
OTKA kutatási zárójelentés

Projekt azonosító: T049573

Vezető kutató: Dr. Kristóf Gergely



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Áramlástan Tanszék

2009. július 23.

A kutatás az alábbi három pontban összefoglalható eredményekre vezetett:

1. CFD alapú szimulációs rendszer adaptálása a városi hősziget keltette áramlás elemzéséhez

A kutatás e részének célja, a város és környezete között kialakult léghőmérséklet különbség által generált atmoszférikus áramlásokat általános célú áramlástani szimulációs rendszer (CFD szoftver) segítségével történő modellezése.

A mérnöki gyakorlatban elterjedt szimulációs rendszerek előnye, hogy rendelkeznek a város részletes (ház szintű) geometriai leírásához alkalmas térbeli felbontási módszerekkel és turbulencia modellekkel. Egyes CFD rendszerek lehetővé teszik a fizikai modell alapját képező egyenletek fizikai tartalmának kiegészítését, ezáltal új effektusok figyelembevételét.

A városi hősziget jelenség széles méretskálát átfogó jelenségkör, mert a hősziget hatás a város felett és annak környezetében (mezoskálájú) áramlási teret hoz létre, ami alapvetően meghatározza a város felett kialakuló hőmérséklet profilt, azonban a város komfortjának és a beépítések- módosítások hatásának elemzéséhez finom térbeli felbontás (mikroskálájú elemzés) szükséges.

A nyomás alapú CFD szoftverek mezoskálájú áramlásokra történő adaptálására alkalmas módszer mindaddig nem állt rendelkezésre, ezért e módszer kidolgozása a kutatás fontos részét képezte.

Jelen kutatás keretében kidolgoztunk egy geometriai transzformációból és az áramlást leíró megmaradási egyenletekhez szükséges kiegészítő forrástagokból álló módszert, ami lehetővé teszi a mezoskálájú hatások figyelembevételét általános célú CFD szoftverekben.

A kidolgozott módszer az alábbi hatásokra terjed ki:

- hőmérsékleti rétegződés áramlás és turbulencia módosító hatásai;
- függőleges áramlások okozta adiabatikus hőmérsékletváltozás;
- a hidrosztatikus nyomás okozta sűrűségváltozás;
- Coriolis-erő;
- nedvesség transzport;
- légköri kondenzáció és párolgás.

A módszer mikro-léptékű városi áramlások számítására általánosan alkalmazott inkompresszibilis szolverre és k -epszilon turbulencia modell alkalmazására épül. Alkalmazásával lehetővé válik a számítási tartomány kiterjesztése a troposzféra tetejéig a nagy értékű hidrosztatikai nyomásgradiens okozta numerikus instabilitások nélkül. Az új módszert ANSYS-FLUENT szimulációs rendszerben, C nyelvű felhasználói függvények formájában implementáltuk.

Tekintve, hogy a kidolgozott eljárás a fizikai közelítésrendszert is érinti feltétlenül szükséges a módszer alapos validálása. A validációs vizsgálatokat az alábbi analitikus modellek, kisminta kísérletek, referencia számítás és nagyméretű légköri jelenségek alapján végeztük el:

- az Ekman-spirálra vonatkozó egydimenziós analitikus megoldás;
- városi hősziget okozta konvekcióra vonatkozó (háromdimenziós) víztartályos laboratóriumi kisminta kísérletből származó sebesség és hőmérséklet megoszlások;
- kompresszibilis szimulációs modellek esetében alkalmazott standard kétdimenziós teszt-eset;

- kis amplitúdójú gravitációs hullámokra vonatkozó analitikus megoldás;
- víztartályos laboratóriumi modellben előállított nagy amplitúdójú gravitációs hullámok;
- egy 1972-ben Boulderben (Colorado) bekövetkezett, sokrétű mérésrel alátámasztott, jól dokumentált valóságos lejtővihar, amely szintén sokak által vizsgált eset.

Az OTKA projekt keretében kidolgoztuk és ANSYS-FLUENT rendszerben implementáltuk az atmoszférikus kondenzáció és párolgás modelljét is. E hatás figyelembevétele jelentőséggel bír a városi hősziget jelenség elemzésében, mert a városközpontokban jellemző magasabb hőmérséklet jelentős részben a városok kisebb intenzitású párologtatásának köszönhető. A vonatkozó publikáció előkészítése folyamatban van.

A mezoskálájú légköri folyamatok CFD alapú szimulációs rendszerben történő leírására kifejlesztett módszernek számos, az OTKA pályázat tárgykörén túlmutató alkalmazási területe is lehetséges, ezek:

- Terméls szellő modellezése: parti szél vagy völgyi szél számítása;
- Energetika, környezettechnika: szélfarmok energetikai potenciáljának felmérése, hűtőtornyok fáklyájának meghatározása, szennyezők városi terjedésének modellezése;
- Meteorológiai kutatás: gravitációs hullámok és lejtőviharok elemzése, felhőképződés modellezése, nagy hegyek körüli áramlások modellezése.
- Katasztrófa szimulációk: vegyi fegyverek hatásának elemzése, erdőtüzek füstjének terjedése, vulkáni hamu légköri terjedésének modellezése.

Az új modellezési eljárás gyakorlati alkalmazásaként elkészítettük Szeged város atmoszférikus modelljét, amely magában foglalja a város és környezete domborzatának 18 x 22 km nagyságú részletét. Az elemzéshez felhasználtuk (a jelen OTKA projekt keretében elkészített) Szeged város háromdimenziós felszínadatbázisából származtatott, beépítettségi statisztikát: pl. a beépített terület arányának megoszlása és a beépítés térfogati arányának megoszlása. A numerikus háló felbontása városon belül 75 m, ami a város körüli területen 900 m-es felbontásig nő. Az épületek fékező hatását egy felszín feletti, beépítettségtől és épületmagasságtól függő ellenállású porózus réteggel vettük figyelembe. E modell alapján meghatároztuk a hősziget által keltett áramlási teret.

A kutatás e részéhez kapcsolódó publikációink:

- [1] Kristóf G., Rácz N., Bányai T., Gál T., Unger J., Weidinger T. 2006: A városi hősziget által generált konvekció modellezése általános célú áramlástan szoftverrel – összehasonlítás kisminta kísérletekkel *A 32. Meteorológiai Tudományos Napok előadásai. Országos Meteorológiai Szolgálat, Bp.*
- [2] Dr. Lajos T., Dr. Kristóf G., Dr. Goricsán I., Rácz N. 2006: Városklíma vizsgálatok a BME Áramlástan Tanszékén, hősziget numerikus szimulációja *VAHAVA projekt (A globális klímaváltozás: hazai hatások és válaszok) zárókonferenciája Bp. CD.*
- [3] Kristóf G., Bányai T., Rácz N. 2006: Development of computational model for urban heat island convection using general purpose CFD solver. *Preprints 6th Int Conf on Urban Climate, Göteborg, Sweden, 822-825*
- [4] Rácz N. és Kristóf G. 2006: Hősziget cirkuláció kisminta méréseinek összehasonlítása saját fejlesztésű LES modellel *Egyetemi Meteorológiai Füzetek No. 20 ELTE Meteorológiai Tanszék, Bp. 173-176*
- [5] Kristóf G, Rácz N, Bányai T, Gál T, Unger J és Weidinger T, 2006: A városi hősziget által generált konvekció modellezése általános célú áramlástan

szoftverrel – példaként egy szegedi alkalmazással. 3. *Magyar Földrajzi Konf*, Bp, CD

- [6] *N.Rácz, G.Kristóf, T.Weidinger, M.Balogh*: Simulation of gravity waves and model validation to laboratory experiments, CD, *Urban Air Quality Conf. Cyprus*, 2007.
- [7] *G.Kristóf, N.Rácz, M.Balogh, 2007*: Adaptation of pressure based CFD solvers to urban heat island convection problems, CD, *Urban Air Quality Conf. Cyprus*.
- [8] *G. Kristóf, N. Rácz, M. Balogh, 2007*: CFD analyses of flow in stratified atmosphere, *Physmod Conference, Orléans, France*.
- [9] *G.Kristóf, N.Rácz, M.Balogh, 2008*: Atmoszférikus áramlások szimulációja, Simulation of atmospheric flows, *GÉP, LIX évf, 5-6-szám*.
- [10] *Kristóf G, Rácz N, Balogh M, 2009*: Adaptation of Pressure Based CFD Solvers for Mesoscale Atmospheric Problems, *Boundary-Layer Meteorol, ISSN 1573-1472, Springer, DOI 10.1007/s10546-008-9325-7, 131:85-103, Impact Factor: 2.05*.

Egy további nemzetközi szakfolyóirat cikk publikációja is folyamatban van, amelyen jelenleg az első bírálói véleményeket követő módosításokon dolgozunk:

- [11] *Norbert Rácz, Gergely Kristóf, Tamás Weidinger, Miklós Balogh*: Evaluation and Validation of a CFD Solver Adapted to Atmospheric Flows: Simulation of Topography-Induced Waves, *Journal of Applied Meteorology and Climatology, (submitted), Impact Factor: 2.09*.

A kutatásnak ezen ágához kapcsolódóan készül a BME-n Rácz Norbert doktori értekezése (várható beadása 2010), amelynek fő újdonság elemei a CFD alapú eljárás gravitációs hullámok elemzésére történő alkalmazása a nedvességtranszport, kondenzáció és párolgás figyelembevétele továbbá a módszer alkalmazása hűtőtornyok ködfáklyájának leírására és validálás a hűtőtornyra vonatkozó mérési adatokkal.

2. Nagyszámú épület elemzésére alkalmas hálógenerálási eljárás az utcakanyonok áramlási terének felbontásával

A városi hősziget okozta áramlás elemzéséhez széles méretskálájú modellezés szükséges. A város kritikus részein, ahol a humán komfort részletes elemzése szükséges, minden épületet egyedileg modellezni kell, ezzel szemben a modellezett tartomány befoglaló méretei egy nagyváros esetében 50–100 kilométerre is szükséges lehet kiterjeszteni. A függőleges irányban hasonló probléma jelentkezik: a talaj közelében kb. 1 m-es minimális felbontás szükséges, a hősziget jelenség megfelelő leírásához pedig legalább 2000–3000 m magasságú tartományt kell figyelembe venni.

A CFD szoftverre épülő modellezési módszer megteremti e széles méretskála egyetlen keretrendszerben való kezelésének lehetőségét: távol térben a természetes lomboszat és elszórt épületek felületi érdességként vehetők figyelembe, a város nagy részében az épületklaszterek hatása a felszín felett elhelyezett porózus blokkokként írhatók le, a város kritikus pontjain pedig akár minden épület körüli áramkép kiszámítható, és mindez akár egyetlen, dinamikus változó sűrűségű háló alkalmazásával is lehetséges.

E cél elérése érdekében új hálógenerálási és modellezési eljárást dolgoztunk ki, amely alkalmas épületklaszterek megoszló ellenállással történő leírására, és – a korábbi hasonló modellekkel ellentétben – az egyes klaszterek között található utcakanyonok áramlási terének finomfelbontására is.

A módszer főbb jellemzői az alábbiak:

- Dinamikus sűrűsíthető, háromszög felszíni hálót alkalmazunk, ami a domborzatot a természetes felszínnek megfelelően követi. Függőleges irányban a háló réteges szerkezetű (wedge elemekből áll).
- A számítási tartomány szélén átmeneti zónát alakítunk ki, amely a tartomány kontúráján a felszíni hálót állandó magasságba rendezi. Ez a módszer lehetővé teszi a peremfeltételek egyszerű specifikációját adott geosztrofikus szél esetén.
- Az épület klaszternek megfelelő blokkokat a felszín felett elhelyezett, több modell rétegből álló zóna segítségével írjuk le, amelynek magassága a maximális beépítési magasságnak felel meg. Az épületklaszterek magukban foglalhatnak kisebb utcákat is. Az egyes klasztereken belül a dinamikai- (légellenállás) és turbulencia paraméterezést a felszín feletti magasság függvényében változtatjuk. Ezen paraméterezések a beépítés átlagos magasságától és a beépített terület arányától függenek, egy szakirodalmi átvett módszer szerint (Coirier W.J., Kim S., 2006. CFD Modeling for Urban Area Contaminant Transport and Dispersion: Model Description and Data Requirements, 6th Symposium on the Urban Environment. Atlanta, GA. Amer. Meteor. Soc.). Az ehhez szükséges forrástagokat ANSYS-FLUENT rendszerben implementáltuk C nyelvű felhasználói függvények formájában.
- Újdonság, hogy a felszíni háló pontosan követi az épületklaszterek közötti nagyobb utcakanyonok vonalát, amelyek mind átszellőzés, mind pedig szennyező anyag kibocsátás szempontjából nagy jelentőséggel bírnak. Egy-egy utcakanyon jellemzően 4-6 szimulációs intervallumra van felbontva. Mindezek lehetővé teszik az átszellőzési útvonalak részletes elemzését is az egyedi épületek modellezése nélkül, akár több ezer épület hatásának figyelembevételével. Az utcakanyonokban megoszló ellenállást nem vettünk figyelembe, azonban a modell továbbfejleszthető a fák ellenállásának figyelembevételével.

A gyakorlati alkalmazások megkönnyítésére hálógeneráló célszoftvert készítettünk, ami lehetővé teszi a modellezni kívánt terület domborzatának Interneten elérhető SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) adatbázisból való lekérdezését, a helykoordináták WGS84-ből EOVS rendszerbe való transzformációját és ANSYS hálógeneráló szoftverrel előre elkészített felületi hálóból kiindulva a domborzati adatok felhasználásával elkészíti a háromdimenziós numerikus hálót.

Az épületklaszter modell felhasználásával, Budapest XI. Kerületi Önkormányzat megbízásából elkészítettük a kerületnek és környezetének áramlási modelljét és elemeztük a kerület átszellőzését a jellemző szélirányokra és a városi hősziget okozta áramlás hatására. E vizsgálatban a kutatás eredményeit a várostervezéssel kapcsolatos gyakorlati kérdések megválaszolására is sikerült hasznosítani.

E témakörhöz kapcsolódó publikációink:

- [12] Balogh M, Kristóf G, 2009: Fine scale simulation of turbulent flows in urban canopy layer, Időjárás, (submitted), **Impact Factor: 0.??**.
- [13] Balogh M, Kristóf G, 2009: Multiscale Modeling Approach for Urban Boundary Layer Flows, *The seventh International Conference on Urban Climate, 29 June - 3 July 2009, Yokohama, Japan.*

E témakör kapcsán készül továbbá Balogh Miklós doktori értekezése a BME-n (várható beadása 2011).

3. Térinformatikai modell, helyszíni felmérések, ventilációs folyosók meghatározása térinformatikai adatok alapján

Légifelvételek és digitális épület-alaprajz adatbázis alapján az OTKA projekt keretében beszerzett szoftverek (PC ERDAS IMAGINE, IMAGINE Stereo Analyst és ArcGIS Arc View 9 MasterLabKit) felhasználásával Szeged város kb. 30 km²-es beépített területére létrehoztunk a városi felszín horizontálisan és vertikálisan is igen pontos leírását tartalmazó adatbázist.

A városi felszíngeometria feltárására térinformatikai eljárásokat fejlesztettünk ki, így tovább bővítettük az adatbázisból kinyerhető érdességi és beépítettségi statisztikát: a beépített terület arányának megoszlása és a beépítés térfogati arányának (porozitás) megoszlása mellett a felszíni légáramlás szempontjából igen fontos további paramétereket határoztunk meg: profileltolási magasság, érdességi szint, érdességi elemsűrűség és a szél irányától függő ún. frontal area index. Ez utóbbi mérőszám a ventilációs folyosók elemzését is lehetővé teszi a szélirány függvényében.

Szeged város háromdimenziós felszínadatbázisa alapján számításokat végeztünk az összetett geometriájú felszínnek a hosszúhullámú sugárzásra és a légáramlásra gyakorolt hatásainak pontos jellemzésére. Az egyik ilyen számolt paraméter – az égboltnláthatóság – estében megvizsgáltuk a városi hősziget intenzitásra gyakorolt hatását, illetve nemzetközi együttműködés keretében a számítási eljárásunkat összevetettük két másik (halszem optikás fényképen és domborzatmodellen alapuló) módszerrel.

A város érdességi paramétereire épülő számítási eljárást dolgoztunk ki a városi tetőszint réteg feletti légáramlás sebességének meghatározására, ami lehetővé teszi a város lakói számára kedvező környezeti hatással bíró ventilációs folyosók meghatározását. Tökéletesítettük az érdességi rétegvastagság, érdességi magasság és városi porozitás paraméterek számításának módját. Mivel számítási eljárásunk térbeli léptéke eltér a felszín légáramlást befolyásoló hatásának térbeli léptékétől, ezért egy átlagolási eljárást alkottunk meg. Ez az átlagolási eljárás a turbulens hőszállításra alkalmazott forrásterület modell analógiájára készült, kiegészítve szélcsatorna kísérletek tapasztalataival.

Kapcsolódó publikációk:

- [14] Unger J, 2006: Modelling of the annual mean maximum urban heat island with the application of 2 and 3D surface parameters. *Climate Research* 30, 215-226
- [15] Unger J, Sümeghy Z, Gál T and Balázs B, 2006: Statistical modelling of the urban heat island using 2 and 2D surface parameters in Szeged, Hungary. *Volume of Abstracts. 8th Conf on Meteorology-Climatology-Atmospheric Physics, Athens*, 169
- [16] Unger J, Balázs B, Sümeghy Z and Gál T, 2006: Multiple variable model for estimating the maximum UHI using 2 and 3 dimensional surface parameters. *Preprints 6th Int Conf on Urban Climate, Göteborg, Sweden*, 334-337
- [17] Unger J, Gál T, Balázs B and Sümeghy Z, 2006: Relationship between the intra-urban variation of sky view factor approximated by a software based tool and air temperature. *Preprints 6th Int Conf on Urban Climate, Göteborg, Sweden*, 346-349.

- [18] Unger J, Gál T, Balázs B és Sümeghy Z, 2006: A városi felszín összetett geometriájának hatása a városi hőszigetre Szegeden. 3. Magyar Földrajzi Konf, Bp, CD .
- [19] Unger J, Gál T, Balázs B és Sümeghy Z, 2006: A városi felszíngeometria és a hőmérséklet területi eloszlása közötti kapcsolat Szegeden. In Kiss A, Mezősi G és Sümeghy Z (szerk): *Táj, környezet és társadalom. Ünnepi tanulmányok Keveiné Bárány Ilona professzor asszony tiszteletére*. SZTE Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék, Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, Szeged, 735-746
- [20] Unger J, Gál T és Kovács P, 2006: A városi felszín és a hősziget kapcsolata Szegeden, 1. rész: térinformatikai eljárás a felszíngeometria számszerűsítésére. *Légekör* 51/3, 2-9
- [21] Unger J és Gál T, 2007: Sky view factor computation using 3D urban raster and vector databases: comparison and an urban climate application. In Kovács Cs (ed): *From villages to cyberplace. In commemoration of the 65th birthday of Rezső Mészáros, Academician*. Department of Economic and Human Geography, University of Szeged, 451-462
- [22] Gál T, Rzepa M, Gromek B and Unger J, 2007: Comparison between Sky View Factor values computed by two different methods in an urban environment. *Acta Climatologica Univ Szegediensis* 40-41, 17-26
- [23] Gál T and Sümeghy Z, 2007: Mapping the roughness parameters in a large urban area for urban climate applications. *Acta Climatologica et Chorologica Univ Szegediensis* 40-41, 27-36
- [24] Unger J és Gál T, 2007: A városi felszín és a hősziget kapcsolata Szegeden, 2. rész: a felszíngeometria és a hőmérséklet-eloszlás kapcsolata. *Légekör* 51/4
- [25] Gál T, Unger J, 2008: Lehetséges ventilációs folyosók feltérképezése érdességi paraméterek alapján egy városi területen. *Légekör* 53(3), 2-8
- [26] Gál T, Unger J, Benkő D, 2008: Roughness mapping process in an urban study area. In Klysiak K, Wibig J, Fortuniak K (eds): *Klimat I bioklimat miast (Urban climate and bioclimate)*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Katedra Meteorologii i Klimatologii, Łódź, Poland, 501-512
- [27] Gál T, Lindberg F and Unger J, 2009: Computing continuous sky view factor using 3D urban raster and vector databases: comparison and an application for urban climate. *Theoretical and Applied Climatology* 95, 111-123, **Impact Factor: 1.566**.
- [28] Gál T, Unger J, 2009: Detection of ventilation paths using high-resolution roughness parameter mapping in a large urban area. *Building and Environment* 44, 198-206, **Impact Factor: 0.852**
- [29] Unger J, 2009: Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database. *Int Journal of Environment and Pollution* 36, 59-80, **Impact Factor: 0.404**

E témakör kapcsán készül továbbá Gál Tamás doktori értekezése az SZTE-n (beadása 2009. szeptember).