

VI. Gépészeti Szakmakultúra Konferencia

NYÍLT FORRÁSKÓDÚ ÁRAMLÁSTANI ÉS AKUSZTIKAI SZIMULÁCIÓK ALKALMAZÁSA A VASÚTI FÉKRENDSZEREK ZAJKIBOCSÁJTÁSÁNAK CSÖKKENTÉSÉRE

APPLICATION OF OPEN SOURCE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS AND AEROACOUSTICS SIMULATIONS FOR REDUCING THE NOISE EMISSION OF RAILWAY BRAKING SYSTEMS

*Tokaji Kristóf, MSc, tokaji.kristof@gpk.bme.hu
Dr. Horváth Csaba, PhD, horvath.csaba@gpk.bme.hu*

ÖSSZEFOGLALÁS

A Knorr-Bremse és a BME Áramlástan Tanszék együttműködik a vasúti fékrendszerek működése során keletkező zaj csökkentésében. Nyílt forráskódú áramlástan és akusztikai szimulációk segítségével vizsgáljuk a vasúti fékrendszer zajkeltési mechanizmusait. Ezen cikk bemutatja az olvasó számára az eddigi közreműködés eredményeként kidolgozott általános akusztikai szimulációs módszertant egy esettanulmányon keresztül.

ABSTRACT

Knorr-Bremse and the BME Department of Fluid Mechanics are collaborating on reducing the noise generated during the operation of railway braking systems. The noise generation mechanisms are investigated using open source computational fluid dynamics and aeroacoustics simulations. This article presents the reader with a general aeroacoustics simulation methodology, via a case study, which has been worked out during the collaboration.

1. BEVEZETÉS

Az egyik Knorr-Bremse Vasúti Járműrendszerek Hungária Kft. által gyártott vasúti fékrendszer légtelenítése során a zajszint meghaladja egy néhány régió által előírt követelményeket. Egy speciális hangtompító alkalmazásával elérhető, hogy a kibocsátott zajszint megfelelő szintre csökkenjen. Azonban, a speciális hangtompító gyártása költséges. Ezen események következményeként, a Knorr-Bremse Vasúti Járműrendszerek Hungária Kft. arra a döntésre jutott, hogy elkezd házon belül végezni akusztikai fejlesztéseket ezen és hasonló

rendszerain. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Karán oktató és kutató Áramlástan Tanszék munkatársai már nagy tapasztalattal rendelkeznek az áramlástan és akusztikai szimulációk terén. Így indult el egy együttműködés, amely célja egy általános akusztikai szimulációs módszertan kidolgozása, valamint csendesebb fékrendszerek megvalósítása.

A zajcsökkentéshez szükséges a zaj keletkezési helyének meghatározása, amelyet mérési technikákkal és szimulációs technikákkal lehet elérni. Az Áramlástan Tanszék sok tapasztalattal rendelkezik akusztikai zajforrások azonosítása területén. Méréstechnika oldalról, számtalan esetben alkalmazunk mikrofontömb méréstechnológiát és nyalábformálási módszereket ipari megbízásaink [1-5] és kutatásaink [6-8] elvégzésében, valamint fejlesztünk nyalábformálási módszereket szükségünk szerint [7-10]. Azonban mérések elvégzése a tervezés kezdeti fázisaiban sok esetben körülményes és költséges, így ezen technikákat meglévő rendszerek ellenőrzésére és a tovább fejlesztés későbbi fázisaiban alkalmazzuk. A fejlesztés kezdeti fázisaiban főként szimulációs technikákkal tudjuk költséghatékonyan vizsgálni és fejleszteni a rendszereket.

A jelen kutatásban szimulációs módszerekkel vizsgáltuk egy zajos berendezés zajkeltését. Az Áramlástan Tanszéken foglalkozunk numerikus áramlástan szimulációkkal (Computational Fluid Dynamics, CFD) és azok ötvözésével numerikus akusztikai szimulációkkal (Computational AeroAcoustics,

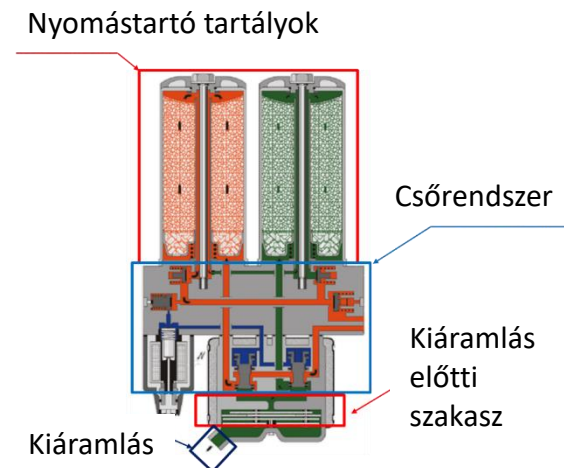
CAA) [3,4,11]. Az ipar számára számos területen alkalmazunk kereskedelmi CFD és CAA numerikus megoldókat [3,4,11], míg más területeken saját CFD és CAA megoldókat fejlesztünk saját és ipari partnereink igényei szerint. A jelen esetben fontos szempont, hogy a felhasznált szoftverek ne hordozzanak magukkal költséges licenc feltételeket, valamint ne avuljanak el a technológia fejlődésével. Vagyis, a kidolgozott vizsgálati módszer legyen hosszútávon és költséghatékonyan alkalmazható. Ebből kifolyólag az OpenFOAM nyílt forráskódú CFD megoldóit alkalmaztuk [12], illetve a szintén OpenFOAM környezetben fellelhető geometria készítő, numerikus hálózó, illetve kiértékelő programokat.

Nagyon széles skálán találhatóak CFD + CAA módszerek [13], amelyek eltérnek mind költségben (futtatási idő), mind a szolgáltatott eredmények részletességét illetően. Az itt alkalmazandó szimulációs módszerek mérsékelt futtatási idővel és költségekkel kell legyenek jellemezhetőek, amely lényeges az iparban hirtelen felmerülő és gyorsan megoldandó feladatok esetén. Emellett, képesek kell legyenek megválaszolni a vizsgálat tárgyát képező kérdéseket. Erre alkalmas módszer egy szélessávú-zaj modell alkalmazása. Ezen CAA modellek stationer Reynolds átlagolt Navier-Stokes (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS) CFD szimulációkból nyert turbulens kinetikus energia (k) és turbulens kinetikus energia disszipáció ráta (ϵ) értékekből becslik a hangkeltés térbeli energia eloszlását. Az itt alkalmazott Proudman akusztikai teljesítmény szélessávú-zaj modell [14] CAA szimuláció a Proudman formulán alapul [15]. Fontos megjegyezni, hogy mivel az alkalmazott akusztikai modell a turbulens mennyiségekből becsli az áramlás által keltett zajt, így bizonyos zajkeltési mechanizmusokat nem vesz figyelembe, például üregekben létrejövő rezonátor általi erősítés, vagy a szilárd testekből terjedő rezgésből származó zaj. Azonban az alacsony sebességű turbulens áramlás zajkeltésére megfelelő közelítést ad rövid idő alatt.

2. GEOMETRIA ÉS NUMERIKUS HÁLÓ

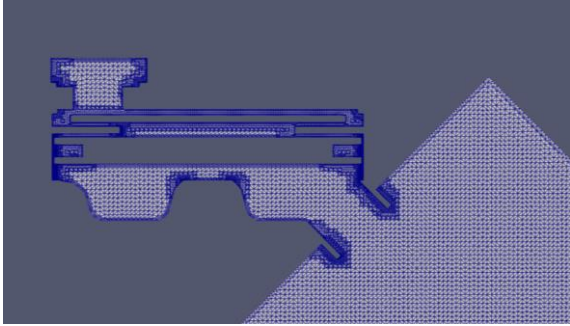
A jelen tanulmányban vizsgált zajos légszárító rendszer geometriája több részre osztható: nyomástartó tartályok, cső- és szeleprendszer, kiáramlás előtti szakasz, végül a kiáramlási keresztmetszet. Az 1. ábrán látható a teljes geometria sematikus rajza, jelölve az egyes

elkülönülő szakaszokat. A nyomástartó edényben elhelyezkedő, porózus, deszikkánsal töltött szakasz feladata az áramló közeg relatív nedvességtartalmának csökkentése. Ezen tartályokból egy összetett csőrendszer indul. Egymást követik a szűkebb csőszakaszok és a nagyobb kiterjedésű tartályszerű szakaszok. A csőszakaszok végén egy-egy szelep található, amely az áramlás szabályozását végzi. A szelepek után az áramló levegő átkerül a kiáramlás előkészítő szakaszba. Ezt a feladatot egy térrész látja el, amelyben több lemez törli meg az áramlás irányát, így a levegőt többszöri irányváltásra és szűk áramlási keresztmetszeteken történő áthaladásra kényszeríti, míg az végül egy henger keresztmetszeten át kijut a szabadba. A szimulációkban a szabad teret egy nagy henger alakú térfogat helyettesíti.



1. ábra: A teljes geometria sematikus rajza

A numerikus háló elkészítésére a cfMesh hálózót alkalmaztuk [16]. A nyílt forráskódú automatikus hálózó segítségével hexa és tetra elemekből alkotott numerikus hálót készítettünk. Egy 2 mm nagyságú hálóelemekből készített numerikus hálót alkalmaztunk a nagy keresztmetszetű szakaszokon, míg a szűk áramlási keresztmetszetekben 0,1 mm-es jellemző méretű, sűrű numerikus hálót alkalmaztunk. Ezen felül a fal mentén 5 rétegű határrétegháló került alkalmazásra. Az elkészített háló egy fontos részletét a 2. ábra mutatja be.



2. ábra A numerikus háló

3. SZIMULÁCIÓK

3.1 Áramlástanai szimulációk

Az áramlástanai szimulációk elvégzéséhez az összenyomható turbulens közeg szimulációjára alkalmas rhoSimpleFoam stacioner megoldót alkalmaztuk. A csőrendszer belépési peremfeltételeként tömegáramot adtunk meg, amely változtatásával számos üzemállapot vizsgálhattunk meg. Így a teljes szubszonikus tartományt meg tudtuk vizsgálni. A kiáramlásnál szabadba történő kiáramlás peremfeltételt alkalmaztuk. A Proudman akusztikai teljesítmény szélessávú-zaj akusztikai modell alkalmazásához szükséges a k és ε értékek kiszámítása. Ennek megfelelően, a $k - \varepsilon$ turbulenciamodellt alkalmaztuk.

3.1 Akusztikai szimulációk

Számos módszer áll rendelkezésre az akusztikai szimulációk elvégzésére OpenFOAM és kereskedelmi szoftverek eszköztárában egyaránt. Az esetek egy részében a szimuláció beállításait úgy kell megválasztani, hogy kimutatható legyen a vizsgált rendszer által keltett nagyon kis amplitúdójú nyomásingadozás időbeli változása, amely maga a keltett zaj. Ilyen esetben instacioner, vagyis időben felbontott szimulációt szükséges végezni. A szimuláció időlépése a keltett zaj periódus-idejénél finomabb kell legyen, illetve a készített hálónak is hasonló követelményeknek kell megfelelnie, ami egy nagyon finom hálót eredményez, amelyen nagyon kis időlépésekkel lép végig a megoldó. Ez alapján az efféle szimulációk erőforrás és időigényesek. A szimulációk egy másik részében a létrejövő áramlás bizonyos tulajdonságai, például a kialakuló turbulencia alapján becsülhető az áramlás által keltett zaj. Jelen vizsgálat során is egy ilyen megoldót alkalmazunk, a proudmanAcousticPower függvényt. A függvény a turbulencia adatokból, k és ε , becsüli a keltett zajforrások akusztikai teljesítményét P_A -t $\left(\frac{W}{m^3}\right)$ (1. egyenlet).

$$P_A = \alpha \cdot \rho \cdot \varepsilon \cdot \frac{\sqrt{2k}}{a_0} \quad (1)$$

ahol $\alpha = 0,1$ konstans, ρ a közeg sűrűsége, a_0 a hangsebesség, k a turbulens kinetikus energia, ε a turbulens kinetikus energia disszipációs ráta. A meghatározott értékek átszámíthatók dB skálára, amelyet a később látható akusztikai eredményeken ábrázolunk (2. egyenlet).

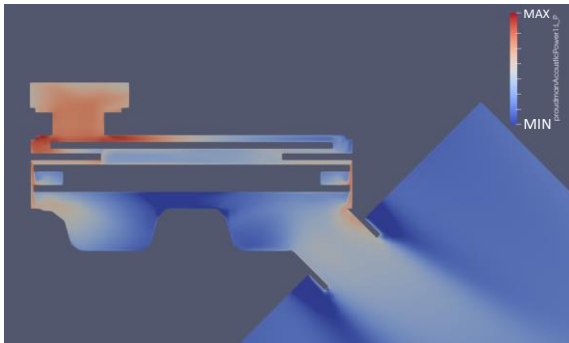
$$L_p = 10 \log \frac{P_A}{P_{ref}} \quad (2)$$

ahol $P_{ref} = 1 \cdot 10^{-12} \left(\frac{W}{m^3}\right)$. Így, stacioner CFD szimulációk elegendők a bemeneti adatok előállításához, amelyből minden cellára meghatározható a keltett zaj erőssége, így kirajzolható hol keletkezik erős zaj, amely alapján megvizsgálható milyen változtatásokkal lehetne csökkenteni a zajforrások erősségét, vagy teljesen megszüntetni azokat. Ezzel nagyságrendekkel csökkenthető a szimulációk elkészítéséhez szükséges erőforrás és időigény. A módszer által meghatározott szintértékek, a módszer egyszerűsített mivoltából kiindulva, kvantitatív szempontból validálást igényelnek. Azonban, két szimuláció eredménye kvalitatív módon összevethető egymással validációs mérés nélkül is. Két eltérő geometria vizsgálata esetén kimutatható, hogy melyik rendelkezik nagyobb és melyik kisebb zajkeltéssel.

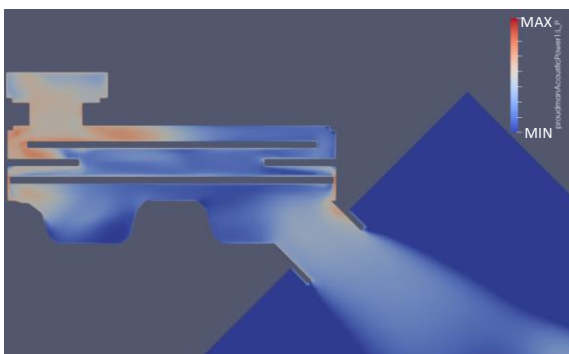
4. EREDMÉNYEK

A számos tömegáram értéken elvégzett szimuláció jó képet adott arról, hogy a tömegáram függvényében, hogyan alakul az áramlás, illetve az általa keltett zaj. A kidolgozott vizsgálati módszer lehetőséget adott arra, hogy megvizsgáljunk alternatív geometriai tulajdonságokkal rendelkező berendezéseket is, és az akusztikai terek vizsgálata segített meghatározni, hogy az adott berendezések nagyobb vagy kisebb zajkeltést eredményeznek. Létrehoztunk egy új geometriát, amelynél áramlástanai és akusztikai ismeretekre alapozva próbáltunk egy kevésbé zajos összeállítást fejleszteni úgy, hogy a berendezés továbbra is megfeleljen a felé támasztott üzemi elvárásoknak. Az új geometria létrehozásánál csökkentettük a hirtelen irányváltások számát, illetve szélesítettük a szűk áramlási keresztmetszetek egy részét. A 3. és 4. ábrákon látható az eredeti és az új geometria mellett

tapasztalható zajkeltés ábrázolása. A két ábrán azonos skála szerepel.



3. ábra Eredeti geometria zajkeltése



4. ábra Új geometria zajkeltése

A 3. ábra mutatja az eredeti geometria zajkeltését, a 4. ábra az új geometria zajkeltését. Jól látható az ábrákon, hogy a rendszerben keletkező zaj jelentősen csökkent. Az eredetileg nagy zajkeltéssel járó szűk keresztmetszeteknél illetve hirtelen irányváltásoknál keletkező zaj csökkent a módosítás hatására. Ezen felül, megfigyelhető, hogy a lokálisan nem módosított területeken, például a kiáramlás környezetében, szintén csökkent a keltett zaj. Összességében, az eredeti akusztikai teljesítmény szinthez képes 7% -os zajszint csökkentés érhető el a geometria optimalizálásával.

5. ÖSSZEGZÉS

A Knorr Bremse Vasúti Járműrendszerek Hungária Kft. és a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar Áramlástan Tanszékének közös kutatásának célja egy vasúti fékrendszerek alkotóelemeinek zajkeltésének vizsgálatára alkalmas CFD + CAA szimulációs vizsgálati folyamat kidolgozása. A szimulációkat nyílt forráskódú OpenFOAM környezetben végeztük el. A kidolgozott

vizsgálati folyamat része a geometria létrehozása, a numerikus háló generálása, a szimulációk elvégzése, valamint a kiértékelés módja. A módszer alkalmas az áramlás által keltett zaj becslésére és segíti az egyes berendezések akusztikai optimalizálását. A jövőben a Knorr-Bremse Vasúti Járműrendszerek Hungária Kft. mérnökei hasznos eszközként alkalmazhatják a kidolgozott szimulációs folyamatot a berendezések zajvizsgálatára és továbbfejlesztésére.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönjük a Knorr -Bremse ösztöndíj programjának, hogy támogatta a Budapesti Műszaki egyetem Gépészmérnöki karának Áramlástan Tanszékével történő közös kutatást. Köszönjük Dr. Balogh Miklósnak, hogy szakmai támogatásával segítette munkánkat. Köszönjük Kustány Kálmánnak, hogy rész vett a kutatási folyamatban. Köszönjük a Knorr-Bremse munkatársainak a közös munkát.

7. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Tóth B. M., Vad J.: Ipari axiális ventilátorok diagnosztikája. MAGYAR ÉPÜLETGÉPÉSZET 11 pp. 18-20. , 3 p. 2014.
- [2] Tóth B. Vad János.: Challenges in Evaluating Beamforming Measurements on an Industrial Jet Fan. Vad, J (szerk.) Proceedings of Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'15) : 16th event of the International Conference Series on Fluid Flow Technologies, Budapest, Magyarország : CFD.HU Kft. 2015. Paper: Paper No. 186, session WS2 - Beamforming for Turbomachinery Applications , 5 p.
- [3] Vad J., Horváth Cs., Kovács J. G., Aerodynamic and aero-acoustic improvement of electric motor cooling equipment. PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART A-JOURNAL OF POWER AND ENERGY 228 : 3 pp. 300-316. , 17 p. 2014.
- [4] Vad J., Horváth Cs., Lohász M. M., Jesch D., Molnár L, Koscsó G., Nagy L., Dániel I., Gulyás A.: Redesign of an electric motor cooling fan for reduction of fan noise and absorbed power. Sen, M; Bois, G; Manna,

- M; Arts, T (szerk.) Proceedings of the 9th European Conference on Turbomachinery - Fluid Dynamics and Thermodynamics (ETC '11), 2011. pp. 69-79. , 11 p.
- [5] Podboy Gary G., Horváth Cs.: Phased Array Noise Source Localization Measurements Made on a Williams International FJ44 Engine. 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2009. pp. 1-17. Paper: AIAA-2009-3183 , 17 p.
- [6] Tokaji K., Horváth Cs.: Acoustically Transparent Duct. INTERNATIONAL JOURNAL OF AEROACOUSTICS 17 : 3 pp. 238-258. , 21 p. 2018.
- [7] Tokaji K., Soós B., Horváth Cs.: Beamforming Method for Extracting the Broadband Noise Sources of Counter-Rotating Open Rotors. AIAA JOURNAL 1 : 1 pp. 1-12. , 12 p. 2020.
- [8] Fenyvesi, B., Horváth, Cs., Kriegseis, J.: Application of a Combined Method for the Investigation of Turbomachinery Noise Sources: Beamforming and Proper Orthogonal Decomposition. 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2019. p. 1 , 17 p.
- [9] Tóth B., Vad J.: A fuzzy clustering method for periodic data, applied for processing turbomachinery beamforming maps. JOURNAL OF SOUND AND VIBRATION 434 pp. 298-313. , 16 p. 2018.
- [10] Balla E., Vad J.: A Laplacian filtering-based technique to localize vortex shedding noise in a strongly contaminated environment. 8th Berlin Beamforming Conference (BeBeC), 2020. Paper: BeBeC-2020-D12.
- [11] Horváth Cs., Vad J.: Broadband Noise Source Model Acoustical Investigation on Unskewed and Skewed Axial Flow Fan Cascades. Vad, J (szerk.) Conference on Modelling Fluid Flow CMFF'09 : 14th event of international conference series on fluid flow technologies held in Budapest : conference proceedings, Budapest, Magyarország : Budapest University of Technology and Economics, 2009. 937 p. pp. 682-689. , 8 p.
- [12] <https://www.openfoam.com/>
- [13] Glegg S., Devenport W.: Aeroacoustics of Low Mach Number Flows. Fundamentals Analysis, and Measurement, Academic Press 2017.
- [14] <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-fos-field-proudmanAcousticPower.html>
- [15] Proudman I.: The Generation of Noise by Isotropic Turbulence. Proc. Roy. Soc., A214:119, 1952.
- [16] http://cfmesh.com/wp-content/uploads/2015/09/User_Guide-cfMesh_v1.1.pdf