

dc_1939_21

MTA Doktori Értekezés

A lokális klímazónák városklimatológiai alkalmazása

Gál Tamás

Szeged

2022

dc_1939_21

Tartalom

Tartalom.....	1
1. Bevezetés	3
2. Városklíma	5
2.1. A városklíma kialakulásának okai.....	5
2.2. A városi éghajlat főbb jellegzetességei	6
2.3. Hőmérsékletmódosulás a városban.....	8
2.4. Városklíma és éghajlatváltozás	11
3. Lokális klímazónák	14
3.1. Lokális klímazónák rendszere és előzményei.....	14
3.2. Lokális klímazónák térképezése	19
3.3. Lokális klímazónák alkalmazása a városklimatológiai megfigyelések céljából.....	22
3.4. Lokális klímazónák alkalmazása városklíma modellezés céljából	26
3.5. További alkalmazási lehetőségek	32
4. Anyag és módszer	36
4.1. Vizsgált területek	36
4.2. WUDAPT LCZ térképezési módszer.....	38
4.3. Az átlagos városi hősziget intenzitás statisztikai modellje.....	39
4.4. A városi hősziget szempontjából ideális napok meghatározása.....	42
4.5. Alkalmazott klímaindexek.....	42
4.6. Humánkomfort paraméterek számításának részletei	43
4.7. Városi léptékű időjárás modellezés.....	44
4.8. Városi léptékű klímamodellezés.....	46
5. Eredmények	48
5.1. Lokális klímazónák térképezése	48
5.1.1. Szubjektív térképezés	48
5.1.2. Térképezés GIS módszerrel.....	50
5.1.3. Térképezési módszerek összehasonlítása.....	54
5.1.4. Kombinált térképezési módszer.....	56
5.2. A lokális klímazónákra reprezentatív mérőállomáshálózat létrehozása	57
5.2.1. Kezdeti megközelítés.....	57
5.2.2. Urban-Path városklíma monitoring rendszer állomásainak kijelölése.....	61
5.3. Urban-Path városklíma monitoring rendszer	65
5.3.1. A mérőállomás hálózat.....	65
5.3.2. A rendszerhez kapcsolódó adatfeldolgozás	68

5.4. A városklíma jellemzése a lokális klímazónák szerint.....	72
5.4.1. Léghőmérséklet mobil mérések alapján	72
5.4.2. Léghőmérséklet állomáshálózat alapján	76
5.4.3. Légnedvesség.....	81
5.4.4. Humánkomfort	84
5.4.5. Klímaindexek.....	87
5.5. A lokális klímazónák alkalmazása klíma és időjárás modellekben	88
5.6. A lokális klímazónák alkalmazása a klímaváltozás várható hatásainak felmérésében	93
5.7. A lokális klímazónák alkalmazása várostervezési kérdésekben.....	100
5.7.1. Városi zöld területek hatásainak elemzése.....	100
5.7.2. Város körüli véderdő hatásainak felmérése	106
6. Összegzés	110
Irodalom.....	113
Köszönetnyilvánítás	133

1. Bevezetés

Napjaink egyik, talán legfontosabb feladata az éghajlatváltozás és hatásainak pontos megismerése. Számos vizsgálat fókuszál erre a témára és sorra fogalmazódnak meg újabb tudományos kérdések is. A közelmúlt változásai a méréseknek köszönhetően jól ismertek és az éghajlat várható alakulásáról számos modell alapján egyre részletesebb kép rajzolódik ki. Meg kell azonban jegyezni, hogy mind a mérések, mind a klímamodellezés szempontjából a városi területek – térbeli léptékükből adódóan – kevésbé vizsgáltak és ismertek, holott napjainkra a világ népességének jelentős része már a városokban koncentrálódik.

A településeken a természetes területektől jelentősen eltérő felszín, geometria és humán aktivitás miatt egy sajátos éghajlat, a városklíma alakul ki. A városklíma számos éghajlati és meteorológiai tényezőre hat, így például a szélre, csapadéokra, légnedvességre, azonban a legjelentősebb hatás a termikus viszonyok esetén tapasztalható. Fontos tehát azt elemezni, hogy a változó éghajlat és a városklimatikus hatások eredőjeként milyen éghajlati viszonyok jönnek létre a globális és a hazai lakosság döntő többségére ható légköri közegben.

A városklimatológiában a hagyományos megközelítés hosszú évtizedekig a város-vidék különbségek vizsgálata volt. Belátható azonban, hogy a városi beépítés nem homogén, nem jellemezhető egy teljes városra kiterjedő területi átlaggal vagy akár néhány kiragadott helyszínre vonatkozó mérésekkel. Ugyanígy a városokat körülvevő vidéki terület sem egységes, fontos a természetes felszínnek jellege. Ennek a hagyományos megközelítésnek a hiányosságait már viszonylag hamar felismerték és igyekeztek különböző felszínosztályozások alkalmazásával kiküszöbölni ezt a túlzó leegyszerűsítést.

A városklimatikus célú felszínosztályozások kapcsán az áttörés bő évtizede történt a lokális klímazónák (LCZ) rendszerének megalkotásával, ami egy globálisan alkalmazható kellően egyszerű felszínosztályozási rendszer. A beépített területek osztályozása során a városi felszín hőmérsékletmódosító hatása állt a középpontban, így a kapott felszínosztályok lényegében a várható termikus hatások alapján különítik el ezeket a területeket. Az osztályozás fő célja kezdetben a városi mérések környezetének jellemzése volt, annak érdekében, hogy a különböző városokban végzett mérések összehasonlítható legyen.

Az LCZ rendszer kialakítását folyamatosan követtem, és elég korán felmerült bennem, hogy a rendszer a városi területekre kiterjedő térképezésnek is az alapja lehet. A lokális klímazónák térképezése lehetővé teszi, hogy a városi termikus viszonyokról egy előzetes képünk legyen, amit felhasználva célzottan lehetne telepíteni reprezentatív városi mérőállomásokat is, bízva abban, hogy így pontosabban megismerhetjük a városok hőmérsékletmódosító hatását és e hatások városon belüli eltéréseit. Az LCZ térképezés másik nagy lehetősége a városi léptékű időjárás és klímamodellezés, tekintve, hogy az eleve termikus szempontból homogén felszínborítási osztályok segíthetik pontosan leképezni a városok termikus reakcióit a modellekben.

A disszertációm keretében bemutatásra kerülő vizsgálatok fő céljait a következő pontok foglalják össze. Az (i) LCZ osztályok városi területeken történő térképezésének kidolgozása. Az (ii) LCZ rendszerre reprezentatív városklíma monitoring hálózat létrehozása. Az (iii) így létrehozott megfigyelő rendszer adatainak felhasználásával a lokális klímazónák komplex városklimatológiai elemzése. Az (iv) LCZ térképezésre és a monitoring rendszer mérési adataira építve a lokális klímazónák beépítése városi léptékű időjárás és klíma modellekbe. Az (v) éghajlatváltozás és a városklíma interakcióinak feltárása és jövőbeli projekciója. Az (vi) LCZ rendszer alkalmazása klíma adaptációs és városklíma mitigációs modellkísérletekben.

Az elmúlt bő évtizedben kutatásaim irányát az itt felsorolt célok határozták meg. Számos vizsgálat és publikáció keretében lépésenként kerültem közelebb ezekhez a célokhoz, amit ezúttal a dolgozatomban igyekszem összefoglalni. A feladat nehéz, hiszen ilyen feszes keretek között az elvégzett kutatómunka főbb epizódjait és ívét lehet csak ismertetni.

A szegedi Városklimatológiai Kutatócsoport tagjaként örömteli helyzetben vagyok, hiszen egy több fős, szerteágazó ismeretekkel rendelkező és a tudományos pálya eltérő pontjain álló kollegákkal pezsdítő kutatócsoporti munkában vehettem részt az elmúlt közel két évtizedben. Ennek a csapatnak a közös munkája előremutató tudományos eredményeket eredményezett, amelyek nemzetközi ismertséget és elismerést is hozott. Amennyire pezsdítő a tudományos munka, annyira nehéz az a helyzet, amikor az MTA doktora eljárás keretében az eredményeket össze kell foglalni és mintegy címkézni a közös munka gyümölcseit. Annyiban szerencsés azonban a helyzetem, hogy a kutatócsoporti munkában jelentős szerepem volt a kutatási ötletek megfogalmazásában már a kezdeti időkben is, ami idővel folyamatosan hangsúlyosabbá vált és lényegében mostanra már egyre hangsúlyosabb szerepem lett mind a kutatási irányok, mind a pályázatok kidolgozásában is. Ezek alapján igyekeztem összeállítani ezt a disszertációt, ami nem más, mint a kutatócsoport azon eredményeinek összefoglalása, amelyek elérésében fontos, jelentős vagy meghatározó szerepem volt. Természetesen azt látni kell, hogy ezeket az eredményeket nem érhettem volna el kiváló kollegáim és témavezetettjeim kiemelkedő teljesítménye és nemzetközi együttműködő partnereimmel végzett közös munka nélkül.

A disszertáció összeállításánál azt is fontos szempontnak tartottam, hogy lehetőség szerint egy koherens kutatási témát és annak teljes életútját lefedje, ezért is választottam a lokális klímazónákkal kapcsolatos vizsgálatainkat, hiszen ez lényegében a PhD fokozatom megszerzését követően került a kutatócsoport fókuszába és a munkában végig meghatározó szerepem volt. Mindazonáltal ez azt is jeleníti, hogy a PhD témám folytatásának tekinthető – amúgy jelentős és nemzetközi szinten is ismert – városi felszínparaméterek számításával kapcsolatos eredményeim túlnyomó többsége kimaradt dolgozatomból. Ezen megfontolásokból a dolgozat nagyrésztében többesszámot alkalmazok, a téziseim megfogalmazásánál viszont igyekszem egyértelművé tenni az adott eredménnyel kapcsolatos szerepemet. Bízok abban, hogy ez a struktúra és koncepció segít pontosan átlátni és értékelni tudományos fokozatszerzésemet követő munkásságomat és annak nemzetközi fogadtatását is.

2. Városklíma

A városklíma olyan helyi éghajlat, ami a beépített terület és a regionális éghajlat kölcsönhatásának eredményeként jön létre (WMO 1983, Oke, Mills 2017, Unger, Gál 2017). Mivel a világ népességének jelenleg több mint a fele (2018-ban 55,3%) és 2050-re várhatóan több mint a kétharmada (68,4%) városokban él (UN 2018), ezért kiemelkedő fontosságú a városi lakosságra közvetlenül ható éghajlati viszonyok pontos ismerete. A klímaváltozás és a városklíma interakciója számos következménnyel jár, többek között növeli az extrém időjárású helyzetek (pl. hőhullámok) előfordulását (IPCC 2021), így különösen fontos a két jelenség kölcsönhatásainak pontos megértése.

A városklíma jelenségéről mind angol mind magyar nyelven kimerítő részletességű művek születtek az elmúlt években (Oke, Mills 2017, Unger, Gál 2017, Stewart, Mills 2021), így ennek a fejezetnek az a célja, hogy a doktori értekezés keretében bemutatott tézisek és új tudományos eredmények háttérének áttekintéséhez elengedhetetlenül szükséges alapismereteket összegezzék, a teljesség igénye nélkül.

2.1. A városklíma kialakulásának okai

A mesterséges városi felszín jelentősen eltér a környező természetes felszínektől, továbbá a városok területén az emberi tevékenység is számos a természetestől eltérő hatást generál. A városklímát kialakító hatásokat a 2.1. ábra összegezi (Unger, Gál 2017). Ki kell emelni, hogy a hatások egy része (földrajzi helyzet, idő, időjárás) pusztán fizikai hatásmechanizmusokon keresztül egy külső befolyásoló és korlátozó tényező. A városméret és városszerkezet rövid időtávon tekintve egy statikus lokális léptékű befolyásoló tényező, míg a városi aktivitás foglalja össze mindazokat a hatásmechanizmusokat, amelyek az időben és térben rendkívül változatos emberi aktivitás eredményének tekinthetők. Fontos kiemelni, hogy a lokális hatások közül csak a városi aktivitás kötődik szorosan a mindennapos emberi tevékenységhez, azaz a város pusztá léte – szemléletesen kifejezve egy lakatlan város – is jelentős éghajlatmódosulást eredményezne.



2.1. ábra A városklímát befolyásoló tényezők összegzése (Unger et al. 2012)

Az emberi hatásokat részletezve meg kell jegyezni, hogy a városszerkezet és városméret keretében részletezett pontok összevonhatók, hiszen mindkét csoport a város fizikai megjelenésére (Oke, Mills 2017) vonatkozik. A városméret némileg statikusabb és az adott város alapvető dimenzióit (méret, szerkezet, megjelenés) rögzíti, míg a városszerkezet pontjai finomabb felbontásban tartalmazzák a fő hatótényezőket. Az atmoszférikus hatások szempontjából legjelentősebb tényezőket a következőképpen összegezzük (Oke, Mills 2017). Az építőanyagok, legyenek azok mesterséges vagy természetes eredetűek, jelentős

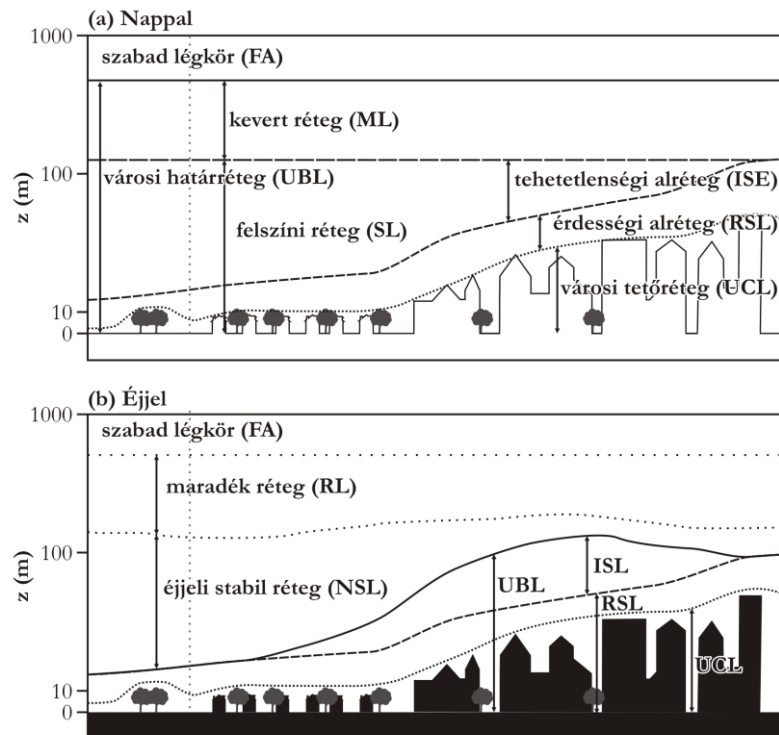
hatást gyakorolnak a sugárzási mérlegre és energiaegyenlegre, valamint befolyásolják a vízháztartást is. A felszínborítás az éghajlatra leginkább a vízháztartáson keresztül fejt ki hatást, így az evapotranspiráció vagy egyes városi területeken annak szinte teljes hiánya módosítja leginkább a városi légköri viszonyokat. A geometria, azaz a városi tereptárgyak 3D-s szerkezete, ideértve az utcakanyonok paramétereit és kitettséget alapvető befolyással bírnak sugárzási egyenlegre és a légáramlásra. A városi aktivitás szintén fontos szerepet tölt be a klímamódosításban. Néhány esetben a hatások ciklikusan jelennek meg, köszönhetően a tevékenység ciklikus voltára. Számos emberi kibocsátásnak jellegzetes napi (közlekedés, fűtés, hűtés) és heti (ipari tevékenység, munkahelyek kibocsátásai, munkába járással kapcsolatos közlekedés) menete van. Az emberi tevékenység hatására valamilyen kibocsátás (hő, légszennyezés, víz) történik, amely közvetett vagy közvetlen hatással van a városi légkör működésére (pl. felhőképződés), sugárzási mérlegre (pl. aeroszolok sugárzásátvitellel gyakorolt hatásai) vagy az energia egyenlegre (pl. antropogén hő).

2.2. A városi éghajlat főbb jellegzetességei

Az előbb említettek alapján a külterülethez képest eltérő felszín és az emberi tevékenység hatásainak köszönhetően kialakul a városok területén egy sajátos tulajdonságokkal jellemezhető éghajlat. Ennek az éghajlatnak számos tulajdonsága mutat merőben eltérő jeleget, mint az ugyanazon területen található háttérklíma.

Klimatológiai szempontból a városklíma egy lokális, vagy mezo γ (Orlanski 1975) léptékű éghajlat. Fontos tulajdonsága a mozaikossága, azaz a rendkívül változatos városi felszín hatására nagyon eltérő mikroklimatikus hatások lépnek fel. A városklímát felfoghatjuk tehát ezeknek a nagyszámú mikroklimatikus hatásoknak az eredőjeként is (Stewart, Mills 2021). Pont ez a tulajdonsága az, amely jelentősen megnehezíti vizsgálatát, így például léghőmérséklet mérés során kihívásokkal teli feladat reprezentatív mérési helyet választani, a felszínhőmérsékletet vizsgálva pedig jelentősen eltérő következtetések vonhatók le különböző felbontású műholdképek vagy légifelvételek alkalmazásával.

A városok felett a légkör szerkezete (2.2. ábra) is jelentősen eltér a természetes területektől (Oke, Mills 2017). A fő különbség, hogy a városi határréteg (UBL) alján megjelenik egy kitüntetett jelentőségű réteg, a városi tetőréteg (UCL), amely lényegében a felszín és az átlagos tetőszint közötti térfogatot fedi le, és az ebben uralkodó éghajlati viszonyok közvetlenül kihatnak a városok lakosaira. Ebben a rétegben jelentős az átkeveredés, így a megszokott függőleges hőmérsékleti profil helyett szinte konstans a magassággal vett változás, valamint a szélesebb magassággal való változása sem követi a logaritmikus szélprofilot. A városok területén a felszíni vagy Prandtl-réteg (SL) szerkezete módosul, köszönhetően a tagolt felszín jelentősebb súrlódásának és így az érdességi alréteg (RSL) magasabbra tolódásának. A határréteg napi dinamikája szempontjából, a nagy különbség a határréteg éjjeli vastagsága, ami – a jelentősebb érdesség és a külterülethez mérten emelkedett hőmérsékletnek köszönhetően – jóval magasabb a városok területén, mint a külterületen. Továbbá azt is ki kell emelni, hogy az UCL vastagsága nem változik a napi menet során.



2.2. ábra A városi légkör szerkezete (Oke, Mills 2017)

A városi sugárzási mérleg, valamint az energia és vízegyenleg városi módosulása alapvetően befolyásolja az UCL-ben uralkodó viszonyokat. Ezeket a módosulásokat részleteiben bemutatja Unger, Gál (2017), így itt csak a főbb következtetések ismertetésére térek ki.

A sugárzási mérleg kapcsán kijelenthető, hogy érdemi eltérés a külterület és a város között nincsen, csak a mérleg tagjaiban van némi átrendeződés, így a rövidhullám esetén a szennyezett városi levegő miatt gyengül mind a beérkező mind a visszaverődő tag is, míg a hosszuhullám esetén megnő a felszín kisugárzása és a légkör felszín irányába mutató sugárzása is, azonban az eredő hosszuhullámú sugárzási mérlegben sem mutatkozik jelentős különbség a vidékhez képest.

Az energiaegyenleg szempontjából jelentős változások figyelhetők meg (Unger, Gál 2017). A városok területén megjelenik az energiaegyenlegnek egy új tagja, az antropogén hőtermelés, amely évszaktól és a város háttérklímájától függően $5-200 \text{ Wm}^{-2}$ értéket vehet fel, azaz adott esetben a teljes sugárzási mérlegben akár meghatározó szerepet is betölthet. A másik jelentős városi hatás a látens, érzékelhető és tárolt hő arányainak megváltozása, egészen pontosan a két utóbbi tag növekedése a látens tag kárára. Ennek az lesz az eredménye, hogy a városi felszín energiabevétele jelentősebb mértékben okozza a városi levegő melegedését illetve a felszín hő tartaléka nagyobb lesz az éjjeli órákban.

Az látens hőt érintő változás megértéséhez elengedhetetlenül szükséges felhívni a figyelmet a városi vízegyenleg változásaira (Unger, Gál 2017). A vízegyenleg bevételi oldalán a városokban megjelennek további tagok, amelyek hozzáadódnak a csapadékból származó bevételhez, így az antropogén égési folyamatok által a városi légtérbe jutó víz és a távolabbi vidékekről a városba szállított víz. Sokkal jelentősebb változást okoz azonban a városi területeken a vízzáró felszínek arányának növekedése és a csatornázás miatt jelentősen felgyorsított – jelentős részben felszín alatti – lefolyás. Ennek hatására jóval kisebb mértékű a párolgás a városi felszíneken, amely az energiaegyenlegnél a látens hő kapcsán említett változást okozza, így jelentősen hozzájárul a magasabb városi léghőmérséklet kialakulásához.

A 2.1. táblázat összegzi a klímparaméterek és tulajdonságok eltéréseit a városok területén. Oke (1997) összegzése egy 1 millió fős város alapján készült, de lényegében megadja az általános trendeket. A változások közül kiemelkedik a léghőmérséklet megváltozása, hiszen a számos tulajdonság (albedó, antropogén hő, hosszuhullámú bevétel, párolgás, hőtárolás, stb.) eltéréseinek hatásai mind a magasabb (éjjeli) hőmérséklet irányába mutatnak, valamint ez az emelkedett hőmérséklet kihat számos más éghajlati jellegzetességre (köd, hó, csapadék, stb.). Továbbá ki kell emelni, hogy a magasabb hőmérséklet számos olyan hatással is jár, ami közvetlenül hat a városok lakosságára, így a hőhullámok terhelő időszakának növekedése, a termikus komfortviszonyok, a hűtési és fűtési igény vagy akár a növények rügyfakadása (Unger, Gál 2017). Mindez alátámasztja az értekezés fókuszának kiválasztását, azaz a város hőmérsékletmódosító hatásának elemzését, hiszen a termikus viszonyok pontos megértése hozzájárul a teljes városi éghajlat megértéséhez is.

2.1. táblázat A jellemző felszíni és légköri tulajdonságok, és a klímparaméterek megváltozása egy közepes földrajzi szélességen fekvő nagyvárosban (Oke 1997)

Paraméter vagy tulajdonság	Változás
albedó	alacsonyabb
emisszivitás	kisebb vagy nagyobb
antropogén hő	nagyobb
Aitken magvak	több
nagy és óriás magvak	több
turbulencia	nagyobb
szélsébség	csökken (növekszik)
szélirány	eltérül
UV-sugárzás	jelentősen kevesebb
napsugárzás	kevesebb
infravörös bevétel	nagyobb
látótávolság	csökken
párolgás	kisebb
konvektív hőáram	nagyobb
hőtárolás	nagyobb
léghőmérséklet	magasabb
légnedvesség	alacsonyabb vagy sokkal magasabb
felhőzet	növekszik
köd	több vagy kevesebb
hó	kevesebb
zivatarok	több
csapadék	több

2.3. Hőmérsékletmódosulás a városban

A városi felszín és az energiagazdálkodás eltérései egy a természetes területektől jelentősen eltérő hőmérsékletű környezet létrejöttéhez járulnak hozzá. A magasabb hőmérséklet nem csak a levegőre, hanem a felszínre és a talajra is kiterjed. A jelenséget a városi hősziget (urban heat island - UHI) fogalma írja le. Ez legegyszerűbben megfogalmazva város – és annak részei – valamint a környező vidéki terület hőmérsékleti különbsége. Fontos kiemelni, hogy a környező vidéki terület hőmérsékleti viszonyaira általában úgy tekintünk, mintha az a természetes viszonyokat jelentené a város helyén csak a városi beépítés nélkül (Unger, Gál 2017, Stewart, Mills 2021).

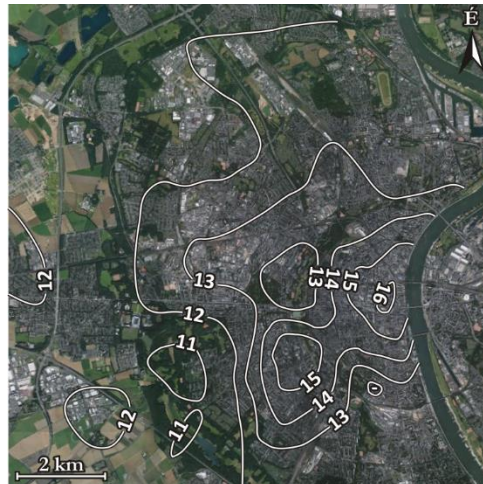
A városi hősziget különböző típusait lehet elkülöníteni, attól függően, hogy azok mely közegben jelentkeznek, így (i) a határretegben (boundary-level UHI - BUHI), (ii) a tetőszinti rétegben (canopy-level UHI - CUHI), (iii) a felszínen (surface UHI - SUHI), valamint (iv) a talajban (substrate UHI - GUHI) (Stewart, Mills 2021). Itt meg kell jegyezni, hogy a városklimatológiai tudományos közösségben hagyományosan az UHI rövidítést a tetőszinti

rétegben tapasztalható hősziget (CUHI) azonosítják, mivel a legtöbb mérést és modellezést alkalmazó vizsgálat erre a közegre koncentrált, és egyben ez az a közeg, ami leginkább hat a városi lakosságra.

A talajban megjelenő hősziget (GUHI) elsődleges oka az épületekből származó antropogén hő (Menberg et al. 2013, Arola, Korkka-Niemi 2014) és eltérés nagyságrendje néhány °C (2.3. ábra). A közepes és alacsony szélességeken ez a jelenség igen korlátozott jelentőséggel bír, azonban magas szélességeken a permafroszt területein található városokban és falvakban súlyos problémákat okozhat, hiszen adott esetben ez a néhány °C különbség hozzájárulhat a fagyott talaj jelentősebb olvadásához (Hinkel et al. 2004, Melnikov et al. 2022).

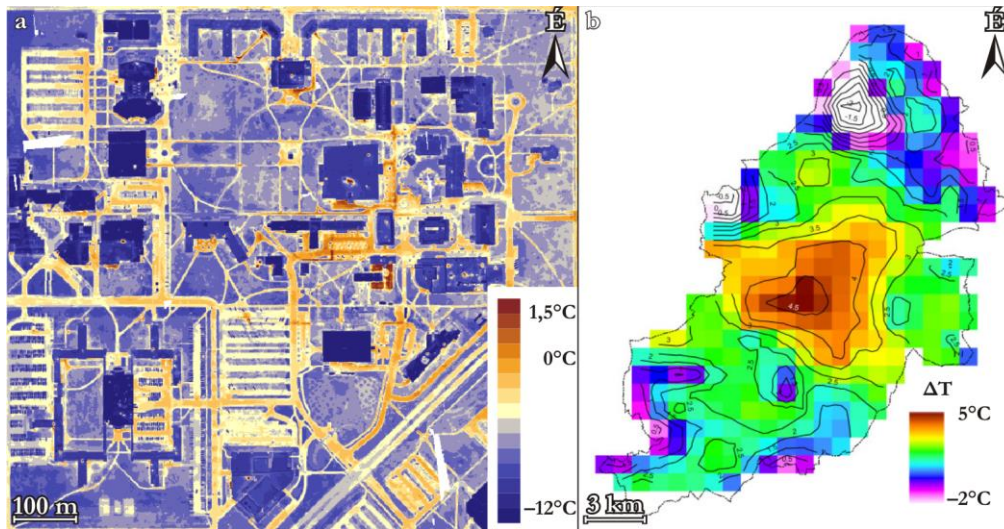
Az elmúlt évtizedekben igen jelentős számú vizsgálat koncentrált a városi felszínhőmérséklet vizsgálatára (SUHI), köszönhetően annak, hogy könnyen elérhető műholdas adatforrásokkal elemezhető. A SUHI első megfigyelését Rao (1972) publikálta, majd 2018-ig a témával foglalkozó – nemzetközi folyóiratban megjelent – publikációk száma megközelítette az 500-at (Zhou et al. 2018). A SUHI vizsgálatában hazai kutatók is jelentős eredményeket értek el (Pongrácz et al. 2006, 2010, Unger et al. 2010, Fricke et al. 2020).

A felszínhőmérséklet kapcsán fontos kérdés a vizsgálat léptéke, köszönhetően annak, hogy igen jelentős különbség tapasztalható a felszínhőmérséklet térbeli szerkezetében, ha eltérő felbontású felvételek segítségével vizsgálják (2.4. ábra). Nagy (pár m-es) felbontás esetén (Savelyev, Sugumaran 2008, Unger et al. 2010) a különböző felszínek eltérő hőmérsékletei városi hősziget helyett inkább felszín hőmérséklet mintázatot rajzolnak ki (2.4.a ábra) az eltérő mikroklimatikus hatásoknak megfelelően. Kis felbontás esetén (10 – 1000 m) a többségében úrbázisú érzékelők mérési adatai mintegy kevert mintaként értékelhetők, azaz a számos különböző városi felszínhőmérséklet eredőjeként. Ennek köszönhetően ezeken a felbontásokon (2.4.b ábra) már megjelenik a klasszikus városi hősziget forma (Pongrácz et al. 2006, 2010, Tomlinson et al. 2012). Fontos megjegyezni, hogy a tetők és a talajfelszín hőmérsékleti viszonyi napszaktól függően igen eltérően alakulnak, ezért kritikusan kell elemezni főleg a kis felbontású műholdas produktumok eredményeit. A felszín és léghőmérséklet közötti kapcsolat pontos meghatározása összetett feladat és városi környezetben a mikrometeorológiai megközelítések (pl. hő-fluxus, forrásterület) elengedhetetlenek hozzá (Voogt, Oke 2003), így különös körültekintést igényel, ha a léghőmérsékletre vonatkozó összefüggéseket a felszínhőmérséklet alapján próbálunk feltárni.



2.3. ábra A talajvíz hőmérsékletének (°C) éves átlagos területi eloszlása 15 m mélyen (2009, Köln) (Menberg et al. 2013)

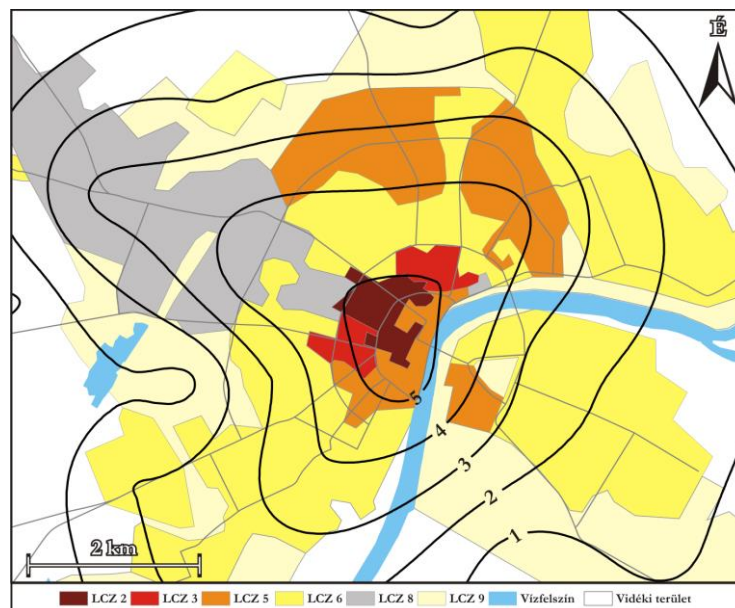
al.
az



2.4. ábra Nappali felszíni hőmérsékleti mintázat („hősziget”) (a) nagy (Cedar Falls, Iowa) és (b) kis (Birmingham, Anglia) felbontásban (Saveljev, Sugumaran 2008, Tomlinson et al. 2012)

A városi éghajlat legmeghatározóbb és a lakosokra legnagyobb hatást kifejtő jelensége a léghőmérséklet módosulása, azaz a városi hősziget. A határrétegben található hősziget (BUHI) kevésbé kutatott, köszönhetően az összetettebb mérési módszereknek (torony, repülő, sodar) (Unger, Gál 2017), viszont a városi tetőszinti rétegben megfigyelt léghőmérsékleti többlet (CUHI vagy a továbbiakban UHI) a városklimatológia legismertebb jelensége. A jelenség első említését Luke Howard *The Climate of London* című munkájához kötik (Howard 1818, 2007, Mills 2008). Stewart (2011a) több mint 500 olyan munkát említ, amely a városi hősziget megfigyelésével foglalkozott 1950-2007 között. A téma a hazai szakirodalomban is nagy múltra tekint vissza (Probáld 1974, Károssy, Gyarmati 1980, Miklósi 1981, Pelle 1983, Roncz 1984, Unger 1992).

A városi hősziget maximális kifejlődése száraz, nyugodt, felhőtlen időjárás esetén, a naplementét követő 3-5 órában figyelhető meg (Lowry 1977) és követi a város beépítésének térbeli jellegzeteségeit (2.5. ábra). Maximális intenzitása elérheti a 8-9 °C-ot (Tzavali et al. 2015), egy bizonyos határ felett városmérettől függetlenül.



2.5. ábra A városi hősziget (°C) térbeli szerkezete a napnyugtát követő 6. órában a 2014. 08. 29-a és 30-a közötti éjszakán, Szegeden (Unger et al. 2017)

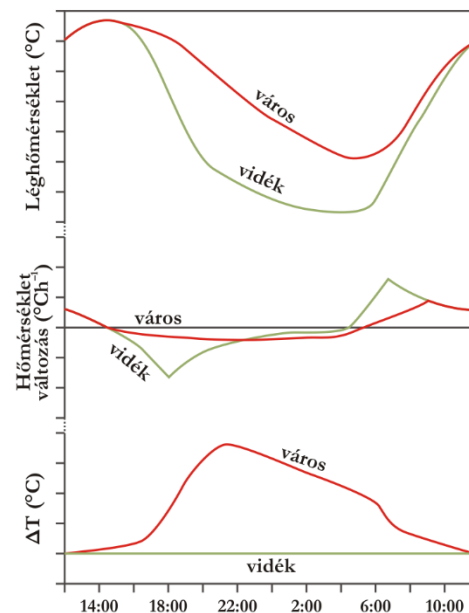
A hősziget kialakulása közvetlenül nyomon követhető, ha megvizsgáljuk a hőmérséklet napi meneteit (2.6. ábra). A naplemente körüli órákban a lehűlés jóval lassabb a városi területen a külterülethez viszonyítva, ennek nyomán kialakul a hőmérsékleti többlet, ami a városi és vidéki hűlési ütem kiegyenlítődéssel az egész éjjel megmarad. Hajnalban viszont a városi területek jóval lassabban tudnak melegedni köszönhetően az épületek árnyékoló hatásának – így a hősziget megszűnik, vagy adott esetben, a délelőtti órákban át is tud fordulni és megjelenik a városi hideg sziget (Unger, Gál 2017).

2.4. Városklíma és éghajlatváltozás

Napjaink legjelentősebb problémája éghajlatváltozás. A Föld éghajlati rendszere földtörténeti időskálán is jelentős idő alatt el a mai állapotát, miközben jelentős változásokat is mutatott. Napjainkban azonban olyan gyorsaságú változásokat tapasztalunk, amelyre földtörténeti távlatban nem volt példa (IPCC 2021). Az üvegház hatású gázok kibocsájtása és koncentrációjának növekedése meghatározza a sugárzási kényszeren keresztül a globális hőmérsékletet (Allen et al. 2009, Rogelj et al. 2019). A napjainkban tapasztalt éghajlatváltozás egyértelműen az emberi tevékenység hatására jön létre (IPCC 2014). A szilárdan megalapozott szakmai konszenzust megerősíti az is, hogy Lynas et al. (2021) szerint a témával kapcsolatban megjelenő referált publikációk több mint 99%-a egyetért ezzel.

A megfigyelések alapján (IPCC 2021) a felszínközeli léghőmérséklet – 1985-1900-hoz viszonyított – változás globális átlaga meghaladta az $\sim 1,1^\circ\text{C}$ -ot, azonban egyes régiókban ennél jóval jelentősebb (szárazföldeken $\sim 1,2^\circ\text{C}$, Európában $\sim 2,1^\circ\text{C}$, É-i sarkvidéken $\sim 2,7^\circ\text{C}$). Hazánkban ez a változás 1901-től $1,2^\circ\text{C}$ (Lakatos et al. 2021). A hőmérséklet emelkedése kihat az időjárási és éghajlati rendszer egészére, aminek számos kézzelfogható következménye van, mint például a tengerszint növekedése, tengeri jégtakaró területének csökkenése, valamint az extrém időjárási jelenségek bekövetkezése (IPCC 2021).

Az éghajlatváltozás valamint a városklimatológia témája a klímakutatás két legjelentősebb területe. A két terület kapcsolatát az IPCC jelentéseinek tükrében érdemes megvizsgálni, hiszen ezek jól szemléltetik a folyamatot, ahogy a két terület közeledik egymáshoz. Az AR5 jelentésig (IPCC 2013) a városklimatológia eredményei az IPCC jelentéseiben főként a célból jelennek meg, hogy megvizsgálják és kizárják a városi hősziget és az urbanizációt, mint a melegedés okát. Az IPCC 2013-as jelentésében például hosszas elemzés szerepel arról, hogy vannak ugyan területek, ahol a gyors városiasodás hatására növekvő UHI következtében megfigyelhetünk melegedést, azonban megállapította a jelentés, hogy olyan területen, ahol nincs lényegi urbanizáció, ott is megfigyelhető a vidéki területek mérésében a melegedés (pl. London - Jones, Lister 2009, Wilby et al. 2011, Sydney, Melbourne és Hobart - Trewin 2012). Az AR5 hatásokkal, alkalmazkodással és sérülékenységgel kapcsolatos részében (IPCC 2014) már megjelenik a városklíma és a klímaváltozás együttes értékelése. A jelentés azonosítja a városi hősziget szerepét abban, hogy a klímaváltozás hatásait felerősíti például a hőstresszel kapcsolatos egészségügyi problémák



2.6. ábra A léghőmérséklet napi menete, a hőmérsékletváltozás a városban és a külterületen, valamint a hősziget intenzitás (ΔT) ideális körülmények mellett (Oke 1982, Unger et al. 2012)

(Hajat et al. 2010), a hűtési energiaigény (Lemonsu et al. 2013) területén, valamint kiemeli, hogy a hőhullámok hosszának növekedéséhez és súlyosbodásához is hozzájárul (Rosenzweig et al. 2009, Mohan et al. 2011). A jelentés továbbá rámutat arra is, hogy a klímaváltozás is hat a városi hőszigetre, bár itt az UHI csökkenésére (McCarthy et al. 2010, Fröh et al. 2011, Oleson 2012) és növekedésére (Wilby 2007, McCarthy et al. 2011, Adachi et al. 2012) is vannak példák, ami rámutat arra, hogy a témával kapcsolatban továbbra is vannak megválaszolatlan kérdések. A városklíma és az éghajlatváltozás kapcsolatát hasonló megközelítésben azonban jóval részletesebben áttekinti az AR6 hatásokkal, alkalmazkodással és sérülékenységgel kapcsolatos része (IPCC 2022), külön bemutatva a városi hősziget kialakulásának okait, a szerepét a hőhullámok során (Founda, Santamouris 2017, Zhao et al. 2018, Lo et al. 2020), a hőstressz és a mortalitás (Taylor et al. 2015, Winqvist et al. 2016, Schuster et al. 2017, Xu et al. 2020) és a városi lakosság produktívitasának (Zander et al. 2015, Zhao et al. 2016) kapcsolatát, valamint a városi hőtöbblet gazdasági hatásait is (Véliz et al. 2017, Bezerra et al. 2021). Kiemelhető az is, hogy az AR6 esetén már a fizikai alapokkal foglalkozó rész (IPCC 2021) is kiemelten foglalkozik a városklímával, pontosan összegezi a városklíma kialakulásának okait és helyesen rávilágít arra, hogy az éghajlatváltozás hatásaira additív módon a városi hatások is rárakódnak. Mint ahogy ezek a példák is rámutatnak, a városklimatológiai ismeretek egyre inkább beépülnek a klímaváltozás ismeretei közé, árnyalva és finomítva a jelenben megfigyelt és jövőre vonatkozó elemzéseket.

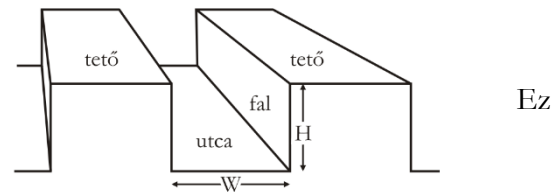
Összegezve a klímaváltozás hatásait módosító főbb városklimatikus eredetű változásokat, kijelenthető, hogy (i) a városi hősziget miatti magasabb éjszakai és minimum hőmérsékletek fokozzák a hőhullámokat (Fujibe 2009, Lokoshchenko 2017, Unger et al. 2018c) és (ii) a hőterhelést (Phelan et al. 2015, Unger et al. 2018a), (iii) a városi területek szárazabbak (Lokoshchenko 2017, Unger et al. 2018a, 2018b, Bian et al. 2020), így az érzékelhető hó aránya nagyobb lesz, (iv) csökkentik a szélsőségeket (Wu et al. 2017, Peng et al. 2018), (v) szerepet játszanak az extrém csapadékok kialakulásában (Schlünzen et al. 2010, Ganeshan et al. 2013, Daniels et al. 2016, Li et al. 2020) és hatásaik (villámárvizek) erősítésében, továbbá fokozza az energiaszükségletét és így a CO₂ kibocsátását a városoknak (Santamouris et al. 2015).

A klímaváltozás városklímára gyakorolt hatásainak összegzése ellenben jóval nehezebb feladat, tekintve, hogy leginkább modellkísérletek állnak csak a rendelkezésre a jövőbeli változások felmérésére, így a feltárt összefüggések mindenképpen bizonytalansággal terhelték. Az bizonyosnak tűnik, hogy a városi hősziget változása egy nagyságrenddel kisebb mértékű, mint a várható melegedés (Fröh et al. 2011, Kusaka et al. 2012, Sachindra et al. 2016, Masson et al. 2020a). Meg kell jegyezni, hogy a modellkísérletek nagy része nem veszi figyelembe az urbanizáció alakulását, ami fokozza a bizonytalanságot. Mindazonáltal a városok beépítés változásának figyelembe vétele, a témában megjelent munkák alapján (Fu, Weng 2009, Lemonsu et al. 2015, Deilami, Kamruzzaman 2017), a szimulációk során számos megoldandó feladatot tartogat, továbbá a vizsgálatok fókuszában leginkább a mitigációs stratégiák állnak (Žuvela-Aloise et al. 2016, Aboelata, Sodoudi 2019, Gál et al. 2021a).

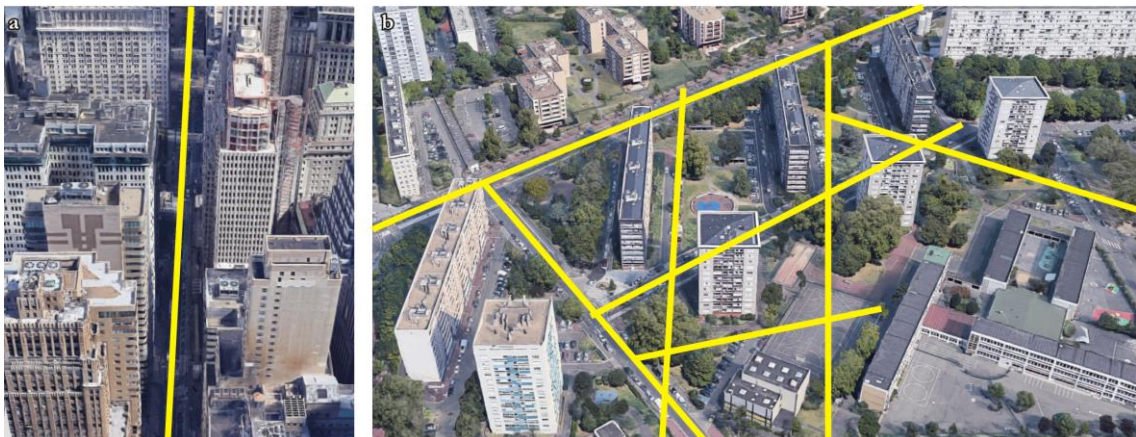
A globális és a regionális modellek nem rendelkeznek kellő felbontással a városi folyamatok követésére, valamint nem is veszik figyelembe a lokális léptékű városi hatásra létrejött folyamatokat. A városklímamodellek (pl. MULKIMO_3 (Sievers 1995), ENVI-met (Bruse, Fler 1998), Town Energy Balance modell (Masson 2000), PALM-4U (Resler et al. 2017)) lehetőséget teremtenek arra, hogy a városi folyamatokat figyelembe vegyük a klímaprojekciók elkészítése során. Az elmúlt évtizedekben gyors fejlődés ment végbe ezen a terén (Kusaka et al. 2001, Martilli et al. 2002, Lemonsu et al. 2012, Yang et al. 2015, Lee et al. 2016, Ryu et al. 2016). A gyors fejlődés oka részben az Weather Research and Forecasting (WRF) modellnek köszönhető, mivel annak keretein belül viszonylag könnyű városi parametizációkat fejleszteni.

A városi klímamodellek fő funkciója az anyag és hőáramok valamint a légmozgásra gyakorolt hatások átvitele a városi felszín és a szabad légkör között. A modelleket felépítésük alapján három csoportba sorolhatjuk. A (i) kétdimenziós modellek, ahol a városokat a megváltozott talaj, felszínborítás, növényzeti, hőtani valamint felszínérdességi paraméterekkel írják le, anélkül, hogy a három dimenziós felszín pontosan figyelembe vennék (Dandou et al. 2005, Best et al. 2006, Liu et al. 2006, Chen et al. 2011, Garuma 2018). Az (ii) egyrétegű modellek már figyelembe veszik a vertikális szerkezetet a városi kanyon koncepcióját alkalmazva (Masson 2000, Kusaka et al. 2001). A (iii) többretegű modellek jóval hatékonyabban közelítik a vertikális cserefolyamatokat az UCL és az UBL valamint a szabad légkör között (Martilli et al. 2002, Hagishima et al. 2005, Dupont, Mestayer 2006, Hamdi, Masson 2008, Schubert et al. 2012). A modellek közül a legkomplexebbek (iv) az épület energetikát is figyelembe vevő megoldások (Reinhart, Davila 2016, Ang et al. 2020).

A legtöbb modell a városi kanyon koncepcióján alapul (2.7. ábra), amit a 70-es években vezettek be (Nunez, Oke 1977). a városi felszín parametrizálásának számítási szempontból hatékony és frappáns módja, mivel a komplex városi felszín falakkal, tetőkkel és utcafelületekkel azok fizikai jellemzőivel reprezentálják. A koncepció jól teljesít a kompakt beépítésű városi területeken, ahol a városi kanyont egyértelműen meg lehet határozni. Példaként a 2.8.a ábra egy kompakt beépítésű területen lévő városi kanyon középvezét mutatja be, ahol egyértelműen látszik, hogy a koncepció megragadja a komplex városi felszín lényegi elemét. Nyitott beépítésű területen (2.8.b ábra) azonban még a városi kanyon beazonosítása is igen nehézkes. Ebben a helyzetben több hasonlóan valószínű és helyes lehetőség is van (2.8.b ábra) a városi kanyonok meghatározására, amiből az látszik, hogy a koncepció itt nem tudja egyértelműen megragadni a városi felszín lényegi elemét. Néhány modell eltérő megközelítést alkalmaz, amire példa a MUKLIMO_3 modell (Sievers 1995), ahol a városi felszín egy porózus közegeként képezi le az eljárás, ami nyitott beépítésű területeken jóval ígéretesebb koncepció.



2.7. ábra A városi kanyon (Nunez, Oke 1977) és



2.8. ábra Példák a városi kanyon meghatározására (a sárga vonal a kanyon középvezét a zárt (a: New York) és nyitott városi (b: Párizs) beépítésű típusokban)

Egyértelműen látszik az a törekvés is, hogy a városi hatásokat megpróbálják implementálni globális (Jackson et al. 2010, McCarthy et al. 2010, Katzfey et al. 2020, Sharma et al. 2020, Hertwig et al. 2021) vagy regionális (Kusaka et al. 2012, McCarthy et al. 2012, Trusilova et al. 2016, Daniel et al. 2019) modellekben, mivel ez jelentős előnyökkel járna a kapcsolt városklíma modellek alkalmazásánál.

3. Lokális klímazónák

3.1. Lokális klímazónák rendszere és előzményei

A lokális klímazónák koncepciójának közvetlen elődjének a városi klímazóna osztályozás tekinthető, amelyet Oke (2004) dolgozott ki. Ezt a munkát később Oke a PhD hallgatójával együtt vitte tovább, amelynek eredményeképp a lokális klímazónák jelenleg is ismert és a városklimatológiában széleskörűen elterjedt koncepciója kialakításra került (Stewart, Oke 2012). A rendszer megértését segíti, ha felvázoljuk a városi felszínosztályozások fejlődését.

A várost érintő felszínosztályozások fő célja az összetett városi felszín klímára gyakorolt hatása alapján történő osztályozása és a homogén területek lehatárolása (Oke 2004). Az így létrejött klímazónák fő jellegzetessége, hogy területükön a város klímamódosító hatása homogén, a klímáparaméterek és meteorológiai állapotjelzők módosulása közel egységes (Oke 2004), valamint a zónákon belül a felszín a meteorológiai állapotjelzők változásait közel homogén termikus változásokkal követi.

A városi klímazóna osztályozására több koncepciót is kidolgoztak. Az egyik első ilyen osztályozás keretében London területét osztották fel 4 különböző régióra, melyek klímájukban és beépítési jellegzetességeikben térnek el (Chandler 1965). Később Auer (1978) nevéhez köthető egy városi-vidéki területekre kiterjedő osztályozás, majd Ellefsen (1991) dolgozta ki a városi felszín zónák (Urban Terrain Zones – UTZ) rendszerét, amelyet 10 amerikai városon alkalmazott. Wilmers (1990) klímatópokot határozott meg Hamburg példáján, amely munkához a terület jellegzetes szél és hőmérsékleti viszonyait, felszínhasználatát, beépítési viszonyait, a domborzatot és a népsűrűséget vette figyelembe. Scherer et al. (1999) szintén egy klímatóp osztályozást alkalmazott, amely hasonló alapelvekből kiindulva jóval több osztályt alkotott meg Basel városa esetén. Auer és Ellefsen osztályozási rendszereit Oke (2004, 2008) ötvözte a 7 osztályból álló városi klímazónák (Urban Climate Zones – UCZ) rendszerében. Loridan, Grimmond (2011) dolgozott ki egy olyan osztályozást, amely alapvetően az energiaegyenleg, növényzet indexek és az aktív felszín felületarányának meghatározásán alapul. Oke (2004) rendszerének továbbfejlesztése a lokális klímazónák (Local Climate Zones – LCZ) rendszere, ahol nem csak a városi, hanem a vidéki területek is megjelennek a rendszerben, megkönnyítve a város-vidék klimatológiai eltéréseinek elemzését (Stewart, Oke 2012). A továbbiakban a felszínosztályozások fejlődésének legfontosabb momentumait mutatom be részletesen.

Az egyik első meteorológiai szempontú városi felszínosztályozás Auer (1978) nevéhez köthető. Osztályozásának fő szempontjai a következők voltak: (i) egyszerű, széleskörűen elfogadott nevezéktan alkalmazása, (ii) lehetséges legyen az osztályozási séma átalakítása más területek igényei alapján, (iii) adjon lehetőséget az induktív generalizálásra. A felmérés alapja alacsony magasságú repülések során készített fényképek kiértékelése volt. A későbbi osztályozások részben ezen a módszeren alapulnak. Az osztályozási rendszert alkotó egyes klímazónák jellegzetességeit a 3.1. táblázat szemlélteti.

Az Ellefsen által megalkotott (Ellefsen 1991) Városi Felszín Zónák (Urban Terrain Zone) alap gondolata az volt, hogy az épületek elhelyezkedésének iránya jelentősen befolyásolja a városi környezetet (Schroeder et al. 2010). Az osztályozási rendszer alapja az épületek egymáshoz viszonyított és városon belüli elhelyezkedése, funkciója, építésének éve, építőanyagai és magassága, valamint külön koncentrált az utcák alakjára, a parkolók elhelyezkedésére, az épületek helyzetére és sűrűségére (Schroeder et al. 2010). Ellefsen a módszerét sikerrel alkalmazta 10 amerikai városon (Ellefsen 1991).

3.1. táblázat A klímazónák jellegzetességei az Auer (1978) meteorológiai szempontú városi felszín osztályozási rendszerben

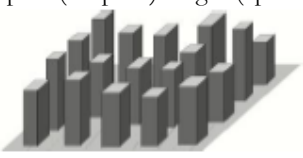


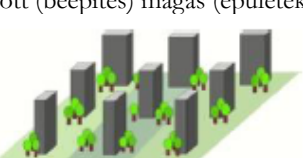

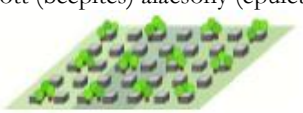
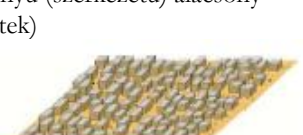
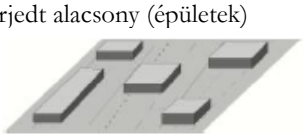
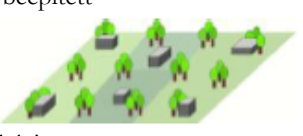
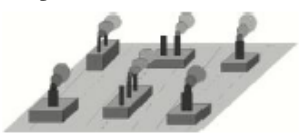
Típus	Elnevezés	Épületek	Növényzet
I1	Nehézipari	3-5 emeletes lapostetős épületek, ipari létesítmények	5% alatt
I2	Könnyűipari	Vasútállomások, logisztikai központok, 1-3 emeletes lapostetős épületek	5% alatt
C1	Kereskedelmi	Irodák, lakóházak, szállodák. 10 emeletnél magasabb lapostetős épületek	15% alatt
R1	Lakóházas	Egyszintes, sátor tetős lakóépületek	Jelentős mennyiségű fű, jelentős mennyiségű fa, teljes növényzet 70% felett
R2	Kompakt lakóházas	Sűrűn elhelyezkedő maximum 2 emeletes sátor tetős lakóházak	Korlátozott mennyiségű fű és fák, növényzet 30% alatt
R3	Kompakt lakóházas	2 emeletes lapostetős családi házak, közel zárt utcafronttal	Korlátozott mennyiségű fű és idős nagyméretű fák, növényzet 30% alatt
R4	Ritkán beépített családi házas	Nagy kertekkel rendelkező családi házak	Nagyméretű füves terület, kevés fa, növényzet 80% felett
A1	Városi természetes területek	Parkok, temetők, golfpályák, ritkán esetlegesen előforduló épületekkel	Közel teljes növényborítás, 95% felett
A2	Mezőgazdasági terület	Szántóföldek	Szántóföldi növényzet, növényborítás 95% felett
A3	Használaton kívüli városi területek	Felhagyott, használaton kívüli területek	Gyomnövények, kevés fa, növényzet 90% felett
A4	Használaton kívüli vidéki területek	Erdők	Növényzet 95% felett
A5	Víz felszínek	Tavak, folyók	-

3.2. táblázat A városi klímazónák (UCZ) jellegzetességei (Oke 2004)

UCZ	Megjelenés	Érdességi osztály	H/W arány	Beépítettség
1. Fejlett városi terület sűrűn elhelyezkedő magas épületekkel		8	> 2	> 90
2. Fejlett városi terület, egymáshoz igen közel elhelyezkedő 2-5 emeletes épületekkel (gyakran téglapítésű épületekkel)		7	1-2,5	> 85
3. Közepes sűrűségű városi terület, különálló, de egymáshoz közel elhelyezkedő épületekkel		7	0,5-1,5	70-85
4. Közepes vagy alacsony sűrűséggel beépített nagy alapterületű alacsony épületek és parkolók		5	0,05-0,2	70-95
5. Kis sűrűséggel 1-2 emeletes lakóházakkal beépített családi házas területek		6	0,2-0,6 > 1 fák esetén	35-65
6. Nagy épületek jelentős zöldfelületekkel		5	0,1-0,5 függően a fák mennyiségétől	< 40
7. Vidéki beépítés, mezőgazdasági terület, ritkán elhelyezkedő épületekkel		4	> 0,05 függően a fák mennyiségétől	< 10



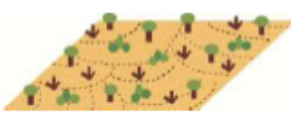


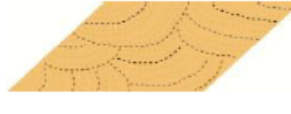

A városi klímazónák (Urban Climate Zones – UCZ) hasonló alapelvek alapján kerültek megalkotásra (Oke 2004). A fő szempont itt is a homogén klímával jellemezhető területek lehatárolása. A csoportosítás (3.2. táblázat) a Davenport-féle érdeességi osztályokon (Davenport et al. 2000), az épületmagasság és utcakanyon szélességének arányán (H/W) (2.7. ábra, Oke 1981) és a beépítettség alapján (Oke 2004).

3.3. táblázat A lokális klímazónák beépítési kategóriái (Stewart, Oke 2012)

Beépítés	Definíció
1. kompakt (beépítés) magas (épületek) 	Sűrűn magas épületekkel beépített. Nincs növényzet. Többnyire burkolt felszín. Beton, acél, kő és üveg építőanyagok.
2. kompakt (beépítés) közepes (épületek) 	Sűrűn közepesen magas (3-9 emelet) épületekkel beépített. Kevés fa. Többnyire burkolt felszín. Kő, téglá és beton építőanyagok.
3. kompakt (beépítés) alacsony (épületek) 	Sűrűn alacsony (1-3 emelet) épületekkel beépített. Kevés fa. Többnyire burkolt felszín. Kő, téglá és beton építőanyagok.
4. nyitott (beépítés) magas (épületek) 	Ritkán elhelyezkedő legalább 10 emeletes épületek. Nagy területeken fű és fás szárú vegetáció. Beton, acél, kő és üveg építőanyagok.
5. nyitott (beépítés) közepes (épületek) 	Ritkán elhelyezkedő legalább 3-9 emeletes épületek. Nagy területeken fű és fás szárú vegetáció. Beton, acél, kő és üveg építőanyagok.
6. nyitott (beépítés) alacsony (épületek) 	Ritkán elhelyezkedő alacsony (1-3 emeletes) épületek. Nagy területeken fű és fás szárú vegetáció. Fa, téglá, kő, és beton építőanyagok.
7. könnyű (szerkezetű) alacsony (épületek) 	Sűrűn elhelyezkedő 1 emeletes könnyűszerkezetes épületek. Kevés fa. Felszínborítás többnyire tömörített talaj. Fa, bádóg építőanyagok.
8. kiterjedt alacsony (épületek) 	Ritkán elhelyezkedő alacsony (1-3 emeletes) épületek. Kevés fa. Többnyire burkolt felszín. Acél, beton és kő építőanyagok.
9. alig beépített 	Elszórtnan elhelyezkedő kis vagy közepes méretű épületek. Nagy területeken fű és fás szárú vegetáció.
10. nehézipar 	Alacsony és közép magas ipari létesítmények (tornyok, tartályok, kémények). Többnyire burkolt felszín. Fém, acél és beton építőanyagok.

A városi klímazónák (Urban Climate Zones) továbbfejlesztésének tekinthető a lokális klímazónák (Local Climate Zones) rendszere (Stewart, Oke 2010, 2012), ami az eddigi módszerek hiányosságát orvosolja (3.3. táblázat), miszerint a városi területeket ugyan felosztották különféle zónákra, azonban a vidéki területek esetén ez nem történt meg, így a különféle városi területeken nehézkes volt az éghajlat külterülethez való eltéréseinek értelmezése. A módszer külön osztályozza a felszínborítást is (3.4. táblázat), valamint a felszínborítás esetén még változatokat is definiál (3.5. táblázat), amelyek alkalmazásával a felszín évszakos változását is figyelembe lehet venni.

3.4. táblázat A lokális klímazónák felszínborítási kategóriái (Stewart, Oke 2012)

Felszínborítás	Definíció
A. fák sűrű (elhelyezkedés) 	Szinte teljes mértékben erdővel borított terület. Vízáteresztő füves felszín. Funkcióját tekintve természetes erdő, erdőgazdaság vagy városi park.
B. fák ritka (elhelyezkedés) 	Ligetes terület nem összefüggő erdő. Vízáteresztő füves felszín. Funkcióját tekintve természetes erdő, erdőgazdaság vagy városi park.
C. bokros bozótos 	Ritkán elhelyezkedő cserjék, bokrok, bozót. Vízáteresztő felszín (csupasz talaj vagy homok). Funkcióját tekintve természetes bozótos vagy mezőgazdasági terület.
D. alacsony növényzet 	Homogén, többnyire fátlan terület többnyire fű és egyéb lágyszárú növényekkel. Funkcióját tekintve természetes rét, mezőgazdasági terület vagy városi park.
E. csupasz szikla / burkolt 	Homogén terület, csupasz kőzet vagy mesterséges felszínborítással. Funkcióját tekintve természetes kősvivatag vagy városi közlekedési területek.
F. csupasz talaj / homok 	Homogén terület, talaj vagy homok borítással. Fátlan, gyér növényborítás. Funkcióját tekintve természetes homoksvivatag vagy mezőgazdasági terület.
G. víz 	Nagyméretű (tavak, tengerek) vagy kisebb víztestek (folyók, tározók)

3.5. táblázat A lokális klímazónák felszínborítási kategóriának változatai és azok jellemzői (Stewart, Oke 2012)

Változat	Leírás
b. lombtalan fák	Levéltelen lombhullató fák (tél). Magasabb SVF, kisebb albedó.
s. hótakaró	Legalább 10 cm-es hótakaró. Kis hővezetés. Magas albedó.
d. száraz talaj	Száraz talaj. Kis hővezetés. Magas Bowen arány. Magasabb albedó.
w. nedves talaj	Vízzel telített talaj. Nagy hővezetés. Alacsony Bowen arány. Alacsonyabb albedó.

Minden LCZ osztály esetén Stewart, Oke (2012) definiál 10 felszínparaméterre vonatkozóan egy-egy jellemző értéktartományt. A felszínparamétereket a 3.6. táblázat és jellemző tartományait a 3.7. táblázat foglalja össze.

3.6. táblázat Az LCZ rendszer jellemző paraméterei (Stewart, Oke 2012)

Paraméter típusok és mértékegységeik	
Geometriai, felszínborítottsági	Termikus, radiatív, energetikai
égboltláthatóság, SVF	felszíni hőtadási tényező, SAD ($Jm^{-2}s^{-1/2}K^{-1}$)
magasság/szélesség arány, H/W	felszíni albedó, SA
épület alapterület arány, BSF (%)	antropogén hő kibocsátás, AH (Wm^{-2})
vízáró felszín arány, ISF (%)	
vízáteresztő felszín arány, PSF (%)	
érdességi elemek magassága, HRE (m)	
terepi érdességi osztály, TRC	

3.7. táblázat A lokális klímazónákat jellemző felszínparaméterek és azok tartományai (Stewart 2011b, Stewart, Oke 2012)

	SVF*	H/W*	BSF	ISF	PSF	HRE*	TRC	SAD	SA	AH
LCZ 1	0,2-0,4	>2	40-60	40-60	<10	>25	8	1100-2200	0,1-0,2	50-300
LCZ 2	0,3-0,6	0,75-2	40-70	30-50	<20	10-25	6-7	1000-2200	0,1-0,2	<75
LCZ 3	0,2-0,6	0,75-1,5	40-70	20-50	<30	3-10	6	1000-2200	0,1-0,2	<75
LCZ 4	0,5-0,7	0,75-1,25	20-40	30-40	30-40	>25	7-8	1100-2000	0,12-0,25	<50
LCZ 5	0,5-0,8	0,3-0,75	20-40	30-50	20-40	10-25	5-6	1000-2200	0,12-0,25	<25
LCZ 6	0,6-0,9	0,3-0,75	20-40	20-50	30-60	3-10	5-6	1000-2200	0,12-0,25	<25
LCZ 7	0,2-0,5	1-2	60-90	<20	<30	2-4	4-5	400-1800	0,15-0,35	<35
LCZ 8	>0,7	0,1-0,3	30-50	40-50	<20	3-10	5	1000-2000	0,15-0,25	<50
LCZ 9	>0,8	0,1-0,25	10-20	<20	60-80	3-10	5-6	1000-2200	0,12-0,25	<10
LCZ 10	0,6-0,9	0,2-0,5	20-30	20-40	40-50	5-15	5-6	1000-2500	0,12-0,2	>300
LCZ A	<0,4	>1	<10	<10	>90	3-30	8	1000-1800	0,1-0,2	0
LCZ B	0,5-0,8	0,25-0,75	<10	<10	>90	3-15	5-6	1000-1800	0,15-0,25	0
LCZ C	>0,9	0,25-1	<10	<10	>90	<2	4-5	1000-1800	0,15-0,3	0
LCZ D	>0,9	<0,1	<10	<10	>90	<2	3-4	1000-1800	0,15-0,25	0
LCZ E	>0,9	<0,1	<10	>90	<10	<0,25	1-2	1300-3000	0,15-0,30	0
LCZ F	>0,9	<0,1	<10	<10	>90	<0,25	1-2	1000-1800	0,20-0,35	0
LCZ G	>0,9	<0,1	<10	<10	>90	<0,25	1	1500	0,02-0,1	0

*az LCZ 1-10 kategóriákban az épületekre, az LCZ A-G kategóriákban a növényzetre vonatkozik

Felmerülhet a kérdés, hogy miért is fontos egy városklíma fókuszú felszínosztályozás megalkotása. A rendszer fő célja alapvetően az egyes városi mérési helyek metaadatainak és környezetének áttekinthető és globális kontextusban is értelmezhető bemutatása. Belátható, hogy megfelelő mennyiségű ismert klímazónában történő mérést követően, a klímazóna osztályozási rendszerek lehetőséget teremtenek a városokra jellemző klíma egyszerű és szemléletes bemutatására. A klímazóna osztályozási rendszerek, karakteres méretüknél fogva (néhány száz méteres homogén összefüggő területek) alkalmas eszköznek mutatkoznak a városok jellemző klimatológia viszonyainak leírására és e szempontoknak a várostervezők felé történő kommunikálására. Ehhez természetesen szükséges számos területen a klímazónák meghatározása, valamint párhuzamosan hosszabb mérési kampányok elvégzése. Ilyen vizsgálatot végzett Houet, Pigeon (2011) Toulouse, valamint Schroeder et al. (2010) Oklahoma City területén.

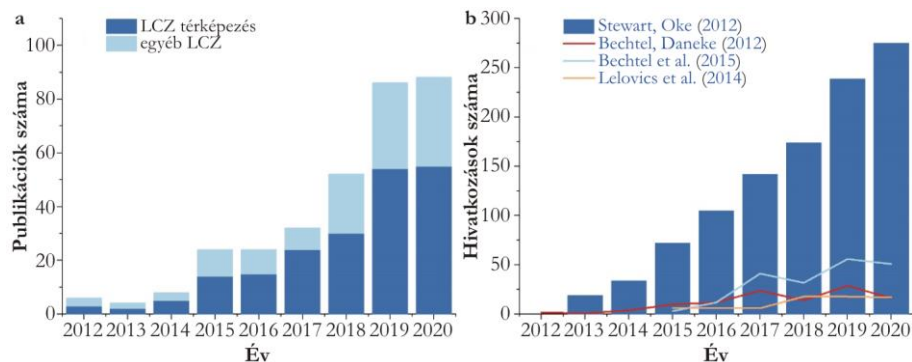
További fontos felhasználási területe lehet a klímazóna osztályozási rendszereknek a klímamodellés, különös tekintettel arra a tényre, hogy a jelenleg alkalmazott numerikus modellek felszínborítási adatbázisainak (CORINE – Bossard et al. 2000, Urban Atlas – Montero et al. 2014, ECOCLIMAP – Masson et al. 2003, Champeaux et al. 2005, USGS – Anderson 1976) felbontása és részletessége nem alkalmas teljes mértékben a városi területek leképezésére.

A harmadik fontos alkalmazási terület a városi mérőállomások optimális helykiválasztásának elősegítése. A klímazónák feltérképezése és további információk – például a városi hősziget felszínborítás alapján történő becslése – értékes segítséget jelenthetnek egy tervezett hálózat állomásainak helykiválasztásában (Unger et al. 2011).

3.2. Lokális klímazónák térképezése

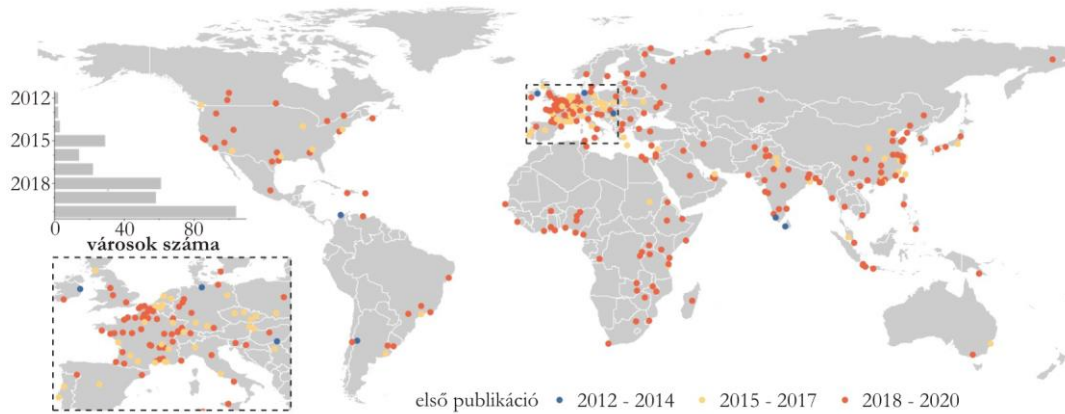
A lokális klímazónák rendszere hamar a városklimatológiai kutatók látókörébe került, tekintve, hogy egy új és egységes rendszer alapját képezte, amellyel a különböző városokban zajló kutatásokat összhangba lehet hozni. Nem meglepő tehát hogy a séma 2012-es megjelenése előtt (Stewart, Oke 2012) is több kutatócsoport figyelme is ráirányult, különös tekintettel olyan szempontból, hogy a sémát városi klimatológiai szempontú térképezésre alkalmazzák. Meg kell jegyezni, hogy ez némileg ellentmond az osztályozás alapvető céljának, azaz a létező városklíma mérések környezetének a leírásának (Stewart, Oke 2012), azonban az elképzelés nagyon gyorsan globálisan elterjedt.

A téma áttekintését jelentősen segíti, hogy a közelmúltban számos olyan összefoglaló cikk született meg, amely a lokális klímazónák alkalmazásával (Peiró et al. 2019, Xue et al. 2020, Jiang et al. 2020), vagy térképezésével (Lehnert et al. 2021, Jiang et al. 2021, Ma et al. 2021, Quan, Bansal 2021) kapcsolatban megjelent irodalmat kísérlik meg összegezni. A téma irodalma igen jelentős, Jiang et al. (2021) gyűjtése alapján 2012 és 2020 között összesen 324 angol nyelvű folyóiratcikk jelent meg, amelyből 202 az LCZ térképezéssel foglalkozott (3.1.a ábra). Jiang et al. (2021) négy kulcs publikációt (3.1.b ábra) említ (és veti össze idéztségüket), melyek közül az első az LCZ rendszer alapjait fekteti le (Stewart, Oke 2012), a további hármat pedig a térképezés szempontjából tart jelentősnek (Bechtel, Daneke 2012, Lelovics et al. 2014, Bechtel et al. 2015). Mivel az LCZ séma konferencia publikációk keretében már 2012 előtt is megjelent, ezért nem meglepő, hogy korábbi térképezéssel kapcsolatos publikációk is vannak, így Quan, Bansal (2021) szerint az első LCZ térképezéssel foglalkozó publikáció (Unger et al. 2011) már 2011-ben megjelent.



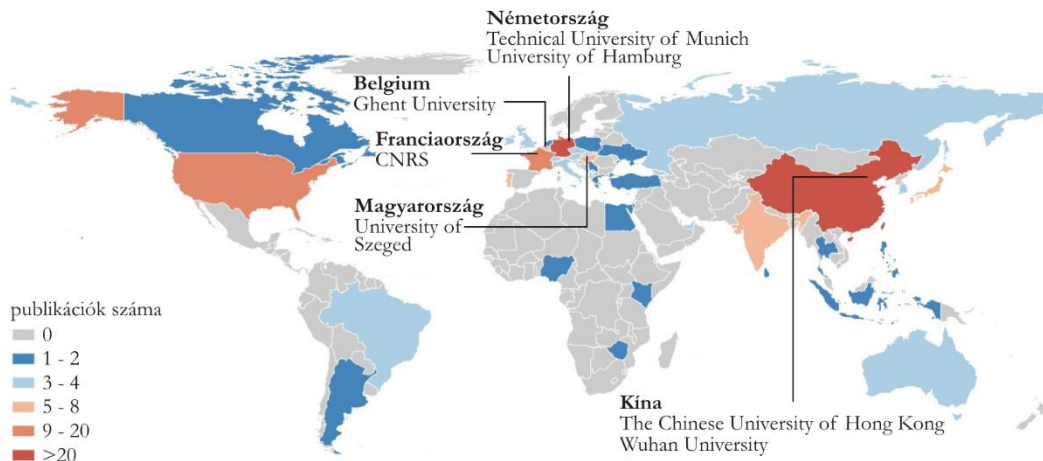
3.1. ábra A (a) lokális klímazónákkal foglalkozó angol nyelvű folyóiratcikkek 2012-től 2020-ig, valamint a 4 meghatározó publikáció idéztsége a Web of Science adatbázis alapján (Jiang et al. 2021)

Az LCZ térképezés korai munkái minden esetben egy vagy több városra koncentráltak, csak az elmúlt években jelent meg olyan kezdeményezés, amely kontinens (Demuzere et al. 2019) vagy globális méretű (Demuzere et al. 2021) térképek előállítását célozza. 2020-ig közel 300 város esetén készültek LCZ térképek (3.2. ábra), amelyek jelentős része Európában van (122 város). A térképezés folyamata 2018 körül fokozódott (Jiang et al. 2021).



3.2. ábra Az LCZ térképezési munkákban megjelent városok tér- és időbeli eloszlása (Jiang et al. 2021)

LCZ térképezéssel kapcsolatban több mint 130 kutatóhely publikált cikket napjainkig (Jiang et al. 2021). Az országokénti sorrendben (3.3. ábra) kiemelkedik Kína (54 db), Németország (28 db), Franciaország (12 db), USA (9 db), India (8 db) és Magyarország (8 db). Jiang et al. (2021) hét intézményt emel ki a kutatóhelyek közül a témával foglalkozó publikációk száma (legalább 5 publikáció) alapján (3.3. ábra).



3.3. ábra Az LCZ-vel foglalkozó publikációk száma országonként és a témában kiemelkedő munkásságú tudományos műhelyek (Jiang et al. 2021)

A lokális klímazónák térképezésének előmozdítása céljából 2013-ban indult el a WUDAPT (World Urban Database and Access Portal Tools) projekt. A kezdeményezés egy platformként próbálja egységesíteni a térképezés módszertanát és lehetőséget teremt az elkészült LCZ térképek megosztására a célból, hogy a városklíma modellező közösség könnyen hozzáférhessen (Ching et al. 2018, Bechtel et al. 2019a).

Az LCZ térképező módszereknek három fő csoportja van, a (i) távérzékelés alapú módszerek, a (ii) a GIS alapú módszerek és a (iii) kombinált módszerek (Jiang et al. 2021). A távérzékelés alapú módszerek nagy része lényegében pixel alapú irányított osztályozási eljárás (Ma et al. 2021).

Bechtel et al. (2015, 2019a) távérzékelés alapú módszere a WUDAPT projekt keretében széles körben elterjedt. A módszer lényegében egy irányított osztályozási eljárás, amely során az egyes LCZ-eket megfelelően reprezentáló tanulóterületeket kell kijelölni, majd a jellemzően Landsat műholdképek felhasználásával egy pixel alapú osztályozási algoritmus fut le, amelynek alapja a random forrest statisztikai eljárás. A módszer előnye, hogy szabadon elérhető műholdképeket (Landsat) és ingyenes szoftvereket (Google Earth, Saga GIS)

alkalmaz, valamint a WUDAPT projekt keretében számos segédlet érhető el a tanulóterületek megfelelő kijelöléséhez vagy a folyamat egészéhez. Az elmúlt években számos hasonló pixel alapú osztályozást alkalmazó módszert (Cai et al. 2016, Verdonck et al. 2017a, Tuia et al. 2017, Cai et al. 2018, Xu et al. 2018, Nurwanda, Hojo 2018, Vandamme et al. 2019, Wang et al. 2019, Zhang et al. 2019, Zhao et al. 2019, La et al. 2020, Patel et al. 2020) dolgoztak ki, azonban koncepciójukban ezek lényegében megegyeznek Bechtel módszerével.

A távérzékelés alapú eljárások egy eltérő koncepciójú csoportját képezik az objektum alapú osztályozási eljárások (Ma et al. 2017), ahol a pixel alapú statisztikai számítások helyett lényegében tanuló algoritmusok segítségével objektumokat azonosítanak a módszerek és azokat végül LCZ osztályokba sorolják. Számos példát találunk az objektum alapú osztályozás alkalmazására az LCZ térképezésében (Wei, Blaschke 2016, Collins, Dronova 2019, Liu et al. 2019, Simanjuntak et al. 2019, Anjos et al. 2020a), és mivel maga a módszertan rohamosan fejlődik a GIS területén, ezért várhatóan számos további, az eddigieknél pontosabb eljárás kifejlesztése várható.

A távérzékelés alapú eljárások további csoportja a képfelismerés alapú módszerek, amelyek az informatika világában napjainkban igen elterjedt képfelismerő algoritmusokat alkalmaznak. Számos olyan példa van, ahol különböző képfelismerési módszert alkalmaztak LCZ térképezésre (Qui et al. 2018, Jing et al. 2019, Xu et al. 2019, Rosentreter et al. 2020, Taubenböck et al. 2020).

A GIS alapú módszerek alapelve, hogy a Stewart, Oke (2012) által minden LCZ osztályra definiált felszínparaméterek (3.6. táblázat), illetve azok értéktartományai alapján, adott területegységről egyszerű logikai vagy fuzzy logikai műveletek segítségével meghatározzák a legvalószínűbb lokális klímazóna osztályt. Ennek köszönhetően a módszerek eltérései a figyelembe vett paraméterekben és az osztályozott területegységekben mutatkozik meg. Mivel általában a területegységek jóval kisebbek mint az LCZ-k minimális mérete, ezért általában szükséges egy utófeldolgozási eljárás is, amely garantálja, hogy a kész LCZ térképek nem tartalmaznak túlzottan kis méretű területeket.

Az osztályozott területegységek alapján elkülöníthetünk (i) parcella vagy telek poligon, (ii) épülettömb vagy városrész, valamint (iii) grid alapú módszereket. A parcella alapú módszerek lényege, hogy a várost összefüggő épülettömbök köré definiált telkekre bontja, ezek a telkek lényegében az épülettömb köré szerkeszthető voronoi poligonok. A telek poligonok koncepciója a városklimatológia területén először a felszínérdesség számításánál jelent meg (Gál, Unger 2009). A telek poligon alapú LCZ térképezési módszereket több kutatócsoport alkalmazta (Lelovics et al. 2014, Šećerov et al. 2015). Hasonló megközelítést alkalmaznak az épülettömb vagy városrész alapú módszerek is (Leconte et al. 2015, Quan et al. 2017, Perera, Emmanuel 2018, Wu et al. 2018, Hidalgo et al. 2019, Quan 2019, Jin et al. 2020). A grid vagy szabályos rács alapú módszerek nagy hátránya, hogy néhány száz m-es léptékben a rács összemérhető az épületek méretével és csak igen ritkán igazodik a beépítés szerkezetéhez, ennek köszönhetően a rács szinte minden esetben feldarabolja az épületek egy részét, ami a geometriai paraméterek számolásánál problémákat okoz. Ennek ellenére igen elterjedtek a grid alapú módszerek (Geletič, Lehnert 2016, Hammerberg et al. 2018, Kotharkar, Bagade 2018a, Wang et al. 2018a, Estacio et al. 2019, Chen et al. 2020a, Dimitrov et al. 2021, Muhammad et al. 2022).

Az osztályozás több esetben fuzzy logika alapján történik, mivel az egyes LCZ osztályok értéktartományai részben átfedik egymást több paraméter esetén. Két eltérő módszer honosodott meg a csoportba tartozás eldöntésére szolgáló függvény alapján (i. Lelovics et al. 2014, Šećerov et al. 2015, Estacio et al. 2019, ii. Geletič, Lehnert 2016, Quan et al. 2017, Wu et al. 2018).

Az utófeldolgozás lényege, hogy a néhány 100 m-es területegységekre rendelkezésre álló LCZ térképet oly módon átalakítsa, hogy az egyes LCZ területegységek minimális mérete haladja meg a lokális klímazónák minimális méretére (minimum 500 m) vonatkozó kritériumot. A feldolgozás alapja a legtöbbször valamilyen egyszerű vagy kombinált többségi szűrő, ahol a szomszédos elemek alapján módosítják az adott terület egység LCZ kategóriáját (Lelovics et al. 2014, Šećerov et al. 2015, Geletič, Lehnert 2016, Estacio et al. 2019, Jin et al. 2020). A számításokhoz több esetben iterációt alkalmaznak.

Néhány módszer kombinálja a GIS alapú és távérzékelés alapú módszerek előnyeit (Gál et al. 2015, Wang et al. 2018a, Hidalgo et al. 2019, Simanjuntak et al. 2019, Yoo et al. 2019, Liu, Shi 2020, Rosentreter et al. 2020). Ezen törekvések lényege, hogy a kombinált eljárás alkalmazásával pontosítsák a térképezést, továbbá a GIS módszereknél alkalmazott utófeldolgozás alkalmazásával javítsák a távérzékeléses módszerrel végrehajtott osztályozást.

3.3. Lokális klímazónák alkalmazása a városklimatológiai megfigyelések céljából

A lokális klímazónák rendszerének a fő célja a városi mérési helyszínek környezetének osztályozása, így elősegítve a különböző városklimatológiai vizsgálatok összehasonlíthatóságát. Ezek alapján nem meglepő, hogy a városklimatológiában elterjedt az LCZ rendszer alkalmazása a városi hőszigetrel kapcsolatos vizsgálatokban. A séma 2012-es megjelenését követően 2019-ig Jiang et al. (2020) gyűjtése alapján 107 cikkben vagy konferenciaközleményben jelentek meg ilyen elemzések. A vizsgálatok fókuszosa első lépésben a léghőmérsékleten volt (CUHI), kezdetben évente néhány (1-2) cikk jelent meg, majd 2014-ben és 2018-ban volt egy-egy hirtelen növekedés (évi 7-8, majd évi 17-20) a cikkek számában (Jiang et al. 2020). A felszínhőmérséklet (SUHI) vizsgálatokra példák csak 2014-től jelentek meg és számuk szinte lineárisan növekszik, 2019-re elérte léghőmérséklettel foglalkozó cikkek számát.

Megvizsgálva a CUHI-ra koncentrált vizsgálatokat, számos következtetést vonhatunk le a séma előnyeiről, valamint a főbb kutatási irányokról (3.8. táblázat). Mérési módszereket tekintve számos esetben már meglévő meteorológiai mérőállomások, valamint a vizsgálatok céljából telepített városklíma mérőállomások vannak a többségben, azonban szép számmal találunk mobil méréseket is (3.8. táblázat). A vizsgálatok jelentős része egyértelműen olyan mérési adatokat használ, amelyek műszereit nem az LCZ alapján telepítették (pl. Emmanuel, Krüger 2012, Berlessova, Konstantinov 2020), vagy már meglévő korábbi mobil méréseket alkalmaztak (Lelovics et al. 2013, Stewart et al. 2014, Wang et al. 2016). Ezekben az esetekben a már meglévő mérések helyszíneit vagy területeit osztályozták az LCZ rendszer alapján. A későbbi munkákban már volt lehetőség arra, hogy a méréseket az LCZ területegységeket megfelelően reprezentáló helyszíneken végezzék (pl. Skarbit et al. 2017, Savić et al. 2018).

3.8. táblázat Az LCZ alapú városi hősziget (CUHI) vizsgálatok összefoglalása és a detektált maximális hőmérséklet különbség (ΔT_{\max}) a legmagasabb (LCZ T_{\max}) és legalacsonyabb (LCZ T_{\min}) hőmérsékletű klímazóna adatai alapján (módosítva és bővítve Jiang et al. 2020 alapján)

Helyszín	LCZ T_{\max}	LCZ T_{\min}	ΔT_{\max}	Klíma	Mérési módszer	Mérések ideje	Hivatkozás
Glasgow, Egyesült Királyság	3	D	2,7	Cfb	állomás	1959-2009	Emmanuel, Krüger 2012
Szeged, Magyarország	2	9	4,2	Cfb	mobil	2008	Lelovics et al. 2013
Uppsala, Svédország	2	D	4,2	Dfb	mobil	1948-1949	Stewart et al. 2014
Vancouver, Kanada	1	D	4,6	Csb	mobil	1999, 2008, 2010	Stewart et al. 2014

Helyszín	LCZ T _{max}	LCZ T _{min}	ΔT_{\max}	Klíma	Mérési módszer	Mérések ideje	Hivatkozás
Nagano, Japán	2	D	3,7	Cfa	mobil	2001-2002	Stewart et al. 2014
Dublin, Írország	2	D	4,2	Cfb	mobil	2010	Alexander, Mills 2014
Kochi, India	2	9	4,1	Am	állomás	2011-2013	Thomas et al. 2014
Nancy, Franciaország	2	D	4,4	Cfb	mobil	2012-2013	Leconte et al. 2015
Querétaro, Mexikó	2	D	4,9	Csa	állomás	2012-2013	Colunga et al. 2015
Singapore	4	9	2,0	Af	állomás	2014	Ng 2015
Chongqing, Kína	H*	2	0,9	Cfa	mobil	2008-2009	Wang et al. 2016
Cluj-Napoca, Románia	1	9	3,8	Cfb	mobil	2015	Herbel et al. 2016
Szeged, Magyarország	2	D	4,8	Cfb	állomás	2014-2015	Skarbit et al. 2017
Berlin, Németország	2	D	3,5	Cfb	állomás	2015	Fenner et al. 2017
Bragança, Portugália	2	D	1	Csb	állomás	2012-2016	Gonçalves et al. 2018
Novi Sad, Szerbia	2	A	2	Cfb	állomás	2014-2017	Savić et al. 2018a
São Paulo, Brazília	3	B	3,8	Cfb	mobil	2014	Cardoso, Amorim 2018
Dijon, Franciaország	2	5	1,8	Cfb	állomás	2015	Richard et al. 2018
Auburn, USA	3	A	2,6	Cfa	állomás	2015	Chieppa et al. 2018
Nagpur, India	3	6	2,5	Aw	állomás	2015-2016	Kotharkar, Bagade 2018b
Milan, Olaszország	2	D	1,5	Cfa	állomás	2016	Oxoli et al. 2018
Hong Kong, Kína	1	9	6,1	Cwa	mobil	2016	Shi et al. 2018
Olomouc, Csehország	2	9	2,4	Cfb	mobil	2016-2017	Lehnert et al. 2018
Nanjing, Kína	2	D	3,1	Cfa	állomás	2016-2017	Yang et al. 2018
Taipei, Kínai Köztársaság	1	A	3,3	Cfa	mobil	2017	Chen et al. 2019
Nur-Sultan, Kazahsztán	1	9	2,1	Dfb	állomás	2006-2019	Berlessova, Konstantinov 2020
Londrina, Brazília	1	9	11,0	Cfa	állomás	2018	Anjos et al. 2020a
Madrid, Spanyolország	2	D	6,4	Csa	állomás	2016-2018	Núñez-Peiró et al. 2021
Constantine, Algéria	2	F	1,6	Csa	állomás	na	Khellaf, Abdou 2021

* A szerzők kiegészítették az osztályozást egy új kategóriával, ami a vízparti városi területeket jelenti (LCZ H)

Az LCZ séma hasznosságát jól szemlélteti, hogy összevetve a 3.8. táblázatban bemutatott maximális UHI intenzitás értékeket az Oke (1973) által összeállított 3.9. táblázatban láthatókkal, jóval pontosabb képet tudunk alkotni. Ez annak köszönhető, hogy nem csak egy maximális intenzitás érték áll rendelkezésünkre városenként, hanem az is, hogy azok a mérések milyen lokális környezetekben történtek.

A léghőmérséklet vizsgálatok túlnyomó többsége esetén korábbi már meglévő mérőállomásokat osztályozták LCZ kategóriákba (pl. Stewart et al. 2014, Wang et al. 2016, Berlessova, Konstantinov 2020), illetve a mérőállomások telepítése során nem az volt a fő cél, hogy a lokális klímazónákra reprezentatív legyen, a mérőállomásokat csak utólag osztályozták LCZ-k szerint (pl. Núñez-Peiró et al. 2021). Kivételt jelent ezek alól néhány vizsgálat (Unger et al. 2011, Alexander, Mills 2014, Lelovics et al. 2014, Anjos et al. 2020a,

Milošević et al. 2022, Ulpiani et al. 2022), amelyek esetén a mérőállomások telepítésénél fő szempont az LCZ termikus viszonyainak és térbeli szerkezetének megfelelő reprezentálása volt.

3.9. táblázat A maximális hősziget intenzitás (ΔT_{\max}) észak-amerikai és európai városokban (Oke 1973)

Város	Lakosság (ezer fő)	ΔT_{\max}
<i>Észak-Amerika</i>		
Montreal	2000	12,0
Vancouver	1000	10,2
San Francisco	784	11,1
Winnipeg	534	11,6
Edmonton	401	11,5
Hamilton	300	9,5
San Jose	101	7,7
Palo Alto	33	6,9
Corvallis	21	6,1
<i>Európa</i>		
London	8500	10,0
Berlin	4200	10,0
Vienna	1870	8,0
Munich	822	7,0
Sheffield	500	8,0
Utrecht	278	6,0
Malmö	275	7,4
Karlsruhe	160	7,0
Reading	120	4,4
Uppsala	63	6,5
Lund	50	5,8

A felszínhőmérséklet (SUHI) vizsgálatok száma dinamikusan növekedik az elmúlt évtizedben (3.10. táblázat), köszönhetően annak, hogy megfelelő műholdas adatok könnyen hozzáférhetőek és feldolgozhatóak. Legyakrabban a Landsat TIRS (USGS 2016), valamint a Terra és Aqua műholdak MODIS szenzoraival készült műholdképeket használják fel a célra (3.10. táblázat). Előbbi előnye a nagy térbeli felbontása, utóbbi esetén pedig az, hogy rendelkezésre áll napi több felvétel, illetve az éjjeli időszakra vonatkozó adatok is. Előfordul néhány példa arra is, hogy repülőgépre szerelt hőkamera (FLIR) méréseit használták fel a vizsgálatokhoz (Skarbit et al. 2015, Koc et al. 2018, Dimitrov et al. 2021). A FLIR szenzorok előnye a műholdakhoz mérten jóval nagyobb térbeli felbontás, így az elemzések a felszínhőmérséklet eloszlásának jóval pontosabb és részletesebb törvényszerűségeit is fel tudják tárni.

3.10. táblázat Az LCZ alapú városi hősziget (SUHI) vizsgálatok összefoglalása és a detektált maximális hőmérséklet különbség (ΔT_{\max}) a legmagasabb (LCZ T_{\max}) és legalacsonyabb (LCZ T_{\min}) hőmérsékletű klímazóna adatai alapján (módosítva és bővítve Jiang et al. 2020 alapján)

Helyszín	LCZ T_{\max}	LCZ T_{\min}	ΔT_{\max}	Klíma*	Szenzor	Hivatkozás
Szeged, Magyarország	2	9	6	Cfb	FLIR	Skarbit et al. 2015
Prague, Csehország	10	A	15	Cfb	TIRS	Geletič et al. 2016a
Brno, Csehország	10	G	18	Cfb	TIRS	Geletič et al. 2016a
Szeged, Magyarország	2	9	5	Cfb	TIRS	Gémes et al. 2016
Dubai, Egyesült Arab Emírségek	2	F	4	Bwh	MODIS	Nassar et al. 2016
Shanghai, Kína	G	D	7	Cfa	ASTER	Cai et al. 2017

Helyszín	LCZ T _{max}	LCZ T _{min}	ΔT_{max}	Klíma*	Szenzor	Hivatkozás
Táipei, Kínai köztársaság	7	G	8	Cfa	TIRS	Chen et al. 2017
Wuhan, Kína	3	G	14	Cfa	TIRS	Wang et al. 2017
Chandigarh, India	10	G	4	Cfa	TIRS	Gupta et al. 2017
Hangzhou, Kína	G	A	6	Cfa	ASTER	Cai et al. 2018
Phoenix, USA	E	G	26	Bwh	ASTER	Wang et al. 2018b
Las Vegas, USA	7	G	17	Bwk	ASTER	Wang et al. 2018b
Sydney, Ausztrália	8	A	5	Cfb	FLIR	Koc et al. 2018
Dijon, Franciaország	8	A	11	Cfb	TIRS	Richard et al. 2018
Geneva, Svájc	2	G	12	Cfb	TIRS	Loftan et al. 2019
Chongqing, Kína	10	4	4	Cfa	TIRS	Cai et al. 2019
Fuzhou, Kína	8	A	14	Cfa	TIRS	Lin, Xu 2019
Nanjing, Kína	3	G	11	Cfa	TIRS	Hu et al. 2019
Gyöngy-folyó deltája, Kína	2	G	7	Cwa	MODIS	Wang et al. 2019
Bangkok, Thaiföld	10	G	4	Aw	TIRS	Khamchiangta, Dhakai 2019
Yogyakarta, Indonézia	E	B	4	Af	TIRS	Pradhesta et al. 2019
Bandung, Indonézia	10	A	3	Af	TIRS	Simanjuntak et al. 2019
São Paulo, Brazilia	3	G	10	Cfb	MODIS	Ferreira, Duarte 2019
Harare, Zimbabwe	2	G	19	Aw	TIRS	Mushore et al. 2019
50 város adata alapján	1	D	5	na	MODIS	Bechtel et al. 2019b
Budapest, Magyarország	2	A	4	Cfa	MODIS	Dian et al. 2020
Szeged, Magyarország	2	A-G	4	Cfa	MODIS	Fricke et al. 2020
Novi Sad, Szerbia	2	A-G	6	Cfa	MODIS	Fricke et al. 2020
Beer Sheva, Izrael	5	A-G	2	BWh	MODIS	Fricke et al. 2020
Sofia, Bulgária	9	C	8	Cfb	FLIR	Dimitrov et al. 2021
Benjing, Kína	1	D	7	Dwa	MODIS	Xia et al. 2022

*a klímaosztályozás szerinti besorolás a Jiang et al. 2020 eredeti táblázatában megtalálható források esetén onnan származik, míg a bővítés során hozzáadott példák esetén a hivatkozott munkából

A szakirodalmi eredmények alapján az egyes LCZ-k közötti hőmérséklet különbségek képe jóval összetettebb (3.10. táblázat), mint a léghőmérséklet esetén. Jelentős befolyása van a kapott eredményekre a napszaknak vagy évszaknak, illetve az egyéb felszíni sajátosságoknak. A bizonytalanságok – amelyet a nagyon eltérő eredmények sejtetnek – ellenére a műholdas produktumok feldolgozása lehetőséget teremt átfogó, több városra kiterjedő klimatológiai elemzéseknek (Bechtel et al. 2019b), vagy kiterjedt idősoros analíziseknek (Xia et al. 2022), hiszen a nagyobb lélegzetvételi elemzések adatfeldolgozási munkafolyamatait főként számítási igényükben térnek el az egy városra vagy időpontra koncentrált esettanulmány jellegű vizsgálatoktól.

3.4. Lokális klímazónák alkalmazása városklíma modellezés céljából

Az LCZ osztályozás nagy előnye, hogy viszonylag egyszerű, egyben termikus szempontból reprezentatív városi felszín osztályozás, ami lehetőséget teremt arra, hogy ne csak a városi mérések környezetének jellemzésére, vagy térképezési célokra alkalmazzák, hanem városi léptékű időjárás és klímamodellekben is felhasználják, mint statikus adatot. Fontos előny, hogy az egyes osztályon belüli területek termikusan homogénnek tekinthetők és pontosan tükrözik az egyes zónák hőmérsékletét kialakító reakcióit. Számos vizsgálat van, ahol nem ilyen termikus alapú felszínadatbázist, hanem a már meglévő más célból és eltérő szempontok szerint alkotott felszínadatbázisokat alkalmaznak (CORINE – Bossard et al. 2000, Urban Atlas – Montero et al. 2014, ECOCLIMAP – Masson et al. 2003, Champeaux et al. 2005, USGS – Anderson 1976). Általánosságban kijelenthető, hogy hiába fejlesztenek újabb és pontosabb városi modelleket vagy parametrizációkat ha a felszínadatbázis nem adja vissza helyesen a városi termikus viszonyokat, akkor a modellek pontossága nem tud érdemben növekedni. Mindezen szempontokat a városklíma, klíma és időjárás modellező közösség hamar felismerte és elkezdte a sémát numerikus szimulációkban alkalmazni, mint felszínadatbázist (3.11. táblázat). A koncepció elterjedését nagyban segíti hogy a WUDAPT projekt is azt a fő célt tűzte ki, hogy segítse a séma meghonosodását a városi modellkísérletekben (Ching et al. 2018).

Az LCZ sémát leggyakrabban a WRF (Weather Research and Forecasting, Skamarock et al. 2008, 2019) modellben alkalmazzák (3.11. táblázat). Az LCZ séma elterjedését jelentősen segítette, hogy Martilli et al. (2016) bemutatta a szükséges módosításokat a WRF 3-as verziójában (Skamarock et al. 2008), majd a 4-es verzió (Skamarock et al. 2019) pedig már eleve támogatta ezt. A vizsgálatok témájukat tekintve szerteágazóak (3.10. táblázat). A meteorológiai vizsgálatok fókuszában számos téma állt, így (i) a városi hősziget (pl. Giannaros et al. 2013, Agathangelidis et al. 2020), (ii) a humánkomfort (pl. Hwang et al. 2019, Yeung et al. 2020), (iii) extrém csapadék (pl. Patel et al. 2021), (iv) hóhullámok (pl. Molnár et al. 2019a, Wang, Wang 2021, Patel et al. 2022) vizsgálata volt a fő cél. Több vizsgálat esetén a fókusz túlmutat a meteorológia tárgykörén, mivel az elemzések főleg várostervezési kérdésekre (pl. Steeneveld et al. 2018, Mughal et al. 2019, 2020, Gilabert et al. 2021a), illetve pl. az urbanizációs folyamatokra (pl. Tse et al. 2018) irányultak. Külön kiemelhető, hogy olyan mérési módszerekkel nehezen tanulmányozható jelenségre, mint a városi hősziget cirkuláció (Wang et al. 2020) vagy a városi szélprofilok (Zhang et al. 2022) is történtek elemzések.

A MUKLIMO_3 (Sievers et al. 2012) egy nem hidrosztatikus lokális léptékű modell. Nagy előnye, hogy maga a modell nem tartalmaz előre definiált felszínosztályozást, így könnyű benne implementálni az LCZ sémát. A modell az idealizált időjárási helyzetek esetén történő numerikus szimulációk valamint a cuboid statisztikai módszer (Früh et al. 2011) kombinálásával alkalmas arra, hogy számos – magas hőterhelést jellemző – klímaindex 30 éves átlagait állítsa elő viszonylag kevés számítási igénnyel, így ideális a várható éghajlati viszonyok városi hatásainak jellemzésére. A módszertant számos alkalommal alkalmazták a lokális klímazónák felhasználásával (3.11. táblázat). A vizsgálatok jelentős része a klímaváltozás várható hatásait elemzi (pl. Skarbit, Gál 2016, Bokwa et al. 2018, Geletič et al. 2019) azonban van példa a modell validációjára (pl. Bokwa et al. 2019), valamint várostervezési lépések elemzésre (pl. Geletič et al. 2020, Gál et al. 2021a) irányuló vizsgálatokra is.

A COSMO egy korlátos tartományú nem hidrosztatikus klímamodell, amelyet mezo léptékű alkalmazásra fejlesztettek (Steppeler et al. 2003, Rockel et al. 2008). A modell TERRA-URB parametrizációs sémája teszi lehetővé a városi léptékű alkalmazást (Trusilova et al. 2016). Az LCZ sémával történő alkalmazására csak kevés példa van (3.11. táblázat), azonban az ilyen irányú vizsgálatok csak az elmúlt években kezdődtek pl. Moszkva

(Varentsov et al. 2018) és afrikai városok (pl. Brousse et al. 2019, Van de Walle et al. 2021) esetén, így várhatóan a modell további alkalmazásában nagy perspektíva van.

A SURFEX egy a felszín légkör kölcsönhatásokat kezelő kapcsolt modell (Le Moigne et al. 2009). A városi alkalmazását a SURFEX-TEB parametrizáció bevezetése tette lehetővé (Schoetter et al. 2017). A modellt számos alkalommal használták a városi hősziget vizsgálatára különböző városokban (Top et al. 2019, Nogueira et al. 2020) és hazánkban is (Zsebeházi, Szépszó 2020, Zsebeházi, Maho 2021). A modell számára a felszín adatokat az ECOCLIMAP (Masson et al. 2005) szolgáltatja, amelynek az új verziója (ECOCLIMAP-SG, Masson et al. 2020b) már tartalmazza a városi területek esetén az LCZ osztályokat. Az LCZ-vel történő alkalmazásra csak néhány példa van (3.11. táblázat). A Meso-NH modellel (Lac et al. 2018) kapcsolva több francia városban történtek vizsgálatok (Ibitolu 2020, Kwok et al. 2020, Gardes et al. 2020), illetve az ALARO modellel (De Troch et al. 2013) kapcsolva pedig Belgiumban történt egy vizsgálat (Caluwaerts et al. 2020). A SURFEX nagy előnye, hogy a hazai operatív gyakorlatban alkalmazott ALADIN modellel (Kullmann 2008) kompatibilis, így a hazai és nemzetközi alap kutatási eredmények felhasználásával rövidtávon integrálni lehetne az LCZ sémát alkalmazó városi parametrizációt abba, így javítva a városi területekre vonatkozó előrejelzéseket.

Az UrbClim modell (De Ridder et al. 2015) egy városi felszín fizikai folyamatait leíró felszín légkör sémából és egy 3D határréteg modulból áll, a kifejlesztésének a fő célja az volt, hogy a nagyfelbontású mezo skálájú klímamodelleknél gyorsabb városi szimulációkat tegyen lehetővé. A jelen és jövőbeli városi hősziget szimulációkra több vizsgálat is irányult (pl. Zhou et al. 2016, Lauwaet et al. 2016). Az LCZ sémával néhány kutatási eredmény jelent meg (3.11. táblázat), ezek nagyrésze az UHI elemzésére irányul (pl. Sharma et al. 2016, Verdonck et al. 2017, Reis et al. 2022), azonban találunk példákat várostervezési (Maheng et al. 2019), illetve humánkomfort (Gilabert et al. 2021b) fókuszú kutatásokra is.

Az ENVI-met egy mikro skálájú numerikus modell (Bruse 2004, Huttner, Bruse 2009), megközelítésének az egyediségét az adja, hogy egy olyan könnyen használható modellezési lehetőséget nyújt, amellyel lehetséges épületek, épületegyüttesek vagy városi közterek mikroklímájának a vizsgálata még a tervezés fázisában. Könnyű használhatósága miatt számos példát találunk arra, hogy a lokális klímazónák sémájával együtt alkalmazzák (3.11. táblázat), azonban meg kell jegyezni, hogy a modell térbeli léptéke nem egyezik meg az LCZ-k léptékével és a modell nem alkalmas arra, hogy teljes városok vagy városrészeket szimuláljon. A vizsgálatok jelentős részén a modell mikro léptékű szimulációit kombinálják az LCZ sémával, így következtetve városi léptékű összefüggésekre (pl. Perera, Emmanuel 2017, Lyu et al. 2019, Kotharkar et al. 2020). Mivel a modell a humánkomfort vizsgálatára is alkalmas, így számos olyan vizsgálat van, amely esetben az egyes LCZ-k esetén vizsgálják a humánkomfort viszonyokat (pl. Xiang, Ren 2017, Rahul et al. 2020, Ouali et al. 2021, Ren et al. 2022).

Néhány példát találunk a szakirodalomban, amikor további numerikus modellekkel együtt alkalmazzák az LCZ sémát. A SUEWS modell (Järvi et al. 2011) egy dimenziós városi energia és vízegyenleg modell. Az LCZ sémával együttesen (3.11. táblázat) több esetben is használták (pl. Alexander et al. 2015, Fernández et al. 2021). Továbbá a közelmúltból találhatunk olyan példákat is, amikor az LCZ sémát új városi modell fejlesztésénél alkalmazták (pl. Brozovsky et al. 2022, Moradi et al. 2022).

A különböző léptékű vagy jellegű modellek összekapcsolása nagyon innovatív lépésnek tekinthető, az LCZ rendszer kapcsán egy ilyen célú vizsgálat említhető (3.11. táblázat). McRae et al. (2020) munkájában a WRF és ENVI-met modelleket kapcsolták össze, hogy részletesebb numerikus szimulációs eredmények alapján jellemezhessek a különböző lokális klímazónákban uralkodó viszonyokat.

A modellezéssel kapcsolatos irodalmi áttekintés kapcsán felmerülhet a RayMan (Matzarakis et al. 2007) vagy SkyHelios (Matzarakis, Matuschek 2011) modell is, azonban mivel ezek fő célja a humánkomfort paraméterek kiszámítása, ezért a vonatkozó irodalmat a 3.5 fejezetben tekintem át.

Nagy potenciál van a PALM és PALM-4U modellben (Maronga et al. 2020) köszönhetően annak, hogy a modell nagy örvény szimuláción (Large Eddy Simulation, LES) alapszik, így módszertani szempontból hoz újdonságot a városi klímamodellezés területére. Meglepő, hogy az irodalomban nem található olyan publikált eredmény, amely esetén a modellt az LCZ rendszerrel használták. Erre részben magyarázatot ad, hogy a Heldens et al. (2020) szerint az LCZ séma felbontása nem elégséges a modell futtatásához, azonban az alkalmazás megfelelő részleteinek kidolgozásával ez véleményem szerint nem okozhat problémát.

3.11. táblázat Az LCZ alapú városi időjárás és klímamodell vizsgálatok főbb tulajdonságai

Helyszín	Vizsgálat célja	Modell	Hivatkozás
		WRF (Skamarock et al. 2008, 2019)	
Athens, Görögország	időjárás előrejelzés, UHI vizsgálata, csak az elemzés történt az LCZ alapján	WRF (Noah LSM)	Giannaros et al. 2013
Madrid, Spanyolország	időjárás előrejelzés, városklíma elemzés	WRF (BEP, BEM)	Brousse et al. 2016
Szeged, Magyarország	időjárás előrejelzés, csapadékos és ködös helyzetek vizsgálata	WRF (SLUCM)	Molnár et al. 2018
Ghent, Belgium	időjárás előrejelzés, várostervezés	WRF (SLUCM)	Steenefeld et al. 2018
Vienna, Ausztria	időjárás előrejelzés, LCZ rendszer tesztelése	WRF (BEP)	Hammerberg et al. 2018
Gyöngy folyó deltája, Kína	időjárás előrejelzés, urbanizáció vizsgálata	WRF	Tse et al. 2018
Dijon, Franciaország	időjárás előrejelzés, LCZ rendszer tesztelése	WRF (UCM)	Richard et al. 2018
Sao Paulo, Brazília	időjárás előrejelzés, ózon terjedés	WRF-Chem (BEP)	Franco et al. 2019
Szeged, Magyarország	időjárás előrejelzés, hóhullám, LCZ rendszer tesztelése	WRF (SLUCM)	Molnár et al. 2019a
Szeged, Magyarország	időjárás előrejelzés, LCZ paraméterezésének vizsgálata	WRF (SLUCM)	Molnár et al. 2019b
Seoul, Dél-Korea	időjárás előrejelzés, humánkomfort vizsgálat	WRF (BEP, BEM)	Hwang et al. 2019
Beijing, Kína	időjárás előrejelzés, modellbeállítások és LCZ rendszer tesztelése, modell validálás	WRF (UCM, BEP, BEM)	Mu et al. 2019
Hong Kong, Kína	időjárás előrejelzés, LCZ rendszer tesztelése és paraméterezésének vizsgálata	WRF (BEP, BEM)	Wong et al. 2019
Singapore	időjárás előrejelzés, várostervezés	WRF (MLUCM)	Mughal et al. 2019, 2020
Mumbai, India	időjárás előrejelzés, extrém csapadék vizsgálata	WRF (BEP)	Patel et a. 2020
Gyöngy folyó deltája, Kína	klímaváltozás, hőmérséklet és humánkomfort	WRF (SLUCM)	Yeung et al. 2020

Helyszín	Vizsgálat célja	Modell	Hivatkozás
Beijing, Kína	időjárás előrejelzés, városi hősziget cirkuláció vizsgálata	WRF (BEP)	Wang et al. 2020
Bologna, Olaszország	időjárás előrejelzés, LCZ paraméterezésének vizsgálata	WRF (BEP, BEM)	Zonato et al. 2020
Szeged, Magyarország	időjárás előrejelzés, antropogén hő	WRF (SLUCM)	Molnár et al. 2020
Európai városok	időjárás előrejelzés, felszínhőmérséklet és léghőmérséklet elemzése	WRF (SLUCM)	Agathangelidis et al. 2020
Barcelona, Spanyolország	időjárás előrejelzés, LCZ rendszer tesztelése	WRF (BEP, BEM)	Ribeiro et al. 2021
Taichung, Kínai köztársaság	időjárás előrejelzés, modell validálás	WRF (SLUCM)	Chen et al. 2021
Barcelona, Spanyolország	időjárás előrejelzés, PBL sémák érzékenysége vizsgálata	WRF (BEP, BEM)	Segura et al. 2021
Beijing, Kína	időjárás előrejelzés, LCZ paraméterezésének vizsgálata	WRF (SLUCM)	Liang et al. 2021
Barcelona, Spanyolország	időjárás előrejelzés, hőhullám, várostervezés	WRF (BEP, BEM)	Gilabert et al. 2021a
Singapore	időjárás előrejelzés, modell validálás, UHI vizsgálata	WRF (BEP, BEM)	Sanchez et al. 2021
Mumbai, India	időjárás előrejelzés, extrém csapadék vizsgálata, várostervezés	WRF (SLUCM)	Patel et al. 2021
Xiamen, Kína	időjárás előrejelzés, hőhullám vizsgálata	WRF (BEP, BEM)	Wang, Wang 2021
Sendai, Japán	időjárás előrejelzés, LCZ rendszer tesztelése, antropogén hő beépítése	WRF (BEP, BEM)	Zhou et al. 2022
Zhejiang, Kína	időjárás előrejelzés, extrém szélprofilok vizsgálata	WRF (SLUCM, SBUCM, MLUCM)	Zhang et al. 2022
Hong Kong, Kína	időjárás előrejelzés, légnedvesség vizsgálata	WRF (BEP, BEM)	Du et al. 2022
Európa	időjárás előrejelzés, hőhullám vizsgálata	WRF (BEP)	Patel et al. 2022
Melbourne, Ausztrália	időjárás előrejelzés, várostervezés	WRF (MLUCM)	Falasca et al. 2022
Szeged, Magyarország	klíma modell, hőterhelés projekciója	MUKLIMO_3 (Sievers et al. 2012)	Skarbit, Gál 2016
King's Landing fiktív település	klíma modell, UHI elemzés	MUKLIMO_3	Žuvela-Aloise 2017
Bratislava, Szlovákia	klíma modell, hőterhelés projekciója	MUKLIMO_3	Bokwa et al. 2018
Brno, Csehország	klíma modell, hőterhelés projekciója	MUKLIMO_3	Bokwa et al. 2018
Kraków, Lengyelország	klíma modell, hőterhelés projekciója	MUKLIMO_3	Bokwa et al. 2018
Szeged, Magyarország	klíma modell, hőterhelés projekciója	MUKLIMO_3	Bokwa et al. 2018
Bratislava, Szlovákia	klíma modell, hőterhelés projekciója	MUKLIMO_3	Bokwa et al. 2019
Brno, Csehország	klíma modell, hőterhelés projekciója	MUKLIMO_3	Bokwa et al. 2019
Kraków, Lengyelország	klíma modell, hőterhelés projekciója	MUKLIMO_3	Bokwa et al. 2019
Szeged, Magyarország	klíma modell, hőterhelés projekciója	MUKLIMO_3	Bokwa et al. 2019
Brno, Csehország	klíma modell, hőterhelés projekciója	MUKLIMO_3	Geletič et al. 2019

Helyszín	Vizsgálat célja	Modell	Hivatkozás
Bratislava, Trnava, Szlovákia	klíma modell, UHI elemzés	MUKLIMO_3	Holec et al. 2020
Prague, Brno, Csehország	klíma modell, várostervezés	MUKLIMO_3	Geletič et al. 2020
Bratislava, Szlovákia	klíma modell, klímakockázat értékelés COSMO (Rockel et al. 2008)	MUKLIMO_3	Sobocká et al. 2021
Moscow, Oroszország	klíma modell, hőmérsékleti profil vizsgálatok	COSMO (TERRA_URB)	Varentsov et al. 2018
Kampala, Uganda	klíma modell, egészségügyi vizsgálatok	COSMO (TERRA_URB)	Brousse et al. 2019
Dakar, Szenegál	klíma modell, felszínhőmérséklet validáció, városklíma elemzés	COSMO (TERRA_URB)	Brousse et al. 2020, Van de Walle et al. 2021
Kampala, Uganda	klíma modell, LCZ paraméterezésének vizsgálata SURFEX (Le Moigne et al. 2009)	COSMO (TERRA_URB)	Varentsov et al. 2020
Toulouse, Franciaország	időjárás előrejelzés, UHI és szélsőségek vizsgálata	Mésó-NH SURFEX	Ibitolu 2020
Toulouse, Franciaország	időjárás előrejelzés, humánkomfort vizsgálat	Mésó-NH SURFEX	Kwok et al. 2020
Francia városok	időjárás előrejelzés, UHI vizsgálat	Mésó-NH SURFEX	Gardes et al. 2020
Ghent, Belgium	klíma modell, UHI elemzés	ALARO-SURFEX, UrbClim	Caluwaerts et al. 2020
	UrbClim (De Ridder et al. 2015)		
Delhi, India	klíma modell, UHI elemzés	UrbClim	Sharma et al. 2016
Brussels, Antwerp, Ghent, Belgium	klíma modell, UHI elemzés	UrbClim	Verdonck et al. 2017b
Delhi, India	klíma modell, klímaváltozás	UrbClim	Sharma et al. 2019
Colombo, Srí Lanka	klíma modell, UHI elemzés, várostervezés	UrbClim	Maheng et al. 2019
Barcelona, Spanyolország	klíma modell, hőhullám, humánkomfort	UrbClim	Gilabert et al. 2021b
Lisbon, Portugália	klíma modell, UHI elemzés ENVI-met (Bruse 2004)	UrbClim	Reis et al. 2022
Oberhausen, Németország	mikroklíma modell, klímaváltozás, várostervezés	ENVI-met	Müller et al. 2014
Colombo, Srí Lanka	mikroklíma modell, várostervezés	ENVI-met	Perera, Liyanapathirana 2014
Glasgow, Egyesült Királyság	mikroklíma modell, várostervezés	ENVI-met	Emmanuel, Loconsole 2015, Maharroof et al. 2020
Colombo, Srí Lanka	mikroklíma modell, klímaváltozás, humánkomfort	ENVI-met	Perera, Emmanuel 2017
Beijing, Kína	mikroklíma modell, humánkomfort	ENVI-met	Xiang, Ren 2017
Vienna, Ausztria	mikroklíma modell, városi léptékű elemzés	ENVI-met	Simon et al. 2018
Abu Dhabi, Egyesült Arab Emírségek	mikroklíma modell, UHI vizsgálat	ENVI-met	Mandahar et al. 2019
Nanjing, Kína	mikroklíma modell, mikroklíma vizsgálata az LCZ rendszer alapján	ENVI-met	Lyu et al. 2019
Kolkata, India	mikroklíma modell, várostervezés	ENVI-met	Chatterjee et al. 2019

Helyszín	Vizsgálat célja	Modell	Hivatkozás
Al-Ain, Egyesült Arab Emírségek	mikroklíma modell, UHI vizsgálat	ENVI-met	Bande et al. 2020a
Dubai, Egyesült Arab Emírségek	mikroklíma modell, várostervezés	ENVI-met	Bande et al. 2020b
Nagpur, India	mikroklíma modell, UHI vizsgálat	ENVI-met	Kotharkar et al. 2020
Changsha, Kína	mikroklíma modell, várostervezés	ENVI-met	Chen et al. 2020b
Roorkee, India	mikroklíma modell, humánkomfort	ENVI-met	Rahul et al. 2020
West Bengal, India	mikroklíma modell, várostervezés	ENVI-met	Ziaul, Pal 2020
Adana, Törökország	mikroklíma modell, SUHI vizsgálat	ENVI-met	Cilek, Cilek 2021
Tokyo, Japán	mikroklíma modell, humánkomfort	ENVI-met	Wang et al. 2021a
Guangzhou, Kína	mikroklíma modell, várostervezés	ENVI-met	Wang et al. 2021b
Adana, Törökország	mikroklíma modell, humánkomfort	ENVI-met	Cilek, Uslu 2021, Cilek, Uslu 2022
Rabat, Marokkó	mikroklíma modell, humánkomfort	ENVI-met	Ouali et al. 2021
Angkor Watt, Kambodzsa	mikroklíma modell, az LCZ rendszer és a régészeti feltárások kapcsolata	ENVI-met	Binarti et al. 2022
Borobudur, Indonézia			
Roro Jonggrang, Indonézia			
Zhengzhou, Kína	mikroklíma modell, humánkomfort	ENVI-met	Ren et al. 2022
További modellek			
Globális	globális klímamodell	CESM CLMU	Feddema et al. 2015
Dublin, Írország	városi energia és vízegyenleg modell, modell fejlesztés	SUEWS	Alexander et al. 2015
Dublin, Írország	városi energia és vízegyenleg modell, modell validáció	SUEWS	Alexander et al. 2016
Hamburg, Németország			
Melbourne, Ausztrália			
Phoenix, USA			
Bahía Blanca, Argentína	városi energia és vízegyenleg modell, energia egyenleg vizsgálatok	SUEWS	Fernández et al. 2021
Dublin, Írország	városi energia és vízegyenleg modell, klímaváltozás	SUEWS	Paranunzio et al. 2021
Trondheim, Norvégia	mikroklíma modell, mikroklíma, épület energetika	CFD	Brozovsky et al. 2022
na	mikroklíma modell, modell fejlesztés	VCWG	Moradi et al. 2022
Modellek összekapcsolása			
San Jose, USA	mikroklíma vizsgálat, modellek összekapcsolása, várostervezés	WRF (SLUCM) ENVI-met	McRae et al. 2020

3.5. További alkalmazási lehetőségek

A humánkomfort vizsgálatok fő célja, hogy az adott mikroklimatológiai viszonyok emberekre gyakorolt hatásait felmérje. A vizsgálatok során számos humánkomfort indexet alkottak meg, amelyek különböző módokon veszik figyelembe a meteorológiai állapotjelzőket együttes hatását (Coccolo et al. 2016).

A lokális klímazónák rendszerének megjelenését követően hamar az érdeklődés középpontjába került a humánkomfort viszonyok és az LCZ közötti kapcsolat elemzése. Számos vizsgálat jelent meg a témában (3.12. táblázat), amelyek több humánkomfort paramétert vizsgáltak. A figyelembe vett paraméterek a következők: fiziológiailag ekvivalens hőmérséklet (Physiologically Equivalent Temperature, PET, Höppe 1999), várható átlagos hőérzet (Predicted Mean Vote, PMV, Fanger 1970), standard effektív hőmérséklet (Standard Effective Temperature, SET*, Gagge et al. 1971), szabadtéri standard effektív hőmérséklet (Outdoor Effective Temperature, OUT_SET*, Pickup, de Dear 2000), relatív terhelési index (Relative Strain Index, RSI, Emmanuel 2005), univerzális termikus klíma index (Universal Thermal Climate Index, UTCI, Jendritzky et al. 2012), hőérzet (Thermal Sensation, TS, Givoni et al. 2006), kényelmetlenségi index (Discomfort Index, DI, Thom 1959), HUMIDEX (H, Masterton, Richardson 1979, Alfonso et al. 2010), hőség index (Heat Index, HI, Steadman 1984), várható hőérzet (Thermal Sensation Vote, TSV, Lai et al. 2014), átlagos sugárzási hőmérséklet (Mean Radiant Temperature, T_{mrt}, ASHARE 2017).

A vizsgálatok során számos módszert alkalmaztak a humánkomfort viszonyok felmérésére. A 3.12. táblázatban a mérés és a mikrometeorológiai mérés között a különbség a mért paraméterekben és a lebonyolításban van. Mikrometeorológiai mérés esetén minden olyan állapothatározót mértek, amely a humánkomfort paraméterek számításához szükséges és a mérés expedíció szerűen történt. Mérés esetén az adott városban már meglévő általánosabb célú állomás hálózat adatait használták. Számos vizsgálat keretében numerikus modellekkel számolták a humánkomfort paramétereket. A biometeorológiában elterjedt néhány olyan módszer vagy egyszerű modell (pl. Matzarakis et al. 2007), amely a mérési adatok felhasználásával számolja a humánkomfort paramétereket, ezek használatát a 3.12. táblázatban nem jelöltem. A humánkomfort viszonyok egy teljesen eltérő alapú, azonban elterjedt módja a kérdőívek alkalmazása (Stathopoulos et al. 2004, Thorsson et al. 2004), amely során az adott terület használóinak hőérzetét mérik fel irányított kérdésekkel.

3.12. táblázat Az LCZ alapú városi humánkomfort vizsgálatok részleteinek és főbb következtetéseinek összefoglalása (az LCZ-k besorolása humánkomfort szempontjából, ahol lehetséges az éjjeli adatok alapján történt)

Helyszín	Módszerek	Paraméterek	Kedvező humánkomfort	Kedvezőtlen humánkomfort	Forrás
Mendoza, Argentína	mérés	PET	LCZ 2	LCZ 3	Puliafito et al. 2013
Barranquilla, Kolumbia	mérés, kérdőív	TSV	LCZ 7	LCZ 3	Villadiego, Velay-Dabat 2014
Szeged, Magyarország	mérés	PET	LCZ 2, 3	LCZ D	Unger et al. 2015
Novi Sad, Szerbia	mérés	PET	LCZ 2, 5	LCZ A, D	Milošević et al. 2016
Shenzhen, Kína	mikrometeorológiai mérés, modellezés	PET, OUT_SET*, UTCI	LCZ 1, A	LCZ 3, 8	Liu et al. 2018
Szeged, Magyarország	mérés	PET	LCZ 2	LCZ D	Unger et al. 2018c

Helyszín	Módszerek	Paraméterek	Kedvező humánkomfort	Kedvezőtlen humánkomfort	Forrás
Gwonseon-gu, Dél-Korea	mikrometeorológiai mérés	PET	LCZ 2	LCZ D	Kong et al. 2018
Brno, Csehország	modellezés	H	LCZ 2	LCZ D	Geletič et al. 2018
Nagpur, India	mérés	DI, RSI	LCZ 9	LCZ 3	Kotharkar et al. 2019
Hong Kong, Kína	mikrometeorológiai mérés, kérdőív	PET, TS	LCZ 2, D	LCZ 1, 3	Lau et al. 2019
Tulkarm, Haifa, Tel Aviv, Izrael	mérés	DI, UPCI, PET	LCZ 6, 8	LCZ 2	Al Abadla et al. 2020
Roorkee, India	mérés, modellezés	PET, UPCI	LCZ 5	LCZ 3	Rahul et al. 2020
Sriniketan-Santiniketan, India	mikrometeorológiai mérés, kérdőív	PET, SET*, DI	LCZ 3, 6	LCZ A	Das et al. 2020, Das, Das 2020
Ghent, Belgium	mérés	PET	LCZ 3	LCZ D	Top et al. 2020
Aracaju, Brazília	mérés	PET	LCZ A	LCZ 4	Anjos et al. 2020b
Nagpur, India	mérés	HI, H	LCZ 3, 9	LCZ D	Kotharkar et al. 2021
Santos, Brazília	mérés, modellezés	Tmrt	LCZ 1	LCZ 3	Pereira et al. 2021
Tokyo, Japán	mérés, modellezés	WGBT	LCZ 1	LCZ 5	Wang et al. 2021a
Shenzhen, Kína	mérés	UTCI	LCZ 1	LCZ F	Wu et al. 2022
Zhengzhou, Kína	modellezés	PMV	LCZ 1	LCZ 3	Ren et al. 2022
Adana, Törökország	modellezés	PET	LCZ 1	LCZ 5	Cilek, Uslu 2022
Berlin, Németország	mérés	PET	LCZ 2	LCZ 4	Langer et al. 2022

A téma jelenlegi szakirodalmát áttekintve (3.12. táblázat) az az alapvető következtetés, hogy a vizsgálatok nagyon eltérő módon közelítik meg a témát. Nem egységes a vizsgált időszak, ami azért problémás mert napszaktól függően nagyon eltérő humánkomfort viszonyok uralkodnak. Nappal alapvetően a besugárzás különbségei okozzák a jelentős különbséget, míg éjjel a magasabb hőmérséklet és a felszínérdesség miatt alacsonyabb szélesség okoz eltéréseket. A kettő napszak közül így inkább az éjjeli állapotot befolyásolják az LCZ-k, míg a nappali állapotokon a közvetlen mikrokörnyezet hatásait figyelhetjük inkább meg. A vizsgálatokban sok esetben a lokális törvényszerűségek feltárására mikroklíma méréseket alkalmaznak, majd azt extrapolálják. Mindezek miatt nagyon vegyesen alakul az, hogy mely LCZ-k a kedvezőek és melyek kedvezőtlenek a humánkomfort szempontjából (3.12. táblázat).

Az LCZ rendszert az elmúlt évtizedben számos további céllal alkalmazták városi környezetben (3.13. táblázat). A rendszer nagy előnye, hogy jól kezelhető, generalizált és a termikus viszonyokra reprezentatív kategóriákra különíti el a városi felszínt, így könnyen alkalmazható várostervezéssel, klímadaptációval kapcsolatos elemzések céljából (3.13. táblázat). Másik oldalról a várostervezéssel foglalkozó szakemberek is könnyen értelmezhetik a kategóriákat, így egy eszköz lehet a klímakutatók és várostervezők közötti kommunikációra

(Picone, Campo 2015), valamint összetett – urbanizációs modelleket is alkalmazó – vizsgálatok alapegysége lehet (Masson et al. 2014).

3.13. táblázat Az LCZ sémát felhasználó alkalmazott vizsgálatok részletei

Helyszín	Téma	Módszerek	Forrás
Paris, Franciaország	klíma adaptáció	térképezés, komplex modellezés	Masson et al. 2014
Phoenix, USA	várostervezés	mikroklíma modellezés	Middel et al. 2014
Glasgow, Egyesült Királyság	zöld infrastruktúra	térképezés, mikroklíma modellezés	Emmanuel et al. 2015, Emmanuel, Loconsole 2015
Buenos Aires, Argentína	várostervezés	térképezés	Picone, Campo 2015
Guangzhou, Kína	várostervezés	térképezés	Cai et al. 2016
São Paulo, Brazília	klíma adaptáció	mikroklíma mérés és modellezés	Duarte, Gonçalves 2018
Novi Sad, Szerbia	klímakockázat értékelés	térképezés	Savić et al. 2018b
Gyöngy-folyó deltája, Kína	urbanizáció	térképezés, műholdas adatfeldolgozás	Tse et al. 2018
Ghent, Belgium	klímakockázat értékelés	komplex modellezés	Steenveld et al. 2018
Colombo, Sri Lanka	várostervezés	térképezés	Perera, Emmanuel 2018
Vancouver, Kanada	zöld infrastruktúra	mikroklíma modellezés	Aminipouri et al. 2019
Yogyakarta, Indonézia	várostervezés	térképezés, műholdas adatfeldolgozás	Pradhesta et al. 2019
Kunming, Kína	várostervezés	térképezés, műholdas adatfeldolgozás	Vandamme et al. 2019
Brussel, Belgium	klímakockázat értékelés	térképezés, komplex modellezés	Verdonck et al. 2019
Sriniketan-Santiniketan, India	ökoszisztéma szolgáltatások	térképezés, műholdas adatfeldolgozás, modellezés	Das, Das 2019
São Paulo, Brazília	zöld infrastruktúra	műholdas adatfeldolgozás	Ferreira, Duarte 2019
Chongqing, Kína	klíma sebezhetőség	térképezés, műholdas adatfeldolgozás	Cai et al. 2019
Shenyang, Kína	városi ventiláció	meteorológiai mérés és modellezés	Zhao et al. 2020
Glasgow, Egyesült Királyság	várostervezés	mikroklíma modellezés	Maharroof et al. 2020
Dalian, Kína	UHI mitigáció	térképezés, műholdas adatfeldolgozás	Yang et al. 2020
Verona, Olaszország	kék-zöld infrastruktúra, klíma adaptáció	térképezés, komplex modellezés	Tomasi et al. 2021
Prambanan, Indonézia	klíma adaptáció	térképezés, komplex modellezés	Binarti et al. 2021
Guangzhou, Kína	zöld infrastruktúra	térképezés, műholdas adatfeldolgozás, komplex modellezés	Wang et al. 2021b
Kampala, Uganda	növényfenológia	műholdas adatfeldolgozás	Kabano et al. 2021
Szeged, Magyarország	várostervezés, zöld infrastruktúra	klíma modellezés	Gál et al. 2021a
Angkor Watt, Kambodzsa	archeológia	mikroklíma modellezés	Binarti et al. 2022
Borobudur, Indonézia			
Roro Jonggrang, Indonézia			

Helyszín	Téma	Módszerek	Forrás
Londrina, Brazília	zöld infrastruktúra	térképezés, meteorológiai modellezés	Sobrinho et al. 2022
Khartoum, Szudán Addis Ababa, Etiópia Kampala, Uganda Dar es Salaam, Tanzánia	kék-zöld infrastruktúra	térképezés, műholdas adatfeldolgozás	Li et al. 2022
Lahore, Pakisztán	klímaváltozás hatásainak ellenálló városi tervezés	térképezés, műholdas adatfeldolgozás	Aslam et al. 2022
Manizales, Kolumbia	várostervezés	térképezés, meteorológiai mérés	Roncancio, Stewart 2022

Az LCZ séma elfogadottságát az is jelzi, hogy van olyan kutatásra is példa, ami eredeti céljától vagy akár a városklímától is távol esik. Zhao et al. (2022) a városi ventilláció vizsgálatára, valamint Tse et al. (2018) urbanizációs folyamatok megfigyelésére alkalmazta a sémát. A rendszert alkalmazták növényfenológiai vizsgálatban (Kabano et al. 2021), illetve arra is van példa, hogy régészeti feltárásokkal kapcsolatos elemzésre használják (Binarti et al. 2022).

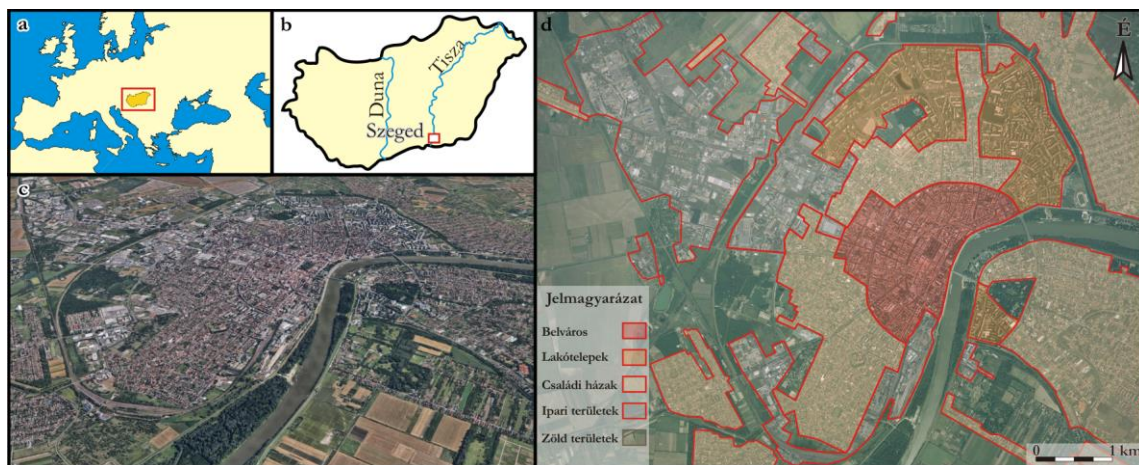
4. Anyag és módszer

Munkásságom jelentős része módszertani fejlesztésekre irányult, így ezeket az eredmények fejezetben részletezem, tekintve, hogy azok új tudományos eredménynek tekinthetők. Jelen fejezetben azokat az összetett módszereket ismertetem, amelyek felhasználásra kerültek a munka során. Meg kell jegyezni, hogy a dolgozatban bemutatott vizsgálatok számos műholdas és térinformatikai adatbázist is alkalmaztak, ezeket a módszereknél, illetve a módszertani fejlesztések kapcsán az eredmények fejezetben a szükséges mértékben ismertetem, annak érdekében, hogy az eredmények leírása jóval követhetőbb legyen.

4.1. Vizsgált területek

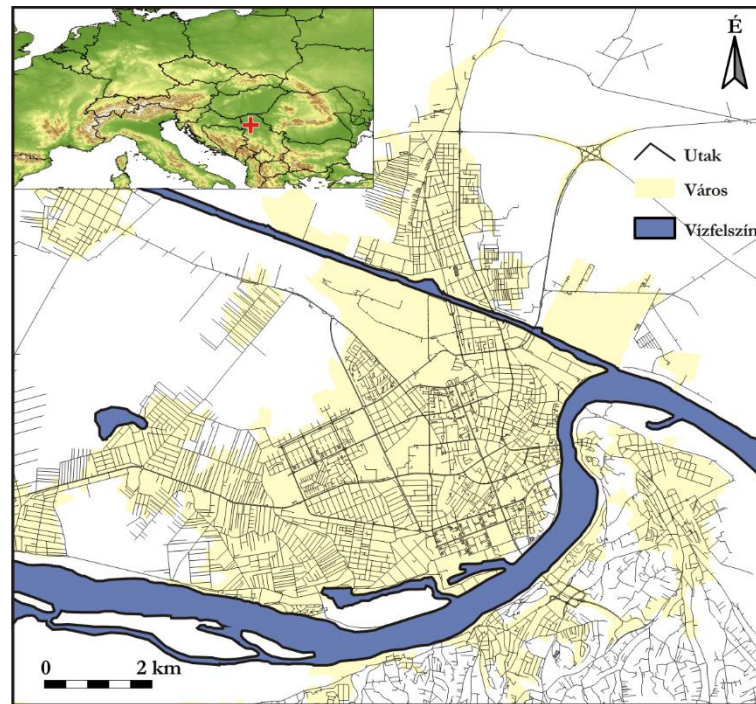
A dolgozat keretében több várossal kapcsolatos vizsgálatot is bemutatok. A vizsgálatok nagy része Szegedre koncentrált. A lokális klímazóna térképezés és a léghőmérséklet jellemzése során több alkalommal említésre kerül a szerbiai Novi Sad városa. A klímamodellezésre koncentráló vizsgálatok során pedig számos kárpátmedencei városra is kiterjed a munka.

Szeged (46,25°É, 20,15°K) sík területen fekszik, mintegy 80 m tengerszint feletti magasságban (4.1. ábra). A terület a Köppen-féle Cfa éghajlati osztályba tartozik (Kottek et al. 2006). A városnak 162 000 lakosa van, és beépített terület nagyságrendileg 40 km². A belvárost sűrű beépítés és viszonylag egységes 2-4 emeletes polgári paloták uralkodják, a város nagyrészen családi házas beépítés uralkodik, ÉK-en ipari raktárházak területek, jelentős területet foglalnak el a panel lakótelepek.



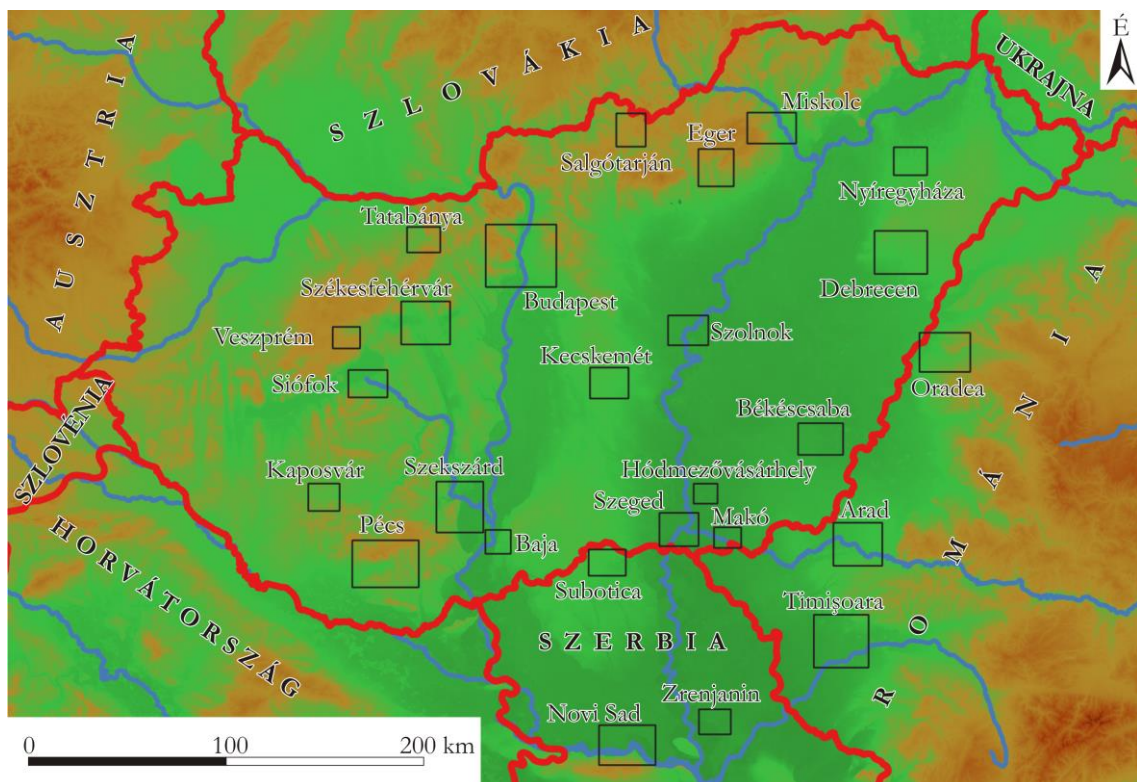
4.1. ábra Szeged elhelyezkedése (a) Európában, (b) Magyarországon és (c) a város látképe (maps.google.com) és (d) főbb beépítési típusai (Gál 2009, Unger et al. 2020a)

Novi Sad Szerbia É-i részén (45,25°É 19,85°K) sík területen található (4.2. ábra), tengerszint feletti magassága 80 m körüli. A városnak csak kis része terül el a Duna jobb partján, élénkebb domborzatú területen (Fruška Gora). A terület a Köppen-féle Cfa éghajlati osztályba tartozik (Kottek et al. 2006). Az 1949-2008 közötti időszak alapján évi középhőmérséklet 11,1°C és az átlagos éves csapadékmennyiség 615 mm (Unger et al. 2011). A város két fő részből áll, a nagyobbik rész 80 és 86 m tengerszint feletti magasság között fekszik egy síkságon, míg a kisebbik, D-i rész a Fruška Gora hegység É-i lejtőin helyezkedik el. A város területe 80 km², és 340 000 lakosával Szerbia második legnagyobb városa. A városközpont viszonylag sűrűn beépített és a város északi részén ipari övezet fekszik (Unger et al. 2011).



4.2. ábra Az Novi Sad elhelyezkedése és átnézeti térképe (Lelovics et al. 2016)

A klímamodellezéssel kapcsolatos munkánkban (5.6. fejezet) 26 különböző méretű és földrajzi háttérű – többnyire síkvidéki – várost vizsgáltunk a Kárpát-medencében (4.3. ábra). A városok népességét és tengerszint feletti magasságát a 4.1. táblázat összegzi. A városok mindegyike a Köppen-féle Cfa éghajlati osztályba tartozik (Kottek et al. 2006).



4.3. ábra A klímamodellezés során vizsgált Kárpát-medencei városok elhelyezkedése (a modelltartományokat fekete keretek jelölik) (Gál et al. 2021a)

4.1. táblázat A klímamodellezés során vizsgált városok népessége és tengerszint feletti magassága (Skarbit et al. 2021)

City	Lakosság (ezer fő)*	tenger szint feletti magasság (m)
Arad	169	115
Baja	36	98
Békéscsaba	59	88
Budapest	1675	120
Debrecen	201	117
Eger	52	156
Hódmezővásárhely	44	81
Kaposvár	63	154
Kecskemét	110	115
Makó	23	83
Miskolc	158	122
Novi Sad	215	81
Nyíregyháza	120	110
Oradea	207	130
Pécs	147	135
Salgótarján	35	242
Siófok	25	107
Subotica	100	109
Szeged	162	85
Székesfehérvár	96	119
Szekszárd	32	94
Szolnok	70	85
Tatabánya	68	144
Timisoara	315	87
Veszprém	55	268
Zrenjanin	80	80

*Adatok forrása a magyar városok esetén: <https://nyilvantarto.hu>
romániai és szerbiai városok esetén: <https://worldpopulationreview.com/>

4.2. WUDAPT LCZ térképezési módszer

A módszer fő célja az egyszerűség és a globális alkalmazhatóság (Bechtel et al. 2015). Ennek jegyében szabadon elérhető műholdképeket és szoftvereket alkalmaz. A szoftverek (Google Earth, SAGA-GIS) könnyen kezelhetőek és kellően egyszerűek ahhoz, hogy távérzékelési szakértői ismeretek nélkül is alkalmazhatóak legyenek. A feldolgozás bármilyen műholdképpel alkalmazható, leggyakrabban a Landsat műholdak felvételeit alkalmazzák (USGS 2016). A módszer a WUDAPT projekt keretében folyamatosan fejlődik, jelenleg már elérhető olyan online felület is, amely kiváltja a SAGA-GIS programban történő adatfeldolgozást (Demuzere et al. 2021).

A térképezés első lépése a tipikus LCZ területek azonosítása a Google Earth segítségével (Bechtel et al. 2015). Ezeket a területek később, mint tanulóterületek kerülnek felhasználásra a pixel alapú osztályozás során. A tanulóterületek LCZ osztályonként rendezve, valamint a vizsgált terület határa egy kml fájlban kerül tárolásra, ami a feldolgozás második lépésének az egyik bemenete.

A feldolgozás második fázisa a műholdképeken történő pixel alapú osztályozás (Bechtel et al. 2015). Az SAGA-GIS szoftverben történő feldolgozás a korábbiakban elkészült kml fájl és Landsat műholdképeket alkalmaz. A feldolgozás során az eredeti 30 m-es felbontásról áttérnek a 100 m-es felbontásra, majd a műholdképek és tanulóterületek felhasználásával egy irányított pixel alapú osztályozás történik a random Forrest algoritmus alkalmazásával. A számítások során a pixelek reflektancia értékeinek hasonlósága alapján minden rácspont esetén meghatározásra kerül a leginkább hasonló LCZ kategória, valamint az összes LCZ esetén a hasonlóság mértéke is.

Városi környezetben az 1,5-2 m magasságban mért hőmérsékleti érték esetén a forrásterület a környezet néhány száz m sugarú körére terjed ki (Oke 2004, Unger 2009). A térképezés célja ezzel összhangban nem más, mint a néhány száz m és több km karakterisztikus méretű homogén LCZ területek megtalálása. Ennek fényében a random Forrest osztályozás eredménye csak egy nyers LCZ-térkép, mivel minden 100 m méretű pixel más-más LCZ-osztályba tartozhat, és ebben az esetben az LCZ-terület jellemző méretére vonatkozó elvárás nem teljesülhet. Az osztályozás e zajos jellegének csökkentése érdekében összevonásra és osztályozás utáni szűrésre van szükség. A WUDAPT módszer esetén a többségi szűrők alkalmazásával oldható meg ez a probléma. Nincsen egységes iránymutatás a szűrők alkalmazásával kapcsolatban, a gyakorlati tapasztalatok alapján négy ilyen szűrőt alkalmaznak, melyek méretben eltérőek (1-4 pixel, azaz 100-400 m) ugyan, de minden esetben a központi rácspont értékéhez az adott sugarú körön belül elhelyezkedő rácsponti értékek közül leggyakoribb LCZ kategóriát rendeli hozzá. A feldolgozás végeredménye egy raszteres formátumú fájl, amit szabadon felhasználhatnak az LCZ-n alapuló vizsgálatoknál.

A módszert több a dolgozat keretében bemutatott vizsgálat során alkalmaztuk. A munka során a Landsat műhold több különböző időszakra vonatkozó, lényegében az összes elérhető felhőmentes felvételeinek összes spektrális sávjának adatát használtuk fel. A különböző időpontokból (évszakokból) származó több kép használata előnyös, így több spektrális információ felhasználásával az osztályozás jobb eredményeket ad, hiszen az évszakosan változó növényzet miatti reflektancia változásokra vonatkozó információk is reprezentálva vannak. A felvételeket az USGS-től (earthexplorer.usgs.gov) szereztük be. A képek kiválasztását követően lényegében minden felhőmentes felhasználásra került (Gál et al. 2015, Bechtel et al. 2019a).

4.3. Az átlagos városi hősziget intenzitás statisztikai modellje

Az 5.2. fejezetben bemutatott vizsgálatok során több alkalommal is felhasználásra került az éves átlagos UHI-intenzitás térbeli szerkezetének becslésére szolgáló módszer (Balázs et al. 2009). Ennek a többváltozós lineáris regresszió alapuló statisztikai módszernek a fő előnye, hogy az éves átlagos UHI térbeli eloszlását mindössze néhány olyan bemeneti paraméter segítségével lehetett becsülni, amelyek egyszerű módon műholdas adatok alapján meghatározhatók anélkül, hogy a városról részletes helyi információkkal rendelkeznénk.

Oke (1984) és Svensson et al. (2002) szerint városklimatológiai kutatásokhoz háromféle modellt lehet alkalmazni: numerikus, fizikai és empirikus alapú modelleket. Az empirikus modellek előnye, hogy megfigyelt statisztikai tulajdonságokon alapulnak, hátrányuk azonban, hogy gyakran egy adott helyszínre korlátozódnak. Az empirikus modellek közül a statisztikai megközelítések a leggyakoribb módszerek az UHI intenzitás és a kialakulását befolyásoló meteorológiai, valamint egyéb fizikai paraméterek közötti összefüggések feltárására. Így ezek a modellek hasznos kvantitatív információkat szolgáltathatnak a fent említett paraméterek szerepéről az UHI kialakulásában és térbeli eloszlásában (pl. Park 1986, Fortuniak 2003, Alcoforado, Andrade 2006).

Az UHI intenzitás (ΔT) térbeli eloszlása szezonális és napszakos változásokat mutat a meteorológiai és városi felszínparaméterek következtében (Oke 2002). A zavaró hatásoktól (domborzat, jelentős vízfelületek) mentes sík területek esetén az UHI térbeli eloszlása és intenzitása elsősorban a városi tényezők eredménye (Lowry 1977, Unger et al. 2001a). Számos vizsgálat során végezték el a ΔT becslését városi felszínparaméterek alkalmazásával (Goldreich 1970, Kuttler et al. 1996, Unger et al. 2000, Szymanowski 2003, Giridharan 2007).

A városi felszínparaméterek meghatározása terepi mérésekkel vagy más adatbázisok alapján igen időigényes és költséges feladat. Síkvidéki városok esetén – ahol a domborzat hatása nem számottevő – idő és költséghatékony megoldás a műholdképek alapján

meghatározható felszínparaméterek alkalmazása. Ebben az esetben ugyan csak kétdimenziós paraméterek (pl. beépítettség) számíthatók ki, azonban előállításuk rendkívül egyszerű feladat hiszen műholdas produktumok bármelyik város esetén rendelkezésre állnak.

A Balázs et al. (2009) publikáció keretében bemutatott empirikus modellünk fejlesztése egy földrajzi és éghajlati értelemben vett viszonylag homogén területen fekvő városok adatai alapján történt. A modell ebben az értelemben helyspecifikus, azonban a Kárpát medence síkvidéki területein szabadon alkalmazható további városok esetén, amennyiben hasonló méretű várost vizsgálunk. A modell fejlesztése Szeged (165 000 fő) és Debrecen (204 000 fő) területén mért UHI adatok és felszínparaméterek alapján történt. A figyelembe vett városi területek nagysága 30 km² körüli volt. A modell eredeti célja az volt, hogy 15 alföldi város esetén állítson elő becsült évi átlagos UHI térképeket, így adva egy provizórikus képet a hősziget nagyságáról és térbeli jellegzetességeiről (Balázs et al. 2009).

Az UHI intenzitására és annak térbeli szerkezetére (mint függő változóra) vonatkozó információk megszerzéséhez a hőmérsékleti adatokat mobil mérésekkel gyűjtötték Szeged és Debrecen városi területein, amelyeket 0,5 km felbontású cellákra osztottak (Unger et al. 2001b, Bottyán et al. 2005). A vizsgált területek Szegeden 107 cellából (25,75 km²), Debrecenben 105 cellából (26 km²) álltak, és a városok belső és külvárosi részét fedték le. Mindkét városban egy-egy vidéki cellát használtak referencia területként a hőmérsékleti adatok összehasonlításához. Ezek a cellák a városokon kívül helyezkednek el, és lényegében mezőgazdasági területek, azaz mindkét cella az LCZ D övezetbe tartozik, így vidéki területként jellemezhetők.

A szükséges adatokat a kijelölt útvonalakon közlekedő gépkocsikra szerelt szenzorokkal gyűjtötték 2002 áprilisa és 2003 márciusa között (Unger et al. 2001b, Bottyán et al. 2005). A mérési útvonalak minden cellán áthaladtak az úthálózat adottságának megfelelően. Mivel a hőmérséklet rövid távolságokon belül nem változik hirtelen, a mérések cellánkénti átlaga reprezentatívnak tekinthetők a cellák egészére vonatkozólag. Ez a fajta mobil mérés széles körben elterjedt a városklimatológiai vizsgálatokban (pl. Oke, Fuggle 1972, Moreno-Garcia 1994). A mérések 10 napos gyakorisággal történtek egyidejűleg, összesen 35 alkalommal mindkét városban, csapadékos helyzetek kivételével mindenféle időjárási körülmények esetén. A korábbi tanulmányok alapján az adatgyűjtés referenciaideje UHI napi maximális kialakulásának várható időpontja, azaz napnyugta után 4 óra volt (pl. Oke 1981, Unger 2004). Az UHI intenzitás (ΔT) cellánkénti értékei a következőképpen kerültek meghatározásra (Unger et al. 2001b):

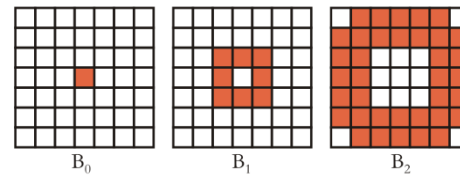
$$\Delta T = T_{\text{cella}} - T_{\text{cella(R)}}$$

ahol T_{cella} a városi cella hőmérséklete és $T_{\text{cella(R)}}$ a vidéki cella hőmérséklete. A ΔT éves átlagát a 35 mérés ΔT -értékeinek átlagolásával határoztuk meg.

Az UHI mező becsléséhez független változóként a szegedi és debreceni vizsgálati területeken a 0,5 km oldalhosszúságú rács minden egyes elemére 2D városi felszínborítási adatokat és a városhatártól való távolságot határoztunk meg.

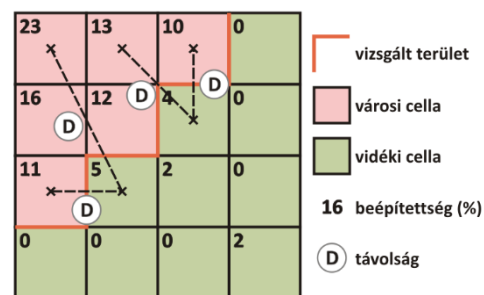
A mesterségesen fedett felszín aránya, vagy beépítettség (B_0) horizontálisan jellemzi a városi felszínt. Ezt a paramétert minden egyes cellára vonatkozóan a Landsat műholdfelvételek (USGS 2016) alapján határoztuk meg (Unger et al. 2001b). A felhasznált műholdfelvételek 2000-ben készültek, így kellően pontos képet adnak a hőmérsékletmérések idején (2002-2003) fennálló beépítettségi viszonyokról. A pixelértékekből kiszámításra került a normalizált vegetációs index (Normalised Difference Vegetation Index, NDVI, Gallo, Owen 1999, Lillesand, Kiefer 1987), majd az index értékei alapján elkülönítésre kerültek a beépített, vízzel vagy növényzettel borított pixelek, ami alapján végül kiszámításra került cellánként egy területi arány.

Fontos figyelembe venni a cellák környezetében található beépítettségi viszonyokat is, mert a tágabb környezet is befolyásolhatja az adott cella hőmérsékletét. A környezet hatásának figyelembevétele érdekében származtatott változókat, azaz a cellák körüli koncentrikus területek átlagos beépítettségi arányait (B_1 , B_2) képeztük (4.4. ábra). A városi és vidéki cellák megkülönböztetése a B_0 értéke alapján történt. Amennyiben a $B_0 < 5\%$, akkor a cella vidéki, ellenkező esetben városi. A küszöbérték alatti beépítettséű területek jellemzően vidéki területek, ahol előfordul néhány út vagy épület is. A beépítettségi paramétereket az adott város teljes vizsgált területén továbbá annak 1,5 km széles környezetében kerültek meghatározásra. Erre a kiterjesztésre a B_1 és B_2 paraméterek kiszámításához van szükség a vizsgált területek széléhez közeli cellák esetében.



4.4. ábra A B_0 , B_1 és B_2 felületi paraméterek kiszámításában részt vevő cellák (Balázs et al. 2009)

A távolság (a városközponttól vagy a városhatártól) olyan paraméternek tekinthető, amely jellemzi egy hely városon belüli elhelyezkedését. Ha összehasonlítunk azonos beépítettséű és jellegű területeket a külvárosban és a városközpontban, akkor a külvárosban alacsonyabb ΔT tapasztalható, mivel itt jelentősen érvényesülni tudnak az advektív hatások. A városhatártól való távolság (D) a vizsgált területen belüli és a legközelebbi 5%-nál kisebb beépítettséű cella közötti távolság (4.5. ábra).



4.5. ábra Példák a városhatártól való távolság (D) meghatározására (a beépített arányok %-ban vannak megadva) (Balázs et al. 2009)

Annak érdekében, hogy figyelembe vegyük a távolság (D) és a beépítettségi paraméterek (B_0 , B_1 és B_2) együttes hatását, új kombinált városi paraméterekben összegezzük azokat (B_0' , B_1' és B_2'). Fortuniak (2003) munkája alapján a városhatártól vett távolság és az UHI nagysága között logaritmikus jellegű kapcsolat van, így a kombinált paraméterek a beépítettségi paraméterek és a városhatártól vett távolság természetes alapú logaritmusának szorzatai., azaz a $B_0' = B_0 \ln D$, $B_1' = B_1 \ln D$ és $B_2' = B_2 \ln D$.

A kapott kombinált városi felszínparaméterek és az éves átlagos UHI intenzitás közötti kapcsolat meghatározása céljából, Szeged és Debrecen adatai alapján, egy többváltozós lineáris regressziós modell került kidolgozásra. A modellben a ΔT ($^{\circ}\text{C}$) a prediktandus és B_0' , B_1' , B_2' paraméterek pedig a prediktorok. A modell egyenletét a lépésenkénti többváltozós regresszió módszerével (Cohen et al. 2014) került meghatározásra SPSS 11 szoftver alkalmazásával. A modellezenlet a következő:

$$\Delta T = 0,001032 B_0' + 0,002455 B_1' + 0,002629 B_2'$$

Az alkalmazott szegedi és debreceni adatsorok tartományai alapján a kapott modellezenlet az 4.1. táblázatban bemutatott intervallumokban alkalmazható. A modellezenletben nincs konstans, így ha a beépítettséggel kapcsolatos paraméterek értéke zérus, azaz nem városi területen vagyunk akkor az egyenlet a vártnak megfelelően zérus UHI intenzitást ad. Ez összhangban van azzal, hogy a beépítetlen területeken nem tapasztalható hőmérsékleti többlet.

A modellezenlet validációja három hasonló környezeti feltételekkel rendelkező településről származó független hőmérsékleti adatsorok alkalmazásával készült és kielégítő

eredményeket mutatott (Balázs et al. 2009). A hőmérsékleti mezők interpolációját standard Kriging eljárással, lineáris variogram modell alkalmazásával készítettük (Chiles, Delfiner 2009, Emery 2006).

4.2. táblázat Az empirikus modell fejlesztéséhez felhasznált paraméterek intervallumai (Balázs et al. 2009)

Parameter	Minimum	Maximum
B ₀ (%)	0	85,5
B ₁ (%)	0,1	63,1
B ₂ (%)	8,1	49,7
D (m)	0 <	3162

Az itt bemutatott modellt az 5.2. fejezet keretében bemutatott vizsgálat során alkalmaztuk Szeged és Novi Sad esetén. Az alkalmazás feltétele, hogy a felszínparaméterek tartományai ne haladják meg a modell fejlesztésénél alkalmazott adatsorok értéktartományát, valamint földrajzi és éghajlati értelemben hasonló területen helyezkedjen el a város. Szeged esetén ez nem szorul magyarázatra. Novi Sad esetén a felhasznált adatsorok alapján az első feltétel teljesül, míg a második feltétel is elfogadhatónak tekinthető hiszen a város az Alföld déli határán, a szegedihez hasonló éghajlatú területen helyezkedik el. Az 5.2.1. fejezet keretében bemutatott vizsgálat során az empirikus modell alkalmazásához szükséges alapadatokat eltérő módon határoztuk meg – amit ott részletezünk – azonban ez nem befolyásolja a módszertan pontosságát.

4.4. A városi hősziget szempontjából ideális napok meghatározása

A városi hősziget azokon az éjszéken tud karakteresen kifejlődni, amikor a éjjeli kisugárzás zavartalan. Az ilyen időjárású helyzetek azonosítása, azaz az ideális körülményekkel rendelkező napok kiválasztása jelentősen segíti a városi hatások pontos értékelését. Az ideális napok kiválasztása az időjárási faktoron (weather factor, Φ_w , Oke 1998) alapul, amelyet a következőképpen számíthatunk ki:

$$\Phi_w = u^{-\frac{1}{2}} \cdot (1 - kn^2)$$

ahol u a szélsébség (ms^{-1}), k a felhőmagasságra vonatkozó Bolz-korrekciós tényező (Bolz 1949), n a felhő mennyisége tizedekben. A Φ_w dimenzió nélküli paraméter, értéke 0 és 1 között változik.

A dolgozat keretében bemutatott vizsgálatok során az Országos Meteorológiai Szolgálat szegedi magaslégkörkutató obszervatóriumának adatai alapján számítottuk ki a Φ_w értékeket egyórás intervallumokra. A kapott értékeket napkeltétől a következő napkeltéig átlagoltuk, mivel az éjszakát megelőző nappali és éjszakai időjárási viszonyok azok, amelyek leginkább elő tudják segíteni a városi hatások érvényesülését az UHI kifejlődése közben. A helyi hatások kialakulását elősegítő időjárási helyzetek elkülönítése érdekében ideális napnak tekintettük a Stewart (2014) által leírtakhoz hasonlóan azt a napot, amelynek átlagos Φ_w értéke nagyobb volt mint 0,7.

4.5. Alkalmazott klímaindexek

A dolgozatban bemutatott vizsgálatok során számos klímaindexet alkalmaztunk. Az egyértelműség érdekében a mérési adatok feldolgozásánál alkalmazott indexeket az 4.3. táblázatban definiálom.

4.3. táblázat Az alkalmazott klímaindexek definíciói (*CEST)

Index	Definíció
Fagyos nap	$T_{\min} < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$
Hideg nap	$T_{\text{átlag}} < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$
Téli nap	$T_{\max} < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$
Fűtési nap	$T_{\text{átlag}} < 15 \text{ } ^\circ\text{C}$
Hűtési nap	$T_{\text{átlag}} > 18,3 \text{ } ^\circ\text{C}$
Meleg nap	$T_{\text{átlag}} > 20 \text{ } ^\circ\text{C}$
Nyári nap	$T_{\max} \geq 25 \text{ } ^\circ\text{C}$
Hőségnap	$T_{\max} \geq 30 \text{ } ^\circ\text{C}$
Sörkerteti nap	$T_{20\text{h}}^* \geq 20 \text{ } ^\circ\text{C}$
Nyári este	$T_{22\text{h}}^* \geq 20 \text{ } ^\circ\text{C}$
Meleg éjszaka	$T_{\min} \geq 17 \text{ } ^\circ\text{C}$
Trópusi éjszaka	$T_{\min} \geq 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

4.6. Humánkomfort paraméterek számításának részletei

Az emberi test és a környezete közötti hőcserét, és ennek következtében az emberi hőérzetet ugyanis nemcsak a környező levegő hőmérséklete, hanem a rövid- és hosszuhullámú sugárzás, a levegő páratartalma és a légáramlási viszonyok együttesen határozzák meg. Ezek komplex hatásait az emberi energiaegyensúlyon alapuló modellekből származtatott különböző bioklimatológiai indexek értékei közelítik, így ezek megbízhatóbb mérőszámok az emberi hőérzetnek, mint a léghőmérséklet (pl. Höppe 1993, McGregor et al. 2015). Az egyik leggyakrabban használt ilyen index a fiziológiailag ekvivalens hőmérséklet (Physiologically Equivalent Temperature, PET, pl. Konstantinov et al. 2014).

A PET kiszámítása a dolgozatban bemutatott kutatások egy részében a RayMan szoftverrel történt (Matzarakis et al. 2007, 2010), amelyet a Német Mérnöki Társaság 3787-es irányelve (VDI 1998) szerint fejlesztettek ki. A program egyszerű és összetett környezetekben számítja ki a sugárzási fluxusokat különböző paraméterek alapján, mint például a levegő hőmérséklete, a levegő páratartalma, a felhőzet mértéke, a napszak és az évszak, valamint a környező felületek albedója, a tengerszint feletti magasság és földrajzi koordináták.

A számítások elvégzésére a szoftver számos lehetőséget kínál, melyek alapvetően két csoportba sorolhatók: (i) az adott pont közvetlen környezetében található tereptárgyak és néhány állapothatározó alapján becsüli a sugárzási környezetet, majd számolja a PET értékét, vagy (ii) sugárzás vagy felhőzet adatok, valamint a főbb állapothatározók alapján számolja a PET értékét. A dolgozatban bemutatott vizsgálatok során az utóbbi megközelítést alkalmaztuk. Ebben az esetben a számításokhoz a modell a léghőmérsékletet (T), a relatív nedvességet (RH), a felhőzetet (C), a szélességet (u), valamint a helyszín földrajzi koordinátáit és a dátumot használja fel (Matzarakis et al. 2007, 2010).

Abban az esetben, ha a modellt a városklíma monitoring rendszer adataival használjuk szükséges a szél, valamint a globálsugárzás és a felhőzet becslése. Azt, hogy ezeket az adatokat hogyan becsülhetjük, az 5.3.2. fejezetben fejtem ki, mivel az ott bemutatott megközelítés is új tudományos eredménynek tekinthető.

A folytonos PET értékek dimenziója $^\circ\text{C}$, azonban több vizsgálat keretében igyekeztek ezt a folytonos paramétert kategóriáikba sorolni a könnyebb értelmezhetőség céljából. Eredetileg Matzarakis, Mayer (1996) határozta meg a hőterhelési fokozatokhoz tartozó PET tartományokat (4.4. táblázat). Bár ez a skála a Nyugat-, illetve Közép-Európában élőkre vonatkozik, a kapcsolódó szakirodalomban széles körben használják egész Európára (pl. Gulyás et al. 2006, Andrade, Alcoforado 2008, Müller et al. 2014, Kántor et al. 2018) és világszerte más éghajlati régiókra is (pl. Toy, Yilmaz 2010, Puliafito et al. 2013, Fang et al.

2018). Hamarosan kiderült azonban, hogy ezek a PET kategóriák nem feltétlenül érvényesek a Közép-Európán kívül élő emberekre (Matzarakis et al. 1999). Ezért a megfelelőbb helyi alkalmazásokat megcélözva felmerült az igény az éghajlati alapú kategorizálásra (akár szezonálisan is). Az ilyen típusú tartománykalibráláshoz átfogó és hosszú távú adatgyűjtésre van szükség (pl. nagyszámú helyi meteorológiai mérés és a terület használóival készített interjúk) (Kántor et al. 2012a). Van néhány példa a hőterhelési kategóriák helyi kiigazítására összpontosító tanulmányokra, figyelembe véve a helyiek hőérzetének jellemzőit (pl. Lin, Matzarakis 2008, Mahmoud 2011, Cohen et al. 2013, Liu et al. 2016, Krüger et al. 2017, Hirashima et al. 2018, Lam et al. 2018). A magyar lakosságot, mint a tanulmány célcsoportját tekintve, szezonálisan kalibrált PET-skálákkal rendelkezünk (4.4. táblázat), amelyek egy többéves hőkomfort-felmérésen alapulnak (Kántor et al. 2016, Kovács et al. 2016). A 4.4. táblázat tartalmazza a tanulmányhoz szükséges nyári PET-kategóriákat.

4.4. táblázat Eredeti hőterhelési kategóriák (PET, °C) az egész évről (*Matzarakis, Mayer 1996) és a magyar lakosságra kalibrált nyári kategóriák (**Kovács et al. 2016)

Kategóriák	hideg	hűvös	enyhén hűvös	neutrális	enyhén meleg	meleg	forró
*Éves	4 - 8	8 - 13	13 - 18	18 - 23	23 - 29	29 - 35	35 - 41
**Nyár	n.a.	- 13,1	13,1 - 17,3	17,3 - 22,4	22,4 - 28,9	28,9 - 41,4	41,4 -

4.7. Városi léptékű időjárás modellezés

A városi léptékű időjárás modellezéssel foglalkozó munkánkban a Weather Research and Forecasting (WRF) modellt (Skamarock et al. 2008) alkalmaztuk.

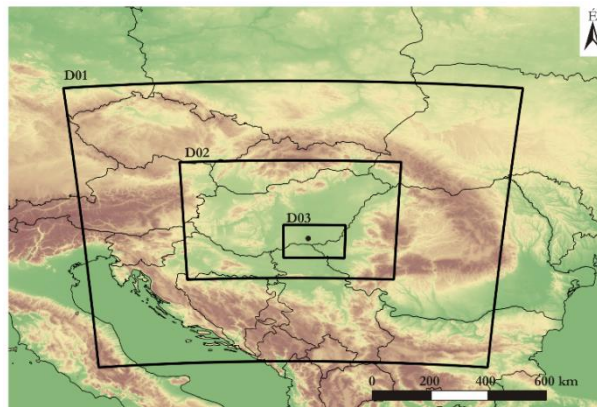
A városi léptékű szimulációhoz szükséges felszínmodelleket alkalmazni a városi hatások figyelembevétele céljából. Több ilyen séma ismeretes, melyek közül kiemelhető az egyrétegű (Kusaka et al. 2001, Kusaka, Kimura 2004), a többrétegű (Martilli et al. 2002, Salamanca, Martilli 2010), a városi energiamérleg (Masson 2000) a MesoNH modellben, a Met Office Reading Urban Surface Exchange séma (Porson et al. 2009) a Met Office Unified modellben. Megfelelő konfigurációkkal a kapcsolt UCL modellek képesek reprodukálni a városi határrétegben zajló folyamatok többségét az épületektől a regionális léptékig. Regionális léptékben a szimulációk elsősorban az UHI, a szélesebség és irány, a légnedvesség és a szélsőséges időjárási események (heves esőzések, hőhullámok) napszakos változására és térbeli eloszlására összpontosítanak.

A WRF nem hidrosztatikus mezoskála-modellt (Skamarock et al. 2008) olyan alkalmazásokra tervezték, mint az időjárás-előrejelzés, a regionális éghajlat és a levegőtisztaság modellezése. A összetett városi környezetet a különböző komplexitású felszínmodellek révén veszik figyelembe. Az első kísérlet a városi folyamatok WRF-ben való leképezésére egy módosított paraméterezés volt (Liu et al. 2006), amely lényegében a Noah felszínmodell egyes változóinak módosítása volt. Kusaka et al. (2001), valamint Kusaka, Kimura (2004) egy egyrétegű városi felszínmodellt (SLUCM) dolgoztak ki. Ez a séma a városi geometriát végtelen hosszúságú, háromdimenziós utcakanyonok tömbjeként kezeli. A SLUCM számíthatóvá teszi a rövid- és hosszuhullámú sugárzás visszaverődését és csapdázását, valamint a falak árnyékoló hatását. A prognosztikai változók közé tartozik az út, a fal és a tető hőmérséklete, valamint a vízszintes és függőleges felületekről kibocsátott fluxusok. A WRF-ben a különböző SLUCM-paramétereket minden egyes városi felszínhasználati kategóriához hozzárendelik. A BEP (Building Effect Parameterization, Martilli et al. 2002) és a BEM (Building Energy Model, Salamanca, Martilli 2010) többrétegű lombkorona-sémái 2010 óta érhetőek el a WRF-hez. A BEP-et a városi határrétegen belüli impulzus, nedvesség és épület légkör hőcseréjének leképezéséhez alkották. A BEM-et az épületek belseje és a környező légkör közötti kölcsönhatások figyelembevételéhez hozták

létre. Figyelembe veszi például a hűtő- és fűtőberendezések hőtermelését és a metabolikus hőtermelést is az épületek különböző szintjein.

A komplex városi geometria figyelembe vételéhez számos paraméterre van szükség. A közepesen összetett SLUCM is több mint 20 városi felszínparamétert alkalmaz minden egyes felszínhasználati osztályhoz. Számos olyan felszínhasználati adatbázis áll rendelkezésre, amelyet a modell kezelni képes, ezek a USGS (Homer et al. 2004), CORINE (Bossard et al. 2000). Az LCZ séma elterjedését jelentősen segítette, hogy Martilli et al. (2016) bemutatta a szükséges módosításokat a WRF 3-as verziójában (Skamarock et al. 2008), majd a 4-es verzió (Skamarock et al. 2019) pedig már eleve támogatta ezt. Fontos kérdés azonban az LCZ osztályok megfelelő paramétereinek definiálása, hiszen a megfelelő értékek megtalálása jelentősen javítja a modell pontosságát. Az LCZ séma optimális integrálása kapcsán kapott eredményeinket az 5.5 fejezetben ismertetem.

A munkáink során a szimulációkat a WRF modell 3.8.1. verziójával végeztük, amelyhez Kusaka et al. (2001) és Kusaka, Kimura (2004) SLUCM modelljét párosítottuk. Három egyirányú, egymásba ágyazott tartományt (4.6. ábra) alkalmaztunk 13,5 km, 4,5 km és 1,5 km rácsfelbontással (Molnár et al. 2018). A Sigma függőleges koordinátákat a felszíntől 20 hPa-ig 44 függőleges szintre osztottuk, amelyből 20 volt 1,5 km alatt, annak érdekében, hogy a városi határréteg megfelelő pontossággal le tudjuk képezni. A szimulációk kezdeti és peremfeltételeit 3 órás NCEP GFS-adatkészlet biztosította 0,25°-os horizontális felbontással (Molnár et al. 2018).



4.6. ábra Az alkalmazott modelltartományok (Molnár et al. 2018)

4.5. táblázat Alapvető információk a szimulációk modellfelépítéséről (Molnár et al. 2018)

Alap információk	
modell verzió	WRF v3.8.1.
felpörgési és szimulációs idő (óra)	24 és 130
Kezdeti és peremfeltételek	GFS 0,25° 3 órás intervallumokkal
Grid beállítások	
felbontás a belső domainben	1,5 km
a domainek száma és felbontásuk aránya	3 és 1:3
vertikális szintek	44 (sigma)
Parametrizációk	
felszín modell	Noah LSM
UCL modell	SLUCM
felszíni réteg	módosított MM5
határréteg	BouLac
rövid és hosszuhullámú sugárzás	RRTMG
mikrofizika	WSM5
konvekció	Kain-Fritsch

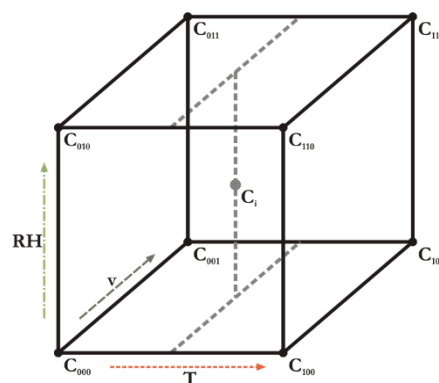
A modell beállításait a 4.5. táblázat összegzi. A szimulációk során a következő fizikai paraméterezéseket kapcsoltuk be: Noah felszíni modell (Tewari et al. 2004), Rapid Radiative Transfer Model (RRTMG) séma a hosszú- és rövidhullámú sugárzásra (Mlawer et al. 1997), módosított MM5 (Jimenez et al. 2012), BouLac határrétegséma (Bougeault, Lacarrere 1989), WSM 5-osztályú séma (Hong et al. 2004) a mikrofizikára, és a konvekció leírására a Kain-Fritsch paraméterezés (Kain 2004). A konvekciós sémát nem vettük figyelembe a legfinomabb tartományban (D03), mivel a modell ilyen finom felbontáson (1,5 km) képes explicit módon megoldani azt.

4.8. Városi léptékű klímamodellezés

Vizsgálataink során a városi léptékű klímamodellezés keretében a MUKLIMO_3 modellt (Sievers 1995) alkalmaztuk. Ezt a nem hidrosztatikus mikroskála modellt a Német Meteorológiai Szolgálat (DWD) fejlesztette ki. A Reynolds-átlagolt Navier-Stokes-egyenleteket oldja meg, hogy szimulálja a légköri áramlási mezőket épületek jelenlétében (Sievers, Zdunkowski 1986, Sievers 1990, Sievers 1995). A kezdeti feltételeket a vizsgált területen belüli referenciaállomásról származó 1D profil biztosítja, ami származhat mérésből, és más modelltől is. A modell több alkalommal bizonyította a megfelelő városi klímamodellezés lehetőségét (Früh et al. 2011, Buchholz, Kossmann 2015, Žuvela-Aloise et al. 2016, 2018, Geletič et al. 2016b). A modell nem tartalmazza a felhőfolyamatokat, a csapadékot és az antropogén hőhatást, de képes szimulálni a hőmérséklet, a páratartalom és a szél jellemzőinek napi ciklusát. A MUKLIMO_3 modell alapvető kimenetei a léghőmérséklet, légnedvesség és a szélmező egy 3 dimenziós rácson, további kimenetei között még stacionárius paraméterek szerepelnek. A vertikális felbontás (10 és 100 m között) általában nagyobb a felszín közelében vagy olyan magasságokban, ami a vizsgálat szempontjából fontos. A szimulációkat vizsgálatainkban 100 m-es vízszintes felbontással és 10 és 50 m között változó függőleges felbontással végeztük, körülbelül 1000 m függőleges magasságig (Bokwa et al. 2018). A kezdeti feltételeket a referenciaállomásról származó egy dimenziós hőmérséklet, relatív nedvesség és szélesség profilok adják.

A modell domain leírásához több különböző bemeneti fájl szükséges. A MUKLIMO_3 futtatása történhet meghatározott és nem-meghatározott épületekkel, ami abban különbözik, hogy milyen bemeneti adatok szükségesek. A nem-meghatározott épületekkel történő modellezés a gyakoribb eset, mivel számítási igénye kisebb. Ekkor 3 input fájl szükséges: rácspontonként a felszínhasználat és a domborzat magassága, valamint egy táblázat, ami leírja az egyes épület- és növényosztályok tulajdonságait. Meghatározott épületek esetében az épületek pontos megadása szükséges egy vagy több rácsponton belül. Ekkor a nem-meghatározott modell futtatás bemeneti fájljai mellett még szükség van az épületeket és utcákat megadó fájlokra is (Unger, Gál 2017).

A beépített területek felszínközeli mikroskálájú folyamatainak modellezése klimatológiai időskálán (30 év vagy több) jelentős számítási kapacitást igényel. A cuboid módszert, ami egy dinamikai-statisztikai leskalázási technika, ennek elkerülésére fejlesztették ki (Früh et al. 2011). A módszer előnye, hogy trilineáris interpolációs sémát használva a hosszú idejű regionális klímaszimulációk vagy megfigyelések mikroskálájú szimulációkkal kombinálhatók. A módszer feltételezi, hogy a városi hőterhelés a meteorológiai paraméterek sajátos kombinációjának esetében tud



4.7. ábra A cuboid módszer sémája (Früh et al. 2011, Žuvela-Aloise et al. 2014)

kialakulni és három paraméterrel meghatározható: léghőmérséklet, relatív nedvesség és szélsébség (4.7. ábra). Ezek a paraméterek a cuboid dimenzióit reprezentálják, míg a kedvező időjárási körülmények a cuboid sarkait. A MUKLIMO_3 modellel ezeket a sarkokat szimuláljuk két uralkodó szélirányra. A szimulációk mellett egy 30 éves napi adatsor szükséges, amely lehet mért adat a vizsgált területről vagy klímamodellek eredménye. Az adatsornak hőmérséklet (T), relatív nedvesség (RH), szélirány és szélsébség (v) adatokat kell tartalmaznia. A cuboid módszer eredményeként különböző klímaindexek (nyári nap, hőségnap, sörkert nap, nyári éjszaka, meleg éjszaka, trópusi éjszaka) 30 évre vonatkozó átlagainak területi eloszlását kapjuk meg.

Munkáink során az 1981-2010-es referenciaidőszakra, valamint jövőbeli időszakokra (2021-2050 és 2071-2100) alkalmaztuk az eljárást. Az ehhez szükséges napi hőmérséklet, relatív nedvesség és szélmező adatokat a referenciaidőszakra mérési adatsor vagy a Carpatclim adatbázis (Szalai et al. 2013) szolgáltatotta, a jövőbeli időszakokra pedig regionális klímamodellek eredmények (EURO-CORDEX). A 2021-2050 és 2071-2100 időszakokra az EURO-CORDEX modell szimulációk (Jacob et al. 2013) bias korrigált léghőmérséklet, relatív nedvesség, szélsébség és szélirány adatait használtuk. A szimulációk felbontása $0,11^\circ$ (~ 12 km) és a legújabb RCP (Representative Concentration Pathways) szcenáriókat alkalmazzák, melyek nem társadalmi-gazdasági tényezőkön, hanem a sugárzási kényszer változásán alapulnak (IPCC 2013). Tizenkét modell kimeneteit használtuk fel a cuboid módszerhez szükséges RCP4.5 és PCP8.5 szcenárióra vonatkozó átlagos adatok kiszámításához.

4.6. táblázat Az alkalmazott EURO-CORDEX éghajlati modellszimulációk részletei (Gál et al. 2021b)

	Szervezet	Globális klímamodell	Regionális klímamodell
1.		CNRM-CM5	
2.	CLMcom	EC-EARTH	CCLM4
3.		HadGEM2	
4.		MPI-ESM-LR	
5.	DMI	EC-EARTH	HIRHAM5
6.	KNMI	EC-EARTH	RACMO22E
7.		HadGEM2	
8.		CNRM-CM5	
9.		EC-EARTH	
10.	SMHI	IPSL-CM5A-MR	RCA4
11.		HadGEM2	
12.		MPI-ESM-LR	

5. Eredmények

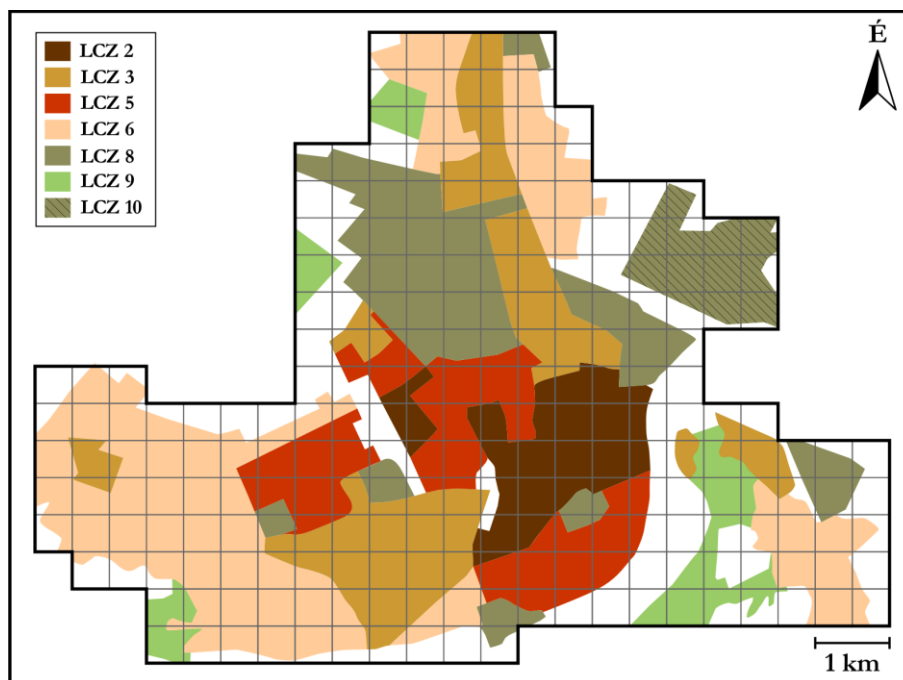
A fejezet keretében a lokális klímazónák rendszerével kapcsolatos eredményeimet mutatom be röviden. Számos területen a terjedelmi korlátok miatt csak arra van mód, hogy rövid bepillantást adjak a témával kapcsolatos publikált eredményeimről.

5.1. Lokális klímazónák térképezése

A lokális klímazónák térképezésének az ötlete már 2009 körül felmerült, köszönhetően annak, hogy ekkoriban már körvonalazódott az LCZ sémája (Stewart, Oke 2009). A rendszert eredendően mérőállomások metaadatainak leírására, illetve a városklimatológiai megfigyelésekben eddig uralkodó város-vidék összehasonlítás hiányosságainak korigálására szánták. Így kijelenthető, hogy a térképezési célzatú alkalmazás ekkor forradalmi volt, illetve mint később kiderült, egy jelentős új területet (3.2. fejezet) nyitott meg a városklimatológia témakörén belül. Ennek a munkásságomban rendkívül fontos területnek a főbb momentumait ismertetem ebben a fejezetben.

5.1.1. Szubjektív térképezés

A lokális klímazónák térképezésének első módszere egy szubjektív eljárás volt (Unger et al. 2011). A térképezés Google Maps műholdas adatok, a Stewart, Oke (2010) által adott útmutatás és személyes tapasztalatok alapján történt (5.1. ábra).

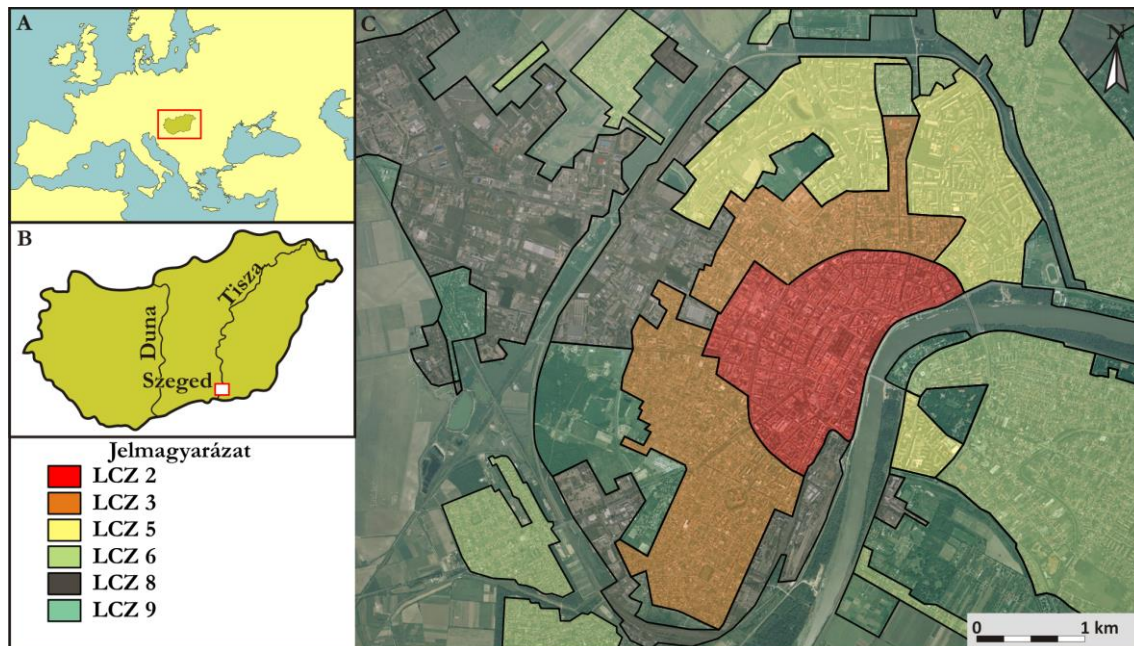


5.1. ábra A lokális klímazónák térképe Novi Sad esetén (Unger et al. 2011)

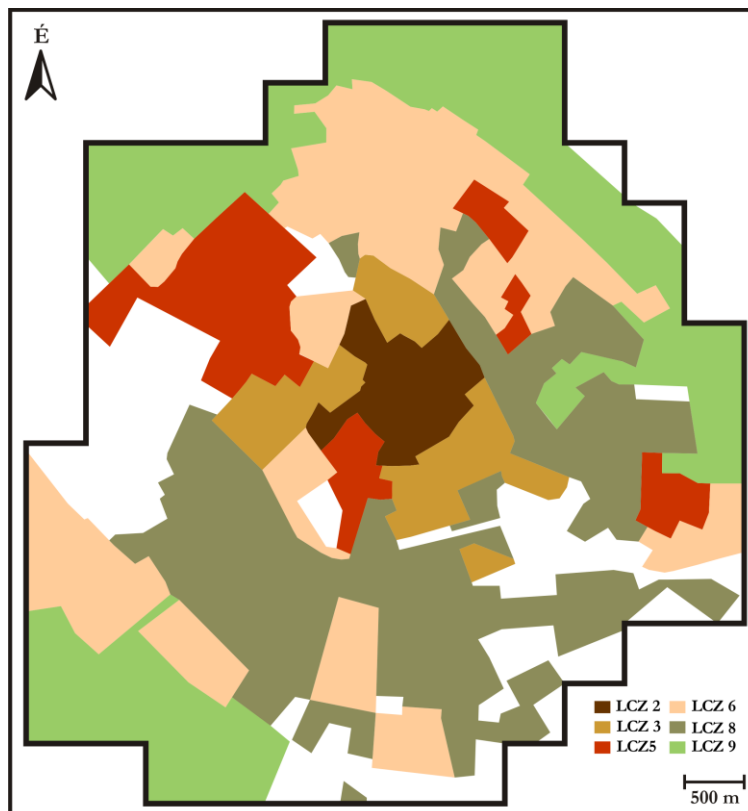
A térkép önmagában már alkalmas a város alapvető éghajlati jellemzőinek felmérésére, valamint alapja lehet az optimális városi mérési helyszínek kijelölésére (5.2.1. fejezet, Unger et al. 2011).

Hasonló szubjektív módszerrel több térkép is készült, így Szeged (5.2. ábra, Hämmerle et al. 2011) és Kecskemét (5.3. ábra) esetére. Az első esetben célszerű volt egy, a városklíma területén belüli, de nem a lokális klímazónákra fókuszáló munkában a vizsgált területet az LCZ szempontjából bemutatni (5.2. ábra), hiszen így további mögöttes városklimatológiai háttérismeretek átadása is lehetővé válik a vizsgált területre vonatkozó térkép bemutatásával

együtt (Hämmerle et al. 2011). Kecskemét esetén egy az Unger et al. (2011) publikációban bemutatotthoz hasonló áttekintő városklimatológiai elemzéshez készült LCZ térkép, azonban ez a kutatási eredmény nem került publikálásra.



5.2. ábra A lokális klímazónák térképe Szeged esetén (Hämmerle et al. 2011)



5.3. ábra A lokális klímazónák térképe Kecskemét esetén

A térképezési módszer – annak ellenére, hogy csak szubjektív módszereket alkalmazott – ráirányította a figyelmet az LCZ rendszer ilyen célú felhasználására, mint ahogy azt a 3.2. fejezetben be is mutattam. Külön kiemelhető, hogy Quan, Bansal (2021) szerint az első LCZ

térképezéssel foglalkozó vizsgálat nem más, mint a jelen fejezet alapját képező publikáció (Unger et al. 2011).

5.1.2. Térképezés GIS módszerrel

A térképezési módszer (Lelovics et al. 2014, Unger et al. 2014a) lényege, hogy a Stewart, Oke (2012) által definiált paraméterek (3.6. táblázat) minél nagyobb hányada meghatározásra kerüljön, majd a szintén Stewart, Oke (2012) által definiált tartományok (3.7. táblázat) alapján sorolja be a módszer az egyes területegységeket a megfelelő LCZ-be. A feladat nehézsége a területegységek meghatározása a városban, amelyre végül a telek poligonok (Gál, Unger 2009) koncepciója bizonyult megfelelő megoldásnak. További kritikus kérdés az osztályba sorolás és a minimális méretű homogén területek meghatározása.

A térképezés első lépése a felszínparaméter számítások a telkek poligonokra. A Stewart, Oke (2012) által felsorolt tíz geometriai, felszínborítási és sugárzási tulajdonságból hét paraméter volt meghatározható a szegedi vizsgált területen. Az osztályozás kiinduló paraméterei közül szakmai okok miatt kihagytuk a H/W értéket, mivel ez az arány túlságosan elméleti jellegű, csak a szabályos utcahálózat esetében számítható ki egyértelműen. A felszíni hőátadási tényező és az antropogén hőkibocsátás szintén hiányzik, mivel ezek az adatok nem álltak rendelkezésre a vizsgált területen.

A többi hét paraméter kiszámítása során a számítás alapterülete az épülettömb (érintkező épületek) és a hozzá tartozó sík terület azaz a telek poligon volt. Az épülettömbök és a telek poligonok meghatározása a szegedi 3D épületadatbázisra épül, amely több mint 22 000 épületet tartalmaz ESRI shapefile formátumban, épületmagassági információkkal (Gál, Unger 2009). A telek poligon meghatározása során az egymással érintkező épületeket blokkokká egyesítettük, majd a vizsgálati területet e blokkok alapján területekre osztottuk, ahol minden egyes poligon a központi épülettömbhöz közelebb eső pontok halmazából áll. A nagyobb nyílt területek (pl. parkok, városszéli területek, vízfelszínek) esetében a poligon határa a legközelebbi tömbtől 100 m távolságra van (5.4. ábra).



5.4. ábra Példa a telek poligonokra (a: épülettömb, b: telek poligon, c: nyílt terület) (Lelovics et al. 2014)

A számítási folyamatokat és az alkalmazott adatbázisokat paraméterenként mutatom be.

Az égboltláthatóság (SVF) számítása során a bemenet egy korábbi vizsgálatainkból (Gál et al. 2009, Unger 2009) származó, 5 m vízszintes felbontású SVF adatbázis volt. Számítása a szegedi 3D-s épületadatbázisból történt vektor alapú módszerrel. Az épületadatbázis az épületek alapterületét poligon típusú adatként, a fotogrammetriai módszerekkel mért épületmagasságokat pedig azok attribútumaként tartalmazza. Az SVF számítás során minden épületet lapos tetővel tekintettünk, és a növényzet hatását elhanyagoltuk. Az SVF-értékek az utca szintjéhez kapcsolódnak, ezért az épületek által nem fedett pontokra számítottuk ki őket, és ezeket az értékeket a telekpoligonok területén belül átlagoltuk.

Az épület alapterület arány (BSF) esetén a bemenet szintén a szegedi 3D-s épületadatbázis volt, amely a vizsgált területen található épületek alaprajzát tartalmazza. A BSF egy telek poligonon belül az épületek és a telek poligon területének aránya.

A vízáteresztő felszín arány (PSF) műholdas és GIS adatbázisok alapján került meghatározásra. A számításának alapja a RapidEye műholdképen számított NDVI index volt amely segítségével lehatároltuk a természetes (nem beépített felszíneket). A kapott eredmények pontosításának céljából felhasználtunk 1:25000-es topográfiai térképet, útdatbázist és a Corine Land Cover (CLC) (Bossard et al. 2000) adatbázist is. A 5,16 m felbontású RapidEye műholdképen légköri korrekciót végeztünk, majd a 3. és 5. sávot felhasználva normalizált vegetációs indexet (NDVI) számítottunk (Tucker 1979). Az NDVI index alapján azokat a pontokat tekintettük burkolt vagy beépített felszínnek, ahol az értéke 0,3 alatt volt. A CLC adatbázist használtuk a mezőgazdasági területek lehatárolására, mivel itt jellemző volt a beépített területekhez hasonló alacsony NDVI érték, köszönhetően a betakarítás utáni elhanyagolható mértékű növényborításnak. További korrekciós lépés volt a víztestek kiterjedésének lehatárolása a topográfiai térképek felhasználásával, mivel több esetben a vízfelszínnek nagyon hasonló NDVI-értékei vannak, mint egyes építőanyagoknak. Utolsó korrekcióként az útdatbázist használtuk a területen található aszfaltozott utak pontos lehatárolására, mivel a város utcáit többnyire jelentős lombkorona fedi, és így az NDVI alapján történő számításunk ilyen esetekben hibát eredményezne. A végeredményül megkapott vízáteresztő felszíneket reprezentáló rácspontok területét ($26,6 \text{ m}^2$) telek poligononként összegeztük majd elosztottuk az adott telek poligon méretével.

A vízzáró felszín arányt (ISF) lényegében a BSF és PSF arányokból származtattuk:

$$\text{ISF} = 1 - (\text{BSF} + \text{PSF})$$

Az érdességi elemek magasságának (HRE) számításához szintén a szegedi 3D-s épületadatbázist használtuk fel. Minden egyes telek poligonra kiszámítottuk az épületek súlyozott átlagát, ahol a súly az épület alapterület volt így garantálva, hogy egy-egy kiugró magasságú azonban nem jelentős méretű épület torzítsa az átlagmagasság értékét.

A felszínérdességi kategória (IRC) meghatározására a Davenport-féle érdességosztályozási módszert alkalmaztuk (Davenport et al. 2000). Az osztályozási eljárás elve az, hogy az adott vizsgált terület érdességi magasságának (z_0) és kiszorítási rétegvastagságának (z_d) értékei megközelítőleg megegyeznek a korábban egy hasonló felszínborítású területen mért értékekkel. Ez a széles körben elterjedt módszer nyolc érdességi osztályt foglal magában. Minden egyes telekpoligont a légi felvételek, a topográfiai térkép és az épületadatbázis vizuális értelmezésével sorolunk be egy-egy érdességi osztályba.

A felszín albedójának (SA) számításához szintén a RapidEye műholdképet alkalmaztuk. A műholdkép 5 látható fény közeli sávjának (440-510 nm, 520-590 nm, 630-685 nm, 690-730 nm, 760-850 nm) atmoszféricusan korrigált reflektancia értékei alapján került kiszámításra. Az albedó értéke nem más, mint a sávok reflektancia értékeinek súlyozott átlaga, ahol a súlytényező az adott sávokhoz tartozó teljes sugárzási intenzitás volt (Starks et al. 1991, Tasumi et al. 2008). A telek poligonokhoz a műholdfelvételtől származó rácsponti albedó értékek átlagát rendeltük.

A térképezés folyamatának következő lépése a telek poligonok osztályozása és összevonása.

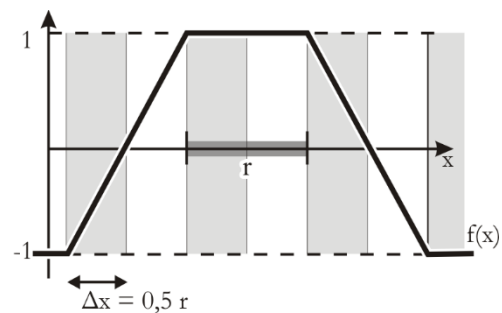
A városi környezetben az 1,5-2 m magasságban mért hőmérsékleti értéket néhány száz méter sugarú forrásterület befolyásolja (Oke 2004, Unger et al. 2010). Természetesen ez csak egy általános megközelítés, mivel a forrásterület a városi környezet jellegzetességeitől függ. Kompakt városi beépítés esetén a forrásterület lehet akár néhány tíz méter is, míg ritka

beépítés esetén olykor több száz méter is. A forrásterület alakja és kiterjedése természetesen nagymértékben függ az időjárási helyzettől és a stabilitási viszonyoktól is (Oke 2004).

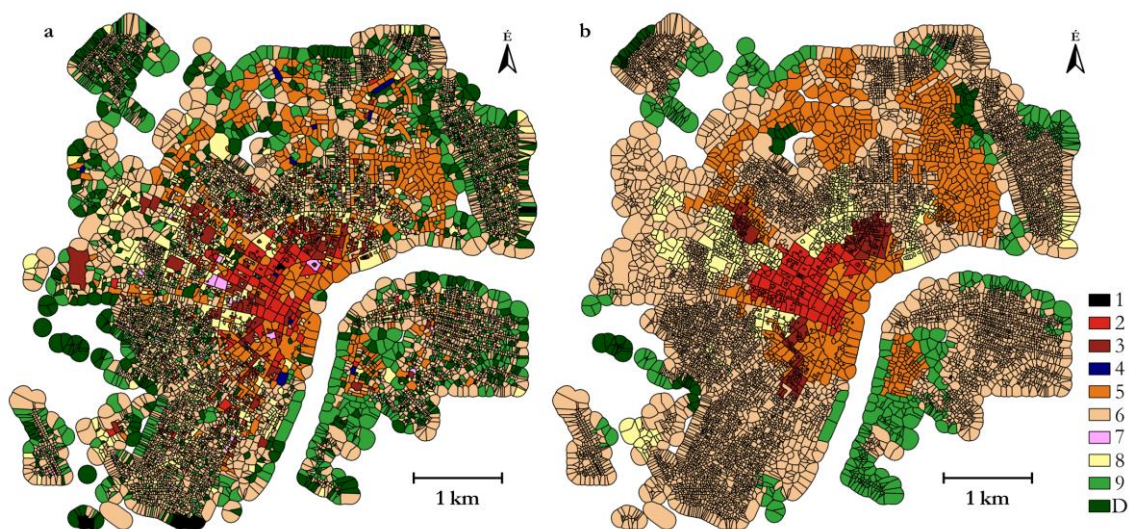
A forrásterület térbeli kiterjedésének jellegzetességeit alapul véve az azonos vagy hasonló LCZ-osztályokba sorolt telekpoligonokat nagyobb összefüggő területekké vontuk össze, amelyek karakterisztikus mérete néhány 100 m és néhány km között változik. Az összevonás több lépésben történt, amely folyamat első lépése maga a telek poligononkénti LCZ osztályozás.

A kapott felszínparaméterek poligonokra vonatkoztatott értékei és az egyes LCZ osztályokhoz rendelt értéktartományok (Stewart 2011b, Stewart, Oke 2012, 3.7. táblázat) alapján poligononként minden LCZ kategóriához pontokat rendeltünk. Mivel hét felszínparamétert vizsgáltunk, ezért minden LCZ esetén maximum 7-es pontérték fordulhat elő. Az egyes felszínparaméterek esetén 0-1 pont érték került meghatározásra az 5.5. ábrán szemléltetett módon, ahol az r nem más, mint az adott paraméter adott LCZ osztályra vonatkozó értéktartománya (3.7. táblázat).

A pontszámfüggvényt (5.5. ábra) alkalmazva minden telek poligon esetén előállt egy sorrend. A legmagasabb pont értékű LCZ a legvalószínűbb vagy leginkább hasonló LCZ kategóriája lesz a telek poligonnak, majd azt követik a második, harmadik és további LCZ kategóriák. Itt egy olyan korlátozással éltünk, hogy ha egy poligon esetén az összpontszám kevesebb, mint 3 pont, akkor a poligon a vizsgált LCZ-hez nem hasonlít (5.6.a ábra). Előfordult olyan eset is, hogy egy poligon sem teljesíti a minimális 3 pontot, ilyen esetekben egy osztályozatlan kategóriába soroltuk. A hasonlósági sorrendből az első (LCZ_x) és második (LCZ_y) kategóriát használtuk fel a további számításoknál.



5.5. ábra A telek poligonokhoz paraméterenként rendelt pontszám függvény (Lelovics et al. 2014)



5.6. ábra Az LCZ térképezés során egyedileg osztályozott telek poligonok (a) és az összevonást követően létrejött telek poligon csoportok (b) (Unger et al. 2014a)

A következő lépés a telek poligonok LCZ kategóriájuk (LCZ_x és LCZ_y), valamint egymáshoz viszonyított térbeli elhelyezkedésük alapján történő összevonása. Ez egy több lépésből álló részben iteratív folyamat. Az első lépésben, ha egy telek poligonon belül helyezkedett el egy másik telek poligon, akkor a belső terület LCZ besorolását a külső

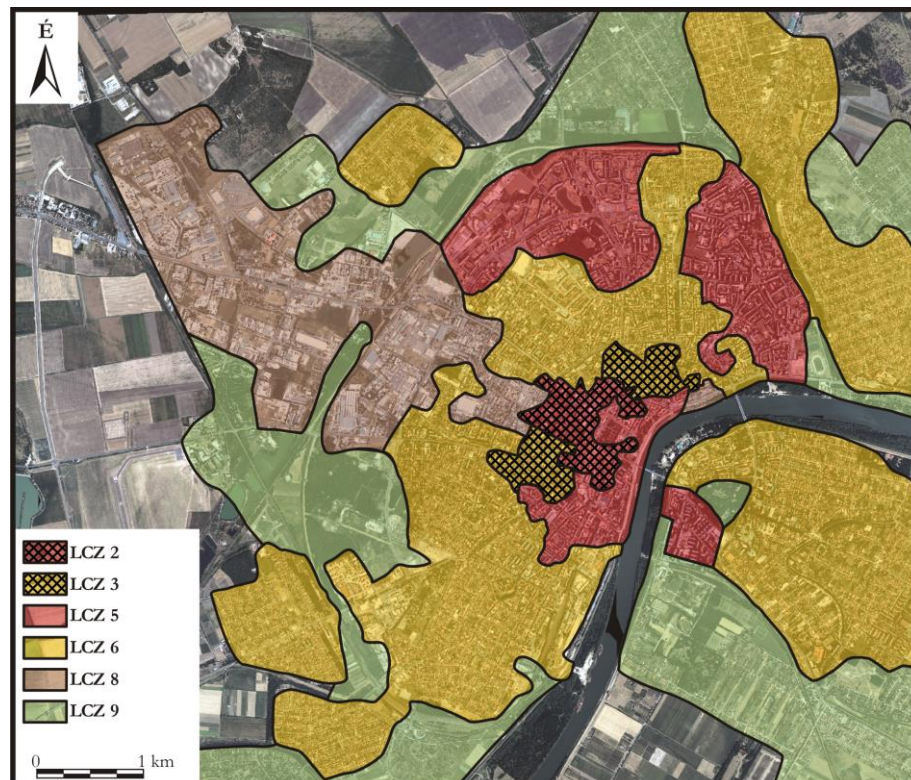
területnek megfelelően módosítottuk. Következő lépés során, ha egy poligon összes vagy egy kivételével az összes szomszédja ugyanabba az LCZ-osztályba tartozott, akkor a poligon osztálya ezekkel a szomszédokkal azonosra módosult.

A következő lépés során azt kezeltük, ha egy poligonnak egyetlen szomszédja sem volt ugyanabban az osztályban, amelyben maga a poligon. Ilyenkor két eset fordulhat elő. Az egyik esetben, ha volt olyan szomszéd, amelynek LCZ_x-je megegyezett a poligon LCZ_y-jával, vagy LCZ_y-je megegyezett a poligon LCZ_x-ével, akkor a poligon LCZ_x-je a szomszédjával megegyezőre lett beállítva. A másik esetben, ha volt olyan szomszéd, amelynek LCZ_x kategóriája hasonló volt a poligon LCZ_x kategóriájához, akkor a poligon LCZ_x-je a szomszéd LCZ_x-ére módosult. A hasonlóságot az 5.1. táblázatban bemutatott módon értelmeztük.

5.1. táblázat Az LCZ kategóriák hasonlósága (a számok az LCZ kategóriák számai, a hasonlóságot a + jelöli) (Lelovics et al. 2014)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-	+		+					
2	+	-	+		+				
3		+	-				+		
4	+			-	+				
5		+		+	-	+			
6			+		+	-			
7							-		
8								-	
9									-

A következő lépésben a megmaradt nem osztályozott poligonok LCZ kategóriáját a szomszédos poligonok leggyakoribb kategóriájának megfelelően adtuk meg.



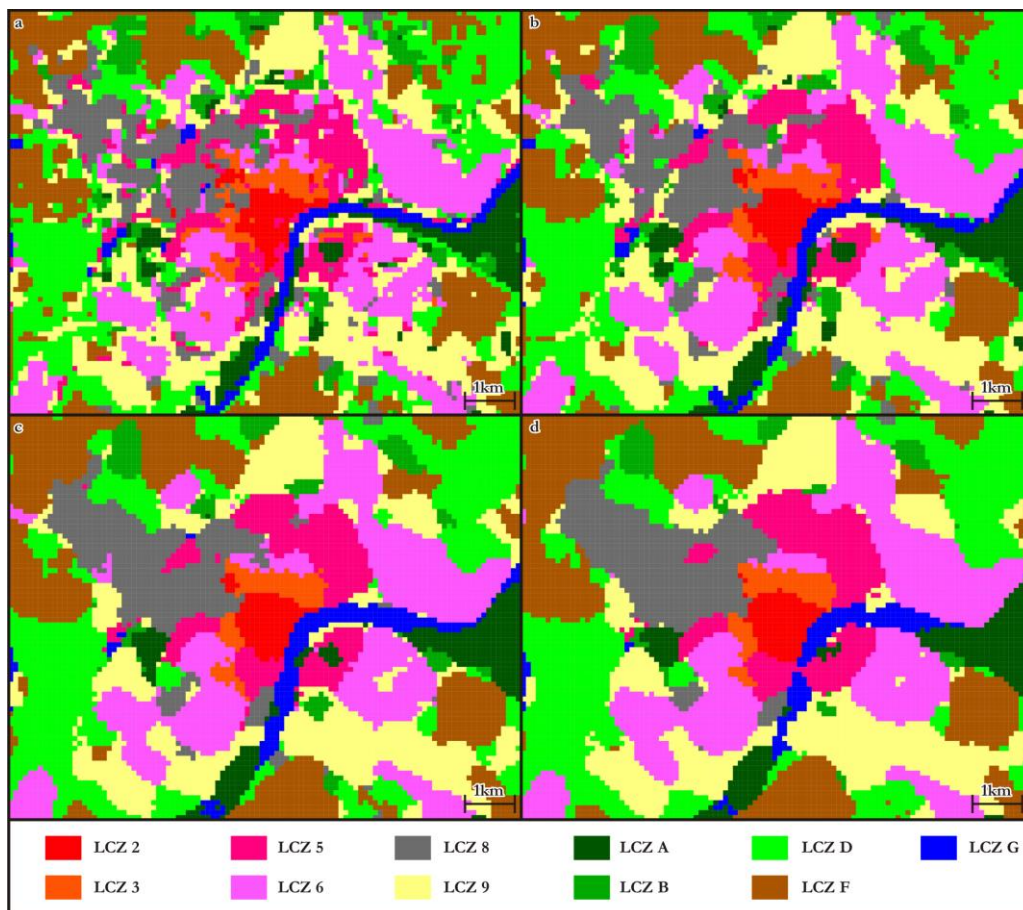
5.7. ábra A generalizált LCZ térkép Szegeden (Unger et al. 2014a)

Ezt követően az adott LCZ-kategóriával rendelkező szomszédos poligonok csoportjait térbeli kiterjedésük szerint vizsgáltuk. Ha egy csoport területe legalább egy 250 m sugarú körre kiterjedt, akkor azt önálló LCZ-területnek tekintettük. Azoknak a csoportoknak a poligonjait, amelyek nem feleltek meg a méretre vonatkozó kritériumnak, tulajdonságaik figyelembevétel nélkül összevontuk, ha szomszédosak voltak. Ha az így kapott csoport elég nagy volt, akkor a csoport kategóriáját a részeinek leggyakoribb kategóriájára állítottuk be; ellenkező esetben a csoportot a vele legnagyobb számú érintkező telek poligonnal rendelkező szomszédos LCZ-területek egyikéhez csatoltuk (5.6.b ábra).

A térképezési eljárás eredményeképpen számos LCZ-poligont kaptunk ESRI shapefile formátumban, ami alkalmas generalizált térképek készítésére (5.7. ábra) vagy térbeli információk kinyerésére is.

5.1.3. Térképezési módszerek összehasonlítása

A városklimatológia területén, köszönhetően a WUDAPT projektnek egy széleskörűen használt műholdkép alapú módszertan terjedt el (Bechtel et al. 2015, 4.2. fejezet). Célszerű tehát összehasonlítani a fejlesztett GIS térképezési módszer (Lelovics et al. 2014) és a WUDAPT módszer (Bechtel et al. 2015) eredményeként létrejött térképeket így azonosítva a módszerek előnyeit és hátrányait (Gál et al. 2015, Bechtel et al. 2019a).



5.8. ábra Lokális klímazóna térképek különböző szűrők alkalmazásával (a: 1 pixeles szűrő, b: 2 pixeles szűrő, c: 3 pixeles szűrő, d: 4 pixeles szűrő) (Gál et al. 2015)

Az összehasonló vizsgálatot Szegedi mintaterületen végeztük el, mivel itt rendelkezésre állt a GIS módszerrel készült térkép és a WUDAPT módszerhez szükséges műholdképek is. A WUDAPT módszerrel készült térképek előállításának részleteit a 4.2. fejezet mutatja be.

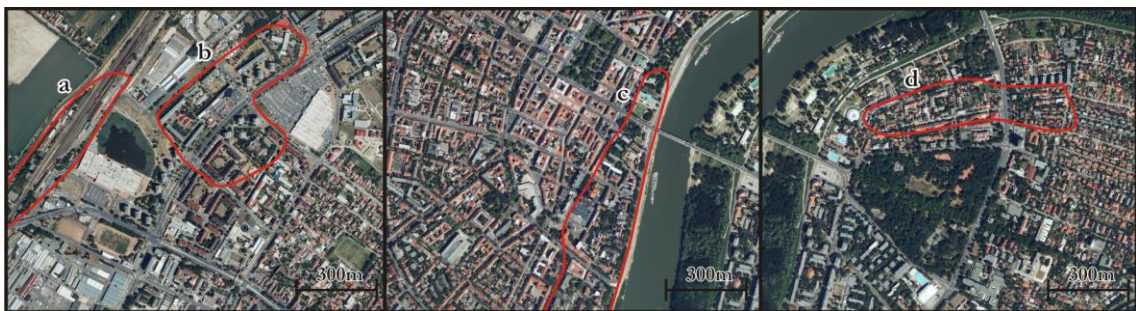
A WUDAPT módszerrel készült LCZ térkép megjelenése nagymértékben függ az alkalmazott utólagos osztályozási szűrőtől (5.8. ábra). A 100 m sugarú szűrő nem tűnik megfelelőnek, számos kis (csak néhány pixel méretű) LCZ-területet lehet találni (5.8.a ábra), amelyek nem teljesítik a minimális méretre vonatkozó kritériumot. A minimális méretre vonatkozó feltétel azért kritikus, mert 100-200 m méretű területen a 2 m-es magasságra vonatkozó hőmérséklet forrásterülete túlnyúlik, így nem várható, hogy termikus értelemben homogén és reprezentatív legyen az LCZ térkép.

A nagyobb szűrők eredményei elfogadhatóbbak, azonban a szűrő méretének növelése más jellegű problémát is okoz. A vonalas jellegű területegységek – mint például a Tisza – egyes helyeken eltűnnek. További gond, hogy a 400 m-es szűrő esetén a városi LCZ területek túlnyúlnak a város tényleges határán (5.8.d ábra). A nagyobb méretű szűrőknél az elkülönülő városrészek összemosódnak, példaként a város ÉNY-i peremén lévő kisméretű ritka, alacsony (LCZ 6) beépítésű területek 200 m-es szűrő esetén elkülönülnek, a nagyobb szűrőknél viszont nem (5.8. ábra).

A GIS-alapú módszer hátránya, hogy csak a beépített LCZ típusok vizsgálhatók, mivel a koncepciója eleve a városon belüli osztályozásra koncentrált, valamint a felhasznált alapadatok is csak a beépített területre állnak rendelkezésre. A városi területen az azonosított LCZ típusok és azok térbeli mintázata (5.7. ábra) lényegében megegyezik a WUDAPT módszerrel kapott eredményekkel (5.8. ábra). A különbségek nagy része abból adódik, hogy az LCZ területek határai élesebbek, így több a vonalas alakú terület (5.7. ábra).

A két eredménytérképet elemi GIS műveletek segítségével összehasonlítottunk, abból a célból, hogy meghatározzuk a különböző osztályba sorolt területek nagyságát. Az összehasonlítás során azt találtuk, hogy az eltérő lokális klímazónaként azonosított 100 m-es pixelek aránya a 100 m-es szűrő esetében 30%, a 200 m-es szűrő esetében 26%, a 300 m-es szűrő esetében 22% és a 400 m-es szűrő esetében 21%.

Az eltéréseket részletesen is elemeztük, felhasználva területről rendelkezésre álló légifotókat (5.9. ábra). Sikertelenül azonosítani néhány problémás területet, ahol az eltérő osztályozás okainak feltárása fontos tanulságokkal szolgálhat a módszerek használata vagy fejlesztése szempontjából.



5.9. ábra Példák az eltérő módon azonosított területekre (Gál et al. 2015)

A problémás területek egy részén a felszíni anyagok okozhatnak eltéréseket, például egy vasútállomást a műholdas alapú módszerrel ritka, alacsony beépítésként azonosítottunk (5.9.a ábra), azonban a GIS-módszerrel nagyméretű, alacsony beépítésként azonosítottuk. A 5.9. ábrán látható b. terület jó példa a pixel alapú szűrők használatának problematikus tulajdonságaira, a GIS-módszer ritka közepmagas beépítésként (LCZ 5) azonosította, de a környező nagyméretű, alacsony beépítésű (LCZ 8) területek miatt a műholdas alapú módszer szűrt LCZ térképei ezt a területet is LCZ 8 kategóriába sorolták. Szeged központja közelében a Tisza partján egy nagy terület (5.9.c ábra) található, ami egyértelműen LCZ 5 beépítésű terület, a GIS módszer ezt így azonosította, azonban a pixel alapú filter alkalmazása ezt a területet is eltünteti a WUDAPT módszer LCZ térképeiről. Az 5.9.d ábrán látható terület jó

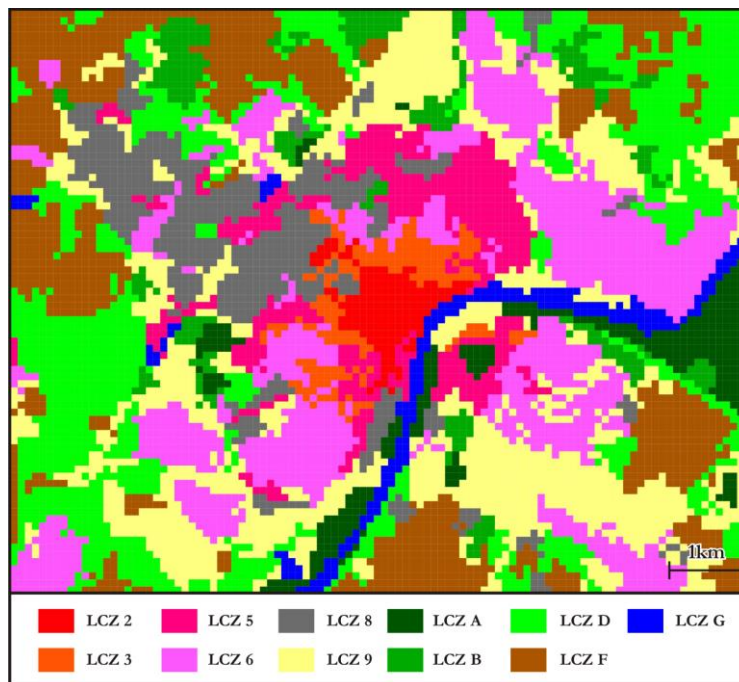
példa arra, hogy mit okoz az ha a beépítés pont két LCZ kategória határán van. A GIS módszerrel ritka, alacsony beépítésként (LCZ 6), míg a WUDAPT módszerrel ritka, közepemagas beépítésként (LCZ 5) azonosítottuk. A helyismeret alapján kijelenthető az, hogy ez terület annyira összetett, hogy nem is egyértelmű melyik módszer szolgáltat helyes eredményt.

5.1.4. Kombinált térképezési módszer

A GIS alapú és WUDAPT LCZ térképezési módszer összehasonlítása (Gál et al. 2015, Bechtel et al. 2019a) során azonosításra kerültek a módszerek erősségei és gyengeségei. A két módszer erősségeit kiaknázva egy új kombinált térképezési eljárás is kifejlesztése került (Gál et al. 2015, Bechtel et al. 2019a).

Mindkét módszernek vannak előnyös és hátrányos elemei. A WUDAPT módszer könnyen használható, csak kevés és szabadon hozzáférhető bemeneti adatra van szüksége, és a világ bármely részén alkalmazható. Hátránya, hogy az utolsó lépése (a pixel alapú szűrő) még némi fejlesztésre szorulhat. A GIS alapú módszer nagyon részletes, és terület összevonását végző fuzzy logika és szomszédsági viszonyokat is figyelembe vevő része nagyon előremutató. Hátránya, hogy nagy mennyiségű különféle bemeneti adatra van szüksége, ezért nem alkalmazható világszerte. A kombinált térképezési eljárás fejlesztésének a fő célja nem más volt, mint a két módszer integrálása, oly módon hogy megőrizzük az összes előnyös részt.

A kombinált módszer a WUDAPT módszerhez hasonlóan működik, egészen a besorolást követő szűrésig (4.2. fejezet). Ebben a szakaszban a többségi szűrő helyébe a GIS alapú módszerben alkalmazott terület összevonási eljárás lép (5.1.2. fejezet). A módszert JAVA nyelven implementáltuk, és bemenetként 100 m méretű négyzetekre van szüksége ESRI shapefile formátumban. A bemeneti shapefile attribútumtáblája tartalmazza az egyes pixelek két legvalószínűbb LCZ-típusát a WUDAPT módszer alapján. A végső LCZ-térképet egy új shapefile-ba írja ki a program.



5.10. ábra A kombinált módszerrel létrehozott LCZ térkép (Gál et al. 2015)

Ha összehasonlítjuk a kombinált módszer eredményeit a GIS módszerrel, azt találjuk, hogy a különböző LCZ-ként azonosított 100 m-es pixelek aránya mindössze 15%, ráadásul

a problémás területeken a kombinált módszer sokkal közelebb van a GIS-módszerhez. Ha figyelembe vesszük, hogy a GIS-módszer sokkal több adatot használ, és az LCZ-séma majdnem minden paraméterét kiszámítja, és ez a kombinált módszer csaknem hasonló eredményt tud produkálni úgy, hogy lényegében csak műholdképek adatait használja fel, akkor ez a 15%-os különbség több mint elfogadható. A kombinált módszerrel előállított térképet az 5.10. ábra mutatja be. A vonalas alakú LCZ területek megmaradnak, és a különböző LCZ területek szélei élesek, így pontosabban visszaadva a városokban tapasztalható valós viszonyokat.

A két teljesen eltérő megközelítésű LCZ térképezési módszer kombinációjának eredményei azt mutatják, hogy a nagy adatigényű GIS módszer és a globálisan alkalmazható WUDAPT módszer kissé eltérő LCZ-térképeket eredményez. A néhány tipikus eset azonosítása megnyitotta az utat a módszerek előnyös tulajdonságainak felméréséhez (5.1.3. fejezet). Mivel a különbségeket leginkább az osztályozás utáni szűrés okozza, ezért a WUDAPT módszer nyers kimenetén a GIS módszer terület összevonási eljárását alkalmaztuk. Az így kombinált módszer LCZ térképének a GIS-módszer térképétől való eltérése csökkent, és a tipikus félreosztályozások is eltűntek. A kifejlesztett új módszer segíthet a WUDAPT módszer javításában. Mivel nem igényel további bemeneti adatokat, az eljárás fő előnye megmarad, és távérzékelési és GIS szakértői ismeretek nélkül globálisan bármely városi területen alkalmazható.

5.2. A lokális klímazónákra reprezentatív mérőállomáshálózat létrehozása

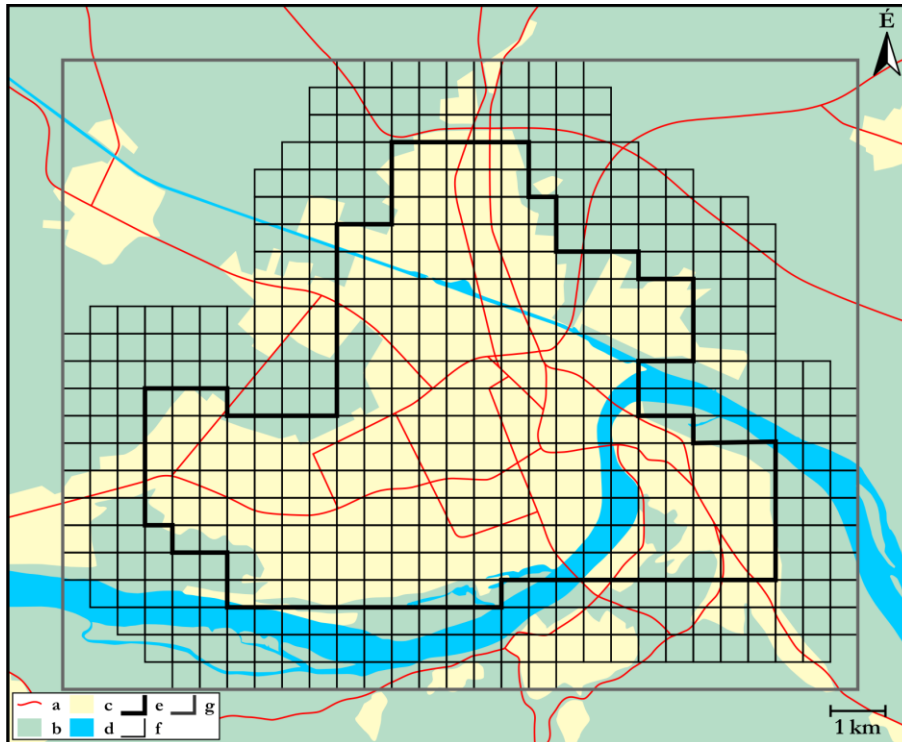
A lokális klímazónák rendszere stabil alapot jelent a városi felszín termikus szempontú osztályozására (3.1. fejezet). A rendszer eredeti céljának megfelelően alkalmas a városi mérések környezetének a leírására. Az LCZ térképezési törekvések (3.2. fejezet, 5.1. fejezet) hamar rámutattak, hogy a városklimatológia területén jóval nagyobb potenciál van az LCZ rendszerben. Felmerült tehát, hogy a térképezésben elért eredményeinket felhasználva célszerű lenne egy olyan városklimatológiai monitoring rendszert kidolgozni, amely eleve az LCZ rendszerre reprezentatív. Ekkoriban már számos területen üzemelt városklíma monitoring rendszer (Muller et al. 2013, Suomi, Käyhkö 2012, Chapman et al. 2015, Matsumoto et al. 2017, Meier et al. 2017), azonban ezek telepítésük idejéből adódóan nem az LCZ rendszerre reprezentatív módon lettek kialakítva, így egy új monitoring rendszer kialakítása a fent említett elvek mentén nemzetközileg is újdonságnak tekinthető. További távlati cél az volt, hogy az LCZ-re reprezentatív városklíma monitoring rendszer kiegészítve a szegedi mintaterületre rendelkezésünkre álló felszíni statikus adatbázisokkal, illetve azzal a ténnyel, hogy Szeged egy városklimatológiai értelemben zavaró hatásoktól mentes közepes méretű város kiváló alapot teremt egy városklíma modell fejlesztési és tesztelési rendszernek. Mindezek alapján jelen fejezetben az LCZ rendszerre reprezentatív monitoring rendszer létrehozásának főbb lépéseit ismertetem.

5.2.1. Kezdeti megközelítés

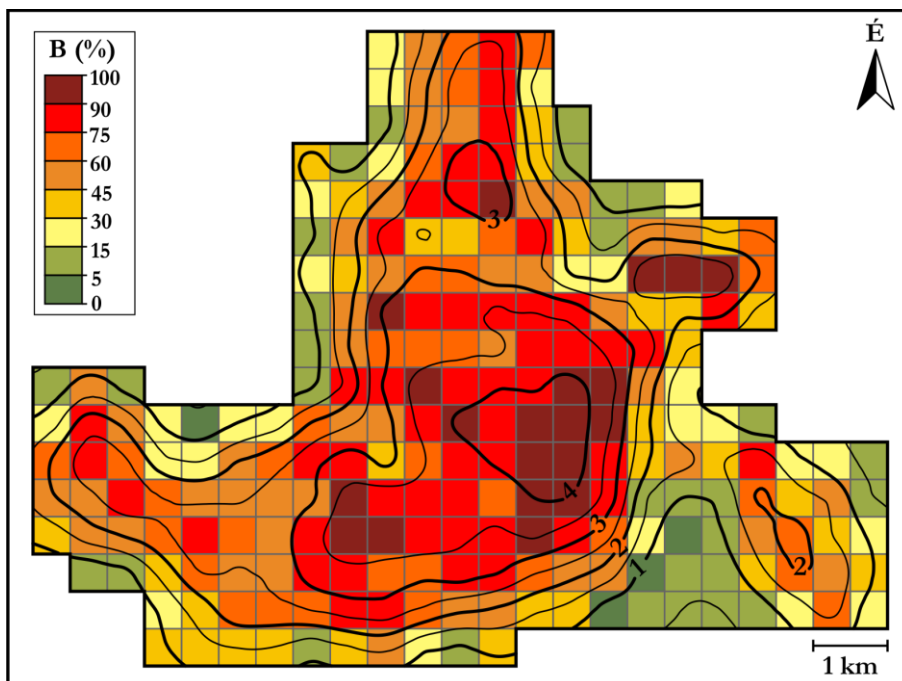
Az első vizsgálat Novi Sad (Szerbia) területére koncentrált és a fő célja az volt, hogy egy későbbiekben létrehozandó mérőállomás hálózatra tegyen javaslatot (Unger et al. 2011). A munka során kijelölésre kerülő állomáshálózat esetén fontos volt, hogy reprezentatív legyen az ekkoriban végleges formát öltő lokális klímazónák rendszerére (Stewart 2011b, Stewart, Oke 2012).

A 4.3. fejezetben ismertetett módszereknek megfelelően egy 500 m oldalhosszúságú rácshálózatot hoztunk létre, amely tartalmazza a vizsgálati területet (240 cella) és annak 1,5 km széles környezetét Újvidéken és környékén. A hálózat a városias területeket fedi le, a körülötte lévő különálló településrészek nélkül (5.11. ábra). A hálózat az 34N 400.500

5.019.000 és 34N 415.000 5.000.500 UTM koordináták által kijelölt téglalap alakú területet fedi le.



5.11. ábra A vizsgált terület rácshálózata és annak 1,5 km széles kiterjesztése Újvidéken (a: főutak, b: vidéki területek, c: városi területek, d: víztestek, e: a vizsgált terület határa, f: cellahatár a vizsgált területen és annak kiterjesztésében, g: a rácshálózatot tartalmazó téglalap határa) (Unger et al. 2011)



5.12. ábra A beépítettségi paraméter (%) és a modellezett éves átlagos UHI-intenzitás (°C) területi eloszlása Novi Sad vizsgált területén (Unger et al. 2011)

A cellánkénti beépítettségi paramétert (B_0) a 2006. június 26-án készült Landsat műholdfelvétel felhasználásával határoztuk meg a 4.3. fejezetben ismertetett módszertannak megfelelően. A B_0 értéke a vizsgált területen belül a Duna és a sűrűn beépített városközpont miatt a 0% közeli értékektől a 90% feletti értékekig terjed (5.12. ábra). A jelentős beépítettség

a vizsgált terület központi részén található (kb. 30 cellában), a legmagasabb B_0 értékek a K-i, Duna menti területeken találhatók (10 szomszédos cellában). A lokális maximumok a vizsgálati terület Ny-i, É-i, ÉK-i és K-i részén találhatók.

A vizsgált terület összes cellájában meghatároztuk a B_0 értékek alapján a másik két beépítettségi paramétert (B_1 , B_2), továbbá a D paramétert. Az éves átlagos UHI-intenzitás értékek becsléséhez kiszámítottuk a kombinált paramétereket (B_0' , B_1' , B_2'), majd alkalmaztuk a 4.3. fejezetben ismertetett modellegyenletet. Ahogy a 4.3. fejezetben említettük, az empirikus modell kidolgozása a szegedi és debreceni adatokon alapult. A papparaméterek értéktartományát (4.2 táblázat) megvizsgálva megállapítható, hogy Novi Sad esetén a B_0 értékek néhány cellában meghaladják a modell fejlesztésénél alkalmazott értéktartományt. Ez a nagy beépítettségű cellák esetén a lényegében a modell extrapolációját jelenti, azaz a kapott eredmények értékelése során különös körtekintés indokolt. Mindazonáltal az eredeti modell esetén a B_0 maximális értéke meghaladja a 85%-ot, így ebben az esetben néhány százalékos túllépés nem jelent lényegi különbséget, hiszen ilyen jelentős beépítettség esetén eleve elhanyagolható a zöldterületek és vízáteresztő felszínnek hatása az UHI intenzitás értékére. A város alakjának köszönhetően hasonló probléma a D paraméter kapcsán nem merült fel. Mindezen szempontok megfontolását követően a kapott évi átlagos UHI mező elfogadhatónak tekinthető, mint egy prekurzív információforrás a városi hősziget főbb szerkezetéről és jellegzetességeiről (5.12. ábra).

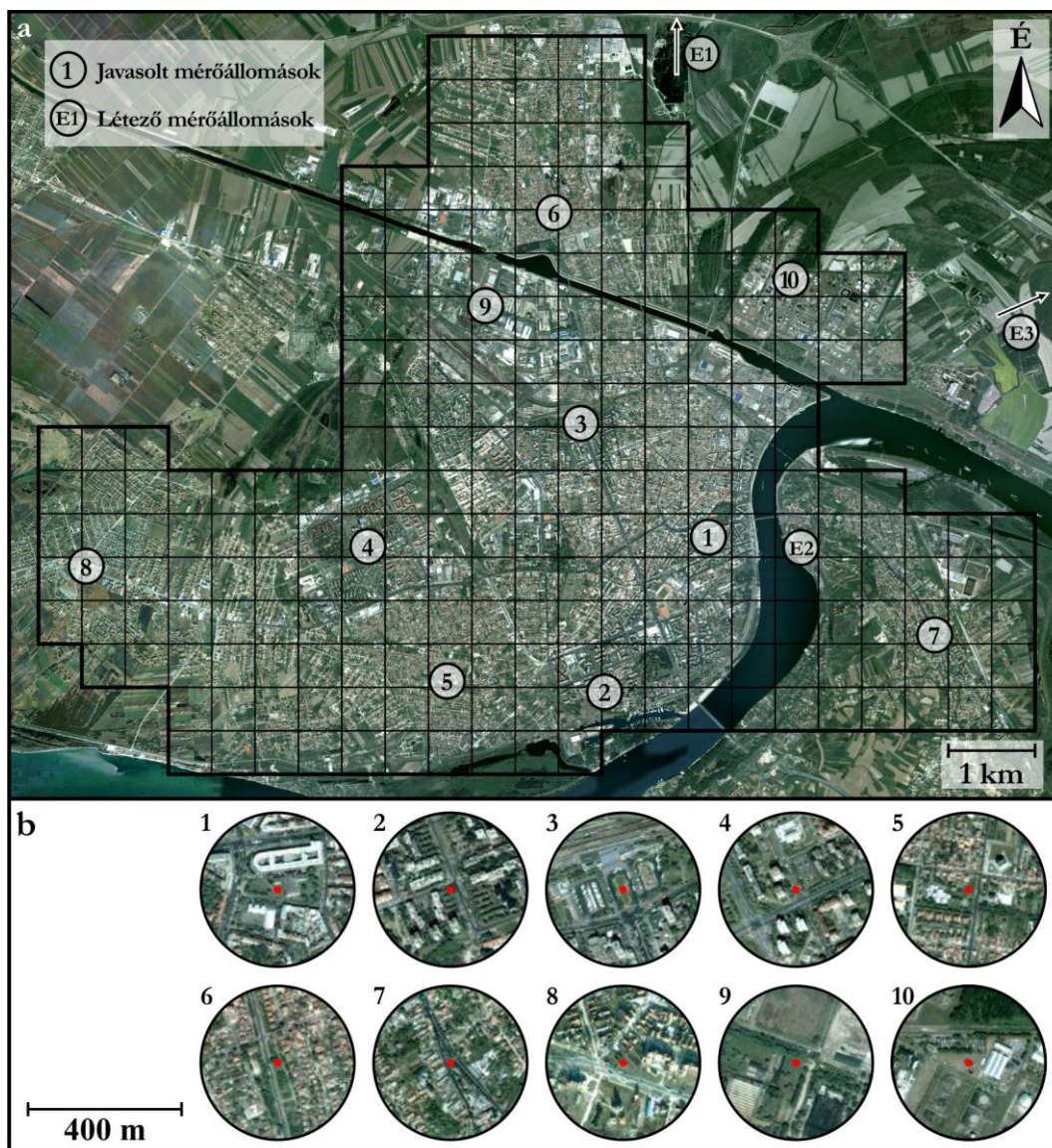
A becsült UHI mezőt elemezve jól kivehető, hogy a hősziget izotermái követik a beépítés jellegzetességeit (5.12. ábra). A városközpont területén az izotermák koncentrikus alakot mutatnak, az értékek a külvárosoktól a belső városi területek felé nőnek, a legmagasabb ΔT értékkel ($>4^\circ\text{C}$) a sűrűn beépített központban. Ettől a szabályos koncentrikus elrendezéstől a Ny-i, É-i és ÉK-i városrészek esetén tapasztalható eltérés, ahol a 2°C -os izoterma a város külső kerületei felé húzódik. Ezenkívül három helyi maximum jelenik meg a vizsgált terület É-i, ÉK-i és K-i részén, 3°C , $2,5^\circ\text{C}$ és 2°C feletti értékekkel. A Duna – és az azt övező zöldterületek – hatásának köszönhetően a vizsgált terület DK-i részén lényegesen alacsonyabb intenzitási értékekről tájékoztat az UHI becslés (5.12. ábra).

A statisztikai eljárás pontosságának értékeléséhez a becsült UHI értékeket összevetettük a város területén üzemelő két meteorológiai állomás adataival (5.13. ábra). A Rimski Šančevi területén egy repülőtérrel található mérőállomást a vidéki állomásnak és Petrovaradin területén fekvő mérőállomást a városi állomásnak tekintve az 1952-1992 közötti időszak mérési adatait elemeztük. A méréseket ebben az időszakban a nappali fő terminusokban végezték egyidejűleg, így az elemzéshez a napi minimum, maximum és átlaghőmérsékleteteket használhattuk fel. Az éjjeli mérések hiányában az UHI nagyságát a minimum hőmérsékleteteket felhasználva vizsgáltuk, ami köszönhetően annak, hogy a legnagyobb hőmérsékleti többlet nem hajnalban, hanem a naplementét követő órákban következik be, némileg alábecsüli a valós viszonyokat. További fontos szempont, hogy a városi állomás lényegében a Duna jobb partján kiemelkedő erődben helyezkedik el, kevésbé sűrűn beépített és kiemelt helyzetben, ami ismételtelen a várható UHI intenzitás alábecsülését valószínűsíti. Az UHI intenzitást az adatsor 37 évének minden napjára kiszámítottuk, majd átlagoltuk. A városi állomás esetén a mért érték $1,7^\circ\text{C}$ míg a modellezett érték $1,8^\circ\text{C}$, így arra a következtetésre juthatunk a rendelkezésre álló rendkívül korlátozott mértékű validációra alkalmas adatforrás alapján, hogy a modell alapvetően jól fogta meg a hősziget léptékét a városban.

A városklíma monitoring hálózat optimális mérőállomás helyeinek azonosítására az LCZ térkép (5.1. ábra) és a becsült UHI mintázat (5.12. ábra) szolgált. A reprezentatív helyszínek kijelölése során két fő kritériumot vettünk figyelembe. Az első kritérium fő célja az volt, hogy a kiválasztott helyszínek jól visszaadják a várható UHI térbeli mintázat főbb karakterisztikáit. Legyenek mindenképpen állomások a helyi és abszolút az UHI maximumok

területén, továbbá azokon a területeken, ahol térben jelentős változások vannak. A második kritérium keretében arra koncentráltunk, hogy a kijelölt mérőállomások környezetében néhány 100 m-es homogén LCZ terület legyen.

A kritériumoknak megfelelően Novi Sad városi területén tíz reprezentatív állomáshelyet határoztunk meg (5.13.a ábra). A helyszínek a város különböző városrészeit képviselik, a kompakt, középmagas beépítésű (LCZ 3) területtől a szinte természetes külterületig (LCZ D). Az 1. számmal jelölt helyszín a belvárosban helyezkedik el, kompakt, középmagas beépítésű (LCZ 3) környezetben. A következő három helyszín ritka, középmagas beépítésű (LCZ 5) területeken található. Az 5. és 6. helyszínt kompakt, alacsony beépítés (LCZ 3) jellemez, <3 emeletes magas épületekkel, amelyeket keskeny utcák választanak el egymástól, míg a 7. és 8. helyszín ritka, alacsony beépítésű (LCZ 6) övezetekben található, lényegében kertés házakból álló beépítéssel.



5.13. ábra A városklíma monitoring hálózat meglévő és javasolt állomásai (a), valamint a helyszínek 400 m átmérőjű környezete (b) (A meglévő állomások: E1 - Rimski Šančevi, E2 - Petrovaradin, E3 - Kač) (Unger et al. 2011)

Az utolsó két állomás (9. és 10.) ipari és raktározási övezetekben található (LCZ 8 és 10). Fontos megemlíteni azt is, hogy a vidéki (E1, LCZ D és E3, LCZ A) és a városi (E2 LCZ 5) területen lévő állomások szintén felhasználhatók az ajánlott városklíma monitoring

hálózat részeként (5.13.b ábra). Ezen túlmenően, az összes állomás pontos helyszínének meghatározása során figyelembe vettük a témát érintő előírásokat és ajánlásokat is (Oke 2004, Stewart 2011a).

A fejezet keretében bemutatott munka (Unger et al. 2011) – bár még szubjektív feldolgozási lépéseket is tartalmazott – utat nyitott egy jóval megalapozottabb és objektív feldolgozási folyamatot alkalmazó vizsgálatnak, amely eredményeképpen mind Szegeden mind Újvidéken városklíma monitoring rendszer került telepítésre (5.2.2. fejezet).

5.2.2. Urban-Path városklíma monitoring rendszer állomásainak kijelölése

Az 5.2.1. fejezetben bemutatott lokális klímazónákra reprezentatív városklíma monitoring rendszer állomásainak kijelölését célzó eljárás jelentős továbbfejlesztését követően alkottuk meg a jelen fejezetben bemutatásra kerülő új módszert (Lelovics et al. 2014, Unger et al. 2014a, 2015). A módszertan nagy előnye, hogy minden lépése objektív megoldásokból áll. Az eljárás felhasználja az 5.1.2. fejezetben bemutatott LCZ térképezési módszer eredményét, valamint további lépésekkel garantálja, hogy a kiválasztott mérőállomások ne csak a lokális klímazónákra legyenek reprezentatívak, hanem az UHI mintázatát is képesek legyenek jól lekövetni (Lelovics et al. 2014, Unger et al. 2014a, 2015). A kifejlesztett eljárással Szegeden és Novi Sad városában került meghatározásra egy-egy reprezentatív városi mérőállomás hálózat, amelyek együttesen alkotják az Urban-Path monitoring rendszert (Unger et al. 2014c). Mivel a fejezet fő célja a kifejlesztett új módszer bemutatása, így annak lépéseit csak Szeged esetén ismertetem.

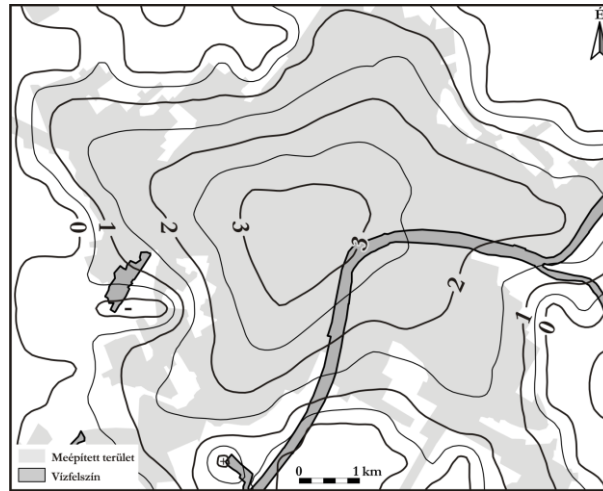
A reprezentatív mérőhelyek meghatározásának fontos szempontja, hogy a kiválasztott állomások mérési adatai képesek legyenek visszaadni az UHI térbeli jellegzetességeit. Az alapelv a 5.2.1. fejezetben bemutatott korábbi munkánkban is erre törekedtünk, azonban célszerű kidolgozni egy olyan eljárást, ami automatizálja azt a szakértői gondolatmenetet, amit abban a munkában követtünk. Felmerül a kérdés, hogy Szeged esetén miért nem használtuk a különböző korábbi UHI mérési kampányokból rendelkezésre álló információkat. Ezzel kapcsolatban az alapgondolatunk az volt, hogy egy általánosan érvényes módszer megalkotása során olyan unikális mérési adatbázisok, mint ami Szegeden rendelkezésre áll, kontraproduktív lenne. További cél volt az is, hogy a módszer mindkét városban alkalmazható kell legyen, így az UHI térbeli szerkezetének jellemzésére kizárólag a Balázs et al. (2009) munkánkon alapuló eljárás alkalmas.

Az első lépés tehát az évi átlagos UHI intenzitás várható mezőjének modellezése a 4.3. fejezetben bemutatott módszerrel. A módszer alkalmazása során a beépítettség paraméter (B_0) lényegében az 5.1.2. fejezetben bemutatott módon kiszámított épület alapterület arány (BSF) és vízzáró felszín arány (ISF) összege. A további származtatott paraméterek meghatározása során nem tértünk el a 4.3. fejezetben bemutatott lépésektől. A számítás eredményeképpen előállt az UHI éves átlagos intenzitása (5.14. ábra). Meg kell jegyezni, hogy a Balázs et al. (2009) eljárás egy 500 m oldalhosszúságú rácshálózat középpontjaihoz rendel becsült UHI értéket.

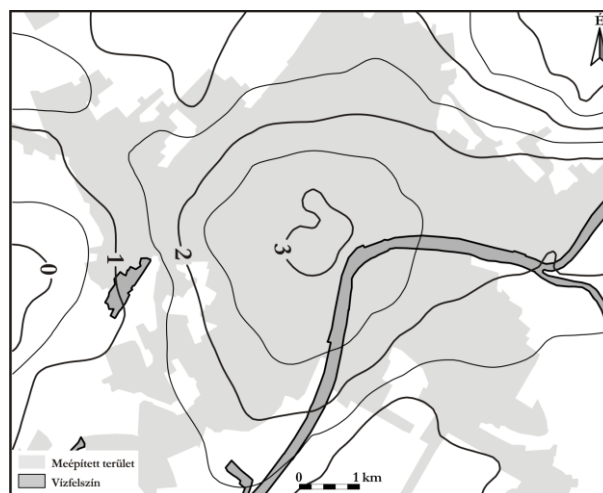
A mérőállomás helyszínének keresése során az LCZ rendszerre vonatkozó reprezentativitás eléréséhez azzal a kitételrel éltünk, hogy nem lehet mérőállomás az LCZ területek határainak 250 m sugarú környezetében, valamint a mérőállomások száma lokális klímazónánként legyen arányos a klímazónák vizsgált területen belüli arányaival. Ennek teljesítéséhez felhasználtuk az 5.1.2. fejezetben bemutatott térképezési módszer eredményét (5.7. ábra).

A másik fő szempont inkább geometriai jellegű, azaz valahogy garantálnunk kell, hogy az elhelyezett mérőállomások követni tudják az UHI mintázatát. Máshogy megfogalmazva

úgy kell adott (jóval kisebb) mennyiségű mintapontból vissza interpolálni egy kezdeti mezőt, hogy annak térbeli szerkezete ne módosuljon jelentősen, és a főbb jellegzetességek megmaradjanak. Belátható, hogy ez a művelet mindenképpen okoz hibát, így a hiba minimalizálását garantáló eljárást kell alkotni. További szempont még az is, hogy lehetőség szerint az interpolációból eredő hiba ne a városi területen jelenjen meg.



5.14. ábra A modellezett UHI mintázat Szegeden (Lelovics et al. 2014)



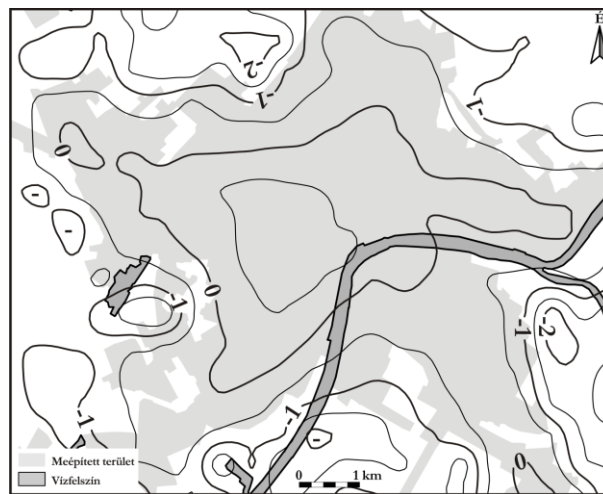
5.15. ábra A modellezett és az állomáshálózat alapján interpolált UHI térbeli szerkezete (Lelovics et al. 2014)

A mérési helyszínek ideális térbeli eloszlását egy iterációs eljárás segítségével határoztuk meg. Az eljárás bemenete a modellezett UHI mintázat (5.14. ábra), az LCZ térkép (5.7. ábra), valamint egy kezdeti mérőállomás térkép. Az algoritmus a kezdeti állomáshálózat (24 mérőállomás) pontjaiban meghatározza a becsült UHI mintázat (5.14. ábra) aktuális pontra vonatkozó értékét, a 24 állomás adatából interpolálja lineáris interpoláció segítségével a teljes vizsgált terület 500 m oldalhosszúságú rácsára az UHI mintázatot, majd kiszámítja minden rácstra a becsült és az interpolált UHI értékének különbségét. A második interpoláción alapuló mező kevésbé részletes, mivel csak 24 pontból generáltuk, de alkalmas annak becslésére, hogy a tervezett hálózat konfigurációja alapján hogyan lehetséges visszaadni a modelltől már ismert mezőt. Az eltérést a mező egészére számított négyzetes hiba értékével számszerűsítettük. A következő lépésben kerül sor az iterációra, azaz a mérőállomások helyszíneinek automatikus mozgatására és az ismételt négyzetes hiba számításra. A mérőállomások mozgatásánál figyelembe vettük a korábbiakban az LCZ térképekkel kapcsolatosan említett szempontokat. A végső állomáshálózati térkép a minimálshoz közeli

négyzetes hibájú térképek közül került ki, oly módon, hogy a hiba térbeli eloszlását összevetettük a nem beépített területek helyeivel.

A végső állomáshálózat esetén az interpolált mezőt a 5.15. ábra mutatja be. Összevetve a modellezett UHI intenzitás térképével (5.14. ábra) jól látszik, hogy a hősziget főbb szerkezeti jegyeit az interpolált mező is jól követi, annak ellenére, hogy a szerkezet – érthető módon – jelentősen egyszerűsödött.

A modellezett és az interpolált hőmérsékleti mezők különbsége alapján (5.16. ábra) megállapítható, hogy a 24 elemű monitoring hálózat abszolút (interpolációból adódó) hibája a teljes terület 78%-án $0,5^{\circ}\text{C}$ alatt van. Az 1°C -ot meghaladó mértékű hibák a terület 5%-ra míg az $1,5^{\circ}\text{C}$ -ot is meghaladó hibák a területnek mindössze az 1%-ra terjednek ki. A vizsgált terület beépített részén ennél jóval alacsonyabb mértékű hibát találunk. A beépített területre számított négyzetes hiba értéke 0,354.



5.16. ábra A modellezett és az állomáshálózat alapján interpolált UHI térbeli szerkezeteinek különbsége (Lelovics et al. 2014)

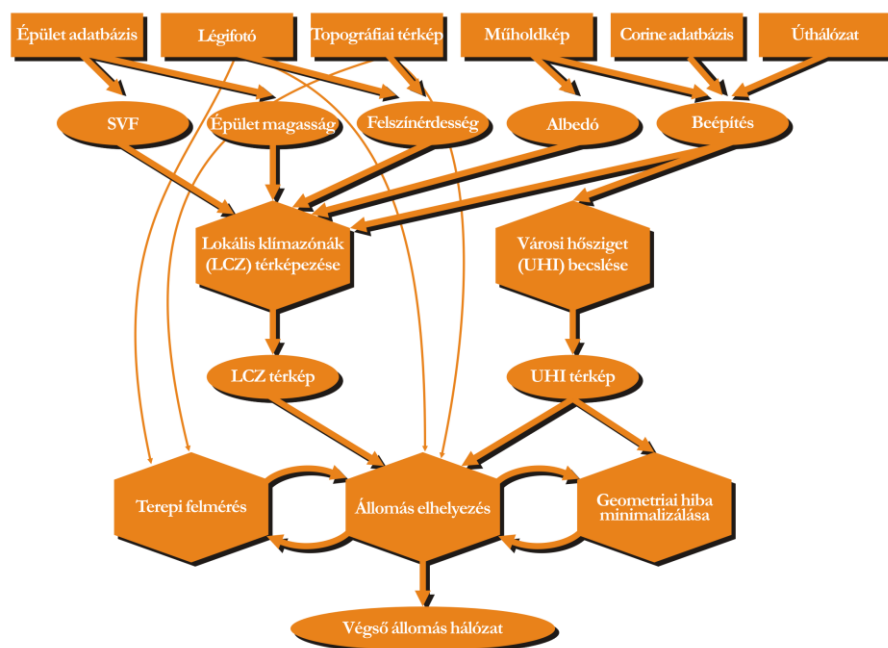
A mérőállomások végső helyszíneinek azonosítása során természetesen további mikroklimatológiai, illetve technikai szempontokat is figyelembe kell venni.

A mikro léptékű környezet hatásait az eljárásba közvetlenül bevonni nem célszerű, tekintve, hogy jóval részletesebb és nagyrészt nem rendelkezésre álló felszíngeometriai és fizikai paraméterek ismeretét igénylik, továbbá a durva zavaró tényezők a lehetséges helyszínek terepbejárásával is kellő bizonyossággal megállapíthatók. A végleges helyszínek meghatározása során tehát az objektív módszerrel meghatározott tágabb értelemben értelmezett helyszínen olyan helyet kell keresni, ami tükrözi az adott LCZ főbb jellegzetességeit. Például egy ritka, alacsony beépítésű (LCZ 6) terület esetén lehetőség szerint ne a területen belül elhelyezkedő bevásárlóközpont parkolóját válasszuk, mert az mikro szinten inkább a nagyméretű, alacsony beépítésre (LCZ 8) jellemző jeleket is fog generálni, így aláásva a mérőhely reprezentativitását.

A technikai szempontok pedig várossal várossal mások, így egy univerzális eljárás esetén nem célszerű beépíteni azokat. Továbbá itt is felmerülhet a mikroklimatológiai szempontok kapcsán említett, az adatok rendelkezésre állásával kapcsolatos probléma. Így ezek a szempontok beépítésére is a terepbejárások szolgálnak. Általános jellegű technikai megfontolás a mérőállomások magassága. A városi területen belül biztonsági szempontok miatt érdemes a szenzorokat – a szabványos 2 m-nél – magasabbra helyezni (esetünkben 4 m). Köszönhetően annak, hogy az UCL-en belül a levegő igen jelentősen átkeveredik ezért ennek a hatása várhatóan minimális (Nakamura, Oke 1988), valamint ezt később szegedi mintaterületeken terepi mérésekkel is megerősítették (Bordás 2017). Továbbá felmerül az

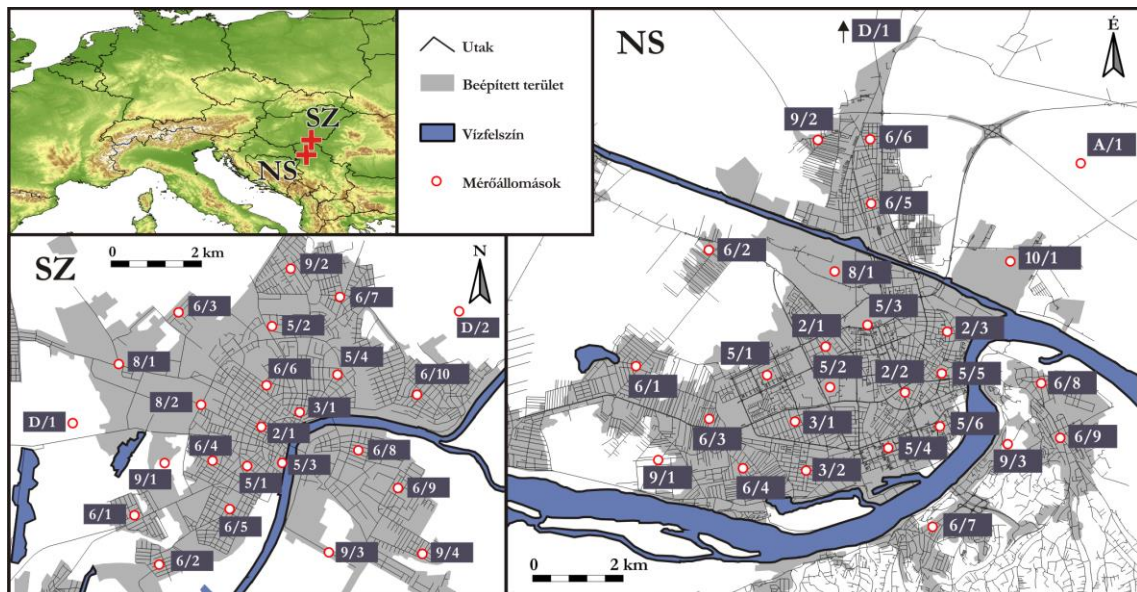
elhelyezés, áramellátás kérdése is. A monitoring rendszer műszereit villany és közvilágítási oszlopokon terveztük elhelyezni, mivel ott a biztonságos elhelyezés és az áramellátás is megoldható. A technikai szempontok kapcsán érdekes problémába is lehet ütközni, mint például az a tény is kevésbé volt a figyelmünk középpontjában, hogy a Szeged egyes városrészein a közvilágítást nem kandeláberekkel, hanem épületek közé kifeszített lámpatestekkel oldják meg, ami nem alkalmas mérőállomás elhelyezésre. Ez utóbbi példa jól szemlélteti, hogy a terepbejárás során megismerhető (mikroklimatológiai vagy technikai) szempontok néhány esetben teljesen felülírják az objektív szempontok alapján automatizált eljárást, így az eljárás végső lépése minden esetben szubjektív terepi és adminisztratív ismereteken alapuló folyamat kell legyen.

A monitoring hálózat telepítése egy összetett folyamat, erősen épít az LCZ térképezési módszerre (5.1.2. fejezet), illetve jelen fejezetben részletezett további szempontokat is figyelembe vesz. A folyamat egészét az 5.17. ábra szemlélteti, részletezve a szükséges összes adatot és eljárást, illetve ezek kapcsolatát.



5.17. ábra Az Urban-Path monitoring hálózat mérőállomásainak meghatározása (Unger et al. 2014a)

A monitoring rendszer állomásainak meghatározása során végül Szeged esetében 24 mérőállomás került kijelölésre (5.18. ábra). A mérőhelyek száma az LCZ 2 és LCZ 3 területeken egy-egy, az LCZ 5 és LCZ 9 övezetben négy-négy, az LCZ 6 területen 10, az LCZ 8 övezetben pedig 2. A vizsgálati terület Ny-i és ÉK-i részén két vidéki (LCZ D) állomást is meghatároztunk (5.18. ábra). Az LCZ D területén kijelölt mérőállomások referenciaként szolgálnak, kijelölésük technikai szempontok, valamint a vizsgált területen tapasztalható uralkodó szélirányok alapján került meghatározásra. A munkával párhuzamosan – analóg módon – Novi Sad esetén is készült egy állomáshálózati terv (5.18. ábra).



5.18. ábra Az Urban-Path monitoring rendszer állomáshálózatai Szegeden (SZ) és Novi Sad városában (NS) (Lelovics et al. 2016)

A lokális klímazónákra reprezentatív városi monitoring rendszer jelentősége abban áll, hogy segítségével vizsgálhatóvá válnak az egyes LCZ-k termikus reakciói illetve hatásuk más éghajlati tulajdonságokra. Az eredmények további része tehát erősen épít az itt bemutatott módon meghatározott mérőállomás hálózatra.

5.3. Urban-Path városklíma monitoring rendszer

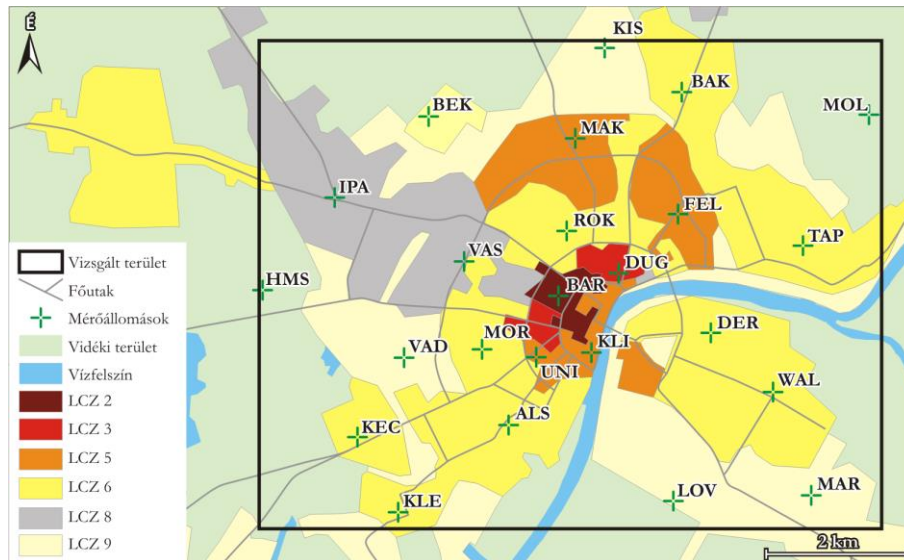
Egy uniós projekt keretében 2013-2014 között egy 24 állomásból álló monitoring hálózatot hoztunk létre Szegeden (Unger et al. 2014c, 2015, 2017). A rendszer fő célja az volt, hogy reprezentatív legyen a lokális klímazónák rendszerére. A mérőállomások helyszíneit ezért egy összetett folyamat keretében határoztuk meg (5.2.2. fejezet). A projekt keretében Novi Sad városában is kialakításra került analóg módon egy 27 mérőállomásból álló monitoring rendszer, azonban a dolgozat keretében csak a szegedi eredményekre koncentrálok.

Mivel a mérőállomás hálózat telepítése az 5.2.2. fejezetben bemutatott módszertanon alapul és működésével kapcsolatban számos főleg módszertani új tudományos eredmény kapcsolódik ezért úgy találtam célravezetőnek, hogy a hálózatot magát, mint tudományos eredményt, ebben a fejezetben ismertetem.

5.3.1. A mérőállomás hálózat

A városklíma monitoring rendszer Szegeden 24 mérőállomásból áll (Unger et al. 2014c, 2015, 2017). A rendszerbe integráltuk az Országos Meteorológiai Szolgálat két szegedi mérőállomását is, így 22 helyszínen hőmérséklet és légnedvesség mérés történik, a fennmaradó két helyszínen pedig jóval szélesebb a mérési spektrum. A rendszer működéséhez az utóbbi két helyszínről a globálsugárzás és szélesség adatokat használjuk fel a hőmérséklet és légnedvességen túl.

A mérőállomások helykiválasztását az 5.2.2. fejezetben részletesen bemutattam. Ott a mérőállomásokat még számokkal jelöltük (5.18. ábra), azonban részben Iain D. Stewart javaslatára áttértünk egyedi azonosítókra, mint ahogy az az 5.19. ábrán is jól látszik.



5.19. ábra Az URBAN-PATH állomáshálózat elemeinek elhelyezkedése és az LCZ-típusok területi eloszlása Szegeden (Unger, Gál 2017)

A mérést egy Sensirion SHT25 érzékelő végzi egy 60 cm-es konzol végén elhelyezett – az OMSZ által is alkalmazott – ernyőben. A szenzor pontossága 10-60 °C között 0,2 °C a hőmérséklet és 10-90% között 1,8% az relatív nedvesség esetében. A konzolokat biztonsági okokból lámpaoszlopokra szereltük, 4 m magasságban a felszín felett (5.20. ábra). A mérőállomások működésért felelős elektronika egy GPRS/EDGE/3G modembe lett integrálva, áramellátását egy szünetmentes tápegység közbeiktatásával a villanyoszlopon lévő áram, illetve a közvilágítási oszlop időszakos áramellátása fedezi.



5.20. ábra A mérőállomások elhelyezése (a) acél és (b) beton kandeláberen, illetve (c) beton és (d) fa villanyoszlopon (Unger, Gál 2017)

Az állomásokon és az adatgyűjtést végző rendszerben az idő UTC-ben van megadva, a mérőállomások óráit a szerver rendszeresen szinkronizálja. Az állomások többsége (17 db) folyamatos áramellátással rendelkezik, de hét állomás csak akkor rendelkezik áramellátással, amikor a városi világítás fel van kapcsolva. Ez a hét állomás a beépített akkumulátorok energiáját használja napközben vagy áramkimaradáskor. Az állomások akár 10 napig is működhetnek kizárólag az akkumulátorukat használva. Az állomások percenként végeznek méréseket és 10 percenként továbbítják a mért állapotváltozók értékeit a központi szerverre kiegészítve néhány technikai információval (akkumulátorfeszültség, rendszer hőmérséklet, érzékelő állapot). Ha nincs mobil internetkapcsolat, vagy a fő szerver nem fogadja az adatokat, az állomás addig próbálja ismételt elküldeni azokat, amíg nem sikerül. Ha az állomás akkumulátorának töltöttségi szintje alacsony, az állomás megnöveli a két adatátvitel közötti időt, hogy csökkentse az energiafogyasztást. Egy mérőállomás (HMS) az OMSZ szegedi magaslégkörkutató obszervatóriumának műszerkertjében található, így kalibrációs információkat is szolgáltat a hálózat számára.

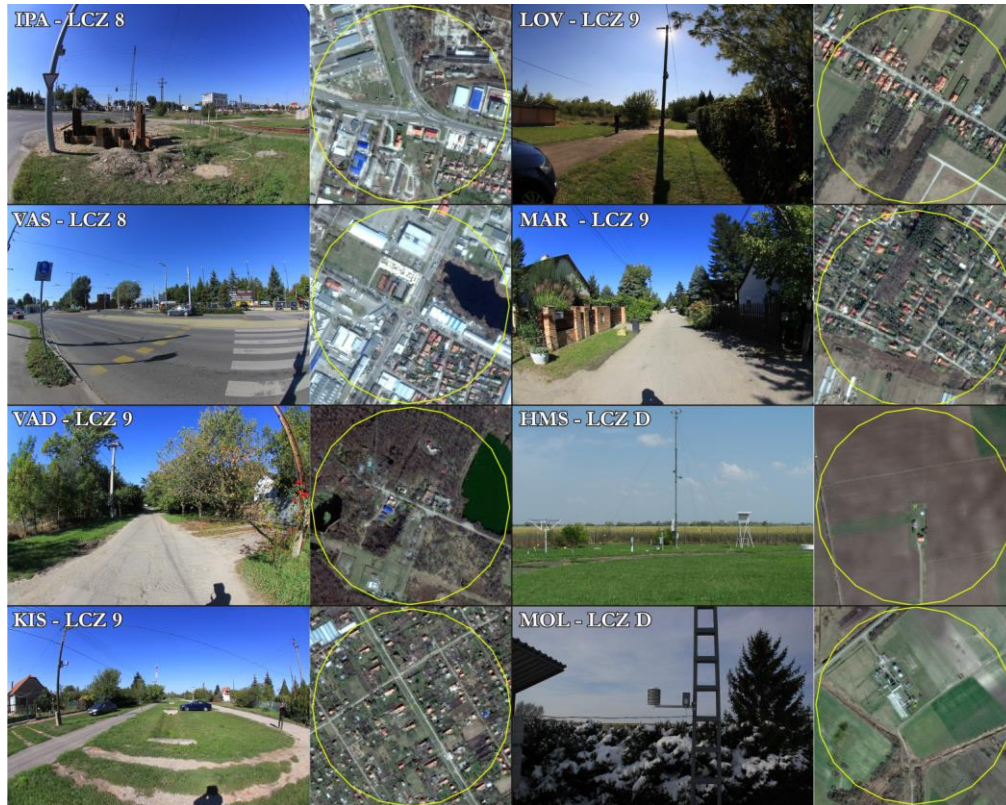


5.21. ábra Az LCZ 2, 3 és 5 területén elhelyezett állomások környezetének látképe és légifelvétele (a 250 m-es környezetet a sárga körök jelölik) (Unger, Gál 2017)



5.22. ábra Az LCZ 6 területén elhelyezett állomások környezetének látképe és légifelvétele (a 250 m-es környezetet a sárga körök jelölik) (Unger, Gál 2017)

A mérőállomások száma arányos az LCZ területek méretével, így a 0,63 km² területű LCZ 2 esetén 1 (5.21. ábra), a 0,67 km² területű LCZ 3 esetén 1 (5.21. ábra), a 4,35 km² területű LCZ 5 esetén 4 (5.21. ábra), a 19,63 km² területű LCZ 6 esetén 10 (5.22. ábra), a 5,91 km² területű LCZ 8 esetén 2 (5.23. ábra), valamint a 15,32 km² területű LCZ 9 esetén 4 (5.23. ábra) állomás került elhelyezésre. A mérési helyszínek közvetlen környezetéről, illetve 250 m sugarú körön belül a környezet viszonyairól az 5.21-23. ábrák nyújtanak tájékoztató információkat.



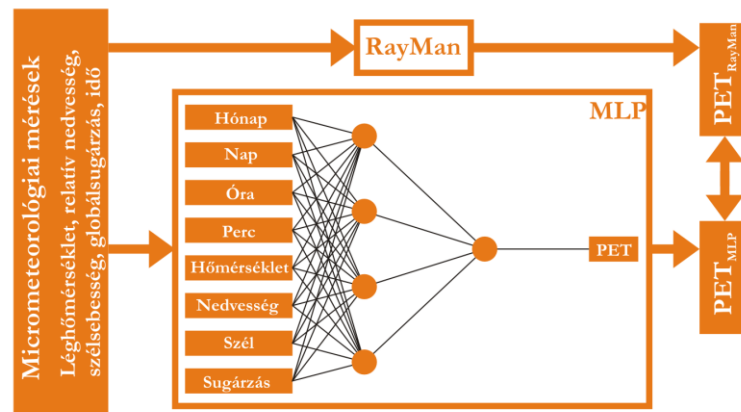
5.23. ábra Az LCZ 8, 9 és D területén elhelyezett állomások környezetének látképe és légfelvétele (a 250 m-es környezetet a sárga körök jelölik) (Unger, Gál 2017)

5.3.2. A rendszerhez kapcsolódó adatfeldolgozás

Az Urban-Path monitoring rendszer egyik fő célja a városi humánkomfort viszonyok térképezése és online bemutatása (Unger et al. 2014c, 2015, 2017). A humánkomfort paraméterek a léghőmérséklet, a légnedvesség, a sugárzás és a szél együttes hatásainak jellemzésére szolgálnak. A rendszer keretében a fiziológiailag ekvivalens hőmérsékletet (PET) alkalmaztuk a hőérzet leírására. A PET lényegében egy olyan fiktív környezet hőmérséklete °C-ban ahol a gőznyomás 12 hPa, a szélesség 0,1 ms⁻¹ és nincs közvetlen napsugárzás. Ebben a fiktív környezetben az emberi szervezet ugyanazokat a fiziológiai válaszokat adja mint egy komplex valós környezetben (Mayer, Höppe 1987).

A PET kiszámítására számos megoldás ismeretes, azonban szerver oldali automatikus számításokhoz ezek nem megfelelőek, ezért egy új közeli módszert fejlesztettünk ki (5.24. ábra). A számítási módszer alapja egy többrétegű perceptron (MLP) struktúrát alkalmazó neurális háló (Haykin 1994). Ez rétegekbe szervezett neuronokból áll. A neuronok differenciálható kimenetei nemlineárisak, ami biztosítja, hogy a hálózat kimenete a súlyok folytonos differenciálható függvénye legyen. A kimeneti réteg lehet lineáris vagy nemlineáris. Még a legegyszerűbb esetben is, amikor az MLP csak egy rejtett réteget tartalmaz, paramétereiben nemlineáris leképezést valósít meg. Az MLP a hiba-visszaterjesztésen alapuló tanulási

algoritmust használja, amely egy pillanatnyi gradiensre épülő iteratív tanulási folyamat (Unger et al. 2015).



5.24. ábra A neurális háló fejlesztésének folyamatábrája (Unger et al. 2015)

A neurális háló bemenő adatai a léghőmérséklet, légnedvesség, globálisugárzás és szélesség. A neurális háló tanulásához a 2009 és 2013 között Szeged különböző városi mikrokörnyezeteiben végzett terepi mérések eredményei alapján – RayMan szoftverrel (Matzarakis et al. 2007) – számított PET értékeket alkalmaztuk (Kántor, Unger 2010, Égerházi et al. 2012). A neurális háló a WEKA szoftverben lett implementálva (Hall et al. 2009).

A PET számítást minden mérőállomásra automatizáltan végeztük a neurális háló alapú módszerrel, a számítás kulcsa a bemeneti paraméterek előállítását volt, mivel azok közül csak a léghőmérséklet és légnedvesség állt rendelkezésre helyszíni mérésekből. A globálisugárzás és szélesség közvetlen mérése technikai (a műszerek költségei), illetve teoretikus okok miatt nem történt meg. Ez utóbbi szakmai szempontok abból eredtek, hogy mind a globálisugárzást mind a szélviszonyokat a városi területen belül a mikrometeorológiai viszonyok erőteljesen befolyásolják, így a helyszíni mérések mikro léptékű folyamatokról tájékoztatnak, ellenben a rendszer célja a lokális léptékű humánkomfort viszonyok jellemzése volt. A számítások eredményeképpen megkapott PET értékek tehát a város különböző – zavartalan besugárzást biztosító mikrokörnyezetek – pontjain lévő lokális léptékű különbségekből adódó viszonyokat jellemzik. Lokális léptékben a városok területén a léghőmérséklet az, ami a legjelentősebb különbségeket mutatja, így ez a legfontosabb mérendő paraméter, a többi esetben becsült értékek is alkalmazhatóak.

A globálisugárzás esetén a legközelebbi olyan helyszín (HMS, UNI, 5.19. ábra) adatát alkalmaztuk, ahol az rendelkezésre állt. A szélesség esetén egy jóval összetettebb közelítő számítást alkalmaztunk.

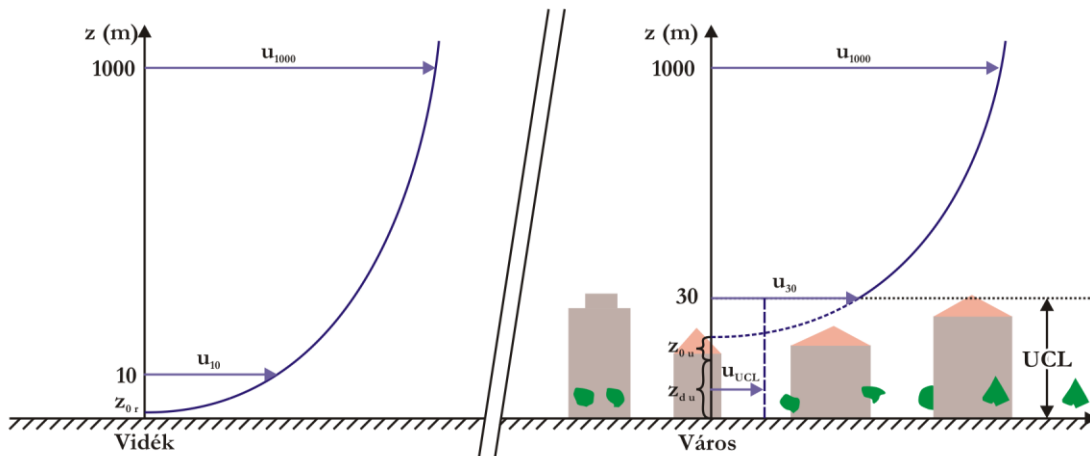
A logaritmusos szélprofil különböző formáinak alkalmazása (Oke 2002, Foken 2008) a szélesség redukciójára több humánkomfort vizsgálatban is elterjedt (Spagnolo, de Dear 2003, Bröde et al. 2012). Ez a módszer azonban megkérdőjelezhető, abban az esetben, ha az érdességi magasság (z_0) és az érdességi rétegvastagság (z_d) összege nagyobb, mint az a magasság, ahol a szélességet szeretnénk kiszámítani, mert a logaritmusos közelítés ezekben az esetekben 0 ms^{-1} -et ad (Oke 2002, Foken 2008). A számításhoz tehát más megoldást kellett találnunk, mivel a városi területen az érdességi paraméterek értékei (Gál, Unger 2009) meghaladják ezt a korlátot. Az átlagos szélesség becslésére az UCL-ben egy erre a célra kifejlesztett új módszert alkalmaztunk, amely a szélprofil logaritmusos közelítésén alapul (Counihan 1975):

$$u_1 = u_2 \cdot \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^\alpha$$

ahol u_1 és u_2 a szélesség a z_1 és z_2 magasságban, és α a z_0 függvényében becsülhető:

$$\alpha \approx \frac{1}{\ln \left(\frac{\sqrt{z_1 \cdot z_2}}{z_0} \right)}$$

Először is a Gál, Unger (2016a) által kifejlesztett Roughness Mapping Tool-t használtuk. Ez egy önálló szoftver az érdességi paraméterek (z_0 , z_d) kiszámítására épület- és fakorona adatbázis felhasználásával. Ezzel a szoftverrel számoltuk ki a z_0 és z_d értékeket a megfigyelési helyszíneken és 8 további területen. Ezek a további területek a korábbi, 2009 és 2012 közötti szegedi humánkomfort vizsgálatok helyszínei (Égerházi et al. 2012, Kántor et al. 2012b), és ezekről a területekről 59 523 egyedi szélesség-mérés áll rendelkezésre. A terepi mérések 1 perces adataiból kiszámítottuk a 10 perces átlagos szélességeket (u_{UCL}), és párba állítottuk a HMS állomás 10 perces átlagos szélesség adataival (u_{10}). Feltételeztük, hogy az u_{UCL} állandó az UCL-en belül, és egyenlő az u_{30} -al (5.25. ábra). Végül 1615 adatpárt kaptunk, miután kiszűrtük a szélcsendes és a nagyon gyenge szélességű helyzeteket ($u < 1 \text{ ms}^{-1}$).



5.25. ábra Az szélesség redukció koncepciója (a szimbólumok magyarázatát lásd a szövegben) (Unger et al. 2015)

Következő lépésben az 1000 m magasságban mért szélességet (u_{1000}) az u_{10} -ból számítottuk ki a logaritmikus képlet segítségével, feltételezve, hogy ez az u_{1000} érték a regionális szélesség, amelyet nem befolyásol a felszín légellenállása (5.25. ábra). Majd meghatároztuk a szélességet az UCL tetején (u_{30}), és az átlagos négyzetes hiba (MSE) minimalizálásával (Scharf, Demeure 1991) kiszámítottunk egy állandót (k), amely az u_{30} és a mért u_{UCL} közötti különbséget írja le (5.25. ábra). A k értéke a feldolgozott 1615 adatpár alapján 0,3331 (MSE=0,3284).

Végül a következő egyenletet kaptuk a szél redukcióhoz:

$$u_{UCL} = u_{10} \cdot \left(\frac{1000}{10} \right)^{\alpha_1} \cdot \left(\frac{30 - z_{du}}{1000 - z_{du}} \right)^{\alpha_2} \cdot k$$

ahol

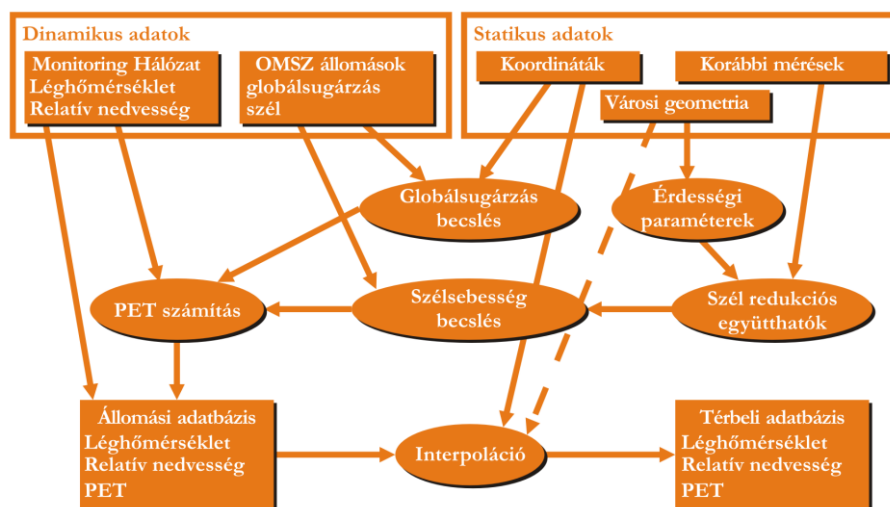
$$\alpha_1 \approx \frac{1}{\ln\left(\frac{\sqrt{10 \cdot 1000}}{z_{0r}}\right)} \quad \alpha_2 \approx \frac{1}{\ln\left(\frac{\sqrt{(1000 - z_{du}) \cdot (30 - z_{du})}}{z_{0u}}\right)}$$

és az r valamint u indexek pedig a vidéki és városi helyszíneket jelölik.

A szél redukcióra levezetett egyenlet felhasználásával komplex szélredukciós állandó (r) értékét minden egyes megfigyelési helyszínre kiszámítottuk (5.2. táblázat). Ezt az értéket arra használtuk, hogy a PET számítás időpontjával egy időben a HMS állomáson mért szélességből kiszámítsuk az állomások becsült szélességét.

5.2. táblázat Az érdességi rétegvastagság (z_d), az érdességi magasság (z_0) és a komplex szélcsökentési állandó (r) a városi állomásokon (Unger et al. 2015)

Állomás szám	Állomás név	z_d (m)	z_0 (m)	r
2-1	BAR	8,7183	1,7455	0,2932
3-1	DUG	6,3586	1,4968	0,3116
5-1	UNI	6,0872	1,6751	0,3065
5-2	MAK	4,6924	2,2986	0,2937
5-3	KLI	7,6809	2,0346	0,2887
5-4	FEL	5,7750	2,8261	0,2765
6-1	KEC	1,7582	0,6740	0,3663
6-2	KLE	1,4402	0,4290	0,3856
6-3	BEK	1,0717	0,3134	0,3982
6-4	MOR	2,6706	0,8682	0,3521
6-5	ALS	3,4694	1,0783	0,3392
6-6	ROK	3,1466	0,9509	0,3463
6-7	BAK	1,5964	0,4782	0,3809
6-8	DER	3,1734	1,1458	0,3372
6-9	WAL	1,5275	0,4108	0,3870
6-10	TAP	1,2339	0,5226	0,3784
8-1	IPA	1,8155	0,2798	0,4001
8-2	VAS	2,1910	0,2509	0,4028
9-1	VAD	0,1703	0,2000	0,4157
9-2	KIS	0,7589	0,2199	0,4111
9-3	LOV	0,2805	0,2000	0,4154
9-4	MAR	0,7641	0,2177	0,4115



5.26. ábra Monitoring rendszer adatfeldolgozásának folyamatábrája (Unger et al. 2015)

A feldolgozási folyamat egészét az 5.26. ábra foglalja össze. A monitoring rendszer keretében természetesen további adatfeldolgozási műveletek is történtek, azonban ezek

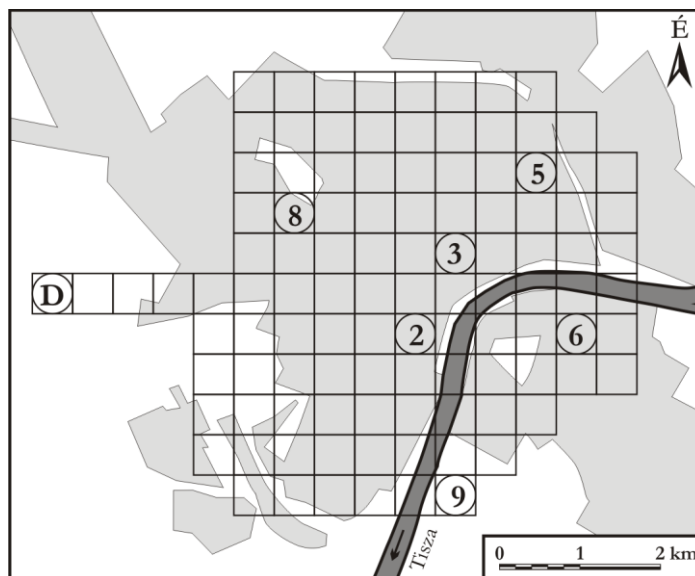
inkább technikai mint tudományos jellegű eredmények, így a további részletek (Unger et al. 2014c, 2015, 2017) ismertetését elhagyom.

5.4. A városklíma jellemzése a lokális klímazónák szerint

A lokális klímazónák rendszerére reprezentatív mérőállomás hálózatunk mint adatforrás alapja volt az elmúlt évek számos vizsgálatának. Számos jelentős tudományos eredményt alapozott meg, amelyek nagy számú rangos publikációban jelentek meg pozitív nemzetközi fogadtatás mellett. Pont ezért nehéz feladat a témával kapcsolatos vizsgálatok rövid és lényegre törő összefoglalása. Igyekeztem az eredmények teljes vertikumára bepillantást adni a kezdeti, még a korábbi mobil méréseket alkalmazó elemzésektől a hosszú adatsorokon végzett klimatológiai szempontú vizsgálatokig. A paramétereket tekintve a léghőmérsékleten túl külön részletezem a légnedvességgel, a klímaindexekkel és humánkomfort viszonyok vizsgálatával kapcsolatos eredményeket is.

5.4.1. Léghőmérséklet mobil mérések alapján

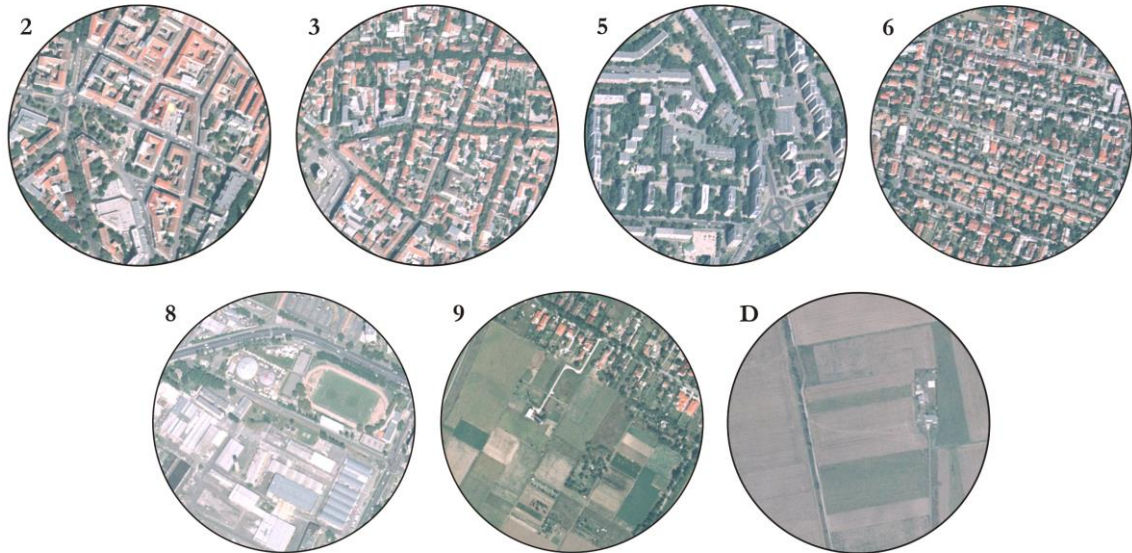
A lokális klímazónák célja a városi mérőhelyek termikus szempontú osztályozása, így célszerűnek mutatkozott az, hogy mérési adatok alapján megvizsgáljuk, hogy valóban elkülönülnek-e az LCZ-kre jellemző hőmérsékleti értékek. Mivel 2014 előtt nem állt rendelkezésre Szegeden megfelelő mérőállomás hálózat, ezért a korábbi 2002-2003-ban (Unger 2004, Unger et al. 2014b), illetve a 2008-ban (Unger et al. 2010, Lelovics et al. 2013) végzett mobil hőmérsékletmérések adatait felhasználva elemeztük az LCZ rendszert ilyen szempontból.



5.27. ábra A Szegeden előforduló LCZ-típusokat reprezentáló területek (Unger et al. 2014b)

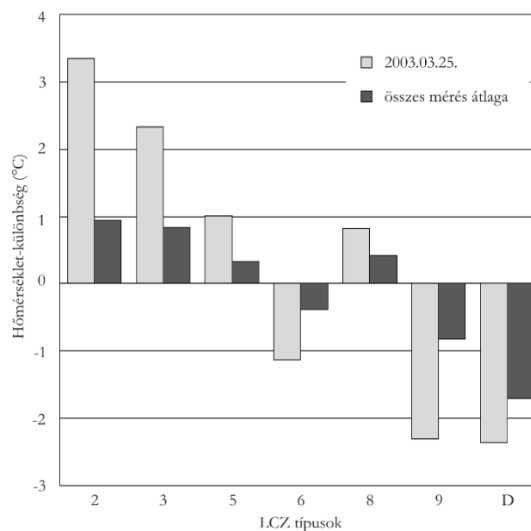
Az első – mobil méréseket alkalmazó – elemzés keretében a 2002-2003-ban végzett mobil városi hősziget mérési kampány adatait használtuk fel (Unger 2004). A vizsgálat alap gondolata az volt, hogy a 35 mérés során gyűjtött, majd a 107 elemű rácshálózatra átlagolt adatokat úgy tekintettük, mintha az egy, a rácshálózat közepén elvégzett mérőállomási mérés lenne (Unger et al. 2014b). A vizsgálat keretében kiválasztottunk 7 olyan cellát (5.27. és 5.28. ábrák), amely esetén a középpont körüli forrásterületnek tekintett 250 m sugarú kör egyértelműen besorolható volt egy LCZ osztályba az 5.1.2. fejezetben ismertetett módszerrel. Ezt a kiválasztott 7 cellát (5.27. és 5.28. ábrák) a vizsgált területen jelen lévő LCZ típusok reprezentatív területeinek tekintettük, majd ugyan ezekre a pontokra vonatkoztatott hőmérsékleti adatokat elemeztük. A hőmérsékleti adatok elemzése során relatív értékeket

számítottunk, oly módon, hogy a 107 cella átlagos UHI értékét tekintettük a 0-nak, majd az egyes reprezentatív LCZ területek hőmérsékletét az ettől a területi átlagtól vett különbségként adtuk meg. Az elemzés során külön vizsgáltuk az évi átlagot (a 35 mérés alapján), valamint a 2003. 03. 25. éjjelen mért adatokat, mivel ez a nap olyan időjárási helyzettel rendelkezett, ami akadálytalanul hagyta érvényesülni a városi hatásokat (Unger et al. 2014b).



5.28. ábra A Szegeden előforduló LCZ-típusokat reprezentáló területek légifotói (Unger et al. 2014b)

Az eredmények (5.29. ábra) rámutattak arra, hogy a mindkét esetben (átlag és kiválasztott nap) a területi átlagnál melegebbnek bizonyultak az erőbben beépített típusok (LCZ 2, 3, 5 és 8). A növényzettel borított és kevésbé beépített LCZ-k hőmérséklete alatta maradt a területi átlagnak. Az LCZ osztályok egymáshoz viszonyított hőmérsékleti értékei alátámasztják a rendszer kidolgozása során feltételezett termikus különbségeket, azaz a nyitottabb beépítésű és alacsonyabb típusok felé csökken a hőmérsékleti többlet (LCZ 2 > LCZ 3 > LCZ 5 > LCZ 8 > LCZ 6). A kiválasztott márciusi napon a város termikus reakciói jóval hangsúlyosabbak voltak, ami annak köszönhető, hogy nyugodt és szélcsendes időjárási körülmények között a felszín klimatikus hatásai jóval erősebben jelentkeznek, míg az éves átlagban köszönhetően annak, hogy kevésbé kedvező időjárású napok is előfordultak kedvezőtlenebbek voltak, az eltérések is kisebb mértékűek voltak (5.29. ábra).

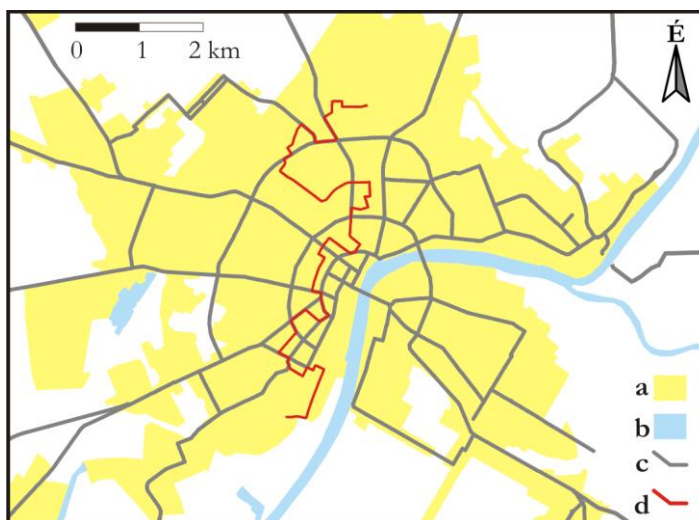


5.29. ábra A különböző LCZ típusok hőmérsékleti eltérései a területi átlagtól egy kiválasztott napon, valamint éves átlag adatai alapján (Unger et al. 2014b)

A kiválasztott napon a legnagyobb különbség az LCZ 2, valamint az LCZ D és LCZ 9, vagyis a területen előforduló legintenzívebb beépítés (kompakt, középmagas beépítés) és a természeteshoz igen közeli, dús vegetációjú (alacsony növényzet és ritkán beépített) között mutatkozott ($\Delta T_{LCZ:2-D}$ és $\Delta T_{LCZ:2-9} > 5,5$ °C). A $\Delta T_{LCZ:3-D}$ és a $\Delta T_{LCZ:3-9}$ is jelentős a különbségre utal (> 4 °C), míg a $\Delta T_{LCZ:5-6}$ közepesnek mondható (~ 2 °C), de a $\Delta T_{LCZ:9-D}$ már jelentéktelennek tekinthető (5.29. ábra). Az éves átlagok esetén a különbségek tendenciái azonosak, azonban a különbségek kisebbek (5.29. ábra). Ezek a különbségek hasonlóak azokhoz az értékekhez, amelyeket Stewart, Oke (2010) feltártak Uppsala városában végzett vizsgálataik keretében.

A másik, hasonlóan mobil méréseken alapuló vizsgálat keretében (Lelovics et al. 2013) a 2008-ban két napon végzett szimultán felszín és léghőmérséklet mérési kampány adatait használtuk fel (Unger et al. 2010). A kedvező időjárású anticiklonális helyzetekben végzett mérések egy É-D irányú mérési útvonal mentén (5.30. ábra) történtek és időben átlagolásra kerültek egy esti referencia időpontra (19 UTC) (Unger et al. 2010). Ezeken a napokon az OMSZ belvárosban található klímaállomásának (Unger, Gál 2011) adatai alapján a besugárzás zavartalan volt (810–860 Wm⁻²-es maximum), mérsékelt volt a szél (a mérések alatt maximum 3,1 ms⁻¹), míg a napi minimumhőmérséklet 17 °C a napi maximumhőmérséklet pedig 28-36 °C körül alakult.

A mobil mérés útvonala a beépített LCZ típusok közül az LCZ 3, 5 és 6 területén kétszer, míg az LCZ 2 területén egyszer haladt át. Az LCZ 8 és 9 területeket nem érintette (5.31. ábra).

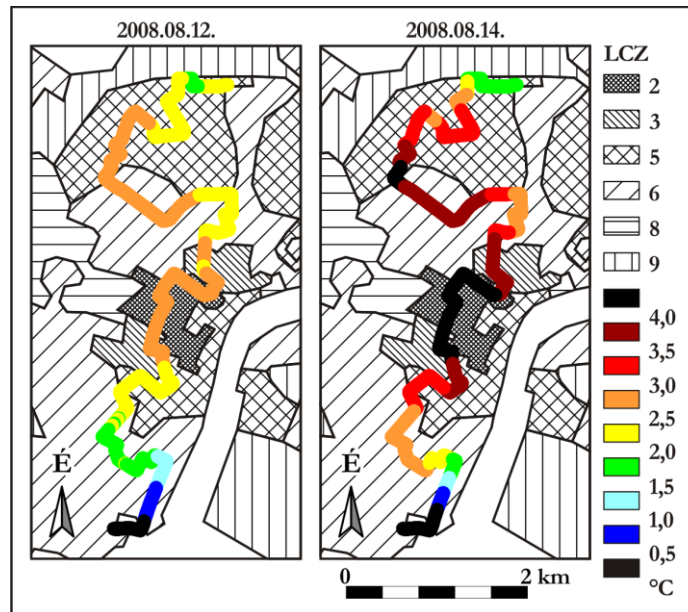


5.30. ábra A 2008-as mérési útvonal Szegeden (a: város, b: vízfelület; c: főbb utak, d: mérési útvonal) (Lelovics et al. 2013)

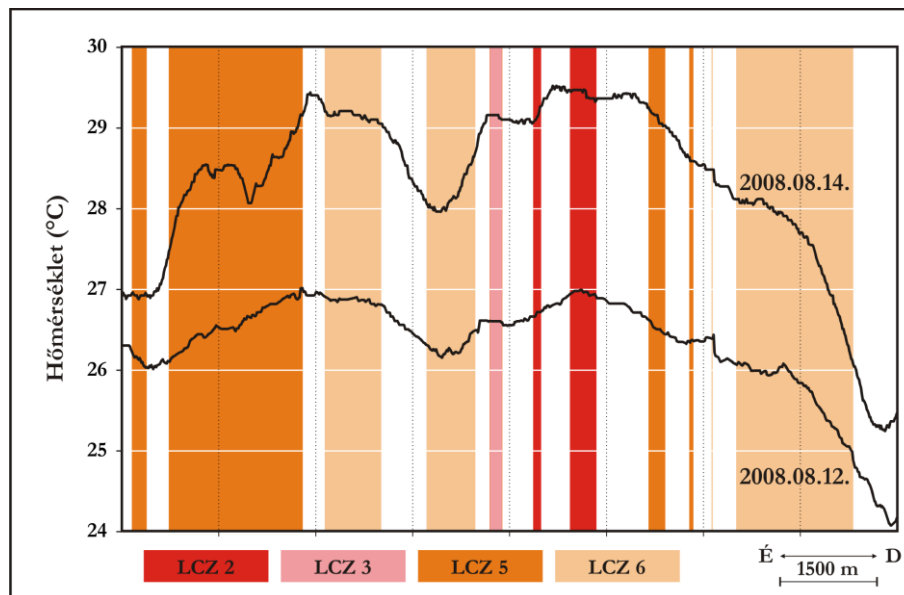
A két mérési napon a hőmérséklet térbeli eloszlása nagyon hasonló volt (5.31. ábra), bár a lokális különbségek a második mérés során jelentősebbek voltak, köszönhetően annak, hogy estére a nappal képződött gomolyfelhők feloszlottak és a szél is elállt. A hőmérsékleti különbség alapja a útvonal mentén mért legalacsonyabb hőmérséklet volt, amit a terület D-i részén találunk, ahol az útvonal egy rövid ideig beépítetlen területen halad (5.31. ábra). A leghidegebb és legmelegebb szakaszok különbsége 2,9°C, illetve 4,3°C volt. Megfigyelhető az összefüggés az LCZ típusok és a hőmérsékleti többlet nagysága között, de látszik egy ennél kisebb térszkálájú mintázat is (5.31. ábra).

A léghőmérséklet alakulását az útvonal mentén az 5.32. ábra szemlélteti. Az ábrán követhető azon mérési pontok LCZ típusai, amelyek nem az LCZ területek határára, vagy annak 100 m-es körzetében helyezkednek el. Az LCZ területek határainak az elemzés további részéből történő kihagyása azért jelentős, mert így elkerülhető, hogy a két LCZ-re jellemző

jelek keveredjenek köszönhetően annak, hogy a mért hőmérsékleti értékek forrásterülete vélhetően nem csak egy LCZ-re terjed ki.



5.31. ábra A mérési útvonal menti hőmérsékleti többlet (°C) 2008.08.12. és 2008.08.14. 19:00 UTC-kor és az érintett LCZ típusok (Lelovics et al. 2013)

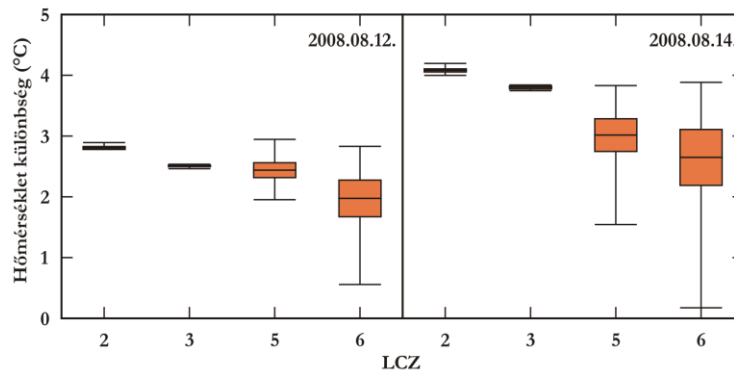


5.32. ábra A léghőmérséklet alakulása az útvonal mentén, valamint az LCZ típusok területei (Lelovics et al. 2013)

Északon az út nagy területen halad az LCZ 5-ben, melyben a beépítettség igen változatos, lakótelepi épületek, parkolók, és fás területek találhatóak (5.32. ábra). Ez a terület ezek alapján nem teljesen homogén, ami a hőmérséklet alakulásában is nyomon követhető. A város déli részén az útvonal hosszan haladt az LCZ 6 területén, ami lényegében családi kertek házákkal történő beépítést jelent. Itt látszik, hogy a városközponttól távolodva a hőmérséklet fokozatosan csökkent. A belváros területén az útvonal az LCZ 2-es területeken halad keresztül, amit a magas hőmérsékleti értékek is követnek (5.32. ábra).

A méréseket LCZ szerint csoportosítva (5.33. ábra) jól látszik, hogy mindkét napon az egyes LCZ-k középértékei eltérnek egymástól az LCZ 2, 3, 4, 6 sorrendben. Jelentősebb szórás az LCZ 5 és 6 esetén tapasztalunk, azonban ez nagyjából annak köszönhető, hogy

a mérési útvonal jóval hosszabb ezekben az LCZ területekben, valamint pl. az LCZ 3 esetén mindössze 14 mérési pontból állt össze az átlag. Ez az eredmény rávilágít arra, hogy egy nem LCZ alapon meghatározott mérési stratégia okozhat nehezen értelmezhető vagy elemezhető eredményeket, ami ráirányítja a figyelmet arra, hogy fontos a megfigyelések tervezése során is szem előtt tartani az LCZ rendszert, mint ahogy azt az 5.2. fejezetben ki is fejtettem.



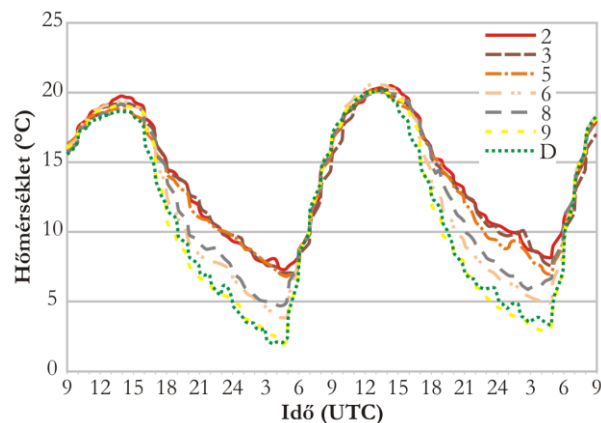
5.33. ábra A hőmérséklet különbségek box plot diagramjai LCZ területenként (Lelovics et al. 2013)

5.4.2. Léghőmérséklet állomáshálózat alapján

A városklíma monitoring rendszerből (5.3. fejezet) származó léghőmérséklet és a lokális klímazónák kapcsolatát több publikációban is elemeztük (Lelovics et al. 2014, Unger et al. 2014b, Unger et al. 2015, Lelovics et al. 2016, Gál et al. 2016, Gál, Unger 2016b, Unger et al. 2017, Skarbit et al. 2017). Ezek közül néhány lényeges eredményt mutatok be a dolgozatomban.

Esettanulmány jelleggel vizsgáltuk (Unger et al. 2015) a különböző LCZ területek eltérő termikus jellemzőit a 2014. március 29. és 31. közötti 48 órás felhőtlen időszakban (5.34. ábra). Az OMSZ szegedi magaslégkörkutató obszervatóriumának mérései alapján a nappali órákban a besugárzás zavartalan volt, a maximális globálisugárzás értékek 750-780 Wm^{-2} között voltak. A légmozgás mérsékelt volt (0-3 ms^{-1}), kivéve az első néhány órát (~4-5 ms^{-1}). A nappalok meglehetősen melegek voltak, a maximális értékek 18-20°C körül alakultak, azonban hajnalra levegő 2-4 °C-ra hűlt, köszönhetően annak, hogy éjjel a kisugárzás miatti hűlés zavartalan volt.

Az LCZ területek hőmérséklet változásának 48 órás időszak alatti összehasonlítása érdekében minden LCZ-területre kiszámítottuk a területi átlagokat. Ennek eredményeként lokális klímazónánként egy-egy hőmérsékleti idősort kaptunk (5.34. ábra).

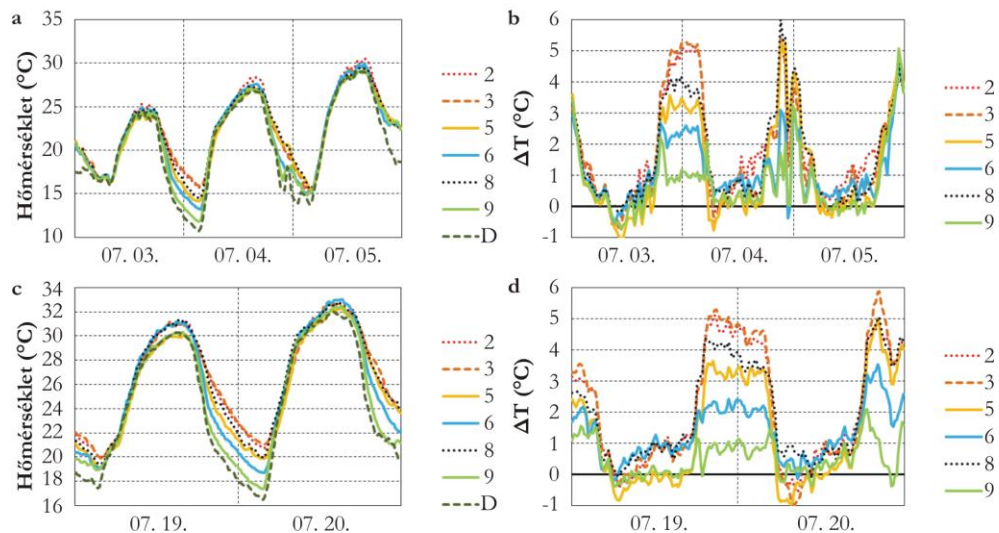


5.34. ábra A léghőmérséklet időbeli változása 2014. március 29-31. között az LCZ kategóriákban (Unger et al. 2015)

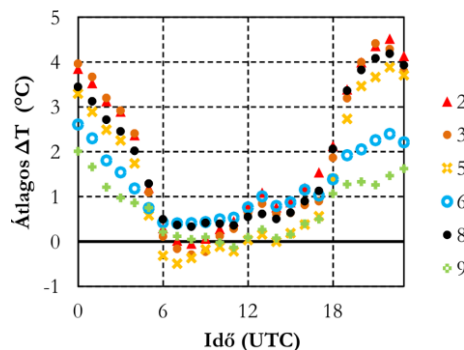
A 5.34. ábra alapján a hőmérsékleti görbék a tavaszi napi hőmérsékleti menet szabályos alakját követik, azaz napközben kora délutánig emelkednek, majd hajnalig csökkennek. A várakozásoknak megfelelően az LCZ 2 terület a legmelegebb, az LCZ 9 és az LCZ D területek pedig a leghűvösebbek, de ez éjszaka érvényesül igazán, mivel nappal a görbék szinte együtt mozognak. A legnagyobb hőmérsékleti különbségek az éjszakai órákban jelentkeznek, így mindkét éjszaka 4.30 UTC-kor a $\Delta T_{LCZ\ 2-D} \sim 5^{\circ}\text{C}$, a $\Delta T_{LCZ\ 5-D} \sim 4,5^{\circ}\text{C}$, a $\Delta T_{LCZ\ 8-D} \sim 2,5^{\circ}\text{C}$ és a $\Delta T_{LCZ\ 9-D} \sim 0^{\circ}\text{C}$. Ennek oka a különböző LCZ osztályok eltérő termikus tulajdonsága, azaz, hogy a jó kisugárzású éjszakákon a sűrűn magasabb épületekkel beépített LCZ osztályok jóval lassabban hűlnek mint a nyitottabbak.

Egy további esettanulmányban (Lelovics et al. 2016) a vizsgált időszakokat az Oke (1998) által bevezetett időjárás faktor (Φ_w) alapján választottuk ki (4.4. fejezet). A kiválasztott időszakok (2014. július 3-5. és 2014. július 19-20.) tehát olyan időjárás helyzettel rendelkeznek, ami kedvez a városi hatások zavartalan érvényesülésének.

A különböző lokális klímazónákhoz tartozó mérőhelyek eltérő napi hőmérsékleti ciklusokkal rendelkeznek (5.35. ábra). Az LCZ-k közötti különbségek Szeged az LCZ 2 és az LCZ 3 esetében a legmarkánsabbak, ahol több mint 5°C -os hőmérsékleti többlet jelentkezik július 4-én 0 és július 20-án 0 UTC-kor (5.35. ábra). Az LCZ 8, 5, 6 és 9 esetében a legnagyobb hőmérsékleti többlet 4°C , $3,5^{\circ}\text{C}$, $2,5^{\circ}\text{C}$ és 1°C .



5.35. ábra A hőmérséklet (a, c) és az LCZ D-hez viszonyított hőmérséklet különbség (b, d) alakulása 2014. július 3-5. (a, b) és július 19-20. (c, d) között Szegeden (Lelovics et al. 2016)

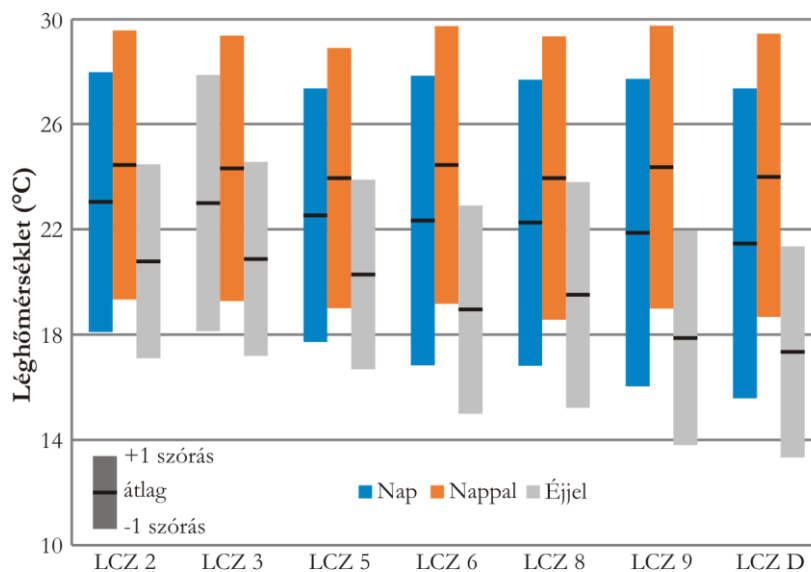


5.36. ábra Az öt kiválasztott napra számított átlagos óránkénti hőmérsékleti különbségek LCZ D átlagához viszonyítva (Lelovics et al. 2016)

Az 5.36. ábra a jellegzetes napi hőmérsékleti ciklusokat mutatja, a kiválasztott ideális napokból számított óránkénti átlagok és a (nem városi) LCZ D különbségeinek segítségével. Napközben, amikor a besugárzás intenzív és konvektív keveredés uralkodik, a

hőmérsékletkülönbségek $\pm 1^\circ\text{C}$ alatt vannak. Éjjel, amikor a kisugárzás miatti lehűlés dominál, a különbségek nagyobbak és többnyire pozitívak. Az LCZ-osztályok közötti különbségek ebben az időszakban a legerősebbek, ami annak köszönhető, hogy ilyenkor tud igazán érvényesülni leginkább a városi beépítés hatása.

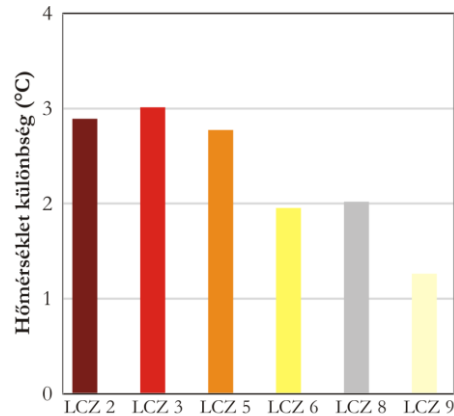
Egy további vizsgálat (Skarbit et al. 2017) keretében elemeztük egy nyári időszak (2014 június-augusztus) ideális napjainak (4.4. fejezet) esetén a napi, nappali és éjjeli átlagos hőmérsékleti értékeket is (5.37. ábra). Ennek az időszaknak az ideális napjain (n=12) a besugárzás intenzív és a energiacsere folyamatok intenzívek voltak valamint ennek köszönhetően az épített és természetes felszínnek termikus reakciói jobban elkülönülnek. A napszakos bontást és a napszakok elkülönített elemzését az indokolja, hogy nyáron a nappali időszakok jelentősen hosszabbak, mint az éjszakaiak (nappali 63%, éjszakai 37%), ezért a nappali órákban mért hőmérsékleti értékek dominálnak a napi átlagok kiszámításánál. A nappali értékek esetén az LCZ kategóriák között elhanyagolható mértékű különbségeket figyelhetünk meg, melynek mértéke ($\pm 0,4^\circ\text{C}$) a műszerek mérési pontosságával megegyező nagyságrendű, annál csak alig valamivel nagyobb. A napi értékek esetében a különbségek kissé nagyobbak, de így sem haladják meg az $1,5^\circ\text{C}$ -ot. Éjjel azonban jelentős eltéréseket találunk, az LCZ kategóriák közötti különbségek egyértelműen látszanak és a maximális eltérés eléri a $3,5^\circ\text{C}$ -ot. A legmagasabb hőmérséklet az LCZ 2, 3, 5 és a legalacsonyabb hőmérséklet az LCZ 9 esetén figyelhető meg, míg az LCZ 6 és 8 köztes helyzetben van a két véglet között. A mérések tehát egyértelműen megmutatják, hogy a városi illetve az eltérő beépítés (LCZ) hatásai éjjel detektálhatók, míg nappal a jelentőségük elenyésző.



5.37. ábra A napi, a nappali és az éjszakai léghőmérsékletek az LCZ osztályokban az ideális napokon (n=12) 2014 nyarán (június-augusztus) (Skarbit et al. 2017)

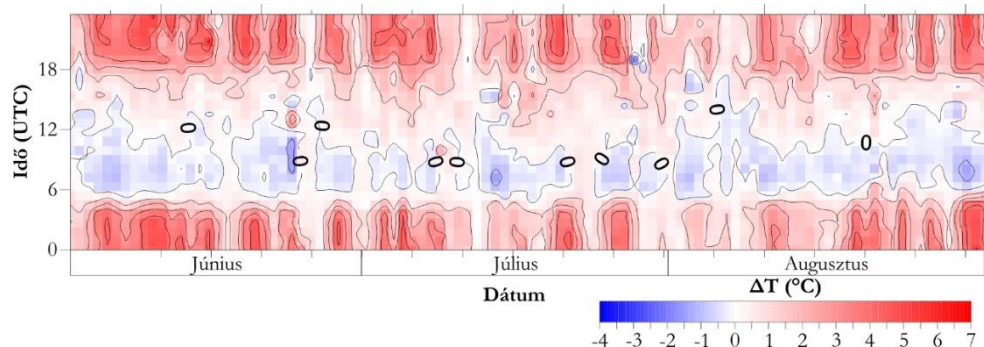
Vizsgálataink kiterjedtek hosszab időszak teljes adatsoraira is, ezáltal elemezve, hogy a városi hatás – amit a fejezet korábbi részén esettanulmányok, illetve ideális napok esetén szemléltettem – hogyan jelentkezik az éves vagy hosszabb időszakok esetén (Unger et al. 2017). Egy ilyen elemzést szemléltet az 5.38. ábra, ami a HMS állomástól számított, maximális hőmérséklet különbségek évi és évszakos átlagát mutatja be az egyes lokális klímazónákra vonatkozóan. A maximális különbség az éjjeli órákban fordul elő, így az ábra alapvetően az éjjeli helyzetről tájékoztat. A zónák közötti eltérések nagysága eltérő, azonban kirajzolódik egy jól elkülöníthető sorrend, az LCZ 2, 3 a legmelegebb, az LCZ 5 valamelyest alacsonyabb hőmérsékletű, amit az LCZ 6 és 8 követ, majd az LCZ 9 következik. Az LCZ 3 rendelkezik

a legmagasabb értékekkel, ahol az átlagos hőmérséklet különbség eléri a 3 °C-ot, míg a legkisebb különbségek az LCZ 9-ben vannak, ahol az átlagérték alig haladja meg az 1 °C-ot.



5.38. ábra A HMS külterületi állomástól számított maximális hőmérséklet különbségek évi átlaga az egyes lokális klímazónákban Szegeden (2014. június – 2015. május) (Unger et al. 2017)

Ha részletesen elemezzük hosszabb időszakok adatait, további összefüggéseket tárhatunk fel. Több vizsgálatban (Lelovics et al. 2016, Skarbit et al. 2017) is alkalmaztunk erre a célra izopléta ábrákat, amelyek alapján a napi és éves menet is elemezhető (5.39. ábra).



5.39. ábra A hőmérséklet különbsége az LCZ 2 és az LCZ D között Szegeden 2014 nyarán (Lelovics et al. 2016)

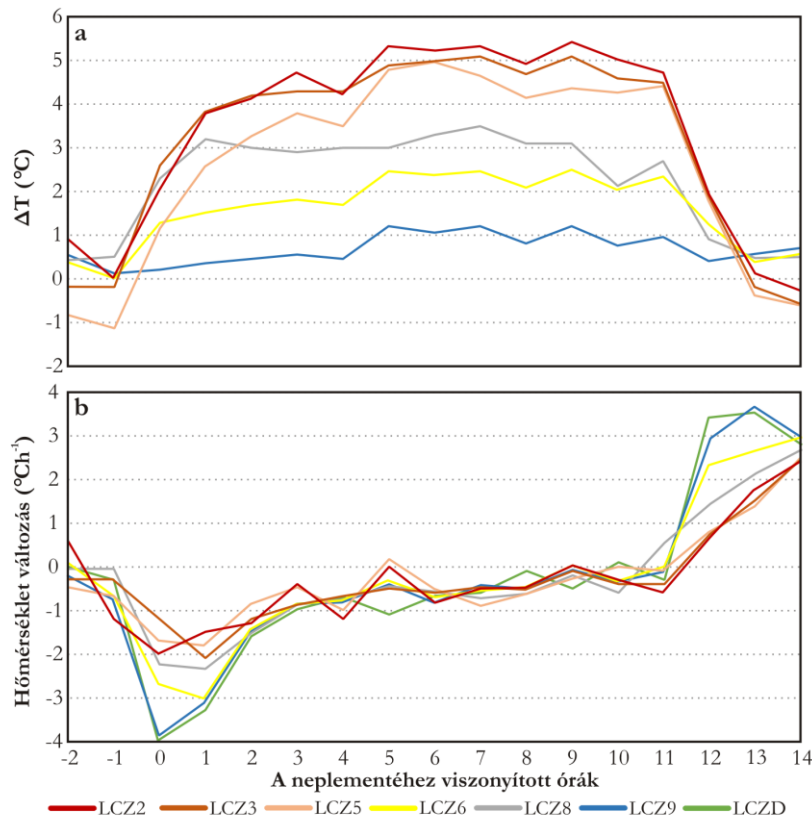
Az UHI intenzitás napszakos alakulását részletesebben elemezve Szegeden pontosabban rávilágíthatunk hogy miben tér el a különböző időszakokban a városi termikus környezet a beépítetlen területektől. Ebben a vizsgálatban az LCZ 2 mérőállomást használtuk a városi viszonyok jellemzésére oly módon, hogy az LCZ D méréseit tekintettük a városi hatástól mentes bázisnak. A két lokális klímazóna között félórás időintervallumokban számítottuk ki a hőmérséklet különbségeket (5.39. ábra).

Az 5.39. ábra látható izopléták alakja összhangban van a városi területek termikus viselkedésének általános jellemzőivel, az UHI intenzitás legtöbbször pozitív, míg a legmagasabb értékek éjjel jelennek meg. A negatív értékek túlnyomórészt nappal fordulnak elő, ami jelzi a városi hűvös sziget (urban cool island, Oke 1997, Yang et al. 2017) megjelenését. A városi hűvös sziget kialakulásának a fő oka, hogy a városi területen az utcaszinten jelentős árnyékolás van, így a városi terület a délelőtti órákban lassabban tud melegedni, mint a külterület. A két időszak közötti választóvonal 6 UTC és 12 UTC körül van. Az UHI intenzitása -1,5 °C és 5,2 °C között változik.

A városi hűvös sziget szinte a teljes időszakban előfordul, jellemzően -1 °C körül alakul (5.39. ábra). Július 27-én 18 UTC körül Szegeden (5.39. ábra) egy kivételt tapasztalhatunk, amelyet egy konvektív csapadék hűsítő hatása okoz. Ekkor a külterületi állomáson (HMS) 36,4 mm, míg a belterületi állomáson (UNI) 83,0 mm csapadék hullott. Ugyanekkor a szél is

igen erős volt (UNI $9,3 \text{ ms}^{-1}$ és HMS $8,3 \text{ ms}^{-1}$). Ez nagy hőmérsékletkülönbségeket eredményezett a város különböző részei között továbbá a lehűlés sokkal gyorsabb volt a városközpontban így tudott ez az anomália kialakulni. Meg kell említeni, hogy (Skarbit et al. 2017) éves adatsorok alapján a városi hűvös sziget leginkább késő tavasszal és kora nyáron jellemző, alacsony napállásnál illetve kedvezőtlen időjárási helyzetek esetén nagyon ritkán fordul elő.

A hőmérséklet napi menetét elemezve az előbb említett városi hűvös sziget, illetve a maga az UHI kialakulásának oka pontosan szemléltethető. A napi meneteket elemző munkánkban (Skarbit et al. 2017) megvizsgáltuk a különböző LCZ területek átlagos UHI intenzitását illetve hőmérséklet változását is órás bontásban. Az elemzésekből kiragadva egy, a városi hatások érvényesülése szempontjából ideális napot (5.40. ábra), jól kimutatható az UHI kialakulása szempontjából kritikus időszak.

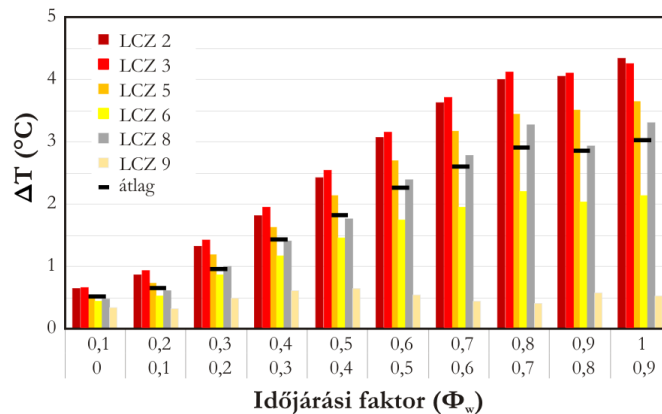


5.40. ábra A (a) városi hősziget intenzitás (ΔT) és a (b) hőmérsékletváltozás időbeli alakulása 2014. 08. 29. éjjelen a napnyugta előtti 2. és a napnyugta utáni 14. óráig tartó időszakban a különböző lokális klímazónákban (LCZ) (Skarbit et al. 2017)

Jól látszik, hogy a naplemente órájában jelenik meg a városi hőmérsékleti többlet (5.40.a ábra), ami az ilyenkor igen jelentős hűlési ütem különbségekből adódik (5.40.b ábra). A naplementét követő egy-két órában a hőmérsékleti többlet fokozódik (5.40.a ábra), azonban az éjjel további részén azt tapasztaljuk, hogy a hőmérsékletváltozás ütemében nincs szisztematikus eltérés a különböző LCZ területek között (5.40.b ábra). Ez felhívja a figyelmet arra, hogy az UHI csökkentést célzó stratégiáknak a fókuszát a naplemente időszakára kell helyezni, hiszen alapvetően ez az időszak felelős a városi hőtöbbletért.

A városi hűvös sziget kapcsán, hasonló módon a hőmérsékletváltozás ütemét érdemes elemezni (5.41.b ábra). A hajnali órákban azt látjuk, hogy az LCZ D terület – köszönhetően az árnyékolás hiányának – ekkor jóval gyorsabban melegszik (5.40.b ábra), így kialakítva kora délelőttre egy $-1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ körüli hőmérsékletkülönbséget (5.40.a ábra).

Egy hosszabb időszak alapján megvizsgáltuk az időjárás faktor (4.4. fejezet) és a átlagos éjjeli UHI nagyságának összefüggését (Skarbit et al. 2018). A vizsgált időszakban minden napra kiszámítottuk az időjárás faktor értékét, majd a napi átlagos UHI intenzitást kiszámítottuk 0,1 időjárás faktor értékenként (5.41. ábra). A Φ_w kategóriák mindegyikében a legnagyobb UHI intenzitások az LCZ 2 és 3-ban jelentkeztek. A legtöbb esetben (kivéve 0,9-1 időjárás faktor kategóriát) a LCZ 3 értéke kissé meghaladja a LCZ 2 értékét. Ennek az eltérésnek a fő oka az, hogy ezekben az övezetekben a lehetséges állomáshelyek korlátozottak voltak, így a közvetlen környezetek nem különböznek jelentősen a két mérőállomás esetén. A kompakt zónák után az LCZ 5 és 8 mutatják a legmagasabb értékeket, amelyeket az LCZ 6 és 9 követnek.



5.41. ábra Átlagos éjjeli UHI 0,1 időjárás faktor kategóriák szerint a különböző LCZ kategóriákban Szegeden (2014 június - 2018 május) (Skarbit et al. 2018)

A lokális klímazónák közötti termikus különbségek a magasabb Φ_w értékek felé haladva nőnek (5.41. ábra). Míg a legalacsonyabb kategóriákban az LCZ 3 és 9 közötti eltérés csak 0,3°C körül van, addig a magasabb osztályokban meghaladja a 3,5°C-ot. A kompakt zónák hőmérséklet-különbsége leginkább az időjárás tényezőtől függ, mivel a legalacsonyabb és a legmagasabb Φ_w kategória közötti leglátványosabb különbség ezekben a zónákban jelentkezik. Ezzel szemben az LCZ 9 értékei csak kismértékben módosulnak, ráadásul a magasabb osztályokban alacsonyabbak, mint a közepes osztályokban. Ezért ez a beépített zóna befolyásolja a legkevésbé a léghőmérsékletet.

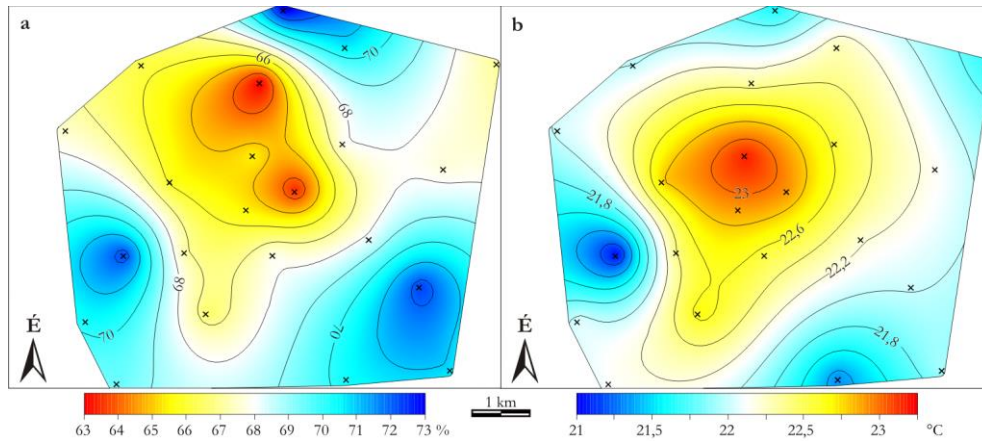
A 5.41. ábra eredményei alapján három Φ_w csoport különíthető el az LCZ-k hőmérséklet-különbség értékeit figyelembe véve. A 0-0,3, 0,3-0,7 és 0,7-1 Φ_w kategóriákban hasonló ΔT értékek jelennek meg. Ezekben a kategóriákban az átlagos $\Delta T=0,7^\circ\text{C}$, $2,0^\circ\text{C}$ és $2,7^\circ\text{C}$. Fontos következtetés az is, hogy az UHI nagysága a kompakt beépítés esetén erősen függ az időjárás helyzettől, addig az LCZ 9 esetén jóval kisebb az időjárás szerepe.

5.4.3. Légnedvesség

A lokális klímazónák rendszere a város éghajlatmódosító hatásának termikus vetületét igyekszik leképezni, felmerül a kérdés azonban, hogy a hőmérséklettel részben összefüggő nedvességi karakterisztikák esetén alkalmazható e a rendszer. A légnedvesség városi jellegzetességeinek irodalmi háttérével részletesen foglalkozott Unger et al. (2018b) cikkünk, míg a szegedi mérőállomás hálózat ilyen irányú eredményeit Unger et al. (2018a) publikációink mutatta be. Ebben a fejezetben a légnedvesség abszolút és relatív állapothatározóival foglalkozó LCZ alapú vizsgálataink fontosabb eredményeit foglalom össze.

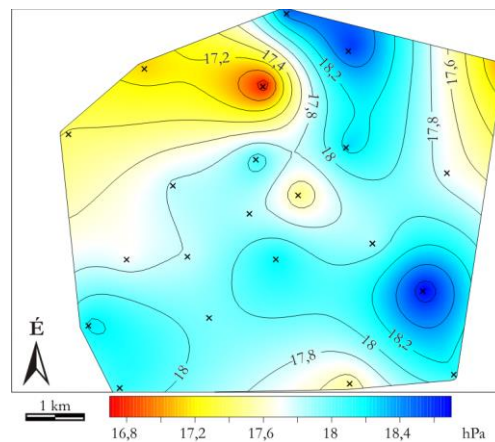
A szakirodalomban számos esetben elemezték a város légnedvesség módosító hatását a relatív nedvesség (RH) alkalmazásával (Unger et al. 2018b) és számos esetben kapcsolatot

találtak az RH mező szerkezete és a városok szerkezete között. Ez némiképpen félrevezető, hiszen az RH a telítettségi gőznyomáson keresztül függ a hőmérséklettől, emiatt főleg az éjjeli időszakokban lényegében az UHI térbeli szerkezete köszön vissza a relatív nedvesség térbeli szerkezetében. Ennek szemléltetésére tekintünk a szegedi UHI monitoring rendszer adataiból interpolált hőmérséklet és relatív nedvesség térképeket (5.42. ábra).



5.42. ábra A (a) relatív nedvesség (%) és (b) hőmérséklet (°C) átlagos nyári mintázata Szeged területén (2014 június és 2017 május közötti időszak adatai alapján) (Unger et al. 2018b)

A két állapothatározó térbeli szerkezetét összevetve (5.42. ábra) jól látszik, hogy bár vannak eltérések azonban a fő szerkezetet mindkét esetben az UHI befolyásolja. Ugyanezen időszakból és forrásból származó gőznyomás adatok (5.43. ábra) azonban rávilágítanak, hogy a valós nedvességviszonyok lényegében egyáltalán nem követik az UHI szerkezetét, azokat leginkább helyi hatások befolyásolják (Unger et al. 2018b).

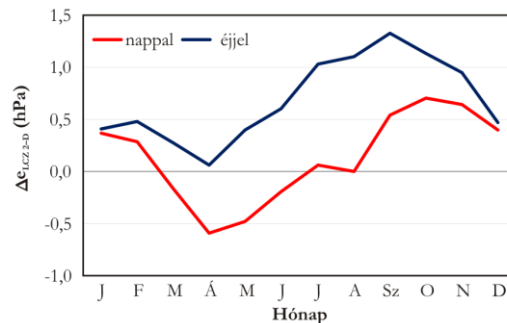


5.43. ábra A gőznyomás átlagos nyári mintázata (hPa) Szeged területén (2014 június és 2017 május közötti időszak adatai alapján) (Unger et al. 2018b)

Fontos következtetés tehát, hogy ugyan vizsgálható a relatív nedvesség városi módosulása, akár lokális klímazónánként is, azonban ez kevésbé célravezető erőfeszítés, hiszen nem kapunk lényegi információt a városi légnedvességi viszonyok alakulásáról. Helyesebb, ha figyelmünket a városi környezetben a levegő nedvességtartalmának abszolút karakterisztikáira (gőznyomás, harmatpont, abszolút nedvesség, stb.) vizsgáló tanulmányokra fordítjuk.

Ennek szellemében, ha megvizsgáljuk a gőznyomás különbségét (Δe) a városközpontot reprezentáló LCZ 2 és a külterületi viszonyokat tükröző LCZ D területek között (5.44. ábra), valósabb képet kaphatunk a légnedvesség alakulásáról (Unger et al. 2018a).

Oke et al. (2017) szerint az éjszakai abszolút nedvesség különbség egész évben pozitív, a legnagyobb augusztusban, a legkisebb pedig télen és tavasszal. A méréseink alapján is hasonló következtetések vonhatók le (5.44. ábra). Az LCZ 2 március és július között szárazabb nappal azonban az is jól látszik, hogy éjjel az egész évben a nagyobb a nedvességtartalma, köszönhetően annak, hogy a hőmérsékleti többlet miatt nagyobb mértékű párolgás lehetséges (Unger et al. 2018a).



5.44. ábra Az átlagos eltérés az LCZ 2 és LCZ D gőznyomás értékei között (2014 június és 2017 május közötti időszak adatai alapján) (Unger et al. 2018a)

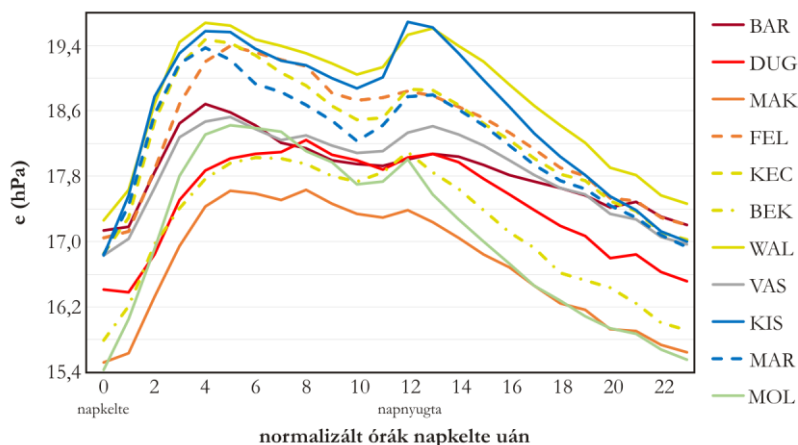
Az átlagos eltérés nyújt ugyan információt, azonban jóval részletesebb képet kaphatunk, ha kiemelünk egy rövidebb időszakot vagy külön elemezzük a különböző LCZ területeken található mérőállomások adatait (Unger et al. 2018a).

Az éves és évszakos átlagokat, a maximális és minimális gőznyomás értékek átlagait, valamint a legnagyobb gőznyomás különbséggel jellemezhető LCZ kategóriákat tekintve (5.3. táblázat) a legnagyobb e átlagok nyáron, míg a legkisebbek télen fordulnak elő. Az átmeneti évszakokban az értékek a kettő között mozognak, ősszel, az év legmelegebb időszakát követően valamivel magasabbak az e átlagok. A legnagyobb átlagos különbség (1,3 hPa) a napi minimális gőznyomásban nyáron a városi (LCZ 3) és a vidéki (LCZ D) területek közötti különbségként jelenik meg, míg a legkisebb (0,3 hPa) télen, szintén az e minimumok között. Sem a évszakos, sem az éves átlagokban nincs egyértelmű sorrend az LCZ-k között, valamint az is megállapítható, hogy az egyes évszakok LCZ sorrendjei is eltérnek (Unger et al. 2018a).

5.3. táblázat Éves és évszakos gőznyomás (e, hPa) átlagok, átlagos minimumok és átlagos maximumok a szegei LCZ-k szerint (2014 június és 2017 május közötti időszak adatai alapján) valamint a legnagyobb e különbség és a legnagyobb e különbség LCZ kategóriái (Unger et al. 2018a)

		LCZ							Δe_{\max}	max Δ LCZ
		2	3	5	6	8	9	D		
Nyár	e_s mean	17,9	17,5	17,8	18,1	17,8	18,1	17,2	0,9	6, 9 - D
	e_s mean max	20,2	19,8	20,1	20,7	20,1	21,0	20,4	1,2	6 - 3
	e_s mean min	15,7	15,2	15,5	15,6	15,5	15,3	14,4	1,3	3 - D
Ősz	e_a mean	12,1	11,3	11,7	11,9	12,2	11,8	11,6	0,9	8 - 3
	e_a mean max	13,9	13,0	13,6	13,9	14,1	13,9	13,8	1,1	8 - 3
	e_a mean min	10,5	9,9	10,1	10,1	10,6	9,8	9,7	0,9	2 - D
Tél	e_w mean	6,4	6,1	6,2	6,2	6,2	6,2	6,5	0,4	D - 3
	e_w mean max	7,3	6,9	7,1	7,2	7,1	7,1	7,5	0,6	D - 3
	e_w mean min	5,5	5,2	5,4	5,3	5,3	5,2	5,5	0,3	2, D - 3,9
Tavaszi	e_{sp} mean	10,3	10,0	10,3	10,4	10,3	10,3	10,2	0,4	6 - 3
	e_{sp} mean max	11,9	11,7	12,0	12,2	12,0	12,2	12,3	0,6	D - 3
	e_{sp} mean min	8,7	8,4	8,7	8,6	8,6	8,4	8,2	0,5	2, 5 - D
Év	e_{an} mean	11,6	11,1	11,5	11,7	11,8	11,6	11,4	0,7	8 - 3

Annak okaira, hogy miért nincs egyértelmű kapcsolat a gőznyomás és az LCZ kapcsolat között érdemes megvizsgálni néhány kiemelt mérőállomás adatát külön is (5.45. ábra). Nyáron a legmagasabb átlagértékek megközelítik a 20 hPa-t, és napközben 15,4-19,7 hPa között mozognak. A legkisebb értékek napkeltekor vannak, de a nap első részében a napfelkelte utáni 4 órában megszakad az emelkedő tendencia, ami szinte minden zónában kora reggeli csúcsot mutat. Ez a csúcs a 9-2 állomás kivételével a napszakos csúcs. Napnyugtáig helyi csökkenés figyelhető meg, majd enyhe növekedés következik be, amely a legtöbb esetben (pl. 5-4, 6-9, 9-4) egy második maximumot képez. A többi állomás esetében a csökkenés napkeltéig folytatódik (pl. 2-1, 3-1, 5-2). A két csúcs megjelenését a városi határréteg (UBL) napi dinamikája okozza. Reggel a napsugárzás gyorsan növeli a párolgást, később a felszínközeli nedvességet konvekció szállítja az UBL magasabb részébe. Napnyugtához közeledve, amikor az UBL a napsugárzás megszűnése miatt összeomlik, ez a nedvesség az UBL magasabb részéből a felszín közelébe süllyed (Unger et al. 2018a).



5.45. ábra A normalizált átlagos óránkénti gőznyomás (e) napi változása nyáron a szegedi lokális klímazónákban elhelyezett mérőállomásokon (2014 június és 2017 május közötti időszak nyári adatai alapján) (Unger et al. 2018a)

A mérőállomások közötti különbségeket áttekintve a külvárosi állomások (KIS, WAL) rendelkeznek a legnagyobb értékekkel egész nap, míg a legkisebb értékek részben a vidéki területen (MOL), részben pedig – meglepetésként – a lakótelepen (MAK) található. Klímazónánként áttekintve azt látjuk, hogy jelentős intrazonális különbségek figyelhetők meg. Mindez rámutat arra, hogy a zónán belüli különbségek nagyobbak lehetnek, mint a zónák közötti különbségek. Következésképpen a mérési helyszínek mikroszkálájú környezetének hatásai döntő fontosságúak. A közvetlen környezet vízellátottsága és evapotranspirációjának mértéke okozhatja az állomások eltérő értékeit ugyanazon zónákon belül. A nagyobb vízáteresztő felület alacsonyabb, míg a természetes felületek, főként a fák közelsége magasabb értékeket jelez (Unger et al. 2018a).

Ezek alapján az a felvetés, hogy a lokális klímazónák rendszere alkalmas lehet arra, hogy a város nedvességviszonyairól tájékoztasson, lényegében elvethető. Fontos tanulság, hogy főleg a városi klíma és időjárás modellezési munkák esetén az LCZ rendszer a termikus tulajdonságok leírására alkalmas ugyan, azonban a nedvességviszonyok realiztikus jellemzéséhez további információforrásokra van szükség.

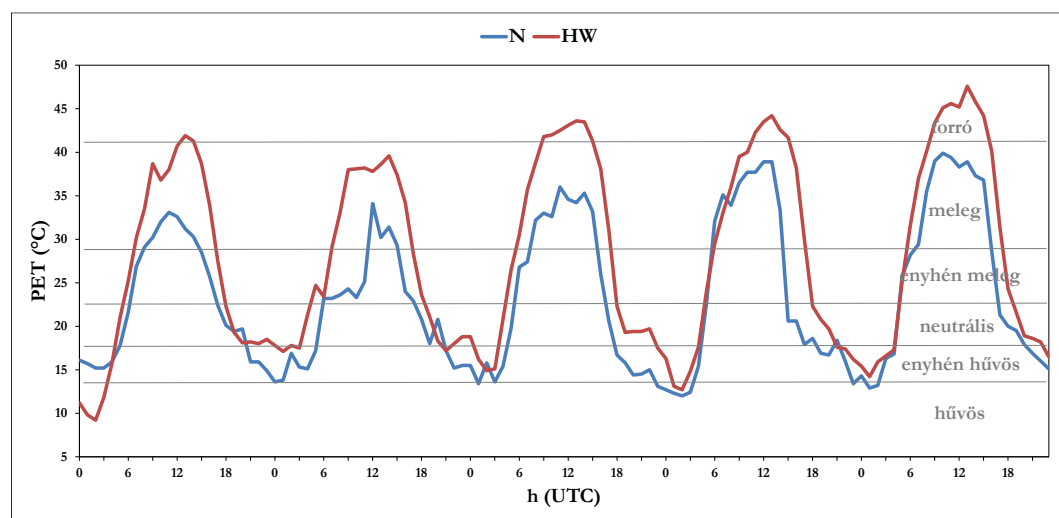
5.4.4. Humánkomfort

A 3.5. fejezetben részletesen bemutattam, hogy a lokális klímazónák rendszerét alkalmazzák városi humánkomfort vizsgálatok során is. A humánkomfort paraméterek jelentős mértékben függenek a léghőmérséklettől, így ha más állapotváltozóknak nincs különbség a léghőmérséklet vállhat jellemző befolyásoló tényezővé. Ezen gondolatmenet

mentén a lokális klímazónák – bizonyos körülmények között – a termikus viszonyok jellemzésén túl a humánkomfortok jellemzésére is alkalmasak.

Unger et al. (2020) munkánkban a hőhullám humánkomfortra gyakorolt hatását elemeztük, továbbá azt, hogy a város megváltozott hőmérsékleti viszonyai hogyan fokozzák az egyes hőhullámok kedvezőtlen hatásait. A vizsgálat során azzal a következtetéssel élünk, hogy olyan PET értéket számítunk ki, ami a városi területen mindenütt megegyező (zavartalan besugárzású, megegyező szélviszonyokkal rendelkező) mikrokörnyezetet jellemzik. Ezzel a megköttéssel lehetségessé vált a különböző LCZ-k területére eső mérőállomásainkra a PET kiszámítása az 5.3.1. fejezetben részletezett részben becsült állapothatározók segítségével a Unger et al. (2020) munkánkban részletezett módon.

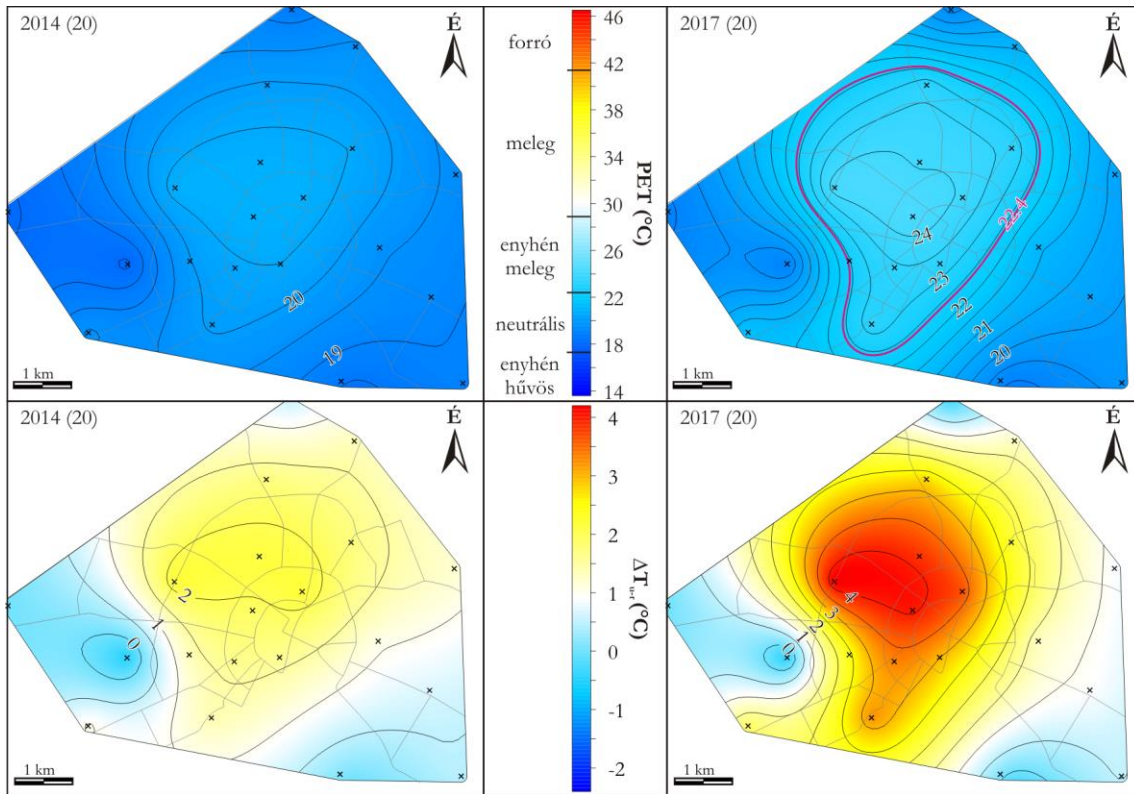
Az esettanulmány egy hőhullámos (2017. 07. 30. - 08. 03.) és egy az év ugyanazon időszakába tartozó nem hőhullámos (2014. 07. 30. - 08. 03.) időszakra koncentrált. A két időszak humánkomfort viszonyait összevetve megállapítható, hogy a PET a hőhullámos időszak szinte egészén magasabb, a nagyobb különbségek nappal fordulnak elő (5.46. ábra).



5.46. ábra A PET alakulása a hőhullámos (HW) és nem hőhullámos (N) időszakokban (a HMS állomás adatai, 2014 és 2017, 07.30 – 08. 03.) (az ábrán a magyar lakosságra vonatkozó nyári PET hőérzet kategóriák (Kovács et al. 2016) is ábrázolva vannak), (Unger et al. 2020a)

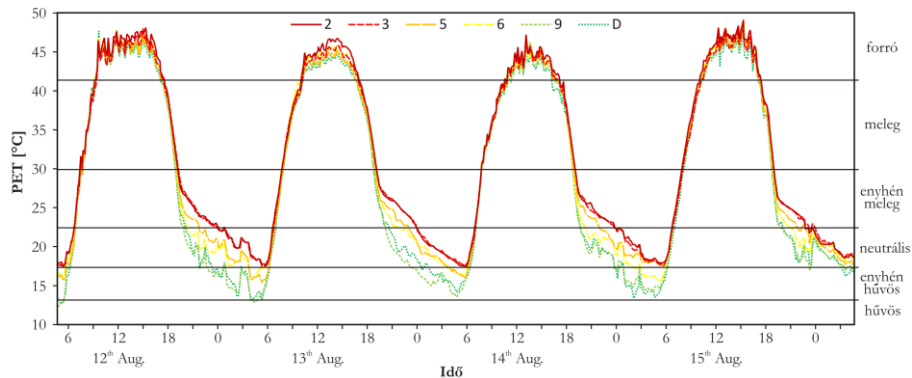
A 5.46. ábra jól szemlélteti, hogy a nappali órákban mért értékek is melegedő tendenciát jeleznek az időszakok során, kivéve a hőhullám 2. napját, ami feltehetően az aznap délutáni felhőzetnek köszönhető (Unger et al. 2020a). A nappali hőstressz az utolsó napon kora délután tetőzik (47,6 és 38,9 °C-os PET-értékekkel a hőhullámos és a normál időszakban). Általánosságban elmondható, hogy a hőhullám időszakban a legmagasabb értékek a forró kategóriába, míg az normál időszakban a PET-értékek a meleg kategóriába tartoznak. Az éjjeli órák a normál időszakban túlnyomórészt a kissé hűvös, míg a hőhullám esetén a semleges kategóriába tartoznak.

Ebben az időjárási és humánkomfort helyzetben, ha figyelembe vesszük a városi hatást is a mérőállomás hálózat segítségével, további összefüggéseket tárhatunk fel (Unger et al. 2020a). Kiragadva a 20 UTC időpontjára vonatkozó helyzetet (5.47. ábra), mint esti állapotot a következő következtetésekre juthatunk. Míg a normál időszakban az egész területen a neutrális értékek jelennek meg, addig a hőhullámos időszakban megjelenik a kissé meleg kategória. Összevetve az LCZ területek térbeli helyzetével (5.19. ábra), jól látszik, hogy a terhelő humánkomforttal jellemezhető terület egybeesik az LCZ 2, 3, 5 területével és a városközpontot övező LCZ 6 területével (5.47. ábra). A hőhullám során ez a PET többlet nagyságrendileg 5°C, ami jelentős és érezhető többletterhelést jelez.



5.47. ábra 5 napos átlagos PET- (fent) és ΔT -mintázatok (lent) 20 UTC-kor az normál (balra) és a hóhullámos (jobbra) időszakban Szegeden (a kereszttek az LCZ-re reprezentatív mérőállomások helyei) (Unger et al. 2020a)

A hőterhelés térbeli szerkezete jól jelzi, hogy a hóhullám során a kedvezőtlen magas hőterhelésű helyzet a külterületen a kora esti órákban megszűnik ugyan, azonban a városi hatás miatt számos LCZ kategóriában jelentős területet érint. Fontos ezért megvizsgálni, hogy a PET értékek napszakos változása hogyan alakul LCZ-k szerinti bontásban. Ennek megválaszolására egy 2015. augusztus 12-15 közötti hóhullámot elemeztünk az előbbiekkal megegyező módszertannal (Unger et al. 2018c).



5.48. ábra A PET időbeli változása a kiválasztott reprezentatív állomásokon kalibrált nyári PET-kategóriákkal egy hóhullámos időszak alatt (2015.08.12-16.) (Unger et al. 2018c)

A vizsgálat alapján a PET napi változása hasonló volt a vizsgált négy napon (5.48. ábra). A napközbeni órákban az értékek a forró kategóriába tartoznak, és az LCZ kategóriák között csak minimális különbségek vannak, azaz a városban jelentős hőterhelés van, de ez vélhetően nem a városi hatásoknak köszönhető. A napnyugta környékén a PET értékek visszaesnek kissé meleg kategóriába és egyúttal megjelenik az LCZ-k közötti érdemi különbség. Az éjjel az LCZ 2, 3, 5 csak a neutrális szintig csökken le, ami, figyelembe véve a nappali nagy hőterhelést, nem olyan kedvező fejlemény. Az időszak utolsó estéjén a megélnékülő szél

hatását figyelhetjük meg, ahogyan a lokálisan kialakuló eltérő hőmérsékleti viszonyok miatt különböző PET értékek hirtelen a keveredés hatására hasonló értékeket vesznek fel (5.48. ábra).

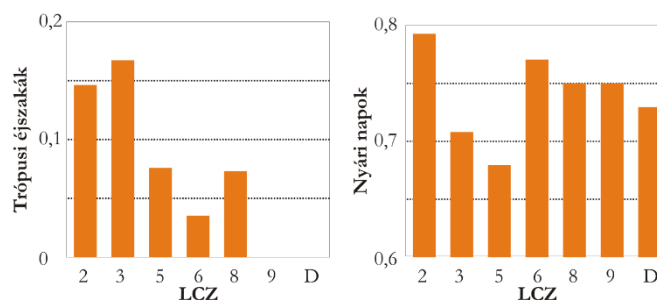
Az 5.48. ábra alapján jól látszik, hogy azonos mikro léptékű környezetek esetén nappal lényegében nincs városi hatás a hőérzetre, minden LCZ hasonlóan reagál, éjjel azonban a hőérzet lényegében követi különböző LCZ-k termikus tulajdonságait. Tehát, ha a nappali humánkomfort viszonyok javítása a cél, akkor a mikrokörnyezetre kell koncentrálnunk, míg az éjjeli helyzet során a városklimatikus hatások figyelembe vétele a fontos.

5.4.5. Klímaindexek

A humánkomfort viszonyok kapcsán (5.4.4. fejezet) már rámutattam arra, hogy a lokális klímazónákra vonatkozó eltérő termikus viszonyok eltérő hatásokkal járnak a lakosság szempontjából. Az ilyen hatások szerzteágazó elemzését segítik a klímaindexek vizsgálata, ezért több munkánkban is foglalkoztunk a városklíma ezirányú vetületeivel (Lelovics et al. 2016, Unger et al. 2017).

Lelovics et al. (2016) munkánkban a napi minimum és maximum hőmérsékleti értékek felhasználásával határoztuk meg a nyári nap illetve a trópusi éjszaka klímaindexét. Előbbi esetén a napi maximumhőmérséklet 25 °C feletti, míg utóbbinál a napi minimum haladja meg a 20 °C -ot (Karl et al. 1999). Ezek az indexek a hőstressz jellemzésre széles körben elfogadottak (pl. Gabriel, Endlicher 2007, Petralli et al. 2011). Mivel a vizsgálatban nem egy teljes évet (48 nap) elemeztünk, ezért az abszolút értékek helyett csak relatív gyakoriságokat vizsgáltunk (Lelovics et al. 2016).

A trópusi éjszakák esetében (5.49. ábra) az LCZ osztályok közötti különbségek viszonylag nagyok, számuk 0 (LCZ D és LCZ 9) és 8 nap (LCZ 3) között változik. Fontos megjegyezni, hogy a trópusi éjszakák legnagyobb gyakorisága a legsűrűbben beépített LCZ területeken (2, 3 és 5) fordul elő. A trópusi éjszakákkal ellentétben a nyári napok eloszlása viszonylag egyenletes a különböző LCZ-k között (5.49. ábra). Az árnyékolás hűtő hatása lehet az oka a Szegeden a LCZ 3 és 5-ben mért alacsonyabb értékeknek. Az árnyékolás mellett a nagyobb mennyiségű növényzetből származó transpiráció is hozzájárul a hűtő hatáshoz.

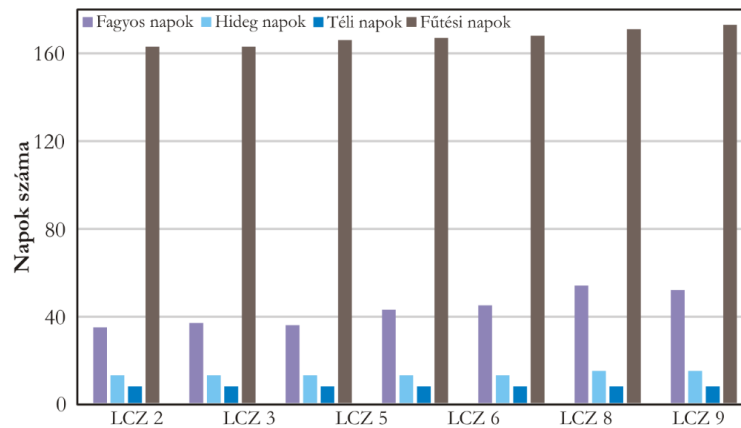


5.49. ábra A trópusi éjszakák és a nyári napok relatív gyakorisága LCZ-osztályok szerint Szegeden (Lelovics et al. 2016)

Ki lehet emelni a két indexel kapcsolatos elemzés (5.49. ábra) kapcsán, hogy már ezen a rövid időszak alapján is egyértelműen látszik, hogy az LCZ rendszerrel leírható városi hatás éjjel fejt ki érdemi hatást, míg nappal inkább a mikro környezet hatási dominálhatnak.

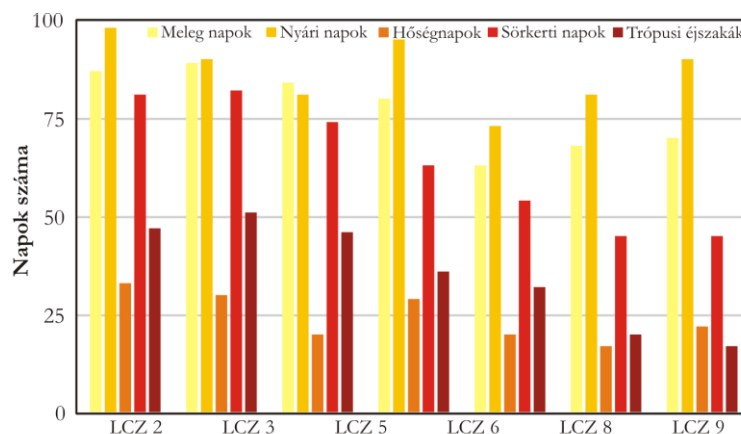
Egy további elemzésünkben egy hosszabb, egy éves adatsor alapján elemeztünk számos klímaindexet (Unger et al. 2017). Ezúttal négy hideg és öt meleg indexet alkalmaztunk. A hideg indexek alatt a téli időszak, míg meleg indexek alatt a nyári időszakot jellemző klímaindexeket értem.

A hideg klímaindexek esetében (5.50. ábra) a tendencia egyértelmű. A beépített klímazónáktól a természetes felszín felé haladva a napok száma nő. Az LCZ 9 és D esetében több napot találunk, mint LCZ 2 vagy 3-ban. A legnagyobb különbség a fagyos napok esetében van, ahol 17 nap az eltérés LCZ 2 és LCZ D között. A hideg napokat nézve már nem találunk ekkora különbséget, míg a téli napok esetében nincs különbség. A fűtési napok különbsége ismét jelentősebb (13 nap).



5.50. ábra A hideg hőmérsékleti indexek átlagos száma az egyes lokális klímazónákban Szegeden (2014. június - 2015. május) (Unger et al. 2017)

Ha a meleg klímaindexek esetén (5.51. ábra), a legnagyobb eltérés a sörkertek napok és a trópusi éjszakáknál figyelhető meg. Ezúttal a tendencia a hideg indexek esetében látottal ellentétes, azaz a napok száma a kompaktabb zónákban több, a legnagyobb értéket LCZ 3-ban találhatjuk. A meleg napok száma szintén itt a legtöbb, majd csökken a kevésbé beépített kategóriák felé haladva, ugyanakkor a tendencia nem teljesen egyértelmű. Ez elmondható a nyári és hőségnapokról is, ahol LCZ 6 és D esetében is kiugrás figyelhető meg.



5.51. ábra A meleg hőmérsékleti indexek átlagos száma az egyes lokális klímazónákban Szegeden (2014. június - 2015. május) (Unger et al. 2017)

A klímaindexek kapcsán tehát egyértelmű különbség mutatkozik a lokális klímazónák között amennyiben a napi minimum vagy az éjjeli hőmérsékleti értékek alapján definiáljuk annak értékét. A nappali viszonyokat tükröző indexek esetén nem figyelhetünk meg ilyen jellegű egyértelmű eltéréseket.

5.5. A lokális klímazónák alkalmazása klíma és időjárás modellekben

A lokális klímazónák népszerűsége a városklimatológiai közösségen belül nem kis részben annak köszönhető, hogy a termikus szempontú osztályozáson alapuló felszínborítási

kategóriák kiváló alapot teremthetnek arra, hogy azt a városi léptékű klíma és időjárás modellekben felhasználják. Ezt jól példázza az is, hogy az első LCZ alapú klíma és időjárás modellkísérletek a rendszer véglegesítését (Stewart, Oke 2012) követő években megjelentek (3.4. fejezet). Az első alkalmazások a WRF (Giannaros et al. 2013, Brousse et al. 2016, Molnár et al. 2018), a MUKLIMO_3 (Skarbit, Gál 2016, Žuvela-Aloise 2017, Bokwa et al. 2018), más klíma és időjárás modellek (Sharma et al. 2016, Varentsov et al. 2018, Ibitolu 2020), az ENVI-met (Müller et al. 2014, Perera, Liyanapathirana 2014, Emmanuel, Loconsole 2015) és további modellek esetén (Feddemu et al. 2015, Alexander et al. 2015) 6-8 éven belül megjelentek.

A témával kapcsolatban a koncepcióm az volt, hogy mivel a LCZ rendszer termikus szempontból pontosan képezi le a városi felszínt, ezért a különböző modellekben történő alkalmazása jelentősen javítja az UHI becslés pontosságát. Ennek a koncepciónak köszönhetően a témában az elmúlt években jelentős eredmények születtek több modell kapcsán is a szegedi Városklíma Kutatócsoportban, amit cikkek (WRF: Molnár et al. 2017, 2018, 2019a, 2019b, MUKLIMO_3: Skarbit, Gál 2016, Bokwa et al. 2018, 2019, Gál et al. 2021a, 2021b, modellek összehasonlítása: Gál et al. 2018) és doktori fokozatok (Skarbit Nóra, Molnár Gergely) is jeleznek. Ebben a fejezetben a koncepció jelentőségét egy modelleket összehasonlító vizsgálat (Gál et al. 2018) alapján mutatom be, mivel az jól összegzi az elmúlt években irányításommal vagy jelentős közreműködésemmel végzett ilyen irányú munkáinkat.

5.4. táblázat A városi geometriával kapcsolatos paraméterek értékei a szimulációkban alkalmazott LCZ-osztályok esetén (Gál et al. 2018)

Paraméter	Dimenzió	LCZ 2	LCZ 3	LCZ 5	LCZ 6	LCZ 8	LCZ 9
városi felszín aránya		0,90	0,82	0,58	0,66	0,75	0,25
növényzet aránya		0,10	0,18	0,42	0,34	0,25	0,75
épület magasság	m	13,6	7,9	15,4	5,4	6,6	5,0
út és tető szélesség	m	5,1	4,3	5,3	3,2	5,5	2,9
albedó		0,15	0,14	0,12	0,16	0,16	0,17
út hővezetése	$Jm^{-1}s^{-1}K^{-1}$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
tető hővezetése	$Jm^{-1}s^{-1}K^{-1}$	1,04	1,01	1,2	1,01	1,24	1,01
fal hővezetés	$Jm^{-1}s^{-1}K^{-1}$	1,02	1,01	1,1	1,02	1,2	1,01
út hőkapacitása	$Jm^{-3}K^{-1}$	$1,95 \cdot 10^6$	$1,98 \cdot 10^6$	$1,95 \cdot 10^6$	$1,98 \cdot 10^6$	$1,94 \cdot 10^6$	$1,98 \cdot 10^6$
tető hőkapacitása	$Jm^{-3}K^{-1}$	$1,97 \cdot 10^6$	$1,97 \cdot 10^6$	$1,97 \cdot 10^6$	$1,97 \cdot 10^6$	$1,97 \cdot 10^6$	$1,97 \cdot 10^6$
fal hőkapacitása	$Jm^{-3}K^{-1}$	$1,63 \cdot 10^6$	$1,62 \cdot 10^6$	$1,72 \cdot 10^6$	$1,62 \cdot 10^6$	$1,86 \cdot 10^6$	$1,61 \cdot 10^6$
út emisszivitás		0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
tető emisszivitás		0,91	0,92	0,87	0,92	0,86	0,92
fal emisszivitása		0,92	0,93	0,9	0,93	0,87	0,93

5.5. táblázat A MUKLIMO_3 modell felszínparamétereinek értékei (Gál et al. 2018)

Paraméter	LCZ 2	LCZ 3	LCZ 5	LCZ 6	LCZ 8	LCZ 9	LCZ D
beépített felszín aránya	0,45	0,45	0,3	0,3	0,4	0,15	0
átlagos épületmagasság	16,5	9,2	18,6	6,5	6,8	8,5	0
fal felület index	3,42	2,4	4,4	2,1	2	2,1	0
burkolt felület aránya	0,7	0,4	0,45	0,4	0,8	0,45	0
fákkal borított terület aránya	0	0	0	0	0	0	0
alacsony növényzettel borított terület aránya	0,9	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8	1
fa magasság	0	0	0	0	0	0	0,2
alacsony növényzet magassága	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5

Az összehasonlító vizsgálat keretében a Weather Research and Forecasting (WRF) (Skamarock et al. 2008) és a MUKLIMO_3 (Sievers et al. 2012) modell lokális klímazónákon alapuló alkalmazásának a főbb kérdéseit és lehetőségeit elemeztük (Gál et al. 2018). A lokális klímazónák térbeli szerkezetét a WRF modellben a GIS módszerrel (5.1.2.

fejezet, Lelovics et al. 2014), míg a MUKLIMO_3 esetén a WUDAPT módszerével (4.2. fejezet, Bechtel et al. 2015) határoztuk meg. Az LCZ térbeli szerkezete mellett a fő kérdés az egyes területhasználati kategóriák paraméterezése, amelyre a két modellben eltérő lehetőségek vannak.

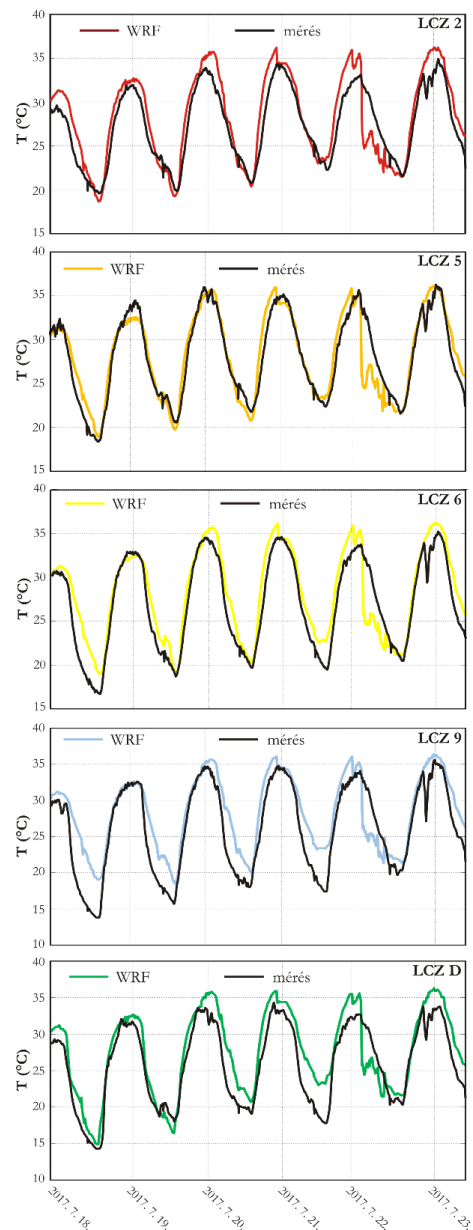
A WRF esetén a szegedi mintaterületen elérhető épületadatbázis és további GIS és távérzékelte adatforrások felhasználásával meghatároztuk (Molnár et al. 2017, 2018, 2019a, 2019b) az egyes LCZ területekre jellemző olyan paraméterek értékeit, amit a modell alkalmaz (5.4. táblázat). A termodinamikával kapcsolatos városi paramétereket (5.4. táblázat) egy terepi felmérésen alapuló módszerrel becsültük (Molnár et al. 2018). Ennek keretében kis területeket (200 m karakterisztikus méret) jelöltünk ki minden LCZ területen, majd megmértük a különböző felszínborítások és építőanyagok jellemző arányait, végül pedig referenciatáblázatok segítségével becsültük meg a jellemző termodinamikai mennyiségeket (Wang 2001).

A felszínparaméterek megfelelő meghatározása szintén kulcsfontosságú a MUKLIMO_3 modellben. A szimulációkhoz a modell paramétereket (5.5. táblázat) a szegedi mintaterületen végzett GIS számításokkal határoztuk meg (Bokwa et al. 2018).

A WRF modellel egy hat napos időszakot szimuláltunk, ami 2017. július 17-én kezdődött (inicializálás 12:00 UTC (14:00 LT)) és 2017. július 24-én 00:00 UTC (02:00 LT) időpontig tartott (Molnár et al. 2018). A szimuláció első napját az elemzéseknél nem vettük figyelembe, az csak a modell inicializálását szolgálta. A szimulációk kezdeti és peremfeltételeit 3 órás NCEP GFS produktum biztosította 0,25°-os horizontális felbontással (Molnár et al. 2018).

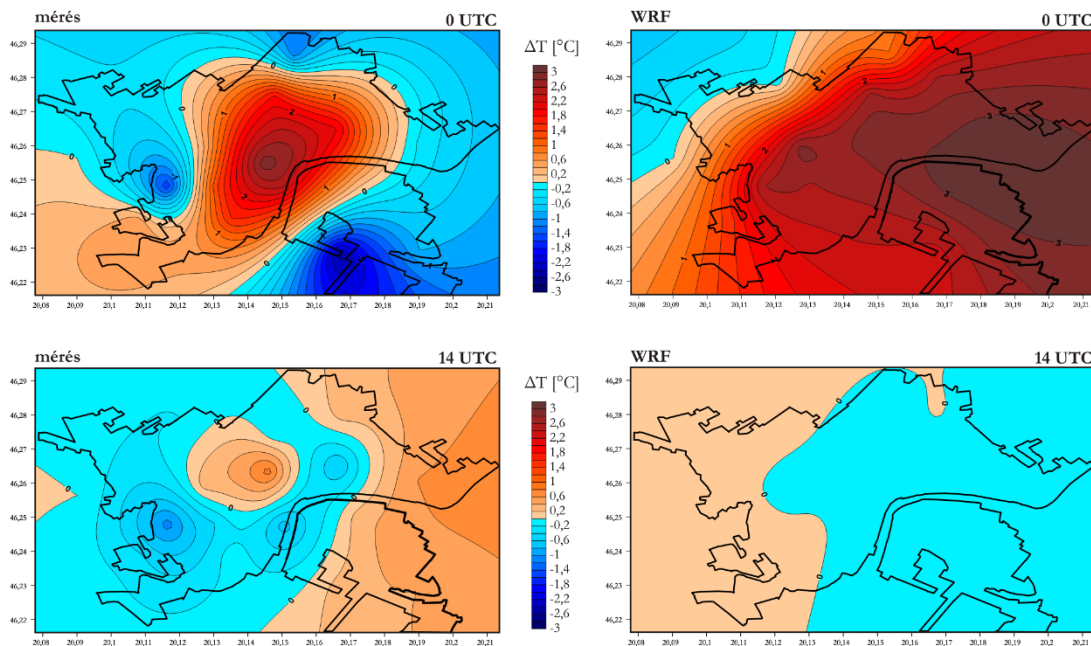
A megfigyelt és szimulált hőmérsékletek idősorait LCZ osztályok szerint megvizsgálva (5.52. ábra) elemezhetjük a WRF modell teljesítményét. A hőmérséklet napi ciklusa meglehetősen pontosan megjelenik. Nappal a szimulált értékek kissé magasabbak. Éjjel a WRF-kimenetek és a megfigyelések közötti különbség minimális a LCZ 2, 5, 6 esetében, míg a LCZ 9, D esetében jelentős túlbecslések tapasztalhatók. Ezen eredmények alapján a kritikus jelenség a korai éjszakai lehülési folyamat, mint ahogy arra a 5.40. ábra kapcsán is rámutattam az 5.4.2 fejezetben, amit a vidéki területeken a modell nem tudja követni teljes mértékben. Ez a városi hősziget jelentős alábecslését eredményezi.

Annak érdekében, hogy értékelni tudjuk a modell teljesítményét az UHI térbeli szerkezete kapcsán is, a városi hősziget intenzitását (ΔT) két különböző időpontban (00:00 és 14:00 UTC) vizsgáltuk (5.53. ábra). A ΔT számítása során a HMS mérőállomáshoz



5.52. ábra A megfigyelések és a WRF előrejelzés összehasonlítása a levegő hőmérsékletére vonatkozóan egy hőhullámos időszakban (2017. július 18-23.) a különböző LCZ osztályokban (Gál et al. 2018)

legközelebbi rácspontot tekintettük vidéki háttér értéknek, az összes többi rácspontban az érték az adott hely hőmérsékletének és a vidéki rácspont hőmérsékletének különbsége az 5 szimulált nap átlagában.



5.53. ábra A megfigyelt és a modellezett UHI átlagos intenzitása 2017. július 18-23. között 0 UTC és 14 UTC időpontban (Gál et al. 2018)

Éjjel a városi hősziget mintázata jól látható a szimulációs eredményekben, azonban az UHI központja keletre tolódott (5.53. ábra). A maximális hőmérsékletkülönbség közel van a megfigyelésekhez és körülbelül 3 °C. Nappal nincs jelentős hőmérsékletkülönbség, ami jelzi, hogy a modell megfelelően tudta szimulálni a nappali folyamatokat.

A MUKLIMO_3 szimulációkat 100 m-es vízszintes felbontással és 10 és 50 m között változó függőleges felbontással végeztük, körülbelül 1000 m függőleges magasságig (Gál et al. 2018, Bokwa et al. 2018). A peremfeltételeket a MUKLIMO_3 egy 1D modell segítségével határozza meg, amely a városon kívüli légköri viszonyokat reprezentáló referenciaállomáson szimulálja a fő időjárási tulajdonságokat. A kezdeti meteorológiai adatokat az ALARO modelltől és a referenciaállomások méréseiből származnak (Bokwa et al. 2018).

A MUKLIMO_3 is jól közelíti a szimulált hőmérsékleti menet a (5.54. ábra). A hőmérséklet éjszakai túlbecslése nem olyan nyilvánvaló, mint a WRF esetében és az időszak egy részében az eredmények jelentősen jobbak. A modell viszont túlbecsüli a hőmérsékletet a délelőtti időszakban, amikor általában a városi hűvös sziget megjelenik, amit az 5.40. ábra kapcsán részletesen elemeztem is az 5.4.2. fejezetben.

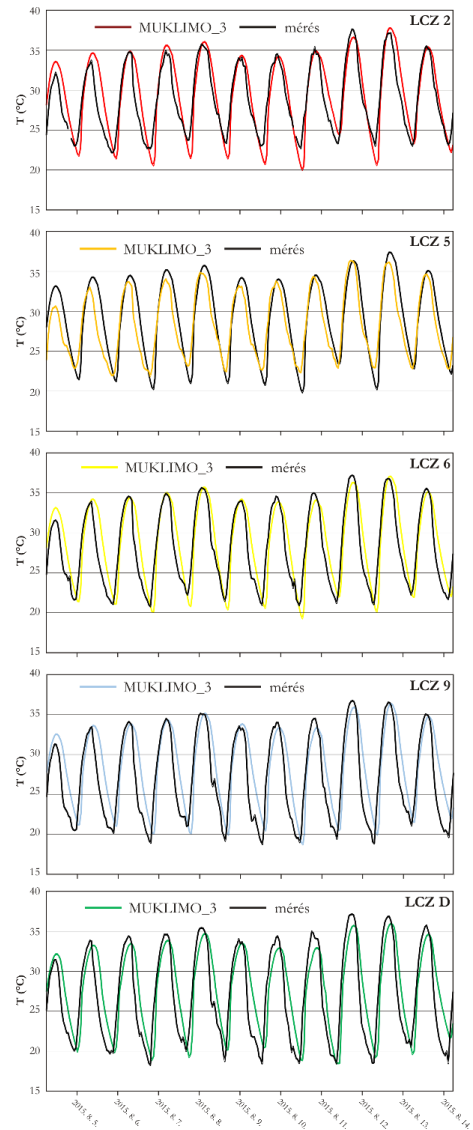
Az UHI térbeli szerkezetének vizsgálata érdeklében hasonlóan ahhoz a megközelítéshez, mint a WRF esetén alkalmaztunk, meghatároztuk két időpont átlagos UHI intenzitását (5.55. ábra). Ezek alapján az éjszakai UHI térbeli eloszlásának becslése jóval

részletesebb és rendkívül pontos (5.55. ábra). A ΔT maximális értékét megfelelően becsülte meg (körülbelül 4 °C). Nappal a modell magas hőmérsékletet szimulál a városközpontra, gyenge UHI figyelhető meg, ami egy jellegzetes problémája a módszernek.

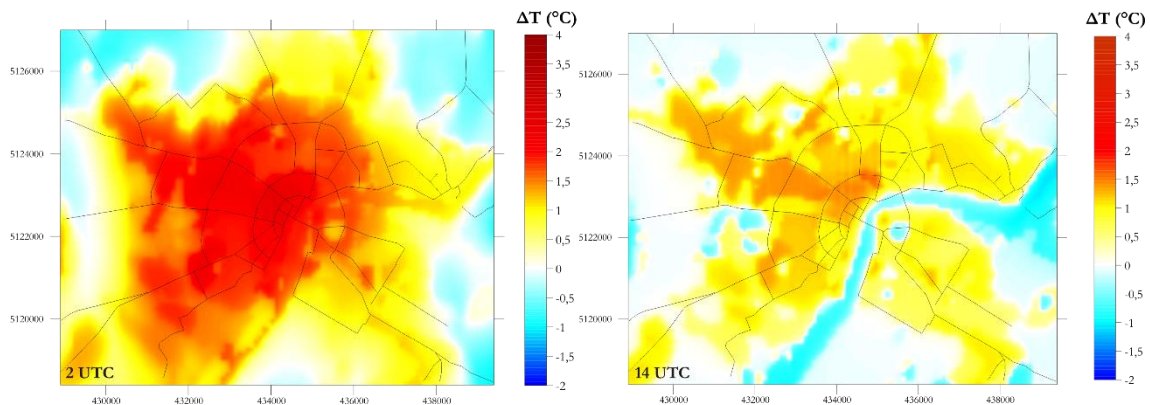
A bemutatott eredmények alapján kijelenthető, hogy az LCZ alkalmazása, mint felszínsztályozás mindkét modell esetén sikeresnek tekinthető, főleg az éjszakai időszakban jól követik a modellek a hőmérséklet időbeli menetét és térbeli szerkezetét.

A modelleknek azonban vannak eltéréseik, illetve olyan szegmensük, amely esetében még fejlesztésre szorulnak. Ez utóbbi kapcsán azért ki kell emelni, hogy az ilyen irányú vizsgálatainknak az itt bemutatott eredmények csak egy pillanatnyi állását mutatják, a munka még nem ért véget. A modellek összehasonlítása rámutat az eltérő koncepcióikra. A WRF, mint a legtöbb városi szimulációnál használt modell, a végtelen városi kanyon megközelítését alkalmazza, ami, mint ahogy a 2.4. fejezetben rámutattam, kérdéseket vet fel bizonyos beépítési típusok esetén. Ez lehet az oka annak, hogy a jóval egyszerűbb fizikájú MUKLIMO_3 modell bizonyos szempontok szerint jobb eredményt produkál, hiszen az a várost egy porózus közegként veszi figyelembe a kanyon helyett.

A két módszer alkalmazásában is vannak eltérések. A WRF nagy előnye, hogy akár operatív előrejelzés keretében is alkalmazható, ily módon a városi fókuszú elemzéseink akár még hasznosulhatnának is a mindennapok során, ha adott esetben az Országos Meteorológiai Szolgálat implementálná eredményeinket az operatív gyakorlatban. A MUKLIMO_3 ezzel szemben a klíma projekcióknak egy rendkívül számítási igény takarékos megoldása, tekintve hogy rövid numerikus szimulációk és statisztikai leskalázás kombinációjával képes klímaindexek 30 éves átlagait előállítani. További előnye, hogy könnyű módosítani a modell statikus felszín adatait, így klíma adaptációs vagy várostervezési fókuszú elemzéseket is lehet vele viszonylag könnyen végrehajtani.



5.54. ábra A léghőmérséklet megfigyelések és a MUKLIMO_3 szimuláció eredményeinek összehasonlítása egy hóhullámos időszakban (2015. augusztus 5-14.) a különböző LCZ osztályokban (Gál et al. 2018)



5.55. ábra Az UHI átlagos intenzitása a modellezett időszakban (2015. augusztus 5-14.) 2 UTC és 14 UTC időpontban (Gál et al. 2018)

5.6. A lokális klímazónák alkalmazása a klímaváltozás várható hatásainak felmérésében

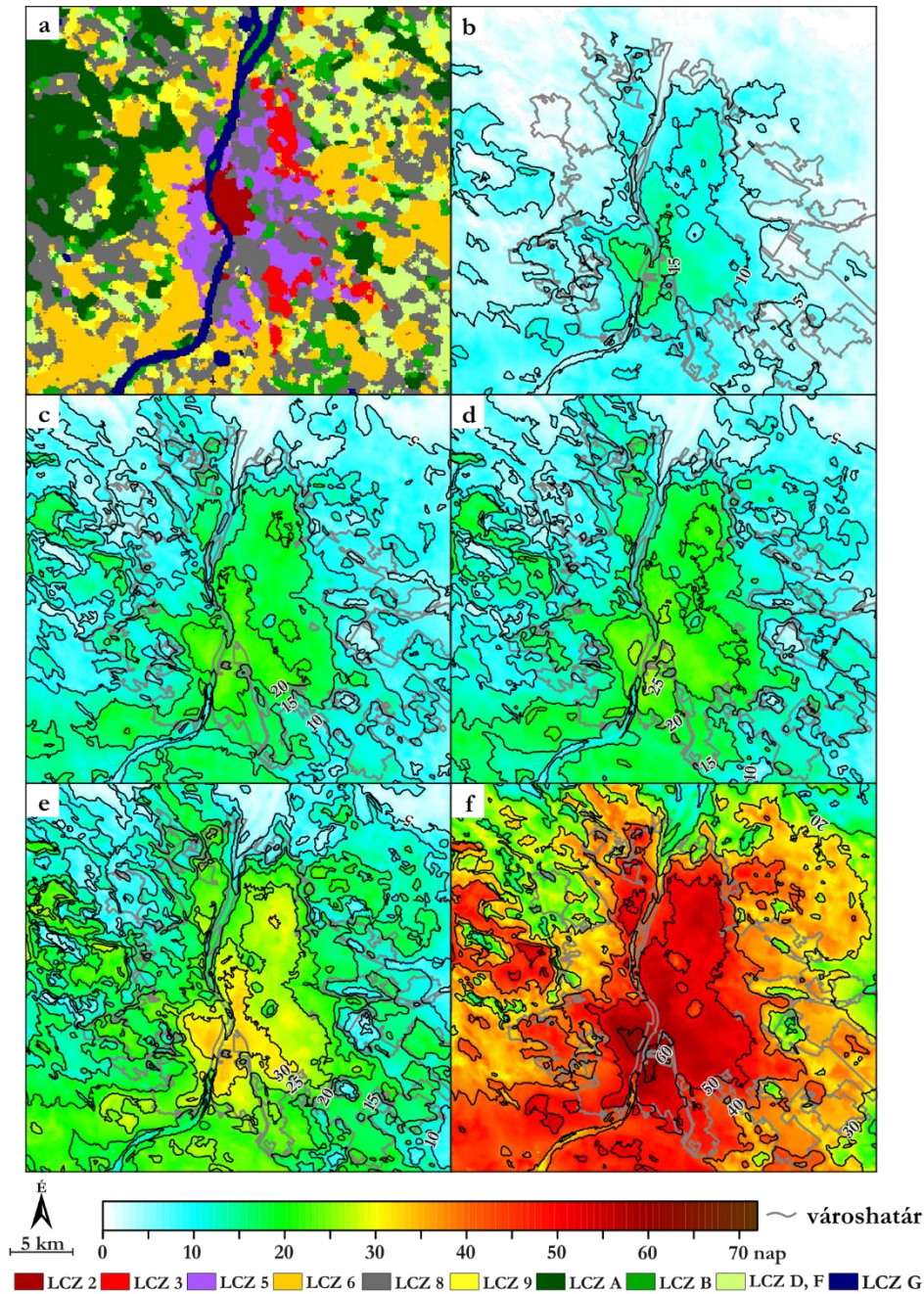
Az 5.5. fejezetben is említett MUKLIMO_3 modellt több vizsgálat keretében is alkalmaztuk (Skarbit, Gál 2016, Bokwa et al. 2018, 2019, Unger et al. 2020b, Gál et al. 2021a, 2021b, Skarbit et al. 2021). A vizsgálatok jelentős része a hazai városok jövőbeli termikus viszonyainak projekciójára irányult. Ennek a célnak a kiteljesedése az a vizsgálat, amelynek keretében 26 jelentősebb Kárpát-medencében elhelyezkedő város esetén készítettünk becslést a trópusi éjszakák jelenlegi és jövőbeli számára (Unger et al. 2020b, Gál et al. 2021b). Ezzel összhangban az ilyen irányú vizsgálatok ismertetését az említett legutóbbi eredményeink alapján végzem el. Meg kell jegyezni, hogy az eredmények a szegedi Városklíma Kutatócsoport weboldalán is elérhetőek (Unger et al. 2021), segítve a döntéshozók és a lakosság érdeklődését felhívni a témára.

A vizsgálat (Unger et al. 2020b, Gál et al. 2021b) keretében a célunk az volt, hogy a Kárpát-medence több különböző méretű városában felmérjük a trópusi éjszakák ($T_{\min} \geq 20^\circ\text{C}$) mintázatát és annak változását a 21. század során. A számításokat a MUKLIMO_3 modellel és az ahhoz kapcsolódó cuboid statisztikai leskálázás módszerével hajtottuk végre (4.8. fejezet). A megközelítés fontos része, hogy a városi felszín a lokális klímazónák alapján képeztük le a modell számára, így garantálva azt, hogy a városi hősziget jelenségét jól visszaadják a kapott eredmények.

Az elemzéshez szükséges volt a vizsgált 26 városban és környékén az LCZ térképezése, amit a WUDAPT módszerrel végeztünk el (4.2. fejezet). A térképezés során több, különböző időpontból származó Landsat (USGS 2016) műholdfelvételt használtunk a megbízhatóbb LCZ-osztályozás érdekében. Ez a megközelítés biztosítja, hogy a mezőgazdasági folyamatok vagy a vegetációs ciklus éves változásai ne befolyásolják a végleges LCZ-térképeket. A szimulációkhoz szükséges volt még domborzati adatra is, amit az EU-DEM adatbázisból (González 2015) állítottunk elő.

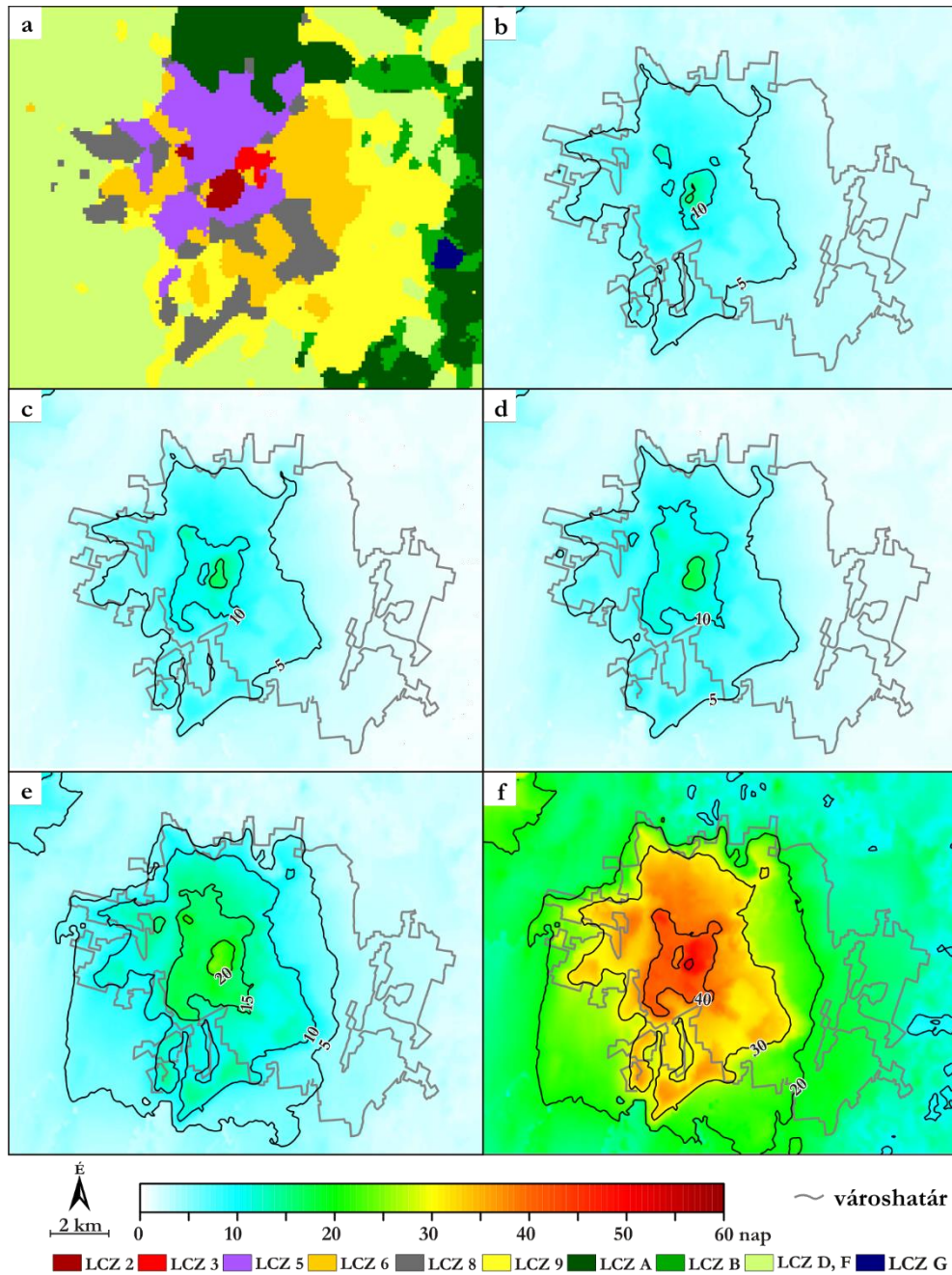
A modell éghajlati input adatai a referencia időszakra (1981-2010) a Carpatclim adatbázis, a jövőbeli időszakokra (2021-2050, 2071-2100) és kibocsájtási forgatókönyvekre (RCP4.5, RCP8.5) az adatokat az EURO-CORDEX adatbázisból nyertük (Jacob et al. 2014). EURO-CORDEX modellszimulációk 0,11°-os felbontású adatait használtuk. A szimulációk kiválasztásának alapja az volt, hogy tartalmazzák-e a cuboid módszerhez szükséges bias korrigált adatokat (léghőmérsékletét, relatív nedvesség, szélesebség és szélirány). Ennek megfelelően 12 szimulációt választottunk ki, így minden szcenárióra és időszakra ennek a 12 modellnek az átlagait alkalmaztuk a számítások során.

A sűrű beépítettség és a nagy területi kiterjedés miatt a trópusi éjszakák száma viszonylag magas Budapesten az 1981-2010 közötti időszakban, és a maximális érték a városközpontban meghaladja a 20-at (5.56. ábra). A magasabb értékek mintázata északkeletre is kiterjed követve az LCZ 3 területeket. Viszonylag magas értékek jelennek meg a város délkeleti részén is, amit az uralkodó szélirány okozhat. Mindkét forgatókönyvben egyértelmű változások tapasztalhatók a 2021-2050 közötti időszakban a referencia-időszakhoz képest, de nincs jelentős különbség a két forgatókönyv között (5.56. ábra). A trópusi éjszakák maximális értékei 31, illetve 35 az RCP4.5 és az RCP8.5 szerint. A város jelentős részén meghaladja a 15 napot. Az évszázad végén a 2021-2050-es időszakhoz képest erős változások várhatóak, és a forgatókönyvek közötti különbségek is nagyobbak lesznek (5.56. ábra). Az RCP4.5 szerint a trópusi éjszakák száma szinte az egész városban meghaladja a 20-at, és a 25 feletti értékek területe is bővül (a maximum 42 nap). Az RCP8.5 esetében a trópusi éjszakák számának maximuma 71, és szinte az egész városban 40 fölött van. Figyelemre méltó az 50 feletti értékek kiterjedése is, míg a városközpontban a számuk meghaladja a 60-at.



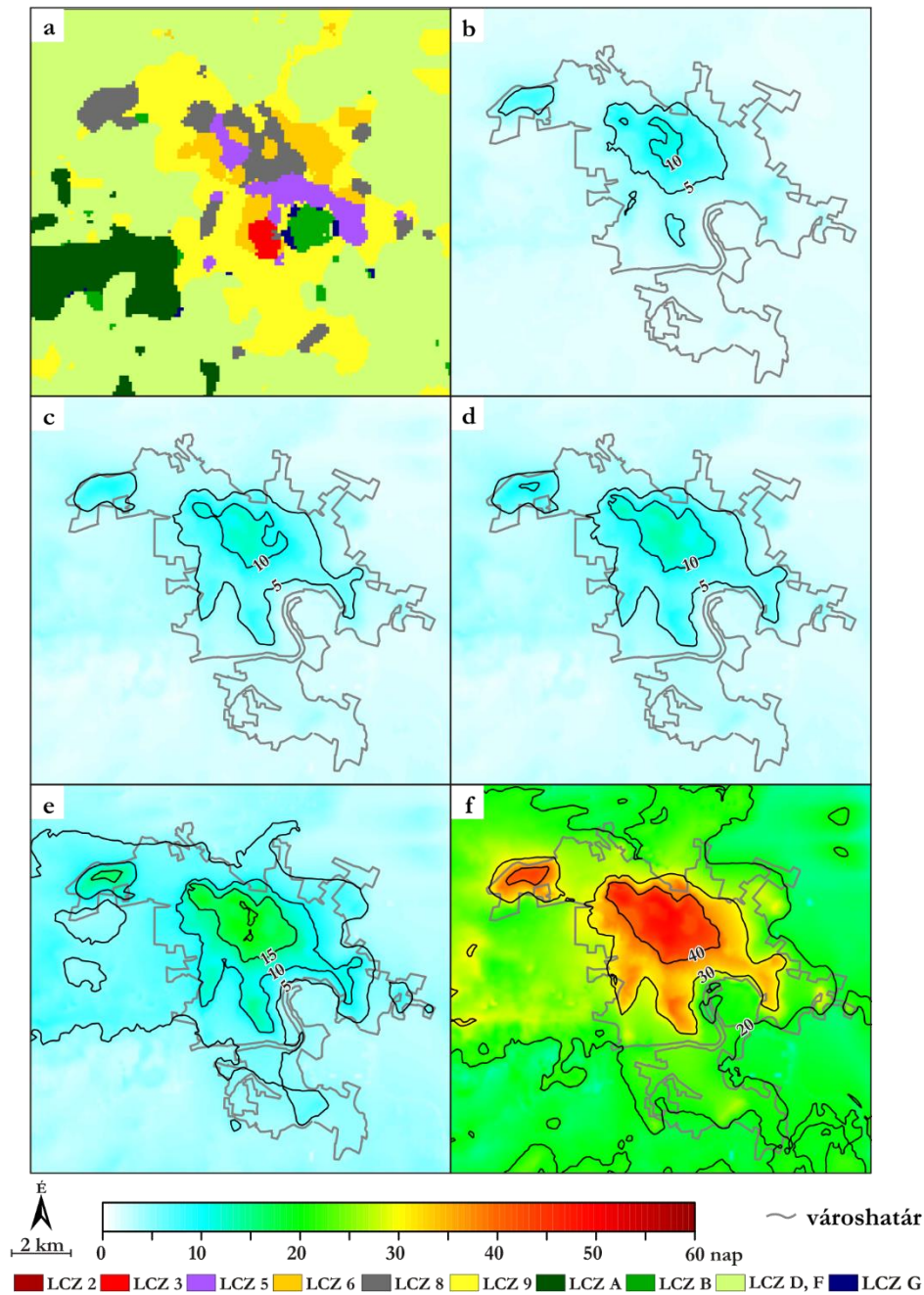
5.56. ábra LCZ térkép (a) és a trópusi éjszakák mintázata Budapesten 1981-2010-ben (b), 2021-2050-ben RCP4.5 (c), 2021-2050-ben RCP8.5 (d), 2071-2100-ban RCP4.5 (e) és 2071-2100-ban RCP8.5 (f) szerint (az uralkodó szélirány az ÉNy-i és a K-i) (Gál et al. 2021b)

Debrecen esetében a fővároshoz képest kisebb népesség és területi kiterjedés tükröződik a trópusi éjszakák számában. Ennek értéke a sűrűbben beépített nyugati városrészben meghaladja az 5-öt 1981 és 2010 között (5.57. ábra). A városközpontban a 10 feletti értékek főként a kompakt LCZ-k területén fordulnak elő (maximum 16 nap). A 2021-2050 közötti időszakban minimális változások lesznek és a forgatókönyvek hasonló eredményeket mutatnak (5.57. ábra). Az egyetlen jelentős változás a 10 és 15 feletti értékek megnövekedett területe. Jelentős növekedés figyelhető meg a 2071-2100 közötti időszakra, és a forgatókönyvek is elválnak egymástól (5.57. ábra). Az RCP4.5 szerint a város nagyrészen az értékek meghaladják a 10-et, míg az LCZ 2-ben a 20-at (maximum 25 nap). Az RCP8.5 esetében az értékek több mint kétszer olyan magasak, a város jelentős részén a számuk meghaladja a 30-at, míg a központban a 40-et is (maximum 51 nap).



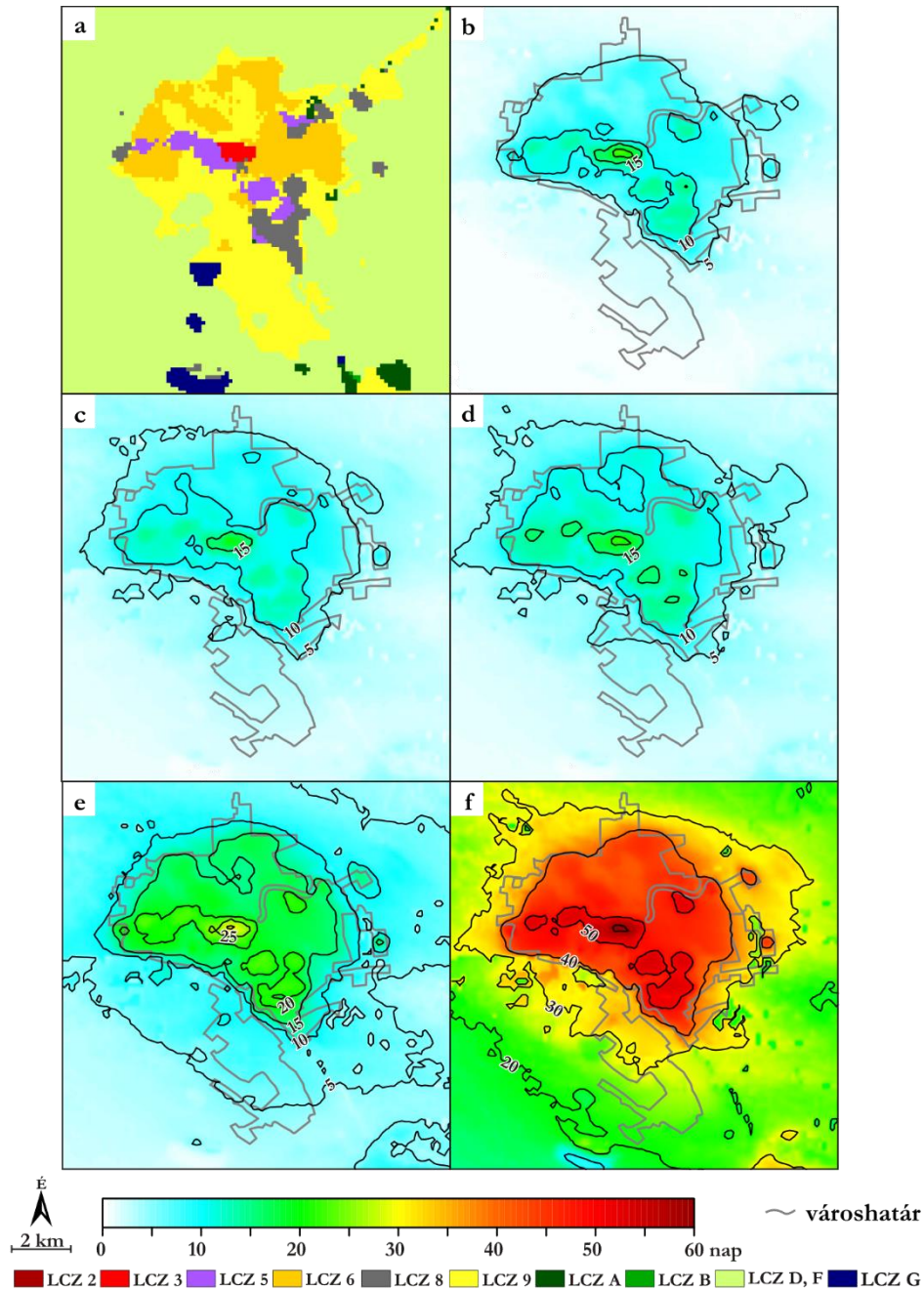
5.57. ábra LCZ térkép (a) és a trópusi éjszakák mintázata Debrecenben 1981-2010-ben (b), 2021-2050-ben RCP4.5 (c), 2021-2050-ben RCP8.5 (d), 2071-2100-ban RCP4.5 (e) és 2071-2100-ban RCP8.5 (f) szerint (az uralkodó szélirány az D-i és a ÉK-i) (Gál et al. 2021b)

Aradot tekintve a trópusi éjszakák száma hasonló, de valamivel alacsonyabb, mint Debrecenben (5.58. ábra). A referencia-időszakban a sűrűn beépített területeken meghaladja az 5-öt (maximum 11 nap). A közeljövő nem hoz jelentős változásokat, és a forgatókönyvek közötti különbség minimális, a maximális értékek 13 és 14 (5.58. ábra). A 2071-2100 közötti időszakban az RCP4.5 szerinti változások nem kiemelkedőek (5.58. ábra). A mintázat hasonló az előző időszakhoz, de az értékek körülbelül 5-tel magasabbak (maximum 21 nap). Az RCP8.5 esetében a növekedés jelentős (5.58. ábra) szinte a város teljes területén, a sűrűn beépített területeken pedig a trópusi éjszakák száma meghaladja a 30-at (maximum 50 nap).



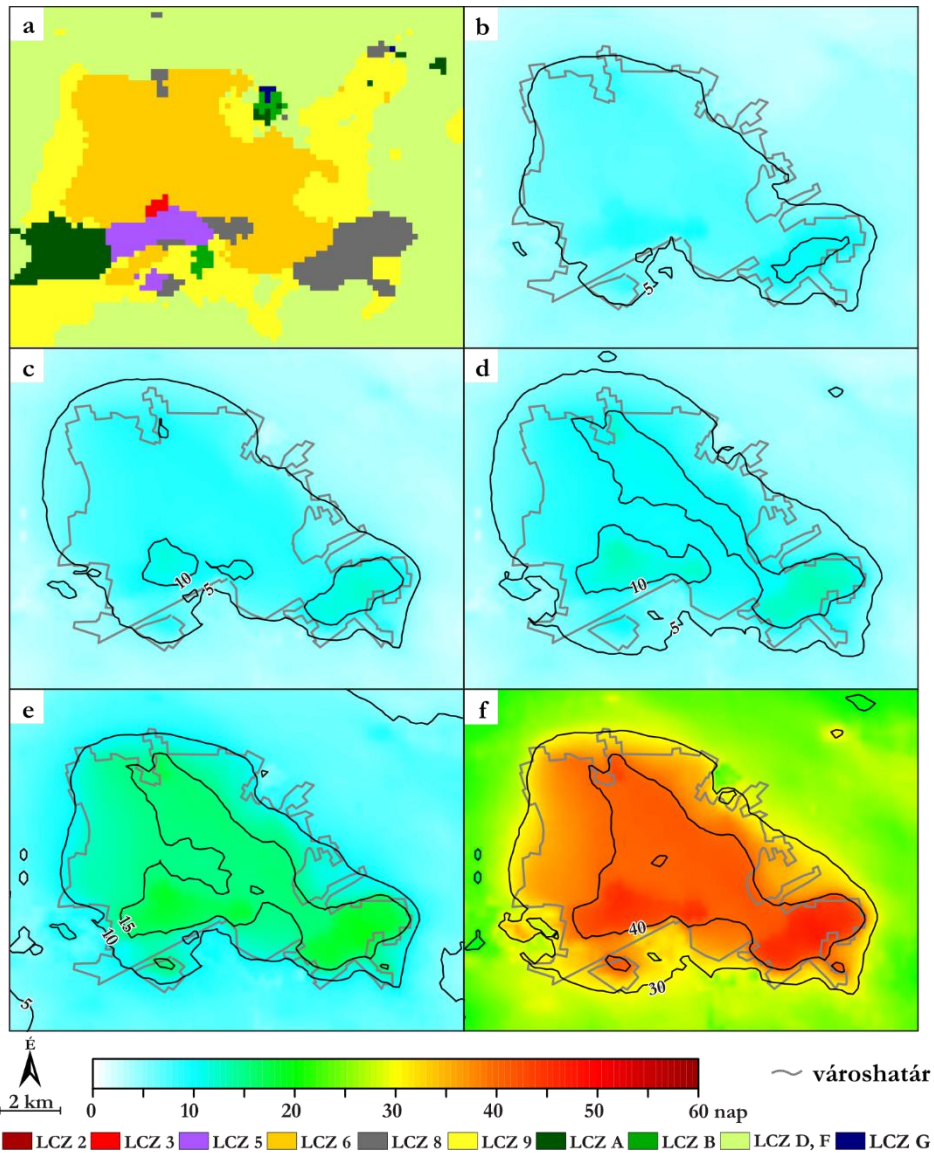
5.58. ábra LCZ térkép (a) és a trópusi éjszakák mintázata Arad (Románia) esetén 1981-2010-ben (b), 2021-2050-ben RCP4.5 (c), 2021-2050-ben RCP8.5 (d), 2071-2100-ban RCP4.5 (e) és 2071-2100-ban RCP8.5 (f) szerint (az uralkodó szélirány az D-i és a DK-i) (Gál et al. 2021b)

Bár Zrenjanin lakossága jóval kisebb, mint az előző két városé, a trópusi éjszakák száma a referencia-időszakban magasabb, köszönhetően éghajlati sajátosságainak (5.59. ábra). A város szinte teljes területén az érték meghaladja az 5-öt, az LCZ 3 területeken 15 fölött van (maximum 23 nap). A 2021-2050 közötti időszakban a terület nagy részén értékek meghaladják az 5 és 10 napot (5.59. ábra). A trópusi éjszakák maximuma 21 és 24 nap. A 2071 és 2100 közötti eredményeket tekintve a változások hasonló nagyságrendűek, mint az előző városok esetében (5.59. ábra). RCP4.5 esetén a trópusi éjszakák száma 15 fölött van a város nagyrészen. A városközpontban meghaladják a 25-öt, sőt egy kis területen a 30-at is (maximum 31 nap). Az RCP8.5 értékek kiemelkedőek, a város szinte teljes területén 40-nél magasabbak, a városközpont területén pedig 60 felett vannak (maximum 62 nap).



5.59. ábra LCZ térkép (a) és a trópusi éjszakák mintázata Zrenjanin (Szerbia) esetén 1981-2010-ben (b), 2021-2050-ben RCP4.5 (c), 2021-2050-ben RCP8.5 (d), 2071-2100-ban RCP4.5 (e) és 2071-2100-ban RCP8.5 (f) szerint (az uralkodó szélirány az DK-i és a ÉNy-i) (Gál et al. 2021b)

A példaként bemutatott városok közül Hódmezővásárhely a legkisebb, ez azonban nem tükröződik a trópusi éjszakák számában (5.60. ábra). A referencia időszakban az egész városban a trópusi éjszakák száma meghaladja az 5-öt, a központban a 10 napot is (maximum 11 nap). A közeljövőben kisebb változásokra kerül sor, ami az 5 és 10 feletti értékterületek bővülésében tükröződik (5.60. ábra). Az RCP4.5 és az RCP8.5 szerinti maximális értékek 12, illetve 13 nap. A 2071-2100 közötti időszakra az RCP4.5 szerinti változás nem kiemelkedő, a trópusi éjszakák száma a város teljes területén meghaladja a 10-et, és a város nagy részén 15-nél nagyobb (5.60. ábra). A maximum nem haladja meg a 20-at. Az RCP8.5 esetében (5.60. ábra) az értékek a város teljes területén meghaladják a 30-at és a délnyugati és délkeleti területeken pedig a 45-öt (maximum 48 nap).



5.60. ábra LCZ térkép (a) és a trópusi éjszakák mintázata Hódmezővásárhelyen 1981-2010-ben (b), 2021-2050-ben RCP4.5 (c), 2021-2050-ben RCP8.5 (d), 2071-2100-ban RCP4.5 (e) és 2071-2100-ban RCP8.5 (f) szerint (az uralkodó szélirány az D-i és a ÉNy-i) (Gál et al. 2021b)

Az előbbi példák jól szemléltetik az egyes városok esetén várható változásokat és a hőmérsékleti többlet térbeli szerkezetét. A további városok eredményeit bemutattuk a [Unger et al. \(2021\)](#) és [Gál et al. \(2021b\)](#) publikációinkban. A dolgozatom keretében a további városok eredményeit összegezve a 5.6. táblázat mutatja be. Az összefoglalás keretében vidéki (R) értéként az LCZ D területek átlagos trópusi éjszaka értékét számítottuk ki, míg a városi (U) értéként, pedig a legmagasabb trópusi éjszaka értéket elérő LCZ-nek az átlagos értékét. Ez utóbbi leggyakrabban az LCZ 2 vagy annak hiányában az LCZ 3 volt.

A 5.6. táblázat szerint a referencia-időszakban a vidéki területeken a trópusi éjszakák száma nem haladja meg az 5-öt. A városi területeken a szórás nagy, a legtöbb városban 5 és 10 között vannak az értékek, míg a nagyobb városokban meghaladják a 10-et, és csak a néhány városban (Újvidék és Zrenjanin) érik el a 15-öt. A 2021-2050 közötti időszakban az 1981-2010 közötti időszakhoz képest minimális változások várhatóak, és a forgatókönyvek közötti különbség is minimális. Az RCP4.5 esetében a vidéki értékek 3 város kivételével még mindig 5 alatt vannak, míg a városi értékek 10 és 15 közöttiek. Jelentős növekedés figyelhető meg 2071-2100-re, különösen az RCP8.5 esetében, és a forgatókönyvek közötti különbség is

növekszik. Az RCP4.5 vidéki értékei a legtöbb esetben 5 alatt vannak, és nem haladják meg a 15-öt, addig az RCP8.5 értékei alapvetően 15 és 25 között vannak. Az RCP4.5 városi értékei általában 15 és 25 között vannak, az RCP8.5 esetében azonban nagyon kevés olyan város van, ahol ez a szám nem haladja meg a 30-at. A tipikus értékek 40 és 50 között vannak, de négy esetben ez a szám meghaladja az 50-et is (pl. Budapest).

5.6. táblázat A trópusi éjszakák számának városi-vidéki értékeinek területi átlagai a 21. században városok szerint (R = LCZ D és U = a legmelegebb LCZ az adott városban, az értékek területi átlagok az adott kategóriánként) (Gál et al. 2021b)

Lakosság (ezer fő)	Időszak Szcenárió	1981–2010		2021–2050				2071–2100			
		R	U	R	U	R	U	R	U	R	U
>400	Budapest	3	13	8	20	8	22	12	29	31	54
200 - 400	Timisoara	3	13	2	12	2	13	4	20	20	50
	Novi Sad	5	18	6	17	7	19	11	26	32	53
100 - 199	Oradea	2	6	2	6	2	7	4	11	18	34
	Debrecen	2	12	1	13	2	15	3	21	15	46
	Arad	1	5	2	6	2	7	3	11	18	35
	Szeged	1	11	2	15	2	16	3	22	15	47
	Miskolc	1	3	1	6	1	7	3	14	14	35
	Pécs	2	6	5	13	5	14	9	21	28	48
	Nyíregyháza	1	9	1	10	1	12	2	17	11	40
	Kecskemét	1	10	1	14	2	15	3	22	16	47
50 - 99	Subotica	1	10	1	10	1	11	2	16	12	38
	Székesfehérvár	2	7	3	10	4	11	6	17	24	41
	Zrenjanin	1	17	2	16	3	18	5	26	23	56
	Szolnok	2	9	2	14	2	15	3	21	17	46
	Tatabánya	0	0	2	3	2	4	4	7	17	24
	Kaposvár	1	2	2	4	2	5	4	8	19	29
	Békéscsaba	2	10	1	11	1	12	2	18	13	43
	Veszprém	0	1	2	4	2	5	4	8	17	28
50 - 99	Eger	0	0	1	3	1	3	2	5	10	19
	Hódmezővásárhely	3	8	3	11	3	12	5	18	22	44
	Baja	2	6	3	11	3	12	5	18	24	46
	Salgótarján	0	0	1	2	1	3	2	4	11	17
	Szekszárd	2	6	3	10	3	10	6	16	20	36
	Siófok	3	9	6	13	6	14	11	22	36	54
	Makó	2	5	2	7	2	8	4	13	19	37

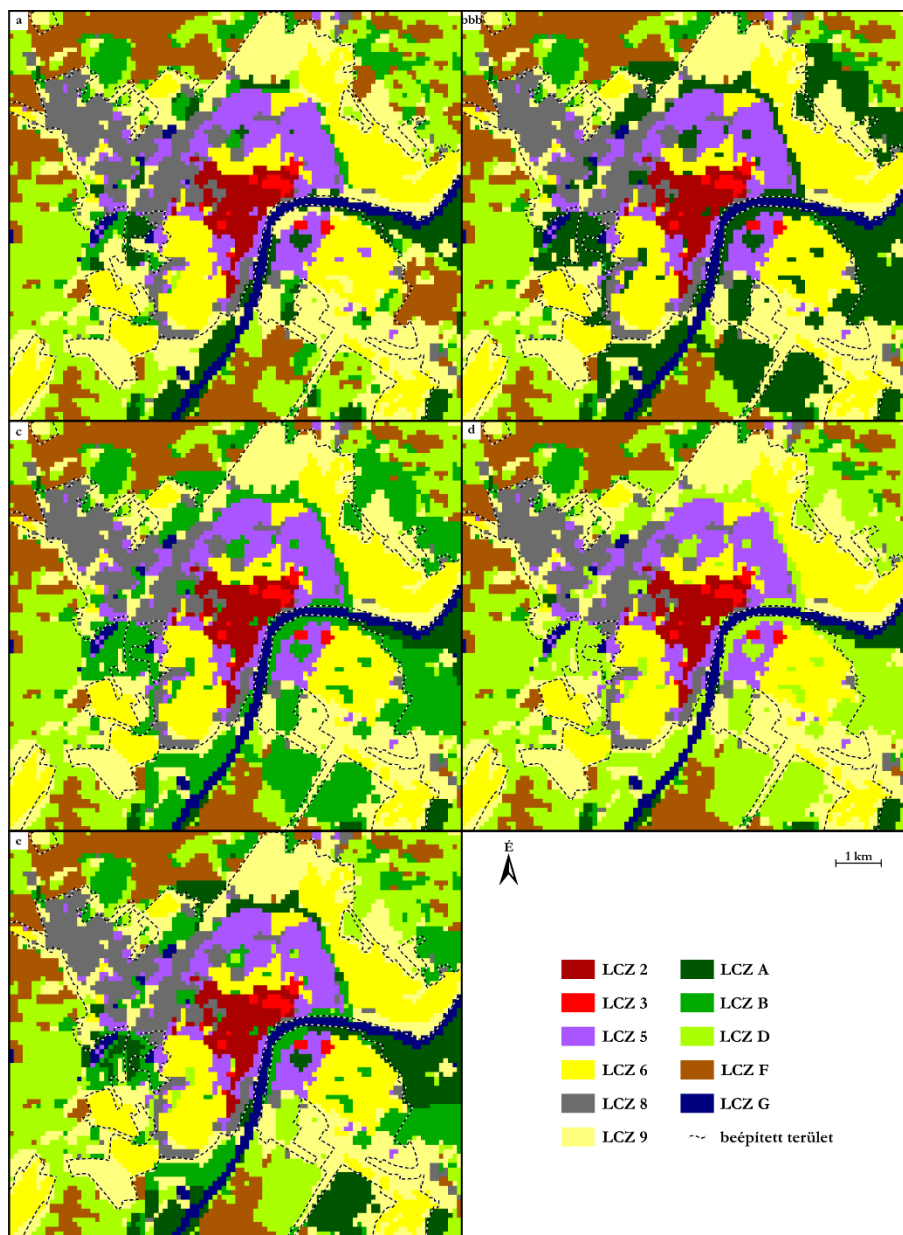
A városok közötti különbségeket leginkább az elhelyezkedés, a méret, a domborzat és a beépített (LCZ) típusok határozzák meg. A legmagasabb értékek a nagyobb vagy melegebb klímájú városok, például Budapest, Újvidék és Zrenjanin esetében jelennek meg (5.6. táblázat). A kisebb vagy a magasabb fekvésű városok (pl. Salgótarján) esetében a értékek általában alacsonyabbak.

Eredményeink azt mutatják, hogy a különböző beépítési típusok milyen mértékben módosítják azaz lényegében felerősítik az éghajlatváltozás várható hatásait. Az eredmények jelentősége abban áll, hogy felhívják a figyelmet, hogy főleg az évszázad végére a városok sűrűn lakott területein a trópusi éjszakákkal leírt valójában rendkívül terhelő az éjszakákra is kiterjedő hóhullámos időszakok 1-1,5 hónapig is tarthatnak egy átlagos nyáron, azaz az átlagos nyár lényegében fele hóhullám lesz. Ez az eredmény azért is különösen fontos, mert a regionális modellek, tekintve, hogy a városi fizikával (még) nem számolnak, ezeket a hatásokat és azok eredményeit nem tudják megfogni. A városi területeken uralkodó viszonyok pontos felmérése és ismerete kritikus, hiszen a hazai lakosság jelentős része ezeken a településeken lakik, és ahogy az eredményeink rámutatnak a városi hatások nem csak a fővárosban vagy a nagyobb megyeszékhelyeken jelennek meg hanem a 100 ezer fő alatti városainkban is.

5.7. A lokális klímazónák alkalmazása várostervezési kérdésekben

A MUKLIMO_3 modell nagy előnye, hogy a felszínborítási adatok definiálása rendkívül könnyen lehetséges, amit ki is használtunk az LCZ rendszer integrálása során (5.5. fejezet). Másik nagy előnye a kis számításigény, így viszonylag gyorsan lehetséges klímanorma időszakokra vonatkozó klímaindexek becslése. Ezeket az előnyöket kihasználva a modell kiváló alapot teremt várostervezési kérdések vizsgálatára. A dolgozatom keretében két esettanulmány (Gál et al. 2021a, Skarbit et al. 2021) példáján ismertetem az ilyen irányú vizsgálatainkat. Az itt bemutatásra kerülő elemzések jelentősége abban áll, hogy a várostervezők, városi döntéshozók számára lehetőségessé válik részletesen ismertetni az egyes koncepciók vagy tervek városklimatológiai hatásait, ezáltal segítve a városklimatológiai ismeretek és tudás társadalmi hasznosulását.

5.7.1. Városi zöld területek hatásainak elemzése

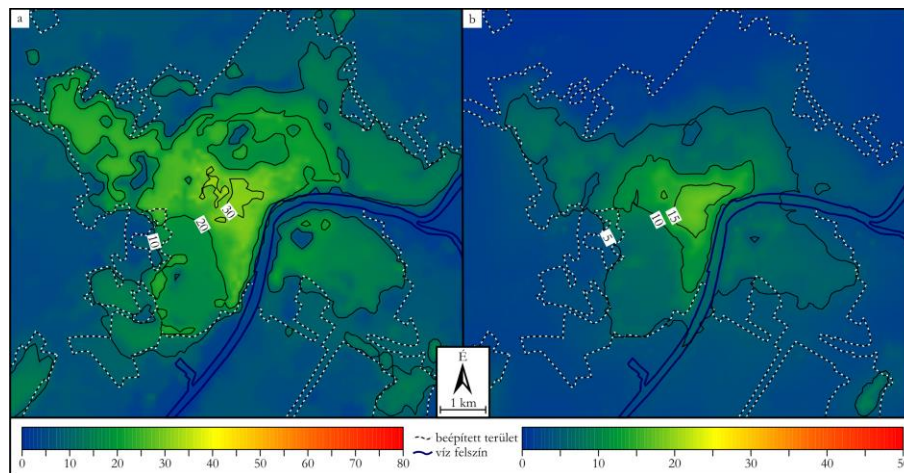


5.61. ábra Az eredeti felszínborítás (a), valamint a módosított felszínborítás (b: A scenárió, c: B scenárió, d: C scenárió, e: D scenárió) LCZ térképei (Gál et al. 2021a)

Az esettanulmány célja a különféle városi zöldterületek hatásainak felmérése a jelen és a jövő éghajlati viszonyai között (Gál et al. 2021a). Az elemzés ugyan a szegedi mintaterületen történt, azonban a munka során lényegében az ideális városi zöldterületek meghatározása történt, így az eredmények kellően általánosak ahhoz, hogy a hazai városok esetén irányadónak tekinthessük.

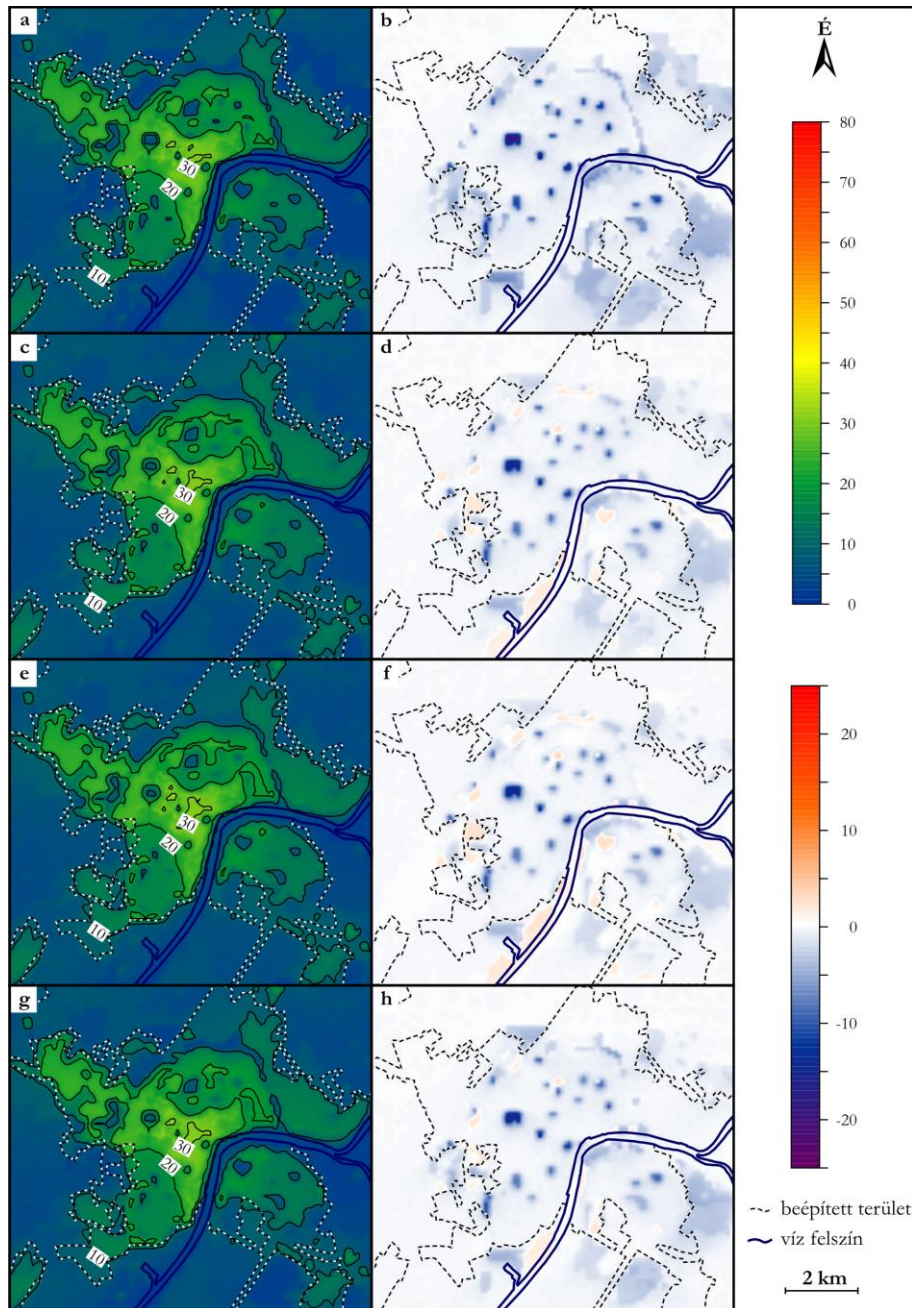
A vizsgálat keretében a zöldterületek városklimatológiai hatásait kitalált várostervezési scenáriókon keresztül vizsgáltuk. Mivel a modellezés alapja a lokális klímazóna volt ezért a vizsgálat során a városba elhelyezett új zöldterületeket is az LCZ rendszer alapján definiáltuk, mivel az ott található osztályok jól definiálják a különféle zöldterületek termikus hatásait. A jelenlegi LCZ térképet lényegében új városi parkokkal egészítettük ki, különböző kombinációkban, oly módon, hogy az új parkokat egyégesen LCZ A, B és D kategóriákkal valamint a három kategória kombinációjaként definiáltuk. A modellezés menete és az eredeti felszínhasználat előállítását megegyeztetett az 5.6. fejezetben ismertetett vizsgálattal.

Az eredeti és módosított felszínborítás LCZ térképeit az 5.61. ábra ismerteti. Az A scenárió esetén további LCZ A (5.61.b ábra), a B scenárió esetén új LCZ B (5.61.c ábra), a C scenárióban pedig további LCZ D (5.61.d ábra) területeket definiáltunk a városi és azzal határos területeken. A D scenárió keretében az LCZ A, B, D kategóriákat definiáltunk vegyesen (5.61.e ábra).



5.62. ábra A hőségnapok (a) és a trópusi éjszakák (b) éves számának mintázata az eredeti felszínborítás esetén az 1981-2010-es időszakban (Gál et al. 2021a)

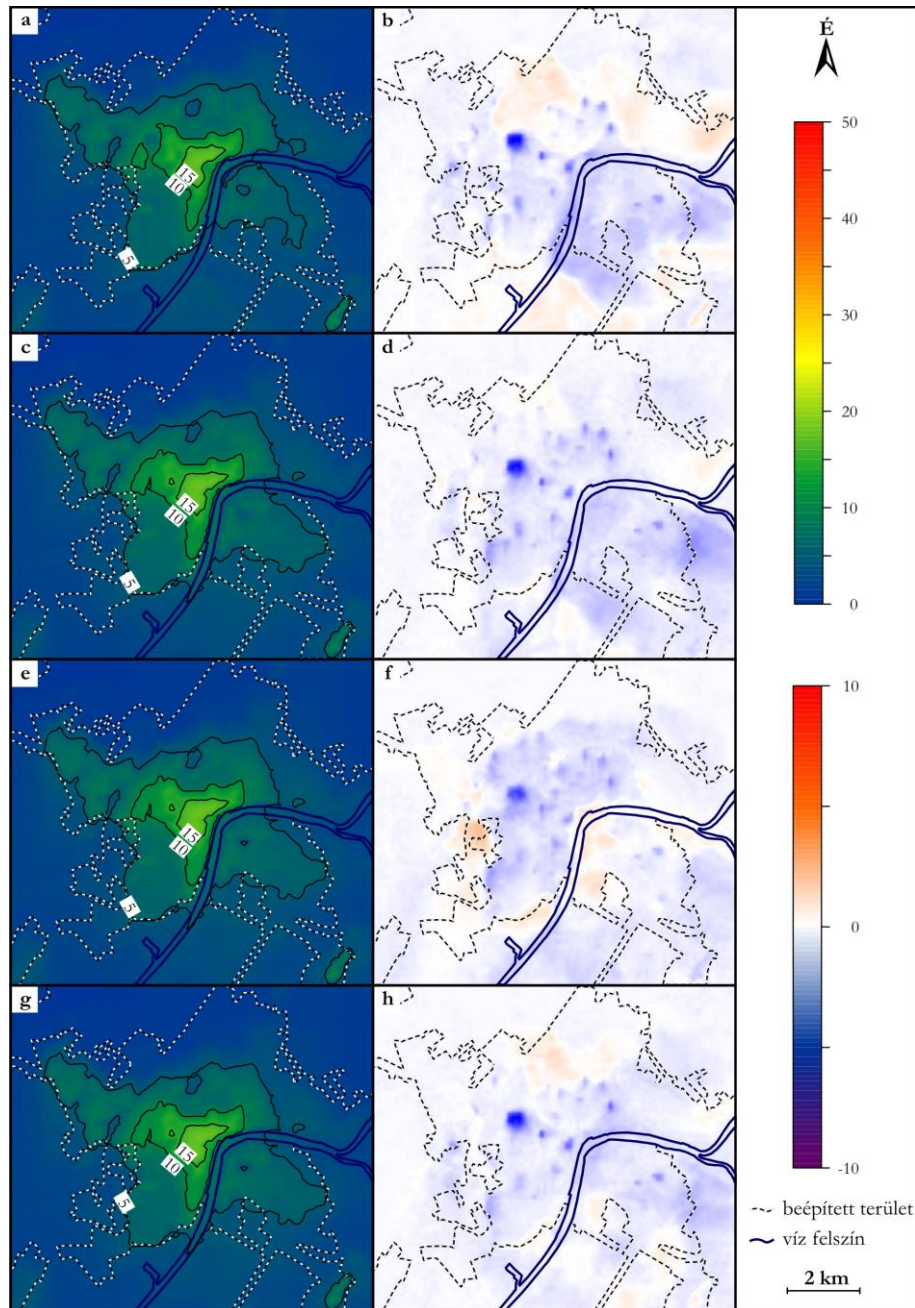
Az eredeti felszínborításra vonatkozó modelleredményeket két index esetén vizsgáltuk. A hőségnap ($T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$) a nappali, míg a trópusi éjszaka ($T_{\min} > 20^{\circ}\text{C}$) az éjjeli nagy hőterhelésű viszonyokat hivatott jellemezni. A modellszámítások alapján a jelenlegi éghajlaton a hőségnapok száma a külterületen 10 nap körüli, míg a városközpontban eléri a 30 napot (5.62.a ábra). A trópusi éjszakák száma a külterületen mindössze pár nap, míg a városközpontban meghaladja a 15 napot (5.62.b ábra). Természetesen az indexek abszolút értékének elemzése is fontos, azonban a továbbiakban csak az eltérésekre fókuszálunk. Ez a megközelítés azért is célravezető, mivel azonos modellbeállításokat alkalmaztunk, így az eltérések tisztán a növényzeti hatásokat tükrözik, ezért adott esetben az indexek abszolút értékére ható esetleges hibák nem befolyásolhatják a kapott következtetéseinket.



5.63. ábra A hőszénapok éves számának térbeli eloszlása a különböző forgatókönyvek esetén (a: A Szenárió, c: B Szenárió, e: C Szenárió és g: D Szenárió), valamint a módosított Szenáriók és az eredeti eset (1981-2010) közötti különbség (az ábra jobb oldalán a különbség a bal oldali Szenárióra vonatkozik) (Gál et al. 2021a)

A különböző felszínborítási Szenáriók (A, B, C és D) termikus hatásait először a nappali klímaindexre vonatkozóan értékeljük a jelen éghajlaton (5.63. ábra). Az A Szenárió és az eredeti állapotot összehasonlítva nyilvánvalóvá válik a hőterhelés csökkenése (5.63.a-b ábra). A legnagyobb különbségek (20 hőszénap csökkenése) egy nagy városi parkban tapasztalhatók, amelyet a LCZ 2 és 8 területek vesznek körül. A B Szenárió esetében a csökkenés majdnem ugyanazt a mintázatot láthatjuk (5.63.b-d ábra), a változás azonban eltérő. A legnagyobb csökkenés 16 nap, ami annak köszönhető hogy a ligetes jellegű növényzet miatt a felszín sugárzási bevétele nagyobb. A C Szenárió eredményei is a hőterhelés mérséklést mutatják (5.63.e-f ábra). A maximális csökkenés a B Szenárióval megegyezik. Ebben az esetben azonban növekedést is tapasztalunk az index értékében. Az 5.63.g-h ábra a vegyes növényzeti kategóriák hatását szemlélteti (D Szenárió), amikor a

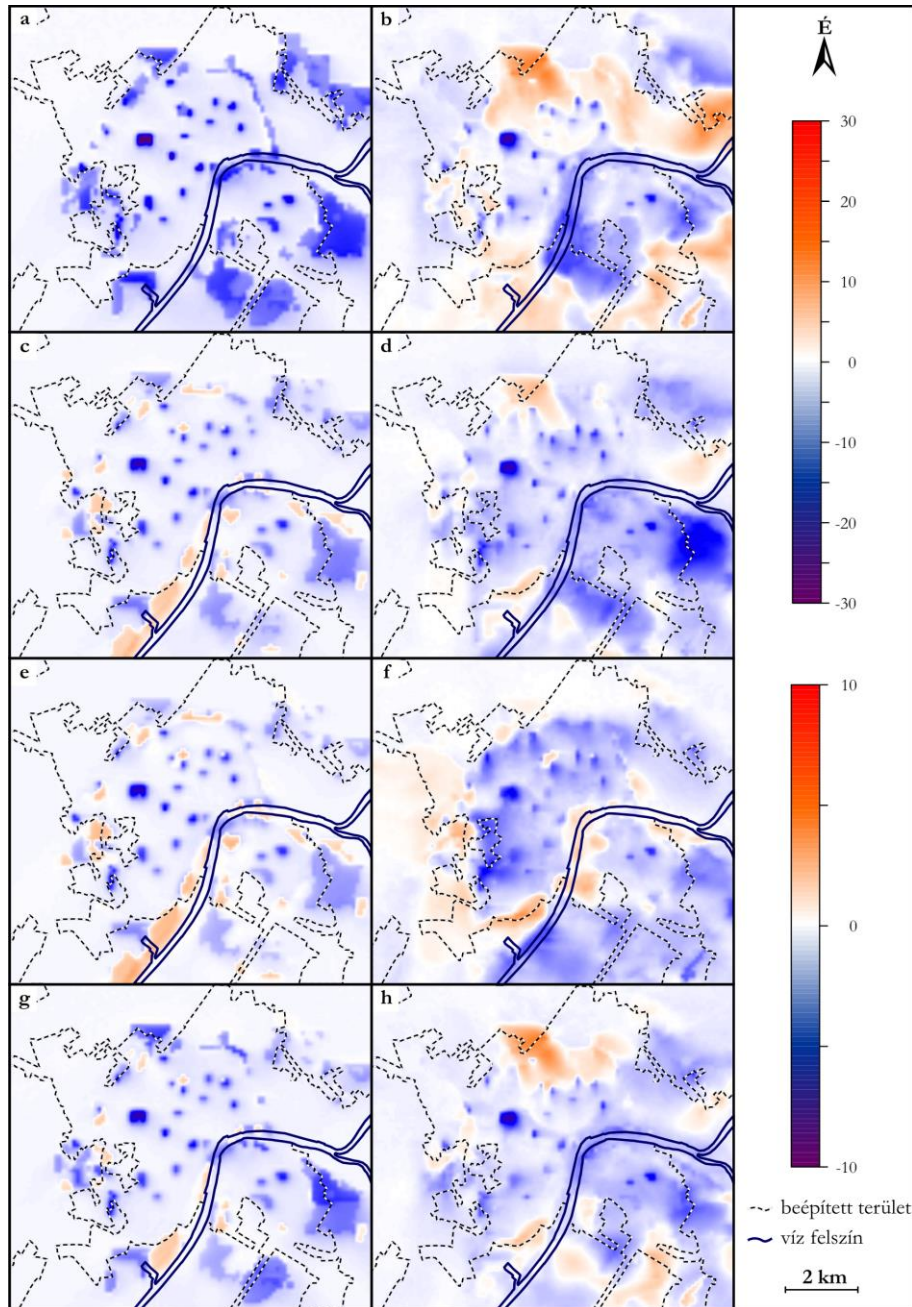
zöldterületek három fő típusát elszórtan helyeztük el a városban és a város körül. A hőségnapok számában az eltérés -17 és +2 között van ez esetben.



5.64. ábra A trópusi éjszakák éves számának térbeli eloszlása a különböző forgatókönyvek esetén (a: A scenárió, c: B scenárió, e: C scenárió és g: D scenárió), valamint a módosított scenáriók és az eredeti eset (1981-2010) közötti különbség (az ábra jobb oldalán a különbség a bal oldali scenárióra vonatkozik) (Gál et al. 2021a)

Az éjszakai indexre vonatkozó modell eredményeik némileg eltérő következményekre hívják fel a figyelmet (5.64. ábra). Az A. scenárió esetén a változások nem egyértelműen a kedvező irányba mutatnak (5.64.a-b ábra). A lehűlés ugyan szinte az egész városban érzékelhető, azonban a város É-i és D-i területein enyhe felmelegedés figyelhető meg. Itt az eredetileg LCZ B és D területek a ritkán beépített LCZ 9-es területek körül LCZ A-ra módosult. Ez a változás kedvezőtlen, tekintve hogy a sűrű zárt lombosított erdős területek a városi beépítéshez hasonlóan korlátozzák a kora esti intenzív lehűlést, ami kihat a szomszédos beépített területre is. A városban belül a hozzáadott új LCZ A területek azonban

hatékonyan csökkentik a trópusi éjszakák számát, vélhetően a nap során nagyobb mértékű párologtatásnak, így alacsonyabb kora esti hőmérsékleteknek köszönhetően. A trópusi éjszakák legnagyobb mértékű csökkenése 5 nap. A B scenárió esetén hasonló változásokat tapasztalunk (5.64.c-d ábra), azonban itt a felmelegedés, azaz lényegében a negatív hatás kevésbé jelentős. A C scenárió köszönhetően a nagy nyitott alacsony növényzetű parkoknak, az éjjeli órákban jelentős lehűlést jelez, ami a trópusi éjszakák számában is megmutatkozik, azonban előfordulnak olyan területek (pl. a város Ny-i részén), ahol az LCZ D területek az LCZ A területeket váltották, és így a nappali órákban történő jóval nagyobb felmelegedése az éjjeli órák viszonyait is kedvezőtlenül befolyásolják (5.64.e-f ábra). A vegyes D scenárióban általánosan kedvező kép rajzolódik ki, a legnagyobb csökkenés 5 nap (5.64.g-h ábra).



5.65. ábra A (a, b) A scenárió, (c, d) B scenárió, (e, f) C scenárió és (g, h) D scenárió eltéréseinek térbeli szerkezet az eredeti felszínborításhoz képest a hőségnapok (a, c, e, g) és a trópusi éjszakák (b, d, f, g) esetén a 2071-2100 közötti időszakban az RCP8.5 alapján (Gál et al. 2021a)

Kérdés hogy a jelenlegi trendek hogyan változnak az éghajlatváltozásnak köszönhetően. A 5.65. ábra mutatja be a felszínhasználat változási szcenáriók és az eredeti helyzet közötti különbséget a 2071-2100 közötti időszakban. Az A szcenárió esetén a hozzáadott sűrű fás területek esetén a hőségnapok csökkenése eléri a 30 napot (5.65.a ábra), míg a trópusi éjszakák csökkenése pedig a 8 napot (5.65.b ábra), azonban a trópusi éjszakák esetén 5 napos növekedés is megfigyelhető nagy területen. Az eredmények rávilágítanak arra, hogy a növényzet hűtő hatása jelentősebbé válik a megváltozó éghajlati viszonyok esetén, valamint azt is megfigyelhetjük, hogy ez a hűtő hatás a parkok környezetében nagyobb területet érint kedvezően. A B szcenárió (5.65.c-d ábra) egyértelmű hőterhelés csökkenést jelez, a hőségnapok száma 24-el, míg a trópusi éjszakák száma 8-al csökken, a negatív változások egyúttal jóval kisebb mértékűek. A C szcenárió esetén (5.65.e-f ábra) a nappali helyzet megegyezik a B-vel, azonban éjjel jelentős területen figyelhetjük meg a trópusi éjszakák csökkenését. A D szcenárió esetén (5.65.g-h ábra) vegyes képet kapunk, a kedvezőtlen éjjeli változások területe lecsökken. A vegyes forgatókönyv eredményei rámutatnak arra, hogy tudatos tervezéssel és a különböző növényborítási kategóriák kombinációjával érhetjük el az optimális hűtő hatást, elkerülve a főleg éjjel jelentkező kedvezőtlen hatásokat.

A szimulációk eredményeit összegezve egy komplex kép tárul elénk (5.7. táblázat). Az összes növényzeti kategória hozzá tud járulni a kedvezőtlen, nagy hőterheléssel járó időszakok csökkentéséhez. A nappali és éjjeli hatások együttes elemzésre rámutat arra, hogy a sűrű, zárt lombkoronájú fás területek alkalmazása nappal rendkívül kedvező, azonban éjjel ez a trend részben megfordul. A ligetes jellegű (B) zöldterületek és a lényegében füves területek (C) lehet, hogy nem annyira hatékonyak nappal, azonban az éjjel jelentős területek hűtésében tudnak közreműködni. A zöldterületek kombinációján alapuló D szcenárió eredményei pedig rávilágítanak arra, hogy a különböző típusú zöldterületek megfelelő térbeli kombinációja alkalmas lehet a pozitív hatások maximalizálására és a negatív hatások elkerülésére.

5.7. táblázat A különböző növényzeti kategóriák esetén a klímaindexek értékeinek maximális csökkenése, valamint a termikus hatásaik hatékonyságának értékelése (Gál et al. 2021a)

Időszak, klímaindex	A szcenárió	B szcenárió	C szcenárió	D szcenárió
1981-2010, hőségnap	20 nap	16 nap	16 nap	17 nap
2021-2050, RCP 8.5, hőségnap	23 nap	18 nap	17 nap	18 nap
2071-2100, RCP 8.5, hőségnap	30 nap	24 nap	23 nap	24 nap
1981-2010, trópusi éjszaka	5 nap	5 nap	4 nap	5 nap
2021-2050, RCP 8.5, trópusi éjszaka	6 nap	6 nap	4 nap	6 nap
2071-2100, RCP 8.5, trópusi éjszaka	8 nap	8 nap	6 nap	8 nap
hűtési hatékonyság nappal	nagyon magas	magas	közepes	magas
hűtési hatékonyság éjjel	ellentmondásos	magas	közepes	magas

Eredményeink rámutattak arra, hogy bár a nappali hőterhelés mérséklésére legjobb megoldás a sűrű erdős területek telepítése, azonban éjjel ez negatív hatásokkal is jár. Így a parkos jellegű fás terület vagy az erdős, parkos, füves területek együttes alkalmazása összeségében kedvezőbb lehet.

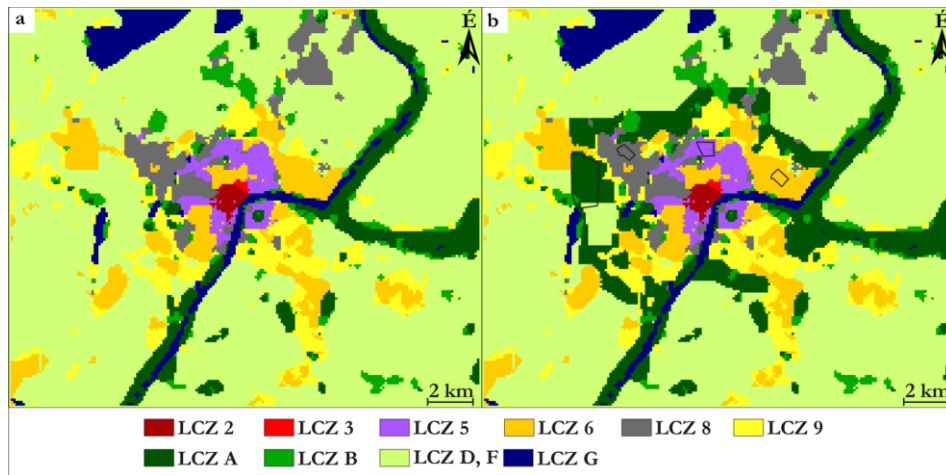
A modellszimulációk eredményein jól látszik, hogy egy zöld terület jelentős méretű szomszédos városi területen tud kifejteni hűtő vagy akár melegítő hatást is. A fás vegetáció városi alkalmazása nem csak a termikus viszonyokra, hanem az átszellőzésre is kihat, hiszen az összefüggő sűrű erdős területek hatékonyan tudják blokkolni a légáramlást. Ez nem csak a városi légszennyezés szempontjából kedvezőtlen, hanem éjjel a városi hőtöbblet szempontjából is, hiszen a mérsékelt átszellőzés nem csak a légszennyező anyagokat hagyja helyben, hanem az éjjeli melegebb városi levegőt is.

A munkánk rámutatott arra is, hogy bár a zöldterületek alapvetően kedvező hatást gyakorolnak, azonban a megfelelő zöldterület típus kiválasztása alapjaiban befolyásolja a hűtési hatékonyságot és nem csak lokálisan, hanem városrészekre kiterjedő módon. Az eredmények tehát reményeim szerint felhívják várostervezők figyelmét arra, hogy körültekintő módon célszerű a zöldterületek tervezése során eljárni.

5.7.2. Város körüli véderdő hatásainak felmérése

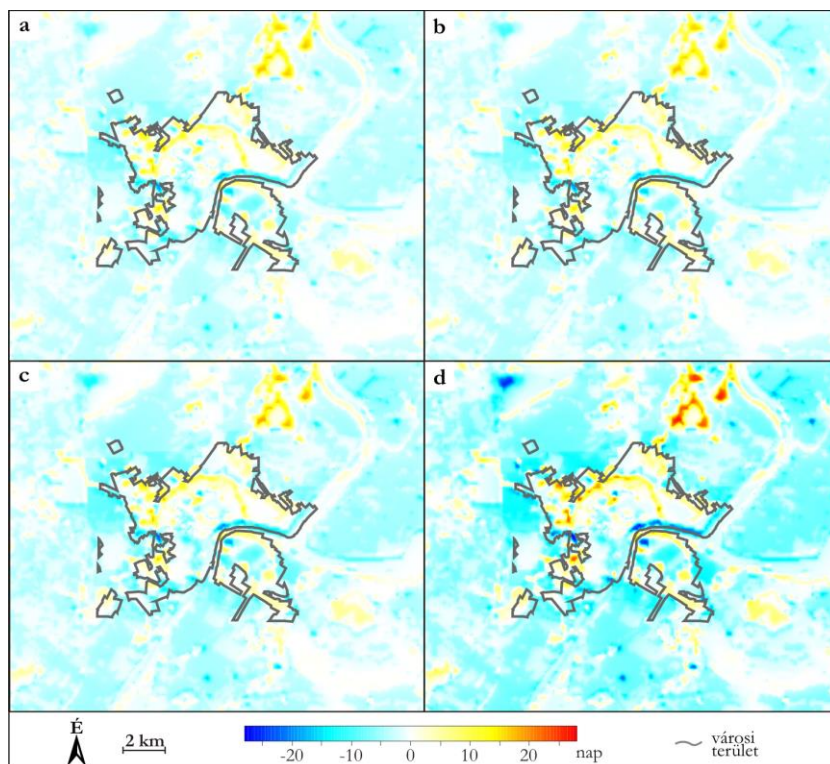
Ennek a vizsgálatnak a fókuszában egy napjainkban felkapottnak tekinthető városstervezési koncepció állt. Több hazai város – köztük Szeged – esetében felmerült a település határába telepítendő véderdő ötlete. A koncepció célja kettős, a dekarbonizáció elősegítése és a városba érkező szállópor csökkentése. Elemzésünk fő célja ennek megfelelően egy várost körbevevő véderdő városklimatológiai hatásainak feltárása (Skarbit et al. 2021). A vizsgálat alapötletét részben az 5.7.1. fejezetben bemutatott eredmények is adták, mivel rámutattak arra, hogy jelentős erdős területek telepítése kedvezőtlenül befolyásolhatják a városklimatológiai viszonyokat és a hőterhelés alakulását.

A vizsgálat keretében egy rendkívül sematikus és kevésbé realiztikus erdőtelepítés hatását szimuláltuk a MUKLIMO_3 modell segítségével. A numerikus szimuláció részletei megegyeznek az 5.6. fejezetben ismertetett vizsgálatéval. A véderdőt oly módon reprezentáltuk a modellben, hogy az eredeti felszínborítási térképen (5.66.a ábra) a városhatárt övező 1-2 km széles sávban, minden elképzelhető helyen az ott jellemző füves területeket (LCZ D) sűrű erdőre (LCZ A) cseréltük (5.66.b ábra). Ez a megközelítés nem alkalmas közvetlenül arra, hogy részletes városstervezési munkát támogasson, hiszen egy ilyen méretű erdőszítés a gyakorlatban nem realiztikus, azonban egyértelműen kimutathatóvá teszi a lépés hatására történő változások trendjeit. Vizsgálatunkban a közeli és a távolabbi jövőre vonatkozóan elemeztük a hatásokat.

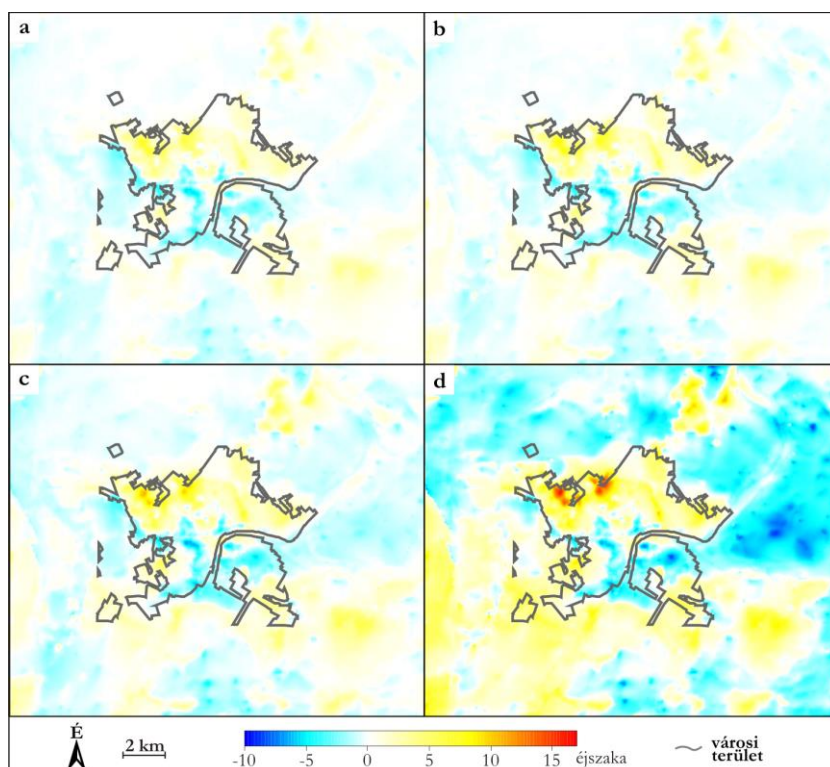


5.66. ábra Az eredeti (a), valamint a véderdővel módosított (b) felszínborítás a vizsgált területen és a kiválasztott mintaterületek (fekete poligonok) (Skarbit et al. 2021)

A 2021-2050 közötti időszakban a két scenárió alapján kapott különbség a hőségnapok számában közel azonos (5.67. ábra). A városban a legnagyobb növekedés az északi városrészben látható. Ennek oka, hogy az uralkodó ÉK-i és ÉNy-i szelek átszellőztető hatása a véderdő miatt korlátozottabban tud érvényesülni. A melegedés 0 és 5 nap közötti és a szomszédos LCZ 5, 6 és 8 területekre korlátozódik (5.66. ábra).



5.67. ábra A hőségnapok számának különbsége a véderdővel módosított és az eredeti felszínborítású vizsgált területek között (a és b: 2021-2050 RCP4.5 és RCP8.5, c és d: 2071-2100 RCP4.5 és RCP8.5) (Skarbit et al. 2021)



5.68. ábra A trópusi éjszakák számának különbsége a véderdővel módosított és az eredeti felszínborítású vizsgált területek között (a és b: 2021-2050 RCP4.5 és RCP8.5, c és d: 2071-2100 RCP4.5 és RCP8.5) (Skarbit et al. 2021)

A 2071-2100 közötti időszakban az RCP4.5 szcenárió szerinti (5.67.c ábra) változás azonos nagyságrendű, mint az előző időszakban. A RCP8.5 szcenárió alapján (5.67.d ábra)

azonban nagyobbak a különbségek. Ekkor főként a város ÉNy-i és Ny-i részén, nagy területen 5 nap, számos kisebb területen a 10 napot is meghaladó különbség alakul ki.

A 2021-2050 közötti időszakban az RCP 4.5 és 8.5 igen hasonló egymáshoz (5.68. ábra). A trópusi éjszakák száma a város É-i részében növekszik 1-5 napot, több területen akár 5 feletti növekedés is előfordul. A déli városhatár mentén is jelentkezik pozitív eltérés, azonban ez nem akkora mértékű. A véderdő hatására a városközpontban a trópusi éjszakák csökkenése egy kis területen meghaladja az 5 napot.

A 2071-2100 időszakban az RCP4.5 forgatókönyv szerint nagyobb növekedés mutatkozhat meg a trópusi éjszakák számában (5.68.c ábra) és a növekedéssel érintett terület is kiterjed. Az RCP8.5 szcenárió szerint jelentősen megnő a trópusi éjszakák száma erre az időszakra (5.68.d ábra) és egyben a véderdő miatti növekedés mértéke és területe is. Ki kell emelni, hogy kis területen a véderdő miatt 15 napot meghaladó különbségek is előfordulnak LCZ 6 és 8 beépítésű területeken.

A vizsgálat keretében további klímaindexeket is elemeztünk (5.8. táblázat) az 5.66. ábrán jelölt mintaterületek átlagértékei alapján. Ezek alapján nem meglepő módon az LCZ A területen, azaz a véderdő területén kedvező változás figyelhető meg (5.8. táblázat), amit azért árnyal a tény, hogy ezen a területen a lakosság maximum rekreációs céllal élvezheti a kedvező változást. A legnagyobb kedvezőtlen eltérések az LCZ 8 esetén figyelhetők meg, majd ezt követi az LCZ 5 és 6 beépítésű terület. Az első lényegében ipari terület, a további kettő viszont családi házakkal valamint lakótelepekkel beépített terület, tehát kijelenthető, hogy a hőterhelés növekedés nagyszámú városi lakost érint. A hőterhelés fokozódása minden napszakra kiterjed, azonban legjelentősebb a kora esti (sörkert nap, nyári éjszaka), éjjeli (meleg éjszaka, trópusi éjszaka) időszakban. Ez azért is kritikus, mert az elemzés alapján az látszik, hogy a véderdő erősíti a városi hatások miatt eleve emelkedett éjjeli hőmérsékleti értékeket.

5.8. táblázat A klímaindexek értékeinek átlagos változása az egyes mintaterületeken (2. ábra) a véderdő telepítését követően

Klímaindex	Időszak	Szcenárió	Mintaterületek			
			LCZ 5	LCZ 8	LCZ 6	LCZ A
Nyári nap	2021– 2050	RCP4.5	8,5	14,9	6,2	-16,6
		RCP8.5	8,7	15,6	6,5	-16,8
	2071–2100	RCP4.5	8,2	14,6	6,3	-16,5
		RCP8.5	7	12,8	5,3	-14,6
Hőségnap	2021– 2050	RCP4.5	4,3	8,1	3,4	-5,8
		RCP8.5	4,3	8,1	3,5	-6,3
	2071–2100	RCP4.5	5	9,2	3,9	-8
		RCP8.5	6,4	10,7	4	-12,1
Sörkert nap	2021– 2050	RCP4.5	8,4	12,6	6,2	-14
		RCP8.5	8,1	12,9	6,5	-14,6
	2071–2100	RCP4.5	7,1	11,4	6	-14
		RCP8.5	6,5	10,5	5,5	-12,6
Nyári éjszaka	2021– 2050	RCP4.5	9,3	17,4	8,9	-20,2
		RCP8.5	9,6	18	9,4	-21,7
	2071–2100	RCP4.5	9,2	17,1	9,1	-19,7
		RCP8.5	7,8	14,7	7,8	-15,7
Meleg éjszaka	2021– 2050	RCP4.5	5,7	18,4	9,4	0,1
		RCP8.5	5,6	18,4	9,8	-0,3
	2071–2100	RCP4.5	5,7	18,7	9,4	0,3
		RCP8.5	5,2	16,7	7,4	1,9
Trópusi éjszaka	2021– 2050	RCP4.5	1,4	5,6	2,5	-1,1
		RCP8.5	1,7	6,6	2,9	-1,2
	2071–2100	RCP4.5	2,4	8,6	3,8	-1,4
		RCP8.5	3,9	12,7	5,7	-0,6

Eredményeink rámutatnak arra, hogy a nappali hőmérsékleti viszonyokban a véderdő egy enyhén pozitív változást idézhet elő a külterületen, azonban a városhatár közelében melegedést okoz éjjel és nappal is. Ez a trend részben a véderdő áramlásmódosító hatásának köszönhető, azaz lényegében az erdősáv, ahogy körbezárja a várost, meg is gátolja a melegebb városi levegő kiáramlását, illetve a külterületekről érkező hűvösebb levegő beáramlását. Bár vizsgálatunk a legszennyező anyagok koncentrációira és a ventiláció elemzésére nem terjedt ki, azonban a termikus viszonyokon jól látszik az átszellőzés hatékony blokkolása, tehát a véderdő vélhetően a városba beérkező természetes eredetű szálló port hatékonyan távol tartja a várostól, viszont a helyi légszennyezőanyag kibocsájtást vélhetően a városi területen tartja.

A várt pozitív hatások ellenére tehát alapos tervezés nélkül az ehhez hasonló véderdősávok telepítése problémás lehet, hiszen főleg a termikus viszonyok esetén számos negatívum jelenhet meg. Mindazonáltal példaértékű, hogy a hazai várostervezők különböző zöld megoldásokkal igyekeznek a klímaváltozás hatásait enyhíteni. Azonban hangsúlyoznunk kell, hogy a települések esetében a városklimatikus hatásokat is rendkívül fontos felmérni, hiszen bizonyos – mint az ebben a tanulmányban is bemutatott – esetekben a beavatkozások a várakozásokkal ellentétes hatásokkal járhatnak.

6. Összegzés

Az összegzés keretében a fő célom nem elsősorban a részletes szintézis megfogalmazása, hanem a saját főbb tudományos eredményeim kiemelése és az 5. fejezetben bemutatott vizsgálatokban betöltött szerepemnek az egyértelmű definiálása volt.

A lokális klímazónák térképezésének területén a következő eredményeket értem el:

I. Kidolgoztam a lokális klímazónák térképezésének szubjektív módszerét (Unger et al. 2011). A munka keretében publikált térkép az első példa a lokális klímazónák ezirányú alkalmazására.

II. Kidolgoztam egy objektív GIS alapú lokális klímazóna térképezési eljárás elvét és részleteit (Lelovics et al. 2014, Unger et al. 2014a). Felismertem, hogy a térképezés az általam korábban definiált telek poligonokon kell alapuljon. Elvi szinten kidolgoztam az osztályba sorolást végző fuzzy logikán alapuló számítást, valamint a telek poligonok összevonásának eljárását is.

III. Összehasonlítottam a GIS térképezési módszert a WUDAPT módszerrel (Gál et al. 2015, Bechtel et al. 2019a). Az összehasonlítás rávilágított arra, hogy a GIS alapú módszernek nagyobb az adatigénye és nehezebben alkalmazható tetszőleges helyszíneken, azonban a műholdkép feldolgozáson alapuló és így könnyebben alkalmazható WUDAPT módszer nem ad annyira pontos eredményt. Az összehasonlítás rámutatott arra is, hogy a GIS módszer telek poligon összevonási művelete városklimatológiai szempontból jelentősen javítja a végső térkép minőségét.

IV. Kidolgoztam külföldi partneremmel együttműködve egy kombinált LCZ térképezési eljárást, amely a WUDAPT módszer műholdkép osztályozásán és a GIS módszer telek poligon összevonásán alapul (Gál et al. 2015, Bechtel et al. 2019a). A kidolgozott új eljárás reményeim szerint a jövőben felhasználásra kerül a WUDAPT projekt keretein belül és hozzájárul az LCZ rendszer további elterjedéséhez.

A lokális klímazónákon alapuló, reprezentatív városklíma monitoring rendszer telepítésével kapcsolatban a következő eredményeket értem el:

V. Felvázoltam a lokális klímazónákra reprezentatív monitoring hálózat mérési helyszíneinek kiválasztását célzó eljárás részleteit (Unger et al. 2011). Felismertem, hogy a helykiválasztás csak akkor lehet eredményes, ha a városi hősziget térbeli struktúrájára vonatkozó információ is figyelembe van véve a tervezés során.

VI. Elvi szinten kidolgoztam a lokális klímazónákra reprezentatív mérőállomás hálózat telepítésének módszerét (Lelovics et al. 2014, Unger et al. 2014a, 2015). A helykiválasztás a GIS módszerrel készült LCZ térképezési eljáráson, a statisztikai módszerrel becsült éves átlagos UHI térbeli szerkezetén és további szempontokon alapult. Elvi szinten kidolgoztam a mérőállomás elhelyezését optimalizáló iteratív számítást.

Az Urban-Path városklíma monitoring hálózat kapcsán az eredményeim a következők:

VII. Kidolgoztam a mérőállomások telepítésének és működésének részleteit (Unger et al. 2014c, 2015, 2017). Jelentős szerepet vállaltam a kiválasztott mérőállomás helyszínek mikroklimatikus szempontú értékelésében.

VIII. Kidolgoztam a monitoring rendszer működésének, adatkezelésének és feldolgozásának koncepcióját és annak egyes részleteit (Unger et al. 2014c, 2015, 2017). Kidolgoztam a humánkomfort paraméter számítás koncepcióját, valamint az ahhoz szükséges paraméterek számításának és közelítésének módszerét.

IX. A humánkomfort számolás érdekében kidolgoztam egy olyan eljárást, amellyel lehetséges a külterületi szélsőbesség, felszínérdesség és további mikroklima mérések adatai segítségével az UCL-en belüli szélsőbesség becslése (Unger et al. 2015).

A lokális klímazónákon alapuló városklimatológiai értékelés során elért eredményeim a következők:

X. Kidolgoztam az elvét annak, hogy hogyan alkalmazhatóak a mobil mérések adatai a lokális klímazónák hőmérsékleti összehasonlítása céljából (Lelovics et al. 2013, Unger et al. 2014b). A vizsgálat keretében a világon az elsők között sikerült bizonyítani, hogy a termikus sajátosságok alapján elkülönített LCZ osztályok valóban eltérő UHI viszonyokat eredményeznek.

XI. Az Urban-Path monitoring rendszer méréseit alkalmazva részletesen demonstráltam az egyes LCZ osztályok napi hőmérsékleti meneteinek eltéréseit (Unger et al. 2015, Lelovics et al. 2016, Skarbit et al. 2017).

XII. Kidolgoztam annak az elemzésnek a koncepcióját, amellyel lehetségessé vált kimutatni azt, hogy LCZ osztályokra vonatkozó átlagos léghőmérsékleti különbségek az éjjeli órák eltéréseiből adódnak (Lelovics et al. 2016, Unger et al. 2017, Skarbit et al. 2017).

XII. Felismertem, hogy a városi hűvös sziget a hazai viszonyok között is kialakul és jelentős hatással van a városi éghajlati viszonyokra jellemzően a nappali órákban (Lelovics et al. 2016, Skarbit et al. 2017).

XIII. Kidolgoztam annak a vizsgálatnak a koncepcióját, amellyel lehetséges a napi időjárás faktor felhasználásával a lokális klímazónák hőmérsékleti viszonyainak és több időjárás tényező együttes kapcsolatának az elemzése (Skarbit et al. 2018). Felhívtam a figyelmet arra, hogy az UHI nagysága a kompakt beépítés esetén erősen függ az időjárás helyzettől, addig az LCZ 9 esetén jóval kisebb az időjárás szerepe, valamint arra, hogy a 0,7 feletti időjárás faktorral jellemezhető időjárás helyzetek mindegyike kedvező az UHI erős kifejlődése szempontjából.

XIV. Felismertem és demonstráltam, hogy a relatív nedvesség elemzése nem alkalmas arra, hogy a város légnedvesség módosító hatását vizsgáljuk (Unger et al. 2018b).

XV. Megvizsgáltam a lokális klímazónák légnedvességi viszonyait gőznyomás adatok alkalmazásával és rámutattam, hogy nincs egyértelmű különbség az LCZ területek nedvességi viszonyai között, valamint erősen dominálnak a mikro léptékű hatások (Unger et al. 2018a).

XVI. Kidolgoztam egy olyan módszert, amellyel lehetséges a város humánkomfort viszonyainak (PET) térbeli és LCZ szerinti számítása és elemzése (Unger et al. 2018c, Unger et al. 2020a). Az eredmények rávilágítanak arra, hogy hőhullámok idején a kompakt LCZ területeken jelentősen kitolódik a terhelő humánkomfort viszonyok időszaka.

XVII. Felismertem, hogy az lokális klímazónákban uralkodó termikus viszonyok összehasonlításának egy szemléletes és célravezető módja a klímaindexek alkalmazása (Lelovics et al. 2016, Unger et al. 2017). Az eredmények rávilágítottak arra, hogy a napi maximum alapján definiált klímaindexek esetén az LCZ-k termikus reakciói között alig ismerhető fel különbség azonban a napi minimum alapján definiált indexek esetén a különböző városi beépítést reprezentáló LCZ-k jelentős eltéréseket produkálnak.

A lokális klímazónákon alapuló klíma és időjárás modellezés kapcsán az eredményeim a következők:

XVII. Felismertem, hogy a lokális klímazónák alkalmazásával lehetséges pontosítani a városi léptékű klíma és időjárás modelleket. Irányításommal kidolgozásra került az LCZ séma alkalmazása több ilyen modellben (WRF: Molnár et al. 2017, 2018, 2019a, 2019b, 2020,

MUKLIMO_3: Skarbit, Gál 2016, Bokwa et al. 2018, 2019, Gál et al. 2021a, 2021b, modellek összehasonlítása: Gál et al. 2018). A kapott eredmények rámutatnak arra, hogy főleg az éjjeli órákban a modellek pontosságán jelentősen javít az LCZ alkalmazása és jó alapot teremt a további ilyen irányú kutatások számára.

XVIII. Kidolgoztam a koncepcióját egy olyan elemzésnek, amely keretében lehetséges a Kárpát-medence jelentősebb városi területeire vonatkozó, terhelő termikus helyzeteket jellemző (trópusi éjszaka) klímaindex projekciója (Unger et al. 2020b, Gál et al. 2021b). A vizsgálat keretében rámutattam, hogy a klímaváltozás és a városklíma kölcsönhatása következtében a kompakt beépítésű területeken jelentősen nő a hőterhelés számos városban.

XIX. Felismertem és demonstráltam, hogy a lokális klímazónák rendszere, kombinálva városi léptékű klímamodellel, alkalmas a növényzettel kapcsolatos várostervezési lépések klimatikus hatásainak elemzésére (Gál et al. 2021a, Skarbit et al. 2021).

XX. Az LCZ alapú városi léptékű klímamodell vizsgálatok alapján megmutattam, hogy a városi területen, illetve azok környékén elhelyezett sűrű erdőhöz hasonlító parkok vagy véderdők klimatikus hatásai nem egyértelműen kedvezőek (Gál et al. 2021a, Skarbit et al. 2021). A vizsgálatok eredményei rámutatnak arra is, hogy a változatos jellegű zöldterületek (sűrű erdő, ligetes erdő, rövid növényzet) kombinációja jóval alkalmasabb a városi léptékű klíma mitigációs törekvések elősegítésére.

A felsorolt tézisek jelentős része nem egy tudományos kutatás lezárása, sokkal inkább annak csak egy köztes fázisa. Számos eredményem rámutatott arra, hogy az értekezés témájában van helye további vizsgálatoknak, módszertani fejlesztéseknek és összetett elemzéseknek. Véleményem szerint jelentős potenciál van a lokális klímazónák alkalmazásával történő városi léptékű időjárás és klímamodellezésben, amelyhez kiváló alapot teremt az LCZ-re reprezentatív városklíma monitoring rendszer, a városi felszínparaméterek és egyéb adatok szempontjából részletesen feltárt és a városklimatológiai vizsgálatok szempontjából ideális adottságokkal rendelkező szegedi mintaterület. A kutatási eredményeim elérése lehetetlen lett volna a szegedi Városklíma Kutatócsoport nélkül, ahol jelentős tapasztalat és tudás gyűlt össze az elmúlt évtizedek során, és bízom benne, hogy a jövőben – a dolgozatban felvázolt kutatómunka ívét folytatva – a csoport hazai városklíma kutatás motorja és a nemzetközi városklimatológiai közösség jelentős tagja tud maradni.

Irodalom

- Aboelata A, Sodoudi S, 2019: Evaluating urban vegetation scenarios to mitigate urban heat island and reduce buildings' energy in dense built-up areas in Cairo. *Building and Environment* 166, 106407
- Adachi SA, Kimura F, Kusaka H, Inoue T, Ueda H. 2012: Comparison of the impact of global climate changes and urbanization on summertime future climate in the Tokyo metropolitan area. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 51, 1441-1454
- Agathangelidis I, Cartalis C, Santamouris M, 2020: Urban morphological controls on surface thermal dynamics: A comparative assessment of major European cities with a focus on Athens, Greece. *Climate* 8, 131
- Al Abadla Z, Schlink U, Wahab MA, Robaa SM, 2020: Urban Heat Island and Thermal Human Comfort in Tulkarm, West Bank, Palestine. *Journal of Materials and Environmental Science* 11, 1361-1373
- Alcoforado MJ, Andrade H, 2006: Nocturnal urban heat island in Lisbon (Portugal): main features and modelling attempts. *Theoretical and Applied Climatology* 84, 151-159
- Alexander PJ, Mills G, 2014: Local climate classification and Dublin's urban heat island. *Atmosphere* 5, 755-774
- Alexander PJ, Mills G, Fealy R, 2015: Using LCZ data to run an urban energy balance model. *Urban Climate* 13, 14-37
- Alexander PJ, Bechtel B, Chow WT, Fealy R, Mills G, 2016: Linking urban climate classification with an urban energy and water budget model: Multi-site and multi-seasonal evaluation. *Urban Climate* 17, 196-215
- Alfano FRDA, Palella BI, Riccio G, 2010: Thermal environment assessment reliability using temperature–humidity indices. *Industrial Health*, 1008190028-1008190028
- Allen MR, Frame DJ, Huntingford C, Jones CD, Lowe JA, Meinshausen M, Meinshausen N, 2009: Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne. *Nature* 458, 1163-1166
- Aminipouri M, Knudby AJ, Krayenhoff ES, Zickfeld K, Middel A, 2019: Modelling the impact of increased street tree cover on mean radiant temperature across Vancouver's local climate zones. *Urban Forestry and Urban Greening* 39, 9-17
- Anderson JR, 1976: A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. Vol. 964, US Government Printing Office
- Andrade H, Alcoforado MJ, 2008: Microclimatic variation of thermal comfort in a district of Lisbon (Telheiras) at night. *Theoretical and Applied Climatology* 92, 225-237
- Ang YQ, Berzolla ZM, Reinhart CF, 2020: From concept to application: A review of use cases in urban building energy modeling. *Applied Energy* 279, 115738
- Anjos M, Targino AC, Krecel P, Oukawa GY, Braga RF, 2020a: Analysis of the urban heat island under different synoptic patterns using local climate zones. *Building and Environment* 185, 107268
- Anjos M, Lopes A, Lucena AJD, Mendonça F, 2020b: Sea breeze front and outdoor thermal comfort during summer in Northeastern Brazil. *Atmosphere* 11, 1013
- Arola T, Korkka-Niemi K, 2014: The effect of urban heat islands on geothermal potential: examples from Quaternary aquifers in Finland. *Hydrogeology Journal* 22, 1953-1967
- ASHARE 2004: Thermal environmental conditions for human occupancy 55, No. 2004. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
- Aslam A, Rana IA, Bhatti SS, 2022: Local climate zones and its potential for building urban resilience: a case study of Lahore, Pakistan. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment* 13, 248-265
- Auer AH, 1978: Correlation of land use and cover with meteorological anomalies, *Journal of Applied Meteorology* 17, 636-643
- Balázs B, Unger J, Gál T, Sümeghy Z, Geiger J, Szegedi S, 2009: Simulation of the mean urban heat island using 2D surface parameters: empirical modelling, verification and extension. *Meteorological Applications* 16, 275-287
- Bande L, Manandhar P, Ghazal R, Marpu P, 2020a: Characterization of local climate zones using ENVI-met and site data in the city of Al-Ain, UAE. *International Journal of Sustainable Development and Planning* 15, 751-760
- Bande L, Manandhar P, Marpu P, Al Battah M, 2020b: April. Local Climate Zones Definition in Relation to ENVI-met in the City of Dubai, UAE. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 829, 012013
- Bechtel B, Daneke C, 2012: Classification of local climate zones based on multiple earth observation data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 5, 1191-1202
- Bechtel B, Alexander PJ, Böhner J, Ching J, Conrad O, Feddema J, Mills G, See L, Stewart I, 2015: Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 4, 199-219

- Bechtel B, Alexander PJ, Beck C, Böhner J, Brousse O, Ching J, Demuzere M, Fonte C, Gál T, Hidalgo J, Hoffmann P, 2019a: Generating WUDAPT Level 0 data—Current status of production and evaluation. *Urban Climate* 27, 24-45
- Bechtel B, Demuzere M, Mills G, Zhan W, Sismanidis P, Small C, Voogt J, 2019b: SUHI analysis using Local Climate Zones - A comparison of 50 cities. *Urban Climate* 28, 100451
- Berlessova AA, Konstantinov PI, 2020: December. Local climate zones in the city of Nur-Sultan (Kazakhstan) and their connections with urban heat island and thermal comfort. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 611, 012060
- Best MJ, Grimmond CSB, Villani MG, 2006: Evaluation of the urban tile in MOSES using surface energy balance observations. *Boundary-Layer Meteorology* 118, 503-525
- Bezerra P, da Silva F, Cruz T, Mistry M, Vasquez-Arroyo E, Magalar L, De Cian E, Lucena AF, Schaeffer R, 2021: Impacts of a warmer world on space cooling demand in Brazilian households. *Energy and Buildings* 234, 110696
- Binarti F, Pranowo P, Aditya C, Matzarakis A, 2022: Does the Local Climate Zone of Archaeological Sites Exist? SSRN 4104484
- Binarti F, Triyadi S, Koerniawan MD, Pranowo P, Matzarakis A, 2021: Climate characteristics and the adaptation level to formulate mitigation strategies for a climate-resilient archaeological park. *Urban Climate* 36, 100811
- Bokwa A, Dobrovolný P, Gál T, Geletič J, Gulyas A, Hajto MJ, Holec J, Hollosi B, Kielar R, Lehnert M, Skarbit N, Stastny P, Svec M, Unger J, Walawender JP, Žuvela-Alois M, 2018: Urban climate in Central European cities and global climate change. *Acta Climatologica* 51-52, 7-35
- Bokwa A, Geletič J, Lehnert M, Žuvela-Aloise M, Hollósi B, Gál T, Skarbit N, Dobrovolný P, Hajto MJ, Kielar R, Walawender JP, 2019: Heat load assessment in Central European cities using an urban climate model and observational monitoring data. *Energy and Buildings* 201, 53-69
- Bolz HM, 1949: Die Abhängigkeit der infraroten Gegenstrahlung von der Bewölkung. *Meteorologische Zeitschrift* 3, 201-203
- Bordás Á, 2017: Construction of a low-budget quadrocopter and design of a simple measuring module applicable for atmospheric measurements. In: Király A, Tél T (ed): *Teaching Physics Innovatively: New Learning Environments and Methods in Physics Education*. ELTE, Budapest
- Bossard M, Feranec J, Otahel J, 2000: CORINE land cover technical guide: Addendum 2000 Vol. 40. Copenhagen: European Environment Agency
- Bottyán Z, Kircsi A, Szegedi S, Unger J, 2005: The relationship between built-up areas and the spatial development of the mean maximum urban heat island in Debrecen, Hungary. *International Journal of Climatology* 25, 405-418
- Bougeault P, Lacarrere P, 1989: Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta--scale model. *Monthly Weather Review* 117, 1872-1890
- Bröde P, Fiala D, Blázejczyk K, Holmér I, Jendritzky G, Kampmann B, Tinz B, Havenith G, 2012: Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology* 56, 481-494
- Brousse O, Martilli A, Foley M, Mills G, 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
- Brousse O, Georganos S, Demuzere M, Vanhuyse S, Wouters H, Wolff E, Linard C, Nicole PM, Dujardin S, 2019: Using local climate zones in sub-Saharan Africa to tackle urban health issues. *Urban Climate* 27, 227-242
- Brousse O, Wouters H, Demuzere M, Thiery W, Van de Walle J, Van Lipzig NP, 2020: The local climate impact of an African city during clear-sky conditions—Implications of the recent urbanization in Kampala (Uganda). *International Journal of Climatology* 40, 4586-4608
- Brozovsky J, Radivojevic J, Simonsen A, 2022: Assessing the impact of urban microclimate on building energy demand by coupling CFD and building performance simulation. *Journal of Building Engineering*, 104681
- Bruse M, Fleer H, 1998: Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling and Software* 13, 373-384
- Bruse M, 2004: ENVI-met 3.0: updated model overview. University of Bochum
- Buchholz S, Kossmann M, 2015: Research note. Visualisation of summer heat intensity for different settlement types and varying surface fraction partitioning. *Landscape and Urban Planning* 144, 59-64
- Cai M, Ren C, Xu Y, Dai W, Wang XM, 2016: Local climate zone study for sustainable megacities development by using improved WUDAPT methodology—a case study in Guangzhou. *Procedia Environmental Sciences* 36, 82-89
- Cai M, Ren C, Xu Y, 2017: Investigating the relationship between local climate zone and land surface temperature. In 2017 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE), IEEE

- Cai M, Ren C, Xu Y, Lau KKL, Wang R, 2018: Investigating the relationship between local climate zone and land surface temperature using an improved WUDAPT methodology—A case study of Yangtze River Delta, China. *Urban Climate* 24, 485-502
- Cai Z, Tang Y, Chen K, Han G, 2019: Assessing the heat vulnerability of different local climate zones in the old areas of a Chinese megacity. *Sustainability* 11, 2032
- Cardoso RDS, Amorim MCDCT, 2018: Urban heat island analysis using the ‘local climate zone’ scheme in Presidente Prudente, Brazil. *Investigaciones Geográficas* 69, 107-118
- Champeaux JL, Masson V, Chauvin F, 2005: ECOCLIMAP: a global database of land surface parameters at 1 km resolution. *Meteorological Applications* 12, 29-32
- Chandler TJ, 1965: *The Climate of London*. Hutchinson
- Chapman L, Muller CL, Young DT, Warren EL, Grimmond CSB, Cai XM, Ferranti EJ, 2015: The Birmingham urban climate laboratory: an open meteorological test bed and challenges of the smart city. *Bulletin of the American Meteorological Society* 96, 1545-1560
- Chatterjee S, Khan A, Dinda A, Mithun S, Khatun R, Akbari H, Kusaka H, Mitra C, Bhatti SS, Van Doan Q, Wang Y, 2019: Simulating micro-scale thermal interactions in different building environments for mitigating urban heat islands. *Science of the Total Environment* 663, 610-631
- Chen F, Kusaka H, Bornstein R, Ching J, Grimmond CSB, Grossman-Clarke S, Loridan T, Manning KW, Martilli A, Miao S, Sailor D, 2011: The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *International Journal of Climatology* 31, 273-288
- Chen YC, Lin TP, Shih WY, 2017: Modeling the urban thermal environment distributions in Taipei Basin using Local Climate Zone (LCZ). In 2017 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE), IEEE
- Chen YC, Lo TW, Shih WY, Lin TP, 2019: Interpreting air temperature generated from urban climatic map by urban morphology in Taipei. *Theoretical and Applied Climatology* 137, 2657-2662
- Chen Y, Zheng B, Hu Y, 2020a: Mapping Local Climate Zones Using ArcGIS-Based Method and Exploring Land Surface Temperature Characteristics in Chenzhou, China. *Sustainability* 12, 2974
- Chen Y, Zheng B, Hu Y, 2020b: Numerical simulation of local climate zone cooling achieved through modification of trees, albedo and green roofs—a case study of Changsha, China. *Sustainability* 12, 2752
- Chen YC, Cheng FY, Yang CP, Lin TP, 2021: Explore the Accuracy of the Pedestrian Level Temperature Estimated by the Combination of LCZ with WRF Urban Canopy Model through the Microclimate Measurement Network. *Environmental Sciences Proceedings* 8, 14
- Chiles JP, Delfiner P, 2009: *Geostatistics: modeling spatial uncertainty*. John Wiley and Sons
- Ching J, Mills G, Bechtel B, See L, Feddema J, Wang X, Ren C, Brousse O, Martilli A, Neophytou M, Mouzourides P, 2018: WUDAPT: An urban weather, climate, and environmental modeling infrastructure for the anthropocene. *Bulletin of the American Meteorological Society* 99, 1907-1924
- Chiappa J, Bush A, Mitra C, 2018: Using “Local Climate Zones” to detect urban heat island on two small cities in Alabama. *Earth Interactions* 22, 1-22
- Cilek MU, Cilek A, 2021: Analyses of land surface temperature (LST) variability among local climate zones (LCZs) comparing Landsat-8 and ENVI-met model data. *Sustainable Cities and Society* 69, 102877
- Cilek MU, Uslu C, 2021: The Thermal Comfort of Local Climate Zone: in the Case of Hot-Humid Adana City. *International Journal of Engineering Research and Applications* 11, 37-44
- Cilek MU, Uslu C, 2022: Modeling the relationship between the geometric characteristics of urban green spaces and thermal comfort: The case of Adana city. *Sustainable Cities and Society* 79, 103748
- Caluwaerts S, Hamdi R, Top S, Lauwaet D, Berckmans J, Degrauwe D, Dejonghe H, De Ridder K, De Troch R, Duchêne F, Maiheu B, 2020: The urban climate of Ghent, Belgium: A case study combining a high-accuracy monitoring network with numerical simulations. *Urban Climate* 31, 100565
- Coccolo S, Kämpf J, Scartezzini JL, Pearlmutter D, 2016: Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards. *Urban Climate* 18, 33-57
- Cohen P, Potchter O, Matzarakis A, 2013: Human thermal perception of Coastal Mediterranean outdoor urban environments. *Applied Geography* 37, 1-10
- Cohen P, West SG, Aiken LS, 2014: *Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences*. Psychology press
- Collins J, Dronova I, 2019: Urban landscape change analysis using local climate zones and object-based classification in the Salt Lake Metro Region, Utah, USA. *Remote Sensing* 11, 1615
- Colunga ML, Cambrón-Sandoval VH, Suzán-Azpiri H, Guevara-Escobar A, Luna-Soria H, 2015: The role of urban vegetation in temperature and heat island effects in Querétaro city, Mexico. *Atmósfera* 28, 205-218
- Counihan JO, 1975: Adiabatic atmospheric boundary layers: a review and analysis of data from the period 1880-1972. *Atmospheric Environment* 9, 871-905
- Dandou A, Tombrou M, Akylas E, Soulakellis N, Bossioli E, 2005: Development and evaluation of an urban parameterization scheme in the Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 110

- Daniel M, Lemonsu A, Déqué M, Somot S, Alias A, Masson V, 2019: Benefits of explicit urban parameterization in regional climate modeling to study climate and city interactions. *Climate Dynamics* 52, 2745-2764
- Daniels EE, Lenderink G, Hutjes RWA, Holtslag AAM, 2016: Observed urban effects on precipitation along the Dutch West coast. *International Journal of Climatology* 36, 2111-2119
- Das M, Das A, 2019: Estimation of ecosystem services (EESs) loss due to transformation of local climatic zones (LCZs) in Sriniketan-Santiniketan planning area (SSPA) West Bengal, India. *Sustainable Cities and Society* 47, 101474
- Das M, Das A, 2020: Exploring the pattern of outdoor thermal comfort (OTC) in a tropical planning region of eastern India during summer. *Urban Climate* 34, 100708
- Das M, Das A, Mandal S, 2020: Outdoor thermal comfort in different settings of a tropical planning region: a study on Sriniketan-Santiniketan Planning Area (SSPA), Eastern India. *Sustainable Cities and Society* 63, 102433
- Davenport AG, Grimmond SB, Oke TR, Wieringa J, 2000: Estimating the roughness of cities and sheltered country. *Proceedings of 12th Conference on Applied Climatology*, 4B.2, 96-99
- De Ridder K, Lauwaet D, Maiheu B, 2015: UrbClim–A fast urban boundary layer climate model. *Urban Climate* 12, 21-48
- De Troch R, Hamdi R, Van de Vyver H, Geleyn JF, Termonia P, 2013: Multiscale performance of the ALARO-0 model for simulating extreme summer precipitation climatology in Belgium. *Journal of Climate* 26, 8895-8915
- Deilami K, Kamruzzaman M, 2017: Modelling the urban heat island effect of smart growth policy scenarios in Brisbane. *Land Use Policy* 64, 38-55
- Demuzere M, Bechtel B, Middel A, Mills G, 2019: Mapping Europe into local climate zones. *PloS one* 14, p.e0214474
- Demuzere M, Kittner J, Bechtel B, 2021: LCZ Generator: A Web Application to Create Local Climate Zone Maps. *Frontiers in Environmental Science* 9, 637455
- Demuzere M, Kittner J, Martilli A, Mills G, Moede C, Stewart ID, van Vliet J, Bechtel B, 2022: A global map of Local Climate Zones to support earth system modelling and urban scale environmental science. *Earth System Science Data Discussions*, 1-57
- Dian C, Pongrácz R, Dezső Z, Bartholy J, 2020: Annual and monthly analysis of surface urban heat island intensity with respect to the local climate zones in Budapest. *Urban Climate* 31, 100573
- Dimitrov S, Popov A, Iliev M, 2021: An Application of the LCZ Approach in Surface Urban Heat Island Mapping in Sofia, Bulgaria. *Atmosphere* 12, 1370
- Du R, Song J, Huang X, Wang Q, Zhang C, Brousse O, Chan PW, 2022: High-resolution regional modeling of urban moisture island: mechanisms and implications on thermal comfort. *Building and Environment* 207, 108542
- Duarte D, Gonçalves FL, 2018: The role of planning, urban and building design for climate adaptation. In *The Microscale: An interdisciplinary research experience empowering architectural*. PLEA
- Dupont S, Mestayer PG, 2006: Parameterization of the urban energy budget with the submesoscale soil model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 45, 1744-1765
- Égerházi LA, Kántor N, Takács Á, Unger J, 2012: Patterns of attendance and thermal conditions on a pedestrian street. *Proceedings of the 8th International Conference on Urban Climate*, 170
- Ellefsen R, 1991: Mapping and measuring buildings in the urban canopy boundary layer in ten US cities. *Energy and Buildings* 16, 1025-1049
- Emery X, 2006: Multigaussian kriging for point-support estimation: incorporating constraints on the sum of the kriging weights. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 20, 53-65
- Emmanuel R, 2005: Thermal comfort implications of urbanization in a warm-humid city: the Colombo Metropolitan Region (CMR), Sri Lanka. *Building and Environment* 40, 1591-1601
- Emmanuel R, Krüger E, 2012: Urban heat island and its impact on climate change resilience in a shrinking city: The case of Glasgow, UK. *Building and Environment* 53, 137-149
- Emmanuel R, Loconsole A, 2015: Green infrastructure as an adaptation approach to tackling urban overheating in the Glasgow Clyde Valley Region, UK. *Landscape and Urban Planning* 138, 71-86
- Emmanuel R, Loconsole A, Drach P, 2015: Green infrastructure enhancement in Glasgow: A proposal based on Local Climate Zone evaluation of urban morphology in a shrinking city. *Proceedings of the 9th International Conference on Urban Climate*
- Estacio I, Babaan J Pecson, NJ, Blanco AC, Escoto JE, Alcantara CK, 2019: GIS- based mapping of local climate zones using fuzzy logic and cellular automata. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*
- Fang Z, Lin Z, Mak CM, Niu J, Tse KT, 2018: Investigation into sensitivities of factors in outdoor thermal comfort indices. *Building and Environment* 128, 129-142
- Fanger PO, 1970: Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Danish Technical Press

- Feddema J, Mills G, Ching J, 2015: Demonstrating the added value of WUDAPT for urban climate modelling. Proceedings of the 9th International Conference on Urban Climate
- Fenner D, Meier F, Bechtel B, Otto M, Scherer D, 2017: Intra and inter 'local climate zone' variability of air temperature as observed by crowdsourced citizen weather stations in Berlin, Germany. *Meteorologische Zeitschrift* 26, 525-547
- Fernández ME, Picone N, Gentili JO, Campo AM, 2021: Analysis of the Urban Energy Balance in Bahía Blanca (Argentina). *Urban Climate* 37, 100856
- Ferreira LS, Duarte DHS, 2019: Exploring the relationship between urban form, land surface temperature and vegetation indices in a subtropical megacity. *Urban Climate* 27, 105-123
- Foken T, 2016: *Angewandte meteorologie*. Springer Spektrum
- Fortuniak K, 2003: An application of the urban energy balance scheme for a statistical modeling of the UHI intensity. Proceedings of the 5th International Conference on Urban Climate, 1, 59-62
- Founda D, Santamouris M, 2017: Synergies between Urban Heat Island and Heat Waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012). *Scientific Reports* 7, 1-11
- Franco DMP, de Fatima Andrade M, Ynoue RY, Ching J, 2019: Effect of Local Climate Zone (LCZ) classification on ozone chemical transport model simulations in Sao Paulo, Brazil. *Urban Climate* 27, 293-313
- Fricke C, Pongrácz R, Gál T, Savić S, Unger J, 2020: Using local climate zones to compare remotely sensed surface temperatures in temperate cities and hot desert cities. *Moravian Geographical Reports* 28, 48-60
- Früh B, Becker P, Deutschländer T, Hessel JD, Kossmann M, Mieskes I, Namyslo J, Roos M, Sievers U, Steigerwald T, Turau H, 2011: Estimation of climate-change impacts on the urban heat load using an urban climate model and regional climate projections. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 50, 167-184
- Fu P, Weng Q, 2018: Responses of urban heat island in Atlanta to different land-use scenarios. *Theoretical and Applied Climatology* 133, 123-135
- Fujibe F, 2009: Detection of urban warming in recent temperature trends in Japan. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society* 29, 1811-1822
- Gabriel KM, Endlicher WR, 2011: Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. *Environmental Pollution* 159, 2044-2050
- Gagge AP, Stolwijk JAJ, Nishi Y, 1972: An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Hokkaido University* 13, 21-36
- Gál T, 2010: Az összetett városi felszín geometriáját leíró paraméterek számítása és városklimatológiai alkalmazása. PhD doktori értekezés, Szegedi Tudományegyetem
- Gál T, Unger J, 2009: Detection of ventilation paths using high-resolution roughness parameter mapping in a large urban area. *Building and Environment* 44, 198-206
- Gál T, Unger J, 2016a: Calculation of sky view factor and roughness parameters in a medium sized city. *Acta Climatologica* 49-50, 21-32
- Gál T, Unger J, 2016b: Városklíma hálózat Szegeden. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek* 27, 49-55
- Gál T, Lindberg F, Unger J, 2009: Computing continuous sky view factors using 3D urban raster and vector databases: comparison and application to urban climate. *Theoretical and Applied Climatology* 95, 111-123
- Gál T, Bechtel B, Unger J, 2015. Comparison of two different Local Climate Zone mapping methods. Proceedings of the 9th International Conference on Urban Climate
- Gál T, Skarbit N, Unger J, 2016: Urban heat island patterns and their dynamics based on an urban climate measurement network. *Hungarian Geographical Bulletin* 65, 105-116
- Gál T, Skarbit N, Molnár G, Gyöngyösi AZ, 2018: Weather and climate modeling possibilities using local climate zone concept and observation network in Szeged, Hungary. Proceedings of the 10th International Conference on Urban Climate, 193
- Gál T, Mahó SI, Skarbit N, Unger J, 2021a: Numerical modelling for analysis of the effect of different urban green spaces on urban heat load patterns in the present and in the future. *Computers, Environment and Urban Systems* 87, 101600
- Gál T, Skarbit N, Molnár G, Unger J, 2021b: Projections of the urban and intra-urban scale thermal effects of climate change in the 21st century for cities in the Carpathian Basin. *Hungarian Geographical Bulletin* 70, 19-33
- Gallo KP, Owen TW, 1999: Satellite-based adjustments for the urban heat island temperature bias. *Journal of Applied Meteorology* 38, 806-813
- Ganeshan M, Murtugudde R, Imhoff ML, 2013: A multi-city analysis of the UHI-influence on warm season rainfall. *Urban Climate* 6, 1-23
- Gardes T, Schoetter R, Hidalgo J, Long N, Marquès E, Masson V, 2020: Statistical prediction of the nocturnal urban heat island intensity based on urban morphology and geographical factors-An

- investigation based on numerical model results for a large ensemble of French cities. *Science of the Total Environment* 737, 139253
- Garuma GF, 2018: Review of urban surface parameterizations for numerical climate models. *Urban Climate* 24, 830-851
- Geletič J, Lehnert M, 2016: GIS-based delineation of local climate zones: The case of medium-sized Central European cities. *Moravian Geographical Reports* 24, 2-12
- Geletič J, Lehnert M, Dobrovolný P, 2016a: Land surface temperature differences within local climate zones, based on two central European cities. *Remote Sensing* 8, 788
- Geletič J, Lehnert M, Dobrovolný P, 2016: Modelled spatio-temporal variability of air temperature in an urban climate and its validation: a case study of Brno, Czech Republic. *Hungarian Geographical Bulletin* 65, 169-180
- Geletič J, Lehnert M, Savić S, Milošević D, 2018: Modelled spatiotemporal variability of outdoor thermal comfort in local climate zones of the city of Brno, Czech Republic. *Science of the Total Environment* 624, 385-395
- Geletič J, Lehnert M, Dobrovolný P, Žuvela-Aloise M, 2019: Spatial modelling of summer climate indices based on local climate zones: expected changes in the future climate of Brno, Czech Republic. *Climatic Change* 152, 487-502
- Geletič J, Lehnert M, Jurek M, 2020: Spatiotemporal variability of air temperature during a heat wave in real and modified landcover conditions: Prague and Brno (Czech Republic). *Urban Climate* 31, 100588
- Gémes O, Tobak Z, Van Leeuwen B, 2016: Satellite based analysis of surface urban heat island intensity. *Journal of Environmental Geography* 9, 23-30
- Giannaros TM, Melas D, Daglis IA, Keramitsoglou I, Kourtidis K, 2013: Numerical study of the urban heat island over Athens (Greece) with the WRF model. *Atmospheric Environment* 73, 103-111
- Gilabert J, Ventura S, Segura R, Martilli A, Badia A, Llasat C, Corbera J, Villalba G, 2021a: Abating heat waves in a coastal Mediterranean city: What can cool roofs and vegetation contribute? *Urban Climate* 37, 100863
- Gilabert J, Deluca A, Lauwaet D, Ballester J, Corbera J, Llasat MC, 2021b: Assessing heat exposure to extreme temperatures in urban areas using the Local Climate Zone classification. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 21, 375-391
- Giridharan R, Lau SSY, Ganesan S, Givoni B, 2007: Urban design factors influencing heat island intensity in high-rise high-density environments of Hong Kong. *Building and Environment* 42, 3669-3684
- Givoni B, Khedari J, Wong NH, Feriadi H, Noguchi M, 2006: Thermal sensation responses in hot, humid climates: effects of humidity. *Building Research and Information* 34, 496-506
- Goldreich Y, 1970: Computation of the magnitude of Johannesburg's heat island. *Notos* 19, 95-106
- Gonçalves A, Ornellas G, Castro Ribeiro A, Maia F, Rocha A, Feliciano M, 2018: Urban cold and heat island in the city of Bragança (Portugal). *Climate* 6, 70
- González JCG, 2015: Eu-Dem Upgrade: Documentation EEA User Manual 12
- Gulyás Á, Unger J, Matzarakis A, 2006: Assessment of the microclimatic and human comfort conditions in a complex urban environment: modelling and measurements. *Building and Environment* 41, 1713-1722
- Gupta K, Pushplata TR, Nekkla S, Kumar P, Kumar AS, 2017: Investigating the relationship of urban form and function with surface temperature patterns: A case study of Chandigarh. 38th Asian Conference on Remote Sensing: Space Applications: Touching Human Lives
- Hagishima A, Tanimoto J, Narita KI, 2005: Intercomparisons of experimental convective heat transfer coefficients and mass transfer coefficients of urban surfaces. *Boundary-Layer Meteorology* 117, 551-576
- Hajat S, O'Connor M, Kosatsky T, 2010: Health effects of hot weather: from awareness of risk factors to effective health protection. *The Lancet* 375, 856-863
- Hall M, Frank E, Holmes G, Pfahringer B, Reutemann P, Witten IH, 2009: The WEKA data mining software: an update. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter* 11, 10-18
- Hamdi R, Masson V, 2008: Inclusion of a drag approach in the Town Energy Balance (TEB) scheme: Offline 1D evaluation in a street canyon. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47, 2627-2644
- Hammerberg K, Brousse O, Martilli A, Mahdavi A, 2018: Implications of employing detailed urban canopy parameters for mesoscale climate modelling: a comparison between WUDAPT and GIS databases over Vienna, Austria. *International Journal of Climatology* 38, e1241-e1257
- Hämmerle M, Gál T, Unger J, Matzarakis A, 2011: Comparison of models calculating the sky view factor used for urban climate investigations. *Theoretical and Applied Climatology* 105, 521-527
- Haykin S, 1994: *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, MacMillan College Publishing Co. New York
- Heldens W, Burmeister C, Kanani-Sühring F, Maronga B, Pavlik D, Sühring M, Zeidler J, Esch T, 2020: Geospatial input data for the PALM model system 6.0: model requirements, data sources and processing. *Geoscientific Model Development* 13, 5833-5873

- Herbel I, Croitoru AE, Rus I, Harpa GV, Ciupertea AF, 2016: Detection of atmospheric urban heat island through direct measurements in Cluj-Napoca city, Romania. *Hungarian Geographical Bulletin* 65, 117-128
- Hertwig D, Ng M, Grimmond S, Vidale PL, McGuire PC, 2021: High-resolution global climate simulations: Representation of cities. *International Journal of Climatology* 41, 3266-3285
- Hidalgo J, Dumas G, Masson V, Petit G, Bechtel B, Bocher E, Foley M, Schoetter R, Mills G, 2019: Comparison between local climate zones maps derived from administrative datasets and satellite observations. *Urban Climate* 27, 64-89
- Hinkel KM, Klene AE, Nelson FE, 2004: The summer climate of an arctic coastal village: Preliminary observations from the Barrow Urban Heat-Island study. *Polar Geography* 28, 197-221
- Hirashima SDS, Katzschner A, Ferreira DG, de Assis ES, Katzschner L, 2018: Thermal comfort comparison and evaluation in different climates. *Urban Climate* 23, 219-230
- Holec J, Feranec J, Št'astný P, Szatmári D, Kopecká M, Garaj M, 2020: Evolution and assessment of urban heat island between the years 1998 and 2016: case study of the cities Bratislava and Trnava in western Slovakia. *Theoretical and Applied Climatology* 141, 979-997
- Homer C, Huang C, Yang L, Wylie B, Coan M, 2004: Development of a 2001 national land-cover database for the United States. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 70, 829-840
- Hong SY, Dudhia J, Chen SH, 2004: A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Monthly Weather Review* 132, 103-120
- Höppe PR, 1993: Heat balance modelling. *Experientia* 49, 741-746
- Höppe PR, 1999: The physiological equivalent temperature—a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology* 43, 71-75
- Houet T, Pigeon G, 2011: Mapping urban climate zones and quantifying climate behaviors e An application on Toulouse urban area (France). *Environmental Pollution* 159, 2180-2192
- Howard L, 1818: The climate of London: deduced from meteorological observations, made at different places in the neighbourhood of the metropolis.
- Howard L, 2007: The climate of London. IAUC edition
- Hu J, Yang Y, Pan X, Zhu Q, Zhan W, Wang Y, Ma W, Su W, 2019: Analysis of the spatial and temporal variations of land surface temperature based on local climate zones: A case study in Nanjing, China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 12, 4213-4223
- Huttner S, Bruse M, 2009: Numerical modeling of the urban climate—a preview on ENVI-met 4.0. *Proceedings of the 7th International Conference on Urban Climate*
- Hwang MK, Bang JH, Kim S, Kim YK, Oh I, 2019: Estimation of thermal comfort felt by human exposed to extreme heat wave in a complex urban area using a WRF-MENEX model. *International Journal of Biometeorology* 63, 927-938
- Ibitolu HA, 2020: Assessment of wind characteristics and urban heat island dynamics for urban planning: a case study of Toulouse, France. *MURCS Proceedings*, 29-41
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds. Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM). Cambridge University Press
- IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds. Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL). Cambridge University Press
- IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds. Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews JBR, Maycock TK, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R, Zhou B). Cambridge University Press
- IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds. Pörtner HO, Roberts DC, Tignor M, Poloczanska ES, Mintenbeck K, Alegría A, Craig M, Langsdorf S, Lösschke S., Möller V., Okem A., Rama B.). Cambridge University Press
- Jacob D, Petersen J, Eggert B, Alias A, Christensen OB, Bouwer LM, Braun A, Colette A, Déqué M, Georgievski G, Georgopoulou E, 2014: EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change* 14, 563-578
- Jackson TL, Feddema JJ, Oleson KW, Bonan GB, Bauer JT, 2010: Parameterization of urban characteristics for global climate modeling. *Annals of the Association of American Geographers* 100, 848-865
- Järvi L, Grimmond CSB, Christen A, 2011: The surface urban energy and water balance scheme (SUEWS): Evaluation in Los Angeles and Vancouver. *Journal of Hydrology* 411, 219-237

- Jendritzky G, de Dear R, Havenith G, 2012: UTCI-why another thermal index?. *International Journal of Biometeorology* 56, 421-428
- Jiang S, Zhan W, Yang J, Liu Z, Huang F, Lai J, Li J, Hong F, Huang Y, Chen J, Lee X, 2020: Urban heat island studies based on local climate zones: A systematic overview. *Acta Geographica Sinica* 75, 09001860
- Jiang S, Huang F, Zhan W, Bechtel B, Liu Z, Demuzere M, Huang Y, Xu Y, Quan J, Xia W, Ma L, 2021: Mapping Local Climate Zones: A Bibliometric Meta-Analysis and Systematic Review. Preprint, doi: 10.31219/osf.io/c2bez
- Jiménez PA, Dudhia J, González-Rouco JF, Navarro J, Montávez JP, García-Bustamante E, 2012: A revised scheme for the WRF surface layer formulation. *Monthly Weather Review* 140, 898-918
- Jin L, Pan X, Liu L, Liu L, Liu J, Gao Y, 2020: Block-based local climate zone approach to urban climate maps using the UDC model. *Building and Environment* 186, 107334
- Jing H, Feng Y, Zhang W, Zhang Y, Wang S, Fu K, Chen K, 2019: Effective classification of local climate zones based on multi-source remote sensing data. In *IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2666-2669
- Jones PD, Lister DH, 2009: The urban heat island in Central London and urban-related warming trends in Central London since 1900. *Weather* 64, 323-327
- Kabano P, Lindley S, Harris A, 2021: Evidence of urban heat island impacts on the vegetation growing season length in a tropical city. *Landscape and Urban Planning* 206, 103989
- Kain JS, 2004: The Kain–Fritsch convective parameterization: an update. *Journal of Applied Meteorology* 43, 170-181
- Kántor N, Unger J, 2010: Benefits and opportunities of adopting GIS in thermal comfort studies in resting places: an urban park as an example. *Landscape and Urban Planning* 98, 36-46
- Kántor N, Unger J, Gulyás Á, 2012a: Subjective estimations of thermal environment in recreational urban spaces—part 2: international comparison. *International Journal of Biometeorology* 56, 1089-1101
- Kántor N, Égerházi L, Unger J, 2012b: Subjective estimation of thermal environment in recreational urban spaces—part 1: investigations in Szeged, Hungary. *International Journal of Biometeorology* 56, 1075-1088
- Kántor N, Kovács A, Takács Á, 2016: Seasonal differences in the subjective assessment of outdoor thermal conditions and the impact of analysis techniques on the obtained results. *International Journal of Biometeorology* 60, 1615-1635
- Kántor N, Chen L, Gál CV, 2018: Human-biometeorological significance of shading in urban public spaces—Summertime measurements in Pécs, Hungary. *Landscape and Urban Planning* 170, 241-255
- Karl TR, Nicholls N, Ghazi A, 1999: Clivar/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes workshop summary. In *Weather and climate extremes*. Springer, Dordrecht
- Károssy Cs, Gyarmati Z, 1980: Városi hősziget kialakulása Szeged légtérében. *JGYTF Tudományos Közleményei*, 111-120
- Katzfey J, Schlünzen H, Hoffmann P, Thatcher M, 2020: How an urban parameterization affects a high-resolution global climate simulation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146, 3808-3829
- Khamchiangta D, Dhakal S, 2019: Physical and non-physical factors driving urban heat island: Case of Bangkok Metropolitan Administration, Thailand. *Journal of environmental management* 248, 109285
- Khellaf D, Abdou S, 2021: Quantification urban heat island (UHI) using the local climate zone classification (LCZ): A case study in Constantine. *Nature and Technology* 24, 1-15
- Koc CB, Osmond P, Peters A, Irger M, 2018: Understanding land surface temperature differences of local climate zones based on airborne remote sensing data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 11, 2724-2730
- Kong HY, Choi N, Park S, Lee J, Park S, 2018: A study on human thermal comfort of residential development districts in summer season. *Ecology and Resilient Infrastructure* 5, 219-228
- Konstantinov PI, Varentsov MI, Malinina EP, 2014: Modeling of thermal comfort conditions inside the urban boundary layer during Moscow's 2010 summer heat wave (case-study). *Urban Climate* 10, 563-572
- Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F, 2006: World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift* 15, 259-263
- Kotharkar R, Bagade A, 2018a: Local Climate Zone classification for Indian cities: A case study of Nagpur. *Urban climate* 24, 369-392
- Kotharkar R, Bagade A, 2018b: Evaluating urban heat island in the critical local climate zones of an Indian city. *Landscape and Urban Planning* 169, 92-104
- Kotharkar R, Bagade A, Agrawal A, 2019: Investigating local climate zones for outdoor thermal comfort assessment in an Indian city. *Geographica Pannonica* 23, 318-328
- Kotharkar R, Bagade A, Singh PR, 2020: A systematic approach for urban heat island mitigation strategies in critical local climate zones of an Indian city. *Urban Climate* 34, 100701

- Kotharkar R, Ghosh A, Kotharkar V, 2021: Estimating summertime heat stress in a tropical Indian city using Local Climate Zone (LCZ) framework. *Urban Climate* 36, 100784
- Kovács A, Unger J, Gál, CV, Kántor N, 2016: Adjustment of the thermal component of two tourism climatological assessment tools using thermal perception and preference surveys from Hungary. *Theoretical and Applied Climatology* 125, 113-130
- Krüger E, Rossi F, Drach P, 2017: Calibration of the physiological equivalent temperature index for three different climatic regions. *International Journal of Biometeorology* 61, 1323-1336
- Kullmann L, 2008: Az ALADIN numerikus előrejelző modell a rövid távú előrejelzés szolgálatában. *Meteorológiai Tudományos Napok*
- Kusaka H, Kimura F, 2004: Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: Impact on urban heat island simulation for an idealized case. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 82, 67-80
- Kusaka H, Kondo H, Kikegawa Y, Kimura F, 2001: A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models. *Boundary-Layer Meteorology* 101, 329-358
- Kusaka H, Hara M, Takane Y, 2012: Urban climate projection by the WRF model at 3-km horizontal grid increment: dynamical downscaling and predicting heat stress in the 2070's August for Tokyo, Osaka, and Nagoya metropolises. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 90, 47-63
- Kuttler W, Barlag AB, Robmann F, 1996: Study of the thermal structure of a town in a narrow valley. *Atmospheric Environment* 30, 365-378
- Kwok YT, Schoetter R, Lau KKL, Hidalgo J, Ren C, Pigeon G, Masson V, 2019: How well does the local climate zone scheme discern the thermal environment of Toulouse (France)? An analysis using numerical simulation data. *International Journal of Climatology* 39, 5292-5315
- La Y, Bagan H, Yamagata Y, 2020: Urban land cover mapping under the Local Climate Zone scheme using Sentinel-2 and PALSAR-2 data. *Urban Climate* 33, 100661
- Lac C, Chaboureaud JP, Masson V, Pinty JP, Tulet P, Escobar J, Leriche M, Barthe C, Aouizerats B, Augros C, Aumont P, 2018: Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications. *Geoscientific Model Development* 11, 1929-1969
- Lai D, Zhou C, Huang J, Jiang Y, Long Z, Chen Q, 2014: Outdoor space quality: A field study in an urban residential community in central China. *Energy and Buildings* 68, 713-720
- Lakatos M, Bihari Z, Izsák B, Szentes O, 2021: Globális és hazai éghajlati trendek, szélsőségek változása: 2020-as helyzetkép. *Scientia et Securitas* 2, 164-171
- Lam CKC, Gallant AJ, Tapper NJ, 2018: Perceptions of thermal comfort in heatwave and non-heatwave conditions in Melbourne, Australia. *Urban Climate* 23, 204-218
- Langer I, Fakhrazadehshirazi E, Werner J, 2021: Spatial variation of physiologically equivalent temperature in different Local Climate Zones of a large city during a hot spell. *Meteorologische Zeitschrift* 30, 115-125
- Lau KKL, Chung SC, Ren C, 2019: Outdoor thermal comfort in different urban settings of sub-tropical high-density cities: An approach of adopting local climate zone (LCZ) classification. *Building and Environment* 154, 227-238
- Lauwaet D, De Ridder K, Saeed S, Brisson E, Chatterjee F, Van Lipzig NPM, Maiheu B, Hooyberghs H, 2016. Assessing the current and future urban heat island of Brussels. *Urban Climate* 15, 1-15
- Le Moigne P, Boone A, Calvet JC, Decharme B, Faroux S, Gibelin AL, Lebeaupin C, Mahfouf JF, Martin E, Masson V, Mironov D, 2009: SURFEX scientific documentation. Note de centre (CNRM/GMME), Météo-France
- Lecante F, Bouyer J, Claverie R, Pétrissans M, 2015: Using Local Climate Zone scheme for UHI assessment: Evaluation of the method using mobile measurements. *Building and Environment* 83, 39-49
- Lee SH, Lee H, Park SB, Woo JW, Lee DI, Baik JJ, 2016: Impacts of in-canyon vegetation and canyon aspect ratio on the thermal environment of street canyons: numerical investigation using a coupled WRF-VUCM model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 142, 2562-2578
- Lehnert AM, Kubeček J, Geletić J, Jurek M, Frajer J, 2018: Identifying hot and cool spots in the city centre based on bicycle measurements: the case of Olomouc, Czech Republic. *Geographica Pannonica* 22, 230-240
- Lehnert M, Savić S, Milošević D, Dunjić J, Geletić J, 2021: Mapping local climate zones and their applications in European urban environments: A systematic literature review and future development trends. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 10, 260
- Lelovics E, Unger J, Gál T, 2013: A lokális klímazónák termikus sajátosságainak elemzése–szegedi esettanulmány. *Légekör* 58, 140-144
- Lelovics E, Unger J, Gál T, 2014: Design of an urban monitoring network based on Local Climate Zone mapping and temperature pattern modelling. *Climate Research* 60, 51-62

- Lelovics E, Unger J, Savić S, Gál T, Milošević D, Gulyás Á, Marković V, Arsenović D, Gál CV, 2016: Intra-urban temperature observations in two Central European cities: a summer study. *Időjárás* 120, 283-300
- Lemonsu A, Masson V, Shashua-Bar L, Erell E, Pearlmutter D, 2012: Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas. *Geoscientific Model Development* 5, 1377-1393
- Lemonsu A, Kounkou-Arnaud R, Desplat J, Salagnac JL, Masson V, 2013: Evolution of the Parisian urban climate under a global changing climate. *Climatic Change* 116, 679-692
- Lemonsu A, Viguie V, Daniel M, Masson V, 2015: Vulnerability to heat waves: Impact of urban expansion scenarios on urban heat island and heat stress in Paris (France). *Urban Climate* 14, 586-605
- Li Y, Fowler HJ, Argüeso D, Blenkinsop S, Evans JP, Lenderink G, Yan X, Guerreiro SB, Lewis E, Li XF, 2020: Strong intensification of hourly rainfall extremes by urbanization. *Geophysical Research Letters* 47, p.e2020GL088758
- Li X, Stringer LC, Dallimer M, 2022: The role of blue green infrastructure in the urban thermal environment across seasons and local climate zones in East Africa. *Sustainable Cities and Society* 80, 103798
- Liang T, He J, Chen L, Yao Z, Zhang L, Che H, Gong S, 2021: Simulation of the influence of a fine-scale urban underlying surface on the urban heat island effect in Beijing. *Atmospheric Research* 262, 105786
- Lillesand TM, Kiefer RW, 1979: Remote sensing and image interpretation. John Wiley and Sons
- Lin ZL, Xu HQ, 2017: A study of urban Heat Island intensity based on local climate zones. *Journal of Geo-Information Science* 19, 713-722
- Lin TP, Matzarakis A, 2008: Tourism climate and thermal comfort in Sun Moon Lake, Taiwan. *International Journal of Biometeorology* 52, 281-290
- Liu S, Shi Q, 2020: Local climate zone mapping as remote sensing scene classification using deep learning: A case study of metropolitan China. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 164, 229-242
- Liu Y, Chen F, Warner T, Basara J, 2006: Verification of a mesoscale data-assimilation and forecasting system for the Oklahoma City area during the Joint Urban 2003 field project. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 45, 912-929
- Liu W, Zhang Y, Deng Q, 2016: The effects of urban microclimate on outdoor thermal sensation and neutral temperature in hot-summer and cold-winter climate. *Energy and Buildings* 128, 190-197
- Liu L, Lin Y, Xiao Y, Xue P, Shi L, Chen X, Liu J, 2018: Quantitative effects of urban spatial characteristics on outdoor thermal comfort based on the LCZ scheme. *Building and Environment* 143, 443-460
- Liu S, Qi Z, Li X, Yeh AGO, 2019: Integration of convolutional neural networks and object-based post-classification refinement for land use and land cover mapping with optical and SAR data. *Remote Sensing* 11, 690
- Lo YE, Mitchell DM, Bohnenstengel SI, Collins M, Hawkins E, Hegerl GC, Joshi M, Stott PA, 2020: UK climate projections: Summer daytime and nighttime urban heat island changes in England's major cities. *Journal of Climate* 33, 9015-9030
- Lotfian M, Ingensand J, Composto S, Molinari M, Brovelli MA, 2019: The relationship between land surface temperature and local climate zone classification: A case study of the canton Geneva, Switzerland. Association of Geographic Information Laboratories for Europe (AGILE)
- Lokoshchenko MA, 2017: Urban heat island and urban dry island in Moscow and their centennial changes. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 56, 2729-2745
- Loridan T, Grimmond CSB, 2012: Characterization of Energy Flux Partitioning in Urban Environments: Links with Surface Seasonal Properties. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 51, 219-241
- Lowry WP, 1977: Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 16, 129-135
- Lynas M, Houlton BZ, Perry S, 2021: Greater than 99% consensus on human caused climate change in the peer-reviewed scientific literature. *Environmental Research Letters* 16, 114005
- Lyu T, Buccolieri R, Gao Z, 2019: A numerical study on the correlation between sky view factor and summer microclimate of local climate zones. *Atmosphere* 10, 438
- Ma L, Li M, Ma X, Cheng L, Du P, Liu Y, 2017: A review of supervised object-based land-cover image classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 130, 277-293
- Ma L, Zhu X, Qiu C, Blaschke T, Li M, 2021: Advances of local climate zone mapping and its practice using object-based image analysis. *Atmosphere* 12, 1146
- Maharroof N, Emmanuel R, Thomson C, 2020: Compatibility of local climate zone parameters for climate sensitive street design: influence of openness and surface properties on local climate. *Urban Climate* 33, 100642
- Maheng D, Ducton I, Lauwaet D, Zevenbergen C, Pathirana A, 2019: The sensitivity of urban heat island to urban green space—a model-based study of city of Colombo, Sri Lanka. *Atmosphere* 10, 151

- Mahmoud AHA, 2011: Analysis of the microclimatic and human comfort conditions in an urban park in hot and arid regions. *Building and Environment* 46, 2641-2656
- Manandhar P, Bande L, Tsoupos A, Marpu PR, Armstrong P, 2019: A Study of local climate zones in Abu Dhabi with urban weather stations and numerical simulations. *Sustainability* 12, 156
- Maronga B, Banzhaf S, Burmeister C, Esch T, Forkel R, Fröhlich D, Fuka V, Gehrke KF, Geletič J, Giersch S, Gronemeier T, Groß G, Heldens W, Hellsten A, Hoffmann F, Inagaki A, Kadasch E, Kanani-Sühring F, Ketelsen K, Khan BA, Knigge C, Knoop H, Krč P, Kurppa M, Maamari H, Matzarakis A, Mauder M, Pallasch M, Pavlik D, Pfafferott J, Resler J, Rissmann S, Russo E, Salim M, Schrempf M, Schwenkel J, Seckmeyer G, Schubert S, Sühring M, von Tils R, Vollmer L, Ward S, Witha B, Wurps H, Zeidler J, Raasch S, 2020: Overview of the PALM model system 6.0. *Geoscientific Model Development* 13, 1335-1372
- Martilli A, Clappier A, Rotach MW, 2002: An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models. *Boundary-Layer Meteorology* 104, 261-304
- Martilli A, Brousse O, Ching J, 2016: Urbanized WRF modeling using WUDAPT. Technical Report CIEMAT
- Masson V, Champeaux JL, Chauvin F, Meriguet C, Lacaze R, 2003: A global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models. *Journal of Climate* 16, 1261-1282
- Masson V, 2000: A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology* 94, 357-397
- Masson V, Marchadier C, Adolphe L, Aguejda R, Avner P, Bonhomme M, Bretagne G, Briottet X, Bueno B, De Munck C, Doukari O, 2014: Adapting cities to climate change: A systemic modelling approach. *Urban Climate* 10, 407-429
- Masson V, Lemonsu A, Hidalgo J, Voogt J, 2020a: Urban climates and climate change. *Annual Review of Environment and Resources* 45, 411-444
- Masson V, Heldens W, Bocher E, Bonhomme M, Bucher B, Burmeister C, de Munck C, Esch T, Hidalgo J, Kanani-Sühring F, Kwok YT, 2020b: City-descriptive input data for urban climate models: Model requirements, data sources and challenges. *Urban Climate* 31, 100536
- Masterton JM, Richardson FA, 1979: Humidex: a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity. Environment Canada, Atmospheric Environment
- Matsumoto J, Fujibe F, Takahashi H, 2017: Urban climate in the Tokyo metropolitan area in Japan. *Journal of Environmental Sciences* 59, 54-62
- Matzarakis A, Mayer H, 1996: Another kind of environmental stress: thermal stress. *WHO newsletter* 18, 7-10
- Matzarakis A, Mayer H, Iziomon MG, 1999: Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology* 43, 76-84
- Matzarakis A, Matuschek O, 2011: Sky view factor as a parameter in applied climatology-rapid estimation by the SkyHelios model. *Meteorologische Zeitschrift* 20, 39
- Matzarakis A, Rutz F, Mayer H, 2007: Modelling radiation fluxes in simple and complex environments-application of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology* 51, 323-334
- Matzarakis A, Rutz F, Mayer H, 2010: Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology* 54, 131-139
- Mayer H, Höpfe P, 1987: Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology* 38, 43-49
- McCarthy MP, Best MJ, Betts RA, 2010: Climate change in cities due to global warming and urban effects. *Geophysical research letters* 37
- McCarthy MP, Harpham C, Goodess CM, Jones PD, 2012: Simulating climate change in UK cities using a regional climate model, HadRM3. *International Journal of Climatology* 32, 1875-1888
- McGregor GR, Bessmoulin P, Ebi K, Menne B, 2015: Heatwaves and health: guidance on warning-system development. WMO No. 1142
- McRae I, Freedman F, Rivera A, Li X, Dou J, Cruz I, Ren C, Dronova I, Fraker H, Bornstein R, 2020: Integration of the WUDAPT, WRF, and ENVI-met models to simulate extreme daytime temperature mitigation strategies in San Jose, California. *Building and Environment* 184, 107180
- Meier F, Fenner D, Grassmann T, Otto M, Scherer D, 2017: Crowdsourcing air temperature from citizen weather stations for urban climate research. *Urban Climate* 19, 170-191
- Melnikov VP, Osipov VI, Brouchkov AV, Falaleeva AA, Badina SV, Zheleznyak MN, Sadurtdinov MR, Ostrakov NA, Drozdov DS, Osokin AB, Sergeev DO, 2022: Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: potential economic impacts on public infrastructure by 2050. *Natural Hazards* 112, 231-251
- Menberg K, Bayer P, Zosseder K, Rumohr S, Blum P, 2013: Subsurface urban heat islands in German cities. *Science of the Total Environment* 442, 123-133
- Middel A, Hüb K, Brazel AJ, Martin CA, Guhathakurta S, 2014: Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. *Landscape and Urban Planning* 122, 16-28

- Miklósi Cs, 1981: A városi hősziget vizsgálata Budapesten. *Légekör* 26, 21-22
- Mills G, 2008: Luke Howard and the climate of London. *Weather* 63, 153-157
- Milošević DD, Savić SM, Marković V, Arsenović D, Šećerov I, 2016: Outdoor human thermal comfort in local climate zones of Novi Sad (Serbia) during heat wave period. *Hungarian Geographical Bulletin* 65, 129-137
- Milošević D, Savić S, Kresoja M, Lužanin Z, Šećerov I, Arsenović D, Dunjić J, Matzarakis A, 2022: Analysis of air temperature dynamics in the “local climate zones” of Novi Sad (Serbia) based on long-term database from an urban meteorological network. *International Journal of Biometeorology* 66, 371-384
- Mlawer EJ, Taubman SJ, Brown PD, Iacono MJ, Clough SA, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 102, 16663-16682
- Mohan M, Kandya A, Battiprolu A, 2011: Urban heat island effect over national capital region of India: a study using the temperature trends. *Journal of Environmental Protection* 2, 465
- Molnár G, Gyöngyösi AZ, Gál T, 2017: A városi hősziget vizsgálata meteorológiai modell segítségével Szegeden. *Légekör* 62, 130-135
- Molnár G, Gál T, Gyöngyösi AZ, 2018: Evaluation of a WRF-LCZ system in simulating urban effects under non-ideal synoptic patterns. *Acta Climatologica* 51, 57-73
- Molnár G, Gyöngyösi AZ, Gál T, 2019a: 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
- Molnár G, Gyöngyösi AZ, Gál T, 2019b: Modeling of urban heat island using adjusted static database. *Időjárás* 123, 371-390
- Molnár G, Kovács A, Gál T, 2020: How does anthropogenic heating affect the thermal environment in a medium-sized Central European city? A case study in Szeged, Hungary. *Urban Climate* 34, 100673
- Montero E, Wolvelaer JV, Garzón A, 2014: The European urban atlas. In *Land use and land cover mapping in Europe*. Springer
- Moradi M, Krayenhoff ES, Aliabadi AA, 2022: A comprehensive indoor–outdoor urban climate model with hydrology: The Vertical City Weather Generator (VCWG v2. 0.0). *Building and Environment* 207, 108406
- Moreno-Garcia MC, 1994: Intensity and form of the urban heat island in Barcelona. *International Journal of Climatology* 14, 705-710
- Mu Q, Miao S, Wang Y, Li Y, He X, Yan C, 2020: Evaluation of employing local climate zone classification for mesoscale modelling over Beijing metropolitan area. *Meteorology and Atmospheric Physics* 132, 315-326
- Mughal MO, Li XX, Yin T, Martilli A, Brousse O, Dissegna MA, Norford LK, 2019: High-resolution, multilayer modeling of Singapore's urban climate incorporating local climate zones. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 124, 7764-7785
- Mughal MO, Li XX, Norford LK, 2020: Urban heat island mitigation in Singapore: Evaluation using WRF/multilayer urban canopy model and local climate zones. *Urban Climate* 34, 100714
- Muhammad F, Xie C, Vogel J, Afshari A, 2022: Inference of Local Climate Zones from GIS Data, and Comparison to WUDAPT Classification and Custom-Fit Clusters. *Land* 11, 747
- Muller CL, Chapman L, Grimmond CSB, Young DT, Cai XM, 2013: Toward a standardized metadata protocol for urban meteorological networks. *Bulletin of the American Meteorological Society* 94, 1161-1185
- Müller N, Kuttler W, Barlag AB, 2014: Counteracting urban climate change: adaptation measures and their effect on thermal comfort. *Theoretical and Applied Climatology* 115, 243-257
- Mushore TD, Dube T, Manjowe M, Gumindoga W, Chemura A, Roustia I, Odindi J, Mutanga O, 2019: Remotely sensed retrieval of Local Climate Zones and their linkages to land surface temperature in Harare metropolitan city, Zimbabwe. *Urban Climate* 27, 259-271
- Nakamura Y, Oke TR, 1988: Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmospheric Environment* 22, 2691-2700
- Nassar AK, Blackburn GA, Whyatt JD, 2016: Dynamics and controls of urban heat sink and island phenomena in a desert city: Development of a local climate zone scheme using remotely-sensed inputs. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 51, 76-90
- Ng YX, 2015: A study of urban heat island using local climate zones: The case of Singapore. *British Journal of Environment and Climate Change* 5, 116-133
- Nogueira M, Lima DC, Soares PM, 2020: An integrated approach to project the future urban climate response: Changes to Lisbon's urban heat island and temperature extremes. *Urban Climate* 34, 100683
- Nunez M, Oke TR, 1977: The energy balance of an urban canyon. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 16, 11-19
- Núñez-Peiró M, Sanchez CSG, González FJN, 2021: Hourly evolution of intra-urban temperature variability across the local climate zones. The case of Madrid. *Urban Climate* 39, 100921

- Nurwanda A, Honjo T, 2018: Analysis of land use change and expansion of surface urban heat island in Bogor City by remote sensing. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 7, 165
- Oke TR, 1973: City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* 7, 769-779
- Oke TR, 1981: Canyon geometry and the nocturnal heat island. Comparison of scale model and field observations, *Journal of Climatology* 1, 237-254
- Oke TR, 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108, 1-24
- Oke TR, 1984: Towards a prescription for the greater use of climatic principles in settlement planning. *Energy and Buildings* 7, 1-10
- Oke TR, 1997: Urban climates and global environmental change. In Thompson RD (ed.): *Applied Climatology*. Routledge, 273-287
- Oke TR, 1998: An algorithmic scheme to estimate hourly heat island magnitude. *Proceedings 2nd Symposium Urban Environment* 80-83
- Oke TR, 2002: *Boundary layer climates*. Routledge
- Oke TR, 2004: Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. IOM Report No. 81, WMO/TD-No. 1250, 47
- Oke TR, 2008: Urban observations. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. Part II, Observing Systems. 7th edition, WMO-No. 8, World Meteorological Organization, II-11-1–II-11-25
- Oke TR, Fuggle RF, 1972: Comparison of urban/rural counter and net radiation at night. *Boundary-Layer Meteorology* 2, 290-308
- Oke TR, Mills G, Christen A, Voogt JA, 2017: *Urban Climates*. Cambridge University Press
- Oleson K, 2012, Contrasts between urban and rural climate in CCSM4 CMIP5 climate change scenarios. *Journal of Climate* 25, 1390-1412
- Orlanski I, 1975: A Rational Subdivision of Scales for Atmospheric Processes *Bulletin of the American Meteorological Society* 56, 527-530
- Ouali K, El Harrouni K, Abidi ML, 2021: November. Characterization of Urban Heat Island and outdoor thermal comfort mapping: case of Rabat. In 9th International Renewable and Sustainable Energy Conference, 9741192
- Oxoli D, Ronchetti G, Minghini M, Molinari ME, Lotfian M, Sona G, Brovelli MA, 2018: Measuring urban land cover influence on air temperature through multiple geo-data: The case of Milan, Italy. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 7, 421
- Paranunzio R, Dwyer E, Fitton JM, Alexander PJ, O'Dwyer B, 2021: Assessing current and future heat risk in Dublin city, Ireland. *Urban Climate* 40, 100983
- Park HS, 1986: Features of the heat island in Seoul and its surrounding cities. *Atmospheric Environment* 20, 1859-1866
- Patel P, Karmakar S, Ghosh S, Niyogi D, 2020: Improved simulation of very heavy rainfall events by incorporating WUDAPT urban land use/land cover in WRF. *Urban Climate* 32, 100616
- Patel P, Karmakar S, Ghosh S, Aliaga DG, Niyogi D, 2021: Impact of green roofs on heavy rainfall in tropical, coastal urban area. *Environmental Research Letters* 16, 074051
- Patel P, Jamshidi S, Nadimpalli R, Aliaga DG, Mills G, Chen F, Demuzere M, Niyogi D, 2022: Modeling Large-Scale Heatwave by Incorporating Enhanced Urban Representation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 127, e2021JD035316
- Peiró MN, Sánchez CSG, González FN, 2019: Source area definition for local climate zones studies. A systematic review. *Building and Environment* 148, 258-285
- Pelle L, 1983: Városklíma mérések Szegeden. *Légekör* 28, 10-12
- Peng L, Liu JP, Wang Y, Chan PW, Lee TC, Peng F, Wong MS, Li Y, 2018: Wind weakening in a dense high-rise city due to over nearly five decades of urbanization. *Building and Environment* 138, 207-220
- Perera NGR, Liyanapathirana A, 2014. Influence of urban water bodies on microclimate and thermal comfort: Case study of Beira Lake, Colombo. *Proceedings of FARU*
- Perera N, Emmanuel R, 2017: Sensitivity analysis of 'Local Climate Zone' based urban morphology parameters for outdoor thermal comfort in the tropics. *Proceedings of the Passive and Low Energy Architecture*
- Perera NGR, Emmanuel R, 2018: A "Local Climate Zone" based approach to urban planning in Colombo, Sri Lanka. *Urban Climate* 23, 188-203
- Pereira CT, Masiero É, Bourscheidt V, 2021: Socio-spatial inequality and its relationship to thermal (dis) comfort in two major Local Climate Zones in a tropical coastal city. *International Journal of Biometeorology* 65, 1177-1187
- Petralli M, Massetti L, Brandani G, Orlandini S, 2014: Urban planning indicators: useful tools to measure the effect of urbanization and vegetation on summer air temperatures. *International Journal of Climatology* 34, 1236-1244

- Phelan PE, Kaloush K, Miner M, Golden J, Phelan B, Silva H, Taylor RA, 2015: Urban heat island: mechanisms, implications, and possible remedies. *Annual Review of Environment and Resources* 40, 285-307
- Pickup J, de Dear R, 2000: An outdoor thermal comfort index (OUT_SET*)-part I-the model and its assumptions. In *Biometeorology and urban climatology at the turn of the millenium. Selected papers from the Conference ICB-ICUC 99*, 279-283
- Picone N, Campo AM, 2015: Preparing urban climate maps using the LCZ methodology for improving communication with urban planners: the case of Tandil city, Argentina. *Proceedings of the 9th International Conference on Urban Climate*
- Pongrácz R, Bartholy J, Dezső Z, 2006: Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis. *Advances in Space Research* 37, 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* 35, 95-99
- Porson A, Harman IN, Bohnenstengel SI, Belcher SE, 2009: How many facets are needed to represent the surface energy balance of an urban area?. *Boundary-Layer Meteorology* 132, 107-128
- Pradhesta YF, Nurjani E, Arijuddin BI, 2019: Local Climate Zone classification for climate-based urban planning using Landsat 8 Imagery (A case study in Yogyakarta Urban Area). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 303, 012022
- Probáld F, 1974: Budapest Városklimája. *Akadémiai Kiadó*
- Puliafito SE, Bochaca FR, Allende DG, Fernandez RP, 2013: Green areas and microscale thermal comfort in arid environments: A case study in Mendoza, Argentina. *Atmospheric and Climate Sciences* 3, 372-384
- Qiu C, Schmitt M, Mou L, Ghamisi P, Zhu XX, 2018: Feature importance analysis for local climate zone classification using a residual convolutional neural network with multi-source datasets. *Remote Sensing* 10, 1572
- Quan SJ, Dutt F, Woodworth E, Yamagata Y, Yang PPJ, 2017: Local climate zone mapping for energy resilience: a fine-grained and 3D approach. *Energy Procedia* 105, 3777-3783
- Quan J, 2019: Enhanced geographic information system-based mapping of local climate zones in Beijing, China. *Science China Technological Sciences* 62, 2243-2260
- Quan SJ, Bansal P, 2021: A systematic review of GIS-based local climate zone mapping studies. *Building and Environment* 196, 107791
- Rahul A, Mukherjee M, Sood A, 2020: Impact of ganga canal on thermal comfort in the city of Roorkee, India. *International Journal of Biometeorology* 64, 1933-1945
- Rao PK, 1972: Remote sensing of urban "heat islands" from an environmental satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society* 53, 647-648
- Reinhart CF, Davila CC, 2016: Urban building energy modeling—A review of a nascent field. *Building and Environment* 97, 196-202
- Reis C, Lopes A, Nouri AS, 2022: Assessing urban heat island effects through local weather types in Lisbon's Metropolitan Area using big data from the Copernicus service. *Urban Climate* 43, 101168
- Ren J, Yang J, Zhang Y, Xiao X, Xia JC, Li X, Wang S, 2022: Exploring thermal comfort of urban buildings based on local climate zones. *Journal of Cleaner Production* 340, 130744
- Resler J, Krč P, Belda M, Juruš P, Benešová N, Lopata J, Vlček O, Damašková D, Eben K, Derbek P, Maronga B, Kanani-Sühring F, 2017: PALM-USM v1.0: A new urban surface model integrated into the PALM large-eddy simulation model. *Geoscientific Model Development* 10, 3635-3659
- Richard Y, Emery J, Dudek J, Pergaud J, Chateau-Smith C, Zito S, Rega M, Vairet T, Castel T, Thévenin T, Pohl B, 2018: How relevant are local climate zones and urban climate zones for urban climate research? Dijon (France) as a case study. *Urban Climate* 26, 258-274
- Ribeiro I, Martilli A, Falls M, Zonato A, Villalba G, 2021: Highly resolved WRF-BEP/BEM simulations over Barcelona urban area with LCZ. *Atmospheric Research* 248, 105220
- Rockel B, Will A, Hense A, 2008: The regional climate model COSMO-CLM (CCLM). *Meteorologische Zeitschrift* 17, 347-348
- Rogelj J, Forster PM, Kriegler E, Smith CJ, Séférian R, 2019: Estimating and tracking the remaining carbon budget for stringent climate targets. *Nature* 571, 335-342
- Roncancio DN, Stewart ID, 2022: Urban climatic maps for environmental planning in Manizales, Colombia. *Cybergeo: European Journal of Geography*, 38885
- Roncz B, 1984: Egri városklíma mérések egyéves tapasztalatai. *Acta Academiae Paedagogicae Agriensis* 17, 659-673
- Rosentreter J, Hagensieker R, Waske B, 2020: Towards large-scale mapping of local climate zones using multitemporal Sentinel 2 data and convolutional neural networks. *Remote Sensing of Environment* 237, 111472
- Rosenzweig C, Solecki W, 2010: Climate change adaptation in New York City: building a risk management response. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1196

- Ryu YH, Bou-Zeid E, Wang Z-H, Smith JA, 2016: Realistic representation of urban trees in an urban canopy model. *Boundary-Layer Meteorology* 159, 193-220
- Sachindra DA, Ng AWM, Muthukumaran S, Perera BJC, 2016: Impact of climate change on urban heat island effect and extreme temperatures: a case-study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 142, 172-186
- 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
- Sanchez B, Roth M, Simón-Moral A, Martilli A, Velasco E, 2021: Assessment of a meteorological mesoscale model's capability to simulate intra-urban thermal variability in a tropical city. *Urban Climate* 40, 101006
- Santamouris M, Cartalis C, Synnefa A, Kolokotsa D, 2015: On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—A review. *Energy and Buildings* 98, 119-124
- Saveljev A, Sugumar R, 2008: Surface temperature mapping of the University of Northern Iowa campus using high resolution thermal infrared aerial imageries. *Sensors* 8, 5055-5068
- Savić S, Lužanin Z, Milošević D, Kresoja M, 2018a: Intra-urban analysis of air temperature in Central-European city. *Proceedings of the 10th International Conference on Urban Climate*, 6A.7A
- Savić S, Marković V, Šećerov I, Pavić D, Arsenović D, Milošević D, Dolinaj D, Nagy I, Pantelić M, 2018b: Heat wave risk assessment and mapping in urban areas: case study for a midsized Central European city, Novi Sad (Serbia). *Natural Hazards* 91, 891-911
- Šećerov I, Savić S, Milošević D, Marković V, Bajšanski I, 2015: Development of an automated urban climate monitoring system in Novi Sad (Serbia). *Geographica Pannonica* 19, 174-183
- Segura R, Badia A, Ventura S, Gilabert J, Martilli A, Villalba G, 2021: Sensitivity study of PBL schemes and soil initialization using the WRF-BEP-BEM model over a Mediterranean coastal city. *Urban Climate* 39, 100982
- Scharf LL, Demeure C, 1991: *Statistical signal processing: detection, estimation, and time series analysis*. Prentice Hall
- Scherer D, Fehrenbach U, Beha, H-D, Parlow E, 1999: Improved concepts and methods in analysis and evaluation of the urban climate for optimizing urban climate processes. *Atmospheric Environment* 33, 4185-4193
- Schlünzen KH, Hoffmann P, Rosenhagen G, Riecke W, 2010: Long-term changes and regional differences in temperature and precipitation in the metropolitan area of Hamburg. *International Journal of Climatology* 30, 1121-1136
- Schoetter R, Masson V, Bourgeois A, Pellegrino M, Lévy JP, 2017: Parametrisation of the variety of human behaviour related to building energy consumption in the Town Energy Balance (SURFEX-TEB v. 8.2). *Geoscientific Model Development* 10, 2801-2831
- Schroeder JA, Basara JB, Illston BG, 2010: Challenges Associated with Classifying Urban Meteorological Stations: The Oklahoma City Micronet Example. *The Open Atmospheric Science Journal* 4, 88-100
- Schubert S, Grossman-Clarke S, Martilli A, 2012: A double-canyon radiation scheme for multi-layer urban canopy models. *Boundary-Layer Meteorology* 145, 439-468
- Schuster C, Honold J, Lauf S, Lakes T, 2017: Urban heat stress: Novel survey suggests health and fitness as future avenue for research and adaptation strategies. *Environmental Research Letters* 12, 044021
- Sharma R, Hooyberghs H, Lauwaet D, De Ridder K, 2016: Application of UrbClim for an Asian tropical city—the case of Delhi. In *Living Planet Symposium* 740, 210
- Sharma R, Hooyberghs H, Lauwaet D, De Ridder K, 2019: Urban heat island and future climate change—Implications for Delhi's heat. *Journal of Urban Health* 96, 235-251
- Sharma A, Wuebbles DJ, Kotamarthi R, Calvin K, Drewniak B, Catlett CE, Jacob R, 2020: Urban-scale processes in high-spatial-resolution earth system models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101, PNNL-SA-153011
- Shi Y, Lau KKL, Ren C, Ng E, 2018: Evaluating the local climate zone classification in high-density heterogeneous urban environment using mobile measurement. *Urban Climate* 25, 167-186
- Sievers U, 1990: Dreidimensionale Simulationen in Stadtgebieten *Umweltmeteorologie, Sitzung des Hauptausschusses II am 7. und 8. Juni in Lahnstein. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN*, 15
- Sievers U, 1995: Verallgemeinerung der Stromfunktionsmethode auf drei Dimensionen. *Meteorologische Zeitschrift* 4, 3-15
- Sievers U, 2012: Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO_3 Teil 1: Theoretische Grundlagen, PC-Basisversion und Validierung
- Sievers V, Zdunkowski WG, 1986: A microscale urban climate model. *Beiträge zur Physik der Atmosphäre* 59, 13-40

- Simanjuntak RM, Kuffer M, Reckien D, 2019: Object-based image analysis to map local climate zones: The case of Bandung, Indonesia. *Applied Geography* 106, 108-121
- Simon H, Kropp T, Sohni F, Bruse M, 2018: Downscaling Climate Models: Running Nested Simulations in the Microclimate Model ENVI-Met. *Passive and Low Energy Architecture*
- Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Barker J, Duda MG, Huang XY, Powers J, 2008: A description of the advanced research WRF version 3, NCAR Tech Note. Note NCAR/TN-475+STR, NCAR, Boulder, CO, 125
- Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Liu Z, Berner J, Wang W, Powers JG, Duda MG, Barker DM, Huang XY, 2019: A description of the advanced research WRF model version 4. National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA, 145
- Skarbit N, Gál T, 2016: Projection of intra-urban modification of night-time climate indices during the 21st century. *Hungarian Geographical Bulletin* 65, 181-193
- Skarbit N, Gál T, Unger J, 2015: Airborne surface temperature differences of the different Local Climate Zones in the urban area of a medium sized city. In 2015 Joint Urban Remote Sensing Event, IEEE
- Skarbit N, Stewart ID, Unger J, Gál T, 2017: Employing an urban meteorological network to monitor air temperature conditions in the 'local climate zones' of Szeged, Hungary. *International Journal of Climatology* 37, 582-596
- Skarbit N, Gál T, Unger J, 2018: Evaluation of spatial and temporal distribution of air temperature in local climate zones based on long-term database in Szeged, Hungary. *Proceedings of the 10th International Conference on Urban Climate*
- Skarbit N, Unger J, Gál T, 2021: Véderdő telepítésének lehetséges jövőbeli hatásai Szeged hőterhelésében. *Földrajzi Közlemények* 145, 288-299
- Sobocká J, Saksa M, Feranec J, Szatmári D, Holec J, Bobáľová H, Rášová A, 2021: Mapping of urban environmentally sensitive areas in Bratislava city. *Journal of Soils and Sediments* 21, 2059-2070
- Sobrinho O, Rudke A, Morais M, Martins L, 2022: Meteorological Effects of Green Infrastructure on a Developing Medium Latin American City: A Numerical Modeling Assessment. SSRN 4017408
- Spagnolo JC, De Dear RJ, 2003: A human thermal climatology of subtropical Sydney. *International Journal of Climatology* 23, 1383-1395
- Starks PJ, Norman JM, Blad BL, Walter-Shea EA, Walthall CL, 1991: Estimation of shortwave hemispherical reflectance (albedo) from bidirectionally reflected radiance data. *Remote Sensing of Environment* 38, 123-134
- Stathopoulos T, Wu H, Zacharias J, 2004: Outdoor human comfort in an urban climate. *Building and Environment* 39, 297-305
- Steadman RG, 1984: A universal scale of apparent temperature. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 23, 1674-1687
- Steenefeldt GJ, Klompmaaker JO, Groen RJ, Holtslag AA, 2018: An urban climate assessment and management tool for combined heat and air quality judgements at neighbourhood scales. *Resources, Conservation and Recycling* 132, 204-217
- Steppeler J, Doms G, Schättler U, Bitzer HW, Gassmann A, Damrath U, Gregoric G, 2003: Meso-gamma scale forecasts using the nonhydrostatic model LM. *Meteorology and atmospheric Physics* 82, 75-96
- Stewart ID, Oke T, 2009: Classifying urban climate field sites by "local climate zones": The case of Nagano, Japan. *Proceedings of the 7th International Conference on Urban Climate*, Vol. 29
- Stewart ID, 2011a: A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology* 31, 200-217
- Stewart ID, 2011b: Redefining the urban heat island. Doctoral dissertation, University of British Columbia
- Stewart ID, Oke TR, 2010: Thermal differentiation of local climate zones using temperature observations from urban and rural field sites; Preprints of 9th Symposium, on Urban Environment
- Stewart ID, Oke TR, 2012: 'Local climate zones' for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93, 1879-1900
- Stewart ID, Mills G, 2021: *The Urban Heat Island*, Elsevier
- Stewart ID, Oke TR, Krayenhoff ES, 2014: Evaluation of the 'local climate zone' scheme using temperature observations and model simulations. *International Journal of Climatology* 34, 1062-1080
- Suomi J, Käyhkö J, 2012: The impact of environmental factors on urban temperature variability in the coastal city of Turku, SW Finland. *International Journal of Climatology* 32, 451-463
- Svensson MK, Eliasson I, Holmer B, 2002: A GIS based empirical model to simulate air temperature variations in the Göteborg urban area during the night. *Climate Research* 22, 215-226
- Szalai S, Auer I, Hiebl J, Milkovich J, Radim T, Stepanek P, Zahradnicek P, Bihari Z, Lakatos M, Szentimrey T, Limanowka D, 2013: Climate of the greater Carpathian region—final technical report
- Szymanowski M, 2003: September. Spatial structure of the urban heat island in Wroclaw, Poland. In *Proceedings of the 5th International Conference on Urban Climate* 1, 151-154
- Tasumi M, Allen RG, Trezza R, 2008: At-surface reflectance and albedo from satellite for operational calculation of land surface energy balance. *Journal of Hydrologic Engineering* 13, 51-63

- Taubenböck H, Debray H, Qiu C, Schmitt M, Wang Y, Zhu XX, 2020: Seven city types representing morphologic configurations of cities across the globe. *Cities* 105, 102814
- Taylor J, Wilkinson P, Davies M, Armstrong B, Chalabi Z, Mavrogiani A, Symonds P, Oikonomou E, Bohnenstengel SI, 2015: Mapping the effects of urban heat island, housing, and age on excess heat-related mortality in London. *Urban Climate* 14, 517-528
- Tewari M, Chen F, Wang W, Dudhia J, LeMone MA, Mitchell K, Ek M, Gayno G, Wegiel J, Cuenca RH, 2004: Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. In 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting and 16th Conference on Numerical Weather Prediction, 1115, 2165-2170
- Thom EC, 1959: The discomfort index. *Weatherwise* 12, 57-61
- Thomas G, Sherin AP, Ansar S, Zachariah EJ, 2014: Analysis of urban heat island in Kochi, India, using a modified local climate zone classification. *Procedia Environmental Sciences* 21, 3-13
- Tomasi M, Favargiotti S, van Lierop M, Giovannini L, Zonato A, 2021: Verona Adapt. Modelling as a Planning Instrument: Applying a Climate-Responsive Approach in Verona, Italy. *Sustainability* 13, 6851
- Tomlinson CJ, Chapman L, Thornes JE, Baker CJ, 2012: Derivation of Birmingham's summer surface urban heat island from MODIS satellite images. *International Journal of Climatology* 32, 214-224
- Top S, Caluwaerts S, Van Schaeybroeck B, Hamdi R, Duchêne F, Termonia P, 2019: Modelling the urban heat island: sensitivity to land cover data. In 2019 Joint Urban Remote Sensing Event
- Top S, Milošević D, Caluwaerts S, Hamdi R, Savić S, 2020: Intra-urban differences of outdoor thermal comfort in Ghent on seasonal level and during record-breaking 2019 heat wave. *Building and Environment* 185, 107103
- Toy S, Yilmaz S, 2010: Thermal sensation of people performing recreational activities in shadowy environment: a case study from Turkey. *Theoretical and Applied Climatology* 101, 329-343
- Thorsson S, Lindqvist M, Lindqvist S, 2004: Thermal bioclimatic conditions and patterns of behaviour in an urban park in Göteborg, Sweden. *International Journal of Biometeorology* 48, 149-156
- Trewin B, 2013: A daily homogenized temperature data set for Australia. *International Journal of Climatology* 33, 1510-1529
- Trusilova K, Schubert S, Wouters H, Früh B, Grossman-Clarke S, Demuzere M, Becker P, 2016: The urban land use in the COSMO-CLM model: a comparison of three parameterizations for Berlin. *Meteorologische Zeitschrift* 25, 231-244
- Tse JWP, Yeung PS, Fung JCH, Ren C, Wang R, Wong MMF, Meng CAI, 2018: Investigation of the meteorological effects of urbanization in recent decades: A case study of major cities in Pearl River Delta. *Urban Climate* 26, 174-187
- Tucker CJ, 1979: Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8, 127-150
- Tuia D, Moser G, Wurm M, Taubenböck H, 2017: March. Land use modeling in North Rhine-Westphalia with interaction and scaling laws. In 2017 Joint Urban Remote Sensing Event
- Tzavali A, Paravantis JP, Mihalakakou G, Fotiadi A, Stigka E, 2015: Urban heat island intensity: A literature review. *Fresenius Environmental Bulletin* 24, 4537-4554
- Ulpiani G, Hart MA, Di Virgilio G, Maharaj AM, Lipson MJ, Potgieter J, 2022: A citizen centred urban network for weather and air quality in Australian schools. *Scientific Data* 9, 1-9
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division 2019: World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420). New York: United Nations
- Unger J, 1992: Diurnal and annual variation of the urban temperature surplus in Szeged, Hungary. *Időjárás* 96, 235-244
- Unger J, 2004: Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach. *Climate Research* 27, 253-264
- Unger J, 2009: Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database. *International Journal of Environment and Pollution* 36, 59-80
- Unger J, Gál T, 2011: Automata állomáspár Szegeden – A városi klímamódosító hatás online megjelenítése. *Légekör* 56, 93-96
- Unger J, Gál T, 2017: Városklíma. *GeoLitera*
- Unger J, Bottyán Z, Sümegey Z, Gulyás Á, 2000: Urban heat island development affected by urban surface factors. *Időjárás* 104, 253-268
- Unger J, Sümegey Z, Zoboki J, 2001: Temperature cross-section features in an urban area. *Atmospheric Research* 58, 117-127
- Unger J, Sümegey Z, Gulyás Á, Bottyán Z, Mucsi L, 2001b: Land-use and meteorological aspects of the urban heat island. *Meteorological Applications* 8, 189-194
- Unger J, Gál T, Rakonczai J, Mucsi L, Szatmári J, Tobak Z, Van Leeuwen B, Fiala K, 2010: Modeling of the urban heat island pattern based on the relationship between surface and air temperatures. *Időjárás* 114, 287-302

- Unger J, Savić S, Gál T, 2011: Modelling of the annual mean urban heat island pattern for planning of representative urban climate station network. *Advances in Meteorology* 2011, 398613
- Unger J, Sümeghy Z, Kántor N, Gulyás Á, 2012: *Kisléptékű környezeti klimatológia*. Szeged, JATEPress
- Unger J, Lelovics E, Gál T, 2014a: Local Climate Zone mapping using GIS methods in Szeged. *Hungarian Geographical Bulletin* 63, 29-41
- Unger J, Lelovics E, Gál T, Mucsi L, 2014b: A városi hősziget fogalom finomítása a lokális klímazónák koncepciójának felhasználásával–példák Szegedről. *Földrajzi Közlemények* 138, 50-63
- Unger J, Savić S, Gál T, Milošević D, Kosztolányi É, Marković V, 2014c: Urban climate and monitoring network system in Central European cities. University of Szeged, University of Novi Sad
- Unger J, Gál T, Csépe Z, Lelovics E, Gulyás Á, 2015: Development, data processing and preliminary results of an urban human comfort monitoring and information system. *Időjárás* 119, 337-354
- Unger J, Skarbit N, Gál T, 2017: Szegedi városklíma mérőállomás-hálózat és információs rendszer. *Légekör* 62, 14-118
- Unger J, Skarbit N, Gál T, 2018a: Absolute moisture content in mid-latitude urban canopy layer, Part 2: results from Szeged, Hungary. *Acta Climatologica* 51-52, 37-45
- Unger J, Skarbit N, Gál T, 2018b: Absolute moisture content in mid-latitude urban canopy layer, Part 1: A literature review. *Acta Climatologica* 51-52, 47-56
- Unger J, Skarbit N, Gál T, 2018c: Evaluation of outdoor human thermal sensation of local climate zones based on long-term database. *International Journal of Biometeorology* 62, 183-193
- Unger J, Skarbit N, Kovács A, Gál T, 2020a: Comparison of regional and urban outdoor thermal stress conditions in heatwave and normal summer periods: A case study. *Urban Climate* 32, 100619
- Unger J, Skarbit N, Gál T, 2020b: Projection of present and future daily and evening urban heat load patterns. *Acta Climatologica* 54, 19-27
- Unger J, Skarbit N, Gál T, 2021: Klímaváltozás a városokban. *Acta Climatologica* 55, 3s, 10.14232/acta.clim.2021.55.3s
- USGS, 2016: Landsat 8(L8): Data Users Handbook, USGS
- Van de Walle J, Brousse O, Arnalsteen L, Byarugaba D, Ddumba DS, Demuzere M, Lwasa S, Nsangi G, Sseviiri H, Thiery W, Vanhaeren R, 2021: Can local fieldwork help to represent intra-urban variability of canopy parameters relevant for tropical African climate studies? *Theoretical and Applied Climatology* 146, 457-474
- Vandamme S, Demuzere M, Verdonck ML, Zhang Z, Van Coillie F, 2019: Revealing Kunming's (China) historical urban planning policies through local climate zones. *Remote Sensing* 11, 1731
- Varentsov M, Wouters H, Platonov V, Konstantinov P, 2018: Megacity-induced mesoclimatic effects in the lower atmosphere: A modeling study for multiple summers over Moscow, Russia. *Atmosphere* 9, 50
- Varentsov M, Samsonov T, Demuzere M, 2020: Impact of urban canopy parameters on a megacity's modelled thermal environment. *Atmosphere* 11, 1349
- VDI, 1998: Methods for the human-biometeorological evaluation of climate and air quality for urban and regional planning. Part I: Climate. VDI guideline 3787. Part 2
- Verdonck ML, Okujeni A, van der Linden S, Demuzere M, De Wulf R, Van Coillie F, 2017a: Influence of neighbourhood information on 'Local Climate Zone' mapping in heterogeneous cities. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 62, 102-113
- Verdonck ML, Van Coillie F, De Wulf R, Okujeni A, van der Linden S, Demuzere M, Hooyberghs H, 2017b: Thermal evaluation of the local climate zone scheme in Belgium. In 2017 Joint Urban Remote Sensing Event
- Verdonck ML, Demuzere M, Hooyberghs H, Priem F, Van Coillie F, 2019: Heat risk assessment for the Brussels capital region under different urban planning and greenhouse gas emission scenarios. *Journal of Environmental Management* 249, 109210
- Véliz KD, Kaufmann RK, Cleveland CJ, Stoner AM, 2017: The effect of climate change on electricity expenditures in Massachusetts. *Energy Policy* 106, 1-11
- Villadiego K, Velay-Dabat MA, 2014: Outdoor thermal comfort in a hot and humid climate of Colombia: A field study in Barranquilla. *Building and Environment* 75, 142-152
- Voogt JA, Oke TR, 2003: Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment* 86, 370-384
- Wang SK, 1993: *Handbook of air conditioning and refrigeration (Vol. 2)*. McGraw-Hill
- Wang F, Wang Y, 2021: Potential role of local contributions to record-breaking high-temperature event in Xiamen, China. *Weather and Climate Extremes* 33, 100338
- Wang Z, Xing W, Huang Y, Xie T, 2016: Studying the Urban Heat Island Using a Local Climate Zone Scheme. *Polish Journal of Environmental Studies* 25, 2609-2616
- Wang Y, Zhan Q, Ouyang W, 2017: Impact of urban climate landscape patterns on land surface temperature in Wuhan, China. *Sustainability* 9, 1700
- Wang R, Ren C, Xu Y, Lau KKL, Shi Y, 2018a: Mapping the local climate zones of urban areas by GIS-based and WUDAPT methods: A case study of Hong Kong. *Urban Climate* 24, 567-576

- Wang C, Middel A, Myint SW, Kaplan S, Brazel AJ, Lukasczyk J, 2018b: Assessing local climate zones in arid cities: The case of Phoenix, Arizona and Las Vegas, Nevada. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 141, 59-71
- Wang R, Cai M, Ren C, Bechtel B, Xu Y, Ng E, 2019: Detecting multi-temporal land cover change and land surface temperature in Pearl River Delta by adopting local climate zone. *Urban Climate* 28, 100455
- Wang Q, Zhang C, Ren C, Hang J, Li Y, 2020: Urban heat island circulations over the Beijing-Tianjin region under calm and fair conditions. *Building and Environment* 180, 107063
- Wang R, Gao W, Zhou N, Kammen DM, Peng W, 2021a. Urban structure and its implication of heat stress by using remote sensing and simulation tool. *Sustainable Cities and Society* 65, 102632
- Wang Y, Ni Z, Hu M, Chen S, Xia B, 2021b: A practical approach of urban green infrastructure planning to mitigate urban overheating: A case study of Guangzhou. *Journal of Cleaner Production* 287, 124995
- Wei CZ, Blaschke T, 2016: Identifying local scale climate zones of urban heat island from hj-1b satellite data using self-organizing maps. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 41, 1431
- Wilby RL, 2007: A review of climate change impacts on the built environment. *Built Environment* 33, 31-45
- Wilby RL, Jones PD, Lister DH, 2011: Decadal variations in the nocturnal heat island of London. *Weather* 66, 59-64
- Wilmers F, 1990: Effects of vegetation on urban climate and buildings. *Energy and Buildings* 15, 507-514
- Winquist A, Grundstein A, Chang HH, Hess J, Sarnat SE, 2016: Warm season temperatures and emergency department visits in Atlanta, Georgia. *Environmental Research* 147, 314-323
- Wong MMF, Fung JCH, Ching J, Yeung PPS, Tse JWP, Ren C, Wang R, Cai M, 2019: Evaluation of uWRF performance and modeling guidance based on WUDAPT and NUDAPT UCP datasets for Hong Kong. *Urban Climate* 28, 100460
- World Meteorological Organization, 1983: Abridged final report, 8th session. Geneva, Commission for Climatology and Applications of Meteorology, WMO No. 600
- Wu J, Zha J, Zhao D, 2017: Evaluating the effects of land use and cover change on the decrease of surface wind speed over China in recent 30 years using a statistical downscaling method. *Climate Dynamics* 48, 131-149
- Wu Y, Sharifi A, Yang P, Borjigin H, Murakami D, Yamagata Y, 2018: Mapping building carbon emissions within local climate zones in Shanghai. *Energy Procedia* 152, 815-822
- Wu J, Liu C, Wang H, 2022: Analysis of Spatio-temporal patterns and related factors of thermal comfort in subtropical coastal cities based on local climate zones. *Building and Environment* 207, 108568
- Xia H, Chen Y, Song C, Li J, Quan J, Zhou G, 2022: Analysis of surface urban heat islands based on local climate zones via spatiotemporally enhanced land surface temperature. *Remote Sensing of Environment* 273, 112972
- Xiang L, Ren C, 2017: Effects of the building typology on PET value in different local climate zones-A case study in Beijing, China. *Proceedings of the Passive and Low Energy Architecture*
- Xu Z, Chen J, Xia J, Du P, Zheng H, Gan L, 2018: Multisource earth observation data for land-cover classification using random forest. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 15, 789-793
- Xu G, Zhu X, Tapper N, Bechtel B, 2019: Urban climate zone classification using convolutional neural network and ground-level images. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 43, 410-424
- Xu C, Kohler TA, Lenton TM, Svenning JC, Scheffer M, 2020: Future of the human climate niche. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117, 11350-11355
- Xue J, You R, Liu W, Chen C, Lai D, 2020: Applications of Local Climate Zone Classification Scheme to Improve Urban Sustainability: A Bibliometric Review. *Sustainability* 12, 8083
- Yang J, Wang ZH, Chen F, Miao S, Tewari M, Voogt JA, Myint S, 2015: Enhancing hydrologic modelling in the coupled Weather Research and Forecasting-urban modelling system. *Boundary-Layer Meteorology* 155, 87-109
- Yang X, Li Y, Luo Z, Chan PW, 2017: The urban cool island phenomenon in a high-rise high-density city and its mechanisms. *International Journal of Climatology* 37, 890-904
- Yang X, Yao L, Jin T, Peng LL, Jiang Z, Hu Z, Ye Y, 2018: Assessing the thermal behavior of different local climate zones in the Nanjing metropolis, China. *Building and Environment* 137, 171-184
- Yang J, Wang Y, Xiu C, Xiao X, Xia J, Jin C, 2020: Optimizing local climate zones to mitigate urban heat island effect in human settlements. *Journal of Cleaner Production* 275, 123767
- Yeung PS, Fung JCH, Ren C, Xu Y, Huang K, Leng J, Wong MMF, 2020: Investigating future urbanization's impact on local climate under different climate change scenarios in MEGA-urban regions: A case study of the Pearl River Delta, China. *Atmosphere* 11, 771
- Yoo C, Han D, Im J, Bechtel B, 2019: Comparison between convolutional neural networks and random forest for local climate zone classification in mega urban areas using Landsat images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 157, 155-170

- Zander KK, Botzen WJ, Oppermann E, Kjellstrom T, Garnett ST, 2015: Heat stress causes substantial labour productivity loss in Australia. *Nature Climate Change* 5, 647-651
- Zhang G, Ghamisi P, Zhu XX, 2019: Fusion of heterogeneous earth observation data for the classification of local climate zones. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 57, 7623-7642
- Zhang Y, Cao S, Zhao L, Cao J, 2022: A case application of WRF-UCM models to the simulation of urban wind speed profiles in a typhoon. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 220, 104874
- Zhao Y, Sultan B, Vautard R, Braconnot P, Wang HJ, Ducharne A, 2016: Potential escalation of heat-related working costs with climate and socioeconomic changes in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113, 4640-4645
- Zhao L, Oppenheimer M, Zhu Q, Baldwin JW, Ebi KL, Bou-Zeid E, Guan K, Liu X, 2018: Interactions between urban heat islands and heat waves. *Environmental Research Letters* 13, 034003
- Zhao N, Ma A, Zhong Y, Zhao J, Cao L, 2019: Self-Training classification framework with spatial-contextual information for local climate zones. *Remote Sensing* 11, 2828
- Zhao Z, Shen L, Li L, Wang H, He BJ, 2020: Local climate zone classification scheme can also indicate local-scale urban ventilation performance: An evidence-based study. *Atmosphere* 11, 776
- Zhou B, Lauwaet D, Hooyberghs H, De Ridder K, Kropp JP, Rybski D, 2016: Assessing seasonality in the surface urban heat island of London. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 55, 493-505
- Zhou D, Xiao J, Bonafoni S, Berger C, Deilami K, Zhou Y, Frolking S, Yao R, Qiao Z, Sobrino JA, 2018: Satellite remote sensing of surface urban heat islands: Progress, challenges, and perspectives. *Remote Sensing* 11, 48
- Zhou X, Yamamoto M, Yan S, Ishida Y, Cai M, Ji Q, Makvandi M, Li C, 2022: Exploring the impacts of heat release of vehicles on urban heat mitigation in Sendai, Japan using WRF model integrated with urban LCZ. *Sustainable Cities and Society* 82, 103922
- Ziaul S, Pal S, 2020: Modeling the effects of green alternative on heat island mitigation of a meso level town, West Bengal, India. *Advances in Space Research* 65, 1789-1802
- Zonato A, Martilli A, Di Sabatino S, Zardi D, Giovannini L, 2020: Evaluating the performance of a novel WUDAPT averaging technique to define urban morphology with mesoscale models. *Urban Climate* 31, 100584
- Zsebeházi G, Szépszó G, 2020: Modeling the urban climate of Budapest using the SURFEX land surface model driven by the ALADIN-Climate regional climate model results. *Időjárás* 124, 191-207
- Zsebeházi G, Mahó SI, 2021: Assessment of the Urban Impact on Surface and Screen-Level Temperature in the ALADIN-Climate Driven SURFEX Land Surface Model for Budapest. *Atmosphere* 12, 709
- Žuvela-Aloise M, 2017: Enhancement of urban heat load through social inequalities on an example of a fictional city King's Landing. *International Journal of Biometeorology* 61, 527-539
- Žuvela-Aloise M, Koch R, Neureiter A, Böhm R, Buchholz S, 2014: Reconstructing urban climate of Vienna based on historical maps dating to the early instrumental period. *Urban Climate* 10, 490-508
- Žuvela-Aloise M, Koch R, Buchholz S, Früh B, 2016: Modelling the potential of green and blue infrastructure to reduce urban heat load in the city of Vienna. *Climatic Change* 135, 425-438
- Žuvela-Aloise M, Andre K, Schwaiger H, Bird DN, Gallaun H, 2018: Modelling reduction of urban heat load in Vienna by modifying surface properties of roofs. *Theoretical and Applied Climatology* 131, 1005-1018

Köszönetnyilvánítás

A dolgozatban bemutatott kutatásokat a következő szervezetek és projektek támogatták: Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (K-67626, PD-100352, K-111768, K-120346, K-137801), Bolyai János Kutatási ösztöndíj, Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-16-4 és ÚNKP-17-4 Új Nemzeti Kiválóság Programja, Ministry of Human Capacities, Hungary grant 20391-3/2018/FEKUSTRAT, IPA Cross Border Cooperation Programme HUSRB/1203/122/166. (URBAN-PATH), International Visegrad Fund Standard Grant no. 21410222, MTA Kiváló Kutatóhely. A felhasznált regionális klímamodell-szimulációkat az EURO-CORDEX projekt biztosította. A MUKLIMO_3 modellt a Német Időjárési Szolgálat (Deutscher Wetterdienst) fejlesztette.

Köszönöm az értekezés eredményeihez vezető közös munkát a szegedi Városklíma Kutatócsoport volt és jelenlegi tagjainak (Unger János, Lelovics Enikő, Skarbit Nóra, Molnár Gergely, Gyöngyösi András Zénó, Kovács Attila, Kiss Márton, Gulyás Ágnes), főbb külföldi partnereimnek (Iain D. Stewart, Benjamin Bechtel, Fredrik Lindberg, Andreas Matzarakis, Stevan Savić, Anita Bokwa), és további társszerzőimnek (Csépe Zoltán, Mahó Sándor, Mucsi László, Gál Csilla, Kosztolányi Éva, Dragan Milošević, Vladimir Marković, Daniela Arsenović, Vladimir Marković, Jan Geletič, Michal Lehnert, Maja Žuvela-Aloise, Brigitta Hollósi, Petr Dobrovolný, Monika J Hajto, Rafal Kielar, Jakub P Walawender, Pavel Št'astný, Juraj Holec, Katarzyna Ostapowicz, Jarmila Burianová, Marcel Garaj, Paul J Alexander, Christoph Beck, Jürgen Böhner, Oscar Brousse, Jason Ching, Matthias Demuzere, Cidália Fonte, Julia Hidalgo, Peter Hoffmann, Ariane Middel, Gerald Mills, Chao Ren, Linda See, Panagiotis Sismanidis, Marie-Leen Verdonck, Guang Xu, Yong Xu).

Köszönettel tartozok a támogató, tudományos kutatásra sarkalló légkör és környezet megteremtéséért az SZTE Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék valamint Földrajzi és Földtudományi Intézet kollektívájának, a hazai meteorológus szakmai közösségnek és a nemzetközi városklimatológus közösségnek (IAUC).

Köszönöm családom támogatását és néha türelmét. Angelika, remélem sokáig fogod büszkén őrizni a könyvespolcodon ezt a kopottas fekete könyvet.