

# NYILATKOZAT

Név: VÖRÖS ERIK

ELTE Természettudományi Kar, szak: FÖLDTUDOMÁNYI

NEPTUN azonosító: ASYPET

Szakedolgozat címe: BUDAPEST VÁROSI HŐSZIGET MODELLEZÉSE  
KÜLÖNBÖZŐ FELSZÍNHASZNÁLATI ADATBÁZISOKKAL

A szakdolgozat szerzőjeként fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy a dolgozatom önálló szellemi alkotásom, abban a hivatkozások és idézések standard szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Budapest, 2023. 05. 28.

Vörös Erik

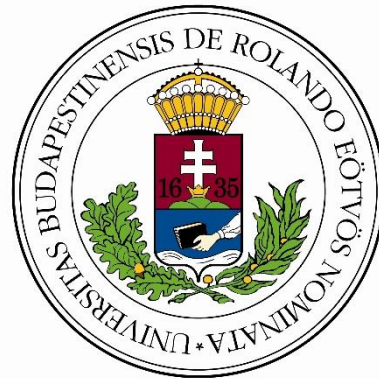
---

a hallgató aláírása

Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Földrajz- és Földtudományi Intézet  
Meteorológiai Tanszék

# **Budapest városi hősziget modellezése különböző felszínhasználati adatbázisokkal**

SZAKDOLGOZAT



Készítette:

**Vörös Erik**

Földtudományi alapszak  
Meteorológiai specializáció

Témavezető:

**dr. Breuer Hajnalka**

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2023

## Tartalomjegyzék

|  |    |
|--|----|
| 1. Bevezetés .....   | 3  |
| 2. Irodalmi áttekintés .....   | 5  |
| 2.1. Budapesti urbanizáció .....   | 5  |
| 2.2. A városi hősziget.....  | 6  |
| 2.2.1. A városi hősziget keletkezése.....                                | 6  |
| 2.2.2. A városi hősziget napi menete.....                                | 7  |
| 2.2.3. Budapesti városi hősziget.....                                    | 8  |
| 2.2.4. Az UHI egészségre gyakorolt hatása.....                           | 9  |
| 2.3. Regionális modellezés.....  | 10 |
| 2.4. A WRF modell .....  | 12 |
| 2.5. A városi hősziget modellezése korlátos tartományú modellekkel ..... | 13 |
| 3. Modell beállítások és adatok .....                                    | 17 |
| 3.1. A WRF modell általános tulajdonságai.....                           | 17 |
| 3.2. Alkalmazott parametrizációk .....                                   | 17 |
| 3.3. Alkalmazott városi parametrizációk .....                            | 19 |
| 3.4. Szimulációk beállítása.....   | 21 |
| 3.5. Kezdeti- és peremfeltételek.....                                    | 24 |
| 3.6. A vizsgált időszak időjárása.....                                   | 24 |
| 4. Eredmények.....   | 25 |
| 4.1. A városi hősziget intenzitás napi menete .....                      | 25 |
| 4.2. A városi hősziget intenzitás térbeli eloszlása.....                 | 28 |
| 5. Összefoglalás .....   | 33 |
| Köszönetnyilvánítás.....   | 34 |
| Irodalomjegyzék .....  | 35 |

## 1. Bevezetés

Az emberiség a megjelenése óta mindig is kolóniákban, közösségekben szeretett élni. A történelem egyes szakaszait vizsgálva, a legfejlettebb államokban alakultak ki városok, mint például az ókori nagy városállamok, a Római Birodalom nagy városai, középkorban a németalföldi városok (*Ritchie & Roser, 2018*). A legnagyobb változást mégis azonban az ipari forradalom hozta el a 18–19. században. Az egykori jobbágyok felszabadulása, az ipar szektorába történő munkába állásuk is hozzájárult ahhoz a gyors urbanizációhoz, ami ezt az időszakot jellemzi. Az urbanizációt tehát úgy definiálhatjuk, hogy a városok és a városi lakosság növekedése (*Novák, 2020*).

ENSZ adatok szerint az 1950-es években a Föld lakossága még csak 2,5 milliárd volt, és az utóbbi 70 évben robbanásszerű növekedés lépett fel, 2022-ben meghaladta már a 8 milliárdot is. Ez a nagymértékű növekedés a városok számában és azok lélekszámaiban nyilvánul meg leginkább. Fokozatosan jelentek meg a nagyobbánál nagyobb városok, nőtt a metropoliszok és a nagy urbanizációs agglomerációval rendelkező megapoliszok száma (*Csomós & Kulcsár, 2011*). Az utóbbi 70 év urbanizációját tekintve látható, hogy a városi lakosság 4,2 milliárd felé emelkedett, ami azt is jelenti, hogy jelenleg többen élnek városi, mint vidéki területeken. Európában ez az urbanizációs arány 74%, főleg a fejlettebb nyugati országokban mutat ma is növekvő tendenciát (*Burger et al., 2020*).

Az urbanizáció elengedhetetlen követelménye tehát, hogy a városok klímáját megértsük, a jövőbeli klímaváltozást szimuláljuk a városokra, és erre a változásra megfelelő választ tudjunk adni, melyek segíthetnek az esetleges melegek ellen a városi területeken (*Chen et al., 2011*). A városok klímáját nem globálisan, hanem helyi szemmel kell figyelni, hiszen mindegyik település, a közös klimatológiai tulajdonságok mellett, sajátos éghajlati tulajdonságokkal rendelkezik (*Doherty et al., 2016*). A vidéki területekhez képest a városi környezetek egy egyedi mikroklímával rendelkeznek, mely nagyrészt eltérő felszínborításnak köszönhetően alakul ki. Egy városi felszínen kevesebb a zöld felület, ami magába tudná a lehullott csapadékot szívni, így jelentősebbek a felszíni lefolyások a városokban. A több aszfalt borítás, a magas házak pedig befolyásolják az energiamérleget, aminek a következménye lesz az úgynevezett városi hősziget (*Gill et al., 2007*).

Jelenlegi szakdolgozatom célja egyrészt a különböző városi parametrizációk közötti különbségeket és az eltérő felszínborítottsági adatbázisokból adódó eltérések vizsgálata. Másrészt, hogy ezek hogyan befolyásolják a városi területeken kialakuló városi hősziget intenzitását. Munkám Budapest városi hőszigetére fókuszál, melyet egy hóhullámos napon, 1 km-es felbontással, a WRF modellel vizsgáltam.

A szakdolgozatomat az irodalmi áttekintéssel kezdem, melyben részletezem a városi hősziget tulajdonságait és a különböző tanulmányokban készített vizsgálatokat tekintetem át. Ezt követően a harmadik fejezetben részletezem a felhasznált parametrizációkat, az alkalmazott városi parametrizációkat és a két különböző felszínborítottságot. Majd a szimulációk beállításaira, kezdeti- és peremfeltételekre térek ki. Végül az utolsó fejezetben az eredmények kiértékelésére kerül sor.

## 2. Irodalmi áttekintés

Az irodalmi áttekintésemet három főbb részre bontottam. Először röviden kitérek arra, hogy miként alakult a budapesti urbanizáció a szocialista berendezkedéstől napjainkig, és hogy milyen eltéréseket mutat a nyugat-európai városok urbanizációjához képest. Ezt követően a következő témám a városi hősziget. Részletezem a hősziget tulajdonságait, az intenzitásának napi menetét, kialakulásának feltételit, illetve a hősziget emberi egészségre gyakorolt hatását. Külön kitérek a budapesti városi hősziget jellemzőire, korábbi vizsgálataira. Harmadik témám a regionális modellezés, amelyen belül a szimulációm során felhasznált WRF modellről is írok, valamint a különböző kutatási eredményekről a városi hősziget modellezését illetően.

### 2.1. Budapesti urbanizáció

Budapest Magyarország fővárosa címén kívül további számos jelzőt birtokolhat. Az ország közlekedési csomópontja, közigazgatási, gazdasági és kulturális központja. Az országba beáramló tőke fele érkezik ide, emellett az előállított GDP több mint 30%-a tartozik a városhoz. A legtöbb nemzeti intézmény és számos nemzetközi cég leányvállalatának székhelyéül is szolgál (Egyedi *et al.*, 2017). Fontos azonban megállapítani, hogy az egykori szocialista berendezkedés miatt másképp alakult az urbanizáció menete. Kijelenthető, hogy a közép-kelet-európai és a kelet-európai városok sokkal sűrűbbek, annak köszönhetően, hogy a városok szélein a nehézipar felemelésének érdekében ipari területeket és több emeletes társasházakból álló lakóparkokat létesítettek (Hirt, 2013). Kovács *et al.* (2019) tanulmányának célja az volt, hogy megvizsgálják Budapest nagyváros térségében (mintegy 6077 km<sup>2</sup>-en, az ország lakosságának körülbelül a 30%-át jelentő területében) a földterületek megváltozásának arányát a szuburbanizáció következtében. Megállapították, hogy már az 1950-es években jelentkezett a városi terjeszkedés, de számottevően csak a rendszerváltás után vette kezdetét. Ebben az időszakban ugyanis a piacgazdaságra való átállás velejárója volt a privatizáció, így az eddigi termőterületek magánkézbe adása után már nem mezőgazdasági területként működtek tovább. A rendszerváltás egy nagymértékű dezindustrializációt eredményezett, megindult az ingatlanpiac, a lakossági és kereskedelmi terjeszkedés. 1990 és 2012 között ennek eredményeképp az urbanizált területek aránya hozzávetőleg 24,5%-kal emelkedett. A KSH által 2022-ben végzett

népszámlálás előzetes adatai szerint, Budapest jelenlegi lakossága valamivel meghaladja az 1,6 millió főt, azonban az elmúlt 10 évben egy 2,7%-os visszaesés tapasztalható a 2011-es adatokhoz képest [1 – KSH, 2022].

## **2.2. A városi hősziget**

Minden egyes település kialakítja azt a sajátos klímáját, mely eltérő a környezethez képest, és még a városon belül is létrejönnek különbségek, lásd a városok szerkezeti felépítése, építési fajták, városi zöldterületek aránya, kialakított légcatornák miatt (*van Eimern & Häckel*, 1984). A városi területek az eltérő felszíneknek köszönhetően módosított energia- és vízháztartással rendelkeznek a vidéki területekhez képest. Ennek következtében alakulnak ki olyan meteorológiai jelenségek, mint például a városi hősziget, amelyek csak a városokra jellemzőek (*Gill et al.*, 2007).

A város azon hőmérsékleti tulajdonságát nevezzük városi hőszigetnek (UHI – Urban Heat Island), ami a levegőhőmérséklet különbsége a városi és a vidéki terület között. Anticiklonális helyzetekben éjszaka a leginkább számottevő ez a jelenség (*Shastri & Ghosh*, 2019; *Masson et al.*, 2020). E légköri hősziget a levegő felmelegedését mutatja meg tehát, melyeket leginkább in situ, vagyis közvetlen mérésekkel vizsgáljuk. Ezzel szemben a felszíni városi hősziget (SUHI – Surface Urban Heat Island) a földfelszín melegedését detektálja, valamint távérzékelési módszereket alkalmazunk a méréséhez, például infravörös műholdas méréseket (*Sobrino et al.*, 2012).

A városi hőszigetet *Peng et al.* (2012) kettő csoportra bontja a hősziget kialakulásának módja és magasságuk szerint. Ennek megfelelően létezik légköri és felszíni városi hősziget. *Yuan & Bauer* (2007) a légköri hőszigetet még további kettő típusra osztja fel. Az egyik a tetőszintű hősziget (CLHI – Canopy Layer Heat Island), mely a földfelszíntől a tetőmagasságig terjed, a másik a fölötté lévő, határréteg hősziget (BLHI - Boundary Layer Heat Island).

### **2.2.1. A városi hősziget keletkezése**

A Föld szférái, vagyis a légkör, a geoszféra, hidroszféra, bioszféra, egymással kölcsönhatásban állnak. A növekvő városi területek mesterséges felszínei ezeket a kölcsönhatásokat módosítják (*Agarwal & Tandom*, 2010). A városi módosult felszín hozta magával az ökológiai és környezeti változásokat. Az eltérő felszínnek mind-mind másképp viselkednek hőelnyelés, hőtárolás terén. Többek között a puszta és az építési

területek járulnak legnagyobb mértékben az UHI-hoz, míg a természetes LULC (Land Use/Land Cover) típusok, azaz a felszínhasználat/felszínborítottság, az erdők és a vizek gyengítik az UHI intenzitását (*Li et al.*, 2017). A mesterséges felszínek szerkezetileg eltérnek a természetes talajokétól, hiszen ezek tömörítettek, vízhatlanok, a csapadékot elvezetik, amelyből következik az a tulajdonság, hogy nagyobb a hőelnyelő és a hőmegtartó képessége (*Landsberg*, 1981). Alapvetően a városi hőszigetre, mint helyi, lokális problémára kell tekinteni, azonban vannak olyan helyek a Földön, ahol kimondottan előnyösnek számít, ilyenek például a magasabb szélességi körökön fekvő települések, ahol a városi hősziget téli melegítő hatása kimondottan pozitív hatást gyakorol (*Gartland*, 2012).

Az antropogén tevékenységeknek köszönhetően szabadul fel hő, melynek a mennyisége a városi környezetben magasabb. Az antropogén hőkibocsátás például az angliai városokban átlagosan 1–3 °C-os emelkedéshez vezet. Az antropogén fűtés a téli időszakban a legjelentősebb, és nem elhanyagolható a városi klímák meghatározásakor sem. Az antropogén hőkibocsátás mellett a városi épületek, amik a beérkező rövid hullámú sugárzást elnyelik és növelik a hosszuhullámú visszasugárzást. E kettő együtt hatása erőteljesen növeli a hőmérsékletet a városi területeken. (*Smith et al.*, 2009; *Rizwan et al.*, 2008).

### **2.2.2. A városi hősziget napi menete**

Az UHI mértékét az UHII (Urban Heat Island Intensity<sup>1</sup>) segítségével tudjuk megadni. Ehhez veszünk egy pontot a városban és egy pontot a városon kívül, és a kettő különbségével tudjuk meghatározni az intenzitás mértékét (*Memon et al.*, 2009). Az intenzitás mértékét meghatározza a város földrajzi elhelyezkedése, a szerkezete, az évszak és éghajlati jellemzők és aktuális időjárási körülmények. A város és a környezet között kialakuló energiaegyensúly és stabilitási különbségek miatt, eltérő felmelegedés és lehűlés jellemző, melynek következtében az intenzitás egy napi menetet mutat (*Oke*, 1982).

A környezet napnyugta után erős hűlésbe kezd, amiatt, hogy a felszínre nem érkezik már rövid hullámú sugárzás. Ez a nagy lehűlés az éjszaka folyamán aztán a lecsökkent felületi hőmérséklet és a sugárzási emisszióknak köszönhetően mérséklődik. A városokban

---

<sup>1</sup> Urban Heat Island Intensity - Városi Hősziget Intenzitás



kisebb mértékű délutáni és esti lehűlés a mesterséges felszínnek, épületek révén. Emiatt a hajnali minimum hőmérsékletek a városokban nem süllyednek le annyira. A reggeli órákban, napfelkeltét követően a város lassabban melegszik fel a környezethez képest. A maximum hőmérsékletet a város kb. kettő órával később éri el, mint a környezet. A naplemente utáni órákban a környezet sokkal nagyobb mértékű lehűlést mutat, mint a város, így a naplemente utáni kettő-három órában lesz a legnagyobb a hőmérséklet különbség. A városi hőmérséklet az éjszaka folyamán egyenletesen csökken, napfelkeltekor erősödik. Összességében tehát a környezet hőmérséklete nagyobb napi ingadozást mutat a városhoz képest. Az UHI intenzitása ennek megfelelően a naplementét követő négy-öt órában a legnagyobb (Oke, 1982; Unger et al., 2012).

### **2.2.3. Budapesti városi hősziget**

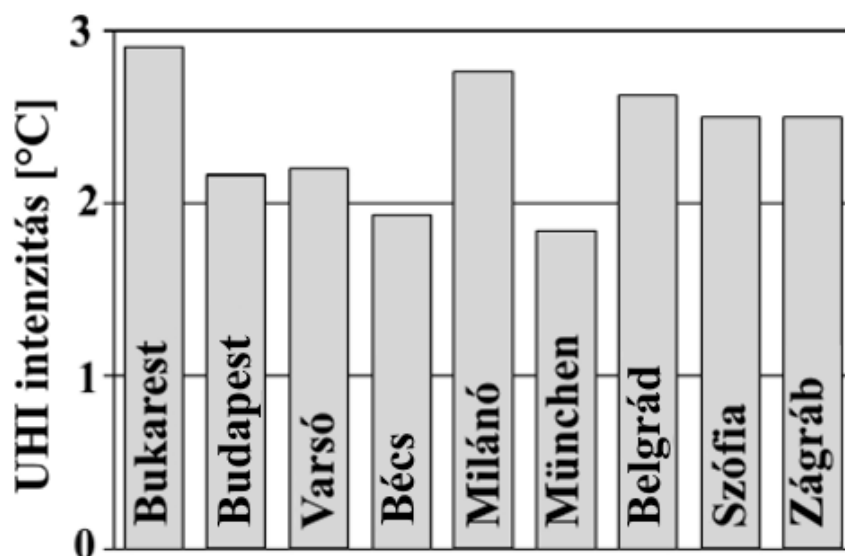
Mint minden város így Budapest is kialakítja a maga sajátos éghajlatát. A budapesti városi hősziget feltérképezésével, vizsgálatával az ELTE Meteorológia Tanszéken foglalkoznak. Ennek köszönhetően számos tanulmány készült a fővárosi UHI-t illetően (Pongrácz et al., 2010; Pongrácz et al., 2006; Dian et al., 2019).

Pongrácz et al (2010) hároméves idősorra tanulmányozták a Terra műhold MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer<sup>2</sup>) érzékelő segítségével, mely a látható tartományban 250m/pixel és az infravörös tartományban 1 km/pixel arányban látja a Földet, 9 közép-európai városra, köztük Budapestre is az UHI intenzitását. A felszíntípus meghatározására, hogy el tudják különíteni a városi és a vidéki területeket a MODIS LCP-t (Land Cover Product<sup>3</sup>) alkalmazták, mely a közepes felbontású MODIS érzékelőből készített talajborítási produktum (Hu et al., 2015), 17 különböző felszíntípussal. Az eredmények azt mutatták, hogy minden város legmelegebb pontja egyértelműen a belvárosok voltak. A legnagyobb UHI intenzitás nyáron fordul elő, értéke 4–6 °C. Budapest esetében a város körüli dombokon lévő erdőkből a talajhőmérséklet alacsony, míg a belváros öreg épületei nyáron nagyon fel tudnak melegedni, így a legmelegebb és a leghidegebb pont közti különbség elérheti a 10 °C-t is.

---

<sup>2</sup> Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer – Közepes Felbontású Képkalkoló Spektrométer

<sup>3</sup> Land Cover Product – Felszínborítási Termék



1. ábra: Hároméves időszor éves átlagos éjszakai városi hősziget intenzitásra a vizsgált városokra (Pongrácz et al., 2010).

További vizsgálatokat készített *Dezső et al.* (2012) a későbbiekben az állomási adatok és a Terra és az Aqua műholdak MODIS érzékelőjével készített adatok között a magyar fővárosra, tízéves időintervallumra. Az állomási adatok alapján a teljes időszorra az UHI intenzitás érték nappali átlaga 0,6 °C. Ezzel szemben a műholdas adatok alapján az intenzitás a teljes időszorra 1,6°C volt. Egyes években előfordultak negatív értékek is a műholdas adatok során, ami azt jelenti, hogy a környék gyorsabban melegedett fel, mint a városi rész.

Budapest IX. kerületében, egy élhetőbb város érdekében lezajló városfejlesztésre került sor, számos új zöldterülettel, felújított régi tömbházakkal. Ennek köszönhetően készült in situ mérésekkel egy UHI intenzitás vizsgálat. *Dian et al.* (2019) ebben a kerületben egy 22 mérési pontból álló kijelölt útvonalon végeztek hőmérséklet- és nedvességméréseket Voltcraft HT-200 mérőeszközzel. Az egyik mérési nap egy hőhullámos, anticiklonális napra esett. A legmelegebb pontja a Boráros tér volt aznap, mely rendkívül nagy forgalmi csomópont. Az UHI intenzitást a pestszentlőrinci állomáshoz viszonyítva nézték. A délután folyamán ez az intenzitás meghaladta a 4 °C-ot is.

#### 2.2.4. Az UHI egészségre gyakorolt hatása

A növekvő urbanizációnak köszönhetően fokozatosan egyre szélesebb körben terjed ki az UHI hatása. A klímaváltozás velejárója lesz a jövőben, hogy a városokban kialakult hősziget intenzitása növekedni fog, így hőhullámokat felerősítik, melynek

köszönhetően növekszik a hőhullámos napok és a forró napok száma (*Tan et al.*, 2010). Magyarországon a hőhullámos napot három további fokra tudjuk osztani: elsőfokú hőhullám, amikor a napi átlaghőmérséklet legalább 25 °C fok egy napon, másodfokú hőhullámról két esetben beszélhetünk, ha a napi átlaghőmérséklet 3 nap folyamán is legalább 25 °C, vagy, ha az adott napon a napi átlaghőmérséklet 27 °C vagy annál több, harmadfokú hőhullámról abban az esetben van szó, ha három napon keresztül a napi átlaghőmérséklet minimum 27 °C. Forró napot úgy definiálhatjuk hazánkban, hogy a napi maximum hőmérséklet meghaladja a 35 °C-t [2 – met.hu].

Kifejezetten veszélyes az emberi egészségre a hőhullámos napokon az UHI egy városban, hiszen éjszaka a vidéki hűvösebb levegő nem tud beáramlani a városokba. Ennek következtében is nőhet a halálozások száma (*Tan et al.*, 2010). Az épületek hőtartó képessége miatt nappal és éjszaka folyamán is nagymértékű hőtermelésnek vannak kitéve a városlakók. Egyértelműen kijelenthető, hogy a hőstressz főleg a szív- és érrendszeri betegek, légzőszervi, illetve agyi érrendszer elégtelenségekkel küzdő betegek halálát okozza, de emellett jelentős hatással van a mentális betegségek kialakulására is. Az UHI kb. 40%-kal járul hozzá egy átlagos európai városban hőhullám idején a halálozásokhoz (*Piercha & Chaudhary*, 2022).

A 2003-as szinte egész Európára kiterjedő hőhullámok után számos tanulmány készült az egyes országok halálozási számok alakulásáról. Sorban dőltek meg a melegrekordok az országokban, ezzel párhuzamot mutatott a halálozások száma is. Franciaországban mintegy 14000 fős többlethalálozást detektáltak, Olaszországban a három nyári hónapban 3134 fővel emelkedett az előző évhez képest a halálozások száma. Legnagyobb mértékben az idősebb korosztályt (75 év felettieket főként) érintette (*Conti et al.*, 2005)

### **2.3. Regionális modellezés**

Az éghajlat modellezése az idő előrehaladtával egyre fontosabbá vált az éghajlatváltozás megértésének és az előrejelzések pontosságának szempontjából. A mai meteorológiában elengedhetetlen lett a modellek használata, hiszen ez az egy lehetőség van a légkörben lejárló összetett folyamatok, különböző visszacsatolások és kölcsönhatások leírására (*Faragó*, 1981). Olyan modell, mely tökéletesen visszaadja a légkörben zajló folyamatokat a nagy összetettség és az instabilitás miatt nem létezik (*Schneider & Dickinson*, 1974). Többféle modell áll rendelkezésünkre: légköri modellek,

áramlástanai modellek, illetve terjedési vagy ökológiai modellek. A légkörben lezajló jelenségek, folyamatok eltérő méretskálán mozognak, így annak érdekében, hogy mit szeretnénk modellezni tudjuk csoportosítani a légköri modelleket. Egyrészt megkülönböztetünk globális (GCM – Global Climate Model) és korlátos tartományú, vagy másnéven regionális (RCM – Regional Climate Model) klímamodelleket (*André et al.*, 2013).

A regionális klímamodellek alkalmazhatók beágyazva egy globális modellben, vagy egy globális modellből kaphatják meg a kezdeti feltételeket, melyre igen érzékeny lesz a modell eredménye (*Giorgi & Bi*, 2000). A korlátos tartományú modellek a helyi és regionális éghajlat meghatározásnál megoldást jelentenek a globális modellek nagy térbeli felbontása miatt fellépő nagy számítási igényre, annak köszönhetően, hogy a regionális modelleket alkalmazhatjuk nagy térbeli felbontással viszonylag kis számítási igény mellett (*Rummukainen*, 2010). A klímamodellekhez hasonlóan időjárási modelleket is alkalmaznak kisebb tartományokra. A korlátos tartományú időjárási modelleket általában 1–5 km-es térbeli felbontással alkalmazzák. Számtalan időjárási jelenség van, amelyek egyrészt szerkezeti változást mutatnak attól függően, hogy hogyan változik a szárazföld-tenger felszínének vagy a domborzat változásra, másrészt időben rövid lefutású, markáns, térben gyorsan változó meteorológiai folyamatok, jelenségek. Ezekről pedig információra van szükség, a megfelelő előrejelzéshez, illetve a jövőbeli alakulásuk vizsgálatához (*Rummukainen*, 2016). Ilyen korlátos tartományú modell például a WRF (Weather Research and Forecasting Model<sup>4</sup>), ALADIN (Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International<sup>5</sup>).

A korlátos tartományú időjárási és éghajlati modelleket az OMSZ (OMSZ – Országos Meteorológiai Szolgálat) is széles körben alkalmazza. Elsősorban a rövid távú előrejelzések készítésére, ezalatt érteendő a veszélyjelzés, a tavi viharjelzés, a repülés, a közlekedés, a hidrológia területe. Az OMSZ Siófoki Observatóriumában található szuperszámítógépen futtatja például a WRF korlátos tartományú, nemhidrosztatikus modellt, melyet a felsorolt alkalmazási területek közül főként a veszélyjelzésre és a tavi viharjelzésre használnak. Mindezek mellett alkalmazzák kutatási célokra, különböző hatástanulmányok készítéséhez, lásd például egy új gyár építése esetén, milyen módosító

---

<sup>4</sup> Weather Research and Forecasting Model – Időjárás Kutató és Előrejelző Modell

<sup>5</sup> Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International – Nemzetközi Fejlesztésű Korlátos Tartományú Dinamikus modell Adaptáció

hatások lépnek fel, illetve oktatás céljából is [3 – met.hu]. Az egyik ilyen alkalmazott modell az ALADIN, melyet az ALADIN projekt együttműködés keretében futtat és fejleszt az OMSZ [4 – met.hu]. Az ALADIN egy korlátos tartományú, nemhidrosztatikus modell. Az európai meteorológiai szolgálatok által egyik legtöbbször alkalmazott modell a rövidtávú előrejelzésben, köszönhetően a kisebb számítási igényének és nagy hatékonyságának. A népszerűsége révén vette kezdetét annak a vizsgálata, hogy alkalmazható-e klímakutatás céljából. A 2000-es évek elején az elindított kísérletek bizonyították, hogy alkalmas a hosszútávú integrációra is. Az ALADIN egy spektrális modell, ami dupla Fourier-együtthatót használ, ellentétben a legtöbb korlátos tartományú modellel (*Farda et al.*, 2010). A 16 tagintézmény az együttműködésben számos konfigurációt készített az időjárás-előrejelzéshez, melyeket ALADIN kanonikus modellkonfigurációknak (CMCs - Canonical Model Configurations) nevezünk. Három ilyen modell van: maga az alap ALADIN, az AROME (Applications of Research to Operations at Mesoscale<sup>6</sup>) CMC és az ALARO (Aire Limitee Adaptation/Application de la Recherche a l'Operationnel<sup>7</sup>) CMC (*Termonia et al.*, 2018). Az AROME egy nemhidrosztatikus modell, Euler-egyenleteken és ugyanazon a magon alapszik, mint az ALADIN (*Bengtsson et al.*, 2017).

## 2.4. A WRF modell

A Weather Research & Forecasting Model (WRF) egy numerikus előrejelző-rendszer, amelynek a fejlesztése az 1990-es évek folyamán vette kezdetét a National Center for Atmospheric Research<sup>8</sup>(NCAR), a U.S. Air Force<sup>9</sup>, a Naval Research Laboratory<sup>10</sup>, a University of Oklahoma<sup>11</sup>, a Federal Aviation Administration<sup>12</sup>(FAA) és a National Oceanic and Atmospheric Administration<sup>13</sup> (NOAA) együttműködésének köszönhetően (*Powers et al.*, 2017). Számos olyan tulajdonsággal rendelkezik a modell, ami miatt napjainkra az egyik legfrekvenciáltabb légköri modellé vált, hiszen alkalmazható mind az operatív időjárás előrejelzésre, mind légköri kutatásokra egyaránt.

---

<sup>6</sup> Applications of Research to Operations at Mesoscale – Kutatási Alkalmazások Mezoskálájú Műveletekhez

<sup>7</sup> Aire Limitee Adaption/Application de la Recherche a l'Operationnel – Korlátozott Területű Kutatások Adaptációja/Alkalmazása Műveletekhez

<sup>8</sup> National Center for Atmospheric Research – Nemzeti Légkör Kutató Intézet

<sup>9</sup> U.S. Air Force – Amerikai Egyesült Államok Légereje

<sup>10</sup> Naval Research Laboratory - Haditengerészeti Radiológiai Védelmi Laboratórium

<sup>11</sup> University of Oklahoma – Oklahamai Egyetem

<sup>12</sup> Federal Aviation Administration – Szövetségi Légügyi Hatóság

<sup>13</sup> National Oceanic and Atmospheric Administration – Nemzeti Óceáni- és Légkörkutató Hivatal

Emellett a modell egy nyíltforráskódú, szabadon használható szoftver, és futtatható az egyszerűbb egymagos gépektől a több magos szuperszámítógépekig (*Riechert & Meyer, 2019*).

A 2000-es évektől a WRF modellnél már kétféle magváltozat van, egyik a WRF-ARW (Advanced Research<sup>14</sup>), a másik a WRF-NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model<sup>15</sup>). A WRF-ARW felhasználható levegőminőség modellezésre, légkör és óceán között lezajló folyamatok vizsgálatára, regionális klíma vizsgálatokra, időjárás előrejelzésre, illetve különböző skálájú légköri folyamatok megfigyelésére, tanulmányozására (*Powers et al., 2017*).

A WRF modell működésének folyamata során először adatokra van szükség. A regionális modellek a nagyobb hatékonyság érdekében általában egy globális modellbe beágyazva alkalmazandók. A kezdeti feltételek egy részét adatasszimiliációval végezhetjük el, amiket kombinálhatunk a megfigyelési adatokkal (*Short & Petch, 2022*). A beérkező információk bekerülnek az úgynevezett WPS-be, az előfeldolgozóba. Az itt lezajló folyamat első programja a „geogrid”, ez fogja meghatározni a modellünk tartományát. A következő az „ungrib” program, a bemenő adatokat kezeli, dekódolja. Az utolsó lépcsőfok a „metgrid” nevezetű program, amely az adatokat fogja interpolálni a modellünk tartományába (*Skamarock et al., 2019*). A WPS-ből megkapjuk a NetCDF típusú fájlt, mely a „real.exe” programba kerül, hogy interpolálja a kezdeti- és peremfeltételeket a modell magassági szintjeire. Majd ezt követően a numerikus integrálás következik, amit a wrf.exe végez (*Davidovic & Skala, 2010*).

## **2.5. A városi hősziget modellezése korlátos tartományú modellekkel**

A városi hősziget megfigyelése, detektálása már az 1830-as évek során kezdetét vette, ugyanis Luke Howard készített olyan feljegyzéseket londoni és annak környéki területein végbevitt mérései alapján, amelyből már látható volt, hogy a városi terület melegebb volt a külterületnél. A modern városi klíma kutatások legnagyobb hangsúlya a városi hősziget megfigyelése (*Stewart, 2011*). A városi hősziget vizsgálatára az egyik leghatékonyabb lehetőség a modellezés. Elsődleges feladat az lenne, hogy egy olyan modellt lehessen alkalmazni, ami regionális skálától alkalmazható az épületek és az utcák

---

<sup>14</sup> WRF Advanced Research – Fejlett Kutatási WRF modell

<sup>15</sup> Nonhydrostatic Mesoscale Model – Nem-hidrosztatikus Mezokálájú Modell

szintjéig. A WRF modell lehet a legkézenfekvőbb, hiszen korlátos tartományú modellről lévén szó, sokszor alkalmazzák 0,5–1 km-es rácsávolsággal. A városi területek modellezésénél egyik legfontosabb feladata a WRF modellnek, hogy a városok hatását az egyes meteorológiai állapotváltozókra (szél, hőmérséklet, nedvesség) minél jobban közelítse (*Chen et al.*, 2011).

A világ számos pontján készítenek tanulmányokat a WRF modell felhasználásával a városklímáról és a városi hőszigetéről. Kína ezek közül az egyik legkiemelkedőbb, ahol a nagyvárosokban városklímái megfigyelő hálózatot építettek ki, többléptékű városmeteorológiai- és levegőminőség-előrejelző numerikus modelleket alkottak meg, valamint több vizsgálatot végeztek a városi hőszigetet befolyásoló tényezőkre (*Miao et al.*, 2020). 2018-ban megalapították a pekingi Városi Meteorológiai Intézetet (IUM – Institute of Urban Meteorology) [5 – en.iium.cn]. IUM feladata, hogy Pekingre és térségére készítsen operatív időjárás előrejelzést a WRF modell segítségével. A 2008-ban Pekingben megrendezett nyári Olimpiai játékok alkalmával nagyon finom numerikus előrejelző rendszerre volt szükség. A modell teljesítményének a növelése érdekében egy háromszorosan beágyazott (27/9/3 km), három óránként frissülő ciklusú rendszert hoztak létre, a WRF Var-t (*Fan et al.*, 2008). Azonban az urbanizált területeken nehézségekbe ütköztek a hőmérséklet- és szélprofilok előrejelzésénél. A modellek torzításának okára és azok megoldási javaslatára készített átfogó tanulmányt *Barlage et al.* (2016), Peking és Tiencsin területére, ami Kína egyik legnagyobb urbanizációval rendelkező vidéke.

További vizsgálatok készültek azonban a városi hősziget intenzitást illetően is. *Chen et al.* (2014) készítettek tanulmányt Hangzhou városában lezajló hosszabb hőhullámos időszakokra. Egyik fő céljuk volt bebizonyítani, hogy egy városi tetőszintmodellel kiegészített WRF modell 1 km-es felbontással alkalmas a naprakész felszíni adatokkal a városi hőmérsékleteket. A vizsgálataikhoz a két méteren mért hőmérsékletből származtatott UHII-t nézték, illetve ezeket a hőmérsékleti adatokat hasonlították össze a sűrűn kiépített meteorológiai állomások mérési adataival. Az eredményeik azt mutatták, hogy átlagosan a belvárosi területek mintegy 0,74 °C-kal volt melegebb, UHII maximum értéke 1,6 °C-t érte el 19 LST-kor (Local Sidereal Time<sup>16</sup>). A

---

<sup>16</sup> Local Sidereal Time – Helyi sziderikus idő

felszíni energia egyenlet vizsgálatával támasztották alá UHI jelenlétét, ugyanis a városnak nappal nagyobb a hőtároló képessége, majd este ez a hőtöbblet szabadul fel.

Nemcsak Kínában zajlanak UHI modellezések, Európa városaira is több vizsgálatot végeztek. Berlinre *Li et al.* (2019) egy újfajta módszert alkalmaztak, ahol is a WRF modell egy UCM-mel (UCM – Urban Canopy Model<sup>17</sup>) kiegészített, de jelen esetben a WRF rácsokban át nem eresztő felülettel, a szimulált két méteres hőmérséklet egy illesztett lineáris függvényen alapul. A szimulációik eredményei azonosulnak a megfigyeltével, éjszakai erős UHI intenzitás tapasztalható. A magas éjszakai értékeket az át nem eresztő felszínek és a természetes felszínek között végbemenő hőáramnak tulajdonítják. *Giannaros et al.* (2018) hasonlóan támasztották alá az UHI kialakulásának okát. Athénra készítettek szimulációkat három hőhullámos napot vizsgálva a WRF modell egyrétegű városi tetőszintmodellt alkalmazva. Érzékenység vizsgálataikkal megerősítették, hogy a városi területek paramétereit, a felszíni albedó és a kialakított utcakanyonok alakítják a UHI intenzitását. Stuttgart Németország egyik legjobban felszerelt klimatológiai mérőhálózattal rendelkező város, számos városklimatológiai vizsgálat készült a városról (*Fallmann et al.*, 2013). *Fallmann et al.* (2013) egy egyhetes nyári hőhullámos időszakra készítettek tanulmányt, a WRF modellel, annak érdekében, hogy a különböző várostervezési stratégiák során hogyan alakul a stuttgarti hősziget intenzitása. 1 km-es felbontással, egyrétegű városi tetőszintmodellel, illetve többretegűvel is készítettek szimulációkat USGS (United States Geological Survey<sup>18</sup>) felszínhasználattal, melynek a 24 alapvető felszín típusát módosították a CORINE (Coordination of Information on the Environment<sup>19</sup>) 33 típusának megfelelően úgy, hogy a városnak számító cellákat további három különböző csoportra különítették el. Az eredményeik azt mutatták, hogy a megfigyelt potenciális hőmérsékletnél a többretegű modell jobban visszaadta a magasabb hőmérsékleteket az egyrétegűhöz képest, illetve a többretegű mutatta a legnagyobb korrelációt is. Az érzékenység vizsgálataikból arra következtettek, hogy arra az adott térségre tehát a többretegű modell alkalmasabb a különböző forgatókönyvek szimulálására.

Hazánkban *Göndöcs et al.* (2017) Budapestre végeztek felszíni hősziget intenzitás modellezést a WRF modellel egy egyhetes időintervallumra. A vizsgálat során eltérő

---

<sup>17</sup> Urban Canopy Model – Városi Tetőszint-modell

<sup>18</sup> United States Geological Survey – Amerikai Egyesült Államok Geológiai Intézet

<sup>19</sup> Coordination of Information on the Environment – Európai Környezetvédelmi Ügynökség



földfelszínhasználati adatbázissal készítették szimulációkat, melyek az OSM (Open Street Map), az USGS és MODIS adatbázist jelenti. Az OSM Budapestre vonatkozóan 43 különböző felszíntípust különít el, és ezt kategorizálták át a Noah földhasználati kategóriáival együtt. A városfelületeket öt kategóriába sorolták: kis és nagy laskosságú terület, kereskedelmi/ipari, várost körülvevő zöldterület és repülőtér. Az eredmények azt mutatták, hogy a különböző felszínhasználatok közül az OSM mutatta a legjobb egyezéseket a mérési adatok összehasonlításával, viszont a vidéki területeken esetenként túlbecsült, emiatt kisebb felszíni hősziget intenzitás volt tapasztalható. A három felszínhasználat közül az USGS szolgáltatta a legnagyobb eltéréseket és a legnagyobb torzításokat. A városi szerkezetet az OSM jól megfogta, meleg középponttal, kifelé csökkenő hőmérséklettel. A MODIS és az USGS használat során hasonló átlagos felszín hőmérsékletek jelentkeztek a városban (21–22 °C) és a városon kívül is (16–18 °C). A 2 méteren mért hőmérsékletből származtatott UHI intenzitás a MODIS esetében volt a legmelegebb (2,18 °C), míg az OSM produkálta a legalacsonyabb értékeket (1,59 °C).

*Molnár et al.* (2019) tanulmányában a WRF-ben használható LCZ (Local Climate Zone<sup>20</sup>) városi osztályozásrendszert hozták létre Szeged városára. Az LCZ 10 különböző városi és 7 nem-városi LULC felszíntípust különböztet meg, a CORINE- nál szemben a városi területek beépítettségét a városi tetőszint hőmérséklete alapján osztályozza. A szimulációik SLUCM-mel készültek, egy hóhullámos időszakra, mely során a felszíni levegőhőmérsékletet és a városi hősziget intenzitás alakulását vizsgálták. Az eredményeik azt mutatták, hogy a szimulációk jól visszaadták térben és időben is az UHI-t (-1 °C 14 UTC-kor, 3–4 °C 20 UTC-kor). Ugyanakkor városi hősziget esetén a WRF alábecsülte a nap túlnyomó részében, míg éjszaka túlbecsülte az intenzitás mértékét.

---

<sup>20</sup> Local Climate Zone – Helyi klímazóna

### 3. Modell beállítások és adatok

Jelen fejezetben áttérünk az általunk készített vizsgálatra. Először részletezzük a szimulációk elkészítéséhez használt modellt és beállításait. Ezt követően bemutatjuk az alkalmazott különböző parametrizációkat, majd rátérünk az általunk felhasznált városi parametrizációk tulajdonságaira.

#### 3.1. A WRF modell általános tulajdonságai

A szimulációinkat a WRF 4.2-es verzióval készítettük el. A WRF-ARW magváltozat egy mezoskálájú modell, teljesen összenyomható, nem-hidrosztatikus Euler-egyenleteken alapul. Azokat a dinamikai megoldókat, fizikai összefüggéseket, adatasszimilációs lehetőségeket hordozza, melyek a szimuláció létrehozásához szükségesek (*Islam et al.*, 2015). A WRF egy vertikálisan hibrid szigma koordinátarendszert alkalmaz, melyet régóta sikeresen alkalmaznak numerikus modellekben. A közelmúltban azonban készítettek egy új hibrid, szigmanyomású vertikális koordinátarendszert annak érdekében, hogy javítsák a meredek területeken fellépő numerikus hibákat, amik a vízszintes nyomási gradiens számításakor lépnek fel (*Beck et al.*, 2020). A szimulációnk elkészítéséhez nem alkalmaztunk adatasszimilációt.

#### 3.2. Alkalmazott parametrizációk

A vizsgálatban használt parametrizációkat *Göndöcs et al.* (2017) munkája alapján választottuk ki.

A szimulációk során alkalmazott sugárzási modell az RRTMG (Rapid Radiative Transfer Model for Global circulation models<sup>21</sup>). Az RRTMG az RRTM (Rapid Radiative Transfer Model<sup>22</sup>) módosított változata, melyet *Iacono et al.* (2008) annak megfelelően módosítottak, hogy elősegítse a pontosságot a GCM-nél való alkalmazása során. Az RRTMG alapvetően ugyanazokkal a fizikai és abszorpciós együtthatókkal (hosszúhullámnál például: vízgőz, szén-dioxid; rövidhullámnál például: vízgőz, metán)

---

<sup>21</sup> Rapid Radiative Transfer Model for Global circulation models – Gyors Sugárzás Átviteli Modell Globális cirkulációs modellekhez

<sup>22</sup> Rapid Radiative Transfer Model – Gyors Sugárzás Átviteli Modell

dolgozik, mint az RRTM. A fluxusintegráció meghatározáshoz egyetlen szabályos diffúziós szöveget használ.

A konvektív hatások érzékelésre a *Grell* (1993) által bevezetett kumuluszparaméterezést alkalmaztuk. Ez egy egyszerűsített, számítási szempontból hatékony séma. Két állandó állapotú keringést feltételez a felhőknek, egy leáramlást és egy feláramlást. Keveredés a felhő és a környezet levegője között csak a felhő tetején és alján lép fel. Állandó tömegáramot feltételez a magassággal, illetve záráshoz stabilitást használ (*Sinha et al.*, 2013; *Grell*, 1993).

A légkörben jelenlévő felhő elemeiben lezajló mikrofizikai folyamatok leírásához egy olyan sémát alkalmaztunk, mely előrejelzi a keverési arányát az öt különböző folyékony és szilárd halmazállapotú felhőösszetevőknek (vízcseppek, jégkristályok, eső, hó és graupel). Ezt a sémát *Thompson et al.* (2008) dolgozta ki. Ebben az új BMP (Bulk Microphysical Parameterization<sup>23</sup>) sémában minden hidrometeor típusra általánosított gamma eloszlási alakzat jellemző. Az elődeihez képest javítottak a szublimáció és a párologtatás leírásán és pontosabb telítettség beállítási alapot kaptak. A havat fraktálszerű kristályoknak tekinti, mely a földfelszín elérő hőtömeg jelentős részét adja. A hó ebben a sémában gőzlerakódással képződik a jégreszecskeken, a képződés hatására növekednek, mindaddig amíg el fognak érni egy bizonyos küszöbértéket.

A planetáris határrétegben (PBL - Planetary Boundary Layer) lezajló turbulens kicserélődések, vagyis a tömeg-, nedvesség- és energiatranszport meghatározására, a *Janjic* (1994) által bevezetett Mellor–Yamada–Janjic sémát alkalmaztuk. Ez egy lokális lezárási modell, melyben a turbulens kinetikus energiából származnak az örvényességi diffúzió együtthatói (*Hu et al.*, 2010).

A Noah földfelszíni modell alkalmaztuk a földfelszín és a légkör között lezajló kölcsönhatások és visszacsatolások reprezentálására. A Noah modell szimulálja a földfelszín energiáját és a vízegyensúlyt is. További egyéb funkciója, hogy hómélységet is meghatároz, illetve képes talajvíz dinamikáját és városi folyamatokat. Emellett pontos becslést tud adni a talajnedvességre, talaj hőmérsékletre (*He et al.*, 2023), melynél két méteres talajmélységgel dolgozik, melynek alján gravitációs szabad vízvezetést alkalmaz a modell (*Niu et al.*, 2011).

---

<sup>23</sup> Bulk Microphysical Parameterization – Tömeges Mikrofizikai Paraméterezés

### 3.3. Alkalmazott városi parametrizációk

A szimulációnk elkészítése során több különböző parametrizációt is alkalmaztunk a városok légköri folyamataira gyakorolt hatásának megjelenítésére. Három fő parametrizáció áll rendelkezésre a WRF-ben a városi modellezésre. A városi modellezés során a WRF modellhez csatolt városi tetőszintmodell (UCM) és földfelszíni modell, esetünkben a Noah, segítségével határozzuk meg az át nem eresztő felületeket a WRF rácsaiban (*Chen et al.*, 2011). Egy ilyen tetőszintmodell célja, hogy valóságghű geometriával a felszín és a légkör közötti energia- és impulzusátvitelt megfelelően kiszámítsák (*Kusuka et al.*, 2001)

A szimulációink során alkalmaztuk az egyrétegű városi tetőszintmodellt (SLUCM – Single Layer Urban Canopy Model), ami egy kétdimenziós, árnyékolást és sugárzáscsapdázást is tartalmazó tetőszint (*Barlage et al.*, 2016). Az egyrétegű modell úgy épül fel, hogy végtelen hosszú kanyonokat feltételez. Ezekben figyelembevételre kerül az árnyékolás, a visszaverődés és a sugárzás elnyelés. Az egyes hőmérsékleti profilokat (például: tető, út, fal) a felületi energiaegyenletből származtatja, a légellenállás együtthatót is számolja. Amikor minden adott már a modellnek, akkor a teljes súrlódási sebességet összesíti és átadja a WRF-nek (*Chen et al.*, 2011).

A másik városi parametrizáció, melyet felhasználtunk a modellezés során a többrétegű városi tetőszint-modell, BEP (Building Effect Parameterization<sup>24</sup>) és az épület energetikai modell, a BEM (Building Energy Model<sup>25</sup>) kombinációja volt. A BEP egy többrétegű városi tetőszint-modell, az egyrétegű modellhez képest abban tér el, hogy bonyolultabb geometriával rendelkezik, hiszen a többrétegűben háromdimenziós épületek szerepelnek (*Kusaka et al.*, 2001). Egy ilyen többrétegű városi tetőszint-modell figyelembe veszi az utak és épületek árnyékolását, csapdázást és visszasugárzást, illetve ezen felületek hatását az impulzusra, a potenciális hőmérsékletre és a turbulens kicserélődésre. További előnye, hogy az épületek azon tulajdonságait is nézi, hogy függőlegesen osztják el a hő-, nedvesség- és lendületforrásukat, nyelőiket a teljes tetőszinten. Az épületek belső hőmérsékletét azonban állandó szinten tartja, konstansnak tekinti. Fontos azonban megemlíteni, hogy a BEP inkább kutatáshoz használható, hiszen

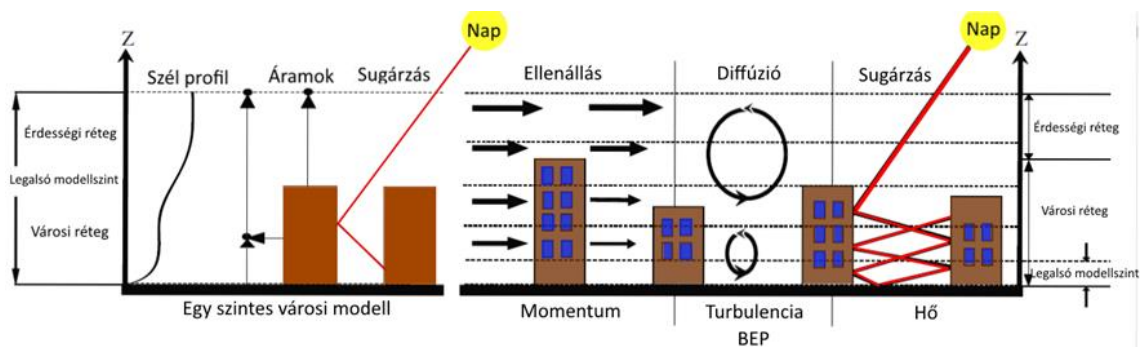
---

<sup>24</sup> Building Effect Parameterization – Városi Környezeti Modell

<sup>25</sup> Building Energy Model – Városi Energia Modell

nagyobb számítási időt igényel a bekerülő több réteg és a nagy felbontás miatt (*Chen et al.*, 2011).

A BEM az épületek belseje és a külső környezet közötti energiacsere folyamatát reprezentálja, illetve az épületet vízszintes és függőleges felületeinek hatását a szélesebbesre és a turbulens kinetikus energiára (*Martilli et al.*, 2002). A BEP-pel szemben a BEM nem állandónak tekinti az épületek belső hőmérsékletét, hanem kiszámítja azok alakulását az energiamérlegből. Az antropogén hőtermelés egy részét veszi csak figyelembe, például a közlekedésből származó hőt nem. Az antropogén látns hő az épületek szellőztetésén keresztül fog kapcsolatot teremteni a külső levegővel, a szenzibilis hőáram pedig a falakon keresztül történő hődiffúzióval történik. (*Salamanca & Martilli*, 2010).



2. ábra: A SLUCM és a BEP modellek által leírt légköri folyamatok (*Chen et al.*, 2010).

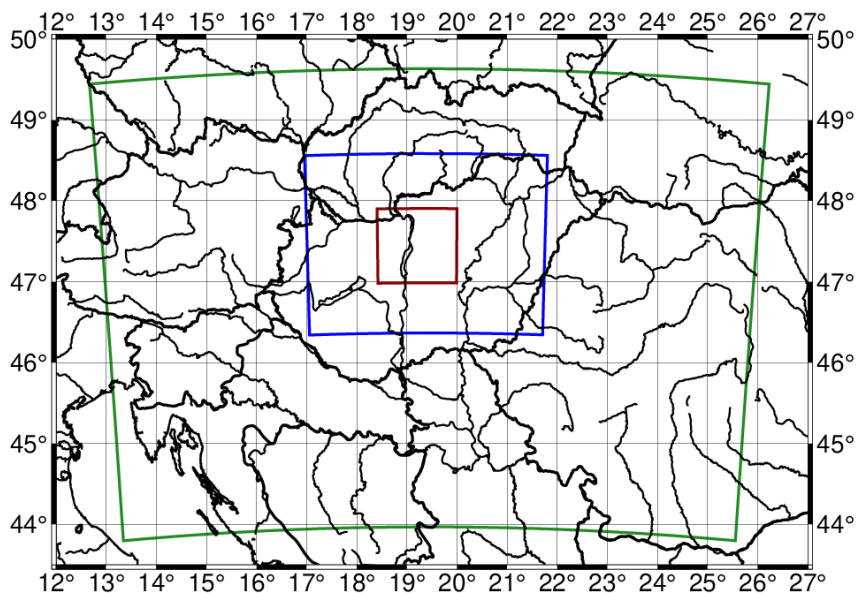
Számos összehasonlító tanulmány készült az elmúlt években, hogy melyik tetőszint-modell hogyan teljesít. *Barlage et al.* (2016) összevetették az eltérő városi parametizációkat a WRF modell futtatásával. A szimulációkat elvégezve a 2 méteren mért hőmérsékletre és a 10 méteres szélesebbesgre az eredmények azt mutatják, hogy a hőméréskelti profilt jól visszaadja mind a három séma, viszont a szélesebbesgnél jelentkezik már az UCM használatának hátránya. Ugyanis a BEP és a BEM jobban megfogja, kevésbé torzít amiatt, hogy az épületek belógnak a légkör alsóbb rétegeibe, a határrétegbe. A szabad légkörben ismételen hasonló torzítással rendelkezik már a három modell típus.

Kína városaira készítettek morfológiai összehasonlítást *Sun et al.* (2021). A szimulációik során a WRF modellt alkalmazták, melyben érzékenység vizsgálatot végeztek a SLUCM, BEP és BEP+BEM városi tetőszint paraméterezéssel. A szimulációik eredményeit az állomási adatokkal vetették össze. A WRF igen nagy érzékenységet mutatott a városi parametizációkra, illetve a városmorfológiai

paraméterekere, melyet az általuk újonnan kidolgozott adatbázis szolgáltatott. A BEP és BEP+BEM eredményei közelebb állnak a valódi értékekhez a városi területeken, mint az SLUCM. A két méteres levegőhőmérsékletet a saját város morfológiai adatbázissal jobban reprezentálta a BEP és a BEP+BEM, mint a SLUCM, abból kifolyólag, hogy az épületmagasság valószínűségi sűrűség eloszlását veszi figyelembe. A SLUCM pedig ezzel szemben az átlagos épület magasságot tartja szem előtt.

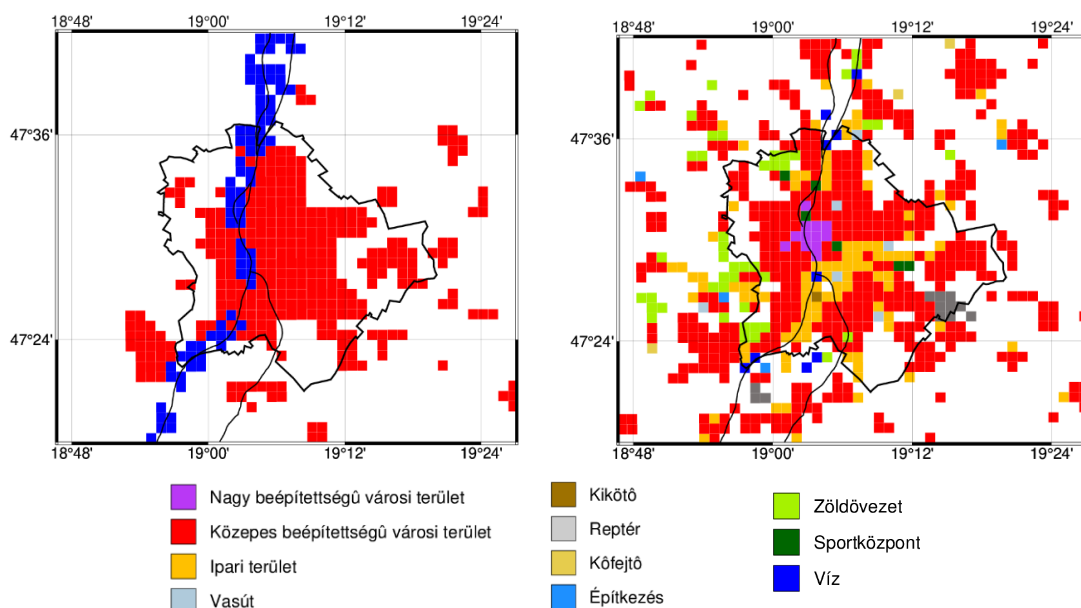
### 3.4. Szimulációk beállítása

A vizsgálataink a fővárosunk, Budapest, által létrehozott városi hősziget intenzitásának a modellezésére irányult. A szimulációinkat egy 30 órás időintervallumra, 2015. 07.07.–08. között, kb. az é.sz. 44° – é.sz. 49,5°, k.h. 13° – k.h. 16,2° tartományra készítettük. A modellünk területe három domainnel futott, ennek megfelelően van egy 10 km-es, egy 3,333 km-es, illetve egy 1,111 km-es felbontással rendelkező futtatásunk, melynek területeit az 3. ábrán szemléltetjük. A UHII vizsgálata során a legnagyobb felbontású szimulációt vettük figyelembe.



3. ábra: A szimulációban használt modellterület. Zöld színnel a külső 10 km-es, késsel a középső 3,333 km-es és pirossal a belső 1,111 km-es felbontású domain.

A szimulációk során kettő különböző felszínhasználati adatbázist alkalmaztunk, az USGS-t és CORINE-t. Az USGS mindösszesen egy felszíntípust különít el a beépített városi területeknek. Ezzel szemben a CORINE-nál tíz különböző felszíntípust tudunk megkülönböztetni a városi területre, mely tíz eltérő típus a 4. ábrán látható.



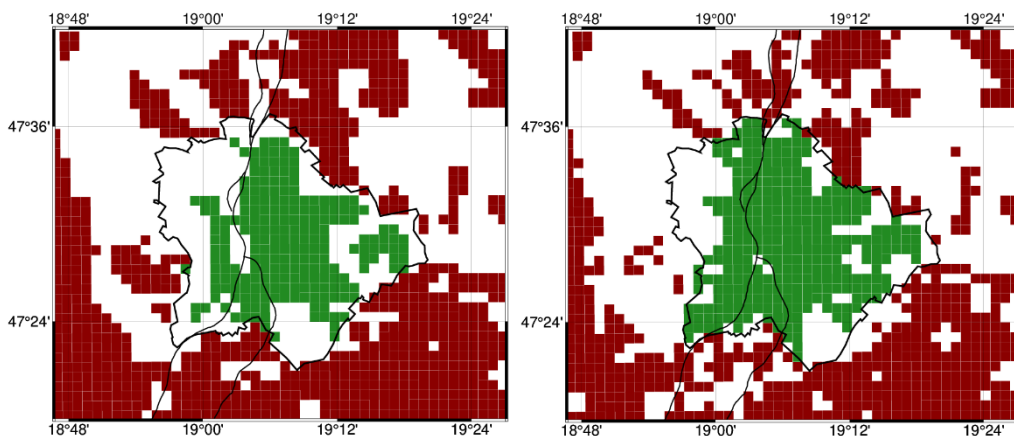
4. ábra: Az USGS (bal), és a CORINE (jobb) adatbázis által elkülönített mesterséges (és víz) felszíntípusok Budapest térségében.

Az 1. táblázatban szemléltetjük, hogy a SLCUM és BEM+BEP sémában használt előírt paraméterek között milyen különbségek vannak az antropogén szenzibilis és látens hőáramban, illetve a beépíttség mértékében az egyes felszínkategóriák között a CORINE felszínhasználatkor. Ha a közepes beépíttségű városi területeket vesszük alapul, melyet az USGS esetén alkalmazunk a városi területre, akkor a táblázatban láthatóan jelentős különbségek lépnek fel az antropogén szenzibilis és látens hőáramban az egyes kategóriák között. Míg a beépíttség mértéke mindössze 20%-ban tér el a nagy beépíttségű és a közepes beépíttségű terület között, addig az AH esetén majdnem a kétszerese tapasztalható. A legnagyobb beépíttség az ipari területeket és az építkezési területeket jellemzi. Ezekhez a felszíni kategóriákhoz kapcsolhatók a legnagyobb AH értékek is, a legmagasabb a reptér esetében,  $120 \text{ W/m}^2$ , míg a legalacsonyabb értékek a zöldövezet és a sportközpontok kategóriában lépnek fel. A látens hőáramban fellelhető egy fordított arányosság a beépíttség mértékével szemben. Ugyanis minél nagyobb a beépíttség, annál kisebb a látens hőáram mértéke. Ez arra vezethető vissza, hogy minél beépítettebb az adott terület, annál több a mesterséges felszín, amelyeknél nagy lefolyás jellemző, így kisebb a párologtatás mértéke is. Ennek megfelelően a zöldövezet kategóriánál mutatható meg a legnagyobb ALH érték,  $60 \text{ W/m}^2$ .

1. táblázat: A SLUCM városi parametrizációban használt előírt antropogén szenzibilis (AH [W/m<sup>2</sup>]) és látens hőáram (ALH [W/m<sup>2</sup>]), valamint a SLUCM és BEM+BEP parametrizációban használt beépítettség mértéke (FRC\_URB [%]) CORINE felszínhasználat típusonként.

|         | Nagy beépítettségű városi terület | Közepes beépítettségű városi terület | Ipari terület | Vasút      | Kikötő       |
|---------|-----------------------------------|--------------------------------------|---------------|------------|--------------|
| AH      | 90                                | 50                                   | 100           | 80         | 80           |
| ALH     | 25                                | 20                                   | 40            | 30         | 40           |
| FRC_URB | 90                                | 70                                   | 100           | 85         | 90           |
|         | Reptér                            | Kőfejtő                              | Építkezés     | Zöldövezet | Sportközpont |
| AH      | 120                               | 75                                   | 80            | 20         | 20           |
| ALH     | 20                                | 35                                   | 40            | 60         | 45           |
| FRC_URB | 90                                | 75                                   | 95            | 50         | 30           |

A városi hősziget intenzitás számításakor meg kell határozni a városi és környéki pontokat. Mind a környéki, mind a városi pontok esetén csak a 200 m tengerszint feletti magasságnál alacsonyabb rácspontokat tekintettük. Környéki pontoknak tekintettük továbbá mindazon rácspontokat, amelyek Budapest közigazgatási határán kívül esnek, nem víz, nem városi felszín. Városnak pedig Budapest közigazgatási határán belül eső mesterséges felszínnel jellemzett rácspontjait tekintettük. Az 5. ábrán látható, hogy a CORINE esetén több olyan rácspont van a külterületen, amely nem használható környéki rácspontként, hiszen városi terület.



5. ábra: A hőszigetintenzitás számításához használt városi (zöld) és környéki (piros) rácspontok az USGS (bal) és CORINE (jobb) felszínhasználat esetén.

Az alkalmazott városi parametrizációinkat úgy használtuk fel a szimulációkhoz, hogy készítettünk mindkét felszínhasználatra, tehát az USGS-re és a CORINE-ra is egy-egy szimulációt az adott parametrizációval. Ennek megfelelően készítettünk városi parametrizáció nélkül egy szimulációt az USGS-sel és egy szimulációt a CORINE-nal. Ezt követően alkalmaztunk előbb egyrétegű városi parametrizációt mindkét



felszínhasználattal, majd többretegű városi parametrizációt is alkalmaztunk, amit kiegészítettük a BEP+BEM modellel, vagyis az épületek energetikája is számításba került ebben az esetben, ismételten mindkét felszínhasználattal külön-külön készültek a szimulációk.

### **3.5. Kezdeti- és peremfeltételek**

A WRF modell futtatásához szükséges kezdeti- és peremfeltételeket egy globális modellből származtathatjuk. Jelen esetünkben az ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts<sup>26</sup>) IFS (Integrated Forecasting System<sup>27</sup>) modell biztosította. Az IFS modell 0,125°-os horizontális felbontásonként szolgáltat adatot. Ilyen adatok például a légköri kezdeti feltételek, amik szükségesek egy szimuláció elkészítéséhez, például két méteres hőmérsékleti, felszíni nyomási, geopotenciál adatok. Ezekon a kezdeti feltételeken kívül még talajnedvesség és talajhőmérsékleti adatokat is nyújt ez a modell.

### **3.6. A vizsgált időszak időjárása**

Európa északi térségének időjárását keletről nyugat felé mozgó frontok alakították, míg Európa déli részén anticiklonális időjárás uralkodott. Magyarország térségében többfelé napos, derült idő volt. Csapadékot nem mértek, egyedül Sopron térségébe az Alpok felől sodródott be zivatar. A napi maximum hőmérséklet a legtöbb helyen 34–38 °C között alakultak, míg a minimum hőmérsékletek pedig 16–26 °C-ig süllyedtek le [6 – met.hu].

Budapesten a napi középhőmérséklet 29,5 °C volt, mely 8,3 °C-kal meghaladta ezen napon a sokéves átlagot. Ezen felül megdőlt az aznapi Budapesten mért addigi maximum hőmérséklet rekord is, 37,3 °C volt a legmagasabb hőmérséklet [6 – met.hu].

A következő nap első részében derült, napos idő volt, majd délután északnyugat felől erősen növekedő felhőzet volt detektálható, ennek következtében egyre többfelé fordult elő, zápor, zivatar. Ismételten megdőlt az aznapi budapesti maximum hőmérséklet 38,7 °C-kal. Az átvonult hidegfront lehullott csapadék napi mennyisége nyom és 40 mm között alakult. Budapest Lőrinc állomáson 27 mm-t mértek, míg Budapest belterületi állomásán 17 mm-t [6 – met.hu].

---

<sup>26</sup> European Centre for Medium Range Weather Forecasts – Középtávú Időjárás Előrejelések Központja

<sup>27</sup> Integrated Forecasting System – Integrált Előrejelzési Rendszer

## 4. Eredmények

Ebben a részben bemutatom, hogy az általunk használt különböző városi parametrizációk és az eltérő felszínhasználat milyen hatással volt a modellezett területünkön a két méteres levegőhőmérsékletből és a felszíni hőmérsékletből származtatott városi hősziget intenzitásra. Megmutatom, hogy milyen különbségek léptek fel az egyes parametrizációk között a 24 órás időintervallumban. A szimuláció elején hagyunk egy 6 órás felfutási időt, annak érdekében, hogy megkaphassuk a teljes napi meneteket.

A továbbiakban a szimulációkat aszerint fogjuk rövidítve nevezni, amelyik felszínhasználatot és városi parametrizációt alkalmaztuk. Ennek megfelelően az USGS városi parametrizáció nélküli esete „u0”, az egyrétegű városi parametrizáció esetén „u1”, a többrétegű parametrizáció esetén „u3”. CORINE esetében a városi parametrizáció nélküli „c0”, az egyrétegű városi parametrizáció „c1”, illetve a többrétegű városi parametrizáció pedig „c3”.

### 4.1. A városi hősziget intenzitás napi menete

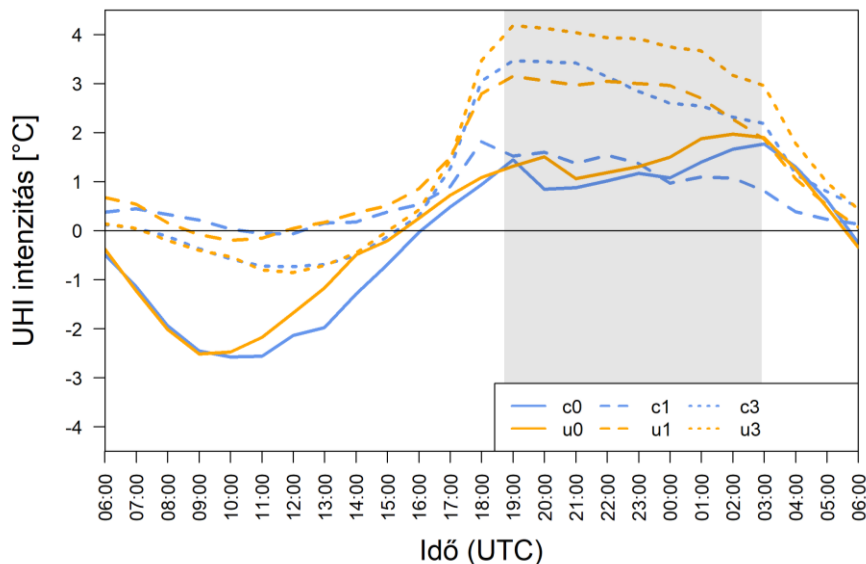
A 6. ábrán láthatók a szimulációk eredményeiből kiszámított kétméteres hőmérséklet városi hősziget és a felszíni hőmérsékletből származtatott városi hősziget intenzitásának napi menete, elkülönítve a különböző szimulációk szerint. Az ábrán jól kirajzolódnak az eltérő parametrizációk okozta különbségek.

A városi parametrizáció nélküli esetben napközben a két méteres hőmérsékletből jelentős negatív hősziget tapasztalható, mindkét felszínhasználat esetén kevesebb, mint  $-2\text{ °C}$ -ot detektáltunk. Ezek a minimum értékek az USGS esetében kb. 9 UTC-kor, míg a CORINE esetében valamivel később 11 UTC körül jelentkeztek. Ezzel szemben az éjszaka folyamán nagyjából együtt halad a két görbe, az u0 részére látszódik némileg erősebb hősziget intenzitás. A délutáni órákban, 15–16 UTC között, kezd el pozitív értékeket mutatni a hősziget intenzitás. A maximum értékek a hajnali órákban, 1–3 UTC között jelentkeznek, mindkét felszínhasználatnál  $2\text{ °C}$  körül.

Jelentős különbségek alakultak ki az u1-es és a c1-es szimulációk között hősziget intenzitás esti időszakában. A nap első részében még nem jelentkezik számottevő különbség, azonban az éjszaka folyamán már kb.  $2\text{ °C}$ -os eltérés van a két szimuláció között az u1 javára. Napközben mindkét szimuláció esetén tapasztaltunk negatív hősziget

intenzitást. Minimum értékek mindkét esetben néhány tizeddel ment  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  alá. Az u1-nél kettő maximum is megfigyelhető, az egyik 19 UTC körül, a másik 22 UTC körül,  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  körül. A c1-es szimulációnál a maximum érték mindössze  $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  volt, mely 18–19 óra között mutatkozott.

A többrétegű városi parametrizációnál a hősziget intenzitás napi menete napközben nagyjából együtt mozog egészen 17 óráig. Napközben negatív értékeket mutat a hősziget intenzitása mindkét felszínhasználat esetén. A minimumok mindkét esetben  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  körül alakultak. Az esti órákban aztán a két görbe eltávolodik egymástól, és az u3 javára tapasztalható nagyobb intenzitás. A maximum érték, ami az u3 esetében  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  volt, 19–20 UTC között mutatkozott. A c3 szimulációnál ez az érték  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal alacsonyabban alakult ugyanebben az időpontban.



6. ábra: 2 méteres hőmérsékletből számított városi hősziget (UHI) intenzitás napi menete különböző szimulációk esetén 2015.07.07-08-án. (0 – városi parametrizáció nélkül, 1 – egyrétegű, 3 – többrétegű városi parametrizáció, c – CORINE, u – USGS felszínhasználat, a szürke színezés a napnyugta és napkelte közti időszakot jelöli).

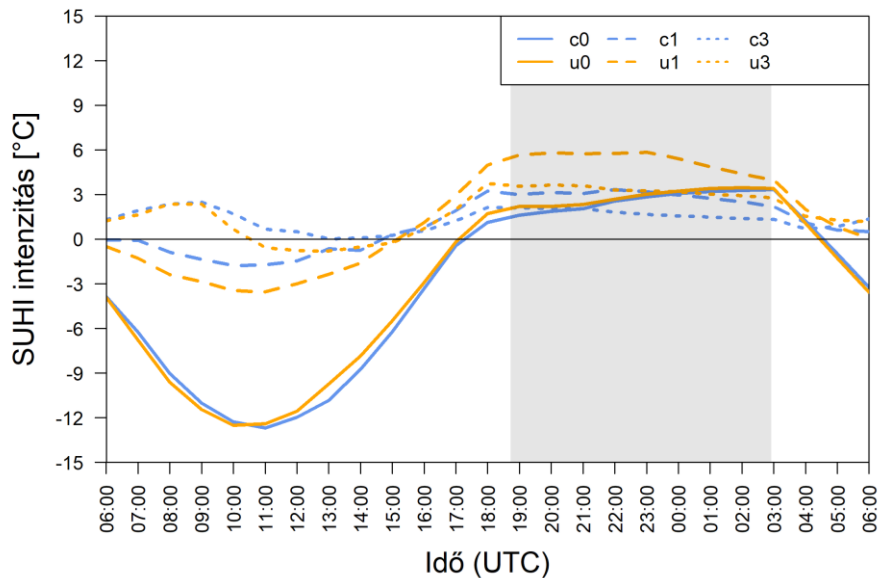
A felszíni hőmérsékletből származtatott városi hősziget intenzitás (SUHI) esetén mindegyik parametrizációra elmondható, hogy a reggeli órákban a CORINE felszínhasználat mutat nagyobb hősziget intenzitást, majd parametrizációtól függően ez 15 UTC környékén megfordul és a nap maradék részében az USGS esetében lesznek nagyobb hősziget intenzitások.

Azoknál a szimulációknál, amelyeknél nem alkalmaztunk városi parametrizációt a 7. ábrán látottak alapján nagy negatív SUHI értékek figyelhetők meg a nap első felében. A két különböző felszínhasználat szimulációja egész nap folyamán együtt mozog. A

parametrizációk közül ebben az esetben volt megfigyelhető csak, hogy már a délelőtti folyamán, 10 UTC körül, az u0 kezd el nagyobb intenzitás értékeket mutatni az c0-nál. A minimum érték mindkét esetben  $-12\text{ °C}$  volt, míg a maximumok a  $3\text{ °C}$ -ot érték el.

Az egyrétegű városi parametrizációnál már nem voltak olyan nagy negatív értékek, mint a parametrizáció nélküli esetben. A parametrizáció nélküli esethez hasonlóan itt is 10 UTC körül alakultak a minimum értékek, mind a c1, mind az u1 esetében. Az este folyamán aztán az u1  $3\text{ °C}$ -kal nagyobb hősziget intenzitást mutat, a c1-hez képest. A maximum érték az u1 esetében  $6\text{ °C}$  körül alakult, míg a c1 esetében  $3\text{ °C}$  volt. Mindkét esetben 22 és 23 UTC között jelentkeztek a maximumok.

A többrétegű parametrizáció esetén a reggeli órákban a többi parametrizációval ellentétben pozitív hősziget tapasztalható. 11 UTC tájékán az u3 negatív hőszigetbe fordul át kb. 16 UTC-ig. A minimum értékek a többrétegű parametrizáció esetén 2–3 órával később mutatkoztak, mint a parametrizáció nélküli és az egyrétegű parametrizáció esetén. A minimum érték az u3-as szimulációnál dél tájékán mutatkozik, és  $-1\text{ °C}$  körül van. A c3 ezzel szemben a 24 óra alatt nem mutatott negatív hőszigetet, minimuma a  $0\text{ °C}$  volt, míg maximuma  $1\text{ °C}$  körül alakult.

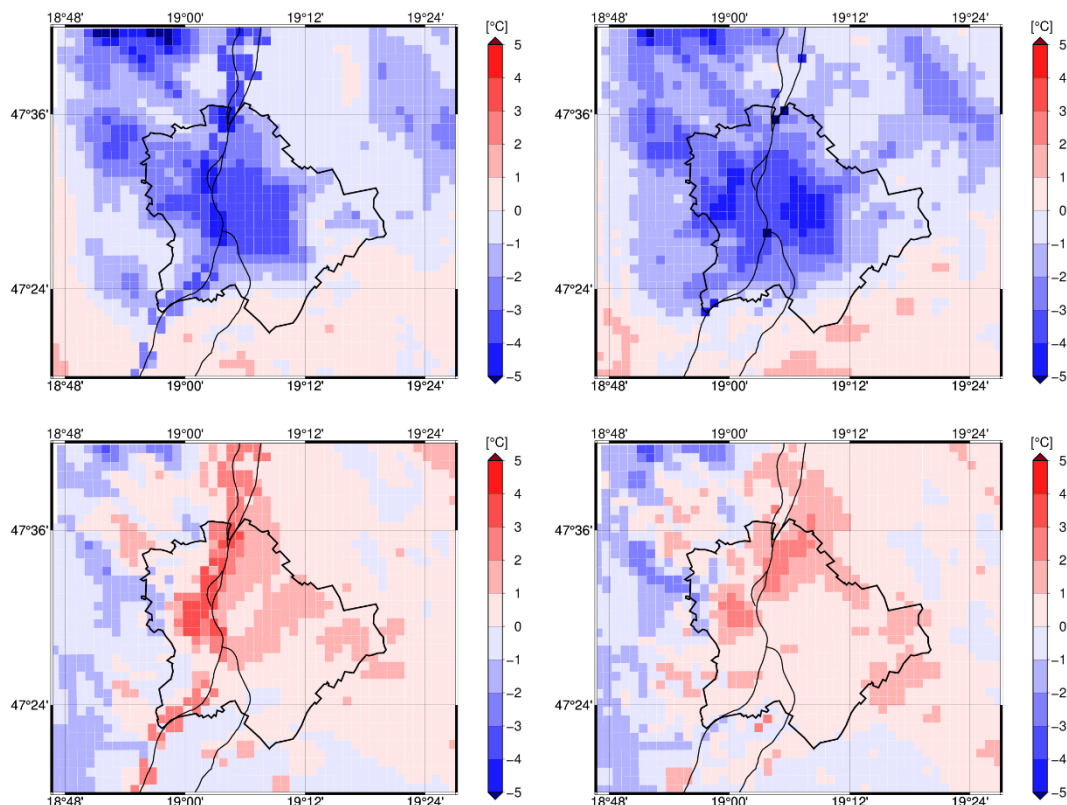


7. ábra: Felszínhőmérsékletből származtatott városi hősziget (SUHI) intenzitás napi menete különböző szimulációk esetén 2015.07.07-08.-án. (0 – városi parametrizáció nélkül, 1 – egyrétegű, 3 – többrétegű városi parametrizáció, c – CORINE, u – USGS felszínhasználattal, a szürke színezés a napnyugta és napkelte közti időszakot jelöli).

## 4.2. A városi hősziget intenzitás térbeli eloszlása

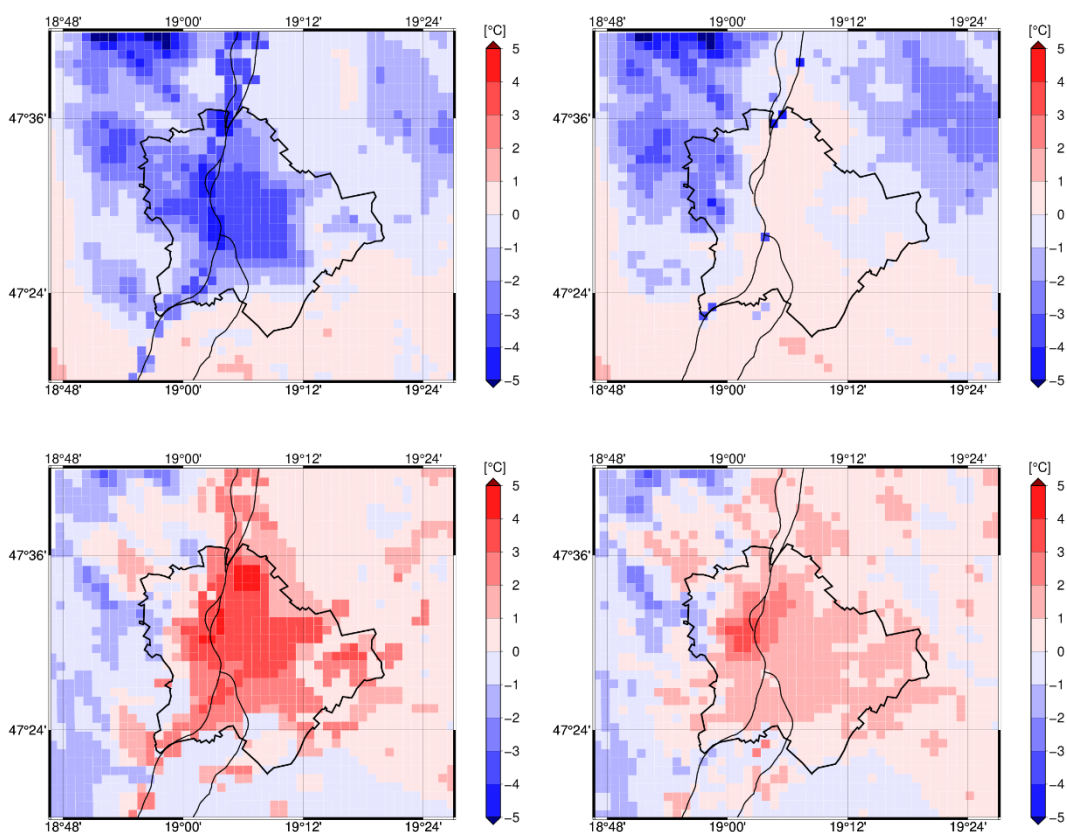
Az elkészített szimulációkból két időpontot választottunk ki, hogy összevethessük egymással a különböző városi parametrizációkat és az eltérő felszínhasználatot. Ezek az időpontok a 10 és 22 UTC, a legkisebb és legnagyobb intenzitás környéki időpontok.

A 8. ábrán láthatóak a városi parametrizáció nélkül készült szimulációk két méteres hőmérsékletből kiszámított városi hősziget intenzitás. A 10 UTC-s térképeken megfigyelhető, hogy a hősziget intenzitás alacsonyabb volt a CORINE felszínhasználat esetén. Az éjszakai ábrákon viszont már a CORINE esetén tapasztalható némileg erősebb hősziget intenzitás. Ez a különbség annak tudható be, hogy a c0 esetében nagyobb albedó volt megadva a városi felszínnél, amelyből az következik, hogy kevesebb sugárzást tudott elnyelni napközben, így valamivel alacsonyabban alakultak a hőmérsékletek a városban. Illetve a hajnali órákban a c0 esetében magasabb hőmérsékleteket voltak a környéki pontokon, mint az u0 szimulációjánál. Éjszaka az u0 szimulációnál jelentkező magas intenzitásértékeket a valóságosnál nagyobb kiterjedésű (4. ábra) Duna eredményezi.



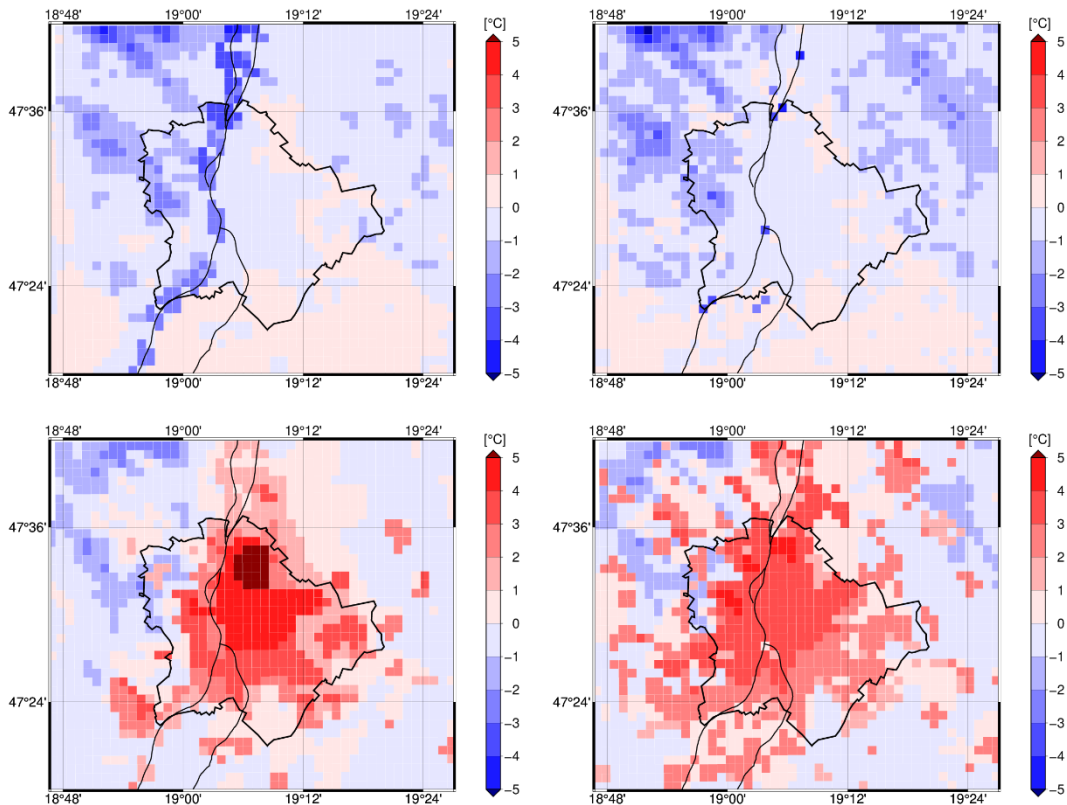
8. ábra: Két méteres hőmérsékletből származtatott városi hősziget intenzitás városi parametrizáció nélkül 2015.07.07.-én. Bal oldal: USGS, jobb oldal: CORINE felszínhasználattal. Felső sor: 10 UTC, alsó sor: 22 UTC.

Az egyrétegű városi tetőszint esetén azonban jelentős különbségeket lehet látni a két időpontban (9. ábra). Ez a nagymértékű különbség a USGS és a CORINE között abból fakad, hogy az USGS esetén a talajhőáram jelentős mértékkel nagyobb. Napközben a talajhőáram az USGS esetén  $-250 \text{ W/m}^2$ , míg a CORINE esetében  $-50 \text{ W/m}^2$ , éjszaka  $80 \text{ W/m}^2$ , míg a CORINE esetében ez az érték  $-25\text{--}30 \text{ W/m}^2$ . További jelentős különbségeket figyeltünk meg napközben a környéki és a városi felszínhőmérsékletek között (nem ábrázoljuk). A CORINE esetében a környéki rácspontokon a felszínhőmérséklet átlagban  $2\text{--}3 \text{ }^\circ\text{C}$ -kal hűvösebb volt, mint az USGS esetében. Valamint az USGS-nél napközben a környék magasabb hőmérsékleteket mutatott, mint a város. A párolgás sem megkerülhető ebben az esetben, ugyanis a c1-es esetben  $20\text{--}30 \text{ W/m}^2$ -rel nagyobb látens hő volt, mind a környezetben, mind a városban a u1-es esethez képest.



9. ábra: Két méteres hőmérsékletből származtatott városi hősziget intenzitása SLUCM városi parametrizációval 2015.07.07.-én. Bal oldal: USGS, jobb oldal: CORINE felszínhasználattal. Felső sor: 10 UTC, alsó sor: 22 UTC.

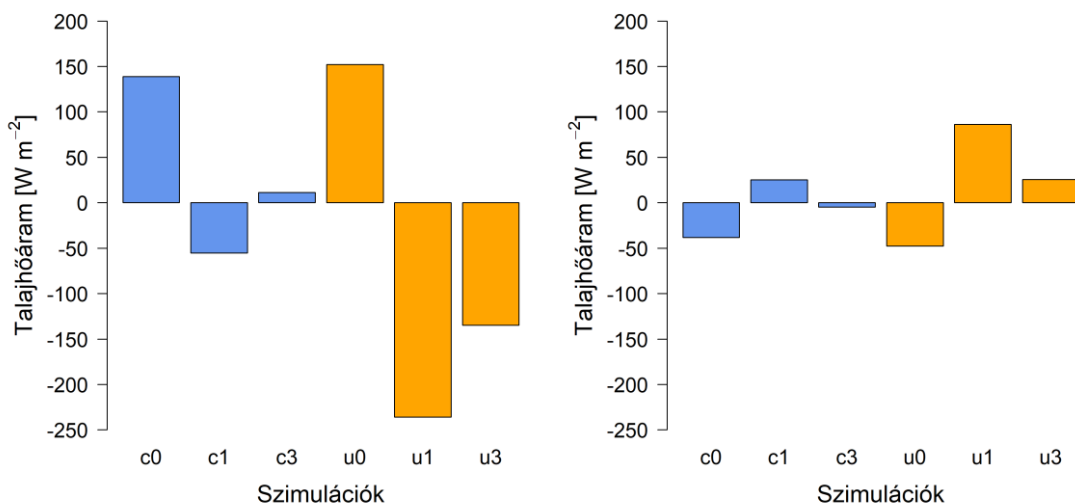
A BEP+BEM szimulációk esetén, melyet a 10. ábrán szemléltetünk, a 10 UTC-s és a 22 UTC-s térképeken látható, hogy a CORINE felszínhasználat esetén tapasztalható az USGS-hez képest gyengébb hősziget intenzitás. Napközben a c3-as szimulációnál tapasztaltunk egyedülként pozitív talajhőáramot. Az USGS használata esetén, a talajhőáram este pozitívok értékeket mutat, majd éjjeltől ismét negatív értékeket észleltünk.



10. ábra: Két méteres hőmérsékletből származtatott városi hősziget intenzitás BEP+BEM városi parametrizációval 2015.07.07.-én. Bal oldal: USGS, jobb oldal: CORINE felszínhasználattal. Felső sor: 10 UTC, alsó sor: 22 UTC.

Ha összevetjük a városi parametrizáció nélküli és az egyrétegű városi parametrizációkat, akkor jelentős különbségeket láthatunk. A városi parametrizáció nélküli szimulációk mindkét felszínhasználat esetén napközben negatív hőszigetet mutatnak, míg az egyrétegű esetén, 3–4 órát leszámítva a délelőtti órákban, az egész nap folyamán pozitív hősziget detektálható. 10–11 UTC-kor tapasztaltuk a minimumokat mindkét esetben. Ebben az időpontban volt a legnagyobb mértékű a globálsugárzás. A lefelé érkező hosszuhullámú sugárzásban viszont eltérő értékeket mutattak a parametrizáció nélküli és az egyrétegű parametrizációs szimulációk. A parametrizáció nélküli esetben  $\approx 390 \text{ W/m}^2$  volt ez az érték, míg az egyrétegű parametrizáció esetében

nagyobb érték volt,  $\approx 405 \text{ W/m}^2$ . A kétféle parametrizáció eltérést mutatott továbbá az albedóban is. Az egyrétegű parametrizációnál volt kisebb az albedó értéke. Az emisszivitásnál fordítva alakultak a különbségek. Az egyrétegű parametrizációnál léptek fel nagyobb értékek, a u1-es szimulációnál például 0,988–0,99 között alakult, míg az u0-nál 0,97 volt. Az eltérő visszasugárzásnak köszönhetően eltérően alakultak a felszíni hőmérsékletek is. A párolgás ebben az összehasonlításban elhanyagolható, mert mindkét városi parametrizáció esetén alacsony volt a mértéke. Ezek az eltérések nem okozhatnak jelentős eltérést, a fő különbség a mesterséges felszínek talajhőáramában keresendő. Napközben a talajhőáram átlagosan  $150 \text{ W/m}^2$  akár az USGS, akár a CORINE felszínhasználatot tekintjük a városi parametrizáció nélkül, míg az egyrétegű modell esetében már negatív előjelű, átlagosan kb.  $50 \text{ W/m}^2$  a CORINE és  $230 \text{ W/m}^2$  az USGS esetén. Éjszaka fordított, parametrizáció nélkül  $-50 \text{ W/m}^2$  körüli, az egyrétegűvel 25, illetve  $80 \text{ W/m}^2$  körüli a CORINE és az USGS esetén. Ennek az az oka, hogy a parametrizáció esetén már többelhő képződik a mesterséges felszínek utcakanyonjaiban, míg parametrizáció nélkül csak a talaj hővezetőképessége van megnövelve, és egy száraz talajfelszínként kell elképzelni a várost.



11. ábra: Városi rácspontra átlagolt talajhőáram különböző szimulációk esetén 2015.07.07. 10 UTC-kor (bal) és 22 UTC-kor (jobb) (0 – városi parametrizáció nélkül, 1 – egyrétegű, 3 – többretegű városi parametrizáció, c – CORINE, u – USGS felszínhasználattal).

Az egyrétegű és a többretegű városi parametrizáció összehasonlítása során azt tapasztalhatjuk, hogy a párolgásban nincs jelentős különbség az egyrétegű és a többretegű parametrizációk között. Némi eltérés van a napközben mutatott talajhőáramban, abból kifolyólag, hogy a c3-as szimuláció esetén pozitív talajhőáram tapasztalható napközben.



További különbség még, hogy a c3 esetén a vizsgált terület felett több felhőt adott, mint a másik három szimuláció esetében. Az esti óráktól, 19 UTC-től, mutat megközelítőleg 0,5 °C-os pozitív eltérést a többretegű városi parametrizáció az egyrétegűvel szemben, köszönhetően a hozzáadott épületenergetikának.

Fontos kiemelni, hogy az USGS és CORINE felszínhasználattal készült városi hősziget intenzitás mértéke közötti különbségnek nem csak a területi eloszlás az oka. Az USGS esetén egységesen közepesen beépített városi felszín tulajdonságaival jellemezték a mesterséges felszínek, míg a CORINE esetén különböznek az olyan meghatározó paraméterek, mint az épületek szélessége, vagy a növényzettel borítottság aránya, ezért a legtöbb esetben kisebb UHII adódott. Ugyanakkor ezen paraméterek módosíthatók, Budapestre jellemző értékre beállíthatók, melyek javíthatják a szimulációk pontosságát.

## 5. Összefoglalás

Szakdolgozatom célja az volt, hogy Budapestre vizsgáljam a WRF modell segítségével a városi hősziget intenzitását különböző városi parametrizációkkal és különböző felszínhasználattal. A vizsgálat 2015.07.07–08.-ra, mintegy 30 óras időintervallumra készült, annak megfelelően, hogy láthassuk a városi hősziget intenzitás napi menetét. Két különböző felszínhasználati adatbázist vettünk figyelembe, az USGS-t és CORINE-t. Mindkettő felszínhasználattal készítettünk szimulációkat városi parametrizáció nélkül, majd alkalmaztunk egyrétegű városi tetőszint-modellt és többretegű városi tetőszint-modellt, mely kiegészül egy épületenergetikai modellel is.

Az eredményekben jól látszódnak a különböző városi parametrizációkból és eltérő felszínhasználatból adódó különbségek. A városi parametrizáció nélküli esetben elmondható, hogy lényeges különbségek nem alakult ki a városi hősziget intenzitás napi menetében az USGS és a CORINE között. A SLUCM esetén már lényeges eltérések adódtak. A napi menetüket összehasonlítva napközben még együtt haladt nagyjából a két görbe, majd éjszaka 2 °C-os eltérés alakult ki az USGS javára. Ez a nagymértékű különbség abból fakadt, hogy az USGS esetén jóval nagyobb talajhőáramot figyeltünk meg, az egységesen sűrűn beépített városi felszín miatt. Valamint ebben az esetben a párolgás mértéke is jelentősebb különbségeket mutatott a két felszínhasználatban. A BEP+BEM alkalmazása során a napi menet a két felszínhasználattal együtt mozgott, napközben negatív hőszigettel. Estére az USGS javára detektáltunk nagyobb UHII-t. Egyedüliként a CORINE esetében napközben is pozitív hőáram volt észlelhető.

A városi parametrizációk közötti összevetésben is a döntő faktornak a talajhőáram bizonyult. A városi parametrizáció nélküli és a SLUCM között a lefelé érkező hosszuhullámú sugárzásban, az albedóban és a felszíni hőmérsékletekben is tapasztaltunk eltéréseket. A SLUCM és BEP+BEM szimulációk közötti esetben is a talajhőáramban mutatott eltérés miatt alakultak ki különbségek az UHI intenzitásában. Illetve az BEM modell miatt hozzáadott épületenergetika jelentette még ebben az esetben a meghatározó tényezőt a különbségek alakulásában.

## **Köszönetnyilvánítás**

Köszönöttem tartozom témavezetőmnek, dr. Breuer Hajnalkának, azért, hogy megszerettette velem a programozás világát. Rengeteg hálával tartozom neki, hogy bármikor fordulhattam hozzá segítségért, mindig ott volt. Nagyon köszönöm neki a türelmét és az időt, amit befektetett a közös munkába. Nélküle nem készülhetett volna el ez a szakdolgozat.

Köszönöm a családomnak és a barátaimnak a sok támogatást, biztató szavakat és a felmerülő kérdéseket a szakdolgozat témájához.

A tanulmány az OTKA K120605 és FK132014 pályázatok támogatásával készült.

## Irodalomjegyzék

- Agarwal, M., Tandon, A. (2010). Modeling of the urban heat island in the form of mesoscale wind and of its effect on air pollution dispersal. *Applied mathematical modelling*, 34(9), 2520–2530.
- André, K., Balogh, M., Baranka, Gy., Bozó, L., Bölöni, G., Grosz, B., Gyöngyösi, A. Z., Horányi, A., Lagzi, I.L., Leelőssy, Á., Mészáros, R., Mile, M., Szépszó, G., Szűcs, M., Tasnádi, P., Weidinger, T. (2013). Alkalmazott számszerű előrejelzés: numerikus időjárás- és csatolt modellek a gyakorlatban. ELTE, 247 p.
- Barlage, M., Miao, S., Chen, F. (2016). Impact of physics parameterizations on high-resolution weather prediction over two Chinese megacities. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(9), 4487–4498.
- Beck, J., Brown, J., Dudhia, J., Gill, D., Hertneck, T., Klemp, J., ... & Kim, J. H. (2020). An evaluation of a hybrid, terrain-following vertical coordinate in the WRF-based RAP and HRRR models. *Weather and Forecasting*, 35(3), 1081–1096.
- Bengtsson, L., Andrae, U., Aspelien, T., Batrak, Y., Calvo, J., de Rooy, W., ... & Költzow, M. Ø. (2017). The HARMONIE–AROME model configuration in the ALADIN–HIRLAM NWP system. *Monthly Weather Review*, 145(5), 1919–1935.
- Burger, M. J., Morrison, P. S., Hendriks, M., Hoogerbrugge, M. M. (2020). Urban-rural happiness differentials across the world. *World happiness report 2020*, 66–93.
- Chen, F., Kusaka, H., Bornstein, R., Ching, J., Grimmond, C. S. B., Grossman-Clarke, S., ... & Zhang, C. (2011). The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *International Journal of Climatology*, 31(2), 273–288.
- Chen, F., Yang, X., Zhu, W. (2014). WRF simulations of urban heat island under hot-weather synoptic conditions: The case study of Hangzhou City, China. *Atmospheric research*, 138, 364–377.
- Conti, S., Meli, P., Minelli, G., Solimini, R., Toccaceli, V., Vichi, M., Beltrano, C., Perini, L. (2005). Epidemiologic study of mortality during the Summer 2003 heat wave in Italy. *Environmental research*, 98(3), 390–399.
- Csomós, G., Kulcsár, B. (2011). Urbanizáció a 21. században: határtalan városnövekedés. *Debreceni Műszaki Közlemények 2011/3*, 33–40.
- Davidović, D., Skala, K. (2010). Implementation of the WRF-ARW prognostic model on the Grid. In *The 33rd International Convention MIPRO* (pp. 220–225). IEEE.
- Dezső Zs., Bartholy J., Pongrácz R., Lelovics E. (2012). Városi hősziget vizsgálatok műholdas és állomási mérések alapján. *Légekör*, 57, 170–173.
- Dian, C., Pongrácz, R., Incze, D., Bartholy, J., Talamon, A. (2019). Analysis of the urban heat island intensity based on air temperature measurements in a renovated part of Budapest (Hungary). *Geographica Pannonica*, 23(4).

- Doherty, M., Klima, K., Hellmann, J. J. (2016). Climate change in the urban environment: Advancing, measuring and achieving resiliency. *Environmental Science & Policy*, 66, 310–313.
- Egedy, T., Kovács, Z., Kondor, A. C. (2017). Metropolitan region building and territorial development in Budapest: the role of national policies. *International Planning Studies*, 22(1), 14–29.
- Fallmann, J., Emeis, S., Suppan, P. (2013). Mitigation of urban heat stress—a modelling case study for the area of Stuttgart. *DIE ERDE—Journal of the Geographical Society of Berlin*, 144(3-4), 202–216.
- Fallmann, J., Suppan, P., Emeis, S. (2013). Modeling of the Urban Heat Island (UHI) using WRF-Assessment of adaptation and mitigation strategies for the city of Stuttgart. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. EGU2013–4251).
- Fan, S. Y., Guo, Y. R., Chen, M., Zhong, J., Chu, Y., Wang, W., Huang, X.Y., Wang, Y.C., Guo, Y. H. (2008). Application of WRF 3DVar to a high resolution model over Beijing area. *Plateau Meteorol*, 27(6), 1181–1188.
- Faragó, T. (1981). Éghajlat és társadalom (Climate and society). *Magyar Tudomány*, 26(7-8), 503–509.
- Farda, A., Déué, M., Somot, S., Horányi, A., Spiridonov, V., Tóth, H. (2010). Model ALADIN as regional climate model for Central and Eastern Europe. *Studia Geophysica et geodaetica*, 54, 313–332.
- Gartland, L. M. (2012). *Heat islands: understanding and mitigating heat in urban areas*. Routledge. 192 p.
- Grell, G. A. (1993). Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Monthly Weather Review*, 121(3), 764–787.
- Giannaros, C., Nenes, A., Giannaros, T. M., Kourtidis, K., Melas, D. (2018). A comprehensive approach for the simulation of the Urban Heat Island effect with the WRF/SLUCM modeling system: The case of Athens (Greece). *Atmospheric Research*, 201, 86–101.
- Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., Pauleit, S. (2007). Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. *Built environment*, 33(1), 115–133.
- Giorgi, F., Bi, X. (2000). A study of internal variability of a regional climate model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D24), 29503–29521.
- Göndöcs, J., Breuer, H., Pongrácz, R., Bartholy, J. (2017). Urban heat island mesoscale modelling study for the Budapest agglomeration area using the WRF model. *Urban climate*, 21, 66–86.
- He, C., Valayamkunnath, P., Barlage, M., Chen, F., Gochis, D., Cabell, R., ... & Ek, M. (2023). *The Community Noah-MP Land Surface Modeling System Technical Description Version 5.0* (p. 5). NCAR Technical Note NCAR/TN-575+ STR, doi: 10.5065/ew8g-yr95.

- Hirt, S. (2013). Whatever happened to the (post) socialist city?. *Cities*, 32, S29–S38.
- Hu, Y., Jia, G., Pohl, C., Feng, Q., He, Y., Gao, H., Xu, R., van Genderen, J., Feng, J. (2015). Improved monitoring of urbanization processes in China for regional climate impact assessment. *Environmental Earth Sciences*, 73, 8387–8404.
- Hu, X. M., Nielsen-Gammon, J. W., Zhang, F. (2010). Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(9), 1831–1844.
- Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Shephard, M. W., Clough, S. A., Collins, W. D. (2008). Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D13).
- Islam, T., Srivastava, P. K., Rico-Ramirez, M. A., Dai, Q., Gupta, M., Singh, S. K. (2015). Tracking a tropical cyclone through WRF–ARW simulation and sensitivity of model physics. *Natural Hazards*, 76, 1473–1495.
- Janjić, Z. I. (1994). The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review*, 122(5), 927–945.
- Kovács, Z., Farkas, Z. J., Egedy, T., Kondor, A. C., Szabó, B., Lennert, J., Baka, D., Kohán, B. (2019). Urban sprawl and land conversion in post-socialist cities: The case of metropolitan Budapest. *Cities*, 92, 71–81.
- Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y., 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.
- Landsberg, H. E. (1981). *The urban climate*. Academic press. 275 p.
- Li, W., Cao, Q., Lang, K., Wu, J. (2017). Linking potential heat source and sink to urban heat island: Heterogeneous effects of landscape pattern on land surface temperature. *Science of the Total Environment*, 586, 457–465.
- Li, H., Zhou, Y., Wang, X., Zhou, X., Zhang, H., Sodoudi, S. (2019). Quantifying urban heat island intensity and its physical mechanism using WRF/UCM. *Science of The Total Environment*, 650, 3110–3119.
- Masson, V., Lemonsu, A., Hidalgo, J., Voogt, J. (2020). Urban climates and climate change. *Annual Review of Environment and Resources*, 45, 411–444.
- Martilli, A., Clappier, A., Rotach, M. W. (2002). An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models. *Boundary-layer meteorology*, 104, 261–304.
- Memon, R. A., Leung, D. Y., Liu, C. H. (2009). An investigation of urban heat island intensity (UHII) as an indicator of urban heating. *Atmospheric Research*, 94(3), 491–500.
- Miao, S., Jiang, W., Liang, P., Liu, H., Wang, X., Tan, J., Zhang, N., Li, J., Du, W., Pei, L. (2020). Advances in urban meteorological research in China. *Journal of Meteorological Research*, 34(2), 218–242.

- Molnár, G., Gyöngyösi, A. Z., Gál, T. (2019). Integration of an LCZ-based classification into WRF to assess the intra-urban temperature pattern under a heatwave period in Szeged, Hungary. *Theoretical and Applied Climatology*, 138, 1139–1158.
- Niu, G. Y., Yang, Z. L., Mitchell, K. E., Chen, F., Ek, M. B., Barlage, M., ... & Xia, Y. (2011). The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D12).
- Novák, N. (2020). Összefüggés a népesség növekedése és az urbanizáció között. *International Journal of Engineering and Management Sciences*, 5(1), 527–541.
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, 108(455), 1–24.
- Peng, S., Piao, S., Ciais, P., Friedlingstein, P., Otle, C., Bréon, F. M., Nan, H., Zhou, L., Myneni, R. B. (2012). Surface urban heat island across 419 global big cities. *Environmental science & technology*, 46(2), 696–703.
- Piracha, A., Chaudhary, M. T. (2022). Urban air pollution, urban heat island and human health: a review of the literature. *Sustainability*, 14(15), 9234.
- Pongrácz, R., Bartholy, J., Dezső, Z. (2006). Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis. *Advances in Space Research*, 37(12), 2191–2196.
- Pongrácz, R., Bartholy, J., Dezső, Z. (2010). Application of remotely sensed thermal information to urban climatology of Central European cities. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 35(1-2), 95–99.
- Powers, J. G., Klemp, J. B., Skamarock, W. C., Davis, C. A., Dudhia, J., Gill, D. O., Coen, J. L., Duda, M. G. (2017). The weather research and forecasting model: Overview, system efforts, and future directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8), 1717–1737.
- Riechert, M., Meyer, D. (2019). WRF-CMake: Integrating CMake support into the Advanced Research WRF (ARW) modelling system. *Journal of Open Source Software*, 4(41), 1468.
- Ritchie, H., Roser, M. (2018). Urbanization. *Published online at OurWorldInData.org*
- Rizwan, A. M., Dennis, L. Y., Chunho, L. I. U. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of environmental sciences*, 20(1), 120–128.
- Rummukainen, M. (2010). State-of-the-art with regional climate models. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(1), 82–96.
- Rummukainen, M. (2016). Added value in regional climate modeling. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 7(1), 145–159.
- Salamanca, F., Martilli, A. (2010). A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations—Part II. Validation with one dimension off-line simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, 99, 345–356.

- Schneider, S. H., Dickinson, R. E. (1974). Climate modeling. *Reviews of Geophysics*, 12(3), 447–493.
- Shastri, H., Ghosh, S. (2019). Urbanisation and surface urban heat island intensity (SUHI). *Climate Change Signals and Response: A Strategic Knowledge Compendium for India*, 73–90.
- Short, C. J., Petch, J. (2022). Reducing the spin-up of a regional NWP system without data assimilation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148(745), 1623–1643.
- Sinha, P., Mohanty, U. C., Kar, S. C., Dash, S. K., Kumari, S. (2013). Sensitivity of the GCM driven summer monsoon simulations to cumulus parameterization schemes in nested RegCM3. *Theoretical and applied climatology*, 112, 285–306.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., ... & Huang, X. Y. (2019). A description of the advanced research WRF model version 4. *National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA*, 145(145), 550.
- Smith, C., Lindley, S., Levermore, G. (2009). Estimating spatial and temporal patterns of urban anthropogenic heat fluxes for UK cities: the case of Manchester. *Theoretical and Applied Climatology*, 98, 19–35.
- Sobrino, J. A., Oltra-Carrió, R., Sòria, G., Bianchi, R., Paganini, M. (2012). Impact of spatial resolution and satellite overpass time on evaluation of the surface urban heat island effects. *Remote Sensing of Environment*, 117, 50–56.
- Stewart, I. D. (2011). A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*, 31(2), 200–217.
- Sun, Y., Zhang, N., Miao, S., Kong, F., Zhang, Y., Li, N. (2021). Urban morphological parameters of the main cities in China and their application in the WRF model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13(8), e2020MS002382.
- Tan, J., Zheng, Y., Tang, X., Guo, C., Li, L., Song, G., ... & Chen, H. (2010). The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. *International journal of biometeorology*, 54, 75–84.
- Termonia, P., Fischer, C., Bazile, E., Bouyssel, F., Brožková, R., Bénard, P., ... & Joly, A. (2018). The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. *Geoscientific Model Development*, 11(1), 257–281.
- Thompson, G., Field, P. R., Rasmussen, R. M., Hall, W. D. (2008). Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization. *Monthly Weather Review*, 136(12), 5095–5115.
- Unger, J., Sümeghy, Z., Kántor, N., Gulyás, Á. (2012). *Kisléptékű környezeti klimatológia*. JATEPress, Szeged. 221 p.



van Eimer, J., Häckel, H. (1984). *Wetter- und Klimakunde*. Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart. 275 p.

Yuan, F., Bauer, M. E. (2007). Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of environment*, 106(3), 375–386.

Internetes hivatkozások:

[1 – KSH] [https://nepszamlalas2022.ksh.hu/eredmenyek/elozetes\\_adatok/nsz2022-elozetes-adatok.pdf](https://nepszamlalas2022.ksh.hu/eredmenyek/elozetes_adatok/nsz2022-elozetes-adatok.pdf)

[2 – met.hu]

[https://www.met.hu/omsz/tevekenysegek/klimamodellezes/eghajlati\\_szelsosegek/](https://www.met.hu/omsz/tevekenysegek/klimamodellezes/eghajlati_szelsosegek/)

[3 – met.hu] <https://www.met.hu/omsz/tevekenysegek/klimamodellezes/felhasznalas/>

[4 – met.hu]

<https://www.met.hu/omsz/tevekenysegek/klimamodellezes/modellkiserletek/>

[5 – en.uim.cn] <https://en.iium.cn/index.php/Home/About/lishi.html>

[6 – met.hu] [https://www.met.hu/idojaras/aktualis\\_idojaras/napijelentes\\_2005-2019/](https://www.met.hu/idojaras/aktualis_idojaras/napijelentes_2005-2019/)