

MISKOLCI EGYETEM
MIKOVINY SÁMUEL FÖLDTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA
A Doktori Iskola Vezetője:
Prof. Dr. Szűcs Péter
Professor

Kitámasztott Hidraulikus Repedés Vizsgálat
Doktori Értekezés Tézisei

Szerző: LENGYEL TAMÁS
Olajmérnök MSc

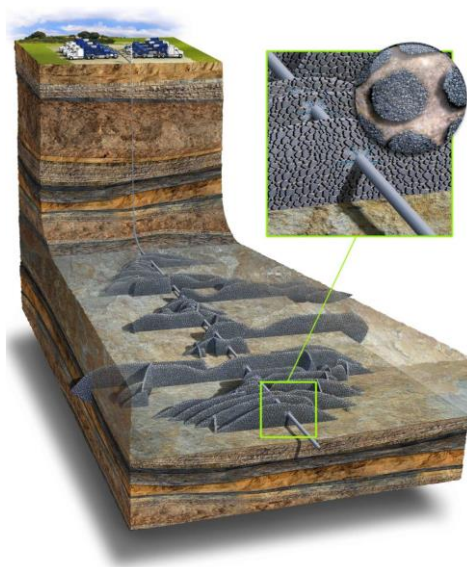
Tudományos Témavezető: PROF. DR. LAKATOS ISTVÁN
Professor Emeritus

Miskolc, 2022

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedekben, valamint a napjainkban jellemző makroökonómiai környezet volatilitása miatt az olajipar kihívásokkal teli időszakokkal szembesül. A 2014-es olajár sokk; a változó, ugyanakkor folyamatosan növekvő olaj és gáz kereslet; a szénhidrogén termékek transzformációja: eltolódás a motorhajtó üzemanyagoktól a magasabb hozzáadott értéket képviselő petrokémiai termékek irányába; valamint az elektromos járművek elterjedése mind olyan tényezők, amelyek egyértelműen a szénhidrogén termelés optimalizálását sürgetik, és amelyek egyre inkább hangsúlyozzák a szénhidrogéntermelést intenzifikáló technológiák jelentőségét.

A hidraulikus rétegrepszítés az egyik leggyakrabban alkalmazott ún. „improved oil recovery” (IOR) módszer, melyet az olajipar upstream divíziójában alkalmaznak, elsősorban nem-konvencionális – kis áteresztőképességű tömött homokkővek, agyagok és márgák – tárolókba fúrt kutak termelékenység indexének (productivity index, PI) növelésére (Denney, 2010). A hidraulikus rétegrepszítés során megnövelik a kúttal hidrodinamikai kapcsolatban álló beáramlási felületet a hagyományos hengerpalást geometriájú beáramlási felülethez képest (Economides & Nolte, 2000). A repesztési műveletet, a gyakorló mérnökök a felszínről vezérlik nagy teljesítményű hidraulikus szivattyúkkal, melyek repesztő fluidumot sajtolnak a kútba azért, hogy a kúttalpon elérjék a réteg repesztési nyomását (formation breakdown pressure, FBP). Az **1. Ábra** mutatja be a hidraulikus rétegrepszítés sematikus ábrázolását. A repesztő fluidum 99 %-ban vizet, 1 %-ban pedig különböző adalékanyagokat tartalmaz, elsősorban azért, hogy megnöveljék a repesztő folyadék dinamikai viszkozitását, ezáltal a fluidum nem kiszűrődik a rétegbe, hanem nyomásemelkedést okoz a kúttalpon, avagy a repesztési kívánt célzónában. Ez a nyomásemelkedés egy bizonyos határértéken (FBP) megrepeszt a kőzetet, és kialakul a repedés a kőzet mechanikai (feszültségi) tulajdonságainak megfelelően.



1. Ábra Hidraulikus rétegrepezítés sémája (Schlumberger, 2021)

Miután megrepedt a réteg, a repesztő fluidomhoz kitámasztó anyagot, proppantot, kevernek. A proppant szemcsés, nagy szilárdságú anyag, mely a fluidummal együtt a repedésbe jut és megakadályozza, hogy a szivattyúzás után a réteg visszazáródjon (Barree & Conway, 1995).

Kutatásaim során azt vizsgáltam, hogy a szivattyúzás után –, amikor a repedésben megszűnik a többlet nyomás, amely azt nyitva tartotta, – a kőzet záródási nyomása milyen hatással van a proppant szemcsék alakváltozására, azaz, hogyan deformálódik, és ágyazódik be a kőzetbe a kitámasztó anyag. A vizsgált jelenséget a **2. Ábra** prezentálja.

A hidraulikus rétegrepezítési művelet egyik legfontosabb indikátora a kialakított repedés konduktivitás, amely a repedés szélességének és a repedésben elhelyezett proppant ágy átteresztőképességének a szorzata. A kialakult konduktivitást alapvetően befolyásolják a proppant szemcsék, valamint a proppant és a kőzet felülete között, a kőzetzáródási nyomás hatására fellépő kölcsönhatások, amelyek jelentékeny mértékben csökkenthetik a kialakított repedés vezetőképességét. A repedés konduktivitást befolyásoló tényezők vizsgálata egy meglehetősen összetett feladat, mert mind a műveleti specifikációk (elsősorban a besajtott proppant sajátságok), mind a tároló tulajdonságok hatással vannak a repesztés végkimenetelére. A proppant mérete, szemcseméret-eloszlása, a proppant és a formáció rugalmassági modulusza és Poisson-tényezője, valamint a záródási nyomás együttesen befolyásolják a proppantok deformációját és kőzetbe való ágyazódását, melyek végeredményben jelentősen csökkenthetik

a repedés vezetőképességét, ezáltal pedig az olaj- és gáztermelést (Li' és Társai, 2015). Ezért elengedhetetlen, hogy a lehető legátfogóbb mértékben modellezzük a fent leírt jelenséget.



2. Ábra Kitámasztott repedés illusztrációja (Terracina & Harper, 2018)

Ennélfogva, kutatómunkám során kifejlesztettem egy, a tudomány jelen állása szerint legkorszerűbb módszert a kitámasztott repedés in-situ modellezésére a DEM-FEM-CFD (Discrete Element Method – Finite Element Method – Computational Fluid Dynamics) numerikus megoldások egyirányú kapcsolásával, mely képes számításba venni a jelenséget alapvetően meghatározó legfontosabb faktorokat, úgy mint a repedés geometriát; a proppant szemcsealakját; a proppant méretét és szemcseméret-eloszlását; a nem-egyenletes proppant elhelyezkedést; a deformációt; a beágyazódást; és a proppant ágy által létrehozott porózus közegben való áramlást. A kutatási eredmények és a Ph.D. disszertáció alkalmazási lehetősége elsősorban a kitámasztott repedések mechanikájának átfogóbb megismerése, amely segítséget nyújthat az olajiparban dolgozó mérnökök számára a hatékonyabb repesztési művelet tervezésében.

1.1. Célkitűzés és eredmények

A hidraulikus rétegrepszttéssel kapcsolatos kutatásaimat 2013-ban kezdtem meg, majd 2016-tól helyeztem a kutatás középpontjába a repedés konduktivitásának a vizsgálatát. A korábbi eredmények alapján a kutatási irány a kezdetektől jól-meghatározott volt: a repedés mechanikájának in-situ vizsgálata „microscale” környezetben annak érdekében, hogy a repedésben elhelyezett proppantok viselkedését az irodalomban fellelhető módszereknél kifinomultabban vizsgálhassam.

A kutatási időszak első periódusát egy átfogó irodalomkutatás jellemezte, amely végsősoron egyértelmű kutatási perspektívákkal és célkitűzésekkel szolgált. Az irodalomkutatás során átfogó képet kaptam a repedés konduktivitást vizsgáló kísérleti, analitikus, fél-analitikus és numerikus megközelítésekről, és ezek alapján, az alábbi célokat tűztem ki:

- a konduktivitást befolyásoló tényezők, valamint a tényezők relevanciájának meghatározását analitikus érzékenységi vizsgálatok elvégzésével.
- egy innovatív numerikus módszer kidolgozását a kitámasztott repedések mechanikájának a gyakorlat számára megfelelő pontossággal történő leírására: egy kapcsolt numerikus modell megalkotását, amely többek között integrálja a repedés és proppant geometriáját, a proppant szemcseméretét és szemcseméret-eloszlását, a proppant szabálytalan elrendeződését a repedésben, a deformációt, a beágyazódást és a repedésben fellépő áramlást.
- az egyirányú kapcsolt modell (One-way coupling method) szimulációs eredményeinek összehasonlítását az analitikus módszerek eredményeivel, beleértve az új tudományos következtetések levonását.
- a kapcsolt numerikus modell validálását az iparban használt API szabványra épült kísérletek elvégzésével.

A kutatás első fázisában használt analitikus modell világosan megmutatta a kitámasztott repedések viselkedésének fizikai hátterét a deformáció, beágyazódás és ezek összegének, a repedés szélesség csökkenés meghatározásának figyelembe vételével. Az analitikus modell végeredményeként, a Hertz féle kontakt elmélet és a Kozeny-Carman féle csőkötegmodell kombinációjával a repedés konduktivitás is számolható. Az analitikus modell segítségével számos érzékenységi vizsgálatot (sensitivity test) végeztem el, melyek megmutatták a legfontosabb, konduktivitást befolyásoló tényezőket, amelyekre a későbbiekben, jelentősebb hangsúlyt volt szükséges fektetni.

Az általam kidolgozott egyirányú kapcsolt modell sikeresen integrálja a Diszkrét Elemes és Végeselemes numerikus módszerek előnyeit a kitámasztott hidraulikus repedések viselkedésének in-situ leírásához. A DEM segítségével modellezhető a proppant szemcsék gömbtől eltérő alakja, a szemcsés halmaz szemcseméret-eloszlása, valamint a proppant szemcsék random elhelyezkedése a repedésben. A FEM Static Structural moduljával

meghatározható a proppant szemcsékben fellépő szabálytalan feszültségeloszlás, a proppant szemcsék deformációja, valamint a kőzetbe való ágyazódása. A FEM CFD (Computational Fluid Dynamics) szolvere pedig megfelelő megoldást nyújt a kialakított proppant „pack” áramlástan vizsgálatára. A kapcsolt numerikus modell szimulációi alapján levont konzekvenciák új tudományos eredményekkel szolgáltak.

A numerikus modell eredményei összehasonlításra kerültek az API RP-19D laborkísérleteivel, melyet a Pécs melletti GEOCHEM Kutatóintézetben végeztem el. Az eredmények megfelelő egyezést mutattak a numerikus modell validációjához, így a tudományos következtetések alapjául szolgáló modell helyessége igazoltnak tekinthető.

A kutatás során az alábbi, hagyományos tudományos módszereket használtam:

- Irodalomkutatás a perspektívák beazonosításához.
- Analitikus modell vizsgálata a kutatási célok definiálásához.
- Numerikus modellfejlesztés a jelenség leírására.
- Laboratóriumi kísérletek elvégzése a létrehozott numerikus modell validálásához.

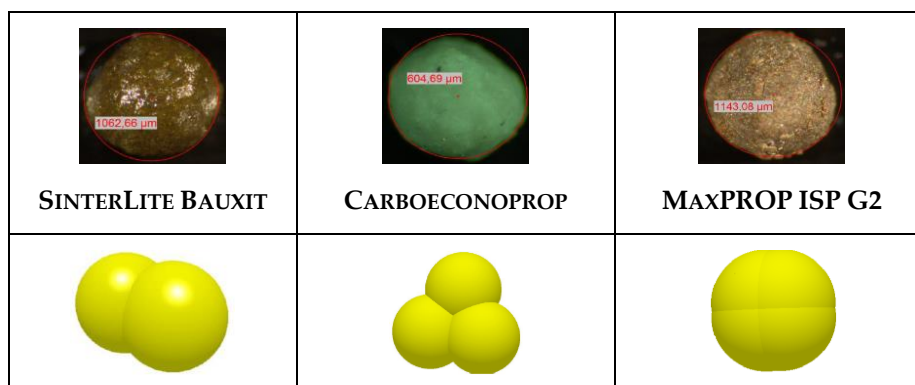
Az új tudományos eredmények folyamatosan publikásra kerültek, ezeket a **2. és 3. fejezet** mutatja be részletesen.

2. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

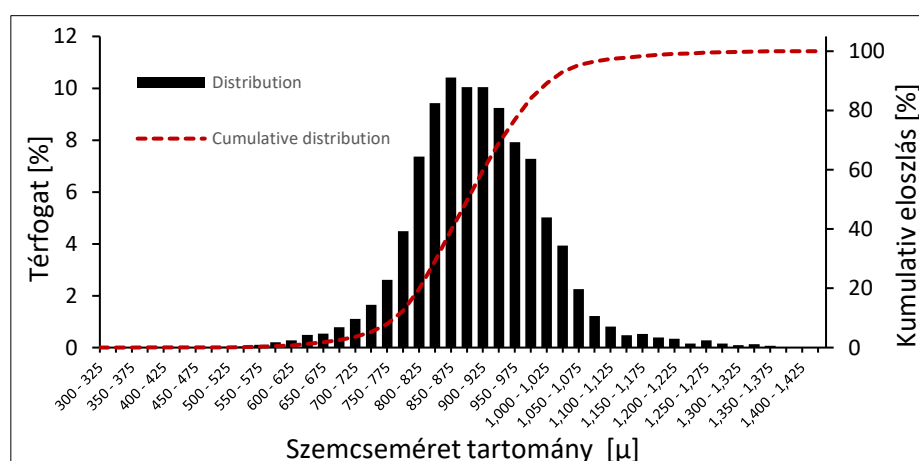
A kutatómunkám során új tudományos eredményeket értem el, melyeket többek között a Ph.D. Értekezésemben tettem közzé. Az alábbi fejezet tézisek formájában foglalja össze a tudományos eredményeket.

2.1. #1 Tézis

Az általam létrehozott Diszkrét Elemes Modell gravitációs eljárása szükségszerűen leírja a proppant szemcsék random elhelyezését a repedésben, beleértve a tangenciális erőket, azaz a szemcsék között fellépő surlódást, valamint a kollíziós kölcsönhatásokat. Ezenfelül, a DEM modellben létrehoztam a gömbtől eltérő geometriát a proppant szemcsék szabálytalan alakjának a leírására (**3. Ábra**), valamint beépítettem a modellbe a szemcsés halmazt jellemző szemcseméret-elosztást (**4. Ábra**). Végezetül, meghatároztam a proppant mikromechanikai tulajdonságait (**1. Táblázat**) a kifolyásvizsgálat kalibrációs eljárásával.



3. Ábra Elektronmikroszkóppal készült proppant szemcse képek és „clumpok”



4. Ábra 16/30 Sinterlite proppant szemcseméret eloszlása

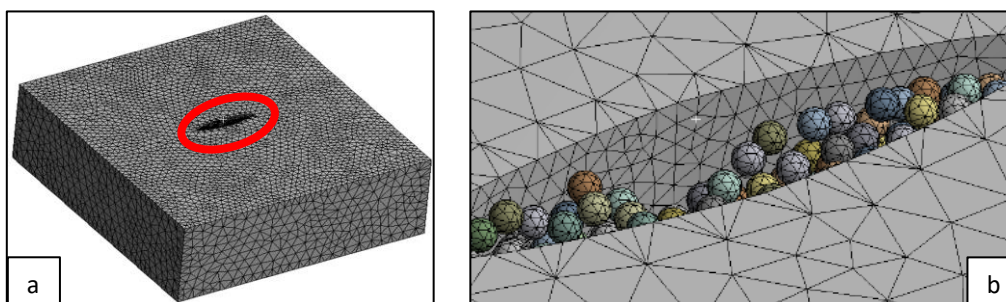
1. Táblázat 16/30 Sinterlite proppant mikromechanikai paramétere

Paraméter	Proppant	Siló
Poisson-tényező, ν [-]	0,25	0,3
Young modulus, E [Pa]	$4,13 \cdot 10^{10}$	-
Sűrűség, ρ_e [kg/m ³]	2800	5100
Súrlódási szög, φ [°]	10	1
Gördülési súrlódás koeff., f [m]	0,0001	0

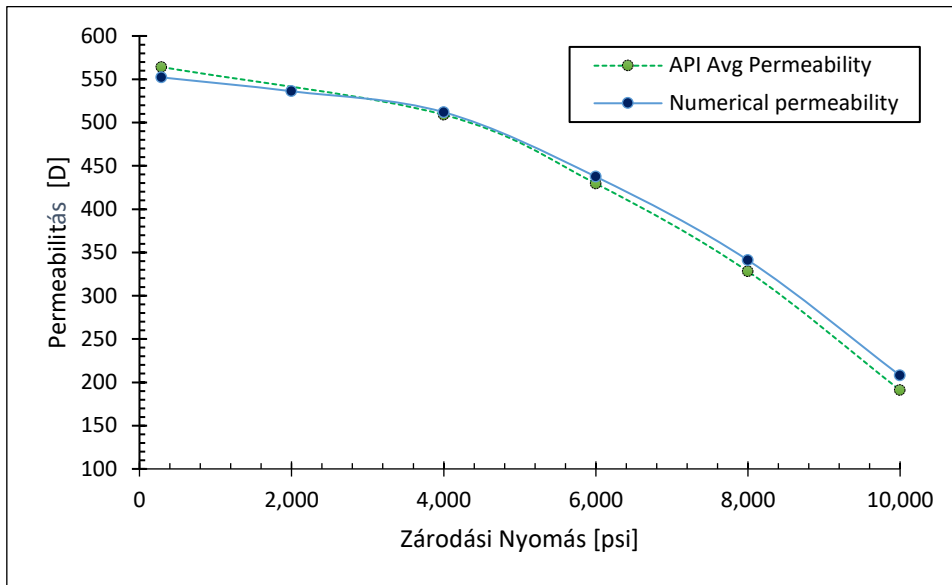
2.2. #2 Tézis

Létrehoztam egy komplex Végeeselemes modellt (Structural and Computational Fluid Dynamics) a proppant szemcsék deformációjának és kőzetbe való ágyazódásának a leírására (5. Ábra), valamint a porózus proppant ágyban fellépő áramlás jellemzésére.

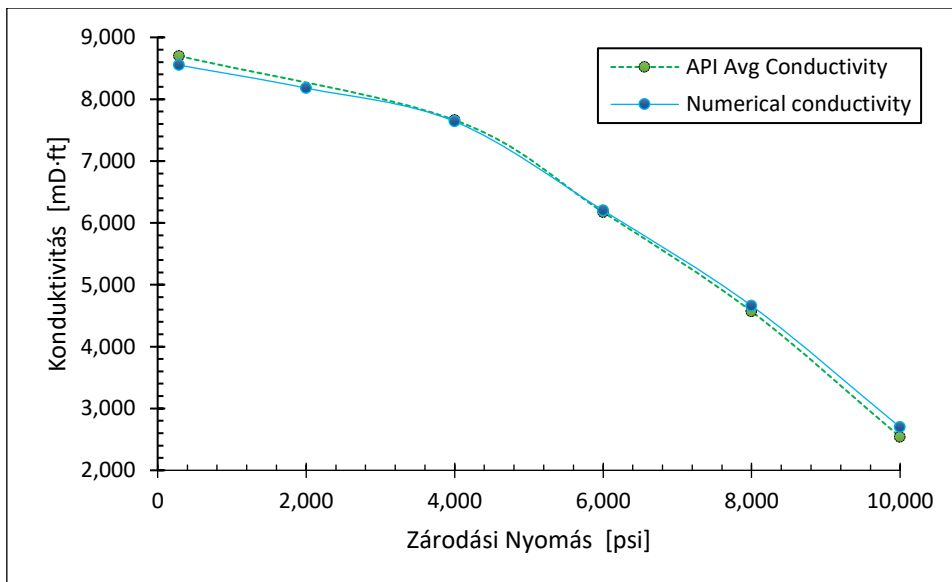
Az API RP 19D laborkísérlet segítségével validáltam a mechanikai és áramlástanai numerikus modellt. A 6. Ábra és 7. Ábra megfelelően jó egyezést mutat a vizsgálati tartományban a mért, és szimulált eredményekre vonatkozóan, így az új kapcsolt numerikus módszerrel, a hidraulikus rétegrepszítés legfontosabb paramétere, a repedés konduktivitás, meghatározható.



5. Ábra A formáció (a) és a proppant (b) numerikus hálózása



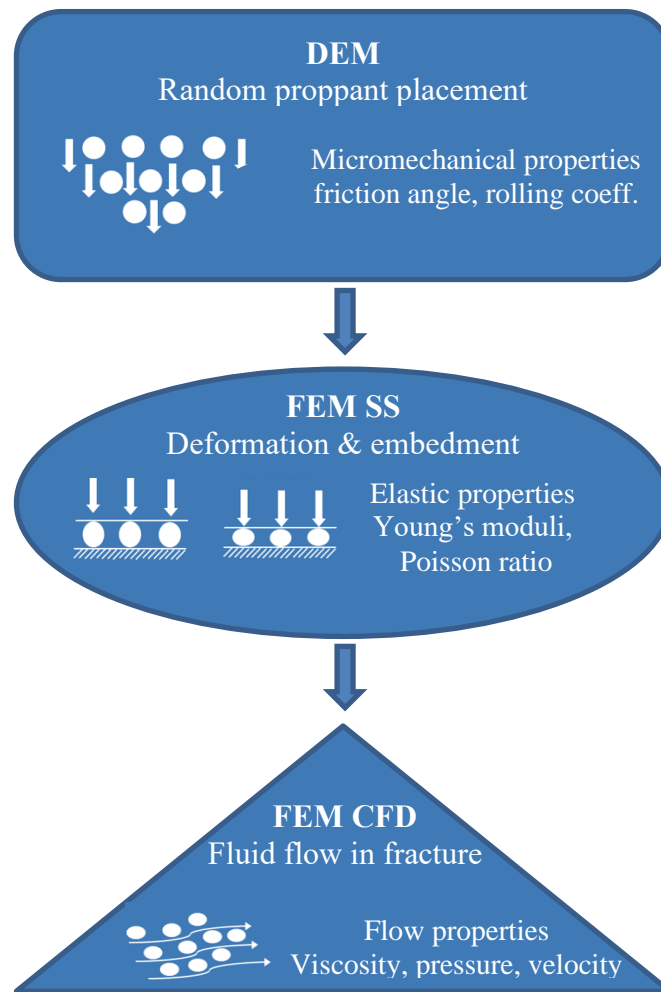
6. Ábra API + numerikus permeabilitás



7. Ábra API + numerikus konduktivitás

2.3. #3 Tézis

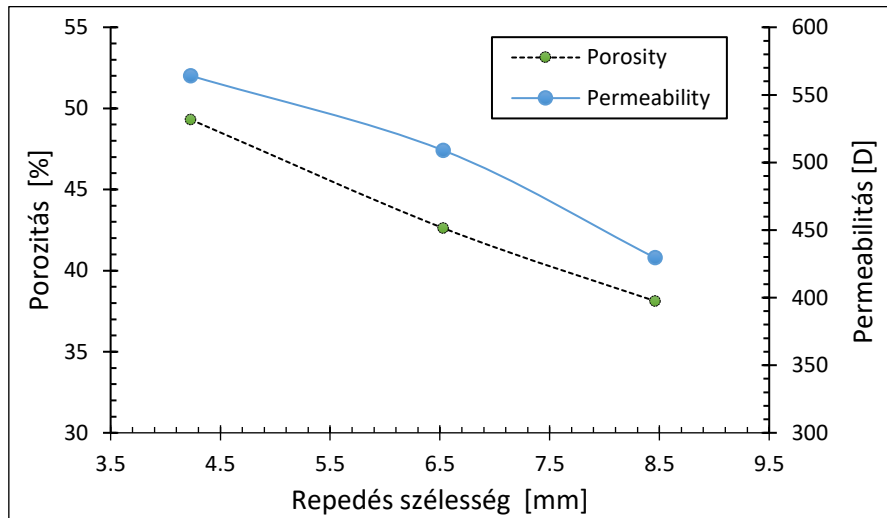
Az általam fejlesztett kapcsolt numerikus módszer (One-way coupling model - **8. Ábra**) megfelelő határfelületet alkot a DEM-FEM-CFD szimulációk fúziójához, ezáltal lehetővé teszi a kitámasztott repedések komplex numerikus vizsgálatát. A One-way coupling módszer a kutatás elsődleges tudományos eredménye, amely a tudomány jelen állása szerint úttörő lehet a gyakorló mérnökök számára.



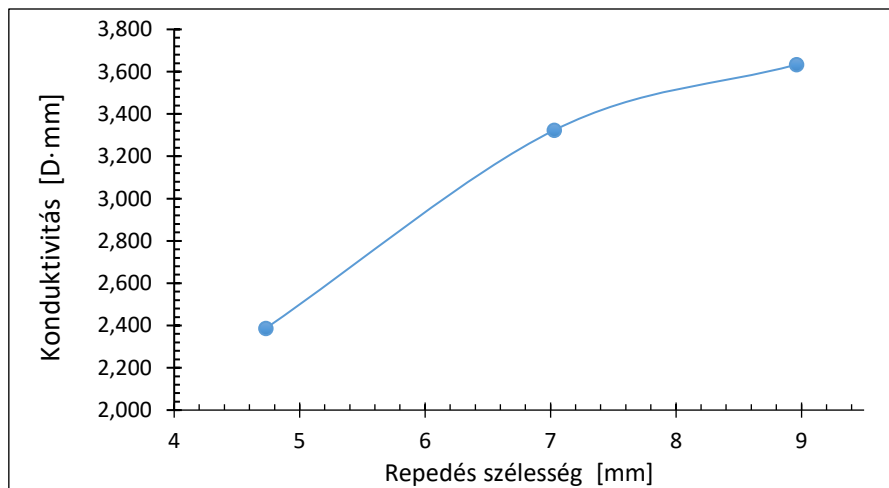
8. Ábra Kapcsolt Numerikus Modell folyamatábrája (eredeti)

2.4. #4 Tézis

A kapcsolt numerikus módszer szimulációi alapján megállapítottam, hogy a repedés szélesség növelésével csökken a repedésben elhelyezett proppant halmaz porozitása, ezáltal szükségszerűen a permeabilitása is (9. Ábra), míg a konduktivitás moderáltan növekszik (10. Ábra). A porozitás csökkenés oka a proppant szemcsék rendezettsége, azaz minél szélesebb a repedés, annál nagyobb a szemcsék rendezettségi foka, ezáltal pedig redukálódik a szemcsék közötti abszolút és effektív pórustér.



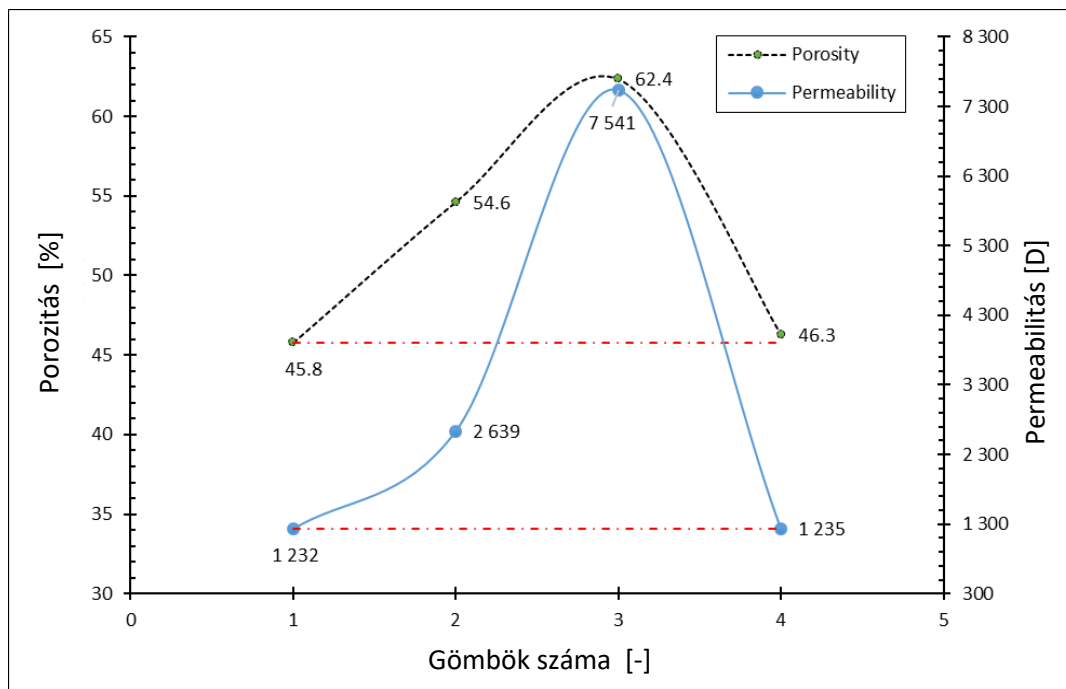
9. **Ábra** Porozitás és permeabilitás a repedés szélesség függvényében



10. **Ábra** Konduktivitás a repedés szélesség függvényében

2.5. #5 Tézis

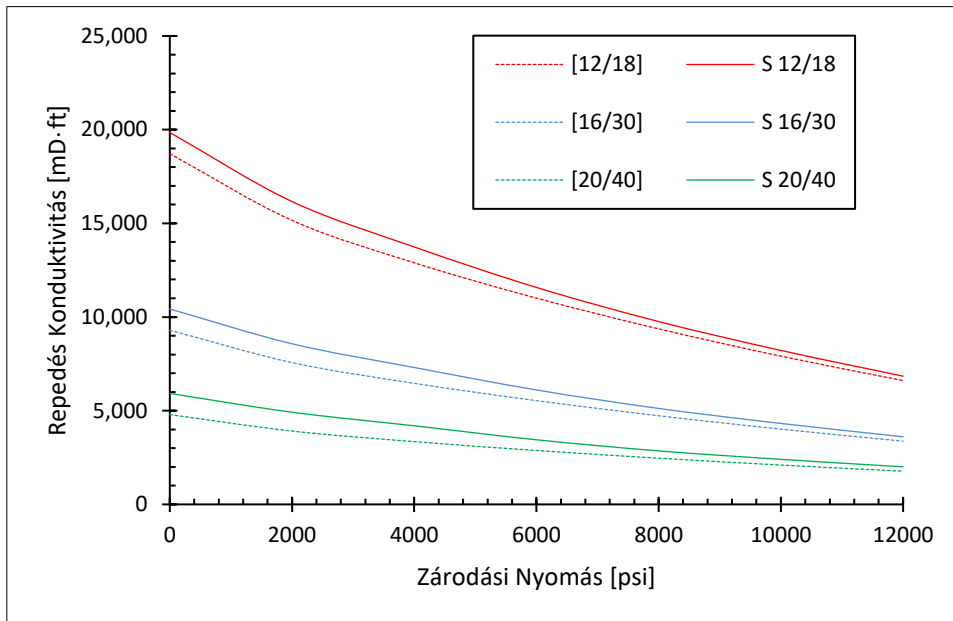
Megmutattam a „clumpok” alkalmazásának (11. **Ábra**) a lehetőségét a proppant szemcsék szabálytalan alakjának a figyelembevételére (3. **Ábra**). Számításba véve a “clump” konfigurációkhoz tartozó szimulációk számítási kapacitás igényét, valamint az alkalmazás tényleges hozzáadott értékét, azaz a gömb szemcse modell eredményektől való eltérést, a jelenség leírására a szabályos gömb geometria megfelelő eredményt ad.



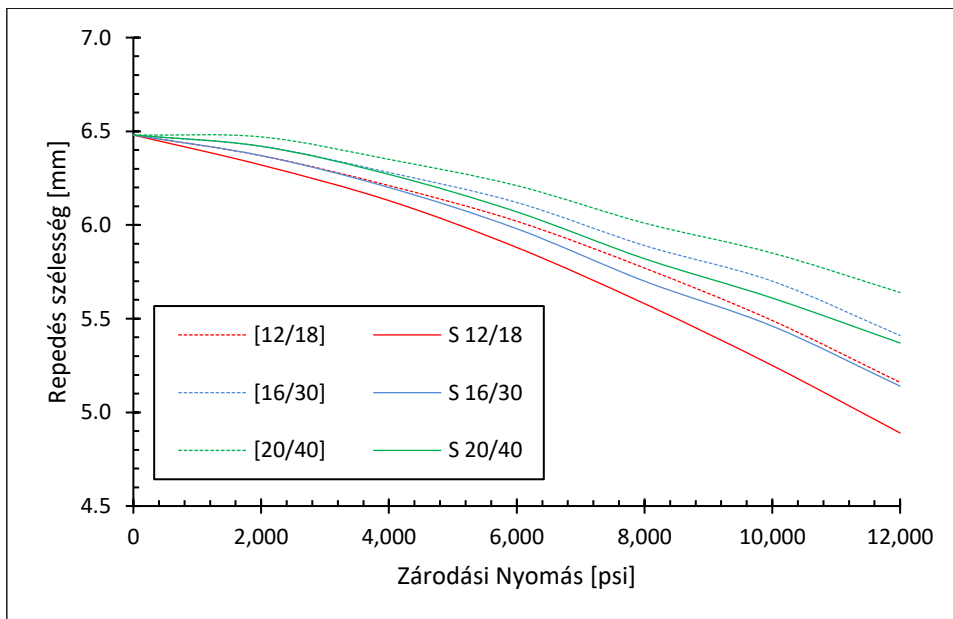
11. Ábra Clumpok porozitása és permeabilitása

2.6. #6 Tézis

A kapcsolt numerikus módszer eredményei alapján bizonyítottam, hogy a proppant halmaz szemcseméret eloszlása nagyobb hatással van a repedés porozitására és permeabilitására, mint maga a szemcse geometriája. Ez a megállapítás megerősíti a geológiai és közettani elméletet, miszerint minél jobban osztályozott a szemcsehalmaz, annál magasabb a porozitása. Nem utolsó sorban, a vizsgálat megmutatta, hogy a kevésbé osztályozott szemcsehalmaz – azaz a magas szemcseméret tartomány varianciával rendelkező halmaz - nagyobb kitámasztást eredményez, azaz kevésbé érzékeny a deformációra. A **12. Ábra** és **13. Ábra** összefoglalja az eredményeket, ahol a *[mesh]* jelöli a szemcseméret-eloszlással jellemzett halmazt (szaggatott vonal), míg *S mesh* mutatja az egyforma méretű szemcsékből álló halmazt (folytonos vonal).



12. Ábra Repedés konduktivitás



13. Ábra Repedés szélesség

2.7. #7 Tézis

Az Értekezésben bemutatott kutatás megmutatta a Hertz féle kontakt teóriából származtatott analitikus modell (Li' és Társai, 2015) korlátait, ezek alapján a következő következtetéseket vontam le:

- A proppant szemcsék egyforma, szabályos gömb alakja eliminálja a szemcsés anyag nem-elhanyagolható, szemcseméret eloszlásból eredő hatásait.
- Az analitikus modell nem veszi figyelembe a szemcsék között fellépő tangenciális erőket, azaz a súrlódási kölcsönhatásokat sem (tapadási, csúszási, gördülési).
- A kontaktfelületet körként értelmezi, holott a deformáció hatására az ellipszoid.
- Az analitikus modell infinitezimális deformáción alapul, és nem veszi figyelembe a nem-lineáris alakváltozást.
- Az áteresztőképességet a Kozeny-Carman féle csőkötegmodell alapján számítja, mely csak lamináris áramlás esetén használható.
- Legkompaktabb, tetrahedrális szemcseelrendeződést feltételez, mely alapján a maximum elérhető porozitás 0,259; és amely a legtöbb esetben nem helytálló.

2.8. Gyakorlati alkalmazás

A Ph.D Értekezésben közzétett kutatás megmutatta a DEM-FEM-CFD numerikus kapcsolat alkalmazhatóságát a hidraulikus rétegrepesztéssel kapcsolatos multidiszciplináris folyamatok modellezésére, valamint kiemelte a repedésben fellépő összetett kölcsönhatásokért felelős tényezőket, különös tekintettel a proppant szemcsékre, a kőzet keménységre és a záródási nyomásra. A kutatás eredményeképp mélyebb és részletesebb képet kapunk a proppant deformáció és beágyazódás fundamentális megértéséhez. Ennek eredményeképp, a kutatás hozzájárulhat a hidraulikus rétegrepesztést optimalizáló alkalmazott tudományok fejlődéséhez.

Az új modellezési technika, az egyirányú kapcsolt numerikus módszer, segíti a gyakorló mérnököket számos, nem-elhanyagolható paraméter modellbe való integrálásában – melyeket a korábbi modellek nem képesek figyelembe venni – , ezáltal pedig jelentős alkalmazási potenciált kínál a kitámasztott repedések széleskörű vizsgálatához. A létrehozott módszer alapkutatási eredménynek értékelhető, mely további perspektívákat hordoz más részterületek vizsgálatára, pl.: a turbulens áramlás és a proppant geometria inerciára kifejtett hatásának vizsgálatát.

3. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN KÖZZÉTETT PUBLIKÁCIÓK

3.1. Cikkek és kiadványok

Pusztai, P., Lengyel T. (2015): A Hidraulikus Rétegrepszítés Gazdasági Optimalizációja, Diáktudomány c. kiadvány, VIII. kötet, ISSN 2062-07-21, Miskolc, 2015.

Jobbik, A., Lengyel, T., Pusztai, P. (2015): Összetett Matematikai Modell Hidraulikus Rétegrepszítés Optimalizálására, Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Közlemények Kőolaj és Földgáz kötet 85, pp. 97-105., ISSN 2063-5508, Miskolc, 2015.

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

Lengyel, T., Jobbik, A. (2017): Kombinált Analízis Rendszer a Proppant Kiválasztás Optimalizálására, Műszaki Tudomány Az Észak-Kelet Magyarországi Régióban, Elektronikus Műszaki füzetek, ISBN 978-963-7064-35-7, Nyíregyháza, 2017.

Lengyel, T. (2017): Repedés Konduktivitást Befolyásoló Tényezők Vizsgálata, Diáktudomány c. kiadvány, X. kötet, ISSN:2062-07-21, Miskolc, 2017.

Lengyel, T., Jobbik, A. (2020): Combined Analysis System for Proppant Selection in Aspect of Fracture Conductivity, Geosciences and Engineering, a Publication of the University of Miskolc (Miskolc University Press). HU ISSN 2063-6997, Miskolc, 2020.

Lengyel T., Jobbik, A. (2017): Integrated Model for Proppant Selection Optimization, Proceedings of 13th International Conference on Heat Engines and Environmental Protection, ISBN: 978-963-420-907-2, Budapest, 2017.

Lengyel, T., Jobbik, A. (2017): Proppant Optimalizálás a Repedés Konduktivitást Befolyásoló Tényezők Figyelembe Vételével, Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Közlemények, ISSN 2063-5508, Miskolc, 2017.

Lengyel, T., Jobbik, A., Tóth, A. (2018): An Analytical Approach for Propped Fracture Conductivity, 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference – SGEM 2018 Conference Proceedings, Volume 18, Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Issue 1.4, ISBN 978-619-7408-38-6, ISSN 1314-2704, DOI: 10.5593/sgem2018/1.4, Sofia, Bulgaria, 2018.

Lengyel, T. (2018): “Analytical Approach for Propped Fracture Conductivity”, Conference Proceedings of Spring Wind 2018 Conference, ISBN 978-615-5586-31-6, DOI: 10.23715/TSZ.2018.1, Budapest, 2018.

Pasztor, A., Lengyel, T. (2019): Method to calculate apparent permeability of hydraulic fractures. International Multidisciplinary Scientific Geoconference 19, 19(1.2), pp. 985-992., ISBN: 978-619-7408-77-5, ISSN: 1314-2704, Sofia, Bulgaria, 2019.

Varga, A., Lengyel, T., Safranyik, F. (2020): Determination of micromechanical parameters of proppant particles, International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering, (2349-2163): 7 2 pp 15-21, 2020

Lengyel, T., Varga, A. (2020): Proppant szemcsék kifolyásvizsgálata, Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Közlemények, ISSN 2063-5508, Miskolc, 2020.

Lengyel, T., Varga, A. (2021): Proppant szemcsék mikromechanikai paramétereinek meghatározása, Mérnöki és Informatikai Megoldások, <https://doi.org/10.37775/EIS.2021.1.>, 2021

Lengyel, T.; Varga, A.; Safranyik, F.; Jobbik, A. (2021): Coupled Numerical Method for Modeling Propped Fracture Behavior. *Appl. Sciences*. 2021, 11, 9681. <https://doi.org/10.3390/app11209681>

3.2. Konferencia előadások

Numerical Modeling of Proppant Deformation and Embedment, 5th ICSTR Singapore – International Conference on Science & Technology Research, Singapore, 26-27 March, 2021

Modeling Proppant Deformation and Embedment, 23rd International Conference on Multidisciplinary Studies "Resilience for Survival", Cambridge, 30-31 July 2020

Apparent Permeability of Fractures, 6th Annual Student Energy Congress – ASEC 2019, SPE Student Chapter, University of Zagreb, Zagreb, 2019

Analytical Approach for Propped Fracture Conductivity, Tavaszi Szél Konferencia, Győr, 2018

An Analytical Approach for Propped Fracture Conductivity, 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference – SGEM 2018 Conference, Sofia, 2018

Combined Analysis System for Proppant Selection in Aspect of Fracture Conductivity, XXXI. Nemzetközi Olaj- és Gázipari Konferencia, Siófok, 2017

An Innovative Method for Hydraulic Fracturing Optimization, 4th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering, Debrecen, 2016

Investigation of parameters influencing fracture conductivity including proppant pack properties and rock mechanical characteristics, „Új kutatási irányok a földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódóan” című szakmai tudományos konferencia, Miskolc, 2017

Barents Sea – Eastern Finnmark Platform, AAPG - Imperial Barrel Award, Prague, 2017

Integrated Model for Proppant Selection Optimization, 13th International Heat Engines and Environment Protection Conference, Budapest, 2017

Kombinált Analízis Rendszer a Proppant Kiválasztás Optimalizálására, Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban, Nyíregyháza, 2017

4. REFERENCES

- Barree, R., Conway, M. (1995): Experimental and Numerical Modeling of Convective Proppant Transport (includes associated papers 31036 and 31068). *J. Pet. Technol.* 1995, 47, p. 216–222, <https://doi.org/10.2118/28564-pa>.
- Barree, R., Cox, S., Barree, V., Conway, M. (2003): Realistic Assessment of Proppant Pack Conductivity for Material Selection. *Soc. Pet. Eng.*, <https://doi.org/10.2118/84306-ms>.
- Cooke, C.J. (1973): Conductivity of Fracture Proppants in Multiple Layers. *J. Pet. Technol.* 1973, 25, p. 1101–1107, <https://doi.org/10.2118/4117-pa>.
- Denney, D. (2010): Thirty Years of Gas-Shale Fracturing: What Have We Learned? *J. Pet. Technol.* 2010, 62, p. 88–90, <https://doi.org/10.2118/1110-0088-jpt>.
- Economides, M., Nolte, K. (2000): *Reservoir Stimulation*, 3rd ed. (John Wiley and Sons: Hoboken, NJ, USA, 2000) ISBN 978-047-149-192-7
- Fredd, C., McConnell, S., Boney, C., England, K. (2000): Experimental Study of Hydraulic Fracture Conductivity Demonstrates the Benefits of Using Proppants. *Soc. Pet. Eng.* 2000, <https://doi.org/10.2118/60326-ms>.
- Huitt, J.L., McGlothlin, B.B. (1958): The Propping of Fractures in Formations Susceptible to Propping-sand Embedment, Paper presented at the spring meeting of the Pacific Coast District, Division of Production, Los Angeles, California, May, 1958. SPE-58-115-MS. <http://dx.doi.org/10.2118/58-115-MS>.
- Lehman, L.V., Parker, M.A., Blauch, M.E., Haynes, R., Blackmon, A. (1999): Proppant Conductivity—What Counts and Why. *Soc. Pet. Eng.*, <https://doi.org/10.2118/52219-ms>
- Li, K., Gao, Y., Lyu, Y., Wang, M. (2015): New Mathematical Models for Calculating Proppant Embedment and Fracture Conductivity. *SPE J.*, 20, p. 496–507, <https://doi.org/10.2118/155954-pa>.
- McDaniel, G.A., Abbott, J., Mueller, F.A., Mokhtar, A., Pavlova, S., Nevvonen, O., Parias, T., Alary, J.A. (2010): Changing the Shape of Fracturing: New Proppant Improves Fracture Conductivity. *Soc. Pet. Eng.*, <https://doi.org/10.2118/135360-ms>.
- Milton-Taylor, D., Stephenson, C., Asgian, M. (1992): Factors Affecting the Stability of Proppant in Propped Fractures: Results of a Laboratory Study. *Soc. Pet. Eng.*, <https://doi.org/10.2118/24821-ms>.
- Peard, N., Macaluso, M., Griffin, M., Andress, R., Callanan, M. (1991): Improved Fracturing Techniques Increase Productivity in the AWP (Olmos) Field. *Soc. Pet. Eng.* <https://doi.org/10.2118/21646-ms>.
- Roodhart, L., Kulper, T., Davies, D.R.K. (1988): Proppant-Pack and Formation Impairment during Gas-Well Hydraulic Fracturing. *SPE Prod. Eng.*, 3, p. 438–444, <https://doi.org/10.2118/15629-pa>.
- Weaver, J.D., Rickman, R.D., Luo, H. (2008): Fracture-Conductivity Loss Due to Geochemical Interactions between Manmade Proppants and Formations. *Soc. Pet. Eng.*, <https://doi.org/10.2118/118174-ms>.