

MISKOLCI EGYETEM
MIKOVINY SÁMUEL FÖLDTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

A Doktori Iskola Vezetője:

Prof. Dr. Szűcs Péter

Professzor

**Áramlási Profilszabályozás Hidraulikus
Rétegrepesztésben – Egy Új Geotermikus Energiatermelő
Eljárás Megalapozása**

Doktori Értekezés Tézisei

SZERZŐ:

Pusztai Patrik

Olajmérnök MSc

Master of Business Administration (MBA)

TUDOMÁNYOS TÉMAVEZETŐ:

Dr. Jobbik Anita

Tudományos főmunkatárs

TUDOMÁNYOS TÁRS TÉMAVEZETŐ:

Dr. Baracza Krisztián Mátyás

Igazgató, Tudományos főmunkatárs

Miskolc, 2023

1 BEVEZETÉS

Mivel a globális energiafelhasználás a jövőben jelentősen növekedni fog, és a potenciálisan rendelkezésre álló szénhidrogénforrások végesek, azok kiaknázása egyre drágább és nehezebb lesz, így a megújuló energiaforrások szerepe hangsúlyosabb lesz. Ezt a szabályozási és társadalmi nyomás formájában jelentkező intenzív környezetvédelmi törekvések is elősegítik. A geotermikus energiaforrások hatalmas potenciállal rendelkeznek, de ma már nem játszanak jelentős szerepet a megújuló energiaforrások összetételében. Ennek oka elsősorban az, hogy a gazdaságosság nagymértékben függ a geológiai és szabályozási környezettől, és általában nagyobb a beruházási igénye, így hosszabb a megtérülési ideje. Valószínűsíthető, hogy egy technológiai innováció nélkül a geotermián alapuló energiatermelés nem fog kulcsfontosságú szerepet betölteni a jövőben.

Számos különböző geológiai formáció és technológia áll rendelkezésre a földkéreg energiájának kiaknázására. Jelen kutatás előfutára és inspirációja az *Enhanced Geothermal Systems (EGS)* volt. Az EGS-nek nincs általánosan elfogadott definíciója, de a legtöbb esetben olyan technológiákra terjed ki, amelyek gazdaságosan életképesé teszik a geotermikus tározót a kitermelésre. A legtöbb esetben ezek a technológiák egy vagy több besajtoló és termelő kutat tartalmaznak. Későbbi tanulmányok, mint például [Kehrer et al. \(2007\)](#) és [Danko et al. \(2018\)](#) olyan EGS rendszereket kínál, ahol a befecskendezést és a termelést egy kútba integrálják, így csökkentve a teljes beruházás költségét. Bár ezek a módszerek bizonyos előnyökkel járnak, vannak korlátai is, amelyek a további vizsgálatok elvégzését teszik szükségessé ezen a területen.

1.1 Célkitűzés és eredmények

A Disszertáció fő célja egy újszerű EGS technológia megalapozása és az ehhez szükséges alapvető elméleti háttér kidolgozása, amely elősegíti a további tudományos kutatásokat és tesztek ezen a területen. Az olaj- és gáziparban széles körben alkalmazott hidraulikus rétegreperesztési eljárás szolgált ennek a módszernek az alapjául. Bár a hidraulikus rétegreperesztési technológia hasznosítása a hatékonyabb geotermikus energiatermelés érdekében számos jelenlegi tanulmány középpontjában áll, ezzel az új megközelítéssel egyetlen kútban érhető el az energiatermelés, ami potenciálisan csökkenti a projekt beruházási költségét. Ennek az egyedi módszernek az alapja, hogy hatékonyabb áramlási profilt hozunk létre, különböző permeabilitású zónák kialakításával a repedésben. Ily módon a hővisszanyerésre rendelkezésre álló felület semmilyen módon nincs korlátozva, és a repedésben az áramlás optimalizálható, hogy maximális hővisszanyerést érjünk el a

rendszerből. Ezt egy kitámasztóanyag alkalmazásával, az úgynevezett *proppant*-tal lehet elérni.

Ennek az új megközelítésnek az elvi ábrázolását az [Fig. 1-1](#) szemlélteti, ahol a repedés keresztmetszetének csak az egyik oldala látható.

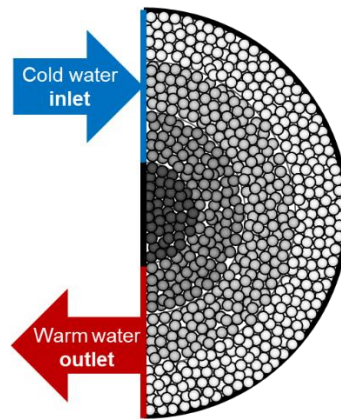


Figure 1-1: Az új megközelítés vizuális megjelenítése

A különböző koncentrikus zónák különböző permeabilitási értékekkel rendelkeznek, így áramlásszabályozó mechanizmust biztosítanak a repedésben. Ebben a dolgozatban egy új félanalitikai megközelítést dolgoztam ki, amellyel tetszőleges permeabilitási értékeket lehet elérni két eltérő kitámasztóanyag különböző tömegarányú keverésével. Ezzel az újszerű módszerrel meghatározható, hogy két kitámasztóanyagot hány tömegszázalékban kell összekeverni, hogy tározókörmények között a szükséges permeabilitási értékeket biztosítsuk.

Ennél az EGS-módszernél a repedésben kapott áramlási profil állandósult (*steady-state*) jelenséggént írható le, ezzel szemben a hővisszanyerés folyamatosan csökken, mivel az áramoltatott folyadék kimeríti a tároló hőmérsékletét, tehát az egy tranzien jelenséggént írható le. Ez az összetett probléma csak numerikusan oldható meg. A számítási folyadékdinamikában a legnépszerűbb megközelítés a végeselem-módszer (FEM), mivel ez a legstabilabb numerikus sémát használja ([Rapp, 2023](#)). Ezért egy olyan FEM-modellt dolgoztam ki, ahol a számítási tartomány kezdetben diszkrét komponensekre van felosztva, így a leíró differenciálegyenletek numerikusan megoldhatók. Bár a repedés gyakran 2 dimenzióban is leírható, ebben a speciális esetben, ahol a hővisszanyerés főleg a repedésre merőlegesen megy végbe, 3 dimenziós modellt kellett kidolgozni. Ebben a kutatásban egy korszerű, kapcsolt *steady-state*-tranzien szimulációt dolgoztam ki, ahol az áramlási profilt *steady-state* szimulációval lehet elérni, míg ennek eredményét egy tranzien

szimulációhoz kapcsolva számítható a hővisszanyerés. A csatolt modell eredményeit a [Fig. 1-2](#) szemlélteti.

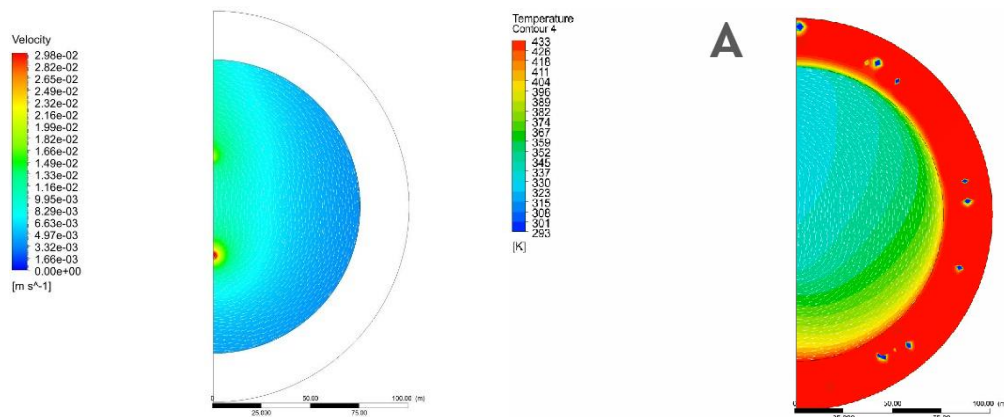


Figure 1-2: A kapcsolt modell eredményei (balra: steady-state szimulációval elért áramlási profil, jobbra: tranziens szimulációval elért hőmérsékleti profil)

A numerikus modell létrehozása után elengedhetetlen volt a modell validálása. Ennek érdekében több API szabványon alapuló mérést végeztem el, és a berendezés alapján egy új 3 dimenziós modellt építettem. Végül a méréseket és a FEM eredményeket összehasonlítottam.

A FEM szimuláció a modelltől és a diszkrét elemek számától függően jelentős számítási kapacitást igényelhet. Mivel a repedés méretei több nagyságrenddel kisebbek, mint a geotermikus tároló, a kidolgozott modell robusztussá vált, és több hétig is eltart annak lefuttatása. Ennek a korlátnak a leküzdésére egy evolúciós algoritmus alapú optimalizálási módszert fejlesztettem ki, ahol a regressziós modell jelentős időcsökkenést eredményezett.

A repedésben a proppant áteresztőképességének számos elrendezése érhető el, és mindegyik eltérő hőkinyerést és termelési hatékonyságot biztosít. A zónák legjobb elrendezésének megtalálására egy válaszfelület optimalizálási módszert dolgoztam ki, amelynek alapja egy többváltozós, polinomiális regresszió.

A kutatás során valamennyi hagyományos tudományos technika alkalmazásra került:

- szakirodalmi áttekintés a perspektívák azonosítására,
- analitikus és numerikus modellek vizsgálata a kutatási célok meghatározásához,
- fél-analitikus modellfejlesztés a jelenség leírására,
- numerikus modellfejlesztés az áramlási jelenség megjelenítésére,
- laboratóriumi kísérletek végzése az elkészített numerikus modell validálására
- számos optimalizálási módszert alkalmazása

2 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

A PhD. értekezésben bemutatott kutatások során új tudományos eredmények születtek. Az alábbi fejezetben az új tudományos eredmények tézisek formájában kerülnek bemutatásra.

2.1 #1 Tézis

A proppant egy nem konszolidált, heterogén (méreteloszlásban), de jól osztályozott szemcsés anyagnak tekinthető, és felhasználhatók azok a különböző összefüggések, amelyek előre jelezhetik az ilyen rendszerek permeabilitását. A proppanton keresztüli áramlás során a nyomásesést jellemzően a permeabilitási kifejezéssel írják le, míg a szemcsés töltetek esetében számos összefüggés a módosított részecskesúrlódási tényező kifejezést használja. Ezek a kifejezések lényegében ugyanazt a jelenséget próbálják leírni, de a köztük lévő kapcsolatot a szakirodalom nem azonosította, mivel más megközelítéseket alkalmaztak. A különböző modellek elemzéséhez **a Szerző egy új összefüggést hozott létre a módosított részecskesúrlódási tényező és a proppant permeabilitás között az [Eq. 2-1](#) egyenlet formájában.**

A kidolgozott összefüggéssel ([Eq. 2-1](#)) a különböző módosított részecskesúrlódási tényező modellek alkalmazhatósága bővíthető. A porózus közegen keresztül történő áramlásban a két fő hajtómechanizmus a repedés viszkózus nyírása és a proppant felületén ható viszkózus ellenállás. A módosított részecskesúrlódási tényező modellek általában figyelembe veszik a proppant felületének viszkózus ellenállását, viszont figyelmen kívül hagyják a befogótest (jelen esetben repedés) hatását a rendszerre. A két mechanizmust figyelembe vevő analitikai modellt kiegészítve a megalkotott összefüggéssel ([Eq. 2-1](#)) **a Szerző egy új félanalitikus modellt dolgozott ki az [Eq. 2-2](#) egyenlet formájában. Az új egyenlettel a különböző modellek viselkedése vizsgálhatóvá és összehasonlíthatóvá vált proppantok esetében.** A különböző modellek viselkedése az új fél-analitikus modellel egyértelműen mindkét mechanizmust magyarázza, amint az a [Fig. 2-1](#) is látható.

$$k_p = \frac{d_p v}{v_{fp}} \quad (2-1)$$

$$k_f = \left(\frac{d_p v}{v_{fp}} \right) \left\{ 1 + \frac{2}{w_f} \sqrt{\frac{\left(\frac{d_p v}{v_{fp}} \right)}{\phi_p}} \left[\operatorname{csch} \left(\sqrt{\frac{\phi_p}{\left(\frac{d_p v}{v_{fp}} \right)}} w_f \right) - \operatorname{coth} \left(\sqrt{\frac{\phi_p}{\left(\frac{d_p v}{v_{fp}} \right)}} w_f \right) \right] \right\} \quad (2-2)$$

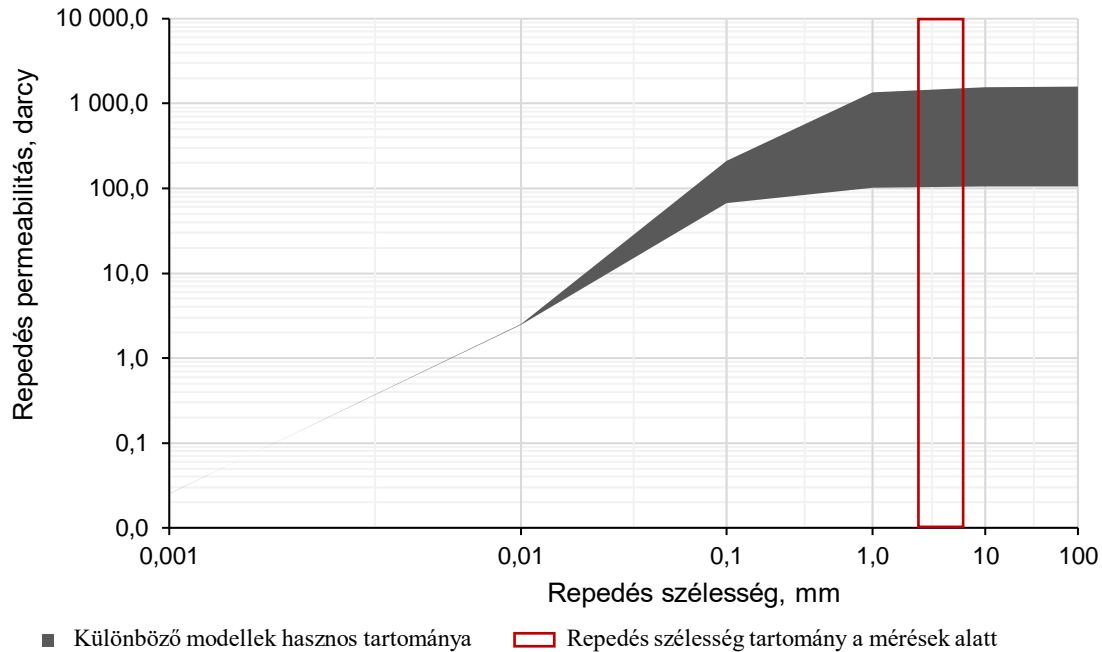


Figure 2-1: A különböző módosított részecskesúrlódási tényező modellek effektív tartománya az [Eq. 2-2](#) egyenlet segítségével

2.2 #2 Tézis

Az [Eq. 2-2](#) egyenletet és a [Tab. 2-1](#) táblázatban látható módosított részecskesúrlódási tényezőket használva a mért és a számított repedés permeabilitás értékek összehasonlíthatóak. Mivel az f_p korrelációs összefüggések a proppant porozitást (Φ_p), mint egy paraméter tartalmazzák, így ennek értékeit meg kellett határozni. A kitámasztóanyag porozitásának kiszámításához különböző alkalmazott zárónyomások mellett két paramétert kellett mérni, ezek a kitámasztóanyag fajsúlya és a kitámasztóanyag térfogatsűrűsége minden alkalmazott zárónyomásnál.

Egy új mérési módszert kellett kidolgozni a proppant térfogatsűrűségének meghatározására különböző alkalmazott zárónyomások mellett, mivel a szakirodalomban nem található erre a célra szolgáló módszer. Az [API RP 19C \(2008\)](#) szabványos módszer alapján **egy új mérési módszer került kidolgozásra a Szerző által a proppant térfogatsűrűségének meghatározására különböző zárónyomások mellett**, és az új módszer sematikus ábrázolása a [Fig. 2-2](#) ábrán látható. Az eredmények azt mutatják, hogy átlagosan 4,41%-os szórással a térfogatsűrűség mérhető különböző zárónyomás mellett. A kapott térfogatsűrűség értékekkel a porozitások könnyen meghatározhatók, amint az a [Fig. 2-3](#) ábrán is látható.

Table 2-1: A jelen tanulmányban figyelembe vett módosított részecskesúrlódási tényező korrelációk

Szerző(k)	Módosított részecskesúrlódási tényező	Egyenlet	Alkalmazhatósági tartomány
Carman (Carman, 1937)	$f_p = \left(180 + 2.871 \left(\frac{Re}{1-\Phi_p}\right)^{0.9}\right) \frac{(1-\Phi_p)^2}{\Phi_p^3 Re}$	(2-3)	$0.01 < Re_1 < 10,000$
Rose (Rose, 1945a)	$f_p = \left(\frac{1,000}{Re} + \frac{60}{\sqrt{Re}} + 12\right) h(\Phi_p)$	(2-4)	$0.01 < Re < 10,000$ $0.32 < \Phi_p < 0.9$
Morcom (Morcom, 1946)	$f_p = \left(\frac{784.8}{Re} + 13.73\right) \left(\frac{0.405}{\Phi_p}\right)^3$	(2-5)	$Re < 750$
Rose and Rizk (Rose and Rizk, 1949)	$f_p = \left(\frac{1,000}{Re} + \frac{125}{\sqrt{Re}} + 14\right) h(\Phi_p)$	(2-6)	$0.01 < Re < 10,000$
Leva (Leva, 1949)	$f_p = 2 f_m \frac{(1-\Phi_p)^{(3-n)}}{\Phi_p^3}$	(2-7)	$Re < 10,000$
Fahien and Schiver (Fahien and Schiver, 1961)	$f_p = \left(q \frac{f_{1L}}{Re_m} + (1-q) \left(f_2 + \frac{f_{1T}}{Re_m}\right)\right) \frac{(1-\Phi_p)}{\Phi_p^3}$	(2-8)	No data
Tallmadge (Tallmadge, 1970)	$f_p = \left(150 + 4.2 \left(\frac{Re}{1-\Phi_p}\right)^{5/6}\right) \frac{(1-\Phi_p)^2}{\Phi_p^3 Re}$	(2-9)	$0.1 < Re_m < 100,000$
Macdonald et al. (Macdonald et al., 1979)	$f_p = \left(180 + 1.8 \left(\frac{Re}{1-\Phi_p}\right)\right) \frac{(1-\Phi_p)^2}{\Phi_p^3 Re}$	(2-10)	$Re_m < 10,000$
Foscolo et al. (Foscolo et al., 1983)	$f_p = (17.3 + 0.336 Re) \frac{(1-\Phi_p)}{\Phi_p^{4.8} Re}$	(2-11)	No data
Meyer and Smith (Meyer and Smith, 1985)	$f_p = \left(90 + 0.462 \left(\frac{Re}{1-\Phi_p}\right)\right) \frac{(1-\Phi_p)^2}{\Phi_p^{4.1} Re}$	(2-12)	$Re_1 < 1,000$
Watanabe; Kurten et al.; Steinour (Watanabe, 1989 ; Kurten et al., 1966 ; Steinour, 1944)	$f_p = 6.25 \left(\frac{21}{Re} + \frac{6}{\sqrt{Re}} + 0.28\right) \frac{(1-\Phi_p)^2}{\Phi_p^3}$	(2-13)	$0.1 < Re < 4,000$
Avontuur and Geldart (Avontuur and Geldart, 1996)	$f_p = \left(141 + 1.52 \left(\frac{Re}{1-\Phi_p}\right)\right) \frac{(1-\Phi_p)^2}{\Phi_p^3 Re}$	(2-14)	$Re_m < 10,000$
Erdim et al. (Erdim et al., 2015)	$f_p = (160 + 2.81 Re_m^{0.904}) \frac{(1-\Phi_p)^2}{\Phi_p^3 Re}$	(2-15)	$2 < Re_m < 3,600$

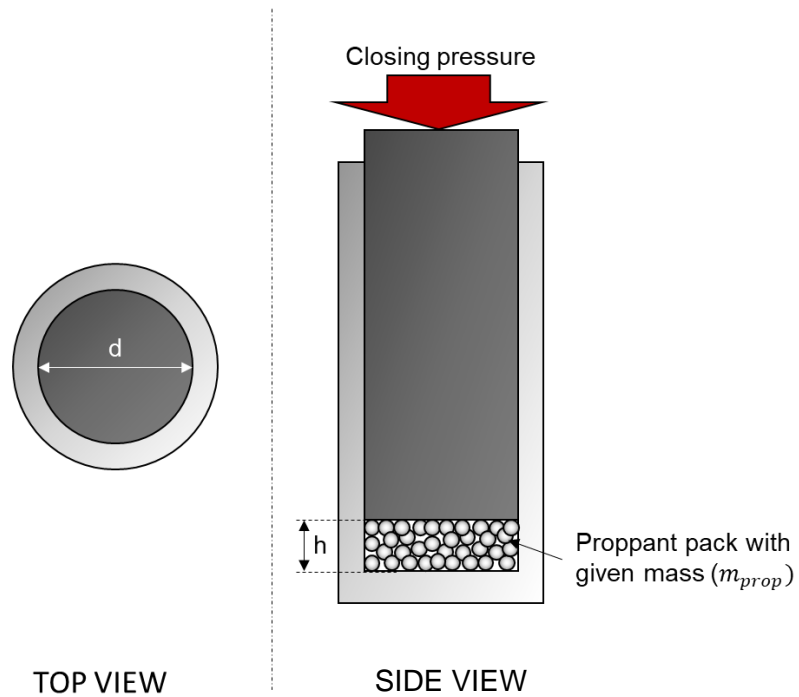


Figure 2-2: A térfogatsűrűség-mérések során használt törésvizsgáló készülék sematikus illusztrációja (nem méretarányosan)

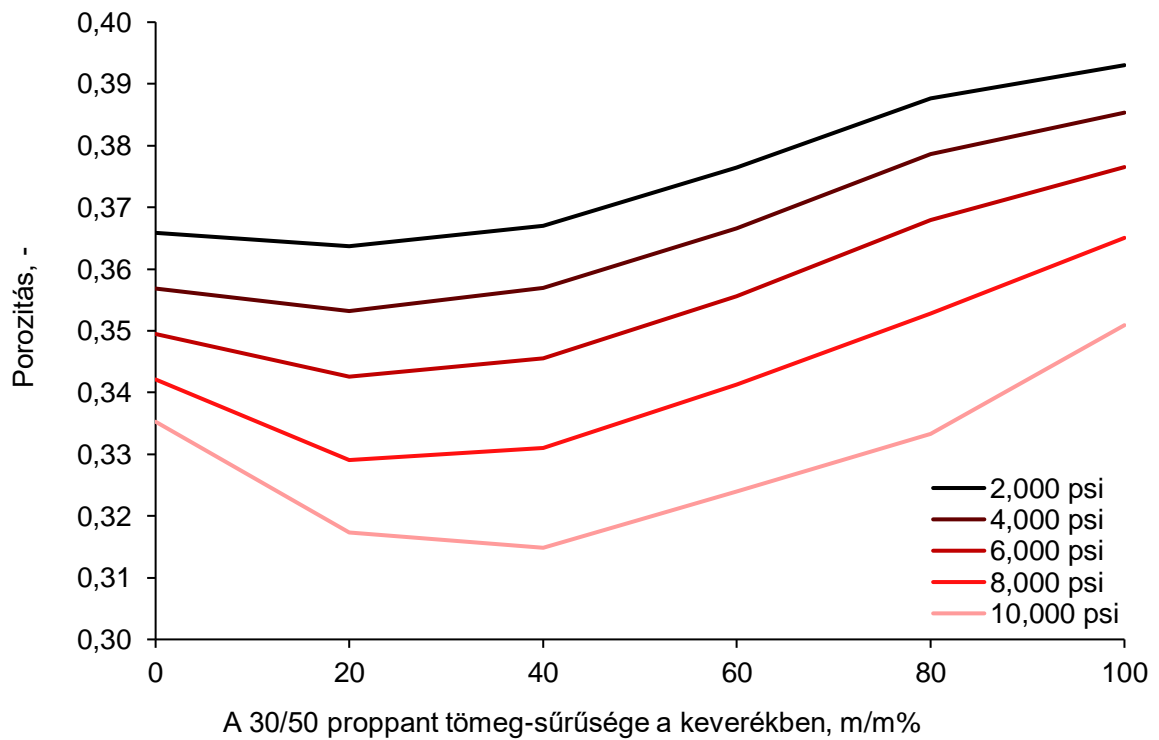


Figure 2-3: Porozitási értékek eltérő alkalmazott zárónyomás mellett különböző keverékek esetén

2.3 #3 Tézis

A különböző módosított részecskesúrlódási tényezők összefüggései nem írják le hatékonyan a proppantok viselkedését tározó körülmények között, amint az a [Fig. 2-4](#) ábrán látható. Ez a következő megfontolások alapján értelmezhető:

- A [Tab. 2-1](#) táblázatban bemutatott modellek esetén a részecskék konszolidálatlanok voltak, ahol a részecskék általában közel szabadon mozoghatnak, míg a támasztóanyag mérések során a támasztó részecskék szinte rögzített helyzetben voltak.
- A [Tab. 2-1](#) táblázatban bemutatott modellek esetén a részecskékre nem hatott jelentősebb nyomás, míg a mérések során a részecskék jelentős nyomás alatt voltak, ami deformációt, zúzódást, a zárótest felületén való beágyazódást okozhat. Ezek a hatások jelentősen ronthatják a végső permeabilitási eredményeket ([Liang et al., 2016](#)).

A rendelkezésre álló modelleken korrekciót alkalmaztam, hogy ezeket a hatásokat figyelembe lehessen venni, és egy nyomásfüggő kifejezés alkalmazásával új korrelációt kaptam. A nyomásfüggő tagot exponenciális összefüggésnek tekintettem és az [Eq. 2-3](#) egyenlet került megalkotásra ennek a hatásnak a figyelembevételére. A korrelációs együtthatókat úgy optimalizáltam, hogy a legjobban illeszkedjenek a mérési értékekhez, és **egy új módosított részecskesúrlódási tényező korrelációt dolgozott ki a Szerző, amely a részecskékre ható zárónyomást az [Eq. 2-4](#) egyenlet segítségével veszi figyelembe.** Ezzel az új korrelációval 12,4%-os átlagos variancia érhető el az egyéb összefüggések 34,1%-100%-ához képest. Ennek az új korrelációnak a viselkedése a mérési értékekhez képest a [Fig. 2-5](#) ábrán látható.

$$f_p = e^{\alpha \frac{P_c}{1,000}} \left[\left(a + b \left(\frac{Re}{1-\Phi_p} \right) \right) \frac{(1-\Phi_p)^2}{\Phi_p^c Re} \right] \quad (2-3)$$

$$f_p = e^{0,203 \frac{P_c}{1,000}} \left[\left(542 + 0,462 \left(\frac{Re}{1-\Phi_p} \right) \right) \frac{(1-\Phi_p)^2}{\Phi_p Re} \right] \quad (2-4)$$

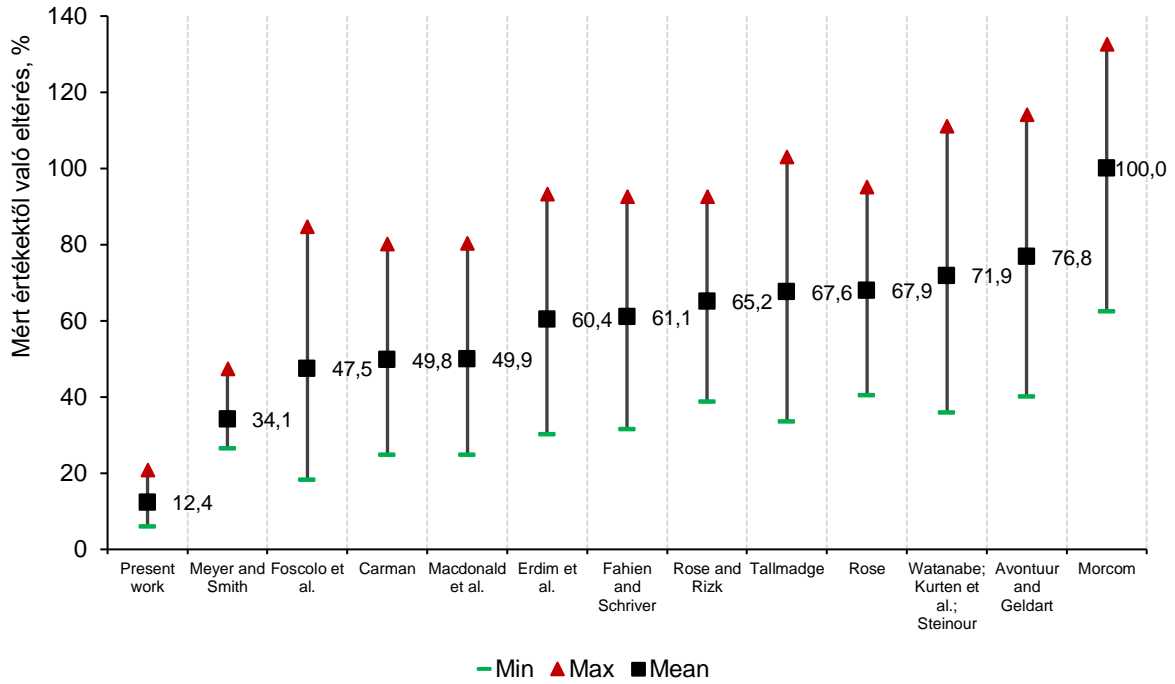


Figure 2-4: A számított és mért repedés permeabilitás értékek összehasonlítása a különböző modellek esetében

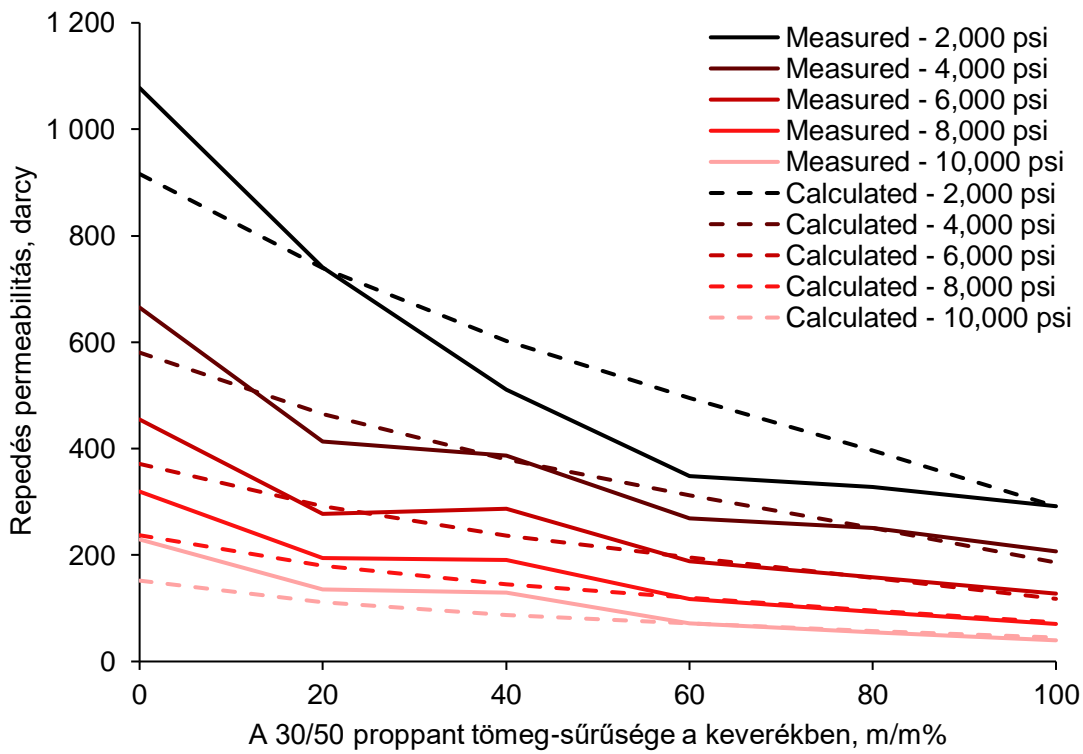


Figure 2-5: Jelen munka összehasonlítása a mért repedés permeabilitási értékekkel

2.4 #4 Tézis

A Szerző által kidolgozásra került egy optimalizálási módszer, amellyel a rendszer tranziens hővisszanyerésének szimulálásához szükséges idő jelentősen csökkenthető. Az optimalizálási módszer egy evolúciós algoritmuson alapul, és az eredmények azt mutatják, hogy kb. 90 nap (szimulációs idő) után a hőmérsékletcsökkenés fennmaradó exponenciális görbéje 0,5%-os eltérés alatt becsülhető, ahogy az a [Fig. 2-6](#) ábrán is látható. 5 különböző, teljes szimuláción keresztül került kidolgozásra és tesztelésre és egy részletes példa látható a [Fig. 2-7](#) ábrán.

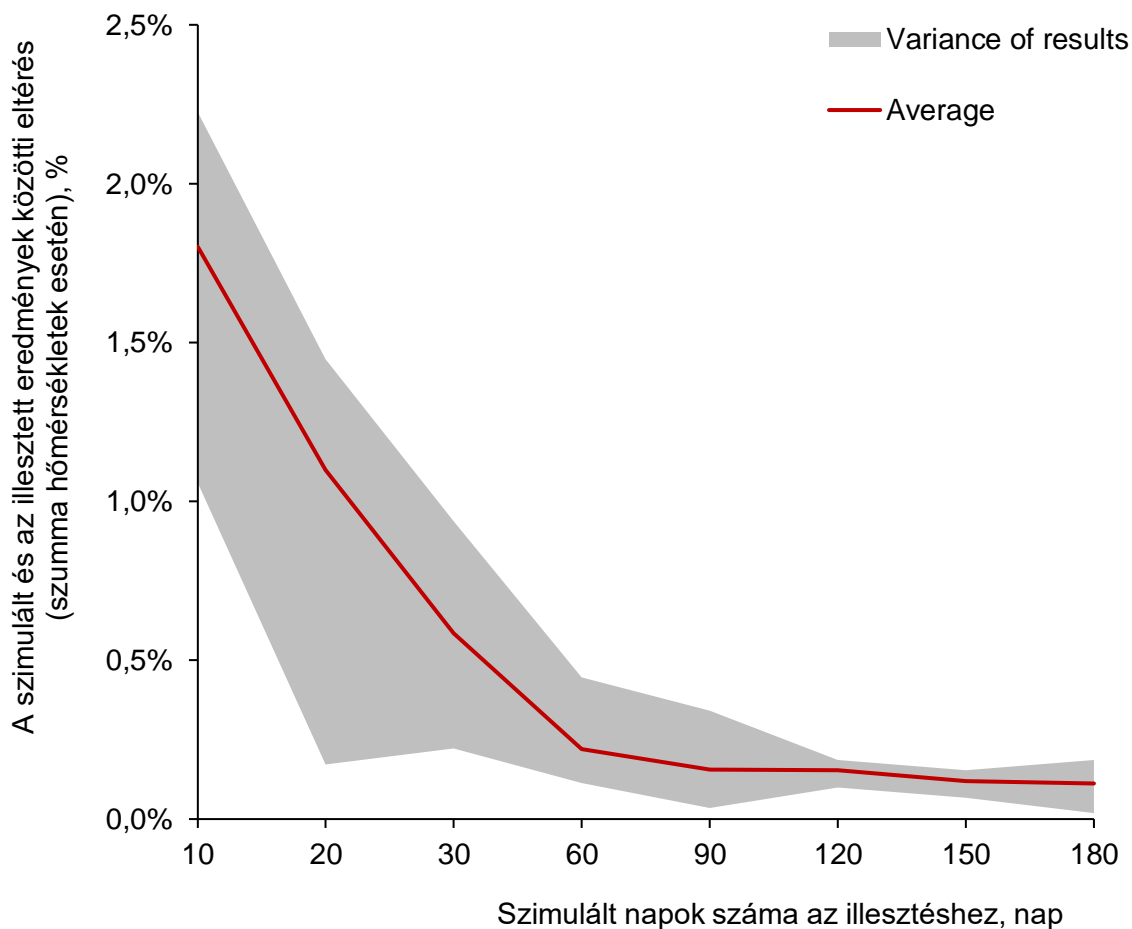


Figure 2-6: A görbe illesztésének eredménye a szimulációs idő csökkentése érdekében

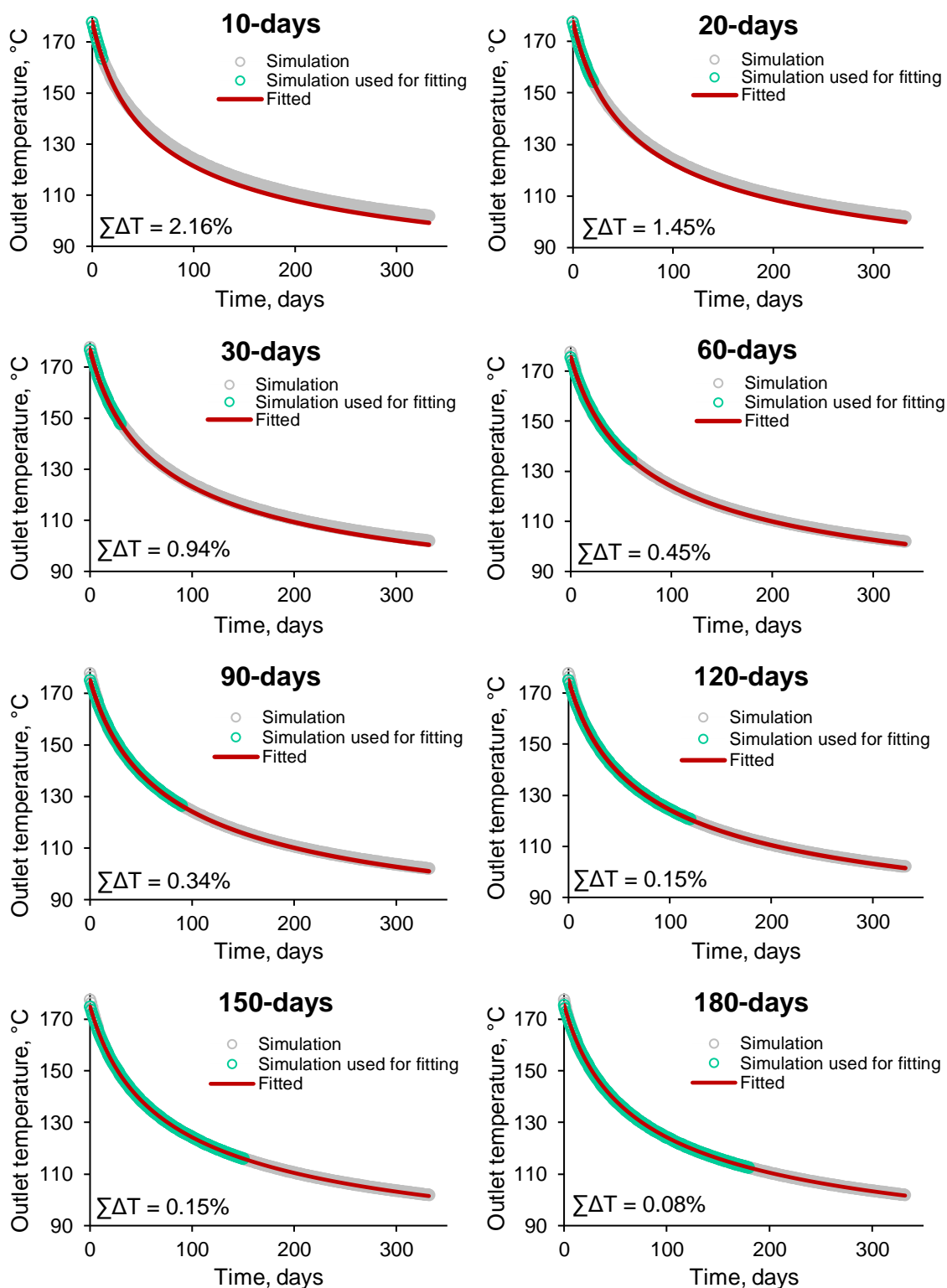


Figure 2-7: Különböző szimulációs időn alapuló illesztési eredmények abban az esetben, ha a zónák törési permeabilitása 128 *Darcy* a szimulált és illesztett adatok összegzett hőmérsékletének ($\Sigma\Delta T$) különbségével

2.5 #5 Tézis

A legtöbb EGS-módszer egy vagy több besajtoló és termelő kutat foglal magában. Későbbi tanulmányok, mint például [Kehrer et al. \(2007\)](#) és [Danko et al. \(2018\)](#) olyan EGS rendszereket kínál, ahol a besajtolást és a termelést egy kútba integrálják, így csökkentve a teljes beruházás költségét. Ezeknek a módszereknek bár vannak előnyeik, vannak korlátai is, amelyek indukálják egy új technológia vizsgálatát.

A Szerző szimulációkkal igazolta, hogy a kitémasztott repedésen belüli áramlás szabályozható különböző permeabilitású koncentrikus zónák kialakításával. Ezzel a módszerrel jelentős különbségek érhetők el a hővisszanyerésben, amint az a [Fig. 2-8](#) ábrán is látható.

A Szerző egy új EGS módszert javasolt, amellyel hatékonyabb hővisszanyerés érhető el. Ebben az új módszerben kitémasztott repedés alkalmazása szükséges, ahol különböző koncentrikus zónákat alakítanak ki. Az új EGS-módszer szimulálására a Szerző egy komplex végeelem-modellt hozott létre. A kidolgozott 3 dimenziós modell egy korszerű módszerrel elemezhető, ahol a *steady-state* szimulációt a tranziens szimulációhoz kapcsoljuk. Ezzel a csatolási módszerrel csökkenthető a szimulációs idő, miközben a modell pontossága nem sérül. Ezt úgy érhetjük el, hogy a repedésen belüli folyadékáramlás elegendő idő elteltével eléri az állandósult állapotot (ez látható a [Fig. 2-9](#) ábrán), miközben a hőátadás a tárolóból a folyadékba folyamatosan változik ([Fig. 2-10](#) ábrán). A modell érvényességét számos szabványos mérés igazolta, ahol a szimuláció eredményei kiváló egyezést mutattak a mért adatokkal, és ez látható a [Fig. 2-11](#) ábrán.

A Szerző egy olyan optimalizálási eljárást is kialakított, ahol az új EGS technológia a hővisszanyerés szempontjából optimalizálható. Az optimalizálási módszer egy többváltozós polinomiális regressziót (MPR) használó válaszfelszíni módszeren (RSM) alapul. Az eredmények bebizonyították, hogy a zónák permeabilitási értékeinek optimális elrendezése van, ahol a maximális hővisszanyerés érhető el. Az RSM optimalizálási módszert a [Fig. 2-12](#) ábra szemlélteti, ahol a függő változók a zónák permeabilitási értékei, a független változó pedig, amelyet maximalizálni kell, a különböző szimulációk kimeneti hőmérsékleti értékeinek összege.

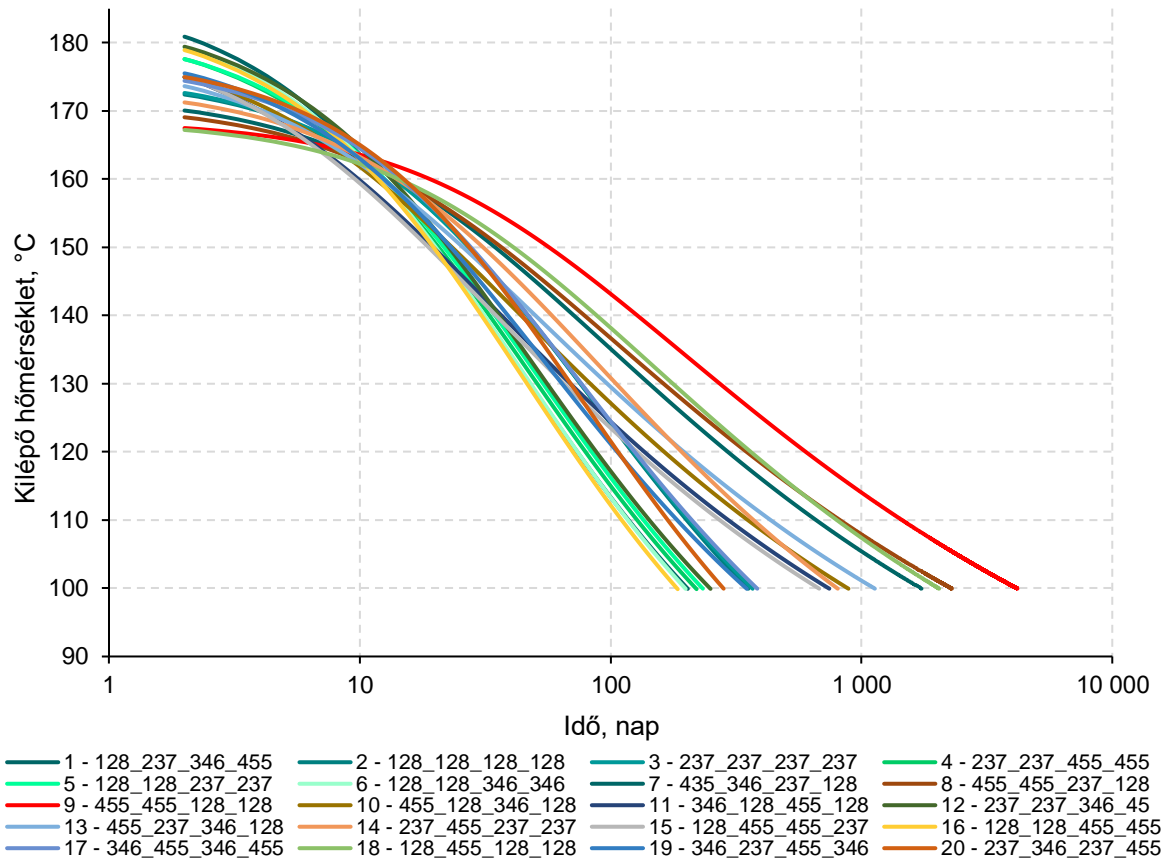


Figure 2-8: Szimulációk eredményei

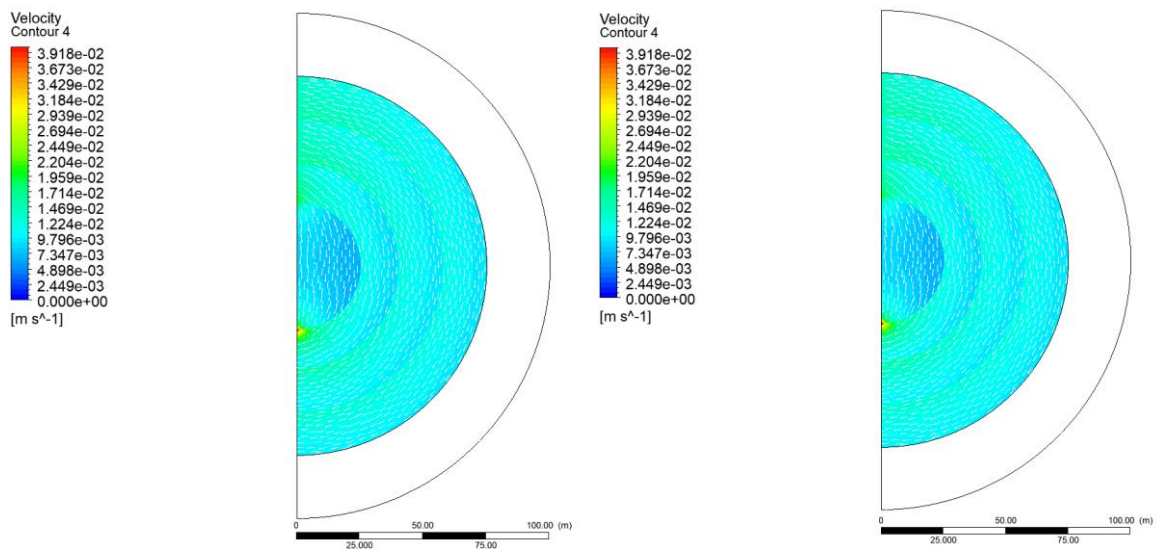


Figure 2-9: Áramlási profilok (bal oldali 60°C bemeneti hőmérséklet és jobb oldali 180°C bemeneti hőmérséklet)

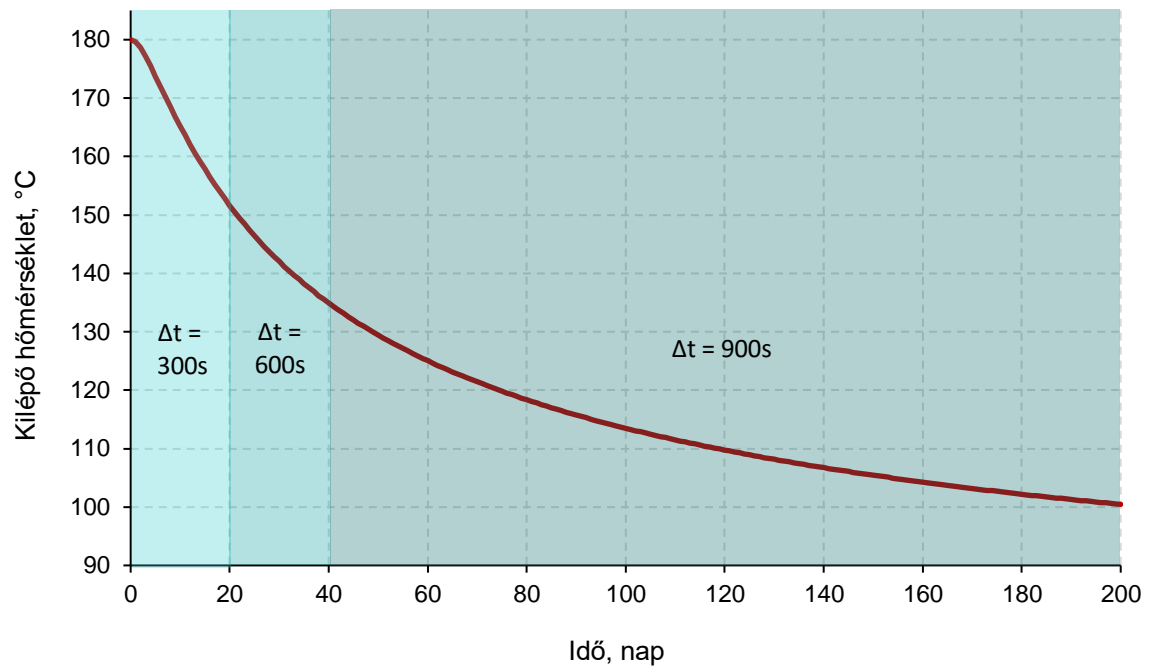


Figure 2-10: Érzékenységelemzés tranzien időlépéshez

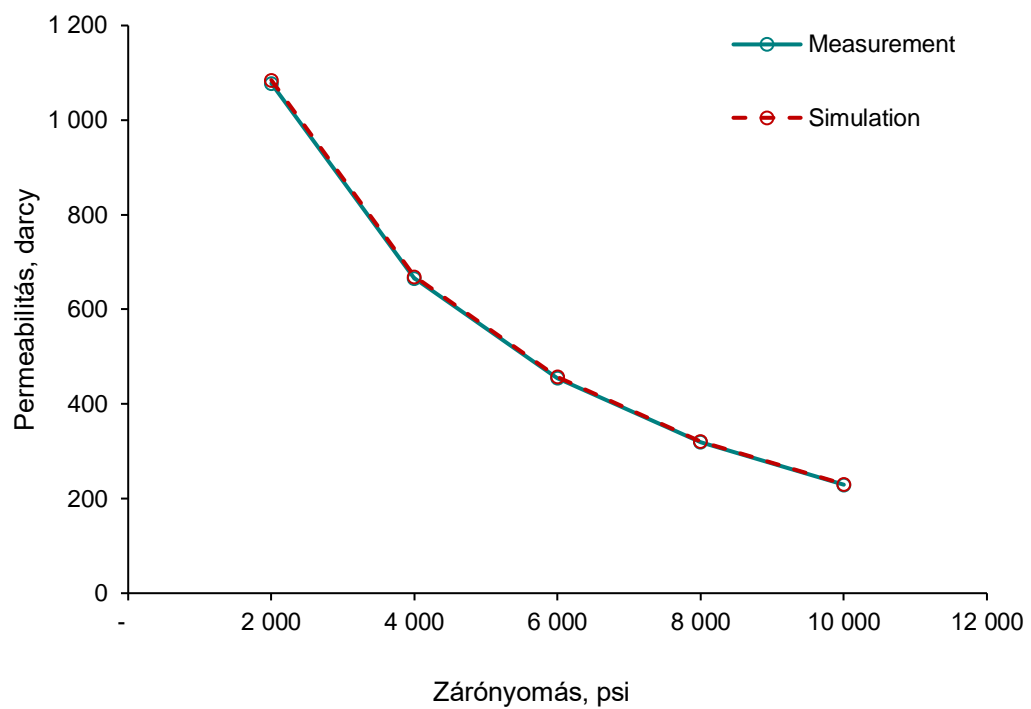


Figure 2-11: A validáció eredménye

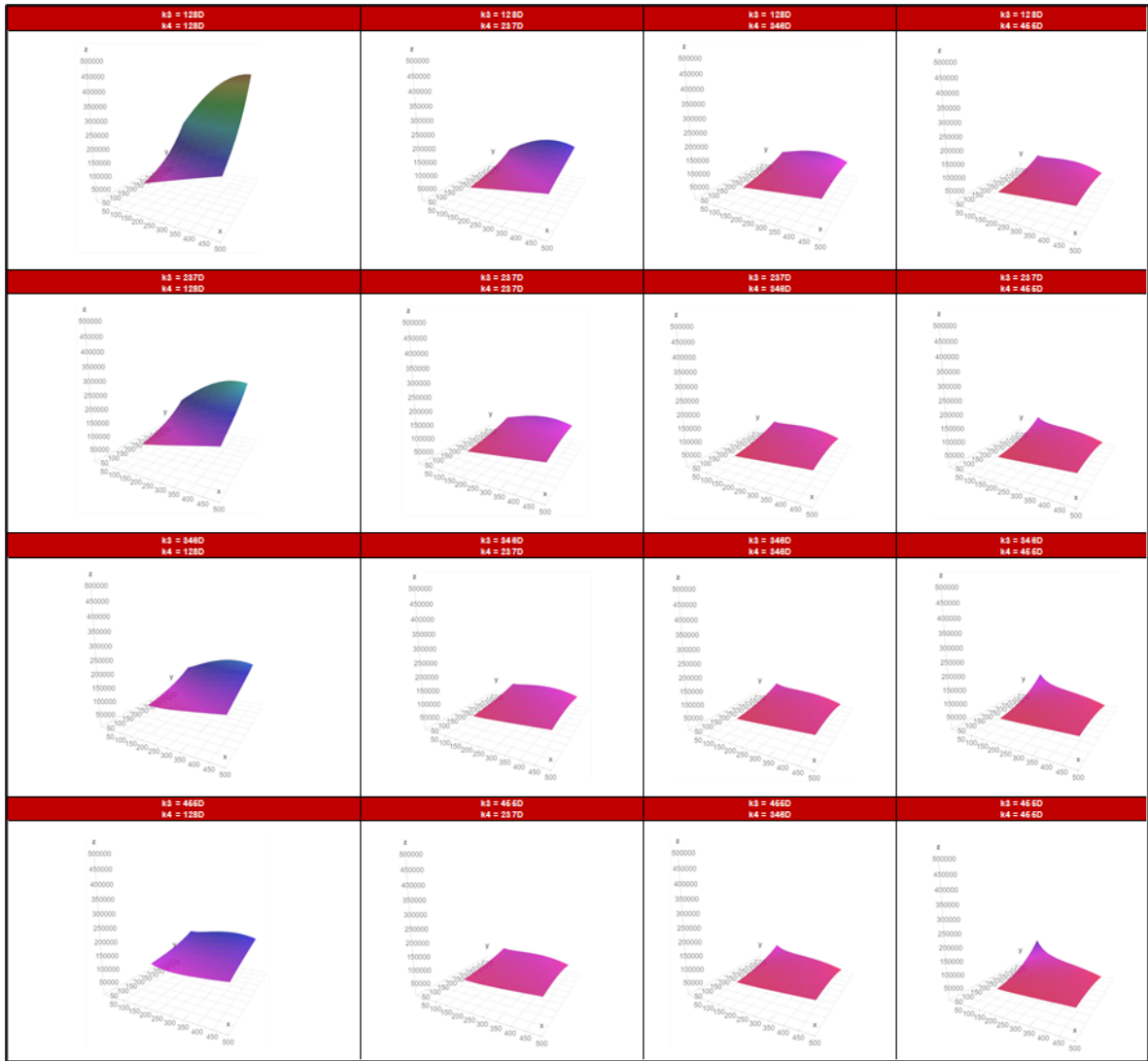


Figure 2-12: Az elemzett adathalmaz válaszfelülete

3 ÖSSZEFOGLALÓ

Jelenleg az *Enhanced Geothermal Systems* technológiák nem játszanak jelentős szerepet a megújuló energiaforrások tekintetében. Az elmúlt néhány évben számos előrelépés történt e területen, mindazonáltal az előrejelzések egyértelműen azt mutatják, hogy bár a geotermikus energiatermelésben komoly potenciál rejlik, széleskörű hasznosítása nem valószínűsíthető jelentős technológiai áttörés hiányában.

A kutatómunka során lefolytatott és a Disszertációban bemutatott kutatások során egy újszerű EGS technológia került kifejlesztésre, és annak elméleti megalapozására került sor. Először egy új ötlet került bemutatásra, ahol egy egyszeres kútban, hidraulikus rétegrepesztéssel létrehozott EGS rendszer került meghatározásra, ahol a repedést proppanttal van kitámasztva. A repedést 4 körkörös zónára került felosztásra, amelyekben a proppant permeabilitása, így a repedés permeabilitása tetszőlegesen meghatározható volt. Ezzel a módszerrel elkerülhetőek a jelenleg vizsgált hasonló megközelítések hiányosságai, vagyis a teljes kőzetfelület rendelkezésre áll hőátadás szempontjából, és az eltérő permeabilitási zónák lehetővé teszik a repedésben az áramlás szabályozását. Az új modell szimulálására egy 3 dimenziós végeselem modell készült. Korszerű megközelítésként a steady-state és a tranziens szimulációt összekapcsolásra került a modellben, ami elősegítette a szükséges számítási kapacitás csökkentését. A modellt a Szerző több API szabvány méréssel is validálta.

A kutatás kimutatta, hogy a proppanttal kitámasztott repedésben a folyadékáramlás szabályozható különböző permeabilitású kör alakú zónák kialakításával. Ez az eredmény igazolta a koncepciót, és megnyitotta a lehetőséget a repedés permeabilitási elrendezésének optimalizálására a legjobb hőkinyerés elérése érdekében. Az optimalizálás érdekében egy modern megközelítés került megtervezésre, amely a többváltozós polinomiális regressziót alkalmazó válaszfelszíni módszeren alapul. Az optimalizálás után bebizonyosodott, hogy a javasolt technológia jól megtervezve körülbelül 20-szor jobb hővisszanyerést biztosíthat egy geotermikus erőforrásból, mint más modellek.

A kutatás kimutatta, hogy két *proppant-pack* összekeverésével az optimalizált repedés permeabilitási értékek elérhetők. Ehhez a Szerző több mérést is végzett, és egy új összefüggést dolgozott ki a módosított részecskesúrlódási tényező és a *proppant-pack* permeabilitás között. Ezzel az új kapcsolattal egy félanalitikus modell definiálható, ahol a porózus közegegen való áramlás során a két hajtómechanizmus integrálható. Kidolgozásra került egy új térfogatsűrűség-mérés is, amellyel a *proppant-pack* lehet meghatározni különböző alkalmazott zárónyomás mellett.

A kutatás eredménye egy új EGS technológia, amely elősegítheti a további tanulmányokat és előrelépést a megújuló energiaiparban.

4 AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN KÖZZÉTETT PUBLIKÁCIÓK

4.1 Cikkek és kiadványok

Jobbik, A., Lengyel, T. & Pusztai, P. (2015). *Összetett matematikai modell hidraulikus rétegrepsztes optimalizálására*. Műszaki Földtudományi Közlemények, University of Miskolc, Miskolc, 85(1):97-105, ISSN [2063-5508](#)

Pusztai, P. & Lengyel, T. (2015). *A hidraulikus rétegrepsztes gazdasági optimalizációja*. Diáktudomány: A Miskolci Egyetem Tudományos Diákköri Munkáiból, University of Miskolc, Miskolc, 8:38-43, ISSN [2062-0721](#)

Lengyel, T., Pusztai, P. & Jobbik, A. (2016). *An Innovative Method for Hydraulic Fracturing Optimization*. Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2016), University of Debrecen Faculty of Engineering, Debrecen, pp. 302-307, ISBN [978-963-473-944-9](#)

Pusztai, P. & Jobbik, A. (2017). *Micro- És Nanoméretű Pórusterekben Történő Gázáramlás Vizsgálata*. Műszaki Tudomány Az Észak-Kelet Magyarországi Régióban, Elektronikus Műszaki füzetek, Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Nyíregyháza, pp. 435-442, ISBN [978-963-706-435-7](#)

Pusztai, P. & Jobbik, A. (2017). *Rendkívül kis pórusterekben történő gázáramlások vizsgálata*. Műszaki Földtudományi Közlemények, University of Miskolc, Miskolc, Volume 86(2):131-140, ISSN [2063-5508](#)

Pusztai, P. (2017). *Palagázban történő áramlások áttekintése és alkalmazása egy magyarországi ultra magas nyomású és hőmérsékletű (UHPHT) tároló magmintáin keresztül*. Diáktudomány: A Miskolci Egyetem Tudományos Diákköri Munkáiból, University of Miskolc, Miskolc, 10:31-38, ISSN [2062-0721](#)

Pusztai, P. & Jobbik, A. (2018). *A New, Extended Material Balance Equation for Investigation of Different Gas Flow Models*. Tavaszi Szél 2018 Konferencia = Spring Wind 2018: Konferenciakötet I., Association of Hungarian PHD and DLA Students, Budapest, 1:359-368, <https://doi.org/10.23715/TSZ.2018.1>

Pusztai, P. & Jobbik, A. (2019). *Modeling Natural Gas Flow Behaviors in Unconventional, UHPHT Reservoirs with Nanoporous Media*. 13th International Conference on Heat Engines and Environmental Protection Proceedings, BME Department of Energy Engineering, Budapest, pp. 125-131, ISBN 978-963-420-907-2

Pusztai, P. & Koronc, P. (2021). *Modified Approach for Proppant Conductivity Measurement*. Geosciences and Engineering, Miskolc University Press., Miskolc, 9(14):43–59, ISSN [2063-6997](#)

Pusztai, P. & Jobbik, A. (2021). *Investigation of gas flow models in case of micro and nano pore size reservoirs*. Geosciences and Engineering, Miskolc University Press., Miskolc, 9(14):96–115, ISSN [2063-6997](#)

Pusztai, P. (2022): *A New Method for Determining Propped Fracture Permeability*. Abstract Book of the International Congress on Geomathematics in Earth- & Environmental Sciences, and the 22nd Hungarian Geomathematical Congress, Publisher: Pécs Regional Committee of the Hungarian Academy of Sciences, ISBN: [978-963-7068-14-0](#)

Pusztai, P., Koronc, P., Kuncz, M., Jobbik, A. & Fedor, F. (2023). *Semi-analytical approach to the determination of fracture permeability*. Int J Geomath 14, 16. <https://doi.org/10.1007/s13137-023-00227-8>

4.2 Konferencia előadások

Pusztai, P., Lengyel T. & Jobbik, A. (2015). *Hidraulikus rétegrepesztés optimalizálása*. ENERGOExpo Nemzetközi Energetikai Szakkiállítás és Konferencia, Debrecen

Pusztai, P. & Jobbik, A. (2017). *Micro- És Nanoméretű Pórusterekben Történő Gázáramlás Vizsgálata*. Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban, Nyíregyháza

Pusztai, P. & Jobbik, A. (2017). *Modeling Natural Gas Flow Behaviors in Unconventional, UHPHT Reservoirs with Nanoporous Media*. 13th International Heat Engines and Environment Protection Conference, Budapest

Pusztai, P. & Jobbik, A. (2017). *Investigation of gas flow models in case of micro and nano pore size reservoirs*. PULSE - Új kutatási irányok a földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódóan” című szakmai tudományos konferencia, Miskolc

Pusztai, P. & Jobbik, A. (2017). *Investigation of Gas Flow Models in case of Tight Reservoirs*. XXXI. Nemzetközi Olaj- és Gázipari Konferencia, Siófok

Pusztai, P. & Jobbik, A. (2018). *A New, Extended Material Balance Equation for Investigation of Different Gas Flow Models*. Tavaszi Szél 2018 Nemzetközi Multidiszciplináris Konferencia, Győr

Pusztai, P. (2022). *A New Method for Determining Propped Fracture Permeability*. International Congress on Geomathematics in Earth- & Environmental Sciences, and the 22nd Hungarian Geomathematical Congress, Pécs

Pusztai, P. (2022). *Laboratory developments supporting thermal water reinjection technologies 2. Proppant qualification, fracture conductivity measurements*. GINOP-2.2.1-15-2017-00102 "Development of a well completion technology for sustainable and cost-effective reinjection of thermal water", Closing Conference, Pécs

5 HIVATKOZÁSOK

API RP 19C (2008). *Measurement of Properties of Proppants Used in Hydraulic Fracturing and Gravel-packing Operations, 1st Edition*. American Petroleum Institute (API)

Avontuur, P.P.C. & Geldart, D. (1996). *A quality assessment of the Ergun equation*. The 1996 IChemE Research Event/Second European Conference for Young Researchers 1996, 994-996

Carman, P.C. (1937). *Fluid Flow through Granular Beds*. Chemical Engineering Research and Design, 75(Supplement):S32-S48, [https://doi.org/10.1016/S0263-8762\(97\)80003-2](https://doi.org/10.1016/S0263-8762(97)80003-2)

Danko, G., Bahrami, D., Varga, Gy., Baracza, M.K. & Jobbik, A. (2018). *Conceptual Study of a Well-Fracture-Well Type Fluid Circulation System for EGS*. PROCEEDINGS, 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, February 12-14, 2018, [SGP-TR-213](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.06.017)

Erdim, E., Akgiray, Ö. & Demir, I. (2015). *A revisit of pressure drop-flow rate correlations for packed beds of spheres*. Powder Technologies, 283:488-504, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.06.017>

Fahien, R.W. & Schriver, C.B. (1961). *Fundamentals of Transport Phenomena*. Paper presented and Denver meeting of AIChE, in R.W. Fahien (Ed.), McGraw-Hill, New York, 1983 (1961)

Foscolo, P.U., Gibilaro, L.G. & Waldram, A. (1983). *A unified model for particulate expansion of fluidised beds and flow in fixed porous media*. Chemical Engineering Science, 38(8):1251-1260, [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(83\)80045-1](https://doi.org/10.1016/0009-2509(83)80045-1)

Kehrer, P., Orzol, J., Jung, R., Jatho, R. & Junker, R. (2007). *The GeneSys project – a contribution of GEOZENTRUM Hannover to the development of Enhanced Geothermal Systems (EGS) [Das GeneSys-Projekt – ein Beitrag des GEOZENTRUMs Hannover zur Entwicklung von "Enhanced Geothermal Systems" (EGS)]*. Zeitschrift Der Deutschen Gesellschaft Für Geowissenschaften, 158(1):119–132, <https://doi.org/10.1127/1860-1804/2007/0158-0119>

Kurten, H., Raasch, J. & Rumpf, H. (1966). *Beschleunigung eines kugelförmigen Feststoffteilchens im Stromungsfeld konstanter Geschwindigkeit*. Chem. Ing. Tech., 38(9):941-948, <https://doi.org/10.1002/cite.330380905>

Leva, M. (1949). Quoted in: Green, D.W. and Perry, R.H. (Eds.), *Perry's Chemical Engineering Handbook*, Eight edition, Chemical Engineering, 56:115-117, ISBN 10: [0071593136](https://doi.org/10.1016/j.petlm.2015.11.001)

Liang, F., Sayed, M., Al-Muntasheri, G.A., Chang, F.F. & Li, L. (2016). *A comprehensive review on proppant technologies*. Petroleum, 2(1):26-39, <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2015.11.001>

Macdonald, L.F., El-Sayed, M.S., Mow, K. & Dullien, F.A.L. (1979). *Flow through Porous Media-the Ergun Equation Revisited*, Ind. Eng. Chem. Fundamen., 18(3)199-208, <https://doi.org/10.1021/i160071a001>

Meyer, B.A. & Smith, D.W. (1985). *Flow through porous media: comparison of consolidated and unconsolidated materials*. Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals, 24(3):360-368, <https://doi.org/10.1021/i100019a013>

Morcom, A.R. (1946). *Fluid flow through granular materials*. Joint meeting of the Institution of Chemical Engineers with the Chemical Engineering Group, Apartments of the Geological Society, Burlington House, London, pp. 30-43

Rapp, B.E. (2023). *Chapter 32 - Finite element method*. Editor(s): Bastian E. Rapp, In *Micro and Nano Technologies, Microfluidics (Second Edition)*, Elsevier, pp. 701-725, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824022-9.00052-8>.

Rose, H.E. (1945a). *On the Resistance Coefficient-Reynolds Number Relationship for Fluid Flow through a Bed of Granular Material*. ARCHIVE: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 1847-1982 (vols. 1-196), 153:154-168, https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1945_153_020_02

Rose, H.E. & Rizk, A.M.A. (1949). *Further Researches in Fluid Flow through Beds of Granular Material*. ARCHIVE: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 1847-1982 (vols. 1-196), 160:493-511, https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1949_160_047_02

Steinour, H.H. (1944). *Rate of sedimentation. Nonfloculated suspensions of uniform spheres*. Industrial and Engineering Chemistry, 36(7):618-624, <https://doi.org/10.1021/ie50415a005>

Tallmadge, J.A. (1970). *Packed bed pressure drop – an extension to higher Reynolds numbers*. AIChE Journal, 16:1092-1093, <https://doi.org/10.1002/aic.690160639>

Watanabe, H. (1989). *Drag Coefficient and voidage function on fluid flow through granular packed beds*. Int. J. Eng. Fluid Mech., 2:93-108