

Épületmintázatok optimalizálása a levegőminőség javításának érdekében GPU alapú nagyörvény szimulációval

Optimization of Building Patterns for Better Air Quality Using GPU-Based Large Eddy Simulation

PAPP Bálint, Dr. KRISTÓF Gergely

Áramlástan Tanszék, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
H-1111 Budapest, Bertalan Lajos u. 4–6. (BME „AE” épület) – Honlap: www.ara.bme.hu
E-mail: P.B.: p.balint14@gmail.com; K.G.: kristof@ara.bme.hu

Kivonat: Ebben a cikkben bemutatásra kerül az ANSYS Discovery Live szoftverben megvalósított numerikus szélcsatorna, mellyel a GPU központú számítás gyorsaságát kihasználva egy óra futásidő alatt statisztikailag bekonvergált LES eredményeket kaphatunk. A szoftverben lehetséges a számítással egyidejűleg az eredmények vizualizálása, valamint a geometria módosítása is, melyek következtében a geometriai paraméterek hatásának hatékony vizsgálata elérhetővé válik. Ebben a tanulmányban bemutatásra kerül számos azonos térfogattal rendelkező épületmintázat hatása a városi áramlási és szennyezőanyag-terjedési folyamatokra, mely alapján a levegőminőség szempontjából optimális épületelrendezés kiválasztható.

Abstract: In this paper, a numerical wind tunnel is presented, created in the GPU-based simulation software ANSYS Discovery Live that is capable of producing statistically converged LES results in one hour. Additionally, the modification of the geometry as well as the visualization of the results is available during the simulation, therefore the investigation of the effects caused by the geometrical changes becomes feasible. In the present study the flow and dispersion fields resulting from different building patterns of equal volumes are compared, thus the optimal building arrangement can be identified.

Kulcsszavak: CFD, nagyörvény szimuláció (LES), városi légszennyezés, optimalizálás

1. A NUMERIKUS SZÉLCSATORNA

Az ANSYS Discovery Live 19.2 képes a légszennyezők mikroskálás terjedésvizsgálatára kiválóan alkalmas [1] nagyörvény szimuláció (LES) alkalmazására. A belépő keresztmetszetben elhelyezett passzív turbulenciagenerátorok (ld. 1. ábra) segítségével az előkészítő szakasz végére kialakulnak az atmoszférikus határréteget jellemző átlagebesség- és turbulenciaintenzitás-profilok:

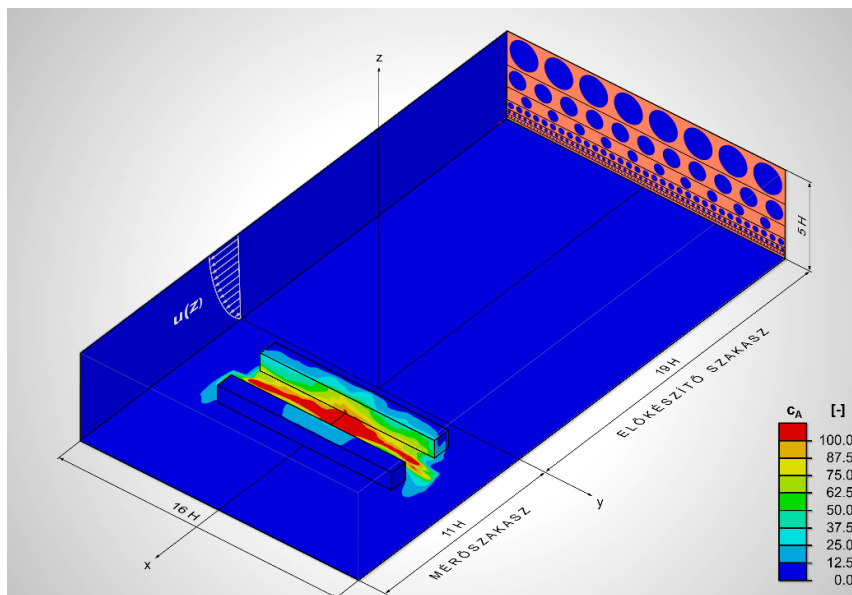
$$u(z) = 4,39 \left(\frac{z}{0,1 \text{ [m]}} \right)^{0,30} \text{ [m/s]} \quad \text{ill.} \quad I_u(z) = 22,4 \left(\frac{z}{0,1 \text{ [m]}} \right)^{-0,36} \text{ [%]} \quad (1)$$

A numerikus szélcsatornában a karakterisztikus épületmagasság $M = 1:150$ modell-lépték mellett $H = 120 \text{ mm}$, az itt mérhető karakterisztikus sebesség pedig $U_H = 4,64 \text{ m/s}$. Az áramlást jellemző Reynolds-szám így $Re_H = 37\,000$, ami kellően magas ahhoz, hogy az áramlási jelenségeket – beleértve a koncentrációeloszlást is – a Reynolds-számtól függetlennek tekinthessük. Ez azt jelenti, hogy az itt közölt eredmények valós léptékben is helytállóak.

Bár a Discovery Live nem képes a felhasználó által definiált skalártanszport szimulációjára, a szoftverben rendelkezésre álló kapcsolt áramlástan-hőtani modellel lehetőségünk nyílik a szennyezőanyag-terjedés számítására. Ehhez a diffúzió és a hőtranszport folyamatai között fennálló analógiát kell felhasználnunk, mely a jelenségeket leíró differenciálegyenletek hasonlóságán (ld. 2. egyenlet) valamint a peremfeltételek megfeleltethetőségén alapszik.

$$\frac{dc}{dt} = \nabla \cdot (D \nabla c) \quad \text{ill.} \quad \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (a \nabla T) \quad (2)$$

A diffúziós egyenletben c [kg/m³] a passzív, nem ülepedő szennyezőanyag koncentrációja, t [s] az idő, D [m²/s] pedig a diffúziós tényező kinematikai egységben kifejezve. Az inkompresszibilis folyadék hőtranszport egyenletében továbbá T [K] az abszolút hőmérsékletet, a [m²/s] pedig a hődiffúziós tényezőt jelöli. A diffúzió–hőtranszport analógia alapján, mely megkívánja, hogy a Lewis-szám ($Le = a/D$) egységnyi legyen, a hőmérséklet reprezentálja a levegőben mérhető szennyezőanyag-koncentrációt – aminek értelmében a 0°C tiszta levegőt jelent –, a gépjárműforgalom által kibocsátott szennyezőanyag-áramot pedig a rendszerbe az úttesteken bevezetett hőáramnak feleltethetjük meg.



1. ábra. A numerikus szélcsatorna felépítése. Az épületek magassága $H = 120$ mm. A belépő keresztmetszetben a velocity inlet-ek narancssárgával, a kör alakú passzív turbulenciagenerátorok kékkel vannak jelölve. A további felületek színezése a c_A normált koncentrációnak megfelelő.

A normált (dimenziótlanított) koncentrációt a szoftver által számított hőmérsékletből az alábbi formula alapján kaphatjuk meg:

$$c_A = \frac{U_H A \rho c_p T}{Q} \quad (3)$$

A fenti egyenletben A [m²] az ismétlődő raszter alapterületével egyezik meg, ρ [kg/m³] a levegő sűrűsége, c_p [J/(kg·K)] a levegő izobár fajhője, Q [W] pedig a forrásintenzitás, mely alatt a raszter alapterületén bevezetett hőáramok összegét értjük.

A geometria átszellőzésének jóságát, vagyis az anyagátadás hatékonyságát kifejező Stanton-számot – Kristóf és Füle [2] módszeréhez hasonlóan – a gyalogosok fejmagasságában (modell-léptékben 10 mm magasságban) mérhető dimenziótlan koncentráció átlagértékének reciprokaként definiálhatjuk:

$$k_A = \frac{1}{\langle c_{A,FM} \rangle} \quad (4)$$

A numerikus szélcsatorna kialakításáról, sebesség- és koncentrációmezejének validálásáról, továbbá a modell hálókongranciájáról és alkalmazásáról a Szerzők korábbi cikkében [3] olvashatunk.

2. AZ ÉPÜLETMINTÁZATOK VIZSGÁLATA

Az épületek alakjának és elhelyezkedésének alkalmas megválasztásával módosíthatjuk az áramlás irányát, s ezáltal képesek vagyunk befolyásolni a szennyezőanyag-terjedési folyamatokat is. Az e tanulmányban vizsgált esetekben közös, hogy az épületmintázatok hasznos összterfoglata nem, csak az egyes objektumok alakja és elhelyezkedése változik. A referenciaeset a városi geometria alapvető építőelemeiből álló ($H/W = 1$ épületmagasság–utcaszélesség arányú) egyszerű utcakanyonsor jelenti.

Ez esetben az utcaközök áramlási struktúráit az épületek közepénél (az útkereszteződésektől távolabb) létrejövő vízszintes forgástengelyű utcaköz-örvény és a függőleges tengelyű sarokörvények

alakítják. Ezek hatására minden utcaközben jelentős koncentrációtöbblet halmozódik fel a szél alatti oldalon található járdák középső területein a szél felőli oldalhoz képest (2a ábra). Ez a jelenség megfelel a szakirodalomban leírtaknak (pl. [3, 4]). A vizsgált eseteket a 2. táblázat foglalja össze.

A paramétervizsgálatok összefoglalása

1. táblázat

A paraméter leírása	Paraméterértékek [mm]	$k_{A,max}$ [–]	Ábra
Referenciaeset: egyenlő magasságú utcakanyonok egymás mögött. ($H/W = 1$; $L/H = 10$)	$H = 120$	$290 \cdot 10^{-4}$	2a
A teljes épületegyüttesek $H \pm \Delta h$ magasságra való növelése ill. csökkentése felváltva.	$\Delta h = \pm 15, \pm 30, \pm 45$	$309 \cdot 10^{-4}$	2b
Az épületegyüttesen belül az egyes épületek magasságának $\pm \Delta h$ mértékű megváltoztatása. Szimmetrikus elrendezés.	$\Delta h = \pm 15, \pm 30, \pm 45$	$296 \cdot 10^{-4}$	–
Az épületegyüttesen belül az egyes épületek magasságának $\pm \Delta h$ mértékű megváltoztatása. Sakktáblaszerű (antiszimmetrikus) elrendezés.	$\Delta h = \pm 15, \pm 30, \pm 45$	$398 \cdot 10^{-4}$	2c 2d
$2H$ magasságú toronyházak a sorok $\pm \Delta y$ mértékű eltolásával. (Eltolás nélkül: $k_A = 400 \cdot 10^{-4}$.)	$\Delta y = 0, 15, 30, 35, 60$	$440 \cdot 10^{-4}$	2e 2f

Aszimmetrikus utcaközök esetén (az utca két oldalán eltérő, de az áramlás irányára merőleges irányban oldalanként azonos épületmagasság mellett, ld. 2b ábra) a korábbinál bonyolultabb örvénystruktúra alakul ki, mely minden utcakanyon alján az alacsonyabb épületek felé szállítja a szennyezőanyagot, ezzel növelve az ott közlekedő gyalogosok, továbbá az alacsony épületek lakóinak szennyezőanyag terhelését. Összességében elmondhatjuk, hogy a globális átszellőzés tekintetében az aszimmetrikus utcaközök nem, vagy csak kis mértékben (a vizsgált paramétertartományban maximum 7%-kal) képesek a levegőminőség javítására.

Eltérő eredményre jutunk, ha az épületek magassága az áramlás irányára merőlegesen, azaz egy épületkomplexumon belül is változik. Bár amennyiben az épületek tornyai egymás mögött helyezkednek el, nem tapasztalható jelentős javulás az átszellőzés jóságában, azonban a sakktáblaszerű toronykiosztás (2c ábra) képes a levegőminőség számottevő, 37%-os javítására. Az alacsony épületek felett a szél képes mélyen behatolni a városi geometriába, a tornyok közötti irányváltások (2d ábra) pedig intenzív keveredést idéznek elő az utcaszínt is, ami elősegíti a szennyezőanyagok távozását.

Hasonló jelenségnek lehetünk tanúi a toronyházak esetén is. Szembeötlő, hogy az épületek között akadálytalanul elfújó szél az eltolás nélküli esetben is (2e ábra) képes a talajmenti szennyező-koncentráció jelentős csökkentésére (38%) a referenciaesethez képest. A szomszédos utcaközökben található épületek teljes átfedése esetén ugyan a szennyezőanyagok képesek felgyülemelni az épületek leválási buborékában, de ezt a toronyházak áramlás irányra merőleges eltolásával (2f ábra) orvosolni tudjuk. A gyalogosok szennyezőanyag-terhelése a szomszédos épületsorok átfedésének csökkentése mellett szintén csökken, a levegőminőség javulásának maximuma – a toronyházak sakktáblaszerű elrendezése esetén – 52%-os az azonos hasznos térfogattal rendelkező homogén utcakanyonsorhoz képest. A hatékony átszellőzés mozgatórugója ez esetben az, hogy az épületek között elhaladó nagy sebességű, erősen fluktuáló áramlás képes az épületek nyomában megragadó szennyezőanyagok hatékony eltávolítására.

3. ÖSSZEGZÉS

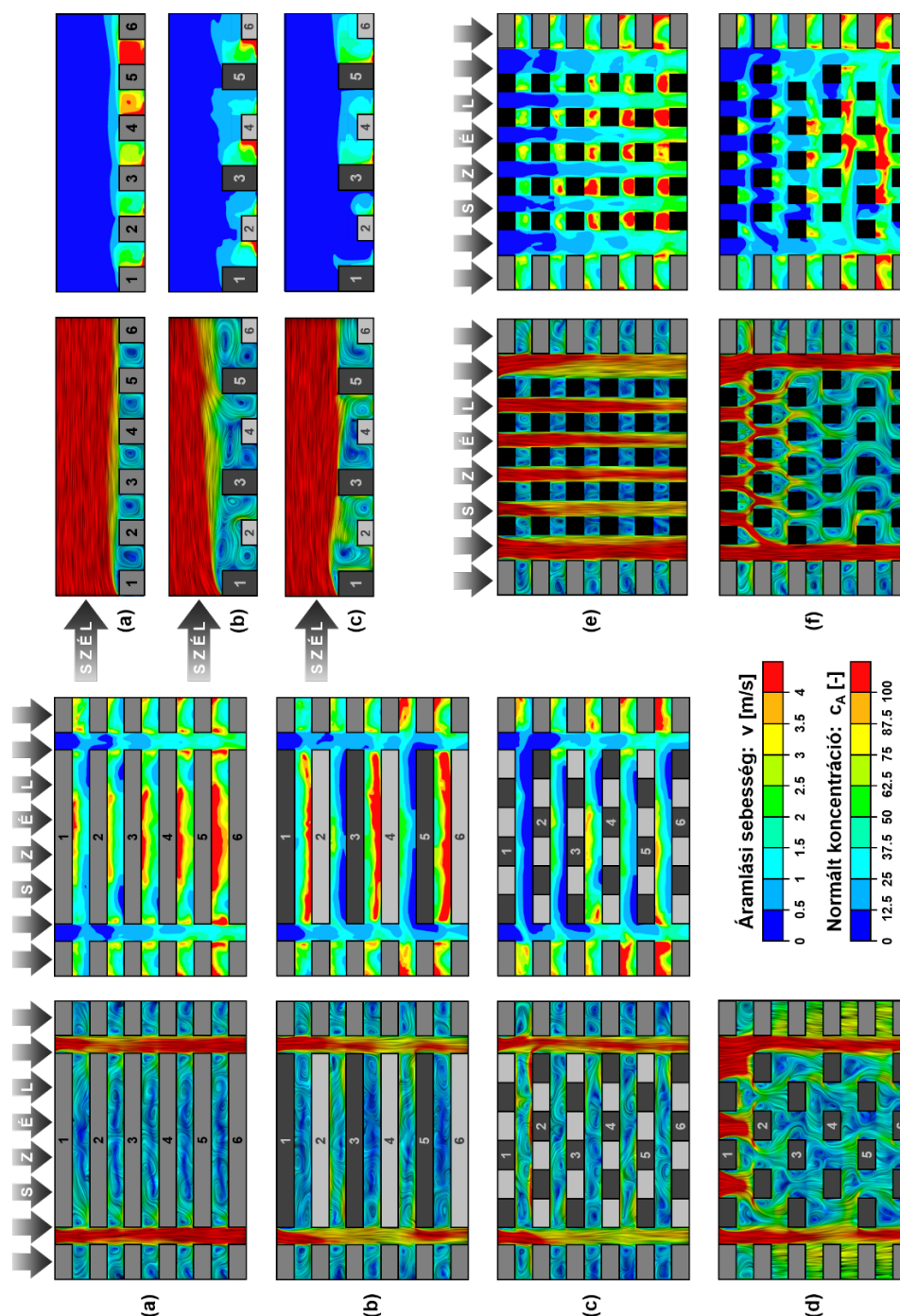
Az ANSYS Discovery Live segítségével létrehozott numerikus szélcsatorna segítségével azonos térfogatú, de különböző elrendezésű épületegyütteseket vizsgáltunk meg a városi átszellőzés hatékonyságának szempontjából. Megállapításra került, hogy az utcakanyonokat alkotó épületek tetején sakktáblaszerűen elhelyezkedő tornyok kialakítása, valamint a magas toronyházak létesítése képes az utcaszínti szennyezőanyag-koncentráció jelentős mértékű csökkentésére.

Támogatás: Ez a tanulmány a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal K 124439 sz. pályázatának támogatásával készült. A kutatást továbbá az Emberi Erőforrások Minisztériumának Felsőoktatási Kiválósági

Köszönetnyilvánítás: A szimulációhoz szükséges hardvert és szoftvert a CFD.HU Kft. biztosította.

Szakirodalmi hivatkozások:

- [1] Tominaga, Y.; Stathopoulos, T. CFD Simulation of Near-Field Pollutant Dispersion in the Urban Environment: A Review of Current Modelling Techniques. *Atmospheric Environment* **79**, **2013**, 716–730.
- [2] Kristóf, G.; Füle, P. Optimization of Urban Building Patterns for Pollution Removal Efficiency by Assuming Periodic Dispersion. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **162**, **2017**, 85–95.
- [3] Kristóf, G.; Papp, B. Application of GPU-Based Large Eddy Simulation in Urban Dispersion Studies. *Atmosphere* **9** (11), **2018**, 442–463.
- [4] Oke, T.R. Street Design and Urban Canopy Layer Climate. *Energy and Buildings* **11**, **1988**, 103–113.



2. ábra. Az eredmények megjelenítése: *időátlagolt sebesség*- (bal oldali oszlopok) és *koncentrációmezők* (jobb oldali oszlopok). A sötétebb szürke színek magasabb épületeket jelölnek.