Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar Áramlástan Tanszék

## A városi szél

Városi felszín fölötti légköri áramlások numerikus modellezése

AZ MTA DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Dr. Kristóf Gergely

Budapest, 2021

#### Bevezetés

A városok növekedése elsősorban a városi anyagcsere, így a közlekedés, az áruforgalom, a vízforgalom, az energiaforgalom és az átszellőzés biztosításában jelent műszaki kihívást. A kibocsátott hő és légszennyezők elszállítása természetes úton történik, melyre hatással vannak a meteorológiai jelenségek, továbbá a városi beépítés geometriai és termikus sajátosságai. A városi szél életünk fontos részévé vált.

Légszennyezés szempontjából a szélcsendes időszakok kritikusak. Ilyen meteorológiai állapotokban csak a felszín helyi hőmérsékleti egyenlőtlenségei által keltett lokális szellők enyhítik a felszín közelében, az elsősorban közlekedési eredetű légszennyezők felhalmozódását. Közismert, hogy a városi felszín melegebb a környező, beépítetlen területhez képest, a városközpont felett feláramlás alakul ki, így a felszín közelében a városi szellő a külvárosból a városközpont felé fúj, létrehozva az 1. ábrán illusztrált áramképet. A hősziget jelenség okozta konvekciónak többféle ismert – pozitív és negatív – hatása van a város klímájára és levegőminőségére. Káros hatásai közül kiemelendő a belvárosi környezetben megnövekedett hőstressz, és a kánikulai időszakban, főként idősebb emberek körében megnövekedett mortalitás. Máig nyitott kérdés, hogy a várostervezés miként aknázhatja ki a városi szellő pozitív hatásait.



1. ábra Balra: A városi hősziget okozta konvekció szerkezete. Jobbra: a nyomás, a hőmérséklet és a transzformált hőmérséklet változása a z vertikális koordináta függvényében.

A legtöbb ismert numerikus áramlástani (Computational Fluid Dynamics, a továbbiakban CFD) megoldó – például FLUENT, STAR-CCM+, CFX, OpenFOAM – a nyomásmezőt prognosztikai mennyiségként alkalmazza, mely a mozgásegyenlet divergenciája és a kontinuitási egyenlet kombinálásával előállított Poisson-egyenlet numerikus megoldása. A nyomásgradiens ugyanakkor – a gravitációs erő mellett – fontos tagot képez a mozgásegyenletben: a hidrosztatikai egyensúly csak a nyomásból származó erő és a gravitációs erő tökéletes egyezése esetében jöhet létre. Nagy hibák léphetnek fel, amennyiben a megoldásban a tehetetlenségi erőt jelentősen meghaladó hidrosztatikus erők vannak jelen, így például stabil rétegződésű folyadékok esetében,

mivel a változó sűrűségből adódóan függőleges irányban változó intenzitású hidrosztatikai erőket a legtöbb CFD megoldó nem képes leválasztani a modellegyenletekről. A városi cirkuláció (Urban Heat Island Convection, UHIC) kialakulásában a stabil rétegződésen kívül további mezoskálás légköri hatások is szerepet játszanak, melyeket az általános célú CFD megoldók modellegyenletei nem vesznek figyelembe.

Dolgozatom **1. és 2. tézisei** olyan transzformációs eljárást mutatnak be, mellyel az általános célú CFD megoldók alkalmassá tehetők stabil rétegződésű folyadékban kialakuló áramlások vizsgálatára és a mezoskálás légköri hatások figyelembevételére. A módszer lényeges eleme az energiaegyenletben alkalmazott, vertikális sebességkomponenssel arányos negatív hőforrás, amellyel figyelembe vehetők a hőmérsékleti rétegződés és a nyomásváltozás okozta adiabatikus hőmérsékletváltozás hatásai a hidrosztatikai erők teljes mértékű eltávolítása mellett. Az 1.ábrán látható módon, *T* abszolút hőmérséklettől eltérően, a numerikus modell alapját képező munkaegyenletekben alkalmazott  $\tilde{T}$  transzformált hőmérséklet konstans profillal adható meg az egyensúlyi állapotban. A felemelkedő légáramlásban  $\tilde{T}$  csökkenését a járulékos hőforrás hozza létre.

A javasolt transzformációs eljárás eddigi hasznosításai a városi hősziget konvekció vizsgálatára (Wang és társai, 2017) a hegyvidéki szélhatások elemzésére (Schneiderbauer és Pirker, 2010), gravitációs belső hullámok és lejtőviharok vizsgálatára (Rácz és társai, 2013), valamint a nedvességtransport és fázisátalakulás modelljével kiegészítve, a nedves hűtőtornyok csóvájának elemzésére (Rácz és Kristóf, 2016) terjedtek ki.

A városi eredetű légszennyezés elsődlegesen az épületek fölötti szél által hajtott turbulens keveredés útján távozik a közvetlen életterünkként szolgáló utcakanyonokból. Az épületek egyúttal légellenállást is képeznek, lassítva a légmozgást az áramlás irányában soron következő utcák fölött, ezzel korlátozva azok átszellőzését. A közlekedési eredetű légszennyezők hígulása egy érdes felszín feletti, turbulens impulzus- és anyagátadási folyamatként fogható fel, melyben a felszín geometriai kialakítása döntő szerepet játszik.

Levegőminőség és légellenállás szempontjából is a zérusértékű épületmagasság lenne a legkedvezőbb, azonban tekintettel kell lennünk az épületek hasznos térfogatára: adott beépítési raszterben, adott hasznos épülettérfogat legkedvezőbb elrendezését célszerű keresnünk.

Levegőminőség szempontjából optimális beépítési formák kereséséhez mindenekelőtt csökkenteni kell a geometriai paraméterek számát. Ennek egy lehetséges módja, ha a várost az 2. ábrán látható módon, ciklikusan ismétlődő, egyszerű geometriai

mintázattal közelítjük, feltételezve, hogy a szennyezőanyag források eloszlása is a geometriai mintázathoz hasonló periodicitást követ. Végtelenbe nyúló mintázat feltételezése esetén, valamiképpen ki kell vezetni a felszín közelében bevitt légszennyezést a modelltartományból.



2. ábra Balra: Budapest egy részletének (13. kerület) műholdas képe. Jobbra: Tipikus középeurópai beépítési forma.

Dolgozatom **3. tézise** a bordázott csatornák hőátadási tényezőjének meghatározása céljából a Patankar (1977) által bevezetett módszer általánosításával, egy szférikusan ciklikus modelltartományban alkalmazható szennyezőanyag transzport modellt mutat be, mely lehetővé teszi a turbulens anyagátadási tényező és a felszín ellenállásának meghatározását tetszőleges szélirány esetén. A periodikus terjedésmodellre építve, dolgozatom **4. tézisében** definiáltam a dimenziótlan k\* hígítási tényezőt, mely az adott beépítés átszellőzési hatékonyságát a kibocsátás intenzitásától és a szélerősségtől függetlenül minősíti. k\* felhasználásával, az **5. tézisben** megfogalmaztam egy optimalizálási feladatot, valamint egy hasonlósági elvet, melyek alkalmazása levegőminőség szempontjából kedvező beépítési formákat eredményezhet.

Négyzetrácsos formában elrendezett, négyzetes oszlop alakú épületek esetében a periodikus tartományban végzett optimálás ésszerű eredményre vezetett: az épületek magasságát úgy célszerű megválasztani, hogy a közöttük fennmaradó utcákra jellemző épületmagasság-utcaszélesség arány (H/W) minimális legyen. A nagy Reynolds-számú áramlások önhasonlósága alapján, a városközpont felé haladva egyre kevesebb, azonban szélesebb utca létrehozása látszik célszerűnek a városi levegőminőség szempontjából.

A dolgozatomban bemutatott periodikus terjedésmodell felhasználható a porózus felszínmodellek fejlesztésére, valamint nagyobb méretskálájú meteorológiai modellek felszínparamétereinek behangolására a városi beépítés geometriai adatainak figyelembevételével. Az energiaegyenlettel kiegészítve, a modell alkalmassá tehető a légszennyezés szempontjából legkritikusabb szélcsendes és gyenge szeles meteorológiai állapotok vizsgálatára.

Érdes síkfelület fölött a Gauss-fáklya modell meglehetősen pontosan képes visszaadni a pontforrásból kibocsátott nyomgáz szélcsatornában megfigyelhető koncentrációeloszlását. Ha azonban a modelleredményeket a terepi méréseken megfigyelt koncentráció-eloszlásokkal vetjük össze, már néhány száz méteres távolságban is igen jelentős, nagyobb távolságban pedig drasztikus eltéréseket figyelhetünk meg. Az eltérések fő oka, hogy modellezés alapját képező szélcsatornás kísérlet csak korlátozott méretű turbulens áramlási struktúrák előállítására képes. Emellett az atmoszférikus turbulencia kialakulásában szerepet játszanak olyan mezoskálás légköri hatások, melyeket sem a szélcsatorna vizsgálatok, sem az általánosan alkalmazott CFD modellek nem vesznek figyelembe, így például a felszín feletti sebességprofil irányváltozása az Ekman-rétegben: magasabb rétegekből a felszín közelébe keveredő légtömegek a felszíni széltől eltérő irányban mozognak, ezért rövid időre, jelentős szélirányváltozást okoznak a felszín közelében. Szélcsatornában a szélsebesség iránya – a természetes szélhez képest – kevésbé változik.

A tartomány méretét meghaladó méretű turbulens struktúrák (makroszkopikus turbulencia) hatását, a dolgozatom **6. tézisében** bemutatott modell szerint, az áramlás létrehozása céljából a periodikus modelltartományba bevezetett térfogati hajtóerő irányának és intenzitásának időbeli változtatásával vehetjük figyelembe. A hajtóerőt úgy szabályozzuk, hogy a tartomány egyetlen pontjában, ahol a vízszintes sebességkomponensek mért idősorai is rendelkezésre állnak, a modell alapján számított sebességmező a mérési adatsornak megfelelő értékekhez közelítsen. A hajtóerő térbeli megoszlását és a szabályzás relaxációs idejét a makroszkopikus turbulenciára jellemző hossz és időléptékek alapján határozzuk meg. Átlagsebesség és turbulencia intenzitás szempontjából jó egyezést mutattak a modelleredmények a párhuzamos utcakanyon-modelleken, a Sun Yat-sen egyetem munkatársai által végzett terepi mérésekkel, az illesztési ponttól eltérő négy további megfigyelési pontban.

Lényeges kérdés, hogy a makroszkopikus turbulencia, melyet a szélcsatornás kísérletek és klasszikus numerikus modellek csak korlátozott mértékben képesek figyelembe venni, miként befolyásolja a légszennyezők terjedését a forrás környezetében, és attól távolabb. Dolgozatom **7. tézisében** egy Lagrange-módszerre épülő modellt mutatok be, mely korlátlan, aperiodikus tartományban végzett terjedésvizsgálatot tesz lehetővé a nagyörvény szimulációval, periodikus tartományban meghatározott sebességmező alapján, a makroszkopikus turbulencia hatásának figyelembevételével, vagy annak elhanyagolásával. Összehasonlító vizsgálataink szerint, a makroszkopikus turbulencia jelentős hatással van a forrást tartalmazó utcakanyon szennyezőanyag koncentrációjára is, és a szennyezőanyag

fáklya alakjára is. A forrás közelében megnőtt a keveredés intenzitása az utcakanyon hossza mentén, a szennyezőanyag fáklya pedig jelentősen szélesedett.

### Ajánlás a T1-T7 tézis alkalmazásához

T1) A bemutatott transzformációs módszer alkalmazásával lehetséges a komplex felszínek felett kialakuló termikus konvekció, gravitációs belső hullámok és transzportfolyamatok vizsgálata, így felhasználhatók például városklíma vizsgálatok, szélenergia hasznosítás, városi levegőminőség elemzések, lejtővihar elemzések, vulkáni felhők és más légköri katasztrófák hatásvizsgálatára, repülősportok támogatására, hűtőtorony- és kéménycsóvák előrejelzésére, továbbá csapadékképződés modellek, felszíni hó- és homokvándorlás modellezése céljából.

T2) A bemutatott térfogati forrásokra épülő módszer alkalmazásával stabil rétegződésű, összenyomhatatlan folyadékokban kialakuló áramlások vizsgálhatók, melynek lehetséges felhasználási területei például a sűrűségi rétegződés jelenlétében végzett víztartályos laboratóriumi kísérletekben megfigyelhető belső hullámok és konvekciós jelenségek modellezése, mikroskálás atmoszférikus terjedésvizsgálatok, továbbá a tengeri áramlások modellezése.

T3) A bemutatott periodikus terjedésmodell lehetővé teszi az ismétlődő érdességmintázattal rendelkező síkfelszín egyensúlyi anyag- és impulzusátadási tényezőinek meghatározását tetszőleges áramlásirány esetében, továbbá megalapozza a hőátadási folyamatok modellezését hasonló áramlási viszonyok esetén. Gyakorlati alkalmazása lehetséges például városi levegőminőség modellezése, kémiai reaktorok optimalizálása, és hőátadó felületek optimalizálása területén.

T4) A bemutatott hasonlósági szám alkalmas a vízszintes irányban szférikusan ismétlődő beépítésű városszerű felszínek jellemzésére, a légszennyezők hígítására való alkalmasság tekintetében, figyelembe véve az érdesség hidraulikai ellenállása okozta hosszútávú kedvezőtlen hatást.

T5) A bemutatott optimalizálási módszer lehetővé teszi levegőminőség szempontjából kedvező városi beépítési formák keresését automatizálható, kvantitatív módon, valamint rávilágít az átszellőzési képesség további javításának lehetőségére, a beépítési raszterméret növelésével.

T6) A bemutatott, térfogatban megoszló hajtóerő lehetővé teszi a korlátos magasságú szférikusan periodikus modelltartományban végzett nagyörvény szimulációkban a mért tranziens szélviszonyoknak megfelelő turbulens impulzusátadás figyelembevételét. Alkalmazható például városi levegőminőség és mikroklíma modellezés céljára.

T7) A bemutatott részecske-pályaszámításra épülő modell nagyobb méretű tartományban végzett aperiodikus terjedésvizsgálatokat tesz lehetővé, egy kisméretű, periodikus raszterben meghatározott időfüggő sebességmező felhasználásával.

#### Tudományos eredmények összefoglalása tézisekben

T1) Mezoskálás hatások figyelembevétele mikroskálás légköri áramlásmodellekben, transzformációs eljárás segítségével

Nyomás alapú háromdimenziós, időfüggő inkompresszibilis Boussinesq-féle sűrűségmodellre és a k-ɛ turbulencia modell valamely változatára épülő numerikus áramlástani modellek alkalmassá tehetők mezoskálás atmoszférikus áramlások elemzésére az alábbi módosítások alkalmazásával:

- 1. A T1.1. táblázat bal oldalán felsorolt képletek szerint  $\tilde{T}$ ,  $\tilde{p}$ ,  $\tilde{\rho}$ ,  $\tilde{w}$  transzformált mezőváltozók alkalmazása a numerikus modellben.
- Megoldás előtt a numerikus háló függőleges irányú torzítása a T1.1.táblázatban megadott z→ ž transzformációs összefüggés szerint. (Az eredmények kiértékelése előtt az eredeti numerikus háló a z→z inverz transzformáció alkalmazásával helyreállítható.)
- 3. A mozgásegyenletben, energiaegyenletben, valamint *k* és  $\varepsilon$  transzportegyenleteiben a T1.1. táblázat jobb oldalán felsorolt  $\mathbf{F} = S_u \mathbf{i} + S_v \mathbf{j} + S_w \mathbf{k}$ ,  $S_T$ ,  $S_k$  és  $S_{\varepsilon}$  addicionális forrástagok alkalmazása.

A transzformációs eljárás céljai:

- A. A hidrosztatikai nyomásgradiens csökkentése a modellegyenletekben.
- B. A hőmésékleti rétegződés és a vertikális áramlással járó (száraz) adiabatikus hőmérsékletváltozás figyelembevétele.
- C. A Coriolis-erő figyelembevétele.
- D. A sűrűség hidrosztatikai nyomás okozta változásának figyelembevétele.

A T1.1. táblázatban *T* [K] abszolút hőmérséklet, *p* [Pa] abszolút nyomás,  $\rho$  [kg m<sup>3</sup>] sűrűség, *u*, *v* és *w* [m s<sup>-1</sup>] az *x*, *y* és *z* irányú sebességkomponensek, *f* és  $\ell$  [s<sup>-1</sup>] a Föld szögsebességének *z* és *y* komponenséhez tartozó Coriolis paraméterek, *c*<sub>*p*</sub> az állandó nyomáson mért fajhő,  $\beta$  [K<sup>-1</sup>] köbös hőtágulási együttható, *g* [N kg<sup>-1</sup>] gravitációs gyorsulás,  $\mu_{t}$  [Pa s] turbulens viszkozitási tényező, Prt turbulens Prandtl-szám,  $\Gamma$  [K m<sup>-1</sup>] szárazadiabatikus hőmérsékleti gradiens,  $\gamma$  [K m<sup>-1</sup>] hidrosztatikus hőmérsékleti gradiens, *k* [m<sup>2</sup> s<sup>-2</sup>] turbulens kinetikus energia,  $\varepsilon$  [m<sup>2</sup> s<sup>-3</sup>] turbulens kinetikus energia disszipáció, *C*<sub>1 $\varepsilon$ </sub> és *C*<sub>3 $\varepsilon$ </sub> a k- $\varepsilon$  turbulencia modell állandói. A hidrosztatikai egyensúlyhoz tartozó  $\overline{T}, \overline{p}, \overline{\rho}$  (hőmérséklet, nyomás, sűrűség) profilok és további modellkonstansok értelmezése a T1.2. táblázatban található.

Forrástagok
$S_u = \rho_0 f v - \rho_0 \ell  \widetilde{w}  J$
$S_v = -\rho_0 f u$
$S_{w} = \rho_{0} \left( J^{2} - 1 \right) \left( \ell  u  J^{-1} + \beta \left( \widetilde{T} - T_{0} \right) g \right) + \rho_{0}  \ell  u  J^{-1} + \zeta  J \left( \widetilde{p} - \rho_{0} \widetilde{w}^{2} \right)$
$S_T = J S_{\Theta} - \rho_0 c_p \widetilde{w} (\Gamma - \gamma) J$
$S_k = -\beta g \frac{\mu_t}{Pr_t} (\Gamma - \gamma)$
$S_{\varepsilon} = -C_{1\varepsilon} C_{3\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \beta g \frac{\mu_t}{Pr_t} (\Gamma - \gamma)$

T1.1. táblázat A transzformációs eljárás összefüggései.

T1.2. táblázat A hidrosztatikus profil összefüggései troposzférikus és szratoszférikus tartományra. T<sub>0</sub> [K], p<sub>0</sub> [Pa] és  $\rho_0$  [kg m<sup>3</sup>] az abszolút hőmérséklet, nyomás és sűrűség tengerszinti referencia értékei,  $\gamma_t$  [K m<sup>-1</sup>] troposzférikus hőmérsékleti gradiens ( $z < z_{tp}$  esetén  $\gamma = \gamma_t$ ), egyébként  $\gamma = 0$ ),  $z_{tp}$  [m] a tropopauza magassága,  $T_{tp} = \overline{T}(z_{tp})$ ,  $p_{tp} = \overline{p}(z_{tp})$ .

	Z < Z t p	$z \ge z_{tp}$
T	$T_0 - \gamma_t z$	$T_{ip}$
$\overline{p}$	$P_0 \left(\frac{T_0 - \gamma_t z}{T_0}\right)^{\frac{g}{R\gamma_t}}$	$p_{tp}e^{-\zeta_s(z-z_{tp})}$
$\overline{\rho}$	$ ho_0 C \ e^{-\zeta \ z}$	$ ho_0 C \ e^{-\zeta \ z}$
ζ	$\zeta_t = 10^4 \mathrm{m}^{-1}$	$\zeta_s = \frac{g}{RT_{tp}}$
С	1	$e^{(\zeta_s-\zeta_t)z_{tp}}$
J	$\left(\zeta K-\zeta \tilde{z}\right)^{-1}$	$\overline{\left(\zeta K - \zeta \tilde{z}\right)^{-1}}$
K	$\frac{1}{\zeta_t}$	$\frac{1}{\zeta_t} \left( 1 - e^{-\zeta_t z_{tp}} \right) + \frac{1}{\zeta_s} e^{-\zeta_t z_{tp}}$

A tézishez kapcsolódó publikációk: Kristóf és társai (2009), Kristóf és társai (2007)<sub>a</sub>, Kristóf és társai (2007)<sub>b</sub>, Rácz és társai (2013), Rácz és társai (2007).

T2) Áramlások numerikus modellezése stabil rétegződésű, összenyomhatatlan folyadékban

A nyomáskorrekciós módszerekre és Boussinesq-féle sűrűségmodellre épülő (inkompresszibilis), háromdimenziós, időfüggő numerikus áramlásmodellek alkalmassá tehetők állandó N [s<sup>-1</sup>] Brunt-Väisälä frekvenciával és pozitív értékű köbös hőtágulási együtthatóval jellemzett, stabil rétegződésű, inkompresszibilis folyadékban kialakuló áramlások modellezésére az alábbi analógiák alkalmazásával:

- 1) Az energiaegyenletet a  $\tilde{T}$  transzformált hőmérsékletre oldjuk meg, melynek fizikai jelentése:
  - a) amennyiben a stabil sűrűségi rétegződést az egyensúlyi **hőmérsékletmegoszlás** hozza létre:  $\hat{T}$  a hőmérsékleti zavarás (egyensúlyi állapottól való eltérés) értékét fejezi ki;
  - b) amennyiben a stabil sűrűségi rétegződést változó koncentrációjú oldott anyag hozza létre: Î értéke a koncentráció zavarással a sűrűségváltozás szempontjából egyenértékű hőmérsékleti zavarást fejez ki. Ebben az esetben a numerikus modellben a folyadék hőmérsékletvezetési tényezőjének [m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>] meg kell egyeznie az oldott anyag azonos mértékegységű diffúziós tényezőjével.
- 2) Az energiaegyenletben az alábbi addicionális forrástag (hőforrás) alkalmazása:  $S_{T,inc} = \rho_0 c_p w \gamma$ , ahol  $\gamma = -(g \beta)^{-1} N^2$  negatív hőmérsékleti gradiens, w [m s<sup>-1</sup>] vertikális sebességkomponens, továbbá g,  $\rho_0$ ,  $c_p$  és  $\beta$ , a gravitációs gyorsulás [N kg<sup>-1</sup>], a folyadékra jellemző sűrűség [kg m<sup>-3</sup>], az állandó nyomáson mért fajhő [J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>] és a folyadék köbös hőtágulási együtthatója [K<sup>-1</sup>].
- 3) k- $\varepsilon$  turbulencia modell valamely változatának alkalmazása esetén *k* és  $\varepsilon$  transzportegyenleteiben  $S_k = -\beta g \frac{\mu_t}{\Pr_t} \gamma$  és  $S_{\varepsilon} = -\beta C_{1\varepsilon} C_{3\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} g \frac{\mu_t}{\Pr_t} \gamma$  addicionális

forrástag alkalmazandó.

Nagyörvény szimuláció alkalmazása esetén a sűrűségi rétegződés hálóméret alatti (fel nem bontott) turbulenciára gyakorolt hatás elhanyagolható.

A tézishez kapcsolódó publikációk: Kristóf és társai (2009), Kristóf és társai (2007)<sub>a</sub>, Kristóf és társai (2007)<sub>b</sub>, Rácz és társai (2013), Rácz és társai (2007).

# T3) Anyagátadási tényező meghatározása Euler-módszerrel, szférikusan periodikus felületű síkcsatornában – Periodic Channel Model (PCM)

Két párhuzamosan elhelyezett érdes felület közötti csatornaáramlásban – tetszőleges irányú, adott nyomásgradiens és ismert fizikai jellemzőkkel rendelkező folyadék esetén – a felületi turbulens anyagátadási tényező meghatározható az alábbi módszerrel, ha a felületi érdesség és a forrásintenzitás két merőleges irányban (x és y koordinátairányok egymásra és a felületi normálisra merőlegesek) végtelen ciklusban ismétlődik (szférikusan periodikus) és az áramlási tér középsíkjára szimmetrikus:

- 1) A modelltartomány az egyik szilárd felület egy vagy több teljes ciklusát foglalja magában, és a felületre merőleges (*z*) irányban a szimmetriasíkig terjed;
- Állandósult áramlás meghatározása az alapegyenletek numerikus közelítő megoldásával (CFD modell alkalmazásával), x és y irányokban periodikus peremfeltételek alkalmazásával;
- 3) Egy c(x,y,z) tömegkoncentrációval [kg/kg] jellemezhető, passzív, skaláris megmaradó mennyiség transzportegyenletének numerikus megoldása, az alábbi járulékos forrástag figyelembevételével:

$$S_c = -\rho_0 \sigma (ud_x + vd_y),$$

melyben  $\rho_0$  az áramló folyadék (például levegő) sűrűsége,  $d_x$  és  $d_y$  a hajtóerő irányába mutató (nyomásgradienssel ellentétes) egységvektor x és y irányú összetevői, u és v az x és y irányú sebességkomponensek az adott pontban,  $\sigma$  [m<sup>-1</sup>] adott állandó;

- A passzív skaláris jellemző forrása a szilárd felületen, vagy a felület közelében kijelölt valamely térrészben előírt koncentrációval adható meg, melynek átlagértéke Cng;
- 5) A passzív skaláris jellemző forrásának *E* intenzitása az *S*<sup>c</sup> mennyiség teljes modelltartományra képzett térfogati integrálja;
- 6) A passzív skaláris mennyiség áramlásra jellemző *Cbulk* átlagos koncentrációja, a transzportegyenlet megoldásaként meghatározott *c*(*x*,*y*,*z*) koncentráció-eloszlás *S*<sub>c</sub>-vel súlyozott, teljes tartományban képzett térfogati átlaga;
- 7) A felületi anyagátadási tényező [kg m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>] az alábbi összefüggés alapján számítható ki az *A* [m<sup>2</sup>] alapterületű modelltartományban:

$$k_c = \frac{E}{A\left(c_{ng} - c_{bulk}\right)} \; .$$

A tézishez kapcsolódó publikáció: Kristóf és Füle (2017).

T4) Szférikusan periodikus beépítési mintázat átszellőzési képességének kvantitatív jellemzésére alkalmas hasonlósági szám (k\*)

Egymásra merőleges *x* és *y* koordinátairányokban periodikusnak tekinthető geometriai mintázattal jellemezhető városi beépítésre adottak: a periodikus raszter méretei, az épületek meteorológiai szempontból reprezentatív geometriai modellje, az utcaszinten kibocsátott (például közlekedési eredetű) légszennyező raszterenként ismétlődőnek feltételezhető forráserősség-eloszlása, és az áramlási tér azon  $V_{ng}$  össztérfogatú része, melyben a légszennyezők koncentrációja vizsgálandó. Adott továbbá a szélirány  $\delta_m$  valószínűségeloszlása n diszkrét irány szerinti felbontásban (

$$\sum_{i=1}^n \delta_i = 1$$
).

A beépítési mintázat átszellőzésére jellemző  $k^*$  [-] hígítási tényező (tömeg Stantonszám) az alábbi módon számítható:

$$k^* = \left(\sum_{i=1}^n \delta_i c_{ng,i}^*\right)^{-1},$$

ahol  $c_{ng,i}^*$  az i széliránnyal párhuzamos  $\Pi \vec{d}_i$  [N m<sup>-3</sup>] térfogati hajtóerővel, a PCM modell alapján meghatározott ci koncentrációmező alapján  $V_{ng}$  térrészre átlagolt, normált koncentráció, az alábbi módon értelmezve:

$$c_{ng,i}^{*} = \frac{1}{V_{ng}} \int_{V_{ng}} \frac{c_{i} - c_{bulk,i}}{E_{i}} A \rho_{0} u^{*} dV$$

melyben  $E_i$  [kg s<sup>-1</sup>] és  $c_{bulk,i}$  [kg/kg] a PCM modell által az i szélirányra eredményezett emisszió és főtömegi koncentráció,  $\rho_0$  [kg m<sup>-3</sup>] légsűrűség,  $u^* = \sqrt{\Pi V / (A \rho_0)}$  súrlódási sebesség, és V [m<sup>3</sup>] a modell légtérfogata, A [m<sup>2</sup>] a modell alapterülete.

A nyomásgradiens Π nagyságát úgy szükséges megválasztani, hogy a modelleredmények alapján számított Reynolds-szám a vizsgált áramlásra jellemző legyen.

A tézishez kapcsolódó publikáció: Kristóf és Füle (2017).

T5) Ismétlődő beépítési mintázat optimálása az átszellőzés javítása céljából

*k*\* hígítási tényező meghatározására alkalmas formában adottak egy ismétlődő beépítési mintázat fizikai jellemzői és a szélirányok valószínűségeloszlása. Adott továbbá a modell m darab dimenziótlan, korlátos geometriai paramétere,  $p_i$ , melyek függetlenek egymástól, a beépítési raszter A [m<sup>2</sup>] területétől, továbbá a beépítési raszteren elhelyezett épületek  $V_b$  [m<sup>3</sup>] össztérfogatától ( $p_i \perp p_j$ ,  $p_i \perp A$ ,  $p_i \perp V_b$ ).

- 1) A geometriai paraméterek adott *A* és *V*<sup>*b*</sup> esetén legkedvezőbb átszellőzést biztosító értékei meghatározhatók a  $\max_{p_i} \left(k^*(p_i)\right)$  optimálási feladat megoldásával.
- 2) A városi beépítésre jellemző módon, a Reynolds-számtól független áramlás következtében az optimális geometriai kialakítás  $k^*$  és  $p_i$  állandósága mellett méretarányosan nagyítható, mely befolyásolja a terület átlagos beépítési magasságát. Például méretnövelés esetén, azonos  $k^*$  és  $p_i$  értékekhez nagyobb beépítési raszter (*A*) terület és nagyobb átlagos  $V_b$  / *A* beépítési magasság tartozik.

A tézishez kapcsolódó publikáció: Kristóf és Füle (2017).

T6) Nagyörvény szimuláció hajtása mért sebesség-idősorokkal – Transient Wind Forcing (TWF)

Az ismétlődő (kvázi-periodikus) városi beépítésben kialakuló időfüggő, háromdimenziós szélmező numerikus modellezésére előnyösen alkalmazható az alábbi módszer:

Nagyörvény szimuláció, az ismétlődő épületmintázat egyszerűsítése és a tartomány méretének minimalizálása érdekében periodikus határfeltételek alkalmazásával a tartomány minden oldalsó határfelületén. A modelltartomány vízszintes méretei a periodikus mintázat osztásához igazodnak (annak egész számú többszörösei). A modelltartomány felső határfeltétele szimmetria sík.

A légköri határrétegben átadott impulzus x (vízszintes koordináta iránynak megfelelő) komponensét a modelltartományban megoszló  $S_u$  [N m<sup>-3</sup>] térfogati erő alkalmazásával vesszük figyelembe egy  $z_0$  [m] magasságban mért  $u_m(t)$  [m s<sup>-1</sup>] x-irányú sebesség-idő függvény alapján, az alábbi összefüggések szerint:

$$S_{u}(z,t) = \rho \cdot \frac{u_{m}(t) - u(t)}{\tau(t)} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-z_{0}}{L_{0}}\right)^{2}}$$
$$\tau(t) = \Delta t_{0} + (\Delta t - \Delta t_{0}) \cdot e^{-\frac{t-t_{start}}{\Delta t_{0}}}$$
$$L_{0} = C_{L}L$$
$$\Delta t_{0} = C_{t}\frac{L}{u_{0}}$$

ahol *z* [m] vertikális koordináta, *t* [s] idő,  $\rho$  [kg m<sup>-3</sup>] sűrűség, *u*(*t*) [m s<sup>-1</sup>] a numerikus modell által eredményezett *x* irányú sebességkomponens, *L*<sub>0</sub> [m] a hajtóerőprofil sugara,  $\tau$ (*t*) [s] a szabályzás dinamikus relaxációs ideje,  $\Delta t_0$  a szabályzás statikus relaxációs ideje,  $t_{start}$  a szimuláció kezdetének időpontja, L [m] a tartomány hosszmérete,  $u_0$  [m s<sup>-1</sup>] a mért sebesség átlagértéke.  $C_L$  és  $C_t$  a módszer egység nagyságrendű, dimenzió nélküli hossz és időparaméterei.

A hajtóerő *y* irányú  $S_v$  [N m<sup>-3</sup>] komponense az  $S_u$  képletéhez hasonló módon adható meg a mért  $v_m(t)$  és számított v(t) sebesség-komponensek alapján.

A mérési pont  $z_0$  magasságát úgy kell megválasztani, hogy a mért sebesség az épületek feletti szélsebességre jellemző legyen. A modellben felbontott turbulens áramlási struktúrák szabad mozgásának biztosítása érdekében a tartomány magasságának jelentősen meg kell haladnia a mérési pont  $z_0$  magasságát. A hajtáshoz  $\Delta t_0$  relaxációs idővel azonos, vagy annál finomabb felbontású mérési adatsorok szükségesek. A mért sebességadatok a mérési pontok között időben lineárisan interpolálhatók.

A tézishez kapcsolódó publikáció: Kristóf és társai (2020), Papp és társai (2021).

T7) Aperiodikus terjedési folyamat vizsgálata periodikus modelltartományban, Lagrange-módszer alkalmazásával

A Transient Wind Forcing (TWF) modellel előállított időfüggő, háromdimenziós, periodikus sebesség mezők felhasználásával aperiodikus terjedésvizsgálat végezhető az alábbi módon:

A szennyezőanyagok terjedését pontforrásokból kibocsátott, súlytalannak tekinthető részecskék pályáinak meghatározása útján, Lagrange-módszer alkalmazásával végezzük. A módszer új eleme, hogy minden részecske esetében követjük az vízszintes (x és y) irányú periodikus ugrások számát, mely adatok felhasználásával az egy pontforrásból kibocsátott részecskék aktuális helyzete a szimuláció időtartamától függő méretű, korlátlan tartományban meghatározható. A periodikus tartományban előállított időfüggő sebességmező alapján aperiodikus terjedési folyamat vizsgálható, mely a TWF modellel előállított sebességmező alkalmazása esetén magában hordozza a modelltartománynál nagyobb méretű turbulens struktúrák (makroszkopikus turbulencia) hatását is.

A tézishez kapcsolódó publikáció: Kristóf és társai (2020), Papp és társai (2021).

#### Szakirodalmi referenciák

- Kristóf, G., & Füle, P. (2017). Optimization of urban building patterns for pollution removal efficiency by assuming periodic dispersion. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 162, 85-95.
- Kristóf, G., Papp, B., Wang, H., & Hang, J. (2020). Investigation of the flow and dispersion characteristics of repeated orographic structures by assuming transient wind forcing. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 197, 104087.
- Kristóf, G., Rácz, N., & Balogh, M. (2007)<sup>a</sup>. Adaptation of pressure based CFD solvers to urban heat island convection problems, CD, Urban Air Quality Conf. https://repozitorium.omikk.bme.hu/bitstream/handle/10890/3493/71538.pdf?sequence=1 &isAllowed=n
- Kristóf, G., Rácz, N., & Balogh, M. (2007). Application of ANSYS-FLUENT for meso-scale atmospheric flow simulations. In ANSYS Conference and 25. CADFEM Users' Meeting. Dresden, Germany (p. 8).
- Kristóf, G., Rácz, N., & Balogh, M. (2009). Adaptation of pressure based CFD solvers for mesoscale atmospheric problems. Boundary-layer meteorology, 131(1), 85-103.
- Papp, B., Kristóf, G., Istók, B., Koren, M., Balczó, M., & Balogh, M. (2021). Measurement-driven Large Eddy Simulation of dispersion in street canyons of variable building height. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 211, 104495.
- Patankar, S. V., Liu, C. H., and Sparrow, E. M. (May 1, 1977). "Fully Developed Flow and Heat Transfer in Ducts Having Streamwise-Periodic Variations of Cross-Sectional Area." ASME. J. Heat Transfer. May 1977; 99(2): 180–186. https://doi.org/10.1115/1.3450666
- Rácz N., Kristóf G. (2016). Implementation and validation of a bulk microphysical model of moisture transport in a pressure based CFD solver. Időjárás, 120, 231–254.
- Rácz, N., Kristóf, G., & Weidinger, T. (2013). Evaluation and validation of a CFD solver adapted to atmospheric flows: Simulation of topography-induced waves. Időjárás, Budapest, 117(3), 239-275.
- Rácz, N., Kristóf, G., Weidinger, T., Balogh, M. (2007). Simulation of gravity waves and model validation to laboratory experiments, 6th International Conference on Urban Air Quality, Cyprus (ISBN 978-1-905313-46-4), published on CD
- Schneiderbauer, S., & Pirker, D. D. S. (2010). Computational fluid dynamics (CFD) simulation of snow transport, erosion and sedimentation in Alpine environments and in the vicinity of massive obstacles (Doctoral dissertation, PhD thesis, Johannes Kepler University).
- Wang, X., Li, Y., Wang, K., Yang, X., & Chan, P. W. (2017). A simple daily cycle temperature boundary condition for ground surfaces in CFD predictions of urban wind flows. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 56(11), 2963-2980.