

Miskolc átszellőzésének vizsgálata GPU alapú nagyörvény szimulációval

Assessment of the Ventilation of Miskolc Using GPU-Based Large Eddy Simulation

SZILÁGYI Mátyás Ákos, PAPP Bálint

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: SZ. M. Á.: sz.matyas11@gmail.com P. B.: papp@ara.bme.hu

Abstract

The present study demonstrates the practical application of a previously validated pollutant dispersion model [1] utilizing a numerical wind tunnel in ANSYS Discovery Live. The GPU-based CFD solver makes it possible to obtain statistically converged LES results in a couple of hours, much faster than a traditional CPU-based one, making it a powerful tool for the quick comparison of different geometries. In the numerical wind tunnel, the air quality of a soon to be rebuilt residential area of Miskolc was examined. The current building layout is compared with 4 new designs based on the exposure of pedestrians and occupants to traffic-induced air pollutants.

Keywords: Computational Fluid Dynamics (CFD), Large Eddy Simulation (LES), urban air pollution, building aerodynamics, Miskolc

Kivonat

A tanulmány egy az ANSYS Discovery Live-ban létrehozott numerikus szélcsatornában egy korábban már validált szennyezőanyag-terjedési modell [1] gyakorlati alkalmazását mutatja be. A szoftver GPU alapú megoldója a hagyományos CPU központú szervereknél nagyságrendekkel gyorsabb, pár óra alatt statisztikailag bekonvergált nagyörvény szimulációs (LES) eredményekre juthatunk, így hatékony eszköz különféle geometriák gyors összehasonlítására. A numerikus szélcsatornában Miskolc egy átépítés előtt álló lakónegyedének levegőminőségét vizsgáltuk meg. A jelenlegi beépítés 4 új tervezett elrendezéssel kerül összehasonlításra a gyalogosokat és az épületek lakóit érő szennyezőanyag-terhelés alapján.

Kulcsszavak: numerikus áramlástan (CFD), nagyörvény szimuláció (LES), városi légszennyezés, épület-aerodinamika, Miskolc

1. A NUMERIKUS SZÉLCSATORNA MODELL

Az eddig született városi szennyezőanyag-terjedési vizsgálatok jelentős része a Reynolds-átlagolt Navier-Stokes (RANS) egyenlet megoldásával készült. Ennek elsődleges oka az, hogy ezen áramlástan szimulációk számítási kapacitás-igénye egy nagyságrenddel kisebb a skálafelbontó turbulenciamodellek (pl. DNS, LES, DES, SAS) hardverigényeinél.

A városi áramlásokat bonyolult, háromdimenziós struktúrák, örvényleválások és intenzív recirkulációs zónák jellemzik, melyek hatására az áramlás és a szennyezőanyag-eloszlás időben dinamikusan változó lesz. Az ilyen jelenségek modellezésére a RANS megoldók korlátozottan alkalmasak csak: a koncentráció időbeli ingadozásainak hiánya miatt az oldalirányú és függőleges diffúziót gyakran alulbecslik, valamint a gyalogosok szennyezőanyag-terhelése szempontjából kritikus időbeli csúcserőtekeket sem képesek visszaadni [2, 3]. A domináns áramlási struktúrák térbeli és időbeli felbontására képes nagyörvény szimuláció (Large Eddy Simulation, LES) alkalmasabb lehet a szennyezőanyag-eloszlás pontos számítására és az időben fluktuáló koncentrációmaximumok megmutatására is.

A jelen tanulmányban alkalmazott numerikus szélcsatorna modellt az ANSYS Discovery Live 2019R3 szoftverben hoztuk létre, mely a kontinuitási, a Navier-Stokes és az energiaegyenleten alapuló áramlástan

megoldó CUDA-kompatibilis GPU-kon történő parallelizált futtatásával a hagyományos CPU-központi szimulációknál egy nagyságrenddel gyorsabban képes statisztikailag bekonvergált LES eredmények előállítására. Esetünkben, egy Nvidia GeForce GTX 1080Ti, 11 GB VRAM-mal rendelkező videokártyán ez 3-4 óra futásidőt jelent 9,1 millió cella alkalmazása mellett – ami a több mint egy óra időtartamot lefedő szimulációk esetén közel valós idejűnek tekinthető. Az alkalmazott turbulenciamodellel nagyörvény szimuláció (LES), Smagorinsky subgrid-scale modellel kiegészítve. A tranziens szimulációkban időben változó időlépést alkalmazunk, a Courant szám $C = u \cdot \Delta t / \Delta x = 1,8$ -nál kisebb értéken tartása mellett (amiben u [m/s] a sebességet, Δt [s] az időlépés nagyságát, Δx [m] pedig a hálófelbontást jelöli).

A modellben nincs lehetőség tetszőleges skálatranszport definiálására, azonban a korábban bemutatott és validált diffúzió-hőtranszport analógia [1] használatával – a kapcsolt hőtani és áramlási szimuláció segítségével – modellezni tudjuk a szennyezőanyag-terjedést. A módszer alapja az alább látható diffúziós egyenlet és az összenyomhatatlan közeg hőtranszport-egyenletének hasonlósága, valamint a peremfeltételek megfeleltethetősége.

$$\frac{dc}{dt} = \nabla \cdot (D \nabla c) \quad \text{ill.} \quad \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (a \nabla T) \quad (1)$$

A fenti egyenletekben c [kg/m³] a passzív, nem ülepedő szennyezőanyag-koncentrációt, t [s] az időt, T [K] az abszolút hőmérsékletet, D [m²/s] a diffúziós, a [m²/s] pedig a hődiffúziós tényezőt jelöli. A hőtranszport analógia fennállásának feltétele, hogy a Lewis szám ($Le = a/D$) értéke egységnyi legyen. Az analógia szerint a levegő hőmérséklete a szennyezőanyag-koncentrációnak (0°C jelöli a teljesen tiszta levegőt), az utakon definiált felületi hőforrás intenzitása pedig a járművek által kibocsátott szennyezőanyag-áramnak felel meg.

A különböző geometriák közvetlen összehasonlíthatósága úgy biztosítható, ha a szennyezőanyag-koncentrációt reprezentáló hőmérsékleteredményeket a szimulációt jellemző mennyiségekkel dimenziótlanítjuk:

$$c^* = \frac{T U_{BL} \rho c_p}{Q_T / A} = \frac{c U_{BL}}{Q_c / A}, \quad (2)$$

ahol U_{BL} [m/s] a szabad áramlásban (a jelen szimulációban a tartomány tetejéhez közel, 46 m magasan) mérhető átlagsebesség, ρ [kg/m³] a levegő sűrűsége, c_p [J/(kg·K)] az izobár fajhője, A [m²] a modell teljes alapterülete, Q_T [W] pedig az azon bevitt összes hőáram. Fontos megjegyezni, hogy a hőtranszport analógia segítségével számított dimenziótlan koncentrációeloszlás, valamint a valós szennyezőanyag-kibocsátás (Q_c [kg/s]) ismeretében következtetni tudunk a levegőben mérhető szennyezőanyagkoncentrációra (c [kg/m³]) is.

A normált átlagkoncentráció reciproként határozható meg a geometria átszellőzési hatékonysága, ami megfelel a tömegáramra vonatkoztatott Stanton-számnak, azaz a vizsgált épületrendezést jellemző dimenziótlan anyagátadási tényezőnek [4]:

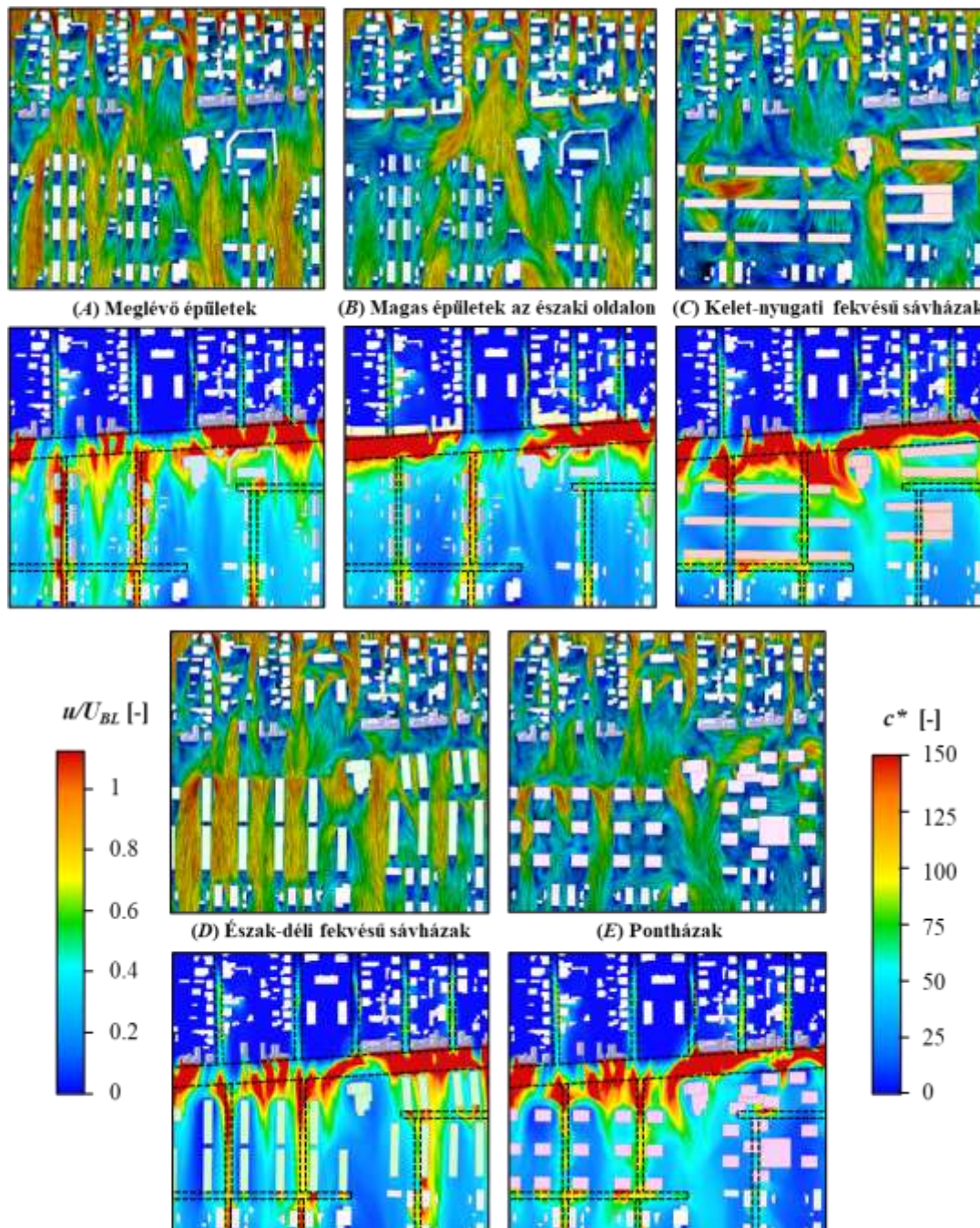
$$k^* = \frac{1}{\langle c^* \rangle}. \quad (3)$$

2. A VIZSGÁLT ÉPÜLETRENDEZÉSEK ÁTSZELLŐZÉSE

A vizsgált lakóterület a miskolci Újgyőri piac környékén, egy nagy forgalmú főúttól (Andrássy Gyula u.) délre fekszik, ahonnan a járművek által kibocsátott szennyezőanyagot az uralkodó – északról 5 fokkal nyugat felől fújó – szél a házak közé szállítja. A lakóterület átszellőzése a jelenlegi beépítés mellett a Molnár [5] által tervezett négy lehetséges épületrendezés esetére lett megvizsgálva, ahogy az az 1. ábrán látható.

A jelenlegi beépítést (A) jellemzően a mellékutcák mellett álló 6 m magas sátozott lakóházak (22 db), melléképületek és három nagyobb épületegyüttes alkotja. A főút északi oldalára a B esetben átlagosan 13 m magas, 40 m hosszú sávházakat terveztek. Ezek az új épületek a vizsgált területen kívül esnek, a hatásuk azonban jelentős a déli oldalon kialakuló szennyezőanyag-eloszlás szempontjából. A C esetben 80-100 m hosszúságú, kelet-nyugat tájolású sávházakat, míg a D esetben észak-dél tájolású, 50 m hosszú sávházakat látunk. Az E esetben a terület nyugati felén 13,5 m magas, szabályosan elrendezett pontházak, míg a keleti oldalon eltérő magasságú (max. 25 m) pontházak lettek elhelyezve. A jellemző épületmagasság a sávházak és a pontházak esetében egyaránt 16 m. A CFD modellben alkalmazott kb. 90 cm oldalhosszúságú egyenküzi hexa háló felbontása korábbi tanulmányok szerint [6] megfelelő az épületek körüli domináns áramlási struktúrák felbontására. A 13,5 m magas pontházak kb. 8, a 16 m magas sávházak kb. 30 lakást foglalnak magukban.

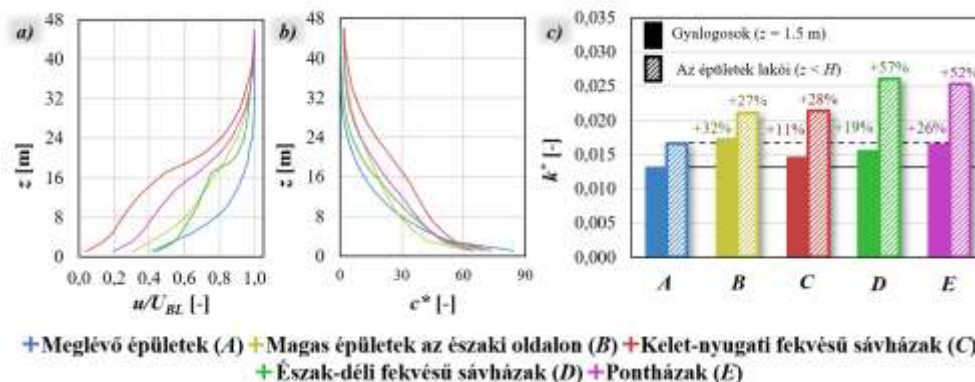
A számítási tartomány alapterülete $350 \text{ m} \times 395 \text{ m}$, magassága 48 m . A belépő peremfeltétel a numerikus szélcsatorna északi oldalán megadott 5 m/s nagyságú, egyenletes megoszlású szélesség. A főút északi oldala a numerikus szélcsatorna áramláselőkészítő szakaszaként fogható fel: az itt elszórtan álló alacsony épületek érdességi elemként működnek, így a déli területeket elérve a kialakuló sebesség- és turbulenciaintenzitás-profilok jól közelítik a városi beépítésre jellemző atmoszférikus határreteget. A számítási tartomány oldalain és tetején szimmetria, a kilépésnél rögzített 0 Pa nyomás peremfeltételt adtunk meg. A gépjárműforgalom szennyezőanyag-kibocsátását a hőtranszport analógia értelmében a főúton $10\,000 \text{ W/m}^2$, a mellékutcákon 3125 W/m^2 hőáram-sűrűséggel reprezentáltuk, ami megfelel az elhaladó autók számában mérhető tízszeres különbségnek: $Q_{T,fő} W_{fő} = 10 \cdot Q_{T,mellék} W_{mellék}$ (ahol W [m] az utak szélessége).



1. ábra. Időátlagolt sebesség- és koncentrációeloszlások gyalogos fejmagasságban ($1,5 \text{ m}$) a meglévő és a tervezett beépítések esetén. Az ábrákon a szél fentről lefelé fúj. Az utak helyét szaggatott vonalak jelölik.

A jelenlegi beépítés (1. ábra, A eset) esetében a talajközeli légrétegek erősen szennyezettek, a sáttortetős házak között lelassuló áramlásban a szennyezők megrekednek, ezzel jelentős koncentrációcsúcsokat okozva a mellékutcákban. Az északi oldali magas épületek (B) nyomában megjelenő vízszintes forgástengelyű örvények az épületek tövébe szállítják a főúton kibocsátott szennyezőanyagokat, így jelentősen csökkentik a talaj mentén

délre sodródó szennyezőanyag koncentrációját, ahogy az a 2b. ábrán látható koncentrációprofilok közötti jelentős eltérésben is látszik. A *C* esetben szintén csökken a szennyezőanyag-terhelés, azonban a javulás itt a főút mentén elhelyezkedő sávház-sor árnyékoló hatásának köszönhető. Érdekes megfigyelni a 2a. ábrán, hogy a szélirányra merőlegesen fekvő sávházak jelentősen lelassítják a szelet. A *D* esetben a sávházak szélel párhuzamos elrendezése felgyorsítja, megvezeti az áramlást (ld. 1. ábra), így a déli területek átszellőzése a meglévő beépítéshez képest hatékonyabbá válik. Ugyan az *E* esetben a pontházak az *A* esethez képest számottevően lelassítják az áramlást (2a. ábra), de jelentős mértékű turbulenciát is keltenek, ami intenzívebbé teszi a talajszinti keveredést, ezzel meggyorsítva a szennyezőanyagok távozását is. Ahogy az a 2c. ábrán látszik, mindegyik tervezett épületelrendezés képes az átszellőzés javítására. A gyalogosok számára a legnagyobb javulást az északi oldalra tervezett magas épületek (*B*) és a pontházak (*E*) okozzák, az épületek lakóinak szempontjából pedig az észak-déli fekvésű sávházak (*D*) és a pontházak (*E*) a legkedvezőbbek. Kiemelendő, hogy a pontházakkal elérhető hatékony átszellőzés kevésbé függ a széliránytól, mint a sávházak esetében. A térbeli áramlási struktúrákat és a légköri terjedési folyamatokat videón is megmutattuk [7].



2. ábra. A különböző beépítési eseteket jellemző függőleges irányú dimenziótlan sebesség- (a) és koncentrációprofilok (b). Az épületelrendezések átszellőzési hatékonysága (c).

3. ÖSSZEGRZÉS

Ebben a tanulmányban egy validált szennyezőanyag-terjedési modell segítségével Miskolc egy átépítés előtt álló lakótelepének átszellőzését vizsgáltuk meg GPU alapú nagyörvény szimuláció segítségével, a jelenlegi és négy tervezett beépítés esetén. Az áramképek és a szennyezőanyag-eloszlások összehasonlítása alapján megmutattuk, hogy a területen a gyalogosok és az épületek lakóinak szennyezőanyag terhelése pontházak építésével hatékonyan csökkenthető: az átszellőzés 26-52%-kal javul a meglévő esethez képest.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ez a tanulmány a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal K 124439 sz. pályázatának támogatásával készült. A szimulációhoz szükséges hardvert és szoftvert a CFD.HU Kft. biztosította.

SZAKIRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Kristóf, G.; Papp, B. Application of GPU-Based Large Eddy Simulation in Urban Dispersion Studies. *Atmosphere* 9 (11), **2018**, 442–463.
- [2] Schatzmann, M.; Leidl, B. Validation and application of obstacle-resolving urban dispersion models. *Atmospheric Environment*, 36 (30), **2002**, 4811–4821.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Molnár, K. Lélegzet: avagy Miskolc felett a szél... *Szakkolgozat*, **2020**, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.
- [6] Xie, Z.; Castro, I. P. LES and RANS for turbulent flow over arrays of wall-mounted obstacles. *Flow, Turbulence and Combustion*, 76(3), **2006**, 291.
- [7] Miskolc átszellőzése. 2021. <https://youtu.be/5FpXit8z9yU>