

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

**Budapesti lokális klímazónák
összehasonlító elemzése
MODIS felszínhőmérsékleti adatok alapján**

DIPLOMAMUNKA



Készítette:

Dian Csenge Márta

Meteorológus mesterszak

Éghajlat kutató szakirány

Témavezetők:

dr. Pongrácz Rita

Soósné dr. Dezső Zsuzsanna

Dr. habil. Bartholy Judit

ELTE TTK Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2017

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Szakirodalmi áttekintés	5
3. Felhasznált adatok	10
3.1. Műholdas adatok	10
3.2. Budapestre meglévő LCZ	11
4. Alkalmazott módszertan	13
5. Az eredmények bemutatása	16
5.1. Módszertani összehasonlítások	16
5.2. A felhőborítottságra vonatkozó kritériumok vizsgálata	18
5.3. Havi átlagos hősziget-intenzitás értékek eloszlása	22
5.4. Hősziget-intenzitás átlagos éves menete	25
5.5. Azonos LCZ típusba eső rácscellák összehasonlítása	27
5.6. A hősziget-intenzitás értékek havi felbontású relatív gyakoriságai ..	33
5.7. Esettanulmányok felhőmentes időszakokra	37
6. Összefoglalás	44
Köszönetnyilvánítás	46
Irodalomjegyzék	47
Internetes források	49
Függelék	50

1. Bevezetés

A Föld népessége folyamatosan növekszik, és a jövőben várhatóan ennek a tendenciának az erősödése lesz meghatározó. A becslések azt jelzik, hogy a növekvő népességben belül a városi lakosság aránya egyre emelkedik. A városokban a mesterséges burkolat és az épületek megváltoztatják az éghajlati jellemzőket, ezért kialakul a sajátos városi mikroklíma. A természetes környezethez képest a városokban módosul a légáramlás, a vízháztartási egyenleg, a sugárzási viszonyok, ennek következtében pedig jelentős eltérések alakulnak ki a felszín- és léghőmérsékletben egyaránt. Az ok-okozati összefüggések áttekintése, valamint a városi és a környező területek közötti különbségek minél pontosabb meghatározása érdekében a városklimatológia egyre fontosabb kutatási területté válik a meteorológusok körében. A városi klíma elemei közül a hőmérséklet módosulása az egyik legjelentősebb vizsgálandó kérdéskör, hiszen a hőmérsékleti viszonyok egészen közvetlenül és alapvetően meghatározzák a lakosság mindennapjait. A város és a vidék közötti hőmérsékletkülönbséget tekintjük a városi hősziget-jelenség fő jellemző számának (Oke, 1973).

A városi hősziget vizsgálatára két alapvető kutatási módszer is alkalmazható: in situ mérések és műholdas alapú mérések. A helyszíni mérések során léghőmérséklet mérések történnek, míg a műholdak felszínhőmérsékleti adatokat szolgáltatnak. A léghőmérsékletből és a felszínhőmérsékletből számított hősziget-intenzitás napi menete különböző, ezért nagyon fontos hangsúlyozni, hogy milyen adatokkal dolgozunk. Magyarországon 2000 óta folynak műholdas városi hősziget-vizsgálatok (Bartholy et al., 2005; Dezső, 2009; Pongrácz et al., 2015). Ezekhez a NASA¹ által felbocsátott műholdak méréseit használjuk fel, melyek a leképezést végző szenzortól függően más-más felbontásban állnak a rendelkezésünkre. A műholdas vizsgálatok előnye, hogy egyidejűleg nagy térségről nyerünk információt. Mindemellett helyszíni mérések alapján is végezhető hősziget-intenzitás kutatás. Ilyen méréseket az elmúlt évtizedben Magyarországon belül Szegedre és Debrecenre (Gál et al., 2016) végeztek, illetve az elmúlt pár évben Budapest IX. kerületének felújított részein is elindultak szisztematikus mérési programok (Dian et al., 2015).

A városklimatológiai kutatásokhoz elengedhetetlen a város szerkezetének ismerete, azonban ez városról városra nagyon eltérő lehet, valamint egy városon belül is sokféle típusú városrész előfordulhat. Ennek jellemzésére hozta létre Stewart és Oke 2012-ben a

¹ NASA (National Aeronautics and Space Administration): amerikai Nemzeti Repülési és Űrhajózási Hivatal

lokális klímazónákat (LCZ²). Beépítettségi, épületmagassági, felszínborítási és energetikai adatok, ismeretek alapján a természetes és mesterséges környezet különböző kategóriákba sorolható. Ez a tipizálás új megvilágításba helyezi a városklimatológiai, ezen belül is a városi hősziget-jelenséggel foglalkozó kutatásokat. Hazánkban is elkezdődtek az LCZ alapú vizsgálatok Szegedre és Budapestre (Unger et al., 2014).

Diplomamunkámban a budapesti LCZ osztályozás és a városi hősziget jelenségének kapcsolatát vizsgáljuk műholdas felszínhőmérsékleti mérésekből számított hősziget-intenzitás értékek felhasználásával. Meghatározzuk, hogy a műholdas leképezéseknél alkalmazott rácsfelbontás alapján milyen az LCZ típusok eloszlása Budapesten. Majd ezek felhasználásával vizsgáljuk az átlagos havi hősziget-intenzitás mezőket évszakos és havi bontásban. Az átlagos mezők értékelése mellett extrém meleg időjárási helyzetekben külön elemezzük a hősziget-intenzitást. Az elemzések során a legfontosabb kérdések a következők: Hogyan befolyásolja a felhőborítottság a hősziget-intenzitást? Milyen összefüggésben áll a hősziget-intenzitás értéke az adott terület LCZ besorolásával? Milyen évszakos változásokat mutat az intenzitás értéke Budapesten az elmúlt 16 évben lokális klímazóna típusonként? Különbözik-e a hősziget-intenzitás napi menete az egyes LCZ osztályokban? Hogyan alakulnak az azonos LCZ típusba tartozó ráscellák átlagos intenzitás értékei?

A dolgozatban először áttekintjük a városi hősziget jelenségét és a lokális klímazónák fogalmát, valamint azon városklimatológiai kutatások rövid történetét, melyek ezekkel a témákkal foglalkoznak, különös tekintettel a hazai vizsgálatokra (2. fejezet). A 3. fejezetben bemutatjuk az elemzésekhez felhasznált műholdas adatokat és a budapesti lokális klímazóna térképet. Ezt követően részletezzük a vizsgálatok során alkalmazott módszertant (4. fejezet). Az 5. fejezetben ismertetjük a kapott eredményeket. Végül a 6. fejezetben olvasható a dolgozat összefoglalása.

² LCZ (Local Climate Zone)

2. Szakirodalmi áttekintés

A fejlődő gazdaság hatására napjainkban a Föld lakosságának több mint 54%-a városokban él, Európában ez az arány 73%. Az ENSZ (Egyesült Nemzetek Szervezete) előrejelzései szerint 2050-re a népesség 66%-a él majd városi környezetben (ENSZ, 2015). Magyarországon ez az arány jelenleg is nagyobb, mint 60% [1 – Központi Statisztikai Hivatal]. A városok megbontják a természetes környezetet, ennek következtében módosulnak az energia-háztartási, sugárzási és áramlási viszonyok. A városoknak sajátos mikroklimája van, ami a mesterséges burkolatra és az épületek elhelyezkedésére vezethető vissza. Az egyik legjelentősebb változás a városi hősziget (UHI³) jelenségében nyilvánul meg. Ahogyan azt Oke (1973, 1982) definiálta, a városi hősziget-intenzitás a város sűrűn beépített területeinek és a városon kívüli referencia területnek a hőmérséklet különbségét jelenti.

Hazánkban mintegy két-három évtizede folyamatosan zajlanak városi hősziget-vizsgálatok (Probáld, 2014). Az ELTE Meteorológiai Tanszékén sokáig elsősorban műholdas alapú városklíma elemzések történtek (Bartholy et al., 2005, Dezső et al., 2005, 2012, Pongrácz et al., 2010, Dian, 2015). Ezeket kiegészítendő 2011-től indult a műholdas mérések és a standard telepítésű meteorológiai mérőhálózat méréseinek összehasonlítása (Lelovics et al., 2011). Ezen vizsgálatok lehetőségeit lényegesen szűkítette az a tény, hogy a mérőállomások városi léptékben viszonylag ritka területi elhelyezkedése miatt kevés pontról állnak rendelkezésre adatok. A rögzített mérések mellett Budapesten belül kisebb területre fókuszálva, a IX. kerület felújított területein 2015 tavasza óta folynak gyalogos in situ mérések (Pongrácz et al., 2016). A mozgó helyszíni méréseknek - a Budapesthez viszonyítva nagyságrendileg kisebb méretű vidéki városokban - már pár évtizedre visszanyúló hagyománya van Magyarországon. Szegeden 1999–2000 és 2002–2003 időszakra (Unger, 2004, Gál et al., 2013), valamint Debrecenben (Bottyán et al., 2005, Bottyán, 2007) járműre szerelt mérőműszerek adataiból végeztek hősziget-intenzitás elemzéseket, illetve kitelepített mérések is történtek (Sümeghy és Unger, 2003; Bottyán 2007).

A városok – és azon belül az egyes városrészek is – nagyon különböző szerkezetűek lehetnek. A városi, városon belüli struktúra jelentősen befolyásolja a mikroklimát, így egy város is többféle részre osztható meteorológiai, klimatológiai szempontból. Ezeknek a különbségeknek a jellemzésére és az ezekben kialakuló éghajlati viszonyok leírására hozták létre az ún. lokális klímazónákat (LCZ) (Stewart és Oke, 2012). Az LCZ

³ UHI (Urban heat island)

besorolásokat különböző paraméterekkel lehet jellemezni (1. táblázat). Ezek egyrészt geometriával és felszínborítottsággal kapcsolatos paraméterek, például az égboltláthatóság, vagy az épületek magasságával és területével kapcsolatos információk, érdeességet jellemző tulajdonságok. Másrészt termikus, sugárzási és energetikai paraméterek, például az antropogén hőkibocsátás.

1. táblázat: Az LCZ típusokat jellemző paraméterek (Stewart - Oke, 2012)

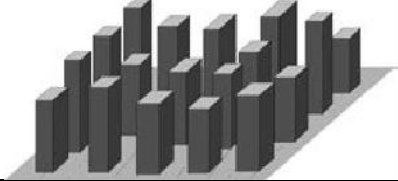
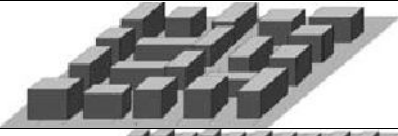
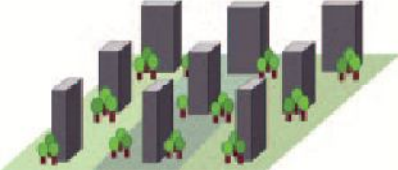
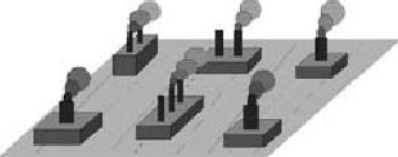
Geometriai és felszínborítottsági paraméterek	Termikus, sugárzási és energetikai paraméterek
égboltláthatóság	felszíni hőátadási tényező
épületmagasság és utcaszélesség aránya	felszíni albedó
épület alapterületi aránya	antropogén hőkibocsátás
vízzáró felszín aránya	
vízáteresztő felszín aránya	
érdeességi elemek magassága	
terepi érdeességi osztály	

A lokális klímazónákat többféle osztályozási elv alapján soroljuk kategóriába, majd ezeket kombinálva lehet összetettebb városrészeket jellemezni. A 2. táblázatban láthatók a beépítettséggel kapcsolatos típusok, melyeket LCZ 1-től LCZ 10-ig számozunk. Itt a fő jellegzetességek az épületmagasság, valamint a terület nyitottsága vagy zártsága, ami azt fejezi ki, hogy mennyire sűrűn helyezkednek el az épületek. Ide tartoznak még a területhasználat alapján elkülöníthető nehézipari régiók.

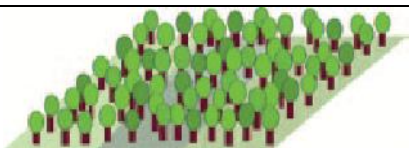
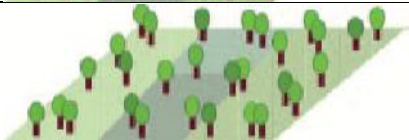
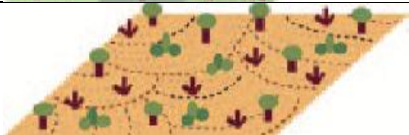
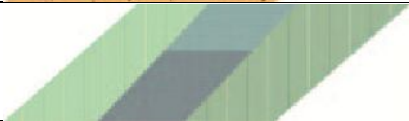
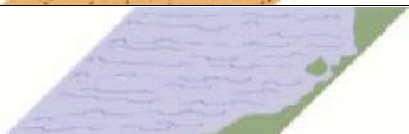
A 3. táblázat a felszínborítottságon alapuló kategóriákat mutatja be (LCZ A-tól LCZ G-ig jelölve). Ezekben a kategóriákban a növényzet magassága és típusa (fák, bokrok, alacsony növényzet), a növényzet sűrűsége és a talaj lefedettsége (burkolt, homok, kőzet) a meghatározó tulajdonságok.

Az LCZ típusokat további információk figyelembevételével is lehet finomítani, melyeket a 4. táblázat összegez. Ezek a tulajdonságok időben erősen változóak, így az adott jellemző (lombtalan fák, hótakaró, száraz/nedves talaj) nem állandó egy-egy területen.

2. táblázat: LCZ típusok a beépítettség alapján (Stewart és Oke, 2012)

Beépítettség típusok	Jellemző térszerkezet
1. Kompakt, magas épületek (sokemeletes)	
2. Kompakt, középmagas épületek	
3. Kompakt, alacsony épületek	
4. Nyitott, magas épületek (sokemeletes)	
5. Nyitott, középmagas épületek	
6. Nyitott, alacsony épületek	
7. Könnyűszerkezetű alacsony épületek	
8. Nagy kiterjedésű alacsony épületek	
9. Ritkán beépített	
10. Nehézipari zóna	

3. táblázat: LCZ típusok a felszínborítás alapján (Stewart és Oke, 2012)

Felszínborítási típusok	Jellemző térszerkezet
A. Sűrűn elhelyezkedő fák	
B. Elszórtan elhelyezkedő fák	
C. Bokros, cserjés	
D. Alacsony növényzet	
E. Csupasz kőzet vagy burkolat	
F. Csupasz talaj vagy homok	
G. Víz	

4. táblázat: LCZ típusok változó felszínborítási jellemzői (Stewart és Oke, 2012)

Változó felszínborítási tulajdonságok
b. lombtalan fák
s. hótakaró
d. száraz talaj
w. nedves talaj

A különböző LCZ típusokhoz meghatározott kritikus értékek tartoznak az 1. táblázatban felsorolt paraméterekre vonatkozóan. Ezek a kritikus értékek alkalmasak egy nagyváros, metropolisz klímazónákba sorolásához (Planning Department, 2012), de Magyarország nagyobb városaiban – beleértve Budapestet is – nem minden LCZ típus jelenik meg. Például az LCZ 1 típus, a kompakt magas épületek kategóriája egyáltalán nem fordul elő

az egész országban. Hazánkban eddig Szegedre és Budapestre végeztek lokális klímazóna vizsgálatokat (Unger et al., 2014).

A lokális klímazónák segítséget jelenthetnek egyes városklimatológiai jelenségek vizsgálatában. Például a városi hősziget szerkezete jellegzetes LCZ típusokhoz köthető, azok városon belüli eloszlásának, pontos struktúrájának ismeretében árnyaltabb képet kaphatunk a városi hőszigetről, hiszen az LCZ típusok alkalmazásával sokkal jobban figyelembe vehetők a beépítettségi viszonyok.

3. Felhasznált adatok

3.1. Műholdas adatok

A városi hősziget jelenségét többféle módszerrel lehet vizsgálni, egyrészt helyszíni, in situ mérések segítségével, másrészt műholdas adatok elemzésével. A helyszíni mérésekkel alapvetően a léghőmérséklet mérhető, így ezen alapuló hősziget-intenzitást tudunk számítani, míg a műholdak szenzorai a felszínhőmérsékletet mérik, tehát felszínhőmérsékletből származtatott intenzitás értékeket kapunk. A műholdas mérések legnagyobb előnye a helyszíni mérésekkel szemben, hogy egyidejűleg nagy egybefüggő területről lehet információhoz jutni.

Az amerikai NASA számos kutatási célból fejlesztett műholdat bocsátott fel, melyek közül kettő méréseit másfél évtizede használjuk városklimatológiai kutatások során. A Terra műhold 1999-ben, míg az Aqua műhold 2002-ben állt pályára (NASA, 1999; 2002). A Terra és az Aqua kvázipoláris pályájú műholdak, mintegy 705 km magasan keringenek, kb. 100 perc a keringési idejük, így egy nap alatt 16-szor kerülnek meg a Földet. Mindkét műhold naponta kétszer készít képet a Föld egy adott pontjáról, kivéve a pólusok térségét, amely felett minden egyes keringés során áthalad. Hazánk felett a Terra műhold délelőtt 9–10 UTC és este 20–21 UTC körül halad át, míg az Aqua délben 12–13 UTC és éjszaka 2–3 UTC körül (Dezső et al., 2005).

A Terra műholdon öt, az Aqua műholdon pedig hat szenzor található (NASA, 1999), melyek egy időben végeznek méréseket, így egyszerre többféle szempontból vizsgálhatók a földi folyamatok. Mindkét műholdon megtalálható a MODIS⁴ szenzor, mely 36 spektrális csatornán végez leképezéseket 1 km²-es rácsfelbontásban. Az 5. táblázatban látható az a hét infravörös csatorna, melyeken a mért sugárzási értékek felhasználásával számolható a felszínhőmérséklet (LST⁵), és ebből a hősziget-intenzitás. A Wan és Snyder (1999) módszerével előállított felszínhőmérsékleti mezők szinte napra készen letölthetők az LP DAAC⁶ adatközpontból 2001-től kezdődően.

⁴ MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer): Közepes felbontású leképező spektrális sugárzásmérő

⁵ LST (Land surface temperature)

⁶ LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center): Földfelszíni Folyamatokhoz Elosztó Aktív Archiváló Központ

5. táblázat: A MODIS szenzor méréseiből a felszínhőmérséklet számításához alkalmazott hét infravörös tartomány (Wan és Snyder, 1999)

Csatorna sorszám	Hullámhossz-tartomány (µm)
20	3,660–3,840
22	3,929–3,989
23	4,020–4,080
29	8,400–8,700
31	10,780–11,280
32	11,770–12,270
33	13,185–13,485

A műholdas mérések hátránya, hogy csak felhőmentes időben tudnak a szenzorok a felszínre vonatkozó használható méréseket végezni. Borult időben adathiány lép fel a felszínhőmérsékleti mezőkben, és ennek következtében a hősziget-intenzitásban is. Budapestre elvileg napi négy mért adat áll rendelkezésünkre a Terra és az Aqua műhold napi két-két áthaladásából, de a felhős égbolt – főként a téli időszakban – a használható műholdfelvételek számát jelentősen csökkenti.

Jelen kutatásban a napi MODIS adatokból készített havi átlagmezőket és a napi felbontású mezőket használjuk fel annak vizsgálatára, hogy az egyes MODIS rácscellákban milyen a hősziget-intenzitás eloszlása az elmúlt 15 évben, évszakos bontásban, hogyan alakul az éves menet, illetve néhány felhőmentes időszak esettanulmányát mutatjuk be részletesebben.

3.2. Budapestre meglévő LCZ

A városok lokális klímazónákra osztása Stewart és Oke (2012) tanulmánya óta egyre elterjedtebb kutatási területté válik. Az LCZ térképek értékes információkat tartalmaznak a városszerkezetről, így felhasználhatók időjárás-előrejelző, éghajlati és energia-háztartási modellekben egyaránt.

A WUDAPT⁷ egy olyan nemzetközi kezdeményezés, melynek célja, hogy adatokat gyűjtsön a városok szerkezetéről és működéséről világszerte [2 – WUDAPT]. Ezen projekt részeként lehetőség nyílik a különböző városok lokális klímazóna térképének elkészítésére. Ennek érdekében a WUDAPT honlapján részletes leírás és segédletek találhatók az LCZ térképek elkészítéséhez. Vannak elsődlegesen kijelölt városok, melyek kategorizálásához minden szükséges előkészített adat elérhető a honlapról, mindazonáltal további városok

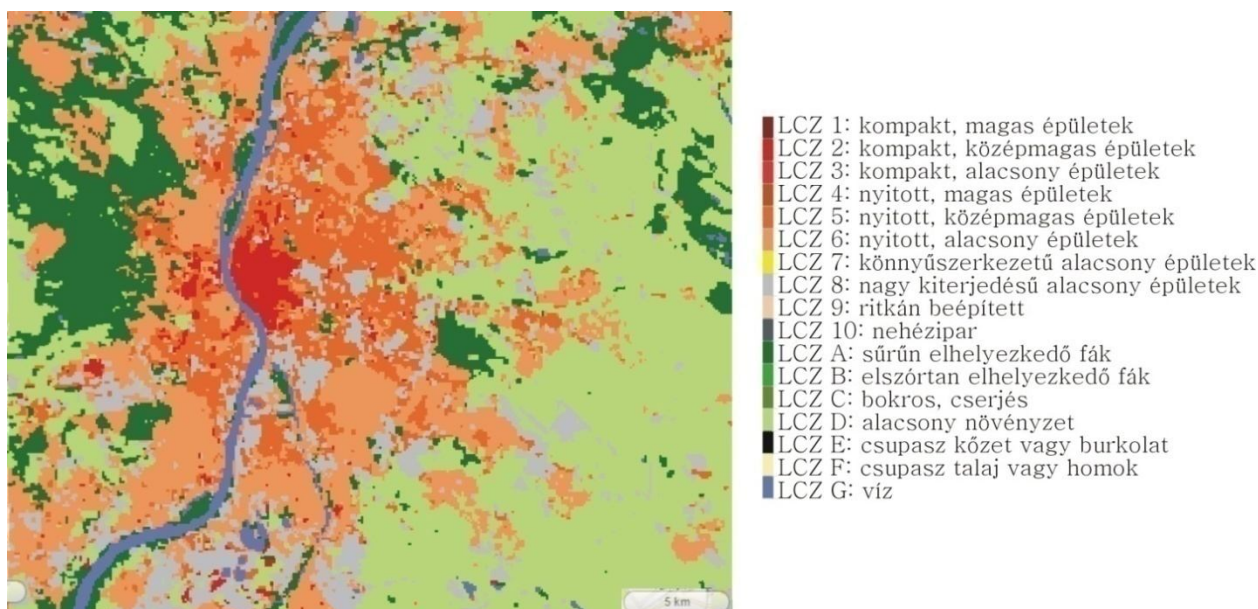
⁷ WUDAPT (World Urban Database and Access Portal Tool): Globális városi adatbázis és hozzáférési pont eszköztár

LCZ térképe is elkészíthető a leírások alapján. Például a 2015 nyarán Toulouse-ban megrendezésre került 9. Nemzetközi Városklimatológia Konferencia (ICUC9⁸) keretében több nagyváros – többek között Budapest – LCZ kategorizálása is megtörtént a WUDAPT segítségével (Bechtel et al., 2015).

Hazánkban mindeztidáig a főváros és Szeged LCZ térképe készült el ezzel a módszerrel (Gál et al., 2015). Jelen munkánkban a jelenleg rendelkezésre álló budapesti LCZ térképet használjuk fel (1. ábra). Budapesten a mindösszesen 17 LCZ típusból kevesebb, mint a fele található meg, hiszen ezekbe a kategóriákba a világ összes városát be kell sorolni, így az olyan metropoliszokat is, melyeknek egyik jellegzetes épület-típusa a felhőkarcoló. Hazánk fővárosában ilyen magasságú épületek köztudottan nincsenek, s a jelenlegi szabályozás szerint építésük nem is engedélyezett [4 – Budapest Főváros Településszerkezeti Terve].

A teljes rendszerből a Budapesten fellelhető hétféle LCZ típus a következő:

- LCZ 2: kompakt beépítettség, középmagas épületek
- LCZ 5: nyitott beépítettség, középmagas épületek
- LCZ 6: nyitott beépítettség, alacsony épületek
- LCZ 8: nagy kiterjedésű alacsony épületek
- LCZ A: sűrűn elhelyezkedő fák
- LCZ D: alacsony növényzet
- LCZ G: víz



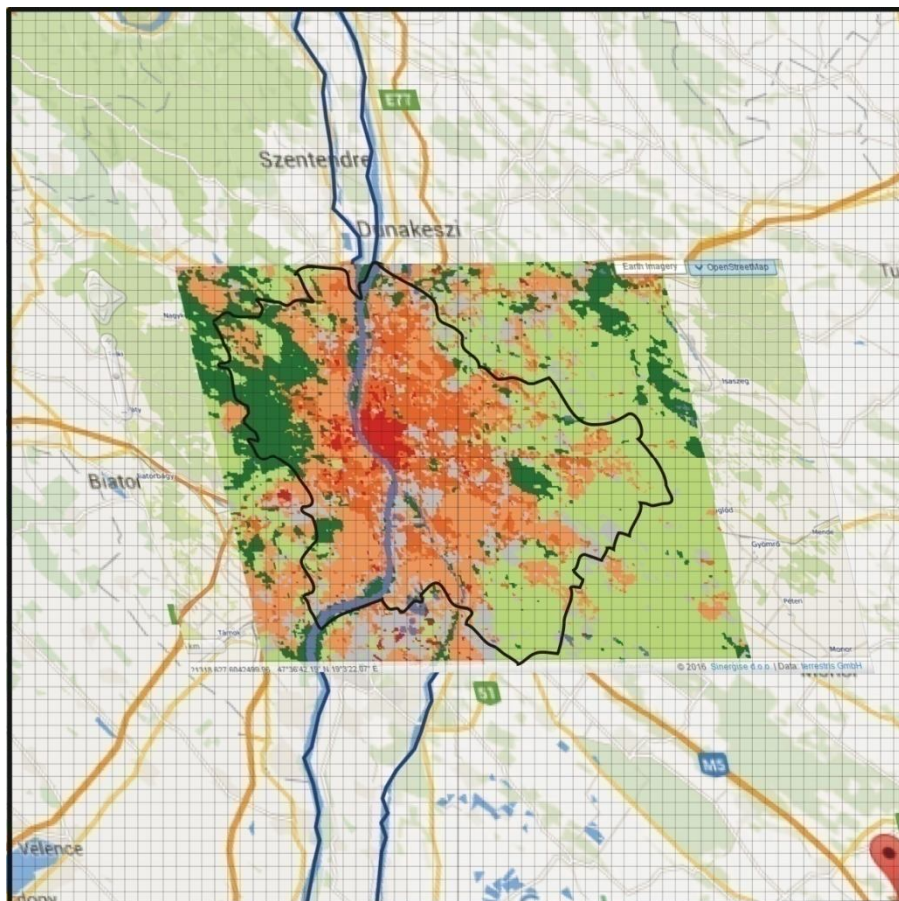
1. ábra: Budapest LCZ osztályozása (Gál et al. munkája)

[3 – Budapest LCZ térképe]

⁸ ICUC9 (9th International Conference on Urban Climate)

4. Alkalmazott módszertan

Kutatásunk során az LCZ típusokat és a MODIS szenzor által mért adatokból számított hősziget-intenzitás értékek viszonyát elemezzük 2001 januárjától 2016 októberéig. Ehhez először is meg kell határozni, hogy az egyes MODIS rácscellák milyen LCZ típusba tartoznak. A 2. ábrán egyszerre látható az LCZ térkép és a MODIS rácshálózat Budapestet is tartalmazó $70 \times 70 \text{ km}^2$ -es kivágata.



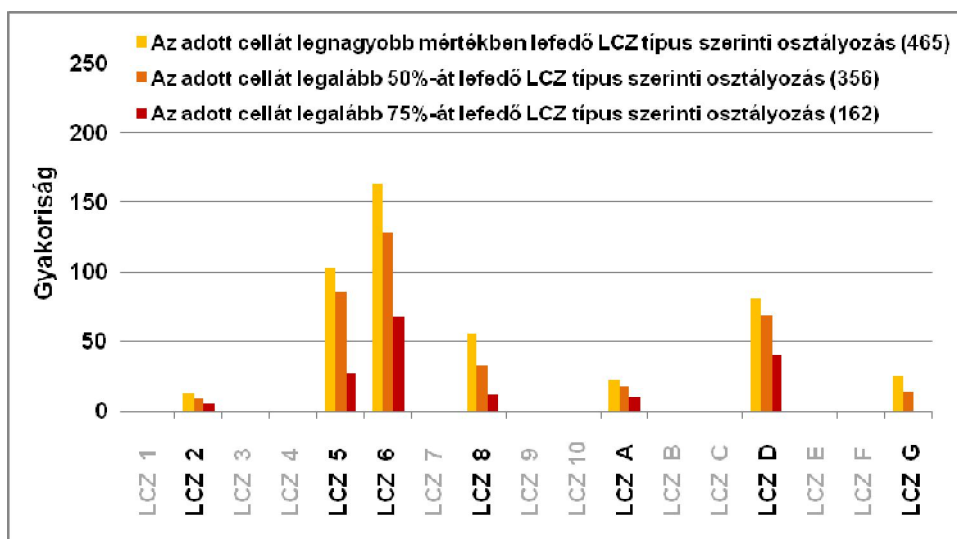
2. ábra: Budapest LCZ térképe és a MODIS $70 \times 70 \text{ km}^2$ -es kivágata

Az ELTE Meteorológiai Tanszékén végzett korábbi városi hősziget kutatások során már meghatározták, hogy mely rácspontok tekinthetők budapesti városi pontnak, s melyek a vidéki pontok, amikhez képest a hősziget-intenzitást számoljuk. Budapesten belül azonban vannak olyan rácscellák, melyeket bizonyos kritériumrendszer alapján figyelmen kívül kell hagyni a városi hősziget-intenzitás számítások során (Dezső, 2009). A Dezső-féle (2009) kritériumrendszerben három feltételnek kell teljesülnie a városi pontokra, melyek a következők:

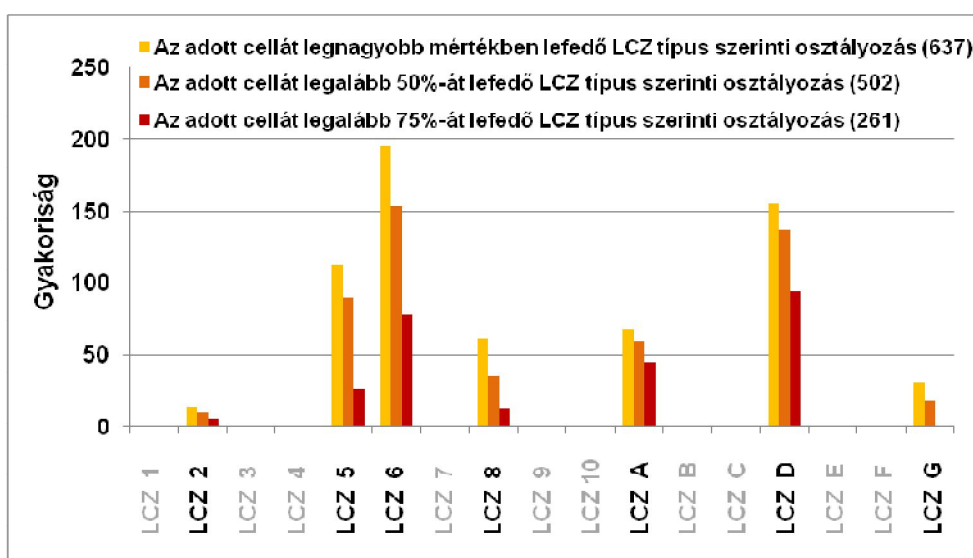
- a Google Earth adatbázis alapján meghatározott beépítettségi határon belül található
- a MODIS felszíntípus adatbázisban a beépített terület kategóriába esnek
- tengerszint feletti magasságuknak az előző két feltételnek megfelelő képpontok átlagos tengerszint feletti magasságától való eltérése nem nagyobb, mint ± 50 m

Jelen vizsgálataink során egyrészt szigorúan csak azokat a rácscellákat tekintjük, melyek a korábbi tanszéki kutatásokban figyelembe vett kritériumrendszer szerint városi pontnak számítanak, azaz lesznek olyan rácscellák, amik ugyan a városon belül helyezkednek el, de a részletesebb elemzések során nem vesszük figyelembe. Másrészt a Budapest közigazgatási határán belülrre eső összes MODIS rácscellával is dolgozunk, hiszen az LCZ besorolás a teljes területre vonatkozik. A budapesti cellákat jellemző LCZ kategóriákat három további szempont szerint határozzuk meg. Az első besorolási módszer kizárólag arra fókuszál, hogy az adott cellában melyik LCZ típus foglalja el a legnagyobb hányadot – függetlenül attól, hogy ez a részarány mekkora a teljes cellán belül. A második módszerben csak akkor vesszük figyelembe az elemzések során a rácscellát, amennyiben a cellát dominánsan alkotó LCZ típus legalább a cella területének 50%-át lefedi. Végül a harmadik módszerben a cellát dominánsan alkotó LCZ típusnak már legalább a rácscella területének 75%-át kell lefedni ahhoz, hogy figyelembe vegyük. A 3. ábrán láthatók a három módszertan alkalmazásával az egyes LCZ típusokba eső rácscellák száma a Dezső-féle (2009) kritériumrendszer alapján meghatározott területre. A legmagasabb értékeket értelemszerűen a legenyhébb feltétel mellett, azaz a domináns típuson alapuló módszer esetén kapjuk. Az LCZ G (víz) teljesen eltűnik abban az esetben, amikor a cella 75%-át fednie kell az adott LCZ típusnak. Mindhárom módszer alapján az LCZ 6 kategóriába (nyitott beépítésű, alacsony épületek) esik a legtöbb rácscella.

A 3. ábrához hasonlóan a 4. ábra mutatja a rácscellák típus szerinti eloszlását a teljes, Budapest közigazgatási határán belülrre eső területre. Az LCZ 2 (kompakt beépítésű, közép magas épületek) és az LCZ G (víz) kategória esetében, nincs érdemi különbség, míg az LCZ A (sűrű, fás) és az LCZ D (alacsony növényzet) típusnál jelentős a cellaszám-növekedés, hiszen ezeket a kategóriákat a Dezső-féle (2009) kritériumrendszer kiszűri a beépítetlenség következtében.



3. ábra: A MODIS rácscellák LCZ típusok szerinti eloszlása a Dezső (2009) féle kritériumrendszer alapján városi pontnak tekintett cellákra vonatkozóan. Zárójelben az összes vizsgált cella száma szerepel.

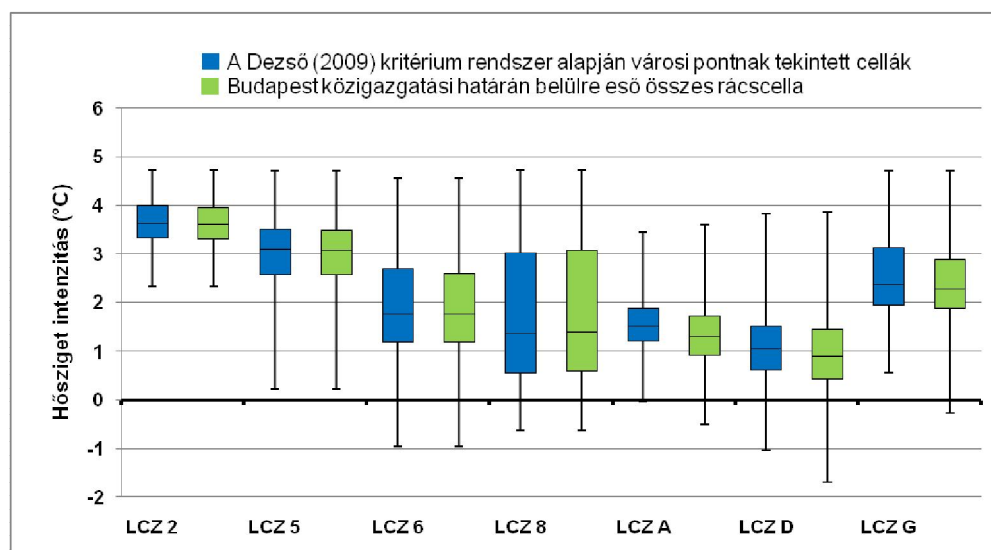


4. ábra: A MODIS rácscellák LCZ típusok szerinti eloszlása a Budapest közigazgatási határán belülre eső összes rácscellára vonatkozóan. Zárójelben az összes vizsgált cella száma szerepel.

5. Az eredmények bemutatása

5.1. Módszertani összehasonlítások

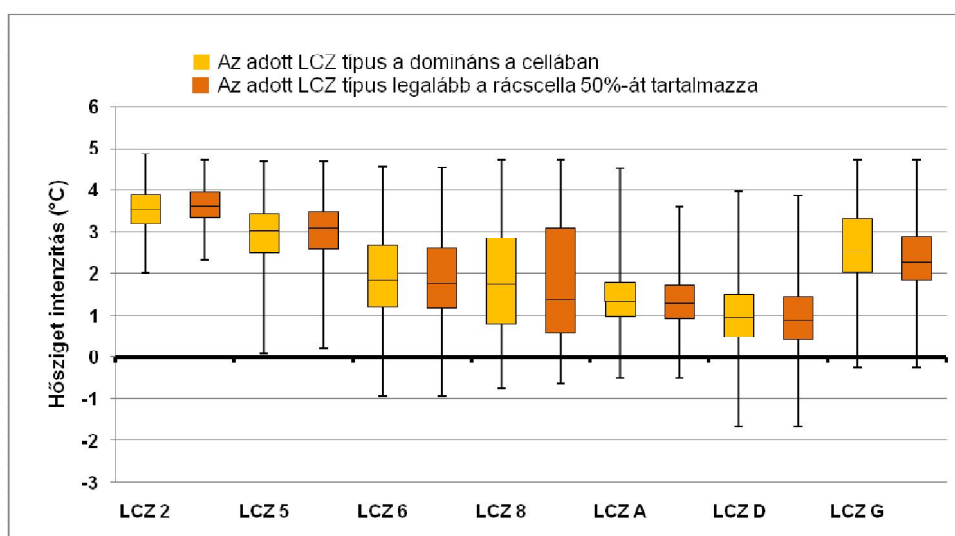
Először a különböző területek és módszertanok összehasonlítását mutatjuk be. Az eloszlások jellemzésére a továbbiakban ún. Box-Whiskers diagramokat használunk, melyek a minimum- és maximumértékek között vékonyabb vonallal jelölik az összes előforduló eset teljes intervallumát LCZ típusonként, s szélesebb téglalapok jelzik ezen belül a középső 50%-ot, vagyis az alsó és felső kvartilis közötti részintervallumot, végül a téglalapon belül látható vonal a mediánt jelzi. Például a Dezső-féle (2009) városi cellák és a Budapest közigazgatási határán belülrre eső összes cella összehasonlítását az 5. ábra mutatja be, ahol a Terra esti átvonulásának méréseiből származó hősziget-intenzitás eloszlását ábrázoljuk, a legalább 50%-os lefedésű módszert alkalmazva a 2001-2016 időszak nyári hónapjaira vonatkozóan. A kétféleképpen meghatározott területre kapott hősziget-intenzitáseloszlások között a legnagyobb különbségek az LCZ A és az LCZ D típusban tapasztalhatók, ami a fákkal sűrűn beépített területeket és az alacsony növényzetet takarja. Ezen kategóriák esetében a közigazgatási határon belülrre eső cellák értékei szélesebb határok között mozognak, mint a Dezső-féle (2009) kritériumrendszer alapján meghatározott rácscellák esetében. A különbség abból adódik, hogy ezek a cellák nem beépítettek, így a korábbi vizsgálatok során alkalmazott vizsgálatokban nem tartoztak a városi pontok közé.



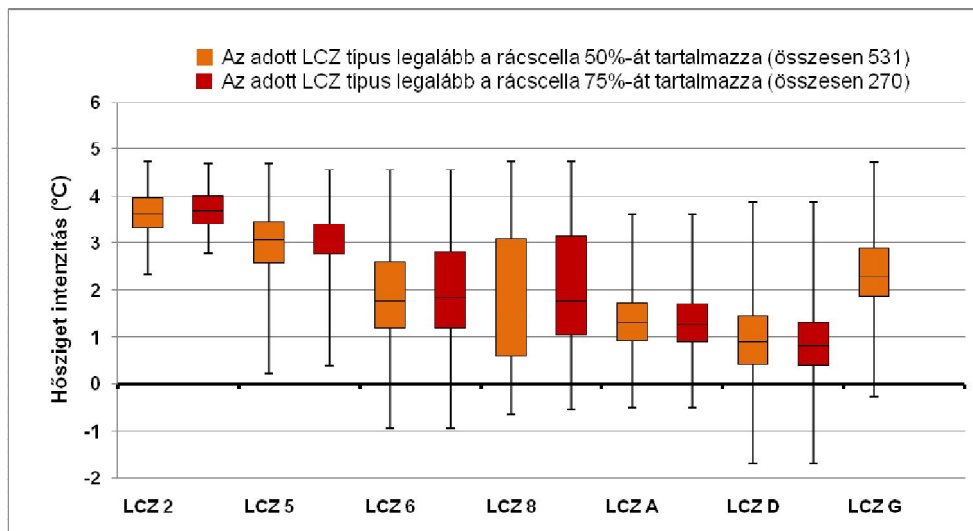
5. ábra: A Dezső féle kritériumrendszer városi celláinak és a Budapest közigazgatási határán belülrre eső cellák hősziget-intenzitás eloszlásának összehasonlítása (Terra esti mérések alapján, nyáron, az adott LCZ legalább a cella 50%-át lefedi)

A különböző besorolási módszerek összehasonlítására vonatkozó eredményeket mutatja a 6. és a 7. ábra, melyeknél szintén a Terra esti méréseit vizsgáltuk a nyári időszakra. Az elemzéseket a Budapest közigazgatási határán belülre eső összes cellára végeztük. A 6. ábrán a legenyhébb és a közepes erősségű kritériumokat alkalmazó módszereket hasonlítottuk össze: egyrészt amikor csak azt vesszük figyelembe, hogy melyik LCZ típus fedí le a rácscella legnagyobb részét, másrészt amikor a jellemző LCZ kategória legalább a cella 50%-át tartalmazza. Jól látható, hogy jelentős változások nincsenek az eloszlásokban, kisebb változások az LCZ 8 (nagy kiterjedésű alacsony épületek) és az LCZ A (sűrű, fás) típus esetén tapasztalhatók. Ezekben is csak a maximum értékekben való eltérés a szembetűnő.

A legalább 50%-os és a legalább 75%-os lefedettségi szinten alapuló módszerek esetében már több különbség tapasztalható (7. ábra). Itt az LCZ 2 (kompakt, közép magas) és az LCZ 5 (nyitott, közép magas) kategóriában is szűkült a tartomány, a minimum értékek emelkedtek. A másik fontos változás, hogy a 75%-ot megkövetelő lefedettséget már egyetlen olyan cella sem teljesíti, ami tartalmazza a Dunát, így az LCZ G (víz) típus már nem jelenik meg, egy rácscella sem esik ebbe a besorolásba.



6. ábra: A cellát a domináns LCZ típussal jellemző, és a rácscella legalább 50%-át lefedő LCZ típust használó módszerek összehasonlítása
(Terra esti mérések alapján, nyáron, Budapest közigazgatási határán belül eső cellákra)



7. ábra: A rácscella legalább 50%-át lefedő LCZ típust használó, és a rácscella legalább 75%-át lefedő LCZ típust használó módszerek összehasonlítása (Terra esti mérések alapján, nyáron, Budapest közigazgatási határán belül eső cellákra)

Továbbiakban a kutatás során kapott eredmények részletes elemzését a Budapest közigazgatási határán belülről eső összes cellára vonatkozóan mutatjuk be, így a növényzettel borított területek is megjelennek, ami fontos kontrasztot mutathat a sűrűn beépített területek intenzitás értékeivel. Az alkalmazott módszert tekintve azt választottuk ki, amikor a cella jellemzésére adott LCZ típus legalább a cella 50%-át lefedi, ami már elég ahhoz, hogy a nagyon vegyes beépítettségű rácscellákat ne vegyük figyelembe, de még elegendően nagy esetszámot biztosít a vizsgálatokhoz.

5.2. A felhőborítottságra vonatkozó kritériumok vizsgálata

A műholdas mérések szempontjából fontos tényező a felhőborítottság, hiszen ilyenkor az adott területről nem tud mérést végezni a szenzor. A hősziget-intenzitás meghatározásához először a városkörnyéki cellák átlagos felszínhőmérsékletét kell meghatározni (Dezső, 2009). Ennek kiszámításánál csak a felhőmentes cellákat tudjuk figyelembe venni, hiszen a felhőzettel borított területekről nem áll rendelkezésre felszínhőmérsékleti adat. Ha a vizsgált terület jelentős részét felhőzet borítja, akkor a városi és városkörnyéki átlaghőmérséklet túl kevés adatból kerül meghatározásra, és az eredmény torzulhat, nem lesz reprezentatív a teljes területre vonatkozóan. Éppen ezért érzékeny kérdés, hogy mekkora felhőborítottság mellett érdemes még az adott napra vonatkozóan meghatározni e paramétereket. E diplomamunka keretében négyféle

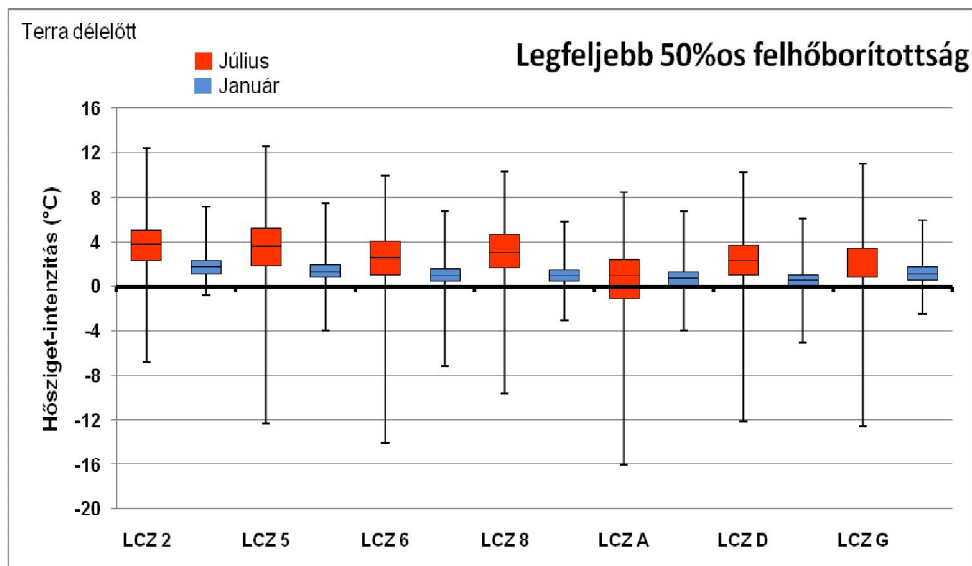
kritériumot vizsgáltunk a felhőborítottságra vonatkozóan. Az első esetben csak azokat a napokat vettük figyelembe, amikor a teljes $70 \times 70 \text{ km}^2$ -es kivágaton legfeljebb a rácscellák felét borította felhő. A második esetben már csak a rácscellák maximum 25%-át fedte felhő. Tovább szigorítva a kritériumot, a harmadik esetben már legfeljebb 10%-os felhőborítottságot engedtünk meg, végül pedig a teljesen felhőmentes napokat vizsgáltuk. A 6. táblázat mutatja, hogy az adott felhőzetkritériumok esetében a Terra délelőtti (2001-2016) és az Aqua délutáni (2003-2016) átvonulása esetén a teljes időszak alatt a napok hány százaléka felelt meg az adott kritériumnak. A Terra műhold átvonulásakor mind a négy kritériumnál 5-6%-kal magasabb volt a megfelelő felhőborítású napok aránya, mint az Aqua esetén, kivéve a teljesen felhőmentes napoknál, hiszen ott közel azonos az arány. Még a legtöbb felhőt megengedő 50%-os kritériumnál is kevesebb, mint a napok fele felelt meg, és csak a napok 4-5%-a volt teljesen felhőmentes a $70 \times 70 \text{ km}^2$ -es kivágaton.

6. táblázat: Az egyes felhőborítottság-kritériumokhoz tartozó napok százalékos aránya a teljes időszakhoz viszonyítva (Terra délelőtt 2001-2016, Aqua 2003-2016)

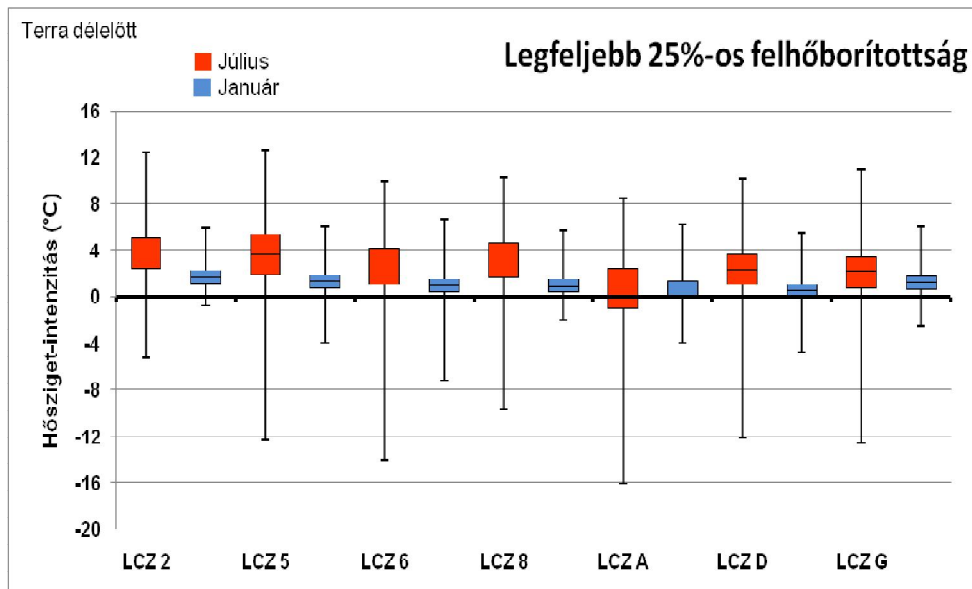
Maximálisan megengedett felhőborítottság	Napok aránya (%)	
	Terra de.	Aqua du.
50%	40%	35%
25%	33%	28%
10%	26%	20%
0%	5%	4%

A hősziget-intenzitás eloszlását napi adatok alapján számított havi bontásban vizsgáltuk az egyes lokális klímazónákban a különböző felhőborítottság-kritériumokra. A 8-11. ábrákon a négyféle kritériumra mutatjuk be a júliusi és januári hősziget-intenzitás eloszlását a Budapest közigazgatási határán belülre eső összes rácscellára, a rácscella 50%-át lefedő LCZ kategóriába sorolási módszertan alapján.

A 8. ábrán az 50%-os felhőborítottság-kritériumra vonatkozó eredmények láthatók a Terra délelőtti méréseiből. Januárban sokkal szűkebbek az intervallumok, mint júniusban, továbbá az is megfigyelhető, hogy az adatok alsó 25%-ában jóval nagyobb eltérések lehetnek az egyes rácscellák és napok között, mint a felső 25%-ban. A legfeljebb 25%-os felhőborítottság esetén az LCZ 2-es és LCZ 8-as kategóriákban, azaz a kompakt, középmagas épületek, és a nagy kiterjedésű alacsony épületek esetében növekedett a minimum értéke (9. ábra). Ezzel kevesebb lett a negatív tartományba eső hősziget-intenzitás.

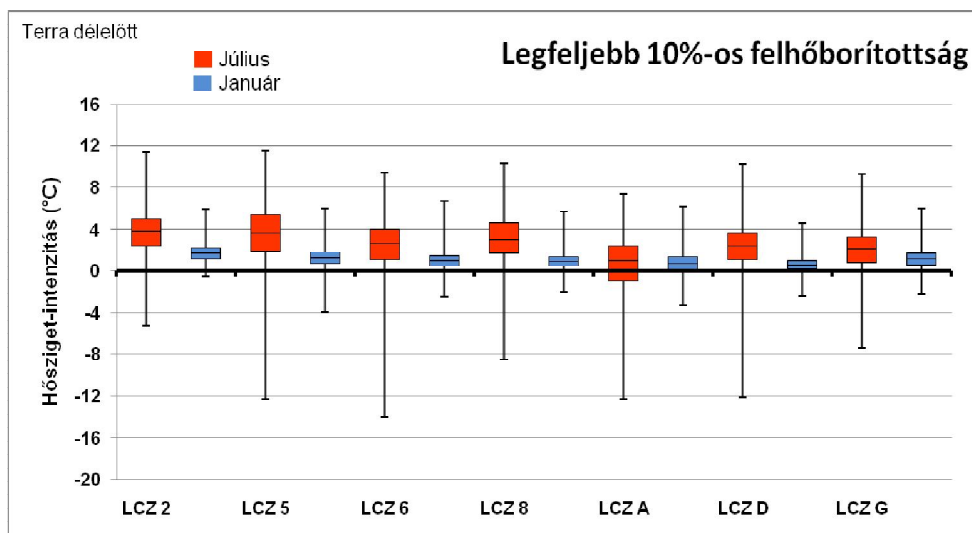


8. ábra: A júliusi és januári hősziget-intenzitás eloszlása az egyes LCZ típusokban a Terra délelőtti mérései alapján, a legfeljebb 50%-os felhőborítottság-kritériumra

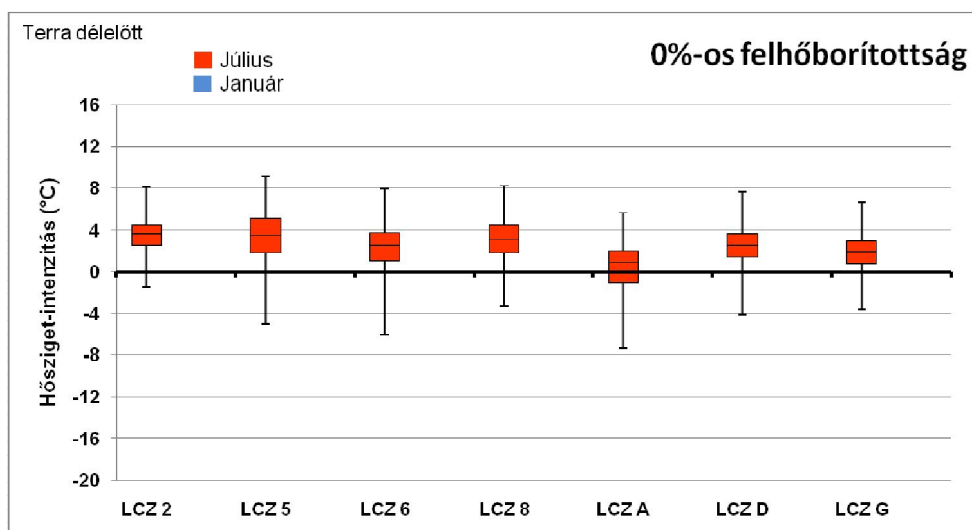


9. ábra: A júliusi és januári hősziget-intenzitás eloszlása az egyes LCZ típusokban a Terra délelőtti mérései alapján, a legfeljebb 25%-os felhőborítottság-kritériumra

A 10. ábra a maximum 10%-os felhőborítottság-kritérium eloszlását ábrázolja. Itt nem tapasztaltunk jelentős változást a 25%-os kritériumhoz képest. A teljesen felhőmentes esetben viszont jelentős változások történtek. Egyrészt egyetlen olyan januári nap sem volt, amikor sehol nem volt felhőzet a kivágaton. Másrészt a minimumértékekben történtek nagy változások. Míg a 25%-os kritérium esetén még -16 °C-os minimum is előfordult, addig a teljesen felhőmentes napokon -8 °C volt a minimum.



10. ábra: A júliusi és januári hősziget-intenzitás eloszlása az egyes LCZ típusokban a Terra délelőtti mérései alapján, a legfeljebb 10%-os felhőborítottság-kritériumra

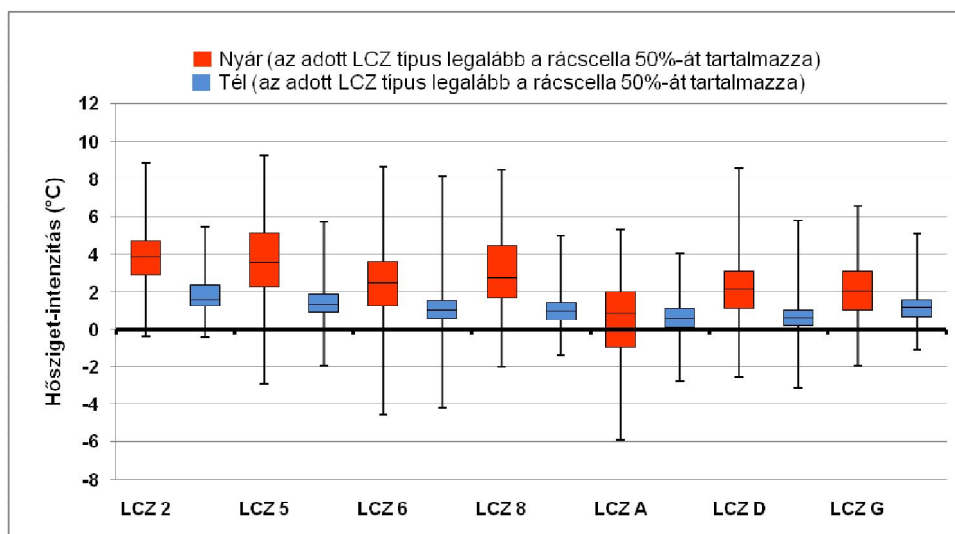


11. ábra: A júliusi és januári hősziget-intenzitás eloszlása az egyes LCZ típusokban a Terra délelőtti mérései alapján, a legfeljebb 0%-os felhőborítottság-kritériumra

Az eredmények bemutatása során a 25%-os, 10%-os és 0%-os kritériumokat alkalmazzuk. A legfeljebb 25%-os felhőborítottság-kritériumnak megfelelő napi adatok átlagából havi átlagos adatokat számítottunk. Ezekből a havi adatok felhasználásával évszakos hősziget-intenzitás eloszlást, átlagos éves menetet és 14 éves idősorokat (2003–2016) vizsgáltunk. A napi adatok alapján havi hősziget-intenzitás gyakoriságokat elemeztünk a 10%-os kritériumra vonatkozóan. Szintén napi adatokból elemeztünk néhány teljesen felhőmentes időszakot esettanulmány jelleggel.

5.3. Havi átlagos hősziget-intenzitás értékek eloszlása

A Terra délelőtti átvonulásának méréseiből származó 25%-os felhőkritériumnak megfelelő napi adatokból származtatott átlagos havi hősziget-intenzitás értékek eloszlásának alakulását az egyes LCZ típusokban a 12. ábra mutatja be a nyári és a téli időszakokra vonatkozóan. Nyáron minden kategóriában a hősziget-intenzitás értékek középső fele (alsó és felső kvartilis közé eső 50%) sokkal szélesebb intervallumban mozog, mint télen, melynek oka a nagyobb nyári bejövő sugárzás. Továbbá általánosságban elmondhatjuk, hogy nyáron az értékek nagy része magasabb, mint télen. A legnagyobb intenzitások a beépített területeken (LCZ 2, LCZ 5, LCZ 8) tapasztalhatók. Az LCZ 2 kategóriába a belváros tartozik, az LCZ 5-be már kevésbé sűrűn beépített területek esnek, de ezek közvetlenül a belváros körül találhatók, míg az LCZ 8, azaz a nagy kiterjedésű alacsony épületek kategóriájába sorolódtak az iparterületek. A legtöbb negatív érték az LCZ A típusban van, amihez a sűrűn telepített fás területek tartoznak. Itt a hősziget-intenzitás adatok 35-40%-a negatív, azaz a környezethez képest alacsonyabbak a felszíni hőmérséklet értékei.

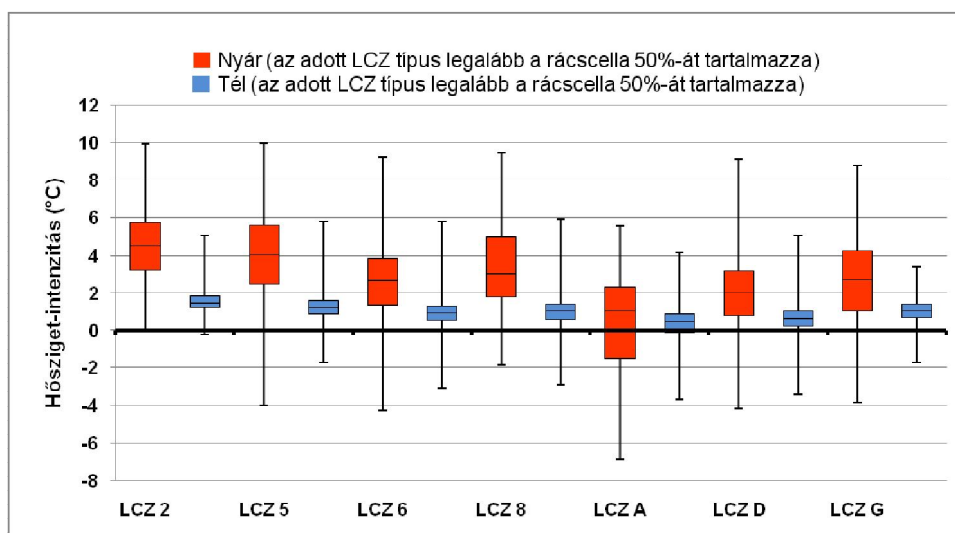


12. ábra: A nyári és téli hónapok hősziget-intenzitás eloszlásai az egyes LCZ típusokban a Terra délelőtti mérései alapján, a legalább 50%-os lefedettséget biztosító módszertan alapján, Budapest közigazgatási határán belülre eső összes cellára, a 25%-os felhőborítottság-kritériummal

Az Aqua délutáni méréseinél télen az intenzitás értékek középső 50%-a még szűkebb tartományba esik az egyes LCZ kategóriákban, mint a délelőtti méréseknél. Az összes típust tekintve 0–2 °C között van az adatoknak az alsó és felső kvartilis közé eső tartománya (13. ábra). A legtöbb kategóriában csökkent a negatív értékek száma, valamint

az egybefüggő negatív hősziget-intenzitású területek kiterjedése kicsi. Kivétel ezek közül az LCZ A, fás típus – amiben $-6,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os intenzitás is előfordul – a növényzet hőmérséklet mérsékelő hatása miatt.

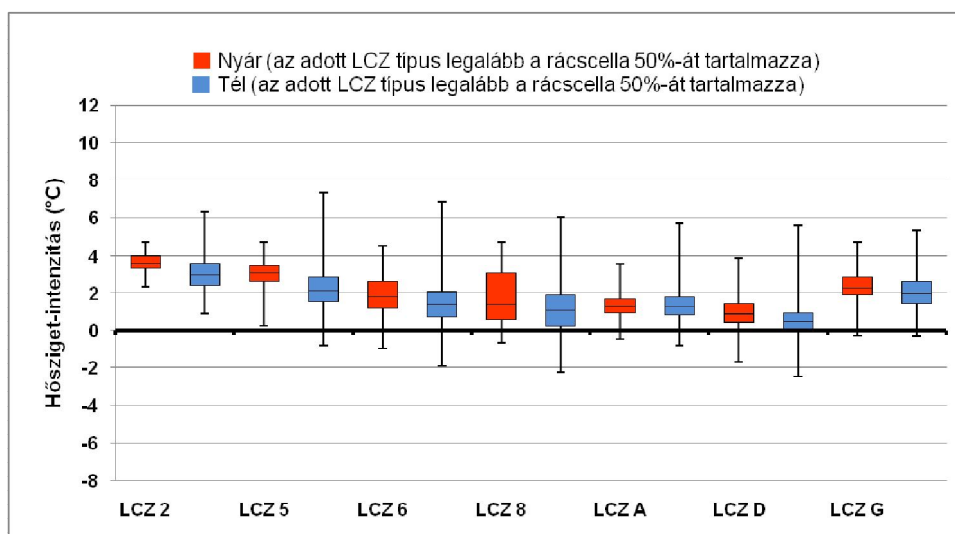
A felszínhőmérsékletből származó hősziget-intenzitás a déli, kora délutáni órákban veszi fel a maximumát, mert ilyenkor a legnagyobb a beérkező napsugárzás. Mégis azt tapasztaltuk, hogy a negatív hősziget-intenzitások a délelőtti órákban (9-10 UTC) jelentek meg még a legnagyobb mértékben beépített LCZ kategóriákban is. Ennek többféle oka lehet. Egyrészt nagyon fontos, hogy a beépítettségen túl a felszint borító anyagok milyensége eltérő lehet, és ez is befolyásolja a sugárzási viszonyokat. Másrészt nyáron a besugárzás hatására meginduló konvekció miatt délelőtt és a déli órákban még csak elszórtan, kisebb gomolyfelhők alakulnak ki alacsony szinten, így ez csak egy-egy pixelt érint. A kora délutáni órákban viszont nyáron már szinte nincs negatív érték az LCZ 2-es kategóriában.



13. ábra: A nyári és téli hónapok hősziget-intenzitás eloszlásai az egyes LCZ típusokban az Aqua délutáni mérései alapján, a legalább 50%-os lefedettséget biztosító módszertan alapján, Budapest közigazgatási határán belülre eső összes cellára, a 25%-os felhőborítottság-kritériummal

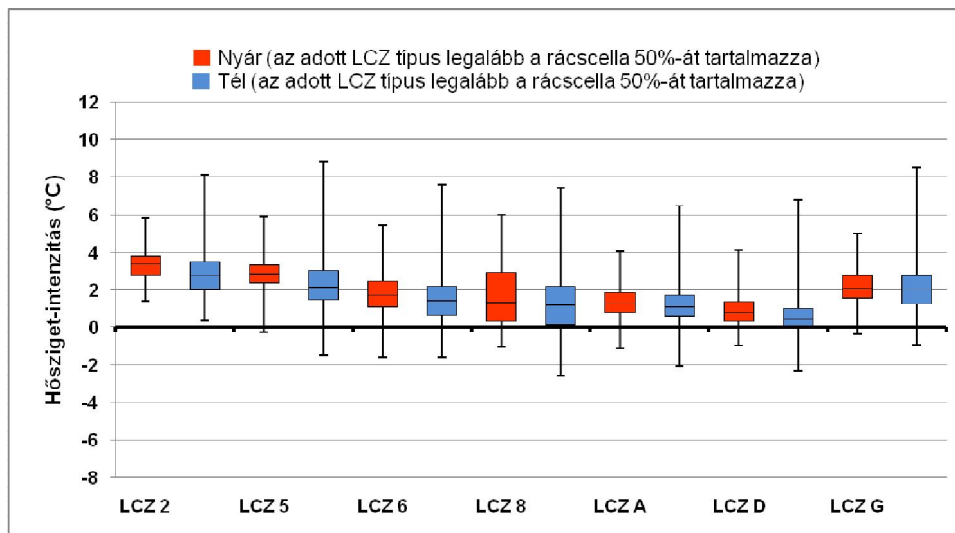
Az Terra esti átvonulásának idején (14. ábra) csökkennek a maximum értékek, viszont a minimumok már csak a legsűrűbben beépített kategóriákban pozitívak. Nyáron és télen is sokkal szűkebb intervallumban mozognak az intenzitásértékek, mint a délelőtti és délutáni időszakokban. Még egy további módosulást figyelhetünk meg az eloszlásokban: a nyári és téli intenzitások között este nincs akkora különbség, mint napközben. A

legnegatívabb értékek az LCZ D kategóriában, az alacsony növényzettel borított részeken tapasztalhatók a téli hónapokban.



14. ábra: A nyári és téli hónapok hősziget-intenzitás eloszlásai az egyes LCZ típusokban a Terra esti mérései alapján, a legalább 50%-os lefedettséget biztosító módszertan alapján, Budapest közigazgatási határán belülre eső összes cellára, a 25%-os felhőborítottság-kritériummal

Az Aqua hajnali áthaladásának hősziget-intenzitás értékei (15. ábra) nagyon hasonlóan alakulnak a Terra esti méréseihez. Itt szinte nem csökken -2 °C alá az intenzitás, sem nyáron, sem télen. Minden LCZ típusban 4 °C alatt marad az adatok 75%-a. Télen nagyobb maximumok tapasztalhatók, mint nyáron, és az intenzitás értékek sokkal szélesebb határok között mozognak. (Az elemzés teljességének érdekében elkészített, 50%-os felhőborítottságra vonatkozó eredmények a függelékben találhatók.)



15. ábra: A nyári és téli hónapok hősziget-intenzitás eloszlásai az egyes LCZ típusokban az Aqua hajnali mérései alapján, a legalább 50%-os lefedettséget biztosító módszertan alapján, Budapest közigazgatási határán belülre eső összes cellára, a 25%-os felhőborítottság-kritériummal

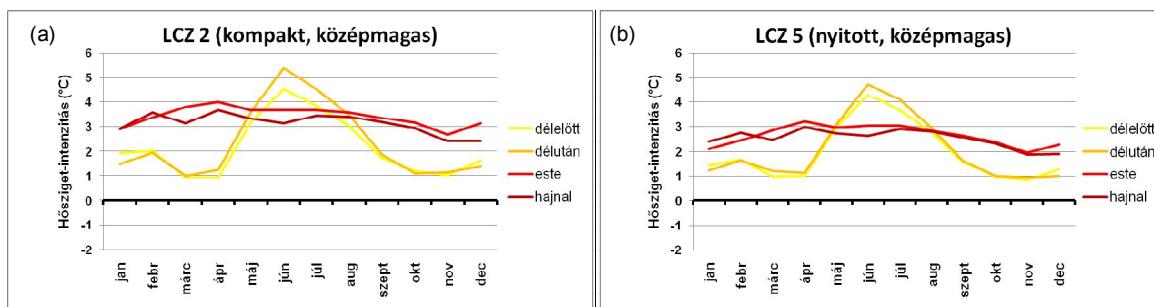
5.4. Hősziget-intenzitás átlagos éves menete

Az ebben az alfejezetben bemutatott elemzés során az egyes LCZ típusokra külön-külön vizsgáltuk a négy műholdáthaladásból származó hősziget-intenzitások átlagos évi menetét. Továbbra is a Budapest közigazgatási határán belül eső összes rácscellára végeztük a számításokat, azzal a módszerrel, amelyben a jellemző LCZ kategória legalább a cella 50%-át lefedi.

A Terra délelőtti és az Aqua délutáni méréseiből származó intenzitások minden LCZ típusnál sokkal nagyobb éven belüli változékonyságot mutatnak, mint az esti (Terra) és hajnali (Aqua) intenzitások (16-18. ábra). Nappal a felszínhőmérséklet alakulásában a bejövő sugárzásnak döntő szerepe van. Ennek oka, hogy a rövidhullámú sugárzás éves menete jóval nagyobb amplitúdójú, mint az éjszakai felszínhőmérsékletet meghatározó bejövő és kimenő hosszuhullámú sugárzás.

A 16.(a) ábra mutatja az LCZ 2 kategória éves meneteit. A napközbeni intenzitás értékek maximuma nyáron jelentkezik, délelőtt 4,5 °C, míg délután csaknem eléri az 5,5 °C-ot. A legalacsonyabb, 1 °C körüli értékek tavasszal (március-április) és ősszel (október-november) tapasztalhatók. Télen ismét kicsit magasabbak az intenzitás értékek. Este és hajnalban nincs nagy amplitúdója az intenzitás évi menetének, végig 2-4 °C között mozog az átlagos intenzitás, este kicsit magasabb, hajnalban pedig kicsit kisebb az értéke.

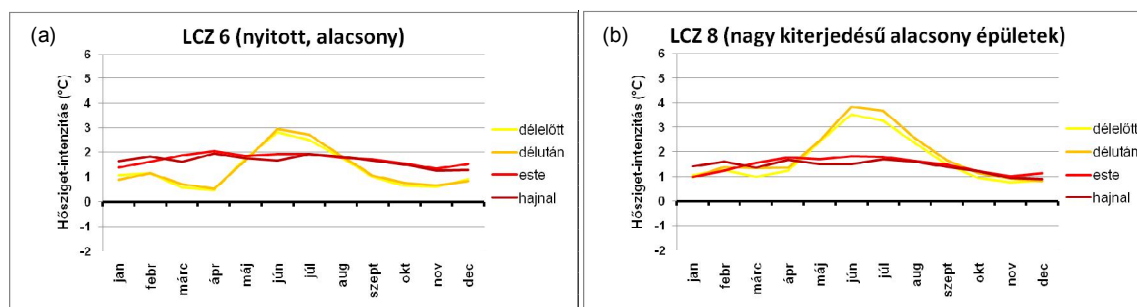
Az LCZ 5 típusnál (16.(b) ábra) – ahol még szintén középmagas épületek találhatók – hasonló az éves menetek alakulása. A különbség az, hogy az esti és éjszakai intenzitások maximuma 1 °C-kal alacsonyabb, mint az LCZ 2 típus esetében.



16. ábra: A hősziget-intenzitás éves menete a négy műhold-átvonulásra a két legsűrűbben beépített kategória esetén: (a) LCZ 2 (b) LCZ 5

Az alacsony épületekkel nyitottabban, szellősebben beépített területeken (LCZ 6) további csökkenés tapasztalható az előző (LCZ 5) kategóriához képest. Napközben a legnagyobb nyári érték már csak 3 °C, a legalacsonyabb intenzitások pedig már 1 °C alá csökkennek (17.(a) ábra). Éjszaka 1-2 °C között alakulnak az intenzitás értékek az egész évben.

Az LCZ 8 típusban eltűnik a téli másodmaximum (17.(b) ábra), de az LCZ 6 kategóriához képest magasabbak, 4 °C körüliek a nyári legnagyobb értékek. Az éjszakai intenzitások az előző (LCZ 6) kategóriához hasonlóan alakulnak.

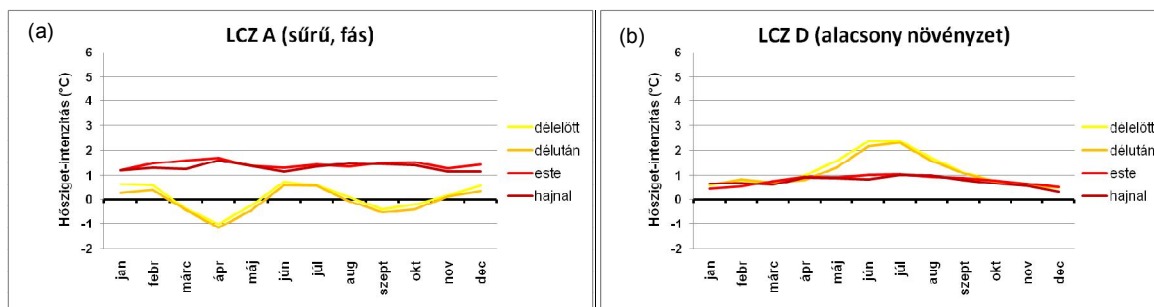


17. ábra: A hősziget-intenzitás éves menete a négy műhold-átvonulásra a két alacsony épületekkel beépített kategória esetén: (a) LCZ 6 (b) LCZ 8

Végül a 14. ábrán a növényzettel borított területek átlagos éves intenzitás menete látható. A fákkal sűrűn borított erdős területeken (LCZ A) az éjszakai intenzitás menetek (18.(a) ábra) megegyeznek a ritkán beépített területek átlagos értékeivel. A nappali intenzitás éves menete hasonlóan alakul a többi kategóriához, de a téli értékek szinte azonosak a nyári

értékekkel. A tavaszi és az őszi átlagos intenzitások negatívak, azaz hűvösebb van ezeken a területeken, mint a város környékén. Tavasszal akár -1°C is lehet a különbség.

Az LCZ D típusban – az alacsony növényzet esetén – a legalacsonyabbak az éjszakai intenzitások, egész évben $0-1^{\circ}\text{C}$ között alakulnak, és nyár kivételével napközben is ebben a tartományban mozognak az értékek (18.(b) ábra).



18. ábra: A hősziget-intenzitás éves menete a négy műhold-átvonulásra két, növényzettel borított kategória esetén: (a) LCZ A (b) LCZ D

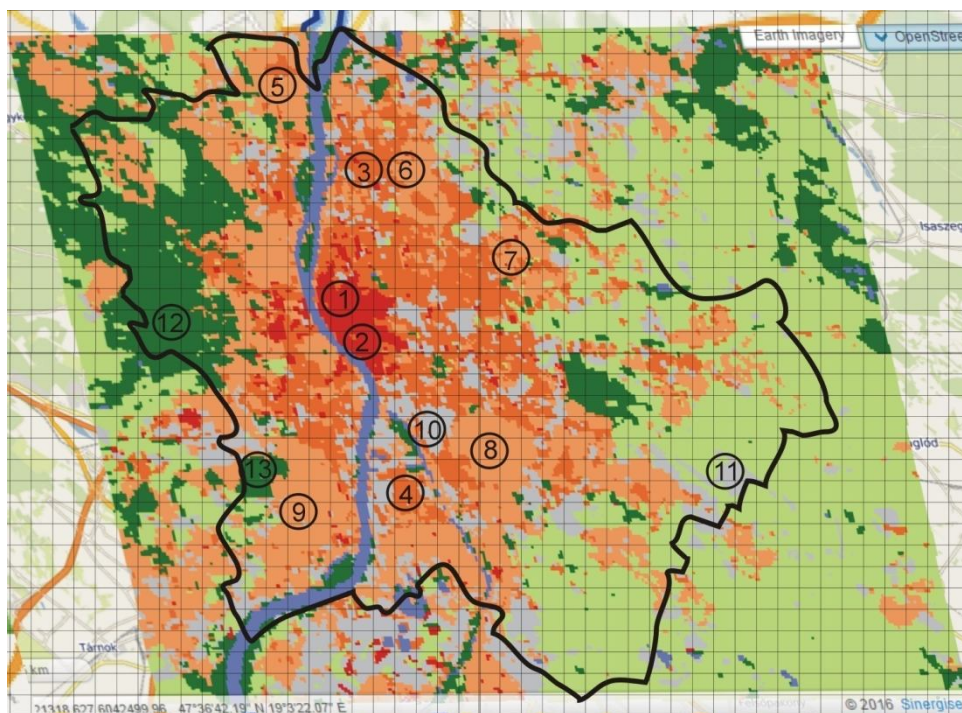
5.5. Azonos LCZ típusba eső rácscellák összehasonlítása

Eddig a különböző LCZ típusokat hasonlítottuk össze, vagyis azt, hogy az eltérő felszínborítással és beépítettséggel rendelkező területek hősziget intenzitás értékei hogyan viszonyulnak egymáshoz. A továbbiakban azonos LCZ kategóriába eső MODIS rácscellák hősziget-intenzitásának idősorait hasonlítjuk össze. A vizsgálatot az Aqua kora délutáni (12-13 UTC) áthaladásának mérésére vonatkozóan mutatjuk be, mivel a felszínhőmérsékletből származó hősziget-intenzitás a legnagyobb besugárzás miatt a déli órákban veszi fel a maximumát.

A rácscellák kiválasztása során a következő szempontokat vettük figyelembe:

- az adott LCZ típus fedje a teljes cellát (kivétel a Liszt Ferenc repülőtér)
- a lehetőségekhez mérten egymástól távol legyenek
- a körülvevő rácscellák minél nagyobb részben a kiválasztott rácscellával azonos LCZ típusba tartozzanak

A dolgozatban 13 kiválasztott rácscella havi hősziget-intenzitás értékeit mutatjuk be a 2003–2016 időszakot figyelembe véve. A 19. ábrán térképen láthatók a kiválasztott cellák, a 7. táblázatban pedig az, hogy az adott rácscella milyen LCZ típusba tartozik, és Budapest mely részén található vagy milyen konkrét területet foglal magába.



19. ábra: Az összehasonlításhoz kiválasztott MODIS rácscellák térképes elhelyezkedése

7. táblázat: A kiválasztott rácscellákat meghatározó LCZ típus és a cellák elnevezése

Rácscella sorszám	LCZ típus	Elnevezés
1	2. Kompakt, középmagas épületek	Belváros, északi
2		Belváros, déli
3	5. Nyitott, középmagas épületek	Újpest
4		Csepel
5	6. Nyitott, alacsony épületek	Békásmegyer
6		Rákospalota
7		Sashalom
8		Kispest
9		Budatétény
10	8. Nagy kiterjedésű alacsony épületek	Ferencvárosi Rendező pályaudvar
11		Liszt Ferenc repülőtér
12	A. Sűrűn elhelyezkedő fák	Csillebérc
13		Budapesti Kamaraerdő

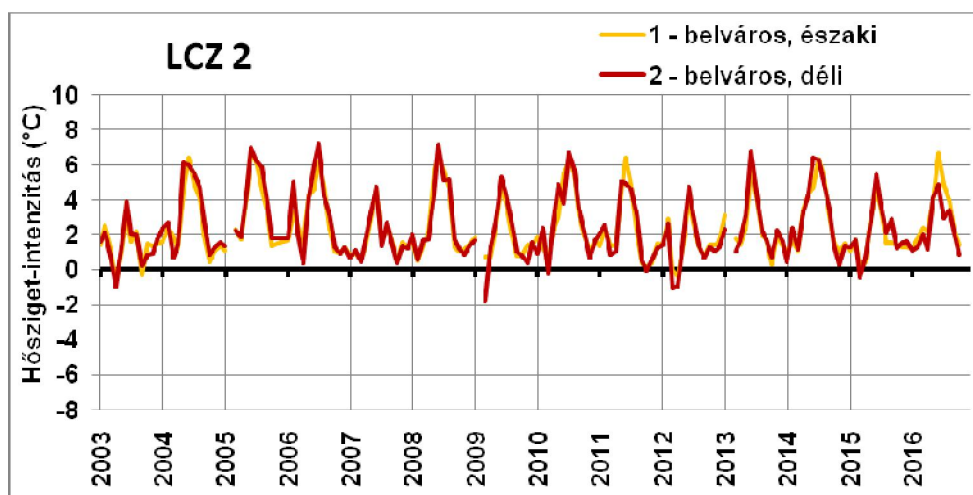
Az LCZ2-es kategória a belvárosban található, ez Budapest legsűrűbben beépített része. A két kiválasztott rácscella a lehetőségekhez képest a legtávolabb helyezkedik el, de még így is nagyon közel van egymáshoz. Ez egyértelműen megjelenik az eredményekben is (20. ábra), a két idősor között alig látható különbség. Kicsit nagyobb eltérés

tapasztható 2011 és 2016 nyarán. A maximális hősziget-intenzitás meghaladta a 7 °C-ot, míg negatív intenzitások alig fordultak elő.

A két idősor kapcsolatát jellemezhetjük az ún. négyzetes középérték hibával (RMSE⁹). Számítását az (1) képlet írja le, ahol x_{1i} és x_{2i} a két rácscella idősorainak értéke az i -edik időpontban, n pedig a teljes adatsor hossza (2003 januárjától 2016 októberéig a havi adatok száma, azaz 166).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1i} - x_{2i})^2}{n}} \quad (1)$$

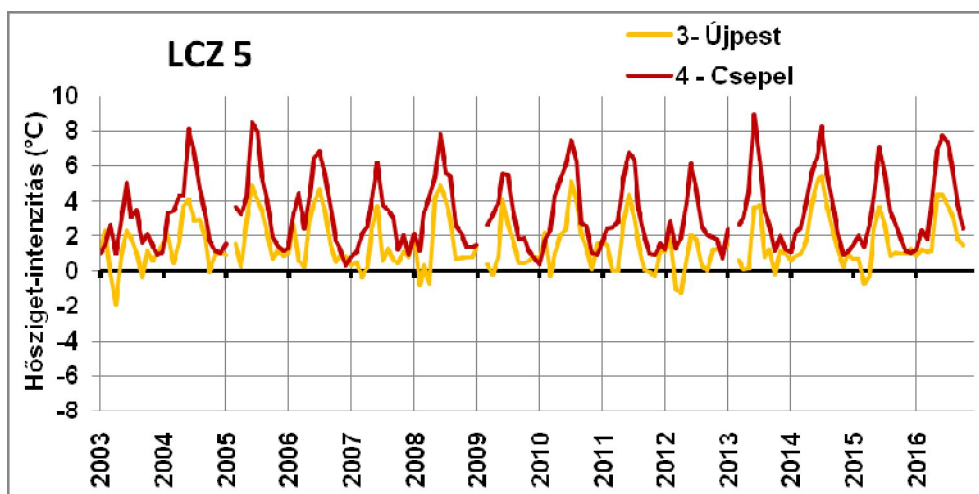
A definícióból következik, hogy minél kisebb az RMSE értéke, annál nagyobb az egyezés a két idősor között. A két belvárosi rácscellára számított RMSE értéke 0,052, azaz a két idősor nagy egyezést mutat, ami a 16. ábrán is látható.



20. ábra: Az Aqua délutáni áthaladásának méréseiből származó havi hősziget-intenzitás idősorok összehasonlítása az LCZ 2-es típusból kiválasztott két rácscella esetén, 2003 januárjától 2016 októberéig

Az LCZ 5-ös (nyitott, közép magas épületek) kategóriából kiválasztott két rácscella összehasonlítását mutatja a 21. ábra. Az egyik cella északon, Újpesten található, a másik pedig délen, Csepelen. Ebben az esetben már nagyobb az eltérés a két kiválasztott cella között, ezt mutatja az RMSE értéke (0,165) is. Csepelen a teljes vizsgált időszakban, 2003 és 2016 között magasabbak voltak a hősziget-intenzitás értékek. Itt nyáron szinte mindig meghaladja a 6 °C-ot, a maximum pedig megközelíti a 9 °C-ot. Ezzel szemben Újpesten a maximális hősziget-intenzitás csak 5,4 °C. Csepelen egyszer sem fordult elő negatív havi átlagos intenzitás, és Újpesten is csak ritkán jelentkezett.

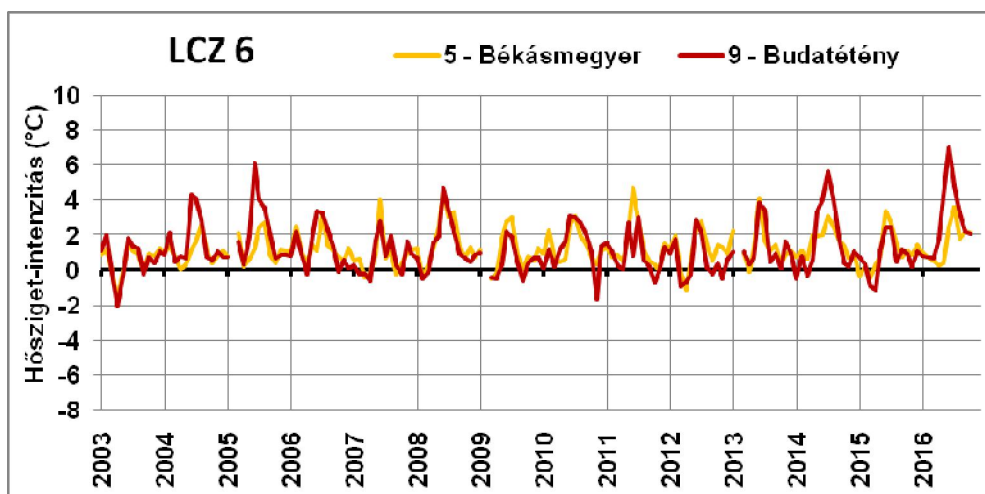
⁹ RMSE (Root-mean-square error)



21. ábra: Az Aqua délutáni áthaladásának méréseiből származó havi hősziget-intenzitás idősorok összehasonlítása az LCZ 5-ös típusból kiválasztott két rácscella esetén, 2003 januárjától 2016 októberéig

Az LCZ 6-os kategória az ún. nyitott, alacsony épületekkel beépített területeket foglalja magába. Budapesten a legtöbb rácscella ebbe az LCZ típusba tartozik, ezért ebből a kategóriából öt rácscella idősorát vizsgáljuk és hasonlítjuk össze. A budai oldalról két cellát választottunk ki (22. ábra), egyet északról (Békásmegyer) és egyet délről (Budatétény). Ezek a területek elég jó hasonlóságot mutatnak, az RMSE értéke 0,093.

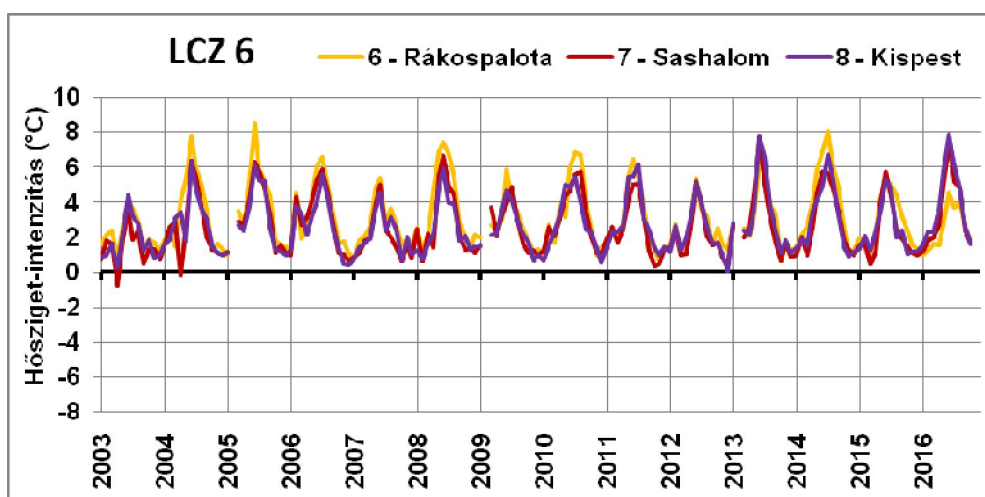
A három pesti rácscellát összehasonlító RMSE értékeket a 8. táblázatban hasonlíthatjuk össze, ezek valamelyest kisebbek, mint a Budán található cellák esetében, azaz ezek az idősorok jobban megegyeznek, mint a budaiak. Ahogyan az a 23. ábráról is leolvasható, Rákospalota, Sashalom és Kispest idősorai alapvetően nagyon hasonlóak. Szinte egyáltalán nincsenek negatív hősziget-intenzitások, a nyári hónapok átlagos hősziget-intenzitásai 6-8 °C között alakulnak. Összességében azt is meg kell jegyezni, hogy a pesti oldalon található LCZ 6-os típusba tartozó rácscellák havi intenzitás értékei magasabbak, mint a budai rácscelláké.



22. ábra: Az Aqua délutáni áthaladásának méréseiből származó havi hősziget-intenzitás idősorok összehasonlítása az LCZ 6-os típusból kiválasztott két budai rácscella esetén, 2003 januárjától 2016 októberéig

8. táblázat: Az LCZ 6-os kategóriába eső három pesti kiválasztott rácscella idősorából származó négyzetes középérték hiba (RMSE)

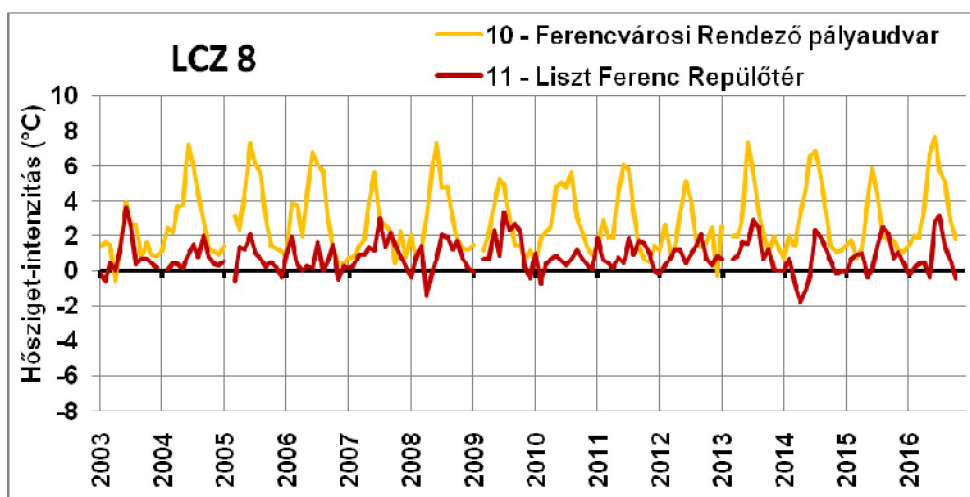
	RMSE érték
Rákospalota - Sashalom	0,078
Rákospalota - Kispest	0,081
Sashalom - Kispest	0,052



23. ábra: Az Aqua délutáni áthaladásának méréseiből származó havi hősziget-intenzitás idősorok összehasonlítása az LCZ 6-os típusból kiválasztott három pesti rácscella esetén, 2003 januárjától 2016 októberéig

Az LCZ 8-as kategóriából két rácscellát választottunk ki, egyik a Ferencvárosi Rendező pályaudvar a másik a Liszt Ferenc repülőtér. Budapesten ebből az LCZ típusból nincsenek nagyobb összefüggő területek, amelyek több egymás melletti rácscellát

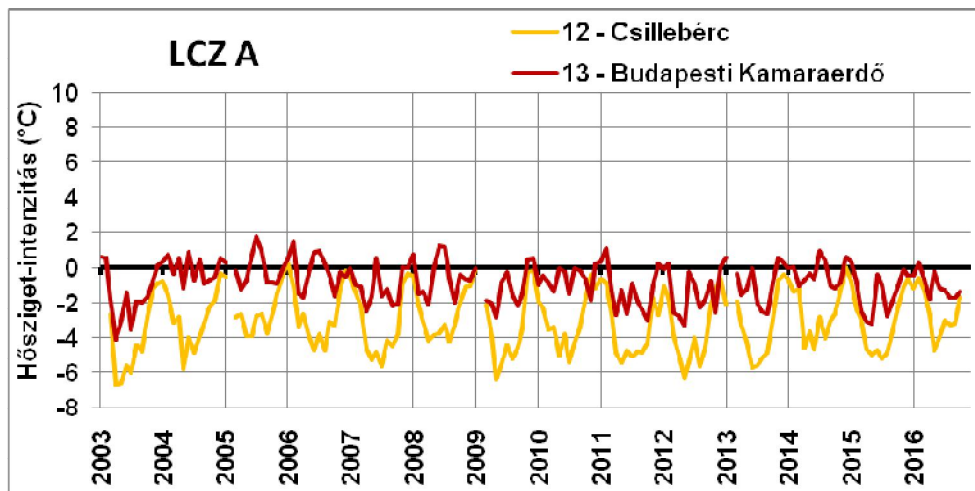
magukba foglalnának. Ezért a kiválasztott cellák másfajta LCZ kategóriákkal vannak körülvéve. A 24. ábra mutatja az idősorokat. Látszik, hogy itt már sokkal nagyobbak az eltérések, mint az eddigi összehasonlítások során, az RMSE értéke is nagyobb: 0,213 (ami mintegy négyszerese a két kiválasztott belvárosi rácscellára kapott RMSE értéknek). A vizsgálatok során egyértelműen itt kaptuk a legnagyobb eltérést az azonos kategóriájú rácscellák között. A Ferencvárosi Rendező pályaudvaron jóval nagyobb a hősziget-intenzitás, mint a repülőtér. Ez az eltérő körülépítettség és a városon belüli elhelyezkedés miatt alakul így. A pályaudvar alacsony (LCZ 6, LCZ 8) és középmagas (LCZ 5) épületekkel van körülvéve és a belvároshoz közel helyezkedik el, így itt az éven belüli maximális havi átlagos intenzitás többször eléri a 7 °C-ot. Ezzel szemben a repülőtér a város peremén, növényzettel borított övezetben helyezkedik el. Itt csak egyszer fordult elő 4 °C-os intenzitás, a vizsgált 14 év nagy részében 2 °C alatt maradt a hősziget-intenzitás.



24. ábra: Az Aqua délutáni áthaladásának méréseiből származó havi hősziget-intenzitás idősorok összehasonlítása az LCZ 8-as típusból kiválasztott két rácscella esetén, 2003 januárjától 2016 októberéig

A növényzettel borított típusok közül az LCZ A (sűrű, fás) összehasonlítását mutatjuk be (25. ábra). Egy nagyobb és egy kisebb erdős területről választottunk rácscellákat. Csillebércen a hősziget-intenzitás a teljes idősorban negatív, azaz alacsonyabb volt a felszínhőmérséklet, mint a vidéki átlagos felszínhőmérséklet értéke. A hősziget-intenzitások -8 °C és 0 °C között alakultak. A Budapesti Kamaraerdő esetében az intenzitások -4 °C és 0 °C között változtak, azaz kisebb volt az eltérés a vidéki átlagtól. Ez abból adódik, hogy a Kamaraerdő esetén jóval kisebb az egybefüggő erdős terület. Továbbá míg a Kamaraerdő tengerszint feletti magassága 100-200 m között alakul, addig

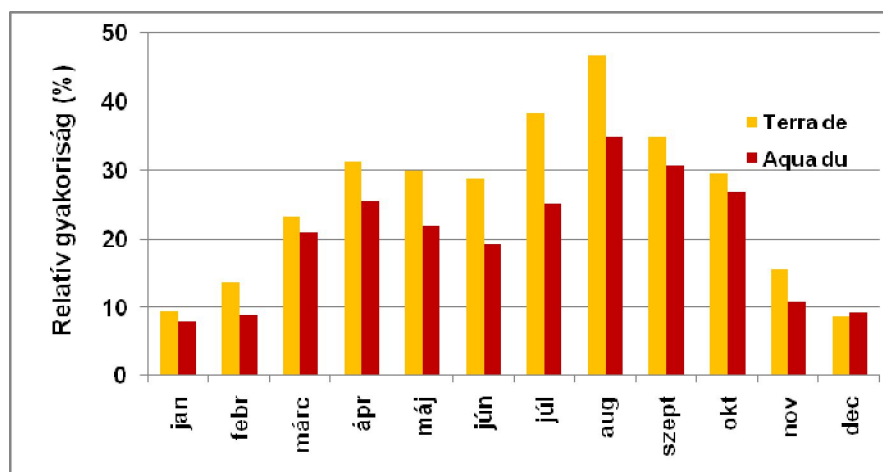
Csillebérc 400-450 m-es tengerszint feletti magasságon fekszik, ez pedig befolyásolja a felszínhőmérséklet alakulását. Az RMSE érték a két adatsor között 0,208, ami az LCZ 8-as kategóriában tapasztalt értékhez közeli.



25. ábra: Az Aqua délutáni áthaladásának méréseiből származó havi hősziget-intenzitás idősorok összehasonlítása az LCZ A típusból kiválasztott két rácscella esetén, 2003 januárjától 2016 októberéig

5.6. A hősziget-intenzitás értékek havi felbontású relatív gyakoriságai

A továbbiakban az éves és évszakos időskáláról áttérünk a havi felbontásra. Ehhez a legfeljebb 10%-os felhőborítottság-kritériumnak megfelelő napi adatokat használjuk fel. Mivel a felszínhőmérsékletből származtatott hősziget-intenzitás napközben veszi fel a maximumát, ezért ezen túl csak a Terra délelőtti és Aqua délutáni áthaladásának méréseit vizsgáljuk. A 26. ábrán láthatjuk a kritériumnak megfelelő napok relatív gyakoriságát a teljes időszakra vonatkozóan, az egyes hónapokban. Télen a gyakoribb felhős, illetve ködös időjárás miatt kevesebb, mint az összes nap 15%-a felelt meg a kritériumnak. A maximális relatív gyakoriság augusztusban adódott mind a két műhold esetében. A Terra esetében mind a 12 hónapban magasabb relatív gyakoriságok fordultak elő, mint az Aqua esetében. Budapest felett a Terra 9–10 UTC körül, míg az Aqua 12–13 UTC körül halad át, így az Aqua mérési idejére már a konvekcióból adódó felhőképződés hatására több felhőzet van, mint a délelőtti, déli órákban.



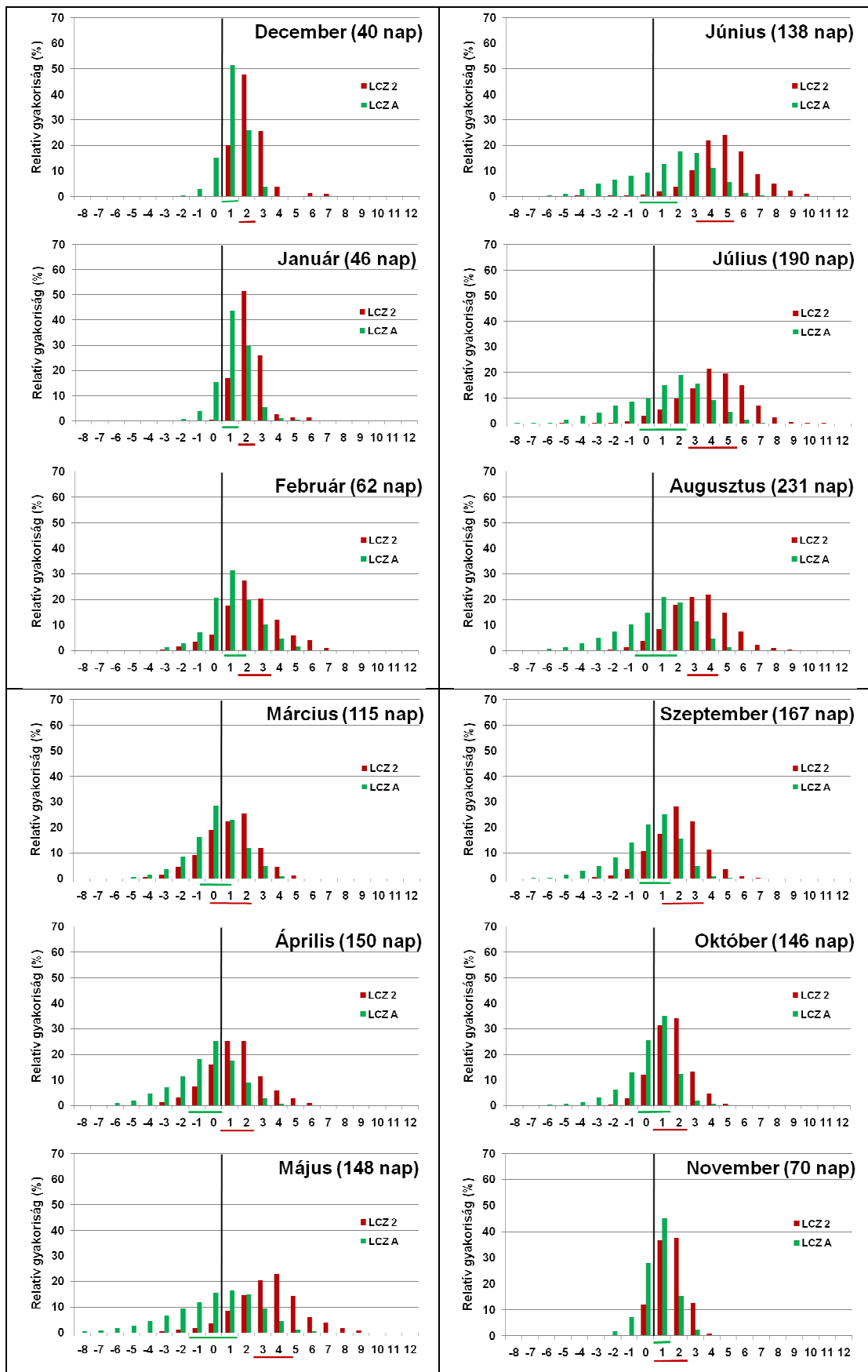
26. ábra: A 10%-os felhőborítottság-kritériumnak megfelelő napok relatív gyakorisága havi bontásban a teljes időszakra vonatkozóan (Terra de: 2001-2016, Aqua du: 2003-2016)

A Terra délelőtti átvonulásának méréseiből származtatott hősziget-intenzitás értékek relatív gyakoriságát vizsgáltuk havi bontásban 1 °C-os tartományokat képezve az LCZ 2-es, kompakt középmagas épületek és az LCZ A, sűrű fás kategóriákra (27. ábra). Így a legbeépítettebb és a legtöbb növényzettel borított LCZ kategóriákat hasonlítjuk össze. Egyrészt láthatjuk a téli és nyári, valamint a tavaszi és őszi hónapokat. Míg télen kb. 40-60 nap között mozgott a megfelelő napok száma, addig nyáron 140-230 közé tehető az esetszám. Ősszel és tavasszal több nap felelt meg a felhőborítottság-kritériumnak, mint télen, közel annyi, vagy esetenként több nap, mint nyáron. Az ábrán függőleges vonallal van bejelölve a 0°C-os hősziget-intenzitás. A skála alatti, illetve fölötti vízszintes vonalakkal emeltük ki az adott LCZ kategóriához tartozó adatok felső és alsó kvartilise közé eső középső 50% 0,5 °C-ra kerekített tartományait. Decemberben és januárban szűk intervallumba esik a hősziget-intenzitás mind a sűrűn beépített (LCZ 2), mind a fás (LCZ A) területeken. Januárban tapasztaltuk a legnagyobb relatív gyakoriságot, az adatok több mint 50%-a 1-2 °C közé esik. Télen még az erdős területeken is kevés a negatív hősziget-intenzitás. Februárban elkezd kiszélesedni az intervallum, ami már az LCZ 2-es kategória alsó és felső kvartilise közé eső részén is megfigyelhető. Tavasszal ez a szélesedés folytatódik, ami a relatív gyakoriságok csökkenésével jár együtt. Növekszik a negatív hősziget-intenzitás gyakorisága, valamint nő a maximális intenzitás. Májusban és a nyári hónapokban már jóval alacsonyabbak a relatív gyakoriságok, éppen csak eléri a 25%-ot a leggyakoribb tartományba eső intenzitás-értékek részaránya az összes adathoz viszonyítva. Az LCZ A, sűrű fás kategóriában akár -8 °C is előfordult és ebben a négy hónapban -1-2 °C között mozgott az adatok középső 50%-a. Ezzel szemben az LCZ 2-es, belvárosi

területre eső rácscellákban nyáron alig fordul elő negatív hősziget-intenzitás, az alsó és felső kvartilis közötti rész 2,5-5,5 °C körül alakul, de előfordult 12 °C-os intenzitás érték is. Jól elkülönül a két LCZ kategóriában a hősziget-intenzitás alakulása. A beépített területeken magasabb intenzitás-értékek alakulnak ki, mint az erdős helyeken. Szeptemberben még a nyárihoz hasonló képet mutat az intenzitás, azonban már kicsit szűkebb intervallumot ölel fel. Ezzel szemben októberben és novemberben már a télihez hasonló a hősziget-intenzitás eloszlása.

A gyakoriságok alapján a hősziget-intenzitás eloszlása jelentősen eltér a nyári és téli hónapokban, míg tavasszal és ősszel nincs külön jellemző eloszlás. Februártól kezdődik az intenzitás intervallumának szélesedése, mely nyáron a legszélesebb, de egészen szeptemberig tartja ezt a jelleget. Októbertől januárig pedig sokkal szűkebb intervallumot fednek le az intenzitásértékek.

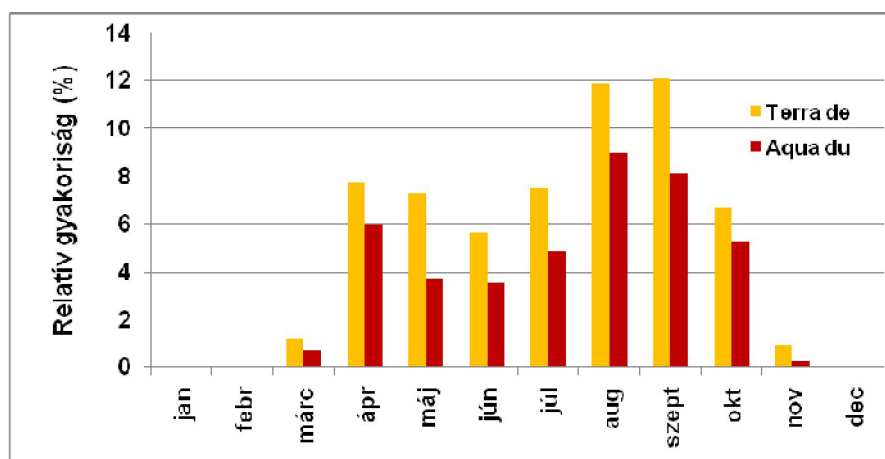
Az Aqua délutáni méréseiből származó gyakoriságok a függelékben láthatók.



27. ábra: Az LCZ 2-es (kompakt, középmagas épületek) és LCZ A (sűrű, fás) kategóriák hősziget-intenzitásának relatív gyakorisága havi bontásban a Terra délelőtti méréseiből a 10%-os felhőborítottság-kritériummal

5.7. Esettanulmányok felhőmentes időszakokra

A felhőzetnek fontos szerepe van a felszínhőmérsékletből származtatott hősziget-intenzitás vizsgálatokban, hiszen felhős időben a műhold nem a felszínt, hanem a felhőtetőt látja. Korábban láttuk, hogy felhőborítottság-kritériumok esetén a legjelentősebb változás a teljesen felhőmentes napok esetében következett be, azaz amikor a műhold átvonulásának idejében a $70 \times 70 \text{ km}^2$ -es kivágat egyetlen rácscellája fölött sem volt felhő. Ez az összes vizsgált napnak csak a 4-5%-át jelenti. A felhőmentes napok adott hónapra vonatkozó relatív gyakorisága a 28. ábrán látható. Télen a 16, illetve 14 év alatt egyszer sem fordult elő teljesen felhőmentes nap. A legnagyobb gyakoriság augusztusban és szeptemberben volt, ekkor kb. 12%-os a relatív gyakoriság. Emellett a felhőborítottság-kritérium mellett is a Terra mérései esetében több volt megfelelő nap, mint az Aqua áthaladásakor.

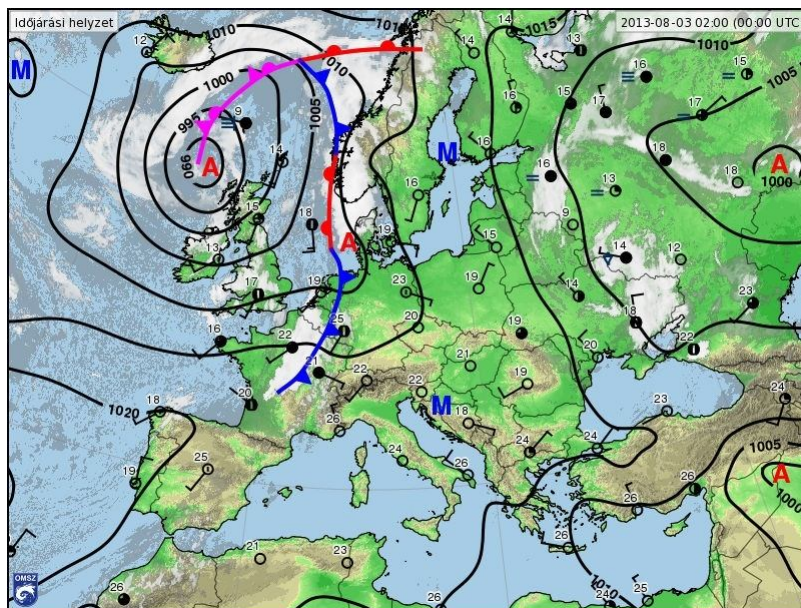


28. ábra: A teljesen felhőmentes napok relatív gyakorisága havi bontásban a teljes időszakra vonatkozóan (Terra de: 2001-2016, Aqua du: 2003-2016)

A felhőmentes időben kialakuló hősziget-intenzitás vizsgálatához olyan időszakokat választottunk ki, melyek során a műholdak áthaladási időpontjában néhány napig nem volt felhőzet a teljes kivágaton. Két nyári időszakot mutatunk be, hiszen a felszínhőmérsékletből származó hősziget-intenzitás nyáron napközben a legmagasabb. A nyári időszakon belül a legtöbb összefüggő felhőmentes időszak augusztusban volt, ami következik abból is, hogy összességében augusztusban volt a legtöbb felhőmentes nap.

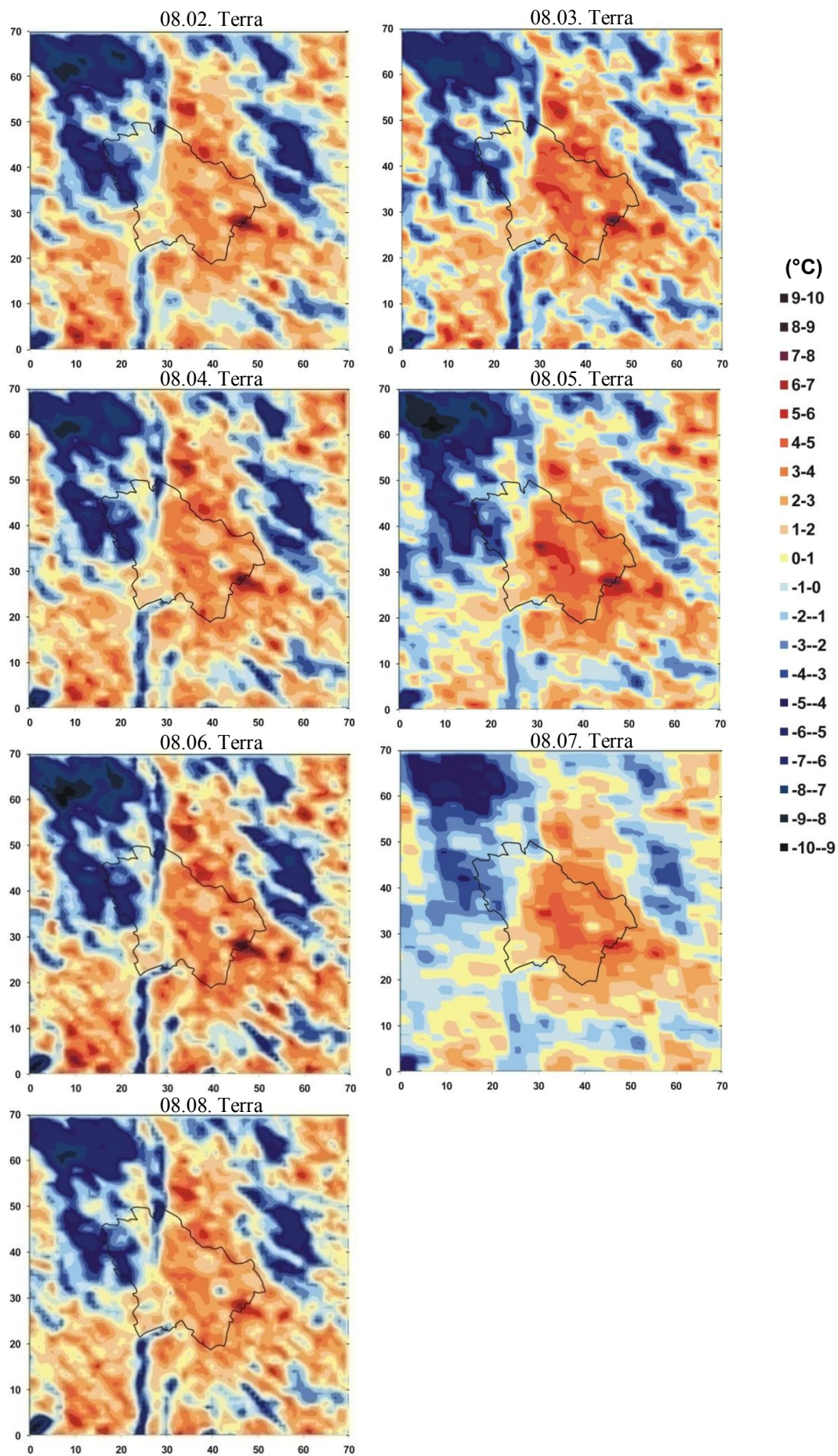
I. esettanulmány: 2013. augusztus 2-8.

2013 augusztusának elején anticiklon határozta meg a Kárpát-medence időjárását. Napokon keresztül több mint 30-35 °C-os maximum hőmérsékletek fordultak elő Magyarországon, de volt, hogy a 40 °C-ot is elérte a léghőmérséklet. A kánikulának az augusztus 9-én érkező hidegfront vetett véget. A szinoptikus helyzetet jól mutatja az augusztus 3-ra vonatkozó fronttérkép (29. ábra), melyen megjelenik a Közép-Európa felett elhelyezkedő anticiklon.



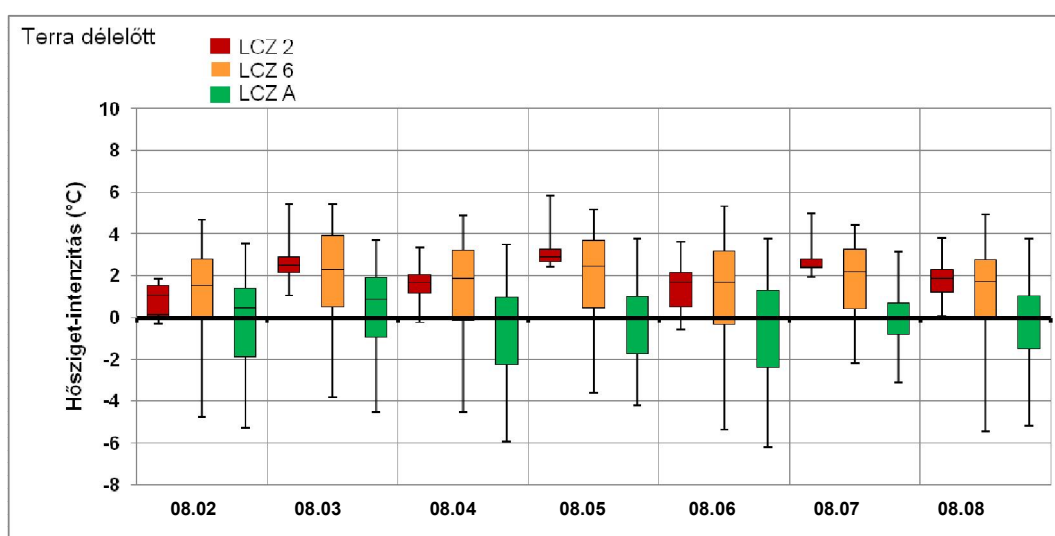
29. ábra: A szinoptikus helyzet Európában, 2013. augusztus 3. 00 UTC
(forrás: www.met.hu)

Ezen a nyolc napon a Terra átvonulásának idejében egyik napon sem volt felhő a $70 \times 70 \text{ km}^2$ -es kivágaton, azonban az Aqua áthaladási időpontjában már megjelent némi felhőzet, így nem volt összefüggő adatsor erre az időszakra, ezért a továbbiakban a Terra adatait vizsgáljuk erre a hét napra. A Terra délelőtti méréseiből származtatott hősziget-intenzitás értékek térképes ábrázolását a 30. ábra képsorozata mutatja a teljes kivágatra. A térképeken jól követhető a Duna vonala, ami nyáron hidegebb a környezeténél, mivel a víz lassabban melegszik fel. A két legnagyobb intenzitású nap augusztus 3-a és 5-e. Ezeken a napokon akár 7-8 °C-os intenzitás is kialakult a belvárosban, azaz az LCZ 2-es kategóriába eső területen. Megfigyelhető egy erősen pozitív és egy negatív vagy alig 0-1 °C intenzitású terület mind a 7 napon. Pozitív szigetként jelenik meg a Liszt Ferenc Repülőtér, ahol ezeken a napokon nagyon erőteljes volt az hősziget jelensége. Beazonosítható negatív sziget az Új Köztemető, amely a nagyobb erdős területe miatt hűvösebb a városkörnyéki pontok átlagos felszínhőmérsékleténél.



30. ábra: A hősziget-intenzitás alakulása 2013. augusztus 2-8. között, a Terra délelőtti mérései alapján, a $70 \times 70 \text{ km}^2$ -es kivágaton

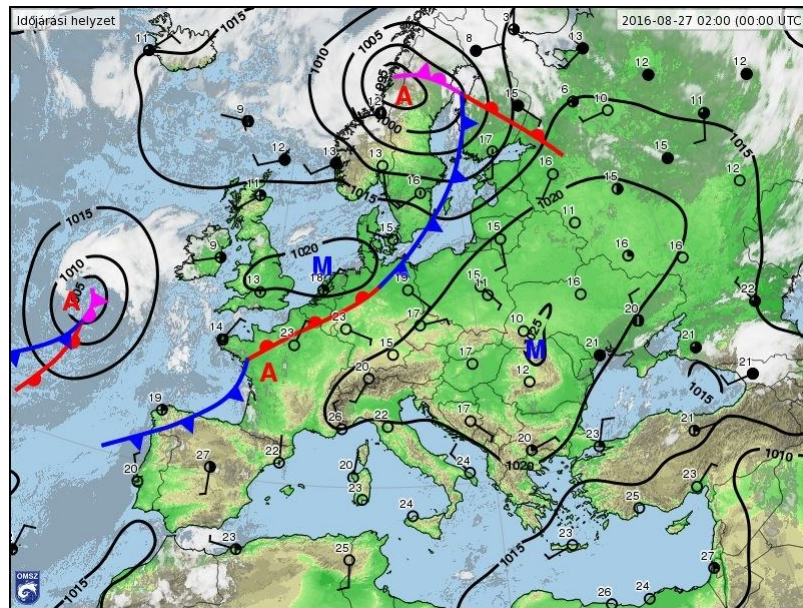
Három kiválasztott LCZ kategória hősziget-intenzitás eloszlását vizsgáltuk a 2013. augusztus 2-8. időszakra vonatkozóan (31. ábra). Az LCZ 2 a kompakt, középmagas épületek kategóriája, Budapesten ebbe a kategóriába a belváros tartozik. Az LCZ 6-os osztály a nyitott, alacsony épületeket foglalja magába, ami a kertvárosnak feleltethető meg, a fővárosban ebbe a típusba tartozik a legtöbb rácsella. Az LCZ A pedig a sűrű, fás kategória, az erdősebb részeket jelenti. Az LCZ A adatainak majdnem a fele minden nap negatív értéket vesz fel. Az LCZ 6-os esetében már jórészt pozitív intenzitások alakultak ki. Az LCZ 2-es kategória esetén szinte csak pozitív értékeket tapasztaltunk, a legmagasabb intenzitás augusztus 8-án volt. Ekkor a minimum is meghaladta a 2 °C-ot, míg a maximum megközelítette a 6 °C-ot.



31. ábra: Az LCZ 2 (kompakt, középmagas épületek), LCZ 6 (nyitott, alacsony épületek) és az LCZ A (sűrű, fás) kategóriák hősziget-intenzitás eloszlása 2013. augusztus 2-8. között, a Terra délelőtti mérései alapján

II. esettanulmány: 2016. augusztus 26-29.

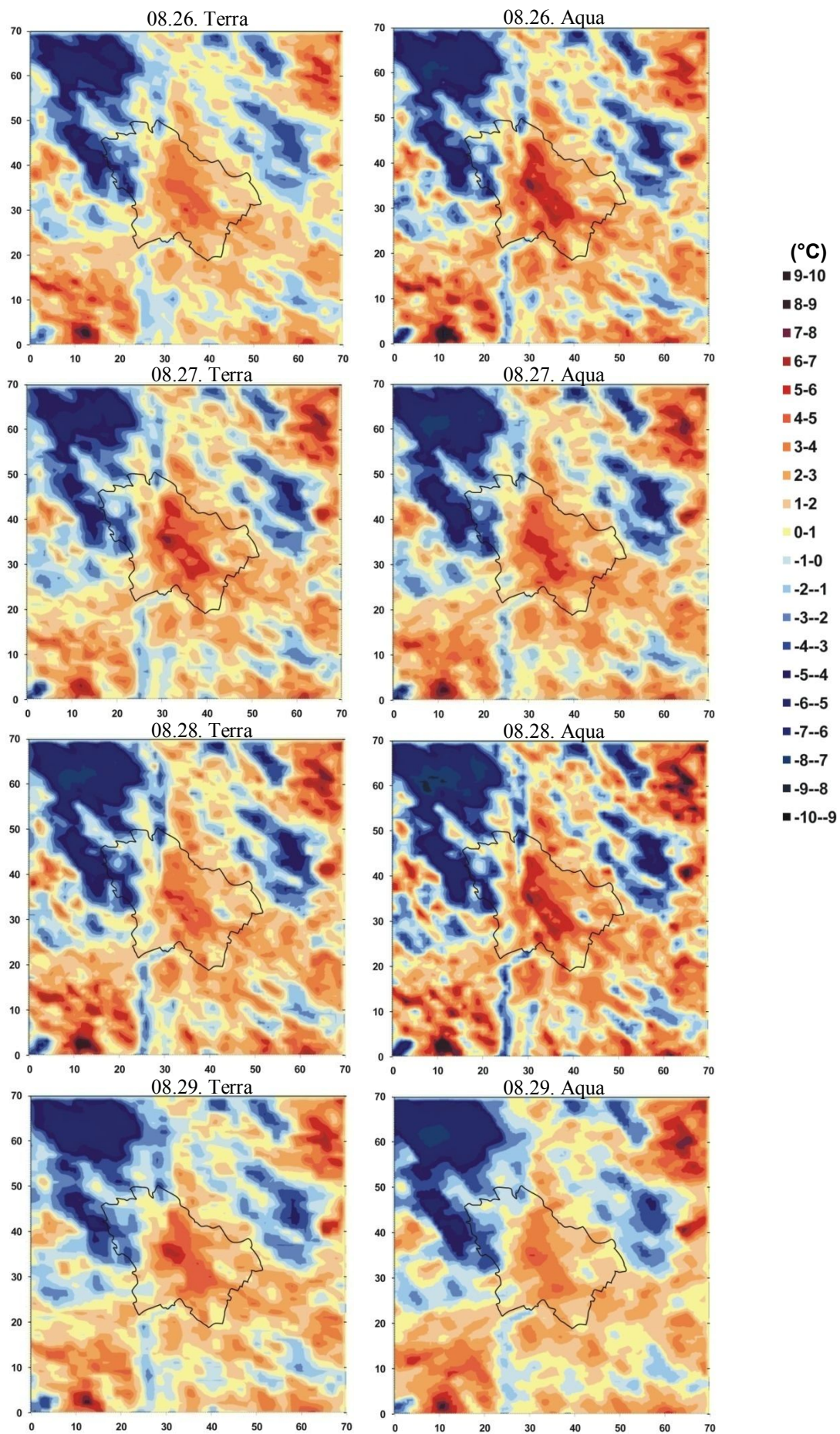
A másik kiválasztott időszak 2016. augusztus 26-29. közötti négy nap, amikor mind a Terra, mind az Aqua átvonulási idejében a teljes $70 \times 70 \text{ km}^2$ -es kivágaton sehol sem borította felhő az égboltot, így minden nap 2 mérési adatunk volt, amiből összesen nyolc hősziget-intenzitás értéket tudtunk származtatni mindenegyik rácscellára. Ebben az időszakban Nyugat- és Észak-Európa felett egy többközéppontú ciklonrendszer uralkodott, míg Dél- és Közép-Európa felett anticiklon tartózkodott (32. ábra). Hazánkban csapadék nem hullott, a hőmérsékletek 30-35 °C közé emelkedtek a beáramló száraz és meleg levegő hatására.



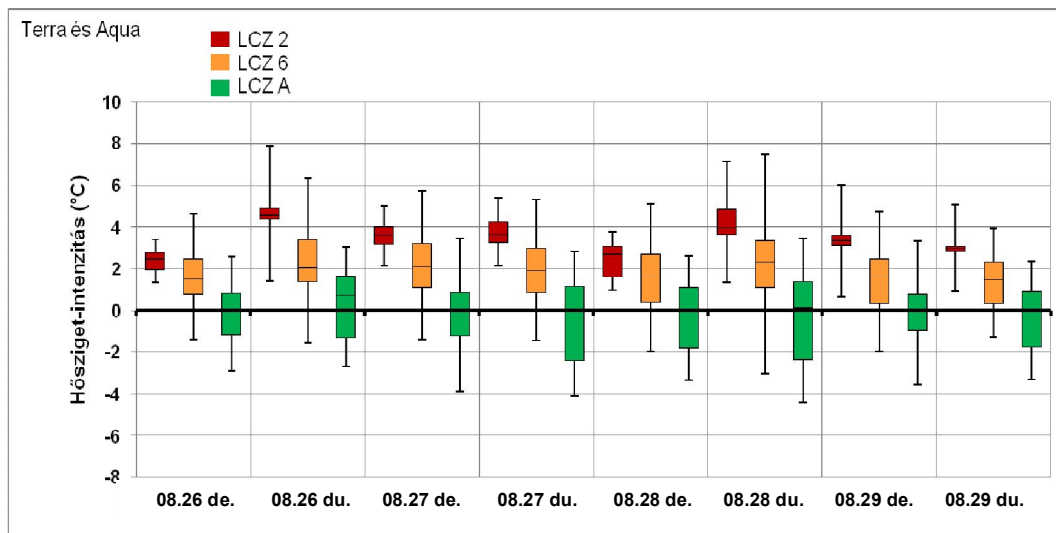
32. ábra: A szinoptikus helyzet Európában, 2016. augusztus 27. 00 UTC
(forrás: www.met.hu)

A 33. ábra képsorozata a Terra és Aqua méréseiből származó hősziget-intenzitás értékeket mutatja a négy vizsgált napra. Látszik, hogy a legmagasabb intenzitások a belvárosban alakultak ki. Az első nap délelőtt még nem volt erős a hősziget-hatás, délutánra azonban nagyon magasak lettek az intenzitás értékek, akár 8 °C is előfordult. Augusztus 29-én egy gyenge hidegfront érte el a Kárpát-medencét, ezzel megszakítva a kánikula időszakot. Ezen a napon délután már a hősziget-intenzitás értékek is alacsonyabbak, mint az ezt megelőző napokban.

A hősziget-intenzitás térképek, illetve a három kiválasztott LCZ kategóriára vonatkozó intenzitás-eloszlások alapján egyaránt 26-án és 28-án délután tapasztaltuk a legmagasabb értékeket (34. ábra). Az LCZ 2-es kategória esetében mindig pozitív hősziget-intenzitást kaptunk, akár 7-8 °C-ot. Az LCZ A erdős területein -4 °C körüli volt a legalacsonyabb hősziget-intenzitás. Ez a minimum a 2013. augusztusi időszakban -6 °C volt, azaz akkor nagyobb volt a különbség a fővároson belüli erdős területek, illetve a városkörnyék felszínhőmérséklete között.



33. ábra: A hősziget-intenzitás alakulása 2016. augusztus 26-29. között, a Terra délelőtti és az Aqua délutáni mérései alapján, a 70 × 70 km²-es kivágaton



34. ábra: Az LCZ 2 (kompakt, középmagas épületek), LCZ 6 (nyitott, alacsony épületek) és az LCZ A (sűrű, fás) kategóriák hősziget-intenzitás eloszlása 2016. augusztus 26-29. között, a Terra délelőtti és az Aqua délutáni mérései alapján

6. Összefoglalás

Az intenzív urbanizációs folyamat minél pontosabb megismerése érdekében már több évtizede folynak városi hősziget-intenzitás kutatások szerte a világon. Oke és Stewart (2012) néhány éve egy újfajta városszerkezet vizsgálati módszert hozott létre: ez a lokális klímazóna rendszer. Jelen dolgozatban az LCZ kategóriák és a hősziget-intenzitás kapcsolatát vizsgáltuk.

Az elemzésekhez a Terra és az Aqua műhold MODIS szenzorának felszínhőmérsékleti időszoraiból származtatható havi, illetve napi intenzitás adatokat használtuk fel 2001 januárjától 2016 októberéig. A vizsgálatok első lépéseként a Budapestet lefedő MODIS rácscellákat besoroltuk az LCZ kategóriákba. Budapest térségére hétféle LCZ típust tudtunk beazonosítani. A besorolást a teljes közigazgatáson belüli területre, valamint egy szűkebb, a Dezső (2009) féle kritériumrendszernek megfelelő rácscellákra vonatkozóan végeztük. Az elemzés során háromféle módszertant alkalmaztunk annak függvényében, hogy egy-egy LCZ típus mekkora részét fedi le a cellának. Az első módszernél azzal az LCZ kategóriával jellemezzük a cellát, amelyik a legnagyobb részét fedi le, a másodikban csak akkor soroltuk be, ha a meghatározó LCZ típus legalább a cella 50%-át lefedi, a harmadik módszer pedig legalább 75%-os lefedettséget követelt meg. A vizsgálatainkban különböző felhőborítottság-kritériumokat alkalmaztunk. Éves és évszakos vizsgálatokhoz legfeljebb 50%-os, illetve 25%-os felhőborítottságot engedtünk meg, havi vizsgálatok esetében legfeljebb 10%-ot boríthatott felhőzet a teljes kivágatból. Végül esettanulmány jelleggel teljesen felhőmentes napok hősziget-intenzitását elemeztük.

A kutatás során a Budapesten előforduló LCZ típusokra vonatkozóan elemeztük a havi átlagos hősziget-intenzitás értékek évszakos eloszlását és a hősziget-intenzitás átlagos éves menetét. Ezeket a teljes Budapest közigazgatási határán belül lévő összes rácscellára elvégeztük azzal a módszertannal, amikor egy rácscellát azzal az LCZ típussal jellemzünk, ami legalább a cella 50%-át lefedi. Továbbá néhány kiválasztott rácscella esetében az azonos LCZ kategóriába tartozó cellák teljes időszakra vonatkozó hősziget-intenzitás idősorát összehasonlítottuk 2003 januárjától 2016 októberéig.

Vizsgálataink eredményeképpen megállapítható, hogy a beépítettség növelésével növekszik a felszínhőmérsékleten alapuló hősziget-intenzitás értéke, a belvárosban (LCZ 2) nyáron napközben akár a 5 °C-ot is megközelítheti az átlagos havi intenzitás. A növényzettel borított területeken fordul elő a legtöbb negatív hősziget-intenzitás, illetve a sűrűn beültetett fás területeken tavasszal és ősszel az átlagértékek is negatívak. Ez

egyértelműen a növényzet eltérő sugárzási tulajdonságaira vezethető vissza és összességében a mesterséges felszínekkel ellentétben a hősziget hatás mérsékelése irányába hat. Egyes kiválasztott rácscellák elemzése során látható, hogy az adott LCZ típusba tartozó rácscella viselkedését nagy mértékben befolyásolja, hogy körülötte milyen beépítettségű cellák helyezkednek el. Így például a repülőtér a körülötte levő zöld növényzet miatt jóval alacsonyabb hősziget-intenzitás értékeket mutat, mint a körülépített Ferencvárosi rendező pályaudvar.

Napi adatok alapján vizsgáltuk a hősziget-intenzitás relatív gyakoriságát az egyes hónapokra a napközbeni műholdáthaladások esetén. Nyáron széles intervallumba esnek az adatok, és jól elkülöníthető a kompakt középmagas épületek kategóriája az LCZ 2-es magas pozitív hősziget-intenzitás értékei és a sűrű, fás LCZ A kategória gyakran negatív értékei. Télen viszont sokkal szűkebb intervallumot fednek le az intenzitások mindkét részletesebben vizsgált LCZ kategória esetén.

Esettanulmány jelleggel elemeztük két felhőmentes kánikulai időszak hősziget-intenzitásait (2013. augusztus 2-8. és 2016. augusztus 26-29.). Az LCZ 2-es beépített kategóriákban akár 8 °C-os intenzitás is kialakult, míg az LCZ A erdős részein még ezeken a napokon is előfordult, hogy 4-6 °C-kal hűvösebb volt a felszínhőmérséklet, mint a városkörnyéki területeken.

További célunk az elemzéseket kiterjeszteni Budapest határán kívülre is, hiszen napjainkra egyre nehezebb valódi vidéki pontokat találni, mivel a várost már nagymértékben körülöleli az agglomeráció. A lokális klímazónákat szeretnénk kiterjeszteni az agglomerációra, és egyben vizsgálni Budapest és az agglomeráció együttes hősziget-intenzitásának alakulását. Továbbá célul tűztük ki a lokális klímazónák felhasználásával egy energiaháztartás alapú modell adaptálását Budapestre.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni a rengeteg segítséget témavezetőimnek, dr. Pongrácz Ritának, aki hasznos tanácsaival, szaktudásával, támogatásával segítette és irányította munkámat. Soósné dr. Dezső Zsuzsannának támogatásáért, a MODIS adatok leválasztásáért valamint előkészítéséért. Továbbá Dr. Bartholy Juditnak, aki lehetővé tette, hogy bekapcsolódjak a kutatásokba.

A műholdas felszínhőmérsékleti adatbázis előállítása és rendelkezésre bocsátása az amerikai NASA-nak köszönhető, melyhez a Földfelszíni Megfigyelőrendszer Adatközpontján keresztül jutottunk hozzá.

A kutatásokat támogatta az OTKA K-109109 és K-120605 számú projektje, az AGÁRKLIMA2 (VKSZ_12-1-2013-0034) projekt, valamint az MTA Bolyai János Kutatási Ösztöndíja.

Irodalomjegyzék

- Bartholy J., Pongrácz R., Dezső Zs. 2005: A hazai nagyvárosok hősziget hatásának elemzése finomfelbontású műholdképek alapján – Agro-21 füzetek, 44, pp. 32-44.
- Bechtel B, Foley M, Mills G, Ching J, See L, Alexander P, O'Connor M, Albuquerque T, Andrade M, Brovelli M, Das D, Fonte CC, Petit G, Hanif U, Jimenez J, Lackner S, Liu W, Perera N, Rosni NA, Theeuwes N, Gál T 2015: CENSUS of Cities: LCZ Classification of Cities (Level 0) – Workflow and Initial Results from Various Cities – ICUC9 extended abstracts. Konferencia helye, ideje: Toulouse, Franciaország, 2015.07.20-2015.07.24. Paper GD2-2-2891238_a.pdf. 6 p.
- Bottyán Zs. 2007: Az átlagos maximális hősziget-intenzitás statisztikus modellje Szegeden és Debrecenben – Doktori (PhD) értekezés. Szegedi Tudományegyetem. 122p.
- Bottyán Zs., 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, pp. 405-418.
- Dezső Zs. 2009: A magyarországi és közép-európai nagyvárosokban kialakuló városi hősziget vizsgálata finom felbontású műholdképek alapján – Doktori (PhD) értekezés. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, 113p.
- Dezső Zs., Bartholy J., Pongrácz R. 2005: Satellite-based analysis of the urban heat island effect – Időjárás, 109, pp. 217-232.
- Dezső Zs., Bartholy J., Pongrácz R., Lelovics E. 2012: Városi hősziget vizsgálatok műholdas és állomási mérések alapján – Léggör, 57, pp. 170-173.
- Dévényi D., Gulyás O. 1988: Matematikai statisztikai módszerek a meteorológiában. – Tankönyvkiadó, Budapest. 443 p.
- Dian Cs. 2015: Felszínhőmérsékleti változások elemzése Budapest IX. kerületére – BSc szakdolgozat. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, 49p.
- Dian Cs., Pongrácz R., Dezső Zs., Bartholy J. (2015): Városhőmérsékleti mérési expedíció Budapest IX. kerületében. In: Aktuális kutatások az ELTE Meteorológiai Tanszékén. Jubileumi kötet - 70 éves az ELTE Meteorológiai Tanszéke. Egyetemi Meteorológiai Füzetek, No.26., pp. 15-21.
- ENSZ (2015): World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, (ST/ESA/SER.A/366). U.N. Dept. of Economic and Social Affairs, Population Division, 517p. <https://esa.un.org/unpd/wup/Publications/Files/WUP2014-Report.pdf>

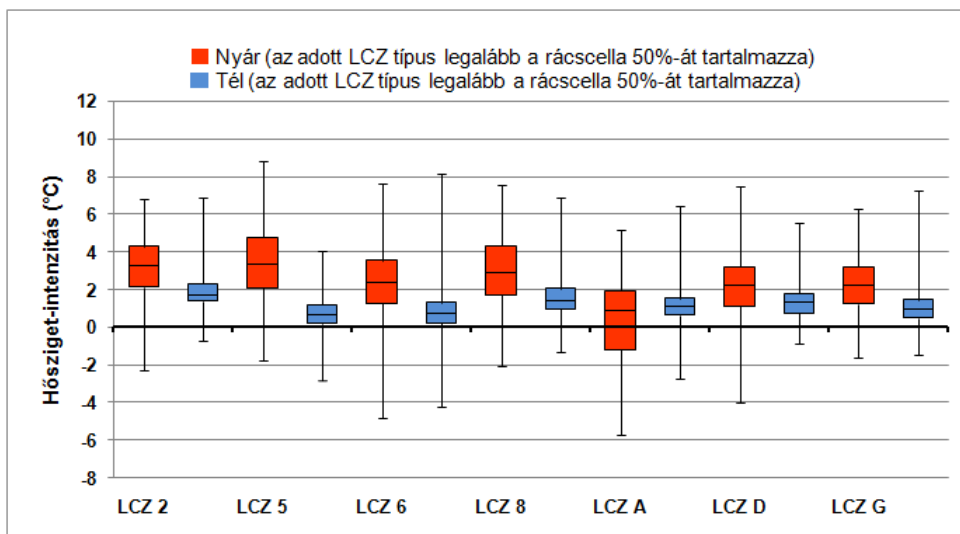
- Gál T., Unger J., Kiss M. 2013: An automatic method to create an urban vegetation database using 4 band aerial photographs for Sky View Factor calculation – A case study in Szeged, Hungary – Institute of Biometeorology, pp. 124-132.
- Gál T., Bechtel B., Unger J. 2015: Comparison of two different Local Climate Zone mapping methods– ICUC9 extended abstracts. Konferencia helye, ideje: Toulouse, Franciaország, 2015.07.20-2015.07.24. Paper GD2_6_1551002_a_u.pdf. 6 p.
- 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:(2) pp. 105-116.
- Lelovics E., Pongrácz R., Bartholy J., Dezső Zs. 2011: Budapesti városi hősziget elemzése: műholdas és állomási mérések összehasonlítása – Légkör, 56, pp. 55-59.
- NASA, 1999: Science writers' guide to Terra – NASA EOS Project Science Office, Greenbelt, MD. 28p.
- NASA, 2002: Science writers' guide to Aqua – NASA EOS Project Science Office, Greenbelt, MD. 32p.
- Oke, T.R. 1973: City size and the urban heat island – Atmospheric Environment, 7, pp. 769-779.
- Oke, T.R. 1982: The energetic basis of the urban heat island – Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 108, pp. 1-24.
- Planning Department, 2012 – Urban Climatic Map and Standards for Wind Environment – Feasibility Study, FINAL REPORT; School of Architecture, CUHK, Hong-Kong, 518p.
- Pongrácz R., Bartholy J., Dezső Zs. 2010: Application of remotely sensed thermal information to urban climatology of Central European cities – Physics and Chemistry of the Earth, 35, pp. 95-99.
- Pongrácz R., Bartholy J., Dezső Zs., Dian Cs. 2015: Analysing the climatic effects of local block rehabilitation programs in Budapest-Ferencváros. – Proceedings of the 9th International Conference on Urban Climates (ICUC9), Toulouse, France. 20-24 July 2015. Extended abstract. 6p.
- Pongrácz R., Bartholy J., Dezső Zs., Dian Cs. 2016: Analysis of the air temperature and relative humidity measurements in the Budapest Ferencváros District. – Hungarian Geographical Bulletin, 65 (2), pp. 93–103.
- Probáld F., 2014: The urban climate of Budapest: past, present and future – Hungarian Geographical Bulletin, 63 (1), pp. 69–79.

- Stewart, I. D. 2007: Landscape representation and the urban-rural dichotomy in empirical urban heat island literatura, 1950–2006 – *Acta Climatologica et Chorologica Universitatis Szegediensis*, Tomus 40-41, pp. 111-121.
- Stewart, I. D., Oke, T.R. 2012: Local Climate Zones for urban temperature studies. – *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, pp. 1879–1900.
- Sümeghy Z., Unger J. 2003: A települések hőmérséklet-módosító hatása – a szegedi hősziget-kutatások tükrében. – *Földrajzi Közlemények*, 127 (51), pp. 23-44.
- Unger J. 2004: Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach – *Climate Research*, 27, pp. 253-264.
- Unger J., Lelovics E., Gál T. 2014: Local Climate Zone mapping using GIS methods in Szeged – *Hungarian Geographical Bulletin*, 63 (1), pp. 29-41.
- Wan, Z., Snyder, W. 1999: MODIS land-surface temperature algorithm theoretical basis document – Institute for Computational Earth Systems Science, Univ. of California, Santa Barbara.

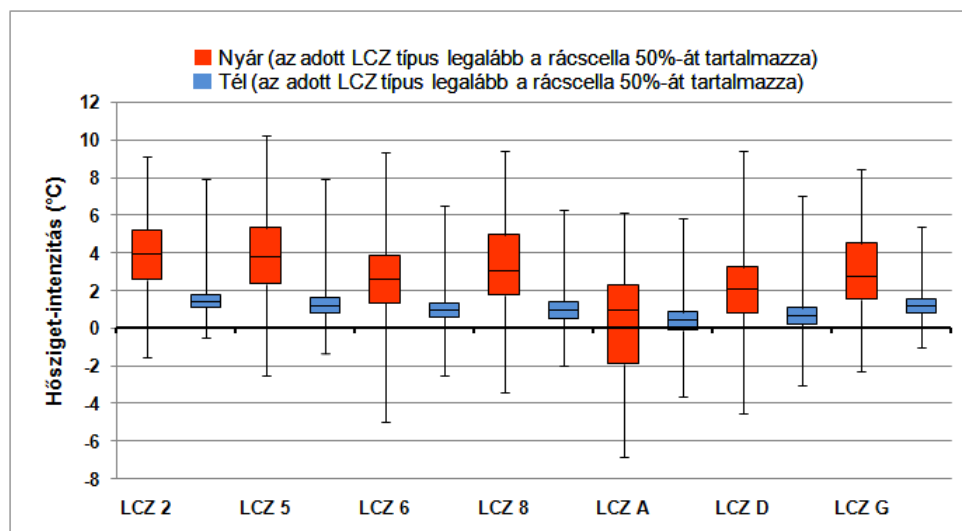
Internetes források

- [1 – Központi Statisztikai Hivatal]: <https://www.ksh.hu/>
- [2 – WUDAPT]: <http://www.wudapt.org/>
- [3 – Budapest LCZ térképe]:
http://geopedia.world/#T4_L107_x2130299.9783078623_y6020180.347740481_s1_1_b17
- [4 – Budapest Főváros Településszerkezeti Terve] (50/2015.(I.28.) Főv. Kgy. határozattal elfogadva, III. kötet – Budapest, 2015):
http://terkep.budapest.hu/TSZT/III_kotet_TSZT/TSZT.pdf
- [5 – OMSZ – Napi jelentés kiadvány]:
http://www.met.hu/idojaras/aktualis_idojaras/napijelentes/

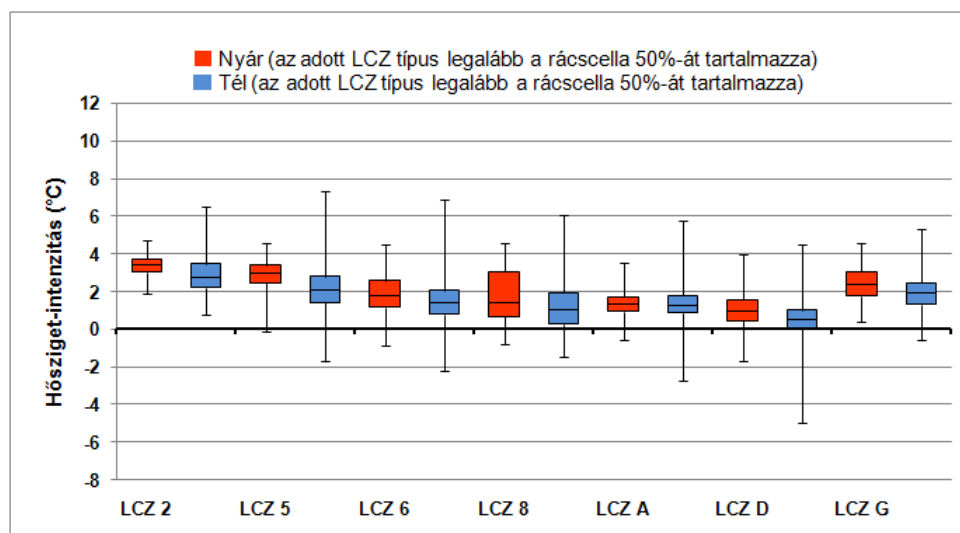
Függelék



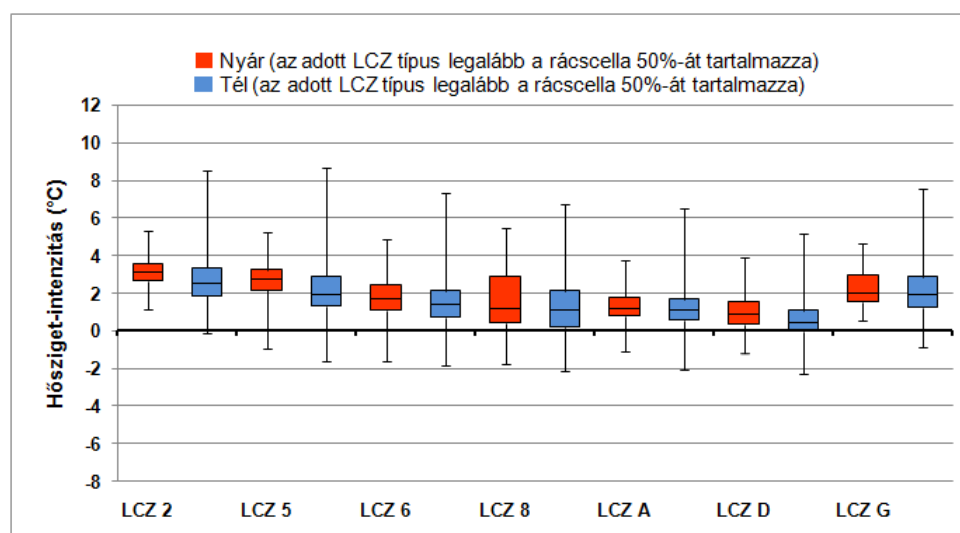
F1. ábra: A nyári és téli hónapok hősziget-intenzitás eloszlásai az egyes LCZ típusokban a Terra délelőtti mérései alapján, a legalább 50%-os lefedettséget biztosító módszertan alapján, Budapest közigazgatási határán belülre eső összes cellára, az 50%-os felhőborítottság-kritériummal



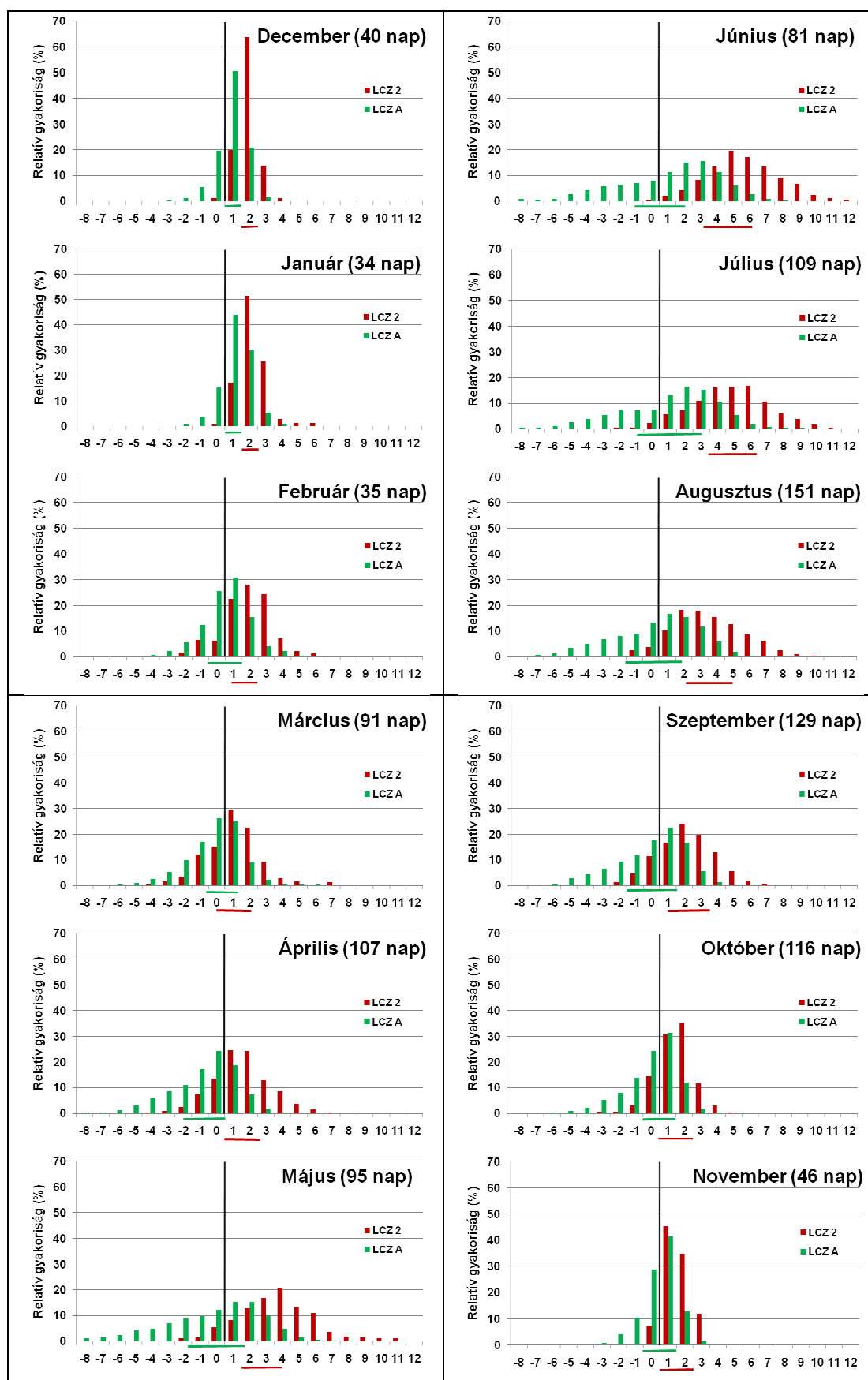
F2. ábra: A nyári és téli hónapok hősziget-intenzitás eloszlásai az egyes LCZ típusokban az Aqua délutáni mérései alapján, a legalább 50%-os lefedettséget biztosító módszertan alapján, Budapest közigazgatási határán belülre eső összes cellára, az 50%-os felhőborítottság-kritériummal



F3. ábra: A nyári és téli hónapok hősziget-intenzitás eloszlásai az egyes LCZ típusokban a Terra esti mérései alapján, a legalább 50%-os lefedettséget biztosító módszertan alapján, Budapest közigazgatási határán belülre eső összes cellára, az 50%-os felhőborítottság-kritériummal



F4. ábra: A nyári és téli hónapok hősziget-intenzitás eloszlásai az egyes LCZ típusokban az Aqua hajnali mérései alapján, a legalább 50%-os lefedettséget biztosító módszertan alapján, Budapest közigazgatási határán belülre eső összes cellára, az 50%-os felhőborítottság-kritériummal



F5. ábra: Az LCZ 2-es (kompakt, közép magas épületek) és LCZ A (sűrű, fás) kategóriák hősziget-intenzitásának relatív gyakorisága havi bontásban az Aqua délelőtti méréseiből a 10%-os felhőborítottság-kritériummal