

MISKOLCI EGYETEM

MIKOVINY SÁMUEL FÖLDTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

A Doktori Iskola vezetője:

Prof. Dr. Szűcs Péter

egyetemi tanár

**Perforált szénhidrogén termelő kutak beáramlási viszonyainak
vizsgálata**

Doktori (PhD) értekezés

KÉSZÍTETTE:

Pásztor Ádám Viktor

okleveles olajmérnök

TUDOMÁNYOS VEZETŐ:

Dr. Turzó Zoltán

egyetemi docens

Miskolc, 2020.03.30.

Tartalomjegyzék

1	Cél megfogalmazása	1
2	Bevezetés	2
2.1	Perforációk kialakítása.....	3
2.2	Perforációs paraméterek.....	4
2.2.1	A perforációs csatornák alakja.....	5
2.2.2	Zúzott zóna.....	6
2.2.3	A perforálás fázisszöge	6
2.3	Szkin tényező	8
2.4	Termelő kutak hozamegyenlete	10
2.5	Viszonyítási kutak.....	14
2.5.1	PVT tulajdonságok	14
2.5.2	Hozamgörbék	18
2.6	Numerikus áramlástani szimuláció.....	20
3	Korábbi számolási módszerek.....	22
3.1	McLeod módszere	23
3.2	Karakas és Tariq módszere	25
3.3	A módszerek vizsgálata.....	27
3.3.1	Olajkutak hozamgörbéi	27
3.3.2	Gázkutak hozamgörbéi.....	29
3.3.3	Konklúzió.....	30
4	Új módszer létrehozása.....	31
4.1	Megfontolási alapok.....	32
4.1.1	Nyomáskeresés a perforációs csatornában	32
4.1.2	Nyomáskeresés a zúzott zónában.....	33
4.1.3	Nyomáskeresés a perforációk közelében	34
4.1.4	Nyomáskeresés a kút közvetlen környezetéig	36
4.1.5	Az elárasztott zóna hatása.....	37
4.2	Nyomáskeresés a perforációs csatornákon	39

4.2.1	Áramlás viselkedésének vizsgálata	41
4.2.2	Nyomásveszteségek összehasonlítása	44
4.2.3	Konklúzió.....	47
4.3	Nyomásesés a zúzott zónában.....	48
4.3.1	Mesterséges kőzetmagok előállítása	48
4.3.2	Porozitás mérések.....	51
4.3.3	Permeabilitás mérések	53
4.3.4	Szemcseeloszlás mérések	56
4.3.5	Kiértékelés.....	58
4.4	Nyomásesés a perforációs csatornák körül.....	61
4.4.1	A perforációk és a zúzott zóna egyenértékű sugara.....	64
4.4.2	A perforációk gyűjtőterének sugara	70
4.5	Kiterjesztett kútsugár	73
4.5.1	$\theta=0^\circ, 180^\circ$ fázisszögek esete	74
4.5.2	$\theta=45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ fázisszögek esete.....	77
4.6	Az elárasztott zóna hatása.....	81
4.6.1	Nem túlnyúló perforációk	81
4.6.2	Túlnyúló perforációk	84
4.7	Az egyenlet végső alakja	92
5	Eredmények az új módszerrel.....	96
5.1	Hozamgörbék az új módszer alapján.....	97
5.2	Szkin tényezők vizsgálata.....	99
5.3	A perforációs paraméterek hatása a termelékenységre	104
5.4	Az elárasztott zóna hatásának vizsgálata	107
5.4.1	Savas rétegkezelés hatásának vizsgálata	110
5.5	Konklúzió.....	113
6	Ipari alkalmazások jelentősége, potenciálja.....	114
7	Tézisek	115
8	Összefoglalás	118

9	Summary	119
10	Köszönetnyilvánítás	120
11	Hivatkozások.....	121
12	Témában megjelent fontosabb tudományos közleményeim	126
A-Melléklet	Szkin elméletek irodalmi áttekintése.....	I
B-Melléklet	Szivárgási differenciálegyenletek	III
C-Melléklet	Béta tényezők összegzése szakirodalom alapján.....	XX
D-Melléklet	Viszonyítási olaj és- gázkutak hozamadatai	XXI
E-Melléklet	Perforált viszonyítási olaj- és gázkutak hozamadatai (McLeod).....	XXII
F-Melléklet	Perforált viszonyítási olaj- és gázkutak hozamadatai (Karakas & Tariq) ..	XXIII
G-Melléklet	Nyomásesés a perforációs csatornában.....	XXV
H-Melléklet	Gyűjtőterek alakja különböző perforálási fázisszögek esetében	XXXI
I-Melléklet	Műközetek összeállítási adatai	XXXIV
J-Melléklet	Műközetek mért tulajdonságai	XXXIX
K-Melléklet	Egyenértékű perforáció sugár CFD vizsgálata.....	XLI
L-Melléklet	Egyenértékű zúzott zóna sugár CFD vizsgálata	XLII
M-Melléklet	Ellipszis paraméterek jellemzése.....	XLIII
N-Melléklet	Kútkörnyék CFD modellje.....	LII
O-Melléklet	Áramlásmegoszlás vizsgálata	LV
P-Melléklet	Perforált viszonykutak hozamadatai az új módszer alapján.....	LVII
Q-Melléklet	Szkin eltérés vizsgálata	LIX
R-Melléklet	Áramlási sebesség független szkin vizsgálata.....	LXII
S-Melléklet	Áramlási sebesség függő szkin vizsgálata.....	LXV
T-Melléklet	Érzékenységi vizsgálatok eredményei (károsodás nélküli eset).....	LXVIII
U-Melléklet	Szennyezett kutak hozamadatai.....	LXXIV
V-Melléklet	Érzékenységi vizsgálatok eredményei (szennyezett eset)	LXXXVI

Ábrajegyzék

2-1 ábra: Acél béléscsővek és termelőcső (Drillingformulas.com, 2014).....	2
2-2 ábra: Perforátor puska (www.fypedrilling.com, 2019).....	3
2-3 ábra: Perforációk kialakítása (mpgpetroleum.com, 2003)	3
2-4 ábra: Perforációs paraméterek (www.halliburton.com, 2005)	4
2-5 ábra: Perforációs csatorna és a zúzott zóna alakja (28g töltet) (Snider, et al., 1997)...	5
2-6 ábra: Perforációs kialakítás lehetséges fázisszögei (petrowiki.spe.org, 2013)	7
2-7 ábra: Szkin tényező hatása (elárasztott zóna) (Ballistics, 2014).....	8
2-8 ábra: Kutak stabil munkapontja (Serintel, 2017)	10
2-9 ábra: Viszonyítási olajkút hozamgörbéje.....	18
2-10 ábra: Viszonyítási gázkút hozamgörbéje.....	19
3-1 ábra: Olajkút hozamgörbéi (McLeod).....	27
3-2 ábra: Olajkút hozamgörbéi (Karakas és Tariq).....	28
3-3 ábra: Gázkút hozamgörbéi (McLeod).....	29
3-4 ábra: Gázkút hozamgörbéi (Karakas és Tariq).....	29
4-1 ábra: Szemcseméret változás hatása	33
4-2 ábra: Egyenértékű sugár.....	34
4-3 ábra: Perforációk korlátozó hatása ($\theta = 60^\circ$).....	35
4-4 ábra: Perforációs csatorna gyűjtőtere ($\theta = 60^\circ$).....	35
4-5 ábra: Irányváltás az áramlásban a kút körül.....	36
4-6 ábra: Áramlás a kúthoz (szennyezett zóna túlnyúlik a perforációkon)	37
4-7 ábra: Áramlás a kúthoz (perforációk túlnyúlnak a szennyezett zónán).....	38
4-8 ábra: USA olajtermelése éves bontásban	39
4-9 ábra: USA gáztermelése éves bontásban.....	40
4-10 ábra: Reynolds szám alakulása olaj áramlása esetében.....	41
4-11 ábra: Reynolds szám alakulása gáz áramlása esetében.....	42
4-12 ábra: A súrlódási tényező alakulása olaj áramlása esetében	43
4-13 ábra: A súrlódási tényező alakulása gáz áramlása esetében	43
4-14 ábra: Nyomásveszteségek aránya olaj áramlása esetén	45
4-15 ábra: Nyomásveszteségek aránya gáz áramlása esetén	46
4-16 ábra: Műközet tartó.....	49
4-17 ábra: Mesterséges minták tömörítése	50
4-18 ábra: Külső mintatartó.....	50
4-19 ábra: Porozitásmérés összeállítása	51
4-20 ábra: Klinkenberg jelenség	54
4-21 ábra: Permeabilitás mérés összeállítása.....	54

4-22 ábra: Gázos permeabilitás mérés kiértékelése (J1 minta).....	55
4-23 ábra: Kumulált szemcseméret eloszlás (L sorozat)	57
4-24 ábra: Mesterséges magok átteresztőképesség kovarianciája	58
4-25 ábra: Mesterséges magok sűrűség és porozitás kovarianciája	59
4-26 ábra: Mesterséges magok átteresztőképesség kovarianciája szűrés után	59
4-27 ábra: Mesterséges magok sűrűség és porozitás kovarianciája szűrés után	60
4-28 ábra: Átteresztőképesség és szemcseméret-eloszlás összefüggése	60
4-29 ábra: Egyenértékű henger	64
4-30 ábra: Perforációs csatorna körül kialakuló áramlási kép.....	66
4-31 ábra: Gridromlás a kúp csúcsánál.....	66
4-32 ábra: Zúzott zóna egyenértékű sugara.....	67
4-33 ábra: Áramlás a zúzott zónában	69
4-34 ábra: Irányváltás perforáció körül ($\theta=180^\circ$)	71
4-35 ábra: Ellipszoid	71
4-36 ábra: Nyomáseloszlás a kút körül ($\theta=0^\circ$) (Karakas & Tariq, 1988)	74
4-37 ábra: Nyomáseloszlás a kút körül ($\theta=180^\circ$) (Karakas & Tariq, 1988)	74
4-38 ábra: Irányváltási zóna ($\theta=0^\circ$)	75
4-39 ábra: Irányváltási zóna ($\theta=180^\circ$)	75
4-40 ábra: áramlási irányváltás CFD szimuláción	77
4-41 ábra: Folytonos irányváltás modellje	78
4-42 ábra: CFD szimuláció túlnyúló perforációk esetében	84
4-43 ábra: r_s/r_w aránya különböző szkin értékek esetén	89
4-44 ábra: sugárváltozás arányok különböző szkin értékek esetén.....	89
4-45 ábra: Effektív hosszváltozás különböző szkin értékek esetében	90
5-1 ábra: Perforált viszonyítási olajkutak hozamgörbéi az új módszer alapján	97
5-2 ábra: Perforált viszonyítási gázkutak hozamgörbéi az új módszer alapján.....	97
5-3 ábra: Szkin tényezők összehasonlítása lövéssűrűség függvényében	99
5-4 ábra: Szkin tényezők összehasonlítása perforáció hossz függvényében	99
5-5 ábra: Szkin tényezők összehasonlítása perforáció sugár függvényében.....	100
5-6 ábra: Szkin értékek az új módszer alapján a lövéssűrűség függvényében.....	100
5-7 ábra: Szkin értékek az új módszer alapján a perforáció hossz függvényében.....	101
5-8 ábra: Szkin értékek az új módszer alapján a perforáció sugár függvényében	101
5-9 ábra: Áramlásfüggő szkin tényező az új módszer szerint a lövéssűrűség függvényében	102
5-10 ábra: Áramlásfüggő szkin tényező az új módszer szerint a perforáció hossz függvényében.....	102

5-11 ábra: Áramlásfüggő szkin tényező az új módszer szerint a perforáció sugár függvényében	103
5-12 ábra: Lövéssűrűség hatása az AOFP-re (olaj)	104
5-13 ábra: Perforáció hossz hatása az AOFP-re (olaj).....	104
5-14 ábra: Perforáció sugár hatása az AOFP-re (olaj)	105
5-15 ábra: Lövéssűrűség hatása az AOFP-re (gáz)	105
5-16 ábra: Perforáció hossz hatása az AOFP-re (gáz).....	106
5-17 ábra: Perforáció sugár hatása az AOFP-re (gáz)	106
5-18 ábra: A szennyezett zóna hatása olajkutak hozamára (nem túlnyúló perforációk esetében).....	107
5-19 ábra: A szennyezett zóna hatása gázkutak hozamára (nem túlnyúló perforációk esetében).....	108
5-20 ábra: A szennyezett zóna hatása olajkutak hozamára (túlnyúló perforációk esetében)	108
5-21 ábra: A szennyezett zóna hatása gázkutak hozamára (túlnyúló perforációk esetében)	109
5-22 ábra: Perforáció hossz hatása szennyezett olajkutakra.....	109
5-23 ábra: Perforáció hossz hatása elárasztott gázkutakra	110
5-24 ábra: Savas rétegkezelés hatása olajkút termelékenységére nem túlnyúló perforációk esetében.....	111
5-25 ábra: Savas rétegkezelés hatása olajkút termelékenységére túlnyúló perforációk esetében.....	111
5-26 ábra: Savas rétegkezelés hatása gázkút termelékenységére nem túlnyúló perforációk esetében.....	112
5-27 ábra: Savas rétegkezelés hatása gázkút termelékenységére túlnyúló perforációk esetében.....	112
11-1 ábra: Áramvonalak.....	III
11-2 ábra: Elemi térfogatú téglalap	VI
11-3 ábra: Polárkoordináta rendszer.....	XVI
11-4 ábra: Perforációk korlátozó hatása ($\theta = 120^\circ$).....	XXXI
11-5 ábra: Perforációs csatorna gyűjtőtere ($\theta = 120^\circ$).....	XXXI
11-6 ábra: Perforációk korlátozó hatása ($\theta = 90^\circ$).....	XXXII
11-7 ábra: Perforációs csatorna gyűjtőtere ($\theta = 90^\circ$).....	XXXII
11-8 ábra: Perforációk korlátozó hatása ($\theta = 45^\circ$).....	XXXIII
11-9 ábra: Perforációs csatorna gyűjtőtere ($\theta = 45^\circ$).....	XXXIII
11-10 ábra: Koordinátarendszer forgatás.....	XLIII
11-11 ábra: Eltolt ellipszis	XLV

11-12 ábra: Geometria, felülnézet (1. szennyezett zóna, 2. tiszta zóna, 3. perforációk, 4. kút)	LII
11-13: Geometria, izometrikus nézet	LIII
11-14 ábra: Kútkörnyék meshelése.....	LIII
11-15 ábra: Áramlási irányok	LIV

Táblázatjegyzék

2-1 táblázat: Konstansok Karakas és Tariq módszeréhez.....	26
4-1 táblázat: Érzékenységi vizsgálatok tartománya.....	96
8-1 táblázat: Szkin felfogások	I
8-2 táblázat: β tényezők összegzése	XX
8-3 táblázat: Viszonyítási kutak hozamadatai	XXI
8-4 táblázat: Perforált kutak hozamadatai McLeod alapján	XXII
8-5 táblázat: Perforált olajkutak hozamadatai Karakas és Tariq alapján.....	XXIII
8-6 táblázat: Perforált gázkutak hozamadatai Karakas és Tariq alapján	XXIV
8-7 táblázat: Reynolds szám olaj áramlása esetén	XXV
8-8 táblázat: Reynolds szám gáz áramlása esetén	XXVI
8-9 táblázat: Sűrűdési tényező olaj áramlása esetén	XXVII
8-10 táblázat: Sűrűdési tényező gáz áramlása esetén	XXVIII
8-11 táblázat: Nyomásesés arány olaj áramlása esetén	XXIX
8-12 táblázat: Nyomásesés arány gáz áramlása esetén	XXX
8-13 táblázat: Műközetek mért tulajdonságai	XXXIX
8-14 táblázat: Egyenértékű perforáció sugár CFD szimulációs eredményei.....	XLI
8-15 táblázat: Egyenértékű zúzott zóna sugár CFD vizsgálata	XLII
8-16 táblázat: Áramlásmegoszlás, számítási eredmények ($S=0.1$, $S=1$).....	LV
8-17 táblázat: Áramlásmegoszlás, számítási eredmények ($S=2$, $S=4$).....	LV
8-18 táblázat: Áramlásmegoszlás, számítási eredmények ($S=10$)	LVI
8-19 táblázat: Perforált olajkutak hozamadatai az új módszer alapján	LVII
8-20 táblázat: Perforált gázkutak hozamadatai az új módszer alapján	LVIII
8-21 táblázat: Szkin eltérés vizsgálata lövéssűrűség alapján.....	LIX
8-22 táblázat: Szkin eltérés vizsgálata lövéshossz alapján	LX
8-23 táblázat: Szkin eltérés vizsgálata perforáció sugár alapján	LXI
8-24 táblázat: Áramlási sebesség független szkin lövéssűrűség alapján.....	LXII
8-25 táblázat: Áramlási sebesség független szkin lövéshossz alapján.....	LXIII
8-26 táblázat: Áramlási sebesség független szkin perforáció sugár alapján.....	LXIV
8-27 táblázat: Áramlási sebesség függő szkin tényező vizsgálata lövéssűrűség alapján	LXV
8-28 táblázat: Áramlási sebesség függő szkin tényező vizsgálata lövéshossz alapján.....	LXVI
8-29 táblázat: Áramlási sebesség függő szkin tényező vizsgálata perforáció sugár alapján	LXVII
8-30 táblázat: Érzékenységi vizsgálatok eredményei lövéssűrűség alapján (olaj, károsodás nélküli eset)	LXVIII

8-31 táblázat: Érzékenységi vizsgálatok eredményei lövéshossz alapján (olaj, károsodás nélküli eset)	LXIX
8-32 táblázat: Érzékenységi vizsgálatok eredményei perforáció sugár alapján (olaj, károsodás nélküli eset)	LXX
8-33 táblázat: Érzékenységi vizsgálatok eredményei lövéssűrűség alapján (gáz, károsodás nélküli eset)	LXXI
8-34 táblázat: Érzékenységi vizsgálatok eredményei lövéshossz alapján (gáz, károsodás nélküli eset)	LXXII
8-35 táblázat: Érzékenységi vizsgálatok eredményei perforáció sugár alapján (gáz, károsodás nélküli eset)	LXXIII
8-36 táblázat: Szennyezett olajkút hozamadatai	LXXIV
8-37 táblázat: Szennyezett gázkút hozamadatai	LXXV
8-38 táblázat: Érzékenységi vizsgálatok eredménye perforáció hossz alapján (olaj, szennyezett eset).....	LXXVI
8-39 táblázat: Érzékenységi vizsgálatok eredménye szennyezés alapján (olaj, szennyezett eset, $L_p=0.5$ ft)	LXXVII
8-40 táblázat: Érzékenységi vizsgálatok eredménye szennyezés alapján (olaj, szennyezett eset, $L_p=1.5$ ft)	LXXVIII
8-41 táblázat: Érzékenységi vizsgálatok eredménye perforáció hossz alapján (gáz, szennyezett eset).....	LXXIX
8-42 táblázat: Érzékenységi vizsgálatok eredménye szennyezés alapján (gáz, szennyezett eset, $L_p=0.5$ ft)	LXXX
8-43 táblázat: Érzékenységi vizsgálatok eredménye szennyezés alapján (gáz, szennyezett eset, $L_p=1.5$ ft)	LXXXI

Témavezetői ajánlás

A szénhidrogén termelő kutak döntő többsége perforált kiképzésű. Az áramlás során fellépő nyomásesésre és így a kút termelékenységére komoly hatással van a perforáció kialakítása. A szerző a perforáció kialakításának áramlásra gyakorolt hatását elemezte behatóan és az eredményei alapján egy új, olaj- és gázkutakra egyaránt alkalmazható számolási módszert alkotott meg.

A téma időszerűségét indokolja, hogy a témában jelentős előrelépés az utóbbi húsz évben nem volt. Tovább hangsúlyozza a kutatás jelentőségét, hogy a jelenleg tapasztalható alacsony olajárak miatt a szakma legfontosabb törekvése a kutak termelékenységének behatóbb vizsgálata és az alacsony költségvonzatú termelés intenzifikálás. A bemutatott módszer túlmutatva elődein több tervezést érintő kérdést tisztáz, így alkalmas eszköz a kutak termelékenységének elemzésére, intenzifikálásának tervezésére.

A szerző új szempontból vizsgálja a kutak körül kialakuló áramlást. A perforációk körül kialakuló komplex áramlási képet jól szemlélteti és kimerítően adja meg annak a matematikai leírását. A levezetések során alkalmazott feltételezéseket részletesen bemutatja és alátámasztja. A munka során a szerző a megfontolásokat számítógépes áramlástan szimulációkkal (CFD) is szemlélteti és alátámasztja. A numerikus szimulációkon felül a kutatás során komplex mérési program is megvalósult.

A szerző munkája jól szerkesztett, logikusan felépített. Az egyes fejezetekben bemutatott egységek (szakirodalmi áttekintés, megfontolási alapok bemutatása, egyes egységek bizonyítása és a levezetés) közötti kohézió jó. A kapott eredmények és a levont következtetések ígéretesek, azokat számos ipari tapasztalat igazolja.

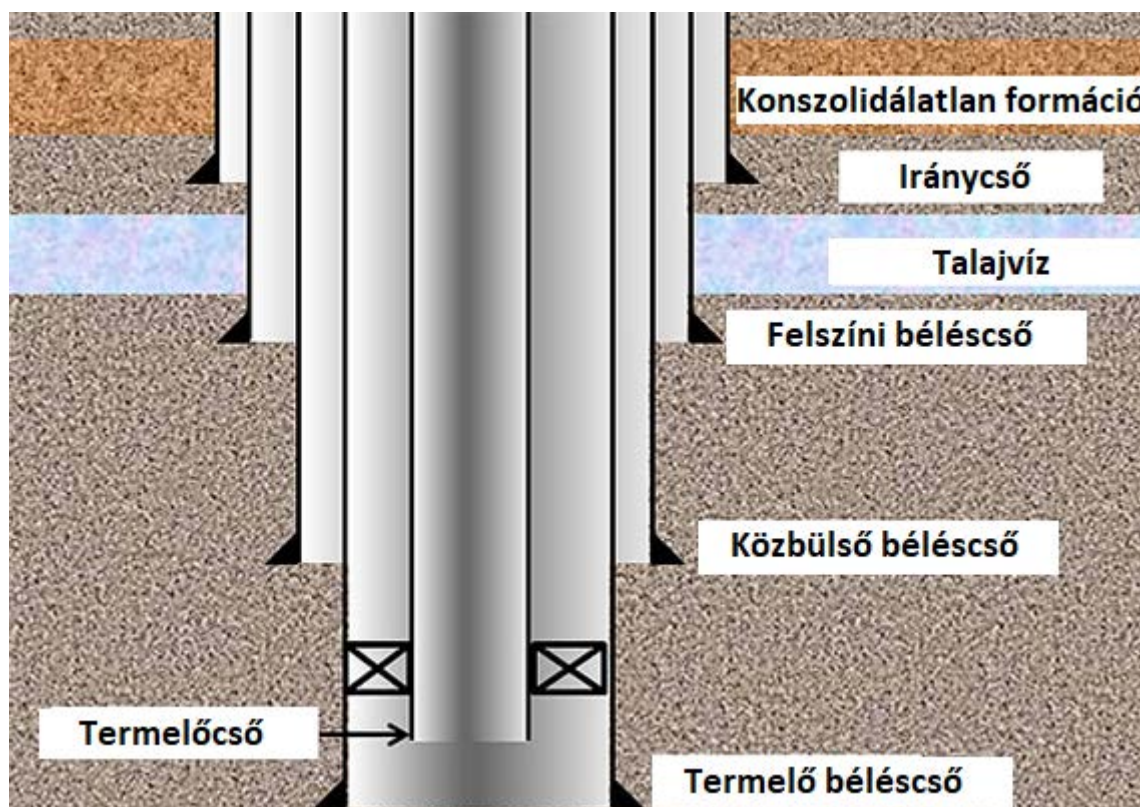
1 Cél megfogalmazása

A 2014-2016-os olajárválság a kőolaj világszerte jelentős, több mint 70%-os esését eredményezte. Az eddig nem tapasztalt, új gazdasági környezetben a termelő kutak termelési, - és költséghatékony optimalizálása minden eddiginél fontosabb lett. Az ipari tapasztalat azt mutatja, hogy a termelő kutak termelékenységét nagy mértékben javítja a megfelelően megtervezett és kivitelezett perforálás. Sajnálatos módon a ma használt számolási módszerek, amelyek alkalmasak lehetnek a perforálás – és így a termelékenység – optimalizálására, gyökerei egy több mint harminc éves, numerikus szimulációkra alapozott módszerre nyúlnak vissza. Ezen felül számos, a perforációk körül kialakuló áramlást érintő kérdés mindmáig tisztázatlan maradt.

Kutatásom célja a perforált szénhidrogén kutak áramlási viszonyainak beható vizsgálata, különös tekintettel a konszolidált szénhidrogéntárolók kútjaiban létrehozott perforációk körül kialakuló áramlási képre. Ezen felül célul tűztem ki az eredményeimre alapozva egy olyan új számítási módszer megalkotását, ami az eddig használt módszereknél pontosabb és alkalmas az eddig megválaszolatlan kérdések tisztázására.

2 Bevezetés

A szénhidrogén kutak fúrása során szükség van a fúróluk környezetétől való elszigetelésére. Ezen okból adódóan a kútmélyítés több lépcsőben történik, az egyes lépcsők végén a lefúrt szakasz béléscsővezetésével és annak cementezésével. Amennyiben a kőzetállékonyság nem elegendő ahhoz, hogy a termelés során alkalmazott nyomáskülönbségnek ellenálljon, akkor a lyukfal kitámasztásához úgynevezett termelési béléscsövet kell alkalmazni (1-1 ábra).



2-1 ábra: Acél béléscsövek és termelőcső (*Drillingformulas.com, 2014*)

Termelő béléscsővel kiképzett kutak esetében a fentiek alapján szükséges a kút és a réteg közötti kapcsolatot biztosítani. Ennek érdekében a béléscsöveket perforálni kell, mely után a létrejövő perforációs csatornák biztosítják a termelvény kútba áramlását a tárolóból.

A termelő kutak hatásfokának egyik mérője a termelékenység, ami a beáramlás mértékének és az ahhoz szükséges nyomáskülönbségnek a kapcsolatát mutatja be. Ez egyszerűen arra a kijelentésre fordítható le, hogy minél könnyebben áramlik be a termelvény a tárolóból a kútba, annál jobb annak a hatásfoka, vagyis elmondható, hogy a perforációk közvetlen hatással vannak a kutak hatásfokára.

2.1 Perforációk kialakítása

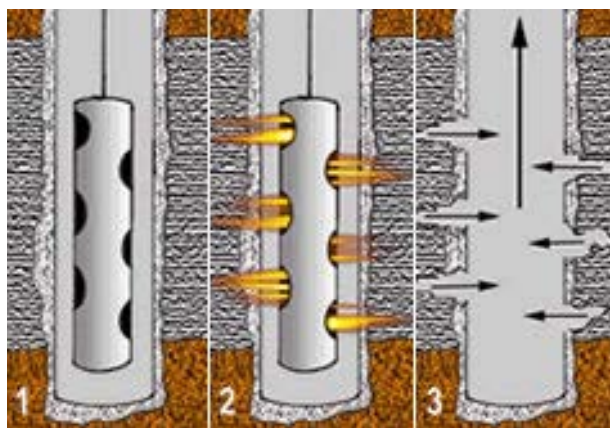
A perforációs csatornák létrehozása szelektíven kiválasztott perforálási technológiával történik. Ezen technológiák egyike a perforátor puskák alkalmazása. A perforátor puskák lényegében robbanóanyaggal töltött acél csövek, amelyekben perforátor fejek foglalnak helyet adott geometriai elrendezésben (1-2 ábra).



2-2 ábra: Perforátor puska (www.fypedrilling.com, 2019)

A folyamat lépései a következők (1-3 ábra):

1. A perforátor puska célmélységbe juttatása.
2. A csatornák kialakítása a robbanóanyag elsütésének hatására létrejövő „jet” sugarakkal.
3. A puska visszanyerése, ill. a lyuktalpi zsompba ejtése, s így a lyukban hagyása.



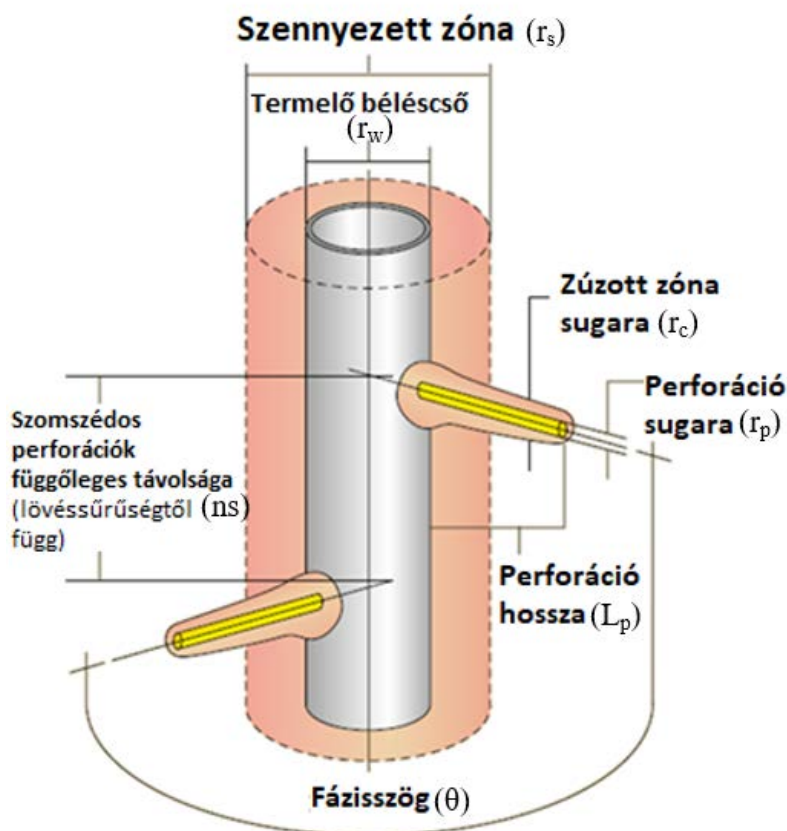
2-3 ábra: Perforációk kialakítása (mpgpetroleum.com, 2003)

A perforátorok célmélységbe való juttatása történhet a termelőcsövön belül, pl. sodronyzott elektromos kábellel, a termelőcsőre akasztva vagy a béléscsőben belül sodronyzott elektromos kábellel. Bármelyik módszer is kerüljön alkalmazásra, látható, hogy a készülékek mérete, és így a bennük lévő robbanóanyag térfogata korlátozott. Ebből következik, hogy a létrehozott csatornák térfogata is szintén korlátozott lesz.

2.2 Perforációs paraméterek

A perforációs csatornák közvetlen termelési hatásuk következtében, valamint a perforációk korlátos térfogata miatt azok egyes paraméterei nem lehetnek függetlenek egymástól. A kutak hatékonyságára gyakorolt hatásuk mélyebb elemzéséhez a perforációs paraméterek beható ismerete szükséges. Az értekezésben vizsgált paraméterek és azok jelölése a következők (1-4 ábra):

- perforációs csatornák hossza: L_p [ft, m],
- perforációs csatornák sugara: r_p [in, cm],
- perforációs lövéssűrűség: n_s [lövés/ft, lövés/m],
- fázisszög: Θ [°],
- zúzott zóna sugara: r_c [in, cm].

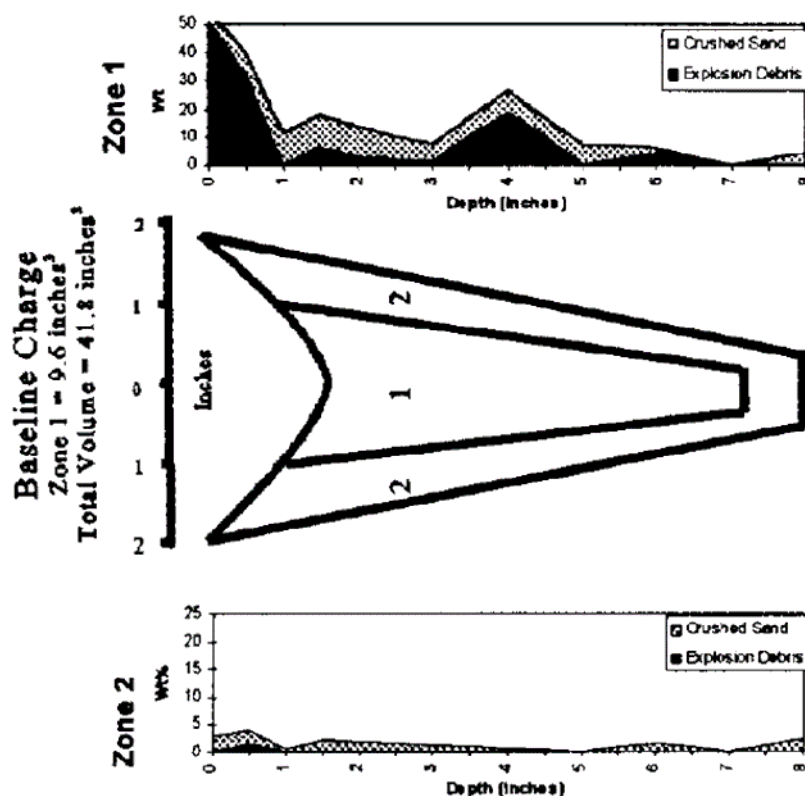


2-4 ábra: Perforációs paraméterek (www.halliburton.com, 2005)

Megjegyzés a fenti ábrával kapcsolatban, hogy rajta a fúrt lyuk sugara és a termelő béléscső sugara egybeesik. A valóságban a fúrt lyuk sugara nagyobb a termelő béléscső sugaránál. A későbbiekben bemutatott egyenletek r_w sugarat a fúrt lyuk sugarának veszik.

2.2.1 A perforációs csatornák alakja

A perforátor puska geometriai adottságaiból következő csatorna-térfogat korlátozása egyszerűen érthető, azonban annak hatása összetett. Nyilvánvaló, hogy a csatornák sugara, hossza, valamint az adott szakaszon létrehozott perforációk száma (vagyis a lövéssűrűség) nem független egymástól. Azt, hogy a létrejövő perforáció milyen sugár/hossz aránnyal rendelkezzen, a perforátor fejek kialakításával lehet befolyásolni. A perforációs térfogat/lövéssűrűség arányt pedig a robbanóanyag fajtája és az egy perforátor fejre jutó robbanóanyag térfogata határozza meg. Látható, hogy termelés optimalizálási szempontból is igen fontos ismerni, hogy ezen paraméterek külön-külön hogyan járulnak hozzá a termelékenységhez. Mindemellett fontos megjegyezni, hogy az így kialakított csatornák alakja kúpszerű, mint arról Snider és tsai 1997-es publikációja is tanúskodik (Snider, et al., 1997).



2-5 ábra: Perforációs csatorna és a zúzott zóna alakja (28g töltet) (Snider, et al., 1997)

2.2.2 Zúzott zóna

A zúzott zóna a perforációs csatorna körül kialakuló, viszonylag vékony réteg, ami a perforáláskor fellépő extrém nagy nyomás hatására keletkezik. A zóna tulajdonságaira korábban számos kutatás összpontosult, mivel a jellege hasonlatos a termelő kutak körül kialakuló elárasztott zónához, ami nagyban befolyásolja a termelékenységet.

King és tsai (King, et al., 1986) valamint Pucknell és Behrmann (Pucknell & Behrmann, 1991) kutatásaik során úgy találták, hogy a zúzott zónában a permeabilitás romlás 60% és 90% között van.

Pucknell és Behrmann (Pucknell & Behrmann, 1991) kutatásaik eredményeként kimutatták, hogy a zúzott zónán belül az átteresztőképesség jól érzékelhető csökkenése ellenére a porozitás csökkenése nem számottevő. Ezt azzal a jelenséggel magyarázták, hogy a lökéshullám hatására a kőzetszemcsék aprózódnak, így a pórustorkok sugara lecsökken, míg a porózus térfogat nem változik.

Klotz és tsai (Klotz, et al., 1974) az elárasztott zóna és a zúzott zóna átteresztőképességre gyakorolt hatásának szuperpozícióját vizsgálták. Eredményeik alapján elmondható, hogy ha a két hatás összeadódik, vagyis, ha a kútkörnyéken a fúróiszap elárasztás miatt a permeabilitás az eredeti 40%-ára csökkent és a perforálás következtében a csökkenés további 90%-ot eredményez, akkor a zúzott zónán belül az átteresztőképesség az eredetinek csupán 4%-át teszi ki.

Craddock és tsai (Craddock, et al., 2018), Jan és tsai (Jan, et al., 2009) valamint Pucknell és Behrmann (Pucknell & Behrmann, 1991) alapján a zúzott zóna vastagsága 0.5 és 0.75 hüvelyk (1.27-1.905 cm) közé tehető.

2.2.3 A perforálás fázisszöge

Azt, hogy a szomszédos perforátor fejek milyen szöget zárnak be egymással, a perforálás fázisszögének nevezzük. A fázisszög alkalmazása a kút körüli egyenletes áramlást hivatott elősegíteni és általában nincs szükség a csatornák orientálására. Ez alól kivételt képeznek a hidraulikus rétegrepesztésre szánt kutak, amelyeknél a legnagyobb horizontális főfeszültség irányába kell állniuk a perforációknak (0° vagy 180° fázisszöggel) a repedés irányváltásának elkerülése érdekében (Economides & Martin, 2007). Az iparban 180°, 120°, 90°, 60°, 45° és 0° fázisszögeket alkalmaznak.

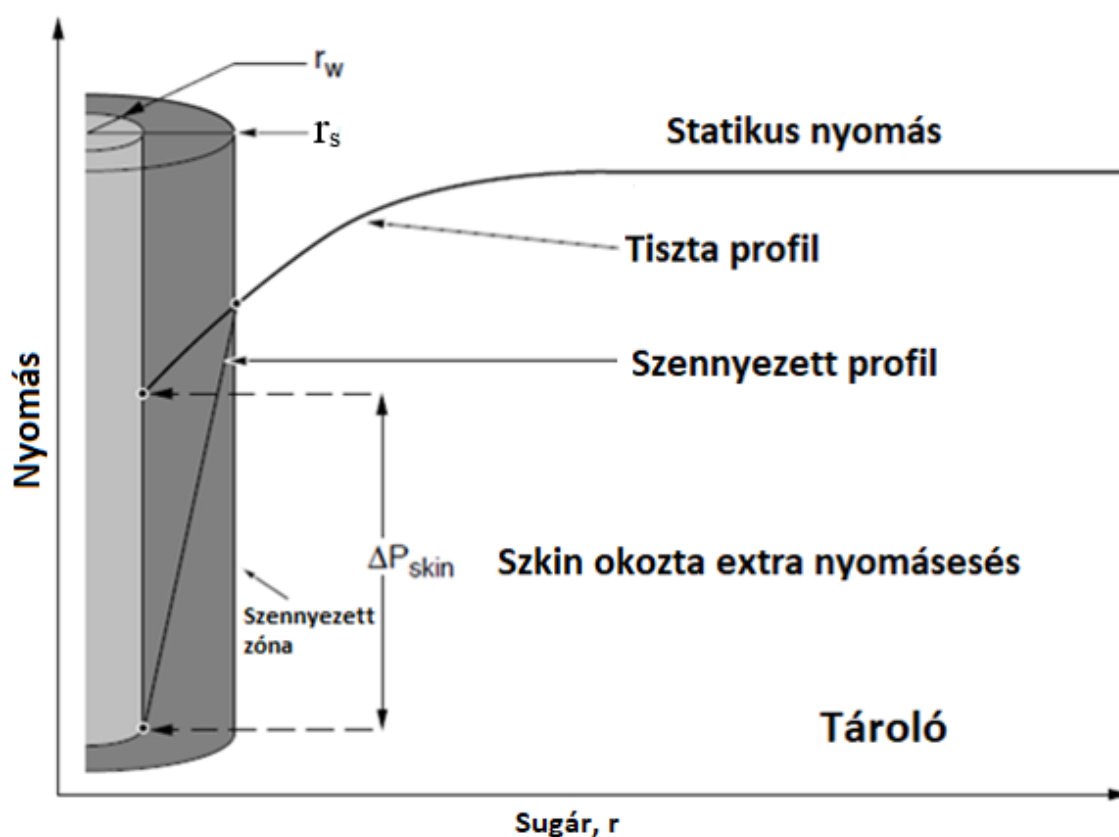


2-6 ábra: Perforációs kialakítás lehetséges fázisszögei (*petrowiki.spe.org, 2013*)

Látható, hogy a fázisszög csökkentésével a csatornák eloszlása a kútkörnyéken javul, vagyis az áramlási kép egyenletesebbnek várható a kis, de nem nulla fázisszögek esetében. Emellett azonban figyelembe kell venni azt a tényt, hogy minél kisebb a fázisszög, a szomszédos csatornák annál közelebb vannak egymáshoz, aminek a hatása a csatornák gyűjtőterének lekorlátozása lehet. Mindezekből következik, hogy a termelés optimalizálás szempontjából az adott kiképzéshez tartozó legmegfelelőbb fázisszög kiválasztása szintén kiemelt fontosságú.

2.3 Szkin tényező

A kútak termelékenysége a kúttalpon alkalmazott nyomáskülönbség és ennek hatására a kút talpán jelentkező folyadékáram közötti kapcsolatot írja le. Számos módszer létezik a szakirodalomban, amely a tároló, a kút és a termelvény tulajdonságai alapján megadja ezt a kapcsolatot. Ezek a módszerek általában egy olyan tiszta állapotot vesznek alapul, ahol a fluidum zavartalanul áramlik a kútkörnyéken. A valóságban ez nem elérhető, különböző behatások miatt eltérést mérhetünk az ideális áramlástól. Minden olyan hatást, ami ezt az eltérést okozza, legyen az pozitív, vagy negatív, a szakirodalom és a gyakorlat szkin tényezőként értelmezi, továbbá az előbbieken említett módszerek is ezt a tényezőt használják az ideálistól való eltérés figyelembevételére. Az alábbi ábra a szennyezett zóna okozta extra nyomáscsökkenés példáján keresztül szemlélteti a szkin tényezőt.



2-7 ábra: Szkin tényező hatása (elárasztott zóna) (Ballistics, 2014)

A végleges szkin tényező több hatás szuperpozíciójaként jön létre (Pucknell & Clifford, 1991, January 1) (Yldiz, 2016):

$$s_t = s_{dam} + s_{part} + s_{dev} + s_{perf} + s_{dperf} + s_{gravel} \quad (1)$$

Ahol:

- S_t : Teljes szkin tényező,
- S_{dam} : Elárasztott zóna hatásából következő szkin tényező (pozitív). Ennek a mérséklése lehetséges rétegkezeléssel.
- S_{part} : Részleges megnyitás hatásából következő szkin tényező (pozitív). Abban az esetben jelentkezik, ha a termelő béléscső nem a teljes tároló szakaszon kerül perforálásra.
- S_{dev} : Ferde kútpálya hatásából következő szkin (negatív). A ferde kútpálya nagyobb érintkezési felületet biztosít a tároló és a kút között, ezzel növelve az adott nyomáskülönbségből következő beáramlás mértékét.
- S_{perf} : A perforálás hatása (lehet pozitív vagy negatív).
- S_{gravel} : Homokszűrő alkalmazásából következő szkin (általában pozitív). Elméletileg a termelt rétegben megnöveli a kútsugarat, ami negatív szkint eredményezne, de az elszennyeződése mégis növeli a nyomásvesztéséget.
- S_{turb} : Darcy áramlási képtől eltérő áramlásból következő szkin tényező (pozitív). Régebben ezt az áramlási típust gyakorta turbulens áramlásnak nevezte a szakirodalom. Gázkutak esetében jelentős a hatása.

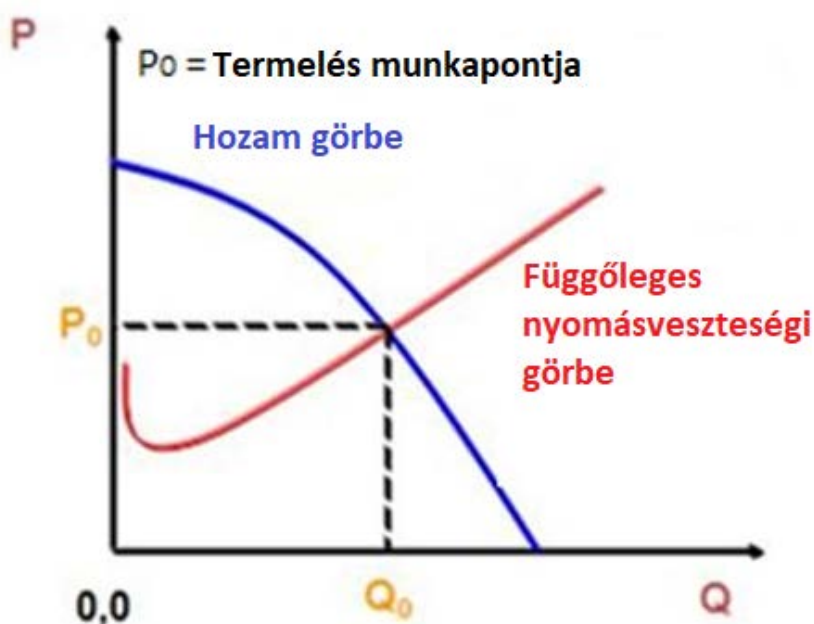
A fenti képlet egy egyszerű felfogást követ, miszerint a különböző hatások szuperpozícióját egyszerű összeadással megkaphatjuk. Bizonyos hatások azonban nem függetlenek egymástól, így ez az egyszerű felfogás közvetlenül mégsem alkalmazható. A szakirodalomban számos szkin értelmezés található, amelyek mind azt tárgyalják, hogy az egyes hatásokból miként lehet meghatározni a végleges, teljes szkint. Ezek a módszerek az „ A-Melléklet ” -ben megtekinthetők. A teljes szkin tényező meghatározható hidrodinamikai kútvizsgálatokkal, azonban az egyes tényezők így is csak becsülhetők.

Jelen értekezés célja a kialakított perforáció és az elárasztott zóna együttes hatásának vizsgálata a szénhidrogén termelő kutak termelékenységére vonatkozóan.

2.4 Termelő kutak hozamegyenlete

A termelő kutak elsődleges funkciója a tárolóban található szénhidrogén felszínre juttatása. Ez a folyamat két részre osztható fel, a tárolóból a kúttalpra történő beáramlására és a termelvény kúttalpról a felszínre való kiemelésére. Az első folyamat a kúttalpon alkalmazott nyomáskülönbség és annak hatására kialakuló térfogat áram kapcsolatától függ. Ezt a kapcsolatot a kutak hozamegyenletével lehet leírni és az úgynevezett hozamgörbékkel lehet szemléltetni. A második folyamatot a kúttal és a kútfej közötti nyomáskülönbség és az annak hatására kialakuló térfogatáram kapcsolata határozza meg. Ezt a kapcsolatot függőleges nyomásveszteségi számítási módszerekkel lehet leírni és az úgynevezett függőleges nyomásveszteségi görbékkel lehet szemléltetni. A kutak stabil munkapontját, vagyis azt az állapotot, amin a kút folyamatosan, állandó térfogatárammal képes szénhidrogént termelni, a két folyamat közös egyensúlyi állapota adja ki.

Ezen állapotban a kúttalpon lévő nyomás éppen elegendő ahhoz, hogy a tárolóból beáramló termelvényt a felszínre emelje úgy, hogy a nyomás a kútfejnyomás értékére csökken. Ezt az egyensúlyi állapotot mutatja be az alábbi ábra (1-8 ábra), a hozam görbe (kék görbe) és a függőleges nyomásveszteségi görbe (vörös görbe) metszéspontja a kút munkapontja. Látható tehát, hogy a kutak hatékonysága azok hozamegyenletének és függőleges nyomásveszteségének a függvénye. A perforáció kialakítása a tárolóból a kútba való beáramlásra van hatással, így a továbbiakban a kutak hozamegyenletére gyakorolt hatására fókuszálunk.



2-8 ábra: Kutak stabil munkapontja (Serintel, 2017)

A folyadékok kőzetben való áramlását először Darcy írta le a róla elnevezett törvényben 1856-ban (Darcy, 1856). A törvény alacsony áramlási sebességek esetén alkalmazható, amennyiben csak az áramló közeg telíti a pórusteret. Olajkutak egyfázisú áramlása esetén kielégítő pontossággal alkalmazható radiális geometriát feltételezve. Darcy-t követően számos hozamegyenlet került kifejlesztésre empirikus vagy analitikus alapon. Ilyenek például Vogel (Vogel, 1968), Fetkovich (Fetkovich, 1973) vagy Jones (Jones, et al., 1967) egyenletei. A felsorolt módszerek közös tulajdonsága, hogy eleve a szénhidrogének viselkedésének leírására készültek, így mind az olaj mind a gáz áramlásának leírására alkalmasak. Jones módszere analitikus alapokon nyugszik és kényelmesen kezelhető alakban rendelkezik. Külön kezeli például a Darcy törvény alkalmazhatóságának megfelelő és nem megfelelő tagokat, így a továbbiakban ezt a módszert használom fel.

Olajkutak esetén a hozamegyenlet (Jones, et al., 1967):

$$p_r - p_{wfs} = Aq_o^2 + Bq_o, \quad (2)$$

$$A = \frac{2.30 \times 10^{-14} \times \beta B_o^2 \rho}{h^2 r_w}, \quad (3)$$

$$B = \frac{141.2 \times \mu_o B_o \left[\ln \left(0.472 \left\{ \frac{r_e}{r_w} \right\} \right) + s_t \right]}{k_o h}. \quad (4)$$

Gázkutak esetén a hozamegyenlet (Jones, et al., 1967):

$$p_r^2 - p_{wfs}^2 = Aq_g^2 + Bq_g, \quad (5)$$

$$A = \frac{3.16 \times 10^{-12} \times \beta \gamma_g T z}{h^2 r_w}, \quad (6)$$

$$B = \frac{1.424 \times 10^3 \mu_g T z \left[\ln \left(0.472 \left\{ \frac{r_e}{r_w} \right\} \right) + s_t \right]}{k_g h}. \quad (7)$$

Ahol:

p_r	tároló nyomás	[psi],
p_{wfs}	kúttalpnymás	[psi],
A	nem-darcy áramlási tag	$[\text{psi} \times \text{day}^2 / \text{STB}^2]_{\text{oil}}$, $[\text{psi}^2 \times \text{day}^2 / \text{Mscf}^2]_{\text{gas}}$,
B	darcy áramlási tag	$[\text{psi} \times \text{day} / \text{STB}]_{\text{oil}}$, $[\text{psi}^2 \times \text{day} / \text{Mscf}]_{\text{gas}}$,
q_o	olaj térfogat árama	[STB/day],
β	béta tényező	[-],
B_o	olaj teleptérfogati tényező	[bbl/STB],
ρ	olaj sűrűség	[lbm/cf],
h	tároló vastagság	[ft],
r_w	kútsugár	[ft],
μ_o	olaj viszkozitás	[cP],
r_e	gyűjtőtér sugara	[ft],
s_t	teljes szkin tényező	[-],
k_o	kőzet effektív olaj permeabilitása	[mD],
q_g	gáz térfogatárama	[Mscf/day],
γ_g	gáz relatív sűrűsége	[-],
T	tároló hőmérséklete	[°R],
z	gáz eltérési tényezője	[-],
μ_g	gáz viszkozitása	[cP],
k_g	kőzet effektív gáz permeabilitása	[mD],

Látható, hogy az olajiparban alkalmazott egyenletek nem a szokványos SI mértékegység rendszerben kerülnek kifejezésre, hanem angolszász mértékegység rendszerben. Emiatt az értekezésemben a szakirodalomhoz jobban illeszkedő angolszász mértékegység rendszert használom (kivéve ott, ahol ezt külön jelölöm), ahol a megértést segíti, ott az SI rendszerbeli értéket is feltüntettem. Mivel pusztán az „A” és „B” tagok ismeretében igen nehéz a kutakat rangsorolni, ezért szükség van egy viszonyítási állapothoz, amin a termelő kutak hatékonysága összehasonlítható. Általános gyakorlat az olajiparban ennek a viszonyítási állapotnak az elméleti legnagyobb hozamot eredményező kúttalpi nyomását (0 psi) kijelölni. Ennek a hozamnak az angol terminológiában Absolute Open Flow Potential (AOFPP) a neve, az értekezésem további részében így hivatkozok erre az értékre.

$$AOFPP_o = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4A \times p_r}}{2A} \quad (8)$$

$$AOFPP_g = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4A \times p_r^2}}{2A} \quad (9)$$

Az egyenlethez szükséges paraméterek közül a béta tényező további részletezést igényel. A tényező maga a Darcy áramlástól való eltérést hivatott jellemezni és először Forchheimer 1901-es tanulmányában jelent meg. (Forchheimer, 1901) A szakirodalomban sokáig

turbulens tényezőként hivatkoztak erre a tagra, de a későbbiekben vita alakult ki arról, hogy valóban a turbulens áramlás felelős-e egyedül a Darcy féle áramlástól való eltérésért. Forchheimer munkája óta számos kutatás irányult a béta tényező meghatározására alkalmas módszer létrehozására. A módszerek között esetenként igen nagy az eltérés, ezért ezeket az eltéréseket és azok lehetséges okait két tanulmány is vizsgálta a közelmúltban (Kovács & Pásztor, 2019) (Veleczki & Pásztor, 2019). A kutatások egyik eredménye egy összefoglaló táblázat, ami az eddig napvilágot látott módszereket összegzi, ez a mellékletekben megtalálható (C-Melléklet). Jelen értekezés során a legtöbb módszerrel hasonló viselkedést mutató β_3 (Jones, 1987) módszer kerül alkalmazásra:

$$\beta_3 = 1.98 \times 10^{11} (k)^{-1.64} \quad (10)$$

2.5 Viszonyítási kutak

A dolgozat célja a kialakított perforációk hatásának elemzése. Az elemzéshez feltétlen szükséges egy olyan viszonyítási alap, amitől való eltérést elemezni lehet. Ennek okán az alfejezet két elméleti mesterséges kutat mutat be (olaj, ill. gázkút) viszonyítási alapként.

2.5.1 PVT tulajdonságok

A szénhidrogének nem tiszta anyagok, hanem többkomponensű rendszerek, ezért a viselkedésük is igen speciális különböző körülmények között. Annak érdekében, hogy a viszonyítási alapként szolgáló kutak hozamgörbéi reálisak legyenek, mindenképpen szükséges valós szénhidrogén viselkedés-leírást alkalmazni a megalkotásuk során. Az áramlástan szempontból fontos tulajdonságokat – mérések és molekulárisösszetétel ismerete hiányában – empirikus korrelációkkal tudjuk meghatározni, az adott körülményekre jellemző állapotváltozók (nyomás és hőmérséklet) ismeretében. A megfelelő eredmény érdekében mind az állapotváltozók megválasztását, mind az alkalmazott empirikus korrelációk kijelölését körültekintően kell megtenni.

Ismert, hogy a tároló nyomása és hőmérséklete nem vehet fel egyenként bármilyen értéket, hiszen mindkettő függ a tároló mélységétől. Mivel a későbbiekben több diagram szerepelteti a kúttalp nyomást az abszcisszáján, ezért célszerű ezt az értéket előre „beállítani” egy jól használható értékre, esetünkben 3000 psi-ra (206.8 bar). Normál hidrosztatikus gradienst feltételezve, ez a nyomás 6933 ft (2113 m) mélységre jellemző. 0.033 °F/ft geotermikus gradienst alkalmazva (nagyjából 0.06 °C/m) a tároló hőmérséklete 260 °F (127 °C). Érdemes megjegyezni, hogy Magyarországon a geotermikus gradiens értéke 0.05 °C/m és 0.07 °C/m között jellemző.

A gáz pszeudokritikus nyomása és hőmérséklete Standing tanulmánya (Standing, 1981) alapján a következők szerint számolhatók:

$$p_{pc} = 667 + 15\gamma_g - 37.5\gamma_g^2, \quad (11)$$

$$T_{pc} = 168 + 325\gamma_g - 12.5\gamma_g^2. \quad (12)$$

Ahol:

p_{pc}	pszeudokritikus nyomás	[psi],
T_{pc}	pszeudokritikus hőmérséklet	[°R],
γ_g	gáz relatív sűrűsége	[-].

A gáz eltérési tényezőjének számítása Pápay szerint (Pápay, 1968) történik:

$$z = 1 - \frac{3.52p_{pr}}{10^{0.9813T_{pr}}} + \frac{0.274p_{pr}^2}{10^{0.8157T_{pr}}}. \quad (13)$$

Ahol:

z	eltérési tényező	[-],
p_{pr}	pszeudoredukált nyomás	[-],
T_{pr}	pszeudoredukált hőmérséklet	[-]

és

$$p_{pr} = \frac{p}{p_{pc}}, \quad (14)$$

$$T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}}. \quad (15)$$

A viszkozitás meghatározása gázok esetén Lee és tsai (Lee, et al., 1966) alapján:

$$\mu_g = A_1 10^{-4} e^{A_2 \rho_g^{A_3}}. \quad (16)$$

Ahol:

$$A_1 = \frac{(9.379 + 0.01607M_g)T^{1.5}}{209.2 + 19.26M_g + T}, \quad (17)$$

$$A_2 = 3.448 + \frac{986.4}{T} + 0.01009M_g, \quad (18)$$

$$A_3 = 2.447 - 0.2224A_2, \quad (19)$$

$$M_g = 28.97\gamma_g, \quad (20)$$

$$\rho_g = 2.703131\gamma_g \frac{p}{zT}, \quad (21)$$

μ_g	gáz viszkozitás	[cP],
M_g	gáz molekuláris tömege	[lbm/mol],
ρ_g	gázsűrűség	[lbm/ft ³],
T	tároló hőmérséklete	[°R],
p	tároló nyomása	[psi].

A feltételezett telepállapotban $\gamma_g = 0.64$ relatív gázsűrűséggel a felvázolt gáztulajdonságok a következőknek adódnak:

- relatív gázsűrűség (γ_g) 0.64,
- eltérési tényező (z) 0.95,
- gáz viszkozitás (μ_g) 0.02 cP.

Az olaj buborékpointi nyomása Vazquez és Beggs módszere (Vazquez & Beggs, 1980) alapján:

$$p_b = \left(56.06 \frac{R_s}{\gamma_g} 10^{-\frac{10.393\gamma_{API}}{T}} \right)^{0.8425} . \quad (22)$$

Ahol:

p_b	buborékpointi nyomás	[psi],
R_s	oldott gáz-olaj viszony	[scf/STB],
γ_{API}	API olaj sűrűség	[°API].

Az olaj viszkozitásának meghatározásához adott körülmények között ismerni kell a gáztalan (dead) olaj viszkozitását, valamint a buborékpointon érvényes viszkozitását. A számításokhoz Beggs és Robinson módszere (Beggs & Robinson, 1975), illetve Vazquez és Beggs módszere (Vazquez & Beggs, 1980) került felhasználásra:

$$\mu_{oD} = -1 + 10^{[(T-460)^{-1.163} e^{6.9824-0.04658-\gamma_{API}}]}, \quad (23)$$

$$\mu_{ob} = 10.715(R_s + 100)^{-0.515} \mu_{oD}^{5.44(R_s+150)^{-0.338}}, \quad (24)$$

$$\mu_o = \mu_{ob} \left(\frac{p}{p_b} \right)^{2.6p^{1.187} e^{[-11.513-(8.98 \times 0.00001)p]}} . \quad (25)$$

Ahol:

μ_{oD}	“dead” olaj viszkozitás	[cP],
μ_{ob}	olaj viszkozitás buborékpointon	[cP],
μ_o	olaj viszkozitás telepállapoton	[cP].

Az olaj teleptérfogati tényezőjének számítása Standing módszerével (Standing, 1981) történt:

$$B_o = 0.9759 + (12 \times 10^{-5}) \left[R_s \left(\frac{\gamma_g}{\gamma_o} \right)^{0.5} + 1.25(T - 460) \right]^{1.2} \quad (26)$$

Ahol:

$$\gamma_o = \frac{141.5}{131.5 + \gamma_{API}}, \quad (27)$$

B_o	olaj teleptérfogati tényezője	[bbl/STB],
γ_o	olaj relatív sűrűsége	[-].
γ_g	gáz relatív sűrűsége	[-].

Végül az olaj sűrűségét az alábbi képlet alapján számíthatjuk:

$$\rho = \frac{62.4\gamma_o + 0.0136\gamma_g R_s}{B_o}. \quad (28)$$

A feltételezett telepállapot mellett 40 °API (824.19 kg/m³) sűrűségű 150 scf/STB (26.716 m³/m³) oldottgáz tartalmú olaj tulajdonságai:

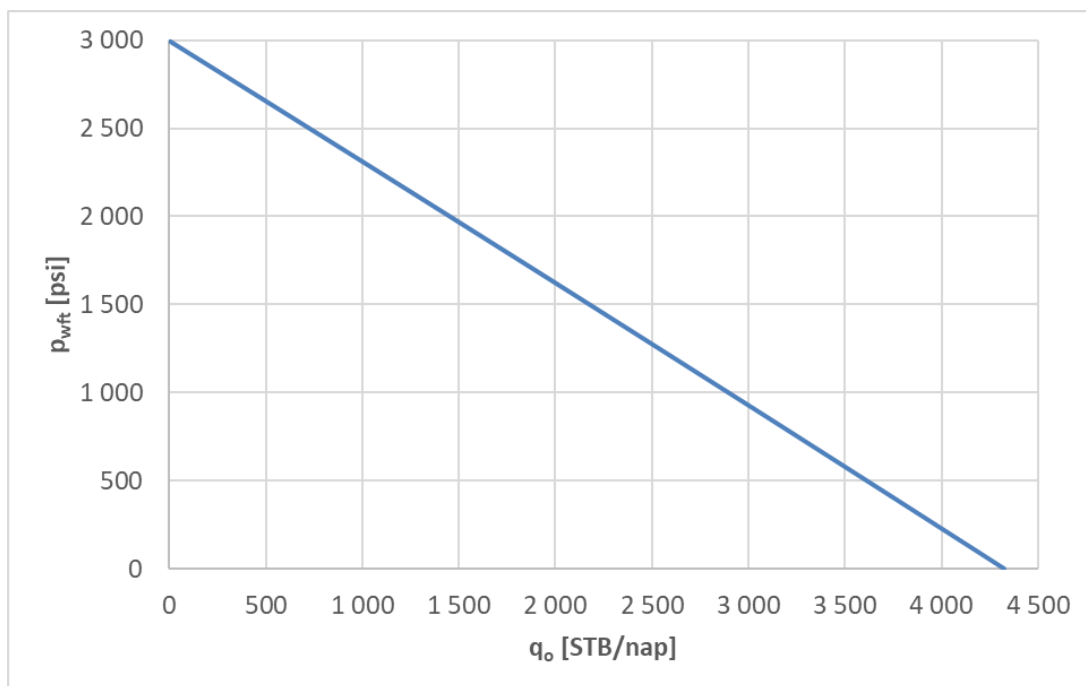
- olaj sűrűség (ρ_o) 45.409 lbm/ft³ (727.382 kg/m³),
- olaj teleptérfogati tényező (B_o) 1.163 bbl/STB (1.163 m³/m³),
- olaj viszkozitás (μ_o) 0.721 cP (0.721 mPas).

2.5.2 Hozamgörbék

A viszonyítás alapjául szolgáló kutak hozamgörbéinek számításához a PVT tulajdonságokon felül szükség van egyéb információkra is. Nyitott lyukszakaszos kiképzést feltételezve a 1.4-es fejezetben ismertetett hozamegyenlet használatához hiányzó paraméterek a következők:

- Abszolút átteresztőképesség (k) 50 mD ($5 \times 10^{-14} \text{ m}^2$),
- gyűjtőterület sugara (r_e) 1000 ft (304.8 m),
- kútsugár (r_w) 0.292 ft (0.089 m),
- termelési szakasz hossza (h) 25 ft (7.62 m).

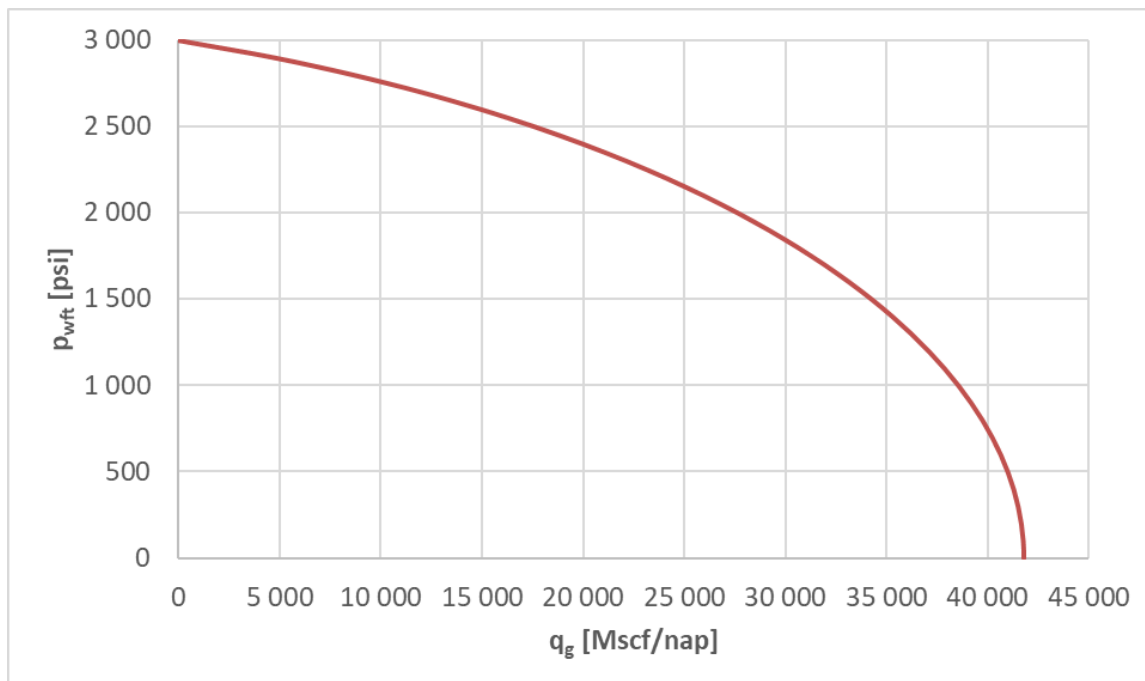
Az alfejezetben ismertetett paramétereket felhasználva az 1-3 egyenletekben, az alábbi hozamgörbe készíthető el a viszonyítási olajkút esetében:



2-9 ábra: Viszonyítási olajkút hozamgörbéje

A kút AOFPP értéke 4323.4 STB/nap ($687.69 \text{ m}^3/\text{nap}$), a diagram adatpontjait a „D-Melléklet„ tartalmazza.

Az alfejezetben ismertetett paramétereket felhasználva a 4-6 egyenletekben, az alábbi hozamgörbe készíthető el a viszonyítási gázkút esetében:



2-10 ábra: Viszonyítási gázkút hozamgörbéje

A kút AOFP értéke 41797.15 Mscf/nap (1183563 m³/nap), a diagram adatpontjait a „ D-Melléklet” tartalmazza.

A későbbiekben a bemutatott hozamgörbék szolgálnak alapul az egyes módszerek vizsgálata során. Rájuk, mint „nyitott lyukszakaszos kiképzés görbéi” címmel történik hivatkozás ezentúl.

2.6 Numerikus áramlástan szimuláció

Az értekezés céljának eléréséhez számos földalatti áramlástan problémát szükséges feloldani, többségüket bonyolult geometriai környezetben. Mivel a kőzetben történő folyadékfiltráció jelenségének vizualizálása eleve nehézkes így a dolgozatban felsorakoztatott problémák ábrázolásához numerikus áramlástan szimulációs (Computational Fluid Dynamics, azaz CFD) szoftver segítségével van szükségünk.

A CFD módszerek lényege, hogy az áramlási differenciálegyenletek megoldására - különböző diszkrétizációs eljárások segítségével - numerikus közelítést adnak. A közelítés lényegében a tér és az idő tartományokra (cellákra) való bontásán alapszik, a megoldás pedig így a tér és az idő diszkrét pontjaira történik (Ferziger & Perić, 1996) (Fletcher, 1990). A megoldás pontossága az alkalmazott diszkrétizációs eljárásoktól függ, ezek közül a leggyakrabban alkalmazottak a véges különbséges (Finite Difference, vagy FD), véges térfogatos (Finite Volume, vagy FV), illetve a véges elemes (Finite Elements, vagy FE) módszerek. Megfelelően nagy felbontás esetén a különböző módszerek eredményei konvergálnak. Bonyolult geometriák esetében a legegyszerűbb alkalmazhatóságot a véges elemes (FE) módszer nyújtja, melynek lényege a tér véges számú, egymással határfelületükön érintkező cellára való felbontás. A jellemző mennyiségek a cella középpontokra kerülnek meghatározásra (számítási csomópontok) - a határokon érvényben lévő értékek interpolációjával. A diszkrétizáció ez esetben a differenciálegyenletek felületi és térfogati integrálásával történik.

Jelen munkában a CFD szimulációk elvégzése az ANSYS programcsalád CFX moduljával történt. A modul a megoldási logikához idomultan három részből áll:

Előkészítő program (Preprocesszor)

Ebben a blokkban történik az áramlási tér felosztása, ami igen fontos folyamat, hiszen a megoldási pontosság a tér felbontásának finomságától függ. Nem megfelelő felosztás hibás eredményre, konvergencia problémákra vezethet. Fontos megemlíteni, hogy a felosztásnak felső korlátot ad a rendelkezésre álló számítási architektúra memóriája.

Megoldó Program (Solver)

A szoftver solver alatt történik a peremfeltételek definiálása, valamint a megoldási módszerek kiválasztása. A beállítások során körültekintően kell eljárni, mert azok nagyban befolyásolják a megoldás pontosságát és a számítási kapacitásigényt.

Eredmény Feldolgozó (Post processor)

A szimuláció eredményeinek grafikus és numerikus reprezentációját végzi ez a blokk. Az eredmények az áramlási tér minden egyes cellájának középpontjára kiszámított áramlási paramétereket tartalmazzák. A feldolgozó segítségével ezek az információk kényelmesen és egyszerűen hozzáférhetőek, vizualizálhatóak.

A numerikus áramlástani szimulációk eredményét kvantitatív és kvalitatív módon lehetséges értékelni. Elfogadható kvalitatív eredményhez elegendő a modell megfelelő geometriájú felépítése és a cellaháló kielégítő finomságú felosztása mellett a reális perem- és kezdeti feltételek megadása. Ahhoz, hogy a kvantitatív eredmény is elfogadható legyen megfelelő pontosságú kalibrációs mérésekre van szükség, amelyekkel a modell finomhangolása elvégezhető.

Jelen munka a szimulációkat csak az áramlási geometriák megfigyelésére és ezek szemléltetésére alkalmazza, vagyis csupán a kvalitatív eredményét használja fel annak. Ennek egyrészt az az oka, hogy a kalibráláshoz és a mennyiségi validáláshoz nem áll rendelkezésre laboratóriumi körülményeknek megfelelő mérési architektúra a geometriai komplexitás, valamint a térfogati korlátozások miatt. A felsorolt korlátok ugyan nem állnak fent telepi körülmények esetén, de a mérések ilyenkor túlságosan nagy hibával terheltek. A másik indok pedig - ahogyan az a későbbiekben is látszik - hogy a célja a szimulációs számításoktól való függetlenség volt.

3 Korábbi számolási módszerek

Yldiz 2006-os cikkében átfogó képet ad a perforálás hatását meghatározó, használatban lévő módszerekről (Yldiz, 2016). Tanulmányában a különböző módszerek szerint számolt szkin értékeket hasonlítja össze a mérési eredményekkel és így tesz ajánlást a különböző módszerek alkalmazására. A tanulmányban felsorolt módszerek és Yldiz megfigyelései:

- Hong (Hong, 1975), illetve Locke (Locke, 1981) nomogramjai: grafikusan alkalmazható módszerek, de használatuk körülményes és pontatlan.
- McLeod módszere (McLeod, 1983): az első analitikus módszer, helyenként túl vagy éppen alul becsüli a szkin tényezőt.
- Karakas és Tariq módszere (Karakas & Tariq, 1988): részben analitikus modell, mely áramlási szimulációkon alapul, jó pontosságú és széles körben alkalmazott.
- Jones – Slusser módszerén (Jones & Slusser, 1974) alapuló hibrid módszer (Yldiz, 2016): lényegében Karakas és Tariq módszerének alkalmazása Jones és Slusser - féle szkin felfogásban.
- SPAN program: végeelem alapokon nyugvó tervezőprogram, szintén Karakas és Tariq módszerét alkalmazza.

A korábban tárgyalt hozamegyenleteket megvizsgálva látható, hogy általános felfogás szerint az áramlást befolyásoló tényezők csak és kizárólag a darcy áramlástan tényezőre hatnak. Ennek ellentmond az a megfigyelés, hogy a szkin tényező nem független a térfogatáramtól, vagyis lennie kell áramlási sebesség függő komponensnek, melynek a nem-darcy tényező által kell hatnia. Sajnálatos módon Yldiz cikkében a módszerek pontosságának vizsgálatát (mért eredményekkel történő összevetését), csak az áramlási sebességtől független szkin tényező figyelembevételével végezte el. Hong és Locke módszerei nem adnak számítási eredményt az áramlásfüggő tagra, így azokra elfogadható Yldiz kapott eredménye. McLeod módszere azonban alkalmas ezen tényező meghatározására, emiatt a McLeod pontosságát/pontatlanságát illető kijelentéseket fenntartásokkal kell kezelni.

Mivel a fent vázolt módszerek többsége Karakas és Tariq módszerén alapul és a McLeod módszer pontatlansága nem nyert bizonyosságot, ezért a továbbiakban ezen két módszernek az elemzésére törekedtem.

3.1 McLeod módszere

McLeod módszerének alapja, hogy a perforációkat kutaknak felelteti meg és az 1.4-es fejezetben bemutatott hozamegyenlet alapján adja meg az extra nyomásesést. A megfeleltetés az alábbiak szerint történik:

- Termelési hossz (h_p) perforáció hossza (L_p),
- kútsugár (r_w) perforáció sugara (r_p),
- gyűjtőtér sugara (r_e) zúzott zóna sugara (r_c).

Az ezen megfeleltetéssel kapott nyomásesések leírása:

Olajkutakra:

$$p_{wfs} - p_{wf} = a \left(\frac{q_o}{ns \times h_p} \right)^2 + b \left(\frac{q_o}{ns \times h_p} \right), \quad (29)$$

$$a = \frac{2.30 \times 10^{-14} \times \beta B_o^2 \rho \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_c} \right)}{L_p^2}, \quad (30)$$

$$b = \frac{\mu_o B_o \left[\ln \frac{r_c}{r_p} \right]}{7.08 \times 10^{-3} \times L_p k_c}. \quad (31)$$

Gázkutakra:

$$p_{wfs}^2 - p_{wf}^2 = a \left(\frac{q_g}{ns \times h_p} \right)^2 + b \left(\frac{q_g}{ns \times h_p} \right), \quad (32)$$

$$a = \frac{3.16 \times 10^{-12} \times \beta \gamma_g T z \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_c} \right)}{L_p^2}, \quad (33)$$

$$b = \frac{1.424 \times 10^3 \mu_g T z \left[\ln \frac{r_c}{r_p} \right]}{L_p k_c}. \quad (34)$$

Ahol:

a	Perforációs csatornák nem-darcy tagja	$[\text{psixday}^2/\text{STB}^2]_{\text{oil}}, [\text{psi}^2 \times \text{day}^2/\text{Mscf}^2]_{\text{gas}}$
b	perforációs csatornák darcy tagja	$[\text{psixday}/\text{STB}]_{\text{oil}}, [\text{psi}^2 \times \text{day}/\text{Mscf}]_{\text{gas}}$
ns	lövessűrűség	[1/ft],
h_p	perforált szakasz hossza	[ft],
r_p	perforációs csatorna sugara	[ft],
r_c	zúzott zóna sugara	[ft],
k_c	zúzott zóna permeabilitása	[mD],
L_p	perforációs csatorna hossza	[ft],
p_{wf}	kúttalp nyomás	[psi],
p_{wfs}	nyomás a fakadó felszínen	[psi].

Az áramlás a perforációk környezetét elérve a kút tengelyére merőleges áramlásról a perforációk tengelyére merőleges áramlásra vált. Az irányváltás megkezdéséig a nyomásesést lehetséges az 1.4-es fejezetben bemutatott egyenletekkel számolni, ettől a ponttól pedig a térfogatáram megoszlik az egyes perforációs csatornák között. Mindezeket figyelembe véve a kapott hozamegyenletek a következők:

Olajkutakra:

$$p_r - p_{wf} = \left(A + \frac{a}{(ns \times h_p)^2} \right) q_o^2 + \left(B + \frac{b}{ns \times h_p} \right) q_o \quad (35)$$

Gázkutakra:

$$p_r^2 - p_{wf}^2 = \left(A + \frac{a}{(ns \times h_p)^2} \right) q_g^2 + \left(B + \frac{b}{ns \times h_p} \right) q_g \quad (36)$$

3.2 Karakas és Tariq módszere

Karakas és Tariq véges elemes szimulációkon alapuló, szemi-analitikus megoldást közölt a perforálás okozta szkin tényező meghatározására. Módszerük szerint a perforálás négy, külön is azonosítható szkin tényezőt eredményez, melyek szuperpozíciója a végleges hatás:

$$s_p = s_H + s_V + s_{wb} + s_c, \quad (37)$$

$$s_H = \ln\left(\frac{r_w}{r_{we}}\right), \quad (38)$$

$$s_{wb}(\theta) = c_1(\theta)e^{c_2(\theta)r_{wD}}, \quad (39)$$

$$s_V = 10^a h_D^{b-1} r_{pD}^b, \quad (40)$$

$$s_c = \frac{\delta_p}{L_p} \left(\frac{k}{k_c} - 1\right) \ln\left(\frac{r_c}{r_p}\right). \quad (41)$$

Ahol:

s_p	a perforálás okozta teljes szkin	[-],
s_H	horizontális szkin	[-],
s_V	vertikális szkin	[-],
s_{wb}	fúróluk szkin	[-],
s_c	zúzott zóna okozta szkin	[-],

$$r_{wD} = \frac{r_w}{L_p + r_w}, \quad (42)$$

$$r_{pD} = \left(\frac{r_p}{2\delta_p}\right) \left(1 + \sqrt{\frac{k_V}{k_H}}\right), \quad (43)$$

$$h_D = \left(\frac{\delta_p}{L_p}\right) \sqrt{\frac{k_H}{k_V}}, \quad (44)$$

$$r_{we}(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{4}L_p, & \theta = 0^\circ \\ \alpha_\theta(r_w + L_p), & \text{egyébként} \end{cases}, \quad (45)$$

$$a = a_1 \log_{10} r_{pD} + a_2, \quad (46)$$

$$b = b_1 r_{pD} + b_2. \quad (47)$$

2-1 táblázat: Konstansok Karakas és Tariq módszeréhez

Θ	α_Θ	c_1	c_2	a_1	a_2	b_1	b_2
0° (360°)	0.250	1.6×10^{-1}	2.675	-2.091	0.0453	5.1313	1.8672
180°	0.500	2.6×10^{-2}	4.532	-2.025	0.0943	3.0373	1.8115
120°	0.648	6.6×10^{-3}	5.320	-2.018	0.0634	1.6136	1.7770
90°	0.726	1.9×10^{-3}	6.155	-1.905	0.1038	1.5674	1.6935
60°	0.813	3.0×10^{-4}	7.509	-1.898	0.1023	1.3654	1.6490
45°	0.860	4.6×10^{-5}	8.791	-1.788	0.2398	1.1915	1.6392

3.3 A módszerek vizsgálata

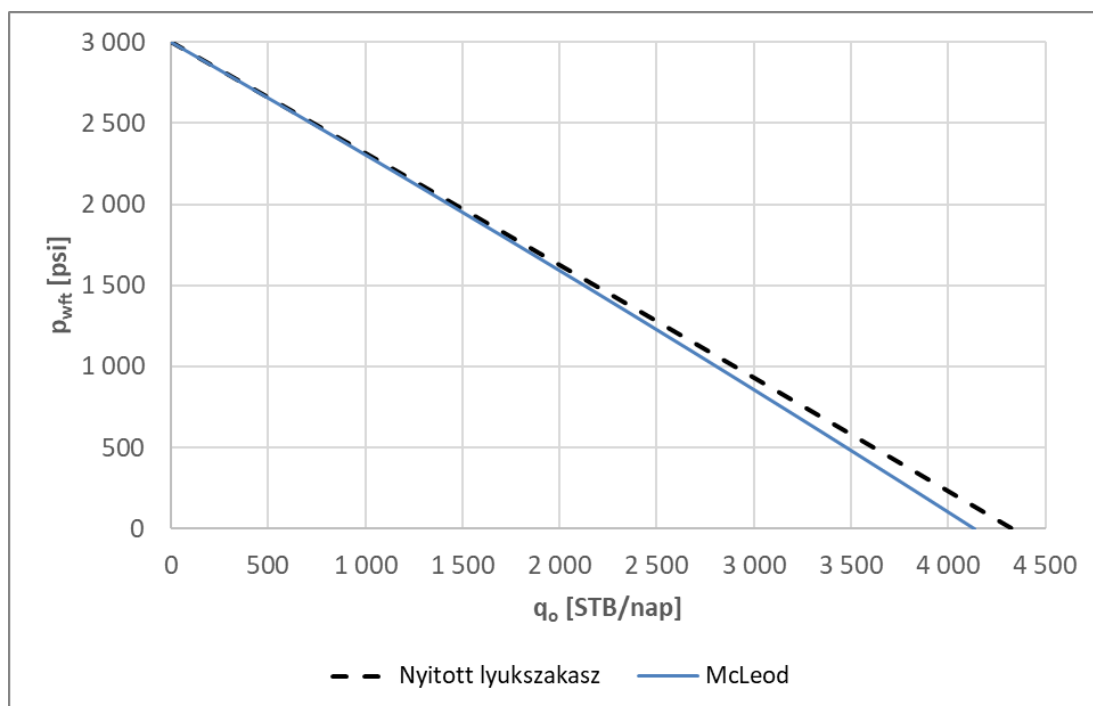
A módszerek vizsgálata a velük meghatározható hozamgörbék és a viszonykutak hozamgörbéinek összehasonlításán alapul. Ahhoz, hogy a bemutatott módszerekkel lehetőség nyíljon hozamgörbék számítására, szükséges egy általános perforálási technika felvétele, amivel meghatározható, hogy miképpen változik a viszonykutak hozamgörbéje a perforálást követően. Ezek a paraméterek a következők:

- Perforációs csatornák hossza (L_p) 1 ft (0.3048 m),
- lövéssűrűség (n_s) 5 spf (16.4 1/m),
- permeabilitás romlási aránya a zúzott zónában (α) 0.3,
- perforált hossz (h_p) 25 ft (7.62 m),
- perforációs csatornák sugara (r_p) 0.015 ft (0.46 cm),
- zúzott zóna sugara (r_c) 0.0567 ft (1.7 cm).

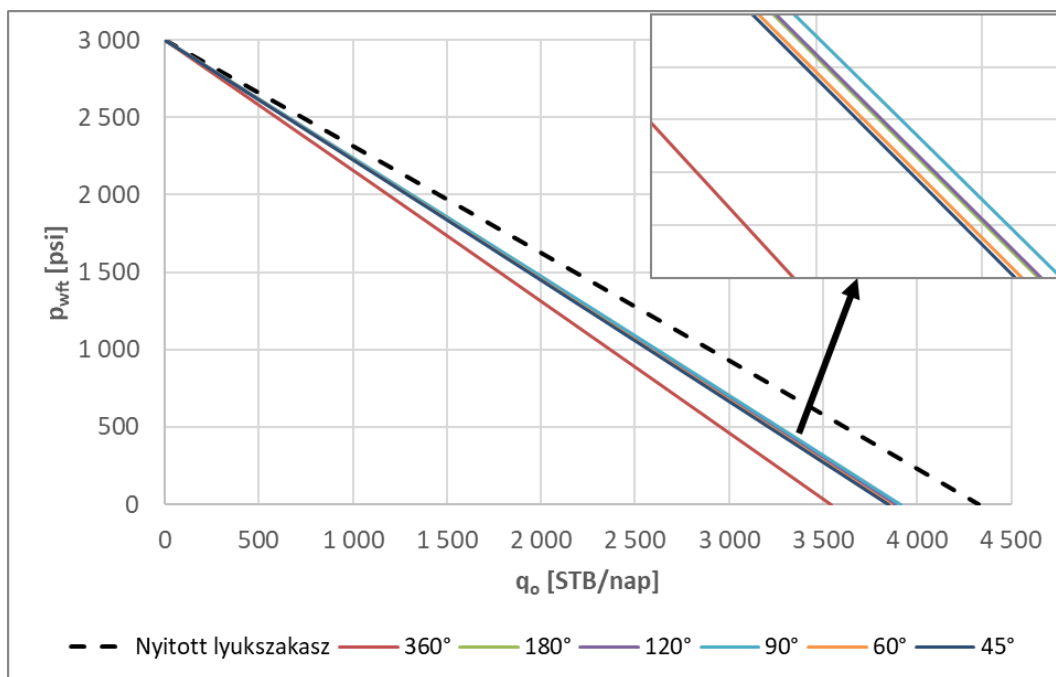
A Karakas és Tariq módszerével kapott szkin tényezők hozamegyenletbe való behelyettesítésével kerül meghatározásra a hozamgörbe minden egyes fázisszögre.

3.3.1 Olajkutak hozamgörbéi

A hozamgörbék olajkutak esetére:



3-1 ábra: Olajkút hozamgörbéi (McLeod)



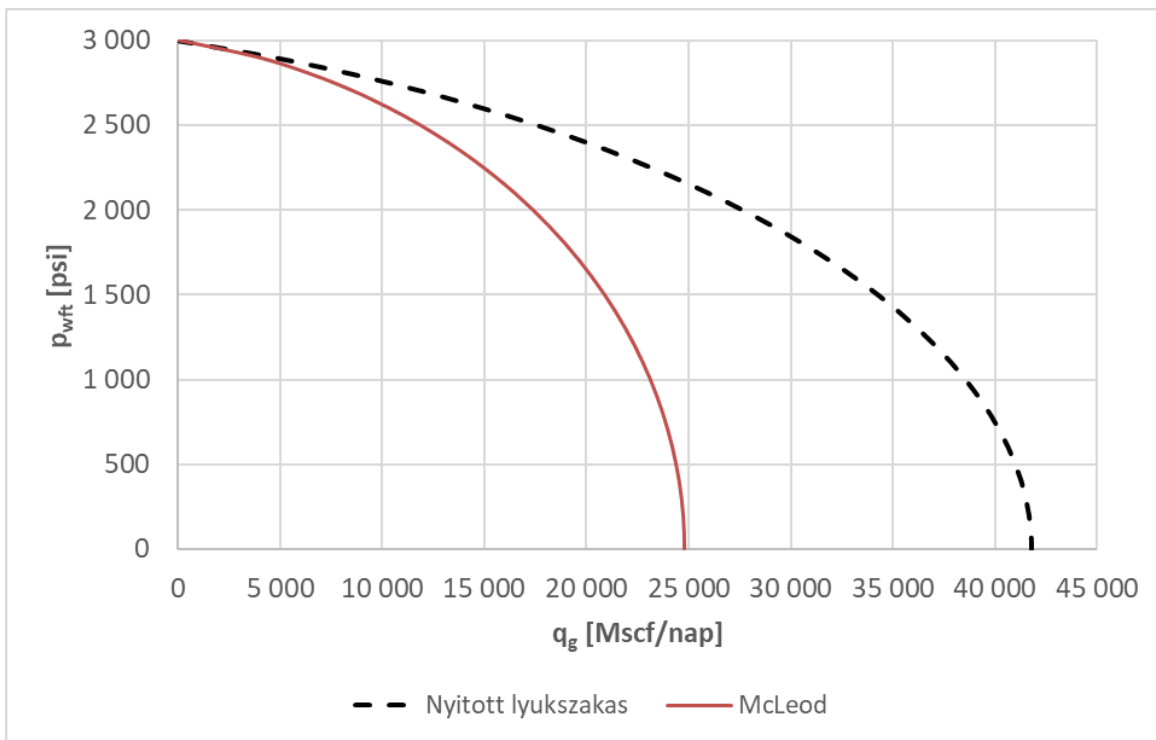
3-2 ábra: Olajkút hozamgörbéi (Karakas és Tariq)

A fenti két ábrán megfigyelhető szaggatott vonalak a nyitott lyukszakaszos kútkiképzést szemléltetik. Látható, hogy a McLeod módszerével kapott hozamgörbe marginális eltérést mutat az eredeti állapothoz képest (2-1 ábra). Ezzel szemben a Karakas és Tariq módszere alapján elkészült hozamgörbék szerint ez a különbség nem elhanyagolható. Utóbbi esetben jól látható, hogy a különböző fázisszögek hatása ugyancsak nem elhanyagolható (eltérő színű görbék). (2-2 ábra). Olaj áramlása esetén az áramlási körülmények kielégítik a Darcy áramlás feltételeit, ezért ebben az esetben a szkin tényező áramlási sebességtől függő része nem érzékelhető. Yıldız a tanulmányában a Karakas és Tariq módszerével meghatározott áramlási sebességtől független szkin tényezőt kielégítően pontosnak értékelte (Yıldız, 2016), így az ábrák tanulsága alapján arra a következtetésre juthatunk, hogy ezt McLeod módszere alul becsüli.

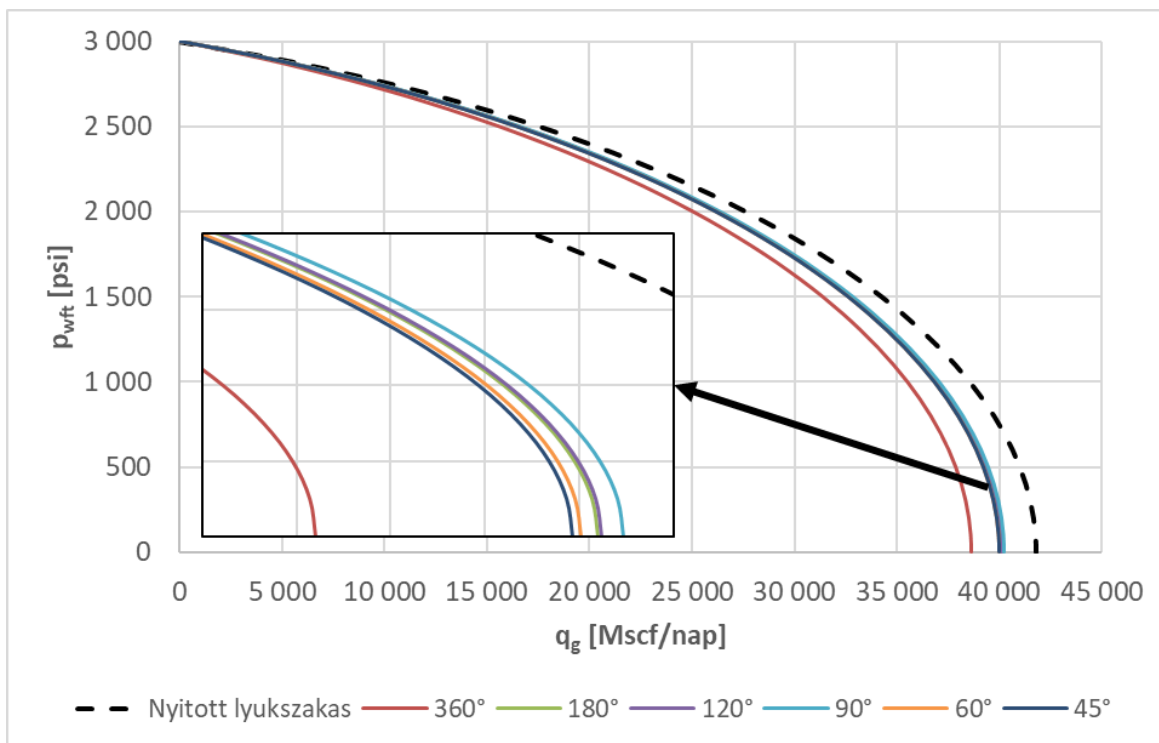
Karakas és Tariq módszere alapján a legjobb fázisszögnek 90° adódott, ami szembe megy az ipari tapasztalattal. Sajnálatos módon a módszer jellegéből fakadóan ennek a jelenségnek az okára a szerzők munkája nem ad választ.

3.3.2 Gázkutak hozamgörbéi

A hozamgörbék gázkutak esetében a következők:



3-3 ábra: Gázkút hozamgörbéi (McLeod)



3-4 ábra: Gázkút hozamgörbéi (Karakas és Tariq)

A két ábrán megfigyelhető szaggatott vonal ismét a nyitott lyukszakaszos kútkiképzést mutatja be. Szembetűnő, hogy az olajkutak esetében megfigyelhető jelenség ellenkezője jellemzi a gázkutak hozamgörbéit. Ebben az esetben McLeod módszerével (2-3 ábra) sokkalta nagyobb hatást tapasztalhatunk, mint Karakas és Tariq módszerével (2-4 ábra). Az eltérés oka az áramlási sebességtől függő szkin tényezőben keresendő. Gáz áramlása esetében az áramlási sebesség a közvetlen kútkörnyezetnél oly mértékben megnő, hogy a nem-darcy tényező számottevő nagyságú lesz, egyébként ez a görbülés oka is nagy hozamok esetében. A McLeod módszerénél tapasztalható nagy eltérés viszont óvatosságra int, elképzelhető, hogy az eltérés mértékét a perforációk körül kialakuló konvergencia túlbecslése (gyűjtőtér sugarának alul becslése) okozza.

3.3.3 Konklúzió

A szakirodalomban és az ipari alkalmazásban számos módszer létezik a perforálás hatásának meghatározására. Amint az előző fejezetből kiderült, ezen módszerek egy része mára már elavult. Yldiz munkájára alapozva két különböző módszer - McLeod, ill. Karakas és Tariq - részletesebb elemzését végeztem el. Az elemzésből a következők vonhatók le:

- A vizsgált módszerek ellentétes eredményt mutattak a perforálás hatásának nagyságrendjét illetően olaj- és gázkutak esetében is.
- McLeod módszere figyelmen kívül hagyja a fázisszög beáramlásra gyakorolt hatását, holott ez Karakas és Tariq szerint nem elhanyagolható nagyságú.
- Karakas és Tariq mind olaj, mind gáz áramlása esetében is a 90°-os fázisszöget értelmezte legmegfelelőbbnek a termelékenység szempontjából, azonban ez egyrészt ellentmond a szakmai tapasztalatoknak, másrészt pedig a jelenség oka a módszer jellegéből adódóan nem meghatározható.
- Karakas és Tariq figyelmen kívül hagyja a szkin tényező áramlási sebességtől függő részét, ami így nem befolyásolja a nem-darcy tényezőjét a hozamegyenletnek. Emiatt ezzel a módszerrel gázkutak esetében a perforálás hatását alábecsüljük.
- McLeod a vizsgálat alapján alulbecsüli a szkin tényező áramlási sebességtől független részét, ellenben - a konvergencia túlbecslése miatt - az áramlási sebességtől függő tagra pedig túl nagy értékeket ad.

A felsorolt okok alapján a két leírt módszer alkalmazását nem javaslom perforált kutak hozamegyenletének meghatározására.

4 Új módszer létrehozása

Az eddigiekben leírtak alapján könnyen belátható, hogy jelenleg nem áll rendelkezésre egy olyan metódus sem, amellyel kielégítő bizonyossággal meg lehetne határozni a perforálás hatását a szénhidrogén kutak termelékenységére. A következő fejezet célja egy olyan új modell bemutatása, amely a régi módszerek esetében leírt problémákat már nem tartalmazza. Az új módszernek a következő feltételeket kell kielégítenie:

Legyen analitikusan levezetett

Karakas és Tariq után a legmegfelelőbb fázisszög a viszonykutak esetében 90° -nak adódott. Teljes bizonyosságot csak akkor nyerne ez az indoklás, ha a szerzők módszerének alapjául szolgáló szimulációt erre külön is lehetne vizsgálni.

Vegyen figyelembe minden tervezési paramétert

A perforálás egyes paraméterei nem függetlenek egymástól, így igen fontos, hogy mindegyik hatása ismert legyen a beáramlásra. Ha csak egy paraméter is kívül esik a modell fókuszán (úgy ahogy a fázisszög a McLeod modell esetében), a termelés optimalizálása megoldhatatlanná válik.

Legyen alkalmazható olaj- és gázkutak esetében is

Ez egy rendkívül fontos kritérium, hiszen mindkét esetben szükség van a hozamot befolyásoló tényezők pontos ismeretére. A probléma gyökere a gáztermelés során bekövetkező nagy kútkörnyéki áramlási sebességben keresendő, aminek köszönhetően a Darcy törvény alkalmazhatósági feltételei sérülnek, így szükség van az ún. nem-darcy áramlási tényező bevezetésére. Ez alapján a feltétel lényegében kielégíthető a perforálás nem-darcy tagra gyakorolt hatásának figyelembevételével.

4.1 Megfontolási alapok

A termelékenységet befolyásoló tényezőket a szkin hatást bemutató ábra (1-7 ábra) alapján az általuk okozott extra nyomáseséssel is jellemezhetjük. Ez a nyomásesés az áramlási út egyes szakaszain eltérő, emiatt érdemes az áramlási utat a jellemző nyomásesést befolyásoló hatások szerint felbontani. A felbontás az áramlás irányában a következő:

1. Nyomásesés a kút közvetlen környezetéig (kút tengelyére merőleges áramlás).
2. Nyomásesés a perforációk közvetlen környezetében (perforációk tengelyére merőleges áramlás)
3. Nyomásesés a zúzott zónában.
4. Nyomásesés a perforációs csatornában.

Mint ahogyan az a számos szkin elméletből is kitűnik (A-Melléklet), az egyes hatások nem függetlenek egymástól, ezért ezeket a hatásokat nem is lehetséges elszigetelten vizsgálni. Például az áramlás első részének hossza attól függ, hogy hol vált az áramlás irányt a kút tengelyére merőleges áramlásról a perforáció tengelyére merőleges áramlásra, ez azonban nem független a perforáció körüli és perforáción belüli nyomáseséstől. Emiatt célszerű a vizsgálatot az áramlás irányával ellentétesen végezve haladni, így visszafejtve a teljes hatást.

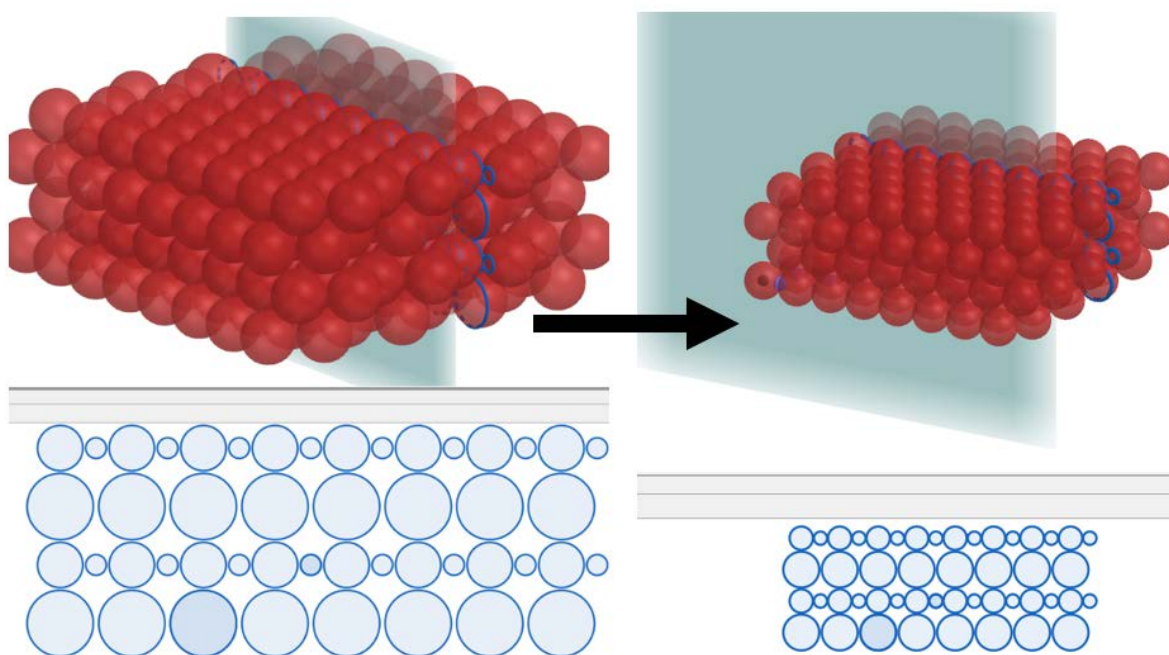
4.1.1 Nyomásesés a perforációs csatornában

A perforálás hatását vizsgáló szerzők szinte teljes mértékben elhanyagolják a csatornában fellépő áramlási veszteségeket. Úgy vélik, hogy az egyes csatornában a teljes térfogatáramnak csak a töredéke áramlik. Mivel a vezetőképességük többszöröse a kőzet vezetőképességének, így a rajtuk keresztül fellépő veszteség a teljes veszteséghez képest elhanyagolható.

Azonban, ha a fluidum áramlás egyéb szakaszaira is hatással lehet ez a veszteség, ez az elhanyagolás már korántsem ilyen kézenfekvő. Feltéve, hogy az áramlási irányváltás függ az egyes részeknél fellépő nyomásveszteségektől, a csatornák áramlásra gyakorolt ellenállása közvetlenül befolyásolja az egyes szakaszok hosszát. Ennek megfelelően eme jelenséget sokkal körültekintőbben kell vizsgálni.

4.1.2 Nyomásésés a zúzott zónában

A perforációs csatornák körül kialakuló - csökkent áteresztőképességű – zúzott réteg hatása szinte teljesen megfeleltethető (analóg) a nyitott lyukszakaszos kútkiképzésnél kialakuló szennyezett zóna hatásának. A nyomásésésre gyakorolt hatás így számolható a Hawkin (Hawkins Jr., 1956) által megadott eljárás alapján. A problémát nem a számolás, vagy a figyelembevétel nehézsége adja, hanem az áteresztőképesség-romlás mibenléte. Pucknell és Behrmann (Pucknell & Behrmann, 1991) szerint az áteresztőképesség romlása mellett a zúzott zónán belüli porozitás alig változik. Ezt azzal magyarázták, hogy a perforálás hatására a közzszemcsék elaprózódnak és így csökken a pórustorok átmérője.



4-1 ábra: Szemcseméret változás hatása

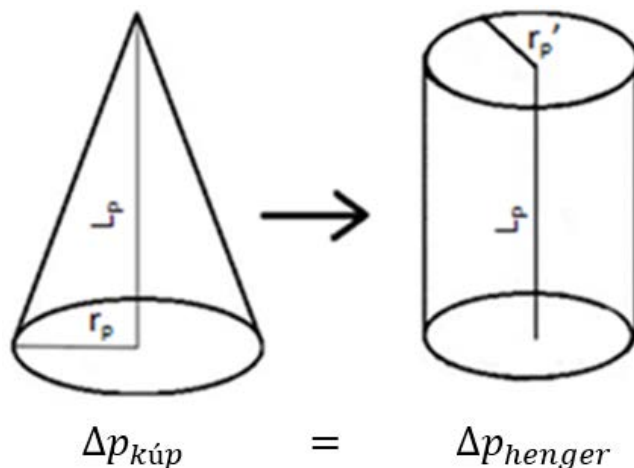
Ahogy azt a fenti ábra (3-1 ábra) is mutatja, a szemcseméret csökkenés elméletileg valóban változatlan porozitást (üres térrész aránya az egészhez) eredményez kisebb pórustorok átmérővel. Ha a permeabilitás csökkenés ennek a jelenségnek tudható be, akkor ez azt jelenti, hogy adott esetben az ebből fakadó nyomásésést nem lehet teljesen csökkenteni a kútkörnyék savas rétegkezelésével.

4.1.3 Nyomásesés a perforációk közelében

A perforációk környékén kialakuló nyomásvesztés meghatározásához két jelenséget kell figyelembe venni: egyrészt a perforációs csatornák alakja nem hengeres, hanem inkább kúpos (Snider, et al., 1997), másrészt a csatornák korlátozzák egymás gyűjtőterét. Mindkét hatás befolyásolhatja az áramlást, ezért vizsgálatuk elengedhetetlen.

Alaki hatás:

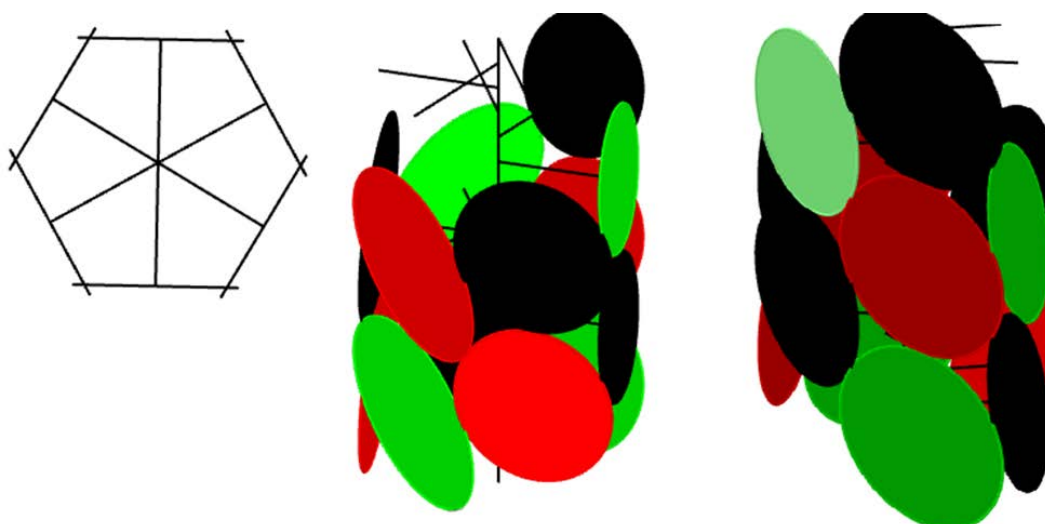
Az áramlási egyenletek hengerkoordináta rendszerben kifejtve is alkalmasak kutak hozamának leírására. Az egyenleteket felhasználva feltételezzük, hogy a gyűjtő henger alakú, így a kapott megoldás is hengeres testre lesz érvényes. Ehhez meg kell találni azt a transzformációt, amivel az alaki különbözőségekből fakadó eltérés eltűnik. Vagyis meg kell keresni azt a hengert, amelyre a nyomásvesztés megegyezik az azonos magasságú kúpéval. Ennek a hengernek a sugara lesz az úgynevezett egyenértékű sugár (3-2 ábra).



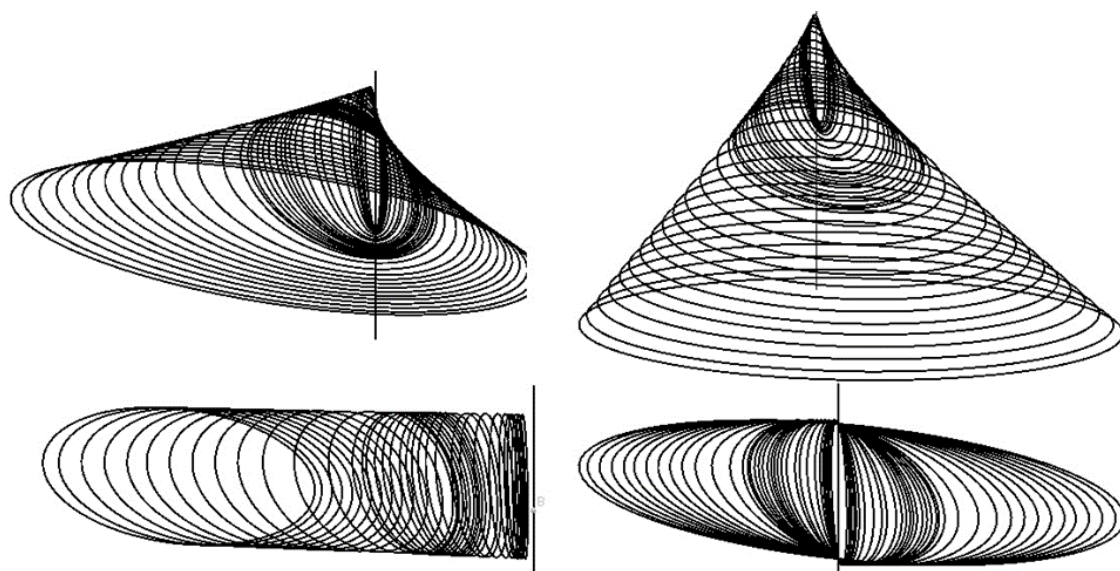
4-2 ábra: Egyenértékű sugár

Korlátozó hatás:

A kutak hozamegyenletének igen fontos paramétere a gyűjtőtér sugara. Mivel a perforációs csatornák körül kialakuló nyomásvesztéseket szintén a hozamegyenletekkel lehet meghatározni, ezért ebben az esetben is kritikus a gyűjtőtér nagyságának ismerete. A paraméter fontossága a McLeod módszer elemzése során szerzett tapasztalatokból is látszódott. A szerző a gyűjtőtér sugarát egyszerűen a zúzott zóna sugarának felelteti meg, ezzel nagymértékben túlbecsüli a nem-darcy tagot a hozamegyenletben (2.3.2 fejezet).

4-3 ábra: Perforációk korlátozó hatása ($\theta = 60^\circ$)

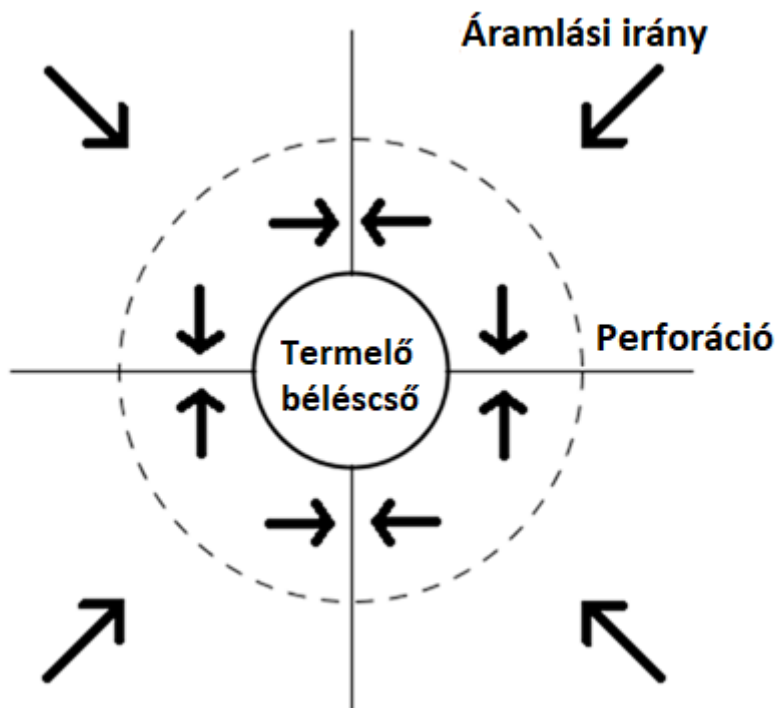
Minden egyes csatorna gyűjtőterét a szomszédos csatornák korlátozzák - mintegy fojtó hatásként. A perforációk gyűjtőterének a perforációk tengelyére vett merőleges síkmetszetét a fenti ábra mutatja (3-3 ábra). Látható, hogy a gyűjtőtér síkmetszete ellipszis, amit a hat szomszédos perforáció gyűjtőtere határol le. Ugyanez a jelenség figyelhető meg a szomszédos termelő kutak esetében is. A gyűjtőtér alakjának meghatározásához meg kell keressük a szomszédos perforációktól egyenlő távolságra lévő pontokat, melyekkel lehetséges a térrész lehatárolása.

4-4 ábra: Perforációs csatorna gyűjtőtere ($\theta = 60^\circ$)

A fenti ábra (3-4 ábra) egy csatorna gyűjtőterének alakját mutatja be, megfigyelhető, hogy ez az alak igen sajátos. További fázisszögek esetére a gyűjtőterek alakját a „H-Melléklet” tartalmazza.

4.1.4 Nyomáskereső a kút közvetlen környezetéig

Az áramlási nyomásvesztéget a kút tengelyére merőleges irányú áramlási szakaszban matematikailag igen könnyű meghatározni, csupán az irányváltási zónáig kell felírni a kút hozamegyenletét. Ez olyan, mintha egy kiterjesztett kútsugárra számolnánk a hozamot.



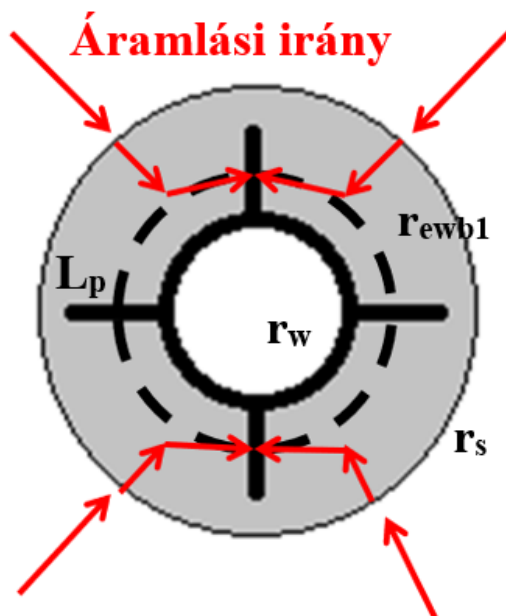
4-5 ábra: Irányváltás az áramlásban a kút körül

A nehézséget a veszteség meghatározásában az irányváltás helye okozza. Az nyilvánvaló, hogy a teljes térfogatáram nem egy diszkrét pontban változtatja meg áramlási irányát, hanem folyamatosan, viszont a számíthatóság érdekében szükséges azon pont meghatározása, amelyre a hatás megegyező.

4.1.5 Az elárasztott zóna hatása

További megfontolás tárgyát képezi az, hogy miként alakul a nyomásesés, ha az elárasztott zóna hatását is figyelembe vesszük. Két lehetséges eset fordulhat ilyenkor elő.

A szennyezett zóna túlnyúlik a perforációs csatornákon:

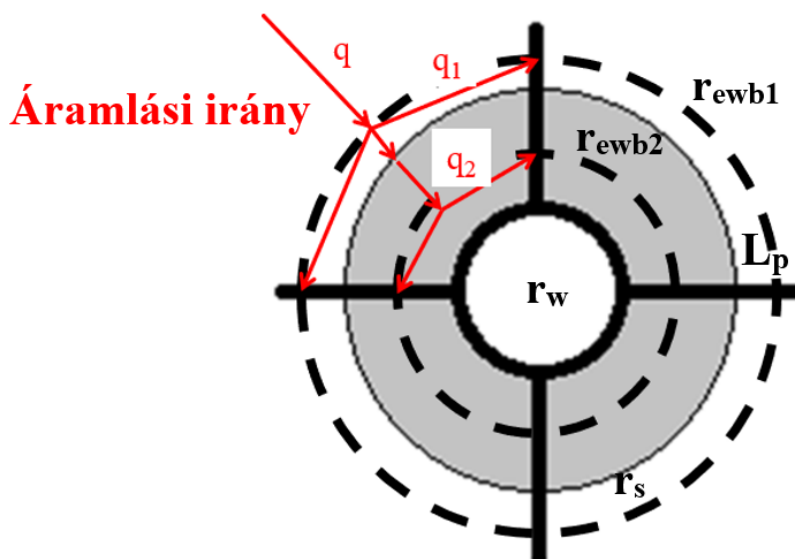


4-6 ábra: Áramlás a kúthoz (szennyezett zóna túlnyúlik a perforációkon)

Ebben az esetben a nyomásesések alakulása a következő:

1. Nyomásesés a szennyezett zónáig (kút tengelyére merőleges áramlás).
2. Nyomásesés az irányváltásig (kút tengelyére merőleges áramlás a szennyezett zónában).
3. Nyomásesés a perforációk közvetlen környezetében (perforációk tengelyére merőleges áramlás a szennyezett zónában)
4. Nyomásesés a zúzott zónában.
5. Nyomásesés a perforációs csatornáknban.

A perforációs csatornák túlnyúlnak a szennyezett zónán:



4-7 ábra: Áramlás a kúthoz (perforációk túlnyúlnak a szennyezett zónán)

Ebben az esetben a nyomásesés alakulása már lényegesen bonyolultabb, az áramlást több részre kell bontani, mivel két részletben történik meg az irányváltás:

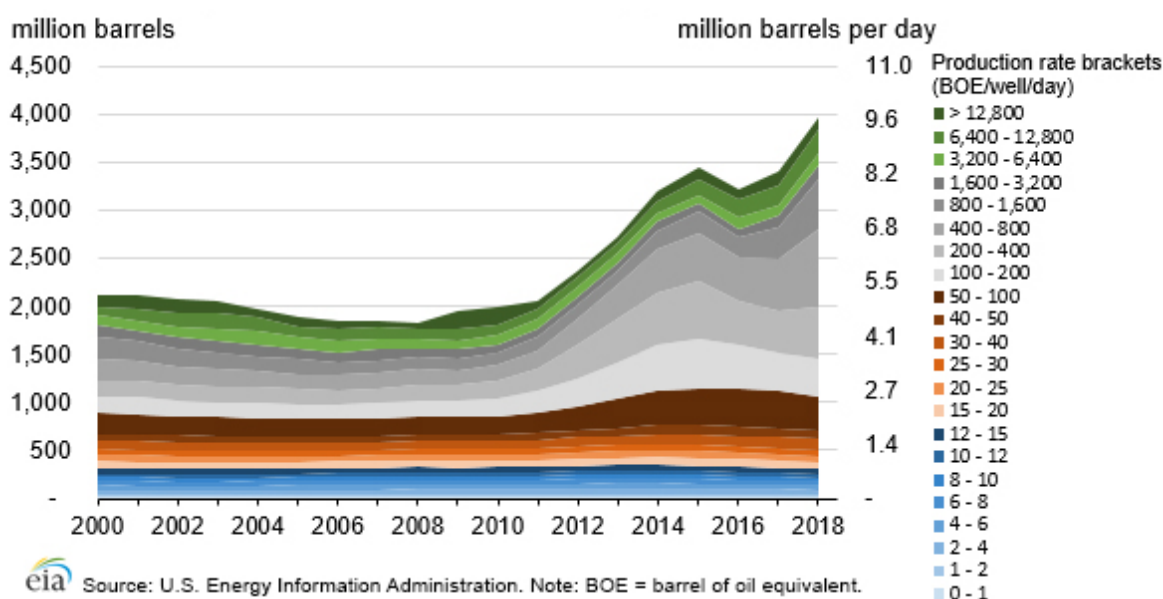
1. Nyomásesés a kút közvetlen környezetéig (kút tengelyére merőleges áramlás) [q].
2. Első irányváltás utáni nyomásesés ($\Delta p_{q_1} = \Delta p_{q_2}$):
 - a. Δp_{q_1} :
 - i. Nyomásesés a perforáció közvetlen közelében (perforációk tengelyére merőleges áramlás) [q_1]
 - ii. Nyomásesés a zúzott zónában [q_1].
 - iii. Nyomásesés a perforációs csatornában [q_1].
 - b. Δp_{q_2} :
 - i. Nyomásesés a második irányváltásig (kút tengelyére merőleges áramlás a szennyezett zónában) [q_2].
 - ii. Nyomásesés a perforációk közvetlen közelében (perforációk tengelyére merőleges áramlás a szennyezett zónában) [q_2].
 - iii. Nyomásesés a szennyezett zúzott zónában [q_2].
 - iv. Nyomásesés a perforációs csatornában [q_2].

Az áramlás szétválásának úgy kell történnie, hogy $q = q_1 + q_2$ és $\Delta p_{q_1} = \Delta p_{q_2}$ feltételek egyszerre teljesüljenek.

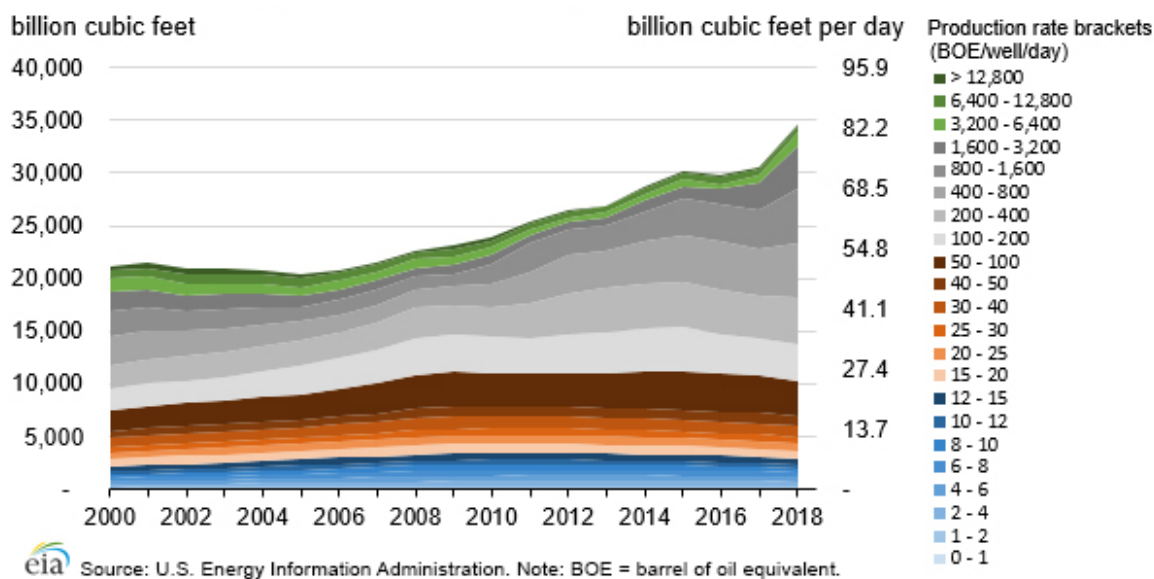
4.2 Nyomásesés a perforációs csatornákon

A perforációk belsejében jelentkező áramlási veszteség nagymértékben befolyásolhatja a végleges hatást, mivel az áramlás irányváltásának helye az irányváltás utáni nyomásveszteségek függvénye. A perforálás okozta teljes nyomásveszteséghez képest a csatornákon belüli veszteség elhanyagolhatóan kicsi ugyan, de a perforációk közvetlen környezetében jelentkező nyomásveszteséghez képest ez nem bizonyított. Jelen alfejezet célja bemutatni, hogy adott hosszúságú kőzetben való áramláshoz képest a perforációs csatornában lévő áramlás során jelentkező veszteség jelentéktelen, így bizonyítva, hogy a perforációk végtelen vezetőknek tekinthetők a szűk környezetükhöz képest.

A vizsgálat megvalósítása érzékenységi vizsgálatok elvégzésével történt, amelyek bemutatják az egyes kulcsparaméterek alakulását a lehetséges hozamok függvényében - különböző mennyiségű perforációs csatornaszám mellett. A helyes kiértékeléshez fontos, hogy reális tartományon belül történjenek a vizsgálatok, így szükség van ezen tartományok meghatározására is. Az alábbi ábrák az Egyesült Államok olaj- illetve gázkútjainak termelését mutatják be évekre, bontva hordó olaj egyenértékben.



4-8 ábra: USA olajtermelése éves bontásban



4-9 ábra: USA gáztermelése éves bontásban

Az ábrák színek alapján elmondható, hogy léteznek olajkutak 2000 m³/nap-os termeléssel is, de jellemzően 500 m³/nap érték alattiak az ütemek (1 BOE = 1.18598 m³ olaj esetén). Gázhozamok esetében a maximum 2×10⁶ m³/nap körüli érték (70.8 MMscf/day), többsége viszont 5×10⁵ m³/nap (17.7 MMscf/day) alatti (1 BOE = 165.4 m³ gáz esetén). Fontos kiemelni, hogy a maximum körüli értékek horizontális és/vagy repesztett kutakhoz tartoznak és nem függőleges, perforált kutakhoz. A vizsgálathoz készült számítások a viszonykutak adataival történtek, olaj áramlása esetében 0-500 m³/nap (3144.9 STB/nap) tartományban, gáz esetén pedig 0-5×10⁶ m³/nap (176.98 MMscf/nap) tartományban.

4.2.1 Áramlás viselkedésének vizsgálata

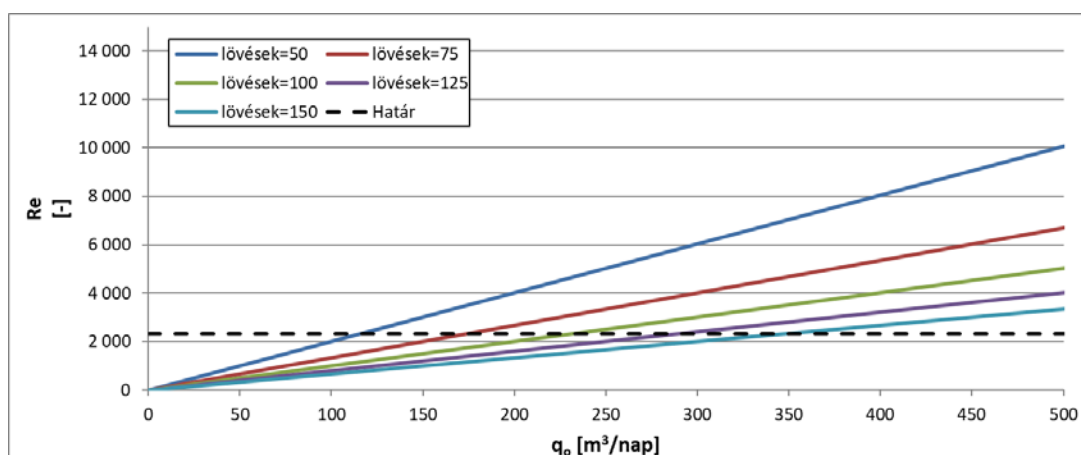
A nyomásesés analízishez - első lépésként - szükséges az áramlási kép ismerete a csatornákon belül - különböző kúthozamokra. Lamináris és turbulens áramlás megkülönböztetésére a Reynolds szám használatos (Sommerfeld, 1908), amelynek az elfogadott, (megközelítően) 2300-as értéke a lamináris áramlás felső határértéke (Stokes, 1851). Mivel az alfejezeti hivatkozások SI mértékegységrendszert alkalmaznak, ezért célszerűen a bemutatott levezetések is SI-ben vannak.

$$Re = \frac{dv\rho}{\mu} = \frac{2q\rho}{\mu r\pi} \quad (48)$$

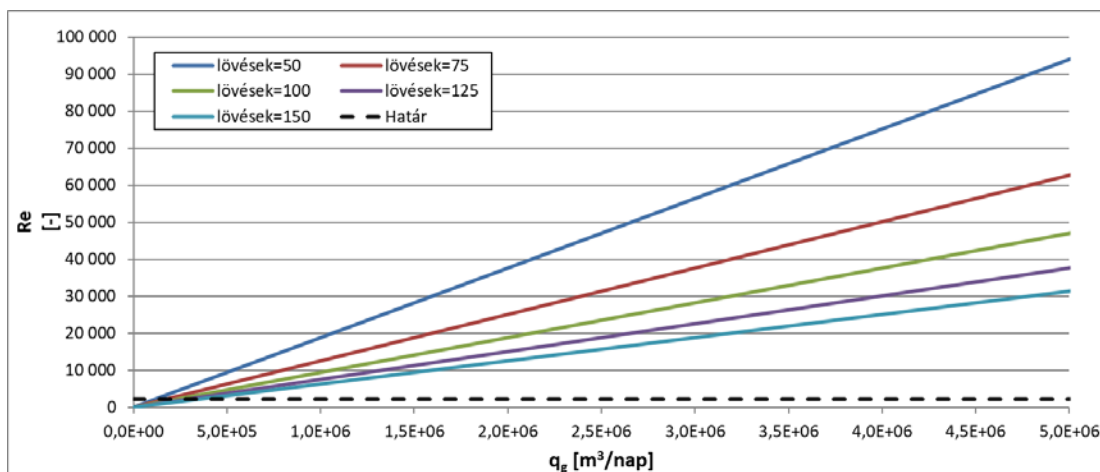
Ahol:

Re	Reynolds szám	[-],
d	áramlási cső átmérője	[m],
μ	folyadék viszkozitása	[Pas],
ρ	folyadék sűrűsége	[kg/m ³],
v	áramlási sebesség	[m/s],
q	térfogatáram	[m ³ /s],
r	áramlási cső sugara	[m].

A következő ábrák (3-10 és 3-11 ábrák) olaj- és gáztermelés esetében mutatják be a Reynolds szám alakulását különböző lövésszám esetében.



4-10 ábra: Reynolds szám alakulása olaj áramlása esetében



4-11 ábra: Reynolds szám alakulása gáz áramlása esetében

Szaggatott vonalak jelölik az ábrákon a lamináris áramlás határértékét. Az érzékenység vizsgálatok alapján elmondható:

- A lövésszám növelése a Reynolds szám csökkenéséhez vezet, mivel kevesebb folyadék áramlik át egy csatornán.
- Olaj áramlása esetén mind lamináris, mind turbulens áramlás is előfordulhat.
- Gáz áramlása esetén nagyrészt csak turbulens áramlás alakulhat ki.

Az áramlási nyomásveszteség meghatározásához szükséges a súrlódási tényező ismerete, ami a következők szerint számolható:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (49)$$

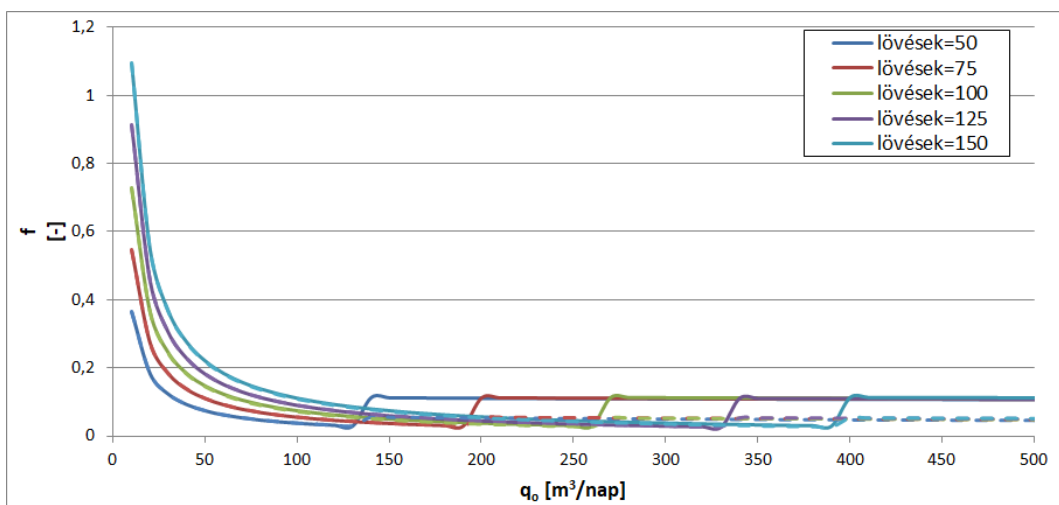
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(2,51 \frac{Re}{f} + \frac{1}{3,715} \frac{kr}{d} \right) \quad (50)$$

Ahol:

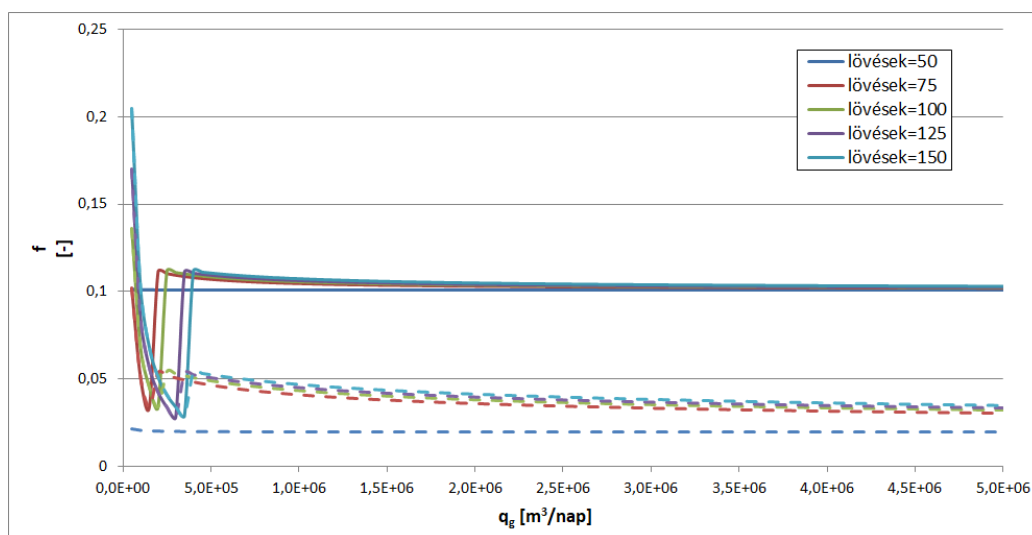
f	súrlódási tényező	[-],
kr/d	relatív csőerdesség	[-].
kr	szemcseméret	[m].
d	cső átmérő	[-].

Az előbbi (49) egyenlet lamináris áramlás mellett igaz, míg az utóbbi (50) turbulens áramlás esetében. Turbulens áramláskor a súrlódási tényező meghatározásához a „cső” relatív érdességének ismerete szükséges. A homokszemcsék mérettartománya rendszerint 10^{-3} m és 10^{-5} méter között van. Feltételezve, hogy a perforációk belsejében ezek a szemcsék

okozzák az érdességet, az előző érzékenységi vizsgálatok elvégezhetőek a súrlódási tényezőre is (3-12 és 3-13 ábrák).



4-12 ábra: A súrlódási tényező alakulása olaj áramlása esetében



4-13 ábra: A súrlódási tényező alakulása gáz áramlása esetében

A két ábrán a folytonos vonal 10^{-3} méteres szemcséket a szaggatott vonal pedig 10^{-5} méteres szemcséket feltételez. Teljesen kialakult turbulens áramlás esetében a súrlódási tényezők aránya:

$$\frac{f_1}{f_2} = \log\left(\frac{kr_1}{kr_2}\right) \quad (51)$$

4.2.2 Nyomásveszteségek összehasonlítása

A vizsgálat alapja a perforációs csatornákon vett és a környező kőzetben előforduló nyomásesések összehasonlítása. Az alkalmazott feltételezések a következők:

- Perforációkban történő nyomásveszteség (Δp_1) számolása során feltételezzük, hogy a termelvény a perforációk elején lép be és semmilyen áramlás nincs a perforációk körül.
- A kőzetben vett nyomásesés (Δp_2) meghatározásánál nyitott lyukszakaszos kiképzést feltételezünk.

Lamináris áramlás esetében a perforációs csatornákból a nyomásesés a Hagen-Poiseuille egyenletek segítségével határozható meg (Stokes, 1845).

Olaj esetén:

$$q = \frac{\pi r_r^4}{8\mu L} \Delta p \quad (52)$$

Gáz esetén:

$$q = \frac{(\pi r_r^4)}{16\mu L} \left(\frac{p_1^2 - p_2^2}{p_1} \right) \quad (53)$$

Turbulens áramlás esetén a nyomásveszteségek a következők szerint határozhatók meg (Stokes, 1851):

Olajra.

$$\Delta p_t = f \frac{L}{2r} \rho \frac{v^2}{2} \quad (54)$$

Gázra:

$$p_1^2 - p_2^2 = f \frac{L}{2r} p_1 \rho_1 v^2 \quad (55)$$

Ahol:

p_1	belépő oldali nyomás	[bar],
p_2	kilépő oldali nyomás	[bar],
L	cső hossz	[m].
Δp_t	nyomáskülönbség az áramlási cső végei között	[bar]

A kőzetben lévő nyomásveszteség meghatározása az első fejezetben bemutatott hozamegyenletek átalakításával lehetséges (az összehasonlíthatóság végett SI rendszerben):

Olajra:

$$p_e - p_{wf} = \frac{\mu q}{\pi h k} \left(\ln \left(\frac{Lp + r_w}{r_w} \right) + \frac{\beta q \rho k}{2\pi \mu h} \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{Lp + r_w} \right) \right) \quad (56)$$

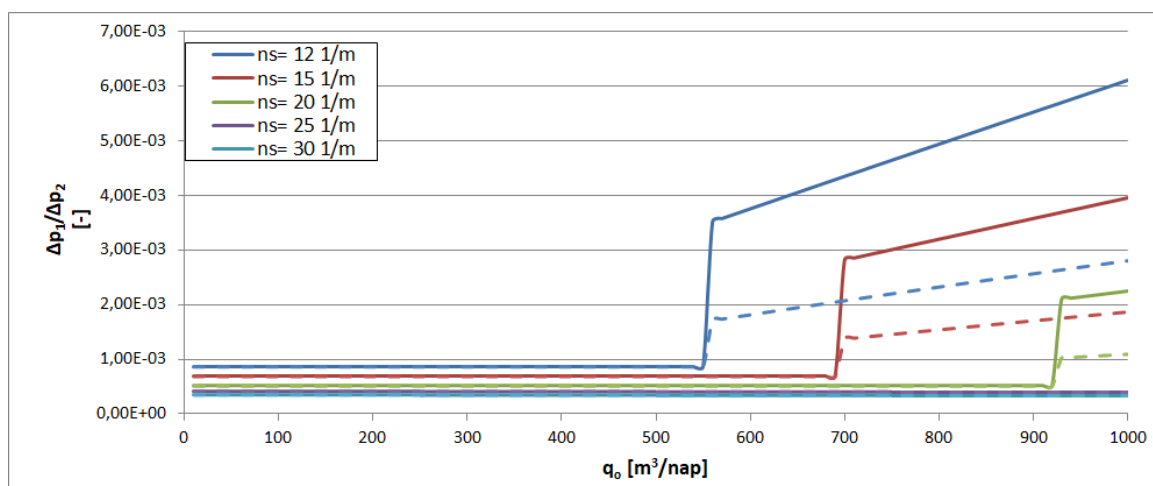
Gázra:

$$p_e^2 - p_{wf}^2 = \frac{\mu q p_e}{\pi h k} \left(\ln \left(\frac{Lp + r_w}{r_w} \right) + \frac{\beta q \rho k}{2\pi \mu h} \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{Lp + r_w} \right) \right) \quad (57)$$

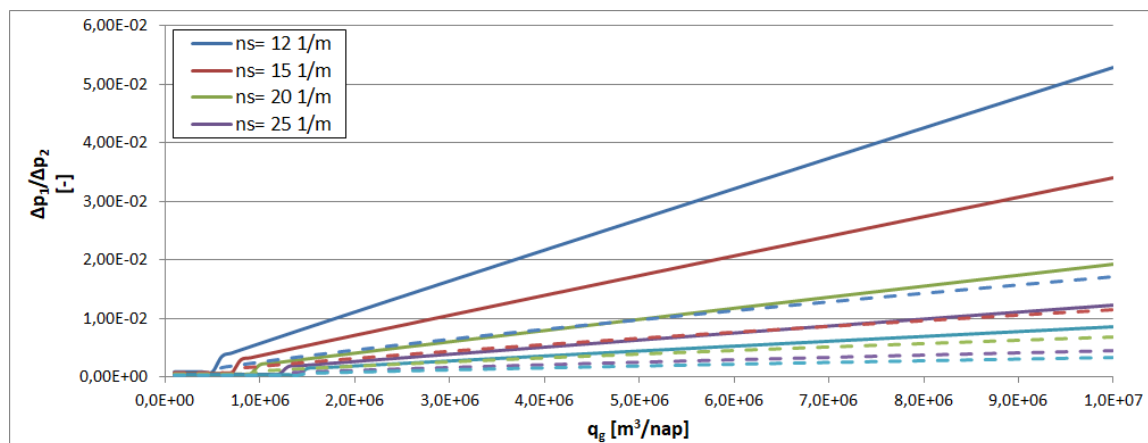
Ahol:

p_e	gyűjtőtér szélén lévő nyomás	[bar],
p_{wf}	kúttalp nyomás	[bar],
L_p	perforációk hossza	[m].
r_w	kút sugara	[m].
μ	folyadék viszkozitása	[Pas],
ρ	folyadék sűrűsége	[kg/m ³].
k	réteg permeabilitása	[m ²].
β	béta tényező	[-].
h	perforált kútszakasz hossza	[m].

A felsorolt egyenletek segítségével elvégezve az érzékenységi vizsgálatokat - a nyomásveszteség-arányok és a hozam között - az alábbi eredményt kapjuk.



4-14 ábra: Nyomásveszteségek aránya olaj áramlása esetén



4-15 ábra: Nyomásveszteségek aránya gáz áramlása esetén

Az ábrákon az eddigiekkel ellentétben a színek a méterenkénti lövesszámot jelölik. Az ábrák alapján könnyen belátható, hogy - a reális áramlási tartományon belül (olaj esetében 0-500 m³/nap, gáz esetében pedig 0-5×10⁶ m³/nap)- a perforációs csatornáknban a nyomásveszteség nem éri el a kőzetben bekövetkező nyomásveszteség 1%-át sem. A diagrammok adatait a „G-Melléklet” tartalmazza.

4.2.3 Konklúzió

Az alfejezetben felvonultatott érzékenységi vizsgálatok alapján levonható következtetések az alábbiak:

- Mind olaj, mind gáz áramlása esetében kialakulhat turbulens áramlás a csatornában a reális áramlási tartományokon belül.
- A súrlódási tényező nagyságrendje 0.1 és 0.01 közé tehető a perforációk belsejében.
- A perforációk száma nagy hatással van a csatornában bekövetkező nyomásvesztésre.
- A reális tartományon belül a perforációkban vett nyomásesés nem éri el a kőzetben létrejövő nyomásesés 1%-át.

Fontos kihangsúlyozni, hogy a bemutatott hozamtartomány igen nagy, a tartomány magasabb értékeit olyan kutak produkálják, amelyek vízszintes kiképzésűek, ill. repesztéssel serkentettek. Ezek az esetek kívül esnek jelen kutatásaim fókuszán. A reális hozam vertikális perforált kutak esetében a felvázolt hozamtartomány felére tehető.

Ki kell emelni, hogy magasabb hozamokat csak nagyobb lövésszámmal lehetséges elérni.

A bemutatott eredmények alapján az is deklarálnak, hogy a perforációs csatornák végtelen vezetőknak tekinthetők a környezetükben lévő kőzethez képest.

4.3 Nyomásesés a zúzott zónában

Pucknell és Behrmann méréseiből levont következtetés az, hogy az áteresztőképesség csökkenését a szemcsék elaprózódása okozza. Ez a megállapítás azon alapul, hogy azonos geometriai elrendezés mellett a porozitás változatlan marad, akármilyen méretűek is a szemcsék. Az elmélet valóban igaz abban az esetben, ha a szemcsék mérete azonos, mint ahogy azt a 3-1-es ábra is mutatja. A tárolók kőzetei azonban nem azonos szemcseméretű komponensekből állnak, hanem folytonos szemcseméret eloszlással rendelkeznek. A változó szemcsemérettel viszont már nem egyértelmű az előbbieken felvázolt kapcsolat. A jelenség vizsgálata laboratóriumi mérésekkel lehetséges.

A vizsgálat lényege, hogy különböző szemcseméret eloszlású kőzetek porozitását és permeabilitását megmérve, azok értéke és a szemceloszlás közötti kapcsolatot lehessen kimutatni. Amennyiben ez a kapcsolat a Pucknell és Behrmann elméletében használthoz hasonló, akkor elmondható, hogy a zúzott zóna roncsoló hatása irreverzibilis.

A vizsgálat elvégzése során nagyon fontos feltétel a kőzetet alkotó szemcsék eloszlásának ismerete és a nagy példányszám/mérésszám rendelkezésre állása. Ehhez mesterségesen kialakított kőzetmagokat alkalmaztam. A magok ismert szemcseméret eloszlású homokok specifikus összekeveréséből készültek. Megszilárdulásukat követően kellő cementálási idő elteltével valósultak meg a gázos porozitás és permeabilitás mérések. A mérések kiértékelése során kapott eredményeket az adott szemcseméret eloszlásokkal korreláltam.

4.3.1 Mesterséges kőzetmagok előállítása

A kőzetmagok előállítása egy többlépcsős folyamat, aminek alapja a gondosan ellenőrzött minőségű, ill. szemcseméretű homok, cement és mészhidrát. A kutatás szempontjából kiemelkedően fontos, hogy az elkészült magokat felépítő szemcsék mérete kontrollált, ill. megfelelően monitorozott legyen, ezért első lépésben a rendelkezésre álló teszt homokot kellett szitálással szétbontani szemcseméret szerinti frakciókra. A szeparálás során mintegy 15 kg homok került leszitálásra.

A frakciók méret-tartományai az alábbiak voltak:

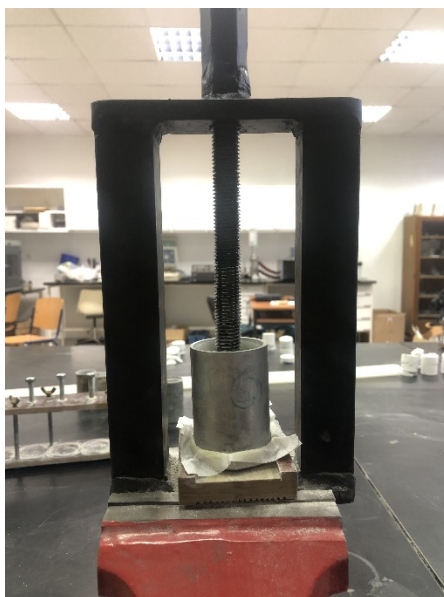
- 500 μm – 800 μm tartomány
- 315 μm – 500 μm tartomány
- 200 μm – 315 μm tartomány
- 106 μm – 200 μm tartomány
- 106 μm alatti tartomány

A következő lépés a kőzet alapanyagául szolgáló keverék összeállítása volt. A szakirodalomban sajnos nincs egyértelműen elfogadott eljárás mesterséges kőzetmagok elkészítésére. A minták elkészítésének módját Kozhagulova és tsai (Kozhagulova, et al., 2018), Rios és tsai (Rios, et al., 2014), valamint Younessi és tsai (Younessi, et al., 2013) munkái alapján a rendelkezésre álló alapanyagok és eszközpark szerint alakítottam ki. A minták minden esetben 420 g homokból 120 g mészkőből és 60 g cementből álltak. A keverék homogenizálása egy megfelelően nagy méretű, lezárható tetejű edényben történt azonos idejű, 10 percnyi rázással. Az elkészült 600 g-os keverékből öt azonos méretű mintatartóba 100 grammnyi keverék került. A mintatartók adták meg a minták végső alakját, a tartók alján pedig egy vízáteresztő filter került elhelyezésre. Felülről egy szabályosan perforált műanyag korong zárta le az adott tartót (3-16 ábra). Ez a kialakítás tette lehetővé a kívánt tömörítést, illetve a víz alatti áztatást és a későbbi kiszáritást is.



4-16 ábra: Műkőzet tartó

A tömörítés egy kőzetprés segítségével valósult meg. A tömörítés elsődleges célja a szemcsék konszolidálása volt. Mivel a keverékben használt homok tömege állandó, így állandó sűrűséget feltételezve a szilárd anyag térfogata minden sorozatra azonos volt. Ez alapján a teljes térfogat precíz korlátozásával és mérésével volt elérhető, hogy az egyes minták porozitása közel azonos legyen, ezzel szimulálva Pucknell és Behrmann eredményeit.



4-17 ábra: Mesterséges minták tömörítése

A tömörítés után a mintatartók egy nagyobb tartóeszközbe kerültek, ami egyrészt megakadályozta a mintatartóból a keverék kipergését, másrészt viszont lehetővé tette a vízzel való közvetlen, meghatározott idejű érintkezést (3-18 ábra), ezáltal a modellmagok szükséges víztelítettségének beállítását.



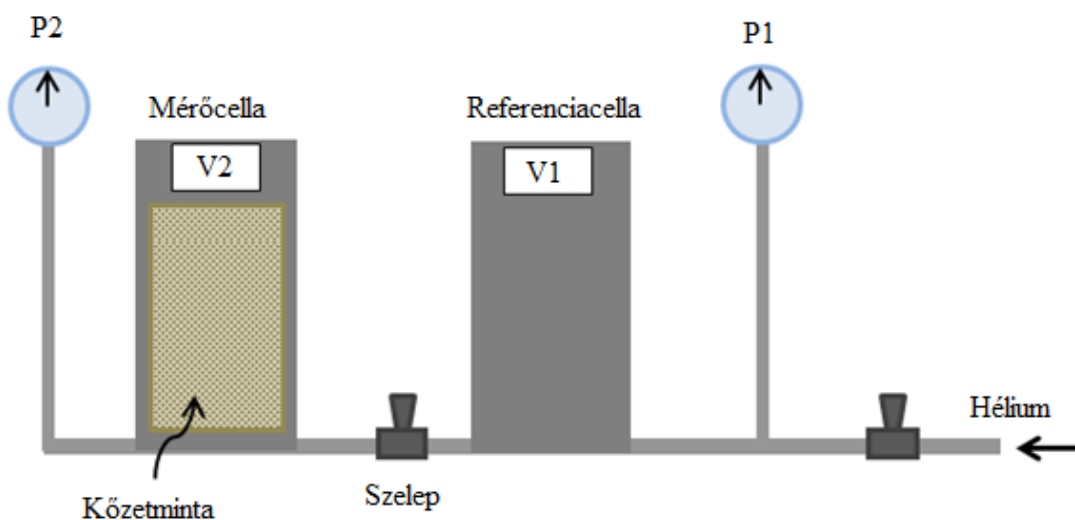
4-18 ábra: Külső mintatartó

A minták ezután 24 órán keresztül a tartóban száradtak. Ezután a minták a tartócilinderrel együtt vákuumos kemencébe kerültek, ahol egy órát töltöttek magas hőmérsékleten (70 °C) vákuum alatt. Ezután a mintákat a tartócilinderekből kivettük, majd további egy órát kemencében pihentettük. A kész mintákat nedvességtől védett tárolóban tároltuk.

A teljes kötés kialakulásának érdekében a minták elkészülésüktől számítva egy hónapot álltak. Az összeállítás adatai a mellékletekben találhatóak (I-Melléklet).

4.3.2 Porozitás mérések

A magok porozitása a Boyle-Mariotte törvényen alapuló műszerrel került meghatározásra. A mérőműszer két ismert térfogatú (V_1 és V_2) cellát tartalmaz, a referencia- és a mérőcellát, utóbbiban a közet helyezkedik el. A mérés első lépése a referencia cella ismert tulajdonságú gázzal való feltöltése, ami jelen esetben hélium volt. A referencia cella nyomását egy mérőműszer segítségével lehetett nyomon követni. A feltöltés utáni egyensúlyi nyomás p_1 -el jelölt. A mérés következő lépése a referencia és mérő cella összenyitása. Az összenyitás hatására a referencia cellában helyet foglaló gáz expandál és nyomása lecsökken p_2 értékre (3-19 ábra).



4-19 ábra: Porozitásmérés összeállítása

Az ismert térfogatok, valamint a mért nyomások alapján a közet szilárdtest térfogata meghatározható a Boyle-Mariotte törvény alapján.

$$p_1 V_1 = \text{állandó} \quad (58)$$

$$p_1 V_1 = p_2 (V_1 + V_2 - V_s) \quad (59)$$

$$V_s = \left(1 - \frac{p_1}{p_2}\right) V_1 + V_2 \quad (60)$$

Ahol:

p_1	referencia cella nyomása az összenyítás előtt	[bar],
p_2	összenyítás utáni nyomás	[bar],
V_1	referencia cella térfogata	[cm ³],
V_2	mérőcella térfogata	[cm ³],
V_s	kőzet szilárd térfogata	[cm ³].

A porozitás definíciója alapján:

$$\Phi = \frac{V_p}{V_b} = \frac{(V_b - V_s)}{V_b} \quad (61)$$

Ahol:

V_p	pórustérfogat	[cm ³],
V_b	teljes közettérfogat	[cm ³],
Φ	kőzet szilárd térfogata	[-].

A porozitás meghatározásához ismerni kell a kőzetek teljes térfogatát. Mivel a kőzetek szabályos hengerként lettek kialakítva, a teljes térfogat az átmérő (d) és a hossz (L) ismeretében meghatározható:

$$V_b = \frac{d^2 \pi}{4} L \quad (62)$$

A véletlen hibákból következő eltérések kiküszöbölése érdekében a kőzetmintákon három alkalommal végeztünk mérést.

4.3.3 Permeabilitás mérések

A kőzetminták áteresztőképességének mérése nitrogén gázzal történt. A választás azért esett a gázzal történő mérésre, mert így volt a legkisebb az esély arra, hogy a minták sérüljenek, illetve a nagy mintaszám miatt a vizes mérések többszörösére növelték volna a mérési időt. A mérések kiértékelése a Darcy egyenlet kompresszibilis folyadékokra használatos alakjával volt lehetséges.

$$k = \frac{q_g p_a \mu_g L}{A} \left(\frac{p_a^2 - p_b^2}{2} \right) \quad (63)$$

Ahol:

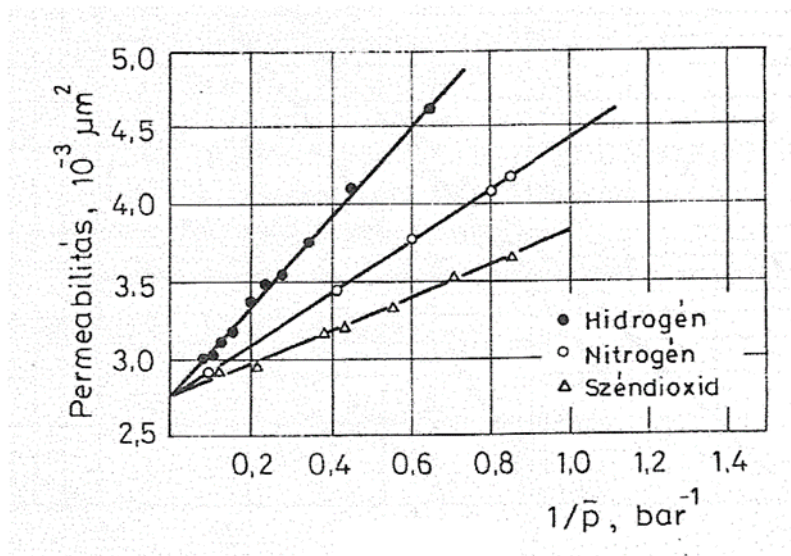
k	kőzet permeabilitása	[D],
q_g	gáz térfogatárama	[cm ³ /s],
p_a	beáramló nyomás	[bar],
p_b	kiáramló nyomás	[bar],
μ	gáz viszkozitása	[cP],
L	kőzet hossza	[cm],
A	kőzet keresztmetszete	[cm ²].

A gázok és a kőzet belső fala mentén fellépő átsiklási jelenségre Klinkenberg hívta fel a figyelmet (Klinkenberg, 1941). Ennek a jelenségnek a hatása, hogy a kőzetek gázos áteresztőképessége nyomás függő, még hozzá fordítottan arányosan (3-20 ábra).

$$k = k_\infty \left(1 + \frac{b}{\bar{p}} \right) \quad (64)$$

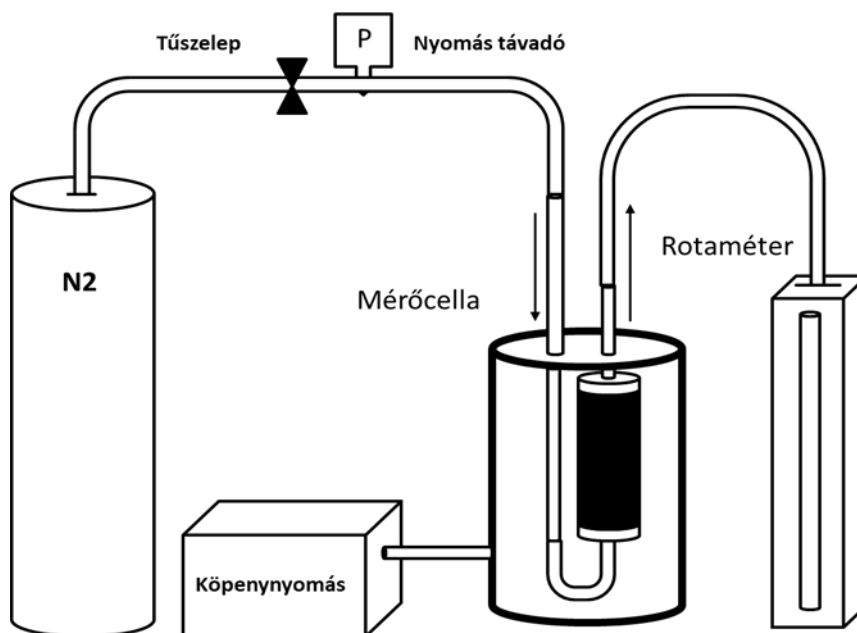
Ahol:

k	kőzet permeabilitása	[mD],
k_∞	határ permeabilitás	[mD],
\bar{p}	átlag nyomás	[bar],
b	kőzet és gázjellemző állandó	[bar],



4-20 ábra: Klinkenberg jelenség

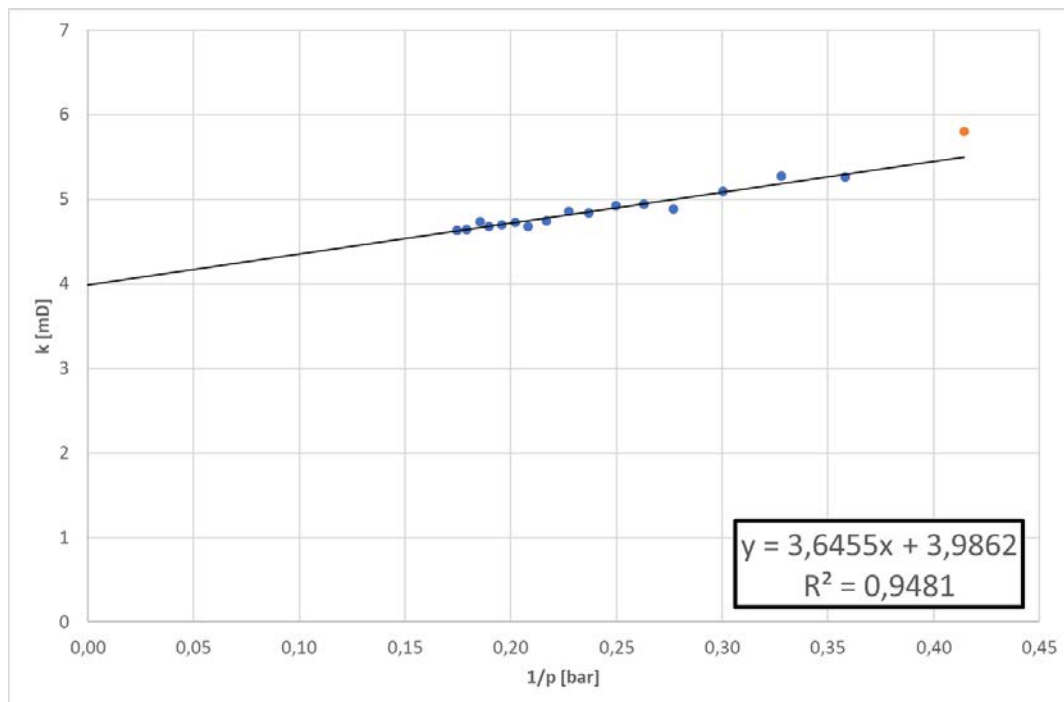
A mérés során a minták egy gumiköpenybe kerültek elhelyezésre. Annak érdekében, hogy a gáz a kőzetén keresztül és ne körülötte áramoljon, a gumiköpenyre az áramlási nyomásnál nagyobb külső nyomást kellett alkalmazni. A kőzetbe belépő gáz nyomása ismert, a kiáramló gáz nyomása pedig atmoszférikus volt. A gáz térfogatáramát a kilépő oldalon lévő rotaméterről lehetett leolvasni (3-21 ábra).



4-21 ábra: Permeabilitás mérés összeállítása

A mérés során a különböző térfogatáramokhoz tartozó bemenő oldali nyomás került feljegyzésre. A feljegyzett értékek alapján így meghatározható volt a minta

áteresztőképessége minden lépcsőre és így megszerkeszthettük az adott mintára jellemző permeabilitás-nyomás összefüggést (3-22 ábra).



4-22 ábra: Gázos permeabilitás mérés kiértékelése (J1 minta)

A fenti ábra a J1-es minta kiértékelését mutatja be. A diagram pontjai a mért értékek, kékkel az illesztésbe bevont, pirossal az illesztésből kihagyott pontok látszanak. Az illesztéseket nem lehetséges automatizálni, mivel az alacsony térfogatáramok esetében a rotaméter nem elegendően pontos, ezért előfordulhat, hogy a szélső pontok erőteljesebben eltérnek a belső pontok által meghatározott trendvonalától. Emiatt minden mérés kiértékelése során meg kellett vizsgálni, hogy az utolsó néhány végpont elhagyása javítja-e az illesztés minőségét.

4.3.4 Szemcseeloszlás mérések

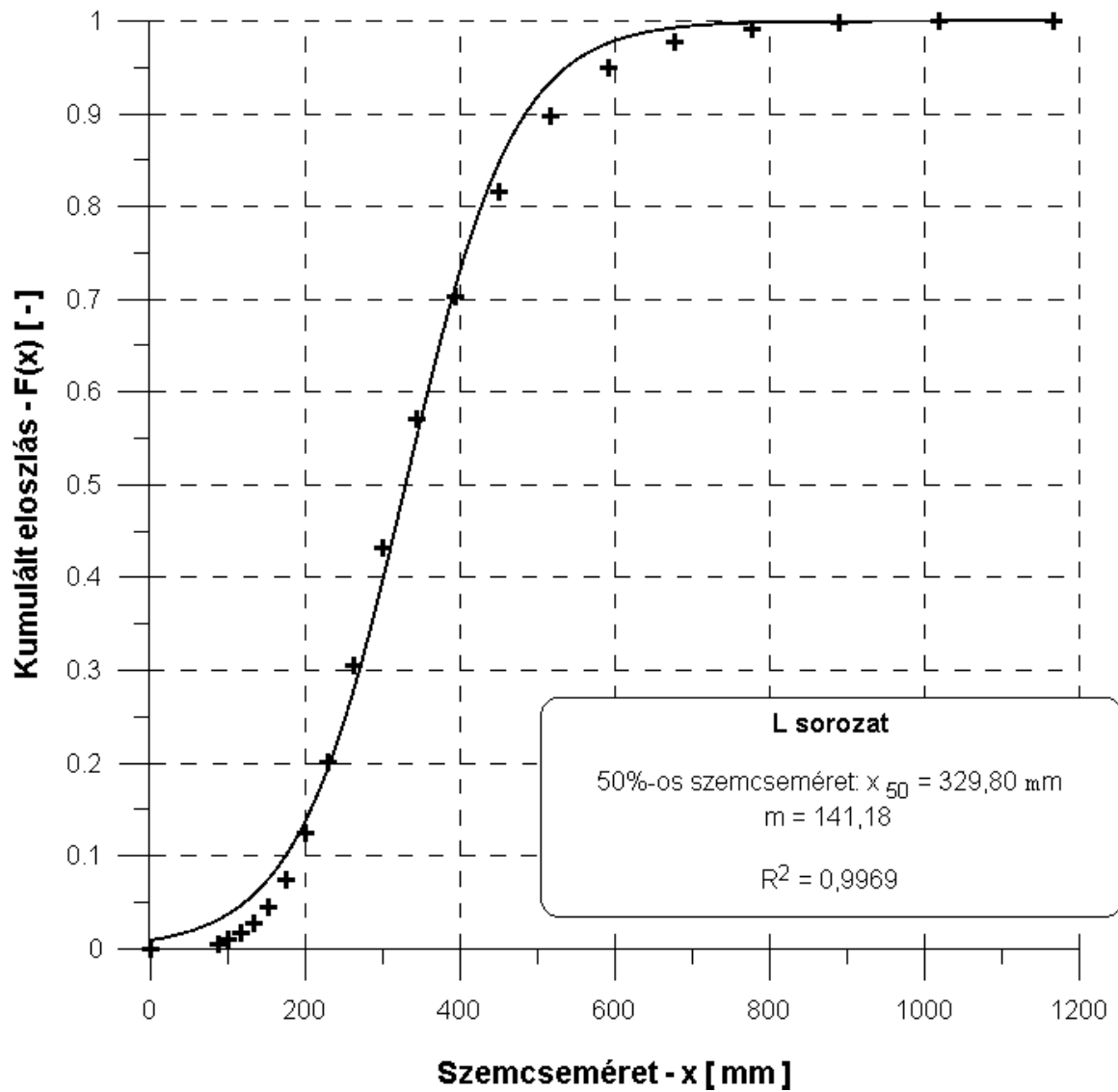
Azért, hogy a mérések során keletkező hibákat minimalizáljuk, a kőzetmagok anyagából a minták elkészülte előtt lézeres szemcseelemzéssel történt mintavétel. Erre azért volt szükség, mert bár a kézi szitálás során a különböző szemcseosztályok rendelkezésre álltak, azoknak a szemcseosztályoknak a pontos eloszlása már nehezen volt mérhető, és a lézeres szemcseelemzés során átfogóbb képet lehetett kapni az egyes receptúrákról. Az elemzés a Miskolci Egyetem - Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet HORIBA LA-950 típusú lézeres szemcseelemző készülékével történt. A szemcseelemző a fény hullámtermészetét kihasználva tudja megállapítani az adott szemcse nagyságát 10 nanométer és 3 milliméter között. Két fényforrást használva, a szemcsére eső fény szóródásának nagyságából és a szóródó fény intenzitásának változásából lehet megállapítani az adott szemcse méretét. Fontos megjegyezni, hogy épp emiatt a szemcseelemző akkor mér pontosan, ha a vizsgálandó szemcsehalmaz szűk tartományon belül mozog, mert minél nagyobb a legnagyobb és legkisebb szemcse közti eltérés, annál nagyobb eséllyel takarja el a nagy szemcse a kis szemcsét. Emiatt a receptúrákból vett minták esetén, a cementet tartalmazó 100 mikrométer alatti értékek kiszűrésére volt szükség. Minden sorozat esetében három korrigált mérés átlagából került megállapításra a szemcseméret eloszlás.

A kapott értékekre, függvényillesztés segítségével jellemző paramétereket próbáltam keresni. A szemcseeloszlások esetén gyakran használt Rosin-Rammler (Rosin & Rammler, 1933) és Gates-Gaudin-Schuhman (Harris, 1968) egyenletek nem adtak kellően kielégítő illesztést, ezért az adatsorok átvizsgálása során a szigmoid típusú, szimmetrikus függvények kerültek előtérbe. Több függvényillesztés után egy módosított tangens hiperbolikus függvényt választottam, melynek R^2 , korrelációs értéke – egy sorozatot kivéve –, mind 0,99 feletti.

$$y = \frac{\left(\tanh \frac{x - x_{50}}{m}\right) + 1}{2} \quad (65)$$

Ahol:

x_{50}	50%-os szemcseeloszláshoz tartozó szemcseméret	$[\mu\text{m}]$,
m	függvénymeredekség reciproka.	$[-]$.



4-23 ábra: Kumulált szemcseméret eloszlás (L sorozat)

Az illesztést a 3-23-es ábra szemlélteti. A kőzetek mért paraméterei a mellékletekben megtalálhatók (J-Melléklet).

4.3.5 Kiértékelés

Mielőtt az eredményeket értékelni lehetne, fontos az adatok szűrése. Erre azért van szükség, mert előfordulhatnak olyan zavaró tényezők, amelyek téves következtetésre vezethetnek. Az ilyen zavaró tényezők a következők lehetnek:

Inhomogén minta:

Az alapanyag összekeverése és tartóba öntése során előfordulhat, hogy nem teljesen homogén keverékből áll a minta. Ezt a szilárdanyag sűrűség nagymértékű eltérése mutatja.

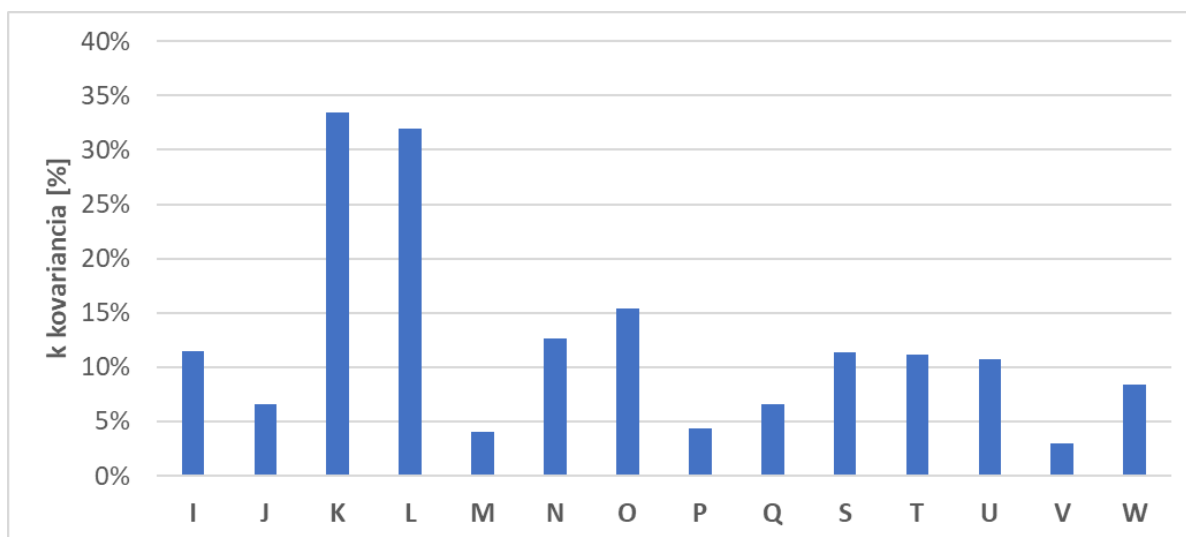
Repedés a mintában:

Az előállítás után mechanikai hatásra, esetleg szilárdulás során keletkezhet. A sorozatbeli átlagnál magasabb porozitás és permeabilitás együttes jelentkezését okozza.

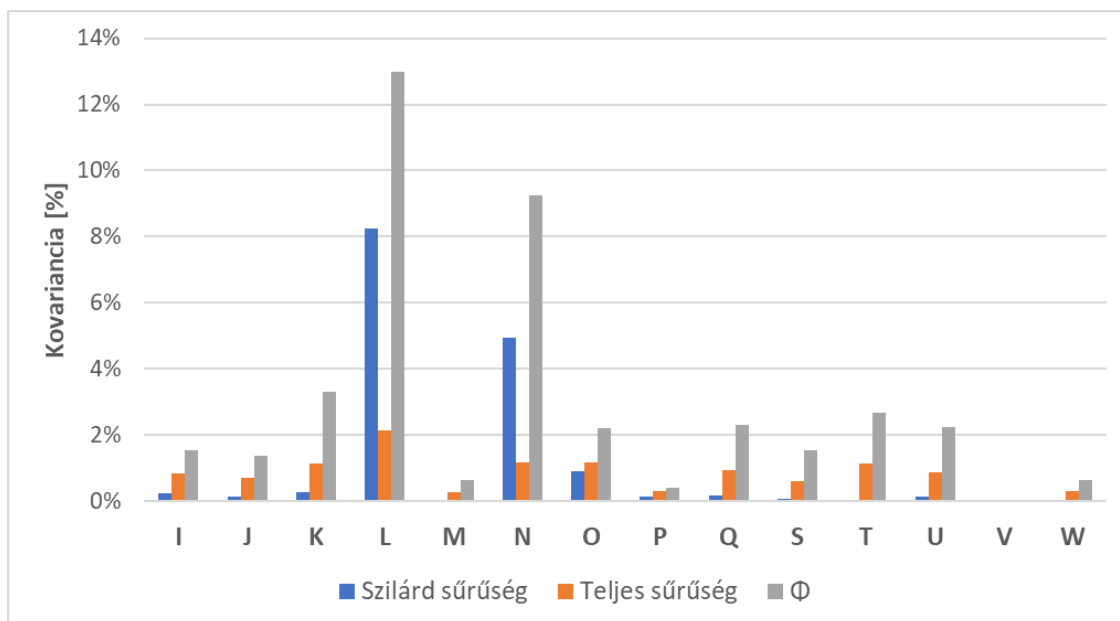
Deformált a minta:

Megszilárdulás előtti mechanikai hatás okozhatja. A deformáltság miatt a mért teljes térfogat és áramlási keresztmetszet nagyobb, mint a tényleges. Emiatt a mért porozitás nagyobb, az áteresztőképesség pedig kisebb lesz, mint a valódi.

A mért értékek kovarianciájának, vagyis az átlagtól való átlagos százalékos eltérésének ismeretében lehet következtetni a zavaró tényezők meglétére.



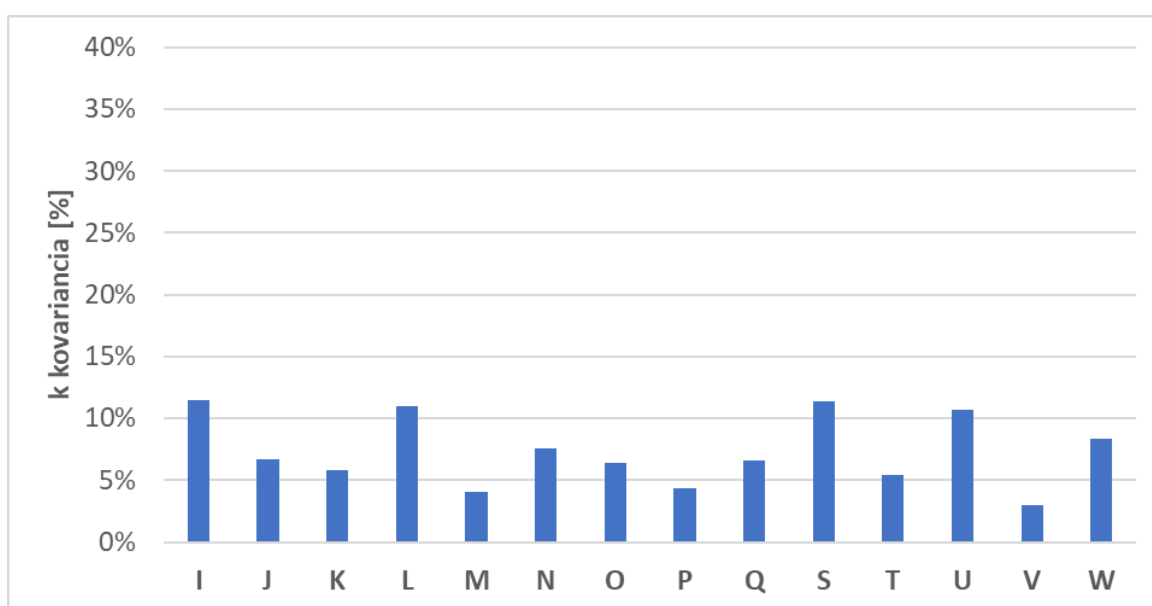
4-24 ábra: Mesterséges magok áteresztőképesség kovarianciája



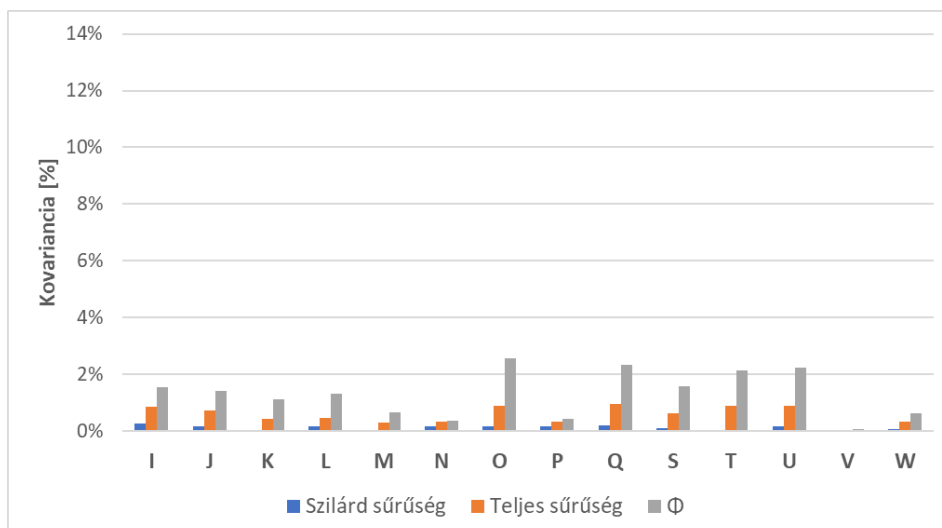
4-25 ábra: Mesterséges magok sűrűség és porozitás kovarianciája

A 3-25-os ábra alapján a „K”, „L” és „O” sorozatban található inhomogén minta. Szemrevételezéssel a hiba nem vehető észre, de a mérési pontossága a műszernek igen magas és más hiba nem okozhatja ezt az eltérést. Emiatt az L1, N3 és O2 minták mérési eredményeit elvetettük. A további szűrés során az adatok elemzése mellett, a minták szemrevételezése alapján a következő minták eredményei kerültek elvetésre:

- L1 és L2 minták repedés miatt (szemmel látható),
- N1 és K1 minták repedés miatt (kiugró értékek, a mérés során eltörték),
- T2 minta enyhe, de észrevehető deformáció miatt.

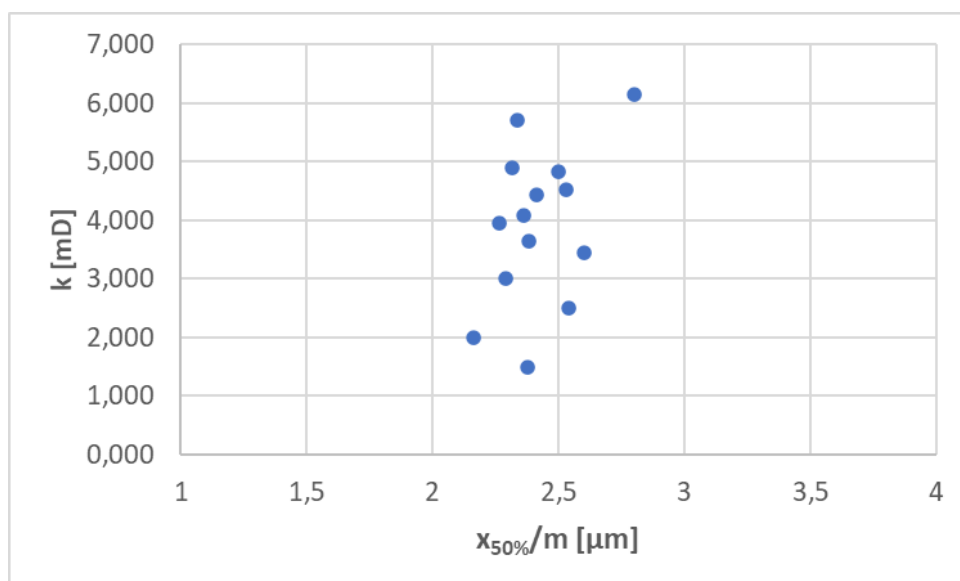


4-26 ábra: Mesterséges magok áteresztőképesség kovarianciája szűrés után



4-27 ábra: Mesterséges magok sűrűség és porozitás kovarianciája szűrés után

A szűrés után a kovarianciák számottevően csökkentek (3-26 és 3-27 ábrák). Tehát a szűrés után az egyes sorozatok egységesnek tekinthetők. A 65-ös egyenlet alapján $\frac{x_{50\%}}{m}$ jellemzi az adott keverék szemcseméretét. Ennek függvényében a mért átteresztőképességeket a 3-28-es ábra mutatja be.



4-28 ábra: Áteresztőképesség és szemcseméret-eloszlás összefüggése

Az ábra kapcsolatot sugall a szemcseeloszlás és az átteresztőképesség között. A szemcseméret növekedése és az osztályozottság javulása (m csökkenése) növeli az átteresztőképességet. Az összefüggés pontos megismeréséhez a bemutatottnál jóval nagyobb mintaszámra lenne szükség, így az nem célja jelen munkának. Ennek ellenére kijelenthető, hogy a szemcseméret csökkenés a zúzott zónában valóban okozhatja az átteresztőképesség romlását.

4.4 Nyomásesés a perforációs csatornák körül

Az első fejezetben bemutatott hozamegyenlet darcy és nem-darcy tényezője az alábbi alakra hozható olaj- és gázkutak esetében:

$$A = C_1 \times \frac{1}{h_p^2} \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_e} \right), \quad (66)$$

$$B = C_2 \times \frac{\ln \left(\frac{r_e}{r_w} \right) + S}{h}. \quad (67)$$

Olajkutak esetében:

$$C_1 = 2.30 \times 10^{-14} \times \beta B_o^2 \rho, \quad (68)$$

$$C_2 = 141.24 \times \frac{\mu_o B_o}{k_o}. \quad (69)$$

Gázkutak esetében:

$$C_1 = 3.16 \times 10^{-12} \times \beta \gamma_g T z, \quad (70)$$

$$C_2 = 1424 \times \frac{\mu_g T z}{k_g}. \quad (71)$$

Amennyiben a szkin tényező pusztán a kútkörnyéki szennyezettségből fakadó áteresztőképesség romlásának az eredménye, akkor a szkin tényező meghatározható az alábbi képlet alapján:

$$S = \left(\frac{k}{k_s} - 1 \right) \ln \left(\frac{r_s}{r_w} \right). \quad (72)$$

Ahol:

r	szennyezett zóna sugara	[ft],
k _s	szennyezett zóna permeabilitása	[mD],

A megfelelő kút tulajdonságok és perforációs paraméterek felcserélésével megalkotható így egy perforációs csatorna hozamegyenlete:

- $L_p \rightarrow h / h_p$
- $r_p \rightarrow r_w$
- $r_{pe} \rightarrow r_{ep}$
- $k_c \rightarrow k_s$
- $r_c \rightarrow r_s$

$$A_p = C_1 \times \frac{\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_{ep}}}{L_p^2}, \quad (73)$$

Mivel a zúzott zóna okozta hatása hasonlatos a szennyezett zóna hatásához, ezért:

$$S = \left(\frac{1}{\alpha} - 1\right) \ln\left(\frac{r_c}{r_p}\right) = \ln\left(\left(\frac{r_c}{r_p}\right)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}}\right), \quad (74)$$

$$B_p = C_2 \times \frac{\ln\left(\frac{r_{ep}}{r_p} \times \left(\frac{r_c}{r_p}\right)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}}\right)}{L_p}. \quad (75)$$

Egy csatornán átáramló folyadék:

$$q_p = \frac{q}{ns \times h_p}. \quad (76)$$

A hozamegyenlet olajtermelésre:

$$p_{ep} - p_{wf} = A_p \left(\frac{q}{ns \times h_p}\right)^2 + B_p \left(\frac{q}{ns \times h_p}\right). \quad (77)$$

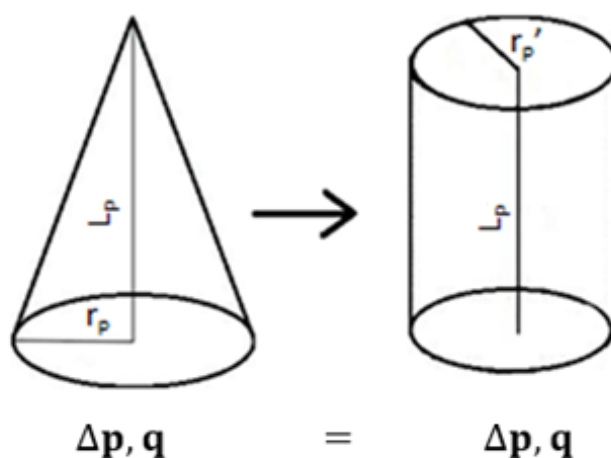
A hozamegyenlet gáztermelésre:

$$p_{ep}^{(2)} - p_{wf}^{(2)} = A_p \left(\frac{q}{ns \times h_p} \right)^2 + B_p \left(\frac{q}{ns \times h_p} \right). \quad (78)$$

A_p	perforációk nem-darcy tényezője	$[\text{psi} \times \text{day}^2 / \text{STB}^2]_{\text{oil}}, [\text{psi}^2 \times \text{day}^2 / \text{Mscf}^2]_{\text{gas}},$
B_p	perforációk darcy tényezője	$[\text{psi} \times \text{day} / \text{STB}]_{\text{oil}}, [\text{psi}^2 \times \text{day} / \text{Mscf}]_{\text{gas}},$
r_{ep}	perforációs csatornák gyűjtőterének sugara	[ft],
q_p	térfogatáramegy csatornán keresztül	$[\text{STB} / \text{day}]_{\text{oil}}, [\text{Mscf} / \text{day}]_{\text{gas}},$
q	teljes térfogatáram	$[\text{STB} / \text{day}]_{\text{oil}}, [\text{Mscf} / \text{day}]_{\text{gas}},$
ns	lövessűrűség	[spf],
h_p	perforált szakasz	[ft],
L_p	perforációk hossza	[ft],
r_p	perforációk sugara	[ft],
r_c	zúzott zóna sugara	[ft],
α	zúzott zóna és környezetének permeabilitás aránya	[-].
p_{ep}	nyomás a perforációk gyűjtőterének határán	[-].

4.4.1 A perforációk és a zúzott zóna egyenértékű sugara

Mint ahogyan azt a korábbi fejezetekben is említettem (3.1.3 fejezet), az áramlási egyenletek hengeres alakú gyűjtőkre adják meg a nyomásvesztéséget. Mivel a perforációs csatornák alakja nem hengeres, ezért nem lehet használni azok sugarát sem a hozamegyenletekben. Annak érdekében, hogy mégis meg lehessen határozni a nyomásesést - a csatornák sugarát módosítani szükséges. Meg kell találni azt az áramlási szempontból egyenértékű hengert, aminek a hossza megegyezik a perforációk hosszával, az áramlási hatása pedig pontosan megegyezik a perforációk hatásával (3-29 ábra). Az egyenértékű henger sugarát alkalmazva már használhatók a bemutatott áramlási egyenletek.



4-29 ábra: Egyenértékű henger

Az egyenértékesítés két féle módon történhet.

- Térfogati alapon: a kúp és az egyenértékű henger térfogata megegyezik, ilyenkor a közetmennyiség, amelyen keresztül az áramlás történik megegyezik a két esetben.
- Felületi alapon: a kúp és a henger palástjának a felülete megegyezik, ilyenkor az áramlási konvergencia hasonló a két esetben.

Megegyező térfogatok esetében az egyenértékű sugár:

$$V_h = V_k \quad (79)$$

$$r_p'^2 L_p \pi = \frac{r_p^2 L_p \pi}{3} \quad (80)$$

$$r'_p = \frac{r_p}{\sqrt{3}} \cong 0.5774r_p \quad (81)$$

Megegyező felületek esetében az egyenértékű sugár:

$$A_h = A_k \quad (82)$$

$$2r'_p \pi L_p = \frac{r_p \sqrt{r_p^2 + L_p^2}}{2L_p} \quad (83)$$

Mivel $L_p \gg r_p$, így:

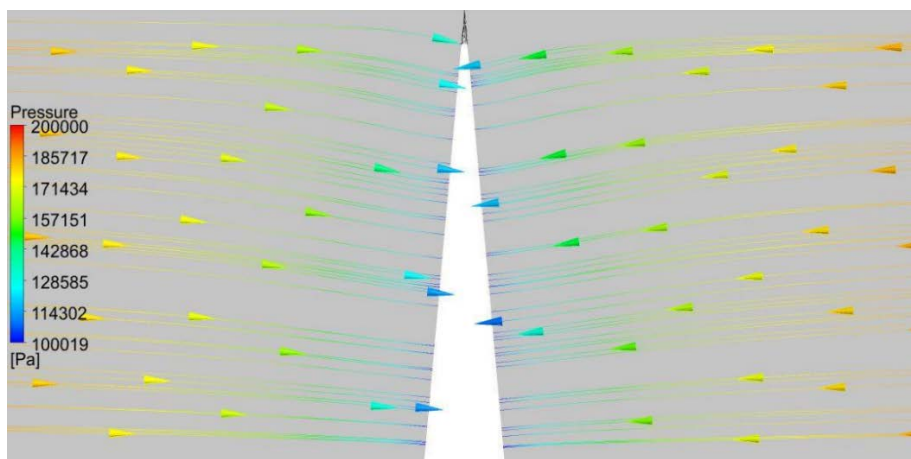
$$\frac{r_p \sqrt{r_p^2 + L_p^2}}{2L_p} \approx \frac{r_p}{2} \quad (84)$$

$$r'_p \cong 0.5r_p \quad (85)$$

Ahol:

V_h	henger térfogata	[ft ³],
V_k	kúp térfogata	[ft ³],
A_h	henger palástfelszíne	[ft ²],
A_k	kúp palástfelszíne	[ft ²].
r'_p	egyenértékű sugár	[ft ²].

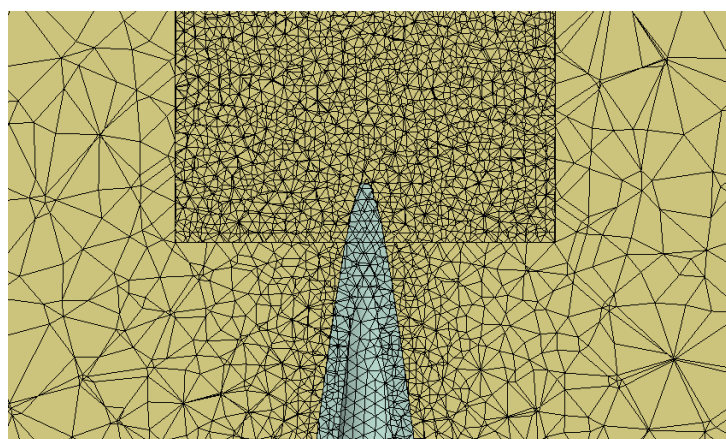
Azt, hogy melyik mód szerint történjen az egyenértékesítés, az a perforációs csatorna körül kialakuló áramlási kép vizsgálatával dönthető el. Az áramlási kép vizsgálatára az ANSYS programcsomag CFX szoftverével készült CFD modellt alkalmaztuk (3-30 ábra). A modellekben vízzel telített porózus közeget (domaint) alkalmaztunk, izotermikus állandósult áramlást feltételezve. A beáramlási (inlet) és a kiáramlási (outlet) felületeken, vagyis az áramlási tér külső palástja, valamint a perforáció felülete, a nyomás állandónak feltételezett. A meshgeometria tetrahedrális, a perforáció körül folyamatosan finomodó felbontású.



4-30 ábra: Perforációs csatorna körül kialakuló áramlási kép

Ahogy az a fenti ábrán is látszik, az áramvonalak elhajlanak a perforációhoz közeledve, a beesés derékszögű. Emiatt az elhajlás miatt az áramvonalak hosszabb utat járnak be a kőzetben, mint a térfogat alapú egyenértékűsítés feltételezné.

Mivel az egyenértékűsítés nem függ attól, hogy milyen tulajdonságú kőzetben keresztül történik az áramlás, ezért az 1.6-os alfejezetben írtakkal ellentétben a CFD szimuláció ebben az esetben alkalmazható kvantitatív ellenőrzésre is. Több perforációs sugár és hossz összeállítását vizsgálva az egyenértékű sugár a szimulációk tanulsága alapján a kúp sugarának nagyjából 47%-52%-a. A szimulációk alapján az egyenértékű sugár függ a kúp hosszától, ami egybevág a 84. egyenlettel. Meg kell jegyezni, hogy a rendelkezésre álló szoftverrel nem generálható kielégítő finomságú és eloszlású cellaháló. Ennek folyománya, hogy egyrészt kisebb L_p/r_p arányt kellett alkalmazni, valamint a kúpok csúcsainál torzulnak a modellek (3-31 ábra) és a felső szakasz (nagyjából 2%) egy részén a szimulációk szerint nincs áramlás.

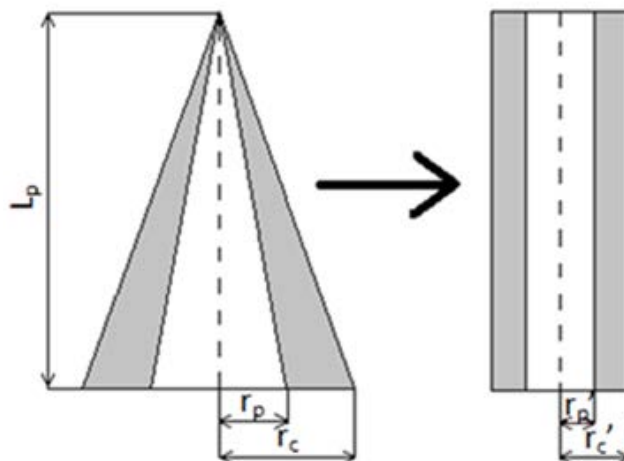


4-31 ábra: Gridromlás a kúp csúcsánál

A fentiek alapján a megfelelő egyenértékűsítés a felület alapú - a perforációk sugaránál.

Mivel a zúzott zóna alakja is kúpos, ezért erre is szükséges az imént bemutatott geometriai módosítást elvégezni (3-32 ábra). Ebben az esetben a megfontolások némiképp változnak:

- Térfogati alap esetén: a zúzott zóna és a perforációs csatorna egyenértékű hengerei közötti térfogatnak kell megegyeznie a zúzott zóna térfogatával.
- Felületi alap esetén: a kúpok és hengerek felületkülönbségének kell megegyeznie.



4-32 ábra: Zúzott zóna egyenértékű sugara

Térfogati alap:

$$V_{zk} - V_{pk} = V_{zh} - V_{pk} \quad (86)$$

$$\frac{r_c^2 \pi L_p}{3} - \frac{r_p^2 \pi L_p}{3} = r_c'^2 \pi L_p - r_p'^2 \pi L_p \quad (87)$$

$$r_c' = \sqrt{\frac{r_c^2 - r_p^2}{3} + r_p'^2} \quad (88)$$

$$r_c' = \sqrt{\frac{r_c^2}{3} + \frac{r_p^2}{12}} \quad (89)$$

Felületi alap:

$$A_{zk} - A_{pk} = A_{zh} - A_{ph} \quad (90)$$

$$\pi r_c \sqrt{r_c^2 + L_p^2} - \pi r_p \sqrt{r_p^2 + L_p^2} = 2\pi r'_c L_p - 2\pi r'_p L_p \quad (91)$$

$$\frac{r_c \sqrt{r_c^2 + L_p^2}}{2L_p} - \frac{r_p \sqrt{r_p^2 + L_p^2}}{2L_p} = r'_c - r'_p \quad (92)$$

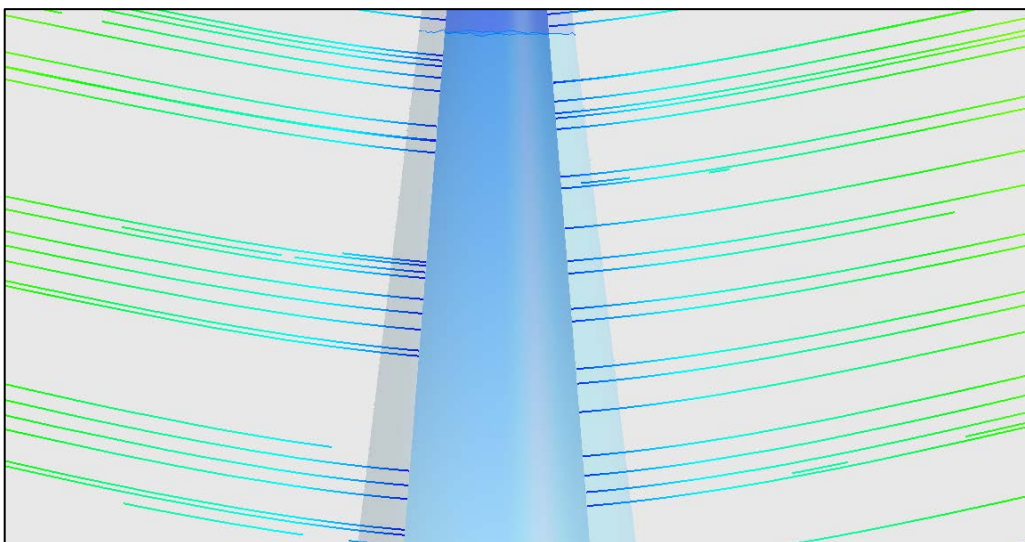
$$r'_c = \frac{r_c}{2} - \frac{r_p}{2} + \frac{r'_p}{2} \quad (93)$$

$$r'_c = \frac{r_c}{2} \quad (94)$$

Ahol:

V_{zh}	henger térfogata (zúzott zóna)	[ft ³],
V_{zk}	kúp térfogata (zúzott zóna)	[ft ³],
V_{ph}	henger térfogata (perforáció)	[ft ³],
V_{pk}	kúp térfogata (perforáció)	[ft ³],
A_{zh}	hengerpalást felszíne (zúzott zóna)	[ft ²],
A_{zk}	kúppalást felszíne (zúzott zóna)	[ft ²].
A_{ph}	hengerpalást felszíne (perforáció)	[ft ²],
A_{pk}	kúppalást felszíne (perforáció)	[ft ²].
r_c	zúzott zóna sugara	[ft].
r_p	perforáció sugara	[ft].
L_p	perforáció hossza	[ft].
r'_c	zúzott zóna egyenértékű sugara	[ft].
r'_p	perforáció egyenértékű sugara	[ft].

Mivel ezen a kis szakaszon már nem történik számottevő irányváltás, ezért a térfogati alapra helyezett egyenértékűsítés alkalmazható. Ezt támasztják alá a CFD szimulációk is (3-33 ábra). A CFD szimulációk eredményeit a „K-Melléklet” és a „L-Melléklet” tartalmazza.



4-33 ábra: Áramlás a zúzott zónában

Karakas és Tariq tanulmányukban kitértek arra, hogy a perforációs csatornák sugarát a számítások során az áteresztőképesség anizotrópiája miatt szükséges módosítani (Karakas & Tariq, 1988). Ezt a módosítást később több szerző is alkalmazta (A-Melléklet). Így a végleges egyenértékű sugarak az alábbiak szerint alakulnak:

$$r'_{pe} = \left(\frac{r'_p}{2}\right) \left(1 + \sqrt{\frac{k_V}{k_H}}\right) \quad (95)$$

$$r'_{ce} = r'_{pe} + r'_c - r'_p \quad (96)$$

Ahol:

r'_{pe}	perforáció egyenértékű sugara	[ft].
r'_{ce}	zúzott zóna egyenértékű sugara	[ft].
k_V	vertikális permeabilitás	[mD].
k_H	horizontális permeabilitás	[mD].

4.4.2 A perforációk gyűjtőterének sugara

Ahogy a 3.1.3 alfejezetben látható volt, a perforációk körül kialakuló gyűjtőtér a perforációs tengelyre merőleges síkra vett metszetének alakja ellipszis. Az ellipszis alak szintén nem használható a hozamegyenletében, így ismételtlen egyenértékűsítésre van szükség. Ehhez ismerni kell az ellipszis különböző értékeit.

$$T_{ep} = \pi \frac{2}{\sqrt{3}} L \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \frac{1}{ns} \frac{360}{\theta}, \quad (97)$$

$$P_1 = \left(\frac{1}{ns}\right)^2 \left(\left(\frac{360}{\theta}\right)^2 - \frac{360}{\theta} + 1\right) + \left(2L \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2, \quad (98)$$

$$P_2 = 12 \left(L \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(\frac{1}{ns}\right) \left(\frac{360}{\theta}\right)\right)^2, \quad (99)$$

$$a_{ep} = \sqrt{\frac{P_1 + \sqrt{P_1^2 - P_2}}{6}}, \quad (100)$$

$$K_{ep} = \pi \left(\frac{3}{2} \left(a_{ep} + \frac{L \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(\frac{360}{\theta}\right) \left(\frac{1}{ns}\right)}{a_{ep} \sqrt{3}} \right) + \sqrt{\frac{L \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(\frac{360}{\theta}\right) \left(\frac{1}{ns}\right)}{\sqrt{3}}} \right), \quad (101)$$

$$V_{ep} = \pi \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{ns} \frac{360}{\theta} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \left((L_p + r_w)^2 - r_w^2 \right). \quad (102)$$

Ahol:

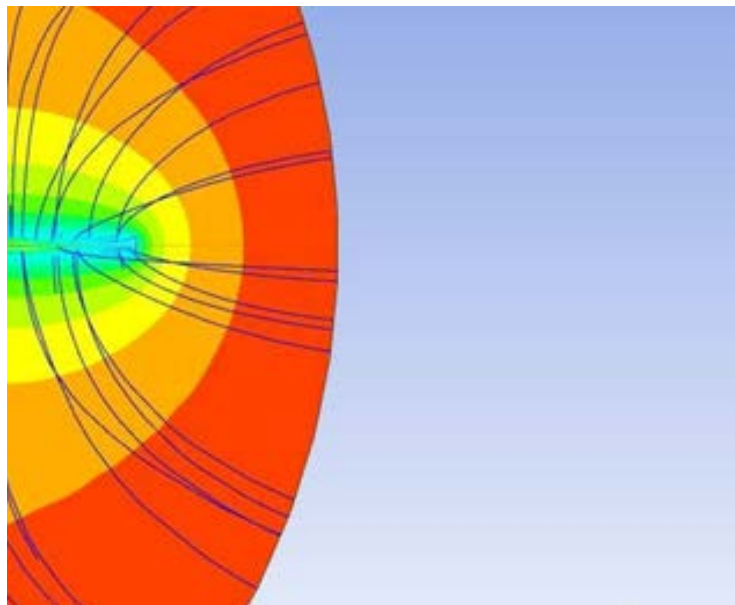
T_{ep}	ellipszis területe	[ft ²],
θ	fázisszög	[°],
L	küttengelytől mért távolság	[ft],
a_{ep}	főtengely hossza	[ft],
K_{ep}	ellipszis kerülete	[ft],
V_{ep}	gyűjtőtér térfogata	[ft ³].
P_1	segédtag	[ft].
P_2	segédtag	[ft].

Az egyenértékűsítés ekkor a síkmetszet kerületén alapszik, vagyis a perforációk gyűjtőterének sugara(r_{ep}) ekkor:

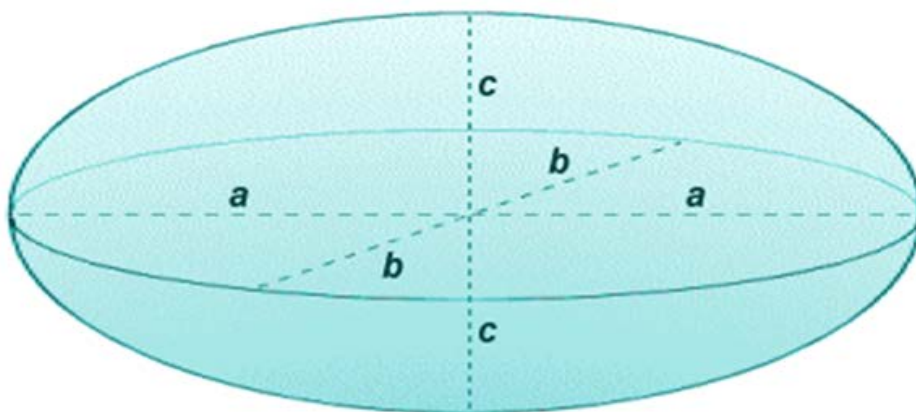
$$r_{ep} = \frac{K_{ep}}{2\pi}. \quad (103)$$

A nyomásveszteség számítás során a tengelytől mért távolság az áramlási irányváltás távolsága a kút tengelyétől. Az egyes paraméterek levezetései a mellékletekben megtalálhatók (M-Melléklet).

Abban az esetben, ha a fázisszög 0° vagy 180° a perforációk gyűjtőterét csak a függőleges szomszédok korlátozzák le. Ekkor a gyűjtőterek ellipszoid alakúak, ahogyan az alábbi CFD szimuláció is mutatja (az irányváltás az ellipszoid felületén történik).



4-34 ábra: Irányváltás perforáció körül ($\theta=180^\circ$)



4-35 ábra: Ellipszoid

Ebben az esetben az ellipszoid egyes tengelyei a fenti ábra jelöléseit használva (3-35 ábra):

$$a = \frac{L_p}{2} \quad (104)$$

$$b = r_{ewb} \quad (105)$$

$$c = \frac{1}{2ns} \frac{360}{\theta} \quad (106)$$

Az egyenértékűsítés az ellipszoid felülete alapján történik:

$$A_{pdrain} = 4\pi \left(\frac{\left(\frac{1}{2ns} \frac{360}{\theta} \frac{L_p}{2} \right)^{1.6} + \left(\frac{1}{2ns} \frac{360}{\theta} r_{ewb} \right)^{1.6} + \left(\frac{L_p}{2} r_{ewb} \right)^{1.6}}{3} \right)^{0.625} \quad (107)$$

$$r_{ep} = \frac{A_{pdrain}}{\pi L_p} \quad (108)$$

Ahol:

r_{ewb}	áramlási irányváltás távolsága a kút tengelyétől	[ft].
r_{ep}	perforációk gyűjtőterének sugara	[ft].
A_{pdrain}	perforációk gyűjtőterének felülete	[ft ²].

4.5 Kiterjesztett kútsugár

Az áramlás irányváltoztatásáig az áramlás viselkedése megegyezik egy, az eredetinel nagyobb sugarú kúthoz való áramlással. Amennyiben ennek a kútnak a sugarát r_{ewb} -nek jelöljük, a hozamegyenlet tagjai:

$$A_{ewb} = C_1 \times \frac{1}{h_p^2} \left(\frac{1}{r_{ewb}} \right), \quad (109)$$

$$B_{ewb} = C_2 \times \frac{\ln \left(0.472 \left(\frac{r_e}{r_{ewb}} \right) \right)}{h}, \quad (110)$$

$$A_{ewb} = C_1 \times \frac{1}{h_p^2} \left(\frac{1}{r_w} \right) \left(\frac{r_w}{r_{ewb}} \right), \quad (111)$$

$$B_{ewb} = C_2 \times \frac{\ln \left(0.472 \left(\frac{r_e}{r_w} \right) \right) + \ln \left(\frac{r_w}{r_{ewb}} \right)}{h}, \quad (112)$$

$$A_{ewb} = C_1 \times \frac{1}{h_p^2} \left(\frac{1}{r_w} \right) \lambda_{ewb}, \quad (113)$$

$$B_{ewb} = C_2 \times \frac{\ln \left(0.472 \left(\frac{r_e}{r_w} \right) \right) + S_{ewb}}{h}. \quad (114)$$

Ahol C_1 és C_2 tagok az eddigiekben leírt (68, 69, 70 és 71 egyenletek) értékekkel rendelkeznek olaj és gáz esetén, valamint:

$$\lambda_{ewb} = \frac{r_w}{r_{ewb}}, \quad (115)$$

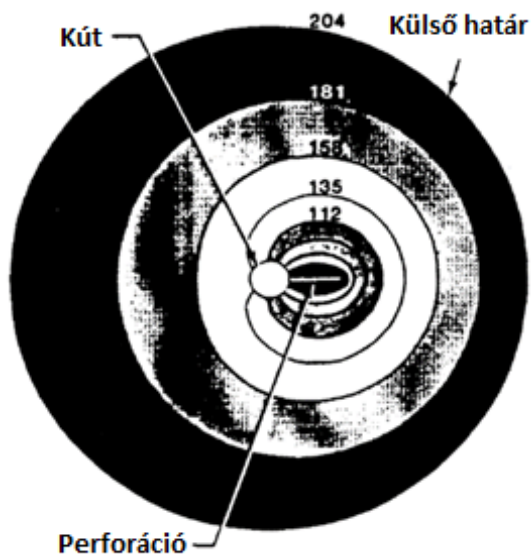
$$S_{ewb} = \ln \left(\frac{r_w}{r_{ewb}} \right). \quad (116)$$

A_{ewb}	kiterjesztett kút nem-darcy áramlási tagja	$[\text{psi} \times \text{nap}^2 / \text{STB}^2]_{\text{olaj}}, [\text{psi}_2 \times \text{nap}^2 / \text{Mscf}^2]_{\text{gáz}},$
B_{ewb}	kiterjesztett kút darcy áramlási tagja	$[\text{psi} \times \text{nap} / \text{STB}]_{\text{olaj}}, [\text{psi}^2 \times \text{nap} / \text{Mscf}]_{\text{gáz}},$
r_{ewb}	kiterjesztett kútsugár	[ft],
S_{ewb}	szkin tényezője a kiterjesztett kútnak	[-],
λ_{ewb}	térfogatáramfüggő szkin tényező	[-],

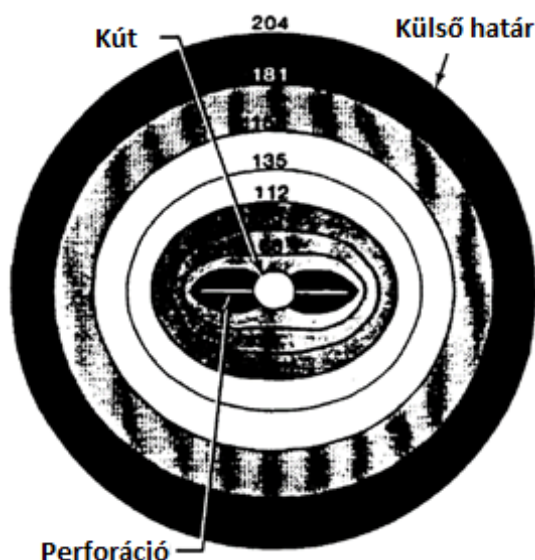
r_w	eredeti kútsugár	[ft],
h_p	perforált szakasz	[ft],
h	termeltetett szakasz	[ft].

4.5.1 $\theta=0^\circ$, 180° fázisszögek esete

Amennyiben a fázisszög 0° avagy 180° , a kiterjesztett kútsugár megfigyelhető a kút tengelyére merőleges sík metszetén a nyomáseloszlást vizsgálva. Ezeket a síkmetszeteket izobár vonalakkal (psi) Karakas és Tariq tanulmányukban közölték (Karakas & Tariq, 1988).

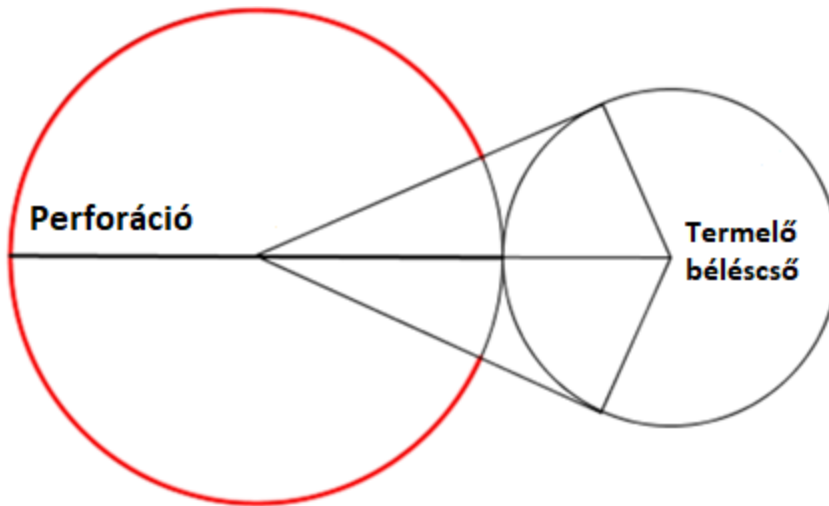
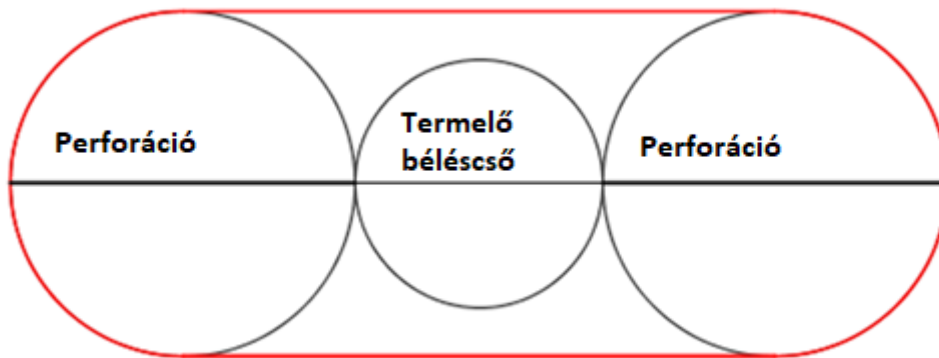


4-36 ábra: Nyomáseloszlás a kút körül ($\theta=0^\circ$) (Karakas & Tariq, 1988)



4-37 ábra: Nyomáseloszlás a kút körül ($\theta=180^\circ$) (Karakas & Tariq, 1988)

A nyomáseloszlásokból következtetni lehet az irányváltási zónákra (3-38 és 3-39 ábrák).

4-38 ábra: Irányváltási zóna ($\theta=0^\circ$)4-39 ábra: Irányváltási zóna ($\theta=180^\circ$)

Az ábrákon az irányváltási zóna határa vörös színnel van jelölve. Ezekben az esetekben a kiterjesztett kútsugár az alábbi lépések szerint számolható:

- Irányváltási zóna határának kerületszámítása (K_d) (vörös színnel jelölve az ábrákon)
- Egyenértékű kör sugarának meghatározása (kerületegyenlőség alapján).
- A folyamatos irányváltás miatt a kiterjesztett kútsugarának feleznie kell az irányváltási zóna térfogatát, így az, az egyenértékű sugár $1/\sqrt{2}$ -ed része (térfogatátlagolás).

$\theta=0^\circ$ esetén:

$$K_d = 2\pi \frac{L_p}{2} - 2 \arcsin\left(\frac{r_w}{\frac{L_p}{2} + r_w}\right) \frac{L_p}{2}, \quad (117)$$

$$r_{dc} = \frac{K_d}{2\pi} = \frac{L_p}{2} - \arctan\left(\frac{r_w}{\frac{L_p}{2} + r_w}\right) \frac{L_p}{2\pi}, \quad (118)$$

$$r_{ewb} = \frac{r_{dc}}{\sqrt{2}} = \frac{\frac{K_d}{2\pi} = \frac{L_p}{2} - \arctan\left(\frac{r_w}{\frac{L_p}{2} + r_w}\right) \frac{L_p}{2\pi}}{\sqrt{2}}. \quad (119)$$

$\theta=180^\circ$ esetén:

$$K_d = 2\pi \frac{L_p}{2} + 2L_p + 4r_w, \quad (120)$$

$$r_{dc} = \frac{K_d}{2\pi} = \frac{L_p}{2} + \frac{L_p}{\pi} + \frac{2r_w}{\pi}, \quad (121)$$

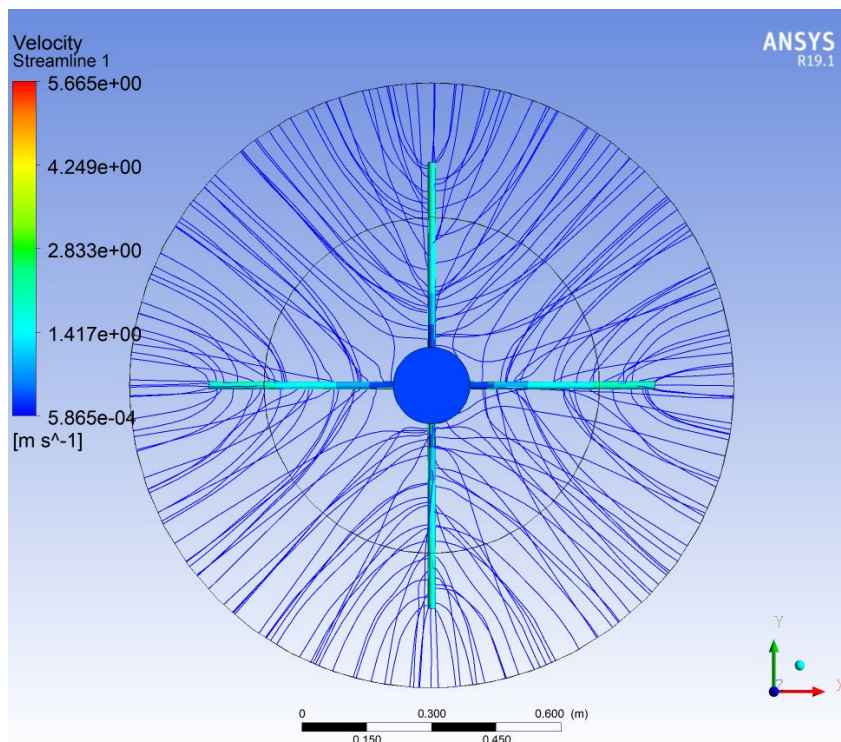
$$r_{ewb} = \frac{r_{dc}}{\sqrt{2}} = \frac{\frac{L_p}{2} + \frac{L_p}{\pi} + \frac{2r_w}{\pi}}{\sqrt{2}}. \quad (122)$$

Ahol:

K_d	irányváltási zóna határának kerülete	[ft],
r_{dc}	K_d kerületű kör sugara	[ft],

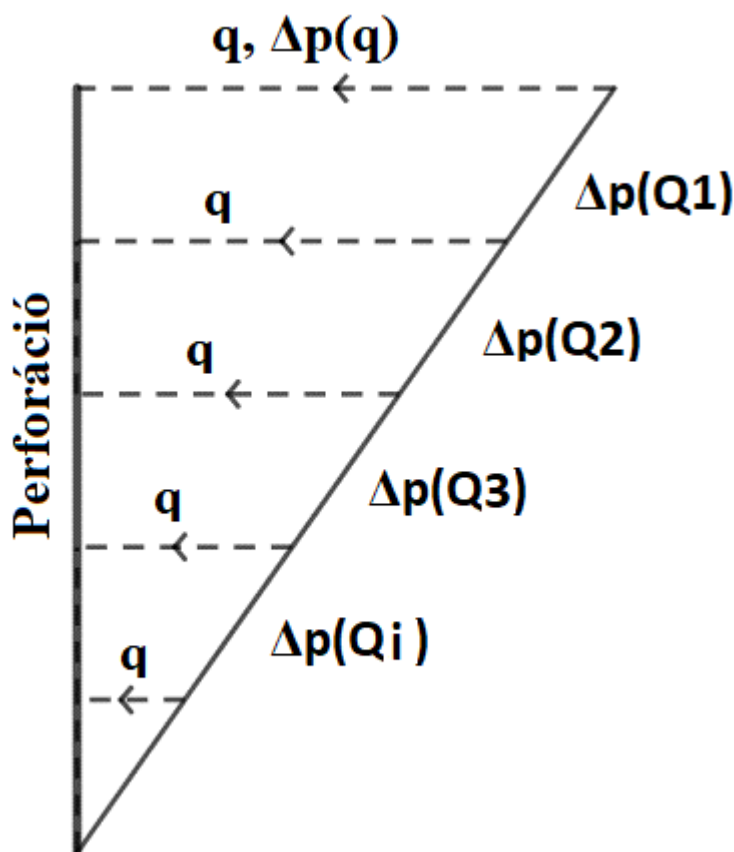
4.5.2 $\theta=45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ fázisszögek esete

A perforációk környékére érve az áramlás irányváltása folyamatos, mint ahogyan azt az alábbi CFD szimuláció szemlélteti (3-40 ábra).



4-40 ábra: áramlási irányváltás CFD szimuláción

Látható, hogy az ábrán a kút körül két koncentrikus kör lett kiemelve. A külső kör az irányváltási zónát, míg a második kör egy szennyezett zónát határol. Mivel a szennyezett zóna hatását egy másik fejezet vizsgálja, ezért ebben az esetben az elárasztott zóna átteresztőképessége megegyezik a közet átteresztőképességével. Látható, hogy a perforációk körül a beáramlás folyamatos. Az eddigiek során világossá vált, hogy mind a kiterjesztett kútsugár, mind a perforációk gyűjtőterének sugara az irányváltás kúttengelytől vett távolságától függ. A folyamatos irányváltást ezért helyettesíteni kell egy olyan diszkrét távolságban történő irányváltásra, aminek az áramlási hatása megegyező azzal. A jelenség a következő egyszerűsített ábrán vizsgálható (3-41 ábra).



4-41 ábra: Folytonos irányváltás modellje

Mivel a perforációs csatorna ebben a környezetben végtelen vezetőként viselkedik, ezért annak mentén állandó a nyomás (3.2-es fejezet). Tehát az ábrán szereplő szaggatott, irányított egyenesek talppontjából bármelyik útvonalat választva megegyezőnek kell lennie a nyomásesésnek. Ez alapján:

$$\sum \Delta p(Q_i) = \Delta p(q) \quad (123)$$

$$Q_i = (n - i)q \quad (124)$$

Radiális áramlás esetében, feltételezve, hogy az irányváltás a térfogaton belül egyenletesen történik, a 328-as egyenlet alapján:

$$\sum \Delta p(Q_i) = \int \frac{C_2}{h_p} \left(\frac{Q}{X^2} r^2 \right) \left(\frac{1}{r} + \frac{C_1}{h_p} \frac{1}{C_2} \frac{1}{r^2} \left(\frac{Q}{X^2} r^2 \right) \right) dr \quad (125)$$

ahol C_1 és C_2 az eddig használt értékek olajra és gázra, r pedig a kúttengelytől vett távolság. A távolságot, ahol az irányváltás elkezdődik, vagyis az irányváltási zóna határát jelöli X . Az egyenértékű kútsugárig a teljes térfogatáramra a nyomásesés megegyezik a folyamatos irányváltás során létrejövő nyomáseséssel.

$$\frac{Q^2 C_1}{h_p^2} \left(\frac{1}{r_{ewb}} - \frac{1}{X} \right) + \frac{Q C_2}{h_p} \ln \left(\frac{X}{r_{ewb}} \right) = \int \frac{C_2}{h_p} \left(\frac{Q}{X^2} r^2 \right) \left(\frac{1}{r} + \frac{\frac{C_1}{h_p}}{C_2} \frac{1}{r^2} \left(\frac{Q}{X^2} r^2 \right) \right) dr \quad (126)$$

$$\frac{Q^2 C_1}{h_p^2} \left(\frac{1}{r_{ewb}} - \frac{1}{X} \right) + \frac{Q C_2}{h_p} \ln \left(\frac{X}{r_{ewb}} \right) = \frac{Q^2 C_1}{h_p^2} \frac{1}{3X} + \frac{Q C_2}{h_p} \frac{1}{2} \quad (127)$$

Nyomásesés abban az esetben, ha a teljes térfogatáram irányváltása egy pontban összpontosul:

$$\frac{Q^2 C_1}{h_p^2} \left(\frac{1}{r_{ewb}} - \frac{4}{3X} \right) + \frac{Q C_2}{h_p} \ln \left(\frac{X}{r_{ewb} \sqrt{e}} \right) = 0 \quad (128)$$

A fenti egyenletből látható, hogy az egyenértékű kútsugár nem független az áramlási sebességtől. A négyzetes tag együtthatójának zérushelye:

$$r_{ewb} = 0.750X \quad (129)$$

Az elsőfokú tag együtthatójának zérushelye:

$$r_{ewb} = \frac{1}{\sqrt{e}} X \approx 0.606X \quad (130)$$

Az egyenlőség akkor teljesülhet csak, ha a két együttható ellentétes előjelű (ellenkező esetben a Q előjele lenne negatív). Ebből következik, hogy:

$$0.606X < r_{ewb} < 0.750X \quad (131)$$

Nagy áramlási sebességek esetén a 0.75-ös értékhez vesz fel közelebbi értéket az egyenértékű kútsugár, alacsony áramlási sebességek esetén pedig a 0.606-hoz. Mivel a két érték közötti különbség igen kicsi, a kettő négyzetes közepének használatával az így választott érték okozta hiba elhanyagolható lesz.

$$r_{ewb} = \sqrt{\frac{0.75^2 + e^{-1}}{2}} X = 0.682X \quad (132)$$

A perforációk fojtó hatását szemléltető ábrákon (3-3, 8-4, 8-6 és 8-8 ábrák) látható, hogy az egyes csatornák gyűjtőtere szabályos sokszögek közé zárják a kútkörnyéket. Vagyis rendre szabályos három-, négy-, hat- és nyolcszög alakul ki a gyűjtőterek tengelyére merőleges síkokból 120°, 90°, 60° és 45° fázisszög esetében. Ahogyan a CFD szimulációból látszik (3-40 ábra), az irányváltás a szabályos sokszögbe írható kör ívére tehető. Így:

$$X = L_p \quad (133)$$

A megkülönböztetett szerepe miatt az értekezésben továbbra is „X”-ként hivatkozok az irányváltási határ távolságára.

Az eddigi levezetés során feltétel volt, hogy a kút pontszerű (vagyis kiterjedés nélküli) gyűjtő legyen. Ebben az esetben jó közelítéssel meghatározható az egyenértékű kútsugár. A kút nem zérus kiterjedése ellenére a viselkedés igen jól közelíthető az előző levezetéssel, mivel a perforáció környéki áramlásra korlátozódik, ahol a perforáció talppontja pontszerűnek tekinthető. Így az egyenértékű kútsugár:

$$r_{ewb} = r_w + 0.682X \quad (134)$$

4.6 Az elárasztott zóna hatása

A kút környezetében kialakult elárasztott zónában a különböző hatásoknak köszönhetően csökken a közet áteresztő képessége. Ez az áteresztőképesség romlás nagyban befolyásolja a nyomásesést a kútkörnyéken. A szennyezettség kiterjedésének nagysága szerint meg kell különböztetnünk azt az esetet, amikor annak sugara túlnyúlik a perforációkon és amikor nem.

A következő levezetések során feltételezzük, hogy az elárasztott zóna kiterjedése (r_s), valamint az áteresztőképessége (k_s) ismertek. Az áteresztőképesség változása miatt, egyes eddig használt paraméterek változnak. Alkalmazva a $\frac{k}{k_s} = \varepsilon$ jelölést:

$$C'_1 = C_1 \varepsilon^\varphi \quad (135)$$

$$C'_2 = C_2 \varepsilon \quad (136)$$

$$\alpha' = \frac{\alpha}{\varepsilon} \quad (137)$$

Ahol φ a β tényező meghatározásához használt képletben a permeabilitás kitevője.

4.6.1 Nem túlnyúló perforációk

Amennyiben a perforációk rövidebbek, mint a szennyezés sugara ($r_s > L_p + r_w$), az áramlás három részre bontható. A három részre külön-külön meghatározható a darcy és nem-darcy tényezője a hozamegyenletnek:

- 1 Áramlás a szennyezett zónáig (r_s):

$$A_1 = C_1 \times \frac{1}{h_p^2} \left(\frac{1}{r_s} \right) \quad (138)$$

$$B_1 = C_2 \times \frac{\ln \left(0.472 \left(\frac{r_e}{r_s} \right) \right)}{h} \quad (139)$$

- 2 Áramlás az irányváltásig a szennyezett zónában:

$$A_2 = C'_1 \times \frac{1}{h_p^2} \left(\frac{1}{r_{ewb}} - \frac{1}{r_s} \right) \quad (140)$$

$$B_2 = C_2' \times \frac{\ln\left(\frac{r_s}{r_{ewb}}\right)}{h} \quad (141)$$

3 Áramlás a perforációk felé a szennyezett zónában:

$$A_3 = C_1' \times \frac{\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_{ep}}}{L_p^2} \left(\frac{1}{ns \times h_p}\right)^2 \quad (142)$$

$$B_3 = C_2' \times \frac{\ln\left(\frac{r_{ep}}{r_p} \times \left(\frac{r_c}{r_p}\right)^{\frac{1-\alpha'}{\alpha'}}\right)}{L_p} \left(\frac{1}{ns \times h_p}\right) \quad (143)$$

A teljes darcy tag:

$$B_t = B_1 + B_2 + B_3 \quad (144)$$

$$B_t = C_2 \frac{\ln\left(0.472 \left(\frac{r_e}{r_s}\right)\right)}{h} + C_2 \varepsilon \frac{\ln\left(\frac{r_s}{r_{ewb}}\right)}{h} + C_2 \varepsilon \frac{\ln\left(\frac{r_{ep}}{r_p} \times \left(\frac{r_c}{r_p}\right)^{\frac{1-\alpha'}{\alpha'}}\right)}{L_p} \left(\frac{1}{ns \times h_p}\right) \quad (145)$$

$$B_t = C_2 \frac{\ln\left(0.472 \left(\frac{r_e}{r_w}\right)\right) + \ln\left(\frac{r_w}{r_s}\right) + \ln\left(\left(\frac{r_s}{r_{ewb}}\right)^\varepsilon\right) + \ln\left(\left(\frac{r_{ep}}{r_p} \times \left(\frac{r_c}{r_p}\right)^{\frac{1-\alpha'}{\alpha'}}\right)^{\frac{\varepsilon h}{L_p \times ns \times h_p}}\right)}{h} \quad (146)$$

$$B_t = C_2 \frac{\ln\left(0.472 \left(\frac{r_e}{r_w}\right)\right) + S_1 + S_2 + S_3}{h} \quad (147)$$

$$S_1 = \ln\left(\frac{r_w}{r_s}\right) \quad (148)$$

$$S_2 = \ln\left(\left(\frac{r_s}{r_{ewb}}\right)^\varepsilon\right) \quad (149)$$

$$S_3 = \ln \left(\left(\frac{r_{ep}}{r_p} \times \left(\frac{r_c}{r_p} \right)^{\frac{1-\alpha'}{\alpha'}} \right)^{\frac{\varepsilon h}{L_p \times ns \times h_p}} \right) \quad (150)$$

A teljes nem-darcy tag:

$$A_t = A_1 + A_2 + A_3 \quad (151)$$

$$A_t = C_1 \frac{1}{h_p^2} \left(\frac{1}{r_s} \right) + C_1 \varepsilon^\varphi \frac{1}{h_p^2} \left(\frac{1}{r_{ewb}} - \frac{1}{r_s} \right) + C_1 \varepsilon^\varphi \frac{\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_{ep}}}{L_p^2} \left(\frac{1}{ns \times h_p} \right)^2 \quad (152)$$

$$A_t = C_1 \frac{1}{h_p^2} \left(\frac{1}{r_w} \right) \left(\frac{r_w}{r_s} + \varepsilon^\varphi r_w \left(\frac{1}{r_{ewb}} - \frac{1}{r_s} \right) \right) \quad (153)$$

$$+ \varepsilon^\varphi r_w \left(\frac{h_p}{L_p \times ns \times h_p} \right)^2 \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_{ep}} \right)$$

$$A_t = C_1 \frac{1}{h_p^2} \left(\frac{1}{r_w} \right) (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) \quad (154)$$

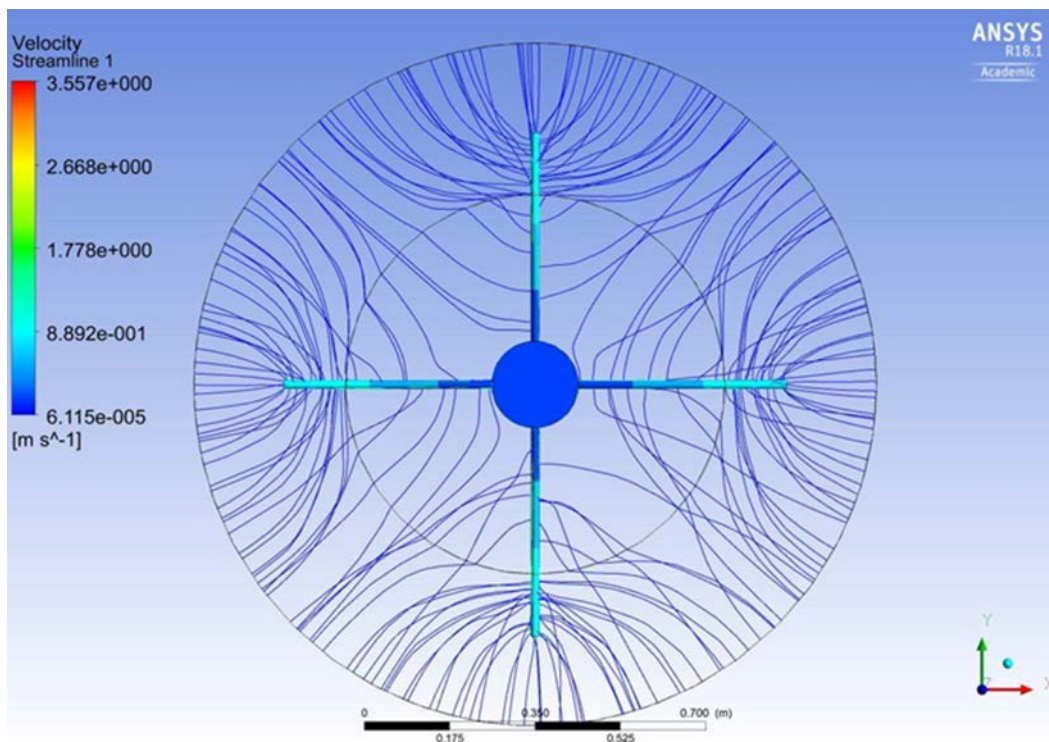
$$\lambda_1 = \frac{r_w}{r_s} \quad (155)$$

$$\lambda_2 = \varepsilon^\varphi r_w \left(\frac{1}{r_{ewb}} - \frac{1}{r_s} \right) \quad (156)$$

$$\lambda_3 = \varepsilon^\varphi r_w \left(\frac{h_p}{L_p \times ns \times h_p} \right)^2 \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_{ep}} \right) \quad (157)$$

4.6.2 Túlnyúló perforációk

Amennyiben a perforációk túlnyúlnak a szennyezett terület sugarán, az áramlást több részre kell felbontani. Ezt támasztja alá az alább látható CFD szimuláció eredménye, amin megfigyelhető, hogy az elárasztott zónán belül (belső koncentrikus kör) az áramvonalak száma jelentősen lecsökken (3-42-es ábra).



4-42 ábra: CFD szimuláció túlnyúló perforációk esetében

Először a teljes térfogatáram az első irányváltás helyéig áramlik.

$$A_1 = C_1 \times \frac{1}{h_p^2} \left(\frac{1}{r_{ewb1}} \right) \quad (158)$$

$$B_1 = C_2 \times \frac{\ln \left(0.472 \left(\frac{r_e}{r_{ewb1}} \right) \right)}{h} \quad (159)$$

$$p_r - p_{ewb1} / p_r^2 - p_{ewb}^2 = A_1 q^2 + B_1 q \quad (160)$$

Ezt követően az áramló fluidum egy része a tiszta zónában a perforációk irányába áramlik tovább, a többi pedig a szennyezett zónában áramlik tovább a kút tengelyére merőlegesen. Az első irányváltás pontjának matematikailag annak a pontnak kell lennie, ameddig a teljes

fluidumáramlás ugyanakkora nyomásvesztéset eredményez, mint az egyenletesen csökkenő folyadékáram.

Perforáció felé áramlás:

$$A_{2p} = C_1 \times \frac{\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_{ep}(r_{ewb1})}}{(L_p - r_s + r_w)^2} \left(\frac{1}{ns \times h_p} \right)^2 \quad (161)$$

$$B_{2p} = C_2 \times \frac{\ln \left(\frac{r_{ep}(r_{ewb1})}{r_p} \times \left(\frac{r_c}{r_p} \right)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} \right)}{(L_p - r_s + r_w)} \left(\frac{1}{ns \times h_p} \right) \quad (162)$$

$$p_{ewb1} - p_{wft} / p_{ewb1}^2 - p_{wft}^2 = A_{2p}(q(1-a))^2 + B_{2p}q(1-a) \quad (163)$$

Szennyezett zónában áramlás az irányváltásig:

$$A_{2k} = C'_1 \times \frac{1}{h_p^2} \left(\frac{1}{r_{ewb2}} - \frac{1}{r_s} \right) \quad (164)$$

$$B_{2k} = C'_2 \times \frac{\ln \left(\frac{r_s}{r_{ewb2}} \right)}{h} \quad (165)$$

$$p_{ewb1} - p_{ewb2} / p_{ewb1}^2 - p_{ewb2}^2 = A_{k2}(q(a))^2 + B_{k2}q(a) \quad (166)$$

A szennyezett zónában az áramlás a perforációkig:

$$A_3 = C'_1 \times \frac{\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_{ep}(r_{ewb2})}}{(r_s - r_w)^2} \left(\frac{1}{ns \times h_p} \right)^2 \quad (167)$$

$$B_3 = C'_2 \times \frac{\ln \left(\frac{r_{ep}(r_{ewb2})}{r_p} \times \left(\frac{r_c}{r_p} \right)^{\frac{1-\alpha'}{\alpha'}} \right)}{r_s - r_w} \left(\frac{1}{ns \times h_p} \right) \quad (168)$$

$$p_{ewb2} - p_{wft} / p_{ewb2}^2 - p_{wft}^2 = A_3(q(a))^2 + B_3q(a) \quad (169)$$

A teljes darcy tag:

$$B_t = B_1 + B_{k2} + B_3 \quad (170)$$

$$B_t = C_2 \frac{\ln\left(0.472\left(\frac{r_e}{r_{ewb1}}\right)\right)}{h} + aC_2\varepsilon \frac{\ln\left(\frac{r_s}{r_{ewb2}}\right)}{h} + aC_2\varepsilon \frac{\ln\left(\frac{r_{ep}(r_{ewb2})}{r_p} \times \left(\frac{r_c}{r_p}\right)^{\frac{1-\alpha'}{\alpha'}}\right)}{L_p} \left(\frac{1}{ns \times h_p}\right) \quad (171)$$

$$B_t = C_2 \frac{\ln\left(0.472\left(\frac{r_e}{r_w}\right)\right) + \ln\left(\frac{r_w}{r_{ewb1}}\right) + \ln\left(\left(\frac{r_s}{r_{ewb2}}\right)^{a\varepsilon}\right) + \ln\left(\left(\frac{r_{ep}(r_{ewb2})}{r_p} \times \left(\frac{r_c}{r_p}\right)^{\frac{1-\alpha'}{\alpha'}}\right)^{\frac{a\varepsilon h}{L_p \times ns \times h_p}}\right)}{h} \quad (172)$$

$$B_t = C_2 \frac{\ln\left(0.472\left(\frac{r_e}{r_w}\right)\right) + S_1 + S_2 + S_3}{h} \quad (173)$$

$$S_1 = \ln\left(\frac{r_w}{r_{ewb1}}\right) \quad (174)$$

$$S_2 = \ln\left(\left(\frac{r_s}{r_{ewb2}}\right)^{a\varepsilon}\right) \quad (175)$$

$$S_3 = \ln\left(\left(\frac{r_{ep}(r_{ewb2})}{r_p} \times \left(\frac{r_c}{r_p}\right)^{\frac{1-\alpha'}{\alpha'}}\right)^{\frac{a\varepsilon h}{(r_s - r_w) \times ns \times h_p}}\right) \quad (176)$$

A teljes nem-darcy tag:

$$A_t = A_1 + A_{k2} + A_3 \quad (177)$$

$$A_t = C_1 \frac{1}{h_p^2} \left(\frac{1}{r_{ewb1}} \right) + C_1 a^2 \varepsilon^\varphi \frac{1}{h_p^2} \left(\frac{1}{r_{ewb2}} - \frac{1}{r_s} \right) + C_1 a^2 \varepsilon^\varphi \frac{\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_{ep}(r_{ewb2})}}{L_p^2} \left(\frac{1}{ns \times h_p} \right)^2 \quad (178)$$

$$A_t = C_1 \frac{1}{h_p^2} \left(\frac{1}{r_w} \right) \left(\frac{r_w}{r_{ewb1}} + a^2 \varepsilon^\varphi r_w \left(\frac{1}{r_{ewb2}} - \frac{1}{r_s} \right) + a^2 \varepsilon^\varphi r_w \left(\frac{h_p}{L_p \times ns \times h_p} \right)^2 \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_{ep}(r_{ewb2})} \right) \right) \quad (179)$$

$$A_t = C_1 \frac{1}{h_p^2} \left(\frac{1}{r_w} \right) (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) \quad (180)$$

$$\lambda_1 = \frac{r_w}{r_{ewb1}} \quad (181)$$

$$\lambda_2 = a^2 \varepsilon^\varphi r_w \left(\frac{1}{r_{ewb2}} - \frac{1}{r_s} \right) \quad (182)$$

$$\lambda_3 = a^2 \varepsilon^\varphi r_w \left(\frac{h_p}{(r_s - r_w) \times ns \times h_p} \right)^2 \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_{ep}(r_{ewb2})} \right) \quad (183)$$

Látható, hogy az az eset, amikor a perforációk nem nyúlnak át a szennyezett zónán egy olyan speciális eset, ahol:

- $a = 1$,
- $r_{ewb1} = r_s$,
- $r_{ewb2} = r_{ewb}$.

A fenti egyenletekben r_{ewb1} , r_{ewb2} és „ a ” értékei ismeretlenek. Mivel a szennyezett zónában a kút tengelyére merőleges térfogatáram egyenletesen nullára csökken, ezért erre az esetre érvényes a 3.5.2-es alfejezetben bemutatott levezetés, és így:

$$r_{ewb2} = r_w + 0.682(r_s - r_w) \quad (184)$$

Ha nem tapasztalható a szennyezett zónában átteresztőképesség csökkenés, akkor „a” értéke az alábbiak szerint meghatározható:

$$a = \frac{(r_s - r_w)^2 - r_w^2}{(X + r_w)^2 - r_w^2} \quad (185)$$

Mivel a szennyezett zónán belül kisebb az átteresztőképesség, ezért ott az áramlás energiaigényesebb. Ezáltal a két zóna között az irányváltás mértéke is eltérő, azaz a tiszta zónában kevesebb energiaveszteséget jelent a perforációk felé áramlás. Tehát a zónahatárig kevesebb fluidum jut el, mint teljesen tiszta esetben. Ez egyenértékű azzal, mintha az irányváltási intervallum megrövidülne és ennek az elméleti rövidülésnek a hatása pedig az elárasztott zónában hat. Ha a rövidülést a $r_s \rightarrow \omega r_s$ transzformációval jelöljük (tehát a rövidülési arány ω):

$$a = \frac{(\omega r_s - r_w)^2 - r_w^2}{(X + r_w + r_s(1 - \omega))^2 - r_w^2} \quad (186)$$

A rövidülési arány megtalálásához meg kell vizsgálni, hogy mennyivel nagyobb kútsugár esetén lesz ugyanakkora a nyomásesés egy szennyezett zónában, mint egy tisztában:

$$C_1 \frac{1}{h_p^2} \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_s} \right) q^2 + C_2 \frac{\ln\left(\frac{r_s}{r_w}\right)}{h} q = C_1 \varepsilon^\varphi \frac{1}{h_p^2} \left(\frac{1}{x \times r_w} - \frac{1}{r_s} \right) q^2 + C_2 \varepsilon \frac{\ln\left(\frac{r_s}{x \times r_w}\right)}{h} q \quad (187)$$

Látható, hogy a megoldás nem független a térfogatáramtól. Ezzel a fenti egyenlet analóg a (128) egyenlettel, így megoldani is hasonlóképpen lehetséges.

A másodfokú tag együtthatójának zérushelye:

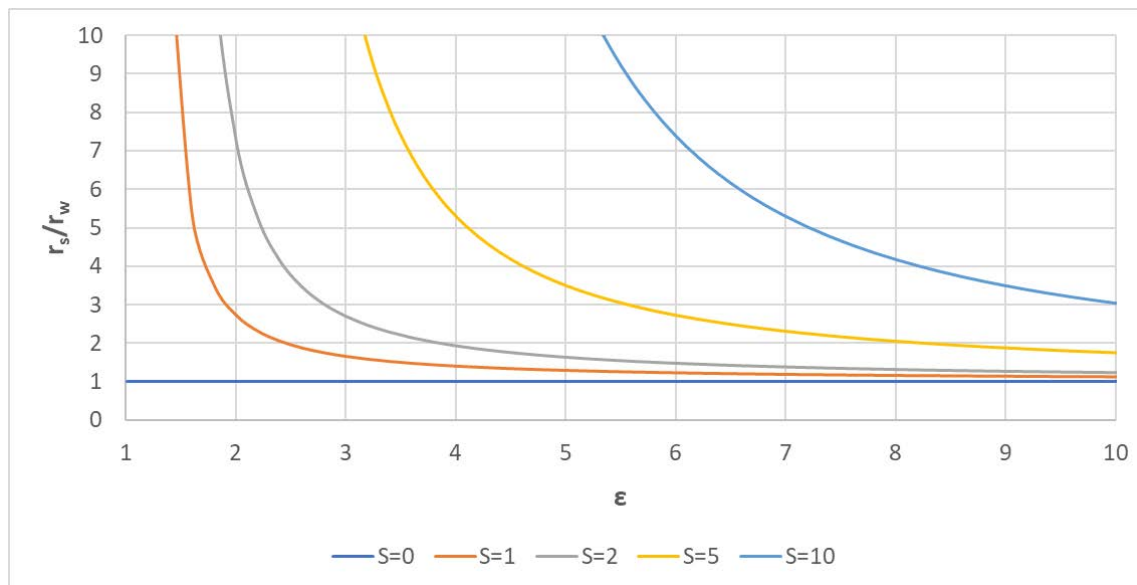
$$x_1 = \frac{r_s}{r_w} \frac{\varepsilon^\varphi}{\varepsilon^\varphi - \left(1 - \frac{r_s}{r_w}\right)} \quad (188)$$

Az elsőfokú tag együtthatójának zérushelye:

$$x_2 = \frac{r_s}{r_w} \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \quad (189)$$

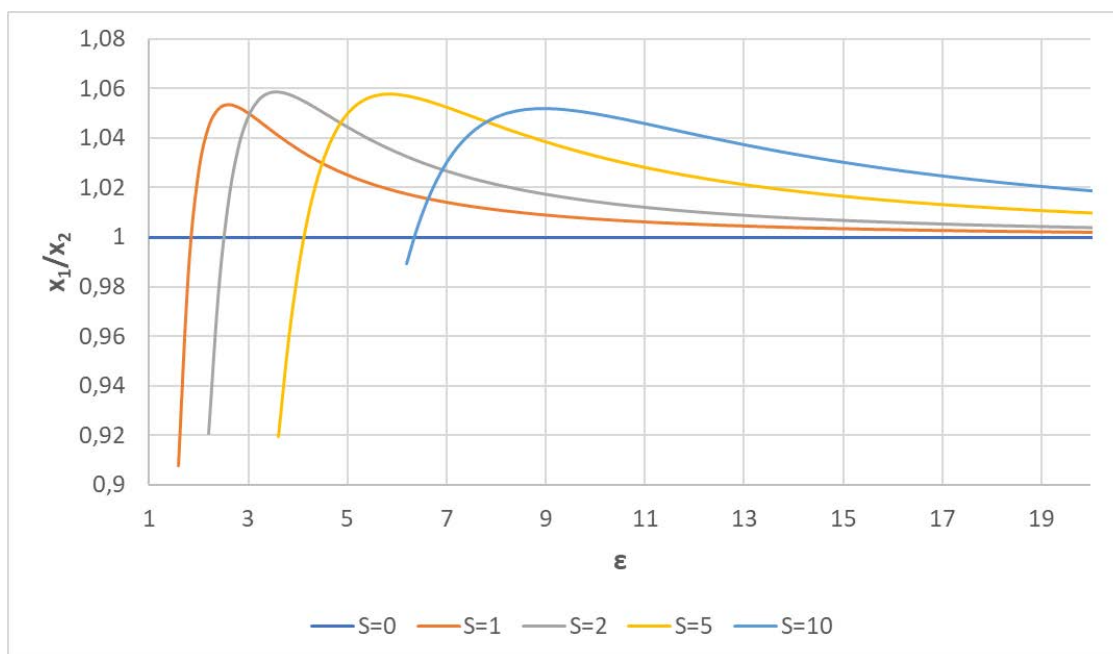
Az $\frac{r_s}{r_w}$ hányados nem vehet fel akármilyen értéket hiszen egy adott szkin tényező esetében k_s egyértelműen meghatározza a (72) egyenlet szerint (3-43 ábra). Mindemellett alapvető

feltételezés, hogy az elárasztott zóna nem nyúlik túl a perforációkon, tehát a kiterjedésnek határt szab a perforáció hossza.



4-43 ábra: r_s/r_w aránya különböző szkin értékek esetén

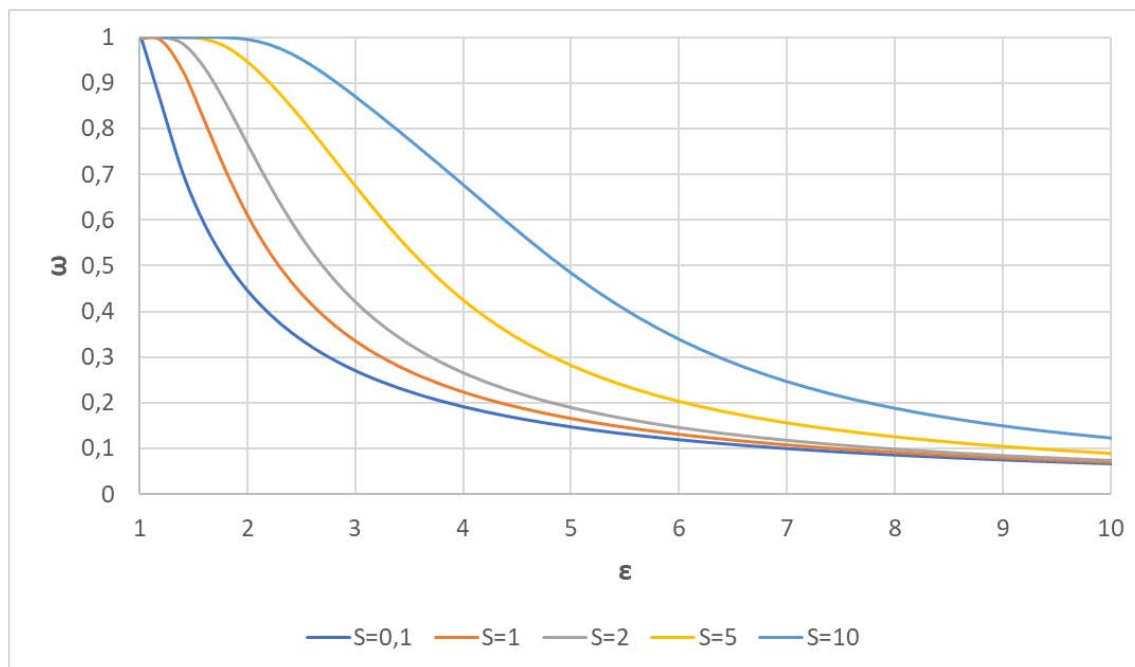
Feltételezve, hogy $\frac{r_s}{r_w}$ értéke nem nagyobb mint 10, x_1 és x_2 értéke igen közel esik egymáshoz (3-44 ábra).



4-44 ábra: sugárváltozás arányok különböző szkin értékek esetén

Ez alapján ω értékére jó közelítést ad az alábbi egyenlet:

$$\omega = \frac{\frac{r_s}{r_w} - \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2}{2}}}{\frac{r_s}{r_w} - 1} \quad (190)$$



4-45 ábra: Effektív hosszváltozás különböző szkin értékek esetében

A fenti ábra grafikusán ábrázolja az effektív hosszváltozást. Látható, hogy amennyiben az elárasztott zóna permeabilitása a tiszta zóna permeabilitásához közelít ($\epsilon = 1$ -hez közelít), ω értéke 1-hez tart. Ez azt jelenti, hogy minél kisebb az átteresztőképesség kontrasztja, annál kisebb a törés az irányváltás mértékében. A másik véglet felé közelítve ω aszimptotikusan közelít 0-hoz, - vagyis végtelen átteresztőképesség romlás esetében - beáramlás csak a tiszta zónákon keresztül van a perforációkba. A számítások eredményeit az „N-Melléklet” tartalmazza.

A fentiek szerint számolt „a” értéke valójában csak közelítő értékű, mivel a számolás nem veszi figyelembe a nyomásesést a perforációs csatornáig. A tényleges értéket a nyomásegyenlőség alapján az alábbi egyenlet megoldásával lehet meghatározni.

$$A_3qa^2 + B_3a + A_{k2}qa^2 + B_{k2}a = A_{2p}q(1 - a)^2 + B_{2p}(1 - a) \quad (191)$$

Az egyenlet explicit megoldása nem lehetséges, mivel a térfogatáram meghatározásához ismerni kell az első irányváltás helyét (r_{ewb1}) és „a” értékét is. Az irányváltás helyére jó első közelítést ad $a = 0$ esetében érvényes $r_{ewb1} = (L_p + r_w - r_s) * 0.682 + r_s$ közelítés. Mivel $a = 1$ azt jelentené, hogy az irányváltás nem történik meg a tiszta zónában, ezért

matematikailag erre az esetre $r_{ewb1} = r_s$ összefüggés igaz. Mindezek alapján a túlnyúló perforációk esetében a következő folyamattal határozható meg a végeredmény:

1. $r_{ewb1} = (L_p + r_w - r_s) * 0.682 + r_s$ kezdőérték felvétele,
2. r_{ewb2} meghatározása,
3. „ a ” meghatározása (186) alapján,
4. A_t , B_t meghatározása,
5. q térfogatáram meghatározása A_t , B_t , p_r és p_{wft} alapján,
6. $a_{új}$ meghatározása 191-es egyenlet alapján,
7. 3-6 pontok ismétlése konvergenciáig ($a_{rég}$ \approx $a_{új}$),
8. $r_{ewb1_{új}}$ meghatározása $r_{ewb1_{új}} = (L_p + r_w - r_s) \times 0.68(1 - a) + r_s$ alapján,
9. 3-8 pontok ismétlése konvergenciáig ($r_{ewb1_{rég}} \approx r_{ewb1_{új}}$).

4.7 Az egyenlet végső alakja

Az új egyenlet végső alakja a következők szerint írható le:

$$p_r - p_{wft} / p_r^2 - p_{wft}^2 = Aq^2 + Bq \quad (192)$$

$$A = C_1 \frac{1}{h_p^2} \left(\frac{1}{r_w} \right) (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) \quad (193)$$

$$B = C_2 \frac{\ln \left(0.472 \left(\frac{r_e}{r_w} \right) \right) + S_1 + S_2 + S_3}{h} \quad (194)$$

$$\lambda_1 = \frac{r_w}{r_{ewb1}} \quad (195)$$

$$\lambda_2 = a^2 \varepsilon^\varphi r_w \left(\frac{1}{r_{ewb2}} - \frac{1}{r_s} \right) \quad (196)$$

$$\lambda_3 = a^2 \varepsilon^\varphi r_w \left(\frac{h_p}{L \times ns \times h_p} \right)^2 \left(\frac{1}{r'_{pe}} - \frac{1}{r_{ep}(r_{ewb2})} \right) \quad (197)$$

$$S_1 = \ln \left(\frac{r_w}{r_{ewb1}} \right) \quad (198)$$

$$S_2 = \ln \left(\left(\frac{r_s}{r_{ewb2}} \right)^{a\varepsilon} \right) \quad (199)$$

$$S_3 = \ln \left(\left(\frac{r_{ep}(r_{ewb2})}{r'_{pe}} \times \left(\frac{r'_{ce}}{r'_{pe}} \right)^{\frac{1-a\varepsilon}{\alpha\varepsilon}} \right)^{\frac{a\varepsilon h}{L \times ns \times h_p}} \right) \quad (200)$$

$$\alpha = \frac{k_c}{k} \quad (201)$$

(k_c a zúzott zóna permeabilitása)

$$\varepsilon = \frac{k}{k_s} \quad (202)$$

$$a = \frac{(\omega r_s - r_w)^2 - r_w^2}{(X + r_w + r_s(1 - \omega))^2 - r_w^2} \quad (203)$$

$$\omega = \frac{\frac{r_s}{r_w} - \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2}{2}}}{\frac{r_s}{r_w} - 1} \quad (204)$$

$$X = L_p \quad (205)$$

$$x_1 = \frac{r_s}{r_w} \frac{\varepsilon^\varphi}{\varepsilon^\varphi - \left(1 - \frac{r_s}{r_w}\right)} \quad (206)$$

$$x_2 = \frac{r_s}{r_w} \frac{\varepsilon^{-1}}{\varepsilon} \quad (207)$$

$$r_{ewb2} = r_w + 0.682(r_s - r_w) \quad (208)$$

$$L = \begin{cases} L_p, & \text{ha } L_p + r_w < r_s, \text{ vagy } k_s = k \\ r_s, & \text{ha } L_p + r_w < r_s \end{cases} \quad (209)$$

Speciális esetek:

A szennyezett zóna túlnyúlik a perforációkon	Nincs szennyezett zóna
$a = 1$	$a = 1$
$r_{ewb1} = r_s$	$r_{ewb1} = r_{ewb}$
$r_{ewb2} = r_{ewb}$	$r_{ewb2} = r_{ewb}$
$\varepsilon = \frac{k}{k_s}$	$\varepsilon = 1 (k_s = k)$
$r_s = r_s$	$r_s = r_{ewb}$

$$r'_{pe} = \left(\frac{r_p}{4}\right) \left(1 + \sqrt{\frac{k_V}{k_H}}\right) \quad (210)$$

$$r'_{ce} = r'_{ce} = r'_{pe} + r'_c - r'_p. \quad (211)$$

r_{ewb} meghatározása:

$\Theta = 0^\circ$:

$$K_d = 2\pi \frac{L_p}{2} - 2 \arcsin \left(\frac{r_w}{\frac{L_p}{2} + r_w} \right) \frac{L_p}{2}, \quad (212)$$

$$r_{dc} = \frac{K_d}{2\pi} = \frac{L_p}{2} - \arcsin \left(\frac{r_w}{\frac{L_p}{2} + r_w} \right) \frac{L_p}{2\pi}, \quad (213)$$

$$r_{ewb} = \frac{r_{dc}}{\sqrt{2}} = \frac{\frac{K_d}{2\pi} = \frac{L_p}{2} - \arcsin \left(\frac{r_w}{\frac{L_p}{2} + r_w} \right) \frac{L_p}{2\pi}}{\sqrt{2}}. \quad (214)$$

$\Theta = 180^\circ$:

$$K_d = 2\pi \frac{L_p}{2} + 2L_p + 4r_w, \quad (215)$$

$$r_{dc} = \frac{K_d}{2\pi} = \frac{L_p}{2} + \frac{L_p}{\pi} + \frac{2r_w}{\pi}, \quad (216)$$

$$r_{ewb} = \frac{r_{dc}}{\sqrt{2}} = \frac{\frac{L_p}{2} + \frac{L_p}{\pi} + \frac{2r_w}{\pi}}{\sqrt{2}}. \quad (217)$$

$0^\circ < \Theta < 180^\circ$:

$$r_{ewb} = r_w + 0.682X \quad (218)$$

r_{ep} meghatározása:

$\Theta = 0^\circ / \Theta = 180^\circ$:

$$A_{pdrain} = 4\pi \left(\frac{\left(\frac{1}{2ns} \frac{360}{\Theta} \frac{L_p}{2} \right)^{1.6} + \left(\frac{1}{2ns} \frac{360}{\Theta} r_{ewb} \right)^{1.6} + \left(\frac{L_p}{2} r_{ewb} \right)^{1.6}}{3} \right)^{0.625}. \quad (219)$$

$$r_{ep} = \frac{A_{pdrain}}{\pi L_p}. \quad (220)$$

$0^\circ < \Theta < 180^\circ$:

$$P_1(L) = \left(\frac{1}{ns} \right)^2 \left(\left(\frac{360}{\Theta} \right)^2 - \frac{360}{\Theta} + 1 \right) + \left(2L \tan \left(\frac{\Theta}{2} \right) \right)^2, \quad (221)$$

$$P_2(L) = 12 \left(L \tan \left(\frac{\Theta}{2} \right) \left(\frac{1}{ns} \right) \left(\frac{360}{\Theta} \right) \right)^2, \quad (222)$$

$$a_{ep}(L) = \sqrt{\frac{P_1 + \sqrt{P_1^2 - P_2}}{6}}, \quad (223)$$

$$K_{ep}(L) = \pi \left(\frac{3}{2} \left(a_{ep} + \frac{L \tan \left(\frac{\Theta}{2} \right) \left(\frac{360}{\Theta} \right) \left(\frac{1}{ns} \right)}{a_{ep} \sqrt{3}} \right) + \sqrt{\frac{L \tan \left(\frac{\Theta}{2} \right) \left(\frac{360}{\Theta} \right) \left(\frac{1}{ns} \right)}{\sqrt{3}}} \right), \quad (224)$$

$$r_{ep}(L) = \frac{K_{ep}(L)}{2\pi}. \quad (225)$$

5 Eredmények az új módszerrel

Az előző fejezetekből egyértelműen kiderült, hogy a perforáció hatására eddig használt módszerek alkalmazhatósága kérdéses. A meglévő problémák alapján kialakított kritériumok felállításával lehetőség nyílt egy új, analitikus alapokon nyugvó módszer kidolgozására. Jelen fejezet célja megvizsgálni, hogy milyen eredmények érhetők el eme új módszer alkalmazásával. A vizsgálat eredményeivel bemutatom - mintegy validálás képpen - hogy a modell nemcsak, hogy megfelel a felállított kritériumoknak, de jól közelíti Karakas és Tariq eredményeit is. Megvizsgálom továbbá az egyes perforálási paraméterek hatását a kutak termelékenységére, végül az elárasztott zóna hatását fejtem ki az új modellem segítségével.

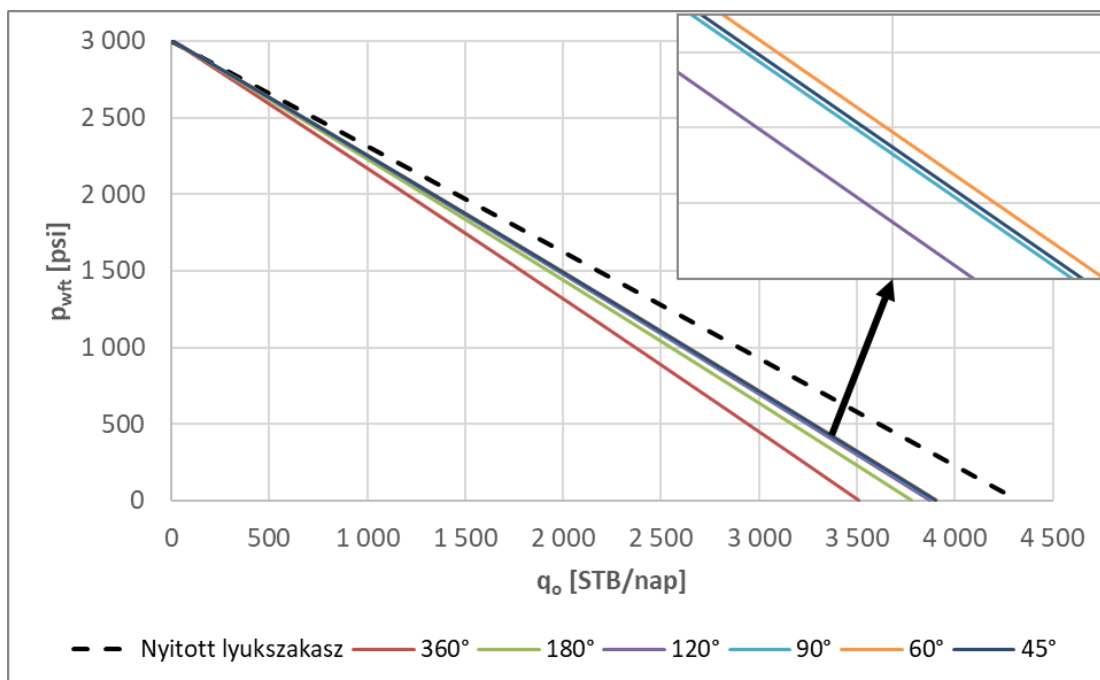
A vizsgálatokhoz több esetben érzékenységi vizsgálatokat végeztem az egyes perforációs paraméterek függvényében. Karakas és Tariq (Karakas & Tariq, 1988) cikke alapján a következőket választottam az egyes paraméterekre:

4-1 táblázat: Érzékenységi vizsgálatok tartománya

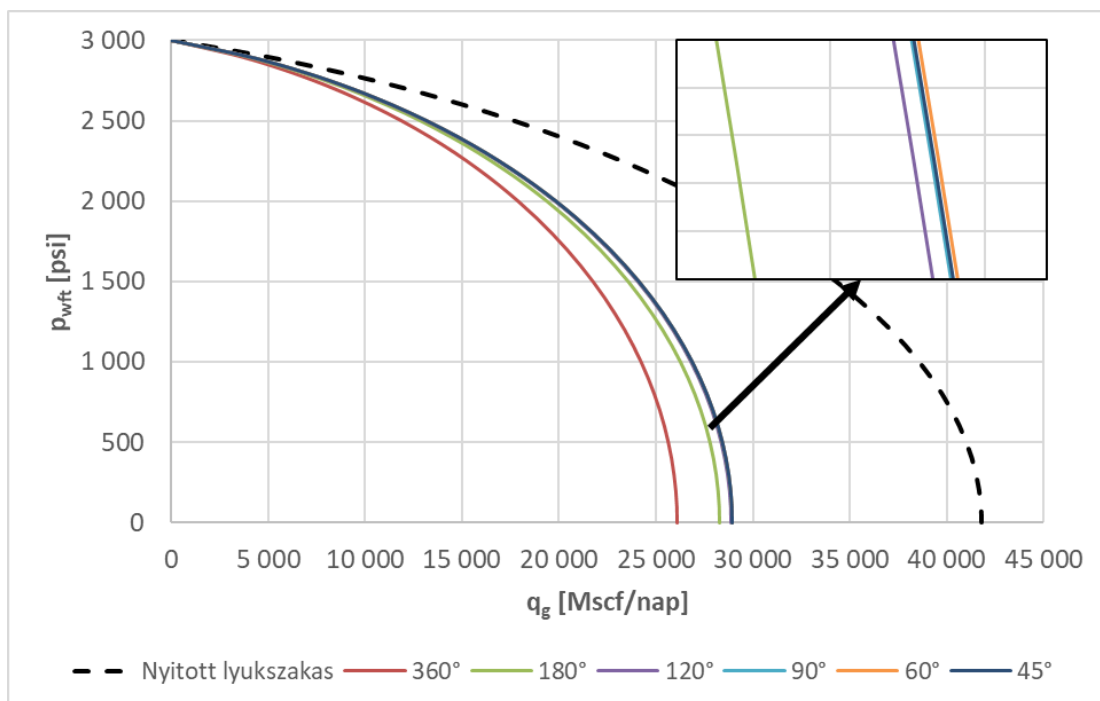
	Kezdő érték	Maximum érték
Lövésűréség (ns)	1 1/ft (3.3 1/m)	8 1/ft (26.25 1/m)
Perforáció hossz (L_p)	0.3 ft (0.091 m)	3 ft (0.91 m)
Perforáció sugár (r_p)	0.09 in (0.23 cm)	0.36 in (0.915 cm)

5.1 Hozamgörbék az új módszer alapján

Az alábbi ábrák a perforált viszonyítási kutakra számolt hozamgörbéket mutatják be az új módszer alapján.



5-1 ábra: Perforált viszonyítási olajkutak hozamgörbéi az új módszer alapján



5-2 ábra: Perforált viszonyítási gázkutak hozamgörbéi az új módszer alapján

A kapott hozamgörbéket összehasonlítva a régebbi módszerekkel számolt hozamgörbéekkel az alábbi megfigyelések tehetők:

- Olajkutak esetében az eredmények nagyon hasonlóak a Karakas és Tariq módszerével számolt eredményekhez (2-2 ábra), azonban az új módszer esetében 60° esetén tapasztalható a legnagyobb hozam.
- Gázkutak esetében az új módszer valamivel nagyobb hozamot jósol 360° -os fázisszög esetében, mint McLeod módszere (2-3 ábra), majd a fázisszög változása lényeges változást eredményez a hozamban. A legnagyobb hozam ebben az esetben is 60° esetében figyelhető meg.

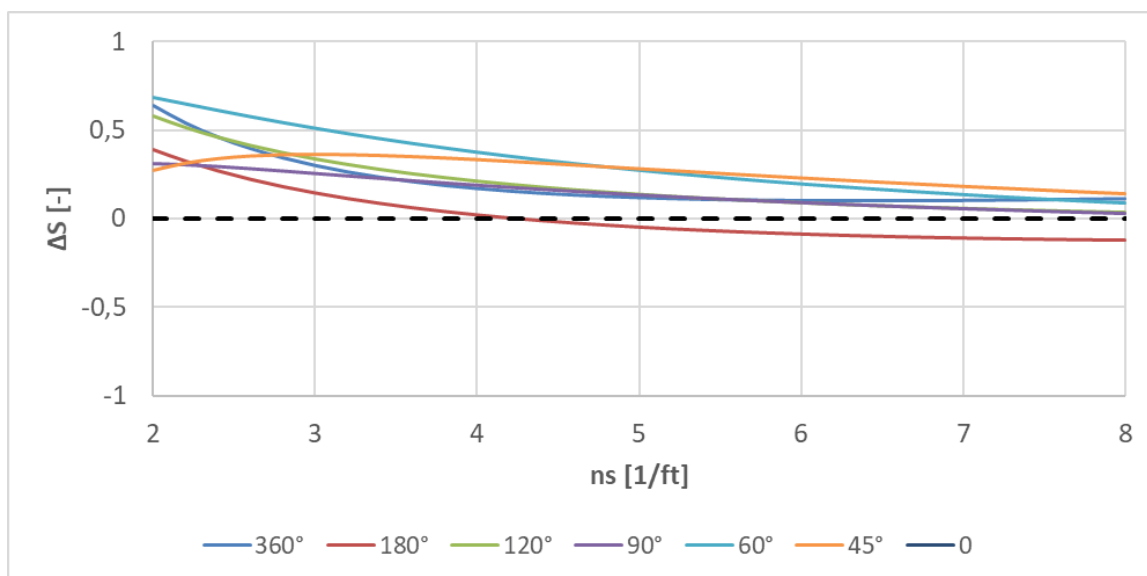
A fentiek alapján a következő következtetések vonhatók le:

- Az új módszer hasonló nagyságrendű - áramlási sebesség független - szkin értékeket ad eredményül, mint Karakas és Tariq módszere.
- Az új módszer alapján a fázisszög hatással van a hozamegyenlet nem-darcy tagjára, viszont a konvergenciát nem becsli túl, mint McLeod módszere.
- Az áramlási sebesség függő, - és független szkin tényezőknek 60° -os fázisszög esetében van minimumuk.

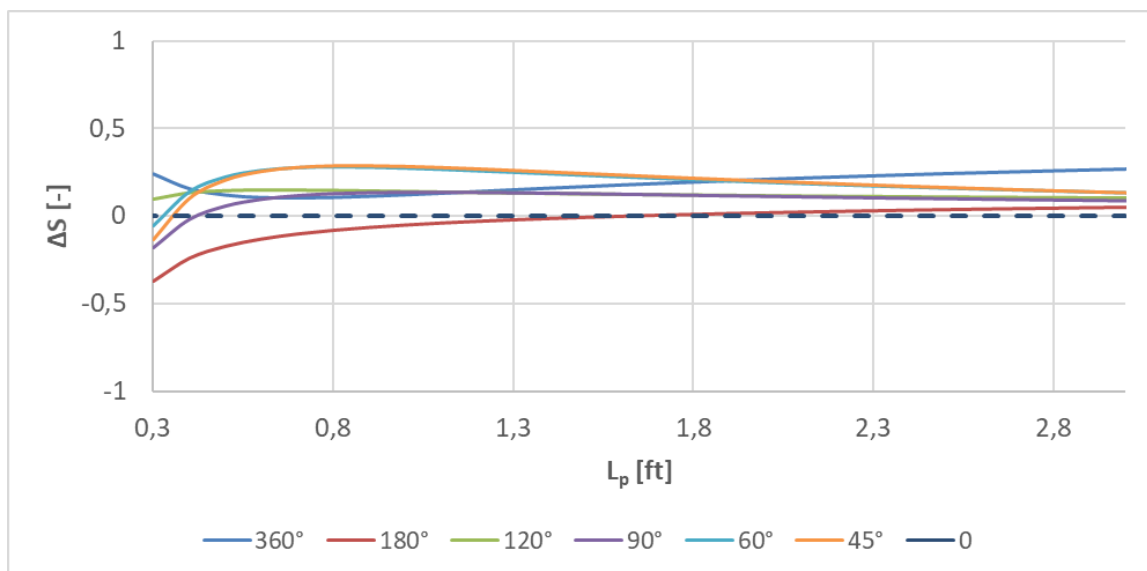
A hozamgörbék számadatai a mellékletekben megtalálhatók (O-Melléklet).

5.2 Szkin tényezők vizsgálata

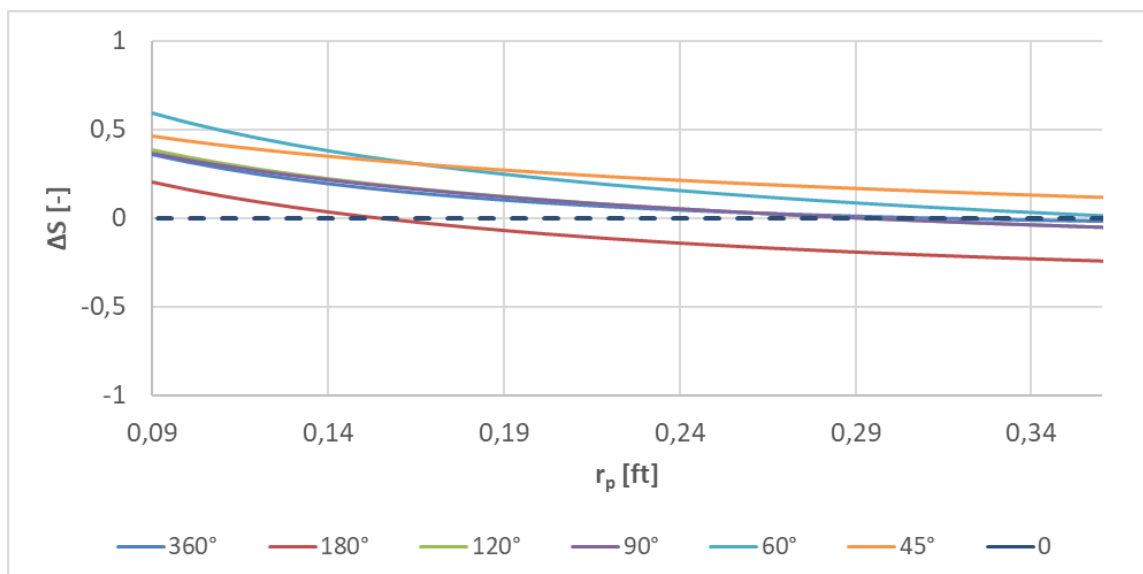
Az előző fejezetben bemutatott következtetések további vizsgálatokat igényelnek. Yldiz (Yldiz, 2016) szerint az iparban mért - áramlási sebesség független - szkin értékeket Karakas és Tariq módszere jól közelíti, tehát a két módszer eredményeit mindenképpen célszerű összehasonlítani. Az alábbiakban közölt ábrák különböző paraméter-összeállítások esetében mutatják meg a Karakas és Tariq módszerével, ill. az új módszerrel számolt szkin tényezők közötti különbséget.



5-3 ábra: Szkin tényezők összehasonlítása lövessűrűség függvényében



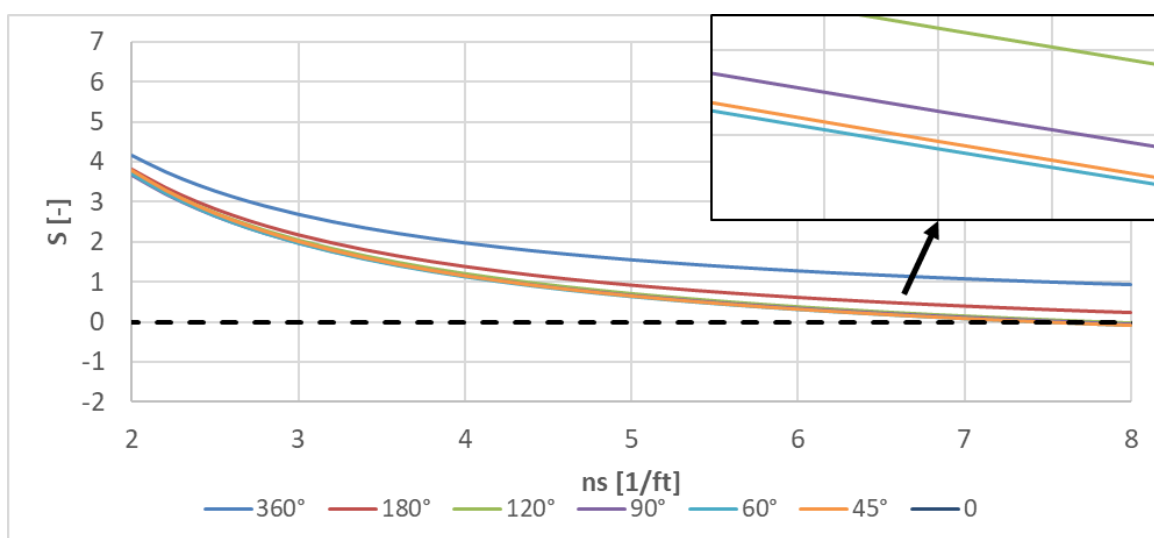
5-4 ábra: Szkin tényezők összehasonlítása perforáció hossz függvényében



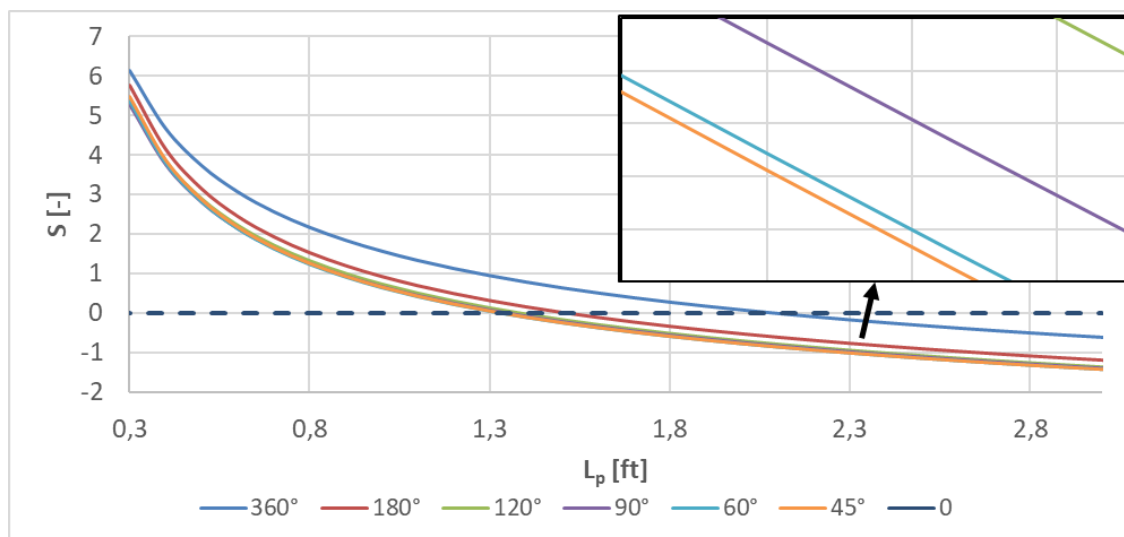
5-5 ábra: Szkin tényezők összehasonlítása perforáció sugár függvényében

Látható, hogy az egyes tartományokon belül az eltérések döntően 0,5 de inkább 0,3 alattiak. Tehát az új módszer jó közelítést ad Karakas és Tariq eredményeire. Ez azt jelenti, hogy a Yıldız által hivatkozott méréseket az új módszer is jól közelíti, hiszen a bemutatott eltérések a mérési pontosság határán mozognak. A számolások eredményeit a „P-Melléklet” tartalmazza.

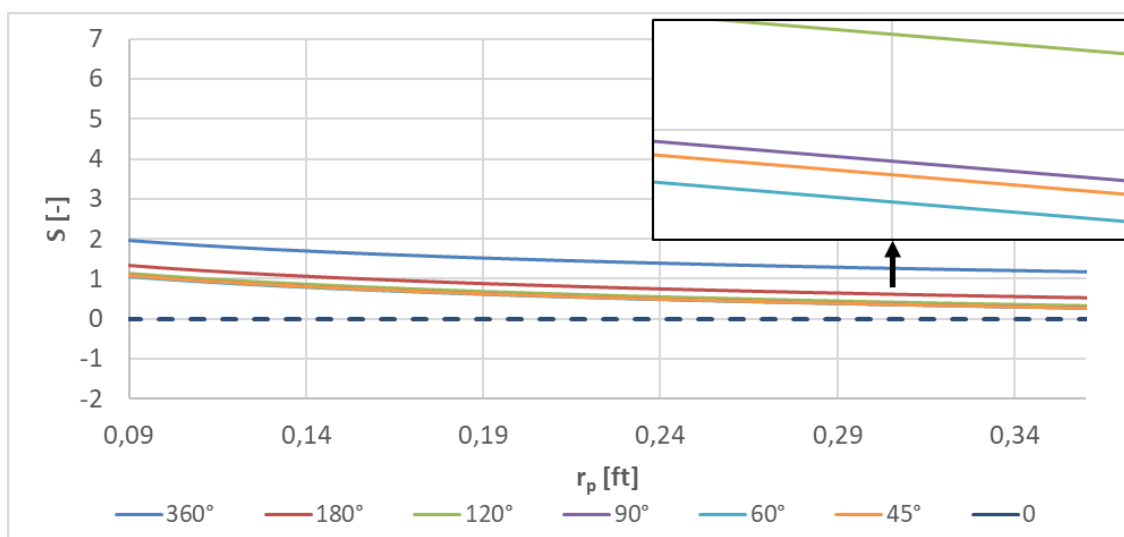
A fázisszög hatását érdemes változó összeállítások alatt vizsgálni, mert a paraméterek között többszörös és igen bonyolult összefüggések vannak.



5-6 ábra: Szkin értékek az új módszer alapján a lövéssűrűség függvényében

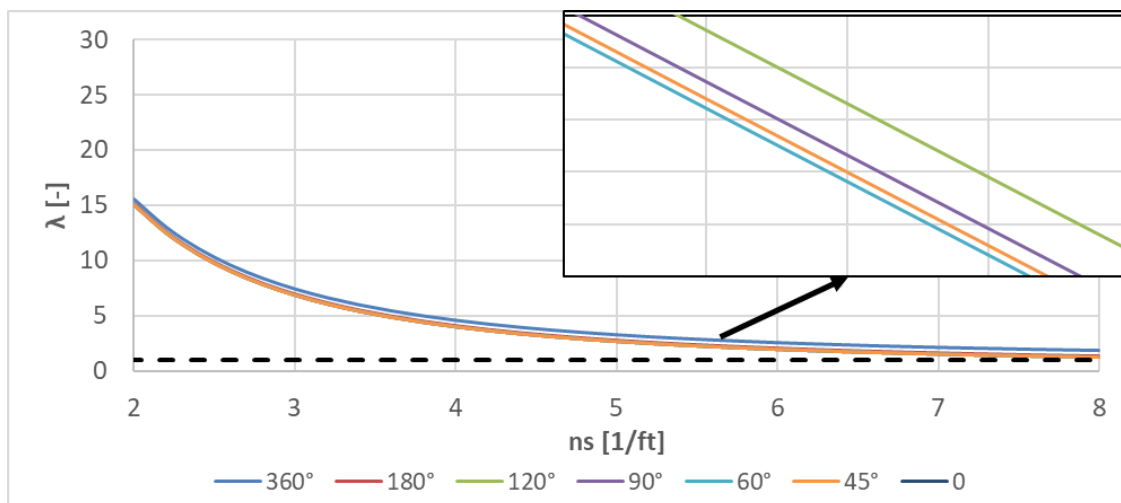


5-7 ábra: Szkin értékek az új módszer alapján a perforáció hossz függvényében

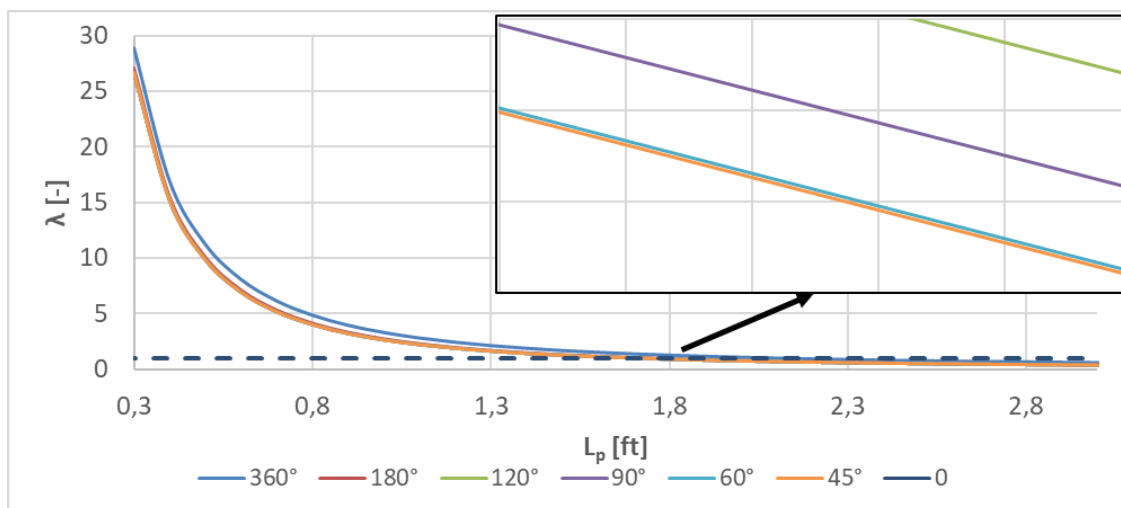


5-8 ábra: Szkin értékek az új módszer alapján a perforáció sugár függvényében

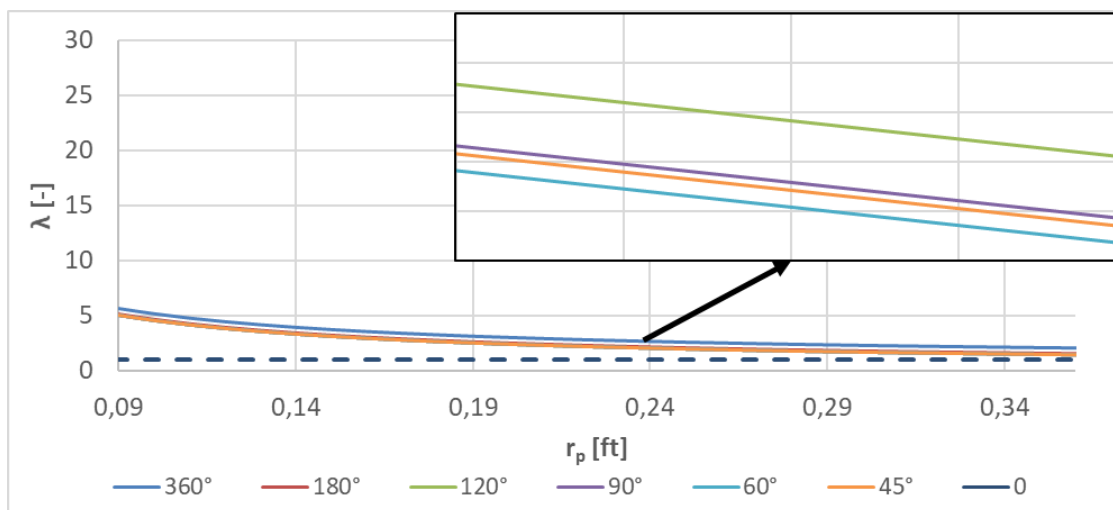
Látható, hogy bizonyos esetekben a 45°fázisszög alacsonyabb szkin értéket eredményez, mint a 60°, bár a különbség marginális. Mivel a végleges hatás az áramlásfüggő tagot is tartalmazza, így arra is el kell végezni a vizsgálatokat. Az eredményeket a „Q-Melléklet” tartalmazza.



5-9 ábra: Áramlásfüggő szkin tényező az új módszer szerint a lövessűrűség függvényében



5-10 ábra: Áramlásfüggő szkin tényező az új módszer szerint a perforáció hossz függvényében



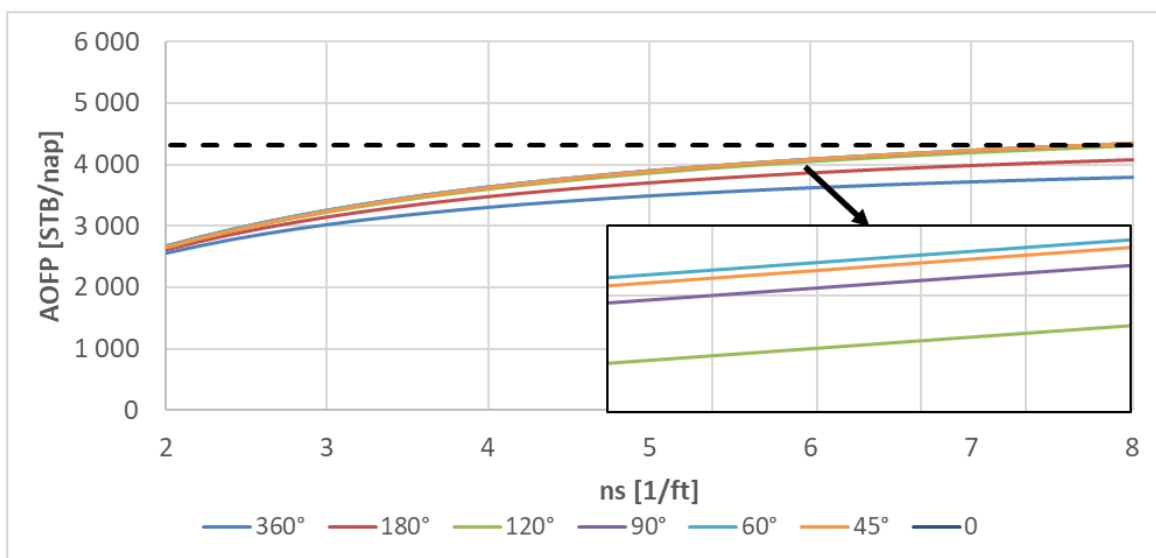
5-11 ábra: Áramlásfüggő szkin tényező az új módszer szerint a perforáció sugár függvényében

A sebességfüggő szkin tényező vizsgálata is hasonló eredményt hozott, mint a sebességfüggetlen tag vizsgálata. Ezek alapján tehát arra lehet következtetni, hogy adott perforáció hossz és lövéssűrűség esetében létezik egy olyan fázisszög, amire a szkin tényezők minimálisak lesznek és ez az érték a vizsgált tartományban 45° és 60° körülre adódik. A jelenség azzal magyarázható, hogy a fázisszög csökkenése kisebb irányváltást eredményez, viszont a közeledő perforációk egymást fojtó hatása idővel ezt elfedi. Mivel a különbségek bőven a mérési pontosság alattiak, ezért 45° és 60° fázisszög egyaránt a legjobb hatásfokot eredményezi. A számítási eredményeket az „R-Melléklet” tartalmazza.

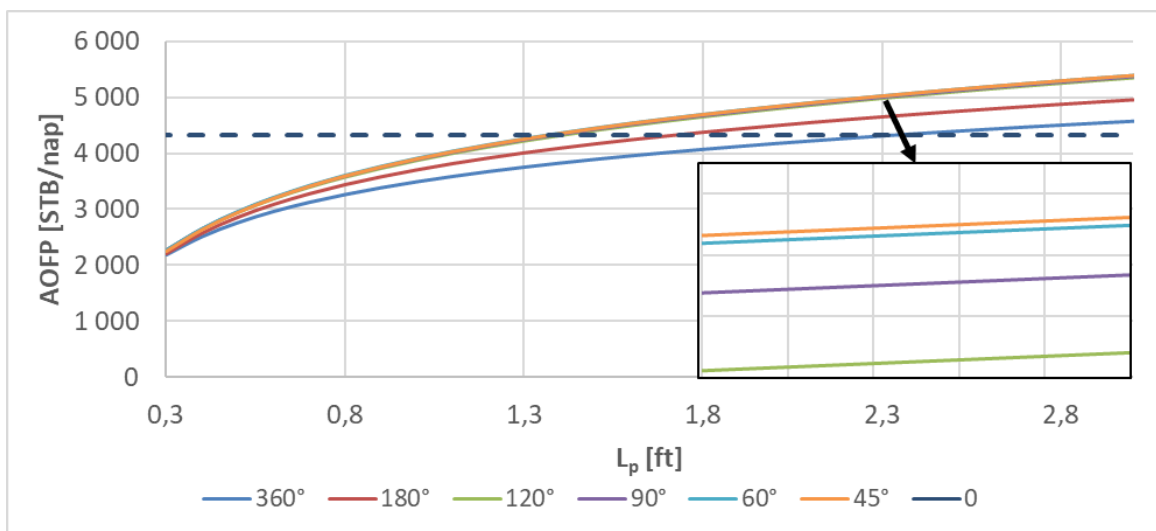
Az ábrákon megfigyelhető az is, hogy a sebesség függő, - és független szkin tényezők bizonyos paraméterek változására lényegesen érzékenyebbek. Látható, hogy míg a perforációs sugár változása marginális változást eredményez, addig a hossz változás már számottevőbb.

5.3 A perforációs paraméterek hatása a termelékenységre

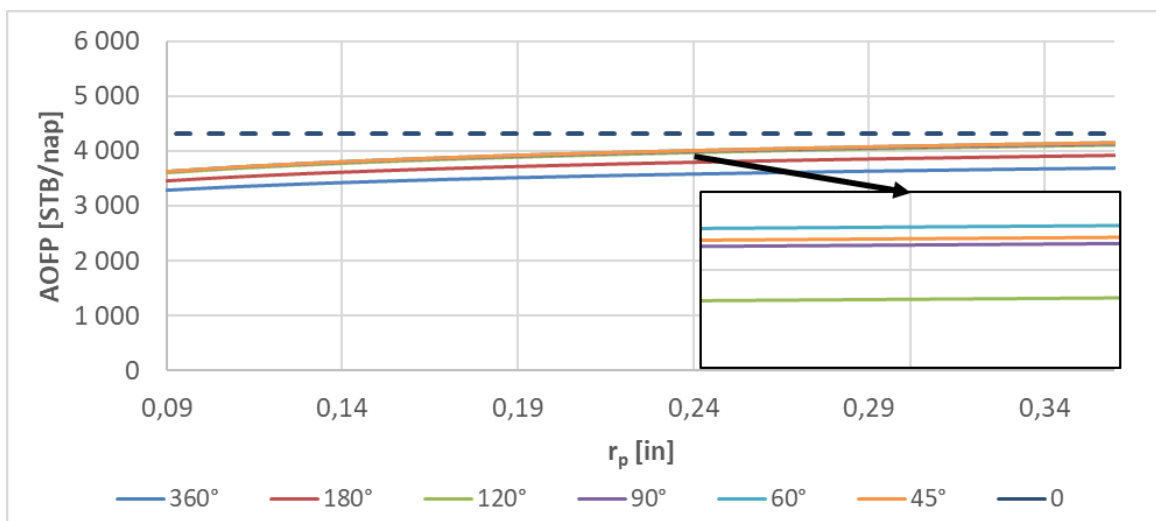
Az előző alfejezet bemutatta, hogy lényeges különbségek vannak az egyes paraméterek szkin tényezőkre gyakorolt hatásában. Az új módszer segítségével számolt AOFP értékeket összehasonlítva a nyitott lyukszakaszos kiképzésre vonatkozó AOFP értékkel ezek a hatások mélyebben vizsgálhatók. Az ábrákon a nyitott lyukszakaszos kútkiképzést a szaggatott vonal jelöli.



5-12 ábra: Lövessűrűség hatása az AOFP-re (olaj)

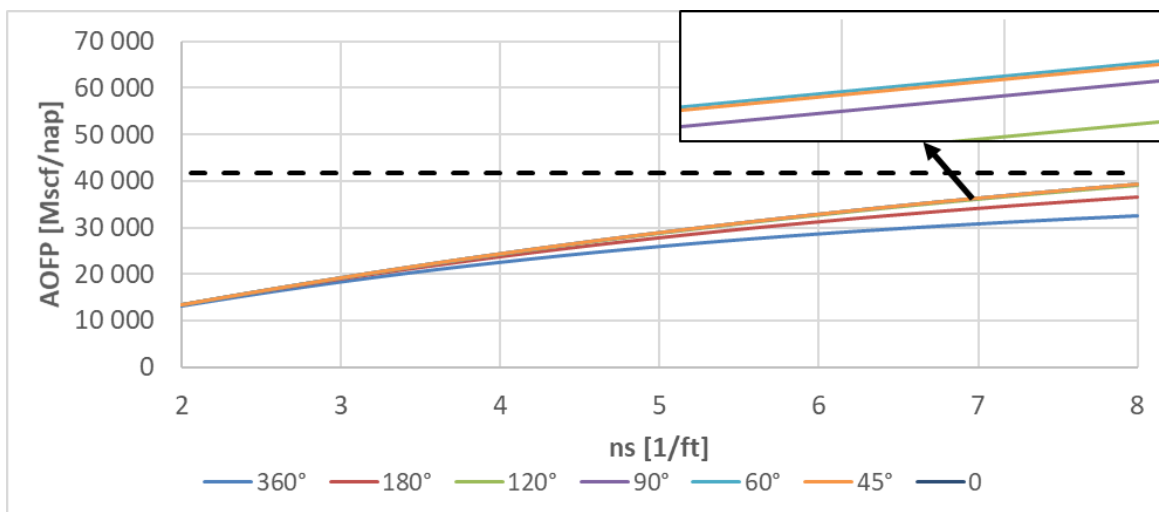


5-13 ábra: Perforáció hossz hatása az AOFP-re (olaj)

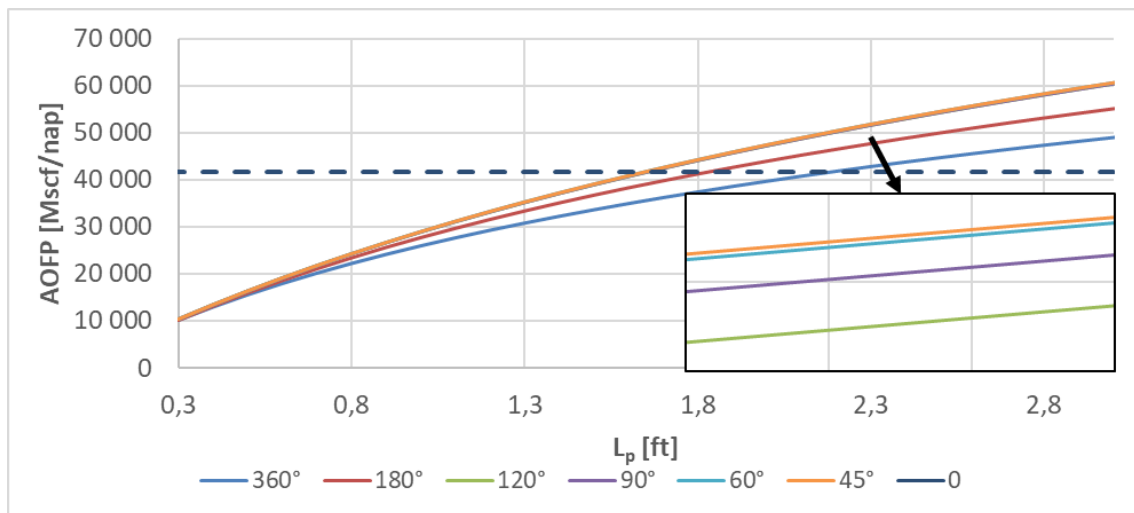


5-14 ábra: Perforáció sugár hatása az AOFP-re (olaj)

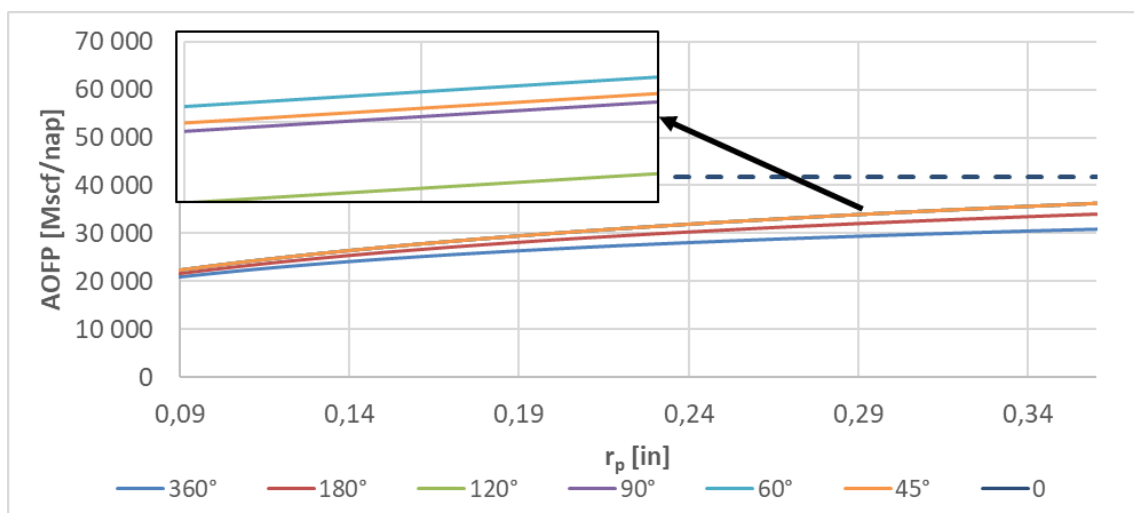
Mivel az ábrák azonos függőleges felbontással készültek, ezért a görbék meredekségéből következtetni lehet az egyes paraméterek okozta hatás nagysága közötti sorrendre. Eszerint a perforációk hossza fejt ki a legnagyobb hatást az olajtermelésre, míg a sugár hatása szinte elhanyagolható. Megfigyelhető továbbá, hogy a 45°-os és a 60°-os fázisszögek adják a legjobb eredményeket marginális különbséggel. A görbék egyes esetekben a szaggatott vonal fölé érnek. Ez azt jelenti, hogy létezik olyan perforálás, aminek hatására a perforált kút termelékenysége nagyobb lesz, mint a nyitott lyukszakasszal kiképzett kút termelékenysége!



5-15 ábra: Lövéssűrűség hatása az AOFP-re (gáz)



5-16 ábra: Perforáció hossz hatása az AOPF-re (gáz)

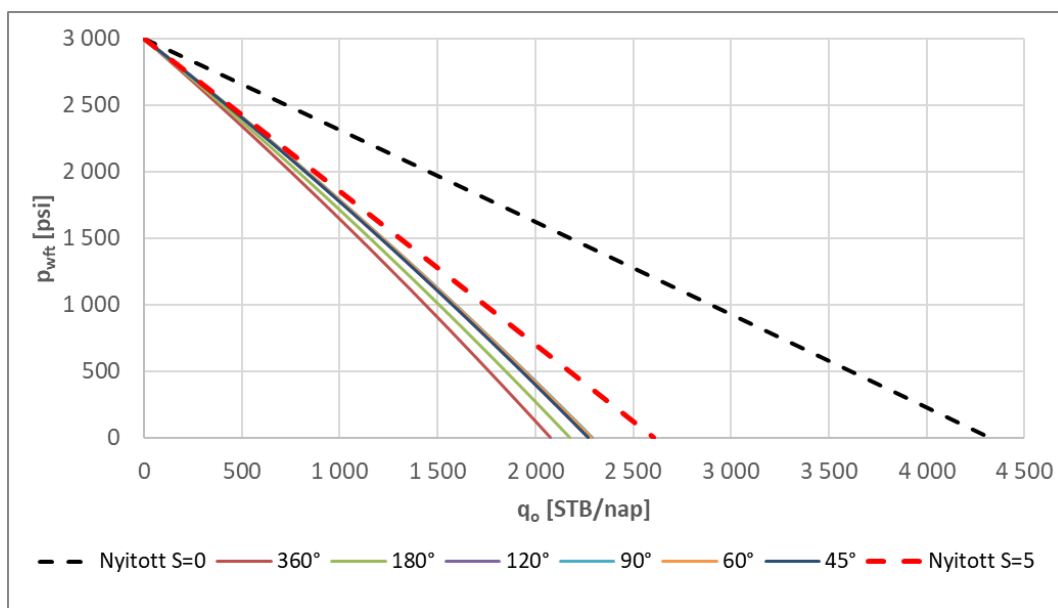


5-17 ábra: Perforáció sugár hatása az AOPF-re (gáz)

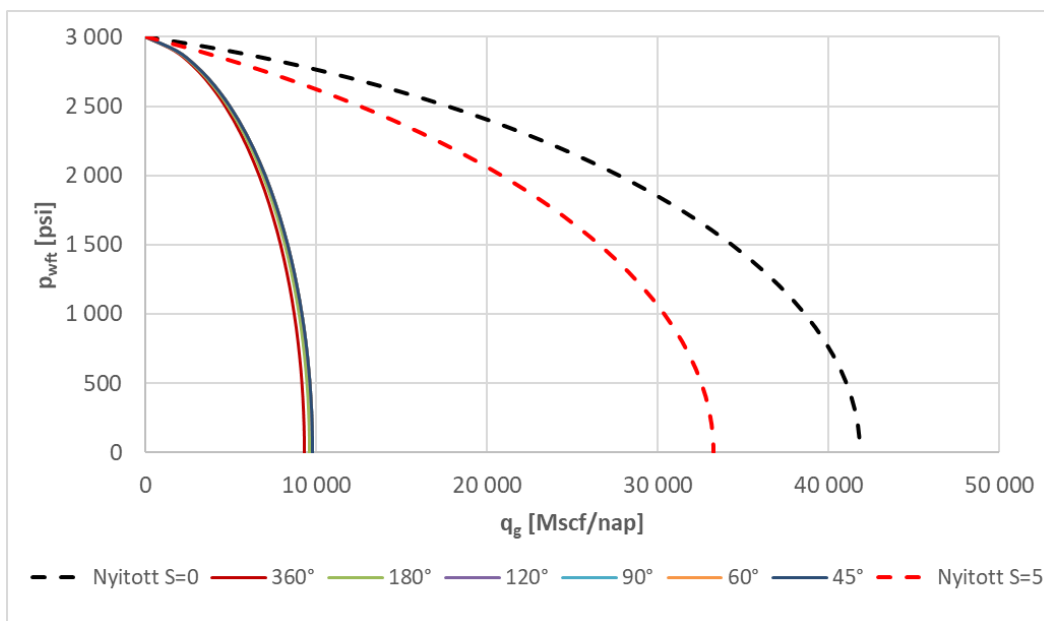
A gázkutak eredményei erősen korrelálnak az olajkutak eredményeivel. A fázisszögre, egyes paraméterek hatására tett megfigyelések ezekben az esetekben is érvényesek. Jobb termelékenység szintén megfigyelhető az eredményekben, mint a nyitott kiképzés esetében. Fontos kiemelni a két eredmény sor közötti szembetűnő különbséget is: a vizsgált tartományon belül arányosan sokkal nagyobb a változás gázkutak esetében, mint olajkutak esetében. Ennek az az oka, hogy a gáz lényegesen nagyobb sebességgel áramlik a kútba, ezért a sebességfüggő szkin hatása sokkal fajsúlyosabb lesz. A számítási eredményeket az „S-Melléklet” tartalmazza.

5.4 Az elárasztott zóna hatásának vizsgálata

Az elárasztott zóna hatásának vizsgálatához először egy viszonyítási alapot szolgáló zóna felvétele szükséges. Legyen ennek a zónának $S=5$ szkin értéke nyitott lyukszakaszos kútkiképzés esetében, úgy, hogy a zóna kiterjedése egy lábbal nagyobb, mint a kút kiterjedése ($r_s = r_w + 1 = 1.292 \text{ ft} (0.394 \text{ m})$). Ekkor a zónán belül az áteresztőképesség a 72-es összefüggés alapján $k_s = 24.872 \text{ mD}$. Amennyiben a perforációk nem nyúlnak túl az elárasztott zónán ($L_p = 0.5 \text{ ft}$), a kutak hozama az alábbi ábrák szerint alakul.

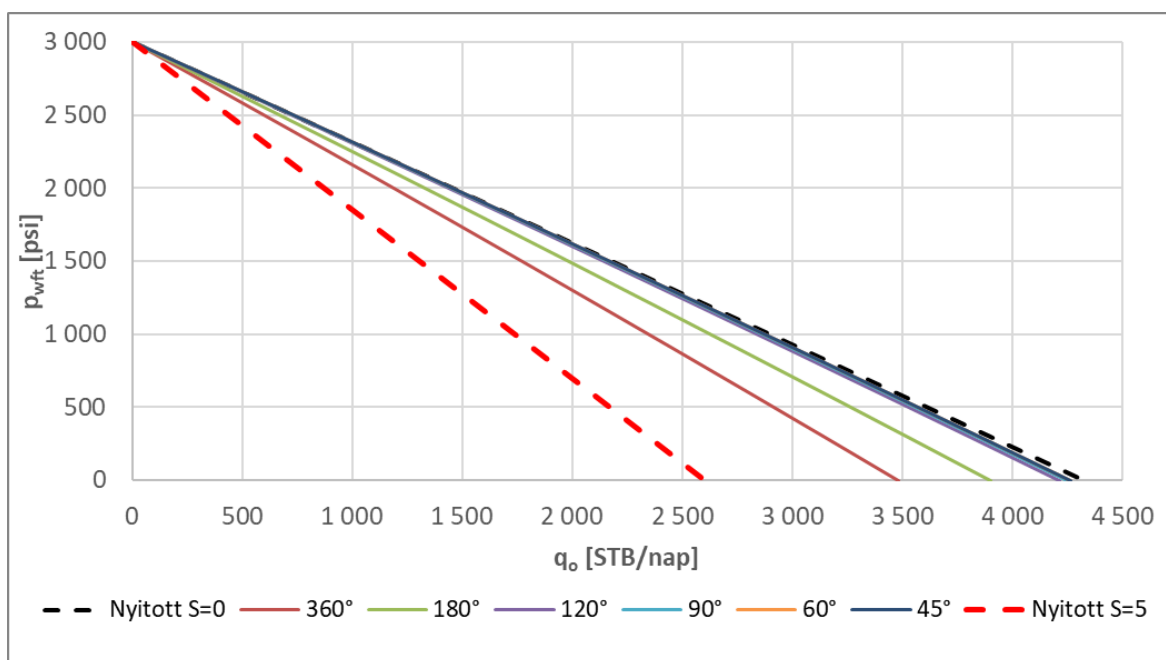


5-18 ábra: A szennyezett zóna hatása olajkutak hozamára (nem túlnyúló perforációk esetében)

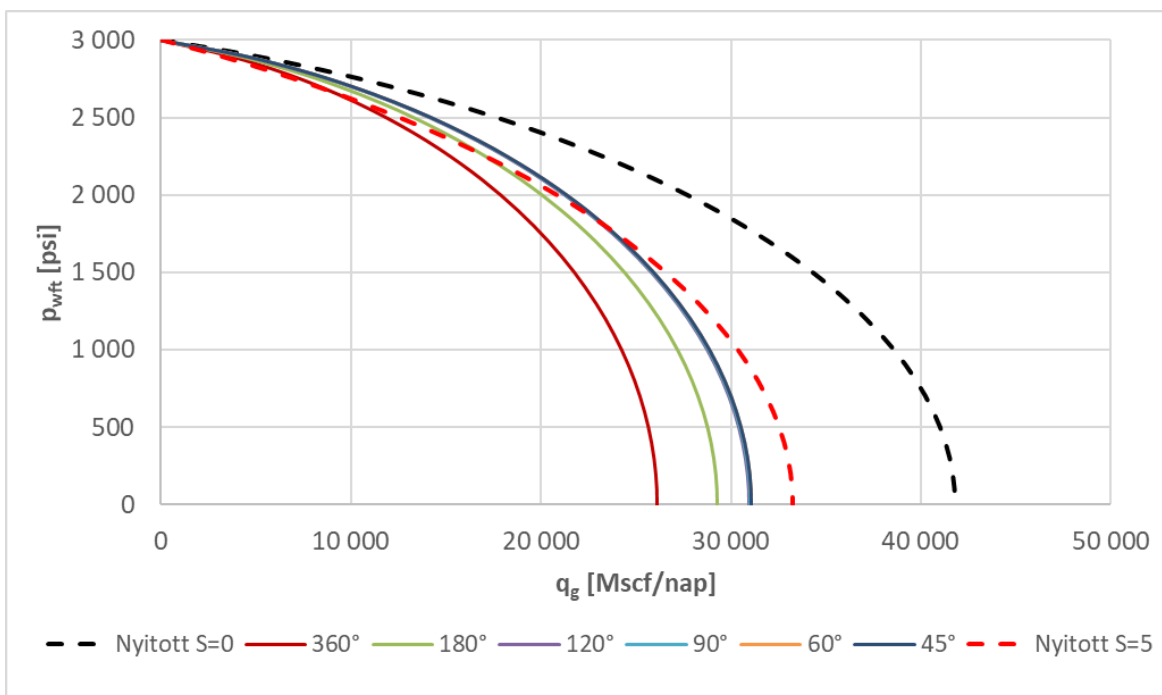


5-19 ábra: A szennyezett zóna hatása gázkutak hozamára (nem túlnyúló perforációk esetében)

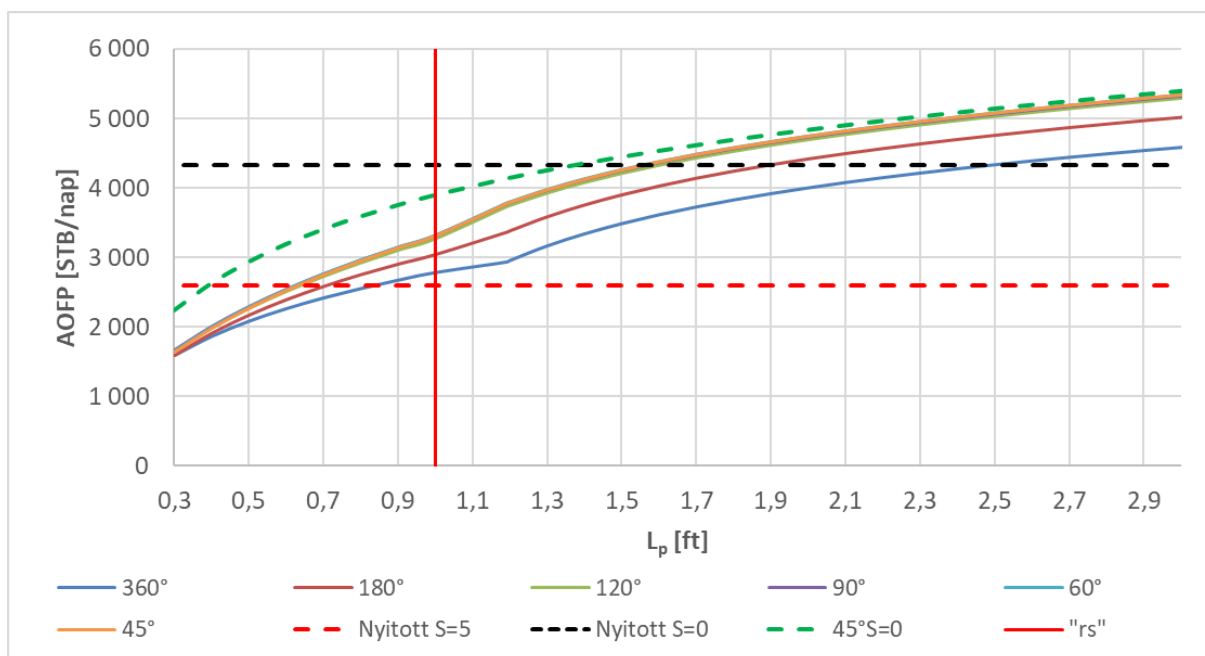
Az ábrákon vörös szaggatott vonal jelzi a nyitott lyukszakaszos kiképzés esetére számolt hozamgörbét az előbbieken jellemzett szennyezett zóna esetében, fekete szaggatott vonallal pedig az elárasztott zóna nélküli esetet. Látható, hogy az elárasztott zóna hatása kiemelkedően jelentős. A következő ábrák azt az esetet szemléltetik, amikor a perforációk túlnyúlnak a zónán ($L_p = 1.5$ ft).



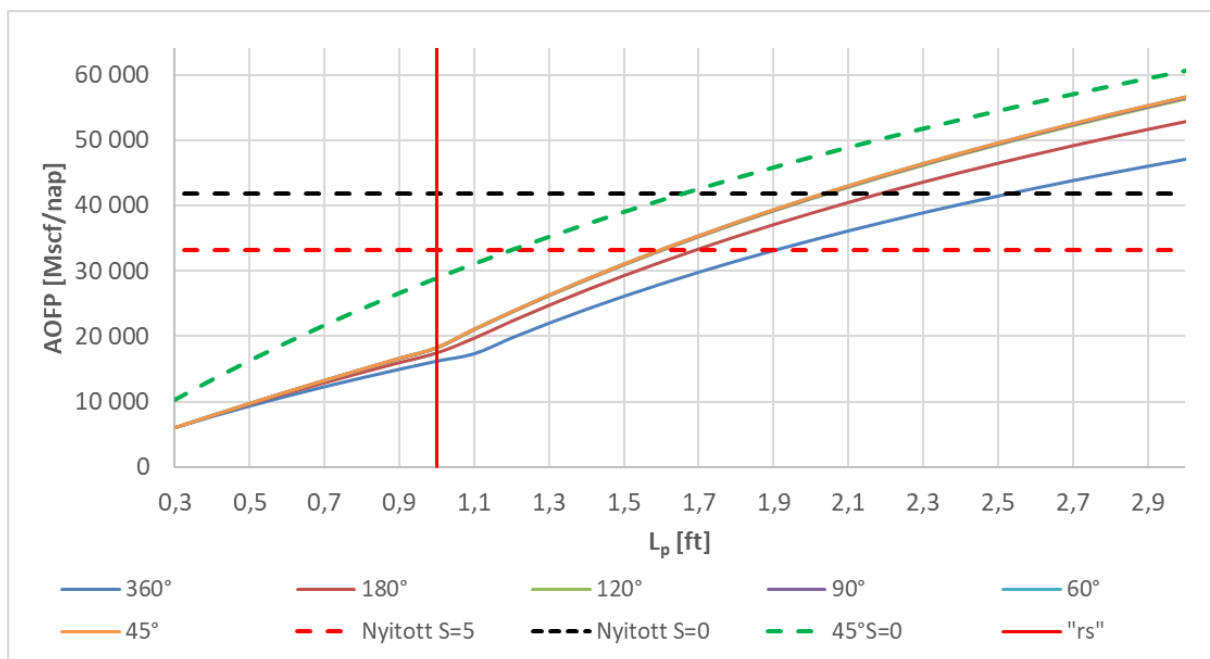
5-20 ábra: A szennyezett zóna hatása olajkutak hozamára (túlnyúló perforációk esetében)



5-21 ábra: A szennyezett zóna hatása gázkutak hozamára (túlnyúló perforációk esetében) Megfigyelhető, hogy lényeges javulást eredményez a szennyezett zóna „túllövése”, olyannyira, hogy a tiszta, nyitott kiképzésű kút hozama is elérhetőnek látszik a perforációk hosszánövelésével. A számítási eredményeket a „T-Melléklet” tartalmazza. A perforációk hosszának hatását az alábbi érzékenységi vizsgálatok szemléltetik.



5-22 ábra: Perforáció hossz hatása szennyezett olajkutakra

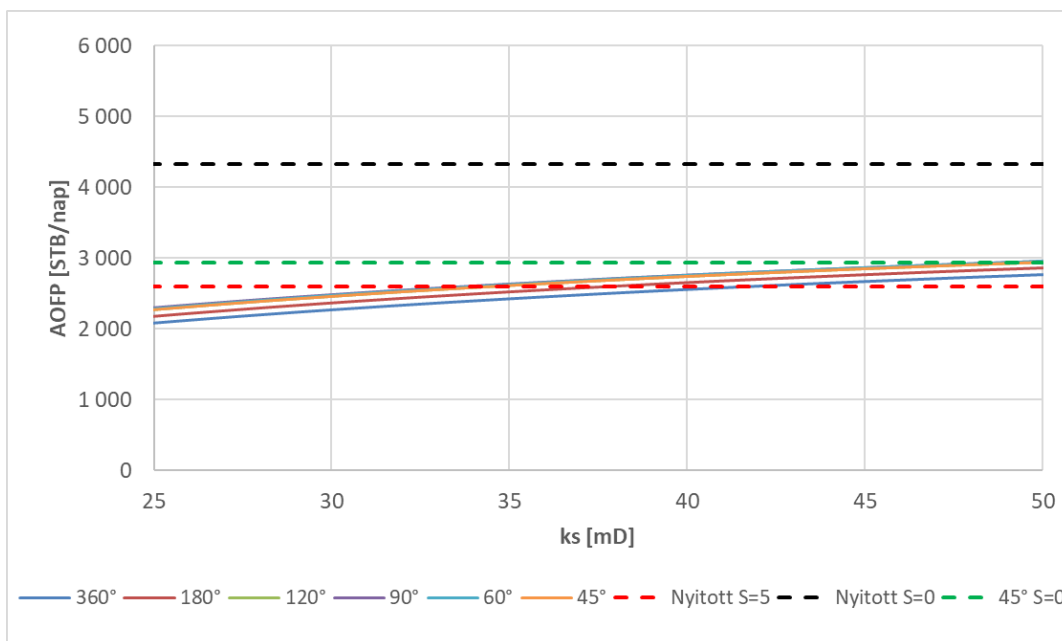


5-23 ábra: Perforáció hossz hatása elárasztott gázkutakra

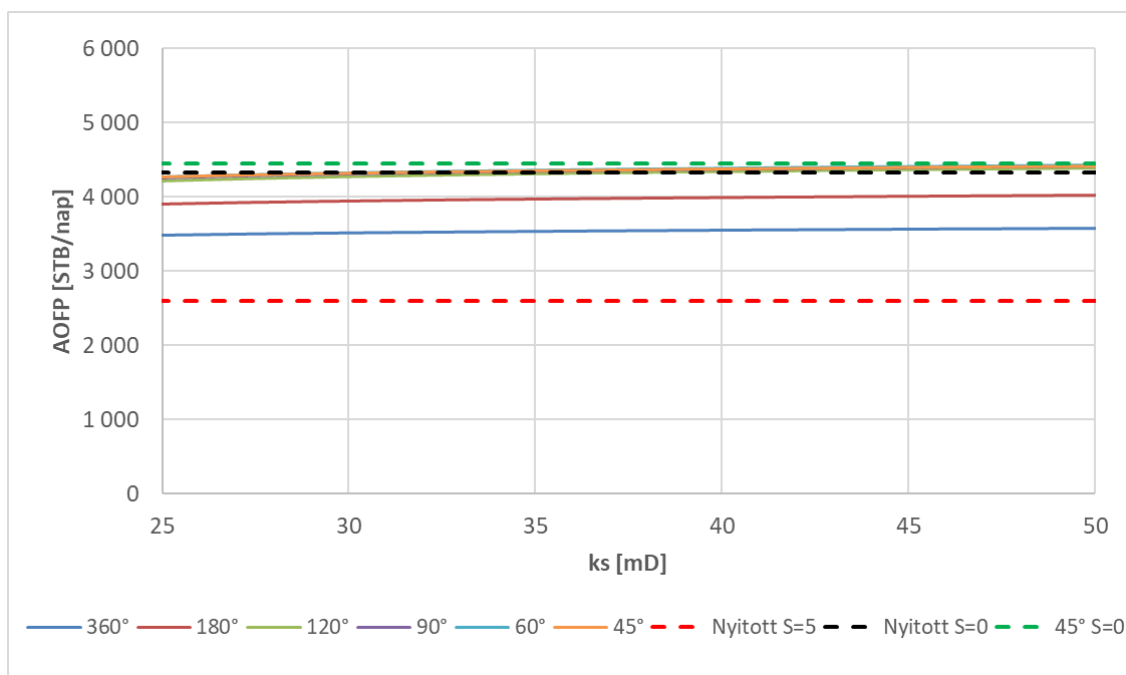
Az ábrákon a nyitott lyukszakaszos kiképzés AOFP értékei (vörös $S=5$, fekete $S=0$) mellett zöld szaggatott görbe mutatja a 45° -os fázisszög esetén számolt AOFP értéket. Emellett vörös függőleges vonal jelzi a szennyezett zóna túllépésének pontját. Látható, hogy az elárasztott zóna „túllövése” kritikus fontosságú a termelékenység szempontjából. Továbbá megfigyelhető, hogy a hossz növelésével a tiszta és szennyezett esetre számolt AOFP értékek közelítik egymást, vagyis létezik olyan perforáció hossz, amire a szennyezett zóna hatása elhanyagolható. A zöld szaggatott vonal továbbá megadja, hogy meddig lehetne javítani a termelékenységet, ha csökkenteni lehetne a szennyezett zóna áteresztőképesség rontó hatását.

5.4.1 Savas rétegkezelés hatásának vizsgálata

A termelő kutak hatékonyságát fokozó rétegkezelési eljárások egyik módszere a savas rétegkezelés. Homokkő tárolók esetében a kútkörnyéki szennyezett zóna hatása mérsékelhető, esetleg teljesen meg is szüntethető savas rétegkezeléssel. Amennyiben azzal a feltételezéssel élünk, hogy a kezelés egyedüli hatása a szennyezett zónán belüli áteresztőképesség növelése, akkor a hatás k_s alapú érzékenységi vizsgálattal elemezhető.

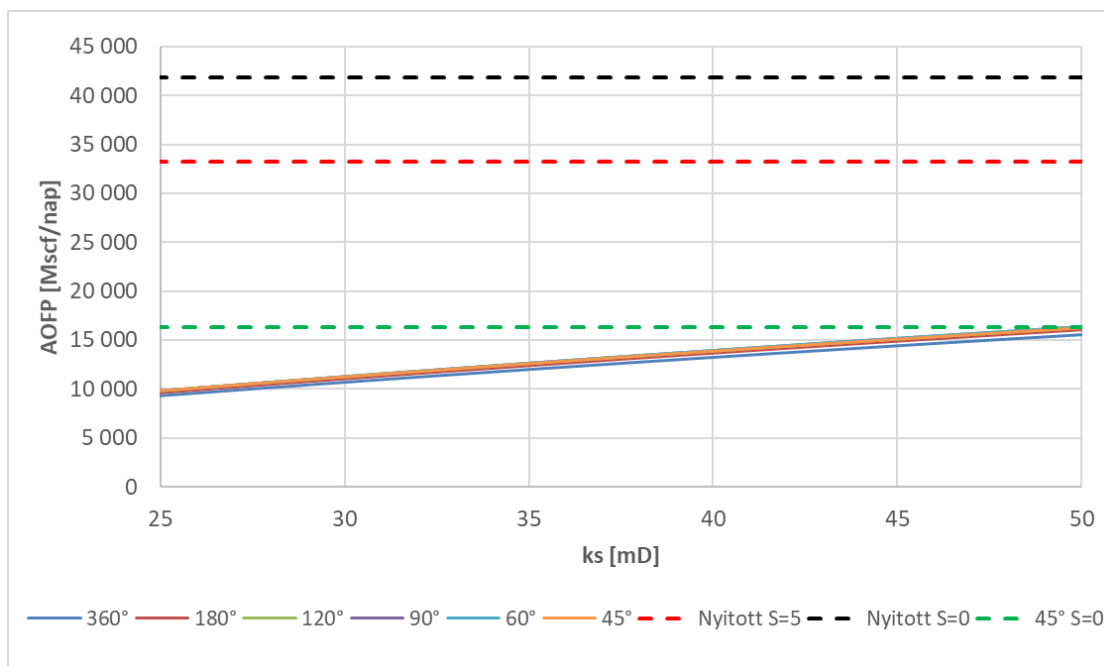


5-24 ábra: Savas rétegkezelés hatása olajkút termelékenységére nem túlnyúló perforációk esetében

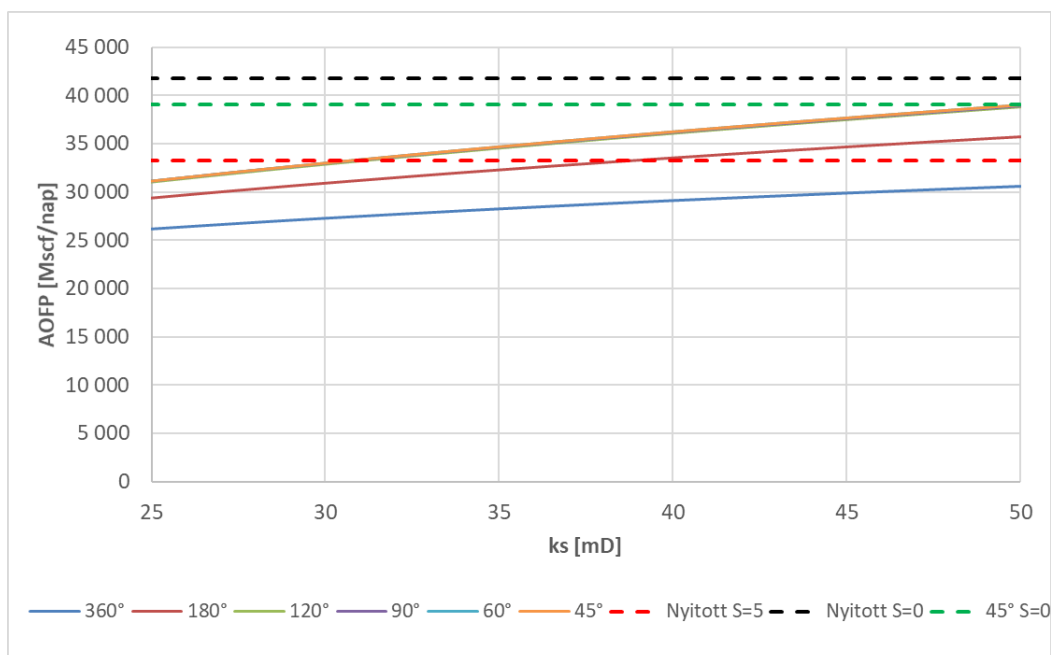


5-25 ábra: Savas rétegkezelés hatása olajkút termelékenységére túlnyúló perforációk esetében

Olajkutak esetében (4-24 és 4-25 ábrák) látható, hogy az átteresztőképesség és a termelékenység javulása közötti kapcsolat nagyjából lineáris. Megfigyelhető továbbá, hogy a szennyezett zóna túllövését követően a perforációs hossz növekedésével ez a javító hatás egyre csökken.



5-26 ábra: Savas rétegkezelés hatása gázkút termelékenységére nem túlnyúló perforációk esetében



5-27 ábra: Savas rétegkezelés hatása gázkút termelékenységére túlnyúló perforációk esetében

Gázkutak esetében látható, hogy nagyobb mértékű javulás érhető el savazással, mint olajkutak esetében. A javulás mértéke pedig a szennyezett zóna „túllövése” után sem csökken elhanyagolható mértékben. Ezeket az eredményeket az ipari tapasztalat is alátámasztja. A számítási eredményeket az „U-Melléklet” tartalmazza.

5.5 Konklúzió

A fejezetben bemutatott vizsgálatok alapján az alábbiak mondhatók el:

- A módszer konzisztens eredményt ad olaj és gázkutak esetében.
- A módszer alapján a perforáció fázisszöge hatással van a nem-darcy áramlási tagra.
- A módszerrel számolt áramlási sebesség független skin értékek közel esnek a Karakas és Tariq módszerével számolt értékekhez. Mivel az utóbbi jó egyezést mutat ipari mérésekkel (Yldiz, 2016), ezért az új módszer pontossága is elfogadható.
- Adott lövessűrűség és perforációhossz esetében létezik egy optimális fázisszög. A rendelkezésre álló geometriák közül a 45°-os és a 60°-os fázisszög alkalmazása adja a legjobb hatásfokot (marginális különbséggel).
- A kutak termelékenysége a perforációk hosszára a legérzékenyebb és a perforációk sugarára a legkevésbé érzékeny.
- A gázkutak termelékenysége érzékenyebb a perforációs paraméterekre, mint az olajkutaké.
- A szennyezett zóna határát átlépve a perforáció hosszának növelésével a termelékenység növekedése jelentősebb.
- Adott elárasztott zónához létezik olyan perforációs hossz, amit elérve az elárasztott zóna hatása eltűnik. Ez olajkutak esetében könnyebben elérhető.
- Olajkutak esetében a rétegsavazással elérhető javulás a szennyezett zóna túlperforálása után jelentősen csökken a perforáció hosszal.
- Gázkutak esetében a rétegsavazással elérhető javulás csökkenése nem olyan jelentős a perforáció hosszával, mint olajkutak esetében.

A fentiek alapján a következő ökölszabályok fogalmazhatók meg a perforálásra:

- A perforálás fázisszöge legyen 45° vagy 60°, de semmi képen ne legyen 180° vagy 0° (speciális eseteket ismét figyelmen kívül hagyva).
- A lehető leghosszabb perforációk elérésére kell törekedni a perforálási technológia kiválasztásakor.

6 Ipari alkalmazások jelentősége, potenciálja

Az előző fejezetben bemutatott eredmények jó összhangban vannak az ipari tapasztalatokkal. A perforálást végző szervíz vállalatok régi törekvése, hogy az adott termelő szakasz megnyitásakor egyre mélyebb behatolású perforáció csatornákat érjenek el, mivel a termelési tapasztalatok azt mutatják, hogy hosszú perforációs csatornákkal érhető el a legjobb termelékenység. Szintén általános törekvés az optimális fázisszög (45°-60°) használata, valamint az is régóta ismert, hogy a gázkutak termelékenysége érzékenyebb a perforáció kialakítására, mint az olajkutaké.

A bemutatott számolási módszerem egyik nagy előnye ugyanakkor, hogy egyszerűen leprogramozható és számítási erőforrás igénye minimális az áramlástan szimulációs programokéhoz képest. A kutak tervezési szakaszában a módszerrel lehetővé válik az optimális – technikai és gazdasági értelemben is - a perforálás megtervezése, azaz:

- Az optimális termelékenység modellezhető, számítható,
- A költségelemzések (pl. a perforálás, ill. egyéb kútmegnyitások), variációinak analízise könnyen megvalósítható,
- A technológia, ill a szervízt biztosító cégek kiválasztása könnyen és gyorsan végigvihető,
- A perforálási szervizek költséghatékonyság vizsgálata bemutatatható

Ezen felül, a módszer rétegserkentési, rétegkezelési projekteknél is rendkívül jól hasznosítható:

- alkalmas a nem kielégítő termelékenység okainak vizsgálatára,
- felhasználható a rétegkezelési (savas, nem savas, oldószeres, stb.) beavatkozások eredményességének vizsgálatára, lehetővé téve a gazdasági megtérülés becslését.

A felsoroltak alapján a módszer alkalmazható a serkentési programok több fázisában is, a kandidátus kutak választásától egészen az elvégzett beavatkozás eredményességének utólagos vizsgálatáig.

Összegezve megállapítható, hogy a jelenlegi világgazdasági környezetben kiemelt fontosságú a költséghatékony megoldások szelekciója, azaz a lehető legkisebb ráfordítással biztosítani a megcélzott hatásfokot a termelő kutakkal. A módszer ehhez nyújt gyors és hathatós segítséget mind az új kutak tervezése során, mind a már termelésbe állított kutak vizsgálata kapcsán.

7 Tézisek

1. A régebbi, nem analitikusan levezetett számolási módszerek nem alkalmasak a nyomásveszteség pontos meghatározására

Számos módszer található a szakirodalomban a perforációk okozta nyomásesés meghatározására. Yildiz megvizsgálta az egyes módszerek pontosságát, azaz a mért eredményekkel összehasonlította a módszerekkel számítható szkin tényezőket (Yildiz, 2016). A megvizsgált számolási módszerek többsége pontatlannak bizonyult az összehasonlítások során. McLeod módszerének alkalmazása esetében pl. a pontatlanságot az áramlási sebesség függő tag okozta, minden más esetben viszont a módszerek nem számolnak az áramlási sebesség függő taggal, ezért Yildiz megfigyelése rájuk helytálló.

A vizsgálatok eredménye megmutatta, hogy McLeod módszere nem veszi figyelembe a fázisszög hatását az áramlásra, így nem alkalmas minden tervezési paraméter együttes vizsgálatára. Eredményeimből egyértelműen kiderül, hogy I Karakas és Tariq módszere nem számol az áramlási sebesség függő szkin tényezővel, ezért a perforálás hatását nagy mértékben alulbecsli gázkutak esetében.

Mindezek fényében kijelenthető, hogy a régebbi módszerek nem alkalmasak a perforálásos rétegmegnyitások pontos tervezésre.

2. A perforációk alakja nem az áramlási egyenletekben leírt henger, ezért azok sugarán korrekciót szükséges végezni

Snider és tsai. (Snider, et al., 1997) több perforátor puska által kialakított perforáció csatorna alakját mutatja be. Ennek tanulsága alapján a perforációs csatornák alakja jellemzően kúpszerű. Mivel a nyomásesés meghatározására alkalmas módszerek levezetése polár koordinátarendszerben történt, ezért megoldást henger alakú gyűjtőkre adnak. Belátható, hogy kúp alakú gyűjtők esetében a nyomásesésnek eltérőnek kell lennie, hiszen az áramlási hossz is és az irány is eltér némiképpen a hengeres gyűjtők esetében tapasztalhatótól. Annak érdekében, hogy ezt az eltérést figyelembe lehessen venni meg kell határozni azt a henger sugarat, amire a nyomásesés a megfelelő talp sugarú kúpéval egyezik meg, ez a perforációk egyenértékű hengerének sugara. A kapott eredmények validálása numerikus áramlástan szimulációval történt, ahol az eredményeim egyértelműen bizonyítják, hogy a geometriai transzformáció szükséges.

3. A perforációs csatornák korlátozzák egymás gyűjtőterét

Ismert jelenség, hogy az egymáshoz közeli termelő kutak hatással vannak egymásra, korlátozzák egymás gyűjtőterét. Hasonló jelenség várható a perforációk esetében is, hiszen ezek a csatornák egymáshoz igen közel helyezkednek el. A kialakuló gyűjtőterekre mind a fázisszög, mind a lövéssűrűség hatással van. A kutatásom során elvégzett áramlási szimulációk eredménye alátámasztja a fenti elképzelést és igazolja a kialakult gyűjtőterek geometriáját.

4. A perforációs csatornában kialakuló nyomásesés elhanyagolható

Mivel a perforációk belsejének áramlási tulajdonságai pontosan nem leírhatóak, ezért a rajtuk vett nyomásvesztés pontos meghatározása nem lehetséges. A nyomásesés lehetséges tartományát azonban viszonylag jól meg lehet határozni azzal a feltételezéssel, hogy a belső fal érdes és ezt az érdességet a homokszemcsék okozzák. A lehetséges tartományt meghatározva összehasonlítható a kőzet és a perforáció áramlásra kifejtett ellenállása. Fontos azonban megjegyezni, hogy az összes feltételezés úgy történt, hogy a perforációkban jelentkező nyomásesés túlbecsléséhez vezessen. A kapott eredmények tanulsága alapján a reális olaj, ill. gáz áramlási tartományban:

- a nyomásesés mintegy százszorta nagyobb a kőzetben gáz esetében,
- és ezerszer nagyobb olaj esetében.

Ebből adódóan a perforációs csatornák a kőzethez képest végtelen vezetőknek tekinthetők.

5. Az egyes zónákban párhuzamos áramlás jön létre

A szennyezett zóna hatása igen fontos optimalizálási szempontból. Annak függvényében, hogy a perforációk túlnyúlnak-e ezen a területen vagy sem, változik a nyomásesés számításának módja. Amennyiben nincs túlnyúlás, a szennyezett zóna határától a rontott áteresztőképességgel kell számolni. Túlnyúlás esetében a perforációkba már a tiszta zónában elkezdődik a beáramlás, viszont emellett párhuzamosan a szennyezett zónában is kell legyen áramlás. A jelenség analóg a párhuzamosan kapcsolat ellenállásokon átfolyó áramerősség megoszlásával. Ezt erősíti meg az elvégzett CFD szimulációk eredménye is.

6. A perforációk kialakításánál a perforáció sugarával szemben a hosszt kell előtérbe helyezni

A perforációk kialakításához használt perforátorok méreteire felső korlátot ad a termelő bélésű átmérője, amibe annak nyilvánvalóan mechanikailag be kell férnie, azaz biztonsággal be, és kiépíthető legyen a művelet során, majd azt követően. Ebből adódóan az alkalmazott robbanóanyag mennyisége - és így a létrehozott csatornák térfogata is - korlátozott.

A kutatásom során kifejlesztett módszert felhasználva megvizsgáltam, hogy olaj és gázkutak esetében hogyan hatnak az egyes perforációs paraméterek a termelékenységre. A kapott eredmények tanulsága szerint a perforáció csatornák sugarának növelésével elért pozitív változás elhanyagolható a perforációk hosszának növelésével elérhető előnyökhöz képest.

7. A termelési maximum eléréséhez a legmegfelelőbb fázisszög a 60° és 45°

A perforációk fázisszöge befolyásolja azok gyújtóterének nagyságát, alakját és az áramlási irányváltás távolságát. Az új módszerrel elvégzett érzékenységi vizsgálatok tanulsága szerint a fázisszög csökkentése javítja a termelékenységet egészen 60°-ig. 60° ról 45°-ra csökkentve a fázisszöget a változás teljesen elhanyagolható és egyes esetekben nem javulást, hanem minimális romlást eredményez. Ennek az oka, hogy a gyújtóterének nagyságát más paraméterek is befolyásolják és minden összeállításhoz létezik egy ideális fázisszög, aminek az értéke az elvégzett vizsgálatok alapján 45° és 60° között van.

8. Létezik olyan perforáció hossz, amelyre az elárasztott zóna hatása elhanyagolhatóvá válik.

A szennyezett zóna hatásának vizsgálata során fény derült arra, hogy a termelékenység szempontjából kritikus a szennyezett zóna túllövése. Eredményeim alapján a perforációs csatorna hosszának növelésekor egy adott ponton túl a kút termelékenysége szinte megegyezik a tiszta (rétegtárosodás mentes) perforált kutakra számolt termelékenységgel. Ahogyan nő ugyanis a perforáció hossza, annál több fluidum lép be a tiszta zónában a perforációba és annál kevesebb áramlik a szennyezett zónában. Ebből következik, hogy minden esetben létezik olyan perforáció hossz, amelyre a szennyezett zóna elhanyagolható lesz.

8 Összefoglalás

Korunk egyik legnagyobb szénhidrogénipari kihívása a tapasztalható alacsony olajárak melletti gazdaságos szénhidrogén termelés. A szénhidrogéntermelő kutak jelentős része perforált kútkiképzéssel rendelkezik. Ezekben az esetekben a perforáció kialakítása nagy hatást gyakorol a kutak termelékenységére, ebből adódóan a perforálás megfelelő megtervezése a termelésoptimalizálás egyik kulcs eleme.

A kutatásom során a konszolidált tárolókra mélyített, perforált szénhidrogénkutak beáramlási viszonyait vizsgáltam, ami elsődlegesen az egyes perforációs paraméterek beáramlásra gyakorolt hatásának megismerésére irányult. A munkám során egy új analitikus modell bevezetését tartottam szükségesnek, mivel az iparban használt eddigi módszerek egyes – lényeges - hatásokat figyelmen kívül hagytak. Az elkészült módszer lehetőséget adott a perforáció okozta nyomásesés pontosabb meghatározására. A lefolytatott vizsgálatok eredményei és az ipari tapasztalatok erős összhangban vannak egymással.

A dolgozatban bemutatom a perforálás paramétereit és kitérek azok sajátosságaira és a velük kapcsolatos eddigi ismeretekre. Ismertetem továbbá a szénhidrogén termelő kutak termelékenységének jellemzésére alkalmas módszereket és az ideálistól való eltérés mértékét, a szkin tényezőt.

A perforált kutak hozamának meghatározására számos módszert publikáltak a múltban. A munkám során megvizsgáltam a legfontosabb és legszélesebb körben alkalmazott módszereket. Az eredmények rávilágítottak arra, hogy ezen módszerek pontossága megkérdőjelezhető, mivel fontos hatásokat figyelmen kívül hagynak.

A továbbiakban azonosítottam a perforációk körül található áramlási zónákat, valamint a régebbi módszerek által elhanyagolt áramlást befolyásoló tényezőket. Sorra meghatároztam az egyes áramlási zónákban a térfogatáram és a zónán belüli nyomásesés kapcsolatát, valamint az eddig figyelmen kívül hagyott tényezők hatást.

Az újonnan levezetett módszerrel beható vizsgálatot végeztem az egyes perforációs paraméterek beáramlásra gyakorolt hatásáról olaj, – és gázkutak esetében. Ezen felül megvizsgáltam a szennyezett zóna okozta nyomásesést különböző perforáció hosszok esetében, illetve az ilyenkor rétegkezeléssel elérhető termelékenység javulást.

A vizsgálatok eredményei összhangban vannak az ipari tapasztalatokkal. A levont következtetések jó iránymutatást adnak a perforálás tervezéséhez, a levezetett módszer pedig alkalmas a termelésoptimalizálás lehetőségeinek vizsgálatára.

9 Summary

One of the biggest challenges of the petroleum industry is to achieve an economic production within the low-oil price environment. Major portion of hydrocarbon producer wells are completed with perforated zones. In these cases, the perforations' properties have great effect on the well's productivity. For this reason, designing the optimum perforation is an absolutely key element in production optimization.

In my research work I have investigated the inflow performance of perforated hydrocarbon wells. The main focus of this investigation was on the effect of the perforation parameters on the inflow. The available calculation methods neglect important phenomena, what I found necessary to develop a new calculation method. With the novel equations it was possible to achieve more accurate results. The results of the conducted investigations are conformed with field experiences.

In my dissertation I introduced a different approach regarding to perforation parameters and discussed the available knowledge about those. Furthermore, I presented the inflow performance relationships of hydrocarbon wells vs. skin factor, which represents the extra drawdown pressure loss.

Several methods have already been published for the calculation of inflow performance in perforated hydrocarbon wells., I examined the most widely accepted and used methods during my work. My results indicated that the accuracy of these methods is rather questionable as those methods neglected important phenomena.

In the following phase I have identified the flow zones around the perforations and the important factors which are influencing the hydrocarbon flow. Then I have deduced the relationship between the flow rate and the pressure loss in the identified zones and the effect of the influencing factors.

With the help of the newly developed method I have made several sensitivity analyzes on the different perforation parameters and their effects on the inflow. Moreover, I have also investigated the effect of the invaded/damaged zone for different perforation lengths, and the possible improvements by stimulation.

My results are reflected in the actual field experiences. The conclusions give a good guideline for production optimization by perforation planning.

10 Köszönetnyilvánítás

A kutatómunkám lezárásaként szeretném megragadni az alkalmat, hogy köszönetemet fejezhessem ki azoknak, akik a hosszú munka során segítségemre voltak. Köszönetet mondok témavezetőmnek Dr. Turzó Zoltánnak a kutatásom során nyújtott támogatásáért.

Szeretnék köszönetet mondani szerzőtársaimnak, akik egy-egy publikáció során segítségemre voltak a kutatásom során. Hálás vagyok Remeczki Ferencnek és Romenda Roland Róbertnek a mérések során nyújtott segítségükért. További köszönet illeti Ürmös Richárdot, Pap Józsefet és Magyar Veronikát, akik kritikájukkal, tanácsaikkal és baráti támogatásukkal segítettek, hogy ez a munka jelen formájában elkészülhessen.

Külön kiemelt köszönet illeti mentoromat és barátomat Dr. Kosztin Bélát, aki hosszú évek óta segíti szakmai és tudományos fejlődésemet.

A kutatómunka a Miskolci Egyetemen működő Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet GINOP-2.3.2-15-2016-00010 jelű „Földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódó hatékonyság növelő mérnöki eljárások fejlesztése” projektjének részeként – a Széchenyi 2020 program keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Strukturális és Beruházási Alapok társfinanszírozásával valósul meg.

11 Hivatkozások

Ballistics, D., 2014. *The Perforator's Guide to Formation Damage. Part 1: Measuring Formation Damage as 'Total Skin'*. [Online]

Available at: <http://blog.delphianballistics.com/2014/05/the-perforators-guide-to-formation-damage-part-1-measuring-formation-damage-as-total-skin>

[Hozzáférés dátuma: 05 02 2020].

Beggs, H. D. & Robinson, J. R., 1975. *Estimating the Viscosity of Crude Oil Systems*.

Bell, W., Sukup, R. & Tariq, S., 1995. *Perforating, Monograph Series*. Richardson, Texas: SPE.

Coles, M. & Hartman, K., 1998. *Non-Darcy Measurements in Dry Core and the Effect of Immobile Liquid*. Calgary: SPE.

Cornell, D. & Katz, D., 1953. *Flow of Gases Through Porous Media*.:Ind. Eng. Chem.

Craddock, G., Smith, J. & Haggerty, D., 2018. *Perforation Crushed Zone Characteristics in a Subsurface Sandstone*. :SPE.

Daltaban, T. & Wall, C., 1998. *Fundamental and Applied Pressure Analysis*. London: Imperial College Press.

Darcy, H., 1856. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Paris: Victor Dalmont.

Drillingformulas.com, 2014. *Basic Understanding of Oil Well Casing and Tubing*. [Online]
Available at: <http://www.drillingformulas.com/basic-understanding-of-oil-well-casing-and-tubing/>

[Hozzáférés dátuma: 05 02 2020].

Economides, M. & Boney, C., 2000. Reservoir Stimulation in Petroleum Production. In: *Reservoir Stimulation*. New York city: John Wiley & Sons, pp. 1-12.

Economides, M. J. & Martin, T., 2007. Perforating for Facturing. In: *Modern Fracturing - Enhancing Natural Gas Production*. Huston: Energy Tribune Publishing Inc., pp. 206-213.

Elshahawi, H. & Gad, K., 2001. *Estimation of Skin for High Deliver- ability Gas Well Tests*. Bahrain,

Ergun, S., 1952. *Fluid Flow Through Packed Column*. :Chemical Engineering Progress.

- Evans, R., Hudson, C. & Greenlee, J., 1987. *The Effect of an Immobile Liquid Saturation on the Non-Darcy Flow Coefficient in Porous Media.*:SPE.
- Ferziger, J. & Perić, M., 1996. *Computational Methods for Fluid Dynamics.* hely nélkül.:Spriger.
- Fetkovich, M., 1973. *The Isochronal Testing of Oil Wells.* Las vegas,
- Fletcher, C., 1990. *Computational Techniques for Fluid Dynamics.* :Springer.
- Forchheimer, P., 1901. *Wasserbewegung durch Boden.* Düsseldorf:
- Golan, M. & Whitson, C., 1991. Well Performance. In: Englewood Cliffs: Prentice-Hall Inc., pp. 331-336.
- Greetsma, J., 1974. *Estimating the Coefficient of Inertial Resistance in Fluid Flow Through Porous Media.* :SPE.
- Harris, C., 1968. *The application of size distribution equation to multi-event communiton processes.* :Trans. SME/AIME., 241: 343-358.
- Hawkins Jr., M. F., 1956. A Note on the Skin Effect. *Journal of Petroleum.*
- Hong, K., 1975. Productivity of Perforated Completions in Formations With or Without Damage. *Journal of Petroleum Technologies*, 27(8).
- Jan, B. M. és mtsai., 2009. *Increasing Production by Maximizing Underbalance During Perforation Using Nontraditional Lightweight Completion Fluid.*
- Janicek, J. & Katz, D., 1955. *Applications os Unsteady State Gas Flow Calculations.* Michigan:
- Jones, L. G., Blount, E. & Glaze, O. H., 1967. *Use of Short- Term Multiple-Rate Flow Test to Predict Performance of Wells Having Turbulence,* SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans: SPE 6133.
- Jones, L. & Slusser, M., 1974. *The Estimation of Productivity Loss Caused by Perforations - Including Partial Completion and Formation Damage.* Indianapolis
- Jones, S., 1987. *Using the Inertial Coefficient, Beta, to Characterize Heterogeneity in Reservoir Rocks.* New Orleans: SPE.

- Karakas , M. & Tariq, S. M., 1988. *Semi-analytical Productivity Models for Models for Perforated Completions*, 63rd Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE held in Huston, TX: SPE 18247.
- Khaniaminjan, A. & Goudarzi, A., 2008. *Non-Darcy Fluid Flow Through Porous Media*. :SPE.
- King, G. E., Anderson, A. & Bingham, M., 1986. *A Field Study of Underbalance Pressures Necessary To Obtain Clean Perforations Using Tubing-Conveyed Perforating*, : Society of Petroleum Engineers.
- Klinkenberg, L., 1941. The permeability of porous media to liquids and gases. In: *Drilling and Production Practice*. New York: American Petroleum Inst., pp. 200-213.
- Klotz, J., Krueger, R. & Pye, D., 1974. Effects of Perforation Damage on Well Productivity. *J. Pet. Tech.*, Nov., p. 257.
- Kovács, M. & Pásztor, Á., 2019. *Effect on the non-Darcy flow*. Zagreb
- Kozhagulova, A. A., Shabdirova, A. D., Tokazhanov, G. & Minh, N., 2018. *Bond Characteristics of Artificial Sandstones With Sodium Silicate Cement*. Seattle, Washington: American Rock Mechanics Association.
- Lee, A. L., Gonzalez, M. H. & Eakin, B. E., 1966. *The Viscosity of Natural Gases*.
- Locke, S., 1981. An Advanced Method for Predicting the Productivity Ratio of a Perforated Well. *Journal of Petroleum Technologies*, 33(12).
- MacDonald, E., 1979. *Flow Through Porous Media-The Ergun Equation Revisited*. :Ind. Eng. Chem. Fundam.
- McLeod, O. H. J., 1983. The Effect of Perforating Conditions on Well Performance. *JPT*, Jan, pp. 31-39.
- mpgpetroleum.com, 2003. *Oil & Gas Fundamentals*. [Online]
Available at: <https://mpgpetroleum.com/fundamentals.html>
[Hozzáférés dátuma: 05 02 2020].
- Pápay, J., 1968. *A termeléstechnológiai paraméterek változása a gáztelepek művelése során*.
- Pascal, H., Quillian, R. & Kingston, J., 1980. *Analisis of Vertical Fracture Length and Non-Darcy Flow Coefficient Using Variable Rate Tests*. Dallas: SPE.

Penmatcha, R., Fayers, J. & Aziz, K., 1995. *Skin Factor Calculations for Vertical, Deviated, and Horizontal Wells*. Palo Alto: Stanford University.

petrowiki.spe.org, 2013. *PEH: Perforating*. [Online]
Available at: <https://petrowiki.spe.org/PEH:Perforating>
[Hozzáférés dátuma: 05 02 2020].

Pucknell, J. K. & Behrmann, L. A., 1991. *An Investigation of the Damaged Zone Created by Perforating*, : Society of Petroleum Engineers doi:10.2118/228811-MS.

Pucknell, J. K. & Clifford, P. J., 1991, January 1. *Calculation of Total Skin Factors*, : Society of Petroleum Engineers.

Rios, S., Viana da Fonseca, A. & Baudet, B. A., 2014. *On the shearing behaviour of an artificially cemented soil*. :Acta Geotechnica, 9(2), 215–226.

Rosin, P. & Rammler, E., 1933. *The Laws Governing the Fineness of Powdered Coal*. :Journal of the Institute of Fuel, 7: 29–36. Journal of the Institute of Fuel, 7: 29–36.

Samaniego, V. & Cinco-Ley, H., 1996. Well Test Analysis in Carbonate Reservoirs. In: *Carbonate Reservoir Characterization: A Geologic- Engineering Analysis, Part II*. Amsterdam: Elsevier Science, p. 589.

Serintel, 2017. *Petroleum Production Optimization*. [Online]
Available at: <http://www.oil-gasportal.com/petroleum-production-optimization/>
[Hozzáférés dátuma: 05 02 2020].

Snider, P. M., Benzel, W. M., Barker, J. M. & Leidel, D. J., 1997. *Perforation Damage Studies in Unconsolidated Sands: Changes in Formation Particle Sizes and the Distribution as a Function of Shaped Charge Design*.

Sommerfeld, A., 1908. *Ein Beitrag zur hydrodynamischen Erklärung der turbulenten Flüssigkeitsbewegungen (A Contribution to Hydrodynamic Explanation of Turbulent Fluid Motions)*. Rome

Standing, M. B., 1981. *Volumetric and Phase Behavior of Oil Field Hydrocarbon Systems*. Richardson, Texas

Stokes, G., 1845. *On the theories of the internal friction of fluids in motion, and of the equilibrium and motion of elastic solids*.

- Stokes, G., 1851. *On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums*.
- Tek, M., Coats, K. & Katz, D., 1962. *The Effect of Turbulence on Flow of Natural Gas Through Porous Reservoirs*. Michigan: SPE.
- Thomas, L., Evans, C. & Pierson, R., 1992. Well Performance Model. *Journal of Petroleum Technology*, 02, 44(2), p. 220.
- Vazquez, M. & Beggs, H. D., 1980. *Correlations for Fluid Physical Property Prediction*.
- Veleczi, P. & Pásztor, Á., 2019. *In search of proper way to measure beta factor*. Zagreb
- Vogel, J., 1968. Inflow Performance Relationships for Solution-Gas Drive Wells. *Journal of Petroleum Technology*, 20(1), pp. 83-92.
- Vrbik, J., 1991. *A Simple Approximation to the Pseudoskin Factor Resulting From Restricted Entry*. :SPEFE.
- www.fypedrilling.com, 2019. *The Classification of Shaped Charge Perforators*. [Online] Available at: <http://www.fypedrilling.com/info/the-classification-of-shaped-charge-perforator-40432314.html>
[Hozzáférés dátuma: 05 02 2020].
- www.halliburton.com, 2005. *TCPcatalog*. [Online] Available at: http://www.halliburton.com/public/lp/contents/Books_and_Catalogs/web/TCPCatalog/2005TCPcatalog/PerforatingSolutions_catalog.pdf
[Hozzáférés dátuma: 13 08 2014].
- Yldiz, T., 2016. Assessment of Total Skin Factor in Perforated Wells. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 9(01), pp. 62-76.
- Younessi, A., Rasouli, V. & Wu, B., 2013. *Sand production simulation under true-triaxial stress conditions*. :International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 61, 130–140.

12 Témában megjelent fontosabb tudományos közleményeim

Kovács, M. & Pásztor, Á., 2019. Effect on the non-Darcy flow. Zagreb, 6th Annual Student Energy Congress ASEC .

Pásztor, Á., 2015. A Perforáció Kialakításának Hatása A Szénhidrogén Termelő Kutak Produktivására. Miskolc, Diáktudomány: A Miskolci Egyetem Tudományos Diákköri Munkáiból VIII. pp. 27-32, pp. 27-32.

Pásztor, Á., 2016. The Invaded Zone's Effect on The Inflow of Perforated Wells, Szolnok: Low and volatile oil price environment – Technical responses in the Pannonian Basin Conference.

Pasztor, A. & Kamenar, M., 2019. A novel modular method for intensification planning. INTERNATIONAL MULTIDISCIPLINARY SCIENTIFIC GEOCONFERENCE, 19(1.2), pp. 605-614.

Pásztor, A. & Kosztin, B., 2015. A Novel Method for Optimal Perforation Design. Budapest, SPE European Formation Damage Conference and Exhibition.

Pasztor, A. & Lengyel, T., 2019. Method to calculate apparent permeability of hydraulic fractures. International Multidisciplinary Scientific Geoconference 19, 19(1.2), pp. 985-992.

Pasztor, A. & Schultz, V., 2015. Analytical IPR equation for perforated wells, Visegrád, Hungary: SPE International Hungarian Section.

Pasztor, A. & Schultz, V., 2016. Analytical determination of the perforation design's effect on the productivity. MOL GROUP Professional Journal, Issue 1, pp. 108-117.

Pásztor, Á. & Schultz, V. M., 2017. A Perforációk Gyűjtőterének Hatása a Kutak Hozamegyenletérs. Miskolc: Műszaki Földtudományi Közlemények 86 : 2 pp. 114-130..

Pasztor, A. V., 2018. Effect of Microfractures on Filtration. International Multidisciplinary Scientific Geoconference, 18(1.4), pp. 413-420.

Pasztor, A. V., 2018. Pressure drop through perforation channels. International Multidisciplinary Scientific Geoconference , 18(1.4), pp. 697-704.

Pasztor, Á. V. & Remeczki, F., 2018. Method to analyze the effect of fractures in tight reservoirs. Zagreb, Annual Student Energy Congress.

Pásztor, Á. V. & Tóth, A., 2017. Effect of Perforation Parameters on the Productivity of Geothermal Wells. Miskolc, MultiScience - XXXI. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference.

Pásztor, Á. V. & Tóth, A. N., 2017. A Simple Method for Optimizing the Perforation Design of Geothermal Wells. International Multidisciplinary Scientific Geoconference, 17(42), pp. 11-18.

Turzó, Z. & Pásztor, Á., 2017. Perforálási hatékonyság értékelése CFD számítás alkalmazásával, Siófok: XXXI. Nemzetközi Olaj - és Gázipari Konferencia, Kiállítás.

Veleczi, P. & Pásztor, Á., 2019. In search of proper way to measure beta factor. Zagreb, 6th Annual Student Energy Congress ASEC .

A-Melléklet Szkin elméletek irodalmi áttekintése

8-1 táblázat: Szkin felfogások

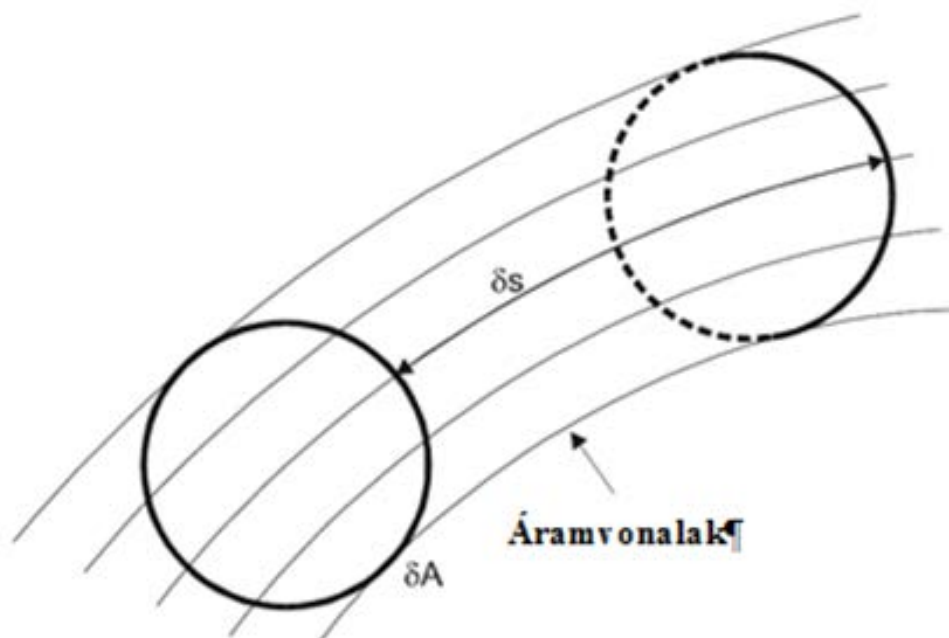
(Vrbik, 1991)	$s_t = s_d + s_{pp} + s_p + s_\theta + s_f$
(Daltaban & Wall, 1998)	$s_t = s_d + s_{pp} + s_\theta$
(McLeod, 1983)	$s_{pdc} = s_d + s_p + s_{cz}$
(Jones & Slusser, 1974)	$s_{pd} = s_d + \frac{k}{k_d} s_p$ $s_t = \frac{h}{h_p} s_{pd} + s_{pp}$
(Karakas & Tariq, 1988)	$s_t = s_d + s_{pp} + s_\theta$
(Bell, et al., 1995)	$s_t = s_{pp} + \frac{h}{h_p} \left[\frac{s_{pdc}}{\gamma_o} + \frac{1}{20} \left(9 + 11 \frac{h}{h_p} \right) s_\theta \right]$ $s_{pdc} = s_d + \frac{k}{k_d} (s_p + s_{cz} + s_X)$
(Thomas, et al., 1992)	$s_t = \frac{h}{h_p} \frac{s_d}{\gamma_{jw}} + s_{pp} + s_p + s_{cz} + s_\theta$
(Penmatcha, et al., 1995)	$s_t = \frac{h}{h_p} \frac{s_d}{\gamma_{jw}} + s_{pp} + s_p + s_{cz} + s_\theta$
(Golan & Whitson, 1991)	$s_t = \frac{h}{h_p} (s_d + s_p) + s_{cz} + s_{pp}$
(Samaniego & Cinco-Ley, 1996)	$s_t = \frac{h}{h_p} (s_d + s_p) + s_{pp} + s_\theta + s_f$
(Economides & Boney, 2000)	$s_t = s_d + s_p + s_{pp}$
(Elshahawi & Gad, 2001)	$s_t = s_d + s_p + s_{\theta p} + \sum other$
(Pucknell & Clifford, 1991, January 1)	$s_t = \frac{h}{L_w} + s_{pdc} + s_{\theta pp}$

Ahol:

h	formációvastagság	[ft],
h_p	kiképzés intervallum	[ft],
k	formáció permeabilitása	[mD],
k_d	elárasztott zóna permeabilitása	[mD],
L_w	ferde kúthossz	[ft],
S_{cz}	zúzott zóna okozta szkin	[-],
S_d	elárasztott zóna okozta szkin	[-],
S_f	rétegrepestés okozta szkin	[-],
S_p	perforáció okozta szkin	[-],
S_{pd}	perforáció és elárasztott zóna kombinált szkin-je	[-],
S_{pdc}	perforáció, zúzott zóna és elárasztott zóna kombinált szkinje	[-],
S_{pp}	parciális behatolás okozta szkin	[-],
S_θ	geometriai szkin	[-],
S_t	teljes szkin	[-],
S_X	perem szkin	[-],
Y_o	Odeh féle szkin skála tényező	[-],
Y_{jw}	Jones – Watts féle szkin skála tényező	[-],

B-Melléklet Szivárgási differenciálegyenletek

A melléklet a termelő kutak hozamegyenletének levezetését mutatja be. Az egyes paraméterek mértékegységei a könnyebb értelmezhetőség kedvéért kivétel nélkül SI rendszerben vannak.



11-1 ábra: Áramvonalak

A fenti ábra porózus közetben áramló fluidumok áramvonalait mutatja be. Az áramvonalkép egy adott időpillanatban jól jellemzi az áramlási térben a sebességek irányváltzásait, ha azonban a sebességek időben is változnak, az áramvonalkép pillanatról pillanatra változik. Az áramvonalak tehát olyan áramlásoknál hasznosak, amelyeknél a sebesség csak a helytől függ, adott helyen időben nem változik. Ilyen, időben állandó áramlásban az áramvonal egyben a folyadékreszecskek pályáját is mutatja. Az áramlás viselkedésének megértéséhez szükséges az áramló fluidumra áramlás közben ható erők ismeretére.

Szivárgás közben a folyadékra ható erők:

1. Kompressziós erő
2. Gravitációs erő
3. Tehetetlenségi erő
4. Súrlódási erő
5. Kapilláris erő

Feltételezve, hogy az áramlás lamináris (elegendően lassú) valamint, hogy az áramlás állandósult (nincs gyorsulás) és nincsenek hirtelen irányváltások, a kapilláris, tehetetlenségi és turbulens súrlódási erőket elhanyagoljuk (a többi erőhatáshoz képest elhanyagolhatóak).

Newton második törvénye alapján:

$$F_\mu + F_p + F_g = 0 \quad (226)$$

- Kompressziós erő:

$$F_p = -\Phi \delta A \nabla p \delta S \quad (227)$$

Ahol

$\Phi \delta A$ pórusfelület,
 $\nabla p \delta S$ nyomásváltozás δS mentén.

- Gravitációs erő:

$$F_g = -\rho g \Phi \delta A \vec{t}_3 \delta S \quad (228)$$

Ahol

\vec{t}_3 felfelé mutató vektor.

- Lamináris súrlódási erő:

$$F_\mu = -B \mu \delta A \vec{u} \delta S \quad (229)$$

Ahol

B porózus közegre jellemző koefficiens,
 \vec{u} áramlási sebességvektor.

Kifejezve (226)-at:

$$-\left(\nabla p + \vec{t}_3 \rho g + \frac{B}{\Phi} \mu \vec{u}\right) \Phi \delta A \delta S = 0 \quad (230)$$

$$\nabla p + \vec{t}_3 \rho g + \frac{B}{\Phi} \mu \vec{u} = 0 \quad (231)$$

$$\frac{B}{\Phi} = k$$

Ebből következnek a Darcy törvény:

$$\vec{u} = -\frac{k}{\mu}(\nabla p + \vec{e}_3 \rho g) \quad (232)$$

Feltételek:

- Állandósult (steady state) áramlás (időben változatlan az áramlás)
- Lineáris áramlás
- Egyfázisú folyadék áramlása
- Homogén közetben való áramlás
- A közet az áramló folyadékkal telített

Potenciálfüggvény:

$$\Psi = gx_3 + \int_{p_0}^p \frac{1}{\rho} dp \quad (233)$$

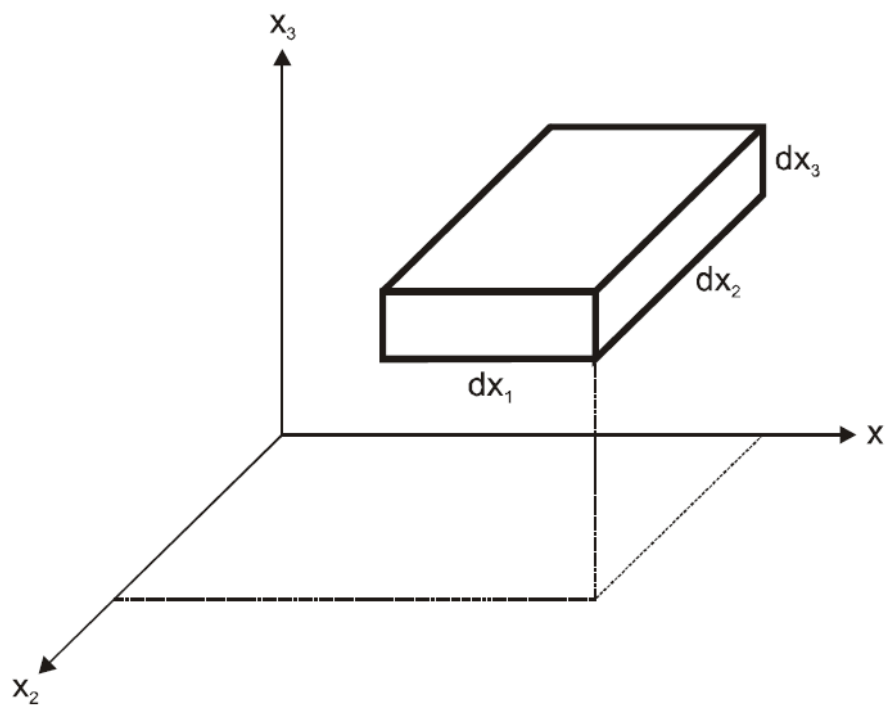
$$\rho = \rho(p) \quad (234)$$

$$\rho \nabla \Psi = \nabla p + \rho g \vec{e}_3 \quad (235)$$

$$\vec{u} = -\frac{k\rho}{\mu} \nabla \Psi \quad (236)$$

Ahol p_0 referencia nyomás x_3 pontban.

Kontinuitási egyenlet



11-2 ábra: Elemi térfogatú téglalap

A továbbiakban vizsgáljuk a fenti ábrán látható dx_1 , dx_2 , dx_3 élhosszúságú elemi téglalapban helyet foglaló fluidum tömegének változását!

Az elemi téglalapban a pórustérfogat:

$$\Phi dx_1 dx_2 dx_3 \quad (237)$$

A pórustérfogatot elfoglaló folyadéktömeg:

$$\rho \Phi dx_1 dx_2 dx_3 \quad (238)$$

A folyadék tömegének idő szerinti változása:

$$\frac{\delta(\rho \Phi)}{\delta t} dx_1 dx_2 dx_3 dt \quad (239)$$

x_1 helyen beáramló folyadéktömeg:

$$(\rho u_1)_{x_1} dx_2 dx_3 dt \quad (240)$$

$x_1 + dx_1$ helyen kiáramló folyadéktömeg:

$$(\rho u_1)_{x_1+dx_1} dx_2 dx_3 dt \quad (241)$$

A be- és kiáramlás különbsége:

$$-\frac{\delta(\rho u_1)}{\delta x_1} dx_1 dx_2 dx_3 dt \quad (242)$$

Mindhárom irányt (x_1, x_2, x_3) figyelembe véve:

$$-\left(\sum_{i=1}^3 \frac{\delta(\rho u_i)}{\delta x_i}\right) dx_1 dx_2 dx_3 dt \quad (243)$$

A fenti kifejezésnek meg kell egyeznie a folyadék tömegének idő szerinti változásával:

$$-\frac{\delta}{\delta t}(\Phi\rho) dx_1 dx_2 dx_3 dt = -\left(\sum_{i=1}^3 \frac{\delta(\rho u_i)}{\delta x_i}\right) dx_1 dx_2 dx_3 dt \quad (244)$$

$$-\frac{\delta}{\delta t}(\Phi\rho) = -\left(\sum_{i=1}^3 \frac{\delta(\rho u_i)}{\delta x_i}\right) \quad (245)$$

$$-\frac{\delta}{\delta t}(\Phi\rho) = \nabla(\rho\vec{u}) \quad (246)$$

A (21) egyenlet a kontinuitási egyenlet, amely kifejezi, hogy az elemi térrészben a folyadék tömegének időbeli változása megegyezik a térrészbe beáramló folyadék tömegének és a térrészből kiáramló folyadék tömegének különbségével.

A szivárgás általános differenciálegyenlete

A Darcy törvény (236) és a kontinuitási egyenlet (246) egyesítéséből kapjuk a szivárgás általános differenciálegyenletét:

$$\nabla \left(\frac{k}{\mu} \rho^2 \nabla \Psi \right) = \frac{\delta(\rho\Phi)}{\delta t} \quad (247)$$

Mivel:

$$\rho^2 \nabla \Psi = \rho \nabla p + \rho^2 \sum_{j=0}^3 \vec{l}_j \quad (248)$$

ezért:

$$\nabla \left(\frac{\vec{k}}{\mu} \rho \nabla p \right) + \nabla \left(\frac{\vec{k}}{\mu} \rho^2 g \sum_{j=0}^3 \vec{l}_j \right) = \frac{\delta(\rho\Phi)}{\delta t} \quad (249)$$

A gravitációs tagot elhanyagolva (vízszintes áramlás):

$$\nabla \left(\frac{\vec{k}}{\mu} \rho \nabla p \right) = \frac{\delta(\rho\Phi)}{\delta t} \quad (250)$$

A fenti egyenlet a szivárgás általános differenciálegyenlete, ami leírja a porózus közegben jelen lévő nyomás gradiens és a fluidum tömegárama közötti kapcsolatot. Mivel az egyenlet levezetéséhez felhasználtuk a Darcy törvényt így ugyanazok a feltételek igazak rá, mint amiket az első fejezetben fogalmaztunk meg!

A szivárgási egyenlet általános alakja (kiegészítés):

Turbulens áramlás esetén figyelembe kell venni a turbulens súrlódásból következő erőt is.

$$\frac{dp}{dx} = \alpha u + bu^2 \quad (251)$$

$$\alpha = -\frac{\mu}{k} \quad (252)$$

$$b = -\frac{\beta\rho}{k} \quad (253)$$

Ahol

β a pórustér karakterisztikus hossza.

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{\mu}{k}u - \frac{\beta\rho}{k}u^2 \quad (254)$$

Áramló fluidumok állapotegyenlete

Az előbbi fejezetben közölt szivárgási differenciálegyenletben szerepel az áramló fluidum sűrűsége is, ami csak kivételes esetekben tekinthető állandónak. A rezervoár mechanikában vizsgált folyamatok során a fluidumok összenyomhatónak tekinthetők, ezért sűrűségük a nyomás függvénye. A szivárgási differenciálegyenlet megoldásához ezért szükséges a különböző fluidumok sűrűségének nyomásfüggőségét vizsgálni.

Nem összenyomható folyadékok:

$$\frac{d\rho}{dp} = 0 \quad (255)$$

$$\rho = \text{konstans} \quad (256)$$

Kissé összenyomható folyadékok:

Vezessük be az anyagok összenyomhatóságát leíró kompresszibilitást:

$$c = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (257)$$

Mivel $V = \frac{m}{\rho}$, ezért:

$$c = -\frac{1}{\frac{m}{\rho}} \frac{d\left(\frac{m}{\rho}\right)}{dp} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (258)$$

Integrálás:

$$c dp = \frac{1}{\rho} d\rho \quad (259)$$

$$c(p - p_0) = \ln \frac{\rho}{\rho_0} \quad (260)$$

$$\rho = \rho_0 e^{c(p-p_0)} \quad (261)$$

Mivel az e^x Taylor sorba fejtése $e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$ már $n = 1$ esetén is jó közelítést ad, ezért:

$$\rho \approx \rho_0 [1 + c(p - p_0)] \quad (262)$$

Ideális gáz:

Az általános gáztörvény:

$$pV = nRT \quad (263)$$

Mivel $n = \frac{m}{M}$ és $\rho = \frac{m}{V}$, ezért:

$$\rho = \frac{Mp}{RT} \quad (264)$$

$$\frac{d\rho}{dp} = \frac{M}{RT} \quad (265)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} = \frac{M}{RT} \frac{1}{\rho} \quad (266)$$

(258) és (264) alapján:

$$c = \frac{1}{p} \frac{RT}{M} \times \frac{M}{RT} \quad (267)$$

$$c = \frac{1}{p} \quad (268)$$

Reális gáz:

Általános gáztörvény:

$$pv = nzRT \quad (269)$$

Ismeretes, hogy az eltérési tényező nem független a nyomástól.

$$\rho = \frac{M}{RT} \frac{p}{z(p)} \quad (270)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{RT}{M} \frac{z(p)}{p} \quad (271)$$

$$\frac{d\rho}{dp} = \frac{M}{RT} \frac{1}{z(p)} - \frac{M}{RT} \frac{p}{z(p)^2} \quad (272)$$

$$c = \frac{1}{p} - \frac{1}{z(p)} \frac{\delta z}{\delta p} \quad (273)$$

Különböző fluidumok szivárgási differenciálegyenletei

Nem összenyomható folyadékok:

$$\rho = \text{állandó}$$

Mivel az áramlás állandósult, ezért (250) az alábbiak szerint alakul:

$$\nabla \left(\frac{\vec{k}}{\mu} \rho \nabla p \right) = \frac{\delta(\rho \Phi)}{\delta t} = 0 \quad (274)$$

Feltételezések:

- $\Phi = \text{állandó}$ (homogén tároló)
- $\mu = \text{állandó}$

$$\nabla(\vec{k}\nabla p) = k_1 \frac{\delta^2 p}{\delta x_1^2} + k_2 \frac{\delta^2 p}{\delta x_2^2} + k_3 \frac{\delta^2 p}{\delta x_3^2} = 0 \quad (275)$$

Izotróp tároló esetén (a közzet tulajdonságok iránytól függetlenek):

$$\nabla(\nabla p) = \frac{\delta^2 p}{\delta x_1^2} + \frac{\delta^2 p}{\delta x_2^2} + \frac{\delta^2 p}{\delta x_3^2} = 0 \quad (276)$$

Kissé összenyomható folyadékok:

$$\rho = \rho_0 e^{c(p-p_0)} \quad (277)$$

$$\rho \nabla p = \rho_0 e^{c(p-p_0)} \nabla p = \frac{1}{c} \nabla(e^{c(p-p_0)}) = \frac{1}{c} \nabla \rho \quad (278)$$

Ez alapján (250) az alábbiak szerint változik:

$$\nabla \left(\frac{\vec{k}}{c\mu} \nabla \rho \right) = \frac{\delta(\rho \Phi)}{\delta t} \quad (279)$$

Felhasználva, hogy:

$$\rho \approx \rho_0 [1 + c(p - p_0)] \quad (280)$$

$$\nabla \rho = \rho_0 c \nabla p \quad (281)$$

$$\nabla \left(\frac{\vec{k}}{\mu} \rho_0 \nabla p \right) = \frac{\delta}{\delta t} \{ \Phi \rho_0 [1 + c(p - p_0)] \} \quad (282)$$

Feltételezések:

- Izotróp tároló
- $\Phi = \text{állandó}$ (homogén tároló)
- $\mu = \text{állandó}$

$$\nabla(\nabla p) = \frac{\delta}{\delta t} \left\{ \frac{\Phi \mu}{k} [1 + c(p - p_0)] \right\} \quad (283)$$

$$\nabla(\nabla p) = \frac{\Phi \mu c \delta p}{k \delta t} \quad (284)$$

$$\frac{\delta^2 p}{\delta x_1^2} + \frac{\delta^2 p}{\delta x_2^2} + \frac{\delta^2 p}{\delta x_3^2} = \frac{\Phi \mu c \delta p}{k \delta t} \quad (285)$$

Reális gázok:

$$\rho = \frac{M}{RT} \frac{p}{z(p)} \quad (286)$$

Feltéve, hogy $\Phi = \text{állandó}$:

$$\frac{\delta(\rho \Phi)}{\delta t} = \Phi \frac{\delta \rho}{\delta t} = \Phi \frac{1}{\rho} \frac{\delta \rho}{\delta p} \left(\rho \frac{\delta p}{\delta t} \right) = \Phi c_g \frac{M}{RT} \frac{p}{z} \frac{\delta p}{\delta t} \quad (287)$$

Az eddigiek alapján (250) a következők szerint változik:

$$\nabla \left(\frac{\vec{k}}{\mu} \frac{M p}{RT z} \nabla p \right) = \Phi c_g \frac{M}{RT} \frac{p}{z} \frac{\delta p}{\delta t} \quad (288)$$

$$\nabla \left(\frac{\vec{k} p}{\mu z} \nabla p \right) = \Phi c_g \frac{p}{z} \frac{\delta p}{\delta t} = \frac{1}{2} \Phi c_g \mu \frac{2p}{\mu z} \frac{\delta p}{\delta t} \quad (289)$$

Vezessük be az úgynevezett pszeudo nyomást (Al-Hussainy után), amivel a reális gázok szivárgási differenciálegyenlete a kissé összenyomható folyadékokéhoz lesz hasonlatos!

$$m(p) = 2 \int_{p_0}^p \frac{p}{\mu z} dp \quad (290)$$

$$\nabla m(p) = \frac{dm(p)}{dp} \nabla p = \frac{2p}{\mu z} \nabla p \quad (291)$$

$$\frac{\delta m(p)}{\delta t} = \frac{dm(p)}{dp} \frac{\delta p}{\delta t} = \frac{2p}{\mu z} \frac{\delta p}{\delta t} \quad (292)$$

$$\nabla[\vec{k} \nabla m(p)] = \Phi c_g \mu \frac{\delta m(p)}{\delta t} \quad (293)$$

Izotróp tárolót feltételezve:

$$\nabla[\nabla m(p)] = \frac{\Phi c_g \mu}{k} \frac{\delta m(p)}{\delta t} \quad (294)$$

Ideális gázok:

$z = 1$, $c_g = \frac{1}{p}$, $\mu = \text{állandó}$

$$m(p) = \frac{p^2}{\mu} \quad (295)$$

$$\nabla^2 p^2 = \frac{\Phi \mu}{kp} \frac{\delta p^2}{\delta t} \quad (296)$$

Különböző fluidumok szivárgási differenciálegyenletének megoldása

Kissé összenyomható folyadékok:

Lineáris áramlás:

$$\frac{\delta p}{\delta t} = 0, \quad \mu = \text{állandó}$$

$$\nabla(\vec{k}\nabla p) = 0 \quad (297)$$

Izotróp eset:

$$\nabla(\nabla p) = 0 \quad (298)$$

$$\frac{d^2 p}{dx^2} = 0 \quad (299)$$

Integrálva:

$$\frac{dp}{dx} = a \quad (300)$$

$$p = ax + b \quad (301)$$

Peremfeltételek:

- $x = 0, \quad p = p_i$

$$b = p_i \quad (302)$$

- $x = L$

Darcy törvény alapján:

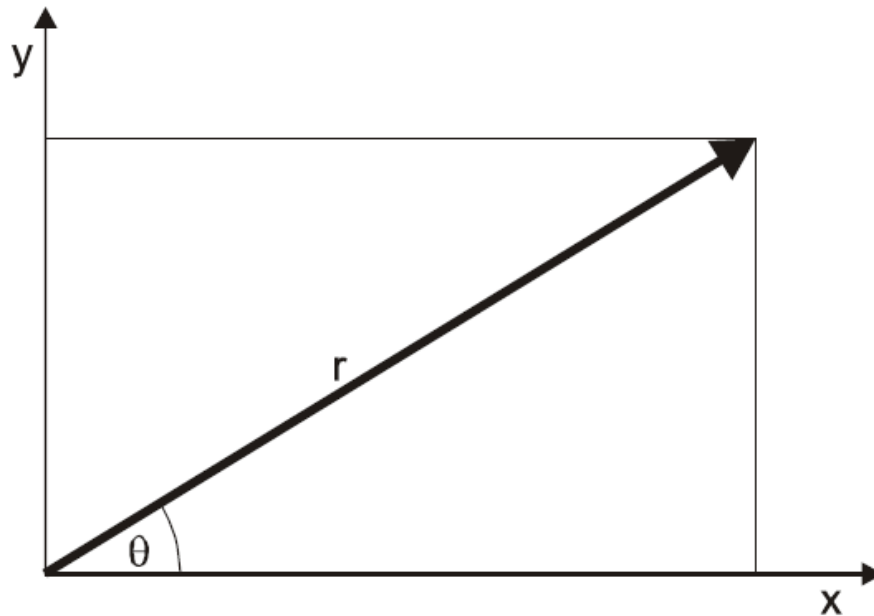
$$q_B = \frac{kA}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (303)$$

$$a = \frac{\mu q_B}{kA} \quad (304)$$

Tehát a megoldás:

$$p - p_i = \frac{\mu q B}{kA} x \quad (305)$$

Radiális áramlás:



11-3 ábra: Polárkoordináta rendszer

$$\theta = \operatorname{atan} \frac{x}{y}$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Mivel izotróp esetre:

$$\nabla(\nabla p) = 0 \quad (306)$$

Ezért:

$$\frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r} \left(r \frac{\delta p}{\delta r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\delta^2 p}{\delta \theta^2} = 0 \quad (307)$$

Mivel a nyomáseloszlás középpontosan szimmetrikus, ezért:

$$\frac{\delta^2 p}{\delta \theta^2} = 0 \quad (308)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r} \left(r \frac{\delta p}{\delta r} \right) = 0 \quad (309)$$

$$\frac{\delta^2 p}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta p}{\delta r} = 0 \quad (310)$$

Integrálva:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{a}{r} \quad (311)$$

$$a = \ln r + b \quad (312)$$

Darcy törvény:

$$-qB = \frac{kA}{\mu} \frac{dp}{dr} \quad (313)$$

$$\frac{dp}{dr} = \frac{q\mu B}{k2r\pi h} \quad (314)$$

$$a = r \frac{dp}{dr} = \frac{q\mu B}{k2\pi h} \quad (315)$$

Peremfeltételek:

- $r = r_w, p = p_{wf}$

$$p_{wf} = a \ln r_w + b \quad (316)$$

$$b = p_{wf} - a \ln r_w = p_{wf} + \frac{q\mu B}{k2\pi h} \ln r_w \quad (317)$$

$$p_{wf} - p = \frac{q\mu B}{k2\pi h} \ln \frac{r}{r_w} \quad (318)$$

$$q = -\frac{2\pi kh}{\mu B} \frac{p_e - p_{wf}}{\ln \frac{r_e}{r_w}} \quad (319)$$

Reális gázok:

Ha csak lamináris áramlást feltételezünk, használhatók az enyhén összenyomható folyadékokra levezetett egyenletek a pszeudo nyomások használatával. Mivel gáz áramlása során az áramlás általában turbulens, ezért a továbbiakban a (254)-es egyenletet használjuk fel.

Lineáris eset:

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{\mu}{k}u - \frac{\beta\rho}{k}u^2 \quad (320)$$

$$\rho u = \frac{Q_m}{A} \quad (321)$$

$$\rho dp = -\frac{\mu Q_m}{Ak} \left(1 + \frac{\beta Q_m}{\mu A}\right) dx \quad (322)$$

Mivel $\rho = \frac{M}{RT} \frac{p}{z(p)}$, ezért:

$$\frac{Mp}{RTz(p)} dp = -\frac{\mu Q_m}{Ak} \left(1 + \frac{\beta Q_m}{\mu A}\right) dx \quad (323)$$

Integrálva:

$$\int_{p_i}^p \frac{p}{z(p)} dp = -\frac{\mu Q_m RT}{AkM} \left(1 + \frac{\beta Q_m}{\mu A}\right) x \quad (324)$$

$$m(p) - m(p_i) = -\frac{2Q_m RT}{AkM} \left(1 + \frac{\beta Q_m}{\mu A}\right) x \quad (325)$$

Ha $z(p) = \bar{z}$

$$p^2 - p_i^2 = -\frac{2\mu Q_m RT \bar{z}}{AkM} \left(1 + \frac{\beta Q_m}{\mu A}\right) x \quad (326)$$

Radiális eset:

$$\int_{p_i}^p \frac{p}{z(p)} = -\frac{\mu Q_m RT}{2\pi h k M} \int_{r_w}^r \left(\frac{1}{r} + \frac{\beta Q_m}{2\pi r^2 h \mu}\right) dr \quad (327)$$

$$\int_{p_i}^p \frac{p}{z(p)} = -\frac{\mu Q_m RT}{2\pi h k M} \left[\ln \frac{r}{r_w} + \frac{\beta Q_m}{2\pi h \mu} \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r}\right) \right] \quad (328)$$

$$m(p) - m(p_{wf}) = -\frac{Q_m RT}{\pi h k M} \left[\ln \frac{r}{r_w} + \frac{\beta Q_m}{2\pi h \mu} \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r} \right) \right] \quad (329)$$

$$p^2 - p_{wf}^2 = -\frac{\mu Q_m RT \bar{z}}{\pi h k M} \left[\ln \frac{r}{r_w} + \frac{\beta Q_m}{2\pi h \mu} \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r} \right) \right] \quad (330)$$

C-Melléklet Béta tényezők összegzése szakirodalom alapján

8-2 táblázat: β tényezők összegzése

Szerzők	Egyenlett	Kőzet
(Greetsma, 1974)	$\beta_1 = \left(\frac{0.005}{\Phi^{5.5} k^{0.5} \times 10^{-11}} \right) \times 30.5$	homokkő
(Jones, 1987)	$\beta_2 = 6.15 \times 10^{10} (k)^{-1.55}$	homokkő / mészkő
(Jones, 1987)	$\beta_3 = 1.98 \times 10^{11} (k)^{-1.64}$	homokkő / mészkő
(Jones, 1987)	$\beta_4 = 7.89 \times 10^{10} (k)^{-1.60} [\Phi(1 - S_w)]^{-0.404}$	homokkő / mészkő
(Jones, 1987)	$\beta_5 = 2.11 \times 10^{10} (k)^{-1.55} [\Phi(1 - S_w)]^{-1.0}$	homokkő / mészkő
(Jones, 1987)	$\beta_6 = \frac{1}{[\Phi(1 - S_w)]^2} \times e^{45 - \sqrt{407 + 81 \cdot \ln(k / (\Phi(1 - S_w)))}}$	homokkő / mészkő
(Tek, et al., 1962)	$\beta_7 = \frac{5.5 \times 10^9}{k^{1.25} \Phi^{0.75}} \times 0.305$	homokkő / mészkő
(Cornell & Katz, 1953)	$\beta_8 = \frac{5.5 \times 10^9}{k^{3/4} \Phi^{3/4}}$	Wilcox- homok
(Evans, et al., 1987)	$\beta_9 = \left(\frac{5.123 \times 10^{-5}}{\Phi} \left[\frac{1}{(1 - S_w) \sqrt{k \times 10^{-11}}} \right]^{1.839} \right) \times 30.5$	homokkő
(Janicek & Katz, 1955)	$\beta_{10} = (1.82 \times 10^8 k^{-5/4} \Phi^{-3/4}) \times 30.5$	homokkő / mészkő / dolomit
(Pascal, et al., 1980)	$\beta_{11} = \left(\frac{4.8 \times 10^{12}}{k^{1.176}} \right) \times 0.305$	alacsony perm., repszett kutak adatai
(Coles & Hartman, 1998)	$\beta_{12} = \frac{1.07 \times 10^{12} \times \Phi^{0.449}}{k^{1.88}}$	homokkő / mészkő
(Coles & Hartman, 1998)	$\beta_{13} = \frac{2.49 \times 10^{11} \Phi^{0.537}}{k^{1.79}}$	homokkő / mészkő
(Khaniaminjan & Goudarzi, 2008)	$\beta_{14} = \frac{9 \times 10^9}{k^{6/7} \times \Phi^{8/7}}$	homokkő
(Khaniaminjan & Goudarzi, 2008)	$\beta_{15} = \frac{17.2 \times 10^{10}}{k^{1.76}}$	homokkő
(Khaniaminjan & Goudarzi, 2008)	$\beta_{16} = \frac{4.8 \times 10^{11}}{k^{1.8} \times \Phi^{-0.48}}$	homokkő
(Jones, 1987)	$\beta_{17} = \frac{2.018 \times 10^9}{k^{1.55}} \times 0.305$	mészkő, kristályos mészkő, jól osztályozott homokkő
(Ergun, 1952)	$\beta_{18} = \frac{1}{\Phi} \sqrt{\frac{1.8 \times 10^9}{k \Phi}} \times 0.305$	homokkő
(MacDonald, 1979)	$\beta_{19} = \frac{1}{\Phi} \sqrt{\frac{245 \times 10^8}{12k \Phi}} \times 0.305$	homokkő
(Coles & Hartman, 1998)	$\beta_{20} = \frac{8.17 \times 10^9 \Phi^{0.537}}{k^{1.79}} \times 0.305$	homokkő / mészkő

D-Melléklet **Viszonyítási olaj és- gázkutak hozamadatai**

8-3 táblázat: Viszonyítási kutak hozamadatai

p_{wf} [psi]	$q_{onyitott}$ [STB/nap]	$q_{gnyitott}$ [Mscf/nap]
3 000	0	0
2 900	146	4 737
2 800	292	8 649
2 700	438	12 012
2 600	584	14 972
2 500	729	17 618
2 400	875	20 007
2 300	1020	22 180
2 200	1165	24 167
2 100	1310	25 991
2 000	1455	27 668
1 900	1600	29 214
1 800	1745	30 640
1 700	1889	31 954
1 600	2034	33 165
1 500	2178	34 280
1 400	2322	35 303
1 300	2466	36 240
1 200	2609	37 094
1 100	2753	37 870
1 000	2896	38 569
900	3040	39 195
800	3183	39 750
700	3326	40 236
600	3469	40 654
500	3611	41 005
400	3754	41 291
300	3896	41 513
200	4039	41 671
100	4181	41 765
0	4323	41 797

E-Melléklet Perforált viszonyítási olaj- és gázkutak hozamadatai (McLeod)

8-4 táblázat: Perforált kutak hozamadatai McLeod alapján

p_{wf} [psi]	q_o [STB/nap]	p_{wf} [psi]	q_g [Mscf/nap]
3 000	0	3 000	0
2 900	146	2 900	3 879
2 800	291	2 800	6 496
2 700	436	2 700	8 571
2 600	580	2 600	10 315
2 500	724	2 500	11 830
2 400	867	2 400	13 171
2 300	1 009	2 300	14 372
2 200	1 151	2 200	15 458
2 100	1 292	2 100	16 446
2 000	1 433	2 000	17 348
1 900	1 573	1 900	18 175
1 800	1 713	1 800	18 933
1 700	1 852	1 700	19 629
1 600	1 990	1 600	20 269
1 500	2 128	1 500	20 855
1 400	2 266	1 400	21 393
1 300	2 403	1 300	21 883
1 200	2 539	1 200	22 330
1 100	2 675	1 100	22 735
1 000	2 810	1 000	23 099
900	2 945	900	23 425
800	3 080	800	23 714
700	3 214	700	23 966
600	3 347	600	24 183
500	3 480	500	24 365
400	3 612	400	24 513
300	3 744	300	24 628
200	3 876	200	24 710
100	4 007	100	24 759
0	4 138	0	24 775

F-Melléklet Perforált viszonyítási olaj- és gázkutak hozamadatai (Karakas & Tariq)

8-5 táblázat: Perforált olajkutak hozamadatai Karakas és Tariq alapján

p_{wf} [psi]	$q_{o\ 360^\circ}$ [STB/nap]	$q_{o\ 180^\circ}$ [STB/nap]	$q_{o\ 120^\circ}$ [STB/nap]	$q_{o\ 90^\circ}$ [STB/nap]	$q_{o\ 60^\circ}$ [STB/nap]	$q_{o\ 45^\circ}$ [STB/nap]
3 000	0	0	0	0	0	0
2 900	119	131	131	132	130	130
2 800	238	262	262	264	260	259
2 700	357	392	393	396	390	389
2 600	476	523	524	528	520	519
2 500	595	653	654	659	650	648
2 400	714	784	785	791	779	777
2 300	833	914	915	922	909	906
2 200	952	1 044	1 045	1 053	1 038	1 035
2 100	1 070	1 174	1 176	1 184	1 167	1 164
2 000	1 189	1 304	1 306	1 315	1 297	1 293
1 900	1 307	1 434	1 436	1 446	1 426	1 422
1 800	1 425	1 564	1 565	1 577	1 555	1 551
1 700	1 544	1 693	1 695	1 708	1 684	1 679
1 600	1 662	1 823	1 825	1 839	1 812	1 808
1 500	1 780	1 952	1 954	1 969	1 941	1 936
1 400	1 898	2 082	2 084	2 099	2 070	2 064
1 300	2 016	2 211	2 213	2 230	2 198	2 192
1 200	2 134	2 340	2 342	2 360	2 326	2 320
1 100	2 252	2 469	2 471	2 490	2 455	2 448
1 000	2 369	2 598	2 600	2 620	2 583	2 576
900	2 487	2 727	2 729	2 750	2 711	2 704
800	2 604	2 855	2 858	2 879	2 839	2 831
700	2 722	2 984	2 987	3 009	2 967	2 959
600	2 839	3 112	3 115	3 139	3 094	3 086
500	2 957	3 241	3 244	3 268	3 222	3 214
400	3 074	3 369	3 372	3 397	3 350	3 341
300	3 191	3 497	3 501	3 527	3 477	3 468
200	3 308	3 625	3 629	3 656	3 604	3 595
100	3 425	3 753	3 757	3 785	3 732	3 722
0	3 542	3 881	3 885	3 914	3 859	3 849

8-6 táblázat: Perforált gázkutak hozamadatai Karakas és Tariq alapján

p_{wf} [psi]	$q_{g\ 360^\circ}$ [Mscf/nap]	$q_{g\ 180^\circ}$ [Mscf/nap]	$q_{g\ 120^\circ}$ [Mscf/nap]	$q_{g\ 90^\circ}$ [Mscf/nap]	$q_{g\ 60^\circ}$ [Mscf/nap]	$q_{g\ 45^\circ}$ [Mscf/nap]
3 000	0	0	0	0	0	0
2 900	3 979	4 315	4 318	4 347	4 293	4 283
2 800	7 404	7 963	7 969	8 015	7 927	7 911
2 700	10 422	11 142	11 150	11 209	11 096	11 076
2 600	13 123	13 966	13 975	14 044	13 913	13 889
2 500	15 565	16 506	16 516	16 592	16 446	16 419
2 400	17 790	18 809	18 820	18 903	18 745	18 716
2 300	19 827	20 912	20 924	21 011	20 844	20 813
2 200	21 700	22 841	22 853	22 944	22 769	22 737
2 100	23 426	24 614	24 627	24 722	24 540	24 506
2 000	25 020	26 249	26 262	26 360	26 172	26 138
1 900	26 493	27 758	27 771	27 872	27 679	27 643
1 800	27 855	29 151	29 164	29 268	29 070	29 034
1 700	29 113	30 437	30 451	30 556	30 354	30 317
1 600	30 275	31 623	31 637	31 744	31 539	31 501
1 500	31 346	32 715	32 730	32 839	32 630	32 592
1 400	32 330	33 719	33 733	33 844	33 633	33 594
1 300	33 233	34 638	34 653	34 765	34 551	34 512
1 200	34 057	35 477	35 492	35 605	35 389	35 349
1 100	34 805	36 239	36 254	36 368	36 150	36 110
1 000	35 481	36 927	36 942	37 057	36 837	36 797
900	36 086	37 542	37 558	37 673	37 452	37 411
800	36 623	38 088	38 103	38 220	37 997	37 956
700	37 093	38 566	38 581	38 698	38 475	38 433
600	37 498	38 977	38 993	39 110	38 886	38 844
500	37 838	39 323	39 338	39 456	39 231	39 189
400	38 115	39 605	39 620	39 738	39 512	39 471
300	38 330	39 823	39 838	39 957	39 730	39 689
200	38 483	39 978	39 994	40 112	39 886	39 844
100	38 575	40 071	40 087	40 206	39 979	39 937
0	38 606	40 102	40 118	40 237	40 010	39 968

G-Melléklet Nyomásesés a perforációs csatornában

8-7 táblázat: Reynolds szám olaj áramlása esetén

q_o [m ³ /d]	Re [-] lövések=50	Re [-] lövések=75	Re [-] lövések=100	Re [-] lövések=125	Re [-] lövések=150	Határ
0	0	0	0	0	0	2 320
50	1 006	671	503	402	335	2 320
100	2 012	1 341	1 006	805	671	2 320
150	3 018	2 012	1 509	1 207	1 006	2 320
200	4 023	2 682	2 012	1 609	1 341	2 320
250	5 029	3 353	2 515	2 012	1 676	2 320
300	6 035	4 023	3 018	2 414	2 012	2 320
350	7 041	4 694	3 521	2 816	2 347	2 320
400	8 047	5 365	4 023	3 219	2 682	2 320
450	9 053	6 035	4 526	3 621	3 018	2 320
500	10 059	6 706	5 029	4 023	3 353	2 320
550	11 065	7 376	5 532	4 426	3 688	2 320
600	12 070	8 047	6 035	4 828	4 023	2 320
650	13 076	8 718	6 538	5 231	4 359	2 320
700	14 082	9 388	7 041	5 633	4 694	2 320
750	15 088	10 059	7 544	6 035	5 029	2 320
800	16 094	10 729	8 047	6 438	5 365	2 320
850	17 100	11 400	8 550	6 840	5 700	2 320
900	18 106	12 070	9 053	7 242	6 035	2 320
950	19 111	12 741	9 556	7 645	6 370	2 320
1 000	20 117	13 412	10 059	8 047	6 706	2 320

8-8 táblázat: Reynolds szám gáz áramlása esetén

q_g [sm ³ /d]	Re [-] lövések=5 0	Re [-] lövések=7 5	Re [-] lövések=10 0	Re [-] lövések=12 5	Re [-] lövések=15 0	Határ
0	0	0	0	0	0	2 320
1,0E+06	18 788	12 525	9 394	7 515	6 263	2 320
2,0E+06	37 575	25 050	18 788	15 030	12 525	2 320
3,0E+06	56 363	37 575	28 182	22 545	18 788	2 320
4,0E+06	75 151	50 101	37 575	30 060	25 050	2 320
5,0E+06	93 939	62 626	46 969	37 575	31 313	2 320
6,0E+06	112 726	75 151	56 363	45 091	37 575	2 320
7,0E+06	131 514	87 676	65 757	52 606	43 838	2 320
8,0E+06	150 302	100 201	75 151	60 121	50 101	2 320
9,0E+06	169 089	112 726	84 545	67 636	56 363	2 320
1,0E+07	187 877	125 251	93 939	75 151	62 626	2 320
1,1E+07	206 665	137 777	103 332	82 666	68 888	2 320
1,2E+07	225 453	150 302	112 726	90 181	75 151	2 320
1,3E+07	244 240	162 827	122 120	97 696	81 413	2 320
1,4E+07	263 028	175 352	131 514	105 211	87 676	2 320
1,5E+07	281 816	187 877	140 908	112 726	93 939	2 320
1,6E+07	300 603	200 402	150 302	120 241	100 201	2 320
1,7E+07	319 391	212 927	159 696	127 756	106 464	2 320
1,8E+07	338 179	225 453	169 089	135 272	112 726	2 320
1,9E+07	356 967	237 978	178 483	142 787	118 989	2 320
2,0E+07	375 754	250 503	187 877	150 302	125 251	2 320

8-9 táblázat: Sűrűdési tényező olaj áramlása esetén

q _o [m ³ /d]	k _r = 10 ⁻³					k _r = 10 ⁻⁵				
	f [-]	f [-]	f [-]	f [-]	f [-]	f [-]	f [-]	f [-]	f [-]	lövések =150
	lövések =50	lövések =75	lövések =100	lövések =125	lövések =150	lövések =50	lövések =75	lövések =100	lövések =125	
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	0,073	0,109	0,146	0,182	0,219	0,073	0,109	0,146	0,182	0,219
100	0,036	0,055	0,073	0,091	0,109	0,036	0,055	0,073	0,091	0,109
150	0,111	0,036	0,049	0,061	0,073	0,054	0,036	0,049	0,061	0,073
200	0,110	0,112	0,036	0,046	0,055	0,051	0,054	0,036	0,046	0,055
250	0,109	0,111	0,029	0,036	0,044	0,050	0,053	0,029	0,036	0,044
300	0,108	0,110	0,111	0,030	0,036	0,048	0,051	0,054	0,030	0,036
350	0,107	0,109	0,111	0,112	0,031	0,047	0,050	0,052	0,054	0,031
400	0,107	0,109	0,110	0,111	0,112	0,046	0,049	0,051	0,053	0,054
450	0,106	0,108	0,109	0,110	0,111	0,045	0,048	0,050	0,052	0,054
500	0,106	0,108	0,109	0,110	0,111	0,044	0,047	0,050	0,051	0,053
550	0,106	0,107	0,108	0,109	0,110	0,043	0,046	0,049	0,051	0,052
600	0,105	0,107	0,108	0,109	0,110	0,043	0,046	0,048	0,050	0,051
650	0,105	0,107	0,108	0,109	0,110	0,042	0,045	0,047	0,049	0,051
700	0,105	0,106	0,107	0,108	0,109	0,041	0,045	0,047	0,049	0,050
750	0,105	0,106	0,107	0,108	0,109	0,041	0,044	0,046	0,048	0,050
800	0,105	0,106	0,107	0,108	0,109	0,040	0,043	0,046	0,048	0,049
850	0,104	0,106	0,107	0,107	0,108	0,040	0,043	0,045	0,047	0,049
900	0,104	0,105	0,106	0,107	0,108	0,039	0,043	0,045	0,047	0,048
950	0,104	0,105	0,106	0,107	0,108	0,039	0,042	0,044	0,046	0,048
1000	0,104	0,105	0,106	0,107	0,108	0,039	0,042	0,044	0,046	0,047

8-10 táblázat: Sűrűlási tényező gáz áramlása esetén

q _g [sm ³ /d]	k _r = 10 ⁻³					k _r = 10 ⁻⁵				
	f [-] lövések =50	f [-] lövések =75	f [-] lövések =100	f [-] lövések =125	f [-] lövések =150	f [-] lövések =50	f [-] lövések =75	f [-] lövések =100	f [-] lövések =125	f [-] lövések =150
0,00E+00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2,50E+05	0,101	0,111	0,112	0,034	0,041	0,020	0,052	0,054	0,034	0,041
5,00E+05	0,101	0,107	0,109	0,110	0,111	0,020	0,047	0,049	0,051	0,052
7,50E+05	0,101	0,106	0,107	0,108	0,109	0,020	0,043	0,046	0,048	0,049
1,00E+06	0,101	0,105	0,106	0,107	0,107	0,020	0,041	0,043	0,045	0,047
1,25E+06	0,101	0,104	0,105	0,106	0,106	0,020	0,039	0,042	0,043	0,045
1,50E+06	0,101	0,104	0,105	0,105	0,106	0,020	0,038	0,040	0,042	0,043
1,75E+06	0,101	0,104	0,104	0,105	0,105	0,020	0,037	0,039	0,041	0,042
2,00E+06	0,101	0,103	0,104	0,104	0,105	0,020	0,036	0,038	0,040	0,041
2,25E+06	0,101	0,103	0,104	0,104	0,105	0,020	0,035	0,037	0,039	0,040
2,50E+06	0,101	0,103	0,103	0,104	0,104	0,020	0,035	0,037	0,038	0,039
2,75E+06	0,101	0,103	0,103	0,104	0,104	0,020	0,034	0,036	0,037	0,039
3,00E+06	0,101	0,103	0,103	0,103	0,104	0,020	0,034	0,035	0,037	0,038
3,25E+06	0,101	0,103	0,103	0,103	0,104	0,020	0,033	0,035	0,036	0,038
3,50E+06	0,101	0,103	0,103	0,103	0,104	0,020	0,033	0,034	0,036	0,037
3,75E+06	0,101	0,102	0,103	0,103	0,103	0,020	0,032	0,034	0,035	0,037
4,00E+06	0,101	0,102	0,103	0,103	0,103	0,020	0,032	0,034	0,035	0,036
4,25E+06	0,101	0,102	0,103	0,103	0,103	0,020	0,032	0,033	0,035	0,036
4,50E+06	0,101	0,102	0,103	0,103	0,103	0,020	0,031	0,033	0,034	0,035
4,75E+06	0,101	0,102	0,103	0,103	0,103	0,020	0,031	0,033	0,034	0,035
5,00E+06	0,101	0,102	0,102	0,103	0,103	0,020	0,031	0,032	0,034	0,035

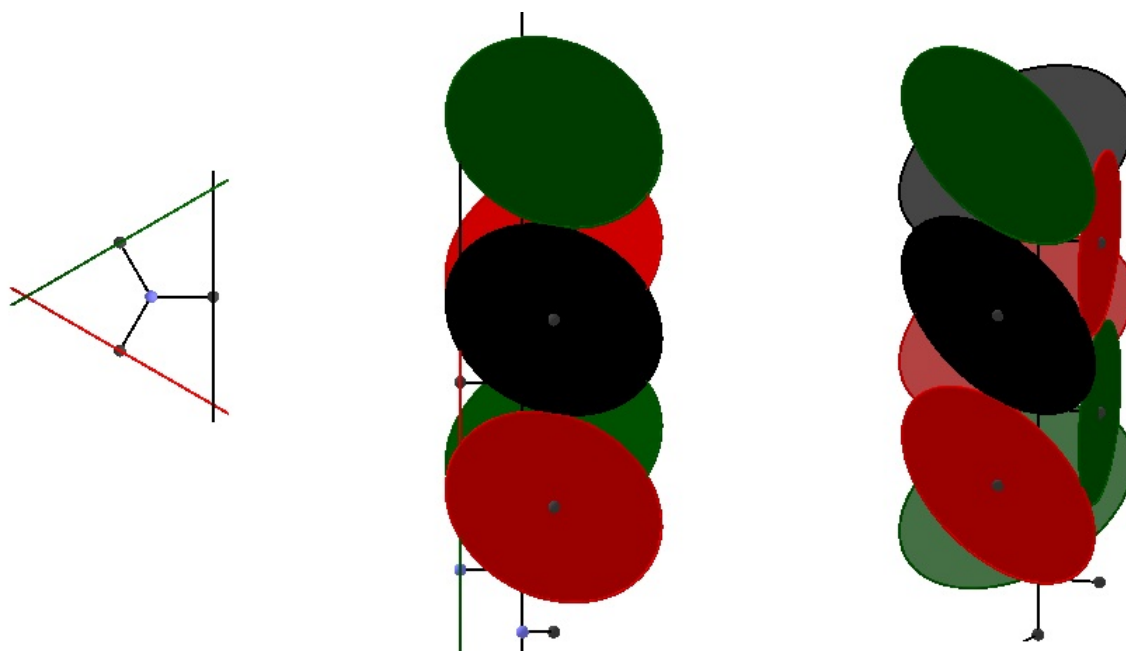
8-11 táblázat: Nyomásesés arány olaj áramlása esetén

q ₀ [sm ³ / d]	k _r = 10 ⁻³					k _r = 10 ⁻⁵				
	Δp1/Δp ₂ ns= 12 1/m	Δp1/Δp ₂ ns= 15 1/m	Δp1/Δp ₂ ns= 20 1/m	Δp1/Δp ₂ ns= 25 1/m	Δp1/Δp ₂ ns= 30 1/m	Δp1/Δp ₂ ns= 12 1/m	Δp1/Δp ₂ ns= 15 1/m	Δp1/Δp ₂ ns= 20 1/m	Δp1/Δp ₂ ns= 25 1/m	Δp1/Δp ₂ ns= 30 1/m
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	8,55E-04	6,84E-04	5,13E-04	4,11E-04	3,42E-04	8,55E-04	6,84E-04	5,13E-04	4,11E-04	3,42E-04
100	8,55E-04	6,84E-04	5,13E-04	4,11E-04	3,42E-04	8,55E-04	6,84E-04	5,13E-04	4,11E-04	3,42E-04
150	8,55E-04	6,84E-04	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04	8,55E-04	6,84E-04	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04
200	8,55E-04	6,84E-04	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04	8,55E-04	6,84E-04	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04
250	8,55E-04	6,84E-04	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04	8,55E-04	6,84E-04	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04
300	8,55E-04	6,84E-04	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04	8,55E-04	6,84E-04	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04
350	8,55E-04	6,84E-04	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04	8,55E-04	6,84E-04	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04
400	8,55E-04	6,84E-04	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04	8,55E-04	6,84E-04	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04
450	8,55E-04	6,84E-04	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04	8,55E-04	6,84E-04	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04
500	8,55E-04	6,84E-04	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04	8,55E-04	6,84E-04	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04
550	8,55E-04	6,84E-04	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04	8,55E-04	6,84E-04	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04
600	3,75E-03	6,84E-04	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04	1,81E-03	6,84E-04	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04
650	4,05E-03	6,84E-04	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04	1,94E-03	6,84E-04	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04
700	4,34E-03	2,81E-03	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04	2,07E-03	1,36E-03	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04
750	4,64E-03	3,00E-03	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04	2,19E-03	1,45E-03	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04
800	4,93E-03	3,19E-03	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04	2,32E-03	1,53E-03	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04
850	5,23E-03	3,38E-03	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04	2,44E-03	1,61E-03	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04
900	5,52E-03	3,57E-03	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04	2,56E-03	1,69E-03	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04
950	5,81E-03	3,76E-03	2,14E-03	4,10E-04	3,42E-04	2,68E-03	1,77E-03	1,04E-03	4,10E-04	3,42E-04
1000	6,10E-03	3,95E-03	2,25E-03	4,10E-04	3,42E-04	2,80E-03	1,85E-03	1,09E-03	4,10E-04	3,42E-04

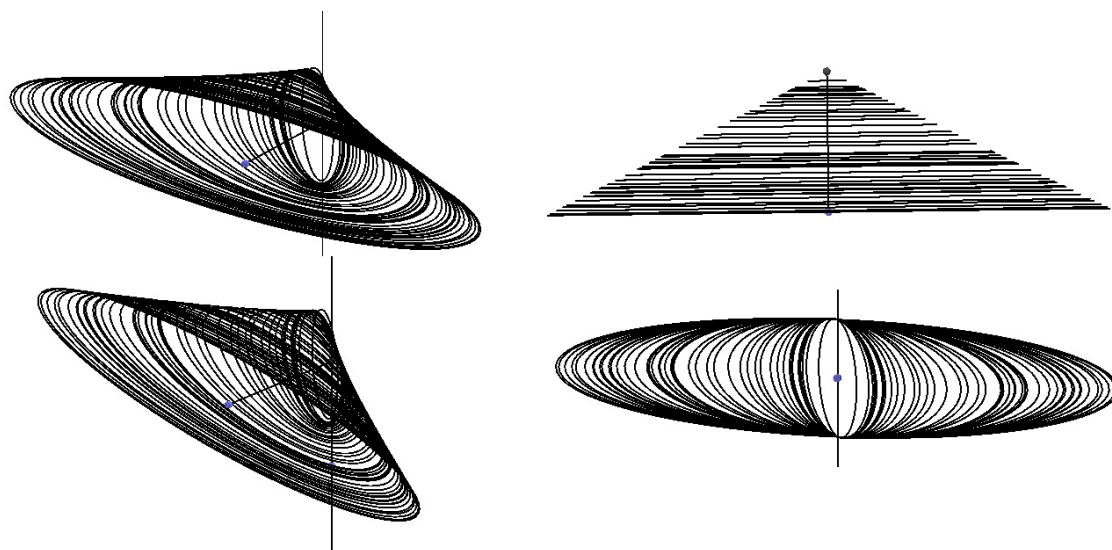
8-12 táblázat: Nyomásesés arány gáz áramlása esetén

q _g [sm ³ /d]	k _r = 10 ⁻³					k _i = 10 ⁻⁵				
	Δp ₁ /Δp ₂ ns= 12 1/m	Δp ₁ /Δp ₂ ns= 15 1/m	Δp ₁ /Δp ₂ ns= 20 1/m	Δp ₁ /Δp ₂ ns= 25 1/m	Δp ₁ /Δp ₂ ns= 30 1/m	Δp ₁ /Δp ₂ ns= 12 1/m	Δp ₁ /Δp ₂ ns= 15 1/m	Δp ₁ /Δp ₂ ns= 20 1/m	Δp ₁ /Δp ₂ ns= 25 1/m	Δp ₁ /Δp ₂ ns= 30 1/m
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5 E+6	8,55E-04	6,84E-04	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04	8,55E-04	6,84E-04	5,13E-04	4,10E-04	3,42E-04
1 E+6	5,72E-03	3,70E-03	2,11E-03	4,10E-04	3,42E-04	2,64E-03	1,75E-03	1,02E-03	4,10E-04	3,42E-04
1,5 E+6	8,42E-03	5,44E-03	3,10E-03	2,00E-03	1,40E-03	3,70E-03	2,46E-03	1,45E-03	9,57E-04	6,81E-04
2 E+6	1,11E-02	7,16E-03	4,08E-03	2,63E-03	1,84E-03	4,68E-03	3,12E-03	1,84E-03	1,22E-03	8,72E-04
2,5 E+6	1,38E-02	8,87E-03	5,05E-03	3,26E-03	2,28E-03	5,62E-03	3,74E-03	2,22E-03	1,47E-03	1,05E-03
3 E+6	1,64E-02	1,06E-02	6,01E-03	3,88E-03	2,71E-03	6,51E-03	4,34E-03	2,57E-03	1,71E-03	1,23E-03
3,5 E+6	1,91E-02	1,23E-02	6,97E-03	4,49E-03	3,14E-03	7,38E-03	4,92E-03	2,92E-03	1,94E-03	1,39E-03
4 E+6	2,17E-02	1,40E-02	7,92E-03	5,11E-03	3,57E-03	8,22E-03	5,48E-03	3,25E-03	2,17E-03	1,56E-03
4,5 E+6	2,43E-02	1,56E-02	8,87E-03	5,72E-03	4,00E-03	9,03E-03	6,03E-03	3,58E-03	2,39E-03	1,71E-03
5 E+6	2,69E-02	1,73E-02	9,82E-03	6,33E-03	4,42E-03	9,84E-03	6,56E-03	3,90E-03	2,60E-03	1,87E-03
5,5 E+6	2,96E-02	1,90E-02	1,08E-02	6,93E-03	4,84E-03	1,06E-02	7,09E-03	4,21E-03	2,81E-03	2,02E-03
6 E+6	3,22E-02	2,07E-02	1,17E-02	7,54E-03	5,26E-03	1,14E-02	7,60E-03	4,51E-03	3,01E-03	2,16E-03
6,5 E+6	3,48E-02	2,24E-02	1,27E-02	8,14E-03	5,68E-03	1,21E-02	8,11E-03	4,81E-03	3,21E-03	2,31E-03
7 E+6	3,74E-02	2,40E-02	1,36E-02	8,75E-03	6,10E-03	1,29E-02	8,60E-03	5,11E-03	3,41E-03	2,45E-03
7,5 E+6	4,00E-02	2,57E-02	1,45E-02	9,35E-03	6,52E-03	1,36E-02	9,09E-03	5,40E-03	3,60E-03	2,59E-03
8 E+6	4,26E-02	2,74E-02	1,55E-02	9,95E-03	6,94E-03	1,44E-02	9,57E-03	5,68E-03	3,79E-03	2,73E-03
8,5 E+6	4,52E-02	2,90E-02	1,64E-02	1,05E-02	7,36E-03	1,51E-02	1,01E-02	5,97E-03	3,98E-03	2,86E-03
9 E+6	4,78E-02	3,07E-02	1,73E-02	1,11E-02	7,77E-03	1,58E-02	1,05E-02	6,25E-03	4,17E-03	3,00E-03
9,5 E+6	5,04E-02	3,23E-02	1,83E-02	1,17E-02	8,19E-03	1,65E-02	1,10E-02	6,52E-03	4,35E-03	3,13E-03
1 E+7	5,29E-02	3,40E-02	1,92E-02	1,23E-02	8,60E-03	1,72E-02	1,14E-02	6,79E-03	4,53E-03	3,26E-03

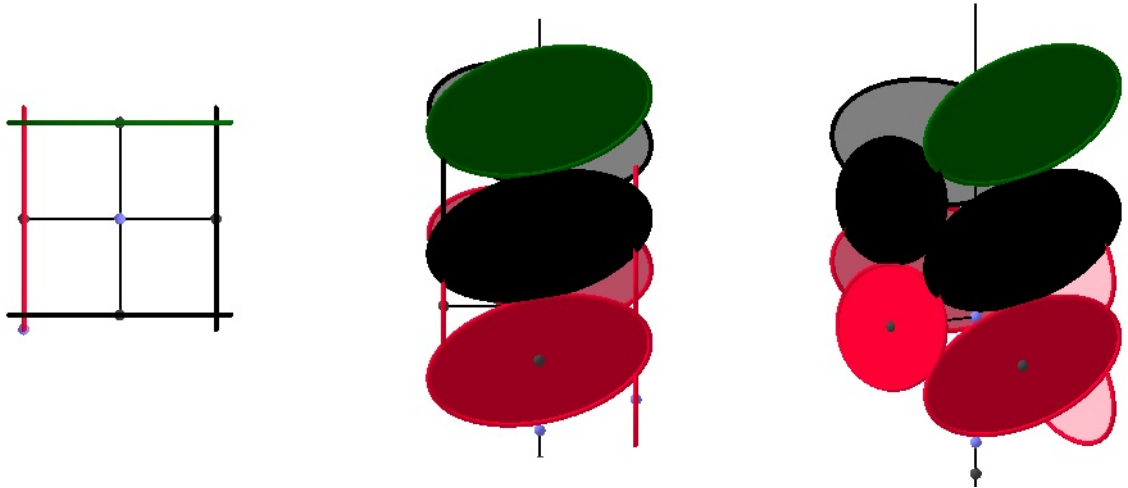
H-Melléklet Gyűjtőterek alakja különböző perforálási fázisszögek esetében



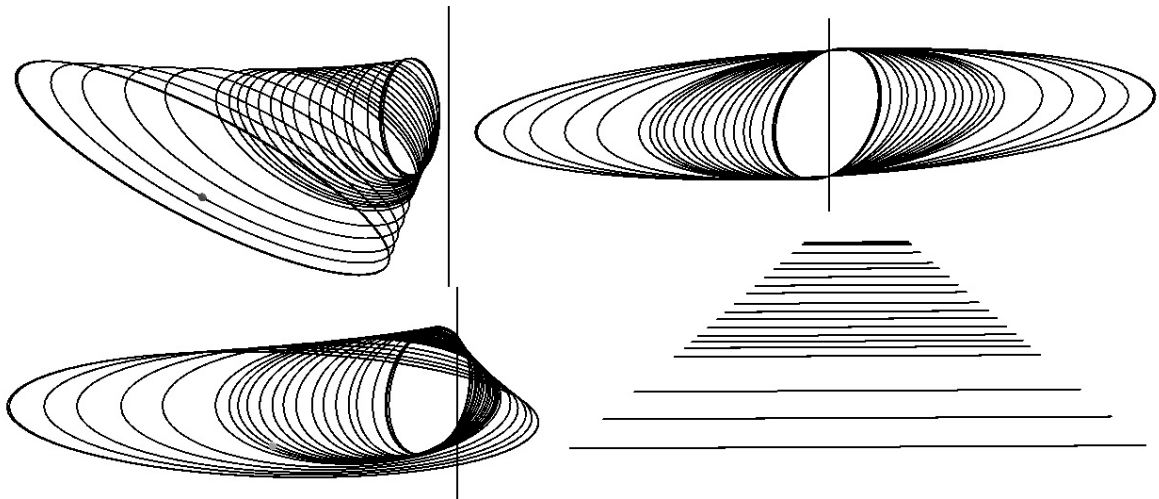
11-4 ábra: Perforációk korlátozó hatása ($\theta = 120^\circ$)



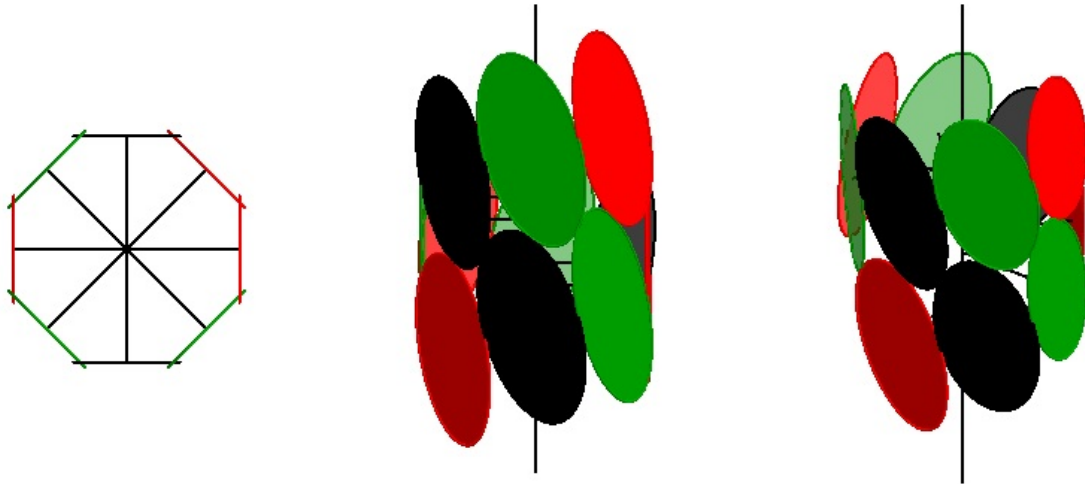
11-5 ábra: Perforációs csatorna gyűjtőtere ($\theta = 120^\circ$)



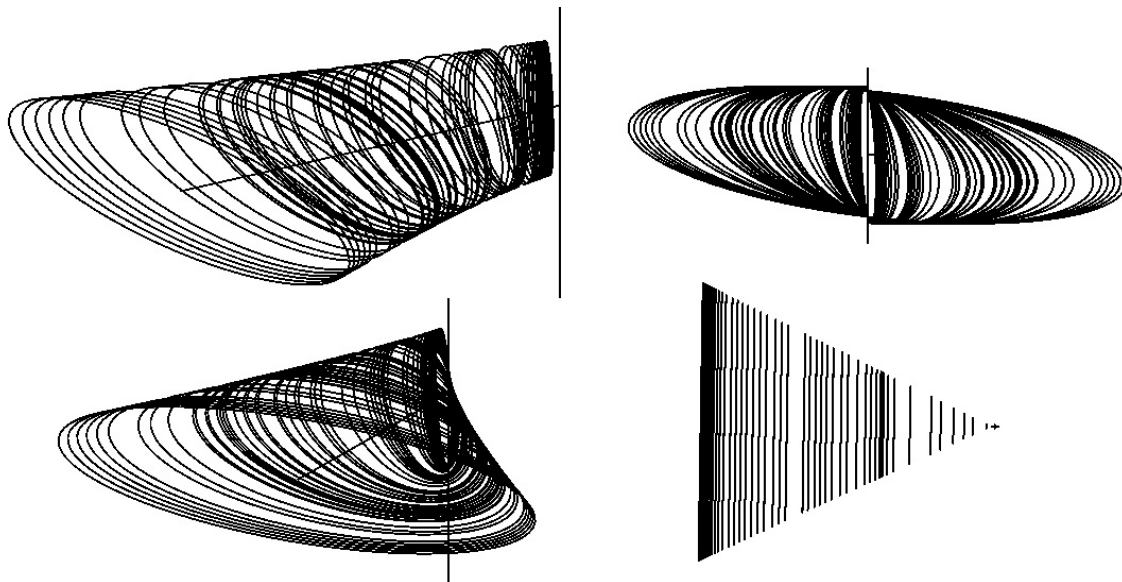
11-6 ábra: Perforációk korlátozó hatása ($\theta = 90^\circ$)



11-7 ábra: Perforációs csatorna gyűjtőtere ($\theta = 90^\circ$)



11-8 ábra: Perforációk korlátozó hatása ($\theta = 45^\circ$)



11-9 ábra: Perforációs csatorna gyűjtőtere ($\theta = 45^\circ$)

I-Melléklet Műközetek összeállítási adatai

I sorozat

Szemcseméret	mennyiség (g)	Megnevezés	Felhasznált keverék (g)
HOMOK			
500	76	I1	-
325	214,72	I2	100,03
200	80,22	I3	100
b200	49,16	I4	100,02
	420,1	I5	100,06
MÉSZKŐ	120,01		
		Víz alatt állt:	2 h 45 min
CEMENT	60,016	Levegőn állt:	72 h
		Vákuumban állt:	1 h

J sorozat

Szemcseméret	mennyiség (g)	Megnevezés	Felhasznált keverék (g)
HOMOK			
500	61,14	J1	100,016
325	224,22	J2	100,006
200	57,446	J3	100,015
b200	221,044	J4	100,003
		J5	-
MÉSZKŐ	120		
		Víz alatt állt:	3 h 5 min
CEMENT	60,04	Levegőn állt:	24 h
		Vákuumban állt:	1 h

K sorozat

Szemcseméret	mennyiség (g)	Megnevezés	Felhasznált keverék (g)
HOMOK			
500	191,42	K1	100,027
325	168,81	K2	100,041 darabokra tört
200	51,09	K3	100,049
b200	9	K4	100,039 2 darabra tört
		K5	100,061
MÉSZKŐ	120,05		
		Víz alatt állt:	4 h 12 min
CEMENT	60,09	Levegőn állt:	24 h
		Vákuumban állt:	0

L sorozat

Szemcseméret	mennyiség (g)	Megnevezés	Felhasznált keverék (g)
HOMOK			
500	0	L1	100,006
325	420	L2	100,015
200	0	L3	100,044
b200	0	L4	100,4
		L5	100,061
MÉSZKŐ	120,1		
		Víz alatt állt:	3h 3 min
CEMENT	60,01	Levegőn állt:	24 h
		Vákuumban állt:	0

M sorozat

Szemcseméret	mennyiség (g)	Megnevezés	Felhasznált keverék (g)
HOMOK			
500	0	M1	100,01
325	124,56	M2	100,09
200	216,85	M3	100,068 darabokra esett
b200	78,99	M4	100,047
		M5	100,023
MÉSZKŐ	120,09		
		Víz alatt állt:	21 h 30 min
CEMENT	60,03	Levegőn állt:	24 h
		Vákuumban állt:	1,5 h

N sorozat

Szemcseméret	mennyiség (g)	Megnevezés	Felhasznált keverék (g)
HOMOK			
500-800	26,17	N1	100,02
315-500	215,66	N2	100,082
200-315	149,23	N3	100,053 alja töredezett
106-200	46,26	N4	100,041
<106	0	N5	100,03
MÉSZKŐ	120,03	Víz alatt állt:	3 h 0 min
		Levegőn állt:	24 h
CEMENT	60,01	Vákuumban állt:	1,5 h

O sorozat

Szemcseméret	mennyiség (g)	Megnevezés	Felhasznált keverék (g)
HOMOK			
500-800	16,1	O1	100,087
315-500	186,49	O2	100,022
200-315	167,58	O3	100,018
106-200	46,81	O4	100,043 ketté tört
<106	3,06	O5	100,059
MÉSZKŐ	120,12	Víz alatt állt:	2 h 45 min
		Levegőn állt:	24 h
CEMENT	86,52	Vákuumban állt:	1 h

P sorozat

Szemcseméret	mennyiség (g)	Megnevezés	Felhasznált keverék (g)
HOMOK			
500-800	65,84	P1	100,05 ketté tört
315-500	200,09	P2	100,183
200-315	147,95	P3	100,19 darabokra esett
106-200	6,64	P4	100,065
<106	0	P5	100,12 pár darabra esett
MÉSZKŐ	120,04	Víz alatt állt:	3 h 0 min
		Levegőn állt:	24 h
CEMENT	60,26	Vákuumban állt:	1 h

Q sorozat

Szemcseméret	mennyiség (g)	Megnevezés	Felhasznált keverék (g)
HOMOK			
500-800	23,066	Q1	100,88
315-500	169,264	Q2	100,8
200-315	192,18	Q3	100,63
106-200	36,52	Q4	100,28
<106	0	Q5	100,37 ketté tört
MÉSZKŐ	121	Víz alatt állt:	2 h 51 min
		Levegőn állt:	24 h
CEMENT	60,45	Vákuumban állt fémben:	1 h
		Vákuumban állt fém nélkül:	1 h

S sorozat

Szemcseméret	mennyiség (g)	Megnevezés	Felhasznált keverék (g)
HOMOK			
500-800	26,94	S1	100,098
315-500	200,34	S2	100,158
200-315	160,59	S3	100,055
106-200	26,13	S4	100,032
<106	6,06	S5	100,063
MÉSZKŐ			
	120,31	Víz alatt állt:	2 h 50 min
		Levegőn állt:	24 h
CEMENT			
	60,64	Vákuumban állt fémben:	1 h
		Vákuumban állt fém nélkül:	1 h

több részre esett

T sorozat

Szemcseméret	mennyiség (g)	Megnevezés	Felhasznált keverék (g)
HOMOK			
500-800	10,916	T1	100,085
315-500	155,024	T2	100,005
200-315	256,434	T3	100,068
106-200	0	T4	100,019
<106	0	T5	100,035
MÉSZKŐ			
	120,120	Víz alatt állt:	2 h 45 min
		Levegőn állt:	48 h
CEMENT			
	60,95	Vákuumban állt fémben:	1 h
		Vákuumban állt fém nélkül:	1 h

több részre esett

U sorozat

Szemcseméret	mennyiség (g)	Megnevezés	Felhasznált keverék (g)
HOMOK			
500-800	17,524	U1	100,096
315-500	141,956	U2	100,093
200-315	200,34	U3	100,026
106-200	47,47	U4	100,068
<106	13,14	U5	100,082
MÉSZKŐ			
	121,08	Víz alatt állt:	2 h 40 min
		Levegőn állt:	48 h
CEMENT			
	60,14	Vákuumban állt fémben:	1 h
		Vákuumban állt fém nélkül:	1 h

V sorozat

Szemcseméret	mennyiség (g)	Megnevezés	Felhasznált keverék (g)
HOMOK			
500-800	11,065	V1	100,071
315-500	159,985	V2	100,09
200-315	175,37	V3	100
106-200	78,33	V4	100,016
<106	0	V5	100,07
MÉSZKŐ			
	120,96	Víz alatt állt:	3 h 12 min
		Levegőn állt:	24 h
CEMENT			
	64,14	Vákuumban állt fémben:	1 h
		Vákuumban állt fém nélkül:	1 h

W sorozat

Szemcseméret	mennyiség (g)	Megnevezés	Felhasznált keverék (g)
HOMOK			
500-800	26,36	W1	100,07
315-500	173,63	W2	100,026
200-315	142,04	W3	100,043
106-200	67,45	W4	100,08
<106	10,82	W5	100,091
MÉSZKŐ			
	121,052	Víz alatt állt:	3 h 2 min
		Levegőn állt:	24 h
CEMENT			
	64,12	Vákuumban állt fémben:	1 h
		Vákuumban állt fém nélkül:	1 h

J-Melléklet Műközetek mért tulajdonságai

8-13 táblázat: Műközetek mért tulajdonságai

Név	L [cm]	d [cm]	m [g]	$\rho_{\text{szilárd}}$ [g/cm ³]	ρ_{teljes} [g/cm ³]	Φ [-]	k [mD]	R ²	X _{50%} [μm]	meredekség [-]
I2	4,04	3,97	90,56	2,65	1,81	0,32	4,62	0,98	319,76	126,40
I3	4,05	3,98	91,42	2,64	1,82	0,31	3,84	0,99		
I4	4,40	3,94	95,88	2,63	1,78	0,32	5,10	0,98		
J1	4,42	3,95	99,09	2,64	1,83	0,31	3,99	0,95	309,60	136,60
J2	4,26	3,98	95,87	2,63	1,81	0,31	3,60	0,98		
J4	4,43	3,97	98,31	2,63	1,80	0,32	4,24	0,98		
K1	4,49	3,98	100,18	2,61	1,79	0,31	3,86	0,98	430,50	199,02
K2	4,41	3,96	100,21	2,59	1,84	0,29	2,12	0,96		
K5	4,15	3,93	92,06	2,60	1,83	0,30	1,89	0,98		
L1	4,49	3,93	98,00	3,18	1,79	0,44	10,23	0,88	329,80	141,18
L2	4,69	3,98	99,89	2,63	1,71	0,35	10,47	0,98		
L3	4,38	3,95	92,59	2,63	1,73	0,34	12,96	0,98		
L4	4,30	3,95	95,34	2,61	1,81	0,31	5,09	0,98		
L5	4,39	3,96	96,70	2,62	1,79	0,32	6,35	0,97		
M1	4,46	3,95	99,58	2,63	1,82	0,31	5,03	0,98	236,69	94,72
M2	4,46	3,95	99,27	2,63	1,82	0,31	5,03	0,98		
M4	4,09	3,96	92,28	2,63	1,83	0,31	4,72	0,99		
M5	4,33	3,97	98,26	2,63	1,83	0,30	4,58	0,96		
N1	4,45	3,98	96,41	2,65	1,74	0,34	5,81	0,97	361,49	156,07
N2	4,37	3,94	95,50	2,64	1,79	0,32	5,06	0,97		
N3	3,66	3,97	80,75	2,98	1,78	0,40	4,07	0,98		
N4	4,11	3,95	90,70	2,65	1,80	0,32	5,25	0,98		
N5	4,30	3,96	94,78	2,64	1,79	0,32	4,39	0,99		
O1	4,12	3,96	96,65	2,61	1,90	0,27	1,46	0,97	319,09	134,18
O2	4,32	3,93	97,07	2,56	1,85	0,28	1,96	0,95		
O3	4,31	3,94	99,82	2,62	1,90	0,27	1,53	0,99		
O5	4,27	3,99	99,60	2,62	1,87	0,29	1,31	0,93		
P2	4,40	3,96	100,79	2,62	1,86	0,29	3,60	0,98	411,24	157,94
P4	4,25	3,97	97,59	2,61	1,85	0,29	3,30	0,96		

Név	L [cm]	d [cm]	m [g]	$\rho_{\text{szilárd}}$ [g/cm ³]	ρ_{teljes} [g/cm ³]	Φ [-]	k [mD]	R ²	x _{50%} [μm]	meredekség [-]
Q1	4,25	3,95	94,44	2,64	1,81	0,32	6,37	0,97	335,04	119,70
Q3	4,05	3,92	90,59	2,64	1,85	0,30	5,58	0,97		
Q4	4,07	3,95	91,33	2,63	1,83	0,30	6,50	0,97		
S1	4,27	3,94	97,57	2,63	1,87	0,29	3,38	0,96	329,79	139,75
S2	4,30	3,97	97,94	2,63	1,84	0,30	4,50	0,96		
S4	4,06	3,94	91,03	2,64	1,84	0,30	4,50	0,97		
S5	4,31	3,97	98,55	2,64	1,85	0,30	3,95	0,95	312,70	123,10
T1	4,34	3,95	98,95	2,63	1,87	0,29	2,43	0,98		
T2	4,36	3,97	98,50	2,63	1,82	0,31	1,96	0,98		
T4	4,35	3,96	98,39	2,63	1,84	0,30	2,40	0,95		
T5	4,36	3,92	98,96	2,63	1,88	0,29	2,70	0,96	303,06	132,46
U1	4,32	3,97	98,29	2,62	1,84	0,30	2,49	0,98		
U2	4,45	3,96	98,80	2,62	1,81	0,31	3,44	0,99		
U3	4,35	3,96	97,25	2,62	1,82	0,31	3,24	0,96		
U4	4,32	4,00	97,69	2,63	1,80	0,31	2,90	0,95		
U5	4,43	3,97	100,60	2,63	1,84	0,30	2,98	0,98	303,14	125,70
V4	4,43	3,96	97,92	2,62	1,80	0,31	4,30	0,97		
V5	4,41	3,96	97,73	2,62	1,80	0,31	4,56	0,98	311,50	130,78
W3	4,49	3,96	98,45	2,62	1,78	0,32	3,33	0,98		
W4	4,40	3,95	96,18	2,62	1,78	0,32	3,94	0,99		
W5	4,40	3,95	97,78	2,62	1,80	0,31				

K-Melléklet Egyenértékű perforáció sugár CFD vizsgálata

8-14 táblázat: Egyenértékű perforáció sugár CFD szimulációs eredményei

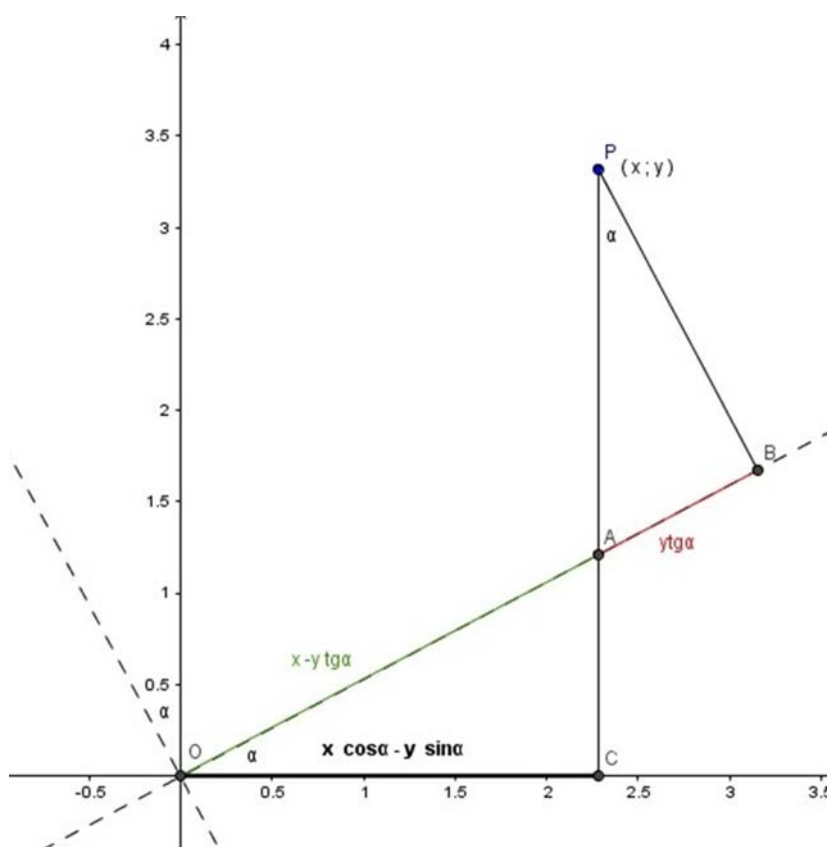
hossz [mm]	$r_{kúp}$ [mm]	r_{henger} [mm]	$r_{henger}/r_{kúp}$ [%]
250	20	9,55	47,75
	22	10,62	48,26
	24	11,58	48,25
	26	12,81	49,27
	28	13,84	49,43
225	20	9,5	47,50
	22	10,7	48,64
	24	11,65	48,54
	26	12,9	49,62
	28	13,9	49,64
200	20	9,65	48,25
	22	10,8	49,09
	24	11,74	48,92
	26	13	50,00
	28	14,1	50,36
175	20	9,85	49,25
	22	10,9	49,55
	24	12,4	51,67
	26	13,15	50,58
	28	14,25	50,89
150	20	9,95	49,75
	22	11,15	50,68
	24	12,4	51,67
	26	13,29	51,12
	28	14,55	51,96

L-Melléklet Egyenértékű zúzott zóna sugár CFD vizsgálata

8-15 táblázat: Egyenértékű zúzott zóna sugár CFD vizsgálata

hossz [mm]	r_{kúp} [mm]	r_{kúphéj} [mm]	r_{henger} [mm]	r_{hengerhéj} [mm]	r_{hengerhéj}/r_{kúphéj} [%]
250	20	30	9,55	15	50,00
	22	32	10,62	15,618	48,81
	24	34	11,58	16,58	48,76
	26	36	12,81	17,81	49,47
	28	38	13,84	18,84	49,58
225	20	30	9,5	14,5	48,33
	22	32	10,7	15,7	49,06
	24	34	11,65	16,65	48,97
	26	36	12,9	17,9	49,72
	28	38	13,9	18,9	49,74
200	20	30	9,65	14,65	48,83
	22	32	10,8	15,8	49,38
	24	34	11,74	16,74	49,24
	26	36	13	17,81	49,47
	28	38	14,1	19,1	50,26
175	20	30	9,85	14,85	49,50
	22	32	10,9	15,9	49,69
	24	34	12,4	17,1	50,29
	26	36	13,15	18,15	50,42
	28	38	14,25	19,25	50,66
150	20	30	9,95	14,95	49,83
	22	32	11,15	16,2	50,63
	24	34	12,4	17,1	50,29
	26	36	13,29	18,1	50,28
	28	38	14,55	19,5	51,32

M-Melléklet Ellipszis paraméterek jellemzése



11-10 ábra: Koordinátarendszer forgatás

P pont koordinátái adottak egy adott koordináta rendszeren belül. Szükség van a P pont koordinátáinak meghatározására egy azonos origójú, de α szöggel elforgatott koordináta rendszerben. Az eredeti koordináta rendszer tengelyei szaggatott vonallal jelöltek az ábrán.

Az ABP háromszögre igaz, hogy:

$$tg\alpha = \frac{AB}{y}, \quad (331)$$

$$AB = ytg\alpha, \quad (332)$$

$$OA = x - ytg\alpha, \quad (333)$$

Az OAC háromszögben:

$$OC = \cos\alpha(x - ytg\alpha) = x\cos\alpha - y\sin\alpha, \quad (334)$$

$$OC = x \cos \alpha - y \sin \alpha, \quad (335)$$

OC P pont x koordinátája az új rendszerben. Az y koordináta a Püthagorasz tétel alapján határozható meg.

$$\begin{aligned} PC^2 &= x^2 + y^2 - (x \cos \alpha - y \sin \alpha)^2 \\ &= x^2 + y^2 - (x^2 \cos^2 \alpha + y^2 \sin^2 \alpha - 2 \sin \alpha \cos \alpha) \end{aligned} \quad (336)$$

$$\begin{aligned} &x^2(1 - \cos^2 \alpha) + y^2(1 - \sin^2 \alpha) + 2 \sin \alpha \cos \alpha \\ &= x^2 \sin^2 \alpha + y^2 \cos^2 \alpha + 2 \sin \alpha \cos \alpha = (x \sin \alpha + y \cos \alpha)^2, \end{aligned} \quad (337)$$

$$PC = x \sin \alpha + y \cos \alpha. \quad (338)$$

Az ellipszis képlete Descartes koordináta rendszerben:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (339)$$

Elforgatva:

$$\frac{(x \cos \alpha - y \sin \alpha)^2}{a^2} + \frac{(x \sin \alpha + y \cos \alpha)^2}{b^2} = 1. \quad (340)$$

Az ellipszist meghatározó 3 pont (perforációs gyűjtőtér határolói):

$$p1 : \left\{ x; \frac{h}{2} \right\}, \quad (341)$$

$$p2 : \left\{ 0; \frac{nh}{2} \right\}, \quad (342)$$

$$p3 : \left\{ -x; \frac{(n-1)h}{2} \right\}. \quad (343)$$

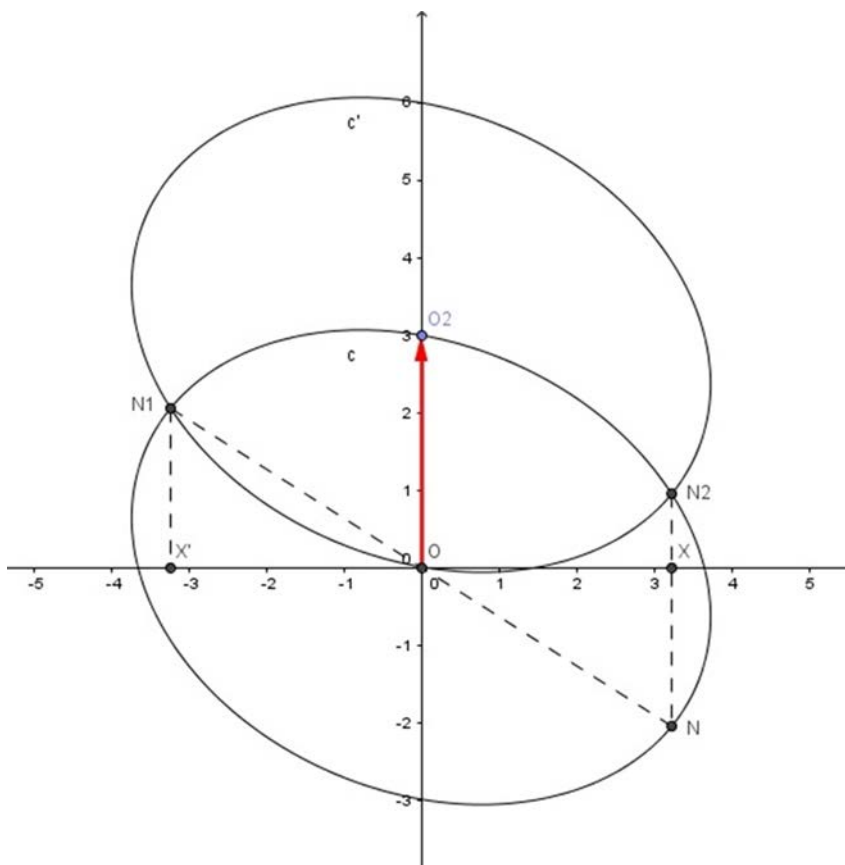
A határolókkal kapott ellipszis ferde tengelyű, szimmetriaközéppontja O. Emiatt a következők igazak:

$$f(-x) = \frac{(n-1)h}{2} = X'N, \quad (344)$$

$$f(x) = \frac{nh}{2} = XN2, \quad (345)$$

$$X'N1 = XN, \quad (346)$$

$$N2N = X'N1 + XN2 = f(0) = \frac{nh}{2}. \quad (347)$$



11-11 ábra: Eltolts ellipszis

Az ellipszist y tengellyel párhuzamosan eltolva $\frac{nh}{2}$ hosszúságú vektorral az eredeti ellipszis $N1$ és $N2$ pontokban metsző új ellipszist kapunk. Erre:

$$\frac{(x \cos \alpha - y \sin \alpha)^2}{a^2} + \frac{(x \sin \alpha + y \cos \alpha)^2}{b^2} = 1, \quad (348)$$

$$y = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}. \quad (349)$$

Eltolás után ($\frac{nh}{2} = p$):

$$\frac{(x\cos\alpha - (y-p)\sin\alpha)^2}{a^2} + \frac{(x\sin\alpha + (y-p)\cos\alpha)^2}{b^2} = 1, \quad (350)$$

$$y - p = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}. \quad (351)$$

Ahol:

$$A = \frac{\sin^2 \alpha}{a^2} + \frac{\cos^2 \alpha}{b^2}, \quad (352)$$

$$B = 2x\sin\alpha \cos\alpha \left(\frac{1}{b^2} - \frac{1}{a^2} \right), \quad (353)$$

$$C = x^2 \frac{\cos^2 \alpha}{a^2} + x^2 \frac{\sin^2 \alpha}{b^2} - 1. \quad (354)$$

Felhasználva, hogy $p = f(0)$:

$$\frac{p^2 \sin^2 \alpha}{a^2} + \frac{p^2 \cos^2 \alpha}{b^2} = 1, \quad (355)$$

$$p^2 = \frac{1}{\frac{\sin^2 \alpha}{a^2} + \frac{\cos^2 \alpha}{b^2}}. \quad (356)$$

Látható, hogy y és $y-p$ ugyanabban a formában írhatók fel (a másodfokú egyenlet megoldóképletével). A metszéspontok megtalálásához $y-t$ úgy kell kifejezni, hogy az első egyenletben pozitív a második egyenletben pedig negatív előjellel kerüljön be a gyökös tag, mivel az első ellipszis felső ívét metszi a második ellipszis alsó tengelye. A metszéspontra:

$$y = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} + p. \quad (357)$$

$p-t$ kifejezve:

$$\frac{\sqrt{B^2 - 4AC}}{A} = p. \quad (358)$$

Ahol:

$$B^2 = \frac{4x^2 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}{b^4} + \frac{4x^2 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}{a^4} - \frac{8 \sin \alpha \cos \alpha}{a^2 b^2}, \quad (359)$$

$$4AC = \frac{4x^2 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}{a^4} + \frac{4x^2 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}{b^4} + \frac{4x^2 \sin^2 \alpha}{a^2 b^2} + \frac{4x^2 \cos^2 \alpha}{a^2 b^2} - \frac{4 \sin^2 \alpha}{a^2} - \frac{4 \cos^2 \alpha}{b^2}, \quad (360)$$

$$B^2 - 4AC = \frac{-4x^2}{a^2 b^2} (\sin^4 \alpha + 2 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + \cos^4 \alpha) + \frac{4 \sin^2 \alpha}{a^2} + \frac{4 \cos^2 \alpha}{b^2}, \quad (361)$$

$$B^2 - 4AC = \frac{-4x^2}{a^2 b^2} (\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha)^2 + \frac{4 \sin^2 \alpha}{a^2} + \frac{4 \cos^2 \alpha}{b^2}, \quad (362)$$

$$B^2 - 4AC = \frac{-4x^2}{a^2 b^2} + \frac{4 \sin^2 \alpha}{a^2} + \frac{4 \cos^2 \alpha}{b^2}. \quad (363)$$

Míg $B^2 - 4AC = p^2 A^2$

$$A^2 p^2 = \left(\frac{\sin^2 \alpha}{a^2} + \frac{\cos^2 \alpha}{b^2} \right)^2 \times \frac{1}{\left(\frac{\sin^2 \alpha}{a^2} + \frac{\cos^2 \alpha}{b^2} \right)} = \left(\frac{\sin^2 \alpha}{a^2} + \frac{\cos^2 \alpha}{b^2} \right), \quad (364)$$

$$p^2 A^2 = \left(\frac{\sin^2 \alpha}{a^2} + \frac{\cos^2 \alpha}{b^2} \right), \quad (365)$$

$$\frac{-4x^2}{a^2 b^2} + \frac{4 \sin^2 \alpha}{a^2} + \frac{4 \cos^2 \alpha}{b^2} = \frac{\sin^2 \alpha}{a^2} + \frac{\cos^2 \alpha}{b^2}, \quad (366)$$

$$\frac{-4x^2}{a^2 b^2} + 4 \left(\frac{\sin^2 \alpha}{a^2} + \frac{\cos^2 \alpha}{b^2} \right) = \left(\frac{\sin^2 \alpha}{a^2} + \frac{\cos^2 \alpha}{b^2} \right), \quad (367)$$

$$\frac{-4x^2}{a^2 b^2} = -3 \left(\frac{\sin^2 \alpha}{a^2} + \frac{\cos^2 \alpha}{b^2} \right), \quad (368)$$

$$x^2 = \frac{3 \left(\frac{\sin^2 \alpha}{a^2} + \frac{\cos^2 \alpha}{b^2} \right) a^2 b^2}{4}. \quad (369)$$

Behelyettesítve p-t:

$$x^2 = \frac{3a^2b^2}{4p^2}, \quad (370)$$

$$x = \frac{\sqrt{3}ab}{2p}. \quad (371)$$

Az ellipszis területének kifejezése (T):

$$T = ab\pi = \frac{2}{\sqrt{3}}xp\pi, \quad (372)$$

$$T = \frac{2}{\sqrt{3}}xnh\pi, \quad (373)$$

$$T_{ep} = \pi \frac{2}{\sqrt{3}}L \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \frac{1}{ns} \frac{360}{\theta}, \quad (374)$$

$$V_{ep} = \int_{r_w}^{\frac{L_p}{2}} T_{ep} = \pi \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{ns} \frac{360}{\theta} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \left((L_p + r_w)^2 - r_w^2 \right). \quad (375)$$

Az ellipszis kerülete:

$$K = \left(\frac{3}{2}(A + B) - \sqrt{AB} \right) \times \pi. \quad (376)$$

A kerület meghatározásához ismerni kell a nagytengely hosszát (a). Két formula használható ellipszisek esetében, az első kúpmetszet általános formulája. Ekkor x és y a szimmetria miatt 0. A második az imént levezetett módszer O középpontú elforgatott ellipsziszre. Mind a két esetben ki kell fejezni x^2 , xy , y^2 valamint egy konstans értékét.

$$ax^2 + bxy + cy^2 + d = 0. \quad (377)$$

Ismert pontok:

$$p1 : \left\{ x; \frac{h}{2} \right\}, \quad (378)$$

$$p2 : \left\{ 0; \frac{nh}{2} \right\}, \quad (379)$$

$$p_3 : \left\{ -x; \frac{h(n+1)}{2} \right\}. \quad (380)$$

A pontok behelyettesítése kielégíti az egyenletet. A paraméterek kifejezhetők az ismert pontok segítségével, a konstans értéke praktikus okokból legyen $d = -1$. Pa behelyettesítésével:

$$c \times \frac{n^2 h^2}{4} = 1, \quad (381)$$

$$c = \frac{4}{n^2 h^2}. \quad (382)$$

P1 és p3, valamint c behelyettesítésével:

$$ax^2 + bx \frac{h}{2} + \frac{1}{n^2} - 1 = 0, \quad (383)$$

$$ax^2 - bx \frac{h(n-1)}{2} + \frac{(n-1)^2}{n^2} - 1 = 0. \quad (384)$$

A b paraméter meghatározása:

$$bx \frac{h + (n-1)h}{2} = 0, \quad (385)$$

$$b = \frac{2(n-2)}{n^2 h^2 x^2}. \quad (386)$$

Így:

$$ax^2 + \frac{(n-2)}{n^2} + \frac{1}{n^2} - 1 = 0, \quad (387)$$

$$a = \frac{n^2 - n + 1}{n^2 x^2}. \quad (388)$$

Második mód:

$$\frac{(x \cos \alpha - y \sin \alpha)^2}{A^2} + \frac{(x \sin \alpha + y \cos \alpha)^2}{B^2} = 1. \quad (389)$$

$$x^2 \times \left(\frac{\cos^2 \alpha}{A^2} + \frac{\sin^2 \alpha}{B^2} \right) + 2xy \times \sin \alpha \cos \alpha \left(\frac{1}{B^2} - \frac{1}{A^2} \right) + y^2 \times \left(\frac{\sin^2 \alpha}{A^2} + \frac{\cos^2 \alpha}{B^2} \right) - 1 = 0. \quad (390)$$

Paraméterek:

$$a = \frac{\cos^2 \alpha}{A^2} + \frac{\sin^2 \alpha}{B^2}, \quad (391)$$

$$b = 2 \sin \alpha \cos \alpha \left(\frac{1}{B^2} - \frac{1}{A^2} \right), \quad (392)$$

$$c = \frac{\sin^2 \alpha}{A^2} + \frac{\cos^2 \alpha}{B^2}, \quad (393)$$

$$d = -1. \quad (394)$$

Vegyük észre, hogy a+c nem tartalmazza az elforgatás szögét!

$$\begin{aligned} a + c &= \left(\frac{\cos^2 \alpha}{A^2} + \frac{\sin^2 \alpha}{B^2} \right) + \left(\frac{\sin^2 \alpha}{A^2} + \frac{\cos^2 \alpha}{B^2} \right) & a + c \\ &= (\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha) \times \left(\frac{1}{A^2} + \frac{1}{B^2} \right). \end{aligned}$$

Az előbbieken kifejezett a és b összege:

$$a + c = \frac{1}{A^2} + \frac{1}{B^2} = \frac{n^2 - n + 1}{n^2 x^2} + \frac{4}{n^2 h^2}.$$

A kisebbik tengely (b):

$$T = AB\pi = \frac{xnh}{\sqrt{3}} \pi, \quad (397)$$

$$B^2 = \frac{x^2 n^2 h^2}{3A^2}. \quad (398)$$

Behelyettesítés után:

$$\frac{1}{A^2} + \frac{3A^2}{x^2 n^2 h^2} = \frac{n^2 - n + 1}{n^2 x^2} + \frac{4}{n^2 h^2}, \quad (399)$$

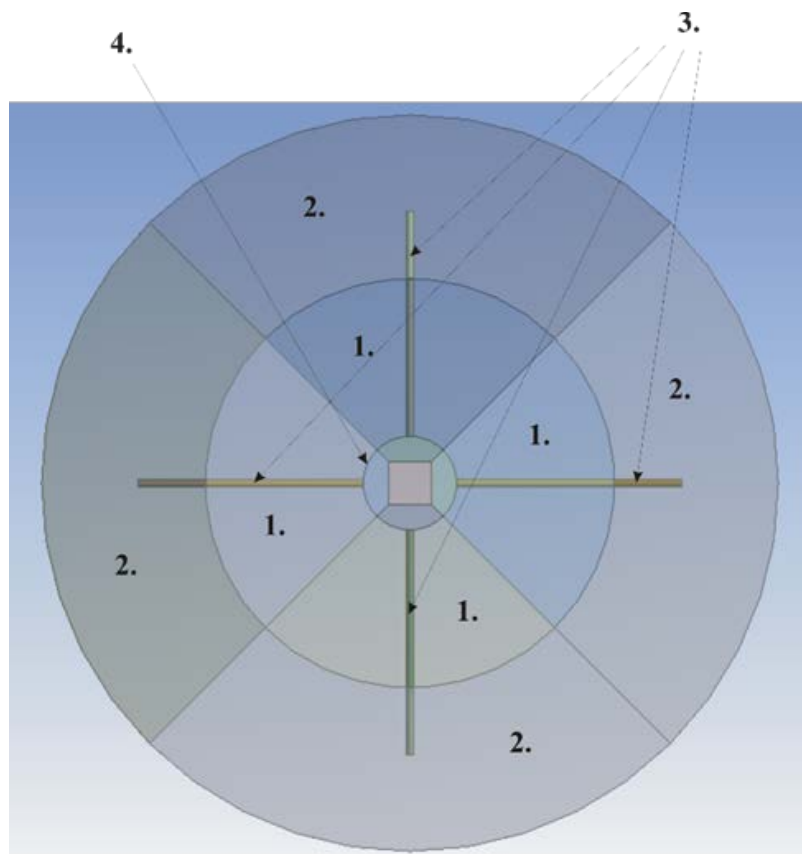
$$3A^4 - A^2 \times [h^2(n^2 - n + 1) + 4x^2] + x^2 n^2 h^2 = 0, \quad (400)$$

$$A^2 = \frac{h^2(n^2 - n + 1) + 4x^2 + \sqrt{(h^2(n^2 - n + 1) + 4x^2)^2 - 12x^2 n^2 h^2}}{6}, \quad (401)$$

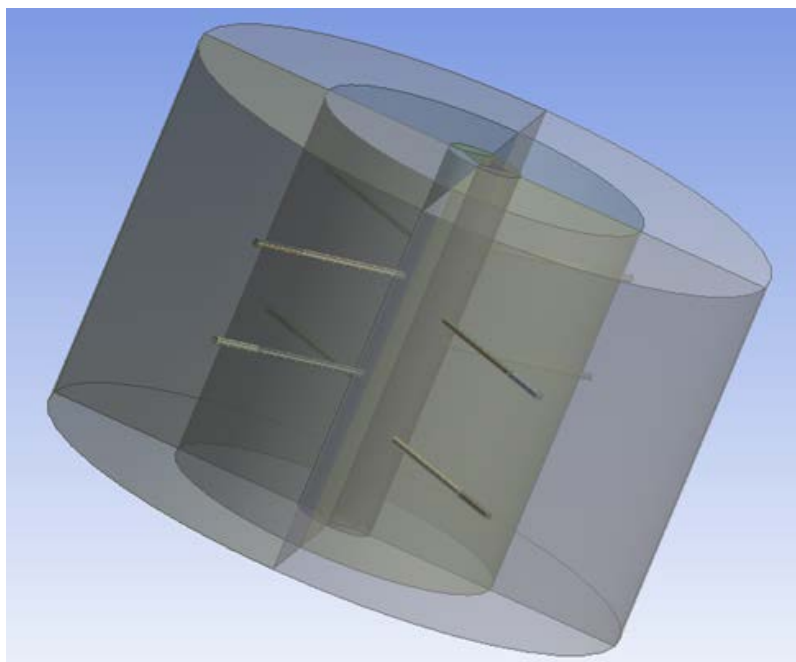
$$K = \left[\frac{3}{2} \times \left(\sqrt{\frac{h^2(n^2 - n + 1) + 4x^2 + \sqrt{(h^2(n^2 - n + 1) + 4x^2)^2 - 12x^2 n^2 h^2}}{6}} \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{xnh}{\sqrt{3} \times \sqrt{\frac{h^2(n^2 - n + 1) + 4x^2 + \sqrt{(h^2(n^2 - n + 1) + 4x^2)^2 - 12x^2 n^2 h^2}}{6}}} \right) \right. \\ \left. - \frac{xnh}{\sqrt{3}} \right] \times \pi. \quad (402)$$

N-Melléklet Kútkörnyék CFD modellje

A CFD szimulációk megfelelő pontosságához elengedhetetlen a geometriai modell megfelelő felépítése. A kútkörnyék megfelelő modellezéséhez a kút, a perforációk, a szennyezett zóna és a perforációk definiálása szükséges a programban (11-12 ábra és 11-13 ábra).

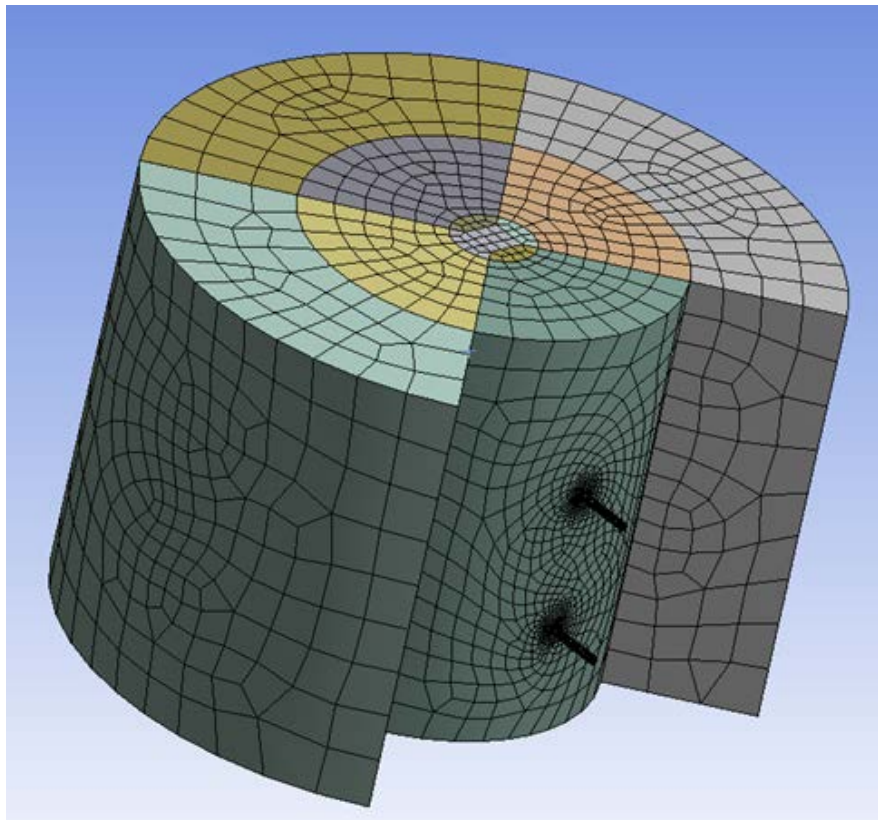


11-12 ábra: Geometria, felülnézet (1. szennyezett zóna, 2. tiszta zóna, 3. perforációk, 4. kút)



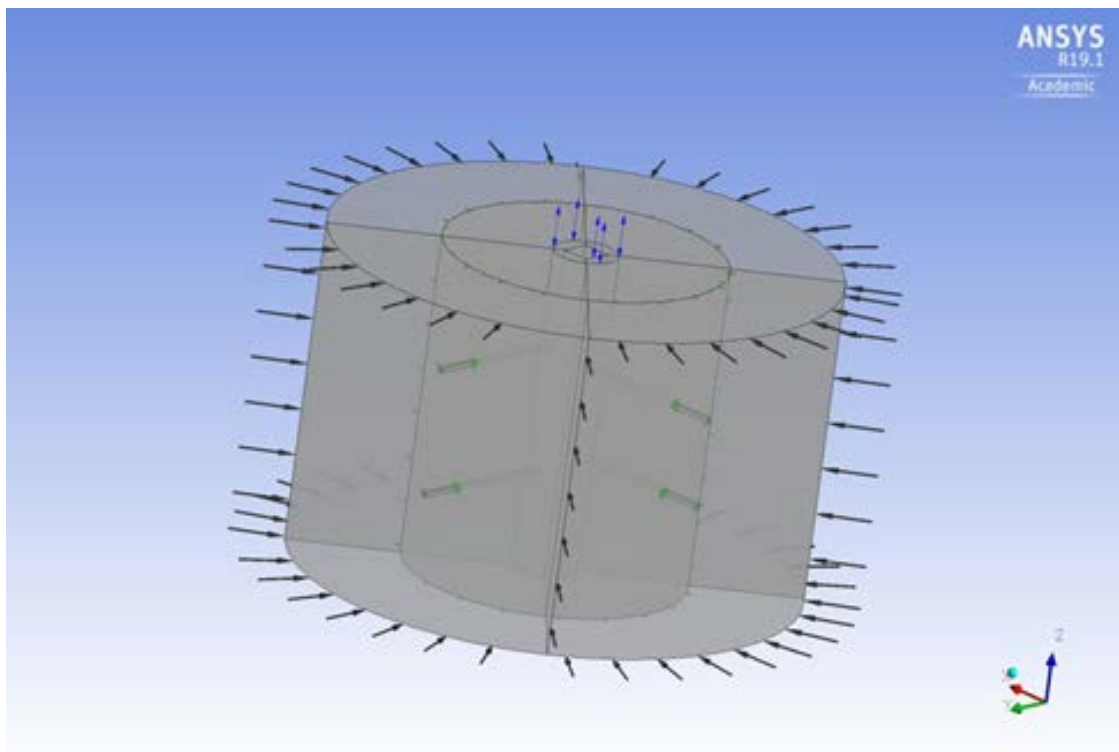
11-13: Geometria, izometrikus nézet

A szimulációk elvégzéséhez az áramlási tér cellákra bontása, meshelése szükséges. A felbontás hexahedrális cellákra történt automatikus finomítással, ami 491680 elemet eredményezett (11-14 ábra).



11-14 ábra: Kútkörnyék meshelése

Az áramlási tér porózus közegként (domain) került definiálásra 100%-os víztelítettséggel. A szennyezett zóna és a tiszta zóna átteresztőképessége külön változtatható. A szimuláció során izotermikus állandósult áramlást feltételeztünk. A beáramlási (inlet) és a kiáramlási (outlet) felületeket a rájuk merőleges fekete és kék nyilakkal mutatja be az alábbi ábra.



11-15 ábra: Áramlási irányok

O-Melléklet Áramlásmegoszlás vizsgálata

8-16 táblázat: Áramlásmegoszlás, számítási eredmények (S=0.1, S=1)

S=0,1						S=1					
ε	rs/rw	x1	x2	x1/x2	ω	ε	rs/rw	x1	x2	x1/x2	ω
1,01	22 026,4658	1,0150	1,1041	0,9194	1,0000	1,01	2,69E+43	1,0150	2,6915	0,3771	1
2	1,1052	1,0656	1,0513	1,0136	0,4444	2	2,7183	1,6910	1,6487	1,0256	0,6101
3	1,0513	1,0410	1,0339	1,0069	0,2695	3	1,6487	1,4657	1,3956	1,0502	0,3355
4	1,0339	1,0295	1,0253	1,0041	0,1908	4	1,3956	1,3298	1,2840	1,0357	0,2236
5	1,0253	1,0230	1,0202	1,0027	0,1467	5	1,2840	1,2522	1,2214	1,0252	0,1659
6	1,0202	1,0188	1,0168	1,0020	0,1187	6	1,2214	1,2033	1,1814	1,0186	0,1311
7	1,0168	1,0159	1,0144	1,0015	0,0993	7	1,1814	1,1699	1,1536	1,0142	0,1081
8	1,0144	1,0137	1,0126	1,0012	0,0853	8	1,1536	1,1458	1,1331	1,0112	0,0917
9	1,0126	1,0121	1,0112	1,0009	0,0746	9	1,1331	1,1276	1,1175	1,0090	0,0795
10	1,0112	1,0108	1,0101	1,0008	0,0662	10	1,1175	1,1134	1,1052	1,0074	0,0701
11	1,0101	1,0098	1,0091	1,0006	0,0595	11	1,1052	1,1020	1,0952	1,0062	0,0626
12	1,0091	1,0089	1,0084	1,0005	0,0540	12	1,0952	1,0927	1,0869	1,0053	0,0565
13	1,0084	1,0082	1,0077	1,0005	0,0494	13	1,0869	1,0849	1,0800	1,0046	0,0515
14	1,0077	1,0076	1,0072	1,0004	0,0455	14	1,0800	1,0783	1,0740	1,0040	0,0473
15	1,0072	1,0070	1,0067	1,0004	0,0421	15	1,0740	1,0727	1,0689	1,0035	0,0437
16	1,0067	1,0066	1,0063	1,0003	0,0392	16	1,0689	1,0678	1,0645	1,0031	0,0406
17	1,0063	1,0062	1,0059	1,0003	0,0367	17	1,0645	1,0635	1,0606	1,0028	0,0379
18	1,0059	1,0058	1,0056	1,0002	0,0344	18	1,0606	1,0597	1,0571	1,0025	0,0355
19	1,0056	1,0055	1,0053	1,0002	0,0325	19	1,0571	1,0564	1,0540	1,0022	0,0334
20	1,0053	1,0052	1,0050	1,0002	0,0307	20	1,0540	1,0534	1,0513	1,0020	0,0315
21	1,0050	1,0050	1,0048	1,0002	0,0291	21	1,0513	1,0507	1,0488	1,0019	0,0298
22	1,0048	1,0047	1,0046	1,0002	0,0276	22	1,0488	1,0483	1,0465	1,0017	0,0283
23	1,0046	1,0045	1,0044	1,0002	0,0263	23	1,0465	1,0461	1,0444	1,0016	0,0269

8-17 táblázat: Áramlásmegoszlás, számítási eredmények (S=2, S=4)

S=2						S=4					
ε	rs/rw	x1	x2	x1/x2	ω	ε	rs/rw	x1	x2	x1/x2	ω
1,01	7,23E+86	1,0150	7,2442	0,1401	1	1,01	#N/A	#N/A	141,2449	#N/A	#N/A
2	7,3891	2,2674	2,7183	0,8341	0,7648	2	148,4132	2,7940	12,1825	0,2293	0,9468
3	2,7183	2,0428	1,9477	1,0488	0,4205	3	12,1825	3,8649	5,2945	0,7300	0,6749
4	1,9477	1,7414	1,6487	1,0562	0,2659	4	5,2945	3,4451	3,4903	0,9870	0,4254
5	1,6487	1,5583	1,4918	1,0446	0,1901	5	3,4903	2,8545	2,7183	1,0501	0,2823
6	1,4918	1,4435	1,3956	1,0343	0,1465	6	2,7183	2,4337	2,3010	1,0577	0,2037
7	1,3956	1,3664	1,3307	1,0268	0,1186	7	2,3010	2,1500	2,0427	1,0525	0,1568
8	1,3307	1,3115	1,2840	1,0214	0,0993	8	2,0427	1,9527	1,8682	1,0452	0,1264
9	1,2840	1,2707	1,2488	1,0175	0,0853	9	1,8682	1,8100	1,7429	1,0385	0,1053
10	1,2488	1,2391	1,2214	1,0145	0,0746	10	1,7429	1,7029	1,6487	1,0329	0,0900
11	1,2214	1,2140	1,1994	1,0122	0,0662	11	1,6487	1,6199	1,5755	1,0282	0,0784
12	1,1994	1,1937	1,1814	1,0104	0,0595	12	1,5755	1,5539	1,5169	1,0244	0,0694
13	1,1814	1,1768	1,1663	1,0090	0,0540	13	1,5169	1,5004	1,4690	1,0213	0,0621
14	1,1663	1,1626	1,1536	1,0078	0,0494	14	1,4690	1,4560	1,4292	1,0187	0,0562
15	1,1536	1,1505	1,1426	1,0069	0,0455	15	1,4292	1,4188	1,3956	1,0166	0,0513
16	1,1426	1,1401	1,1331	1,0061	0,0421	16	1,3956	1,3870	1,3668	1,0148	0,0471
17	1,1331	1,1310	1,1248	1,0055	0,0392	17	1,3668	1,3597	1,3419	1,0132	0,0436
18	1,1248	1,1230	1,1175	1,0049	0,0367	18	1,3419	1,3360	1,3202	1,0119	0,0405
19	1,1175	1,1159	1,1110	1,0044	0,0344	19	1,3202	1,3151	1,3010	1,0108	0,0378
20	1,1110	1,1096	1,1052	1,0040	0,0325	20	1,3010	1,2967	1,2840	1,0098	0,0354
21	1,1052	1,1040	1,0999	1,0037	0,0307	21	1,2840	1,2802	1,2688	1,0090	0,0334
22	1,0999	1,0989	1,0952	1,0034	0,0291	22	1,2688	1,2655	1,2552	1,0083	0,0315
23	1,0952	1,0942	1,0908	1,0031	0,0276	23	1,2552	1,2523	1,2428	1,0076	0,0298

8-18 táblázat: Áramlásmegoszlás, számítási eredmények (S=10)

S=10					
ϵ	rs/rw	x1	x2	x1/x2	ω
1,02	#N/A	#N/A	1,81E+04	#N/A	#N/A
2	2,20E+04	2,8282	148,4132	0,0191	0,9953
3	148,4132	5,0533	28,0316	0,1803	0,8702
4	28,0316	6,4014	12,1825	0,5255	0,6770
5	12,1825	6,0907	7,3891	0,8243	0,4839
6	7,3891	5,1502	5,2945	0,9727	0,3391
7	5,2945	4,2979	4,1727	1,0300	0,2465
8	4,1727	3,6596	3,4903	1,0485	0,1881
9	3,4903	3,1956	3,0377	1,0520	0,1496
10	3,0377	2,8538	2,7183	1,0499	0,1231
11	2,7183	2,5960	2,4821	1,0459	0,1039
12	2,4821	2,3966	2,3010	1,0416	0,0896
13	2,3010	2,2388	2,1581	1,0374	0,0785
14	2,1581	2,1114	2,0427	1,0336	0,0697
15	2,0427	2,0067	1,9477	1,0303	0,0626
16	1,9477	1,9193	1,8682	1,0273	0,0567
17	1,8682	1,8454	1,8008	1,0248	0,0518
18	1,8008	1,7821	1,7429	1,0225	0,0477
19	1,7429	1,7274	1,6927	1,0205	0,0441
20	1,6927	1,6797	1,6487	1,0188	0,0410
21	1,6487	1,6377	1,6099	1,0172	0,0383
22	1,6099	1,6005	1,5755	1,0159	0,0359
23	1,5755	1,5673	1,5446	1,0147	0,0338

P-Melléklet Perforált viszonykutak hozamadatai az új módszer alapján

8-19 táblázat: Perforált olajkutak hozamadatai az új módszer alapján

p_{wf} [psi]	$q_{o\ 360^\circ}$ [STB/nap]	$q_{o\ 180^\circ}$ [STB/nap]	$q_{o\ 120^\circ}$ [STB/nap]	$q_{o\ 90^\circ}$ [STB/nap]	$q_{o\ 60^\circ}$ [STB/nap]	$q_{o\ 45^\circ}$ [STB/nap]
3 000	0	0	0	0	0	0
2 900	121	130	133	134	134	134
2 800	241	260	266	268	269	268
2 700	361	389	399	402	402	402
2 600	481	518	531	535	536	535
2 500	601	647	663	668	669	668
2 400	720	776	795	800	802	801
2 300	839	904	926	933	935	933
2 200	958	1 032	1 057	1 065	1 067	1 066
2 100	1 077	1 160	1 188	1 196	1 199	1 197
2 000	1 195	1 287	1 319	1 328	1 331	1 329
1 900	1 313	1 415	1 449	1 459	1 462	1 460
1 800	1 431	1 541	1 579	1 590	1 593	1 591
1 700	1 548	1 668	1 708	1 720	1 724	1 722
1 600	1 665	1 794	1 838	1 851	1 855	1 852
1 500	1 782	1 920	1 967	1 981	1 985	1 982
1 400	1 899	2 046	2 096	2 110	2 115	2 112
1 300	2 016	2 172	2 224	2 240	2 245	2 241
1 200	2 132	2 297	2 353	2 369	2 374	2 371
1 100	2 248	2 422	2 481	2 498	2 503	2 500
1 000	2 363	2 547	2 608	2 626	2 632	2 628
900	2 479	2 671	2 736	2 755	2 761	2 757
800	2 594	2 796	2 863	2 883	2 889	2 885
700	2 709	2 920	2 990	3 010	3 017	3 013
600	2 824	3 043	3 117	3 138	3 145	3 140
500	2 938	3 167	3 243	3 265	3 272	3 268
400	3 053	3 290	3 369	3 392	3 400	3 395
300	3 167	3 413	3 495	3 519	3 526	3 521
200	3 280	3 535	3 621	3 645	3 653	3 648
100	3 394	3 658	3 746	3 771	3 780	3 774
0	3 507	3 780	3 871	3 897	3 906	3 900

8-20 táblázat: Perforált gázkutak hozamadatai az új módszer alapján

p_{wf} [psi]	$q_{g\ 360^\circ}$ [Mscf/nap]	$q_{g\ 180^\circ}$ [Mscf/nap]	$q_{g\ 120^\circ}$ [Mscf/nap]	$q_{g\ 90^\circ}$ [Mscf/nap]	$q_{g\ 60^\circ}$ [Mscf/nap]	$q_{g\ 45^\circ}$ [Mscf/nap]
3 000	0	0	0	0	0	0
2 900	3 570	3 855	3 944	3 964	3 971	3 967
2 800	6 221	6 726	6 876	6 906	6 916	6 909
2 700	8 390	9 077	9 277	9 312	9 324	9 316
2 600	10 244	11 088	11 330	11 370	11 383	11 374
2 500	11 870	12 853	13 130	13 173	13 187	13 178
2 400	13 319	14 425	14 735	14 780	14 795	14 785
2 300	14 624	15 841	16 180	16 227	16 243	16 232
2 200	15 808	17 126	17 491	17 540	17 556	17 545
2 100	16 888	18 298	18 686	18 737	18 754	18 743
2 000	17 876	19 371	19 781	19 833	19 851	19 839
1 900	18 783	20 356	20 786	20 839	20 857	20 845
1 800	19 617	21 261	21 709	21 764	21 782	21 770
1 700	20 383	22 094	22 558	22 613	22 632	22 620
1 600	21 088	22 859	23 339	23 395	23 413	23 401
1 500	21 735	23 561	24 055	24 112	24 131	24 118
1 400	22 327	24 205	24 712	24 769	24 788	24 776
1 300	22 869	24 793	25 312	25 370	25 389	25 377
1 200	23 363	25 330	25 859	25 917	25 937	25 924
1 100	23 810	25 815	26 355	26 414	26 433	26 420
1 000	24 214	26 253	26 801	26 861	26 880	26 867
900	24 574	26 645	27 201	27 260	27 280	27 267
800	24 893	26 992	27 554	27 614	27 635	27 621
700	25 173	27 295	27 864	27 924	27 944	27 931
600	25 413	27 556	28 130	28 190	28 211	28 197
500	25 615	27 775	28 353	28 414	28 435	28 421
400	25 779	27 954	28 535	28 596	28 617	28 603
300	25 906	28 092	28 676	28 737	28 758	28 744
200	25 997	28 190	28 777	28 838	28 858	28 845
100	26 051	28 249	28 837	28 898	28 919	28 905
0	26 069	28 269	28 857	28 918	28 939	28 925

Q-Melléklet Szkin eltérés vizsgálata

8-21 táblázat: Szkin eltérés vizsgálata lövéssűrűség alapján

ns [1/ft]	ΔS_{360° [-]	ΔS_{180° [-]	ΔS_{120° [-]	ΔS_{90° [-]	ΔS_{60° [-]	ΔS_{45° [-]
2	0,64	0,39	0,58	0,31	0,68	0,27
2,2	0,54	0,33	0,52	0,31	0,65	0,31
2,4	0,46	0,27	0,46	0,30	0,61	0,34
2,6	0,40	0,22	0,41	0,28	0,58	0,35
2,8	0,34	0,18	0,37	0,27	0,54	0,36
3	0,30	0,14	0,34	0,26	0,51	0,36
3,2	0,26	0,11	0,31	0,24	0,48	0,36
3,4	0,23	0,09	0,28	0,23	0,45	0,36
3,6	0,21	0,06	0,26	0,22	0,42	0,35
3,8	0,19	0,04	0,23	0,20	0,40	0,34
4	0,17	0,02	0,21	0,19	0,38	0,33
4,2	0,16	0,00	0,20	0,18	0,35	0,32
4,4	0,14	-0,01	0,18	0,17	0,33	0,31
4,6	0,13	-0,03	0,17	0,16	0,31	0,30
4,8	0,13	-0,04	0,15	0,15	0,29	0,29
5	0,12	-0,05	0,14	0,14	0,27	0,28
5,2	0,11	-0,06	0,13	0,13	0,26	0,27
5,4	0,11	-0,07	0,12	0,12	0,24	0,26
5,6	0,11	-0,08	0,11	0,11	0,22	0,25
5,8	0,10	-0,08	0,10	0,10	0,21	0,24
6	0,10	-0,09	0,09	0,09	0,20	0,23
6,2	0,10	-0,09	0,09	0,08	0,18	0,22
6,4	0,10	-0,10	0,08	0,08	0,17	0,21
6,6	0,10	-0,10	0,07	0,07	0,16	0,20
6,8	0,10	-0,11	0,07	0,06	0,15	0,19
7	0,10	-0,11	0,06	0,06	0,14	0,18
7,2	0,10	-0,11	0,06	0,05	0,12	0,18
7,4	0,11	-0,12	0,05	0,05	0,11	0,17
7,6	0,11	-0,12	0,05	0,04	0,11	0,16
7,8	0,11	-0,12	0,04	0,03	0,10	0,15
8	0,11	-0,12	0,04	0,03	0,09	0,14

8-22 táblázat: Szkin eltérés vizsgálata lövéshossz alapján

L_p [ft]	ΔS_{360° [-]	ΔS_{180° [-]	ΔS_{120° [-]	ΔS_{90° [-]	ΔS_{60° [-]	ΔS_{45° [-]
0,3	0,24	-0,37	0,10	-0,18	-0,05	-0,13
0,4	0,15	-0,24	0,13	-0,02	0,14	0,10
0,5	0,12	-0,17	0,14	0,06	0,22	0,21
0,6	0,10	-0,13	0,15	0,10	0,26	0,26
0,7	0,10	-0,10	0,15	0,12	0,28	0,28
0,8	0,10	-0,08	0,15	0,13	0,28	0,29
0,9	0,11	-0,06	0,14	0,13	0,28	0,29
1	0,12	-0,05	0,14	0,14	0,27	0,28
1,1	0,13	-0,04	0,14	0,14	0,27	0,28
1,2	0,14	-0,03	0,13	0,13	0,26	0,27
1,3	0,15	-0,02	0,13	0,13	0,25	0,26
1,4	0,16	-0,01	0,13	0,13	0,24	0,25
1,5	0,17	-0,01	0,13	0,13	0,23	0,24
1,6	0,18	0,00	0,12	0,12	0,22	0,23
1,7	0,18	0,01	0,12	0,12	0,22	0,22
1,8	0,19	0,01	0,12	0,12	0,21	0,22
1,9	0,20	0,02	0,12	0,12	0,20	0,21
2	0,21	0,02	0,12	0,11	0,19	0,20
2,1	0,22	0,03	0,11	0,11	0,19	0,19
2,2	0,22	0,03	0,11	0,11	0,18	0,18
2,3	0,23	0,03	0,11	0,10	0,17	0,18
2,4	0,24	0,04	0,11	0,10	0,17	0,17
2,5	0,24	0,04	0,11	0,10	0,16	0,16
2,6	0,25	0,04	0,11	0,10	0,15	0,16
2,7	0,25	0,04	0,11	0,09	0,15	0,15
2,8	0,26	0,05	0,11	0,09	0,14	0,14
2,9	0,26	0,05	0,10	0,09	0,14	0,14
3	0,27	0,05	0,10	0,09	0,13	0,13
3,1	0,27	0,05	0,10	0,08	0,13	0,13
3,2	0,28	0,06	0,10	0,08	0,12	0,12
3,3	0,28	0,06	0,10	0,08	0,12	0,12

8-23 táblázat: Szkin eltérés vizsgálata perforáció sugár alapján

r_p [in]	ΔS_{360° [-]	ΔS_{180° [-]	ΔS_{120° [-]	ΔS_{90° [-]	ΔS_{60° [-]	ΔS_{45° [-]
0,09	0,36	0,21	0,39	0,36	0,60	0,46
0,1	0,32	0,17	0,35	0,33	0,54	0,43
0,11	0,28	0,13	0,31	0,29	0,50	0,41
0,12	0,25	0,09	0,28	0,26	0,45	0,39
0,13	0,22	0,06	0,25	0,24	0,42	0,37
0,14	0,20	0,04	0,22	0,21	0,38	0,35
0,15	0,17	0,01	0,20	0,19	0,35	0,33
0,16	0,15	-0,01	0,18	0,17	0,32	0,31
0,17	0,14	-0,03	0,16	0,15	0,30	0,30
0,18	0,12	-0,05	0,14	0,14	0,27	0,28
0,19	0,10	-0,07	0,12	0,12	0,25	0,27
0,2	0,09	-0,08	0,11	0,10	0,23	0,26
0,21	0,08	-0,10	0,09	0,09	0,21	0,24
0,22	0,07	-0,11	0,08	0,08	0,19	0,23
0,23	0,06	-0,13	0,06	0,06	0,17	0,22
0,24	0,05	-0,14	0,05	0,05	0,16	0,21
0,25	0,04	-0,15	0,04	0,04	0,14	0,20
0,26	0,03	-0,16	0,03	0,03	0,13	0,19
0,27	0,02	-0,17	0,02	0,02	0,11	0,18
0,28	0,02	-0,18	0,01	0,01	0,10	0,17
0,29	0,01	-0,19	0,00	0,00	0,09	0,17
0,3	0,01	-0,20	-0,01	-0,01	0,08	0,16
0,31	0,00	-0,21	-0,02	-0,02	0,07	0,15
0,32	0,00	-0,21	-0,02	-0,02	0,06	0,14
0,33	-0,01	-0,22	-0,03	-0,03	0,05	0,14
0,34	-0,01	-0,23	-0,04	-0,04	0,04	0,13
0,35	-0,01	-0,23	-0,05	-0,05	0,03	0,12
0,36	-0,02	-0,24	-0,05	-0,05	0,02	0,12
0,37	-0,02	-0,25	-0,06	-0,06	0,01	0,11
0,38	-0,02	-0,25	-0,07	-0,06	0,00	0,10
0,39	-0,02	-0,26	-0,07	-0,07	-0,01	0,10

R-Melléklet Áramlási sebesség független szkin vizsgálata

8-24 táblázat: Áramlási sebesség független szkin lövéssűrűség alapján

ns [1/ft]	S_{360° [-]	S_{180° [-]	S_{120° [-]	S_{90° [-]	S_{60° [-]	S_{45° [-]
2	4,16	3,82	3,75	3,67	3,71	3,79
2,2	3,75	3,37	3,28	3,21	3,23	3,30
2,4	3,42	2,99	2,89	2,82	2,84	2,90
2,6	3,13	2,68	2,57	2,49	2,51	2,56
2,8	2,90	2,41	2,29	2,22	2,22	2,27
3	2,69	2,18	2,05	1,98	1,98	2,02
3,2	2,51	1,98	1,84	1,77	1,77	1,80
3,4	2,35	1,80	1,66	1,59	1,58	1,61
3,6	2,21	1,65	1,49	1,42	1,42	1,44
3,8	2,09	1,51	1,35	1,28	1,27	1,29
4	1,98	1,38	1,21	1,15	1,14	1,16
4,2	1,88	1,27	1,10	1,03	1,02	1,04
4,4	1,79	1,17	0,99	0,93	0,91	0,93
4,6	1,70	1,08	0,89	0,83	0,81	0,83
4,8	1,63	0,99	0,80	0,74	0,72	0,74
5	1,56	0,92	0,72	0,66	0,64	0,65
5,2	1,49	0,85	0,64	0,59	0,57	0,58
5,4	1,43	0,78	0,57	0,52	0,50	0,51
5,6	1,38	0,72	0,51	0,45	0,43	0,44
5,8	1,33	0,66	0,45	0,39	0,37	0,38
6	1,28	0,61	0,39	0,34	0,32	0,32
6,2	1,24	0,56	0,34	0,29	0,27	0,27
6,4	1,19	0,51	0,29	0,24	0,22	0,22
6,6	1,16	0,47	0,24	0,19	0,17	0,18
6,8	1,12	0,43	0,20	0,15	0,13	0,13
7	1,08	0,39	0,16	0,11	0,09	0,09
7,2	1,05	0,35	0,12	0,07	0,05	0,05
7,4	1,02	0,32	0,08	0,04	0,02	0,02
7,6	0,99	0,29	0,05	0,00	-0,02	-0,02
7,8	0,96	0,26	0,02	-0,03	-0,05	-0,05
8	0,94	0,23	-0,02	-0,06	-0,08	-0,08

8-25 táblázat: Áramlási sebesség független szkin lövéshossz alapján

L_p [ft]	S_{360° [-]	S_{180° [-]	S_{120° [-]	S_{90° [-]	S_{60° [-]	S_{45° [-]
0,3	6,13	5,75	5,35	5,28	5,36	5,48
0,4	4,66	4,13	3,84	3,76	3,80	3,87
0,5	3,72	3,13	2,88	2,80	2,82	2,87
0,6	3,06	2,44	2,21	2,14	2,14	2,18
0,7	2,56	1,92	1,70	1,64	1,63	1,66
0,8	2,16	1,52	1,31	1,25	1,23	1,25
0,9	1,83	1,19	0,99	0,93	0,91	0,93
1	1,56	0,92	0,72	0,66	0,64	0,65
1,1	1,32	0,68	0,49	0,43	0,41	0,42
1,2	1,12	0,48	0,29	0,24	0,22	0,22
1,3	0,94	0,31	0,12	0,07	0,04	0,05
1,4	0,78	0,15	-0,04	-0,09	-0,11	-0,11
1,5	0,63	0,01	-0,18	-0,23	-0,25	-0,25
1,6	0,50	-0,12	-0,31	-0,35	-0,37	-0,37
1,7	0,38	-0,24	-0,42	-0,46	-0,49	-0,49
1,8	0,27	-0,34	-0,53	-0,57	-0,59	-0,59
1,9	0,16	-0,44	-0,63	-0,67	-0,69	-0,69
2	0,07	-0,53	-0,72	-0,76	-0,78	-0,78
2,1	-0,02	-0,62	-0,80	-0,84	-0,86	-0,86
2,2	-0,10	-0,70	-0,88	-0,92	-0,94	-0,94
2,3	-0,18	-0,77	-0,96	-0,99	-1,01	-1,02
2,4	-0,25	-0,85	-1,03	-1,06	-1,08	-1,08
2,5	-0,32	-0,91	-1,09	-1,13	-1,15	-1,15
2,6	-0,39	-0,98	-1,16	-1,19	-1,21	-1,21
2,7	-0,45	-1,04	-1,22	-1,25	-1,27	-1,27
2,8	-0,51	-1,09	-1,27	-1,30	-1,32	-1,33
2,9	-0,57	-1,15	-1,33	-1,36	-1,37	-1,38
3	-0,62	-1,20	-1,38	-1,41	-1,43	-1,43
3,1	-0,68	-1,25	-1,43	-1,46	-1,47	-1,48
3,2	-0,73	-1,30	-1,48	-1,50	-1,52	-1,53
3,3	-0,77	-1,34	-1,52	-1,55	-1,56	-1,57

8-26 táblázat: Áramlási sebesség független szkin perforáció sugár alapján

r_p [in]	S_{360° [-]	S_{180° [-]	S_{120° [-]	S_{90° [-]	S_{60° [-]	S_{45° [-]
0,09	1,97	1,33	1,13	1,08	1,06	1,07
0,1	1,91	1,27	1,07	1,01	0,99	1,01
0,11	1,85	1,21	1,01	0,95	0,93	0,95
0,12	1,80	1,16	0,96	0,90	0,88	0,89
0,13	1,75	1,11	0,91	0,85	0,83	0,85
0,14	1,70	1,06	0,87	0,81	0,79	0,80
0,15	1,66	1,02	0,83	0,77	0,75	0,76
0,16	1,63	0,98	0,79	0,73	0,71	0,72
0,17	1,59	0,95	0,75	0,69	0,68	0,69
0,18	1,56	0,92	0,72	0,66	0,64	0,65
0,19	1,53	0,89	0,69	0,63	0,61	0,62
0,2	1,50	0,86	0,66	0,60	0,58	0,59
0,21	1,47	0,83	0,63	0,57	0,55	0,57
0,22	1,44	0,80	0,60	0,55	0,53	0,54
0,23	1,42	0,78	0,58	0,52	0,50	0,52
0,24	1,39	0,75	0,56	0,50	0,48	0,49
0,25	1,37	0,73	0,53	0,48	0,46	0,47
0,26	1,35	0,71	0,51	0,45	0,44	0,45
0,27	1,33	0,69	0,49	0,43	0,41	0,43
0,28	1,31	0,67	0,47	0,41	0,40	0,41
0,29	1,29	0,65	0,45	0,39	0,38	0,39
0,3	1,27	0,63	0,43	0,38	0,36	0,37
0,31	1,26	0,61	0,42	0,36	0,34	0,35
0,32	1,24	0,60	0,40	0,34	0,32	0,34
0,33	1,22	0,58	0,38	0,33	0,31	0,32
0,34	1,21	0,57	0,37	0,31	0,29	0,30
0,35	1,19	0,55	0,35	0,30	0,28	0,29
0,36	1,18	0,54	0,34	0,28	0,26	0,27
0,37	1,16	0,52	0,32	0,27	0,25	0,26
0,38	1,15	0,51	0,31	0,25	0,23	0,25
0,39	1,14	0,50	0,30	0,24	0,22	0,23

S-Melléklet Áramlási sebesség függő szkin vizsgálata

8-27 táblázat: Áramlási sebesség függő szkin tényező vizsgálata lövéssűrűség alapján

ns [1/ft]	λ_{360° [-]	λ_{180° [-]	λ_{120° [-]	λ_{90° [-]	λ_{60° [-]	λ_{45° [-]
2	15,57	15,14	15,05	15,05	15,05	15,06
2,2	13,02	12,58	12,49	12,49	12,49	12,49
2,4	11,09	10,64	10,54	10,54	10,54	10,54
2,6	9,58	9,12	9,03	9,02	9,02	9,03
2,8	8,39	7,92	7,83	7,82	7,82	7,82
3	7,43	6,95	6,86	6,85	6,85	6,85
3,2	6,64	6,16	6,06	6,06	6,06	6,06
3,4	5,98	5,50	5,40	5,40	5,40	5,40
3,6	5,44	4,95	4,85	4,85	4,85	4,85
3,8	4,97	4,49	4,38	4,38	4,38	4,38
4	4,58	4,09	3,99	3,98	3,98	3,98
4,2	4,24	3,75	3,64	3,64	3,64	3,64
4,4	3,95	3,45	3,35	3,34	3,34	3,34
4,6	3,69	3,19	3,09	3,08	3,08	3,08
4,8	3,46	2,96	2,86	2,86	2,86	2,86
5	3,26	2,76	2,66	2,66	2,66	2,66
5,2	3,09	2,59	2,48	2,48	2,48	2,48
5,4	2,93	2,43	2,32	2,32	2,32	2,32
5,6	2,79	2,29	2,18	2,18	2,18	2,18
5,8	2,66	2,16	2,05	2,05	2,05	2,05
6	2,55	2,04	1,94	1,94	1,93	1,94
6,2	2,45	1,94	1,83	1,83	1,83	1,83
6,4	2,35	1,85	1,74	1,74	1,74	1,74
6,6	2,27	1,76	1,65	1,65	1,65	1,65
6,8	2,19	1,68	1,57	1,57	1,57	1,57
7	2,12	1,61	1,50	1,50	1,50	1,50
7,2	2,06	1,55	1,44	1,44	1,43	1,43
7,4	2,00	1,48	1,38	1,37	1,37	1,37
7,6	1,94	1,43	1,32	1,32	1,32	1,32
7,8	1,89	1,38	1,27	1,27	1,27	1,27
8	1,84	1,33	1,22	1,22	1,22	1,22

8-28 táblázat: Áramlási sebesség függő szkin tényező vizsgálata lövéshossz alapján

L_p [ft]	λ_{360° [-]	λ_{180° [-]	λ_{120° [-]	λ_{90° [-]	λ_{60° [-]	λ_{45° [-]
0,3	28,89	27,04	26,70	26,68	26,70	26,73
0,4	16,89	15,48	15,22	15,21	15,21	15,23
0,5	11,21	10,09	9,88	9,87	9,87	9,88
0,6	8,05	7,14	6,96	6,95	6,95	6,96
0,7	6,11	5,34	5,19	5,18	5,18	5,19
0,8	4,82	4,17	4,03	4,03	4,03	4,03
0,9	3,92	3,35	3,23	3,23	3,23	3,23
1	3,26	2,76	2,66	2,66	2,66	2,66
1,1	2,77	2,33	2,23	2,23	2,23	2,23
1,2	2,39	1,99	1,90	1,90	1,90	1,90
1,3	2,09	1,72	1,64	1,64	1,64	1,64
1,4	1,84	1,51	1,44	1,44	1,44	1,44
1,5	1,64	1,34	1,27	1,27	1,27	1,27
1,6	1,48	1,20	1,13	1,13	1,13	1,13
1,7	1,34	1,08	1,02	1,02	1,02	1,02
1,8	1,22	0,98	0,92	0,92	0,92	0,92
1,9	1,12	0,89	0,84	0,84	0,84	0,84
2	1,03	0,82	0,77	0,77	0,77	0,77
2,1	0,96	0,75	0,71	0,70	0,70	0,70
2,2	0,89	0,70	0,65	0,65	0,65	0,65
2,3	0,83	0,65	0,60	0,60	0,60	0,60
2,4	0,78	0,60	0,56	0,56	0,56	0,56
2,5	0,73	0,56	0,52	0,52	0,52	0,52
2,6	0,69	0,53	0,49	0,49	0,49	0,49
2,7	0,65	0,50	0,46	0,46	0,46	0,46
2,8	0,61	0,47	0,43	0,43	0,43	0,43
2,9	0,58	0,44	0,41	0,41	0,41	0,41
3	0,55	0,42	0,39	0,39	0,39	0,39
3,1	0,53	0,40	0,37	0,37	0,37	0,37
3,2	0,50	0,38	0,35	0,35	0,35	0,35
3,3	0,48	0,36	0,33	0,33	0,33	0,33

8-29 táblázat: Áramlási sebesség függő szkin tényező vizsgálata perforáció sugár alapján

r_p [in]	λ_{360° [-]	λ_{180° [-]	λ_{120° [-]	λ_{90° [-]	λ_{60° [-]	λ_{45° [-]
0,09	5,63	5,13	5,03	5,02	5,02	5,02
0,1	5,16	4,66	4,55	4,55	4,55	4,55
0,11	4,77	4,27	4,16	4,16	4,16	4,16
0,12	4,45	3,95	3,84	3,84	3,84	3,84
0,13	4,17	3,67	3,57	3,57	3,57	3,57
0,14	3,94	3,44	3,33	3,33	3,33	3,33
0,15	3,74	3,24	3,13	3,13	3,13	3,13
0,16	3,56	3,06	2,95	2,95	2,95	2,95
0,17	3,40	2,90	2,80	2,80	2,79	2,80
0,18	3,26	2,76	2,66	2,66	2,66	2,66
0,19	3,14	2,64	2,53	2,53	2,53	2,53
0,2	3,03	2,53	2,42	2,42	2,42	2,42
0,21	2,93	2,43	2,32	2,32	2,32	2,32
0,22	2,83	2,33	2,23	2,23	2,22	2,23
0,23	2,75	2,25	2,14	2,14	2,14	2,14
0,24	2,67	2,17	2,07	2,06	2,06	2,06
0,25	2,60	2,10	2,00	1,99	1,99	1,99
0,26	2,54	2,04	1,93	1,93	1,93	1,93
0,27	2,48	1,98	1,87	1,87	1,87	1,87
0,28	2,42	1,92	1,81	1,81	1,81	1,81
0,29	2,37	1,87	1,76	1,76	1,76	1,76
0,3	2,32	1,82	1,71	1,71	1,71	1,71
0,31	2,27	1,77	1,67	1,66	1,66	1,66
0,32	2,23	1,73	1,62	1,62	1,62	1,62
0,33	2,19	1,69	1,58	1,58	1,58	1,58
0,34	2,15	1,65	1,55	1,54	1,54	1,54
0,35	2,12	1,61	1,51	1,51	1,51	1,51
0,36	2,08	1,58	1,48	1,47	1,47	1,47
0,37	2,05	1,55	1,44	1,44	1,44	1,44
0,38	2,02	1,52	1,41	1,41	1,41	1,41
0,39	1,99	1,49	1,38	1,38	1,38	1,38

T-Melléklet Érzékenységi vizsgálatok eredményei (károsodás nélküli eset)

8-30 táblázat: Érzékenységi vizsgálatok eredményei lövessűrűség alapján (olaj, károsodás nélküli eset)

ns [1/ft]	Q _{0360°} [STB/nap]	Q _{0180°} [STB/nap]	Q _{0120°} [STB/nap]	Q _{090°} [STB/nap]	Q _{060°} [STB/nap]	Q _{045°} [STB/nap]
2	2 573,6	2 643,8	2 659,7	2 674,9	2 667,3	2 651,8
2,2	2 688,6	2 777,0	2 797,6	2 814,7	2 808,7	2 793,8
2,4	2 790,9	2 897,0	2 922,8	2 941,4	2 937,0	2 922,7
2,6	2 882,5	3 005,6	3 036,7	3 056,6	3 053,7	3 040,1
2,8	2 964,7	3 104,2	3 140,6	3 161,7	3 160,2	3 147,4
3	3 038,9	3 194,0	3 235,8	3 257,9	3 257,7	3 245,6
3,2	3 106,1	3 276,0	3 323,3	3 346,2	3 347,2	3 335,9
3,4	3 167,2	3 351,2	3 403,8	3 427,4	3 429,6	3 419,0
3,6	3 222,9	3 420,2	3 478,1	3 502,4	3 505,6	3 495,7
3,8	3 274,0	3 483,9	3 547,0	3 571,7	3 575,8	3 566,6
4	3 320,8	3 542,8	3 610,8	3 636,0	3 641,0	3 632,5
4,2	3 364,0	3 597,3	3 670,2	3 695,7	3 701,5	3 693,6
4,4	3 404,0	3 647,9	3 725,6	3 751,3	3 757,9	3 750,6
4,6	3 440,9	3 695,1	3 777,3	3 803,2	3 810,5	3 803,8
4,8	3 475,3	3 739,0	3 825,7	3 851,7	3 859,7	3 853,5
5	3 507,2	3 780,1	3 871,1	3 897,2	3 905,7	3 900,1
5,2	3 537,1	3 818,6	3 913,7	3 939,9	3 948,9	3 943,8
5,4	3 565,0	3 854,8	3 953,8	3 980,0	3 989,5	3 984,8
5,6	3 591,1	3 888,7	3 991,6	4 017,8	4 027,7	4 023,5
5,8	3 615,6	3 920,7	4 027,3	4 053,4	4 063,7	4 059,9
6	3 638,7	3 950,8	4 061,0	4 087,0	4 097,7	4 094,3
6,2	3 660,4	3 979,3	4 092,9	4 118,9	4 129,9	4 126,9
6,4	3 680,9	4 006,3	4 123,1	4 149,0	4 160,3	4 157,7
6,6	3 700,3	4 031,8	4 151,8	4 177,6	4 189,2	4 186,8
6,8	3 718,6	4 056,0	4 179,1	4 204,7	4 216,5	4 214,5
7	3 736,0	4 079,0	4 205,0	4 230,5	4 242,6	4 240,9
7,2	3 752,5	4 100,9	4 229,7	4 255,1	4 267,3	4 265,9
7,4	3 768,2	4 121,7	4 253,3	4 278,5	4 290,9	4 289,8
7,6	3 783,1	4 141,5	4 275,8	4 300,8	4 313,3	4 312,5
7,8	3 797,2	4 160,4	4 297,2	4 322,1	4 334,8	4 334,2
8	3 810,8	4 178,5	4 317,8	4 342,4	4 355,3	4 354,9

8-31 táblázat: Érzékenységi vizsgálatok eredményei lövéshossz alapján (olaj, károsodás nélküli eset)

L_p [ft]	Q_{0360° [STB/nap]	Q_{0180° [STB/nap]	Q_{0120° [STB/nap]	Q_{090° [STB/nap]	Q_{060° [STB/nap]	Q_{045° [STB/nap]
0,3	2 140,8	2 204,2	2 262,5	2 272,6	2 260,8	2 243,9
0,4	2 466,7	2 578,8	2 640,1	2 655,3	2 647,7	2 632,3
0,5	2 721,9	2 873,9	2 939,5	2 958,4	2 954,8	2 941,2
0,6	2 930,1	3 115,0	3 185,6	3 207,1	3 206,9	3 195,1
0,7	3 105,3	3 317,6	3 393,4	3 416,8	3 419,4	3 409,4
0,8	3 256,4	3 491,8	3 572,9	3 597,5	3 602,5	3 594,1
0,9	3 389,0	3 644,4	3 730,5	3 756,1	3 763,0	3 756,0
1	3 507,2	3 780,1	3 871,1	3 897,2	3 905,7	3 900,1
1,1	3 613,9	3 902,3	3 997,9	4 024,4	4 034,2	4 029,7
1,2	3 711,1	4 013,4	4 113,5	4 140,2	4 151,1	4 147,6
1,3	3 800,5	4 115,4	4 219,7	4 246,5	4 258,4	4 255,8
1,4	3 883,2	4 209,7	4 318,0	4 344,8	4 357,5	4 355,7
1,5	3 960,2	4 297,4	4 409,5	4 436,3	4 449,7	4 448,6
1,6	4 032,4	4 379,4	4 495,3	4 522,0	4 535,9	4 535,5
1,7	4 100,2	4 456,6	4 576,0	4 602,6	4 616,9	4 617,1
1,8	4 164,3	4 529,5	4 652,3	4 678,7	4 693,4	4 694,1
1,9	4 225,0	4 598,5	4 724,6	4 750,8	4 765,9	4 767,1
2	4 282,7	4 664,2	4 793,5	4 819,5	4 834,9	4 836,5
2,1	4 337,8	4 726,9	4 859,2	4 885,0	4 900,6	4 902,6
2,2	4 390,5	4 786,8	4 922,1	4 947,7	4 963,5	4 965,8
2,3	4 440,9	4 844,3	4 982,4	5 007,8	5 023,8	5 026,4
2,4	4 489,4	4 899,5	5 040,4	5 065,6	5 081,7	5 084,6
2,5	4 536,0	4 952,7	5 096,3	5 121,3	5 137,5	5 140,7
2,6	4 581,0	5 004,0	5 150,2	5 175,0	5 191,3	5 194,8
2,7	4 624,4	5 053,5	5 202,4	5 226,9	5 243,3	5 247,0
2,8	4 666,4	5 101,5	5 252,9	5 277,2	5 293,6	5 297,5
2,9	4 707,0	5 148,0	5 301,8	5 325,9	5 342,4	5 346,5
3	4 746,5	5 193,1	5 349,4	5 373,3	5 389,8	5 394,0
3,1	4 784,7	5 237,0	5 395,6	5 419,3	5 435,8	5 440,2
3,2	4 822,0	5 279,7	5 440,6	5 464,0	5 480,6	5 485,1
3,3	4 858,2	5 321,2	5 484,4	5 507,6	5 524,2	5 528,9

8-32 táblázat: Érzékenységi vizsgálatok eredményei perforáció sugár alapján (olaj, károsodás nélküli eset)

r_p [in]	Q_{0360° [STB/nap]	Q_{0180° [STB/nap]	Q_{0120° [STB/nap]	Q_{090° [STB/nap]	Q_{060° [STB/nap]	Q_{045° [STB/nap]
0,09	3 292,7	3 526,5	3 603,7	3 625,8	3 633,1	3 628,3
0,1	3 326,9	3 566,8	3 646,1	3 668,9	3 676,3	3 671,4
0,11	3 357,3	3 602,7	3 683,9	3 707,2	3 714,8	3 709,8
0,12	3 384,7	3 635,0	3 718,0	3 741,8	3 749,6	3 744,4
0,13	3 409,5	3 664,3	3 748,9	3 773,2	3 781,1	3 775,9
0,14	3 432,2	3 691,2	3 777,3	3 802,0	3 810,0	3 804,7
0,15	3 453,1	3 715,9	3 803,4	3 828,4	3 836,6	3 831,2
0,16	3 472,5	3 738,9	3 827,5	3 853,0	3 861,3	3 855,8
0,17	3 490,4	3 760,2	3 850,1	3 875,8	3 884,2	3 878,7
0,18	3 507,2	3 780,1	3 871,1	3 897,2	3 905,7	3 900,1
0,19	3 523,0	3 798,8	3 890,9	3 917,3	3 925,9	3 920,2
0,2	3 537,8	3 816,4	3 909,4	3 936,1	3 944,8	3 939,1
0,21	3 551,8	3 833,1	3 927,0	3 954,0	3 962,7	3 956,9
0,22	3 565,0	3 848,8	3 943,6	3 970,8	3 979,7	3 973,8
0,23	3 577,6	3 863,7	3 959,4	3 986,9	3 995,8	3 989,9
0,24	3 589,5	3 877,9	3 974,4	4 002,1	4 011,1	4 005,1
0,25	3 600,9	3 891,5	3 988,7	4 016,6	4 025,7	4 019,7
0,26	3 611,7	3 904,4	4 002,4	4 030,5	4 039,7	4 033,6
0,27	3 622,1	3 916,8	4 015,5	4 043,8	4 053,0	4 046,9
0,28	3 632,0	3 928,6	4 028,0	4 056,5	4 065,8	4 059,6
0,29	3 641,6	3 940,0	4 040,0	4 068,7	4 078,1	4 071,9
0,3	3 650,7	3 950,9	4 051,5	4 080,4	4 089,9	4 083,6
0,31	3 659,5	3 961,4	4 062,7	4 091,7	4 101,2	4 094,9
0,32	3 668,0	3 971,5	4 073,4	4 102,6	4 112,1	4 105,8
0,33	3 676,2	3 981,3	4 083,7	4 113,1	4 122,7	4 116,3
0,34	3 684,1	3 990,7	4 093,6	4 123,2	4 132,8	4 126,4
0,35	3 691,7	3 999,8	4 103,3	4 133,0	4 142,7	4 136,2
0,36	3 699,0	4 008,6	4 112,6	4 142,4	4 152,2	4 145,7
0,37	3 706,2	4 017,1	4 121,6	4 151,6	4 161,4	4 154,9
0,38	3 713,1	4 025,4	4 130,3	4 160,5	4 170,3	4 163,8
0,39	3 719,7	4 033,4	4 138,8	4 169,1	4 178,9	4 172,4

8-33 táblázat: Érzékenységi vizsgálatok eredményei lövéssűrűség alapján (gáz, károsodás nélküli eset)

ns [1/ft]	Q_{g360° [Mscf/nap]	Q_{g180° [Mscf/nap]	Q_{g120° [Mscf/nap]	Q_{g90° [Mscf/nap]	Q_{g60° [Mscf/nap]	Q_{g45° [Mscf/nap]
2	13 220	13 435	13 483	13 498	13 490	13 475
2,2	14 337	14 626	14 689	14 708	14 701	14 685
2,4	15 414	15 786	15 869	15 891	15 886	15 869
2,6	16 451	16 917	17 022	17 047	17 044	17 027
2,8	17 449	18 018	18 149	18 177	18 175	18 158
3	18 408	19 090	19 249	19 281	19 281	19 263
3,2	19 329	20 132	20 323	20 358	20 360	20 342
3,4	20 213	21 146	21 371	21 409	21 413	21 396
3,6	21 061	22 132	22 394	22 435	22 440	22 423
3,8	21 874	23 089	23 391	23 435	23 442	23 426
4	22 652	24 019	24 362	24 410	24 419	24 403
4,2	23 397	24 921	25 309	25 360	25 371	25 355
4,4	24 110	25 797	26 232	26 285	26 299	26 284
4,6	24 792	26 646	27 130	27 186	27 202	27 188
4,8	25 445	27 470	28 005	28 064	28 082	28 068
5	26 069	28 269	28 857	28 918	28 939	28 925
5,2	26 666	29 043	29 686	29 749	29 772	29 759
5,4	27 236	29 794	30 492	30 558	30 583	30 571
5,6	27 782	30 521	31 277	31 345	31 372	31 361
5,8	28 303	31 225	32 040	32 111	32 140	32 129
6	28 801	31 907	32 783	32 855	32 886	32 876
6,2	29 278	32 568	33 505	33 579	33 612	33 603
6,4	29 734	33 208	34 206	34 283	34 318	34 310
6,6	30 169	33 828	34 889	34 968	35 004	34 997
6,8	30 586	34 428	35 552	35 633	35 671	35 665
7	30 984	35 009	36 197	36 279	36 319	36 314
7,2	31 366	35 571	36 824	36 908	36 950	36 945
7,4	31 731	36 116	37 433	37 518	37 562	37 558
7,6	32 080	36 643	38 025	38 112	38 157	38 154
7,8	32 414	37 153	38 600	38 688	38 735	38 733
8	32 734	37 648	39 160	39 249	39 297	39 296

8-34 táblázat: Érzékenységi vizsgálatok eredményei lövéshossz alapján (gáz, károsodás nélküli eset)

L_p [ft]	Q_{g360° [Mscf/nap]	Q_{g180° [Mscf/nap]	Q_{g120° [Mscf/nap]	Q_{g90° [Mscf/nap]	Q_{g60° [Mscf/nap]	Q_{g45° [Mscf/nap]
0,3	9 911	10 238	10 336	10 346	10 334	10 317
0,4	12 689	13 257	13 405	13 423	13 414	13 395
0,5	15 275	16 105	16 312	16 339	16 334	16 315
0,6	17 694	18 796	19 072	19 106	19 106	19 087
0,7	19 968	21 347	21 696	21 738	21 742	21 724
0,8	22 113	23 768	24 195	24 244	24 254	24 237
0,9	24 143	26 072	26 579	26 634	26 650	26 634
1	26 069	28 269	28 857	28 918	28 939	28 925
1,1	27 901	30 366	31 036	31 103	31 129	31 117
1,2	29 647	32 372	33 124	33 197	33 227	33 217
1,3	31 314	34 293	35 128	35 205	35 240	35 233
1,4	32 910	36 137	37 052	37 134	37 174	37 169
1,5	34 438	37 907	38 903	38 990	39 034	39 031
1,6	35 905	39 610	40 685	40 776	40 825	40 823
1,7	37 315	41 249	42 403	42 498	42 551	42 551
1,8	38 672	42 830	44 061	44 159	44 216	44 218
1,9	39 980	44 355	45 662	45 764	45 824	45 829
2	41 242	45 829	47 210	47 315	47 379	47 385
2,1	42 460	47 253	48 708	48 816	48 883	48 892
2,2	43 638	48 632	50 159	50 270	50 340	50 350
2,3	44 778	49 968	51 565	51 679	51 752	51 764
2,4	45 883	51 264	52 929	53 046	53 122	53 136
2,5	46 954	52 521	54 254	54 373	54 451	54 467
2,6	47 993	53 741	55 541	55 662	55 743	55 761
2,7	49 002	54 928	56 792	56 915	56 999	57 018
2,8	49 983	56 081	58 009	58 135	58 221	58 242
2,9	50 938	57 204	59 195	59 322	59 411	59 433
3	51 867	58 298	60 349	60 478	60 569	60 593
3,1	52 771	59 363	61 475	61 606	61 699	61 724
3,2	53 653	60 402	62 573	62 705	62 800	62 827
3,3	54 514	61 416	63 645	63 778	63 875	63 903

8-35 táblázat: Érzékenységi vizsgálatok eredményei perforáció sugár alapján (gáz, károsodás nélküli eset)

r_p [in]	Q_{g360° [Mscf/nap]	Q_{g180° [Mscf/nap]	Q_{g120° [Mscf/nap]	Q_{g90° [Mscf/nap]	Q_{g60° [Mscf/nap]	Q_{g45° [Mscf/nap]
0,09	20 877	21 977	22 260	22 293	22 304	22 297
0,1	21 651	22 880	23 198	23 234	23 247	23 238
0,11	22 359	23 715	24 067	24 107	24 121	24 112
0,12	23 010	24 492	24 879	24 922	24 936	24 927
0,13	23 612	25 219	25 639	25 686	25 701	25 691
0,14	24 171	25 900	26 355	26 404	26 421	26 410
0,15	24 692	26 542	27 031	27 083	27 100	27 089
0,16	25 180	27 149	27 671	27 726	27 744	27 732
0,17	25 638	27 723	28 278	28 337	28 356	28 343
0,18	26 069	28 269	28 857	28 918	28 939	28 925
0,19	26 476	28 788	29 409	29 473	29 494	29 480
0,2	26 860	29 283	29 937	30 003	30 026	30 011
0,21	27 225	29 757	30 442	30 511	30 534	30 519
0,22	27 571	30 209	30 926	30 998	31 023	31 006
0,23	27 900	30 643	31 392	31 466	31 491	31 475
0,24	28 213	31 060	31 839	31 916	31 942	31 925
0,25	28 512	31 460	32 270	32 350	32 377	32 359
0,26	28 798	31 845	32 686	32 768	32 796	32 777
0,27	29 071	32 216	33 087	33 171	33 200	33 181
0,28	29 333	32 574	33 474	33 561	33 591	33 571
0,29	29 584	32 919	33 849	33 938	33 968	33 948
0,3	29 825	33 252	34 211	34 303	34 334	34 313
0,31	30 057	33 575	34 562	34 656	34 688	34 667
0,32	30 279	33 887	34 903	34 999	35 032	35 010
0,33	30 494	34 189	35 233	35 331	35 365	35 343
0,34	30 700	34 482	35 553	35 654	35 688	35 666
0,35	30 900	34 766	35 865	35 968	36 003	35 979
0,36	31 092	35 041	36 167	36 272	36 308	36 284
0,37	31 278	35 309	36 461	36 569	36 605	36 581
0,38	31 457	35 568	36 748	36 857	36 894	36 870
0,39	31 631	35 821	37 027	37 138	37 176	37 151

U-Melléklet Szennyezett kutak hozamadatai

8-36 táblázat: Szennyezett olajkút hozamadatai

P_{wf} [psi]	$Q_{o\ 360^\circ}$ [STB/nap]	$Q_{o\ 180^\circ}$ [STB/nap]	$Q_{o\ 120^\circ}$ [STB/nap]	$Q_{o\ 90^\circ}$ [STB/nap]	$Q_{o\ 60^\circ}$ [STB/nap]	$Q_{o\ 45^\circ}$ [STB/nap]
3 000	0	0	0	0	0	0
2 900	78	82	86	87	87	86
2 800	155	163	172	174	173	172
2 700	232	244	256	259	259	257
2 600	308	324	340	344	343	340
2 500	383	402	423	427	427	423
2 400	457	481	504	510	509	505
2 300	531	558	586	592	591	586
2 200	604	635	666	673	672	667
2 100	676	711	745	754	752	746
2 000	748	786	824	833	832	825
1 900	819	861	902	912	910	903
1 800	890	935	980	990	988	981
1 700	960	1 009	1 056	1 068	1 066	1 057
1 600	1 030	1 082	1 132	1 145	1 142	1 134
1 500	1 099	1 154	1 208	1 221	1 218	1 209
1 400	1 167	1 226	1 283	1 296	1 293	1 284
1 300	1 235	1 297	1 357	1 371	1 368	1 358
1 200	1 302	1 367	1 430	1 445	1 442	1 432
1 100	1 369	1 437	1 503	1 519	1 516	1 505
1 000	1 436	1 507	1 576	1 592	1 589	1 577
900	1 502	1 576	1 647	1 664	1 661	1 649
800	1 567	1 645	1 719	1 736	1 733	1 720
700	1 632	1 713	1 789	1 807	1 804	1 791
600	1 697	1 780	1 860	1 878	1 874	1 861
500	1 761	1 847	1 929	1 948	1 945	1 931
400	1 825	1 914	1 999	2 018	2 014	2 000
300	1 888	1 980	2 067	2 087	2 083	2 069
200	1 951	2 046	2 135	2 156	2 152	2 137
100	2 013	2 111	2 203	2 224	2 220	2 205
0	2 075	2 176	2 270	2 292	2 288	2 272

8-37 táblázat: Szennyezett gázkút hozamadatai

P_{wf} [psi]	$q_{g\ 360^\circ}$ [Mscf/nap]	$q_{g\ 180^\circ}$ [Mscf/nap]	$q_{g\ 120^\circ}$ [Mscf/nap]	$q_{g\ 90^\circ}$ [Mscf/nap]	$q_{g\ 60^\circ}$ [Mscf/nap]	$q_{g\ 45^\circ}$ [Mscf/nap]
3 000	0	0	0	0	0	0
2 900	1 689	1 758	1 810	1 820	1 818	1 811
2 800	2 689	2 793	2 865	2 877	2 875	2 866
2 700	3 458	3 588	3 674	3 687	3 684	3 675
2 600	4 096	4 248	4 344	4 358	4 355	4 345
2 500	4 646	4 815	4 921	4 935	4 933	4 922
2 400	5 130	5 315	5 429	5 443	5 441	5 430
2 300	5 562	5 761	5 882	5 897	5 894	5 883
2 200	5 951	6 164	6 290	6 306	6 303	6 292
2 100	6 305	6 529	6 661	6 677	6 674	6 662
2 000	6 627	6 862	6 999	7 015	7 012	7 000
1 900	6 922	7 166	7 308	7 324	7 321	7 309
1 800	7 192	7 445	7 591	7 608	7 605	7 593
1 700	7 440	7 701	7 851	7 868	7 865	7 853
1 600	7 668	7 936	8 090	8 106	8 103	8 091
1 500	7 876	8 152	8 308	8 325	8 322	8 310
1 400	8 067	8 349	8 508	8 525	8 522	8 510
1 300	8 242	8 529	8 691	8 708	8 705	8 692
1 200	8 400	8 692	8 857	8 874	8 871	8 859
1 100	8 544	8 841	9 008	9 025	9 022	9 009
1 000	8 673	8 974	9 143	9 161	9 157	9 145
900	8 789	9 094	9 264	9 282	9 278	9 266
800	8 891	9 199	9 371	9 389	9 386	9 373
700	8 981	9 292	9 465	9 483	9 479	9 467
600	9 058	9 371	9 546	9 564	9 560	9 547
500	9 122	9 438	9 613	9 631	9 628	9 615
400	9 175	9 492	9 668	9 686	9 683	9 670
300	9 216	9 534	9 711	9 729	9 726	9 713
200	9 245	9 564	9 741	9 759	9 756	9 743
100	9 262	9 582	9 760	9 778	9 774	9 761
0	9 268	9 588	9 766	9 784	9 780	9 767

V-Melléklet Érzékenységi vizsgálatok eredményei (szennyezett eset)

8-38 táblázat: Érzékenységi vizsgálatok eredménye perforáció hossz alapján (olaj, szennyezett eset)

L_p [ft]	Q_{0360° [STB/nap]	Q_{0180° [STB/nap]	Q_{0120° [STB/nap]	Q_{090° [STB/nap]	Q_{060° [STB/nap]	Q_{045° [STB/nap]	$Q_{045^\circ (s=0)}$ [STB/nap]
0,3	1 582	1 596	1 656	1 666	1 654	1 637	2 244
0,4	1 857	1 915	1 989	2 005	1 997	1 980	2 632
0,5	2 075	2 176	2 270	2 292	2 288	2 272	2 941
0,6	2 257	2 397	2 515	2 541	2 541	2 527	3 195
0,7	2 411	2 588	2 732	2 762	2 765	2 752	3 409
0,8	2 547	2 757	2 929	2 961	2 967	2 956	3 594
0,9	2 668	2 909	3 108	3 143	3 152	3 143	3 756
1	2 777	3 047	3 275	3 311	3 323	3 315	3 900
1,19	2 928	3 365	3 734	3 770	3 784	3 779	4 136
1,2	2 952	3 388	3 753	3 790	3 804	3 798	4 148
1,3	3 162	3 589	3 932	3 968	3 983	3 978	4 256
1,4	3 336	3 758	4 084	4 119	4 135	4 131	4 356
1,5	3 483	3 904	4 216	4 251	4 267	4 264	4 449
1,6	3 611	4 031	4 333	4 367	4 384	4 382	4 535
1,7	3 724	4 143	4 438	4 471	4 488	4 488	4 617
1,8	3 824	4 244	4 533	4 566	4 583	4 583	4 694
1,9	3 915	4 336	4 620	4 653	4 670	4 671	4 767
2	3 998	4 420	4 701	4 733	4 751	4 752	4 836
2,1	4 074	4 497	4 776	4 807	4 825	4 827	4 903
2,2	4 145	4 569	4 846	4 877	4 895	4 897	4 966
2,3	4 211	4 637	4 912	4 943	4 961	4 964	5 026
2,4	4 273	4 700	4 975	5 005	5 024	5 026	5 085
2,5	4 331	4 759	5 035	5 064	5 083	5 086	5 141
2,6	4 386	4 816	5 091	5 121	5 139	5 143	5 195
2,7	4 438	4 870	5 146	5 175	5 193	5 197	5 247
2,8	4 488	4 921	5 198	5 226	5 245	5 250	5 298
2,9	4 536	4 970	5 248	5 276	5 295	5 300	5 347
3	4 581	5 017	5 297	5 324	5 343	5 348	5 394
3,1	4 625	5 062	5 343	5 371	5 390	5 395	5 440
3,2	4 667	5 106	5 389	5 416	5 435	5 440	5 485
3,3	4 707	5 148	5 433	5 459	5 479	5 484	5 529

8-39 táblázat: Érzékenységi vizsgálatok eredménye szennyezés alapján (olaj, szennyezett eset, $L_p=0.5$ ft)

k_s [mD]	q_{0360° [STB/nap]	q_{0180° [STB/nap]	q_{0120° [STB/nap]	q_{090° [STB/nap]	q_{060° [STB/nap]	q_{045° [STB/nap]	$q_{045^\circ} (s=0)$ [STB/nap]
24,872	2 075	2 176	2 270	2 292	2 288	2 272	2 941
25,710	2 110	2 210	2 305	2 326	2 322	2 307	2 941
26,547	2 143	2 243	2 338	2 359	2 355	2 339	2 941
27,385	2 175	2 275	2 369	2 391	2 387	2 371	2 941
28,222	2 206	2 306	2 400	2 422	2 417	2 402	2 941
29,060	2 236	2 336	2 430	2 451	2 447	2 432	2 941
29,898	2 265	2 365	2 459	2 480	2 476	2 460	2 941
30,735	2 293	2 393	2 486	2 508	2 503	2 488	2 941
31,573	2 321	2 420	2 513	2 534	2 530	2 515	2 941
32,410	2 347	2 446	2 539	2 560	2 556	2 541	2 941
33,248	2 373	2 472	2 564	2 585	2 581	2 566	2 941
34,086	2 398	2 497	2 589	2 610	2 606	2 590	2 941
34,923	2 422	2 521	2 612	2 633	2 629	2 614	2 941
35,761	2 446	2 544	2 635	2 656	2 652	2 637	2 941
36,598	2 469	2 567	2 657	2 678	2 674	2 659	2 941
37,436	2 492	2 589	2 679	2 700	2 696	2 681	2 941
38,274	2 513	2 610	2 700	2 720	2 717	2 702	2 941
39,111	2 535	2 631	2 720	2 741	2 737	2 722	2 941
39,949	2 555	2 651	2 740	2 760	2 756	2 742	2 941
40,786	2 576	2 671	2 759	2 779	2 776	2 761	2 941
41,624	2 595	2 690	2 778	2 798	2 794	2 780	2 941
42,462	2 614	2 709	2 796	2 816	2 812	2 798	2 941
43,299	2 633	2 727	2 814	2 834	2 830	2 816	2 941
44,137	2 651	2 745	2 831	2 851	2 847	2 833	2 941
44,974	2 669	2 762	2 848	2 867	2 864	2 849	2 941
45,812	2 686	2 779	2 864	2 884	2 880	2 866	2 941
46,650	2 703	2 795	2 880	2 899	2 896	2 882	2 941
47,487	2 720	2 811	2 895	2 915	2 911	2 897	2 941
48,325	2 736	2 826	2 911	2 930	2 926	2 912	2 941
49,162	2 751	2 842	2 925	2 944	2 941	2 927	2 941
50,000	2 767	2 857	2 940	2 958	2 955	2 941	2 941

8-40 táblázat: Érzékenységi vizsgálatok eredménye szennyezés alapján (olaj, szennyezett eset, $L_p=1.5$ ft)

k_s [mD]	Q_{0360° [STB/nap]	Q_{0180° [STB/nap]	Q_{0120° [STB/nap]	Q_{090° [STB/nap]	Q_{060° [STB/nap]	Q_{045° [STB/nap]	$Q_{045^\circ (S=0)}$ [STB/nap]
24,872	3 483	3 904	4 216	4 251	4 267	4 264	4 449
25,710	3 490	3 912	4 228	4 262	4 278	4 276	4 449
26,547	3 495	3 919	4 239	4 273	4 288	4 286	4 449
27,385	3 501	3 926	4 248	4 282	4 298	4 295	4 449
28,222	3 506	3 932	4 258	4 291	4 306	4 304	4 449
29,060	3 510	3 938	4 266	4 299	4 314	4 312	4 449
29,898	3 514	3 943	4 274	4 306	4 321	4 319	4 449
30,735	3 518	3 948	4 281	4 313	4 328	4 326	4 449
31,573	3 522	3 952	4 288	4 320	4 334	4 332	4 449
32,410	3 526	3 957	4 294	4 326	4 340	4 338	4 449
33,248	3 529	3 961	4 301	4 332	4 346	4 343	4 449
34,086	3 532	3 965	4 306	4 337	4 351	4 349	4 449
34,923	3 535	3 968	4 312	4 342	4 356	4 354	4 449
35,761	3 538	3 972	4 317	4 347	4 361	4 359	4 449
36,598	3 541	3 975	4 322	4 352	4 366	4 363	4 449
37,436	3 543	3 978	4 327	4 357	4 370	4 368	4 449
38,274	3 546	3 981	4 332	4 361	4 375	4 372	4 449
39,111	3 549	3 984	4 337	4 366	4 379	4 376	4 449
39,949	3 551	3 987	4 341	4 370	4 383	4 380	4 449
40,786	3 553	3 990	4 346	4 374	4 387	4 384	4 449
41,624	3 556	3 993	4 350	4 378	4 390	4 388	4 449
42,462	3 558	3 996	4 354	4 382	4 394	4 392	4 449
43,299	3 560	3 998	4 358	4 385	4 398	4 395	4 449
44,137	3 562	4 001	4 362	4 389	4 401	4 399	4 449
44,974	3 565	4 003	4 366	4 393	4 405	4 402	4 449
45,812	3 567	4 006	4 370	4 396	4 408	4 406	4 449
46,650	3 569	4 008	4 373	4 400	4 411	4 409	4 449
47,487	3 571	4 010	4 377	4 403	4 415	4 412	4 449
48,325	3 573	4 013	4 380	4 406	4 418	4 416	4 449
49,162	3 575	4 015	4 384	4 409	4 421	4 419	4 449
50,000	3 577	4 017	4 387	4 413	4 424	4 422	4 449

8-41 táblázat: Érzékenységi vizsgálatok eredménye perforáció hossz alapján (gáz, szennyezett eset)

L_p [ft]	Q_{0360° [Mscf/nap]	Q_{0180° [Mscf/nap]	Q_{0120° [Mscf/nap]	Q_{090° [Mscf/nap]	Q_{060° [Mscf/nap]	Q_{045° [Mscf/nap]	$Q_{045^\circ (S=0)}$ [Mscf/nap]
0,3	5 933	6 002	6 066	6 073	6 065	6 054	10 317
0,4	7 655	7 834	7 944	7 957	7 951	7 938	13 395
0,5	9 268	9 588	9 766	9 784	9 780	9 767	16 315
0,6	10 785	11 272	11 538	11 561	11 561	11 548	19 087
0,7	12 222	12 895	13 267	13 296	13 300	13 287	21 724
0,8	13 588	14 463	14 960	14 994	15 002	14 990	24 237
0,9	14 893	15 982	16 620	16 661	16 672	16 661	26 634
1	16 146	17 458	18 254	18 300	18 316	18 305	28 925
1,1	17 279	19 721	21 055	21 108	21 127	21 117	31 117
1,2	19 710	22 315	23 715	23 774	23 798	23 788	33 217
1,3	21 973	24 768	26 246	26 311	26 339	26 330	35 233
1,4	24 095	27 091	28 658	28 728	28 760	28 753	37 169
1,5	26 095	29 296	30 958	31 034	31 070	31 064	39 031
1,6	27 984	31 391	33 156	33 237	33 277	33 273	40 823
1,7	29 775	33 385	35 259	35 345	35 389	35 386	42 551
1,8	31 476	35 286	37 273	37 363	37 411	37 410	44 218
1,9	33 096	37 101	39 204	39 299	39 351	39 351	45 829
2	34 642	38 836	41 059	41 158	41 213	41 216	47 385
2,1	36 120	40 498	42 842	42 945	43 004	43 008	48 892
2,2	37 534	42 091	44 558	44 664	44 727	44 733	50 350
2,3	38 892	43 621	46 212	46 321	46 387	46 396	51 764
2,4	40 195	45 091	47 806	47 919	47 989	47 999	53 136
2,5	41 449	46 507	49 346	49 462	49 534	49 546	54 467
2,6	42 657	47 870	50 834	50 952	51 028	51 042	55 761
2,7	43 822	49 186	52 273	52 394	52 473	52 488	57 018
2,8	44 947	50 456	53 666	53 790	53 872	53 889	58 242
2,9	46 035	51 684	55 016	55 142	55 227	55 246	59 433
3	47 087	52 872	56 325	56 454	56 541	56 562	60 593
3,1	48 106	54 023	57 596	57 726	57 816	57 838	61 724
3,2	49 094	55 138	58 830	58 963	59 055	59 079	62 827
3,3	50 054	56 220	60 030	60 164	60 259	60 284	63 903

8-42 táblázat Érzékenységi vizsgálatok eredménye szennyezés alapján (gáz, szennyezett eset, $L_p=0.5$ ft)

k_s [mD]	Q_{0360° [Mscf/nap]	Q_{0180° [Mscf/nap]	Q_{0120° [Mscf/nap]	Q_{090° [Mscf/nap]	Q_{060° [Mscf/nap]	Q_{045° [Mscf/nap]	$Q_{045^\circ (S=0)}$ [Mscf/nap]
24,872	9 268	9 588	9 766	9 784	9 780	9 767	16 315
25,710	9 505	9 833	10 014	10 033	10 029	10 016	16 315
26,547	9 741	10 075	10 261	10 279	10 276	10 262	16 315
27,385	9 974	10 315	10 504	10 523	10 520	10 506	16 315
28,222	10 204	10 553	10 745	10 765	10 761	10 747	16 315
29,060	10 433	10 788	10 984	11 004	11 000	10 986	16 315
29,898	10 659	11 021	11 221	11 241	11 237	11 222	16 315
30,735	10 883	11 251	11 455	11 475	11 471	11 457	16 315
31,573	11 105	11 480	11 687	11 707	11 703	11 689	16 315
32,410	11 325	11 706	11 917	11 938	11 934	11 918	16 315
33,248	11 543	11 931	12 144	12 166	12 161	12 146	16 315
34,086	11 760	12 153	12 370	12 392	12 387	12 372	16 315
34,923	11 974	12 373	12 594	12 615	12 611	12 595	16 315
35,761	12 186	12 592	12 815	12 837	12 833	12 817	16 315
36,598	12 397	12 808	13 035	13 057	13 053	13 037	16 315
37,436	12 606	13 023	13 253	13 275	13 271	13 254	16 315
38,274	12 813	13 236	13 468	13 491	13 487	13 470	16 315
39,111	13 019	13 447	13 682	13 706	13 701	13 684	16 315
39,949	13 223	13 656	13 895	13 918	13 914	13 897	16 315
40,786	13 425	13 864	14 105	14 129	14 124	14 107	16 315
41,624	13 625	14 070	14 314	14 338	14 333	14 316	16 315
42,462	13 824	14 274	14 521	14 545	14 541	14 523	16 315
43,299	14 022	14 477	14 726	14 751	14 746	14 729	16 315
44,137	14 218	14 678	14 930	14 955	14 950	14 932	16 315
44,974	14 412	14 877	15 132	15 157	15 153	15 134	16 315
45,812	14 605	15 075	15 333	15 358	15 353	15 335	16 315
46,650	14 797	15 271	15 532	15 557	15 552	15 534	16 315
47,487	14 987	15 466	15 729	15 755	15 750	15 731	16 315
48,325	15 175	15 660	15 925	15 951	15 946	15 927	16 315
49,162	15 363	15 852	16 120	16 146	16 141	16 122	16 315
50,000	15 548	16 042	16 312	16 339	16 334	16 315	16 315

8-43 táblázat: Érzékenységi vizsgálatok eredménye szennyezés alapján (gáz, szennyezett eset, $L_p=1.5$ ft)

k_s [mD]	q_{0360° [Mscf/nap]	q_{0180° [Mscf/nap]	q_{0120° [Mscf/nap]	q_{090° [Mscf/nap]	q_{060° [Mscf/nap]	q_{045° [Mscf/nap]	$q_{045^\circ (S=0)}$ [Mscf/nap]
24,872	26 095	29 296	30 958	31 034	31 070	31 064	39 031
25,710	26 296	29 570	31 286	31 362	31 398	31 392	39 031
26,547	26 492	29 837	31 606	31 683	31 719	31 713	39 031
27,385	26 683	30 099	31 921	31 998	32 034	32 028	39 031
28,222	26 869	30 356	32 230	32 307	32 343	32 337	39 031
29,060	27 051	30 607	32 533	32 611	32 647	32 640	39 031
29,898	27 229	30 853	32 831	32 909	32 945	32 939	39 031
30,735	27 403	31 095	33 125	33 203	33 239	33 232	39 031
31,573	27 573	31 333	33 413	33 492	33 528	33 521	39 031
32,410	27 740	31 566	33 697	33 776	33 813	33 805	39 031
33,248	27 903	31 795	33 977	34 057	34 093	34 085	39 031
34,086	28 063	32 020	34 253	34 333	34 369	34 361	39 031
34,923	28 220	32 242	34 525	34 605	34 641	34 633	39 031
35,761	28 374	32 460	34 793	34 873	34 909	34 902	39 031
36,598	28 525	32 674	35 058	35 138	35 174	35 166	39 031
37,436	28 673	32 885	35 318	35 398	35 435	35 427	39 031
38,274	28 818	33 093	35 576	35 656	35 692	35 684	39 031
39,111	28 961	33 297	35 829	35 910	35 946	35 938	39 031
39,949	29 101	33 499	36 080	36 161	36 197	36 189	39 031
40,786	29 239	33 697	36 327	36 408	36 445	36 436	39 031
41,624	29 374	33 892	36 572	36 653	36 689	36 681	39 031
42,462	29 507	34 085	36 813	36 894	36 930	36 922	39 031
43,299	29 637	34 275	37 051	37 132	37 169	37 160	39 031
44,137	29 766	34 462	37 286	37 368	37 404	37 395	39 031
44,974	29 892	34 646	37 519	37 600	37 636	37 628	39 031
45,812	30 016	34 828	37 748	37 830	37 866	37 857	39 031
46,650	30 138	35 007	37 975	38 057	38 093	38 084	39 031
47,487	30 258	35 183	38 199	38 281	38 317	38 308	39 031
48,325	30 376	35 357	38 420	38 502	38 539	38 530	39 031
49,162	30 493	35 529	38 639	38 721	38 758	38 749	39 031
50,000	30 607	35 699	38 856	38 938	38 974	38 965	39 031