

M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**

**Gépészmérnöki Kar**

**Áramlástan Tanszék**

**Városi áramlások és szennyezőanyag-terjedés numerikus  
áramlástani modellezése – az operatív használat felé  
(Towards operational modelling of flow and dispersion in  
urban areas with Computational Fluid Dynamics (CFD))**

Tézisfüzet

Készítette: RÁKAI Anikó Judit

Témavezető: Dr. KRISTÓF Gergely

Budapest

2014

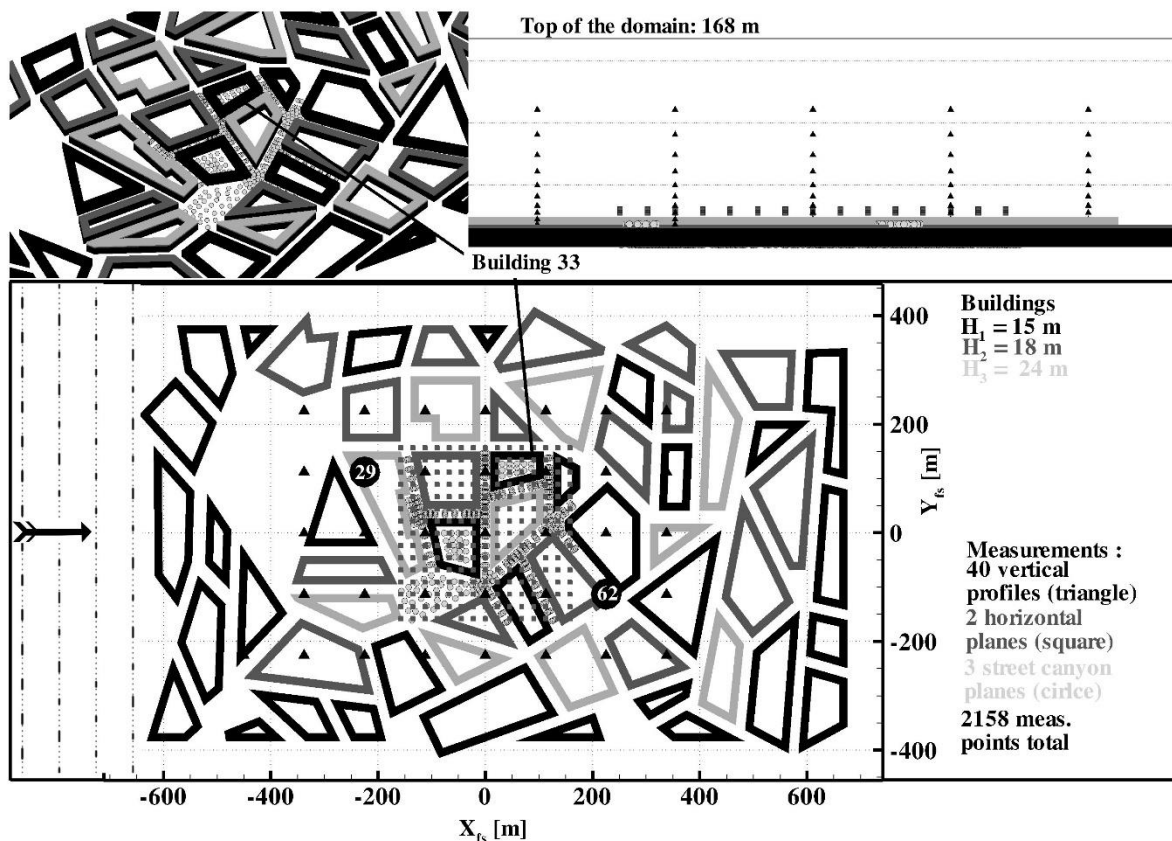
## **Bevezetés**

A városi levegőminőség modellezésével több tudományág is foglalkozik, a meteorológiában mikroskálájú épületfelbontó modelleknek nevezik ezt az ágot, míg a mérnöki tudományokban számítógépes szélmérnökségnek, az angol kifejezés használatával Computational Wind Engineering-nek (CWE). Mindkét tudományág a Navier Stokes egyenletek numerikus megoldásán alapszik, kiegészítve egy passzív skalár transzportegyenlettel a szennyezőanyagra. A számítógépek számítási kapacitásának gyors növekedésével ezek a városi levegőminőség modellek egyre népszerűbbek, és ezzel egyszerre a városi népesség aránya is egyre nő földünkön. A legnagyobb nehézség a városi levegőminőség numerikus áramlástanai modellezésével kapcsolatban, amennyiben az épületeket is szeretnénk belevonni a modellbe, a számítási folyamat összetettsége, és a ráfordítandó idő, hogy megfelelő minőségű eredményeket szolgáltatassunk a döntéshozóknak. Ez a tény hátráltatta az ilyen típusú modellek operatív használatát, amely kifejezést a disszertációban a következő értelemben használok: operatív modellezésnek tekintem a mindennapi tervezési vagy szabályozási fázisban használt modellezést, amelyet egy építésziroda vagy egy önkormányzat rendszeresen végez. A numerikus áramlástanai levegőminőség modellezésnek igen kiterjedt szakirodalma van, azonban az általános megközelítés a modellfejlesztésre koncentrál, nem térve ki az operatív modellezés elvárásaira, nevezetesen a szűkös idő és számítógépes kapacitásokra. Egy másik szempont, amelyet gyakran elhanyagolnak a modellfejlesztés során, a numerikus diszkretizációs bizonytalanság számszerűsítése, miközben ezek az épületeket is felbontó modellek összetett és numerikus szempontból nem ideális minőségű hálófelépítést követelnek meg, tehát ez a hiba elkerülhetetlen.

## **A disszertáció célja és fő témái**

A disszertációban a numerikus áramlástanai levegőminőség modellek operatív használatának kérdéseire koncentrálok. Kutatásom célja egy a korlátozott források és a modellezés pontossága közötti kompromisszum elérése, amely egyszerre a numerikus diszkretizáció hibáját is figyelembe veszi. Ennek érdekében egy numerikus kísérletet hajtottam végre, összehasonlítva négy automatikus hálózási módszert és két különböző passzív skalár terjedésmódot egy összetett városi környezetben, az úgynevezett Michelstadt modellen (lásd 1. ábra). Ehhez a geometriához kiterjedt szélcsatorna mérések állnak rendelkezésre mind a szélmező, mind a szennyezőanyag-terjedés adataival, amely elengedhetetlen egy jól meghatározott

peremfeltételekkel rendelkező validáció lefolytatásához. A numerikus diszkretizációs bizonytalanság számszerűsítéséhez Richardson extrapoláción alapuló illetve egy-hálós becslési módszereket használtam, az utóbbiak egy lehetséges alternatívái a szabványban előírt Richardson extrapoláción alapulóknak. Egy további lépésként, annak érdekében, hogy ezeket a modelleket vészhelyzeti modellezésre is használni lehessen a későbbiekben, rövid idejű kibocsátásokat, más néven puffokat is modelleztem.



1. ábra: A Michelstadt tesztet számítási tartománya a szélmező mérési pontjaival

### Mik a fő kihívások a városi áramlások és szennyezőanyag-terjedés modellezésében?

Egy összetett városi környezetben az áramlások és szennyezőanyag-terjedés modellezése áramlástanai numerikus szimulációval több ok miatt is nehéz feladat. A főbb felmerülő kihívások:

- A városi levegőminőség modellezésekor a jellemző folyamatok nagyon széles skálákon mozognak, mind térben, mind időben. A jelenleg elérhető számítógépes kapacitásokkal nem tudjuk mindezeket a skálákat felbontani. És ami még összetettebbé teszi a helyzetet, a városi környezet az atmoszférában van, amely maga is egy bonyolult fizikai folyamatokkal jellemzett folyamatosan változó környezet.

- A nem megfelelő térbeli felbontás numerikus diszkretizációs hibát okoz, amelyet nehéz számszerűsíteni és megkülönböztetni a fizikai modellünk hibájától.
- Az épületek tompa testek, amelyek körül a turbulens áramlás modellezése, különösen stacionárius megközelítésben nehézséget okoz, mivel leválások, visszacsatolódások, periodikus örvények jöhetnek létre, illetve a turbulens kinetikus energiát a modellek gyakran túlbecsülik erős nyírórétegekben.
- A szennyezőanyag-terjedés modellezése egy már eredendően nem tökéletesen modellezett szélmezőben ugyancsak nehézséget okoz.

Mindezek az említett nehézségek csökkentik a bizalmat az ilyen típusú modellek iránt. Schatzmann és Leitl 2011 a következőképpen fogalmazza meg az áramlástanai szélmező és terjedésmoდეllek városi környezetben való használatával kapcsolatos aggodalmakat: azt mondják ezeket a modelleket nem vetették alá szisztematikus értékelésnek, mégis olyan döntések meghozatalában használják őket, amelyek komoly gazdasági és politikai következményekkel járnak. Azt is hozzáteszik, a jelenleg elérhetőnél jóval nagyobb teljesítményű számítógépekre és jelentős kutatási erőfeszítésre lesz szükség ahhoz, hogy az első megbízható időfüggő épületeket is felbontó városi skálájú szennyezőanyag-terjedés modellek elérhetőek legyenek. Ebben a disszertációban ebből következően a stacionárius megközelítéssel foglalkozom.

Korábban is voltak és jelenleg is vannak jelentős kutatási erőfeszítések, hogy alátámasszák a numerikus áramlástanai modellek városi áramlás és szennyezőanyag-terjedés modellezését, illetve elősegítsék a nehézségek jobb megértését és megoldását. Egy jelenleg is folyó kutatást mindenképpen meg kell itt említeni, amelyhez ez a disszertáció is szorosan kapcsolódik, ez a COST ES 1006 Akció, amelynek témája: lokális skálájú vészhelyzeti döntéshozó eszközök alkalmazásának, döntéshozó eszközökbe való implementálásnak fejlesztése (COST ES1006 Action “Evaluation, improvement and guidance for the use of local-scale emergency prediction and response tools for airborne hazards in built environments”).

### **Miben különbözik ez a disszertáció a korábbi szakirodalmi munkáktól?**

Szeretném kiemelni azokat a fő szempontokat, amelyek megkülönböztetik ezt a munkát korábbi numerikus szélmérnöki (Computational Wind Engineering - CWE) és mikroskálájú épületeket felbontó meteorológiai témájú szakirodalmi munkáktól:

- Az operatív nézőpont: Sok olyan cikk elérhető a szakirodalomban, amelyek egy egyszerű geometriára és struktúrált hálóra nagyon jó számítási eredményt mutatnak.

Ezek azonban nem életszerűek, ha egy valódi városi szennyezőanyag-terjedési vagy levegőminőségi problémával állunk szemben. Ez a disszertáció az általános városi geometriák mindennapi megoldására koncentrálnak.

- Egy összetett városi geometria, mint teszt eset: A CWE-ben vizsgált teszt esetek jellemzően egy vagy néhány sorba rendezett kockából állnak. A Michelstadt teszt eset azonban éles sarkokat, utcakanyonokat, tereket tartalmaz, mint egy valódi város, ezzel együtt azonban részletes és megbízható mérési adatok is elérhetőek hozzá, mind a szélmezőre, mind a passzív skalár szennyezőanyagra, több kibocsátási helyről.
- A numerikus diszkretizációs bizonytalanságok számszerűsítése: Nagyon sok olyan cikk található a szakirodalomban, amelyek valamilyen modellfejlesztést (pl. turbulenciamodell) javasolnak, anélkül, hogy figyelembe vették volna a numerikus diszkretizációs bizonytalanságokat. Egyszerű blokk geometriákra és strukturált hálóra feltételezhető, hogy azok alacsonyak, azonban való életbeli használatnál ez a feltételezés már nem elfogadható.
- Automatikus hálózási módszerek: A CWE-ben megjelenő cikkek jellemző, hogy csak egyetlen hálótípust vizsgálnak, amelynek elkészítése sokszor több időt vesz igénybe, mint az utána következő számítások. Amennyiben a célunk operatív modellezés, egy automatikusan készített háló elengedhetetlen.
- Rövid idejű kibocsátások: A szakirodalom most kezd el foglalkozni ezzel a jelenséggel a numerikus áramlástanai levegőminőség modellezésben, lehetővé téve a vészhelyzeti modellezésben is a válaszadást. Ebben az esetben olyan mennyiségek az érdekesek, mint dózis, érkezési idő vagy maximális koncentráció.

### **Az új tudományos eredmények összefoglalása tézispontokban:**

#### **Tézis 1**

Új teszt esetet vontam be a városi áramlási és szennyezőanyag-terjedési folyamatok numerikus áramlástanai modellezésének validációjára használt esetek közé, amely az eddigieknél összetettebb városi geometria vizsgálatát teszi lehetővé, részletes szélcsatorna mérési adatok segítségével. A teszt eseten numerikus kísérletet hajtottam végre nem időfüggő Reynolds átlagolt (Averaged) Navier-Stokes (RANS) modell használatával, amely a szakirodalomban korábban használt vizsgálati szempontokat operatív, mindennapi mérnöki/önkormányzati használhatóságot figyelembe vevő szempontokkal is kiegészíti.

1.1: Olyan értékelő módszert dolgoztam ki, amely a következő szempontokat is figyelembe veszi az eredmények pontosságán kívül: számítási költségek, a számítás numerikus stabilitása, az automatikus hálókészítés nehézsége.

1.2: A módszer segítségével arra a következtetésre jutottam, hogy a doktori munka során városi geometriák hálózására újonnan alkalmazott, testet követő, automatikusan végrehajtható, hexahedron elemeken alapuló, a geometri felületén cellafelezéssel sűrített és testre illesztett hálózási módszer az 1.1 pontban említett szempontok szerint a legmegfelelőbb a numerikus áramlástanai modellezés operatív használatához városi áramlási és szennyezőanyagterjedési folyamatok modellezésére.

Erre a tézispontra a disszertáció 5.2. fejezetében térek ki részletesen.

Kapcsolódó publikációk: Rákai és Franke 2012b és Rákai et al 2014b

## Tézis 2

Új validációs statisztikai mérőszámot vezettem be, a validációs rátát (VR), amely a szakirodalomban használt mérőszámokkal ellentétben figyelembe veszi a numerikus szimuláció során elkerülhetetlen numerikus bizonytalanságot is a mérési és számítási eredmények összehasonlításának statisztikai értékelésében. Számításakor a mérési és szimulációs eredmények eltérését ( $D_i$ ) a validációs bizonytalansághoz ( $U_{val}$ ) hasonlítom, és ezt a teljes mérési adatbázisra ( $N$  mérési pont) átlagolom.

$$VR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i \quad \delta_i = \begin{cases} 1 & D_i \leq U_{val} \\ 0 & \text{for else} \end{cases}$$

Ennek segítségével egy adott számítás értékelésénél figyelembe vehető a mérési bizonytalanságon kívül a numerikus bizonytalanság is. Négy Richardson extrapoláción alapuló módszert hasonlítottam össze, amelyek lehetővé teszik a becsült numerikus hibából a numerikus bizonytalanság számítását egy biztonsági faktor alkalmazásával. Két turbulenciamodell, a standard és a relizable k- $\epsilon$  modell összehasonlításának példáján bemutattam, hogyan alkalmazható a validációs ráta áramlástanai numerikus szimulációs modellek értékelésére és összehasonlítására.

Erre a tézispontra a disszertáció 5.3. fejezetében térek ki részletesen.

Kapcsolódó publikációk: Rákai és Franke 2012a, Rákai és Franke 2013 és Rákai és Franke 2014a

### **Tézis 3**

Egy komplex városi geometriában három különböző helyen lévő passzív skalár szennyezőanyagforrás kibocsátásának modellezésével kiterjesztettem az eddigi szakirodalmi vizsgálatokat a forrás elhelyezkedésére való érzékenység vizsgálatával. A vizsgált helyszínek egy nyílt tér, egy utcakanyon és egy utcai kereszteződés.

3.1: A terjedésvizsgálatok legfontosabb paraméterét, a turbulens Schmidt számot és annak optimális értékét vizsgálva arra az eredményre jutottam, hogy egy nyílt téren való kibocsátás esetén annak értéke 0.7, amely eltér a szakirodalomban található korábbi, egyszerű városi geometriákon végzett vizsgálatok eredményeitől.

3.2: A másik két helyszín, az utcakanyon és kereszteződés esetén azonban ez az érték már nem az optimális, az utcakanyonban nem definiálható optimális érték, míg a kereszteződés esetén 0,5 adódik, tehát ugyanabban a szélmezőben is különböző értékekre van szükség, amely egy szélmezőtől függő paraméterválasztási módszer kidolgozását teszi szükségessé.

Erre a tézisontra a disszertáció 6.1. fejezetében térek ki részletesen.

Kapcsolódó publikációk: Rákai és Kristóf 2013, Rákai és Franke 2014, Rákai et al. 2014a

### **Tézis 4**

Kísérletet tettem a szennyezőanyag-terjedés modellezésére anizotróp (Yee et al. 2009) terjedési modell alkalmazásával egy összetett városi szélmezőben, amelyhez implementáltam a modellt a használt numerikus áramlástanai kódban

4.1: Statisztikai összehasonlítás alapján arra a következtetésre jutottam, hogy az anizotróp modell lehetővé teszi a terjedés irányfüggésének figyelembevételét, és javíthat az eredményeken, de a használt tesztesetnél csak a nyílt téren elhelyezkedő forrás esetén volt kimutatható ez a javulás, ahol az L2 norma értéke a vizsgált mérési pontok mérési és számítási értékeinek különbségére 0,29-ről 0,23-ra csökkent, az utcakanyonban és kereszteződésben lévő források esetén azonban növekedett.

4.2: Az operatív, mindennapi mérnöki/önkormányzati használhatóságot figyelembe vevő szempontok alapján azonban ez a modell nem felel meg a mindennapi használatra numerikus

stabilitási problémák miatt. Csak a legkritikább testhez illeszkedő hexahedron hálóra sikerült megfelelően konvergált végeredményeket kapni az összehasonlításhoz.

Erre a tézispontra a disszertáció 6.2. fejezetében térek ki részletesen.

Kapcsolódó publikációk: Rákai és Kristóf 2011, Rákai és Kristóf 2013

### **Tézis 5**

A városi szennyezőanyagterjedés numerikus áramlástanai modellezését kiterjesztettem a levegőminőség vizsgálatokon kívül a vészhelyzeti modellezésben szükséges rövid idejű kibocsátások vizsgálatával a komplex városi tesztesetre, három különböző elhelyezkedésű kibocsátás vizsgálatával. A problémát egy állandó szélmezőben történő időfüggő passzív skalár terjedéssel közelítettem meg. Térbeli felbontásra való érzékenység vizsgálatok segítségével arra az eredményre jutottam, hogy a nehezebben modellezhető utcakanyonban illetve kereszteződésben lévő szennyezőanyagforrások esetén ez eredmények nagyon érzékenyek a térbeli felbontásra, túl ritka háló esetén nem éri el a szennyezőanyagcsóva a receptor pontokat. Sűrűbb, az épületek felszínén  $1 \text{ m}^2$  cellaméretnél kisebb felbontással azonban ezzel a módszerrel jól közelítik a számítási eredmények a dózison alapuló rövid kibocsátási paraméterek mérési eredményeit, a vizsgált dózis és legmagasabb koncentrációhoz tartozó idő (peak time) esetén a vizsgált 8 receptor pontban egy kivételével az eredmények eltérése 65% alatti, ami egy térben és időben is alkalmazott hasonlításnál jónak mondható.

Erre a tézispontra a disszertáció 6.3. fejezetében térek ki részletesen.

Kapcsolódó publikációk: Rákai et al. 2014a

### **Tézis 6**

Passzív skalár szennyezőanyagterjedés modellezésének numerikus hibabecslését kibővítettem egy-hálós becslési módszerek vizsgálatával, amelyeket korábban más még nem alkalmazott városi geometriák szimulációjához. Ezek előnye a Richardson extrapoláción alapuló módszerekkel szemben, hogy nincs szükség három különböző felbontású hálóra a használatukhoz. A reziduál és momentum numerikus hibabecslő módszerek eredményeit összehasonlítottam a Richardson extrapoláción alapulóval, amely a szabvány szerinti módszer. A reziduál módszer a térfogati és cellaoldalakra felírt integrálok különbségéből, míg a momentum módszer a vizsgált ismeretlen második momentumára felírt transzportegyenlet segítségével becsül hibát (Jasak 1996). A két módszer becsült numerikus hibáinak és

bizonytalanságainak összehasonlítása alapján arra a következtetésre jutottam, hogy az egyhálós módszerek jellemzően kisebb értékeket adnak eredményül, de a momentum hibabecslés hasonló trendet mutat, mint a Richardson extrapolációs. Megfelelő biztonsági faktor számítási módszer kidolgozása után jelentősen megkönnyíthetik a numerikus bizonytalanságbecslést a mindennapi alkalmazásban, amely jelenleg a szakirodalmat áttekintve nem elterjedt a városi numerikus áramlástanai alkalmazásokban.

Erre a tézisontra a disszertáció 6.4. fejezetében térek ki részletesen.

Kapcsolódó publikációk: Rákai és Franke 2014a

### **Kapcsolódó publikációk:**

A. Rákai and J. Franke (2014a). “*On quantification of numerical discretization uncertainty in urban flow and dispersion modelling*”. In: Journal of Atmospheric Environment, in preparation

A. Rákai, E. Berbekar and J. Franke (2014a). “*RANS Passive Scalar Transport Modelling in a Complex Urban Area – Effect of Source Location on the Results*”. In: 6th International Symposium on Computational Wind Engineering, June 8 - 12, 2014 - Hamburg, Germany

A. Rákai and J. Franke (2014). “*Validation of two RANS solvers with flow data of the flat roof Michelstadt case*”. In: Journal of Urban Climate. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2013.11.003>

A. Rákai, G. Kristóf and J. Franke (2014b). “*Sensitivity analysis of microscale obstacle resolving models for an idealized Central-European city centre, Michel-Stadt*”. In: Időjárás, Journal of the Hungarian Meteorological Society 118/1, p 53-77, **IF: 0.289**

A. Rákai and G. Kristóf (2013). “*Microscale Obstacle Resolving Air Quality Model Evaluation with the Michelstadt Case*”. In: The Scientific World Journal 2013. DOI: [doi:10.1155/2013/781748](https://doi.org/10.1155/2013/781748), **IF: 1.73**

A. Rákai and J. Franke (2013). “*Numerical error quantification of RANS modelling in an idealized Central European city centre*”. In: International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes 6-9 May 2013, Madrid, Spain

A. Rákai and J. Franke (2012a). “*Validation of RANS flow models with flow data of an idealised Central-European city centre, Michel-Stadt*”. In: Proceedings of Conference on Modelling Fluid Flow. Budapest, Hungary, 04/09/2012-07/09/2012

A. Rákai and J. Franke (2012b). “*Validation of two RANS solvers with flow data of the flat roof Michel-Stadt case*”. In: Proc. 8th International Conference on Air Quality – Science and Application, Athens, Greece

A. Rákai and G. Kristóf (2011). “*Különböző passzív skalár terjedésmodellek használatának lehetőségei városi szennyezőanyagterjedés modellezésére (Modelling urban pollutant transport with the help of*

*different passive scalar transport models in CFD in Hungarian*”. In: OGÉT 2011-XIX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó. Csíksomlyó, Románia

**Hivatkozott irodalom:**

Jasak, Hrvoje (1996). “Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Application to Fluid Flows”. PhD thesis. Imperial College of Science, Technology and Medicine

Schatzmann, Michael and Bernd Leitl (2011). “*Issues with validation of urban flow and dispersion CFD models*”. In: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 99, pp. 169–186

Yee, Eugene, Bing-Chen Wang, and Fue-Sang Lien (2009). “Probabilistic Model for Concentration Fluctuations in Compact-Source Plumes in an Urban Environment”. In: Boundary Layer Meteorology 130, pp. 169–208