

VÁROSI HŐSZIGET MEGHATÁROZÁSÁNAK LEHETŐSÉGEI A WRF MODELL FELHASZNÁLÁSÁVAL

POSSIBILITIES OF THE URBAN HEAT ISLAND ANALYSIS USING THE WRF MODEL

Göndöcs Júlia, Breuer Hajnalka, Pongrácz Rita, Bartholy Judit

ELTE, Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A.

juliagondocs@nimbus.elte.hu, bhajni@nimbus.elte.hu, prita@nimbus.elte.hu, bartholy@caesar.elte.hu

Összefoglalás. A városok egyik legfontosabb éghajlat-alakító hatása a városi hősziget jelenségében nyilvánul meg, mely során a városi területek nagyobb mértékben melegednek fel a városon kívüli növényzettel borított területekhez képest. A jelenség vizsgálható numerikus modellek segítségével, illetve az ehhez kapcsolt városi fizikai folyamatokat leíró parametrizációkkal. Munkánkban a WRF modellt és beépített városi sémáit teszteltük Budapestre és közvetlen környezetére, finomfelbontású és aktualizált felszíni adatbázisok alkalmazása mellett. Célunk volt a budapesti városi hősziget jelenségének detektálása és területi elrendeződésének vizsgálata.

Abstract. One of the most substantial climatic effects of the built-up areas is the urban heat island, which results in warmer urban areas compared to its surrounding rural areas. The phenomenon can be analysed with numerical models, linked to urban parameterisation. In this research the WRF (Weather Research and Forecasting) model and its urban schemes are tested for Budapest and its surroundings, initialized with updated surface databases of fine resolution. The main goal of this study is to evaluate the intensity of the urban heat island effect and its spatial distribution in Budapest.

Bevezetés. A Föld népességének rohamos növekedése és városokban történő koncentrálódása (ENSZ, 2007) miatt az urbanizáció következményei egyre több problémát váltanak ki világszerte. A mesterségesen létrehozott felszínek – mint például az utak, épületek – a természetes vegetációtól eltérő fizikai tulajdonságaik miatt, jelentősen megváltoztatják egy adott terület energiaháztartását és áramlási viszonyait. Ennek eredményeképpen a városi környezet melegebb, mint a környező területek, s ezt a lokális éghajlati hatást városi hőszigetnek nevezzük. A növekvő népességgel a városi területek és a beépítettség is növekszik, mely a városi hősziget intenzitását tovább fokozhatja, ezzel rontva az ott élők klimatikus életkörülményeit. A városi hősziget jelenség Budapesten (Dezső et al., 2012; Pongrácz et al., 2006) és más közepes nagyságú magyarországi városban is detektálható műholdképeken (Bartholy et al., 2005) és felszíni mérések (Bottyán et al., 2005; Gál et al., 2016) adatsorai alapján.

A módosult tulajdonságok hatásának vizsgálatára jól használható fizikai alapú modelleket fejlesztettek ki, melyek egyike a WRF (Skamarock et al., 2008) időjárás előrejelző modell. A WRF beépített városi almodellel rendelkezik, melyek lehetővé teszik a városi környezetben zajló mikroskálájú folyamatok és a különböző városrészek mikroklimatikus viszonyainak becslését. A modellt számos tanulmányban alkalmazták városi területnövekedés hatásainak becslésére is (Zhang et al., 2010), továbbá jelen munkánkban sikeresen használtuk a városi hősziget becslésre. A kialakult jelenség területi elrendeződése függ a felszínborítás típusától, komplexitásától és a felbontástól. Brousse et al. (2016) sikeresen alkalmazták a lokális klímazónák szerinti kategorizálást a WRF modellben, ezzel javítva előrejelzéseiket, míg munkánkban az ingyenesen elérhető OpenStreetMap adatbázist

használtuk fel szimulációink elkészítéséhez fővárosunk hősziget jelenségének feltérképezése céljából.

Módszerek és adatok.

WRF modell. A két nagy amerikai kutatóintézet – NCEP¹ és NCAR² – együttműködésében kifejlesztett WRF modell (Skamarock et al., 2008) az egyik legdinamikusabban fejlődő időjárás előrejelző modell, melynek forráskódja szabadon letölthető a világhálóról és tetszés szerint módosítható. A WRF egy nem-hidrosztatikus, korlátos tartományú numerikus időjárás előrejelző modell, mely a több 100 km-estől akár az 1 km alatti horizontális felbontásig képes a légköri folyamatok szimulációjára. Finomabb horizontális felbontás esetén azonban már a modellterületek egymásba ágyazására van szükség. Ekkor a modellterületen belül kijelölünk további kisebb részterületeket, így növelve a felbontást és csökkentve a leskalázásból 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 határréteg átkeveredés, a konvektív felhőképződés, a felhő-mikrofizika, a talaj-felszín-légkör kölcsönhatások és a városi termodinamika leírására. A modell vertikális koordináta-rendszere felszínkövető, melyet a nyomás hidrosztatikus komponense alapján számítanak.

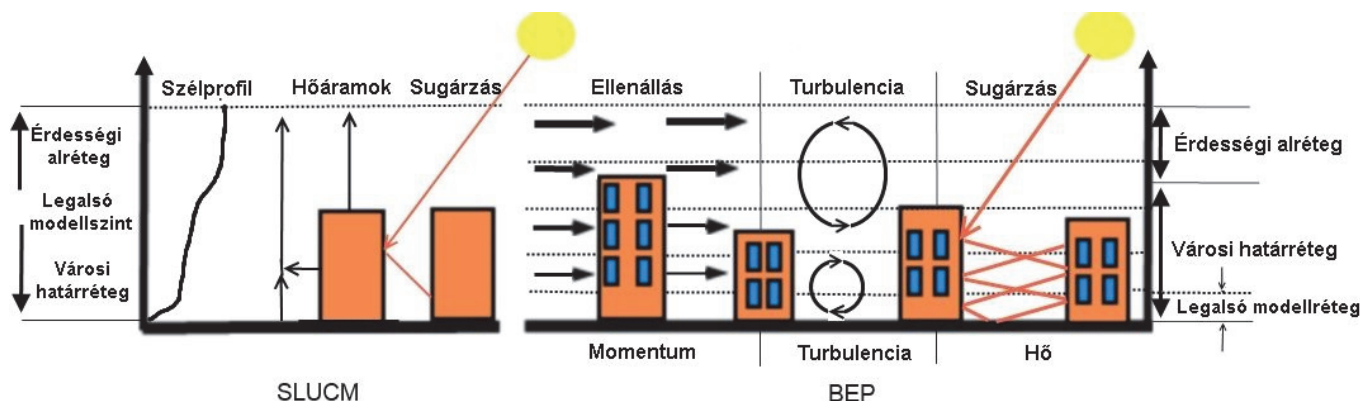
A városi felszín figyelembevételére a modellben három almodell található, melyek a következők:

¹ National Centers for Environmental Prediction

² National Center for Atmospheric Research

(1) A WRF modellben 2001 óta megtalálható alapbeállítás használatával a modell nem számol külön városi parametizációval, helyette a beépített felszíni folyamatokért felelős ún. Noah almodellt (*Chen and*

szél vertikális profilját a városi határrétegben exponenciálisnak feltételezzük. A szenzibilis hőáramok és hőmérsékletok számítása során minden egyes városi felszín típusra (tető, fal, út) a séma külön



1. ábra: Az egyzintes (SLUCM) és a többszintes (BEP) városi parametizáció működésének sematikus ábrája

Dudhia, 2001) alkalmazza. Ez az almodell felszíni paraméterek segítségével reprezentálja a városi felület természetestől eltérő viszonyait. A városi felület felett a nagyobb érdeklés miatt kialakuló turbulencia a felszíni érdeklés paraméter megadásával módosítható. Természetes, növénytakaróval borított környezet esetén értéke 0,5 m, míg beépített területekre 0,8 m. A mesterséges felületekhez tartozó albedó is eltér a természetestől, melynek értéke 0,15 városokra, a növényzettel borított területeken pedig 0,16 és 0,3 között változik. Városi felületek esetében a felület albedójának csökkentésével számítják a nagyobb rövidhullámú sugárzáselnyelést. Mivel az épületek hőtárolása nagyobb, mint a természetes növényzettel borított felületé, ezért a számítások során a térfogati hőkapacitás értékét $3 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$, míg a hővezetést $3,24 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ értékkel állítják be. A séma csak egyetlen városi felület kategóriát különböztet el, mely felett a párolgás mennyisége jelentősen csökken, hiszen a zöld területek aránya 5%-ra van redukálva. Az antropogén hő kibocsátást és a városi geometriát nem veszi figyelembe a Noah felszíni modul.

(2) A WRF-beli első kifejezetten városi környezetre kifejlesztett modell *Kusaka et al. (2001)* és *Kusaka and Kimura (2004)* nevéhez fűződik, melyben a város vertikálisan csupán egy kitüntetett szinttel rendelkezik (SLUCM³). Ezzel a városi modellel a számítások során már figyelembe vehető a városok egyedi struktúrája: a város geometriája, a falak és a tetők eloszlása. Számításba vehetjük továbbá a város háromdimenziós kiterjedését, így az árnyékolást, valamint visszaverődést és sugárzáselnyelést is számolunk. A geometriai tulajdonságok statisztikai alapon adandók meg, egy adott városi felület kategóriához tartozó rácspontbeli épületmagasságok minden hasonló felület kategóriában ismétlődve, azonos módon építik fel a várost a modellterben. A

számol fluxusokat, amik végül összeadódnak a légkörre vonatkozó értékekkel. Az alapbeállításhoz viszonyítva további újdonság, hogy a modell képes az antropogén hő kibocsátást is figyelembe venni, mégpedig oly módon, hogy a modellben megtalálható a különböző felület kategóriákhoz tartozó átlagos kibocsátás értéke és a napi menet. A becsült antropogén kibocsátás a modell futtatás során hozzáadódik a felszíni modellel számított szenzibilis hőáram értékeihez. Ennek és a felszíni paraméter táblázatban megadott városi paramétereknek a 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 jól jellemzi egy adott város fizikai tulajdonságait.

(3) A specifikus modellfejlesztésnek köszönhetően a WRF-ben elérhetővé vált a *Martilli et al. (2002)* által kidolgozott többszintes városi környezet parametizáció (BEP⁴), mely már közvetlen kölcsönhatást teremt a városi felület és a légkör között (1. ábra). Ebben a sémaiban is fontos szerepe van a különböző felület paramétereknek, azonban a fizikai folyamatokban már vertikálisan figyelembe vesszük az épületek eltérő magasságát, ami alapvető szerepet játszik a város felett kialakuló turbulencia és az áramlási viszonyok kialakulásában. Az épületek vertikális kiterjedése hat a város termodinamikai szerkezetére és a kialakuló hőáramokra a sűrűlási rétegben, valamint a legalsó városi modellszinten. A beérkező sugárzás ebben a verzióban is a felület tulajdonságaitól és irányától függően visszaverődik, elnyelődik, s az épületek árnyékot képeznek. A modell lehetőségeinek maximális kihasználása érdekében szükséges a felület nagyfelbontású megadása, továbbá fontos, hogy több vertiká-

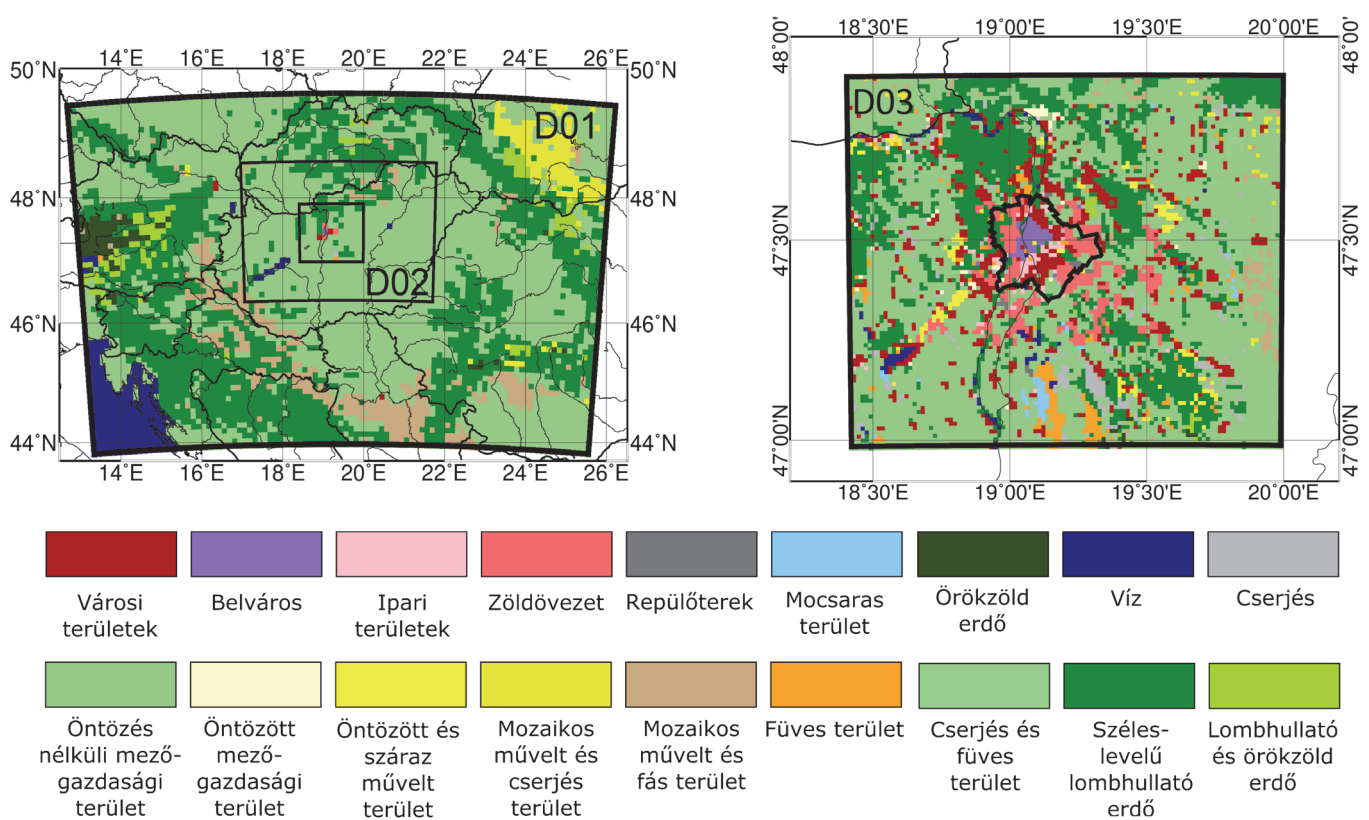
³ Single Layer Urban Canopy Model

⁴ Building Environment Parameterization

lis szint essen a városi határétegbe. Az antropogén hőkibocsátás figyelembevétele ebben az esetben is rögzített napi menettel történik. A séma használatával az egyes 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. Az így számítható antropogén hőkibocsátás függ a felhasználó által előre megadott, épületeken belüli hőmérsékletektől. Ezáltal a szenzibilis hőáramra és az antropogén hőkibocsátásra egy pontosabb becslést kaphatunk (Chen et al., 2011).

tosabbá tehető a modell által alkalmazott városi szerkezet.

Felszíni adatbázis. A szimulációk nagy felbontása miatt szükséges a felszíni mezők finomfelbontású meghatározása a modellterületen. Hivatalos, finomfelbontású felszínhasználati adatbázis hiányában szükséges volt egy olyan felszínhasználati adatbázis létrehozása, melyhez az ingyenesen elérhető és módosítható *OpenStreetMap* adatbázist használtuk. Az adatbázis tartalmaz számos városi paramétert, például 43 féle felszínhasználati kategóriát, épületmagasságot, utcahálózatot és vízzel fedett területeket. *Google Earth* műholdképek alapján további területeket különítettünk el: a sűrűn beépített belvárost és a Liszt Ferenc Nemzetközi repülőtérrel, ezzel növelve a városi kategóriák számát az eredeti háromról ötre. A folyamatok vizsgálatához a főváros körül lehatároltunk



2. ábra: A vizsgált terület és a felszínhasználati eloszlás

A WRF széles horizontális skálán történő alkalmazhatósága és a finomfelbontású szimulációk elkészítése miatt feltétlenül szükséges a felszíni adatbázisok finomfelbontású meghatározása, 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. Az eredeti modellbeállításban megadott felszíni adatbázis alapján a WRF modell három városi felszíni kategóriát különít el, melyek a következők: ritka beépítettségű lakónegyedek, sűrű beépítettségű lakónegyedek, illetve ipari területek. A felszín pontosabb ismeretében több városi kategória is bevezethető, melyekkel pon-

egy területet, melyet korábbi vizsgálatok alapján határoztunk meg és a következő területet fedi le:

k. h. 18° 48'–19° 30'; é. sz. 47° 12'–47° 48'. A terület lehatárolásakor fontos volt, hogy a későbbi városi hősziget vizsgálatok esetén a városi és környékbeli pontok száma azonos nagyságrendbe essen, így a lehatárolás után 733 városi és 1094 városkörnyéki pont adódott.

A számítások során további kikötéseket alkalmaztunk: a tengerszint feletti magasság nem haladhatja meg a 200 m-t és a vizsgált rácspont nem lehet vízzel fedett. Így a rácspontok végső száma a következő: 604 városi és 664 külterületi pont.

A külterületi pontok – ahogyan azt a 2. ábra is szemlélteti – 60%-a mezőgazdasági terület, míg 24%-a lombhullató erdő.

⁵ Building Environment Model

Felhasznált további adatbázisok. A modellfuttatáshoz szükséges kezdeti mezőket az ECMWF⁶ központ IFS⁷ modelljének analízis mezői biztosították számunkra. A kezdeti mezők nyolcad fokos felbontásban voltak elérhetőek, és rendelkezésre álltak a WRF-modellfuttatáshoz szükséges talaj adatok négy szintre, valamint a hőmérséklet- és szélmezők több légköri nyomási szintre.

A modell felszíni adatbázisainak módosítása során a klimatológiai albedó mezőt is frissítettük. A modellben megtalálható eredeti adatbázis 1992 és 1993 között végzett AVHRR⁸ mérésekből készült. Az általunk készített frissített adatbázis az *Aqua* és *Terra* műholdon található MODIS⁹ szenzorral mért 16 napos átlagos globális albedó mérésekből készült a 2000.01.01–2015.12.31. időszakot lefedve, 500 m felbontással.

A modellszimulációk értékeléséhez Budapest-Pestszentlőrinc szinoptikus állomáson a Marcell György Obszervatóriumban (é. sz. 47° 25', k. h. 19° 10') mért állapotváltozók értékeit is felhasználtuk.

Szimulációk. A városi hősziget jelensége anticiklonális időjárási helyzetben képes a legszabályosabban kialakulni, gyenge légmozgás és felhőmentes égbolt esetén. A szimulációkat 2015. július 4-re készítettük el, amikor egy magasnyomású rendszer határozta meg hazánk időjárását, kevés felhőt és 32,4 °C-os maximumhőmérsékletet eredményezve a pezsztentlőrinci állomáson.

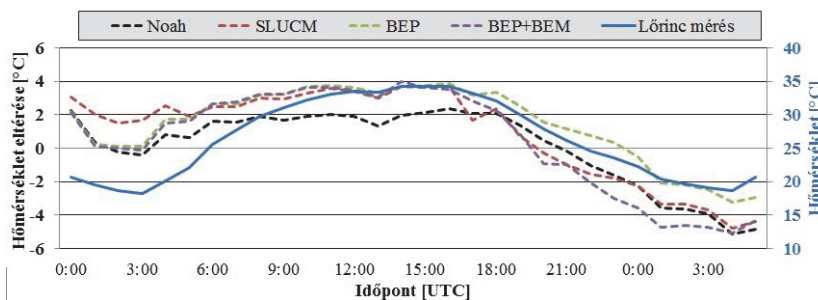
A modellszimulációt július 4-én 00 UTC-től indítottuk és másnap 06 UTC-ig futtattuk. Négy szimulációt készítettünk el a fent bemutatott városi parametizációkat alkalmazva. Az első szimulációban – mely során nem alkalmaztunk külön városi almodellt – csupán a WRF felszíni folyamatokért felelős Noah modulját használtuk (továbbiakban: Noah), majd az egyszintes városi modellel (továbbiakban: SLUCM) és a többszintes városi modellel (továbbiakban: BEP) készítettünk szimulációkat. Utóbbi esetében a városenergetikai modellt is használtuk

ba vettük (továbbiakban: BEP+BEM) az egyik számítás során.

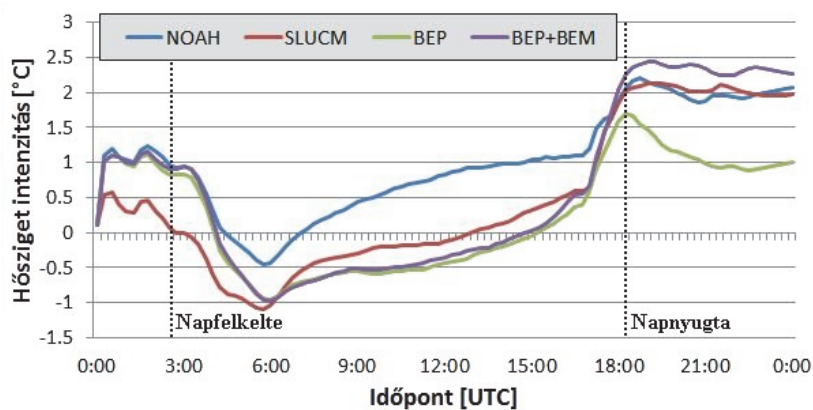
A különböző városi parametizációk viselkedésének vizsgálatához Budapestre és annak közvetlen környezetére készültek szimulációk. A kezdeti- és peremfeltételek durva felbontása miatt szükséges volt egymásba ágyazott modellterületek használata. Így a legkülső D01 modellterület a Kárpát-medencét fedi le 10 km-es horizontális felbontással (99×64 rácspont), az első beágyazott terület (D02) Magyarország középső térségét 3333 m felbontással (108×75 rácspont), míg a belső (D03) terület a fővárost és környezetét 1 km-es felbontással (108×93 rácspont).

Eredmények.

A modell által generált hősziget jelenség vizsgálata előtt szükséges megvizsgálnunk a modellszimulációkból kapott hibákat is. A 3. ábrán a Budapest-Pestszentlőrinci állomáson mért lég-hőmérsékleti adatokat (folytonos vonal) és a modellszimulációk ettől vett eltéréseit (színes szaggatott vonalak) szemléltetjük. A mérésekből egyértelműen kirajzolódik a hőmérséklet napi menete 17 °C-os minimummal a hajnali órákban és 32 °C-os maximummal a déli órákban. A grafikon jól illusztrálja a különbségek napi menetét is, ami nagyjából együtt fut a mért



3. ábra: A Budapest-Pestszentlőrincen végzett hőmérséklet mérés és a modellszimulációk ettől vett eltéréseinek nap menete 2015. 07. 04. 00 UTC-től 2015. 07. 05. 06 UTC-ig



4. ábra: Hősziget intenzitások napi menete a szimulációkban 2015. 07. 04-én.

hőmérsékleti értékekkel. A hajnali órákban (még a modellszimuláció felpörgési ideje alatt) a minimális besugárzás hatására az eltérések 0 °C és 2 °C között mozognak. Majd ahogy növekszik a beérkező rövidhullámú sugárzás, a hibák 4 °C-hoz közelednek, kivéve a Noah szimulációt, melynek hőmérsékleti hibája a nappali órákban sem haladja meg a 2,3 °C-ot.

A beérkező sugárzás csökkenésével mind a mért hőmérséklet, mind a szimulációk ettől való eltérése csökken a délután és az este folyamán. A pezsztentlőrinci állomás a zöldövezeti zónában helyezkedik el, ahol a modellszimulációkban – a Noah szimulációt kivéve – megjelenik egy minimális antropogén hőkibocsátás. Az emberi tevékenységek által kibocsátott hő eltérő számítási módjának és a város eltérő struktúrájának következté-

⁶ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

⁷ Integrated Forecast System

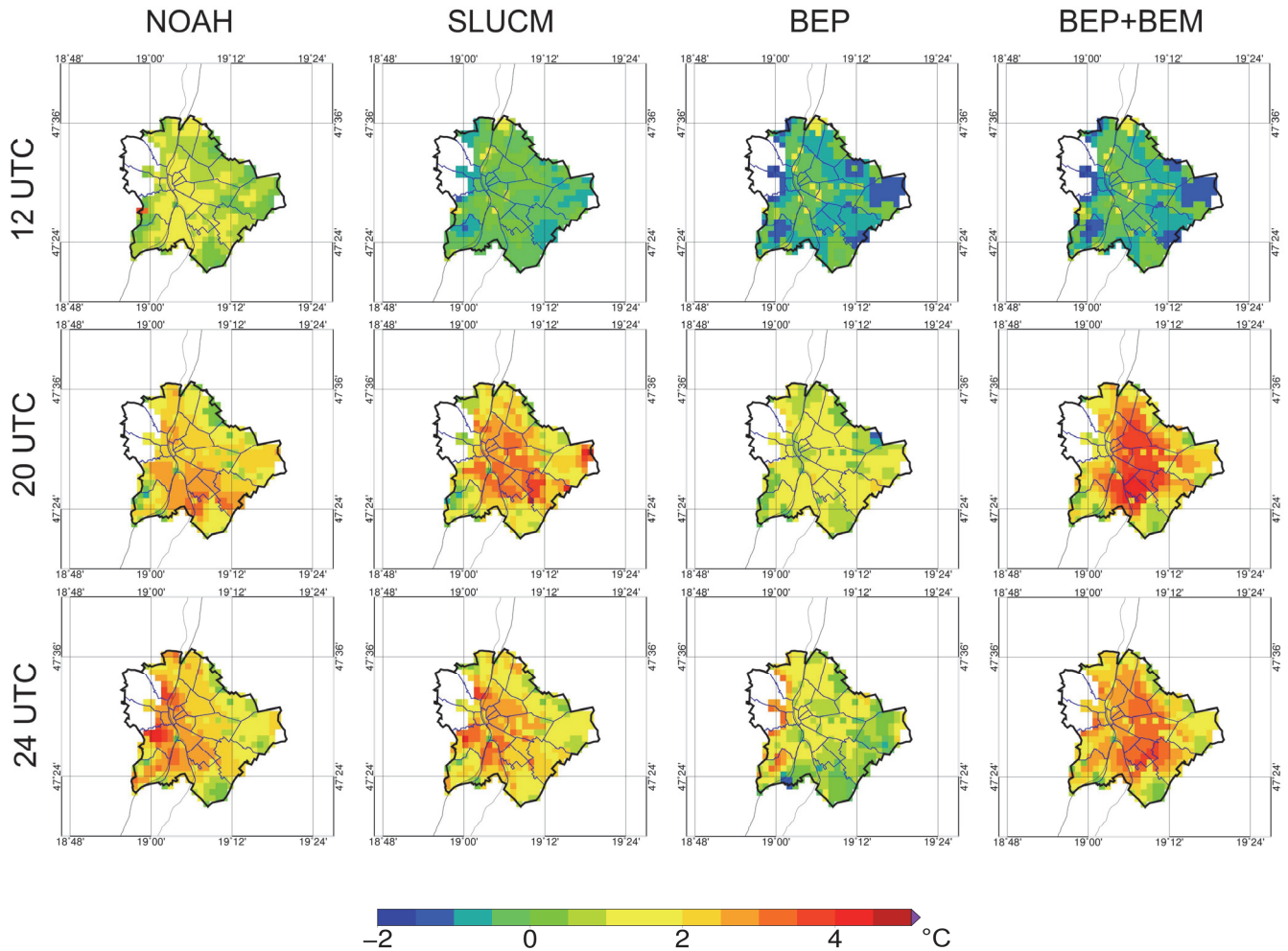
⁸ Advanced Very High Resolution Radiometer

⁹ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

ben a BEP szimuláció lassabb csökkenést mutat a hőmérsékleti eltérésekben 18 UTC után a többi szimulációhoz képest.

Számításaink során a városi hősziget intenzitását (UHI) a következőképpen definiáltuk: a korábban bemutatott, elkülönített modellterületen belül városi pontnak tekintettük azokat a rácpontokat, melyek Budapest közigazgatási területén belül helyezkednek el, nem vízzel borítottak és tengerszint feletti magasságuk nem éri el a 200 m-t; a külterületi pontok pedig a Budapest határain kívül eső, nem mesterséges felszínborítású területek rácpontjai. Az értékelésnél e két területen kialakult kétméteres

futtatástól, ahol az intenzitás értéke csupán a napfelkelte időszakában volt negatív. Ez a pozitív irányú eltolódás a városi területek hőtöbbletével és a látens hőáram hiányával magyarázható. A Noah felszíni séma minimális városi vegetációjának és a felszíni talajnedvesség hiányának hatására a látens hőáram a nap folyamán nulla volt. Ezzel ellentétben a többi szimuláció során a ritkább beépítettségű felszínkategóriákban kialakulhatott közel 125 Wm^{-2} -es látens hőáram is. Naplemente után a szimulációkban található városi területek eltérő módon viselkedtek a kialakuló látens, szenzibilis és antropogén hőáramok miatt. A BEP szimuláció hősziget intenzitása naplementekor érte el $1,7 \text{ }^\circ\text{C}$ -os maximumát, utána el-



5. ábra: Városi hősziget területi elrendeződése a különböző szimulációkban 12, 20 és 24 UTC-kor

léghőmérsékletbeli különbségének napi menetét (4. ábra) és területi elrendeződését (5. ábra) vizsgáltuk.

A WRF-modellben használható városi parametizációk eltérő módon kezelik a fizikai folyamatokat: így nem meglepő, hogy a kapott hősziget intenzitások sem alakulnak teljesen azonosan. A hajnali órákban, napfelkelte előtt, a modell felpörgési időszakában pozitív hősziget intenzitás ($\approx 1 \text{ }^\circ\text{C}$) alakult ki, azonban a SLUCM szimulációban a városi területek kevésbé tudtak felmelegedni, mely kisebb intenzitás értékeket eredményezett. A nap-pali órákban a városi parametizációt használó szimulációkban az UHI értéke nulla alatt mozgott eltérve a Noah

kezdett csökkenni, eltérve ezzel a többi szimulációtól. A jelentős csökkenés a városi területek hirtelen lehűlésével magyarázható. Az éjszakai órákban a BEP+BEM szimuláció generálta a legerősebb hőszigetet, ami a városi területek antropogén hőtöbbletével magyarázható és a belvárosi területeken maximalizálódott (5. ábra).

A városi hősziget számításánál jelentős szerepe van a felszín borítottságának is, így elengedhetetlen az UHI területi elrendeződésének vizsgálata. Korábbi műholdas vizsgálatok (Pongrácz *et al.*, 2006) alapján Budapestről elmondható, hogy a hősziget intenzitás a maximumát a Duna bal partján fekvő belvárosi területeken érte el, ahol

a legnagyobb a beépítettség és az antropogén hő kibocsátás is. A város határa felé fokozatos intenzitás csökkenés detektálható, kirajzolva ezzel egy sugaras város szerkezetet. A WRF-modell forráskódjába újonnan bevezetett városi kategóriák segítségével pontosabban reprezentálható az UHI struktúrája, azonban itt is mutatkoznak különbségek a szimulációk között. Az UHI intenzitások 4. ábrán bemutatott napi meneténél a Noah szimuláció a nappali órákban egyértelműen kiemelkedett magasabb értékeivel, ami jól látszódik az 5. ábra legfelső sorában is.

A Noah szimuláció esetében a városi területek hőmérséklete átlagosan 31,4 °C volt, míg a külterületeké 30,5 °C. Ezzel ellentétben a többi szimuláció során 12 UTC-kor negatív hősziget jelenség alakult ki (SLUCM: város: 30 °C környék: 30,2 °C; BEP: város: 29,7 °C, környék: 30,4 °C; BEP+BEM: város: 29,8 °C, környék: 30,5 °C). Megfigyelések alapján a vizsgált jelenség naplemente után, az éjszakai órákban éri el maximumát és rajzolódik ki a legtisztábban (Oke, 1982). Az 5. ábra szemléltet két további, éjszakai időpontra meghatározott területi eloszlást is.

A korábbi eredményekhez hasonlóan a BEP+BEM szimulációban 4 °C-os maximummal kirajzolódik a belváros térsége, ami a többi szimulációban nem, vagy csak részlegesen jelenik meg gyengébb intenzitásokkal. A BEP szimuláció alacsony éjszakai intenzitás értékei miatt a belvárosi meleg zóna nem jelenik meg. A Noah szimuláció, habár nem rendelkezik antropogén hő kibocsátást leíró taggal, mégis képes reprodukálni az éjszakai hősziget jelenséget, azonban a BEP+BEM szimulációtól eltérő területi elrendeződésben.

Összegzés. A WRF numerikus modell beépített városi parametizációinak segítségével megbecsülhető a budapesti városi hősziget hatás jellemzői és térbeli szerkezete. A modellszimulációk során a felhasználói igények figyelembevételével a megoldandó feladat, probléma jellegétől függően háromféle, eltérő komplexitású városi sémával számolhatunk. Habár a komplex fizikai folyamatok miatt a szimulációs eredmények hibával terhelték (nappali órákban mintegy 4 °C-os a léghőmérsékleti eltérés), a város sajátos struktúrája és a hősziget beépítettségéből adódó területi elrendeződése elemezhető. Pontos és finomfelbontású adatbázisok használatával tovább javítható a felszíni folyamatok becslése és a folyamat térbeli eloszlása is.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben bemutatott kutatásokat támogatta az AGÁRKLIMA2 (VKSZ_12-1-2013-0034) és az OTKA K-120605 számú projekt.

Irodalom

- Bartholy J., Pongrácz R. és Dezső Zs., 2005: A hazai nagyvárosok hősziget hatásának elemzése finomfelbontású műholdképek alapján. *AGRO-21 Füzetek* 44, 32–44.
- Brousse, O., Martilli, A., Foley, M., Mills, G. and Bechtel, B., 2016: WUDAPT, an efficient land use producing data tool for mesoscale models? Integration of urban LCZ in WRF over Madrid. *Urban Climate*. 17, 116–134.
- Bottyán, Zs., Kircsi, A., Szegedi, S. and Unger, J., 2005: The relationship between built-up areas and the spatial development of the mean maximum urban heat island in Debrecen, Hungary. *Inter. J. Climatol.* 25(3), 405–418.
- Chen, F. and Dudhia, J., 2001: Coupling an Advanced Land Surface-Hydrology Model with the Penn State-NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity. *Mon. Weather Rev.* 129(4), 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. and Zhang, C., 2011: The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *Int. Jour. of Climat.* 31, 273–288.
- Dezső Zs., Bartholy J., Pongrácz R. és Lelovics E., 2012: Városi hősziget vizsgálatok műholdas és állomási mérések alapján. *Léggör* 57, 170–173.
- ENSZ, 2007: World Urbanization Prospects: The 2007 Revision, <http://www.un.org/esa/population/publications/wup2007/2007wup.htm>.
- Gál, T., Skarbit, N. and Unger, J., 2016: Urban heat island patterns and their dynamics based on an urban climate measurement network. *Hungarian Geographical Bulletin* 65(2), 105–116.
- Kusaka, H. and 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. *J. Meteor. Soc. Japan* 82, 67–80.
- Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y. and Kimura, F., 2001: A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab models. *Boundary-Layer Meteorology* 101, 329–358.
- Martilli, A., Clappier, A. and Rotach, M. W., 2002: An urban surface exchange parameterization for mesoscale models. *Boundary-Layer Meteorology* 104, 261–304.
- Oke, T.R., 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108, 1–24.
- Pongrácz, R., Bartholy, J. and Dezső, Zs., 2006: Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis. *Advances in Space Research* 37, 2191–2196.
- Skamarock, W.C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W. and Powers, J. G., 2008: A description of the advanced research WRF Version 3. *NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR*. doi:10.5065/D68S4MVH.
- Zhang, N., Gao, Z. and Wang, X., 2010: Modeling the impact of urbanization on the local and regional climate in Yangtze River Delta, China. *Theor. Appl. Climatol.* 102, 331–345.