

A városi hősziget által generált konvekció modellezése általános célú áramlástan szoftverrel–példaként egy szegedi alkalmazással

Kristóf Gergely* – Rác Norbert* – Bányai Tamás* – Gál Tamás** – Unger János** – Weidinger Tamás***

* Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Áramlástan Tanszék

** Szegedi Tudományegyetem TTK, Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék

*** ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Összefoglalás

A városi hősziget jelenség által indukált lokális áramlási rendszer modellezésére a gépészeti gyakorlatban elterjedt és széles körben ellenőrzött FLUENT 6 nevű, általános célú áramlástan szimulációs szoftvert alkalmazzuk. E megközelítés előnye, hogy mezo- és mikroskálájú áramlások egyszerűen vizsgálhatók egyazon modellben a numerikus háló lokális finomítása révén; így elkerülhetők a különböző skálájú modellek egymásba ágyazásával járó nehézségek. A modellezés jelenlegi stádiumában nem vesszük figyelembe a nedvességszállítást és a fázisátalakulások hatását – a száraz levegő állapotváltozásaival számolunk.

A modell első gyakorlati alkalmazásaként Szeged felett, szélcsendes időben, a városi hősziget áramlási képét határoztuk meg. Ehhez először az ERDAS IMAGINE térinformatikai szoftver segítségével – légifelvételek és digitális épület-alaprajz adatbázis alapján – elvégeztük a vertikálisan és horizontálisan is igen összetett városi felszín nagy pontosságú felmérését. Létrehoztunk egy részletes 3D-s adatbázist Szeged város kb. 30 km²-es beépített területére. Ezután készítettük el a szegedi hősziget-modellhez szükséges kiinduló adatagyűtést, amely magában foglalja a város és környezete domborzatának 18 x 22 km² nagyságú háromdimenziós részletes modelljét, 5 m-es felbontásban, valamint néhány, a 3D-s adatbázisból származtatott, beépítettségi statisztikát, mint a beépített terület arányának illetve a beépítés térfogati arányának megoszlása.

A városi felszín energia-egyenlegének megoldása helyett esettanulmányunkban az általunk 2003. februárjában végzett részletes hőmérséklet-mérések eredményeit használtuk fel. A felületi hőteljesítmény megoszlása és a termális cirkuláció áramlási jellemzői a számítás eredményeként adódnak. Ezek szerint kialakul:

- a felszínközeli néhányszor 10 m-es rétegben egy, a városközpont felé tartó körkörös és viszonylag lassú beáramlás, amely befelé haladva fokozatosan melegszik,
- a központ feletti, viszonylag kis területre koncentrálódó erőteljes feláramlás, amely majdnem 2 km-es magasságig felhatol és közben fokozatosan hűl,
- majd az 1,5-2 km-es magasságban egy lassú szétáramlás, amely távolodva a városcentrumtól, veszít eredeti magasságából és ez által kissé felmelegszik.

Ezen első lépések után további fejlesztés szükséges a városi canopy réteg transzport folyamatának helyes modellezéséhez.

1. BEVEZETÉS

A kutatás elsődleges célkitűzése egy olyan transzformációs rendszer kidolgozása volt, amellyel egy általános célú áramlástan feladatokat megoldó program CFD (Computational Fluid Dynamics) alkalmassá tehető mikro- és mezo-skálájú modellszámítások elvégzésére. Ez egy új eszközt jelent a modellezéssel foglalkozó szakemberek számára. A meteorológiai számításokban gyakran használt hidrosztatikus közelítés helyett a vertikális mozgásegyenlet általános alakját alkalmaztuk. A turbulencia leírására a CFD szoftverben rendelkezésre álló *realizable k- ϵ* turbulencia modellt használtuk standard fal-függvény alkalmazásával. A légkör összenyomhatósága és a hőmérsékleti rétegződés a mezőváltozókra vonatkozó transzformációs függvényekkel, valamint a kormányzó egyenletekben megjelenő forrástagokkal vettük figyelembe (lásd. 2. fejezet).

A korábbi, városi hősziget cirkuláció számítására alkalmazott meteorológiai modellekben, általában egy elsőrendű lezárási hipotézisen alapuló határréteg modellel kombinált hidrosztatikus közelítést alkalmaztak. Gyakran találkozhatunk erősen leegyszerűsített, az adott feladatnak megfelelő célorientált modellekkel. (F. Iványi 1980, Yoshikado 1992, Lu et al. 1997, Kurbatskii 2001). A korszerű nem-hidrosztatikus numerikus modellek, mint az MM5 (Mesoscale Model), vagy a WRF (Weather Research Forecast) már nem-hidrosztatikus közelítéssel dolgoznak (Baklanov 2006, Warner 2006), az 1 km alatti rácsfelbontásuk lehetővé teszi a városi hősziget tanulmányozását, azonban a mikro-skálájú áramlások e modellekben csak külső szoftverek beágyazásával vizsgálhatók.

Az általános célú áramlástechnikai szoftverek (CFD szoftverek, vagy megoldók) légköri áramlások modellezésében történő alkalmazásánál problémát jelent a nagy értékű hidrosztatikai nyomási gradiens jelenléte a viszonylag kisebb, de az áramlás szempontjából fontos vízszintes nyomásgradienshez képest. E probléma kiküszöbölésére egy egyszerű transzformációs rendszert dolgoztunk ki, amelynek felhasználásával az általános célú, nyomás alapú áramlástan megoldók alkalmassá tehetőek légköri áramlások számítására.

Annak ellenére, hogy hasonló általános célú CFD megoldók széles körben elterjedtek, ipari célokra használtak és validáltak, e szoftverek meteorológiai alkalmazása elsősorban épületek (Kawai and Kanda 2006) és városi kanyonok (Goricsán et al. 2004) áramképeinek vizsgálatára, valamint szennyezőanyagok mikro-skálájú transzportjára terjed ki. Továbbá – a korlátozott számítási kapacitás ellenére – találhatunk olyan városrész modelleket is, ahol a felszín és épületek vízszintes felbontása eléri akár az 5 métert (Ashie and Kono 2006).

Mezo-skálájú légköri modellekhez a CFD megoldókat általában egy- vagy kétirányú adatforgalmat (Clark and Farley 1984) biztosító beágyazásos (nesting) módszerrel szokás kapcsolni. Az ilyen módszerek lényege a különböző felbontású numerikus hálók közötti interpolációs rendszer. Nehézséget jelent, hogy a különböző sűrűségű rácsfelületek határán áthaladó hullámok szakadásszerűen jutnak az egyik tartományból a másikba, és visszaverődések is előfordulhatnak (Sarma et al. 1999), tehát a beágyazásos módszer numerikus hibák és modellbizonytalanságok forrása lehet.

Célunk, hogy a CFD megoldó matematikai modelljének alkalmas átalakításával lehetővé tegyük a mikro- és mezo-skálájú légköri folyamatok egységes rendszerben történő vizsgálatát egységes modellegyenletek alkalmazásával úgy, hogy az áramlás mikroszerkezete a numerikus háló lokális sűrítésével bárhol feltárható legyen. Az alkalmazott CFD megoldó lehetővé teszi a numerikus hálónak a számított mezőváltozók felhasználásával történő adaptálását is (pl. nagy gradiensű esetén a numerikus háló helyileg, automatikusan sűríthető), azonban az itt bemutatott esettanulmányban előre definiált területeken történt a sűrítés.

A legtöbb CFD megoldó rendelkezik kompresszibilis áramlás opcióval, ami azt jelenti, hogy a közeg sűrűségének számítása a lokális nyomás és hőmérséklet alapján az ideális gáztörvényből történik. E módszerek alkalmazása azonban léghőri áramlások modellezésében nem gazdaságos, hiszen a szimuláció időlépését a léghőri hanghullámok terjedéséből származó CFL (Courant-Friedrich-Levy) stabilitási kritérium korlátozza. Ennek elkerülésére összenyomhatatlan közegek számítására alkalmas modellt használunk Bousinesq-féle közelítés alkalmazásával. További nehézséget okoz, hogy a CFD modellekben instabilitás léphet fel nagy hidrosztatikus nyomási gradiensek jelenléte esetén. Ezt a problémát úgy küszöbölhetjük ki, hogy alapegyenleteinket a hőmérséklet-, nyomás- és a sűrűség- standard léghőri profiljai körüli perturbációkra oldjuk meg. Ilyen rendszerben a szimuláció kezdeti feltételének a mezőváltozók konstans eloszlásai adhatók meg, az egyensúlyi horizontális nyomási gradiens értéke zérus.

A szimulációs rendszerben alkalmazott mezőváltozók és a tényleges fizikai jellemzők közötti kapcsolatot transzformációs összefüggések formájában adjuk meg. Ezen túlmenően szükséges a CFD megoldó alapegyenleteinek néhány új forrástaggal történő kiegészítése.

A szükséges forrástagokat beépítjük a FLUENT 6 szimulációs rendszerbe, majd a Szeged város felett kialakuló termális cirkulációs cella számítására alkalmazzuk.

2. A MATEMATIKAI MODELL LEÍRÁSA

Ha az áramkép meghatározására általános célú véges térfogat-elvű CFD megoldót kívánunk alkalmazni egy 1,5 rendű lezárási hipotézist alkalmazó k-ε turbulencia modellel, akkor az alábbi kormányegyenleteket kell felhasználnunk (hullámmal jelöljük a transzformált mezőváltozókat):

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{\mathbf{v}}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \bar{\mathbf{v}}) + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{\mathbf{v}} \bar{\mathbf{v}}) = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}} + \bar{\rho} \bar{\mathbf{g}} + \bar{\mathbf{F}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} E) + \nabla \cdot (\bar{\mathbf{v}} (\bar{\rho} E + \bar{p})) = \nabla \cdot \left(k_{\text{eff}} \nabla \bar{T} + \bar{\boldsymbol{\tau}} \cdot \bar{\mathbf{v}} \right) + S_T \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} k) + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{\mathbf{v}} k) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_k + G_b - \bar{\rho} \epsilon + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \epsilon) + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{\mathbf{v}} \epsilon) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \nabla \epsilon \right) + \bar{\rho} C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (5)$$

(1)-(3) egyenletek a kontinuitás-, momentum- és energiaegyenletek, továbbá a (4)-(5) a turbulencia leírására szolgáló turbulens kinetikus energia (k) és disszipáció (ε) transzportegyenletei (Shih et al. 1995, Kim et al. 1997). (1)-(3) egyenletekben t idő, $\bar{\rho}$ sűrűség, $\bar{\mathbf{v}} = (u, v, w)$ sebességvektor, $\bar{\boldsymbol{\tau}}$ viszkózus feszültségtenzor, $\bar{\mathbf{g}}$ térerősség-vektor, E:

torló energia. A turbulencia modell konstansai C_1, C_2, C_{1e} és C_{3e} , G_k a deformációsebességtől függő turbulens kinetikus energia produkció.

S_T, S_k, S_ε és $\vec{F} = (S_u \ S_v \ S_w)^T$ felhasználói forrástagokon keresztül vihetünk be a légköri áramlás leírásához szükséges járulékos tagokat. Forgó koordináta-rendszer alkalmazása esetén \vec{g} a megfelelő tehetetlenségi erővel egészül ki, így a Coriolis-erő hatását a szimulációs rendszerben egyszerűen forgó koordináta-rendszer megadásával lehet figyelembe venni. (1)-(5) egyenletek részletes ismertetése megtalálható a numerikus áramlástan szakirodalomban és a CFD szoftverek dokumentációjában, ezért itt csak a forrástagok levezetése szempontjából fontos elemekre szorítkozunk.

A turbulens transzport-tényezők μ_t turbulens viszkozitással arányosak, amelynek értéke k - ε turbulencia modellek esetében az alábbi módon számítható:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

A turbulens kinetikus energia egyenlete (4) tartalmaz egy termikus felhajtóerő hatását reprezentáló forrástagot, amelyet a CFD megoldó az alábbi alakban határoz meg:

$$G_b = \beta \frac{\mu_t}{Pr_t} \vec{g} \cdot \nabla \vec{T}, \quad (7)$$

(7) egyenletben β a levegő köbös hőtágulási együtthatója.

A transzformációs összefüggések és forrástagok meghatározásához először az egyensúlyi profilokat szükséges definiálni. Nyomás és hőmérséklet esetében az ICAO standard légkör profiljait alkalmaztuk (politróp közelítés, ref: Manual of the ICAO Standard Atmosphere 1993), míg a sűrűség esetében egy közelítő exponenciális profilt használunk a transzformációs összefüggések egyszerűsíthetősége érdekében. E sűrűség profil az analitikus (hatványkitevős) megoldást 0,4% pontossággal közelíti 4000 m magasságig, de a hiba gyorsan növekszik nagyobb magasságokban.

$$\bar{T} = T_0 - \gamma z \quad (8) \quad \bar{p} = p_0 \left(\frac{T_0 - \gamma z}{T_0} \right)^{\frac{g}{R\gamma}} \quad (9) \quad \bar{\rho} = \rho_0 e^{-\zeta z} \quad (10)$$

Ahol z jelöli a függőleges koordinátát, $\gamma = 0,65^\circ\text{C}/100\text{m}$, $T_0 = 288,15\text{K}$, $p_0 = 1,01325 \cdot 10^5\text{Pa}$, $\rho_0 = 1,225\text{kg}/\text{m}^3$, $g/(R\gamma) = 5,2553$, $\zeta = 10^{-4}\text{m}^{-1}$.

Az egyenletekben a következő transzformációs függvények kerültek alkalmazásra:

$$T = \vec{T} - T_0 + \bar{T} \quad (11) \quad p = \frac{\bar{p}}{\rho_0} \cdot \tilde{p} + \bar{p} = e^{-\zeta z} \cdot \tilde{p} + \bar{p} \quad (12)$$

$$\rho = \tilde{\rho} - \rho_0 + \bar{\rho} \quad (13) \quad z = -\frac{1}{\zeta} \text{Ln}(1 - \zeta z) \quad (14)$$

$$w = \frac{\rho_0}{\bar{\rho}} \tilde{w} = \tilde{w} e^{\zeta z} \quad (15)$$

ahol, w a sebesség függőleges komponense, T , p , ρ , z , w abszolút (transzformálatlan) fizikai mennyiségeket, \vec{T} , \tilde{p} , $\tilde{\rho}$, \tilde{z} , \tilde{w} a szimulációs rendszer transzformált jellemzőit jelölik. A sűrűségre időfüggő, változó sűrűséget figyelembe vevő Bousinesq-féle sűrűség modellt alkalmaztunk a (2) mozgás- és a (3) energiaegyenletekben.

$$\bar{\rho} = \rho_0 - \rho_0 \beta (\bar{T} - T_0) \quad (16)$$

A megoldóban a felhajtóerő figyelembevételére, a (2) mozgásegyenlet vertikális komponensében $\bar{\rho}$ használatos a többi helyen konstans ρ_0 kerül az egyenletekbe.

A 14. és 15. egyenletek a kontinuitási egyenlet (1) felhasználásával vezethetők le. Egy adott dz vastagságú légréteg tömege azonos transzformált és transzformálatlan rendszerben:

$$\rho dz = \bar{\rho} d\bar{z} \equiv \rho_0 d\bar{z} \quad (17)$$

és megegyeznek a függőleges tömegáramok is:

$$\rho w = \bar{\rho} \bar{w} \equiv \rho_0 \bar{w} \quad (18)$$

Ezzel a transzformációval a légkört függőleges irányban egy jól definiált konstans sűrűségű rétegbe zsugorítjuk, \bar{z} nem lehet nagyobb, mint $1/\zeta$ (lásd a 14. egyenletet).

A (17) és (18) egyenletben leírt feltételek biztosítják a mozgásegyenlet vízszintes komponensében és a kontinuitási egyenletben a két rendszer közötti egyezést, csak a függőleges sebesség egyenletéhez szükséges addicionális tagokat csatolni. Hidrosztatikus állapotot feltételezve nagy magasságokban, ami igaz a légköri áramlásokra, a vertikális mozgásegyenletben a 19. egyenletben leírt forrástagot kapjuk. Ez a tag megfelelően kompenzálja a nyomásgradiens függőleges komponensét.

$$S_w = -\rho_0 \beta g_z (\bar{T} - T_0) \left(\frac{\rho_0^2}{\bar{\rho}^2} - 1 \right) - \frac{\bar{\rho}}{\rho_0} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \bar{z}} \frac{\rho_0^2}{\bar{\rho}^2} \quad (19)$$

ami tovább alakítva a (13) sűrűség profil felhasználásával:

$$S_w = -\rho_0 \beta g_z (\bar{T} - T_0) \left((1 - \zeta \bar{z})^{-2} - 1 \right) + \zeta \bar{\rho} (1 - \zeta \bar{z})^{-1} \quad (20)$$

A (19) egyenletet alapul véve és alkalmazva a sűrűsége az általunk választott profilt (3. egyenlet), a forrástag a számításhoz célszerűbb (20) alakra hozható. Az így nyert (20) egyenlet csak az általunk használt sűrűségprofil esetén érvényes.

A (3) energiaegyenlet és a turbulens transzportot leíró egyenletek (4),(5) is korrekcióra szorulnak. Itt a forrástag arányos lesz az átlagos ($\gamma = 0,65^\circ\text{C}/100\text{m}$) és a száraz adiabatikus hőmérsékleti gradiens ($\Gamma = 0,976^\circ\text{C}/100\text{m}$) különbségével.

A felhasználói függvénnyel előírt forrástag az energiaegyenletben W/m^3 mértékegységű, az egységnyi légtérfogatba bevitt hőteljesítményt reprezentálja. A vertikálisan elmozduló légréteg hőmérséklete a száraz adiabata mentén változik (Γ), így a $\Gamma - \gamma$ értékével arányos hőmennyiséget kell elvonnunk az adott térfogattól, tehát az energia egyenletbe a következő forrástagot kell beépíteni:

$$S_T = -c_p \bar{\rho} \bar{w} (\Gamma - \gamma) \quad (21)$$

k- ϵ modell esetén a turbulens kinetikus energia egyenletében a felhajtóerő okozta (7) produkció \bar{T} hőmérséklet vertikális gradiensével arányos. E tagnak nullának kell lennie semleges rétegződésű légkör esetén (lásd a 22. egyenletet).

A hőmérséklet gradiens kifejezhető a transzformált hőmérséklet profil és az egyensúlyi hőmérséklet profil gradiensének összegeként. (lásd a 23. egyenletet).

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{\text{indiff}} = -\Gamma \quad (22) \quad \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} - \gamma \quad (23)$$

A (22), (23), valamint (7) egyenletek felhasználásával előállítható a turbulens kinetikus energia (4) egyenletének korrekciós tagja:

$$S_k = -\beta g \frac{\mu_t}{Pr} (\Gamma - \gamma) \quad (24)$$

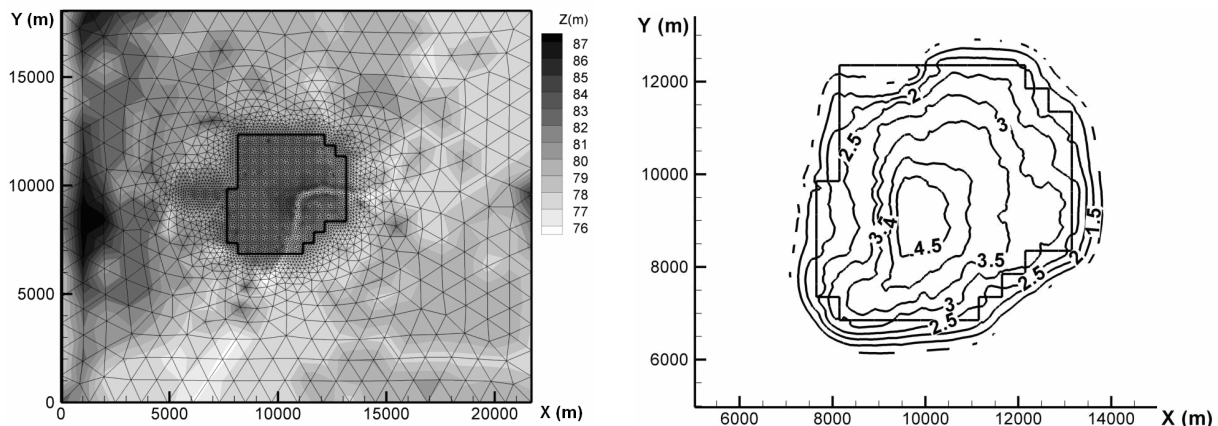
ahol Pr jelenti a turbulens Prandtl-számot. Megjegyezzük, hogy S_k értéke negatív, ebből következően a turbulenciára csillapítólag hat.

Hasonló korrekciót kell végrehajtani ε -ra is:

$$S_\varepsilon = -C_{1\varepsilon} C_{3\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \beta g \frac{\mu_t}{Pr} (\Gamma - \gamma) . \quad (25)$$

3. SZEGEDI HŐSZIGET MÉRÉSEK

A számítási tartomány 21 km (észak-dél) és 18 km (kelet-nyugat) kiterjedésű, 8000 m vastagságú (1. ábra). A város a tartomány közepén helyezkedik el és kb. egy 5 km x 5 km-es területnek felel meg. Az 1. ábrán látható a numerikus rácshálózat, ahol a város magjában 70-80 m oldalhosszúságú háromszög alapú hasáb-cellák találhatók, míg távol a nagy függőleges gradiensektől a tartomány peremén 800-900 m a jellemző cellaméret. A domborzat függőleges és horizontális felbontása ennek megfelelően a háló sűrűségét követi. A legmagasabb és legalacsonyabb felszíni pontok közötti különbség 11,4 m, a felszínhez közeli első cella mérete pedig 15 m. A hőmérséklet-méréseket éjszakai órákban (2003. február. 26. helyi idő: 21:30) nyugodt időjárási körülmények között végezték (Unger 2004). A mérés időtartama kb. 3 óra volt. A maximális hősziget-intenzitás mértéke kb. 4,5°C (1.ábra), az uralkodó szélirány keleties (71°) az átlagos szélesség értéke pedig 1,4 m/s volt. A hőmérséklet-méréseket mobil mérőegység alkalmazásával végezték a talajszinttől mért 1,5 m-es magasságban.



1. ábra Tengerszint feletti magasság szerint színezett kontúrok és a numerikus háló (bal); hőmérséklet kontúrok a mérés eredményei alapján Szegeden 2003. február 26-án (jobb)

4. PEREMFELTÉTELEK

A felszín fölötti első cella rétegbe változó intenzitású hőforrást alkalmaztunk. A hőforrás intenzitását úgy szabályoztuk, hogy az eredményül kapott helyi hőmérséklet kielégítse az adott pontban mért lég hőmérsékletet. A többi peremfeltételt a következők szerint definiáltuk: a tartomány összes függőleges kerületén a nyomás peremfeltételt, a felső vízszintes peremen $z = 1/\zeta$ magasságban szimmetria peremfeltételt írtunk elő (peremre merőleges áramlás nincs).

Az előző fejezetben leírt forrástagokat ((19)-(21) ill. (24)-(25) egyenletek) C nyelven, felhasználói függvények formájában építettük be a CFD megoldóba. A rácsháló geometriája

tartalmazta a domborzatot is. (z alapján a (14) egyenlet segítségével, annak inverz függvényeként.)

A mező-változóknak \tilde{p} és \tilde{T} kezdeti értékeként p_0 és T_0 értéke adható, ami azt jelenti, hogy a kezdeti értékük kielégíti az egyensúlyi profilokat. Szintén konstans érték adható a kilépő peremeknél. Tapasztalataink szerint dupla pontosságú számábrázolás szükséges minden számításnál. A CFD modellekben szokásos a konvergencia javítására korlátozó feltételt alkalmazni a turbulens viszkozitás értékére. E korlátozás alapértelmezett értékét több nagyságrenddel meg kell növelni a nagy Reynolds-számú áramlás miatt.

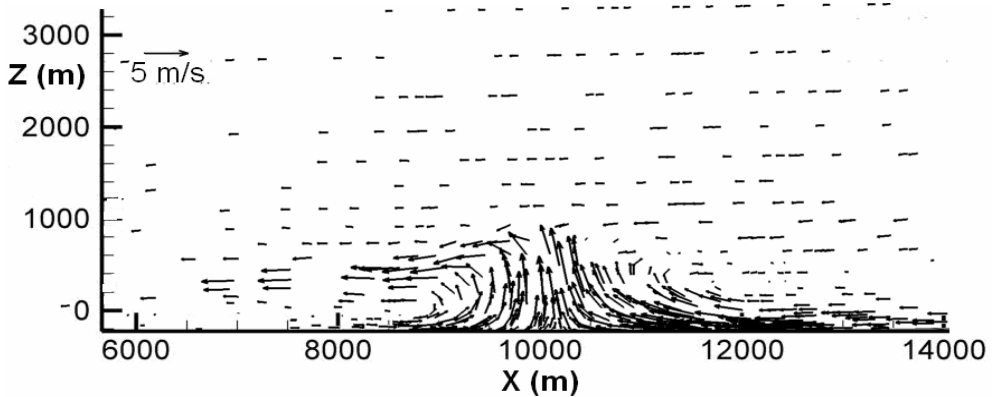
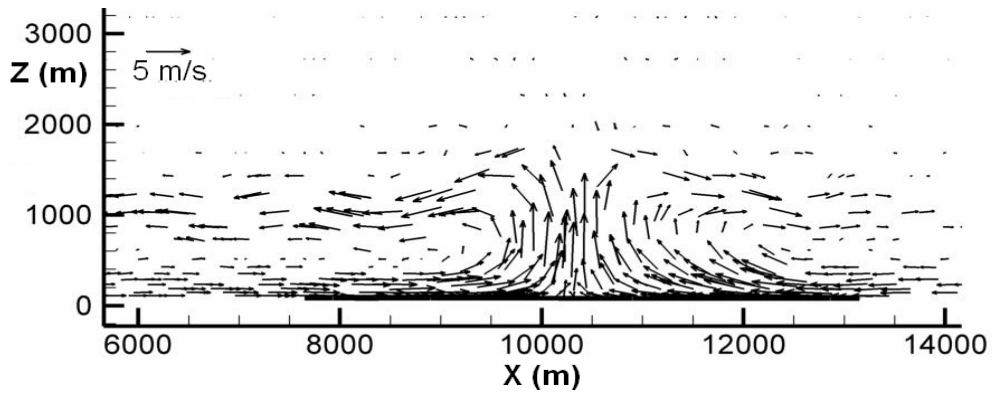
Időszerinti implicit séma alkalmazásával 1 sec nagyságú időlépcső bizonyult optimálisnak a FLUENT 6 megoldóval készített hősziget-modellünkben. Az eredmények értékeléséhez a z függőleges koordinátát vissza kell transzformálni (14) összefüggés segítségével.

5. EREDMÉNYEK

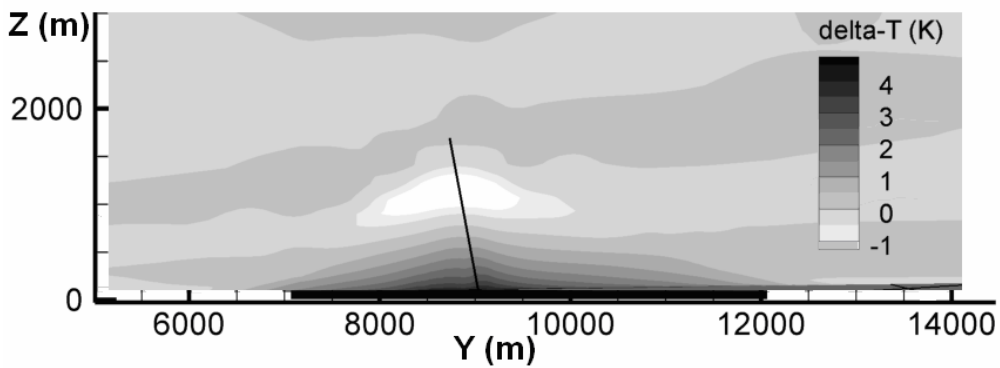
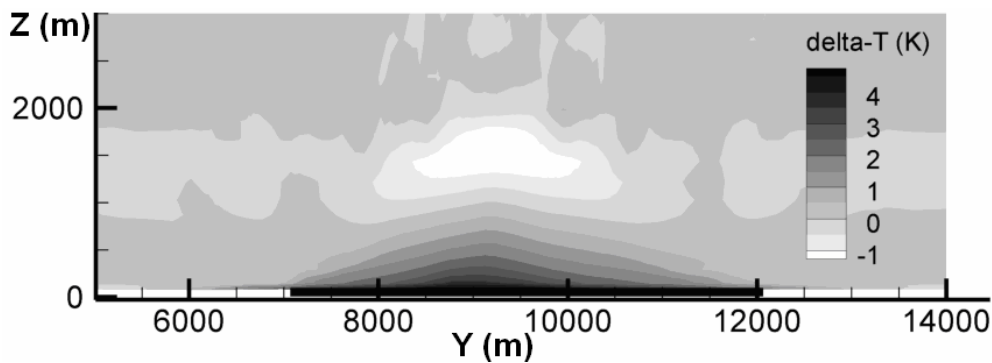
Hősziget cirkuláció jellemzésekor általában egy külterületi referencia ponthoz képest adják meg (Unger 2004) a városi hőmérséklet eloszlását. A cirkulációra jellemző hőmérsékletzavarás és sebességmegoszlás mind vízszintes, mind függőleges metszetek (Lu et al. 1997) esetén jelentős információt hordoz. Jelen esetben különböző metszetekben vett vektor- és hőmérsékletmezőt ábrázoltuk. A sebességeloszlás (2. ábra) és a hőmérséklet perturbáció (3. ábra) a vártak megfelelően alakult. A feláramlás maximális magassága (1200-1500 m) jó egyezést mutat hasonló számításokkal (Yoshikado 1992) (Kusaka and Kimura 2004) A modell első változatában szélsendes környezetet feltételeztünk (szélsebesség hatása elhanyagolva), így szimmetrikus áramkép alakult ki. Meg kell említeni, hogy a város felett kialakuló hőfluxus a szakirodalomban hasonló esetekre publikált eredményekhez képest (G.Rigó, 2006) nagyobbra adódott. Ennek az lehet a magyarázata, hogy a hőmérsékletmérések a városi talajközeli (canopy) réteg alján történtek, s a városi talajközeli rétegben alkalmazott felületi érdességi modell nem írja le helyesen az itt lejátszódó, erősen korlátozott hő és impulzus transzportot, ennek következtében a külterületek felől érkező áramlás túl nagy mennyiségű hőt von el a hőt a felszínről. A városi felszínközeli réteg helyes leírásához impulzus- és turbulencia forrástagok, valamint módosított transzport tényezők alkalmazása szükséges a modellben.

A hősziget áramlás pontosabb leírásához már szükségessé válik a nedvesség-szállítás figyelembevétele is az alapegyenletekben. Az alkalmazott CFD megoldó alkalmas a sugárzásos hőszállítási folyamatok számítására, a felszíni energiamérleg számítása azonban további fejlesztő munkát igényel.

A városi hősziget cirkuláció számítása mellett az itt közölt modell számos egyéb távlati alkalmazási területe látható, ilyenek pl. a hűtőtornyok hatásának vizsgálata, a kémények által kibocsátott szennyezőanyagok terjedése, magas hegyek körüli áramlás, szélfarmok teljesítmény potenciáljának számítása, vulkánok, nagy kiterjedésű erdőtüzek, lokális skálájú szelek (parti szél, völgyi szél), vagy a felhőképződés modellezése.



2. ábra. Sebességvektorok az $y = 10\,000$ m síkban
szélcsendes körülményeket mellett (fent), valós szélesebesség figyelembevételével (lent)



3. ábra. Standard hőmérsékleti profil körüli perturbáció az $x = 10\,000$ m metszetben
szélcsendes körülményeket mellett (fent), valós szélesebesség figyelembevételével (lent)

Köszönetnyilvánítás

A szerzők megköszönik az OTKA iroda kutatási támogatását (OTKA T049573), és az NKFP (3A/088/2004) program hozzájárulását a munka elvégzéséhez.

Irodalom

- Ashie Y. and Kono T., 2006. Numerical simulation of urban thermal environment of the waterfront in Tokyo by using a five meter horizontal mesh resolution, *In Preprints of the 6th International Conference on Urban Climate*, Göteborg, Sweden, 615-618
- Baklanov A.A., 2006. Urbanisation of meteorological and air pollution models: potential and shortcomings *In Preprints of the 6th International Conference on Urban Climate*, Göteborg, Sweden, 400-403
- Clark, T.L., and R.D. Farley, 1984: Severe Downslope Windstorm Calculations In Two And Three Spatial Dimensions Using Anelastic Interactive Grid Nesting: A Possible Mechanism For Gustiness. *J. Atmos. Sci.*, 41, 329-350.
- F. Iványi Zs., 1980. A városi hősziget cirkuláció numerikus vizsgálata II. *Időjárás* 84, 205-217.
- Goricsán I., Balczó M., Rékert T. and Suda J.M., 2004. Comparison of Wind Tunnel Measurement and Numerical Simulation of Dispersion of Pollutants in Urban Environment. *Impact of Wind and Storm on City Life and Built Environment*, ed. by J.P.A.J. van Beeck, COST C14 *International Conference on Urban Wind Engineering and Buildings Aerodynamics*, pp. D.6.1-D.6.10.
- Kawai T. and Kanda M., 2006. Evaluation of simple urban energy balance for mesoscale simulation with comprehensive outdoor scale model experiment for urban climate. *In Preprints of the 6th International Conference on Urban Climate*, Göteborg, Sweden, 274-277
- Kim S.-E., Choudhury D., and Patel B. 1997. Computations of Complex Turbulent Flows Using the Commercial Code FLUENT. *In Proceedings of the ICASE/LaRC/AFOSR Symposium on Modeling Complex Turbulent Flows*, Hampton, Virginia.
- Kurbatskii, A.F., 2001. Computational modeling of turbulent penetrative convection above the urban heat island in a stably stratified environment. *J. Appl. Meteorol.*, 40, 1748-1761.
- Kusaka H. and Kimura F. Thermal effects of urban canyon structure on the nocturnal heat island: numerical experiment using mesoscale model coupled with an urban canopy model *J. Appl. Meteorol.* 43, 1899-1910
- Lu, J., Arya, S.P., Snyder, W.H. and Lawson Jr, R.E., 1997. A laboratory study of the urban heat island in calm and stably stratified environment. Part II: Velocity field. *J. Appl. Meteorol.* 36, 1392-1402.
- Manual of the ICAO Standard Atmosphere / Doc 7488, 1993.
- Rigó G. and Parlow E. 2006. Energy flux densities with remote sensing and in-situ data in an urban environment *In Preprints of the 6th International Conference on Urban Climate*, Göteborg, Sweden, 770-773
- Sarma A., Ahmad N., Bacon D., Boybeyi Z., Dunn T., Hall M., and Lee P., 1999. Application of Adaptive Grid Refinement to Plume Modeling, *Air Pollution VII*, WIT Press, Southampton, 59-68.
- Shih T.-H., Liou W. W., Shabbir A., Yang Z., and Zhu J. 1995. A New k- ϵ Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation. *Computers Fluids*, 24(3):227-238.
- Unger J., 2004: Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach. *Climate Research* 27, 253-264
- Warner T., Swerdlin S., Wyszogrodzki A. and Vandenberghe F. 2006. Multi-scale urban weather analysis, forecasts and climatologies *In Preprints of the 6th International Conference on Urban Climate*, Göteborg, Sweden, 422-426
- Yoshikado, H., 1992. Numerical study of the daytime urban effect and its interaction with sea breeze. *J. Appl. Meteorol.* 31, 1146-1163.