



Miskolci Egyetem
Műszaki Földtudományi Kar
Kőolaj és Földgáz Intézet
Olajmérnöki Intézeti Tanszék

Tudományos Diákköri Konferencia Dolgozat

Hidraulikus Rétegrepesztés Optimalizálása Költséghatékony Szempontból

Készítette: Lengyel Tamás és Pusztai Patrik

Olaj- és gázmérnök szakirány

Konzulens: Dr. Bódi Tibor, egyetemi docens, AFKI

Dr. Jobbik Anita egyetemi főmunkatárs, AFKI

Miskolc, 2014.10.27

1.	Bevezetés	1
2.	Kutatómunkánk célja.....	3
3.	Az optimalizálási eljárás.....	5
3.1.	A felhasznált modell	5
3.1.1.	A vizsgált rezervoár és kút alapadatai	5
3.1.2.	A repesztés paraméterei	6
3.1.2.1.	A repesztés geometriája	6
3.1.2.2.	A dimenzió nélküli konduktivitás	7
3.1.2.3.	A dimenzió nélküli proppant szám.....	8
3.1.2.4.	A repesztő fluidum	9
3.1.3.	A tároló nyomáscsökkenése	10
3.1.4.	Egyéb paraméterek	11
4.	Az algoritmus felépítése	12
4.1.	Az algoritmus részei	12
4.1.1.	Az első főciklus lépései.....	12
4.1.2.	A második főciklus lépései	15
5.	A harmadik fő ciklus: gazdasági optimalizálás ^[4]	17
5.1.	Nettó diszkontált árbevétel meghatározása	17
5.2.	NPV, nettó jelenérték.....	18
6.	Eredmények közzététele	20
6.1.	Különböző „tight” tárolók rétegrepesztésének optimalizálása.....	23
6.1.1.	0,25 mD áteresztőképességű tároló	23
6.1.1.1.	NPV maximum pontos meghatározása (16/30-as proppant esetében) ...	28
6.1.2.	0,20 mD áteresztőképességű tároló	30
6.1.3.	0,15 mD áteresztőképességű tároló	34
6.2.	Az eredmények összegzése	39
7.	Összegzés.....	42

7.1. További célkitűzések	42
8. Köszönetnyilvánítás	42
9. Irodalomjegyzék.....	44
10. Mellékletek	45

Jelmagyarázat

Jelölés	Megnevezés	Mértékegység
B_g	vizsgált gáz teleptérfogati tényezője	m^3/nm^3
B_i	kezdeti teleptérfogati tényező	m^3/nm^3
C_{fD}	dimenzió nélküli konduktivitás	-
$C_{fD,opt}$	dimenzió nélküli optimális konduktivitás	-
f_a	állami adók	-, %
f_d	diszkontált szorzó tényező	-
f_v	vállalat fenntartási költségei	-
G_i	kezdeti gázmennyiség	m^3
G_p	összes kitermelt gázmennyiség	m^3
h	tároló vastagság	m
h_p	proppantál kitámasztott repesztés vastagság	m
I_x	repesztés behatolási arány	-
J_i	kezdeti produktivitási index	$m^3/nap/bar$
J_D	dimenzió nélküli produktivitási index	-
J_{Dmax}	maximum dimenzió nélküli produktivitási index	-
K	éves kamatláb+1	-
k	kőzet permeabilitás	mD
k_f	proppant "pack" permeabilitás	mD
L	repedés fél-hossz	m
N_{prop}	proppant szám	-
NPV	nettó jelenérték	HUF
P_n	normál nyomás	-
P_{pc}	pszeudo-kritikus nyomás	Pa, bar
P_{pr}	pszeudo-redukált nyomás	-
$P_{roppmass}$	proppant tömeg	kg
R_n	nettó diszkontált árbevétel	HUF
T	hőmérséklet	K, °C
T_n	normál hőmérséklet	K, °C
T_{pc}	pszeudo-kritikus hőmérséklet	-
T_{pr}	pszeudo-redukált hőmérséklet	-

V_p	repedésben lévő proppant térfogata	m^3
V_r	tárolótér térfogata	m^3
w	repedés szélesség	m
w_{opt}	optimális repedés szélesség	m
X_e	tárolótér oldal hossza	m
x_f	repedés fél-hossz	m
x_{fopt}	optimális repedés fél-hossz	m
Z	eltérési tényező	-
Z_i	kezdeti eltérési tényező	-
γ_g	gáz relatív sűrűsége	-
γ_i	gáz kezdeti relatív sűrűsége	-
μ	gáz dinamikai viszkozitása	cP
κ	éves kamatláb	-, %
ρ_p	proppant halmazsűrűsége	kg/m^3
$\$E$	egyéb költség	HUF
$\$F$	fúrasköltség	HUF
$\$FEL$	felállás költsége	HUF
$\$FL_{kg}$	egységnyi tömegű proppant repesztő folyadék ára	HUF/kg
$\$h$	egységnyi gázára	HUF/ m^3
$\$K$	kútvizsgálat költsége	HUF
$\$KRE$	kútkiképzés költsége repesztés előtt	HUF
$\$KRU$	kútkiképzés költsége repesztés után	HUF
$\$M$	mérések költségei	HUF
$\$n$	éves árbevételek ($n=1, 2, \dots$)	HUF
$\$p_{kg}$	proppant egy kilogrammjának ára	HUF/kg
$\$prop$	felhasznált proppant költsége	HUF
$\$R$	repesztés költsége	HUF

1. BEVEZETÉS

A napjaink növekvő energiaigényének kérdései egyre nagyobb jelentőségű problémává válnak, s ez kihat a fosszilis energiahordozók szerepének jövőbeli és jelenlegi megítélésére egyaránt. A szénhidrogén előfordulásokra koncentrálnak, ez azt jelenti, hogy a hagyományos szénhidrogén telepek egyre csak fogynak, a termelésbe állított kutak lassan kimerülnek. Ennek köszönhetően egyre nagyobb hangsúlyt kap a nem-hagyományos, más néven nem konvencionális szénhidrogének szerepe.

Ezek a szénhidrogén előfordulások több szempontból is nevezhetők nem hagyományosnak. Számos definíció áll rendelkezésünkre, hogy ezen szénhidrogének jellemzőit magyarázzuk, vannak gazdasági szempontokat tekintő, az igényelt technika szempontjából vizsgáló, illetve az adott tároló paramétereit figyelembe vevő meghatározások is. Dolgozatunkban kifejezetten a tight gas kategóriájú nem konvencionális szénhidrogén tároló típussal foglalkozunk, így erre a kategóriára egy általánosan elfogadott definíciót használunk. A tight gas egy olyan fajta földgáz előfordulás, mely rezervoár nem termeltethető (olyan ütemben/mértékben) gazdaságosan, a réteg beáramlási viszonyainak jelentős megnövelése (horizontális, multilaterális kutak, rétegrepesztés) nélkül. Ebben a definícióban is kulcs szerepet kap, hogy az adott réteget hagyományos vertikális kúttal nem lehet gazdaságosan termeltetni, ezért valamilyen alternatív megoldást kell választani a fakadó felszín megnövelésére, ennek az egyik leggyakrabban alkalmazott módszere a hidraulikus rétegrepesztés.

A rétegrepesztés egy rendkívül összetett mérnöki feladat, tervezése során számos tudomány együttes alkalmazása szükséges. Emellett a hidraulikus rétegrepesztés számottevő költségekkel is jár, így kulcsfontosságú, hogy a lehető legoptimálisabb tervezés és kivitelezés valósuljon meg. Munkánk során egy olyan több lépcsős algoritmust dolgoztunk ki, mely megfelelő bemenő – a tárolót jellemző - paraméterek alapján adja meg a legoptimálisabb repesztés paramétereit gazdaságossági szempontokra vonatkoztatva. Egyértelmű tény ugyanis, hogy minél nagyobb a repesztési eljárás annál kedvezőbb beáramlási körülményeket kapunk, ám ennek van egy optimuma, ami után már a megnövelt fakadó felszín kevesebb többlet profitot eredményez mint a pluszban befektetett repesztési költség.

Számítási modellünk megalkotásához csupán olyan egyszerűsítő feltételeket alkalmaztunk melyek lehetővé teszik a módszer valóságban történő alkalmazását is. A kidolgozott algoritmusunk helyességét igazolja a végeredményben kapott értékek visszacsatolhatósága a

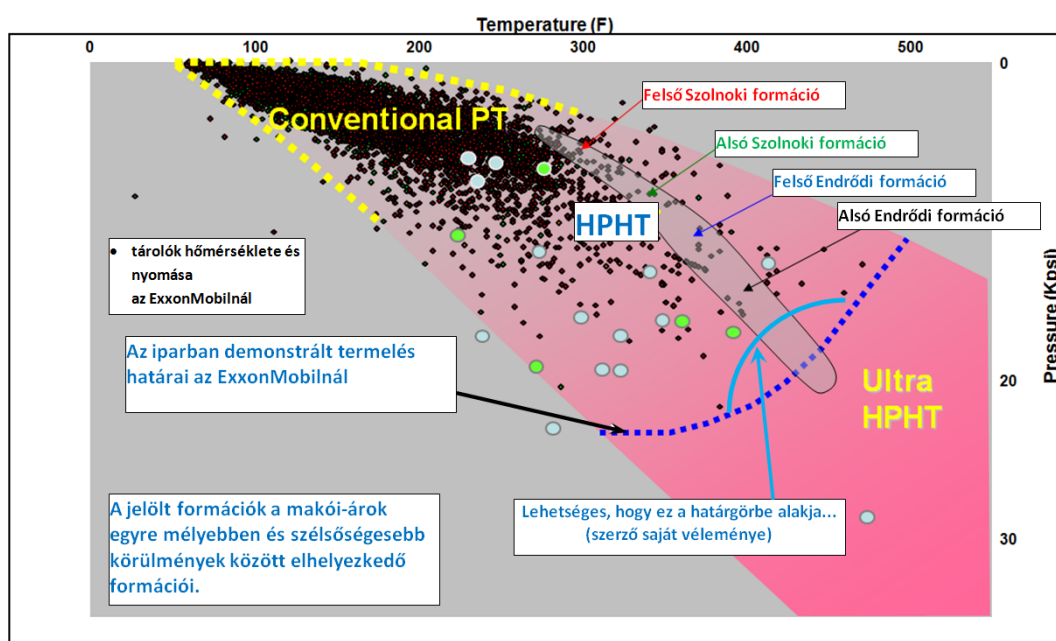
kiindulási elmélet felé. Eredményeinkben szembetűnően jelentkezik, hogy az általunk meghatározott optimális repesztés tulajdonságaitól való, akár kismértékű eltérés is, jelentős gazdasági következményeket von maga után.

A kutatási témánk megválasztásában egy nagy tapasztalattal rendelkező, rétegrepesztéssel foglalkozó, olajipari szakember volt segítségünkre, aki hangsúlyozta, hogy egy ilyen átfogó, a rétegrepesztési eljárás nagyságának optimalizációjával foglalkozó munka hatalmas segítség lehet az olajipari cégeknek. Különösen magyar tekintetben, mert ehhez hasonló tanulmány még nem született.

Számításainkat és ábráinkat Mathcad és Excel szoftverekkel végeztük, mely fájlokat egy CD-n mellékeljük. Úgy tartjuk a számításokkal bizonyított eredményeink a későbbiekben, az iparban is használhatók lehetnek.

2. KUTATÓMUNKÁNK CÉLJA

A technológia dinamikus fejlődésével és a világ egyre növekvő energiaigénye miatt a szénhidrogének termeltetése egyre szélsőséesebb körülmények között található formációkból valósul meg. A hidraulikus rétegrepesztés kivitelezése, az elmúlt évtizedben rekord mélységű tároló rétegeket ért el, melyekben korábban elképzelhetetlen volt a gazdaságos kitermelés. A Magyarországon található nem-hagyományos földgázt tároló formációk többsége az úgynevezett HPHT (High Pressure High Temperature, magyar fordításban Magas Nyomás Magas Hőmérséklet) tartományba esik, mely tárolók gazdaságos kitermelése kulcsfontosságú kérdés lesz az ország jövőbeni energiaigényének kielégítésében.



1. ábra: Az ExxonMobil által eddig lemélyített kutak hőmérséklet-nyomás adatai [9]

A fenti ábra az ExxonMobil operációk hőmérséklet és nyomás körülményeit mutatja, melyben fel vannak tüntetve Magyarország legnagyobb szénhidrogént tartalmazó nem konvencionális formációjának (makói árok) hőmérséklet, nyomás viszonyai (p,T). Szembetűnő tény, hogy a körülmények romlásával egyre kevesebb fúrás lemélyítése történt meg. Ezeknek a tárolóknak a rétegserkentése tehát a HPHT körülmények miatt még nehezebb kihívásokat állít a mérnökök elé.

E tárolók rétegkezelésére használt eljárás legtöbbször a hidraulikus rétegrepesztés. Szeretnénk hangsúlyozni, hogy a rétegrepesztés tervezése egy multidiszciplináris folyamat. A legfontosabb dolog, a tervezés folyamán – természetesen a maximális műszaki biztonság

mellett - mégis az, hogy a tervezett repesztés gazdasági szempontból leghatékonyabb legyen, hisz a vállalatok célja a hidraulikus rétegrepesztéssel, a kút hozamának olyan szintű növelése, hogy megtérítse a befektetett tőkét illetőleg profitot szolgáltasson. A lehető legköltséghatékonyabb kivitelezés elérése, azonban komplex mérnöki és gazdasági probléma, mely megoldása egy projekt sikerességét jelentheti. Kutatásaink során nem találtunk olyan összetett számítási modellel, amely a hidraulikus rétegrepesztés optimalizálását átfogó módon vizsgálja. Így dolgozatunk fő célja egy átfogó, a megoldhatóság keretein belül a valóságot legjobban megközelítő modell megalkotása volt, melyre felépítve egy több lépcsős algoritmust, az iparban is használható optimalizációt érhetünk el. Ehhez a szakirodalomban alkalmazott összefüggéseken kívül saját elgondolásainkat és korrelációinkat is felhasználtuk.

Úgy véljük, a gyakorlati életben is alkalmazható algoritmust dolgoztunk ki, mely integrálva kezeli a mérnöki és gazdasági számításokat.

3. AZ OPTIMALIZÁLÁSI ELJÁRÁS

3.1. A FELHASZNÁLT MODELL

Dolgozatunk elkészítésekor a cél egy olyan számítási algoritmus kidolgozása volt, amely egy hidraulikusan rétegrepesztett kút viselkedését a közelítő feltételeknek megfelelő pontossággal leírja, s ez által meghatározza a kérdéses tárolóban elhelyezkedő, költséghatékony szempontból optimális kialakítású repesztett kút paramétereit. Minden ilyen számítási módszer alapja egy modell, mely megfelelő egyszerűsítési feltételeket figyelembe véve írja le az adott valóságból vett megoldandó feladatot.

Az alkalmazott modell kiválasztása során arra törekedtünk, hogy olyan mértékben legyen pontos a modellünk, hogy végeredményben a valóságnak megfelelő adatokkal szolgáljon, ugyanakkor matematikailag még kezelhető legyen. Kezelhetőség alatt a numerikus matematikai megoldásokat értjük, így az itt alkalmazott legtöbb függvény és összefüggés diszkrét megoldást nyújt, ám ez semmivel sem pontatlanabb mintha folytonos korrelációkat használnánk.

3.1.1. A vizsgált rezervoár és kút alapadatai

Figyelembe véve, hogy a rétegrepesztés tárgyköre mennyire sokoldalú és összetett, a megfelelő tárgyalhatóság érdekében viszonylag szűk keretek közé kellett szorítanunk a tárolót és a kutat jellemző körülményeket, vagyis a figyelembe vett paramétereket. Annak érdekében, hogy ez a számítási metódus Magyarországon alkalmazható legyen, magyarországi körülményeket és kifejezetten Magyarországon elhelyezkedő rezervoárt vettünk figyelembe. Nem eltekintve attól a tényről sem, hogy a rendelkezésünkre álló adatok ugyancsak magyarországi repesztett kútra vonatkoznak, és ezeket kívántuk referencia adatokként használni.

A vizsgált rezervoár közele tömött homokkő, mely viszonylag mélyen 3500 és 4000 méter között helyezkedik el, erősen túlnyomásos, 500-600 bar nyomás jellemzi, továbbá a Magyarországon jellemző, magas geotermikus gradiensnek megfelelően, megközelítőleg 200 °C a tároló hőmérséklete. A tároló az úgynevezett „tight gas” kategóriába sorolható, hiszen tömött homokkő mely rendkívül kicsi 0,1-0,2 mD áteresztő képességgel párosul. Megjegyezzük, hogy a modellünkben azzal az egyszerűsítéssel élünk, hogy a tároló homogénnek tekintendő nem csak a permeabilitás, hanem a porozitás, nyomás- és

hőmérséklet eloszlás tekintetében is. A nagy mélységnek és ennek következtében nagy nyomásnak köszönhetően a kőzet porozitása szintén rendkívül alacsony, mindössze 8-10 %-os. Az úgynevezett „drainage area” azaz beáramlási területünk négyzet alakúnak feltételezett, 650 méter oldalhosszúságú, ezt a méretet analógiák alapján becsültük. A tároló réteg magassága 65 méter, ami hagyományos tárolókat tekintve körülbelül 3-4 szerese az általánosnak, de nem konvencionális „tight gas” típusú szénhidrogén előfordulásra ez elfogadható méret, mellesleg Magyarországon is hasonló méretekkel számolhatunk.

A kút szerkezeti kialakítása technikai szempontból a számítási algoritmusunkban - mint az később látható - majdhogynem teljesen elhanyagolható, egyedül a béléscső szakasz utolsó, perforált részének átmérője a lényeges, ami esetünkben 4 és fél inch.

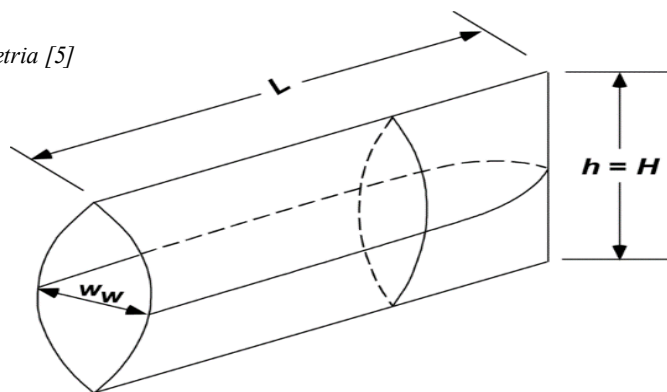
3.1.2. A repesztés paraméterei

Hidraulikus rétegrepesztés során a hozam növekedését okozó jelenség az úgynevezett „fakadó felszín” növekedése által következik be. Azaz megnöveljük azt a felületet, ahol a rendkívül rossz áteresztőképességű kőzetből a szénhidrogén a kút felé áramolhat. Nagyságrendekkel lesz nagyobb a rossz tulajdonságú kőzet beáramlási felülete, mely átlagos vertikális kút esetében csupán a nyitott vagy perforált szakasz henger palástja lenne, amely kevés a gazdaságos mértékű hozam beáramlásához.

3.1.2.1. A repesztés geometriája

A fakadó felszín méretét, mint ahogy a neve is tartalmazza, annak geometriai méretei határozzák meg. Az általánosan elfogadott repesztési modell a perforált szakaszokból kiinduló két ellentétes, a maximális főfeszültségi irányba terjedő alakzat. Az ideális alakzatot, melyet a modellünk is feltételez a 2. ábra illusztrálja.

2. ábra: Repedés geometria [5]



A kútból kiinduló egyik, s másik repesztett alakzatot repesztési félszárnynak (fractured half length) nevezik, a későbbiekben mi is így hivatkozunk rá. Nyilvánvaló, hogy a fakadó felszín annál nagyobb, minél nagyobb repedést hozunk létre, mind hosszúság, szélesség és magasság tekintetében. Ennek természetesen vannak technikai korlátai is, alapjában véve azonban az in-situ kőzetfeszültségek fogják meghatározni a kialakuló repedés geometriáját.

Az in-situ feszültségek a rétegrepesztés geometriáját alapvetően befolyásoló lokális feszültségek, egy adott közettömbben. Számos tényező együttesen határozza meg a feszültségviszonyokat, mint például a rétegek súlyából adódó nyomás, a pórus nyomás, a kőzet tulajdonságaira vonatkozó paraméterek (Young modulus és a Poisson szám), a diagenezis, tektonika stb. A három főfeszültség a vertikális feszültség, mely jellemzően a legnagyobb és a két horizontális feszültség, melyek nem egyenlők. Anélkül, hogy részletesebben foglalkoznánk a kőzetmechanikával, egyszerűen megállapítható, hogy a repedés a minimális horizontális feszültségre merőleges (így a maximális horizontális feszültség) irányába fog terjedni leginkább, ez lesz a repedés hossz. A minimális horizontális feszültség irányába, így a maximális horizontális feszültségre merőlegesen fog a legkevésbé terjedni a repedés, ezt nevezzük a repedés szélességének, a vertikális irányba történő terjeszkedést pedig a repedés magasságának.

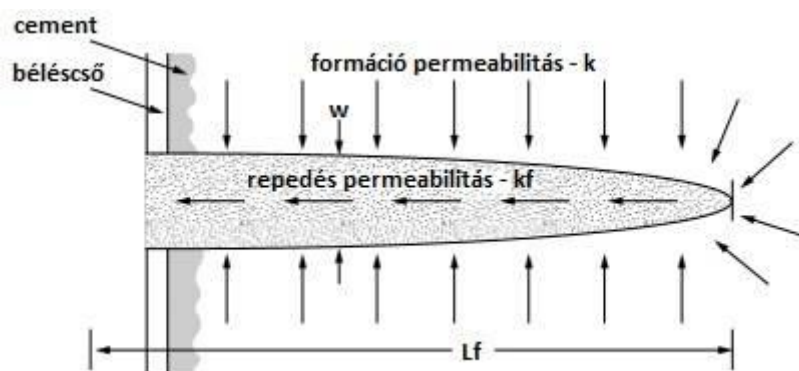
Általánosan elmondható, hogy a tömörebb alacsony permeabilitású tárolókban a hosszabb, kevésbé széles repesztések generálnak hatékonyabb produktivitást, míg a jobb áteresztőképességű tárolókban a rövidebb, szélesebb repesztés geometria az ideális. Azaz nagyobb permeabilitású tároló kapcsán az elérhető konduktivitás ($k_f \cdot w$) a jelentékeny, míg kompakt tárolók esetén a szénhidrogének mobilitásának korlátozottsága miatt a távolabbi tároló rész elérése a lényeges.

Számításaink alapjául szolgáló modellünkben - mint azt a repesztés tervezéssel (frac design) foglalkozó szerviz cégek is teszik – azt feltételeztük, hogy a repesztés magassága megegyezik a tároló magasságával, tehát teljes magasságban megrepesztett tárolóval számolhatunk.

3.1.2.2. A dimenzió nélküli konduktivitás

A geometria mellett és persze annak függvényében az úgynevezett dimenzió nélküli konduktivitás jellemzi leginkább a létrehozott repedést. A dimenzió nélküli konduktivitást leíró összefüggés^[1]:

$$C_{fD} = \frac{k_f \cdot w}{k \cdot L} \quad (3-1)$$



3. ábra: Dimenzió nélküli repedés konduktivitás paraméterei, [1]-saját szerkesztésű magyarosítás

Értelemszerűen a C_{FD} növekedésével nő a vezetőképesség, ezáltal a hozamunk is. Ez igaz a repedés hosszára is (kompakt, kis permeabilitással rendelkező tárolóknál), tehát ha növeljük a repedés hosszát növekszik a hozamunk. Azonban ezek egymással fordított arányosságban állnak. Mind a tároló tulajdonságait, mind a repedés jellemzőit figyelembe véve kell elérnünk egy „egyensúlyt”, ahhoz, hogy megkapjuk a legoptimálisabb kútkiképzést.

3.1.2.3. A dimenzió nélküli proppant szám

Szeretnénk hangsúlyozni a proppant jelentőségét, hiszen magát a repedést és a repedés terjedést a repesztő fluidum hozza létre a megfelelő túlnyomásnak köszönhetően, ám a túlnyomás megszűnése után a kőzetben uralkodó feszültségek visszazárnák a repedést. Ennek megakadályozása érdekében van szükség proppantra vagy más néven a kitámasztó anyagra. Alapvetően a proppantnak két lényeges tulajdonsága van, az egyik a szemcsék átmérője, ez adja meg ugyanis a proppant áteresztő képességét, ami hangsúlyos szerepet kap a fentebb definiált dimenzió nélküli konduktivitás mértékében (hiszen ez az egyik bemenő paraméter amit mi választhatunk meg). A másik fontos tulajdonsága pedig a terheléssel szembeni ellenálló képessége. Ez azért nagyon fontos mert ha a kőzetben uralkodó nyomások által tönkrementelt szenved, akkor nagyon nagy mértékben leromolhat a kitámasztott repedés áteresztőképessége. Szélsőséges esetekben akár teljesen megszűnhet az. A proppantok részletesebb jellemzésére egy másik fejezetben térünk ki.

A dimenzió nélküli proppant szám a számítási algoritmusunkban az egyik legfontosabb paraméter mely a következőképp definiálható^[1]:

$$N_{prop} = I_x^2 * C_{fD} = \frac{4k_f x_f w}{k X_e^2} = \frac{4k_f x_f w h_p}{k X_e^2 h_p} = \frac{2k_f V_p}{k V_r}, \quad (3-2)$$

A számítási modellünkben, mindamelllett, hogy a proppant tökéletes eloszlását (így a repedés egészére homogén permeabilitást) és a repedés térfogat maximális kitöltését feltételeztük, a katalógusokban található proppant permeabilitásának nyomás hatására történő csökkenését is figyelembe vettük.

3.1.2.4. A repesztő fluidum

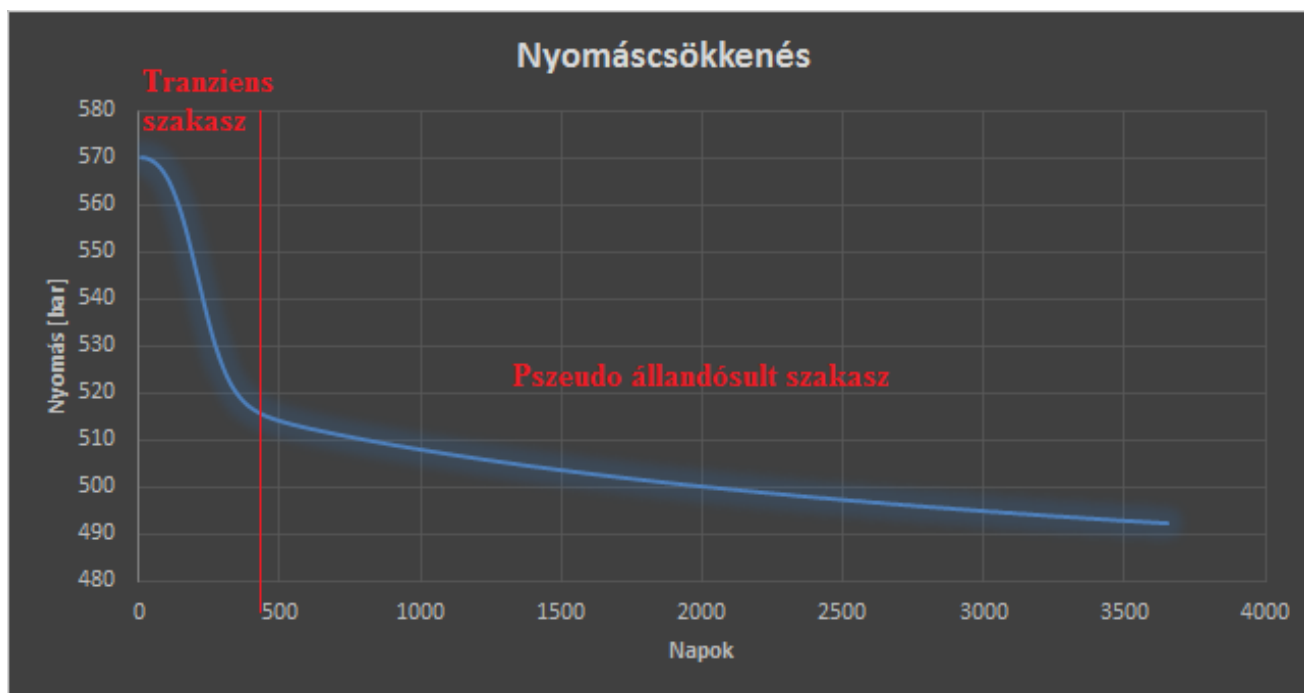
A repesztés kialakításában és az egész folyamat tervezésében jelentős szerepet kap a repesztő fluidum kiválasztása. A repesztő fluidum a kitámasztó anyaggal egyaránt a hidraulikus rétegrepszítés legfontosabb eleme. Különösen magyarországi viszonylatban jelent komoly műszaki kihívást a megfelelő fluidum megtervezése illetve kiválasztása, ugyanis a vizsgált mélységben Magyarországon HPHT (high pressure and high temperature) körülmények uralkodnak. Különösen a magas hőmérséklet jelent problémát a repesztésnél, hisz a fluidum számos adalékanyagot, például polimereket tartalmaz, melyek nehezen tolerálják a magas hőmérsékletet, egy bizonyos hőmérsékleti határérték felett egyszerűen szétesnek. A fluidum elsődleges feladatai a repedés létrehozása és kiterjesztése, a proppant szállítása és elosztása az egész repedés térfogatban, illetőleg, hogy könnyen visszatermeltethető legyen a repesztés végrehajtása után és a lehető legkisebb mértékben károsítsa a réteget. A fluidumnak stabil reológiával kell rendelkeznie mind a felszínen mind pedig a művelet során a mélyben. További elvárás, hogy megfelelő mértékben viszkózusnak kell lennie annak érdekében, hogy ne okozzon túl nagy nyomásvesztést, ugyanakkor megfelelően szállítsa a kiválasztott proppantot. Fontos, hogy a fluidumnak kompatibilisnek kell lenni a rezervoár tulajdonságaival, ezt sokszor az agyagásványok indokolják. Mindamelllett, hogy a fentebbi összes kritériumnak meg kell felelniük, a repesztés során felhasznált nagy mennyiségük miatt, az áruk is meghatározó döntési paraméter egy művelet tervezése során.

A felsorolt számos elvárás is alátámasztja, hogy mennyire bonyolult egy repesztő folyadék összeállítása, rendkívül magas szintű kémiai, fizikai-kémiai, áramlástan stb, szakmai ismereteket igényel ezért önmagában külön tudományágként jelenik meg a repesztés tervezésben.

Dolgozatunkban a költséghatékony optimalizálással foglalkozunk, ezért a repesztő folyadék milyenségét csak költség szinten vesszük figyelembe. Fontos megjegyeznünk, hogy a besajtolt fluidum mennyiségnek csupán 20-50 % hozza létre a repedést, a maradék 50-80 %-a pedig kiszűrődik, így ez jelentős költségnövekedést von maga után. Ennek alapján a modellünkben egy átlagos 65 %-os kiszűrődéssel vettük figyelembe a többlet fluidum okozta többletköltséget.

3.1.3. A tároló nyomáscsökkenése

Ahhoz, hogy minél pontosabban vizsgálhassuk a hozamból számolt bevételt, elengedhetetlen, hogy figyelembe vegyük a tároló nyomáscsökkenését az idővel. Evidens dolog, hogy minél több szénhidrogént termelünk ki, annál kisebb lesz a tárolónk nyomása. A nyomáscsökkenést az olaj ipar két lényeges periódusra bontja, tranziens, tehát időben változó és pseudo-state, azaz közel állandósult időszakokra. Egyértelmű megállapítás, hogy a tranziens szakasz nyomásváltozása jelentkezik nagyobb hozamcsökkenésekkel. A 4. ábrán világosan kirajzolódik a termelési ciklust jellemző két fő periódus, a tranziens és a pszeudo-állandósult szakasz.



4. ábra: Repesztett tároló nyomáscsökkenése (saját szerkesztésű ábra)

Mivel a hozamunkat a depresszió, azaz a rétegnyomás és a kúttalp nyomás különbsége nagy részben befolyásolja, így ez a mértékű nem stacionárius változás nem hagyható figyelmen kívül. A még pontosabb leírás érdekében, számítási modellünkben a gáz kompresszibilitási (eltérési), és ezen keresztül a teleptérfogati tényező nyomásfüggését is figyelembe vesszük. Erre azért van szükség, mert a hozamot a produktívítási index és a depresszió határozza meg, a nyomáscsökkenés pedig mindkét tényezőt módosítja az előbb említett jellemzőkön keresztül. Ez a jelenség rétegrepesztett kutak esetében még élesebben jelentkezik, hiszen ezzel a rétegkezelő eljárással nagyságrendekkel megnöveljük a fakadó felszínt, így a produktívítási indexet. Ezért lényegesen nagyobb hozamokat érünk el, így eleinte sokkal meredekebb lesz a nyomáscsökkenés-idő görbénk, mint egy hagyományos tároló esetében.

A kontrasztosabb és pontosabb leírás érdekében állandó kúttalp nyomással, így pedig csökkenő depresszióval és hozamokkal számoltunk. A nyomáscsökkenés problémájának a megoldására egy zárt gáztárolókra is alkalmazott anyagmérleg egyenletet használtunk. Egyszerűsítő feltételként a hőmérsékletet állandónak tekintjük a rétegben, ez egyébként jól közelíti a valóságot, mert ilyen mélységben, ekkora időintervallumot tekintve maximum egy-két °C-ot változik a tároló hőmérséklete.

Az alkalmazott anyagmérleg egyenletet illetve az iterációs eljárást a későbbiekben mutatjuk be.

3.1.4. Egyéb paraméterek

Munkánk során arra törekedtünk, hogy egy átlátható, a repesztési műveletet körülölelő lényegesebb folyamatokat, eszközöket, kellékeket magában foglaló modellt állítsunk fel. Az előző fejezetekben bemutatott, modellünk részét képező elemeken túlmenően a valóságban természetesen vannak egyéb, ám a munkánk célját tekintve elhanyagolható tényezők is.

4. AZ ALGORITMUS FELÉPÍTÉSE

4.1. AZ ALGORITMUS RÉSZEI

Kidolgozott algoritmusunk alapvetően három fő részből áll. Az első kiindulási rész a rétegrepesztés méreteit és az ehhez tartozó maximális produktivitási indexeket számolja a bemenő paramétereknek megfelelően, a második rész az így kapott eredményeket használja fel a nyomáscsökkenés és ennek következtében a tranziens jelenségek figyelembe vételére. Végül a harmadik ciklus az így kapott eredményeket használja fel a gazdasági számításhoz, és az itt kapott optimumokat vetíti vissza a kiindulási repesztési paraméterekre, meghatározva ezzel az optimális repesztés méreteit. Mivel az első két ciklus mérnöki feladatokat old meg a felépített természettudományi modellünk alapján, így élesen elhatárolódik a harmadik ciklus típusától, mely gazdasági számításokat végez. Ezért a harmadik, ekonomiai ciklust külön, a 5. fejezetben részletes magyarázattal mutatjuk be.

4.1.1. Az első főciklus lépései

Az első főszakasz tehát a bemenő paraméterek alapján számítja ki a repesztés méreteit, majd ezen méretekből meghatározza a maximálisan elérhető produktivitási indexeket. A bemenő paramétereket az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat: (saját készítésű táblázat)

Megnevezés	Jelölés [Dimenzió]
Tároló réteg magassága	h [m]
Tároló permeabilitása	k [mD]
Tároló nyomása	P_e [bar]
Kúttalpnymás	P_{wf} [bar]
Beáramlási terület oldalhossza	X_e [m]
Tároló hőmérséklete	T [K]
Gáz dinamikai viszkozitása	μ [cP]
Gáz relatív sűrűsége	γ_g [-]
Proppant permeabilitása	k_f [mD]
Proppant halmazsűrűsége	ρ_p [kg/m ³]

Első lépésben az algoritmusunk kiszámolja a nyomás és hőmérséklet adatok alapján a gáz eltérési (Z) és teleptérfogati (B) tényezőit. Az eltérési tényezőt az (4-1) egyenletben látható Pápay összefüggés^[3] adja meg, míg a teleptérfogati tényezőt az (4-6) egyenlet jól ismert összefüggése adja meg.

$$Z = 1 - \frac{3,52P_{pr}}{10^{0,9813T_{pr}}} + \frac{0,274P_{pr}^2}{10^{0,8157T_{pr}}} \quad (4-1)$$

Ahol P_{pr} [bar] és T_{pr} [K] pszeudo redukált nyomás és hőmérséklet és a következő képletek alapján határozandók meg a relatív sűrűség segítségével:

$$T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}} \quad (4-2)$$

$$P_{pr} = \frac{P_e}{P_{pc}} \quad (4-3)$$

$$T_{pc} = 103,9 + 183,3\gamma_g - 39,7\gamma_g^2 \quad (4-4)$$

$$P_{pc} = 48,69 - 3,566\gamma_g - 0,766\gamma_g^2 \quad (4-5)$$

$$B_g = \frac{P_n}{P_e} \frac{T}{T_n} Z \quad (\text{m}^3/\text{nm}^3) \quad (4-6)$$

ahol P_n (1,01325 bar) és T_n (288,15 K) a gáztechnikai normál állapotra vonatkoztatott nyomás és hőmérséklet. Ebbe a ciklusba tartozik még a rezervoár és a proppant térfogatának kiszámítása, mely egyszerű képleteket az (4-7) és (4-8) egyenletek adják meg.

$$V_r = X_e^2 * h \quad (4-7)$$

$$V_p = \frac{\text{Proppmass}}{\rho_p} \quad (4-8)$$

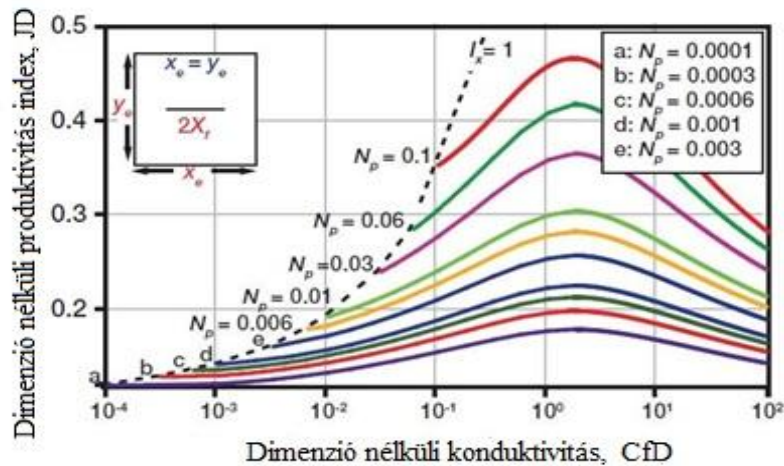
Ezt követően, előre megadott lépték szerint az algoritmusunk felhasznált proppant tömegeket (Proppmass [kg]) generál. Ez tetszőlegesen megválasztható, ám érdemes a valósághoz hű intervallumon belül maradni. Munkánkban 25 tonnánként vizsgáltuk a modell viselkedését, 0 és 525 tonna közötti intervallumban, azaz végeredményben 21 darab értéket kaptunk.

Ezek alapján a következő lépésben Valkó és Economides^[1] összefüggéseit használjuk, a maximális produktivitási index számításához. Legelőbb, a modellünk leírásában definiált dimenzió nélküli proppant szám (N_{prop}) meghatározása történik a (3-2) egyenlet szerint. Majd ennek függvényében meghatározzuk az optimális dimenzió nélküli konduktivitás és a maximális dimenzió nélküli produktivitási index értékét. Ezek a korrelációk az (4-9) és (4-10) egyenletekben találhatók.

$$C_{fD,opt}(N_{prop}) = \begin{cases} 1,6, & N_{prop} < 0,1 \\ 1,6 + \exp\left[\frac{-0,583+1,48 \times \ln(N_{prop})}{1+0,142 \times \ln(N_{prop})}\right], & 0,1 \leq N_{prop} \leq 10 \\ N_{prop}, & N_{prop} > 10 \end{cases} \quad (4-9)$$

$$J_{Dmax}(N_{prop}) = \begin{cases} \frac{1}{0,990-0,5 \times \ln(N_{prop})}, & N_{prop} \leq 0,1 \\ \frac{6}{\pi} - \exp\left[\frac{0,423-0,311N_{prop}-0,089(N_{prop})^2}{1+0,667N_{prop}+0,015(N_{prop})^2}\right], & N_{prop} > 0,1 \end{cases} \quad (4-10)$$

Valkó és Economides egyenleteiben a J_{Dmax} és $C_{fD,opt}$ paraméterek az N_{prop} függvényében meghatározottak. Az 5. ábrán pontosan látszik, hogy a dimenzió nélküli produktivitás (J_D) a dimenzió nélküli konduktivitás (C_{fD}) 1,6-os értékénél veszi fel a maximumot megfelelően kis N_{prop} értékeket tekintve.



5. ábra: J_D - C_{fD} diagram[1] - (saját magyarosítás)

A megfelelő CfD értékekhez tartozó optimális repedés hossz és szélesség értékek az (4-11) és (4-12) egyenletekben megadottak szerint számíthatók.

$$x_{f,opt} = \left(\frac{k_f \times V_f}{C_{fD,opt} \times k \times h} \right)^{0,5} \quad (4-11)$$

$$w_{opt} = \left(\frac{C_{fD,opt} \times k \times V_f}{k_f \times h} \right)^{0,5} \quad (4-12)$$

A dimenzió nélküli produktivitási indexből előáll a kiindulási produktivitási index a (4-13) összefüggés alapján, majd a megadott depresszió függvényében a kiindulási napi hozam. Ezzel véget ér az első főciklus.

$$J = \left(\frac{2 \times \pi \times k \times h}{B \times \mu} \right) \times J_D \quad (4-13)$$

Megjegyzendő, hogy az itt használt optimális és maximum jelzők a technikai tulajdonságokra vonatkoznak, nem pedig az általunk kitalált gazdasági optimalizációt jelentik.

4.1.2. A második főciklus lépései

Ebben a ciklusban a tároló nyomáscsökkenésének a hozamra gyakorolt hatását határozzuk meg. Az előző ciklusban eredményül kapott felhasználandó paraméterek a kiindulási produktivitási index, a kiindulási eltérési és teleptérfogati tényező és a kiindulási depresszió (a kiindulási rétegnyomás és az állandó kúttalp nyomás különbsége), illetve a betáplált bemenő paraméterek közül a hőmérséklet. Azért adtuk meg már az első ciklusban azokat a paramétereket is, melyeket csak itt használunk, mert így a kút viselkedését meghatározó tényezők egy helyen, a fő munkalapon módosíthatók. Ezen kívül szükség van még a kezdeti földtani vagyon mennyiségére, melyet hazai analógia alapján vettünk figyelembe P50-es valószínűség mellett. Ez jelen esetben 24 milliárd normálköbméter gázt jelent.

Numerikus eljárást használva megfelelően kis, 10 napos időintervallumokat választottunk számításunk léptékéül. A használandó anyagmérleg egyenlet a zárt gáztárolókra használt, állandó hőmérsékletet tekintendő egyenlet:

$$G_p = G_i \left(1 - \frac{\frac{p}{z}}{\frac{p_i}{z_i}} \right) \quad (4-14)$$

Ahol G_p (nm^3) az összes kitermelt gázmennyiség, G_i (nm^3) a kezdeti gázmennyiség, p_i (bar) és Z_i a kezdeti tároló nyomás és ennek megfelelően a kezdeti eltérési tényező, illetve értelemszerűen a p (bar) és Z az aktuális nyomás és eltérési tényező. Ezt rendezve p -re megkapjuk az aktuális nyomásokat a megfelelő időszakokra.

A vizsgált időszakunk 1000 nap, ezt 10 naponként 100 periódusra bontottuk fel, így a második fő ciklus 100 kis ciklusban végzi el az iterációs eljárást. Ez a ciklus először számol az első 10 napos intervallumra egy kumulált gáztermelést a kezdeti produktivitási index és kezdeti depresszió szorzataként, majd a kiindulási paraméterekből kiszámolja az új rétegnyomást az első periódusra. Ez a lecsökkent rétegnyomás módosítja a gáz relatív sűrűségét (expanzió), a lecsökkent relatív sűrűség és nyomás együttesen módosítja (csökkenti) a kompresszibilitási tényezőt, a lecsökkent kompresszibilitási tényező és nyomás pedig csökkenti a teleptérfogati tényezőt, ami csökkenti a produktivitási indexet. A hozamot pedig a produktivitási index és depresszió csökkenése egyaránt mérsékli. Majd az újonnan kiszámolt hozammal véget ér az első kis ciklus.

Egy ilyen kis ciklus 7 darab különböző értéket számol és ez százszor ismétlődik. A második főciklus, az első ciklus alapján megadott 21 darab (25-525 tonnáig) proppant mennyiségből kiindulva 21 db produktivitási indexet generál, így a második ciklus összesen $7 \cdot 100 \cdot 21$ azaz 14700 új értéket számol.

A második ciklusban kapott végeredmény az 1000. nap végére összegzett kitermelt gázmennyiség. Ez egyszerűen előállítható számunkra a fenti nyomáscsökkenésből számolt hozamokból. Azaz a nyomáscsökkenés által generált tranziens és pseudo-állandósult szakaszok hozamait kell összegeznünk. Excel szoftver alkalmazása végett ezt numerikus integrálással oldjuk meg, azaz az idő-hozam koordináta rendszerben kirajzolt görbét integráljuk, így megkapjuk a görbe alatti területet, vagyis a kumulált hozamot. A harmadik ciklusra így 21. darab végeredményünk jut.

5. A HARMADIK FŐ CIKLUS: GAZDASÁGI OPTIMALIZÁLÁS^[4]

5.1. NETTÓ DISZKONTÁLT ÁRBEVÉTEL MEGHATÁROZÁSA

Az utolsó fő ciklusban a bemenő paramétereink a második fő ciklus eredményeül kapott 21 darab 1000 napra összegzett hozamunk melyet G_p -vel jelöltük. Ezt a földgáz normál köbméterre vonatkoztatott jelenlegi árával vettük számításba, amely értéket $\$_h$ rövidítéssel jelöltünk. Továbbá szakirodalmakban leírtak és saját megfontolásaink összevetéséből alkotott szorzótényezőkkel vettük figyelembe a vállalat fenntartási költségeit (f_v) és az állami adókat (f_a) is, mivel a növekvő bevételek növekvő költségeket is jelentenek.

Az 1000 napra vizsgált bevételeket ez idő alatt diszkontálnunk is kellett, hiszen a jövőbeni pénzünk jelenbeli összegét szeretnénk megkapni. Ez a feladat azért lehet problémás, mert a bevételünk nap, mint nap jelentkezik, így igazán egzaktul a termelési periódus során minden nap diszkontálnunk kellene a befolyt bevételt. Ezt azonban sem a munkánk sem pedig a realitás nem követeli meg, így a számításaink átláthatósága érdekében a nettó diszkontált árbevételt (R_n) a képletben már csak egy meghatározott szorzó tényezővel (f_d) vesszük számításba, amely tényező már az 1000 termelési nap hozamát együttesen diszkontálja. Ezt az 1000 termelési napra vonatkozó értéket úgy határoztuk meg, hogy felosztottuk a vizsgált időintervallumot éves periódusokra melyek így sorra 1-365; 366-730; 731-1000 napra lettek behatárolva. Az ezekhez tartozó éves kamatláb $\kappa=5,8\%$. Mivel az utolsó időintervallumunk egy teljes évnek csak a $\approx 74\%$ ezt ennek megfelelően az (5-2) összefüggésben leírt hatványkitevővel vettük figyelembe. Ezen periódusok alatt szummáztuk a termeléseinket és megszoroztuk az általunk állandónak vett átlagos gázárral ($\$_h$). Az így kapott éves bevételeket $\$_n$ jelöléssel láttunk el. Így az ezen időszakok alatt befolyt bevételeket az alábbi általunk megalkotott összefüggések segítségével diszkontálni tudtuk és meghatározhattuk az f_d szorzótényezőnket:

$$K = 1 + \kappa \quad (5-1)$$

$$\frac{\sum_{n=1}^{\text{évek}} \frac{\$n}{K^n}}{\text{\$összes}} = f_d \quad (5-2)$$

Az 1000 napos termelés során használatos f_d szorzótényezőt a fenti összefüggések szerint az alábbi egyenlet alkalmazásával kaptuk meg:

$$\frac{\frac{\$1}{K^1} + \frac{\$2}{K^2} + \frac{\$3}{K^{2,74}}}{\$_{\text{összes}}} = f_d \quad (5-3)$$

ahol,

$$\begin{aligned} \$1 &= G_{p1} \times \$h \\ \$2 &= (G_{p2} - G_{p1}) \times \$h \\ \$3 &= (G_{p3} - G_{p2}) \times \$h \end{aligned} \quad (5-4;5;6)$$

A leírt feltételek és saját magunk alkotott összefüggések alapján a diszkontált bevétel az (5-4;5;6) egyenlet alapján alakul.

$$R_n = R_h \times \$h \times f_d \times (1 - f_v) \times (1 - f_a) \quad (5-7)$$

5.2. NPV, NETTÓ JELENÉRTÉK

Az algoritmusunk létrehozásának fő célja a rétegrepesztés optimalizálása a nettó jelenérték (NPV Net Present Value) alapján. Egy beruházás kezdeti befektetést igényel, illetve folyamatos vagy esetenkénti anyagi ráfordítást, beruházást, amely idő alatt pénzhozamok is jelentkeznek. Mivel ezek a kiadások és pénzhozamok nem egy időpontban jelentkeznek így hagyományos módon nem lehet őket összegezni, ennek kiküszöbölésére használtuk a fenti korrelációt, amivel megkaptuk a jelenértéket. A nettó jelenérték pedig a jelenértékű bevétel és kiadás megfelelő előjelű összevonását jelenti, mely összefüggést a (5-9) egyenlet adja meg.

Ezen ciklus bemenő paraméterei az előzőekben meghatározott diszkontált bevételek. Optimalizálási algoritmusunkhoz befektetési költségként tekintettünk számos kiadást. Ezek: mérések költségei (\$_M), felállás költsége (\$_{FEL}), fúrás költsége (\$_F), kútvizsgálat költsége (\$_K), kútkiképzés költsége repesztés előtt (\$_{KRE}) (beletartozik a HPHT körülményeknek és magának a repesztésnek ellenálló cső), repesztés költsége (\$_R), kútkiképzés repesztés után (\$_{KRU}), valamint egyéb költségek (\$_E) (ide sorolhatók a tisztítótermeltetés költségei, üzemanyag költségek, szervizelési költségek, stb.). A repesztési térfogat növelésével arányosan növekszik a proppant költség, és a proppant bejuttatásához szükséges repesztő folyadék költsége. A repesztő folyadék árába minden járulékos költséget figyelembe vettünk (szállítás, keverés, szivárgás). A kitámasztó anyag költségének meghatározásához az alábbi értékeket használtuk: a proppant egységnyi tömegéhez tartozó ára (\$_{pkg}), a repesztő folyadék költsége egységnyi proppant tömegére vonatkoztatva (\$_{FLkg}) és természetesen a repesztés

térfogatban elhelyezett proppant tömege (P_{roppmass}). Az utóbb felsorolt paramétereket értelemszerűen egyenletbe helyezzük a proppant költség meghatározásához:

$$\$_{prop} = \rho_{prop} \times V_p \times (\$_{Pkg} + \$_{FLkg}) \quad (5-8)$$

A fent értelmezett paramétereket használva, utolsó lépésben az alábbi összefüggést határoztuk meg az NPV számításához:

$$NPV = Rn - (\$_F + \$_K + \$_{KRE} + \$_{KRU} + \$_R + \$_M + \$_{FEL} + \$_E + \$_{prop}) \quad (5-9)$$

Ebben a fő ciklusban tehát a bemenő paraméter, a második fő ciklusban meghatározott kumulált kitermelt gázmennyiség, melyből az előzőekben részletezett számítások alapján végeredményül nettó jelenértéket kapunk. Így az első ciklusban megadott 21 darab Proppmass értékhez 21 darab NPV értéket kapunk, majd egy görbe illesztésével jól látható maximum jelentkezik. A maximum matematikai megkereséséhez egy harmadfokú polinomot illesztünk a kapott görbére, majd egyszerű függvény analízis (differenciál számítás) segítségével meghatározzuk a maximum helyét és értékét. Ezekhez a számításokhoz numerikus (függvény illesztés) és szimbolikus (függvény analízis) matematikai megoldásokat alkalmazunk az Excel és Mathcad szoftverek segítségével. Megjegyezzük, hogy a szélsőérték helyét és értékét egyszerűen le is olvashatjuk a kirajzolt görbéről, ám így csupán a meghatározott diszkrét értékek állnak rendelkezésünkre.

Az itt leírt, eredményeinkhez felhasznált NPV kalkulációt a következő fejezetben szemléletesen prezentáljuk.

6. EREDMÉNYEK KÖZZÉTÉTELE

Az előző fejezetekben részletesen ismertetett összefüggések, valamint saját elgondolásaink alapján kidolgozott *hidraulikus rétegrepesztés optimalizálási eljárást* különböző kis áteresztőképességű tároló vizsgálatain keresztül mutatjuk be. Három különböző méretű és tulajdonságú proppant felhasználását vizsgálva végeztük el számításainkat. A szélsőséges körülményekre való tekintettel, a nagy ellenálló képességgel rendelkező bauxit proppant kiválasztása mellett döntöttünk, amely a leginkább alkalmas az ilyen típusú nagy nyomású tárolók repedésének kitámasztására, viszont kimagasló tűrőképességük okán ezek a proppantok drágábbak. Az 1. táblázatban közölt három proppant tulajdonságait vettük számításba. Mely adatokat proppant katalógusból határoztuk meg. A 16/30, 20/40 és 30/60-as jelölés a proppantok szemcseátmérő szerinti eloszlását jelzik. A kiválasztott sinterball proppant az 6. ábrán látható.

2. táblázat: (saját készítésű táblázat)

BAUXIT PROPPANT	16/30	20/40	30/60
Halmazsűrűség [kg/m^3]:	2098,42	2114,44	2082,4
Átmérő [mm]:	0,94	0,7	0,501
Áteresztőképesség 570 bar-os záródási nyomáson [mD]:	3000	2500	2000
Ár [HUF/kg]	800	600	500



6. ábra: Bauxit proppant[1]

Az algoritmusunkhoz szükséges konstans paraméterek megválasztásánál – mint azt eddig is hangsúlyoztuk - az úgynevezett HPHT (High Pressure High Temperature, magyar fordításban Magas Nyomás Magas Hőmérséklet) tight gas tárolókra jellemző értékeket vettük figyelembe, amik a hazai viszonylatban is helytállóak. Az alábbi 3. táblázatban közöljük az általunk kiválasztott bemenő paramétereket.

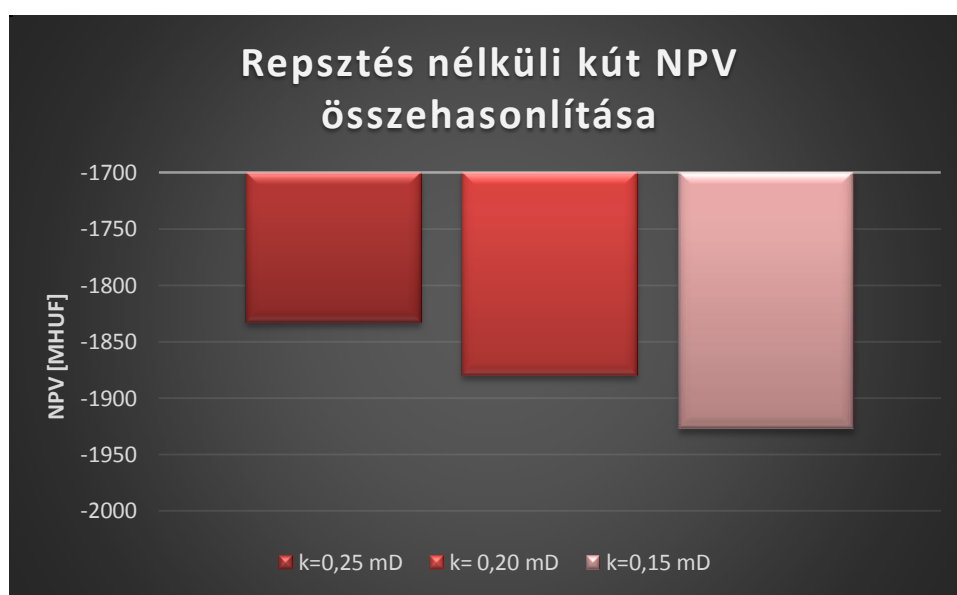
Az eddigiekben, csupán a gazdasági bemenő paraméterek értékeit nem magyaráztuk, különösen a költség adatokat tekintve. Ezeket a valósághoz közel álló (15-20 %-os eltérés) adatokat rendelkezésünkre bocsájtotta egy olajipari nagyvállalat eddigi analógiáik alapján. Az NPV számításához szükséges szorzótényezők pedig szakirodalmi utánajárások és saját megfontolások alapján kerültek meghatározásra, így ezek valósághű adatok, így helytállóan alkalmazhatók az algoritmusunk helyességének vizsgálatához.

3. táblázat: (saját készítésű táblázat)

Megnevezés	Jelölés	Mértékegység	Érték
Repesztés magasság:	h	[m]	65
Rétegnyomás:	p_e	[bar]	570
Áramlási kúttalp nyomás:	p_{wf}	[bar]	475
Kőzet permeabilitás:	k	[mD]	0,25 0,2 0,15
Megcsapolási terület oldalhossza:	X_e	[m]	650
Teleptérfogati tényező (kezdeti):	B_i	[m ³ /nm ³]	0,00400381
Gáz dinamikai viszkozitása:	μ	[cP]	0,03
Gáz relatív sűrűsége (kezdeti):	γ_i	[-]	0,709
Gáz eltérési tényező (kezdeti):	Z_i	[-]	1,357
Vállalat fenntartási költségeire vonatkozó tényező:	f_v	[-]	0,29
Nettó diszkontált árbevételi tényező:	f_d	[-]	0,91
Adókra vonatkozó tényező:	f_a	[-]	0,16
Gázár:	$\$_h$	[HUF/nm ³]	73
Fúrás költsége:	$\$_F$	[HUF]	2000000000
Kútvizsgálat költsége:	$\$_K$	[HUF]	50000000
Kútkiképzés költsége repesztés előtt:	$\$_{KRE}$	[HUF]	100000000

Kútkiképzés költsége repesztés után:	$\$_{KRU}$	[HUF]	600000000
Repesztés költsége:	$\$_R$	[HUF]	200000000
Mérések költségei:	$\$_M$	[HUF]	10000000
Felállás költsége:	$\$_{FEL}$	[HUF]	9600000
Egyéb költség:	$\$_E$	[HUF]	10000000
Fluidum és egyéb költség a proppant 1kg-jához:	$\$_{FL}$	[HUF/kg]	2800

Korábbi fejezetekben többször is hangsúlyoztuk, hogy az általunk vizsgált tároló típus termeltetése a beáramlási viszonyok jelentős mértékű megváltoztatása nélkül nem lehet gazdaságos. A fenti 3. táblázatban található referencia adataink segítségével meghatároztuk a különböző permeabilitású tárolók 1000 napra vetített NPV értékeit, hogy ha nem alkalmazunk hidraulikus rétegrepesztést a termelésünk során. Az alábbi 7. ábra szemléletesen mutatja, hogy mekkora veszteséggel járna az ilyen tárolók termeltetése hidraulikus rétegrepesztés alkalmazása nélkül. Ezzel is alátámasztva az első fejezet állítását, miszerint ezeket a tárolókat rétegserkentés nélkül nem lehet gazdaságosan termeltetni.



7. ábra: (saját készítésű ábra)

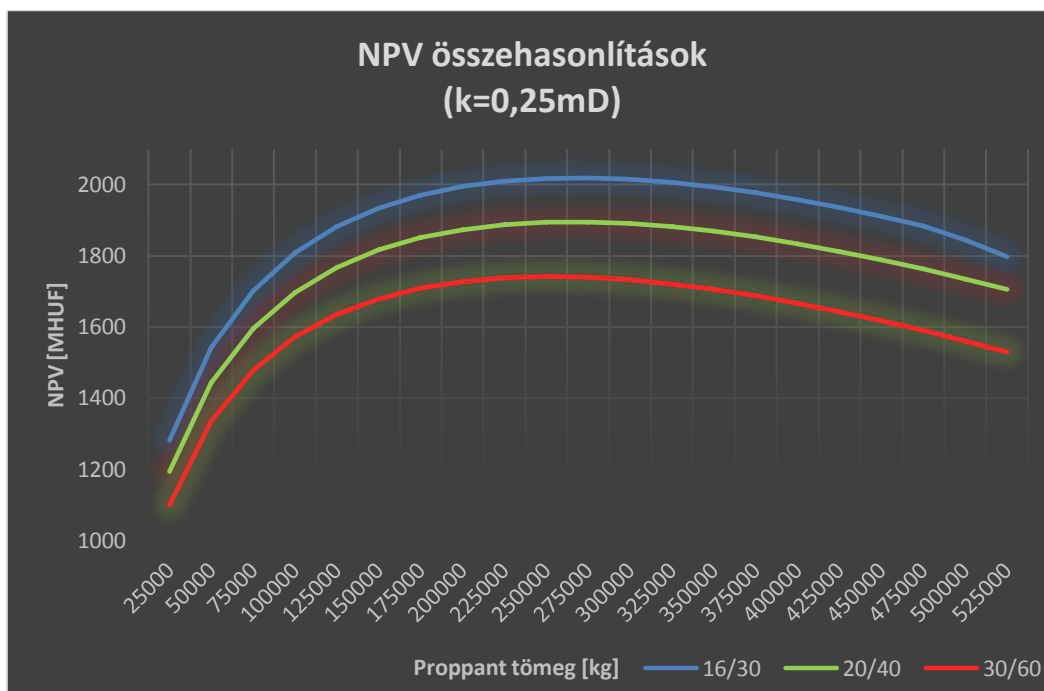
A következő fejezetekben ugyanazon szisztéma szerint, diagramokkal szemléltetve sorra vesszük a három különböző permeabilitású tároló és a 3 különböző tulajdonságú proppant függvényében az optimális repesztéseket. Szemléltetjük a maximális NPV-eket, ebből visszacsatolva pedig az optimális repedés paramétereit határozzuk meg (Proppmass proppant

menyiség, G_p kumulált gáztermelés 1000 napra, X_f repedés hossz, w repedés szélesség, J produktivitási index).

6.1. KÜLÖNBÖZŐ „TIGHT” TÁROLÓK RÉTEGREPESZTÉSÉNEK OPTIMALIZÁLÁSA

6.1.1. 0,25 mD áteresztőképességű tároló

Algoritmusunk által meghatározott görbéket először a 0,25 mD áteresztőképességű tárolón keresztül mutatjuk be. A bemenő paraméterek értékeit az 3. táblázat foglalja össze. A vizsgált proppantok tulajdonságait a 2. táblázatban közöltük. Az algoritmusunkban közölteknek megfelelően az 8. ábrán a 0,25 mD permeabilitású tárolónk rétegrepszésének optimalizálása látható az NPV függvényében. A három proppant három különböző maximummal jelentkezik, így nem csak a legoptimálisabb repesztés méretei, hanem a maximális NPV-vel jelentkező proppant is determinálható.



8. ábra: (saját készítésű ábra)

Megfigyelhető, hogy a legmagasabb profitot – közel 2,0185 milliárd forint - a legjobb áteresztőképességet biztosító, egyben legdrágább 16/30-as bauxit proppant szolgáltatja. A

kedvezőtlenebb tulajdonságokkal rendelkező, olcsóbb 20/40-es proppant használata közel 124 millió forint profit kiesést eredményezne. A vizsgált proppantok közül a legkedvezőtlenebb tulajdonsággal bíró 30/60-as proppant, alkalmazásával a 16/30-as proppantthoz képest 277 millió forinttal kevesebb NPV érhető el. A három görbe maximumának helyei a következőképp alakulnak:

$$Proppmass_{16/30} = 275000 \text{ kg}$$

$$Proppmass_{20/40} = 275000 \text{ kg}$$

$$Proppmass_{30/60} = 250000 \text{ kg}$$

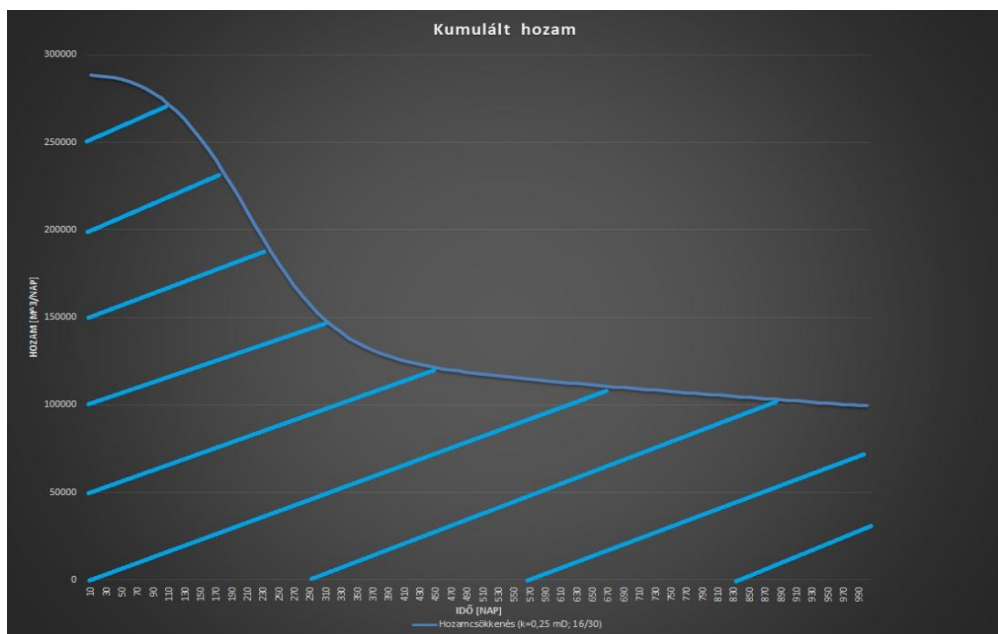
Az így leolvasott avagy matematikailag meghatározott értékek visszacsatolása a következő „J” produktivitási indexeket határozza meg:

$$J_{16/30} = 3034,795 \frac{\frac{m^3}{nap}}{bar}$$

$$J_{20/40} = 2920,205 \frac{\frac{m^3}{nap}}{bar}$$

$$J_{30/60} = 2754,1954 \frac{\frac{m^3}{nap}}{bar}$$

Ezekből világosan látszik, hogy a kisebb ellenálló képességgel rendelkező kitámasztó anyagok számottevően alacsonyabb produktivitási indexeket eredményeznek, amely kardinális hatással vannak a kumulált hozamainkra. A kumulált hozamokat az algoritmusunk 2. főciklusa szerint (azaz az idő-napihozam koordináta-rendszerbeli görbe integrálásával) az 8. ábrán és az (1); (2); (3); (4); (5); (6); (7) illetve (8) mellékletekben látható módon kapjuk.



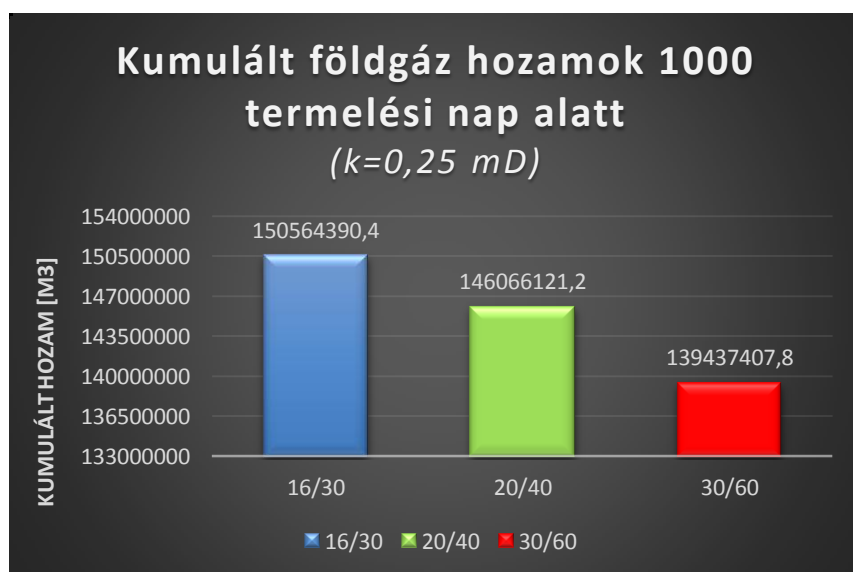
9. ábra: Kumulált hozam, $k=0,25$ mD permeabilitású tároló esetén (saját készítésű ábra)

Az általunk vizsgált 1000 termelési nap alatti kumulált földgázhozamok a vizsgált proppantok függvényében az alábbi módon alakulnak:

$$G_{p,16/30} = 150564390,4 \text{ m}^3$$

$$G_{p,20/40} = 146066121,2 \text{ m}^3$$

$$G_{p,30/60} = 139437407,8 \text{ m}^3$$



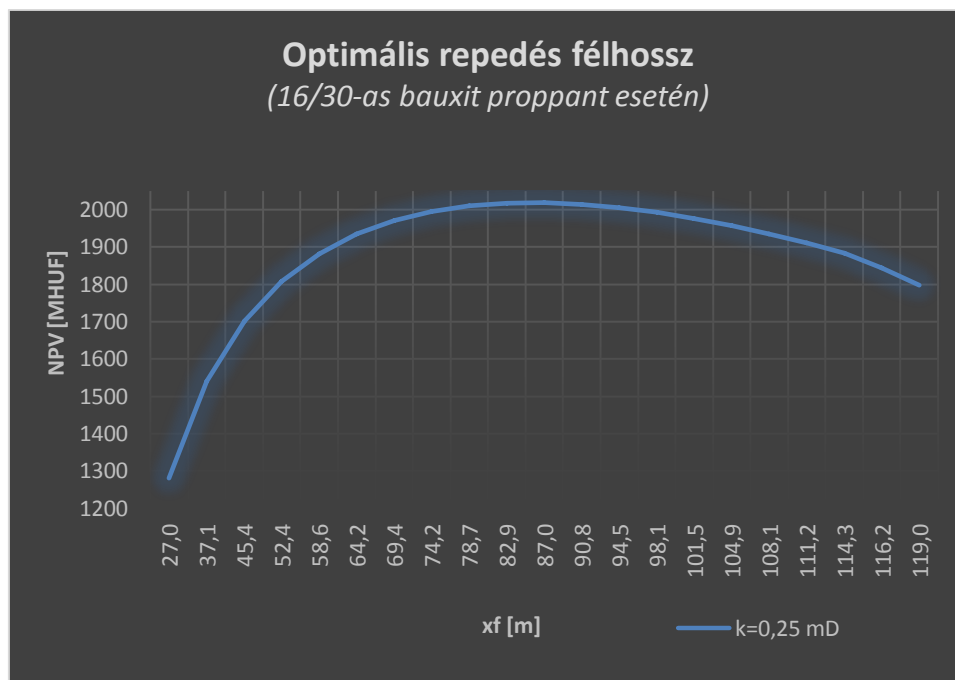
10. ábra: (saját készítésű ábra)

A fenti fejezetekben részletesen taglalt összefüggések segítségével és az algoritmusunk által kirajzolt NPV görbék maximumának leolvasásával az optimális repesztés paraméterek meghatározhatók. Így a legnagyobb nettó jelenérték eléréséhez szükséges X_f repedés félhossz és w repedés szélesség értékek a felhasznált proppantok függvényében az alábbi módon alakulnak.

- 16/30-as bauxit proppant alkalmazása esetén:

$$x_{f_{opt}} = 87 \text{ m}$$

$$w_{opt} = 0,012 \text{ m}$$

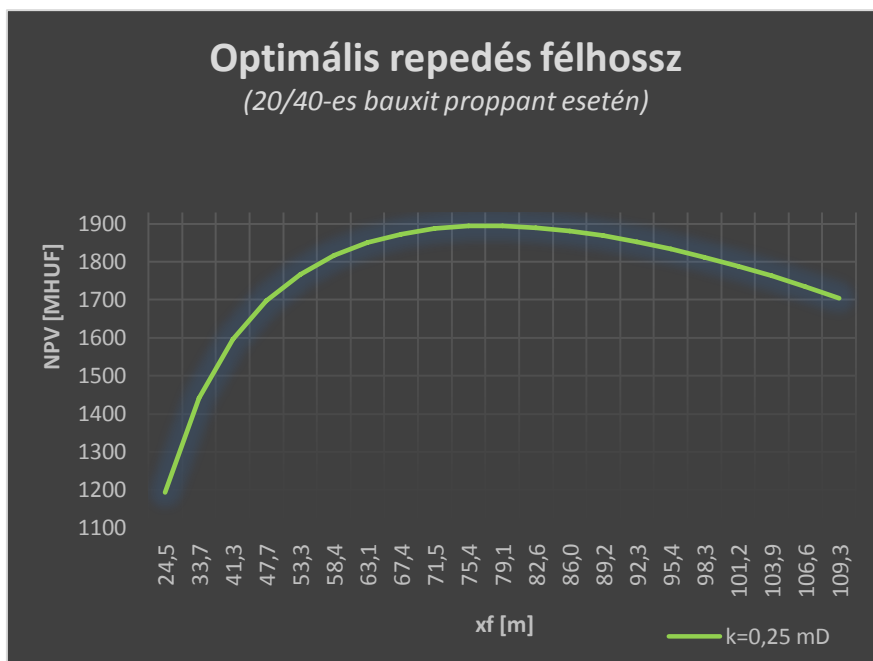


11. ábra: (saját készítésű ábra)

- 20/40-es bauxit proppant alkalmazása esetén:

$$x_{f_{opt}} = 79 \text{ m}$$

$$w_{opt} = 0,013 \text{ m}$$

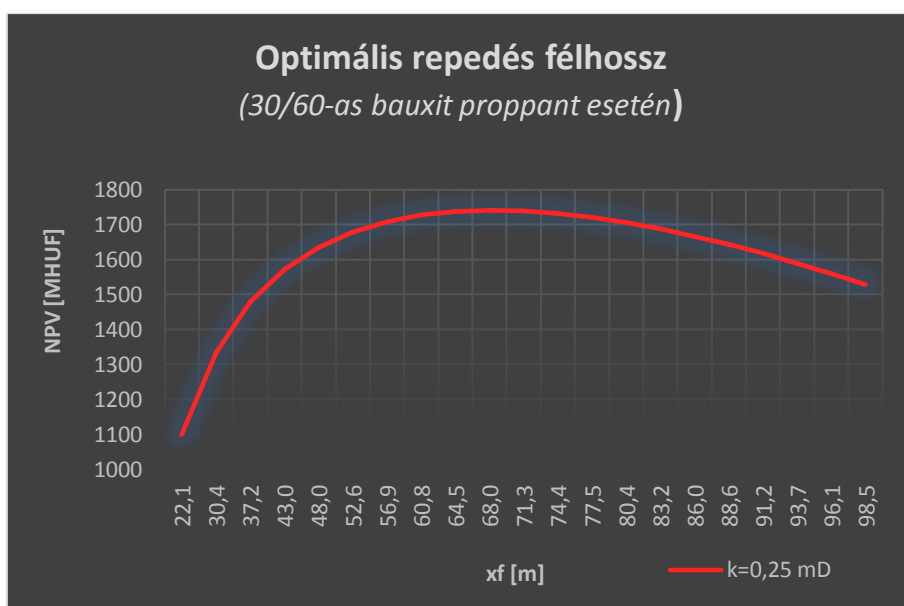


12. ábra: (saját készítésű ábra)

- 30/60-as bauxit proppant alkalmazása esetén:

$$x_{f_{opt}} = 68 \text{ m}$$

$$w_{opt} = 0,014 \text{ m}$$



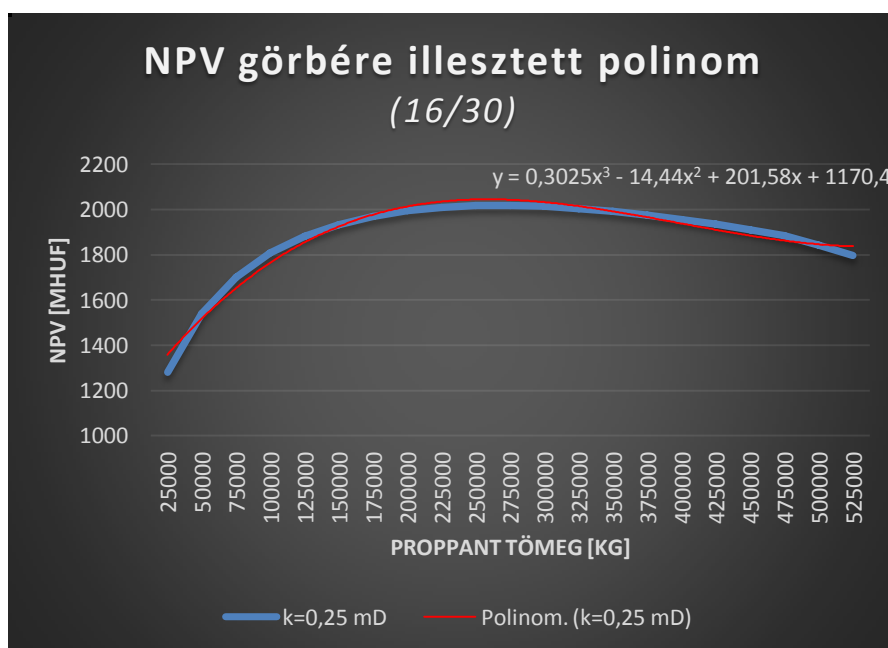
13. ábra: (saját készítésű ábra)

Érdekes megfigyelni, hogy a jobb permeabilitással rendelkező proppant esetében az optimális repedés hossz nagyobb mint a másik két gyengébb áteresztőképességű proppant esetében.

6.1.1.1. NPV maximum pontos meghatározása (16/30-as proppant esetében)

A fentebb ismertetett eredményeket az NPV-Proppant tömeg diagramon kirajzolt görbénk értékeinek leolvasásával kaptuk, amelyek így egy diszkrét, ám de gyakorlati alkalmazásban kielégítő eredményeket szolgáltatnak. A következőkben ismertetjük a matematikailag pontosabb NPV illetve proppant tömegek meghatározásának menetét.

A már kirajzolt görbénkre az excel program segítségével egy harmadfokú polinomot illesztettünk (természetesen ezt mechanikus numerikus illesztéssel is meg lehet valósítani, de így gyorsabb), amelyet a 14. ábrán szemléltetünk. Ezen polinomhoz tartozó hatványtagok konstans szorzó tényezőit az alábbi módon a; b; c; illetve d jelöléssel láttuk el.



14. ábra: (saját készítésű ábra)

$$a = 0,3025$$

$$b = -14,44$$

$$c = 201,58$$

$$d = 1170,4$$

$$f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (6-1)$$

Ezt követően a kapott $f(x)$ függvényünkön egy differenciál számítást végeztünk el (6-2). (Ezt a gyorsabb megoldás érdekében akár Mathcad programmal is végezhetjük, ugyanis az képes szimbolikus számítások végrehajtására is)

$$\frac{d}{dx}f(x) = 0,9075 \times x^2 - 28,88 \times x + 201,58 \quad (6-2)$$

Az így kapott másodfokú függvény konstans szorzótényezői, és a zérus helyek meghatározásával (6-3); (6-4) kapott két szélsőérték hely az alábbi:

$$A = 0,9075$$

$$B = -28,88$$

$$C = 201,58$$

$$X_1 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 \times A \times C}}{2 \times A} = 21,485 \quad (6-3)$$

$$X_2 = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4 \times A \times C}}{2 \times A} = 10,339 \quad (6-4)$$

Mivel ez egy harmadfokú polinom több szélsőértéke is létezik. A mi alkalmazásunkban az első azaz a legkisebb helyhez tartozó maximum a keresett pont (a polinomot tekintve lehetséges, hogy később egy ennél nagyobb maximumot kapunk, ám a realitás viszonylatában egy darab maximum lehetséges (mind technikai mind gazdasági vonatkozásban)) így a másodfokú megoldó képlet segítségével kapott két érték közül mindig a kisebb jelent megoldást. Ez okból kifolyólag a X_2 megoldás visszahelyettesítésével az eredeti harmadfokú polinom függvényébe, kaptuk meg a helyes NPV_{max} értékét (6-5), illetve az X_2 érték és az általunk választott proppant tömeg lépték (25000) szorzataként a helyes $Proppmass_{opt}$ (6-6).

$$NPV_{max} = aX_2^3 + bX_2^2 + cX_2 + d \quad (6-5)$$

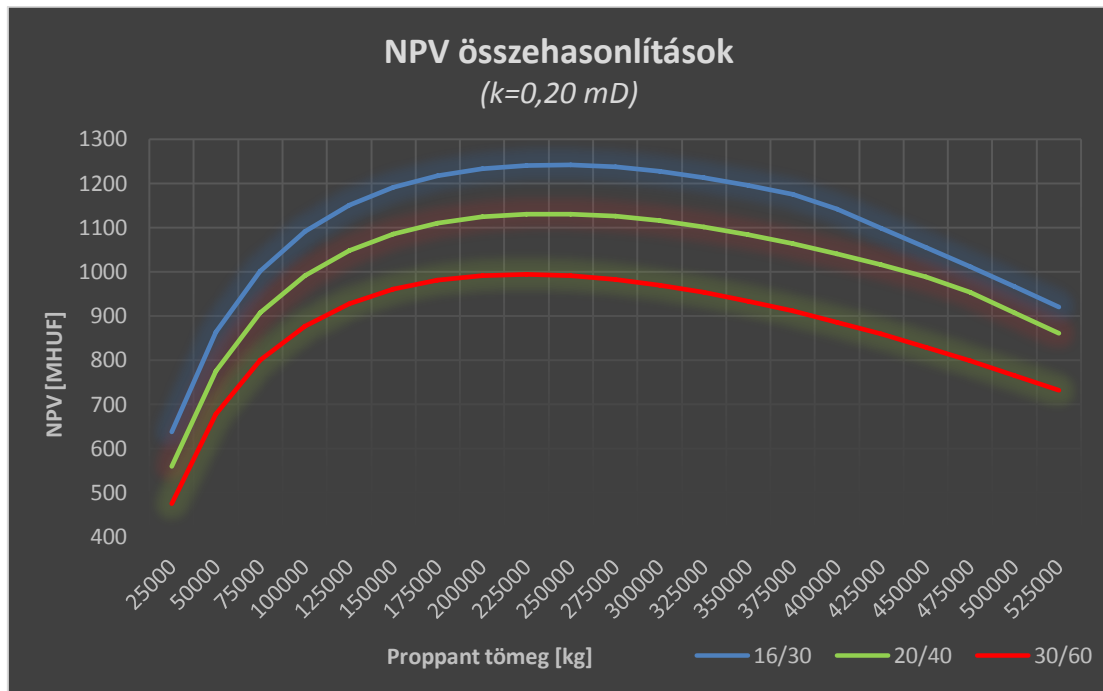
$$NPV_{max} = 2045,292 \text{ MHUF}$$

$$Proppmass_{opt} = X_2 \times 25000 = 258467.142 \text{ kg} \quad (6-6)$$

A szélsőérték maximum (és nem minimum) voltának meggyőződésével a realitás miatt nem szükséges foglalkoznunk.

6.1.2. 0,20 mD áteresztőképességű tároló

Az előző 0,25 mD permeabilitású tároló esetében közölt optimalizálási eljárás sorrendjében vesszük végig a kapott eredményeket. Így a 15. diagramon a három proppant által maximálisan elérhető NPV-k jelentkeznek.



15. ábra: (saját készítésű ábra)

Az előző fejezetben taglalt analógia szerint az NPV értékek diszkrét maximum helyei és értékei a következőképpen alakulnak:

$$NPV_{max16/30} = 1241,576 \text{ HUF}$$

$$NPV_{max20/40} = 1130,519 \text{ HUF}$$

$$NPV_{max30/60} = 994,050 \text{ HUF}$$

$$Proppmass_{16/30} = 250000 \text{ kg}$$

$$Proppmass_{20/40} = 225000 \text{ kg}$$

$$Proppmass_{30/60} = 225000 \text{ kg}$$

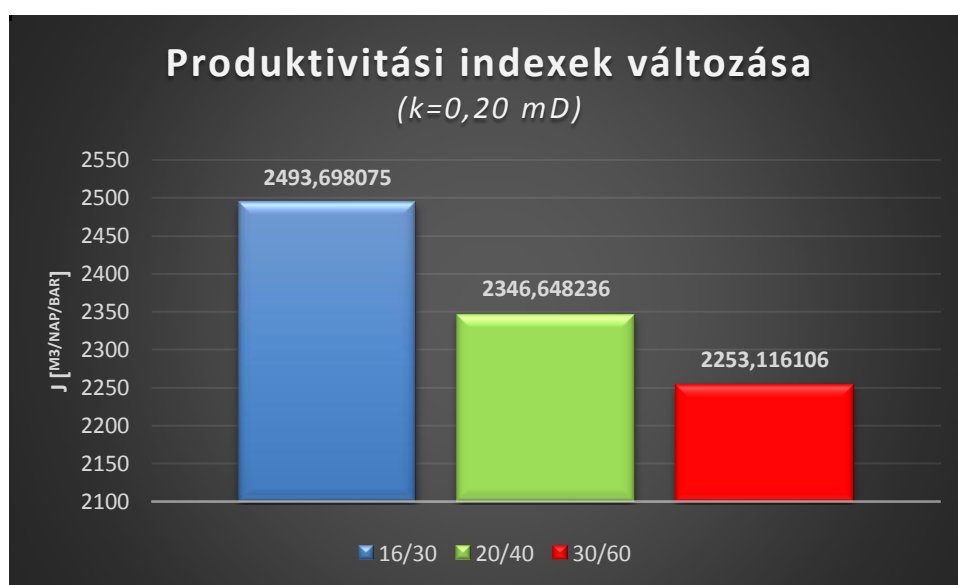
Ennél a kisebb áteresztőképességű tárolónál is megfigyelhető, hogy az ellenállóképesebb, jobb permeabilitással rendelkező 16/30-as bauxit proppant alkalmazása teszi a leggazdaságosabbá a rétegrepszési eljárást. A diagramról leolvasott maximális NPV értékek

és a hozzájuk tartozó optimális proppant tömegek visszacsatolása az algoritmusunkba, az alábbi produktivitási indexeket és 1000 napra kumulált hozamokat adja eredményül.

$$J_{16/30} = 2493,698 \frac{m^3}{\text{nap bar}}$$

$$J_{20/40} = 2346,648 \frac{m^3}{\text{nap bar}}$$

$$J_{30/60} = 2253,116 \frac{m^3}{\text{nap bar}}$$

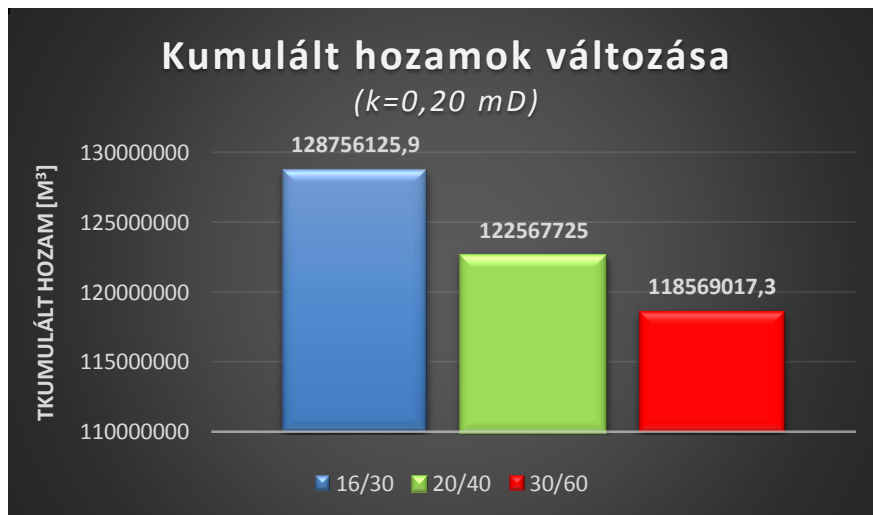


16. ábra: (saját készítésű ábra)

$$G_{p,16/30} = 128756125,9 \text{ m}^3$$

$$G_{p,20/40} = 122567725,0 \text{ m}^3$$

$$G_{p,30/60} = 118569017,3 \text{ m}^3$$



17. ábra: (saját készítésű ábra)

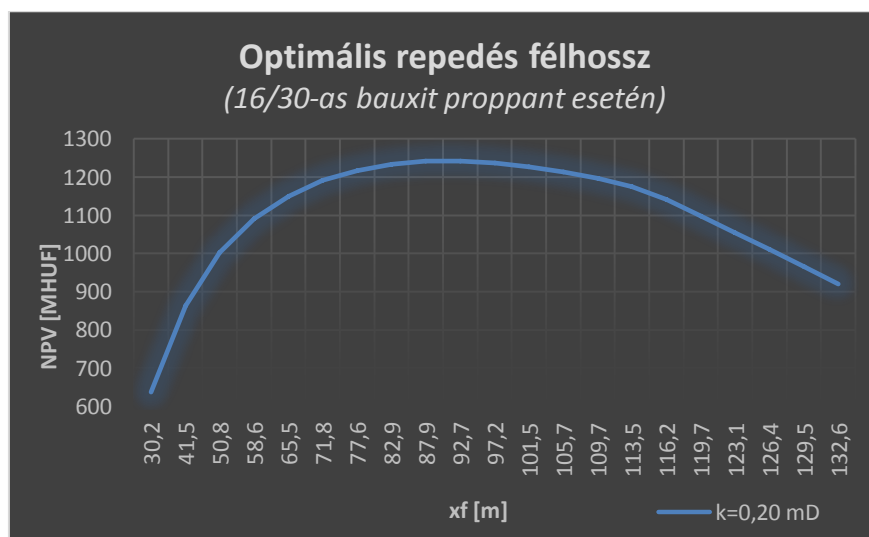
A hozam és produktívítási index összefüggését a fenti 16. és 17. ábrák oszlopdiagramjai is ábrázolják.

Az optimális repesztés geometriai paraméterek alakulása, 0,20 mD permeabilitású tároló kőzet esetén az alábbiak szerint alakulnak:

- 16/30-as bauxit proppant alkalmazása esetén:

$$x_{f_{opt}} = 93 \text{ m}$$

$$w_{opt} = 0,010 \text{ m}$$

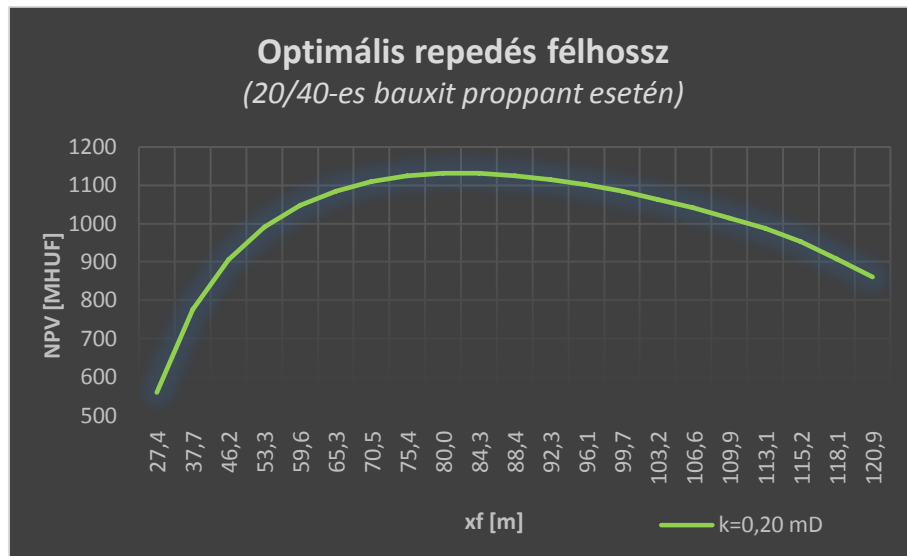


18. ábra: (saját készítésű ábra)

- 20/40-es bauxit proppant alkalmazása esetén:

$$x_{f_{opt}} = 80 \text{ m}$$

$$w_{opt} = 0,010 \text{ m}$$

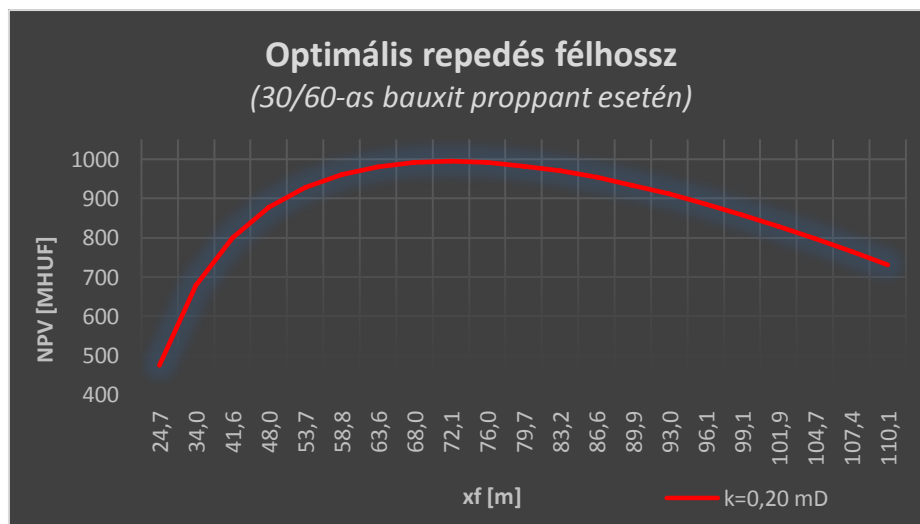


19. ábra: (saját készítésű ábra)

- 30/60-as bauxit proppant alkalmazása esetén:

$$x_{f_{opt}} = 80 \text{ m}$$

$$w_{opt} = 0,013 \text{ m}$$



20. ábra: (saját készítésű ábra)

Az előző alcímben megállapítottak szerint, 0,20 mD permeabilitású tároló esetében szintén a jobb áteresztő képességgel rendelkező proppant hosszabb repedést fog létrehozni. A jobb 0,25 mD áteresztőképességű tárolónk esetében rövidebb repedések ígérnek az optimális eljárást míg 0,20 mD áteresztőképességű tárolót tekintve már lényegesen hosszabb repedések létrehozása gazdaságosabb. Ez az eredmény az elméletben állítottak szerint helytálló.

6.1.3. 0,15 mD áteresztőképességű tároló

A vizsgált tároló típusaink közül a 0,15 mD permeabilitású formációnk rendelkezik a legrosszabb permeabilitással, így ebben a tároló típusban a legkevésbé mozgóképességű a gáz. Az előzőekhez hasonlóan mind a három proppant mérettel lefuttattuk a számításainkat, amely így a következő NPV értékeket határozta meg a felhasznált proppant tömegének függvényében:

$$NPV_{max16/30} = 391,029 \text{ HUF}$$

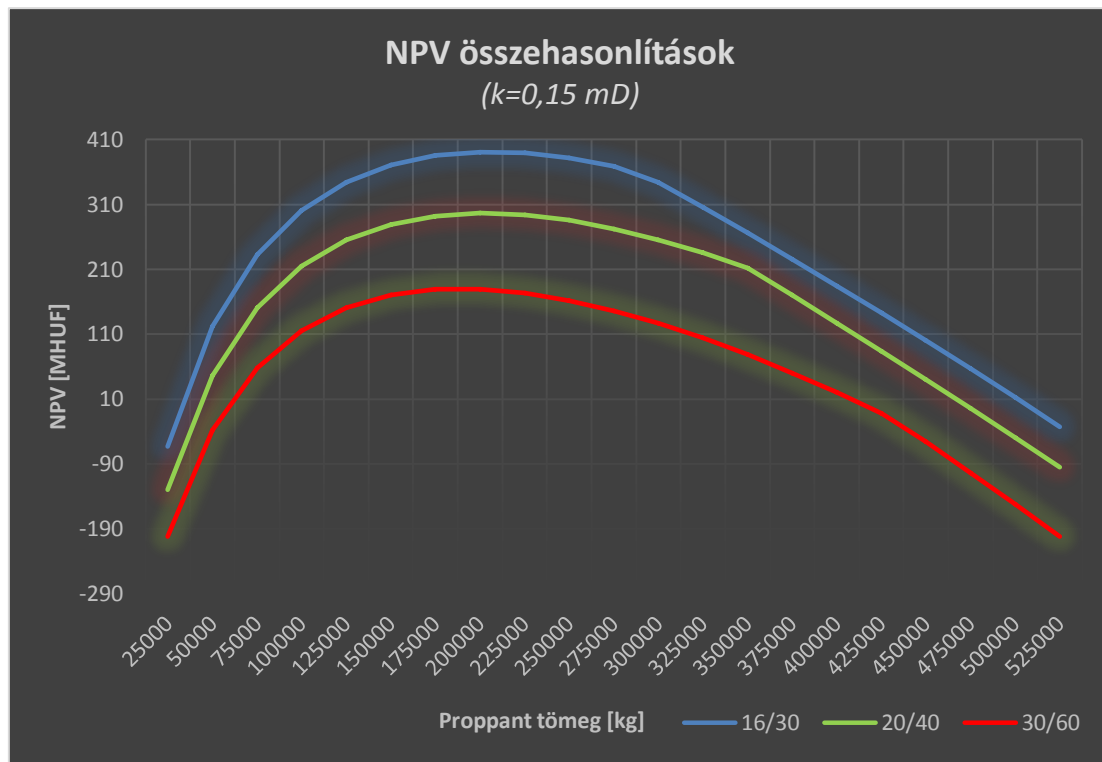
$$NPV_{max20/40} = 296,530 \text{ HUF}$$

$$NPV_{max30/60} = 179,460 \text{ HUF}$$

$$Proppmass_{16/30} = 200000 \text{ kg}$$

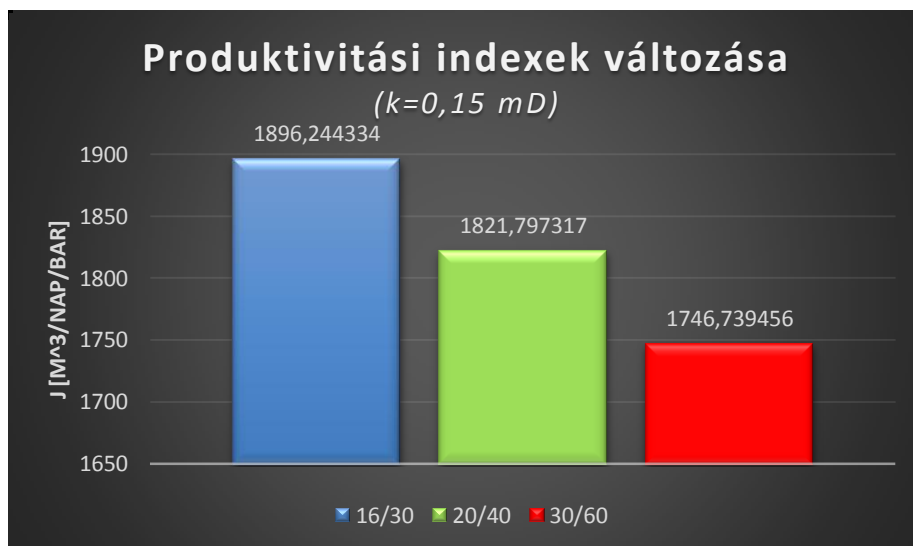
$$Proppmass_{20/40} = 200000 \text{ kg}$$

$$Proppmass_{30/60} = 200000 \text{ kg}$$



21. ábra: (saját készítésű ábra)

Rendkívül jól látszik, hogy a jobb áteresztőképességű tárolókhoz képest lényegesen kisebb NPV maximum elérésére vagyunk csak képesek, és a nem megfelelően elvégzett repesztés esetén az NPV negatív értéket is felvehet. Az előző vizsgálatokhoz hasonlóan, és nem is meglepően, ebben az esetben is a legjobb permeabilitással rendelkező proppant (16/30) alkalmazásával érhetjük el a legmagasabb NPV értéket. Az optimális repedésbe juttatott kitámasztó anyag tömege kevesebb, mint a jobb áteresztőképességű tárolóink esetében, így az azzal járó költségek is. Ennek ellenére lényegesebb kisebb NPV maximum elérésére van lehetőségünk, tárolóink rossz áteresztő képessége miatt.

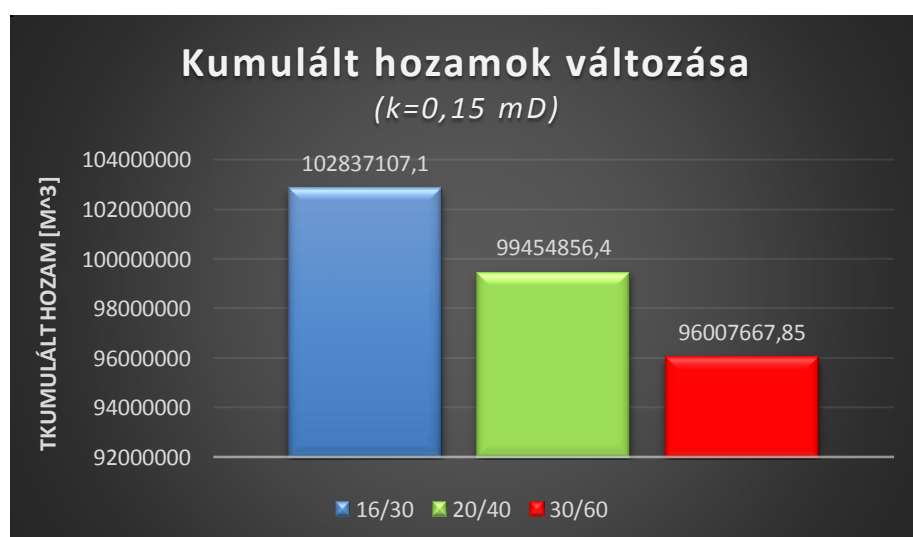


22. ábra: (saját készítésű ábra)

$$J_{16/30} = 1896,2 \frac{\frac{m^3}{nap}}{bar}$$

$$J_{20/40} = 1821,8 \frac{\frac{m^3}{nap}}{bar}$$

$$J_{30/60} = 1746,7 \frac{\frac{m^3}{nap}}{bar}$$



23. ábra: (saját készítésű ábra)

$$G_{p,16/30} = 128756125,9 \text{ m}^3$$

$$G_{p,20/40} = 122567725,0 \text{ m}^3$$

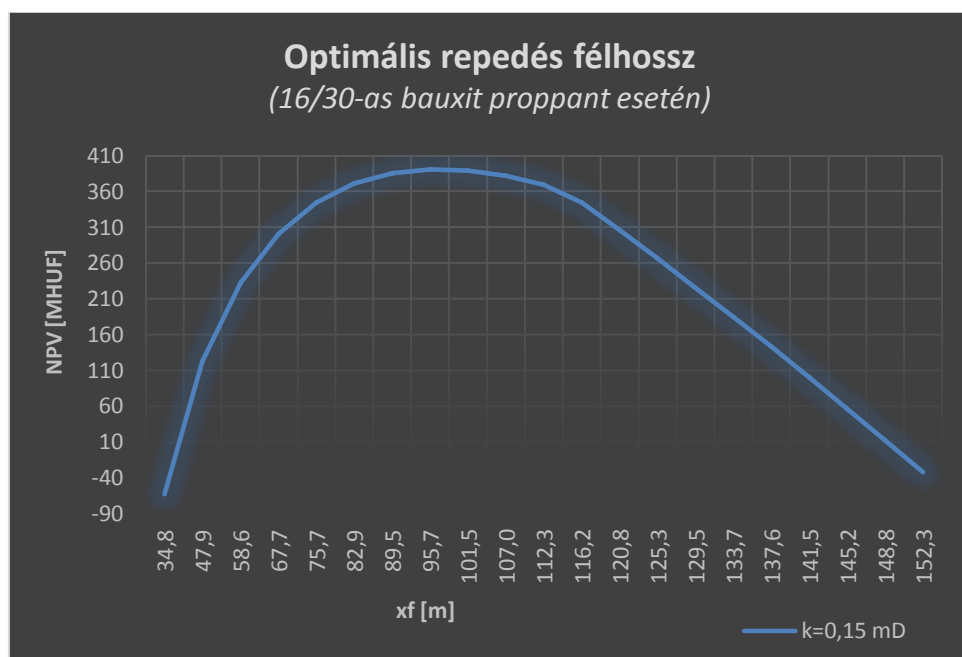
$$G_{p,30/60} = 118569017,3 \text{ m}^3$$

A kumulált hozamok is a vártnak megfelelően jóval alacsonyabbak, mint a jobb áteresztőképességű tárolók esetében. Az algoritmusunkba az alábbi értékeket vizsgálva megkaptuk a maximális NPV eléréséhez szükséges optimális repedésgeometria értékeket.

- 16/30-as bauxit proppant alkalmazása esetén:

$$x_{f\text{opt}} = 96 \text{ m}$$

$$w_{\text{opt}} = 0,008 \text{ m}$$

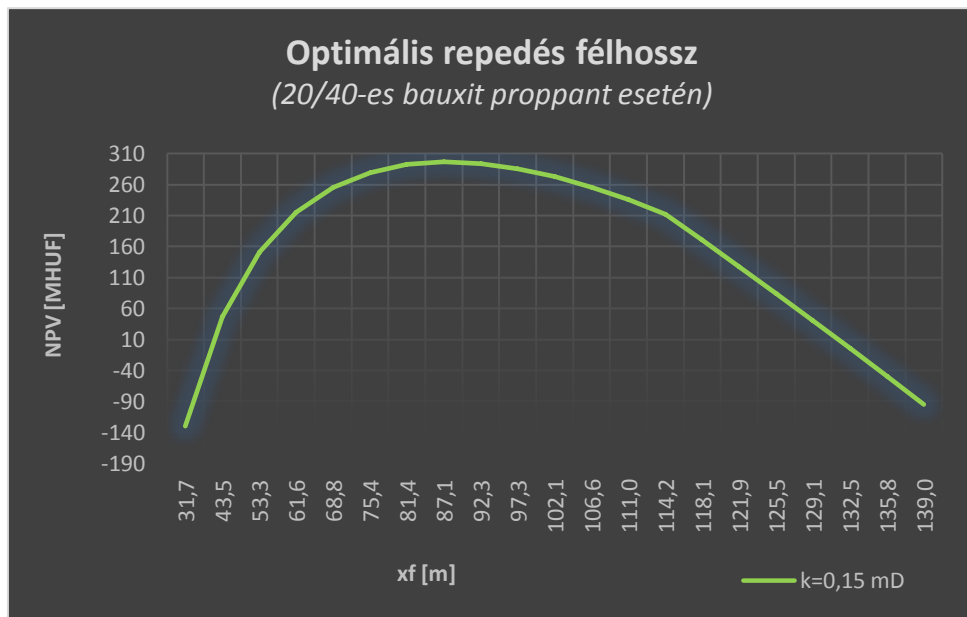


24. ábra: (saját készítésű ábra)

- 20/40-es bauxit proppant alkalmazása esetén:

$$x_{f\text{opt}} = 96 \text{ m}$$

$$w_{\text{opt}} = 0,008 \text{ m}$$

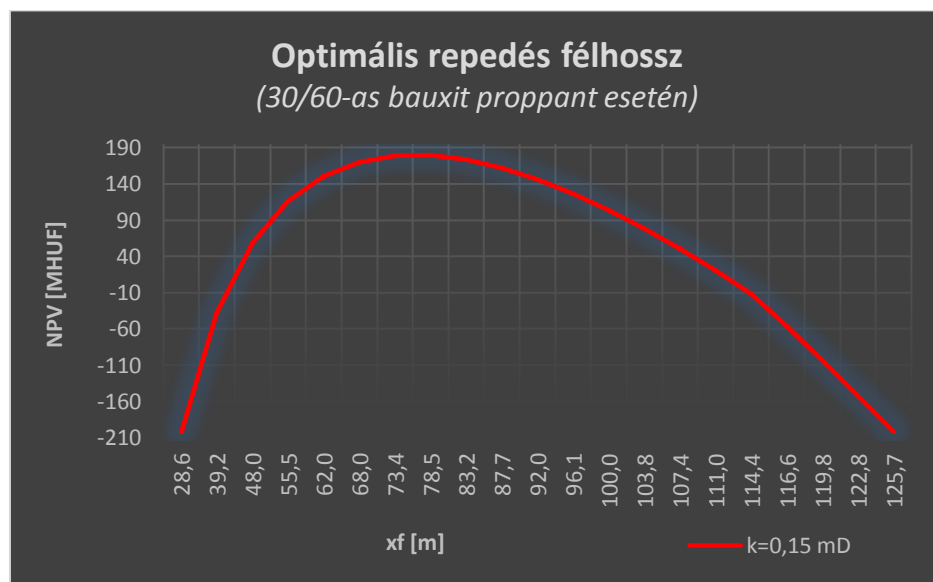


25. ábra: (saját készítésű ábra)

- 30/60-as bauxit proppant alkalmazása esetén:

$$x_{f\text{opt}} = 79 \text{ m}$$

$$w_{\text{opt}} = 0,01 \text{ m}$$



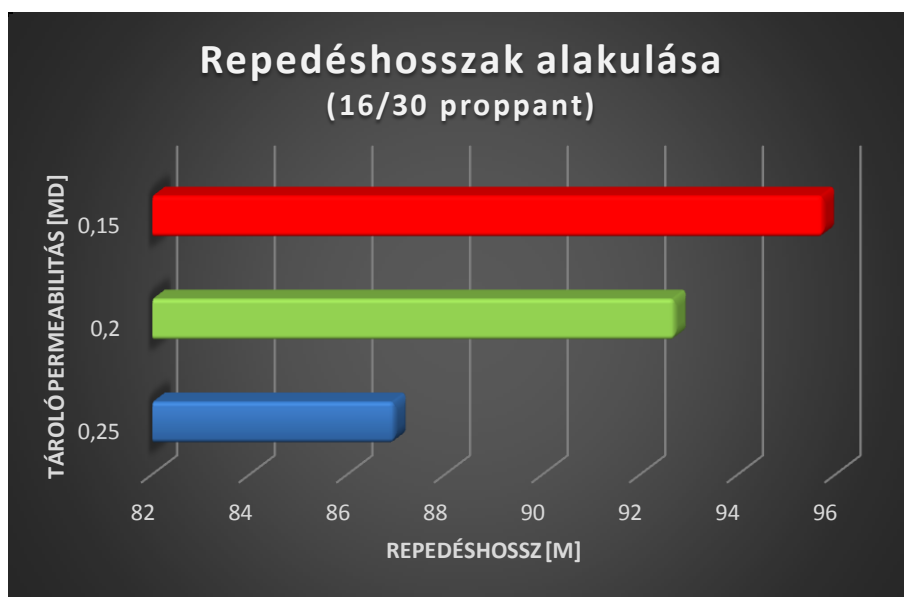
26. ábra: (saját készítésű ábra)

Szembevető eredmény, hogy a 16/30-as és a 20/40 proppant alkalmazásával ugyanazok a geometriai méretek állnak elő.

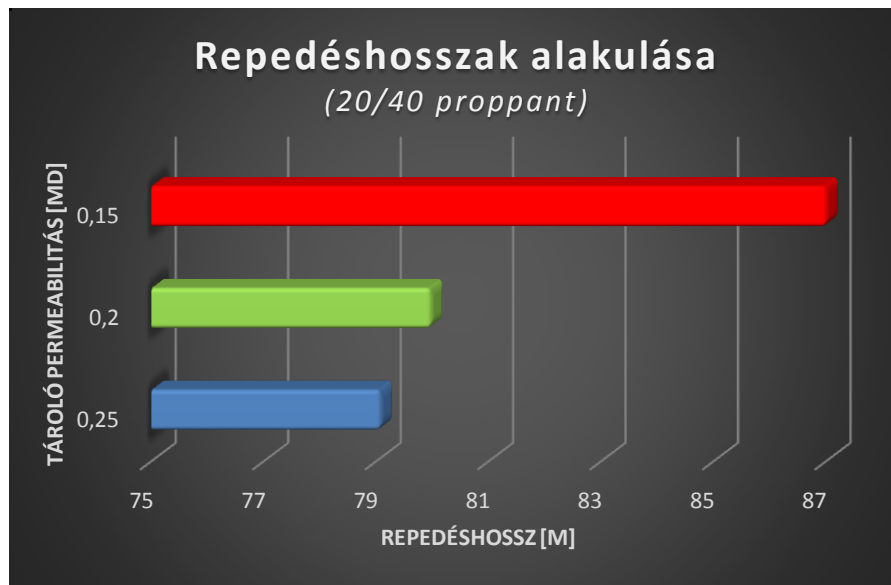
6.2. AZ EREDMÉNYEK ÖSSZEGZÉSE

A bemutatott eredmények meggyőzően alátámasztják, hogy a kidolgozott optimalizálási eljárásunk működik. A repesztési eljárásoknak a nettó jelenérték függvényében maximuma van, így ezzel a módszerrel meghatározható az optimális repesztés nagysága, milyensége.

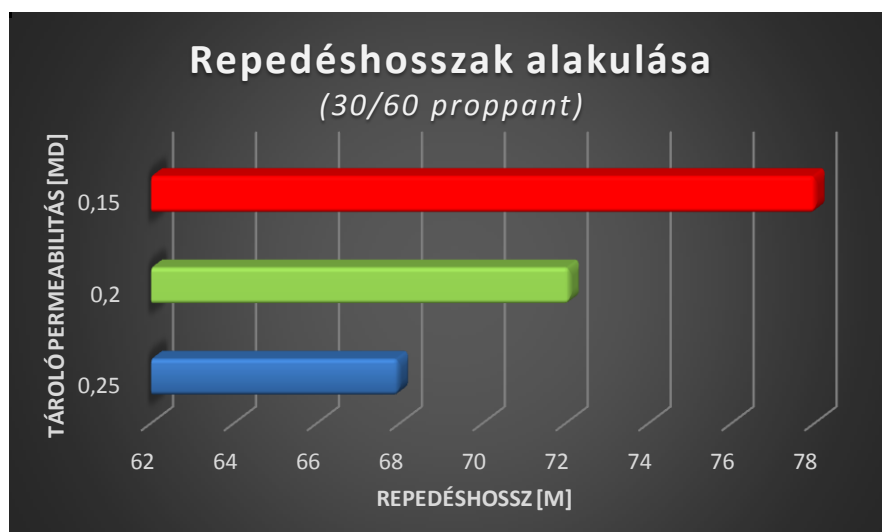
Tovább igazolja modellünk helyességét, hogy a kapott eredmények a már említett alapelveknek tökéletesen megfelelnek. Ezt szemlélteti az 27., 28., 29. ábra, melyeken különböző proppantok figyelembe vételével látható, hogy egyre kisebb permeabilitású tároló esetében egyre hosszabb és keskenyebb repedés az optimális.



27. ábra: (saját készítésű ábra)

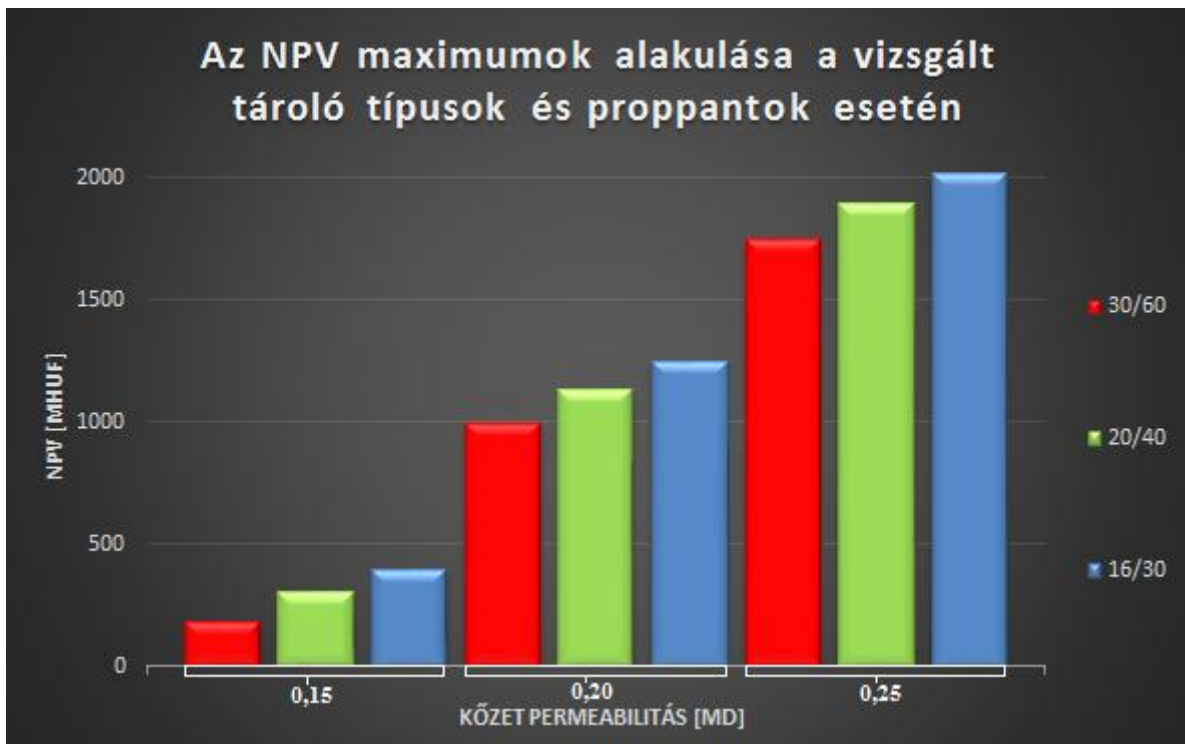


28. ábra: (saját készítésű ábra)



29. ábra: (saját készítésű ábra)

A különböző permeabilitású tárolók és proppantok által elért maximális NPV-eket az 30. diagram szemlélteti. Triviális megállapítás, hogy a jobb áteresztőképességű tároló esetén nagyobb NPV-eket érünk el. Kevésbé triviális meglátás, hogy jobb áteresztőképességű proppantok esetén is nagyobb NPV-k érhetők el, hiszen ezeknek az ára is több.



30. ábra: (saját készítésű ábra)

A kapott eredmények tehát a valóságnak megfelelőek, az optimum meghatározás sikeres, így gyakorlati feladatok előzetes elemzésére alkalmasnak ítéljük meg modellünk és algoritmusunk működését.

7. ÖSSZEGZÉS

Kutatómunkánk során meggyőződünk modellünk és a kidolgozott algoritmusunk alkalmazhatóságáról. A szakirodalomban leírt alapelvek visszaköszönnék a kapott eredményeinkben, mint például a 3. fejezetben leírt repedéshossz és szélesség - a tároló áteresztőképességének függvényében való - alakulása, a több szakkönyvben említett ökölszabály teljesülésére, miszerint a repedés szélesség a proppant átmérő körülbelül két-háromszorosa. Továbbá, hogy kapott eredményeink nagyságrendileg is megfelelnek az ipari gyakorlatnak. Mindezek arra engednek következtetni, hogy az algoritmusunk megfelelő megoldást nyújt a hidraulikus rétegrepesztés előzetes/projektfejlesztés közbeni optimalizálásának kérdésére. Lényegében egy átlátható, numerikus módszereket kezelő és iterációs feladatokat megoldó repesztést optimalizáló algoritmust dolgoztunk ki, mely nem igényel jelentős számú bemenő paramétert illetve gazdasági szempontokat is figyelembe vesz.

7.1. TOVÁBBI CÉLKITŰZÉSEK

További kutatómunkánk során határozott szándékunk még több paraméter beépítésével pontosabbá tenni a modellünket. Felmerült, hogy a későbbiekben a repesztés tervezés folyamata során a tároló közetmechanikai tulajdonságait szofisztikáltabb módon vesszük figyelembe, továbbá a repesztő fluidum kémiai tulajdonságaival is kalkulálnánk. Számba kívánjuk venni a repesztési eljárás során megnövelt J_D produktivitási index időbeli csökkenését, hiszen a tisztítótermeltetés és az utána következő folyamatos termelés során a kezdeti J_D egy adott értékig lecsökken a közet kompresszibilitásának és a beágyazott proppant tönkremenetelének illetve visszatermeltetésének köszönhetően. Mindezek további összetett algoritmus ciklusokat jelentenének az optimalizálási eljárás során.

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnénk megköszönni a munkánkhoz kapott segítséget a konzulenseinknek: Dr. Jobbik Anitának és Dr. Bódi Tibornak (AFKI), akik koordinálták és kontrollálták munkánkat és dolgozatunk elkészítését.

Továbbá szeretnénk köszönetet mondani Dr. Kosztin Bélának (Senior Adviser, MOL KT), aki külső konzulensként nyújtott jelentős segítséget munkánkhoz.

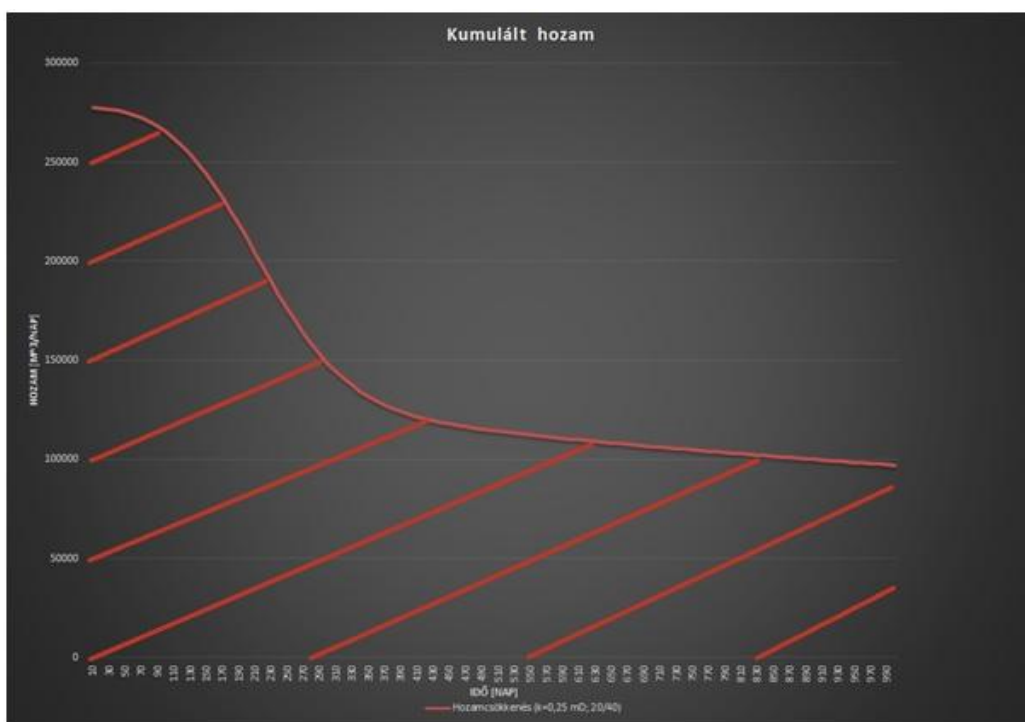
Szeretnénk kifejezni köszönetünket Kiss Károlynak és Balázsné Papp Katalinnak (MOL KT), akik a dolgozathoz szükséges adatokat a rendelkezésünkre bocsájtották és számos hasznos szakirodalommal elláttak minket.

9. IRODALOMJEGYZÉK

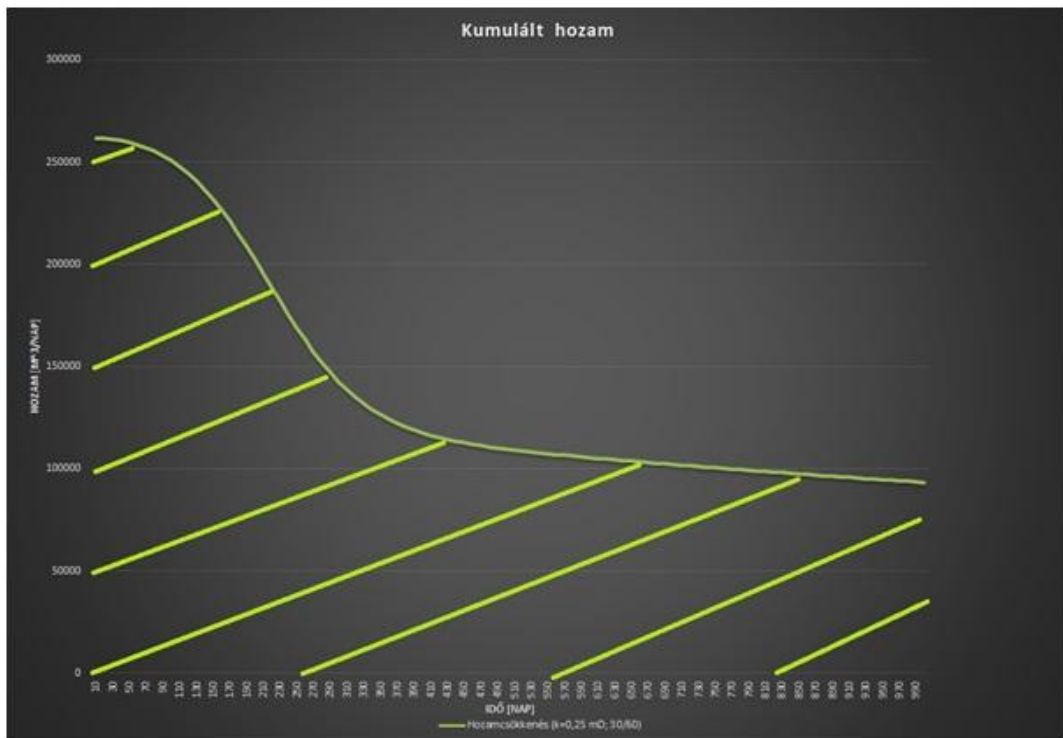
- [1] Michael J. Economides, Tony Martin: Modern Fracturing . Enhancing Natural Gas Production (2007)
- [2] Economides, M.J., Oligney, R.E., and Valko, P.P.: Unified Fracture Design, Orsa Press, Houston (2002a)
- [3] Pápay József: Exploitation of Unconventional Petroleum Accumulations. Theory and Practice (2013)
- [4] Az 5. fejezetben található általunk átgondolt és újra dolgozott összefüggések forrása: M. Marongiu-Porcu and M.J.Economides: Economic and Physical Optimization of Hydraulic Fracturing, In: paper SPE 111793, 2008
- [5] petrowiki.org
- [6] Economides, M.J., Oligney R.E., and Valkó, P.P.: “Applying unified fracture design to natural gaswells, ” In: World Oil (Oct. 2002b), 52-62.
- [7] S.D.Joshi: Horizontal Well Technology
- [8] Advanti, S.H., Khattib, H., and Lee, J.K.: “Hydraulic Fracture Geometry Modeling, Prediction and Comparisons,” In: paper SPE 13863, 1985.
- [9] Lengyel Tamás, Pusztai Patrik: Makói Palagáz, Miskolci Egyetem, MFK, Tudományos Diákköri Verseny, 2014.04.14.

10. MELLÉKLETEK

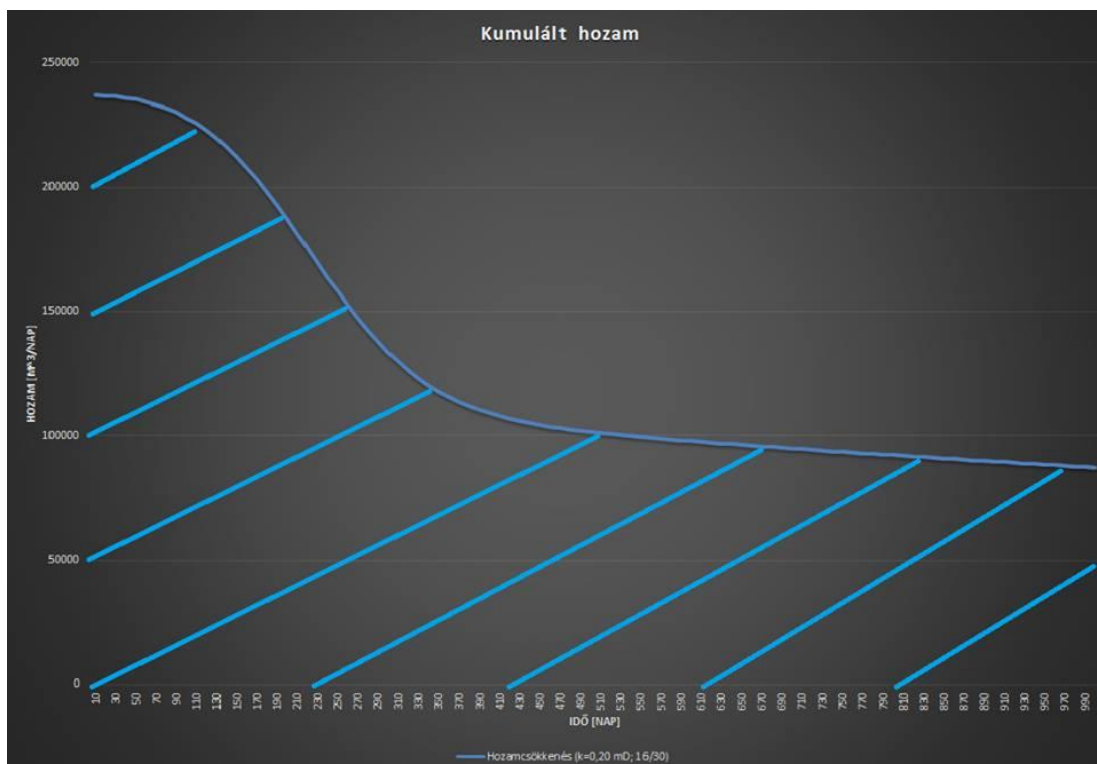
(1) Idő-napihozam koordinátarendszerbeli görbe integrálási ábra (0,25 mD permeabilitás és 20/40-es proppant alkalmazása esetén)



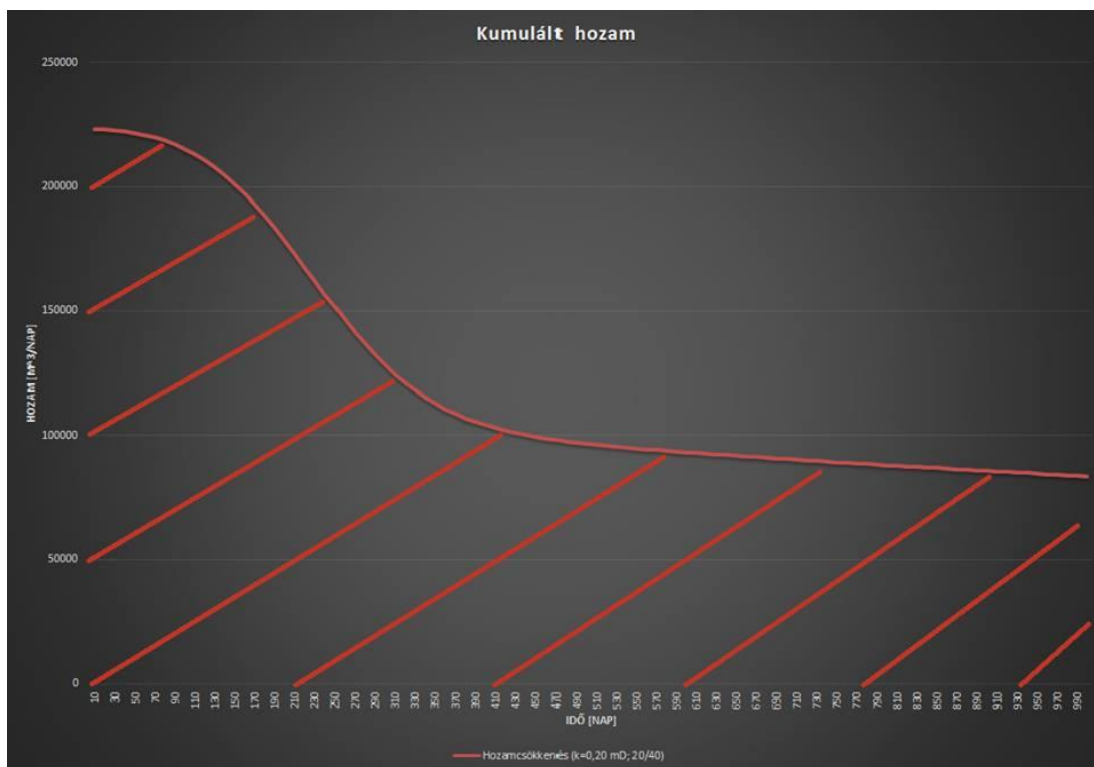
(2) Idő-napihozam koordinátarendszerbeli görbe integrálási ábra (0,25 mD permeabilitás és 30/60-as proppant alkalmazása esetén)



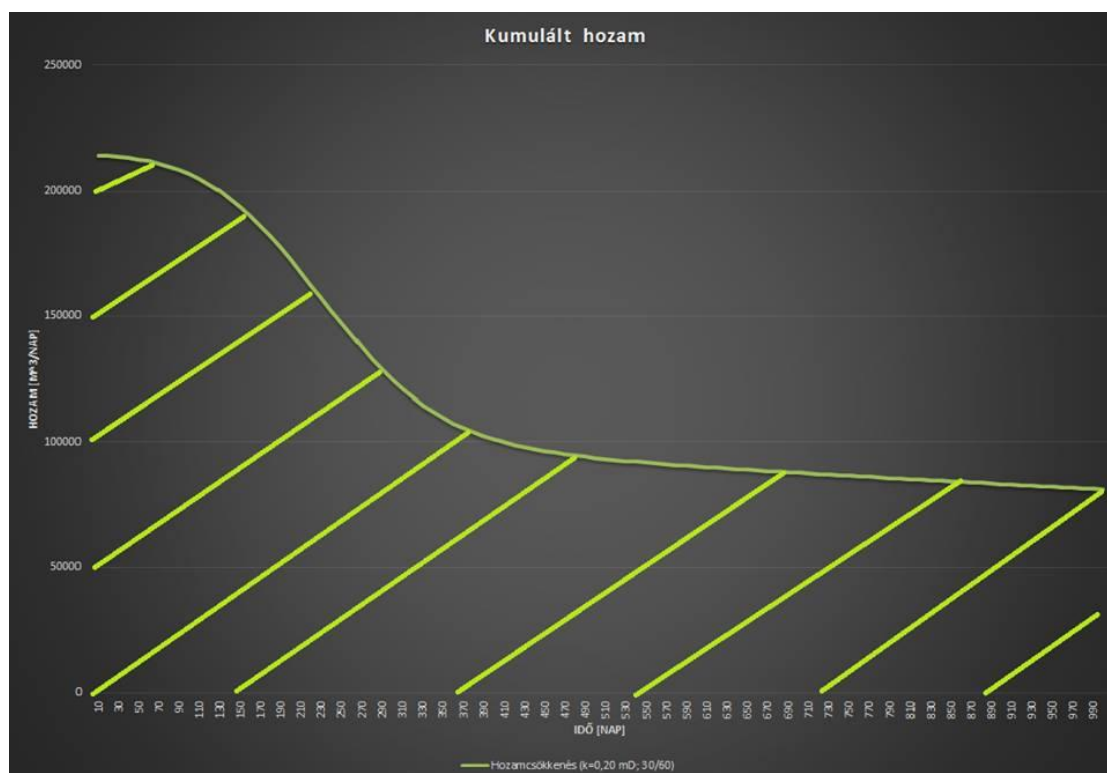
(3) Idő-napihozam koordináta-rendszerbeli görbe integrálási ábra (0,20 mD permeabilitás és 16/30-as proppant alkalmazása esetén)



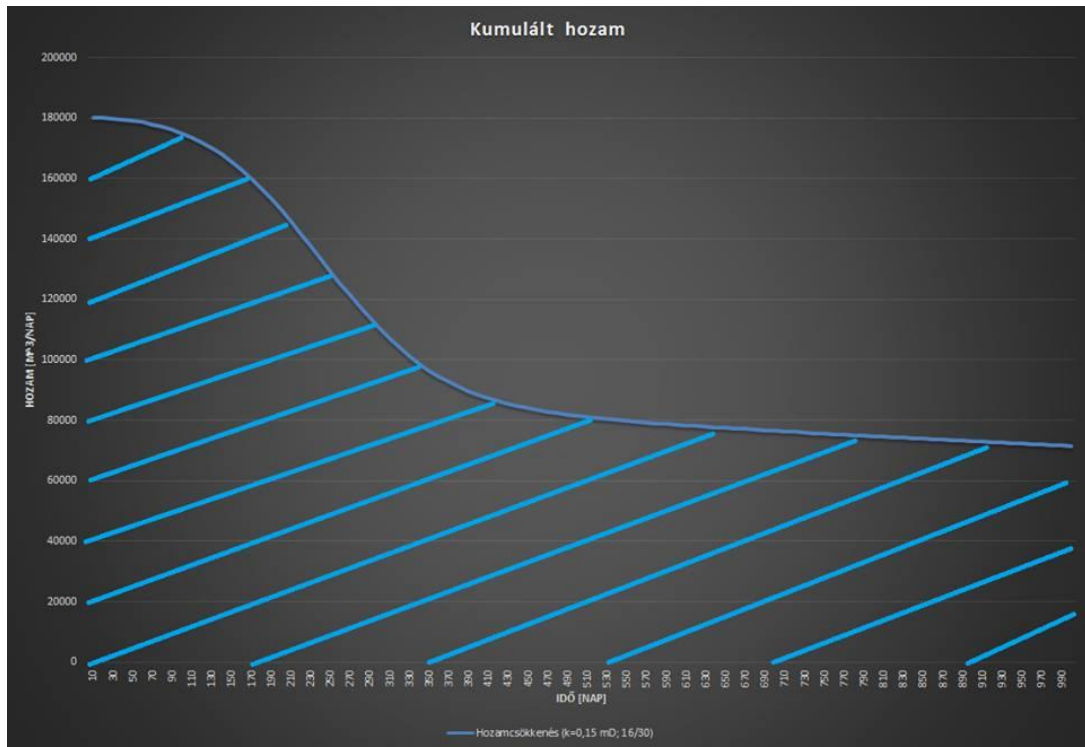
(4) Idő-napihozam koordináta-rendszerbeli görbe integrálási ábra (0,20 mD permeabilitás és 20/40-es proppant alkalmazása esetén)



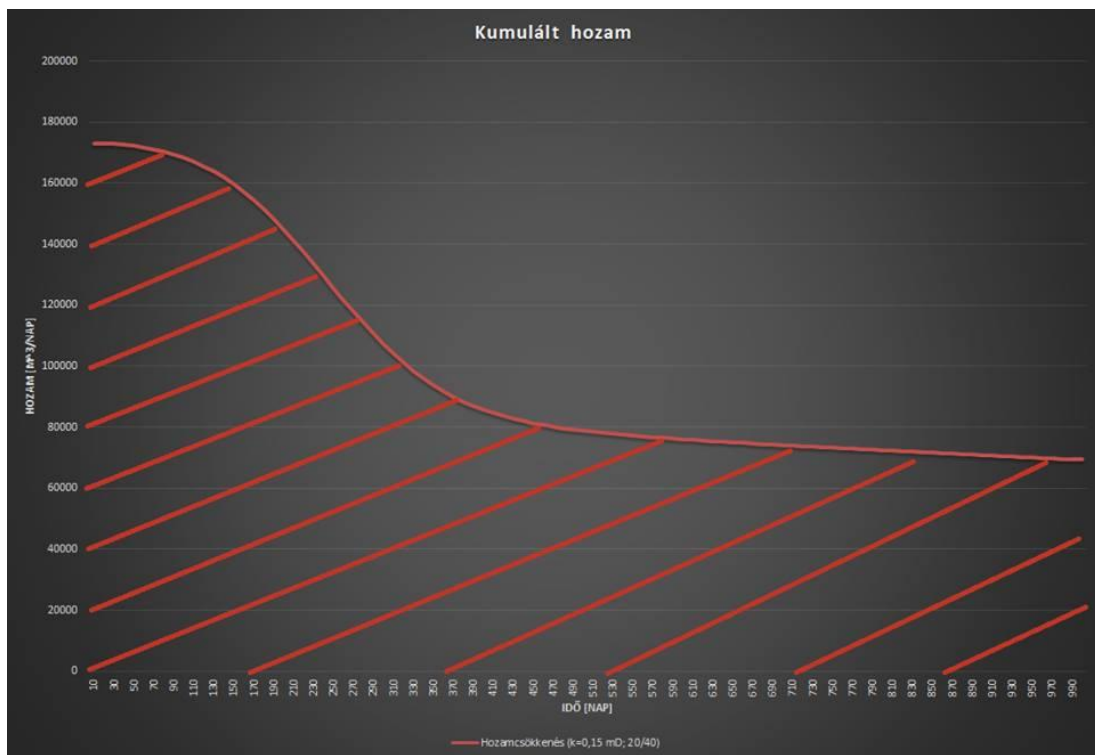
(5) Idő-napihozam koordinátarendszerbeli görbe integrálási ábra (0,20 mD permeabilitás és 30/60-as proppant alkalmazása esetén)



(6) Idő-napihozam koordinátarendszerbeli görbe integrálási ábra (0,15 mD permeabilitás és 16/30-as proppant alkalmazása esetén)



(7) Idő-napihozam koordináta-rendszerbeli görbe integrálási ábra (0,15 mD permeabilitás és 20/40-es proppant alkalmazása esetén)



(8) Idő-napihozam koordináta-rendszerbeli görbe integrálási ábra (0,15 mD permeabilitás és 30/60-as proppant alkalmazása esetén)

