

VÁROSI KÖRNYEZET MODELLEZÉSE A WRF IDŐJÁRÁS ELŐREJELZŐ MODELLEL FELHASZNÁLÁSÁVAL

Göndöcs Júlia, Breuer Hajnalka, Pongrácz Rita, Bartholy Judit

ELTE Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A
e-mail: gondocs.julia@gmail.com, bhajni@nimbus.elte.hu,
prita@nimbus.elte.hu, bartholy@caesar.elte.hu

Bevezetés

A Föld népességének rohamos növekedése és koncentrációja (ENSZ, 2007) miatt az urbanizáció következményei egyre több problémát váltanak ki világszerte. A mesterségesen létrehozott felszínek – mint például az utak, épületek – jelentősen megváltoztatják egy adott terület energiaháztartását és áramlási viszonyait, a természetestől eltérő fizikai tulajdonságai miatt. Ennek eredményeképpen a városi környezet melegebb, mint a környező területek, s ezt a lokális éghajlati hatást városi hőszigetnek nevezzük. A növekvő népességgel a beépítettség is növekszik, mely a városi hősziget intenzitását tovább fokozhatja, ezzel rontva az ott élők klimatikus életkörülményeit. A módosult tulajdonságok hatásának vizsgálatára jól használható fizikai alapú modelleket fejlesztettek ki, melyek egyike a WRF¹ időjárás előrejelző modell (Skamarock et al., 2008). A WRF beépített városi almodellel rendelkezik, mely lehetővé teszi a városi környezetben zajló mikroskálájú folyamatok becslését.

A WRF modell

A két amerikai kutatóintézet – NCEP² és NCAR³ – együttműködésében kifejlesztett WRF modell az egyik legdinamikusabban fejlődő időjárás előrejelző modell, hiszen forráskódja szabadon letölthető a világhálóról és tetszés szerint módosítható. A WRF egy nem-hidrostatikus, korlátos tartományú numerikus időjárás előrejelző modell, mely az 1000 km-estől akár az 1 km alatti horizontális felbontásig is képes a légkör vizsgálatára. Finomabb horizontális felbontás esetén azonban már a modellterületek egymásba ágyazására van szükség. Ekkor a modellterületen belül kijelölünk további kisebb részterületeket, ún. nesteket, így növelve a felbontást és csökkentve a leskálázásból adódó hibákat.

A modell a prognosztikai egyenletek integrálását végzi, a számítások egy része további kapcsolók közbeiktatásával módosítható. A hidrotermodinamikai egyenletrendszer megoldása mellett almodelleket alkalmaznak a sugárzás-átvitel, a határreteg átkeveredés, a felhőképződés, a talaj-felszín kölcsönhatások és a városi termodinamika leírására. A modell vertikális koordinátája felszínkövető, melyet a nyomás hidrosztatikus komponense alapján számítanak.

A városi felszín figyelembevételére a WRF-ben három almodell áll rendelkezésre:

(1) Az alapbeállítás 2003 óta található meg a WRF beállítási lehetőségei között. Ekkor a számítások nem külön városi almodell segítségével történnek, hanem a Noah felszíni modulban (Chen et al., 1996; Chen & Dudhia, 2001) az eltérő felszíni karakterisztikák alapján határozzák meg a felszíni energiaháztartás összetevőit. A beépített területet jelző kategória esetében a természeteshez viszonyítva jelentősen módosulnak a paraméterek. Például az érdesség értéke városi felszín esetén 0,8 m, míg természetes felszínre 0,5 m. Így veszik figye-

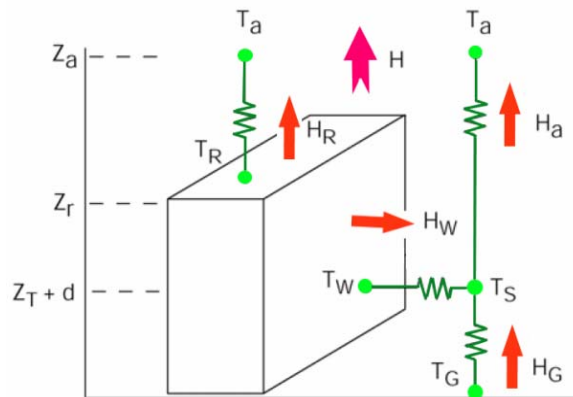
¹ Weather Research Forecast

² National Centers for Environmental Prediction

³ National Center for Atmospheric Research

lembe a városi felszín felett az érdesség miatt kialakuló turbulenciát. A beépített felszíni kategóriához tartozó albedó is eltér a természetestől, melynek értéke 0,15 városokra, növényzetre pedig 0,16 és 0,3 között változik. Mesterséges felszínek esetében ennek segítségével számítják a nagyobb rövidhullámú sugárzáselnyelést. Mivel az épületek hőtárolása nagyobb, mint a természetes vegetációé, ezért a számítások során a térfogati hőkapacitást $3,0 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$, míg a hővezetést $3,24 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ értékkel állítják be. A párolgás városi felszín felett kisebb, így a zöld területek aránya 10%-ra van csökkentve. Az antropogén hőkibocsátást nem veszik figyelembe a számításokban.

(2) A WRF-beli első városi modell Kusaka et al. (2001) és Kusaka & Kimura (2004) nevéhez fűződik, mely egy egy-szintes városi séma. A számítások során már figyelembe veszik a városok egyéni struktúráját: a város geometriáját, a falakat és a tetőket. Számításba veszik a város háromdimenziós kiterjedését, így árnyékolást, visszaverődést és sugárzáselnyelést is számolnak. A szél vertikális profilját a városi határrétegben exponenciálisnak feltételezik. Az 1. ábrán látható módon történik a szenzibilis hőáramok és hőmérséklet számítása: minden egyes városi felszínre (tető, fal, út) külön számol fluxusokat, amik végül összeadódnak a légkörre vonatkozó értékekkel. További újdonság, hogy a modell az antropogén hőkibocsátást is figyelembe veszi, oly módon, hogy a modellben megtalálható annak napi menete, mely hozzáadódik a felszíni modellel számított szenzibilis hőáramhoz. Ennek segítségével modellezhetővé válik a városi hősziget jelensége mind az éjszakai, mind a nappali órákban. A felszíni hőmérséklet és a hőmérsékleti profil a városban prognosztikus változóként kezelendő. A séma működéséhez közel 20 városi paraméter megadása szükséges, mely jellemzi egy adott város fizikai tulajdonságait (1. táblázat).

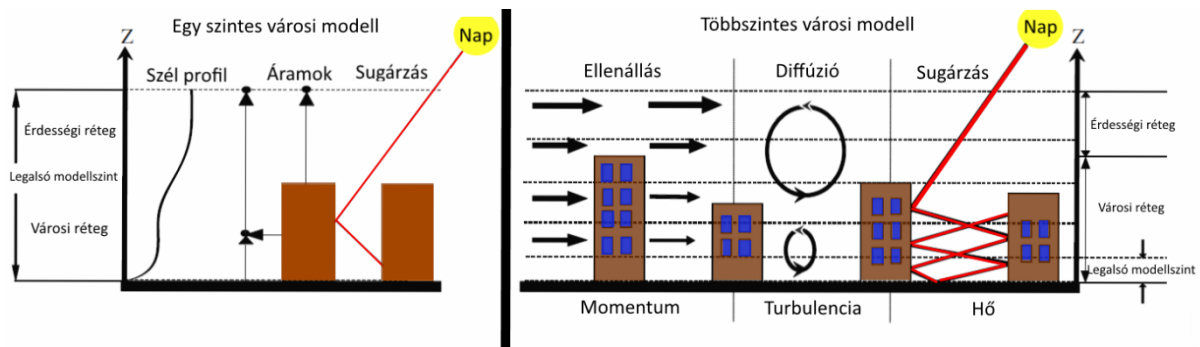


1. ábra: Az egyszintes városi hőforrások modell sematikus ábrája. z_a : legelső modellszint magassága; T_a : léghőmérséklet z_a szinten; z_r : hőáramra vonatkozó érdesség; d : kiszorítási rétegvastagság; H : aggregált szenzibilis hőáram; z_r : épületmagasság; T_r , T_g , T_w : tető, út és fal hőmérséklet; H_r , H_a , H_w , H_g : szenzibilis hőáram a tetőről, városi „kanyonból”, falakról, útról (Kusaka & Kimura, 2004)

(3) A későbbiekben a WRF-ben elérhetővé vált a Martilli et al. (2002) által kifejlesztett többszintes városi környezet parametrizáció (BEP⁴), mely már közvetlen kölcsönhatást teremtett a városi felszín és a légkör között (2. ábra). Ebben a sémában továbbra is fontos szerepe van a különböző felszíni paramétereknek, azonban a fizikai folyamatokban már vertikálisan figyelembe veszik az épületek eltérő magasságát, ami felelős a város felett kialakuló turbulenciáért és áramlási viszonyokért. Az épületek vertikális kiterjedése hat a város termodinamikai szerkezetére és a kialakuló hőáramokra a sűrűlési rétegben és a legelső városi modellszinten. A beérkező sugárzás továbbra is a felszín tulajdonságaitól és irányától függően visszaverődik, elnyelődik, illetve az épületek árnyékot képeznek. A maximális kihasználtság érdekében szükséges a felszín nagyfelbontású megadása, továbbá fontos, hogy több vertikális

⁴ Building Environment Parameterization

szint essen a városi határrétegbe. Az antropogén hőkibocsátás figyelembevétele ebben az esetben is rögzített napi menettel történik. A séma használatával az egyéni épületek belső hőjét konstansnak tekintjük, azonban csatolhatunk a sémához egy városi környezet modellt (BEM⁵), mely az épületek belső hőcseréjét számítja. A számításokhoz figyelembe veszi a hődiffúziót a falakon, a tetőn és a padlón keresztül; az ablakon keresztül történő hőcserét; a közlekedési eszközök és berendezések általi hőképződést; valamint a légkondicionálók, a fűtés és a ventiláció hatását. Ezáltal a szenzibilis hőáramra és az antropogén hőkibocsátásra egy pontosabb becslést kaphatunk (Chen et al., 2011).



2. ábra: Városi modell sematikus ábrázolása (Chen et al., 2011)

Máig sem ismert minden, a természetben lezajló fizikai, biológiai és kémiai folyamat, ezért leírásukra különböző, mért állandókkal meghatározott parametrizációkat alkalmaznak. Így van ez a városi terek modellezésénél is, mely során sémától függően közel 20 állandó megadása szükséges. Ezek az állandók jellemzik egy adott város struktúráját, energiaháztartását és az összesített antropogén hőkibocsátást (1. táblázat). A paraméterek megválasztása a modellszámítások kritikus lépése, és meghatározásuk nem egyértelmű adott városra. Wang et al. (2011) megmutatták, hogy a számos, bizonytalanságot növelő paraméter közül a város geometriája erős befolyással bír, míg a házak belső hőmérséklete kissé befolyásolja csak a számítások végeredményét. A legfontosabb és legbonyolultabb paraméter az antropogén hőkibocsátás, amely dinamikus változóként ugyan nem adható meg, de mindenképpen érdemes valamilyen formában számításba venni (Chen et al., 2011). A BEP sémához csatolható BEM séma éppen ezt modellezi.

1. táblázat: Városi modellek néhány fontosabb bemenő paramétere

Paraméter	Jelölés	Mértékegység
Tető magasság/Épület magasság	Z_r	m
Térfogati hőkapacitás (tető, fal, út)	$\rho c_r, \rho c_w, \rho c_g$	$J m^{-3} K^{-1}$
Hővezetés (tető, fal, út)	$\lambda_r, \lambda_w, \lambda_g$	$W m^{-1} K^{-1}$
Érdességi paraméter	Z_0	m
Albedo (tető, fal, út)	$\alpha_r, \alpha_w, \alpha_g$	-
Emisszivitás (tető, fal, út)	$\epsilon_r, \epsilon_w, \epsilon_g$	-
Szélesség (tető, út)	l_{roof}, l_{road}	m
Antropogén hőkibocsátás	AH	$W m^{-2}$

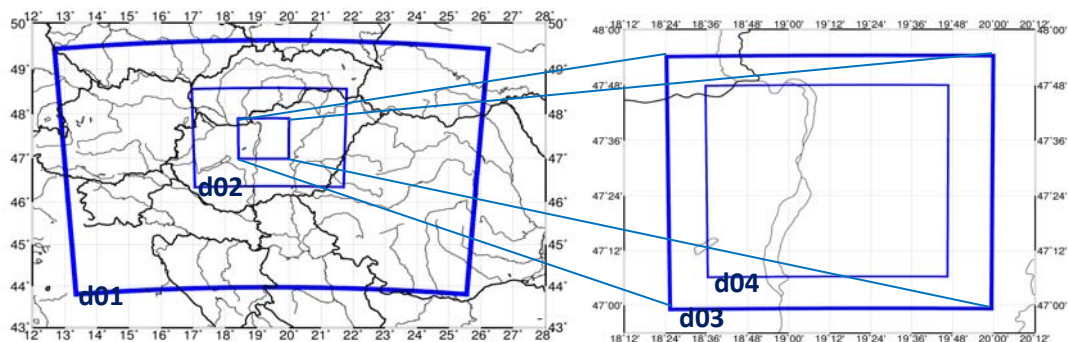
A városi modell inicializálásához szükséges a felszín nagyfelbontású megadása, mely részletesen tartalmazza a felszíni információkat és a terület struktúráját. Ez gyakran meglehetősen nehéz feladat, hiszen nem állnak rendelkezésre megfelelő felbontásban részletes és hozzáférhető mérések. A WRF számításai során három különböző városi felszínt – ritka beépített-ségű lakónegyedeket, sűrű beépítettségű lakónegyedeket, illetve ipari területeket – különít el,

⁵ Building Environment Model

melyekhez más és más tulajdonságokat rendel hozzá. Háromnál több kategória megadása is lehetséges a felszín pontosabb ismeretében.

Modellszimulációk

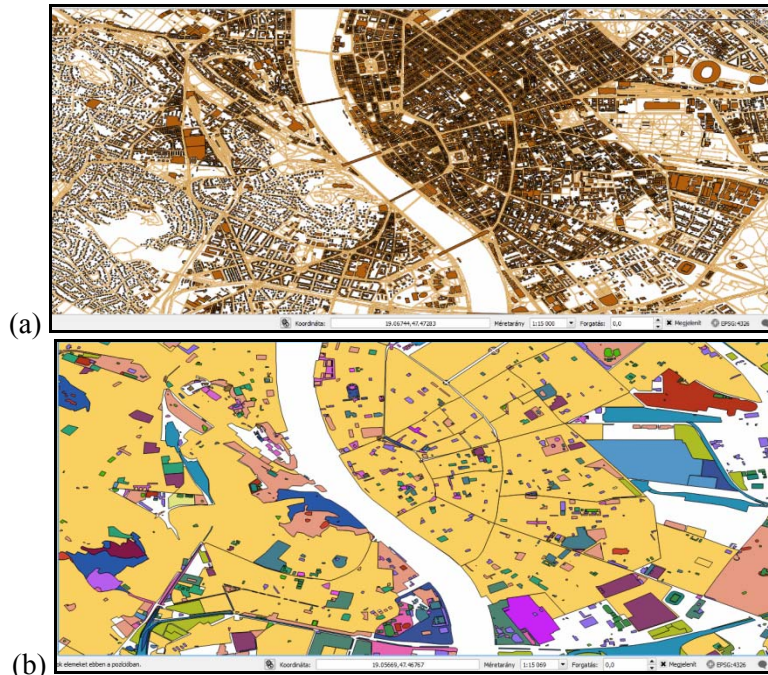
A készülő szimulációk inicializálásához szükséges a kezdeti meteorológiai mezők megadása, mely történhet valós reanalízis mezők felhasználásával vagy akár idealizált mezőkkel. Tervezett kutatásaink során nem csak globális meteorológiai modellek reanalízis mezőit fogjuk alkalmazni, hanem a RegCM regionális klímamodell futtatási eredményeit, mely hat óránként biztosítja majd a szükséges kezdeti- és peremfeltételeket. A korlátos tartományú RegCM modell (Elguindi et al., 2011) horizontális felbontása 10 km, és többek között megtalálhatók benne a következő változók: a felszíni hőmérséklet, a három szélkomponens, a relatív nedvesség, a nyomás, illetve a talaj nedvessége két mélységben. Vannak azonban olyan, a WRF futtatásához szükséges változók is, melyeket a RegCM modell outputjai nem tartalmaznak, ilyen például a talajhőmérséklet vagy a felszín fényességi hőmérséklete. A talajnedvesség a RegCM modellben a felső 10 cm-es, illetve a gyökérszóna rétegére áll rendelkezésre, míg a WRF modellhez négy különböző mélységre vonatkozóan kell információt megadni. A gyökérszóna vastagsága a WRF modellben a felszínhasználatától függ. Az előkészítő munkálatok során elkészítettük a WRF számára szükséges, speciális bináris formátumú fájlokat a RegCM outputokból, azonban a talajnedvesség mezőkben hibák adódtak. A RegCM rácspontjaiban a felszíni vizek alatt, az alsó réteg talajnedvesség tartalma hiányos, ezért a felső réteg talajnedvessége került a WRF összes talajszintjébe. A teszt számításokkor a hiányzó adatok pótlása után, a rendelkezésre álló mezők segítségével létrehoztuk a WRF modellszimuláció elindításához szükséges kezdeti mezőket, majd elkészítettük a futtatásokat a 3. ábrán jelölt egymásba ágyazott területeken. A külső terület (d01) horizontális felbontása 10 km és összesen 99×64 rácspontról áll, az ebbe ágyazott d02 felbontása 3333,333 m és 108×75 rácspontról tartalmaz 40 vertikális szintet. A Budapest nagyobb környezetét tartalmazó d03 térség 1111,111 m felbontáson 108×93 rácspontról tartalmaz, míg a legbelső terület Budapestet és annak szűkebb környezetét fedi le mintegy 370 m-es felbontással 240×210 rácspontról segítségével. A legbelső területet úgy határoztuk meg, hogy az közelítsen a korábbi műholdas városklíma kutatások (pl.: Dezső et al., 2012) területéhez, s ezáltal a kapott modellfuttatási eredmények független eredményekkel is verifikálhatók lesznek.



3. ábra: A WRF szimulációkhoz megadott vizsgált, egymásba ágyazott területek

A következő lépésben szükséges a d04 területére a felszíni, illetve a felszínhasználati kategóriák nagyfelbontású meghatározása annak érdekében, hogy a városi modellben leírandó hatások valóban érvényesülni tudjanak. Hivatalos, nyilvános budapesti épület-nyilvántartási adatbázis hiányában a világhálóról szabadon elérhető OpenStreetMap (<https://www.openstreetmap.org/>) adataival dolgozunk, mely alapvetően egy szerkeszthető földrajzi adatbázis, és kapcsolódik hozzá egy ingyenes internetes térképszolgáltatás is. Az önkéntes alapon működő

projekt szabadon hozzáférhető földrajzi adatokat gyűjt a világ minden tájáról. A kész utcaterképek turista- és kerékpárút-térképek, közlekedési viszonylatok útvonalainak, térképeinek gyűjteménye. Az OpenStreetMap adatait heti rendszerességgel frissülő, előre feldolgozott adatbázisból töltöttük le a könnyebb kezelhetőség érdekében (<https://mapzen.com/data/>). Az adatok standard térinformatikai formátumban érhetők el, ezért a WRF modellben való felhasználáshoz az ingyenesen elérhető QGIS (<http://www.qgis.org/hu/site/>) programmal alakítottuk át (4. ábra). A teljes területet kisebb részegységekre osztottuk és ennek megfelelően használtuk fel az adatbázisban rendelkezésre álló 46 féle felszínhasználati kategóriákat és az épületek emeleteinek számát. Végül az így elkészített k.h. 18,354°–19,859° és é.sz. 46,939°–47,842° által kijelölt területen létrehoztuk a felszín-borítást 100 m-es felbontásban.



4. ábra: A vizsgált terület részlete a QGIS programmal megjelenítve:
(a) Budapest utcahálózata és épületei; (b) a felszínhasználati kategóriák

Fontos megemlíteni számításaink egyik technikai korlátozó tényezőjét, a szükséges számítási igényt. A legkülső terület esetén $\Delta t=60$ s időlépcsőt alkalmaztunk, míg az egyre kisebb területek felé haladva ez az érték rendre harmadolódott. Az időlépcsők és a területet lefedő szükséges rácspontok számát alkalmazva az elkészülő szimulációk futási ideje elérte a 10 órás hosszúságot is, ami a további tervekben szereplő szimulálandó (klimatológiai) idősor hosszúságának ismeretében nem elfogadható.

A nagy számítási igény oka főleg a legbelső és a legkülső terület felbontás- és méretbeli különbsége, mivel a WRF modell több szálon történő párhuzamos futtatásának a legkisebb kiterjedésű mező rácspontjainak száma szab határt. Egy szála ugyanis minimum 15×15 rácspontnak kell jutnia és a számításokra használt szálak száma nem változtatható a futtatás során. Ez a korlátozás a külső terület esetén 28 szálát jelent, míg a belső terület esetén akár 224 is használható lenne. A modellterületek külön-külön kezelésével lehetséges a technikai probléma kezelése. A külső három modellterületre (d01, d02, d03) elvégezzük a szükséges 24 órás szimulációkat 40 vertikális szinten. A legbelső (d04) területet azonban külön kezeljük több – megközelítőleg 60 – vertikális szinten a WRF ún. ndown beépített leskálázó programcsomagjával. Ezáltal a számításokat párhuzamosítani tudjuk, és több szál alkalmazásával jelentős időt tudunk megtakarítani.

További tervek

Következő lépésként a RegCM-WRF modell-együttes megfelelő működésének összeállítása a cél, mely során először megkeressük az optimális beállításokat a WRF városi almodelljéhez, továbbá a Budapest struktúrájára vonatkozó paramétereket is meghatározzuk a rendelkezésre álló adatok alapján. A készült szimulációkat műholdas felszíni hőmérsékletmérésekkel verifikáljuk annak érdekében, hogy megtaláljuk a legjobb kalibrálást. Ezt követően a kijelölt időszakra és esetekre WRF szimulációkat készítünk a RegCM által korábban végrehajtott szimulációk eredményeinek felhasználásával. A városi modellszimuláció eredményeire vonatkozóan statisztikai vizsgálatokat végzünk, s így a várható klímaváltozás Budapestre gyakorolt hatásáról, illetve a budapesti városi hősziget intenzitásának változásáról kaphatunk pontosabb képet.

Köszönetnyilvánítás

Kutatásainkat támogatja az OTKA K-109109 számú projektje és az AGRÁRKLIMA2 projekt (VKSZ_12-1-2013-0034).

Hivatkozások

- Chen, F., Mitchell, K., Schaake, J., Xue, Y., Pan, H-L., Koren, V., Duan, Q.Y., Ek, M., Betts A., 1996: Modeling of land-surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations. *Journal of Geophysical Research*, 101: 7251–7268.
- Chen, F., Dudhia, J., 2001: Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review*, 129: 569–585.
- Chen, F., Kusaka, H., Bornstein, R., Ching, J., Grimmond, C.S.B., Grossman-Clarke, S., Loridan, T., Manning, K.W., Martilli, A., Miao, S., Sailor, D., Salamanca, F.P., Taha, H., Tewari, M., Wang, X., Wyszogrodzki, A.A., Zhang, C., 2011: The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *Int. J. Climatol*, 31: 273–288.
- Dezső, Zs., Bartholy, J., Pongrácz, R., Lelovics, E., 2012: Városi hősziget vizsgálatok műholdas és állomási mérések alapján. *Léggör*, 57: 170-173.
- Elguindi, N., Bi, X., Giorgi, F., Nagarajan, B., Pal, J., Solmon, F., Rauscher, S., Zakey, A., Giuliani, G., 2011: Regional climatic model RegCM – User manual. Version 4.3. ICTP, Trieste, Italy. 32p.
- Kusaka, H., Kimura, F., 2004: Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: impact on urban heat island simulation for an idealized case. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82: 67–80.
- Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y., Kimura, F., 2001: A simple singlelayer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab models. *Boundary-Layer Meteorology*, 101: 329–358.
- Martilli, A., Clappier, A., Rotach, M.W., 2002: An urban surface exchange parameterization for mesoscale models. *Boundary-Layer Meteorology*, 104: 261–304.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X-Y., Wang, W., Powers, J.G., 2008: A Description of the Advanced Research WRF -59- Version 3 NCAR/TN–475+STR, June 2008. – NCAR Technical Note.
- ENSZ, 2007: World Urbanization Prospects: The 2007 Revision [Interneten elérhető: <http://www.un.org/esa/population/publications/wup2007/2007wup.htm>].
- Wang, Z., Bou-Zeid, E., Au, S.K., Smith, J.A., 2011: Analyzing the sensitivity of WRF's Single-layer Urban Canopy Model to parameter uncertainty using advanced Monte Carlo simulation. *American Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50: 1795–1815.