

LÉGSZÁRÍTÓ PATRONOK PORÓZUS KÖZEGÉBEN KIALAKULÓ ÁRAMLÁSOK SZIMULÁCIÓJA ÉS MODELLEZÉSE NYÍLT FORRÁSKÓDÚ SZOFTVERKÖRNYEZETBEN

SIMULATION AND MODELING OF FLOWS IN POROUS MEDIA OF AIR DRYER CARTRIDGES USING AN OPEN-SOURCE SOFTWARE ENVIRONMENT

Balogh Miklós, *Phd, adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Áramlástan Tanszék, baloghmi@ara.bme.hu*

Zádeczki Zalán, *BSc hallgató, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Energetikai mérnöki alapszak, zadeczki.zalan@gmail.com*

ÖSSZEFOGLALÁS

A Knorr-Bremse által támogatott kutatásaink hosszú távú célja a pneumatikus fékrendszerekben található légszárító patronok optimalizálása. A munka kezdeti szakaszában a légszárító berendezések porózus közegének CFD szimulációs módszertanát fejlesztettük ki. Ezt nyílt forráskódú szoftverkönyezetben valósítottuk meg az OpenFOAM CFD programcsomag használatával.

ABSTRACT

The long-term goal of our research project, supported by Knorr-Bremse, is to optimize air-drying cartridges of pneumatic brake systems. In the initial phase of our work, a CFD simulation methodology is developed for the porous media of air dryers. The developments were implemented in a fully open-source software environment using the OpenFOAM CFD toolbox.

1. BEVEZETÉS

A vasúti járművek megbízható és biztonságos működése szempontjából kiemelten fontos a fékrendszer elemeinek megfelelő kialakítása. A Knorr-Bremse több mint 100 éves tapasztalattal rendelkezik az ilyen rendszerek fejlesztésében, tervezésében és gyártásában. A légfékrendszerek egyik fontos eleme a légszárító berendezés, amely abszorpciós vízmegkötéssel, majd az abszorpciós közeg regenerálásával távolítja el a vizet a sűrített levegő rendszerből. A légszárító patronban található granulátum porózus szerkezetének köszönhetően nagy mennyiségű vízpára

megkötésére képes, így a belőle kilépő száraz levegőben még annak jelentős lehűlése esetén sem lép fel kondenzáció. A patronok optimális kialakításának meghatározása igen fontos feladat, amelyben hasznos segítséget nyújthatnak a numerikus áramlástani szimulációk eredményei. A Knorr-Bremse Vasúti Jármű Rendszerek Hungaria Kft. és a BME Áramlástan Tanszéke közötti együttműködés célja az, hogy numerikus szimulációk segítségével jobban megértsük a légszárító patronban kialakuló áramlások sajátosságait, támogatva az optimális kialakítást. Az ilyen kialakítás hatékonyabb működést, kisebb méretet, ezáltal olcsóbb berendezést eredményez, a megbízhatóság megőrzése mellett. A kutatás során kiemelt figyelmet fordítunk a Knorr-Bremse szakemberei által kidolgozott, ún. *snowstorm* patronöltési módszer [1] hatékonyságának vizsgálatára. Ez az eljárás nem csupán a gyártást egyszerűsíti le, de a betöltött vízmegkötő granulátum optimális elrendezését is biztosíthatja. Mivel a vízmegkötő (disszókáns) szemcsék közötti pórusokban kialakuló áramlások numerikus szimulációja igen számításgépes feladat, ezért azt csak nagyobb teljesítményű számítógépeken, sok szálon párhuzamosítva lehet azt megvalósítani. Kereskedelmi CFD szoftverek alkalmazása esetén a párhuzamosítás során alkalmazott számítási szálak számával a licenc költségek is emelkednek, ezért döntöttünk a nyílt forráskódú OpenFOAM CFD programcsomag használatára mellett. A forgalomban lévő kereskedelmi CFD szoftvercsomagok magas licenc-költségeivel szemben az OpenFOAM tetszőleges számú processzor szálon is ingyenesen használható, szabadon módosítható és testre szabható. Használatában és fejlesztésében is sok éves tapasztalattal

rendelkezünk. Megfelelő számítási kapacitás birtokában ez a szoftvercsomag lényegesen nagyobb kutatási potenciállal ruházta fel használoit, mint a kereskedelmi szoftverek. A költség-hatékonyság érdekében a vizsgálatokhoz szükséges elő- és utófeldolgozási lépéseket is nyílt-forráskódú környezetben és eszközökkel valósítottuk meg.

2. MÓDSZERTAN

Az bevezetőben megfogalmazott céljainknak megfelelően kidolgoztuk a légszárító berendezésekben található szárítópatronok CFD szimulációs módszertanát, amely segítségével a későbbiekben akár az egész légszárító berendezés szimulációja is megvalósítható. A következőkben ezt a módszertant tekintjük át, amelynek lépései két nagyobb egységbe oszthatók. Az elsőben nagy felbontású, pórus léptékű vizsgálatokat (számítás sorozatokat) végzünk, a másodikban pedig ezek eredményeire építve egy nagyobb skálán használható modellt alkotunk. A szárítópatron töltetének (10^5 - 10^6 db szemcse) teljes pórusszerkezete numerikusan nem kezelhető (nem bontható fel kellően sok véges térfogatra), ezért azt kisebb résztartományokra osztjuk. Ezen már kellően nagy felbontás mellett végezhető el a numerikus áramlástani szimulációk, azaz pontosan meghatározhatók a nagyobb léptékű modell paraméterezéséhez szükséges áramlástani mennyiségek. A résztartományok geometriai paraméterei és a számított áramlástani mennyiségek közötti összefüggések meghatározásával lehetővé válnak a nagyobb léptékű, akár a teljes légszárító patronra magába foglaló tartományon végzett szimulációk is.

2.1. Geometriai modell

A légszárító patronban lévő disszikáns szemcsék elrendeződésének modelljét a Knorr-Bremse Vasúti Jármű Rendszerek Hungária Kft bocsátotta rendelkezésünkre. A virtuális modelleket a diszkrét elem módszer (Discrete Element Method: DEM) segítségével hozták létre [1]. Az átadott szemcsehalmazok nagy mérete miatt azok explicit, azaz pórus skálájú diszkretizációja és szimulációja nem lehetséges. A CFD szimulációk során a peremfeltételek megadása szempontjából a térben periodikus geometria az optimális. A nagy szemcseszám, illetve a periodizálhatóság érdekében kisebb méretű virtuális szemcsehalmazokat hoztunk létre. A halmazgenerálás alapja a szoros elrendezés, amely a disszikáns szemcséket modellező gömböket egy tetraéder csúcaiban helyezi el. A tetraédert a koordináta

irányok mentén eltolva egy általunk meghatározott méretű, könnyen periodizálható szemcsehalmazt kapunk. Ezt a módszert HCP-nek (Hexagonal Close Packing) nevezik [2]. Carl Friedrich Gauss 1831-ben bebizonyította, hogy a HCP módszer egyike annak a két módszernek, amelylyel a legnagyobb halmazsűrűség, azaz a legkisebb porozitás érhető el azonos méretű gömbök esetén. Az általunk alkalmazott módszerrel megközelítőleg 0,74-es sűrűség (26%-os porozitás) érhető el, míg a véletlenszerű halmazgenerálással csupán kb. 0,64-es sűrűségű (36% porozitású) halmazokat kapunk. A szemcsehalmazok geometriáját a Gmsh szoftverrel [3] készítettük, amely segítségével paraméteres formában, egy parancsfájl megadásával automatikusan generálható a különböző szemcsehalmazok geometriája. Tapasztalataink alapján a háló jó minőségét csak úgy lehet biztosítani, ha a szemcsék érintkezési pontjainál kialakuló szűkületeket kimetsszük a folyadékter geometriájából. Ha ezt nem tesszük meg, akkor a későbbiekben ez hálózasi és szimulációs nehézségeket okoz, hiszen ezeken a területeken rendkívül torzult cellák jönnek létre, amelyek később a szimuláció összeomlásához vezet. Azért, hogy ezt kiküszöböljük, a gömbök középpontját összekötő tengely körül metszőhengereket hozunk létre, amelyekkel kivághatjuk a kritikus térrészeket. A hengerek optimális sugara az érintkezési pont körüli hálóméret függvényében változik. Az optimális sugarat megadó függvényt geometriai és áramlástani megfontolások alapján adtuk meg.

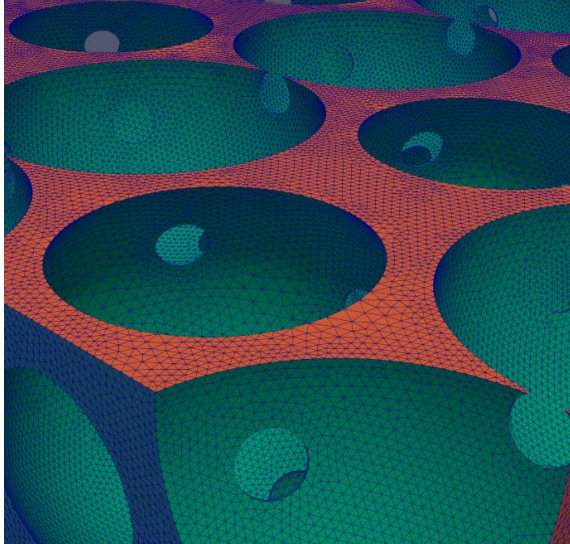
2.2. Térbeli diszkretizáció

A Gmsh szoftver nem csak a geometria létrehozásánál volt segítségünkre, de a CFD számítások alapját képező térbeli diszkretizációt is azzal végeztük. Ennek során a számítási tartományt véges térfogatok (cellák) hálózatasra bontjuk. Delaunay triangularizációval [4] háromszögekre bontjuk fel a szilárd felületeket, és Delaunay tetrahedronizációval [5] tetrahedronokra az áramlási teret, létrehozva a felületi és térfogati hálót. A periodikus peremeken a felületelemek egyezősége érdekében páronként összekapcsoltuk az összetartozó peremfelületeket. Annak érdekében, hogy a háló finom szerkezetét jobban szemlélthessük, az 1. ábrán kinagyítottuk a háló egy részletét.

2.3. Numerikus megoldás

Az áramlások leírásánál a mozgásmennyiség, a tömeg és energia megmaradási tételeket alkalmazzuk.

A mozgásmennyiség (impulzus) megmaradást a Navier-Stokes (NS) egyenletek segítségével fejezzük ki, a tömegmegmaradást pedig a kontinuitási egyenlettel. A Navier-Stokes egyenletek konzervatív alakját alkalmazva, a kontinuitási egyenlet megoldását nem kell elvégeznünk, hiszen az implicit szerepel a mozgásegyenletben.



1. ábra. A szemcsehalmaz felületi hálójának kinagyított, axonometrikus nézete.

A mi esetünkben alacsony Reynolds szám mellett ($Re < 2000$) lamináris áramlást, összenyomhatatlan közeget és stacionárius megoldást feltételezünk, és a térerősség hatását is elhanyagoljuk. A fenti egyszerűsítések mellett a mozgásegyenlet

$$\nabla \cdot (\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\nabla p + \nu \Delta \mathbf{u} + \mathbf{S}_u \quad (1)$$

alakban írható, ahol \mathbf{u} a sebességvektor, p a nyomás, ν a kinematikai viszkozitás, \mathbf{S}_u pedig tetszőleges forrás vektor. Mivel a sűrűséget állandónak tekintjük, és nem vesszük figyelembe a hőmérséklet változását sem, így az energiamegmaradás triviálisan teljesül, vagyis nem kell megoldanunk az energiaegyenletet. Az (1) egyenletben található \mathbf{S}_u forrástag segítségével adhatók meg a különböző kényszerek hatásai, például az a nyomásgradiens, amellyel periodikus modellek esetén meghajtható az áramlás, vagy amellyel megadható a porózus zóna ellenállása. A periodikus modellt meghajtó erő kétféleképp definiálható. Előírható a tartományon átáramló közeg átlagsebessége, illetve direkt módon megadható a hajtóerőt biztosító nyomásgradiens is. A porózus

zóna modellezésére a nagyléptékű szimulációban a Darcy-Forchheimer modellt [6] alkalmaztuk, ahol a forrástag a következőképp írható

$$\mathbf{S}_u = [\nu \mathbf{D} + (1/2)\mathbf{F}\mathbf{U}] \odot \mathbf{u}. \quad (2)$$

A(2) egyenletben U a sebesség nagyságát jelöli, \mathbf{D} Darcy együtthatóvektor a forrástag lineáris (viszkózus) sebességfüggését skálázza, az \mathbf{F} Forchheimer együtthatóvektor pedig annak nemlineáris (alaki) sebességfüggését paraméterezi.

3. PÓRUS LÉPTÉKŰ SZIMULÁCIÓK

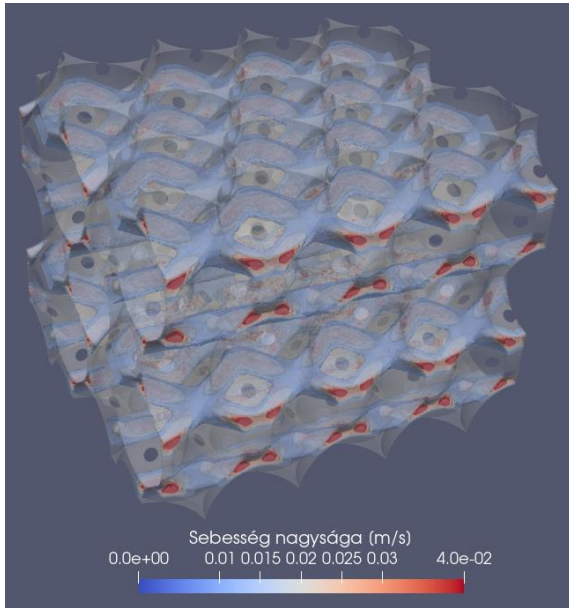
A porus léptékű vizsgálataink során, periodikus tartományokon, különböző méretű szemcsehalmazokon végeztünk szimulációkat. Ezeknek a vizsgálatoknak az volt az elsődleges célja, hogy felmérjük az explicit, porus skálájú szimulációk numerikus költségét, illetve paramétereit.

3.1. Hálózás

A vizsgálatokhoz különböző finomságú hálókat hoztunk létre, változó szemcseszámmal, 2 mm átmérőjű szemcsékkel. A tartomány élei mentén elhelyezkedő szemcsék száma esetenként meg egyező volt. Készítettünk 4^3 -os, 6^3 -os és 8^3 -os szemcsehalmazokat, amelyek hálójá rendre $\sim 5,26$, $\sim 17,59$ és $\sim 41,47$ millió cellát tartalmaztak. Kísérletképp egy 10^3 -os szemcsehalmazt is megpróbáltunk elkészíteni, de erre a munkaállomás 64 Gb-os memóriája már nem volt elegendő. A hálófelbontást parametrikusan definiáltuk, a halmazbeli szemcsék sugarának (r_s) függvényében. A kontaktpontok környezetében a legkisebb cellaméret (Δs_c^0) $0.04r_s$ volt, amely fokozatosan $\Delta s_c^{i+1}/\Delta s_c^i = 1.3$ aránnyal növekedett $0.12r_s$ méretig, azaz 80 mikrontól 240 mikronig. A szemcsék felületén, a kontaktpontoktól távol a szemcseméret maximuma szintén $0.12r_s$ volt, amely a szemcséktől távolodva még tovább, $\Delta s_{\max} = 0.2r_s$ méretig növekedett, számszerűen 0,4 mm-ig. Az eredmény hálófüggetlenségének meghatározására a felbontás duplázásával, illetve felezésével is készítettünk hálókat.

3.2. Verifikáció

Szimulációkat futtattunk 3 különböző szívárgási sebesség mellett és három különböző felbontással is, a legkisebb halmazon. A szimulációk során az (1) egyenletet oldjuk meg, az adott átlagsebesség eléréséhez szükséges erőt pedig a \mathbf{S}_u forrástag segítségével írtuk elő. A szimuláció során kialakuló áramlási teret a 2. ábrán szemléljük.



2. ábra. Az SP04 (4^3) szemcsehalmazon számított szivárgási sebesség kontúrfelületei.

A szimuláció-sorozat számszerű eredményeit a 1. táblázatban foglaltuk össze, ahol az adott irányokhoz tartozó szimulált átteresztőképességet (κ) a Kozeny-Carman ([7-9]) egyenlettel (3) becsülthöz (κ_i) hasonlítottuk.

$$\kappa_i = (1/150) \Phi^3 d_s (1 - \Phi)^{-2}, \quad (3)$$

ahol d_s a gömbök átmérője, Φ pedig a porozitás.

1. táblázat. Számszerű szimulációs eredmények ($Re=1.33$), 40 szálon futtatva

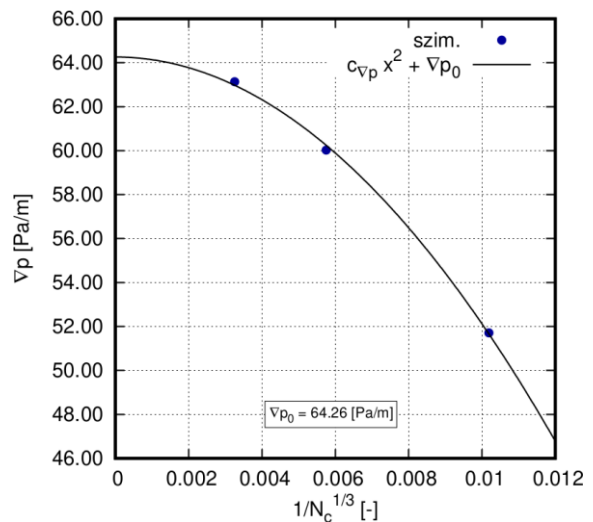
	SP04	SP06	SP08
Szemcse/él	4	6	8
Szemcse [db]	64	216	512
Cella [10^6 db]	5,26	17,59	41,47
∇p [Pa/m]	60,03	59,94	59,90
Φ [%]	25,94	25,94	25,94
κ_x [10^{-10} m ²]	8,427	8,439	8,446
κ_y [10^{-10} m ²]	8,523	8,538	8,547
κ_z [10^{-10} m ²]	8,624	8,625	8,626
κ_t [10^{-10} m ²]	8,488	8,489	8,489
Futásidő [óra]	1,89	8,09	21,81
Memória [Gib]	6,255	19,086	40,496

Az 1. táblázatból látható, hogy a szimulált értékek jól egyeznek a Kozeny-Carman egyenlet

által becsültekkel. Csekély eltérések láthatók, hiszen a Kozeny-Carman összefüggés nem képes figyelembe venni a szemcsehalmaz irányfüggő jellemzőit, míg a numerikus szimulációk ezt explicit leírják. A futásidő és a memória felhasználás is lineárisan változik a szemcsék mennyiségével, és azon keresztül a cellák számával. A numerikus kísérletek alapján megállapítható, hogy a memória mérete korlátozza leginkább a szemcseszám további növelését.

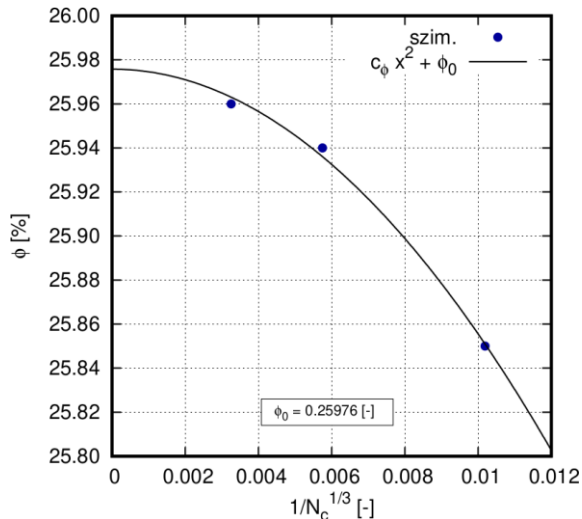
3.4. A megoldás hálójfüggetlensége

A hálójfüggetlenség ellenőrzésének érdekében szimulációkat futtattunk az SP04 szemcsehalmazon a felbontás változtatásával, azt a felére, illetve a duplájára változtatva.



3. ábra. Nyomásgradiens a cellaszám függvényében.

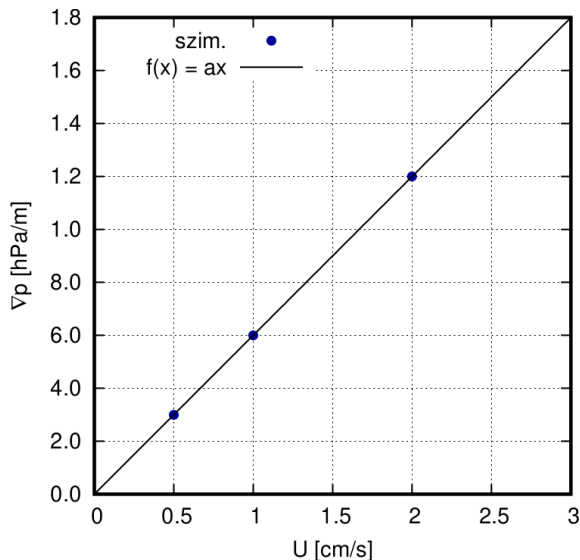
Az eredményeket a 3. és 4. ábrán láthatjuk, ahol a nyomásgradienst és a numerikus porozitást ábrázoltuk a cellaszám függvényében. Mivel a cellaszám reciproka szerepel az x tengelyen, ezért a zérus érték végtelen nagy hálójfelbontásnak felel meg. A zöld színnel jelölt illesztett négyzetes függvény y tengelymetszete tehát a végtelen felbontáshoz tartozó értéket becsli. Ez az érték a porozitás esetében jól közelíti a szoros szemcsehalmaz porozitására megadott 26%-ot. A nyomásgradiens változása még 5-10% körüli a közepes és finom felbontás mellett, a végtelen felbontásra extrapolált értékhez viszonyítva, így a háló további finomításával az eredmények is pontosabbak lennének. Ezt azonban elsősorban a rendelkezésre álló memória korlátozza.



4. ábra. Numerikus porozitás a cellaszám függvényében.

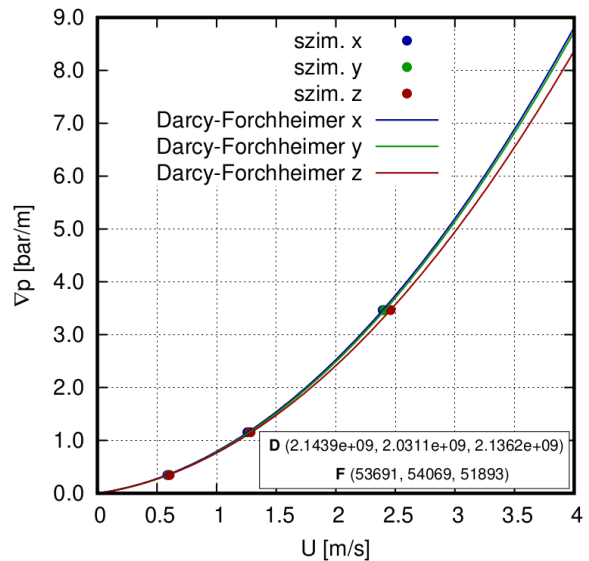
3.3. Reynolds szám függés és paraméterezés

A Reynolds-szám, azaz sebesség-függés ellenőrzését két lépésben végeztük el. Az első lépésben szivárgásos, azaz Darcy áramlást feltételeztünk, ahol a Reynolds szám kisebb 10-nél, és a viszkozus erők, illetve a nyomás-gradiens erő egyensúlya dominál. A hajtóerőt a szemcsehalmoz átlójával párhuzamosan vettük fel. Az alacsony Reynolds számok mellett kapott eredményt az 5. ábrán mutatjuk be, amelyen jól látható a sebesség és a nyomásgradiens közötti lineáris kapcsolat.



5. ábra. A Darcy tartományban végzett Reynolds szám függőségi vizsgálat: nyomásgradiens a szivárgási sebesség függvényében.

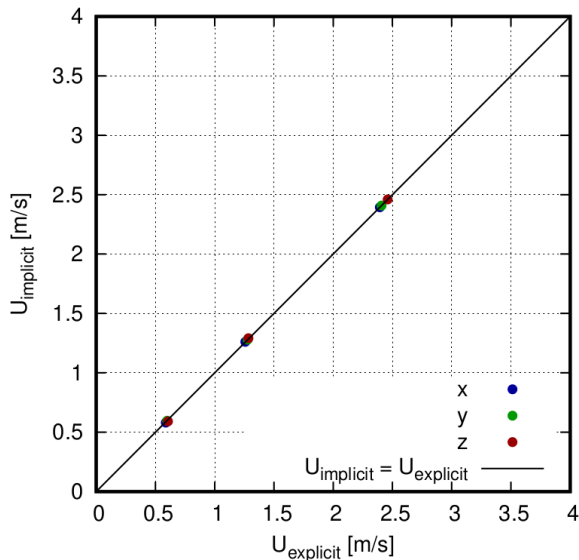
A második lépésben a $500 < Re < 2000$ tartományt vizsgáltuk, ahol már a szemcsehalmoz alaki ellenállása is befolyásolja a nyomásgradienst. Az eredmények alapján, a korábban bemutatott Darcy-Forchheimer modell paraméterezését is elvégeztük. Erre a célra egy olyan Fortran programot készítettünk, amely képes a szimulációs eredményeket beolvasva önműködően elvégezni a paraméterillesztést (a legkisebb négyzetek módszerével). A szimulációk és a paraméter illesztés eredményeit a 6. ábrán láthatjuk.



6. ábra. A nyomásgradiens a sebesség függvényében, az x, y és z koordinátairányok mentén. Az illesztett modellparaméterek a jobb alsó sarokban találhatóak.

4. NAGYLÉPTÉKŰ SZIMULÁCIÓK

A kifejlesztett szimulációs módszertan a porózus modell validációjával vált teljessé. Amennyiben az előző fejezetben meghatározott \mathbf{D} és \mathbf{F} konstans vektorokkal paraméterezzük fel a Darcy-Forchheimer modellt, akkor a nagy-skálájú (implicit) szimulációnak ugyanazt az eredményt kell adnia, mint a pórus skálájú (explicit) szimulációknak. Ennek ellenőrzésére egy olyan egyszerű hálót hoztunk létre, amely egy 1 cm élhosszúságú kockában egyenközű 1 mm-es felbontást alkalmaz, így csupán ezer cellából áll. Az így elkészített hálón futtatott szimulációk eredményeit a 7. ábra mutatja be. Ezen jól látható, hogy a kidolgozott módszertan képes a porózus modell paraméterezésére és az implicit szimulációkkal pontosan modellezhető az pórus-skálájú eredmények.



7. ábra. Az explicit és implicit szimulációk eredményeinek összevetése.

5. ÖSSZEGZÉS, KITEKINTÉS

Kutatásaink hosszú távú célja a pneumatikus fűrendszerekben található légszárító patronok kialakításának optimalizálása, amelyhez meg kell vizsgálni az abban kialakuló áramlásokat. Kifejlesztettük az ehhez szükséges CFD szimulációs módszertant, amellyel akár az egész légszárító berendezés szimulációja is megvalósítható. A fejlesztésekhez csak nyílt forráskódú szoftvereket vettünk igénybe, a CFD szimulációkat az OpenFOAM keretrendszerben végeztük. A kutatás folytatásában a pórus skálájú térbeli diszkretizáció továbbfejlesztése, illetve egy inhomogén és anizotrop porózus modell paraméterezésére a célunk. Az ehhez szükséges jelentős hardver- és szoftver-fejlesztések már folyamatban vannak, a Knorr-Bremse Vasúti Jármű Rendszerek Kft-nek köszönhetően.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönet a Knorr-Bremse Vasúti Jármű Rendszerek Hungária Kft-nek a kutatás-fejlesztés támogatásáért.

IRODALOM

[1] Safranyik F., Varga A., Oldal I., és Keppler I.: Optimal and effective technique for particle packing. *Advanced Powder Technology*, 31(8), 3222-3235, 2020.

[2] Conway J. H., Sloane N. J. A.: *Sphere Packings, Lattices, and Groups*. Springer-Verlag, második kiadás, 1993.

[3] Geuzaine C., Remacle J.-F.: Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 79(11), 1309-1331, 2009.

[4] Delaunay, B.: Sur la sphère vide. *Bulletin de l'Académie des Sciences de l'URSS, Classe des Sciences Mathématiques et Naturelles*, 6, 793-800, 1934.

[5] Marot C., Pellerin J., Remacle J.-F.: One machine, one minute, three billion tetrahedra. *Numerical Methods in Engineering*, 117(9), 967-990, 2019.

[6] Whitaker S.: The Forchheimer equation: A theoretical development. *Transport in Porous Media*, 25, 27-61, 1996.

[7] Kozeny J.: Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden. *Sitzungsber Akademie der Wissenschaften, Wien*, 136(2a), 271-306, 1927.

[8] Carman P. C.: Fluid flow through granular beds. *Transactions, Institution of Chemical Engineers, London*, 15, 150-166, 1937.

[9] Carman P. C.: *Flow of gases through porous media*. Butterworths, London, első kiadás, 1956.