

Épületek szélterhelésének becslése GPU alapú nagyörvény szimulációval numerikus szélcsatornában

Estimation of the wind load on buildings using GPU-based large eddy simulation in a numerical wind tunnel

PAPP Bálint¹, Dr. KRISTÓF Gergely¹, Dr. Christof GROMKE²

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Áramlástan Tanszék, H-1111 Budapest, Bertalan Lajos u. 4–6. (BME „AE” épület). Honlap: www.ara.bme.hu,
E-mail: papp@ara.bme.hu; kristof@ara.bme.hu

² Karlsruhe Institute of Technology, Institute for Hydromechanics, Laboratory of Building and Environmental Aerodynamics. Kaiserstr. 12, 76133 Karlsruhe, Germany. – Honlap: <https://www.ifh.kit.edu/english/112.php>
E-mail: christof-bernhard.gromke@kit.edu

Kivonat

Ez a tanulmány egy GPU alapú nagyörvény szimulációra épülő módszert mutat be az épületek dinamikus szélterhelésének meghatározására. A numerikus szélcsatorna modell által előállított atmoszférikus határrétegbe helyezett kocka felületi nyomáeloszlását hasonló körülmények között végzett szélcsatorna- ill. terepi mérések eredményeivel validáltuk. Megmutattuk, hogy a modell képes a mérésekkel megegyező turbulens spektrum előállítására a Kolmogorov-spektrum tehetetlenségi tartományán belül.

Kulcsszavak: épület-aerodinamika, dinamikus szélterhelés, atmoszférikus határréteg, CFD, nagyörvény szimuláció (LES), szélcsatorna-mérés, terepi mérés, felületi nyomáeloszlás

Abstract

This study presents a methodology using a GPU-based CFD software for predicting dynamic wind loads on a cubical object. The surface pressure distribution of the numerical wind tunnel model was compared to experimental data obtained in an atmospheric boundary layer wind tunnel with a similar approach flow, as well as to field measurements. It was shown, that the numerical model is capable of producing matching turbulent spectra in an intermediate frequency range within the inertial subrange of the Kolmogorov spectrum.

Keywords: building aerodynamics, wind engineering, dynamic wind load, atmospheric boundary layer, CFD, LES, wind tunnel measurement, full-scale measurement, surface pressure distribution

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a szélcsatorna-mérések mellett elfogadott módszernek számítanak az épület-aerodinamikában a CFD modellek is. A dinamikus szélterhelés előrejelzéséhez szükséges tranziens áramlástan szimulációkban azonban hátrányt jelentenek az atmoszférikus szelet reprezentáló belépő peremfeltételek bizonytalanságai éppúgy, mint a skálafelbontó turbulenciamodellek (LES, DES, SAS) jelentős számítási igényei: a mérnöki gyakorlatban elvárható pontosságú tranziens eredményekre – még egyetlen vizsgált szélirány esetén is – általában heteket, vagy akár hónapokat kell várunk.

A tanulmányban bemutatott, az ANSYS Discovery Live szoftverben elkészített numerikus szélcsatorna modell a nagyörvény szimulációt alkalmazó GPU alapú szolvernek köszönhetően képes akár egy óra alatt statisztikailag bekonvergált, tranziens LES eredményeket produkálni, esetünkben egy maximálisan 9,1 millió cellából álló háló esetén. A CFD modell eredményeit a kutatás keretében elvégzett szélcsatorna-kísérletek és korábbi terepi mérések eredményeivel validáljuk.

2. SZÉLCSATORNA-MÉRÉSEK

A szélcsatorna-méréseket a Karlsruhei Egyetem (KIT) határréteg-szélcsatornájában [1] végeztük el. A szélcsatorna 6 m hosszú előkészítő szakaszában (ld. 1. ábra) Irwin-típusú örvénygenerátorok, egy vízszintes akadály (botlasztó) és a talajra erősített érdességi elemek segítségével került kialakításra az atmoszférikus határréteg, melynek áramlás irányú átlagsebesség-profilját az alábbi hatványfüggvénnyel írhatjuk le.

$$u(z) = u_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^{\alpha_u} = 4.39 \left(\frac{z}{0.1 \text{ [m]}} \right)^{0.30} \text{ [m/s]} \quad (1)$$

A szélcsatorna mérőterébe egy plexiből (PMMA) készült, 20 cm élhosszúságú, kocka alakú, üreges épületmodellt helyeztünk el, melynek egyik oldalán 35 szimultán mérésre alkalmas nyomásmegcsapolás található. A kocka megfelelő irányba való beforgatásával az épületmodell teljes felületén megvizsgáltuk az időben változó nyomáseloszlást. A kísérleteket 0° és 45° szélirányok beállításával végeztük el.



1. ábra Balra: a határréteg-szélcsatorna előkészítő szakasza. Középen: a kocka alakú épületmodell ($L = 20 \text{ cm}$) a nyomásmegcsapolásokkal. Jobbra: a 35 nyomásmérési pont pozíciója.

Az időfüggő statikus nyomás jeleket az elméleti átlagsebességprofilból számított referencia dinamikus nyomással normálva kaphatjuk meg a dimenziótlan nyomástényező-értékeket.

$$c_p(t) = \frac{p(t) - p_{st,ref}}{p_{din,ref}} = \frac{p(t) - p_{st,ref}}{\frac{\rho}{2}(u(L))^2} \quad (2)$$

A Reynolds-szám az épületmodell magasságát alapul véve $Re_L = u(L) \cdot L/\nu = 72\,000$ -nek adódik, ami meghaladja azt a küszöbértéket ($Re = 15\,000$), ami felett az áramlás a Reynolds-számtól független [2], valamint nagyobb annál a kritikus Reynolds-számnál is ($Re = 50\,000$), amit meghaladva a jól definiált élekkel rendelkező kocka modell felületi nyomáseloszlása is Reynolds-függetlennek tekinthető [3].

3. CFD SZIMULÁCIÓK

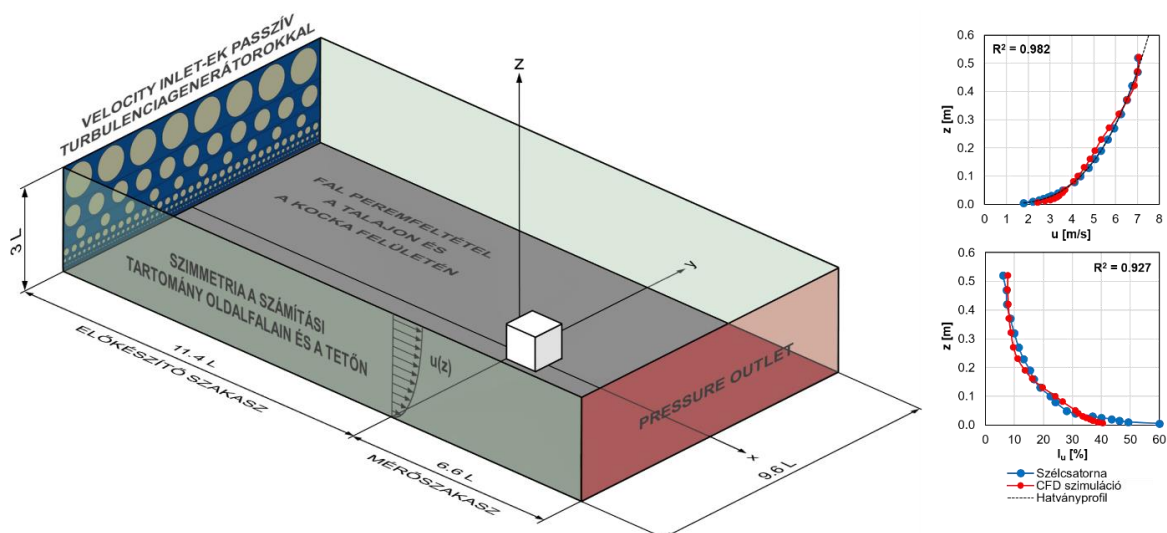
A CFD szimulációkat az ANSYS Discovery Live 19.2 szoftverben végeztük el, mely az inkompresszibilis kontinuitási és a Navier-Stokes egyenleteket oldja meg, a véges térfogatok módszere ill. LES turbulenciamodellel alkalmazásával. Az explicit numerikus integrálás stabilitásának érdekében a szimuláció időlépését a szoftver a Courant-Friedrichs-Lewy feltételnek megfelelően szabályozza.

A numerikus szélcsatorna modell felépítését és peremfeltételeit a 2. ábra mutatja be. A belépő keresztmetszetben elhelyezett sebesség peremfeltételek és a kör alakú passzív turbulenciagenerátorok optimalizálásával [4] elértük, hogy az előkészítő szakasz végére kialakuló függőleges átlagsebesség- és turbulenciaintenzitás-profilok jó egyezést mutassanak a szélcsatorna által előállított atmoszférikus határréteg jellemzőivel.

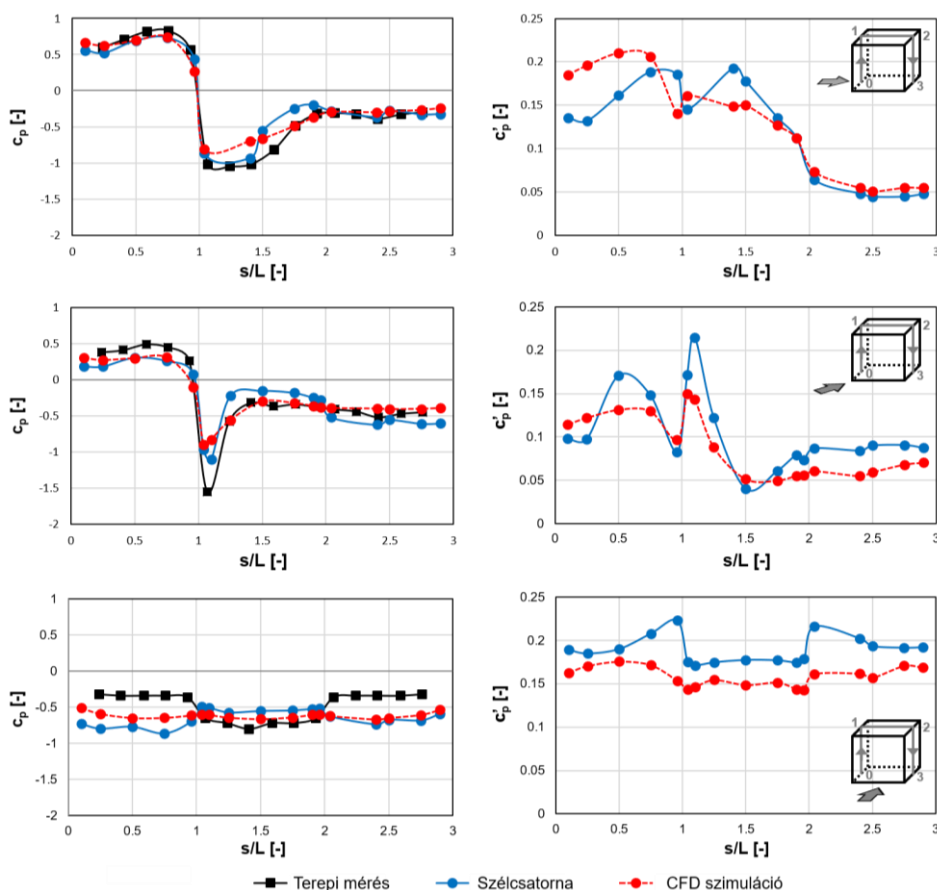
4. AZ EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

A mért és számított nyomástényező-eloszlásokat (az idősorok átlagait és szórásait) a 3. és 4. ábrák mutatják be. A szélcsatorna-mérés és a CFD szimuláció között (két szélirányt vizsgálva) a 350 pontra vonatkoztatott korrelációs tényező rendre 0,898 ill. 0,734 az átlagértékek és az ingadozások

tekintetében. Eredményeinket továbbá összehasonlítottuk a Silsoe terepi mérések [5] eredményeivel is, melyben egy 6 m oldalhosszúságú kocka felületi nyomáseloszlását vizsgálták.



2. ábra Balra: a numerikus szélcsonna felépítése és peremfeltételei. Jobbra: a megfűvást jellemző átlagsebesség- és turbulenciaintenzitás-profilok a szélcsonnában és a CFD szimulációban.



3. ábra A nyomástényező átlagértékének (c_p) és ingadozásának (c_p') eloszlása a függőleges gyűrűk mentén 0° és 45° szélirány esetén.

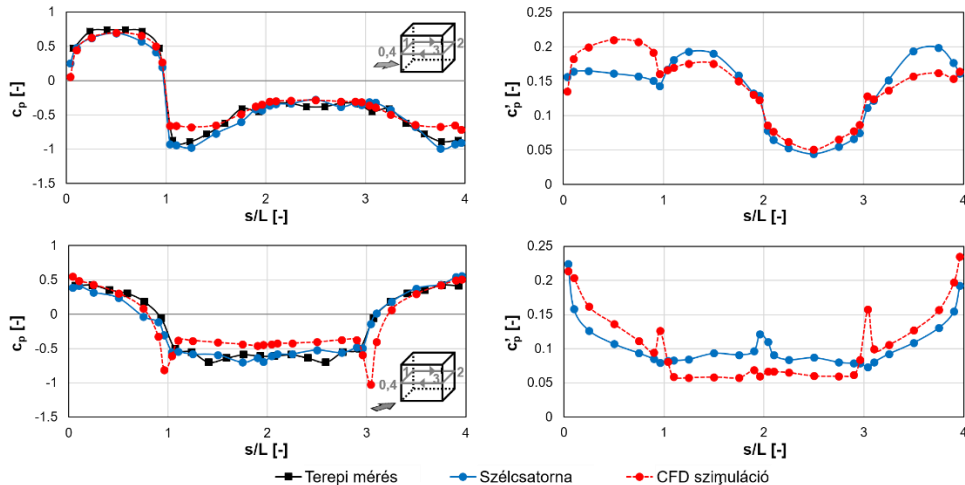
A 3. ábrán látható, hogy mind a szélcsonna-mérés, mind a CFD szimuláció képes a valós körülmények között létrejövő jelentősebb áramlási struktúrák, és ezáltal a felületi nyomáseloszlások reprodukálására. Az átlagértékek esetén kocka előlapja mögötti leválási zónákban észrevehetünk jelentősebb eltéréseket, melyek a szélcsonna-kísérletek esetén pusztán a némileg eltérő átlagsebesség-

profil következtében is kialakulhatnak. (Silsoe-kísérlet: $\alpha_u = 0,17$.) Általánosságban kimondhatjuk, hogy a CFD modell jó egyezést mutat mind a terepi, mind a szélcsatorna-mérés eredményeivel. A szélcsatorna eredményektől való eltérés a 0,589 ill. 0,663 értékű hit rate-tel jellemezhető [6]. Jelentős eltérés csak az első élek mögötti leválási zónákban tapasztalható, ahol a szoftver által alkalmazott egyenközű rácsháló miatt a modell nem képes a nagy nyomásgradiensek kellően pontos felbontására.

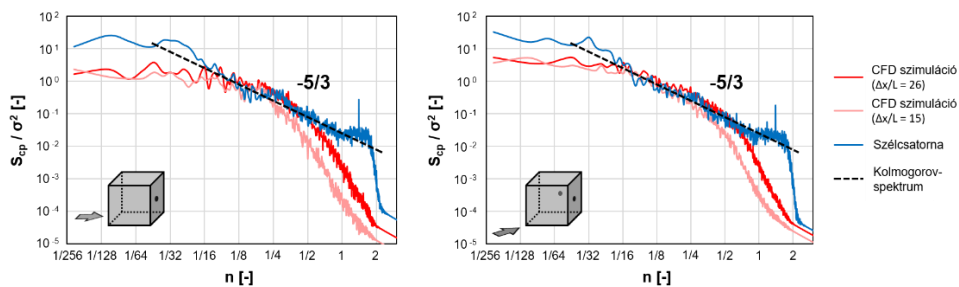
A vízszintes gyűrűk menti összehasonlítás (4. ábra) alátámasztja a fent leírtakat. Az átlagos és ingadozó nyomásterhelések jó egyezése mellett azonban kiemelendő, hogy az egyenközű háló diskretizációs hibát visz a modellbe: 45° szélirány esetén például az elforgatott kocka oldalsó éleit ($s/L = 1$ ill. $s/L = 3$) nem tudjuk felbontani, így itt jelentősebb eltéréseket tapasztalhatunk.

A felületi nyomáseloszlások mellett összehasonlítottuk a szélcsatorna-mérés és a numerikus szimuláció eredményeként kapott turbulens spektrumokat is, amit az 5. ábra mutat be. A nyomástényező frekvenciafüggő teljesítménysűrűségét (S_{cp}) az idősorokból FFT segítségével számíthatjuk ki, amit ezután az idősorok varianciájával normalunk. A dimenziótlan frekvenciát – a Strouhal-számhoz hasonlóan – a karakterisztikus hossz és sebesség ismeretében kaphatjuk meg ($n = f \cdot L/u(L)$).

A CFD modell képes a valósággal megegyező turbulens spektrum előállítására a Kolmogorov-spektrum $-5/3$ -os kitevővel jellemzett tehetetlenségi tartományán belül, melynek alsó és felső korlátait a számítási tér mérete, valamint a cellaméret ($\Delta x/L = 26$ ill. 15) határozza meg. Ezen frekvencialimitek nagyobb VRAM kapacitású GPU alkalmazásával kitolhatók, aminek következtében a sűrűbb egyenközű háló alkalmassá válhat a leválási zónáknál megjelenő nagy nyomásgradiensek kielégítő pontosságú felbontására is.



4. ábra A nyomástényező átlagértékének (c_p) és ingadozásának (c_p') eloszlása a vízszintes gyűrűk mentén 0° és 45° szélirány esetén.



5. ábra A szélcsatorna-mérés és a CFD szimulációk turbulens spektrumainak összehasonlítása a kocka leválási buborékában 0° és 45° szélirány esetén. Az örvényméret n -nel fordítottan arányos.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tanulmány az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-19-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült. A kutatást továbbá a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal K 124439 sz. pályázata; az Emberi Erőforrások Minisztériumának Felsőoktatási

Kiválósági Programja; és a Vízügyi és Katasztrófavédelmi Kutatások a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen – BME FIKP-VÍZ alprogram támogatta. A szimulációkhoz szükséges hardvert és szoftvert a CFD.HU Kft. biztosította. Az előadó részvételét az OGÉT 2020 konferencián az NTP-HHTDK-19-0068 azonosítójú, „A hazai Tudományos Diákköri műhelyek és rendezvények támogatása” pályázat támogatta.

HIVATKOZÁSOK

- [1] Gromke C., Ruck B. (2005). Die Simulation atmosphärischer Grenzschichten in Windkanälen. Proceedings 13th GALA Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmechanik, 51-1 - 51-8. German Association for Laser Anemometry.
- [2] Gromke, C. (2018). Wind tunnel model of the forest and its Reynolds number sensitivity. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 175, 53-64.
- [3] Költzsch, K., Ihlenfeld, H., Brechling, J. (1997). Einfluss des Modellierungsmassstabes bei der Ermittlung von Windlastannahmen in Grenzschichtwindkanälen, in: *Baukonstruktionen unter Windeinwirkung*, WTG-Berichte Nr. 5. Windtechnologische Gesellschaft, Aachen, p. 18.
- [4] Kristóf, G., Papp, B. (2018). Application of GPU-based Large Eddy Simulation in urban dispersion studies. *Atmosphere*, 9 (11), 442.
- [5] Richards, P. J., Hoxey, R. P. (2012). Pressures on a cubic building – Part 1: Full-scale results. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 102, 72-86.
- [6] Franke, J. (2009). Validation metrics of Reynolds stresses and turbulent kinetic energy for the MUST wind tunnel case of COST action 732. In *Proceedings of the 5th European & African Conference on Wind Engineering (EACWE 5)* (pp. 19-23).