

**EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM  
TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR  
METEOROLÓGIAI TANSZÉK**

**A MAGYARORSZÁGI ÉS KÖZÉP-EURÓPAI  
NAGYVÁROSOKBAN KIALAKULÓ VÁROSI HŐSZIGET  
VIZSGÁLATA FINOM FELBONTÁSÚ MŰHOLDKÉPEK  
ALAPJÁN**

**doktori (PhD) értekezés**

**SOÓSNÉ DEZSŐ ZSUZSANNA**

**FÖLDTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA**  
Iskolavezető: Dr. Gábris Gyula, egyetemi tanár

**FÖLDRAJZ-METEOROLÓGIA PROGRAM**  
Programvezető: Dr. Gábris Gyula, egyetemi tanár

**Témavezető:**  
**DR: BARTHOLY JUDIT**  
tanszékvezető egyetemi tanár  
az MTA doktora

**Konzulens:**  
**DR: PONGRÁCZ RITA**  
adjunktus  
a földtudományok doktora

**BUDAPEST, 2009**

## Tartalomjegyzék

1. Bevezetés .....	3
1.1. Urbanizációs folyamatok a világban, Európában és Magyarországon .....	3
1.2. A városklíma-kutatások története és jelentősége .....	7
1.2.1. Műholdas városklíma-kutatások .....	7
1.2.2. Városklíma-kutatások Magyarországon .....	13
2. A városi klíma .....	16
2.1. A sugárzási paraméterek alakulása a városok területén .....	16
2.2. A városi hősziget .....	20
2.2.1. A hősziget horizontális szerkezete .....	20
2.2.2. A hősziget vertikális szerkezete .....	22
2.2.3. A hősziget kialakulásának lehetséges okai .....	23
2.3. A légáramlás módosulása a város területén .....	24
3. Adatok és módszerek .....	26
3.1. A Terra és az Aqua műhold, valamint az általuk mért paraméterek .....	26
3.1.1. A Terra és az Aqua műhold alapvető jellegzetességei .....	26
3.1.2. A MODIS szenzor által mért felszínhőmérséklet .....	29
3.1.3. A MODIS szenzor méréseiből meghatározott felszíntípusok .....	32
3.1.4. A MODIS szenzor méréseiből meghatározott vegetációs index .....	33
3.1.5. Az ASTER szenzor által mért felszínhőmérséklet .....	33
3.2. A vizsgálati módszerek .....	34
3.3. A vizsgált városok .....	39
3.4. A felhasznált adatok mennyiségi és minőségi vizsgálata .....	40
4. A vizsgálat eredményei .....	45
4.1. A városi hősziget szerkezete .....	45
4.1.1. A városi hősziget szerkezete Magyarország nagyvárosaiban .....	45
4.1.2. A városi hősziget szerkezete Közép-Európa nagyvárosaiban .....	51
4.2. A városi hősziget keresztmetszete .....	63
4.2.1. A városi hősziget keresztmetszete Magyarország nagyvárosaiban .....	63
4.2.2. A városi hősziget keresztmetszete Közép-Európa nagyvárosaiban .....	74
4.3. A városi hősziget átlagos intenzitása .....	88

4.4. Esettanulmányok.....	96
5. Összefoglalás .....	101
Köszönetnyilvánítás.....	105
Felhasznált irodalom.....	106

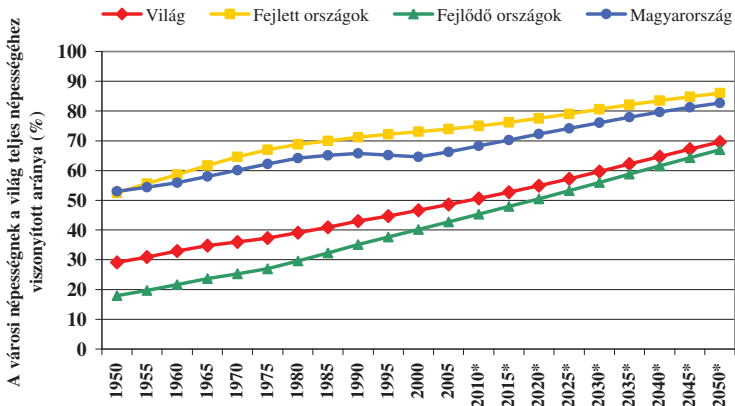
## 1. Bevezetés

Napjainkban az éghajlatkutatás legfontosabb területe az emberi tevékenység természetre gyakorolt hatásának a vizsgálata. Ez – a mikroklimák vizsgálatától a globális éghajlati modellekig – sokféle térskálán történhet. E térskálák közül kiemelt jelentőséggel bírnak a városok, hisz itt az emberi tevékenység természetre gyakorolt hatása koncentráltan érvényesül: nagymértékben megváltozik a felszín arculata, módosul a légkör összetétele, aminek következtében az éghajlat is változik.

Ma már a városklíma-kutatás célja nem egyszerűen a nagyobb települések éghajlatának leírása, hanem a városi környezetben zajló felszíni-légköri folyamatok okozati összefüggéseinek megismerése, valamint e törvényszerűségek felhasználásával a levegőkörnyezet változásainak modellezése, előrejelzése. Egyre inkább előtérbe kerülnek a közvetlenül hasznosítható célkitűzések, mint például az optimális településszerkezet tervezése (pl. Iino és Hoyano, 1996; Scherer et al., 1999; Eliasson, 2000), a városok időszakos túlmelegedésének a mérséklése, a hőérzeti komfort biztosítása, valamint a szennyezett levegő kicserélődési folyamatainak leírása, vizsgálata (pl. Nichol, 1996; Gómez et al., 2001; Gulyás et al., 2006; Gál és Unger, 2009.).

### 1.1. Urbanizációs folyamatok a világban, Európában és Magyarországon

A Világbank jelentése szerint (World Bank, 2008) a Föld népessége 2007-ben 6,612 milliárd fő volt. Ez a szám a becslések szerint 2015-re 7 milliárd fölé emelkedik, 2050-re pedig megközelíti a 9 milliárdot. 1980-ban közel 2 milliárd ember élt városokban, mára a városlakók száma meghaladja a 3 milliárdot. Az **1. ábra** a városi népességnek a teljes népességhez viszonyított arányát mutatja be az egész világra, külön a fejlett és a fejlődő országokra, valamint Magyarországra, az 1950 és 2050 közötti időszakokra vonatkozóan. Látható, hogy a városi népesség aránya folyamatosan nő. Ez egyrészt annak köszönhető, hogy a vidéki területekről folyamatosan áramlik a népesség a jobb életfeltételeket és megélhetést kínáló városokba (ez a jelenség főként a fejlődő országokban figyelhető meg), másrészt újabb és újabb települések érik el azt a fejlettségi szintet, ami indokolja az adott település városi rangra emelését.



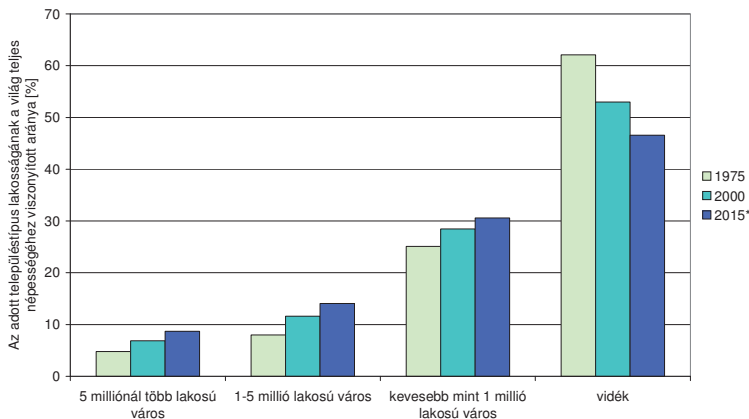
\*Előrejelzés

1. ábra

A városi népességnek a teljes népességhez viszonyított arányának változása 1950 és 2050 között (United Nations, 2008a)

Mára a világon a 100 ezer főnél népesebb városok száma megközelíti a 3500-at (United Nations, 2008b). Ahogy a **2. ábra** is mutatja, a világ népességének egyre nagyobb hányada él 1, illetve 5 millió lakost meghaladó lélekszámú nagyvárosban. Az előrejelzések szerint 2015-re a Föld népességének több mint egyötöde él majd 1 milliónál nagyobb lélekszámú metropoliszban. A nagyvárosok száma dinamikusan növekszik. 2000-ben 41 olyan várost tartottak nyilván, melyek lakosainak száma meghaladta az 5 milliót, ezek száma az előrejelzések szerint 2015-re 59-re emelkedik. A 10 millió lakost meghaladó óriásvárosok száma a 2000-ben nyilvántartott 19-ről 2015-re várhatóan 23-ra nő. E nagyvárosok jelentős része a fejlődő országokban található. 2000-ben az 5 milliónál több lakosú városok közül csupán 10 volt fejlett országbeli, és a prognózisok szerint 2015-ben az 59 nagyváros közül mindössze 11 található majd fejlett ország területén (United Nations, 1999).

A fenti tények nemcsak a városklíma-kutatások szükségességét igazolják, de egyben felhívják e folyamatban rejlő veszélyekre is a figyelmet: úgymint a várostervezés szükségessége, a zöld területek arányának szabályozása, az ipartelepítésnél a helyi klimatikus sajátosságok figyelembevétele, közegészségügyi szabályozás szigorúbbá tétele, stb.



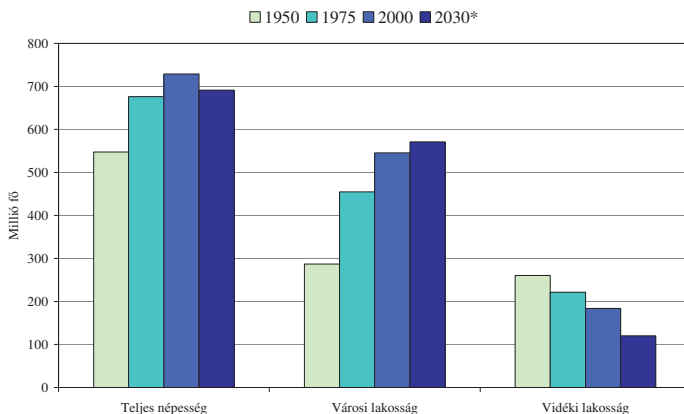
\*Előrejelzés

2. ábra

A különböző méretű városok lakosságának a világ teljes népességéhez viszonyított aránya  
(United Nations, 2006)

Európa a történelem során mindig a leginkább városiasodott területek közé tartozott. Az urbanizáció a dél-európai térségben már Kr.e. 700 körül elkezdődött, majd fokozatosan az egész kontinensre kiterjedt. A középkor során Európában kétféle városminta terjedt el. Az egyik az ún. elsődleges városminta hatalmas mögöttes területtel. Ilyen típusú város például Párizs, London, Lisszabon, Nápoly, Konstantinápoly. A másik várostípus az egymástól viszonylag közeli távolságban lévő városok csoportja. Ezek főként a középkori Flandriában és Észak-Itáliában terjedtek el (Antrop, 2004).

Az ipari forradalom a városiasodás területén is robbanásszerű fejlődést eredményezett. Ahogy a **3. ábra** is mutatja, 1950-ben az európai népességnek körülbelül fele élt városokban. 2000-re ez az arány 75%-ra emelkedett, a kontinens 729 millió lakosából 545 millió volt városlakó. Ezzel egy időben a vidéki népesség száma jelentősen lecsökkent.



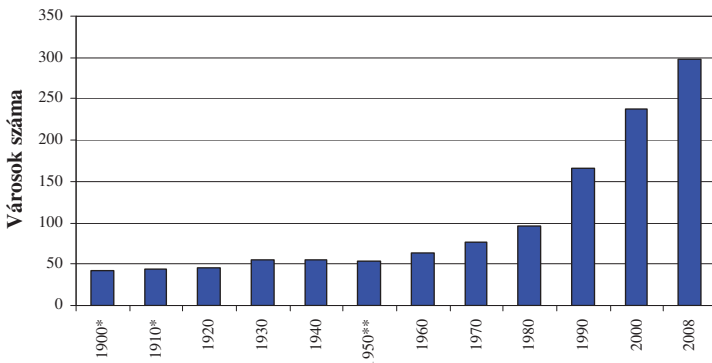
\*Előrejelzés

### 3. ábra

A teljes, a városi és a vidéki népesség alakulása Európában 1950 és 2030 között (*United Nations, 2008a*)

2008. január 1-jén Magyarország 10 045 401 lakosából 6 803 439 fő élt városokban. Ez 67,7%-os arányt jelent (*KSH, 2008*). A **4. ábrán** látható a magyarországi városok számának változása 1900-tól napjainkig. 1900-ban a mai Magyarország területén 42 várost tartottak nyilván. Az 1950-es évekig inkább a már meglévő városok – főként Budapest – nagy mértékű növekedése volt jellemző. Az ötvenes évektől kezdve indult meg a városok számszerű gyarapodása. Az ötvenes-hatvanas évek újonnan várossá nyilvánított településeinek nagy része még ún. szocialista város, mely a szocialista tervgazdálkodás és iparfejlesztés következtében indult fejlődésnek. A hetvenes évektől kezdve az erőteljesebb területi munkamegosztásnak köszönhetően mérséklődött a népesség városokba való áramlása, egyidejűleg pedig megindult a kedvezőbb helyzetben lévő falvak fejlődése, városiasodása, ami a városok számának gyors ütemű növekedését vonta maga után. A rendszerváltással a városi rang elnyerésének követelményei jelentősen enyhültek. Ma Magyarországon a városi rang odaítélését az 1990. évi önkormányzati törvény határozza meg. Ez létszámlimitet nem ír elő: a városi státusz odaítélésében a munkanélküliségi ráta, a település gazdasági mutatói, a közműhálózat és az egészségügyi intézményrendszer a mérvadó (*KSH, 2001*). Az enyhébb feltételeknek köszönhetően (és a nagyobb anyagi támogatás reményében) évről évre falvak tucatjai pályáznak a városi

cím elnyerésére. A rang mögött azonban ma már sokszor nem áll tényleges fejlettség, hazánk 298 városa közül 158-nak a népessége nem haladja meg a 10 ezer főt, ebből 61-ben 5 ezernél kevesebben élnek. (A legkisebb magyarországi városok: Visegrád (Pest megye) – 1840 fő, Zalakaros (Zala megye) – 1786 fő, Öriszentpéter (Vas megye) – 1226 fő, Pálháza (Borsod-Abaúj-Zemplén megye) – 1085 fő.) (KSH, 2008)



\* Csak a mai Magyarország területén található városokat tartalmazza.

\*\* 1950-ben 7 korábban városi címet elnyert települést Budapesthez csatoltak, így azok önálló városi rangja megszűnt.

(KSH, 1995; KSH, 2000; KSH, 2008)

#### 4. ábra

A városok számának alakulása Magyarországon (1900-2008)

A napjainkban tapasztalható gyors gazdasági növekedés hatására hazánkban is megfigyelhető a természetes környezet módosulása. Az építészeti beruházások (pl. ipari üzemek, bevásárlóközpontok, lakónegyedek, autópályák építése) nyomán a mesterséges felszínnek aránya folyamatosan nő, a fokozódó ipari termelés és közlekedés következtében sok szennyezőanyag kerül a levegőbe, ezért indokolt és szükséges e hatásoknak a vizsgálata.

## 1.2. A városklíma-kutatások története és jelentősége

### 1.2.1. Műholdas városklíma-kutatások

Elsőként *Howard (1833)* állapította meg, hogy egy városi térség és annak környezete között hőmérsékletkülönbség áll fenn. Ezt a hőmérsékleti kontrasztot *Balchin és Pye (1947)* nevezte először városi hőszigetnek (urban heat island - UHI).



Napjainkban világszerte számtalan kutató foglalkozik a városok különféle klimatikus hatásaival, e kutatások nemzetközi fóruma a Nemzetközi Városklimatológiai Társaság (International Association for Urban Climate, <http://www.urban-climate.org>). A városklíma-kutatások legfontosabb területei a következők:

- a beépített területek klimatikus és meteorológiai viszonyai
- a városi felszín és a fölötte található határreteg kicserélődési folyamatai
- a városi levegő minősége
- turbulencia és áramlási viszonyok a városban
- a városi felszín és légkör jellemzőinek mérése, modellezése és távérzékelése
- az épületekkel, utakkal, parkokkal kapcsolatos mikroskálájú folyamatok és jellegzetességek vizsgálata
- az épületek belső klímája
- a városi ökoszisztémák biometeorológiája és bioklimatológiája, humánkomfort és egészségügyi kockázatelemzés
- a városban zajló légköri folyamatokkal kapcsolatos vizsgálatok felhasználása a városstervezésben
- a városi jellegzetességek figyelembe vétele a mezoskálájú időjárási és klimatológiai modellekben.

Ahogy a fentiekből kitűnik, a műholdas városklíma-kutatás csak egy kisebb részterülete – egy speciális és újszerű módszere – a városklíma vizsgálatának.

A műholdas adatoknak a városklimatológiában való alkalmazására a nagy felbontású műholdak megjelenésével nyílt lehetőség. Az első ilyen vizsgálatot *Rao (1972)* végezte a hetvenes évek elején. Kutatásaihoz az ITOS-1<sup>1</sup> műhold hőmérsékleti képeit használta, melyek felbontása 7,4 km volt. Ezek segítségével kimutatta, hogy a New York – Philadelphia – Baltimore – Washington által meghatározott tengely jól látható e műholdképeken egy markáns pozitív hőmérsékleti anomália formájában.

*Carlson és munkatársai (1977)* Los Angeles térségét vizsgálták a NOAA-3<sup>2</sup> műholdon található VHRR<sup>3</sup> szenzor 1 km-es felbontású hőmérsékleti infravörös tartományban mért adatainak felhasználásával. Megállapították, hogy a reggeli órákban az ipari területek, este pedig a városközpont közeli üzleti negyedek és a sűrű beépítettségű lakóövezetek hőmérséklete a legmagasabb.

<sup>1</sup> Improved TIROS Operational Satellite – Továbbfejlesztett TIROS Operatív Műhold

<sup>2</sup> National Oceanic and Atmospheric Administration – Nemzeti Óceáni és Légköri Hivatal (USA)

<sup>3</sup> Very High Resolution Radiometer – Igen Nagy Felbontású Sugárzásmérő

*Scofield és Weiss (1977)* egy geostacionárius műhold, az SMS<sup>4</sup> 30 percenként érkező 1 km-es felbontású látható és 8 km-es felbontású infravörös képeit alkalmazták vizsgálataikhoz. Washington és Baltimore példáján kimutatták, hogy a tornyos gomolyfelhők (Cumulus congestus, Cumulonimbus) – a városi és városkörnyéki területek eltérő felmelegedése következtében kialakult alacsony szintű konvergencia miatt – gyakran városok fölött jönnek létre.

*Matson és munkatársai (1978)* a NOAA-5 műhold VHRR szenzorának 1 km-es felbontású hőmérséketi adatait használták vizsgálataikhoz, melyek során 50 amerikai városra meghatározták a városi és városkörnyéki hőmérséklet maximális különbségét. Megállapították, hogy megfelelő légköri feltételek mellett a műholdak alkalmasak a városi hősziget detektálására, a hősziget szezonális változásainak és időjárási helyzettől való függésének vizsgálatára. Kimutatták, hogy már viszonylag kis városok esetében is tapasztalhatók a városfelszín által okozott hőmérsékleti anomáliák (*Matson et al., 1978*).

*Price (1979)* a városi hősziget vizsgálatához már 500 méteres felbontású műholdképeket alkalmazott, melyek a HCMM<sup>5</sup> műhold HCMR<sup>6</sup> szenzorának felvételeiből készültek. New York térségének műholdas vizsgálata során megállapította, hogy sok nagyvárosban a műhold által mért felszínhőmérséklet 10-15 °C-kal is meghaladhatja a város környezetének hőmérsékletét. *Price* vizsgálta a városi felszínek által a magasabb hőmérséklet következtében kisugárzott energiatöbblet mennyiségét is. *Matson és munkatársaihoz (1978)* hasonlóan *Price (1979)* is megállapította, hogy a műholdak által megfigyelt városi hősziget jelenléte már egész kis városok esetében is kimutatható.

*Vukovich (1983)* szintén a HCMM műhold képeit alkalmazta a Missouri állambeli St. Louis felszínhőmérsékleti viszonyainak vizsgálatára. Megállapította, hogy a műhold által mért felszínhőmérsékleti adatokból meghatározott hősziget-intenzitás maximumát a nappali órákban veszi fel. Ez éppen ellentétes a 2 méteres magasságban mért léghőmérsékleti adatokból meghatározott hősziget-intenzitás napi menetével, mely a napnyugta utáni órákban a legnagyobb mértékű (*Oke, 1982*).

*Roth és munkatársai (1989)* három amerikai nagyváros hőszigetét vizsgálták a NOAA-7, -8 és -9 műholdak AVHRR<sup>7</sup> szenzora által mért sugárzási értékekből

<sup>4</sup> Synchronous Meteorological Satellite – Egyidejű Meteorológiai Műhold

<sup>5</sup> High Capacity Mapping Mission – Nagy Kapacitású Térképező Küldetés

<sup>6</sup> High Capacity Mapping Radiometer – Nagy Kapacitású Térképező Sugárzásmérő

<sup>7</sup> Advanced Very High Resolution Radiometer – Továbbfejlesztett Igen Nagy Felbontású Sugárzásmérő

számított felszínhőmérsékleti adatok felhasználásával. Ők is azt állapították meg, hogy a műholdakkal mért felszínhőmérsékletből számított városi hősziget nappal intenzívebb, mint éjszaka. Vizsgálták a műholdak által mért felszínhőmérséklet és a 2 méteres magasságban mért léghőmérséklet kapcsolatát, és hangsúlyozták a különféle módszerekkel (2 méteres hőmérséklet, műholdas mérések, gépkocsis mérések, légifotózás) nyert városi hősziget-intenzitások megkülönböztetésének fontosságát (*Roth et al., 1989*).

*Gallo és munkatársai (1993a)* szintén a NOAA műholdak AVHRR szenzorai által végzett sugárzásméréseket használták különféle vizsgálataikhoz. A vizsgált városokra vonatkozóan meghatározták a sugárzási felszínhőmérsékletet ( $T_{sfc}$ ) és a normalizált vegetációs indexet ( $NDVI^8$ ), melyeket rendre a következő képletekkel definiálhatunk:

$$T_{sfc} = T_4 + 3,3 \cdot (T_4 - T_5),$$

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS},$$

ahol  $T_4$  és  $T_5$  az AVHRR szenzor 4-es (10,3-11,3  $\mu m$ ) és 5-ös (11,5-12,5  $\mu m$ ) csatornája által mért (hőmérsékleti) sugárzás, VIS az 1-es (0,58-0,68  $\mu m$ ) csatorna által mért (látható), NIR pedig a 2-es (0,725-1  $\mu m$ ) csatorna által mért (közeli infravörös) sugárzás (*Gallo et al., 1993b*).

Vizsgálataik fő célja annak meghatározása volt, hogy milyen kapcsolat áll fenn a városban és a városon kívül, 2 méteres magasságban mért léghőmérséklet napi minimum értékeinek különbsége, valamint a sugárzási felszínhőmérséklet, illetve az NDVI városi és városkörnyéki értékének különbsége között. Megállapították, hogy városi és vidéki különbségeknek mind a sugárzási felszínhőmérséklet, mind a vegetációs index esetében határozott éves menete van, tehát a léghőmérséklet vonatkozásában észlelt nagyobb hősziget-intenzitás nagyobb városi-vidéki NDVI különbséggel, illetve felszínhőmérséklet-különbséggel párosul. A városokban általában magasabb hőmérsékleti és alacsonyabb vegetációs index értékek tapasztalhatók, mint a városon kívüli területeken (*Gallo és Tarpley, 1996*). Bár az NDVI csak a fotoszintetikusan aktív időszakban alkalmazható, a téli hónapokban nem, de az év bizonyos időszakában, júliustól októberig jobb prediktora a 2 méteres magasságban mért léghőmérsékleti értékeknek, mint a felszínhőmérséklet (*Gallo és Owen, 1999*).

---

<sup>8</sup> Normalized Difference Vegetation Index

*Hafner és Kidder (1999)* különféle, műholdas mérésekből számított felszíni és talajparamétereket használtak fel kutatásaikhoz. Céljuk a városi hősziget fejlődésének modellezése volt, amihez bizonyos bemenő paramétereket – az albedót, a termális tehetetlenséget és a rendelkezésre álló nedvességet – NOAA AVHRR adatokból határozták meg. A modelleredmények kiértékelése során megállapították, hogy a városi hősziget fejlődésének legfontosabb tényezője a városi és városon kívüli területek felszíni energiaáramainak eltérése.

*Nichol (1996)* munkássága áttörést jelentett a műholdas városklíma-kutatás területén, ugyanis ő alkalmazta elsőként a Landsat TM<sup>9</sup> műhold hőmérsékleti szenzorának mért adatait. E műhold felbontása mindössze 120 méter, így lehetővé vált a városi hősziget szerkezetének részletesebb feltárása. *Nichol (1996)* vizsgálta a város szerkezetének, illetve a növényzetnek a szerepét a városi hősziget kialakulásában, a felszínhőmérséklet és a léghőmérséklet közötti összefüggéseket, valamint a hőmérséklet alakulását a humánkomfort szempontjából.

*Voogt és Oke (2003)* az elmúlt években megjelenő 39 jelentősebb távérzékelésen alapuló városklíma-kutatással foglalkozó publikáció felhasználásával részletes irodalmi áttekintést adott a műholdas városklíma-kutatás eddigi eredményeiről. Részletes táblázatokban foglalták össze a kutatásokhoz használt hordozó berendezéseket és szenzorokat.

*Dousset és Gourmelon (2003)* Marseilles városi határrétegét vizsgálta hőmérsékleti infravörös képek alapján, s ezt kombinálta közeli infravörös és látható tartományú mérésekkel. A műholdadatokat a NOAA AVHRR, az EOS<sup>10</sup> ASTER<sup>11</sup> szenzorából, valamint a SPOT<sup>12</sup> HRV-4<sup>13</sup> leképező műszer segítségével származtatták. Az eredmények azt mutatják, hogy a magasabb hőmérsékletek a beépített területeken jelennek meg, míg alacsonyabb hőmérséklet jellemzi a növényzettel borított és a hegyvidéki területeket. A legmagasabb felszínhőmérséklet az ipari és sűrűn beépített régiókban figyelhető meg.

*Xian (2008)* az Egyesült Államok három nagyvárosa – Seattle, Tampa Bay és Las Vegas – térségét vizsgálta Landsat műholdképek és nagy felbontású orto-felvételek felhasználásával. Megállapította, hogy a felszínhőmérséklet szoros kapcsolatban áll a

---

<sup>9</sup> Landsat Thematic Mapper – Landsat Tematikus Térképező

<sup>10</sup> Earth Observing System – Földfigyelő Rendszer

<sup>11</sup> Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer - Továbbfejlesztett űrbéli hőmérsékleti emissziót és reflexiát mérő sugárzásmérő

<sup>12</sup> Satellite pour l'Observation de la Terre – A Föld megfigyelésére szolgáló műhold

<sup>13</sup> High Resolution Visible - Nagy Felbontású Láthatótartományú

nem vízáteresztő felületek arányával. Szintén a Landsat műholdak adatait használták *Chen és munkatársai* (2006) a dél-kínai Gyöngy-folyó torkolatának vizsgálatához. Ez a térség Kína egyik leggyorsabban városiasodó területe, így a városi hősziget intenzitásának növekedése itt már néhány éves időskálán is kimutatható. Vizsgálataikban a hőmérsékletnek a különféle műholdas mérésekből származtatott vegetációs, beépítettségi és vízháztartási indexekhez való viszonyát elemezték.

Sok kutató vizsgálja azt, hogy a beépített környezet hogyan hat a város energiaháztartására, a szenzibilis és látens hőáram arányára, a napsugárzás abszorpciójára. Ehhez különböző modelleket fejlesztenek ki, melyek segítségével le tudják írni a város hőmérsékleti, áramlási és sugárzási viszonyait. *Iino és Hoyano* (1996) a Landsat MSS<sup>14</sup> szenzor méréseit használták a megfelelő városi környezet megtervezéséhez. *Voogt és Grimmond* (2000) Kanadában Vancouver egy kevésbé iparosított területén felszínhőmérsékletből származtatható szenzibilis hőáramot vizsgálta, Marseille-re *Voogt és munkatársai* (2004) végeztek hasonló vizsgálatokat.

*Soux és munkatársai* (2004), valamint *Voogt* (2008) munkájukban arra dolgoztak ki egy modellt, hogy mit „lát” a távérzékelő mérőműszer egy olyan komplex felszínből, mint a városi felszín, ahol a bonyolult háromdimenziós szerkezet egyes elemei jelentősen különböző hőmérsékleti, sugárzási és nedvességi tulajdonságokkal rendelkeznek.

*Jin és munkatársai* (2005) a Terra műhold MODIS<sup>15</sup> szenzora által mért felszínhőmérséklet felhasználásával becsülték meg a városi területeknek a Föld éghajlati rendszerére gyakorolt hatását. Számos helyen mind a négy évszakban nappal és éjszaka egyaránt kimutatták a városi hőszigetet: a városi területeken a felszínhőmérséklet többnyire magasabbnak találták, mint a vidéki régiókban. Vizsgálták az albedót, a szenzibilis és látens hőáramot, melyekre kimutatták, hogy nappal a nedves térségekben a szenzibilis hőáram nem éri el a felét sem a látens hőáramnak.

*Rajasekar és Weng* (2009) szintén MODIS és ASTER felvételeket használtak az egyesült államokbeli Indiana állam egy kétmillió lakosú agglomerációjának vizsgálatához, illetve a városi hősziget modellezéséhez.

Az utóbbi néhány évben számos olyan kutatás folyt szerte a világon, melynek célja a városi humánkomfort biztosítása és a várostervezés szolgálata volt (*pl: Eliasson,*

---

<sup>14</sup> Multispectral Scanner – Többszatornás Leképező

<sup>15</sup> Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer – Közepes felbontású leképező spektrális sugárzásmérő

2000; Pauleit és Duhme, 2000). A városok szerkezetének kialakításánál ma már alapvető elvárás, hogy a fenntartható fejlődés érdekében minél inkább környezetbarát városi agglomerációkat hozzanak létre, hiszen manapság a városi életminőség javításához elengedhetetlen a megfelelő városi környezet kialakítása. *Gómez és munkatársai* (2001) a városi zöld zónák és a humánkomfort fontosságát hangsúlyozták munkájukban. Valencia városát vizsgálták, s különböző indexeket használtak, hogy megállapítsák a növényzetnek a humánkomfortra gyakorolt hatását. Vizsgálatukban jól elkülönültek a kertes és kert nélküli, a csupasz és a fákkal szegélyezett utak. *Scherer és munkatársai* (1999) tökéletesítették a városi klíma vizsgálatát a várostervezési folyamatok optimalizálása végett, melyhez Landsat-TM felvételeket alkalmaztak.

### 1.2.2. Városlíma-kutatások Magyarországon

A hazai városlíma-kutatások a XX. század elején kezdődtek el. A század első felének nagy meteorológusai közül sokan foglalkoztak a magyarországi városok éghajlatának vizsgálatával. *Réthy Antal* (1947) és *Bacsó Nándor* (1958) városi és városkörnyéki mérések adatainak felhasználásával próbált átfogó képet nyújtani Budapest éghajlati viszonyairól. *Berényi Dénes* (1930) a háztömböknek a minimum-hőmérsékletre gyakorolt hatását vizsgálta Debrecenben. *Berkes Zoltán* (1947) a csapadék eloszlását vizsgálta Budapest területén belül.

Péczely György elsősorban a légáramlási és légszennyezettségi viszonyokkal foglalkozott Budapestre vonatkozóan. Budapest légszennyezettségi viszonyait a makroszintoptikus helyzetek függvényében vizsgálva megállapította, hogy a főváros levegője keleties áramlású anticiklonális helyzetben a legszennyezettebb (*Péczely, 1959*). Egy másik vizsgálat során arra az eredményre jutott, hogy az évnél körülbelül egyharmadában Budapest esetében is kialakul a jellegzetes nagyváros által keltett helyi szélrendszer, ami szintén anticiklonális helyzetben a legintenzívebb (*Péczely, 1962*).

Probáld Ferenc átfogóan vizsgálta a nagyváros, illetve Budapest éghajlati sajátosságait, amint arról több tanulmánya is tanúskodik (*Probáld, 1965; 1974*). Nagy figyelmet szentelt a különféle fosszilis energiahordozók elégetése során a városi légtérbe kerülő hőmennyiség szerepének a városi éghajlat kialakulásában, mely különösen a téli félévben jelentős (*Probáld, 1963*).

A városlíma kutatásában sokáig nagy nehézséget okozott az adathiány. Ennek megszüntetésére az Országos Meteorológiai Szolgálat a hatvanas években Budapest

területén éghajlatkutató és szélmérő hálózatot hozott létre, mely öt éven keresztül folytatott óránkénti méréseket a város és agglomerációs körzetének 22 pontján (*Szepesi, 1981; Dezső, 2000a és 2000b*). 1977-ben Péczely György kezdeményezésére Szegeden hoztak létre tíz állomásból álló városklimatológiai mérőhálózatot, mely 1981-ig működött (*Unger, 1995*).

A városban élő emberek életminősége szempontjából az egyik legfontosabb klimatikus tényező a különféle légszennyező anyagok koncentrációja a város feletti légtérben. Ennek mérésére a Közegészségügyi és Járványügyi Felügyelet (KÖJÁL) (jogutódja az Állami Népegészségügyi és Tisztiorvosi Szolgálat (ÁNTSZ)) a hetvenes években hozott létre a fővárosban mérőhálózatot. 2002 óta a légszennyezettségi mérőhálózatok üzemeltetése a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium feladata. Az Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat az európai uniós normáknak megfelelően 59 fix és mobil monitorállomást működtet az országban, valamint további 200 mérőponton szakaszos mintavétellel végeznek légszennyezettségi vizsgálatot.

Napjainkban – a városklimatológia jelentőségének növekedésével – egyre több kutató foglalkozik hazánkban is e témával. A Szegedi Egyetem Éghajlattani és Tájé földrajzi Tanszékén átfogó városklimatológiai kutatásokat folytatnak. A vizsgálatokhoz szükséges adatok gyűjtése több mérési sorozat keretében, egy 500 m × 500 m-es cellából álló szabályos rácshálózat mentén, autóra szerelt mérőműszerekkel történt heti gyakorisággal (*Unger et al., 2000*). Emellett a Péczely György által létrehozott mérőhálózat adatait is felhasználják a különféle vizsgálatokhoz.

A kutatások elsődleges célja a hősziget szerkezetének részletes feltárása (*Unger, 1992*), annak modellezése (*Unger et al., 2000; Unger, 2006*), illetve a város bioklimatológiai hatásainak vizsgálata (*Gulyás et al., 2006; Sódar és Unger, 1998*). Vizsgálataik során kapcsolatot kerestek az ún. égboltláthatósági érték és az éves átlagos maximális hősziget intenzitás között. Kimutatták, hogy a hősziget intenzitásának térbeli szerkezete viszonylag jól jellemezhető a beépítettséggel és az égboltláthatósággal. Ezt jól tükrözi, hogy az alacsony égboltláthatósági értékkel rendelkező belvárosi területeken nagy a hősziget intenzitás értéke (*Unger, 2004; 2009*). Emellett egy módszert dolgoztak ki az érdességi paraméterek számítására is, melyek segítségével meghatározhatók a városon belüli ventilációs folyosók, melyek a város levegőjének cseréjét lehetővé teszik (*Gál és Unger, 2009*). *Makra és munkatársai (2006)* pedig a különféle légtömegtípusok osztályozására vonatkozóan dolgoztak ki egy módszert, amit a légszennyezettségi vizsgálata során is felhasználtak.

A Debreceni Egyetem Meteorológiai Tanszékén szintén mérőautós vizsgálatok alapján elemzik a városi hősziget szerkezetét, továbbá kapcsolatot keresnek a hősziget kialakulása és a különböző időjárási helyzetek között (*Szegedi, 2000; 2002*). *Bottyán és munkatársai (2005)* az évszakos átlagos maximum hősziget térbeli szerkezetét vizsgálták Debrecenre vonatkozóan. Egy lineáris regressziós statisztikai modell segítségével kerestek kapcsolatot a beépített területek paramétereit és az átlagos maximum városi hősziget intenzitás között.

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál az utóbbi évtizedben folyt városklimatológiai vizsgálatok elsődleges célja arra irányult, hogy milyen módon tervezhető, befolyásolható egy város levegőjének minősége (*Sándor, 1999; Szepesi és Schirokné, 1999*). E témakörben a legfontosabb kutatási területek közé tartozik a levegő minősége és a különböző meteorológiai viszonyok közötti kapcsolat feltárása, illetve a levegő minőségének számszerű előrejelzése. Haszpra László és munkatársai (*Haszpra et al., 2001*) a budai Vár alatt lévő Alagútban folytattak méréseket abból a célból, hogy meghatározzák a magyarországi gépkocsialomány átlagos szennyezőanyag-kibocsátását, illetve vizsgálják a városok közlekedésből eredő légszennyezését. Bozó László és Baranka Györgyi kutatásainak célja a főváros légszennyezettségi viszonyainak feltárása, valamint a felszínközeli ózonkoncentráció alakulásának vizsgálata volt (*Bozó et al., 1999; Baranka, 1999*).

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén egy évtizede folynak városklimatológiai kutatások. Az ELTE és az OMSZ közös kutatási programja keretében Weidinger Tamás és munkatársai vizsgálták a budapesti városi hősziget szerkezetét a meteorológiai mérőhálózat, a légszennyezettséget mérő monitorhálózat, valamint kerékpáros mérések adatainak felhasználásával (*Molnár, 1999*), illetve kifejlesztettek egy módszert az urbanizációnak a hosszúidejű hőmérsékleti idősorokra vonatkozó hatásának meghatározására (*Weidinger et al., 1999*). 1999-ben az ELTE és az OMSZ együttműködésének keretében az egyetem területén létesült egy városklimatológiai mérőállomás is (*Kern, 2001*). A Meteorológiai Tanszéken a mai napig folyó kutatások fő iránya a Magyarország és Közép-Európa nagyvárosaiban kialakuló városi hősziget vizsgálata műholdas mérésen alapuló adatok felhasználásával (*Bartholy et al., 2004 és 2005; Dezső, 2002; Dezső et al., 2005; Pongrácz et al., 2006, 2009*). E kutatások legfontosabb eredményeit hivatott bemutatni ez a disszertáció.



## 2. A városi klíma

Az egyedi nagyvárosi klíma létrejöttének alapja az emberi tevékenység, melynek hatására a különböző éghajlati elemek jelentősen módosulhatnak a települést övező természetes környezethez képest. E változások nem függetlenek egymástól, hanem szoros ok-okozati összefüggésben állnak. Ezeket az összefüggéseket az **5. ábra** foglalja össze.

Látható, hogy az egész folyamat kiindulópontja az emberi tevékenység, melynek hatására sajátos, mesterséges felszín jön létre. Ennek jellemzője az, hogy igen változatos, kis területen belül hirtelen módosulhat, a különféle éghajlati paramétereket pedig jelentősen befolyásolja. A városban lehulló csapadék a mesterséges, nem vízáteresztő felszíneknek és a csapadékelvezető csatornahálózatnak köszönhetően nagyon gyorsan lefolyik, így a városban a párolgás rövidebb ideig tart és kisebb mértékű, mint a városkörnyéki területeken. Ezáltal a városban a relatív nedvességtartalom is kisebb lesz.

A felszín másik fontos hatása a sugárzási paraméterek módosulásában nyilvánul meg. Azt, hogy egy adott felszín a ráeső napsugárzást milyen mértékben nyeli el, illetve veri vissza, a felszín tulajdonságai döntően meghatározzák. A változatos felszín, a nagyobb érdesség miatt a város felett nagyobb a sűrűlódás, ami a szélsébség csökkenéséhez és a turbulencia fokozódásához vezet.

Mindezek hatására megváltoznak a hőháztartási viszonyok: a város területén hőmérsékleti többlet alakul ki. Ezt kiegészíti az is, hogy a levegőszennyezés hatására fokozódik a különféle üvegházgázok koncentrációja a város fölött, ami erősíti az üvegházhatást.

### 2.1. A sugárzási paraméterek alakulása a városok területén

A sugárzási paraméterek közötti összefüggéseket az energiaegyenleggel írhatjuk le (*Landsberg, 1981*):

$$\pm Q_N = Q_T \cdot (1 - \alpha) + Q_L \downarrow - Q_L \uparrow = \pm Q_T \pm Q_S \pm Q_L \pm Q_A \quad (1)$$

ahol  $Q_N$  a nettó energiamérleg

$Q_T$  a felszínre jutó lefelé irányuló rövidhullámú sugárzás

$\alpha$  a felszín albedója

$Q_{L\downarrow}$  a lefelé irányuló hosszűhullámú sugárzás

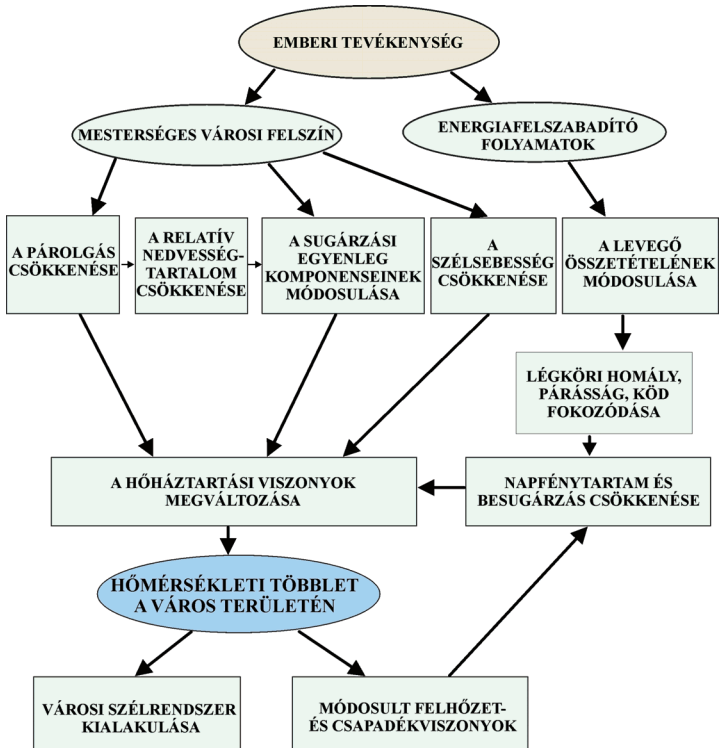
$Q_{L\uparrow}$  a felfelé irányuló hosszűhullámú sugárzás

$Q_T$  a talajhőáram

$Q_S$  a szenibilis hőáram

$Q_L$  a látens hőáram

$Q_A$  az antropogén eredetű hő



5. ábra

Az emberi tevékenység hatására létrejövő városi klíma jellegzetességei, az egyes éghajlati elemek között kialakuló ok-okozati összefüggések (Probáld, 1965)

A felszín eltérő sugárzási tulajdonságai és a légszennyezettség következtében a városokban a fenti egyenlet minden egyes paramétere eltér a városon kívül tapasztalható értéktől. A Naptól érkező rövidhullámú sugárzás egy részét a levegő bizonyos részecskéi elnyelik, illetve szórják. Mivel e részecskék mennyisége a levegőszennyezés következtében a város felett nagyobb, ezért a városi felszínre kevesebb direkt napsugárzás jut el, mint az azt körülvevő területekre, ugyanakkor a szórt sugárzás aránya megnő a felszínre jutó rövidhullámú sugárzáson belül ( $Q_f$ ). A sugárzás csökkenésének mértéke változó, függ az évszaktól, a napmagasságtól és a légszennyező anyagok koncentrációjától. Kisebb napmagasság esetén nagyobb a veszteség. A felszínre jutó rövidhullámú sugárzás ( $Q_f$ ) mennyisége általában 2-10%-kal kevesebb a városokban, mint azokon kívül (*Peterson és Stoffel, 1980*).

*Oke (1982)* kutatásai szerint közepes földrajzi szélességeken a városok albedója 5-10%-kal kevesebb, mint a városkörnyéki területeké. E két hatás eredőjeként a rövidhullámú sugárzás egyenlege alig tér el egymástól a városi és az azon kívüli területek esetében, hisz amennyivel kevesebb rövidhullámú sugárzás jut le a város felszínére, körülbelül annyival kevesebb a visszavert sugárzás mennyisége is.

Városokban mind a lefelé, mind a felfelé irányuló hosszúhullámú sugárzás megnövekszik. E módosulásokat nem csupán a légszennyező anyagok megnövekedett koncentrációja (ami intenzívebb üvegházhatáshoz vezet) és a városi felszín alacsonyabb emisszivitása okozza, hanem maga a városi hősziget is egy pozitív visszacsatolást eredményez. Ugyanis a felszín által kisugárzott hosszúhullámú sugárzás ( $Q_{L\uparrow}$ ) a Stefan–Boltzmann-törvény értelmében a felszínhőmérséklet negyedik hatványával arányos, tehát ha a város felszínének hőmérséklete meghaladja a környék felszínének hőmérsékletét, akkor e sugárzás értéke is nagyobb lesz a városban. Az üvegházhatás következtében a légszennyezőanyag részecskéiről e sugárzási áramnak jelentős része visszasugárzódik a földfelszín felé, és nappal ennek a lefelé irányuló hosszúhullámú sugárzásnak a mennyiségét tovább növeli a napsugárzás hatására felmelegedett légrészecskék hőmérsékleti sugárzása (*Oke, 1982*). Mivel a városokban mind a felfelé, mind a lefelé irányuló hosszúhullámú sugárzás növekszik, ezért e kettő különbsége – a hosszúhullámú sugárzási egyenleg – a rövidhullámú sugárzási egyenleghez hasonlóan alig különbözik a városi és vidéki területek esetében.

Mindezekből pedig az is következik, hogy a városi és városkörnyéki teljes sugárzási egyenleg különbsége sem nagy, *Oke (1982)* vizsgálatai szerint kevesebb, mint 5 %.

Ahogy az (1) egyenlet mutatja, a földfelszín energiamérlege megadható a szenzibilis, a látens és a talajhőáramok, valamint az antropogén eredetű hő összegeként. E hőáramoknak a teljes sugárzási egyenleghez viszonyított arányának jellemző értékeit tartalmazza az **1. táblázat**.

1. táblázat

A talaj- ( $Q_T$ ), a szenzibilis ( $Q_S$ ) és a látens ( $Q_L$ ) hőáramok aránya a teljes sugárzási egyenleghez ( $Q_N$ ) viszonyítva (*Oke, 1982*)

	$Q_T/Q_N$	$Q_S/Q_N$	$Q_L/Q_N$
Vidék	0,15	0,28	0,57
Városi peremterület	0,22	0,39	0,39
Város	0,27	0,44	0,29

A táblázatból leolvasható, hogy az energia megoszlása városban és vidéken teljesen eltérő. A talajhőáramnak a teljes sugárzási egyenleghez viszonyított aránya a városban közel kétszerese a vidékinek. Ez azzal függ össze, hogy a város hőtároló képessége jóval nagyobb, mint az azt körülvevő területeké, aminek oka bizonyos építőanyagok nagy hővezető képessége ( $k$ ) és hőkapacitása ( $C$ ). E kettő együtt határozza meg az adott anyag termális tehetetlenségét (termális inerciáját):

$$\mu = \sqrt{k \cdot C}$$

A termális tehetetlenség értéke városban nagyobb, mint annak környékén, és ez eredményezi a talajhőáramok közti jelentős eltérést. *Hafner és Kidder (1999)* szerint ez az eltérés a városi hősziget kialakulásának fő oka.

A hőmérsékletváltozás napi menete a növényzettel borított talajban körülbelül 20-40, míg betonburkolatban 80-100 cm-es mélységig érzékelhető (*Landsberg, 1981*).

A szenzibilis és látens hő arányában nagyon komoly város és vidék közötti eltérés adódik abból, hogy a városban a rendelkezésre álló nedvesség általában kevesebb, mint annak környékén. Így kevesebb energia fordítódik párolgásra, több hő jelenik meg szenzibilis formában, és kisebb lesz a látens hő aránya.

Egy város energiamérlegében fontos szerepet játszik az antropogén eredetű hőáram. E komponens meghatározása igen nehéz, hiszen az emberi hőkibocsátás

számtalan tényező függvénye. Függ például az évszaktól, a napszaktól, attól, hogy az adott város mennyire fejlett iparilag, hogy mekkora az átlagos gépkocsiforgalom, és hogy milyen az időjárás. Budapesten a hetvenes évek elején az átlagos antropogén energia-áramsűrűség  $43 \text{ W/m}^2$  volt (*Landsberg, 1981; Helbig et al., 1999*), de ez természetesen nagy időbeli és térbeli változékonyságot mutat. Az antropogén hőnek egyik speciális komponense az emberi és állati anyagcsere során felszabaduló hő, az ún. metabolikus hő. Ez egy egymillió lakossal rendelkező város esetében a teljes energiamérlegnek legfeljebb 3-4%-át alkotja, de a legtöbb esetben 1% alatt marad, ezért e komponens általában elhanyagolható (*Landsberg, 1981*). Sokkal jelentősebb mértékű ennél az ipar, a közlekedés, a fűtés és légkondicionálás révén felszabaduló energia.

## **2.2. A városi hősziget**

### *2.2.1. A hősziget horizontális szerkezete*

A városklíma legjellegzetesebb jelensége a városi hősziget, melyet intenzitásával jellemezhetünk. E hősziget-intenzitás a városi és városkörnyéki hőmérséklet különbségeként definiálható. Ennek meghatározása sokféle módon történhet. A számítás módja elsősorban az adatfelvétel módjától és a városra vonatkozó adatok mennyiségétől függ. Például ha csak egy városi állomás és egy városon kívüli referenciaállomás 2 méteres magasságban mért lég hőmérsékleti adatai állnak rendelkezésre, akkor a hősziget intenzitása értelemszerűen e kettő különbségeként határozható meg. Teljesen más módszereket kell alkalmazni abban az esetben, ha egy városról és annak környékéről egy műholdas mérésekből meghatározott, folytonosnak tekinthető felszínhőmérsékleti mező, illetve ha gépkocsis mérések segítségével egy szabályos rács hálózat mentén végzett mérések eredményei állnak rendelkezésre. Ilyenkor statisztikai eszközök felhasználásával határozható meg a hősziget erősségére jellemző érték.

A hősziget intenzitása függ a szinoptikus helyzettől, az évszaktól, a napszaktól, a beépítettségtől és a felszín anyagától. A hősziget kialakulásának a szélcsendes, derült időjárás kedvez, ilyen feltételek mellett alakul ki a legnagyobb hőmérsékletkülönbség a város és annak környéke között. A hősziget általában nyáron intenzívebb, mint télen (*Oke, 1982*).

A műholdak által meghatározott sugárzási felszínhőmérséklet és a 2 méteres magasságban mért léghőmérséklet napi menetében különbség tapasztalható. A léghőmérsékleti adatokból meghatározott városi hősziget általában napnyugta után 2-3 órával a legintenzívebb, a felszínhőmérsékleti adatokból meghatározott hősziget intenzitása viszont napközben, dél körül a legnagyobb (*Vukovich, 1983; Roth et al. 1989; Gallo et al., 1993a*). A két hőmérséklet különbségének több oka van. Az egyik legfontosabb, hogy a felszínhőmérséklet a felszín energiaháztartási mérlegétől, a léghőmérséklet pedig a légtömeg fluxusdivergenciájától függ, amit az advekciónak befolyásol. A különbség másik fontos oka az, hogy a műhold a földfelszínről érkező hosszúhullámú sugárzásnak csak bizonyos szögből érkező részét észleli (pl. ha a műhold a földfelszínhez képest zenitben van, akkor csak a vízszintes felületeket „látja”), tehát az aktív felület, mely a különféle energiaszállító folyamatokban részt vesz, sokkal nagyobb, mint amit a műhold „lát” (*Soux et al., 2004; Voogt, 2008*). A függőleges falak és a fák lombkoronája alatti területek „láthatatlanok”. Sűrűn beépített területek esetén az aktív felület 2-3-szorosa is lehet annak a területnek, melynek sugárzását a műhold érzékelni képes. Nagy napmagasság esetén a vízszintes felületek jobban felmelegednek, mint a függőlegesek, viszont a léghőmérséklet kialakulásáért felelős energiaszállító folyamatokban a teljes városfelszín szerepet játszik. Ezért a felszínhőmérséklet általában magasabb és nagyobb szórású, mint a 2 méteres magasságban mért léghőmérséklet (*Roth et al., 1989*). A különböző kutatások szerint a műholdakkal észlelt felszínhőmérséklet és a 2 méteres magasságban mért léghőmérséklet közötti korreláció 0,7-0,8 (*Nichol, 1996; Ben-Dor és Saaroni, 1997*).

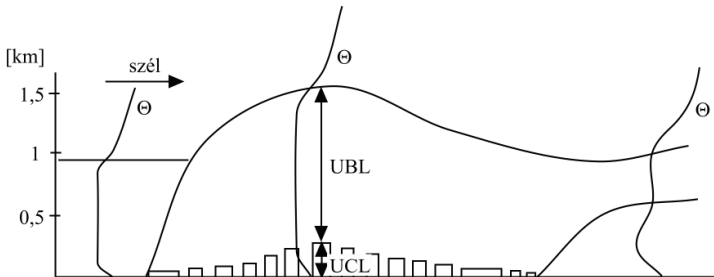
A hősziget horizontális szerkezete elsősorban a felszín anyagától és a beépítettségétől függ. A parkok és tavak viszonylag hidegebbek, míg az ipari területek, lakótelepek, hivatali és kereskedelmi negyedek relatíve melegebbek. A felszín anyaga és a hőmérséklet közötti korreláció jóval erősebb, ha a műholddal érzékelt felszínhőmérsékleti adatokat vesszük figyelembe, mint ha a 2 méter magasságban mért léghőmérsékleti adatokkal számolunk (*Roth et al., 1989*).

### 2.2.2. A hősziget vertikális szerkezete

Ideális esetben a város fölött ún. városi hőkupola jön létre. A valóságban e hőkupola szerkezetét a szél módosítja. A város feletti légtér két rétegre osztható (Oke, 1982):

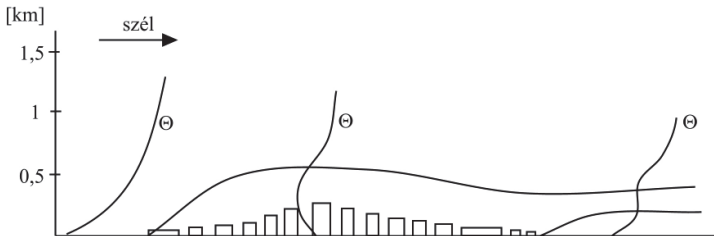
- a városi tetőszint rétege (UCL<sup>16</sup>): a felszíntől az átlagos háztetősínt magasságáig terjed,
- a városi határréteg (UBL<sup>17</sup>): a tetőszinttől a zavartalan atmoszférikus határrétegig terjed, ahol a légmozgást nem befolyásolja már a felszín zavaró hatása.

Az UBL vastagsága nappal átlagosan 500-1500 m, míg éjszaka 100-300 m, mely függ a szenzibilis hőáramtól és a légtömeg stabilitásától. A hősziget vertikális szerkezetét mutatja az **6a.** és **6b. ábra.**



6a. ábra

A városi hősziget vertikális szerkezete a nappali órákban (Stull, 1989)



6b. ábra

A városi hősziget vertikális szerkezete éjszaka (Stull, 1989)

<sup>16</sup> Urban Canopy Layer – a városi tetőszint rétege

<sup>17</sup> Urban Boundary Layer – a városi határréteg

### 2.2.3. A hősziget kialakulásának lehetséges okai

A városi hősziget kialakulását számos tényező befolyásolja. A hősziget kialakulásáért közvetlenül valamilyen sugárzási változás a felelős, de ennek hátterében mindig valamilyen urbanizációs hatás áll.

A városi tetőszint rétegében végbemenő legfontosabb változások (Oke, 1982):

- Az épületek alakjának és egymáshoz viszonyított elhelyezkedésének köszönhetően a városokban nagy az aktív felszín és megsokszorozódik a sugárzás visszaverődése, ami a rövidhullámú sugárzáselnyelés megnövekedéséhez vezet.
- A városi légtérben a légszennyezés következtében nagyobb az üvegházgázok koncentrációja, mint a városon kívül, aminek hatására intenzívebb a hosszuhullámú sugárzás elnyelődése és újbóli kibocsátása. Ez a városi tetőszint rétegében megnövekedett lefelé irányuló hosszuhullámú sugárzást eredményez.
- A szűk utcáknak, magas házaknak köszönhetően a városban egy adott pontból az égboltnak kisebb hányada látható, mint zavartalan városon kívüli környezet esetén. Emiatt a felszín által kibocsátott hosszuhullámú sugárzásnak kisebb része hagyja el a városi határréteget, tehát kisebb a hosszuhullámú sugárzási veszteség.
- Az épületek és a közlekedés hővesztesége az antropogén eredetű hő fontos komponense, ami a városi tetőszint rétegének hőtartalmát növeli.
- Az épületek, burkolatok anyagának átlagos hővezető-képessége nagyobb, mint a városon kívüli természetes anyagoké, aminek hatására a városi tetőszint rétegében megnő a szenzibilis hő tározódása.
- A mesterséges anyagoknak, burkolatoknak köszönhetően a víz a városok felszínéről gyorsan lefolyik, aminek hatására az evapotranspiráció csökken.
- A tetőszint rétegében a nagyobb sűrűlődés következtében csökken a szélességség, ami a teljes turbulens hőszállítás csökkenését okozza.

Változások a városi határrétegben (Oke, 1982):

- A légszennyezettség következtében megnövekedett légköri abszorpció miatt a városi határrétegben megnő a rövidhullámú sugárzáselnyelés.



- A kémények hővesztesége – mint antropogén eredetű hő – a városi határréteg hőtartalmát növeli.
- A városi tetőszint hőkibocsátásának köszönhetően megnövekszik a felszín felől érkező szenzibilis hőáram.
- A nagy érdességnek és a hősziget jelenlétének köszönhetően a városi határrétegben megnő a turbulencia, aminek hatására a felülről érkező szenzibilis hőáram is megnövekszik.

E két utóbbi hatás együttesen a városi határrétegben a szenzibilis hő konvergenciáját eredményezi. Ez a tényező, valamint a sűrűlódás miatt a légáramlás sebességének csökkenése következtében bekövetkező feláramlás együttesen okozza a város fölött a határréteg felboltozódását (*Oke, 1982*).

### 2.3. A légáramlás módosulása a város területén

A felszín tagoltsága, a nagyobb felszínközeli sűrűlódás következtében a városokban a szélesebbég általában csökken. *Landsberg (1981)* kutatásai szerint az évi átlagos szélesebbég a felszín közelében 20-30%-kal, a heves szélökések sebessége 10-20%-kal mérséklődik. Ez azonban nem minden esetben észlelhető. Ha a nagytérségű szél sebessége csekély, akkor a város által okozott nagyobb termikus és mechanikus turbulencia a mozgásmennyiség nagyobb mértékű függöleges kicserélődésével a felszín közeli szélesebbég fokozódásához vezet. A budapesti vizsgálatok tanúsága szerint a városközpontban a háztetőszint fölött a szélesebbég csökkenése a városkörnyéki értékhez képest csak akkor következik be, ha az utóbbi az 1,5-3,5 m/s-ot meghaladja (*Probáld, 1974*).

A nagyvárosok légáramlási képének egyik jellegzetes törvényszerűsége a városi hősziget hatására létrejövő sajátos városi szélrendszer, az ún. „*friss levegőt hozó szellő*”. A friss levegőt hozó szellő termikusan indukált helyi szélrendszer, amit a városi és a vidéki környezetek energiaháztartásbeli eltérése által keltett nyomásgradiens hoz létre (*Probáld, 1974*). Az energiaháztartás egyensúlykülönbsége kritikus mértékűvé elsősorban gyenge légáramlású és erős besugárzással járó anticiklonális időjárási helyzetekben válik.

Erős városi hősziget esetén, a talajközeli légáramlások a város pereme felől a város közepe felé konvergálnak. A magasabb légrétegekben (150-200 m fölött)

ellentétes irányú cirkuláció fejlődik ki. Ez a légkörvíz alkalmas lehet a városi belterület szennyezettebb levegőjének felfrissítésére, de csak akkor képes ezt a pozitív hatást kifejteni, ha megfelelő ventilációs folyosók (zöld folyosók, városi parkok, folyómedrek, utak, vasúti pályák) biztosítják a levegő cseréjét (*Szepesi, 1981*).

A városi hősziget kialakulása és erőssége jelentős mértékben függ a szélesebségtől. Az a kritikus szélesebség, amely fölött már nincs lehetőség önálló városi hősziget kialakulására, erősen függ a város méretétől. Budapesten ez az érték 10 m/s körül alakul (*Szepesi és Schirokné, 1999*). Budapesten a hegyvidéki és a Duna-parti mérőhelyek kivételével a 10 m/s fölötti szélesebségek gyakorisága legfeljebb 1%, tehát ritkán fordul elő, hogy a szél miatt nem alakul ki a városi hősziget (*Dezső, 2000a*).

### 3. Adatok és módszerek

E fejezetben a vizsgálatok során felhasznált adatbázist mutatjuk be részletesen, valamint a távérzékelte információk feldolgozásához alkalmazott módszert tárgyaljuk.

#### 3.1. A Terra és az Aqua műhold, valamint az általuk mért paraméterek

Napjainkban már nagyon sok, különböző céllal felbocsátott műhold kering egyidejűleg a Föld körül, folyamatosan pásztázva a földfelszínt és a légkört. Ahogy az 1.2. fejezetben részletesen bemutattuk, az elmúlt 40 évben világszerte számos kutató használta városklimatológiai vizsgálataihhoz a különféle műholdak felvételeit. Az ELTE Meteorológiai Tanszékén kilenc éve folyó kutatásainkhoz mi is a műholdfelvételeket használjuk a hazai és közép-európai nagyvárosok városi hősziget-jelenségének vizsgálatához.

A NASA<sup>18</sup> Földmegfigyelő Rendszerének (EOS<sup>19</sup>) részeként 1999 decemberében bocsátották pályára a Terra (korábban EOS AM-1), majd ezt követően 2002 májusában az Aqua (korábban EOS PM) nevű műholdat. E két műhold egy több évig tartó nemzetközi kutatáshoz gyűjt adatokat. E kutatás célja a globális változások komplex vizsgálata, amihez egy legalább 15 éves, az egész Földre kiterjedő adatsort kívánnak létrehozni. A kutatási program kiemelt céljai közé tartozik az emberi tevékenység éghajlatra gyakorolt hatásainak a vizsgálata. E két műhold által mért adatok lehetőséget nyújtanak arra, hogy a városban zajló folyamatokat, változásokat egyre pontosabban leírjuk, és azok lehetséges okait feltárjuk.

##### 3.1.1. A Terra és az Aqua műhold alapvető jellegetességei

A Terra és az Aqua kvázipoláris pályájú műholdak, melyek 705 km magasságban keringenek a Föld körül. Napszinkron pályájúak, a Terra az Egyenlítő leszálló pályán helyi időben 10 óra 30 perckor, az Aqua felszálló pályán 13 óra 30 perckor lépi át. A Földet naponta 16-szor kerülik meg. Pályájuknak az Egyenlítő síkjától való elhajlása (inklinációja) 98° (Terra, 1999; Aqua, 2002).

---

<sup>18</sup> National Aeronautics and Space Administration – Nemzeti Légügyi és Űrkutatási Hivatal (USA)

<sup>19</sup> Earth Observing System

A Terra műhold fedélzetén öt műszert hordoz, melyek különböző felbontásban mérik és regisztrálják az egyes sugárzási paramétereket. E szenzorok főbb tulajdonságait az alábbiakban foglaljuk össze (*Terra, 1999*).

- ASTER<sup>20</sup>: 4 látható és közeli infravörös tartományú csatornában 15 méteres, 6 közeli infravörös tartományú csatornában 30 méteres, és 5 hőmérsékleti infravörös tartományú csatornában 90 méteres felbontású képeket készít.
- CERES<sup>21</sup>: Három csatornában méri a sugárzás intenzitását – az első a visszavert napsugárzást (0,3-5  $\mu\text{m}$ ), a második a földfelszín által kibocsátott hosszuhullámú sugárzást (8-12  $\mu\text{m}$ ), a harmadik pedig a teljes sugárzási tartomány (0,3-100  $\mu\text{m}$ ) sugárzási intenzitását detektálja.
- MODIS<sup>22</sup>: A sugárzási paramétereket 36 különböző – a láthatótól a hőmérsékleti infravörösig terjedő – hullámhossztartományban méri, a mérések térbeli felbontása a látható tartományban 250 m, az infravörös tartományban 1 km.
- MOPITT<sup>23</sup>: E szondázó műszer az alsólégkör CO és CH<sub>4</sub> tartalmát méri 22 km-es horizontális és 5 km-es vertikális felbontással. E gázok koncentrációjának meghatározásához a műszer három spektrális tartományban mér, melyek a közeli infravörös sávba eső szén-monoxid és metán elnyelési sávokban találhatók.
- MISR<sup>24</sup>: Négy hullámhossztartományban (három látható és egy közeli infravörös), kilenc különböző szögben méri a sugárzási paramétereket. Ennek az egyedülálló műszernek a célja annak a mérése, hogy hogyan szóródik és verődik vissza a napfény a különböző felszíni elemekről, illetve ez hogyan hat a klímára.

Az Aqua műhold fedélzetén hat műszer található (*Aqua, 2002*), melyeket röviden az alábbiakban jellemezzük.

- AIRS<sup>25</sup>: 2378 infravörös, valamint 4 látható/közeli infravörös csatornában (0,4-1  $\mu\text{m}$ , illetve 3,7-15,4  $\mu\text{m}$ ) mérő szondázó műszer, mely képes nagy

---

<sup>20</sup> Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer – További fejlesztett űrbeli hőmérsékleti emissziót és a visszavert sugárzást mérő sugárzásmérő

<sup>21</sup> Clouds and the Earth's Radiant Energy System – Felhőzet és a Föld sugárzási energiarendszere

<sup>22</sup> Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer – Közepes felbontású leképező spektrális sugárzásmérő

<sup>23</sup> Measurements of Pollution in the Troposphere – A szennyezés mérése a troposzférában

<sup>24</sup> Multi-Angle Imaging Spectroradiometer – Sok szögben leképező spektrális sugárzásmérő

<sup>25</sup> Atmospheric Infrared Sounder – Légköri Infravörös Szondázó Műszer

pontossággal meghatározni a légköri hőmérsékleti profilt, továbbá számos egyéb légköri és földfelszíni paramétert.

- AMSU-A<sup>26</sup>: 15 mikrohullámú csatornában (15-90 GHz) mérő szondázó műszer, mely elsősorban a felső légkör, főként a sztratoszféra hőmérsékleti profiljának mérésére szolgál, valamint képes a troposzféra hőmérsékletének mérésére a felhőzet hatásának kiküszöbölésével. Ugyanígy műszer található a NOAA K/L/M műholdak fedélzetén is.
- HSB<sup>27</sup>: A Brazil Nemzeti Űrkutatási Intézet által kifejlesztett 4 csatornás mikrohullámú (egy 150 GHz-es és három 183 GHz-es csatornával rendelkező) szondázó műszer, mely képes a légköri nedvességprofilot erősen felhős, illetve párás légköri viszonyok között is nagy pontossággal meghatározni.
- AMSR-E<sup>28</sup>: A Japán Nemzeti Űrkutatási Hivatal által kifejlesztett, 12 csatornás, 6 frekvenciás (6,925; 10,65; 18,7; 23,8; 36,5; 89,0 GHz) passzív mikrohullámú sugárzásmérő rendszer. A mérések térbeli felbontása 5,4 km (a 89,0 GHz-es csatorna esetén) és 56 km (a 6,925 GHz-es csatorna esetén) között alakul. A műszer méri a csapadék intenzitását, a légkör páratartalmát, a felhőzet, a hó, a jég és a talaj nedvességtartalmát, valamint a tengerfelszíni szelet és hőmérsékletet.
- MODIS: A Terra műholdon lévő műszerrel azonos.
- CERES: A Terra műholdon lévő műszerrel azonos.

Az EOS program keretében e szenzorok méréseiből a teljes éghajlati rendszerre vonatkozóan számtalan paramétert meghatározhatnak, melyek segítségével vizsgálhatók a globális folyamatok és változások. A meghatározott paraméterek az éghajlati rendszer egyes elemeire lebontva (*King, 2000*):

- Légkör: különféle felhőkarakterisztikák (mennyiség, optikai tulajdonságok, magasság), sugárzási energiafluxusok, a troposzféra kémiai összetétele (O<sub>3</sub>, nyomgázok), a sztratoszféra kémiai összetétele (O<sub>3</sub>, ClO, BrO, OH, nyomgázok), aeroszolkarakterisztikák a troposzférára és a sztratoszférára vonatkozólag, a légkör hőmérséklete és nedvességtartalma, villámdektálás

---

<sup>26</sup> Advanced Microwave Sounding Unit – Továbbfejlesztett Mikrohullámú Szondázó Egység

<sup>27</sup> Humidity Sounder for Brazil – Brazil Nedvességszonda

<sup>28</sup> Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS – A Földmegfigyelő Rendszer számára kifejlesztett Továbbfejlesztett Mikrohullámú Letapogató Sugárzásmérő

- Felszín: felszíntípusok és azok változása, a vegetáció fejlődése, felszínhőmérséklet, tüzesetek és vulkanikus folyamatok detektálása, a felszín nedvességtartalma
- Óceán: felszínhőmérséklet, fitoplankton- és szervesanyag-koncentráció, a tengerfelszíni szél, a tengerfelszín topográfiája (a tengerszint és a hullámok magassága)
- Krioszféra: a belföldi jégtakaró és a gleccserek topográfiája, valamint azok változásai, a tengeri jég kiterjedése, összetétele, mozgása és hőmérséklete, a hófelszín kiterjedése, hó-vízgyenérték

Ezek az adatok az LP DAAC<sup>29</sup> adatközponton keresztül érhetők el. Mi kutatásainkhoz a MODIS szenzor által mért felszínhőmérsékleti, felszínborítottsági és vegetációs index adatsorokat, valamint az ASTER felszínhőmérsékleti adatait használtuk fel.

### 3.1.2. A MODIS szenzor által mért felszínhőmérséklet

A felszínhőmérséklet a földfelszín energiaháztartásának jó indikátora. Alkalmos a felszín-légkör kölcsönhatások tanulmányozására, következtethetünk belőle a szenzibilis és a látens hőáram arányára, felhasználásával vizsgálható az üvegházhatás és annak változásai. A mezőgazdaság területén való felhasználási lehetőségek is sokoldalúak – pl. fagyok és fagyveszélyes területek meghatározása, növények víztartalmának becslése (Wan, 1999).

A műholdakkal mért felszínhőmérséklet meghatározására az eddigiekben három különböző módszert fejlesztettek ki (Wan, 1999):

- „Single Infrared Chanel”<sup>30</sup> módszer: ehhez szükséges egy pontos sugárzásátviteli modell, valamint a felszín emisszivitásának és a légköri profiloknak a pontos ismerete.
- „Split Window”<sup>31</sup> módszer: ez már a felszíni és a légköri emisszivitásra vonatkozó korrekciókat tartalmaz. Számos sokcsatornás tengerfelszín-hőmérsékleti algoritmusban ezt a módszert használják.

<sup>29</sup> Land Processes Distributed Active Archive Center – Földfelszíni Folyamatok Elosztó Aktív Archiváló Központja

<sup>30</sup> Egy Infravörös Csatorna

- „Day/night MODIS LST”<sup>32</sup> módszer: a MODIS szenzor hét különböző hőmérsékleti infravörös tartományú csatornájának nappali/éjszakai mérési pártjait használja. Egyidejűleg nagy pontossággal határozza meg a felszínhőmérsékletet és az emisszivitást a légköri hőmérséklet és a vízgőzprofil előzetes ismerete nélkül.

Ezt a harmadik módszert kimondottan abból a célból fejlesztették ki, hogy kihasználják a MODIS szenzor egyedülálló adottságát, nevezetesen hogy egyidejűleg 36 különböző hullámhossztartományban mér. Így ez az eljárás lehetővé teszi a műholdakkal mért felszínhőmérséklet minden eddiginél pontosabb meghatározását. A felszínhőmérséklet meghatározásához felhasznált hét csatorna fizikai paramétereit a **2. táblázat** foglalja össze.

2. táblázat

A MODIS szenzor hőmérsékleti infravörös csatornáinak fizikai paramétereit (*Wan, 1999*)

A csatorna sorszáma	Spektrális tartomány [ $\mu\text{m}$ ]	A várható NE $\Delta\text{T}$ <sup>33</sup> [K]
20	3,660 – 3,840	0,05
22	3,929 – 3,989	0,07
23	4,020 – 4,080	0,07
29	8,400 – 8,700	0,05
31	10,780 – 11,280	0,05
32	11,770 – 12,270	0,05
33	13,185 – 13,485	0,25

A felszínhőmérséklet meghatározása a földfelszín által kisugárzott hosszuhullámú sugárzás segítségével történik. Planck törvénye értelmében minden test a hőmérsékletének megfelelő hullámhosszú elektromágneses sugárzást bocsát ki. A szenzorok azonban nem képesek tisztán a felszín által kibocsátott sugárzást mérni, hisz a légkör tetején mért spektrális infravörös sugárzás a felszín hőmérsékleti sugárzása mellett a felszín által visszavert, valamint a légkör által kibocsátott hőmérsékleti sugárzást is tartalmaz. Emellett a felszínhőmérséklet meghatározásában komoly nehézséget okoz a felszín emisszivitásának nagy térbeli változékonysága. Ez függ a felszín anyagától és a talaj szemcseméretétől, valamint a műhold pásztázó sugara és a

<sup>31</sup> Hasított ablak

<sup>32</sup> Nappali/éjszakai MODIS Felszínhőmérsékleti

<sup>33</sup> Noise-equivalent temperature difference – A zajjal ekvivalens hőmérsékletkülönbség

földfelszín által bezárt szög nagyságától. A MODIS LST algoritmus képes e légköri és felszíni hatásokat korrigálni (Wan, 1999).

Egy ismeretlen és változó emisszivitású felszín  $T_s$  hőmérsékletének meghatározása matematikailag alulhatározott probléma, amennyiben  $N$  darab hőmérsékleti infravörös csatorna egyidejű méréseiből akarjuk meghatározni a felszínhőmérsékletet, valamint a spektrális csatornák átlagos emisszivitását. Még ha pontosan ismerjük is a légköri hőmérsékleti és nedvességi profilt, akkor is  $N+1$  az ismeretlenek száma. Ha két időpont (nappal és éjszaka) mérési eredményeit használjuk, akkor az ismeretlenek:  $N$  darab emisszivitás, a nappali felszínhőmérséklet, az éjszakai felszínhőmérséklet, a nappali és éjszakai hőmérsékleti és nedvességi profil, valamint  $\alpha_r$  anizotropitási faktor. Az ismeretlen változók száma tehát  $N+7$ , a megoldhatóság feltétele  $2N \geq N+7$ , vagyis  $N \geq 7$ . A MODIS LST algoritmusban e hét ismert változót a **2. táblázatban** foglalt csatornák sugárzásmérései jelentik (Wan, 1999).

Ha a sugárzásátviteli egyenletet linearizáljuk, majd a 7 csatorna nappali és éjszakai mérésére vonatkozó 14 egyenletet kombináljuk, akkor a felszínhőmérséklet és a csatornák emisszivitását megkapjuk a csatornák fényességi hőmérsékleteinek lineáris kombinációjaként. Matematikai alakban kifejezve:

$$x_i = \sum_{j=1}^{14} w_{i,j} \cdot y_j + w_{i,0}, \quad (2)$$

ahol  $\underline{x}$  ( $x_i, i=1, \dots, 14$ ) a 14 ismeretlen változót tartalmazó vektor,  $y_j$  a  $j$ . megfigyelésből számított fényességi hőmérséklet,  $w_{i,j}, i,j=1, \dots, 14$  regressziós együtthatók,  $w_{i,0}$  eltolási tényezők. Az együtthatók meghatározása két lépésben történik:

1. Szimulált megfigyelési értékekből létrehozunk egy nagy terjedelmű adatbázist. E megfigyeléseknél fontos, hogy a kiindulási felszíni és légköri paraméterek széles skálán mozogjanak.
2. Statisztikai regressziós vizsgálatokat végzünk a szimulált sugárzási értékekből meghatározott fényességi hőmérsékletek mint független változók, valamint az emisszivitás, a felszínhőmérséklet és a légköri paraméterek mint függő változók között. Ez a regressziós vizsgálat sok számítási műveletet igényel, de csak egyszer kell végrehajtani. Statisztikai értelemben a fenti közelítéssel nyert  $x_i$ -k a legjobb becslései az ismeretlen változóknak (Wan, 1999).

A MODIS szenzor által mért felszínhőmérséklet abszolút pontossága 0,3 K óceán felett, és 1 K szárazföld felett, relatív pontossága 0,25 K (Wan, 1999).



Horizontális térbeli felbontása 1 km. Ezen adatok felhasználásának legfőbb hátránya az, hogy csak felhőmentes időszakban alkalmazhatók a városi hősziget-hatás elemzésére.

### 3.1.3. A MODIS szenzor méréseiből meghatározott felszín típusok

A felszínborítottság egy terület klímájának meghatározó tényezője. Alapvetően befolyásolja a sugárzási, a momentum-, hő- és vízgőzátviteli, valamint a biogeokémiai folyamatokat.

A MODIS szenzor sokcsatornás mérései lehetővé teszik egy adott képpont felszín típusának (MODIS Land Cover Product<sup>34</sup>) meghatározását. E paraméter maximális térbeli felbontása a felszínhőmérséklethez hasonlóan 1 km, a globális adatbázist 96 napos, illetve egy éves periódusokra állítják elő. Jelenleg a 2001 és 2004 közötti időszakra vonatkozóan állnak rendelkezésre ezek az adatok. Megvizsgáltuk, hogy az általunk vizsgált városok és azok környékének tekintetében van-e különbség az egyes évek között a felszín-borítottsági adatbázisban. Mivel nem találtunk különbséget, tehát az egyes képpontok mindegyik évben ugyanabba a felszín-borítottsági kategóriába esnek, így vizsgálatainkhoz a 2004. év sugárzásmérései alapján készült MODIS felszínborítottsági paraméter adatait használtuk fel.

#### 3. táblázat

A MODIS szenzor által meghatározott felszín típus-kategóriák (Strahler et al., 1999)

Sorszám	Felszín típus	Sorszám	Felszín típus
1.	Örökzöld tülevelű erdő	10.	Füves terület
2.	Örökzöld lombos erdő	11.	Tartósan vízzel borított terület
3.	Lombhullató tülevelű erdő	12.	Szántóföld
4.	Lombhullató lombos erdő	13.	Beépített terület
5.	Kevert erdő	14.	Szántóföld/természetes növényzet
6.	Zárt bozót	15.	Hó és jég
7.	Nyitott bozót	16.	Növényzetmentes terület
8.	Fás szavanna	17.	Víz
9.	Szavanna		

A felszín típusok meghatározásához számos, a MODIS szenzor méréseiből korábban meghatározott paramétert használnak fel bemenő adatként, mint például az albedót, a vegetációs indexet, a hó- és jégborítottsági adatbázist, a felszínhőmérsékletet

<sup>34</sup> MODIS Felszínborítottsági Paraméter

és a tengerszint feletti magasságot. A felszínborítottsági paraméter 17 kategóriát tartalmaz (**3. táblázat**), mely megfelel a Nemzetközi Geoszféra és Bioszféra Program során bevezetett csoportosításnak (*Strahler et al., 1999*).

A felszín típusok klasszifikációja statisztikai módszerekkel történik. Az eljárás során döntések sorozata (döntési fa) határozza meg, hogy az adott képpont melyik kategóriába tartozik. A döntési fa létrehozása egy műholdas és felszíni mérésekből álló tanuló adatsor segítségével történt. Az adatok validációjához szintén felszíni méréseket használnak fel (*Strahler et al., 1999*).

#### 3.1.4. A MODIS szenzor méréseiből meghatározott vegetációs index

A városi hősziget-jelenség erősségét döntően befolyásolja a vegetáció, illetve annak fizikai állapota (pl. nedvességtartalma). A növények a fotoszintézis során a látható fényt (VIS) nagymértékben elnyelik, viszont a levelek a közeli infravörös sugárzást (NIR) visszaverik. A növények e fontos tulajdonságát kihasználva definiálták a Normalizált Vegetációs Indexet (NDVI) (*Deering, 1978*), amit a következő képlet ír le:

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS}$$

A vegetációs index a növényzet, valamint annak környezeti tényezőinek jellemzésére szolgáló dimenziómentes mérőszám, értéke elvileg -1 és +1 között változhat, földfelszíni körülmények között 0 (csupasz felszín) és 0,8 (dús vegetáció) között alakul.

A MODIS Normalizált Vegetációs Indexet (MODIS NDVI) a szenzor 1. (0,62-0,67  $\mu\text{m}$ ) (VIS) és 2. (0,841-0,876  $\mu\text{m}$ ) (NIR) csatornájának méréseiből határozzák meg a fenti képlet szerint. Ebből 16 napos, illetve 1 hónapos intervallumra kompozit képeket állítanak elő különböző – 250 m-es, 1 km-es és 0,25°-os – térbeli felbontással (*Huete et al., 1999*). Mi vizsgálatainkhoz az 1 hónapos, 1 km-es felbontású NDVI adatokat használtuk fel.

#### 3.1.5. Az ASTER szenzor méréseiből meghatározott felszínhőmérséklet

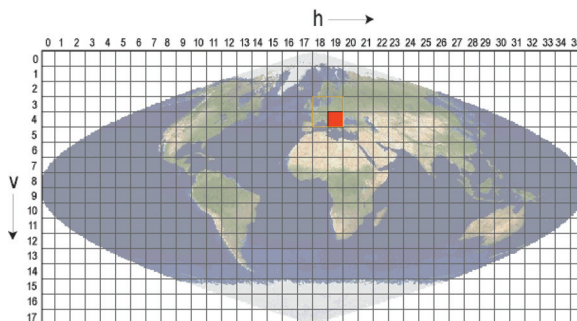
Az ASTER szenzor öt hőmérsékleti infravörös csatornával rendelkezik, ezek hullámhossztartománya 8,125-8,475  $\mu\text{m}$ , 8,475-8,825  $\mu\text{m}$ , 8,925-9,275  $\mu\text{m}$ , 10,25-10,95

$\mu\text{m}$  és 10,95-11,65  $\mu\text{m}$ . A MODIS szenzor méréseiből meghatározott felszínhőmérséklet ismertetésénél már utaltunk arra, hogy a felszínhőmérséklet műholdas mérésekből történő meghatározása matematikailag alulhatározott probléma olyan felszínek esetében, ahol a pontos emisszivitást nem ismerjük. Az ASTER szenzor esetében az öt mérési eredményből hat ismeretlen változót – az öt csatorna emisszivitását és a felszínhőmérsékletet – kellene meghatározni. Ennek megoldására kidolgozták az ún. „Temperature/Emissivity Separation” (TES)<sup>35</sup> algoritmust, ami különféle közelítő eljárások kombinálásával határozza meg az ismeretlen változókat (Gillespie et al., 1999).

Az ASTER szenzor által mért felszínhőmérséklet abszolút pontossága 1 K, relatív pontossága 0,3 K. Térbeli felbontása 90 m (ASTER, 2001).

### 3.2. A vizsgálati módszerek

A városi hősziget legfontosabb jellegzetességeinek vizsgálatát a tíz legnagyobb magyarországi nagyvárosra, valamint Közép-Európa további kilenc, 1-2 millió lakosú nagyvárosára vonatkozólag végeztük el. Ehhez a Terra és az Aqua műhold fedélzetén található MODIS szenzor felszínhőmérsékleti mezőit használtuk fel. A szükséges adatokat a NASA földfelszíni adatokat archiváló internetes adatközpontjától (LPDAAC<sup>36</sup>) FTP szerverten keresztül kaptuk.

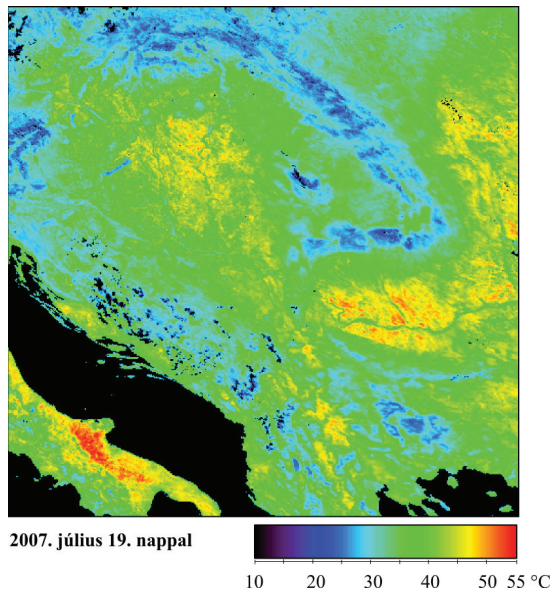


7. ábra  
A Föld képe szinuszoid leképezés alkalmazásával

<sup>35</sup> Hőmérséklet/Emisszivitás Szétválasztó

<sup>36</sup> Land Processes Distributed Active Archive Center – Földfelszíni Folyamat Adatok Aktív Archiváló Központja

A felszínhőmérsékleti adatokat tartalmazó fájlok egységes formátumúak, mindegyik 1200×1200 képpontot tartalmaz. A gömbfelületre vonatkozó adatok két dimenzióba való leképezése szinuszoid projekcióval történik (Lerner, 1996). A **7. ábrán** látható (piros színnel jelölve) a Kárpát-medencét is tartalmazó kivágat elhelyezkedése a globális szinuszoid térképen. A magyarországi városok vizsgálatához e kivágat adatait, míg a közép-európai vizsgálatokhoz ugyanennek, valamint a tőle északnyugatra, északra és nyugatra található kivágatoknak az adatait használtuk fel (narancssárga kerettel jelölve). A **8. ábra** egy példát mutat be, a 2007. július 19-i nappali felszínhőmérsékleti adatokat ábrázolja a Kárpát-medencére és környékére vonatkozóan. Ez a nap annak az emlékezetes néhány napnak az egyike, amikor Közép-Európát egy extrém hőhullám árasztotta el, és az abszolút melegrekord is megdőlt. A felszínhőmérsékleti adatokban is igen szélsőséges (45 °C feletti) értékek figyelhetők meg bizonyos területeken.



8. ábra

A MODIS szenzor által mért felszínhőmérséklet alakulása a v4h19-es számú MODIS műholdkép-kivágat által lefedett területen 2007. július 19-én a nappali órákban

A munkafolyamat adatgyűjtést követő lépése az adatok kontrollja, a hibás és a felhős képek kiszűrése volt. A városok azonosítása a műholdképeken egy speciális számológép, az ún. MODLAND Tile Calculator<sup>37</sup> segítségével történt. A számológép pontosan kiszámolta, hogy adott földrajzi koordinátákkal rendelkező ponthoz a műholdképen mely képpont tartozik. A városok azonosítása után a városokról és környékükről kivágatok készültek. A kivágat mérete Budapest és a külföldi nagyvárosok esetében 65×65, a többi magyarországi nagyváros esetében 30×30 pixel.



9. ábra  
Budapest egy része a Google Earth műholdkép-adatbázisban

Az adatfeldolgozás következő lépése a városi és városkörnyéki képpontok meghatározása volt. Ehhez felhasználtuk a MODIS felszíntípusok adatbázisát, a Google

<sup>37</sup> MODLAND Kivágat-Számológép - a MODIS szárazföldi méréseinek földrajzi azonosítására szolgáló webes eszköz

Earth<sup>38</sup> internetes műholdkép-adatbázist, valamint a GTOPO30 Digitális Terepmodellét. A Google Earth adatbázis nagy felbontású műholdfelvételei lehetővé teszik a beépített és nem beépített területek vizuális elkülönítését, ahogy az a **9. ábrán** is látható. E műholdfelvételeket felhasználva minden egyes városra lehatároltuk azt a területet, ami a város közigazgatási határán belül ténylegesen beépített. Ezt a kontúrt illesztettük rá az 1 km-es térbeli felbontású rácsra, és megszámoltuk, összesen hány képpont található e kontúrban belül. Ezután meghatároztuk a város „átlagos sugarát”, amit a következő egyenlet ír le:

$$r_{\text{város}} = \sqrt{\frac{N_{\text{pixel}}}{\pi}}$$

ahol  $N_{\text{pixel}}$  a városhatáron belüli képpontok száma. E mennyiség tulajdonképpen azt fejezi ki, hogy mekkora lenne a város sugara, ha a város pontosan kör alakú lenne.

A GTOPO30 adatbázist a jelentős magassági különbségek kiszűrésére használtuk fel. Ennek az adatbázisnak a horizontális térbeli felbontása 30 szögmásodperc (átlagosan 1 km).

A városi képpontok közé azok a pontok tartoznak, melyek a következő három feltétel mindegyikének megfelelnek:

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

A városkörnyéki képpontokhoz való tartozás feltételei:

- távolságuk a Google Earth adatbázis alapján meghatározott beépítettségi határtól legfeljebb  $r_{\text{város}}$ , ahol  $r_{\text{város}}$  a város fent definiált „átlagos sugara”
- felszín típusuk nem tartozik a beépített terület és a víz típushoz
- tengerszint feletti magasságuknak a város átlagos tengerszint feletti magasságától vett eltérése nem nagyobb, mint  $\pm 100$  m.

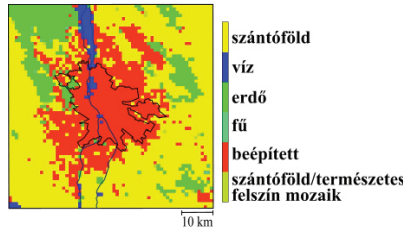
A **10. ábrán** a városi és városkörnyéki képpontok lehatárolásának folyamatát mutatjuk be Budapest esetében.

Az így kapott pontok felszínhőmérsékleti adatainak felhasználásával minden városra és időpontra meghatároztuk a városi és városkörnyéki átlaghőmérsékletet, melyek

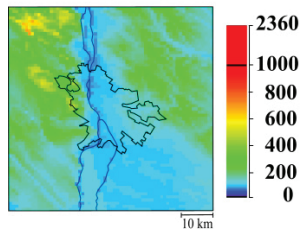
<sup>38</sup> Google Föld – nagy felbontású, látható tartományú műholdfelvételek globális internetes adatbázisa

különbsége adja a városi hősziget intenzitását. A meghatározott hősziget-intenzitás lehetőséget ad különféle összehasonlító vizsgálatokra, tanulmányozható a hősziget, valamint a különböző felszíni és meteorológiai paraméterek kapcsolata, a hősziget napszaktól, évszaktól és városmérettől való függése, továbbá a hősziget szerkezete és keresztmetszete.

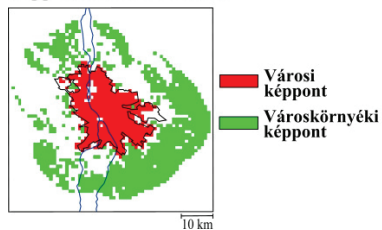
#### A MODIS felszínborítottsági adatbázis



#### Digitális magassági mező



#### A városi és városkörnyéki képpontok szétválasztása



10. ábra

A városi és városkörnyéki területek szétválasztása (lent) a MODIS felszínborítottsági adatbázis (fent) és a digitális magassági mező (középen) felhasználásával Budapest agglomerációs övezete (65 km × 65 km) esetén

### 3.3. A vizsgált városok

Műholdas felszínhőmérsékleti méréseken alapuló városi hősziget vizsgálataink több irányba terjedtek ki. Egyrészt részletes vizsgálatot végeztünk Magyarország tíz legnépesebb városára vonatkozóan, melyek népességszámát a **4. táblázat** tartalmazza, területi elhelyezkedését pedig a **11. ábra** mutatja be.

4. táblázat  
A vizsgált magyarországi városok és azok népességszáma 2008. január 1-jén  
(forrás: KSH, 2008)

Sorszám	Város	Népesség [fő]
1.	Budapest	1 702 297
2.	Debrecen	205 084
3.	Miskolc	170 096
4.	Szeged	167 039
5.	Pécs	156 664
6.	Győr	128 808
7.	Nyíregyháza	116 874
8.	Kecskemét	110 316
9.	Székesfehérvár	101 755
10.	Szombathely	79 300



11. ábra  
A tíz legnagyobb magyarországi nagyváros területi elhelyezkedése

Kutatásaink másik fő irányvonala Közép-Európa 1-2 millió lakosú – tehát Budapesttel összevethető méretű – városainak vizsgálata volt. E városok felsorolását és népességszámát az **5. táblázat**, területi elhelyezkedését a **11. ábra** mutatja be.



5. táblázat

A vizsgált közép-európai városok és azok népességszáma (forrás: Brinkhoff, 2009)

Város	Ország	Népesség [fő]	A népességszám felmérésének időpontja
Bukarest	Románia	1 931 838	2007. 07. 01.
Varsó	Lengyelország	1 707 981	2008. 06. 30.
Bécs	Ausztria	1 677 867	2008. 01. 01.
München	Németország	1 311 573	2007. 12. 31.
Milánó	Olaszország	1 299 633	2008. 01. 01.
Prága	Csehország	1 212 097	2008. 01. 01.
Szófia	Bulgária	1 156 796	2007. 12. 31.
Belgrád	Szerbia és Montenegró	1 120 092	2002. 04. 01.
Zágráb	Horvátország	691 724	2001. 03. 31.



11. ábra

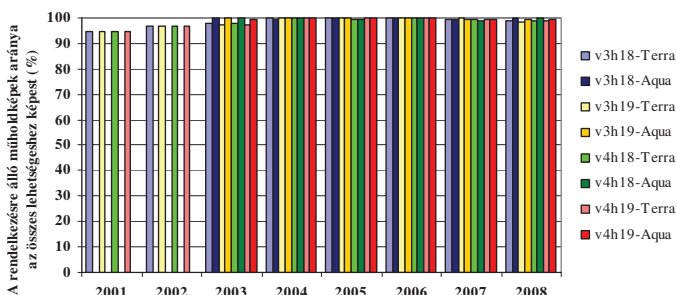
A vizsgált tíz közép-európai főváros területi elhelyezkedése

### 3.4. A felhasznált adatok mennyiségi és minőségi vizsgálata

Ahogy azt a 3.1. fejezetben már említettük, a Terra műholdat 1999 decemberében, az Aqua műholdat pedig 2002 májusában lőtték fel a világűrbe. Rendszeres mérések a Terra esetében 2000 márciusa, az Aqua esetében 2002 júliusa óta állnak rendelkezésre. Az adatok kalibrálásának, feldolgozásának módszerét a NASA adatfeldolgozó központjában folyamatosan fejlesztették, ma már az ún. 5-ös verziószámú, nagy pontosságú, földrajzilag tökéletesen illesztett adatok állnak rendelkezésre a teljes vizsgált időszakra vonatkozóan. Az elmúlt évek során az adatok minőségének javulását kutatásaink során mi is követtük, a műholdas adatbázis

visszamenőleg is folyamatosan frissítettük, így ebben a disszertációban már a teljes vizsgált időszakra vonatkozóan az 5-ös verziószámú adatok elemzése szerepel.

Vizsgálataink a Terra/MODIS adatok esetében a 2001. január 1. és 2008. december 31., az Aqua/MODIS adatok esetében a 2003. január 1. és 2008. december 31. közötti időszakra terjedtek ki. (Néhány esetben – amikor évszakos átlagokat számoltunk – felhasználtuk a 2000. decemberi Terra, illetve 2002. decemberi Aqua adatokat is.) Ez az adatmennyiség a Terra méréseiből számított felszínhőmérsékleti adatok esetében műholdkép-kivágotonként közel 3000 darab fájl (a nappali és éjszakai adatok egy fájlban találhatóak), és 12 GB információt jelent. A **7. ábrán** bemutatott négy MODIS műholdkép kivágotra vonatkozóan elvégzett vizsgálataink során közel 22.000 fájl és 75 GB információt dolgoztunk fel. E hatalmas adatmennyiség feldolgozását az utóbbi 1-2 évtized technikai fejlődése tette lehetővé. Még 15-20 évvel ezelőtt is elképzelhetetlen volt egy ilyen jellegű munka: elég csak a korábbi tárolókapacitások szűkös méretére vagy az internetes kapcsolatok sebességére gondolni.



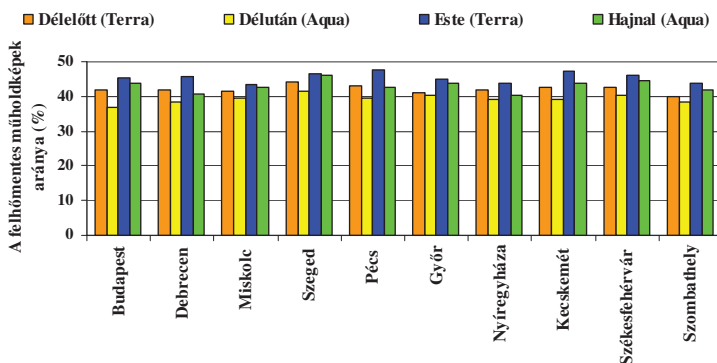
12. ábra

A rendelkezésre álló MODIS felszínhőmérsékleti adatok aránya az összes lehetségeshez képest

Ha a teljes MODIS felszínhőmérsékleti adatbázist megvizsgáljuk, megállapíthatjuk, hogy ritkán – inkább csak a vizsgált időszak első felében – fordult elő adathiány. A **12. ábra** a rendelkezésre álló műholdképek arányát mutatja be az összes lehetségeshez képest minden egyes évre és műholdkép-kivágotra vonatkozóan. Látható, hogy a Terra műhold működésének első három évében léptek fel olyan problémák, melyek egyes napokon adathiányt eredményeztek, de az adathiányos napok száma még a legrosszabb évben sem haladja meg a 20 napot. Az Aqua műhold méréseinek indulásakor már rendelkezésre álltak a Terrával kapcsolatos tapasztalatok, így ott e

kezdeti adathiány egyáltalán nem figyelhető meg. 2004-től pedig legfeljebb évi három olyan nap van, melyre nem áll rendelkezésre MODIS felszínhőmérsékleti mező.

Az, hogy a rendelkezésre álló műholdkép a vizsgálataink szempontjából fontos képpontokban tartalmaz-e felszínhőmérsékleti adatot, elsősorban a felhőzetől függ. A hőmérsékleti infravörös tartományú sugárzást a felhőzetet alkotó vízgőz részben elnyeli, illetve maga is sugároz, így a műholdak a felhővel borított területeken csak a felhőtető hőmérsékletét tudják mérni. Ezeknek az adatoknak a meteorológiai hasznossága vitathatatlan, de ezek az esetek a műholdas felszínhőmérsékleti méréseken alapuló városi hősziget-vizsgálatoknál komoly adathiányt eredményeznek.



13. ábra

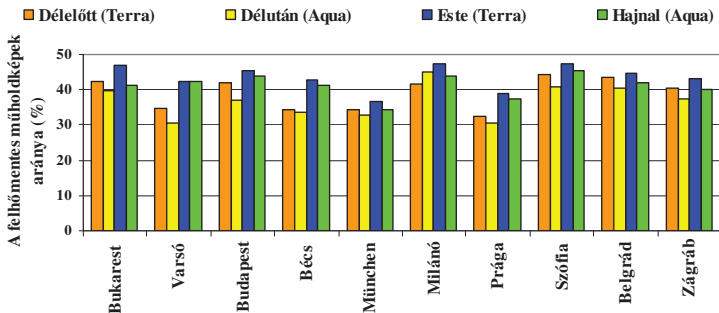
Azoknak a napoknak az összes naphoz viszonyított aránya Magyarország nagyvárosaira vonatkozóan, melyeken a városi képpontoknak legalább a fele felhőmentes

A **13. ábra** azoknak a napoknak a teljes vizsgált időszakhoz viszonyított arányát mutatja be a magyarországi nagyvárosokra vonatkozóan, melyeken a városi képpontoknak legalább a fele felhőmentes volt a MODIS felvételeken, így meg lehetett határozni a városi hősziget intenzitását. Amennyiben kevesebb képpont állt rendelkezésre, úgy arra a napra nem határoztuk meg a hősziget-intenzitást, mert ilyenkor sok esetben irreális eredmények születtek. A grafikonon látható, hogy a magyar városok esetében az összes lehetséges nap 37-47%-án használható a műholdas felszínhőmérsékleti adatok a városi hősziget vizsgálatára.

Ha a négy mérési időpontot vetjük össze, megállapíthatjuk, hogy a Terra műhold késő esti (21 és 23 UTC közötti) áthaladása során készül a leggyakrabban felhőmentes

felvétel. Néhány százalékkal kevesebb esetben készül ilyen felvétel az Aqua műhold hajnali (0:30 és 3 UTC közötti) áthaladása során. A nappali órákban is a Terra felvételei használhatók gyakrabban: a délelőtti (10 és 12 UTC közötti) Terra-áthaladás idején ritkábban van felhő a városok felett, mint délután (12 és 14 UTC között), amikor az Aqua áthalad a vizsgált városok felett.

A **14. ábra** a közép-európai nagyvárosokra vonatkozóan mutatja be ugyanezt. A használható műholdképek gyakorisága hasonló, mint a magyar városok esetében, bár az értékek szórása nagyobb, 30% és 47% között alakul. Az ábrán jól tükröződnek az egyes városok éghajlati sajátosságai: az óceánhoz közelebb lévő, nagyobb éves csapadékmennyiséggel rendelkező városok esetében értelemszerűen kisebb a használható műholdképek aránya, míg a mediterrán éghajlatú nagyvárosokban, ahol kevesebb a csapadék és kisebb a felhőborítottság, több használható felszínhőmérsékleti adat áll rendelkezésre.

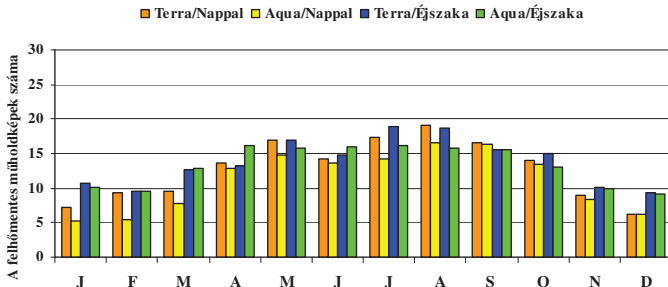


14. ábra

Azoknak a napoknak az összes naphoz viszonyított aránya Közép-Európa nagyvárosaira vonatkozóan, melyeken a városi képpontoknak legalább a fele felhőmentes

A használható adatok éven belüli eloszlása nem egyenletes, ahogy az Budapestre vonatkozóan a **15. ábrán** is látható. Az ábra az egyes hónapokban használható MODIS műholdképek mennyiségének a 2001-2008 közötti időszakra vonatkozó átlagát mutatja be a Terra, míg a 2003-2008 közötti időszakra vonatkozó átlagát az Aqua műhold esetében. Látható, hogy télen egy átlagos hónapban 5-10 olyan nap van, melyen elegendő műholdas felszínhőmérsékleti adat áll rendelkezésre a városi hősziget intenzitásának meghatározásához. Nyáron az ilyen napok száma 15-20 között alakul.

Kisebbséges tapasztalható júniusban, ami az ilyenkor tapasztalható felhősebb, csapadékosabb időjárásnak köszönhető.



15. ábra

A felhőmentes MODIS felszínhőmérsékleti műholdképek mennyiségének havi átlaga Budapestre vonatkozóan (Terra: 2001-2008, Aqua: 2003-2008)

A használható MODIS felszínhőmérsékleti adatok év közbeni eloszlása a többi vizsgált városban is hasonló képet mutat, az adott hely éghajlati sajátosságai természetesen megjelennek az eloszlásban. A téli hónapokban mindenhol 5-10, nyáron a gyakrabban felhős nagyvárosokban 12-15, a ritkábban felhős városokban 20-25 napon áll rendelkezésre használható műholdkép.

Ha ezt az adatsűrűséget összevetjük más városklimatológiai kutatási módszerekkel, megállapíthatjuk, hogy még így is, hogy a vizsgálatok a felhőmentes napokra korlátozódnak, rendkívül nagy mennyiségű adat áll rendelkezésre e módszer keretein belül. Bár a hagyományos földfelszíni városklimatológiai mérőállomások mérései minden nap tetszőleges időpontban rendelkezésre állnak, de az állomások sűrűsége soha nem lesz olyan nagy, mint a műholdfelvételek térbeli felbontása. A földfelszíni, illetve repülőgépes mobil mérések jó térbeli felbontásúak, de nagy költségigényük miatt hosszú távon nem lehet azokat nagy gyakorisággal végezni. E módszer létjogosultságát alátámasztja továbbá az a tény is, hogy a hősziget kialakulásának kedvez a szélcsendes, derült időjárás (Oke, 1982), így az intenzívebb hősziget-jelenségek mindenképpen vizsgálhatók e módszerrel.

## 4. A vizsgálat eredményei

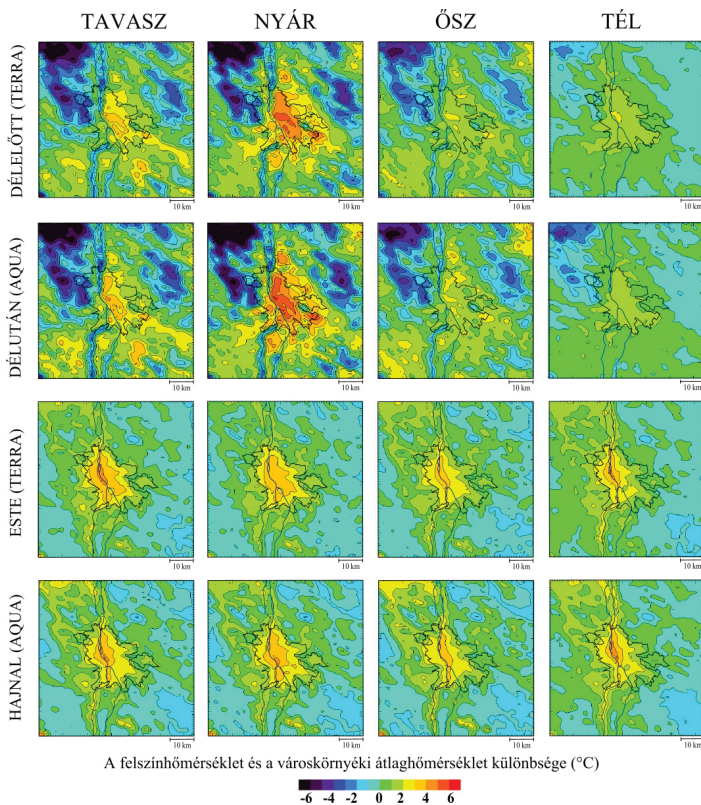
Vizsgálataink során meghatároztuk a városi hősziget intenzitását, azaz a városi és városkörnyéki átlagos felszínhőmérséklet különbségét Magyarország tíz legnagyobb városára, valamint Közép-Európa további kilenc nagyvárosára vonatkozólag minden olyan napra, melyre használható – felhő- és hibamentes – műholdkép állt rendelkezésünkre. Ezt követően havi és évszakos átlagokat határoztunk meg. Az így kapott eredmények vizsgálatánál azonban fontos figyelembe venni azt a tényt, hogy a havi átlagok az adott hónapban rendelkezésre álló képek számának függvényében erősen eltérő mennyiségű adatból lettek meghatározva.

### 4.1. A városi hősziget szerkezete

#### 4.1.1. A városi hősziget szerkezete Magyarország nagyvárosaiban

A műholdas felszínhőmérsékleti mérések egyedülálló lehetőséget nyújtanak a városi hősziget térbeli szerkezetének részletes feltárására. A **16. ábra** a budapesti városi hősziget szerkezetét mutatja be. Az ábrákon az egyes képpontok hőmérsékletének a városkörnyéki átlaghőmérséklettől vett eltéréseinek évszakos átlaga látható a Terra mérések esetében a 2001-2008, míg az Aqua mérések esetében a 2003-2008 közötti időszakokra vonatkozóan. Mivel Budapest hazánk fővárosa és egyetlen millió feletti lakosú nagyvárosa, ezért e város kutatásaink során kiemelt szerepet kapott.

A nappali mezőket vizsgálva megállapíthatjuk, hogy a városi hősziget magja a főváros pesti oldalán karéj alakban helyezkedik el lefedve a belvárost. A tavaszi-nyári időszakban a hősziget kiterjedése és intenzitása is jelentős: a városkörnyéki átlaghőmérsékletet tavasszal 3-4 °C-kal, míg nyáron 4-6 °C-kal meghaladó terület a fővárosnak szinte az egész pesti részére kiterjed. A budai oldalon a hősziget csak egy kisebb területet fed le, itt a domborzat, valamint a zöldfelületek nagyobb aránya mérsékli a városi hősziget erősségét. A tavaszi-nyári időszakban a Budai-hegység legmagasabb részeinek felszínhőmérséklete 5-6 °C-kal alacsonyabb, mint a városkörnyéki átlaghőmérséklet, így ebben az időszakban a fővárosban a hegyvidék és a belváros között néhány kilométeres távolságon belül kb. 15 °C-os hőmérsékletkülönbség alakul ki. Az őszi-téli időszakban nappal a hősziget erőssége a belvárosban csekélyebb, mint nyáron, kb. 2-3 °C.



16. ábra

A városi hősziget átlagos évszakos szerkezete Budapest térségében (a Terra/MODIS 2001-2008, és az Aqua/MODIS 2003-2008 közötti felszínhőmérsékleti mérései alapján)

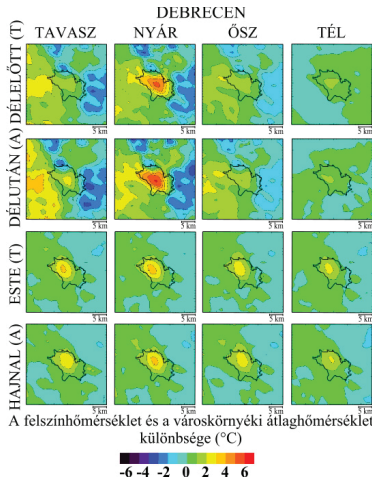
Az ábrák 1 km<sup>2</sup>-es felbontása lehetővé teszi, hogy megvizsgáljuk azoknak a felszíni elemeknek a hőszigetre gyakorolt hatását, melyek mérete meghaladja az 1 km<sup>2</sup>-t. Az ilyen elemek jellegzetes meleg, illetve hideg pontokat rajzolnak ki a hőszigeten belül, ami különösen a tavaszi-nyári nappali képeken szembetűnő. Ezeken a közvetlen környezetüknél több fokkal hidegebbek például a vízfelületek, erdők, parkok: az ábrákon jól láthatóan kirajzolódik a Duna vonala, a Népliget, valamint a X., XVII. és XVIII. kerületek közé bekelődő Városerdő. A meleg pontokra jó példa a Ferihegyi Repülőtér, aminek felszínhőmérséklete a nagy arányú mesterséges felszínnek

köszönhetően nyáron akár 5 °C-kal meghaladhatja a városkörnyéki átlaghőmérsékletet városperemi fekvése ellenére is.

Az éjszakai órákban a hősziget szerkezete jelentősen eltér a nappalitól: a fővörös szinte teljes területén pozitív hőmérsékleti anomália jelenik meg, a hősziget centruma pedig a budai és pesti oldalra egyaránt kiterjed. Az éjszakai képeken – a nappaliakkal ellentétben – a budai hegyek melegebbek, mint a városkörnyéki átlaghőmérséklet.

Ha a hősziget változásának napi menetét vizsgáljuk, megállapíthatjuk, hogy a műholdas felszínhőmérsékleti mérésekből meghatározott városi hősziget intenzitásának maximuma délután, az Aqua műhold felvételein figyelhető meg, ami jó egyezést mutat más korábbi külföldi vizsgálatok eredményeivel (*Vukovich, 1983; Roth et al. 1989; Gallo et al., 1993*). A hősziget intenzitásának napközbeni fokozódása és kiterjedésének növekedése a tavaszi, nyári és őszi képeken figyelhető meg, a téli képen ezzel ellentétes

folyamat látható.

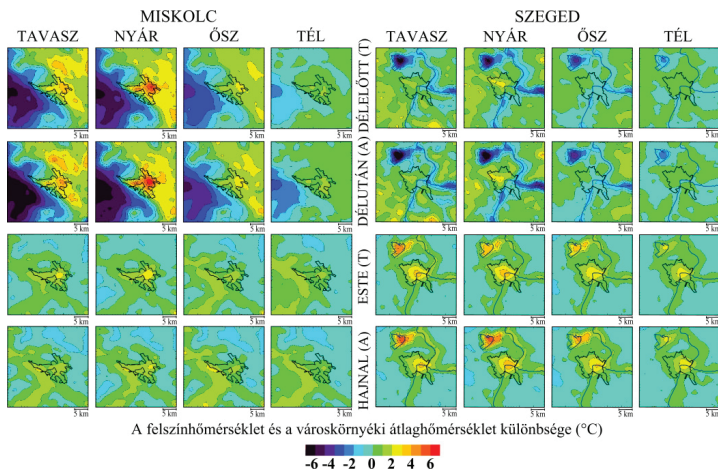


17. ábra

A városi hősziget átlagos évszakos szerkezete Debrecen térségében (Terra/MODIS (T) 2001-2008, Aqua/MODIS (A) 2003-2008)

A **17. ábrán** a debreceni városi hősziget szerkezete látható. Az ábrákon minden évszakban és napszakban kirajzolódik a hősziget, melynek átlagos intenzitása nyáron a délutáni órákban a 6 °C-ot is meghaladja. Télen a nappali órákban a város területén 1-2 °C-os hőmérsékleti többlet jelentkezik a városkörnyéki átlaghőmérsékletéhez viszonyítva. A nappali képeken kirajzolódik a város északi peremén található Nagyerdő, ami hideg területként jelenik meg. Éjszaka a városban kialakuló hőmérsékleti többlet 2-4 °C a városkörnyéki átlaghőmérsékletéhez képest, nyáron intenzívebb, és nagyobb területű a hősziget, mint télen.

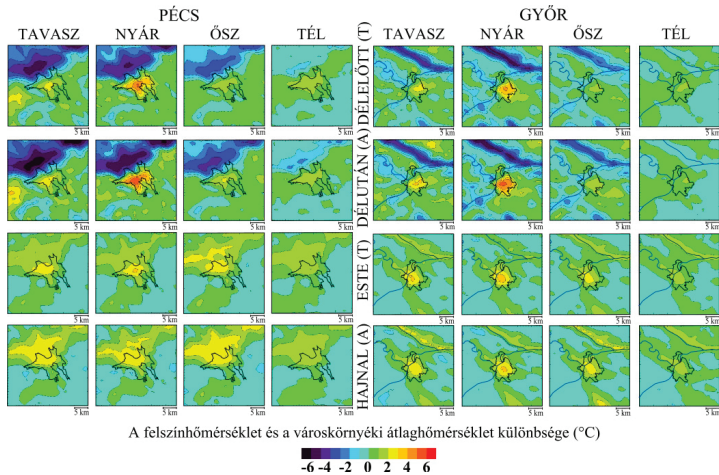




18. ábra  
A városi hősziget átlagos évszakos szerkezete Miskolc és Szeged térségében  
(Terra/MODIS (T) 2001-2008, Aqua/MODIS (A) 2003-2008)

A **18. ábra** bal oldali része Miskolc környékének átlagos felszínhőmérsékleti viszonyait mutatja be évszakos bontásban. Az ábrákra pillantva rögtön szembetűnik – különösen a tavaszi-nyári félévben – az élesen kirajzolódó hőmérsékleti kontraszt: a nappali képeken a várostól nyugatra húzódó Bükk hegység felszínének hőmérséklete jóval alacsonyabb, mint a városkörnyéki átlaghőmérséklet, míg a városban akár a 6 °C-ot is elérheti a hősziget intenzitása. A nappali képeken két hősziget-maximum is kirajzolódik, az elsődleges maximum a belváros területén, míg a másodlagos Diósgyőr városrészen található.

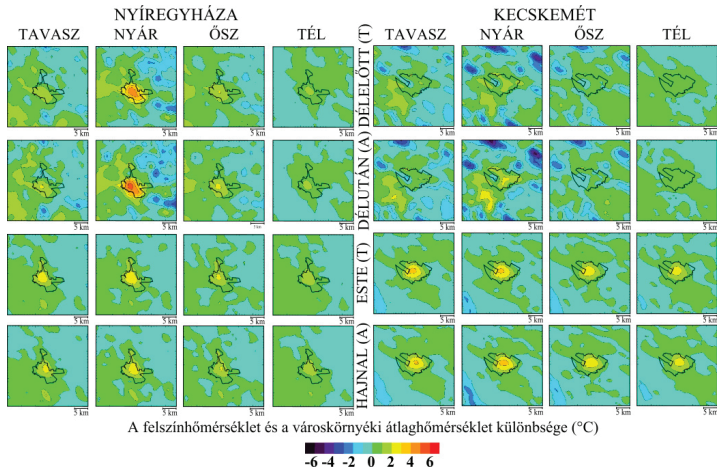
A **18. ábra** jobb oldali része a Szegedre vonatkozó szerkezeti képeket mutatja be. Itt a korábbiakban bemutatott városokkal ellentétben nem nappal, hanem éjszaka alakul ki erősebb hősziget. Nappal a tavaszi-nyári félévben mindössze 2-3 °C a hősziget intenzitása, az őszi-téli félévben pedig meg sem jelenik a hősziget. Ezzel szemben az éjszakai hősziget intenzitása mindegyik évszakban 2-4 °C. A várostól ÉNY-ra található Fehér-tó a nappali képeken hideg, az éjszakai képeken meleg területként jelenik meg a vízfelszínnek nagyobb hőmérsékleti tehetetlensége miatt.



19. ábra  
 A városi hősziget átlagos évszakos szerkezete Pécs és Győr térségében  
 (Terra/MODIS (T) 2001-2008, Aqua/MODIS (A) 2003-2008)

A 19. ábrán a pécsi és győri hősziget szerkezetét mutatjuk be. Pécs környékének felszínhőmérsékleti képein minden évszakban és napszakban megjelenik a városi hősziget, melynek intenzitása napszaktól és évszaktól függően 1-2 °C (télen) és 5-6 °C (nyáron, nappal) között változik. A hegyvidéki területek felszínhőmérséklete természetesen nappal alacsonyabb, éjszaka magasabb, mint a városkörnyéki átlaghőmérséklet.

Győr környékének felszínhőmérsékleti viszonyait a városhatáson túl a folyók is jelentősen befolyásolják. A Duna, a Mosoni-Duna és a Rába hatása is megjelenik a felszínhőmérsékleti mezőkön, ezek nappal hidegebbek, télen melegebbek, mint a városkörnyéki átlaghőmérséklet. A többi városhoz hasonlóan nyáron, a nappali képeken a legerősebb a hősziget-hatás, ekkor a belváros 5-6 °C-kal melegebb a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél. Nyáron az éjszakai órákban is megfigyelhető 3-4 °C-os pozitív hőmérsékleti anomália a belvárosban. Ősszel és télen az éjszakai hősziget erősebb, mint a nappali, előbbi intenzitása meghaladja a 2 °C-ot, míg a nappali hősziget-intenzitás 1-2 °C.



20. ábra

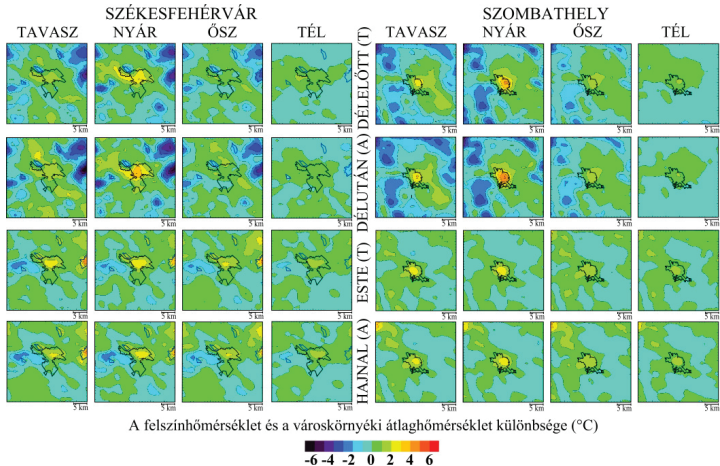
A városi hősziget átlagos évszakos szerkezete Nyíregyháza és Kecskemét térségében (Terra/MODIS (T) 2001-2008, Aqua/MODIS (A) 2003-2008)

A **20. ábra** bal felén az évszakos átlagos felszínhőmérsékleti anomália-mező látható Nyíregyháza térségére vonatkozóan. A hősziget szerkezete hasonlóan alakul, mint a korábbiakban bemutatott városokban: a maximális hősziget-intenzitás nyáron, délután figyelhető meg, mértéke 5 °C körül alakul. Télen a hősziget a belvárosra korlátozódik, ami 1-2 °C-kal melegebb a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél.

A **20. ábra** jobb felén Kecskemét térségének felszínhőmérsékleti viszonyai láthatók, ami a szegedi képpel mutat nagy hasonlóságot. Az éjszakai felvételeken a hősziget szépen kirajzolódik, annak intenzitása télen meghaladja a 2 °C-ot, nyáron pedig a 3 °C-ot. Ezzel szemben a nappali képeken csupán nyáron jelenik meg pozitív hőmérsékleti anomália, a többi évszakban a város felszínének átlaghőmérséklete alig haladja meg a városkörnyék átlaghőmérsékletét.

A **21. ábrán** Székesfehérvár és Szombathely felszínhőmérsékleti viszonyait mutatjuk be. A székesfehérvári kép is hasonlít némileg a szegedi és kecskeméti felszínhőmérsékleti viszonyokra, bár az előbbiekkal ellentétben nyáron itt erősebb a nappali hősziget, mint az éjszakai, de annak intenzitása csupán 4 °C. Ősszel és télen a nappali órákban itt sem jelenik meg a városi hősziget. Ezzel szemben az éjszakai képeken mindegyik évszakban kirajzolódik a pozitív hőmérsékleti anomália, ennek mértéke 2-3 °C, és a város északi felére korlátozódik. A képek jobb szélén északabbra a

Velencei-hegység, délebbre a Velencei-tó nyugati fele rajzolódik ki, ezek nappal hidegbbek, éjszaka pedig melegebbek, mint a városkönyéki átlaghőmérséklet.



21. ábra

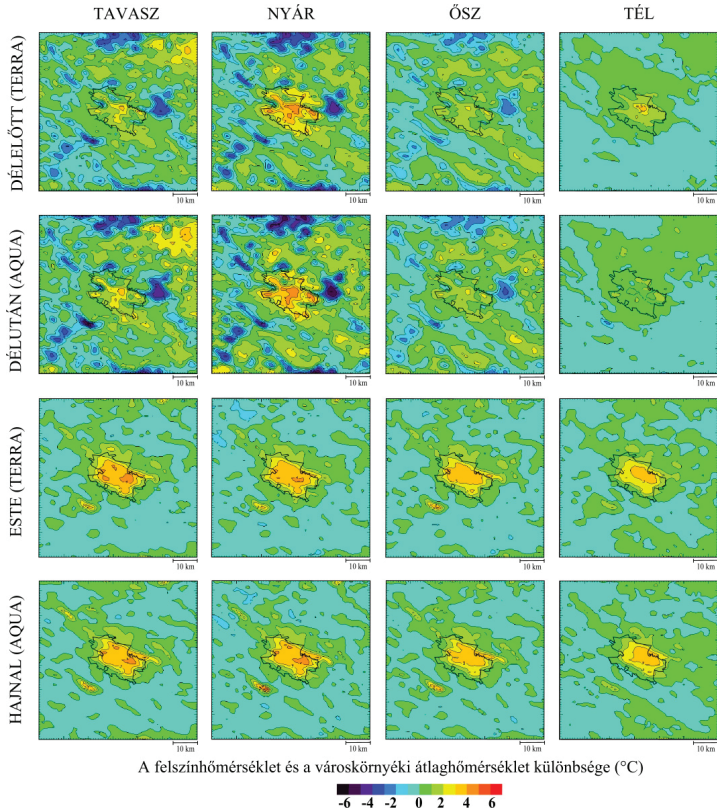
A városi hősziget átlagos évszakos szerkezete Székesfehérvár és Szombathely térségében (Terra/MODIS (T) 2001-2008, Aqua/MODIS (A) 2003-2008)

Szombathely esetében a városi hősziget szerkezete hasonló képet mutat, mint a korábban bemutatott városok többségénél. A nyári, nappali maximális intenzitás 5 °C körül alakul, nyáron éjszaka 2-3 °C-os hőmérsékleti többlet alakul ki. Ősszel és télen 1-2 °C a városi hősziget átlagos intenzitása. Itt is markánsan kirajzolódnak a hegyvidéki területek, a várostól nyugatra az Alpokalja nyúlványai – a többi, hegyek közelében található városhoz hasonlóan – nappal hidegbbek, éjszaka pedig melegebbek, mint a városkönyéki átlaghőmérséklet.

#### 4.1.2. A városi hősziget szerkezete Közép-Európa nagyvárosaiban

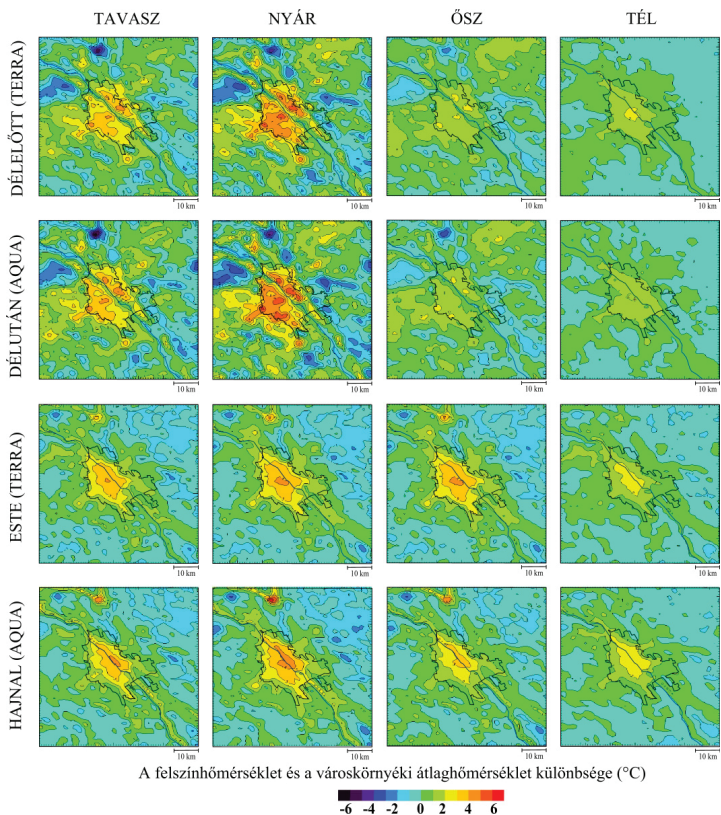
A fenti vizsgálatokat elvégeztük Közép-Európa 1-2 millió lakosú nagyvárosára is. A **22. ábra** Bukarestre vonatkozóan mutatja be a felszínhőmérsékleti anomáliamező alakulását. Bukarest a Román-alföldön fekszik, a város körül több kisebb vízfelület található, ezek a nappali képeken hidegbbek, az éjszakai képeken melegebbek, mint a

városkörnyéki átlaghőmérséklet (pl. a várostól délnyugatra kb. 10 km-re, illetve közvetlenül a város nyugati peremén, a városkontúr konkáv részénél).



22. ábra  
A városi hősziget átlagos évszakos szerkezete Bukarest térségében  
(Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)

A nappali mérési időpontokban a hősziget intenzitása a többi városhoz képest nem túl nagy, még nyáron sem haladja meg az 5 °C-ot. Tavasszal, ősszel és télen a városon belül számottevő pozitív hőmérsékleti anomáliával rendelkező területek nagysága jóval kisebb, mint maga a város. Ezzel szemben éjszaka a hősziget szinte a város teljes területére kiterjed, intenzitása mind a négy évszakban meghaladja a 3 °C-ot.



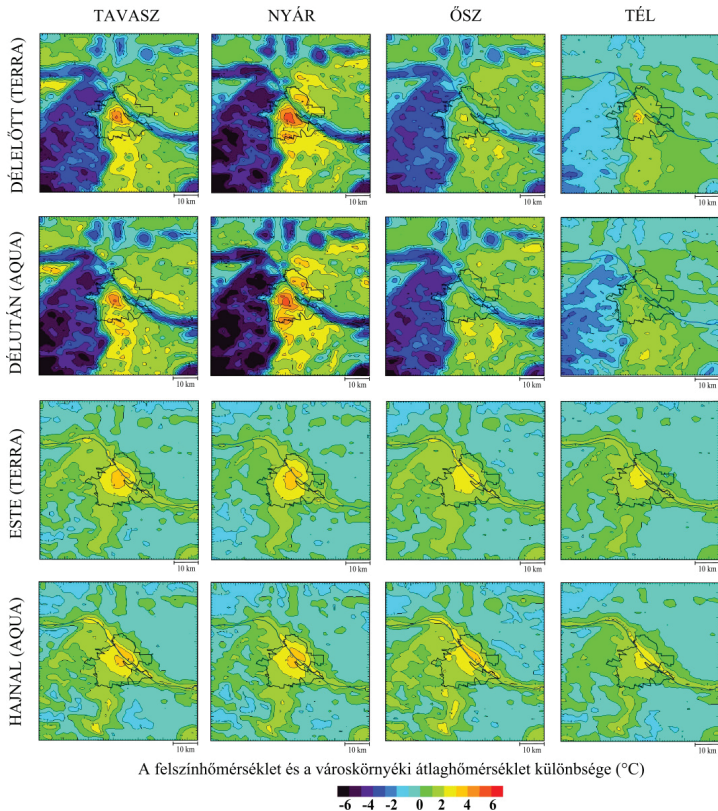
23. ábra

A városi hősziget átlagos évszakos szerkezete Varsó térségében  
(Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)

A **23. ábra** Varsó esetében mutatja be a felszínhőmérsékleti mező alakulását. A síkvidéki elhelyezkedésű város a Visztula folyó két partján terül el. A tavaszi, nyári és őszi nappali képeken a folyó és környéke hidegebb, mint környezete, így az mérsékli a hősziget-hatást, egyúttal két részre osztja a városi hőszigetet. Varsó esetében több hősziget-maximum is kirajzolódik a nappali képeken. A Visztula jobb és bal partján kirajzolódó belvárosi hősziget-maximumok mellett – a városperemi fekvés ellenére –

Varsó nyugati részén egy nagy kiterjedésű ipari terület felett is kialakul egy maximum, valamint környezeténél melegebb a város délnyugati részén található repülőtér is.

A zöldfelületek hősziget-mérséklő hatására is láthatunk példát Varsó esetében: a város északi felében, a belvároshoz viszonylag közel található nagyobb zöldfelület hidegebb közvetlen környezeténél. Az éjszakai képeken a város teljes területére kiterjed a hősziget, aminek átlagos intenzitása tavasztól őszi meghaladja a 4 °C-ot, télen pedig a 2 °C-ot.



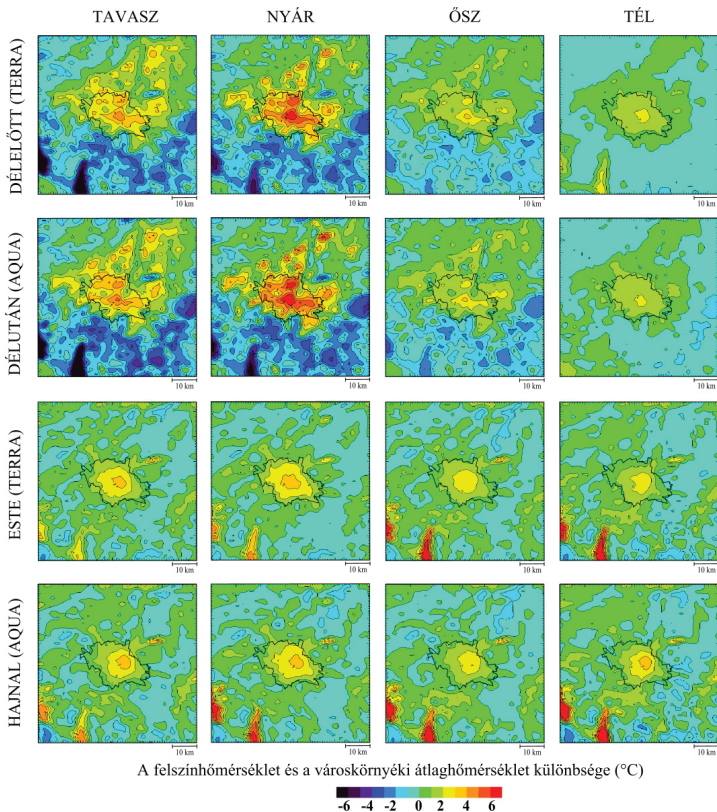
A felszínhőmérséklet és a városkörnyéki átlaghőmérséklet különbsége (°C)



24. ábra

A városi hősziget átlagos évszakos szerkezete Bécs térségében  
(Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)

A **24. ábra** Bécsre vonatkozóan mutatja be az egyes képpontok felszínhőmérsékletének a városkönyéki átlaghőmérséklettől vett eltérését. Bécs városszerkezetét tekintve hasonlít Budapestre, ennek megfelelően a hőmérsékleti mező alakulása is hasonló képet mutat. A várostól nyugatra-délnyugatra húzódó Bécsi-erdő hegyei a nappali képeken éles hőmérsékleti kontrasztot eredményeznek, hisz ez a terület nyáron 5-6 °C-kal hidegebb a városkönyéki átlaghőmérsékletnél, és több mint 10 °C-kal hidegebb a városközpont felszínhőmérsékleténél. A legtöbb képen a Duna is kirajzolódik, nappal hidegebb, éjszaka kicsit melegebb, mint a városkönyéki átlaghőmérséklet.



25. ábra  
A városi hősziget átlagos évszakos szerkezete München térségében  
(Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)



A nappali képeken a városi hőszigetet a Duna két részre osztja. A folyó jobb partján, a történelmi városközpont környékén a legerősebb a hősziget-hatás (átlagos intenzitása nyáron 5-6 °C), de a folyó bal partján is kialakul egy kisebb hősziget. Éjszaka a 2-3 °C-os intenzitású hősziget minden évszakban megjelenik, és az egész belvárosra kiterjed.

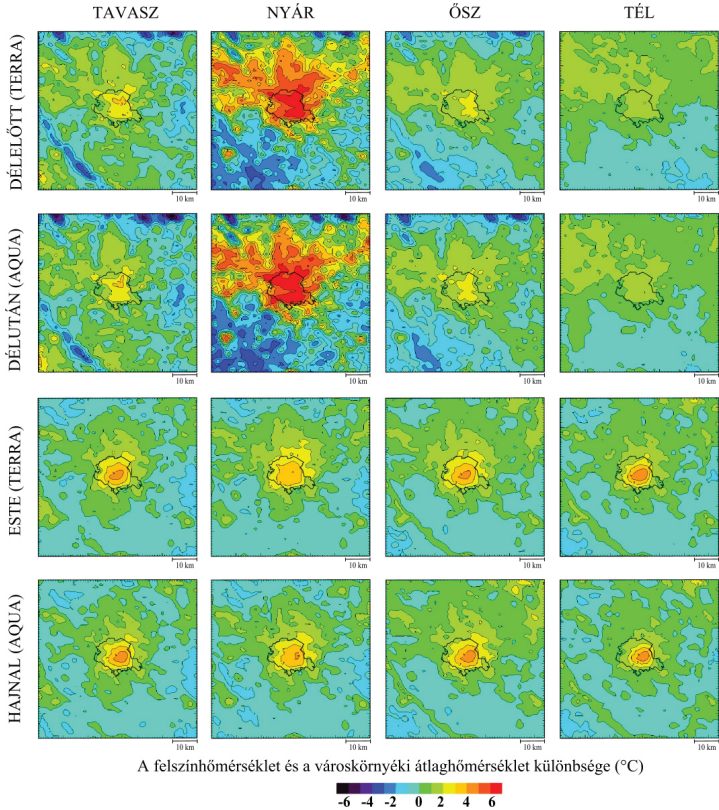
A **25. ábra** München térségére mutatja be az egyes képpontoknak a városkörnyéki átlaghőmérséklettel vett eltérését. A várost dél felől az Alpok nyúlványai határolják, a hegyek nappal jóval hidegebbek, mint a városkörnyéki átlaghőmérséklet. A képeken markánsan kirajzolódnak a közeli tavak is: a városközponttól ÉK-re található Speicher-tó és a kivágat DNY-i részén lévő Starnbergi-tó a nappali képeken tavasztól őszig negatív, míg télen nappal, illetve éjszaka mindegyik évszakban pozitív hőmérsékleti anomáliaként jelenik meg.

München esetében is megállapítható, hogy a nagy pozitív felszínhőmérsékleti anomália nemcsak a város központjában figyelhető meg, a felszínhőmérséklet nyáron szinte a város teljes területén meghaladja a 4-5 °C-ot. Ám a nyári nappali képeken jól beazonosíthatók a nagyobb parkok, erdők is, melyek ebben az időszakban több fokkal hidegebbek környezetüknél. A téli képeken is az egész város területén hőmérsékleti többlet figyelhető meg, a hősziget centruma a városközpontra tehető, intenzitása pedig meghaladja a 3 °C-ot.

A **26. ábra** a Milánóban kialakuló városi hőszigetet mutatja be. Milánó körül az évszázadok során fejlett agglomerációs városhálózat jött létre, így ma már a város az északi részén teljesen összenőtt a környező településekkel. Mi a definíciónk szerint a közigazgatási határon belül eső képpontokat vesszük figyelembe a városi átlaghőmérséklet számításánál, a város határán kívül eső beépített kategóriába eső pontokat sem a városi, sem a városkörnyéki átlaghőmérséklet meghatározásánál nem vesszük számításba. Milánó esetében az agglomerációs települések nagy kiterjedése miatt a városi hősziget a város határán is túl nyúlik. Ez különösen a nyári, nappali mezőkön belül szembetűnő, ahol a felszínhőmérséklet a város teljes területén legalább 5 °C-kal meghaladja a városkörnyéki átlaghőmérsékletet. Csak a város nyugati peremén van egy kisebb hőmérsékleti többlettel rendelkező terület, ahol néhány tó és zöldfelület némileg mérsékli a hősziget-hatást. A többi évszakban kisebb intenzitással ugyan, de szintén az egész városra kiterjed a hősziget.

Az éjszakai hőmérsékleti anomáliamezőket vizsgálva megállapíthatjuk, hogy Milánó esetében a többi városhoz képest éjszaka is erősebb hősziget-jelenséggel

találkozunk, a hősziget intenzitása mindegyik évszakban és időpontban meghaladja a 4 °C-ot.

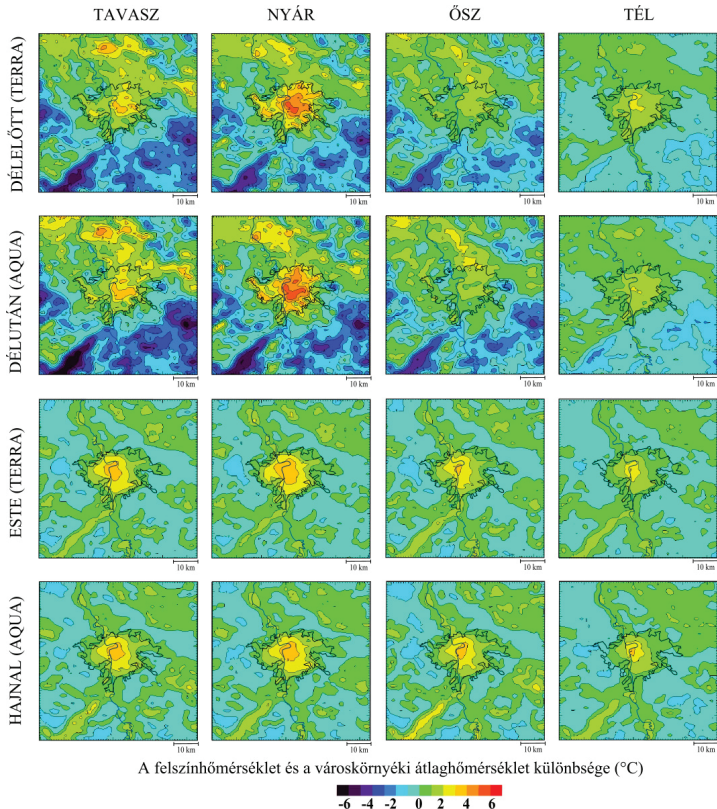


26. ábra  
A városi hősziget átlagos évszakos szerkezete Milánó térségében  
(Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)

A **27. ábra** Prága környékének felszínhőmérsékleti viszonyait mutatja be. A várost nyugat és dél felől hegyek határolják, és a Moldva folyó ketté osztja. A hősziget centruma a folyó jobb partján található. A bal parton a domboknak és a kiterjedt zöldfelületeknek köszönhetően kisebb mértékű a felszín felmelegedése. Nyáron nappal a hősziget intenzitása a belvárosban meghaladja az 5 °C-ot, télen 2-3 °C között alakul.

Az éjszakai képeken mindegyik évszakban 3 °C-ot meghaladó hőmérsékleti többlet figyelhető meg a városközpontban.

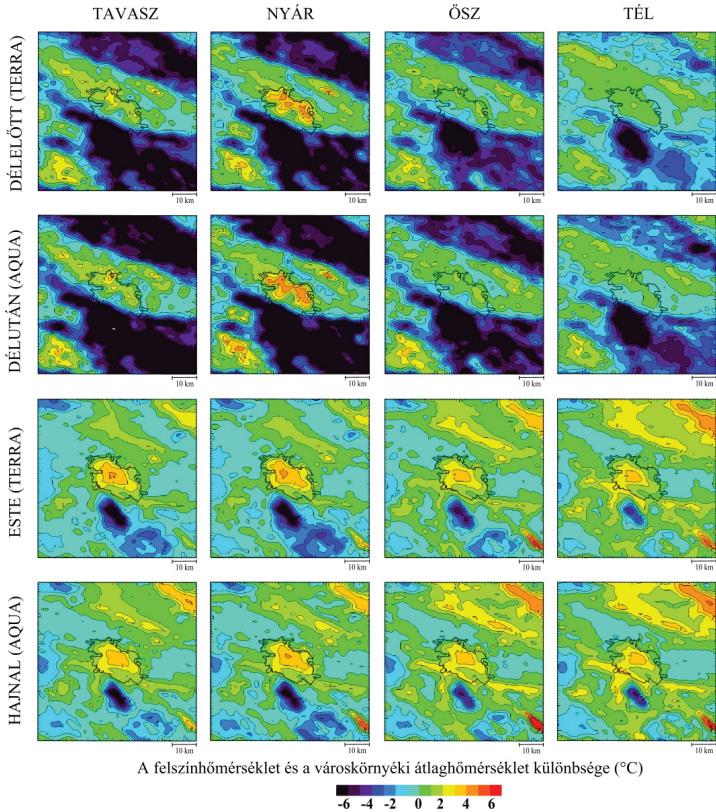
Megfigyelhető, hogy több helyen a belvárostól távolabb, a város peremén is relatíve magas a felszín hőmérséklete. E meleg pontok repülőteret (a város ÉNY-i szélén), illetve nagy kiterjedésű mesterséges felszínnel borított ipari és kereskedelmi egységeket (gyárakat, bevásárló központokat) jelölnek.



27. ábra

A városi hősziget átlagos évszakai szerkezete Prága térségében  
(Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)

A **28. ábra** az egyes képpontok felszínhőmérsékletének a városkörnyéki átlaghőmérséklettől vett eltérését mutatja be Szófia térségében. Szófia városa egy medencébe ékelődik, délről a Vitosa 2000 métert meghaladó csúcsai övezik, északon pedig a Golema-hegység határolja. A változatos domborzat a felszínhőmérsékleti mezőben is kirajzolódik, kis távolságon belül igen jelentős hőmérsékleti kontraszt alakul ki.



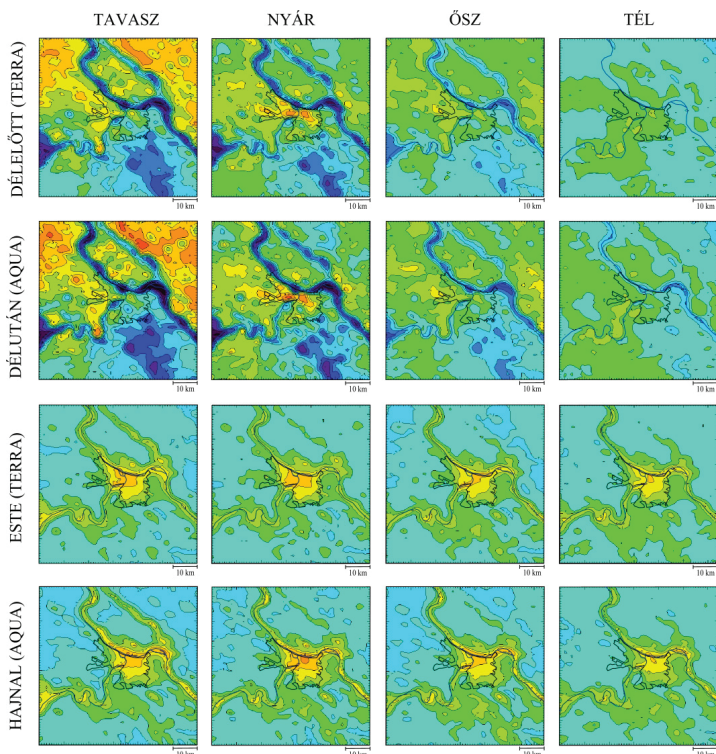
A felszínhőmérséklet és a városkörnyéki átlaghőmérséklet különbsége (°C)

28. ábra

A városi hősziget átlagos évszakos szerkezete Szófia térségében  
(Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)

A nappali órákban jelentős, az egész városra kiterjedő hősziget-hatás csak nyáron alakul ki, ekkor a belváros felszínhőmérséklete 4-5 °C-kal haladja meg a

városkörnyéki átlaghőmérsékletet. Tavasszal, ősszel és télen csak a város területének egy részén alakul ki a városkörnyékhez képest felszínhőmérsékleti többlet, és ennek mértéke csupán 1-2 °C. Ezzel szemben éjszaka mindegyik évszakban kialakul a városi hősziget, ennek intenzitása a városközpontban meghaladja a 3-4 °C-ot. Látható, hogy – a korábban bemutatott városokhoz hasonlóan – az alacsonyabb hegyek felszíne melegebb a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél, és csak a Vitosa hegység legmagasabb része hidegebb annál.



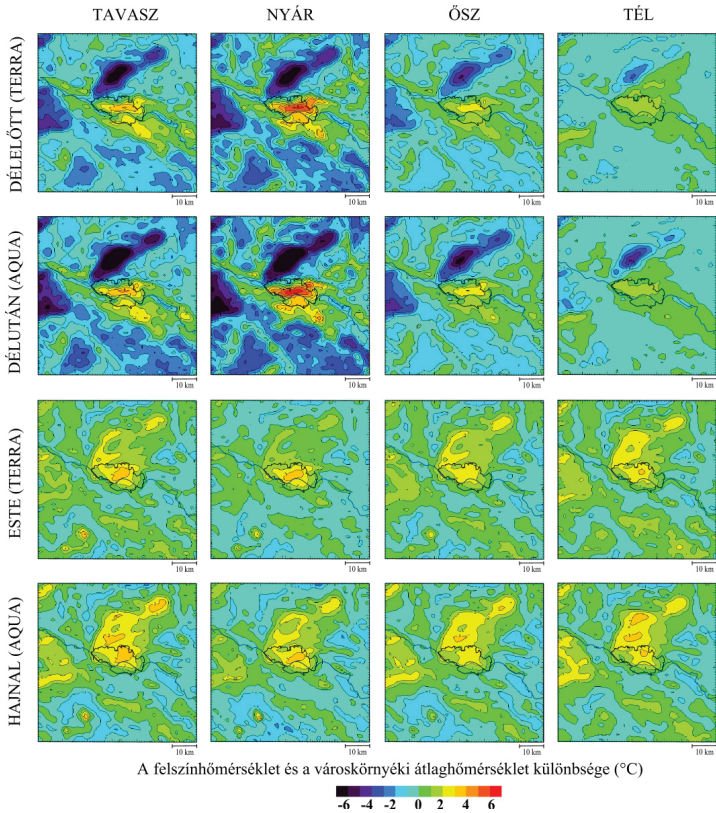
A felszínhőmérséklet és a városkörnyéki átlaghőmérséklet különbsége (°C)



29. ábra

A városi hősziget átlagos évszaki szerkezete Belgrád térségében  
(Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)

A 29. ábrán a Belgrádban kialakuló városi hősziget szerkezete figyelhető meg. A várost északról érinti a Duna, és Belgrád területén torkollik a Dunába a Száva. A felszínhőmérsékleti képeken mindkét folyó kirajzolódik, nappal hidegebbek, éjszaka melegebbek környezetüknél.



30. ábra

A városi hősziget átlagos évszakos szerkezete Zágráb térségében  
(Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)

A nappali képek közül csupán a nyári felvételeken figyelhető meg számottevő intenzitású hősziget, aminek két maximuma a belváros területén a Száva jobb és bal partján figyelhető meg, intenzitása pedig 4 °C körül alakul. A városközponttól délre nagy kiterjedésű zöldfelületek találhatók, melyek hidegebbek közvetlen környezetüknél.

A többi évszakban a nappali mezőkön a város területén csak 1-2 °C-os felszínhőmérsékleti többlet jelenik meg, és tavasszal a Belgrádtól ÉNY-ra és ÉK-re található szántóföldek kifejezetten melegebbek a város felszínénél. Az éjszakai képeken a városi hősziget mindegyik évszakban kirajzolódik, magjának intenzitása 3-4 °C körül alakul.

A **30. ábra** Zágráb térségének felszínhőmérsékleti viszonyait mutatja be. A város a Medvednica-hegység déli lábánál, a Száva partján terül el. A hegyek és a folyó felszínének hőmérséklete hasonlóan alakul, mint a korábban bemutatott városok esetében, azok nappal hidegebbek, éjszaka melegebbek, mint környezetük.

A városi hősziget minden évszakban és napszakban megfigyelhető, a legerősebb hősziget a nyári nappali képeken jelenik meg: a Száva bal partján a városközpontban a felszínhőmérséklet ekkor több mint 6 °C-kal haladja meg a városkörnyéki átlaghőmérsékletet. Télen a hősziget intenzitása 1-2 °C.

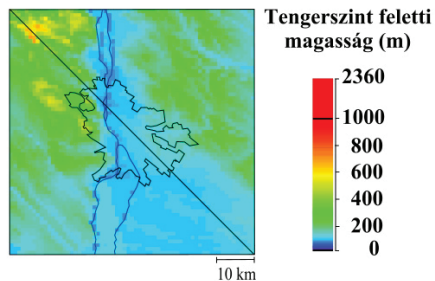
Éjszaka a város területén a felszínhőmérséklet 2-4 °C-kal haladja meg a városkörnyéki átlaghőmérsékletet.

## 4.2. A városi hősziget keresztmetszete

Az előző fejezetben a hősziget térbeli alakulását vizsgáltuk, melynek során meghatároztuk az egyes képpontok felszínhőmérsékletének a városkörnyéki átlaghőmérséklettől vett eltérését, majd ezt a teljes, 8 éves időszakra átlagoltuk évszakonként. Terjedelmi korlátok miatt sajnos nincs lehetőség e szerkezeti ábrának a kisebb időbeli felbontású idősorát bemutatni, melyek segítségével vizsgálható lenne a hősziget-jelenség hónapok, évek közötti változékonysága. Ezért minden város esetében elkészítettük a négy fő irány (É-D, NY-K, ÉNY-DK, DNY-ÉK) szerinti keresztmetszet havi bontású idősorát, melyek közül e dolgozatban a város felszínhőmérsékleti viszonyait legjobban reprezentáló irány szerinti idősort mutatjuk be. Mivel az egyes városokban kialakuló városi hősziget átlagos tulajdonságainak elemzését a korábbiakban már ismertettük, ebben a fejezetben elsősorban az időbeli változékonyságból adódó jellegzetességeket mutatjuk be.

### 4.2.1. A városi hősziget keresztmetszete Magyarország nagyvárosaiban

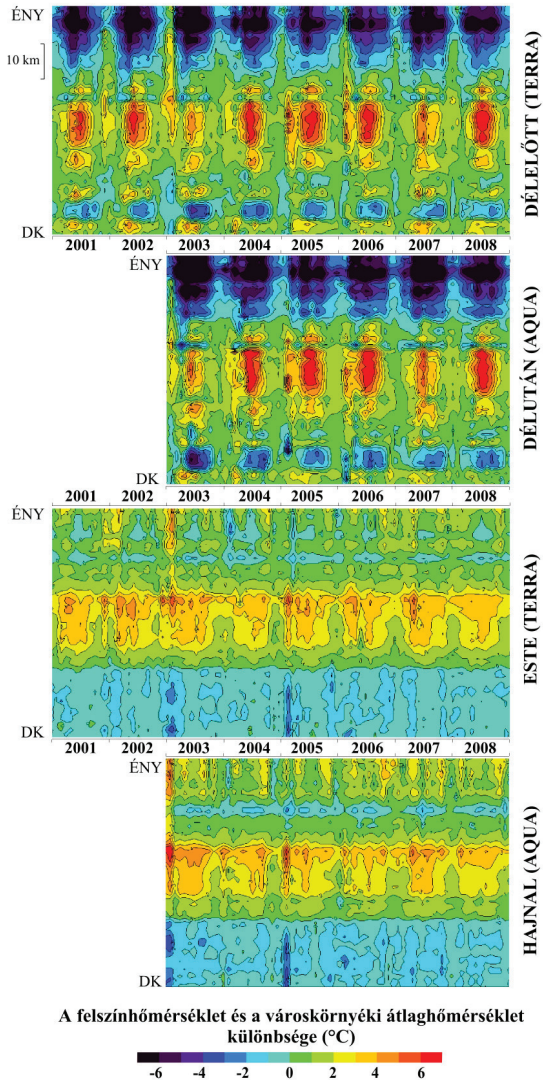
Budapest esetében az ÉNY-DK-i tengely mentén vizsgáltuk a hősziget keresztmetszetének időbeli alakulását. A **31. ábrán** a metszészonal földrajzi elhelyezkedése, a **32. ábrán** pedig a felszínhőmérsékleti anomália időbeli alakulása látható.



31. ábra

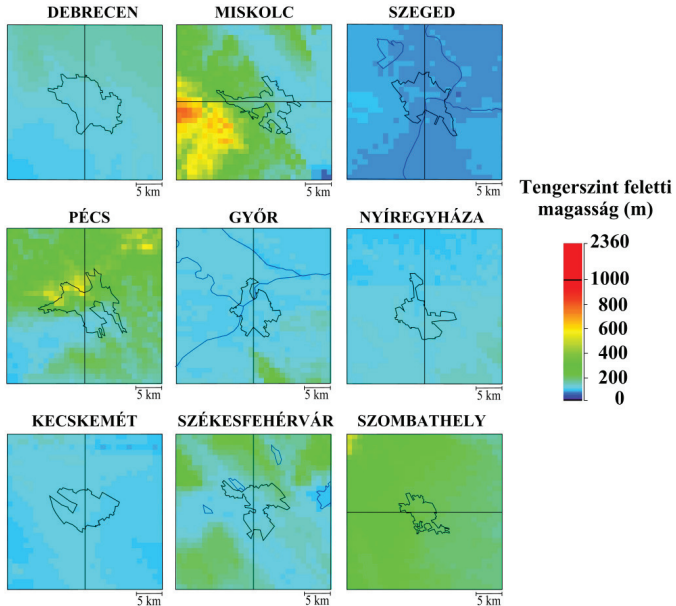
Budapest és környékének topográfija a GTOPO30 digitális magassági mező adatbázis alapján





32. ábra  
 A havi átlagos városi hősziget ÉNY-DK-i keresztmetszeti képe Budapest esetén  
 (Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)

A nappali képeken megfigyelhető a városi hősziget intenzitásának nyári maximuma, aminek értéke az egyes években különböző volt. A legtöbb évben a belvárosban a felszínhőmérséklet városkörnyéki átlaghőmérséklettől vett eltéréésének havi átlaga bizonyos nyári hónapokban a 6 °C-ot is meghaladta. Ez az állapot 2005-ben és 2008-ban állt fenn a leghosszabb ideig, ekkor három hónapon keresztül haladta meg a 6 °C-ot a városi hősziget havi átlagos intenzitása a belvárosban.



33. ábra

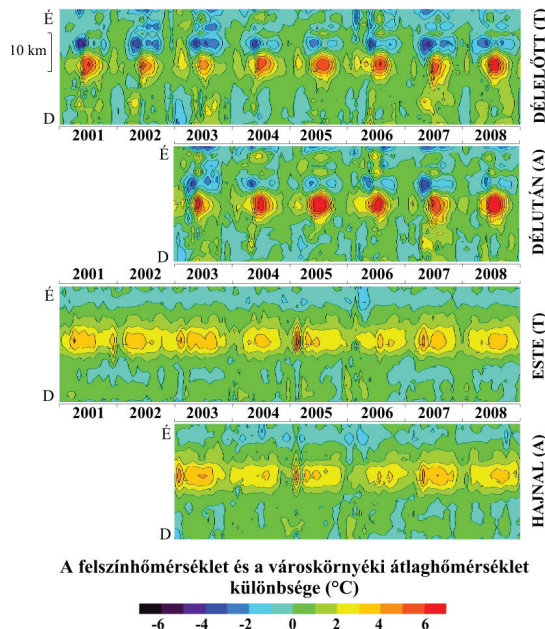
A magyarországi nagyvárosok környékének topográfiája a GTOPO30 digitális magassági mező adatbázis alapján

Két olyan év is volt, amikor a műholdas felszínhőmérsékleti mérések alapján a többi évhez viszonyítva kisebb hősziget-intenzitást detektáltunk, 2003-ban és 2007-ben. Ekkor a belvárosban a városkörnyéki átlaghőmérséklethez viszonyított anomália nyáron is csak 4-5 °C körül alakult, és ez az intenzitás kisebb területen, rövidebb ideig állt fenn. Ennek hátterében valószínűleg az akkori időjárási viszonyok állnak: a nyári hónapokban a hőmérséklet jóval az átlag felett, a csapadék mennyisége pedig az alatt alakult. Ez azt eredményezte, hogy a városon kívül sem állt rendelkezésre megfelelő mennyiségű

nedvesség a párolgáshoz, így a városkörnyéki területek az átlagosnál jobban felmelegedtek. Tehát nem a város volt „hidegebb”, hanem a környék volt „melegebb”, ami e két terület átlaghőmérséklet-különbségének csökkenéséhez vezetett.

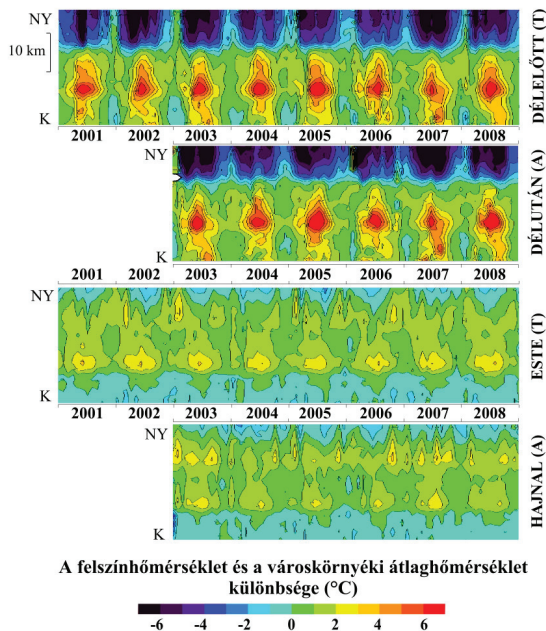
Az éjszakai idősorok kiegyenlítettebb képet mutatnak. Itt is megfigyelhető, hogy a hősziget a téli félévben némileg visszahúzódik, de a téli és a nyári időszak között kisebb a különbség, mint nappal.

Ugyanezt a vizsgálatot a többi magyarországi városra is elvégeztük. A **33. ábrán** az összes város digitális magassági térképén bejelöltük azt a metszésvonalat, ami mentén meghatároztuk az egyes képpontok városkörnyéki átlaghőmérséklettől vett eltérést, majd ennek időbeli alakulását vizsgáltuk. Debrecen, Szeged, Pécs, Győr, Nyíregyháza, Kecskemét és Székesfehérvár esetében az É-D-i, Miskolc és Szombathely esetében pedig a NY-K-i keresztmetszet mentén mutatjuk be a felszínhőmérsékleti anomália időbeli alakulását.



34. ábra  
A havi átlagos városi hősziget É-D-i keresztmetszeti képe Debrecen esetén (Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)

A **34. ábra** Debrecen É-D-i keresztmetszetének felszínhőmérsékleti anomália-idősorát mutatja be. A nappali képeken Budapesthez hasonlóan itt is 5-6 °C-os hősziget-maximumok figyelhetők meg a nyári hónapokban, illetve a belvárosban a felszínhőmérsékleti anomália éves menetében télen egy másodlagos 1-3 °C-os maximum is megfigyelhető a legtöbb évben. Eszerint a nappali mérések során tavasszal és ősszel tapasztalható a legkisebb különbség a város és a városkörnyék felszínhőmérséklete között, ennél valamivel nagyobb a különbség télen, és ennél több fokkal nagyobb nyáron. Itt is megfigyelhető, hogy 2003-ban és 2007-ben kicsit gyengébb volt a hősziget-jelenség, és 2005-ben, valamint 2008-ban volt a legerősebb.



35. ábra

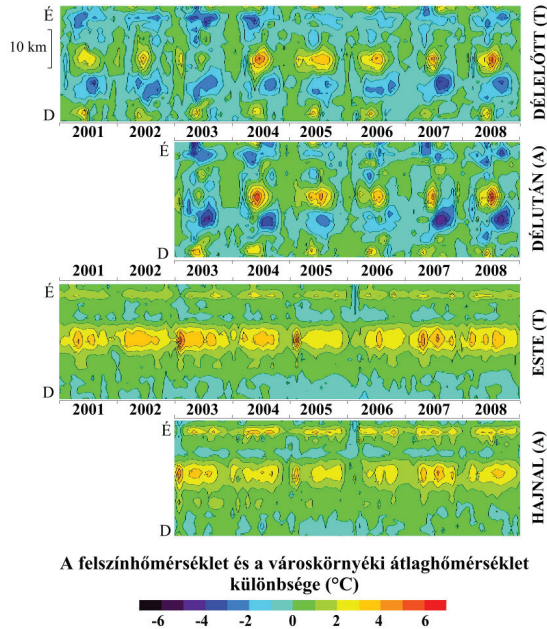
A havi átlagos városi hősziget NY-K-i keresztmetszeti képe Miskolc esetén (Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)

A **35. ábra** Miskolc esetében mutatja be a városi hősziget keresztmetszetének idősorát. Mivel Miskolc a NY-K-i metszésvonal mentén a legnagyobb kiterjedésű, illetve a város nyugati széle mélyen benyúlik a Bükk hegységbe, ezért e keresztmetszetnek az idősorát mutatjuk be. A nappali órákban nyáron Miskolc esetében

is 6 °C felett alakul a belvárosban a felszínhőmérsékletnek a városkörnyéki átlaghőmérséklettől vett eltérése. Ennek az igen erős pozitív hőmérsékleti anomáliával rendelkező szakasznak a térbeli kiterjedése is nagy, meghaladja az 5 km-t. E meleg városközponti hősziget-maggal éles kontrasztban áll a várostól nyugatra található hegyvidéki terület, melynek nyáron nappal igen alacsony a felszínhőmérséklete. Így a város NY-K-i keresztmetszete mentén 15 km-es távolságon belül 12 °C-ot meghaladó különbség alakul ki a felszínhőmérsékletben.

Ha az éjszakai méréseket tekintjük, megállapíthatjuk, hogy ebben az esetben is nyáron alakul ki a belvárosban a legnagyobb pozitív felszínhőmérsékleti anomália, ami meghaladja a 3 °C-ot. Éjszaka a hegyvidék alacsonyabban fekvő része melegebb a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél.

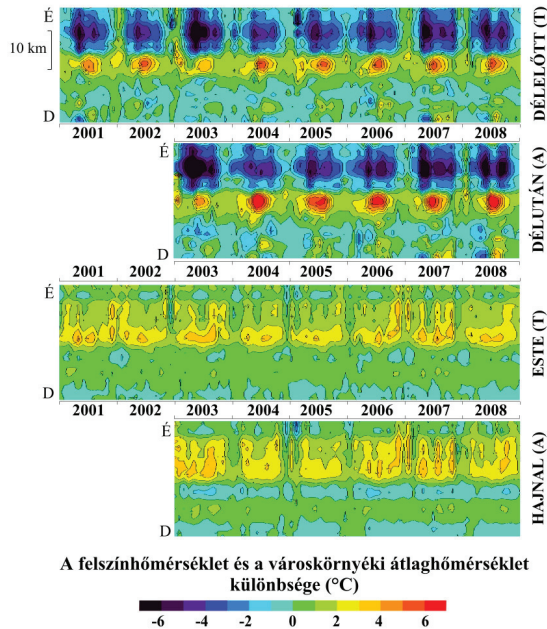
Az ábrán megfigyelhető a hősziget változásának napi menete is: a nappali megfigyelések közül a délutánin jelenik meg intenzívebb hősziget-jelenség, míg éjszaka a pozitív felszínhőmérsékleti anomália késő este nagyobb, hajnalban kisebb.



36. ábra  
A havi átlagos városi hősziget É-D-i keresztmetszeti képe Szeged esetén  
(Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)

A **36. ábra** Szeged É-D-i keresztmetszete mentén mutatja be a felszínhőmérsékleti anomália időbeli alakulását. Már a korábbiakban is utaltunk rá, hogy Szeged esetében nappal gyengébb, és éjszaka erősebb a hősziget-jelenség. A nappali idősorokon jól látszik, hogy a város területén csupán a nyári hónapokban figyelhető meg pozitív hőmérsékleti anomália, ennek mértéke a belvárosban az évek többségében 4-5 °C körül alakul. Ennél alacsonyabb érték figyelhető meg 2003-ban, amikor a hősziget átlagos intenzitása még a belvárosban sem haladja meg a 2 °C-ot.

Éjszaka a metszévonal teljes városi szakaszán pozitív hőmérsékleti anomália figyelhető meg minden évszakban, a legmelegebb részeken és időszakokban ennek mértéke meghaladja a 4 °C-ot.



37. ábra

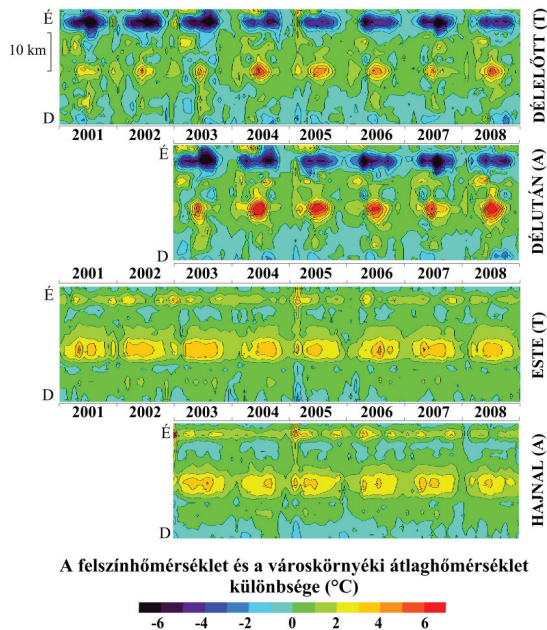
A havi átlagos városi hősziget É-D-i keresztmetszeti képe Pécs esetén (Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)

A **37. ábra** Pécs É-D-i keresztmetszete mentén mutatja be a felszínhőmérsékleti anomália időbeli alakulását. Mivel Pécs a Mecsek déli lábához épült, ezért a hegyek és a belváros között kialakuló éles felszínhőmérsékleti kontraszt a nappali képeken itt is

megjelenik. Éjszaka viszont – a városhoz hasonlóan – a hegyek is melegebbek, mint a városkörnyéki átlaghőmérséklet.

Nyáron a belvárosban délelőtt 5 °C, délután 6 °C feletti maximumok figyelhetők meg a felszínhőmérsékleti anomália-mezőben, tehát a besugárzás növekedésével a hősziget-hatás is erősödik. Ennél gyengébb intenzitás csak a 2003-as esztendőben tapasztalható, aminek okát már Budapest esetében elemeztük.

A **38. ábrán** a győri hősziget É-D-i keresztmetszetének időbeli változása látható. Mind a nappali, mind az éjszakai idősorokon kirajzolódik a Duna az ábrák északi részén. A folyó a nappali képeken általában hidegebb a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél, csupán a délelőtti képeken néhány téli hónapban fordul elő némi pozitív hőmérsékleti anomália; éjszaka viszont melegebb környezeténél.

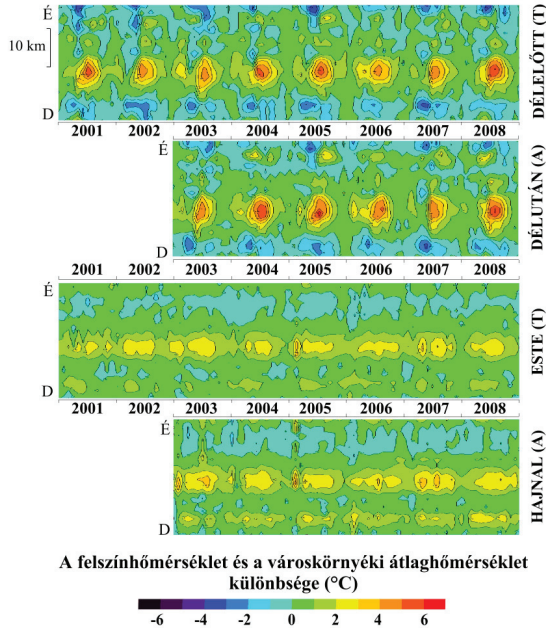


38. ábra  
A havi átlagos városi hősziget É-D-i keresztmetszeti képe Győr esetén  
(Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)

A városi hősziget intenzitásának időbeli alakulása mind nappal, mind éjszaka hasonló képet mutat, mint a korábban bemutatott városok esetében. Ezeken az ábrákon

is jól kimutatható a hősziget intenzitásváltozásának napi menete: nappal délután, míg az éjszakai képek közül késő este figyelhető meg erősebb intenzitás.

A **39. ábra** Nyíregyháza É-D-i keresztmetszete mentén mutatja be a felszínhőmérsékleti anomália időbeli alakulását. Ennek menete nagyon hasonlít a korábban bemutatott városokéra: nyáron nappal 4-6 °C-os hőmérsékleti többlet jelentkezik a belváros területén, míg télen ez az érték csak 1-2 °C. Éjszaka 1-3 °C körül alakul a hősziget intenzitása a belvárosban.



A felszínhőmérséklet és a városkörnyéki átlaghőmérséklet különbsége (°C)

39. ábra

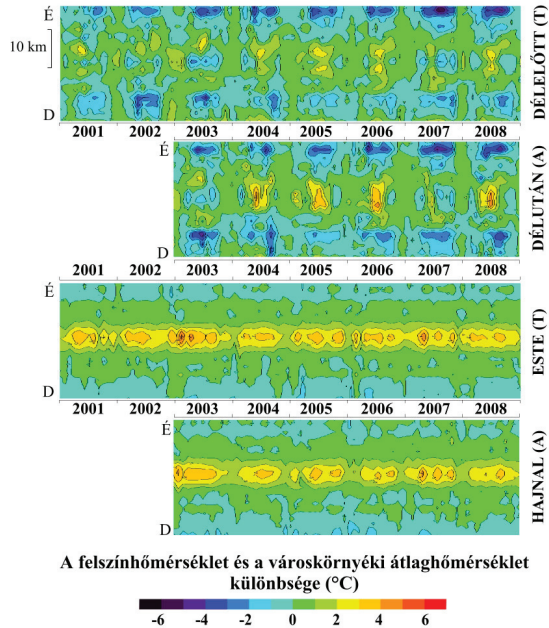
A havi átlagos városi hősziget É-D-i keresztmetszeti képe Nyíregyháza esetén (Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)

Kecskemét esetében az É-D-i keresztmetszet mentén a felszínhőmérsékleti anomália idősora hasonlóan alakul, mint Szeged esetében, ahogy az a **40. ábrán** látható. Dél előtt az év legnagyobb részében mindössze 1-2 °C-os hőmérsékleti többlet alakul ki a város területén, sőt néhány hónapban a városban a felszínhőmérséklet alacsonyabb a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél. Délután a nyári időszakban a városközpont



hőöbblete valamivel nagyobb mértékű, 3-4 °C körüli, kivételt képez ez alól a 2003-as és 2007-es év, amikor a belváros még nyáron sem volt melegebb környezeténél.

Éjszaka a metszésvonal teljes városi szakaszán pozitív felszínhőmérsékleti anomália figyelhető meg, ennek mértéke 2-4 °C.

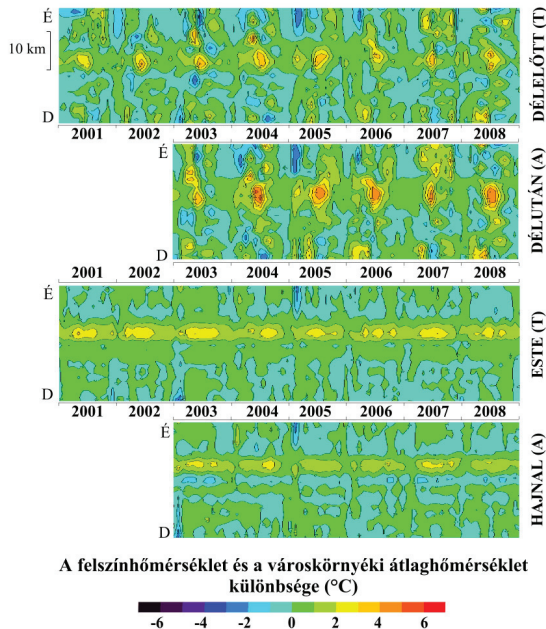


40. ábra

A havi átlagos városi hősziget É-D-i keresztmetszeti képe Kecskemét esetén (Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)

A **41. ábra** Székesfehérvár térségében mutatja be az É-D-i keresztmetszet mentén a felszínhőmérsékleti anomália alakulását. A délelőtti képen csak a nyári hónapokban alakul ki jelentősebb pozitív hőmérsékleti anomália a város területén, ennek maximális értéke 3-4 °C között alakul. A délutáni képen már erősebb hősziget-jelenség rajzolódik ki 4-5 °C közötti maximumokkal és nagyobb térbeli kiterjedéssel.

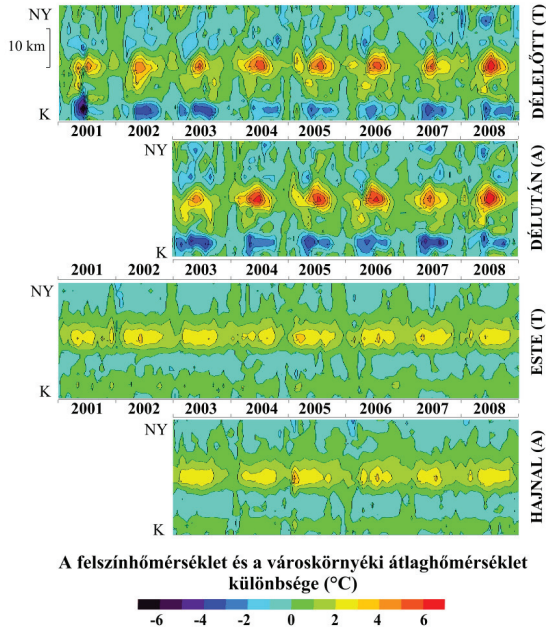
Az éjszakai képek közül a késő estin figyelhető meg nagyobb mértékű és térbeli kiterjedésű hőöbblet a város területén: ennek maximális értéke nyáron 2-3 °C között alakul.



41. ábra

A havi átlagos városi hősziget É-D-i keresztmetszeti képe Székesfehérvár esetén  
(Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)

A **42. ábrán** Szombathely esetében a NY-K-i keresztmetszet mentén mutatjuk be a felszínhőmérsékleti anomália idősorát. Szombathelytől nyugatra az Alpokalja keleti nyúlványai emelkednek, melyek nappal valamivel hidegebbek a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél. A nyári időszakban a belvárosban nappal 5-6 °C-os, éjszaka pedig 2-3 °C-os felszínhőmérsékleti többlet tapasztalható, télen nappal és éjszaka egyaránt 1-3 °C-kal magasabb a belváros felszínhőmérséklete a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél.

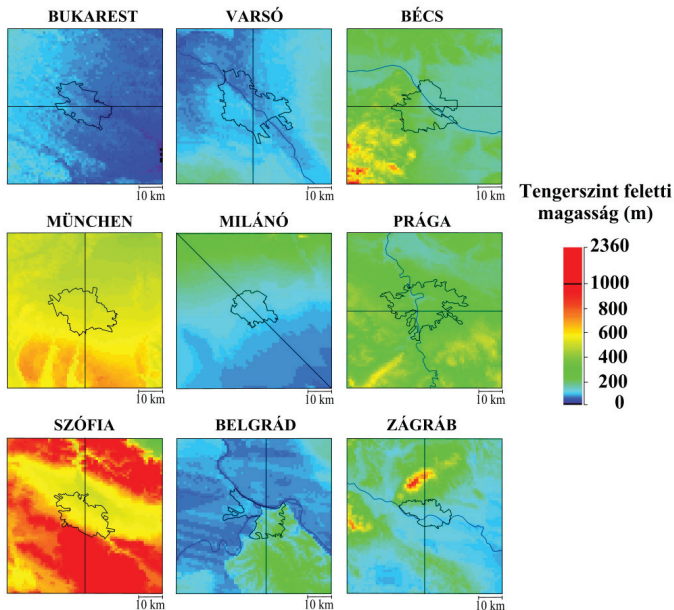


42. ábra

A havi átlagos városi hősziget NY-K-i keresztmetszeti képe Szombathely esetén (Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)

#### 4.2.2. A városi hősziget keresztmetszete Közép-Európa nagyvárosaiban

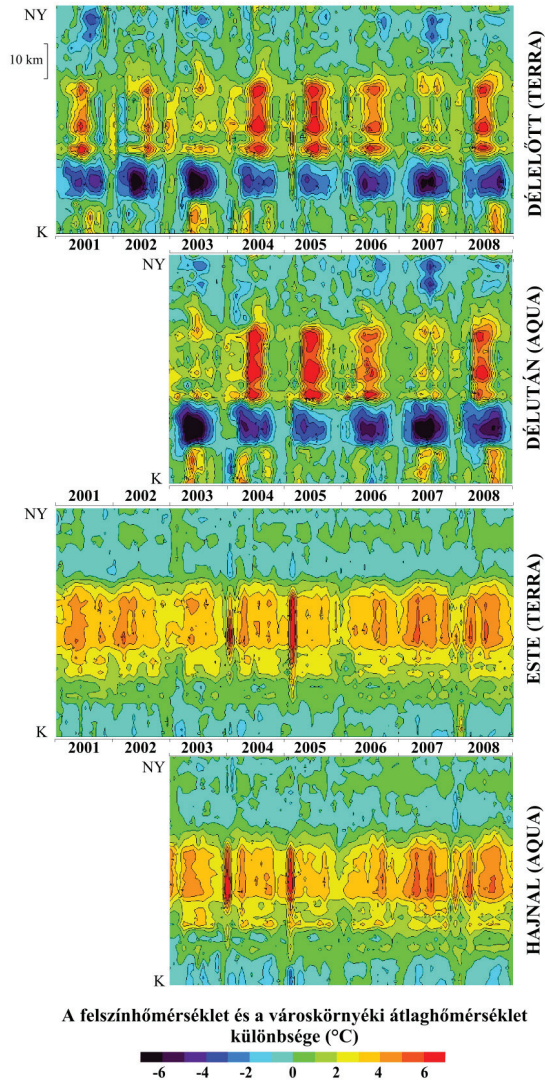
A fenti vizsgálatot Közép-Európa nagyvárosaira vonatkozóan is elvégeztük. A **43. ábrán** az összes város digitális magassági térképén bejelöltük azt a metszévonalat, ami mentén a hősziget keresztmetszetét, valamint annak időbeli változását vizsgáltuk. Bukarest, Bécs és Prága esetében a NY-K-i, Varsó, München, Szófia, Belgrád és Zágráb esetében az É-D-i, Milánó esetében pedig az ÉNY-DK-i keresztmetszetet találtuk a legkarakterisztikusabbnak. E dolgozatban ezek mentén határoztuk meg az adott képpontnak a városkörnyéki átlaghőmérséklettől vett eltérését, és ennek 6 éves (az Aqua esetében), illetve 8 éves (a Terra esetében) havi bontású adatsorát.



43. ábra

A közép-európai nagyvárosok környékének topográfiája a GTOPO30 digitális magassági mező adatbázis alapján

A **44. ábra** Bukarest térségében mutatja be a NY-K-i keresztmetszet mentén a felszínhőmérsékleti anomália időbeli alakulását. A metszévonal érinti a város keleti szélén található Pantelimon tavat és az attól keletre található erdőt, ami nappal hidegebb, éjszaka melegebb a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél. Ha a nappali képeket megvizsgáljuk, megállapíthatjuk, hogy a nyugat-keleti tengely mentén három hőmérsékleti maximum figyelhető meg. A legnyugatibb a város széléhez közel található, ami egy ipari-kereskedelmi övezetnek felel meg, a másik kettő pedig a belváros területére esik, amit kettő oszt a Dambovita folyó. A legmelegebb hónapokban a gócpontokban a felszínhőmérséklet több mint 5 °C-kal haladja meg a városkörnyéki átlaghőmérsékletet. Itt is megfigyelhető, hogy 2003-ban és 2007-ben gyengébb volt a hősziget-jelenség, ami hasonló okokkal magyarázható, mint a hazai nagyvárosok esetében.

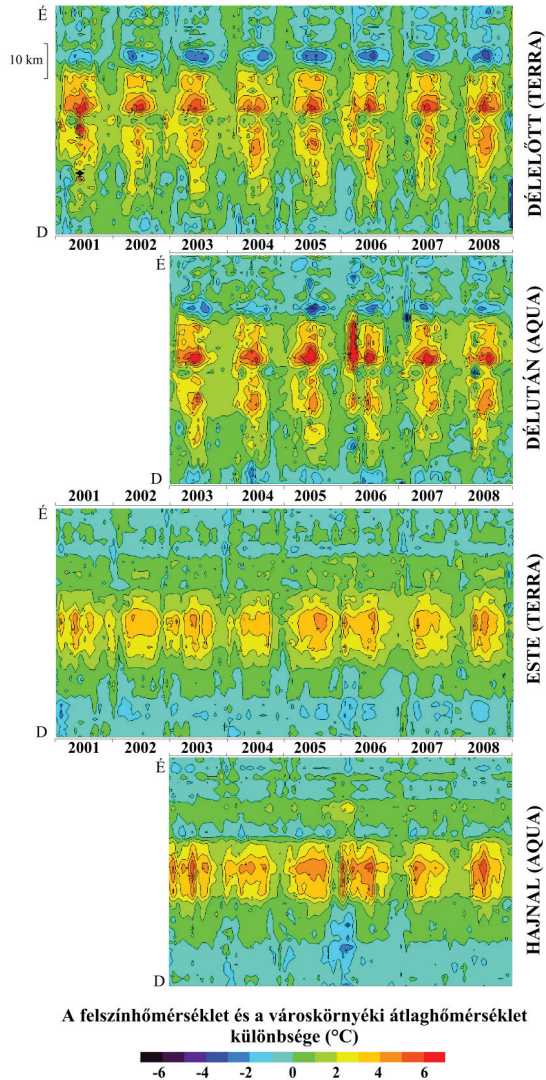


A felszínhőmérséklet és a városkörnyéki átlaghőmérséklet különbsége (°C)



44. ábra

A havi átlagos városi hősziget NY-K-i keresztmetszeti képe Bukarest esetén (Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)



45. ábra  
A havi átlagos városi hősziget É-D-i keresztmetszeti képe Varsó esetén (Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)

Az éjszakai idősorokat vizsgálva megállapíthatjuk, hogy a felszínhőmérséklet az egész város területén, a teljes időszakban meghaladja a városkörnyéki átlaghőmérsékletet, és ez a pozitív hőmérsékleti anomália esetenként az 5 °C-ot is eléri.

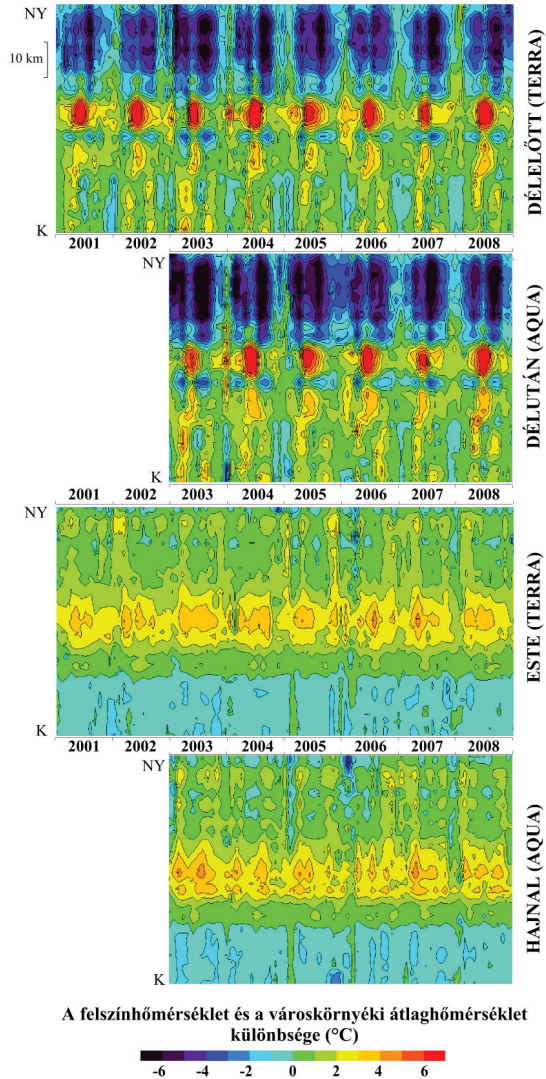
A **45. ábrán** a felszínhőmérséklet városkörnyéki átlaghőmérséklettől vett eltéréseinek idősora Varsó É-D-i keresztmetszete mentén látható. A nappali képeken kirajzolódik a Visztula hatása: a folyó környezetében mérséklődik a hősziget-hatás, így annak vonalában több fokkal alacsonyabb a felszínhőmérséklet, mint attól északra és délre. A legmelegebb terület a folyó jobb partján található, itt nyáron a felszínhőmérséklet több mint 6 °C-kal meghaladja a városkörnyéki átlaghőmérsékletet, de a felszínhőmérsékleti többlet a bal parton is eléri esetenként az 5 °C-ot.

Varsó esetében éjszaka is viszonylag nagy a felszínhőmérsékleti anomália éven belüli változékonysága, a belvárosban a nyári időszakban 2-3 °C-kal nagyobb hőmérsékleti többlet jelentkezik, mint télen.

A **46. ábra** a bécsi városi hősziget NY-K-i keresztmetszetének idősorát mutatja be. Az ábrákon kirajzolódnak a város topográfiai sajátosságai. Nyugat felől a hegyek felszíne nappal hidegebb, éjszaka 1-2 °C-kal melegebb, mint a városkörnyéki átlaghőmérséklet. A hősziget intenzitásának maximuma a nyári időszakban jelentkezik, nappal a Dunától nyugatra a belváros területén 6 °C-ot meghaladó felszínhőmérsékleti anomália figyelhető meg. A Dunától keletre is kialakul egy másodlagos maximum, itt nyáron a felszínhőmérséklet 3-4 °C-kal haladja meg a városkörnyéki átlaghőmérsékletet.

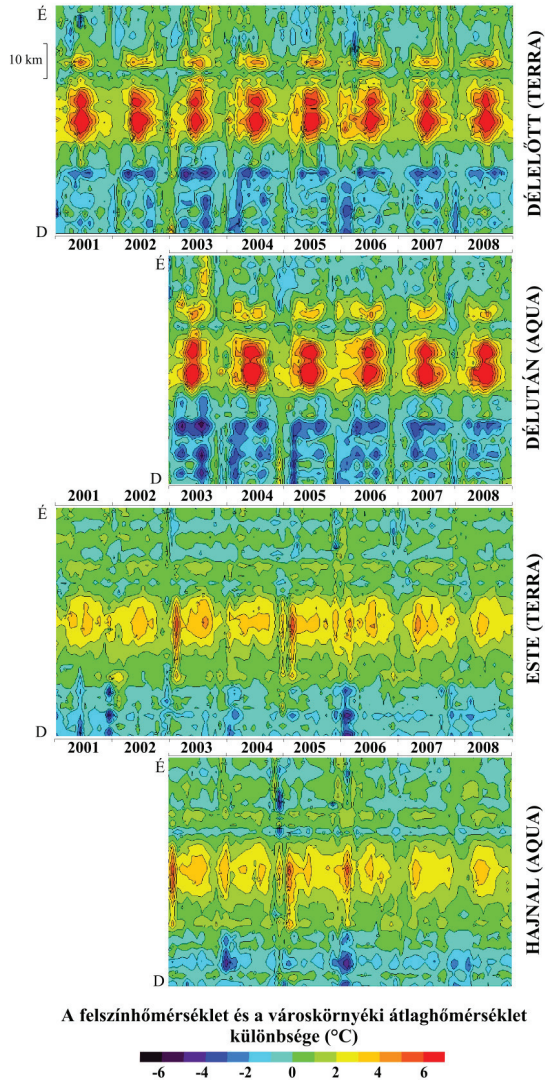
Éjszaka télen 1-2, nyáron 3-4 °C-os hőmérsékleti többlet jelentkezik a belváros területén. A késő esti ábrán a Duna felszínhőmérséklete alapján nem különül el a város többi részétől, ezzel szemben a hajnali képen a legtöbb hónapban a folyó felszínének, illetve közvetlen környezetének hőmérséklete már alacsonyabb, mint az azt körülvevő városfelszín hőmérséklete.

A **47. ábra** München É-D-i tengelye mentén mutatja be az egyes képpontok és a városkörnyéki átlaghőmérséklet különbségének idősorát. Az intenzitás mértékét és a maximumok időbeli eloszlását tekintve München esetében – nappal és éjszaka egyaránt – a korábban bemutatott városokhoz hasonló kép tárul elénk. A nyári időszakban nappal két hősziget-maximum figyelhető meg az ábrákon, ezek között viszonylag alacsonyabb a felszínhőmérséklet. Ez a lokális minimum a városközponttól északra található Olimpia Park területének felel meg. Itt a nagy zöld- illetve vízfelület mérsékli a hősziget-hatást, sok esetben 2-3 °C-kal.



46. ábra  
 A havi átlagos városi hősziget NY-K-i keresztmetszeti képe Bécs esetén  
 (Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)





47. ábra  
A havi átlagos városi hősziget É-D-i keresztmetszeti képe München esetén  
(Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)

Éjszaka a belvárosban évszaktól függően 2-4 °C-os felszínhőmérsékleti többlet tapasztalható a városkörnyéki átlaghőmérséklethez viszonyítva. Megfigyelhető, hogy a késő esti képhez viszonyítva hajnalra némileg mérséklődik a hősziget-hatás.

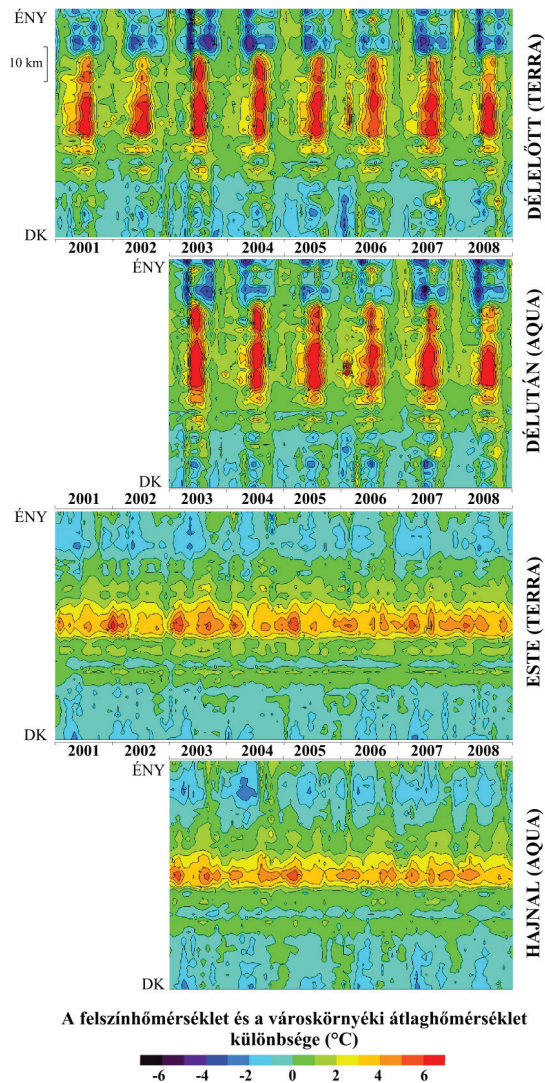
Milánó esetében az ÉNY-DK-i tengely mentén mutatjuk be a városi hősziget keresztmetszetének idősorát, ezt tartalmazza a **48. ábra**. Ahogy már a *4.1.2. fejezetben* említettük, Milánó teljesen összenőtt a környező agglomerációs településekkel. Ennek megfelelően az ábrákon is nagy területen látható jelentős felszínhőmérsékleti többlet. Ennek mértéke nyáron – még a város peremén is – meghaladja a 6 °C-ot.

Éjszaka is jelentős intenzitás figyelhető meg a város területén. A késő esti időszoron sok esetben 5 °C feletti maximumok is előfordulnak. Hajnalra némileg csökken a hősziget-hatás, ekkor 4 °C körül alakul a felszínhőmérsékleti anomália mértéke a belvárosban.

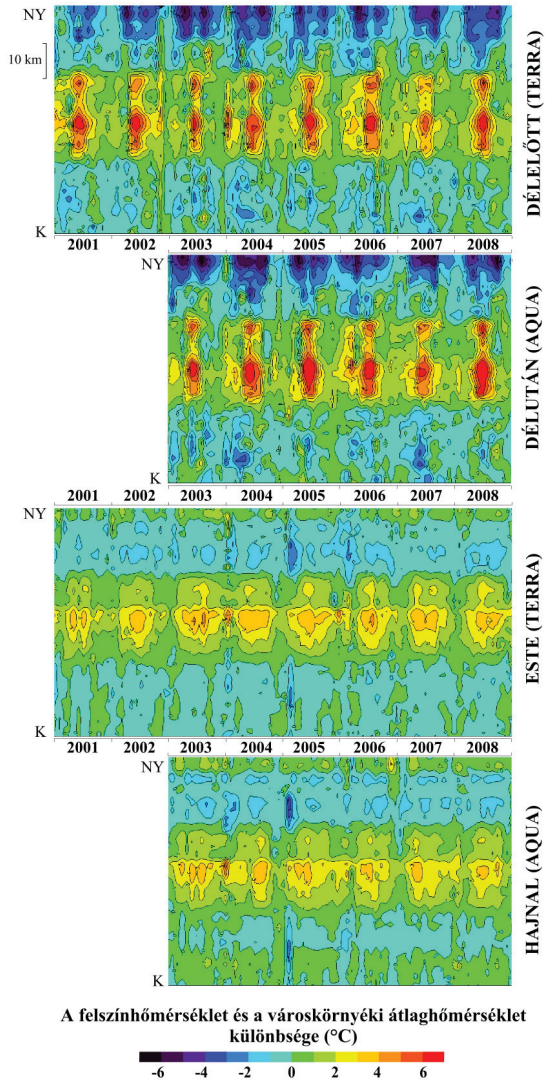
A **49. ábrán** a Prága területén kialakuló hősziget NY-K-i keresztmetszetének idősora látható. A várostól nyugatra hegyek találhatók, melyek felszíne nappal 5-6 °C-kal hidegebb a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél. A várost kettéosztja a Moldva folyó, ami nappal és éjszaka is mérsékli a hősziget-hatást. Nappal nyáron a folyó mindkét oldalán 5-6 °C-kal melegebb a város felszíne a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél, ám a folyó közvetlen környezetében e hőmérsékleti többlet 2-3 °C-kal kevesebb. Éjszaka a folyótól keletre, a belvárosban 3-4 °C a hősziget intenzitása, míg nyugatra ennél 1-2 °C-kal kevesebb. Maga a vízfelszín és annak közvetlen környezete éjszaka 1-2 °C-kal melegebb a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél.

Az **50. ábrán** Szófia É-D-i keresztmetszete mentén az egyes képpontok felszínhőmérséklete és a városkörnyéki átlaghőmérséklet különbségének idősora látható. A várost észak és dél felől egyaránt magas hegyek veszik körül, ami a metszéspont mentén jelentős különbséget eredményez a város és a hegyek felszínhőmérséklete között. A hegyek nappal jóval hidegebbek, mint a városkörnyéki átlaghőmérséklet, éjszaka viszont az alacsonyabb hegyek melegebbek (l. a Golema-hegység a várostól északra), és csak a hegyek legmagasabb részei hidegebbek a városkörnyéki átlaghőmérsékleténél.

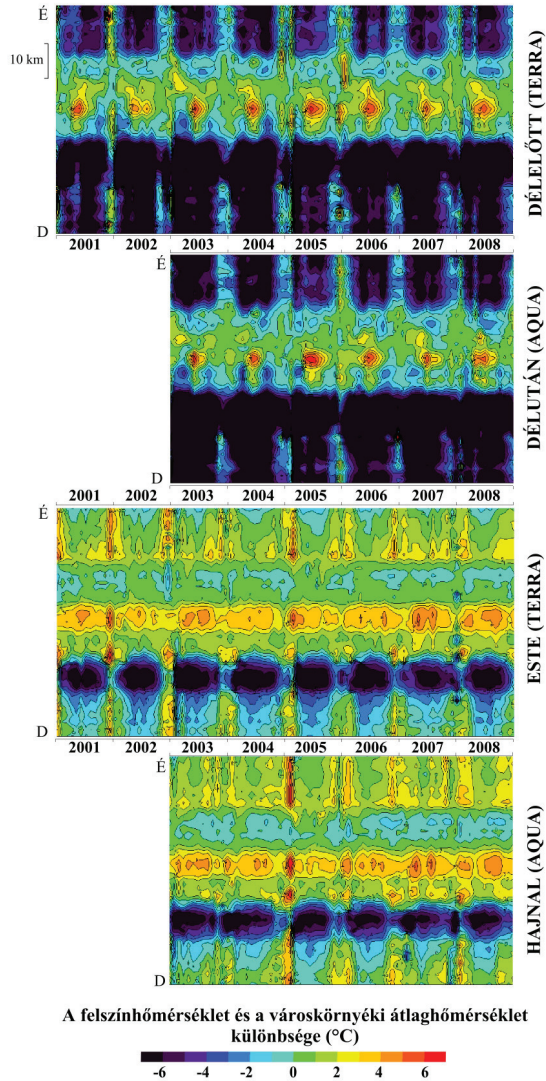
A nappali képeken, nyáron a belváros területén 5 °C feletti hőmérsékleti többlet alakul ki, míg éjszaka 3-5 °C-kal melegebb a belváros felszíne a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél. Az É-D-i keresztmetszet mentén a városi hősziget átmérője éjszaka néhány km-rel nagyobb, mint nappal.



48. ábra  
 A havi átlagos városi hősziget ÉNY-DK-i keresztmetszeti képe Milánó esetén  
 (Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)



49. ábra  
A havi átlagos városi hősziget NY-K-i keresztmetszeti képe Prága esetén  
(Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)



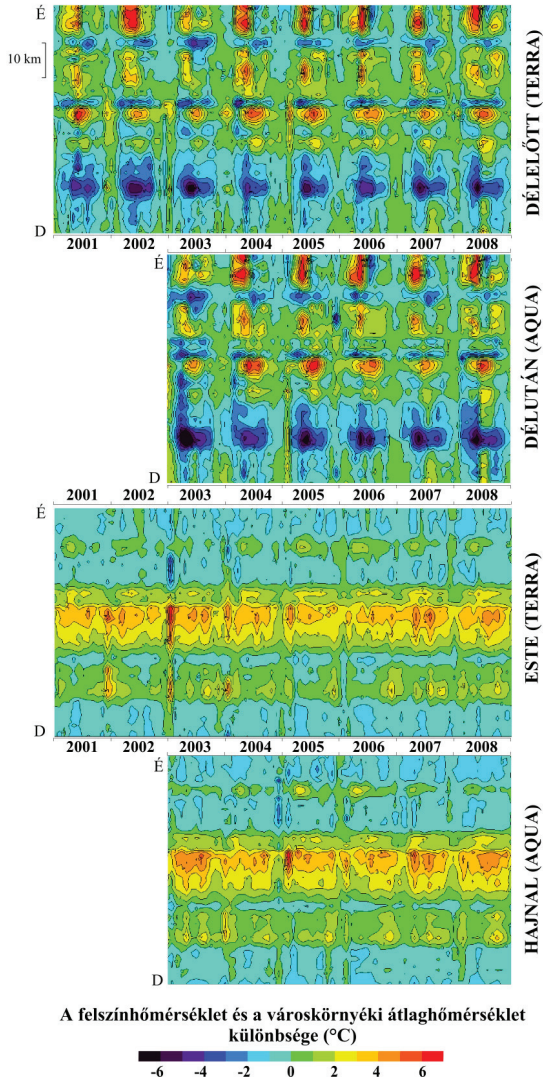
50. ábra  
 A havi átlagos városi hősziget É-D-i keresztmetszeti képe Szófia esetén  
 (Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)

Az **51. ábra** Belgrád É-D-i tengelye mentén mutatja be a hősziget keresztmetszetének idősorát. Belgrádtól északra a Dunán egy sziget található, – ahogy a **43. ábrán** is látható – a metszésvonal a folyó mindkét ágát metszi. Ez a keresztmetszeti idősoron is kirajzolódik: a nappali képeken a vízfelszínnek hidegebbek, az éjszakai ábrákon általában melegebbek, mint a városkörnyéki átlaghőmérséklet. Ugyanígy alakul a várostól délre található hegy felszínének hőmérséklete is.

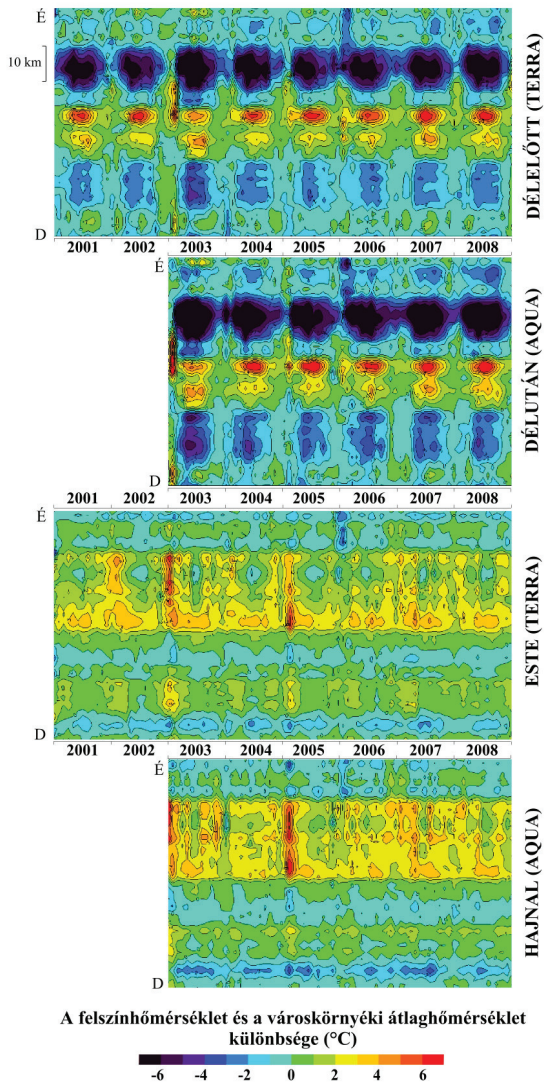
A nappali képeken a nyári időszakban több viszonylag meleg terület látható az É-D-i keresztmetszet mentén, amik a metszésvonal mentén található kisebb-nagyobb települések felszínhőmérsékleti viszonyait mutatják. Ezek közül az ábra középső részén lévő sáv esik Belgrád területére. A város méretéhez képest e meleg zóna viszonylag kis kiterjedésű, maximális intenzitása a nyári hónapokban általában 4-5 °C körül alakul. Alacsonyabb értékek tapasztalhatók 2002-ben, 2003-ban és 2007-ben. Éjszaka nagyobb területen tapasztalható pozitív felszínhőmérsékleti anomália, aminek maximuma a legtöbb hónapban 3-5 °C.

Az **52. ábra** a Zágrábban kialakuló városi hősziget É-D-i keresztmetszetének idősorát mutatja be. A várostól északra és délre hegyek találhatók, és a várost kettéosztja a Száva. A hegyek felszíne a nappali képeken hidegebb, az éjszakai melegebb, mint a városkörnyéki átlaghőmérséklet. Nappal a folyó jelentősen mérsékli a hősziget-hatást, közvetlen környezetében nyáron 3-4 °C-kal alacsonyabb a hőmérséklet, mint a belváros folyótól távolabb eső részein. A legnagyobb felszínhőmérsékleti anomália nyáron, a kora délutáni időszakban a folyótól északra, a belváros területén jelentkezik, itt ekkor több mint 6 °C-kal haladja meg a felszínhőmérséklet a városkörnyéki átlaghőmérsékletet. A Szávától délre is kirajzolódik egy másodlagos felszínhőmérsékleti maximum a város területén, ami 3-5 °C-kal melegebb, mint a városkörnyéki átlaghőmérséklet.

Éjszaka a várostól északra található Medvednica-hegység a városkörnyéki átlaghőmérséklethez képest hasonló felszínhőmérsékleti többlettel rendelkezik, mint a városnak a folyótól északra eső része. A késő esti képen a legtöbb hónapban Zágráb felszíne még 1-2 °C-kal melegebb, mint a hegyé, de hajnalra ez a különbség eltűnik. Megfigyelhető az is, hogy a város Szávától délre eső részének felszínhőmérséklete éjszaka alig haladja meg a városkörnyéki átlaghőmérsékletet.



51. ábra  
 A havi átlagos városi hősziget É-D-i keresztmetszeti képe Belgrád esetén  
 (Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)



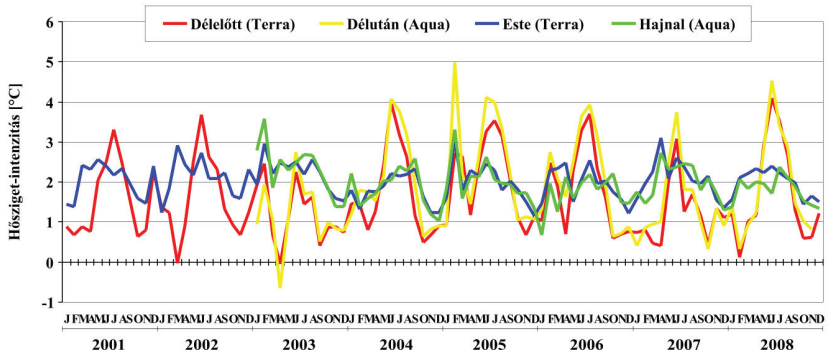
52. ábra  
 A havi átlagos városi hősziget É-D-i keresztmetszeti képe Zágráb esetén  
 (Terra/MODIS 2001-2008, Aqua/MODIS 2003-2008)



### 4.3. A városi hősziget átlagos intenzitása

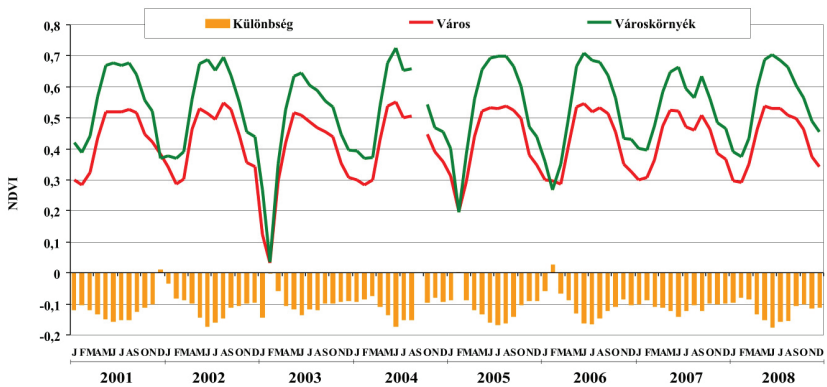
Az előző két fejezetben elemeztük a vizsgált városok térségében a felszínhőmérsékleti anomáliamező térbeli és időbeli alakulását, aminek során a 3.2. fejezetben definiált városkörnyéki átlaghőmérsékletet használtuk referenciához hőmérsékletként. Ugyanitt leírtuk a városi képpontok – illetve ezen pontok felszínhőmérsékletének átlagaként meghatározott városi átlaghőmérséklet – definícióját is. A városi és városkörnyéki átlaghőmérséklet különbsége adja a városi hősziget átlagos intenzitását. Ezt az intenzitást az összes városra, minden egyes műholdas mérési időpontra meghatároztuk, amikor olyan műholdkép állt rendelkezésünkre, melyen a városi képpontoknak legalább a fele felhőmentes. Terjedelmi korlátok miatt e napi bontású adatsort sajnos nincs lehetőségünk bemutatni, ezért kiszámítottuk a hősziget intenzitásának napszakonkénti havi átlagát. Ennek teljes, 8 éves idősorát – az ábra nagy mérete miatt – csak Budapestre vonatkozóan mutatjuk be, a többi város esetében 8 (Terra), illetve 6 évre (Aqua) átlagoltuk a havi átlagokat, súlyozva az adott hónap használható méréseinek száma szerint. Hangsúlyoznunk kell, hogy a havi átlagok a rendelkezésünkre álló felhőmentes adatok számának függvényében erősen eltérő számú adatból (minimum 1, maximum 27) kerültek meghatározásra.

Az **53. ábra** a városi hősziget havi átlagos intenzitásának menetét mutatja be 2001 és 2008 között Budapest esetében a négy műholdas mérési időpontra vonatkozóan. A nappali idősorokat megvizsgálva megállapíthatjuk, hogy a hősziget intenzitásának maximuma a legtöbb évben június-július hónapra esik, ennek mértéke 3-4,5 °C. A legtöbb évben egy másodlagos maximum figyelhető meg a téli hónapokban, ekkor 1,5-3 °C-kal haladja meg a városi képpontok átlaghőmérséklete a városkörnyéki átlaghőmérsékletet. (Egy kiugró, 5 °C-os maximum figyelhető meg a délutáni adatsorban 2005 februárjában. Ez valószínűleg annak eredményeképpen alakult ki, hogy a viszonylag kis számú rendelkezésünkre álló műholdképen a városi pontok egy része felhős volt, ami az eredmény torzulásához vezetett.) A hősziget intenzitása március-április, illetve október-november hónapban a legalacsonyabb, az 1 °C-ot sem haladja meg, sőt 2003 két tavaszi hónapjában negatív. A délelőtti és délutáni görbe nagyjából párhuzamosan fut, sok hónapban a délutáni hősziget-intenzitás néhány tized fokkal meghaladja a délelőtti értéket, tehát a besugárzás fokozódásával a hősziget intenzitása is erősödik némileg. Éjszaka a hősziget intenzitásának éves menete kiegyenlítettebb képet mutat.



53. ábra

A városi hősziget havi átlagos intenzitásának alakulása Budapesten 2001 és 2008 között a Terra/MODIS és az Aqua/MODIS szenzorok felszínhőmérsékleti méréseit alapján



54. ábra

A Terra/MODIS szenzor méréseiből meghatározott normalizált vegetációs index (NDVI) átlagos értéke a városi és városkörnyéki pontokra vonatkozóan Budapesten 2001 és 2008 között

A hősziget átlagos intenzitása 1-3 °C között alakul, de a magasabb értékek itt is a nyári hónapokban figyelhetők meg.

Azért, hogy a hősziget-intenzitás éves menetének alakulását, illetve az egyes évek közötti különbséget jobban megértsük, meghatároztuk a városi és városkörnyéki képpontokra vonatkozóan a havi normalizált vegetációs index átlagos értékét. E két átlagérték menetét, valamint a kettő különbségét mutatja be az **54. ábra**. Látható, hogy a városban a vegetációs index menete az egyes években hasonló. Az index maximális értékét a május és július közötti időszakban veszi fel, értéke ekkor 0,52-0,55 között alakul. Minimuma pedig februárra tehető, ekkor nagysága a legtöbb évben 0,3 körüli, csak 2003-ban és 2005-ben alacsonyabb. E két esztendőben az ország felszínét az egész hónap során hó borította. A városkörnyéki területen ennél nagyobb a vegetációs index évek közötti változékonysága. A legnagyobb értékek itt is a nyári hónapokban fordulnak elő, de a maximumok szélesebb tartományban, 0,64 és 0,72 között változnak. A minimumok közül itt is kiugrik 2003 és 2005 februárja, valamint 2006 februárja is (a jellemző csapadék ebben a hónapban is a hó volt), a többi évben 0,38-0,4 között alakult.

Ha a városi és vidéki NDVI-értékek közötti különbség éves menetét megvizsgáljuk, megállapíthatjuk, hogy a legnagyobb különbség – a hősziget-intenzitáshoz hasonlóan – a nyári időszakban figyelhető meg. Ennek értéke átlagos években 0,16-0,18, viszont 2003-ban és 2007-ben csupán 0,12-0,14. Ez éppen egybeesik azzal a megfigyelésünkkel, hogy ezekben az években alacsonyabb hősziget-intenzitás értékeket detektáltunk. A kisebb különbség a városkörnyéki vegetációs index alacsonyabb értékének következménye, ami arra utal, hogy ezekben az években az átlagosnál gyébrebb volt a vegetáció, illetve a növényzet számára nem állt megfelelő mennyiségű nedvesség rendelkezésre. A kisebb mértékű evapotranspiráció miatt az energiaegyenlegben lecsökkent a látens hő aránya, ami a földfelszín nagyobb mértékű felmelegedését tette lehetővé. Mivel a város területén nincs számottevő különbség az egyes évek vegetációs index értékei között, feltehető, hogy a városfelszín ezekben az években is hasonló mértékben melegedett fel, mint a többi esztendőben, így a városkörnyék magasabb hőmérséklete miatt a hősziget intenzitálásában kisebb különbségek adódtak.

A téli hónapokban a vegetációs index különbsége a városi és városkörnyéki területek között 0-0,1 körül alakul, sőt néhány hónapban előfordul, hogy a városban magasabb a vegetációs index értéke, mint annak környékén. Ez előfordulhat olyan

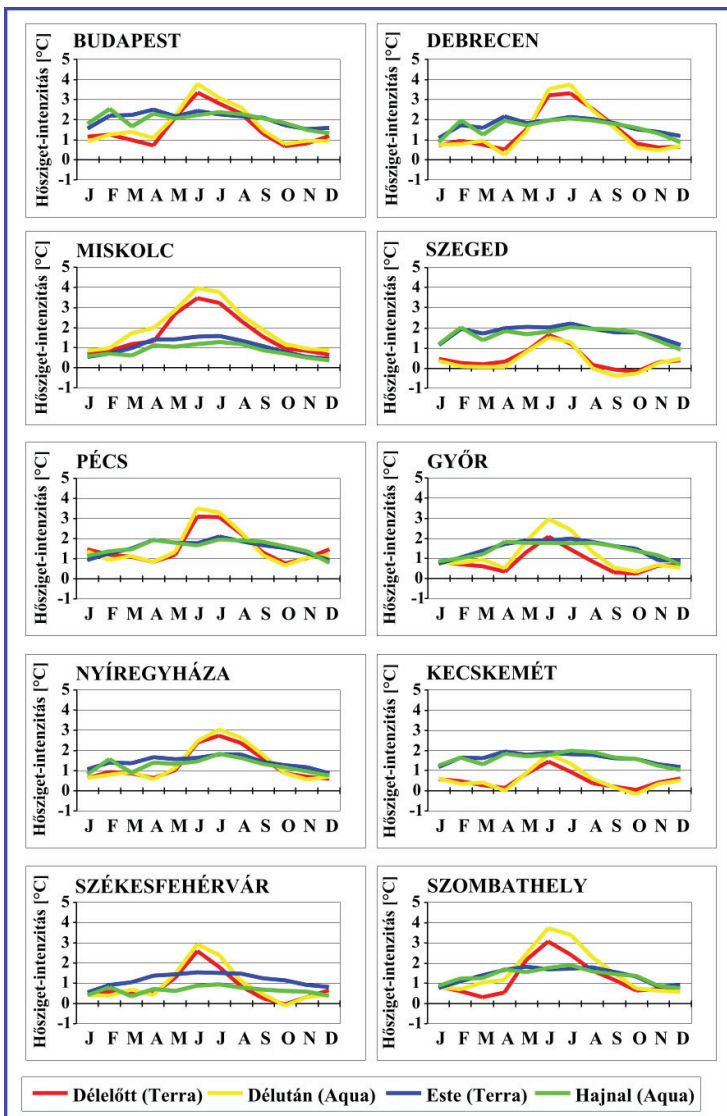
esetben, mikor a városkörnyéki területet hó borítja, miközben az a városban – a takarítás és a városi hősziget-hatás következtében – elolvad.

Az **55. ábra** a magyarországi nagyvárosok havi átlagos intenzitásának éves menetét mutatja be. A havi átlagokat a délelőtti és esti (Terra) mérések esetén a 2001 és 2008 közötti, míg a délutáni és hajnali (Aqua) mérések esetén a 2003 és 2008 közötti időszakra átlagoltuk, súlyozva az egyes években rendelkezésre álló adatok száma szerint.

A délelőtti és délutáni görbék maximuma mindenhol a nyári időszakra esik: Debrecenben és Nyíregyházán júliusban, a többi városban júniusban legmagasabb az átlagos hősziget-intenzitás. Ennek nagyságában azonban az egyes települések között jelentős különbség figyelhető meg, 3-4 °C között alakul Budapest, Debrecen, Miskolc, Pécs és Szombathely esetében, 2-3 °C Győr, Nyíregyháza és Székesfehérvár esetében, és csupán 1-2 °C Szegeden és Kecskeméten. A nappali görbék a legtöbb esetben két minimummal rendelkeznek. Ez alól csak a miskolci délelőtti és délutáni, valamint a szombathelyi délutáni görbe jelent kivételt, ahol decemberben és januárban a legalacsonyabb – csupán 0,5-1 °C – a hősziget intenzitása. A többi város esetében a március-áprilisi, illetve az október-novemberi időszakban legalacsonyabb a városi és városkörnyéki átlaghőmérséklet különbsége. Ez nem haladja meg az 1 °C-ot, sőt Szeged, Kecskemét és Székesfehérvár esetében előfordul, hogy a város átlagos felszínhőmérséklete alacsonyabb, mint a városkörnyéké.

Az esti és hajnali görbék éves menete kisebb amplitúdójú, mint a nappaliaké. Itt is nyáron legnagyobb a hősziget intenzitása, viszont a minimum decemberben és januárban fordul elő. A legtöbb városban nyáron 2 °C körül, télen 1 °C körül alakul a városi hősziget átlagos intenzitása. Ennél kb. 0,5 °C-kal erősebb hősziget alakul ki Budapesten, és 0,5 °C-kal gyengébb Miskolcon és Székesfehérváron.

Ha az intenzitás menetét különböző napszakokban összehasonlítjuk, megállapíthatjuk, hogy a délelőtti és délutáni, illetve az esti és hajnali görbék páronként nagyjából párhuzamosan futnak. A legtöbb városban a délutáni átlagos hősziget-intenzitások néhány tized fokkal meghaladják a délelőtti értékeket.

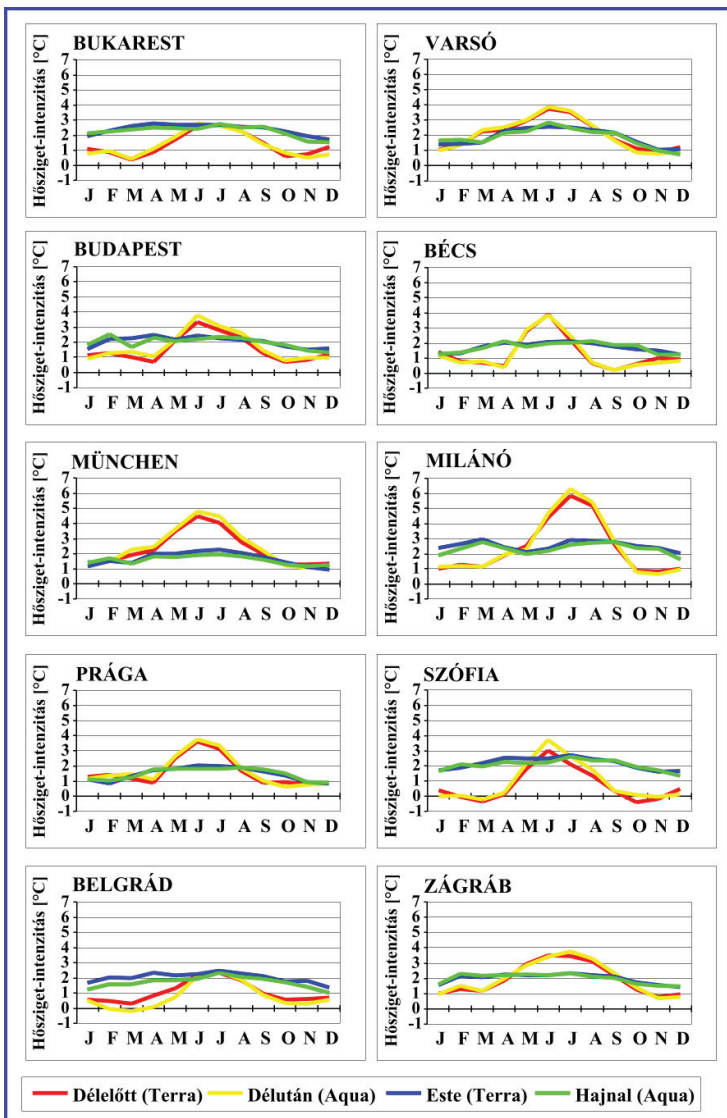


55. ábra  
 A városi hősziget havi átlagos intenzitásának sokéves átlaga Magyarország nagyvárosaiban (a Terra/MODIS 2001-2008 közötti, az Aqua/MODIS 2003-2008 közötti felszínhőmérsékleti mérései alapján)

Ez megfelel a várakozásoknak, hisz a magasabb napállás következtében fokozódik a globálisugárzás intenzitása, ami miatt a földfelszín nettó energiaegyenlege is nő (1. (1) egyenlet a 2.1. fejezetben). Ennek következtében a különböző (szenzibilis, látens, talaj-) hőáramok is megnövekednek. E hőáramoknak a nettó sugárzási egyenleghez viszonyított aránya jelentősen különbözik a város és vidék esetében, és ez eredményezi a hősziget kialakulását. Így a hőáramok fokozódása a felszínhőmérsékleti mezőben is növeli a város és a vidék közötti különbséget. Ugyanez az oka annak is, hogy nyáron jóval nagyobb a hősziget intenzitása, mint télen.

Az esti és hajnali intenzitás-átlagok közül az estiek általában magasabbak, de a különbség legfeljebb 0,1-0,2 °C, csak Székesfehérvár esetében haladja meg a 0,5 °C-ot. Éjszaka a nettó sugárzási egyenlegből hiányzik a bejövő rövidhullámú sugárzás, így azt csak a bejövő és kimenő hosszuhullámú sugárzás határozza meg. Ezek napi és éves változékonysága kisebb, mint a rövidhullámú sugárzásé, ezért a felszínhőmérsékleti görbék amplitúdója is gyengébb.

A sugárzás éven belüli változékonyságán túl az albedó változása is befolyásolhatja a hősziget intenzitásának éven belüli alakulását. Az albedó, azaz a felszín által visszavert és a felszínre érkező sugárzás hányadosa függ a felszín anyagától, ami elsősorban a városkörnyéki területeken változhat az év során. Tavasszal és ősszel a szántóföldeket felszántják, aminek hatására lecsökken az albedójuk, tehát több energia marad azok felszínének melegítésére. (A nedves csupasz talaj albedója 0,12-0,14, a zöld gabonáé 0,21-0,24, a száraz tarlóé 0,30-0,32, a fűé 0,18-0,22, a lombos erdőé 0,10-0,15.) Így ezekben a hónapokban a városkörnyéki területek is jobban felmelegszenek, tehát a városi és városkörnyéki területek átlagos felszínhőmérsékletének különbsége kisebb lesz. Azoknál a városoknál, ahol a városkörnyéki képpontok között jelentős a szántóföldek aránya, ez akár „negatív sziget” kialakulását is eredményezheti. Bár télen is csupasz a talaj a szántóföldeken, de ekkor két tényező is a városok javára billenti az energiamérleget. Egyrészt a városokban télen jelentős mennyiségű antropogén eredetű hő szabadul fel, ami a városi átlaghőmérsékletet növeli. Másrészt télen gyakran előfordul, hogy a városkörnyéki területeket hó borítja, miközben a városokban az már elolvadt, ilyenkor a két terület közötti jelentős albedó-különbség a városok nagyobb mértékű felmelegedését eredményezi. E tényezők miatt alakul ki a hősziget intenzitásának éves menetében télen tapasztalható másodlagos maximum.



56. ábra

A városi hősziget havi átlagos intenzitásának sokéves átlaga Közép-Európa nagyvárosaiban (a Terra/MODIS 2001-2008 közötti, az Aqua/MODIS 2003-2008 közötti felszínhőmérsékleti mérései alapján)



Az **56. ábra** a városi hősziget intenzitásának éves menetét mutatja be Közép-Európa nagyvárosaiban a 2001 és 2008 közötti (Terra), illetve a 2003 és 2008 közötti (Aqua) időszakra átlagolva. (Budapest a jobb áttekinthetőség és összehasonlíthatóság végett ezen az ábrán ismét szerepel.) A görbék éves menetét megvizsgálva hasonló képet kapunk, mint a hazai nagyvárosok esetében. A hősziget intenzitásának maximuma Varsó, Budapest, Bécs, München, Prága és Szófia esetében júniusra, Bukarest, Milánó, Belgrád és Zágráb esetében júliusra esik. Az átlagos hősziget-intenzitás maximális értéke tág határok között változik: Milánóban eléri a 6 °C-ot, 4-5 °C között alakul Münchenben, 3-4 °C között alakul Varsóban, Budapesten, Bécsben, Prágában, Szófiában és Zágrábban, és 2-3 °C között alakul Bukarestben és Belgrádban. A nappali görbék a legtöbb város esetében két minimummal rendelkeznek, ez alól csak Varsó és München kivétel. Utóbbiak esetében novemberben a legalacsonyabb a hősziget intenzitása, Münchenben valamivel 1 °C felett, Varsóban 1 °C alatt alakul. A többi város esetében tavasszal és ősszel is megfigyelhető egy-egy minimum, ekkor a hősziget intenzitása 1 °C körül, illetve az alatt alakul, sőt Szófia és Belgrád esetében negatív értéket vesz fel.

Éjszaka a hősziget intenzitása – a magyar városokhoz hasonlóan – itt is kiegyenlítettebb képet mutat, a legtöbb város esetében a nyári maximum és a téli minimum között kb. 1 °C különbség van. Milánó esetében a nyár elején is viszonylag alacsony a hősziget intenzitása. A maximális hősziget-intenzitás Bukarest, Varsó, Milánó és Szófia esetében meghaladja a 2,5 °C-ot, Budapest, Bécs, München, Prága, Belgrád és Zágráb esetében pedig 2-2,5 °C között alakul.

#### **4.4. Esettanulmányok**

Az előző fejezetekben átfogóan elemeztük a magyarországi és közép-európai nagyvárosok hősziget-jelenségének sajátosságait, melyhez a MODIS szenzor 1 km-es felbontású felszínhőmérsékleti adatait használtuk fel. A hősziget finomszerkezetének feltárásához ennél jobb térbeli felbontású műholdfelvételekre lenne szükség. Sajnos a technika ma még nem teszi lehetővé, hogy egy szenzor napi rendszerességgel, az egész Földet lefedően készítsen ilyen felvételeket, az igen finom (100 m alatti) felbontású műholdképek egy adott területről sokkal ritkábban állnak rendelkezésre. A helyzetet tovább rontja az, hogy e képek sokszor felhősek, így városklimatológiai kutatásokra nem használhatók. A Terra műhold fedélzetén található ASTER szenzor is csak néhány

napra vonatkozóan készített felvételeket az általunk vizsgált városokról a 2001 és 2008 közötti időszakban. Így e 90 m-es térbeli felbontású adatokat csak esettanulmányok készítésére tudjuk használni. Segítségükkel feltárhatjuk, hogy a műhold áthaladásának időpontjában hogyan alakultak a vizsgált terület felszínhőmérsékleti sajátosságai.

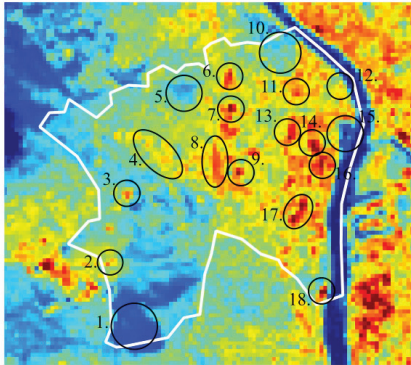
Budapestre vonatkozóan két képet választottunk ki, egy nyárit, ami a 2001. július 6-i, és egy télit, ami a 2003. február 2-i sugárzási adatokból kiszámított felszínhőmérsékleti mezőt ábrázolja. Mindkét kép a Terra délelőtti áthaladása során készült. Kiemelt vizsgálati célpontként a XI. kerületet választottuk ki. Ennek több oka van: egyrészt az ELTE Meteorológiai Tanszéke itt található a Lágymányosi Campus területén, ezért e kerületet jól ismerjük, és különösen is figyelemmel kísérjük. Másrészt ez a viszonylag nagy kiterjedésű kerület igen változatos beépítettségű, a sűrűn és ritkán beépített lakóövezetek mellett található itt többek között ipari, kereskedelmi területek, irodaépületek, vasutak, valamint parkok, erdők is.

Az **57. ábrán** a XI. kerület felszínhőmérsékleti viszonyait mutatjuk be e két napra vonatkozóan. A két felszínhőmérsékleti ábrán az egyes képpontoknak az adott napi MODIS városkörnyéki átlaghőmérsékletől vett eltérése látható. A felszíni elemek beazonosítása céljából a kerület Google Earth adatbázisban található, látható tartományú képét is bemutatjuk.

Az ábrákat megvizsgálva rögtön szembetűnik, hogy a nyári napon jelentős hőmérsékleti anomália alakul ki, ekkor a felszínhőmérséklet a kerület jelentős részén legalább 10 °C-kal meghaladja a városkörnyéki átlaghőmérsékletet, aminek értéke 30,61 °C. A téli képen a városkörnyéki átlagos felszínhőmérséklet -4,84 °C, a kerület felszíne ennél általában 5-10 °C-kal melegebb. A Duna a nyáron kb. 10 °C-kal hidegebb, míg télen 8 °C-kal melegebb, mint a városkörnyéki átlaghőmérséklet.

E 90 m-es felbontású adatok lehetővé teszik, hogy egyes épületek, illetve egyéb felszíni elemek hőmérsékleti viszonyait vizsgáljuk. Az ábrákon kijelöltünk néhány forró, illetve hideg pontot (melyeket 1-től 18-ig terjedő sorszámmal jelöltünk), és megvizsgáltuk, hogy mely objektumok felelnek meg e pontoknak:

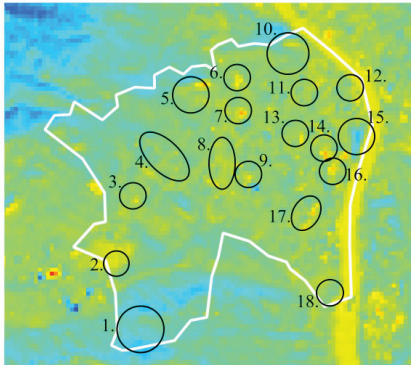
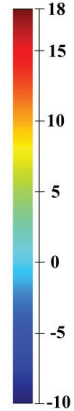
1. Kamaraerdő – A kerület szélén található parkerdő nyáron még a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél is hidegebb, és felszíne a közelben (ÉNY-ra) található budaörsi bevásárlóközpontoknál 20-25 °C-kal alacsonyabb hőmérsékletű. Télen felszínhőmérséklete némileg meghaladja a városkörnyéki átlaghőmérsékletet, de a környező beépített területeknél hidegebb.



**2001.07.06.**

$T_{\text{városkörnyéki átlag}} = 30,61 \text{ } ^\circ\text{C}$

**A felszínhőmérséklet és a városkörnyéki átlaghőmérséklet különbsége ( $^\circ\text{C}$ )**



**2003.02.02.**

$T_{\text{városkörnyéki átlag}} = -4,84 \text{ } ^\circ\text{C}$



**Google Earth látható tartományú műholdkép**

57. ábra

A felszínhőmérséklet városkörnyéki átlaghőmérséklettől vett eltérése Budapest XI. kerületében a Terra/ASTER 90 m-es felbontású mérései alapján)

2. Az egykori Vasvári Laktanya – Épületeiben ma már különféle cégek telephelyei találhatóak. A terület szervesen kapcsolódik a főváros határán kívül eső budaörsi ipari és logisztikai park létesítményeihez (mely az M1/M7 autópálya mentén található bevásárlóközpontoktól délre fekszik). Felszíne a nyári képen 12 °C-kal, a télin 7 °C-kal melegebb a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél.
3. Sasadi Virágpiac – Nagy kiterjedésű mesterséges burkolatának következtében felszíne a nyári felvételen mintegy 12 °C-kal, a téli felvételen kb. 8 °C-kal melegebb a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél.
4. Gazdagréti Lakótelep – A jórészt tízemeletes panelházakból álló lakótelep épületei nyáron kb. 10 °C-kal, télen 5 °C-kal melegebbek a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél. Az ábrákon megfigyelhető, hogy az épületek között található zöldfelületek némileg mérséklék a hősziget-hatást, ezek felszíne 2-3 °C-kal hidegebb az épületekénél.
5. Sas-hegy – A 266 m tengerszint feletti magasságú hegy legfelső része beépítetlen, növényzettel borított. Felszíne a nyári képen 5-6 °C-kal hidegebb, mint a közvetlen környezete, s 2 °C-kal hűvösebb a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél. Télen nincs számottevő eltérés a hegy és környéke felszínhőmérséklete között, mindkettő kb. 5 °C-kal haladja meg a városkörnyéki átlaghőmérsékletet.
6. A Karolina út elején található csarnoképület – A lapos tetűjű épület nyáron kb. 15 °C-kal, télen 7-8 °C-kal melegebb, mint a városkörnyéki átlaghőmérséklet.
7. Kelenföldi Buszgarázs – A csarnoképületekből és hatalmas aszfaltborítású parkolóból álló Nagyszőlős utcai BKV telep a XI. kerület egyik legmelegebb felszínű területe. A felszínhőmérséklet nyáron 18 °C-kal, télen 10-12 °C-kal haladja meg a városkörnyék átlagos felszínhőmérsékletét.
8. Kelenföldi Pályaudvar – A vasúti sínek és a pályaudvari épületek felszíne a téli képen 5-6 °C-kal, a nyári felvételen 12 °C-kal haladja meg a városkörnyéki átlaghőmérsékletet.
9. A Volánbusz Rt. telepe – Az Andor utca és Thán Károly utca kereszteződésében található telep a Kelenföldi Buszgarázshoz hasonlóan teljes mértékben mesterséges burkolatú, így felszínének hőmérséklete nyáron 15 °C-kal, télen 8 °C-kal haladja meg a városkörnyéki átlaghőmérsékletet.
10. Gellért-hegy – A Gellért-hegy déli oldala esik a XI. kerület területére. Ennek felszínhőmérséklete nyáron a városkörnyéki átlaghőmérséklet alatt, míg télen némileg felette alakul. A hegyoldal mindegyik évszakban hidegebb közvetlen környezeténél.

11. Az egykori Budai Skála Áruház és a Piac – A műholdfelvételek készítésének időpontjában még állt a Budai Skála Áruház épülete, amit 2007-ben lebontottak. Ennek, valamint a mellette található piaccsarnoknak a felszíne nyáron 12-13 °C-kal, télen 5-7 °C-kal melegebb a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél.
12. ELTE Lágymányosi Campus Északi Tömb – A nyolc emeletes épület, melyben a Meteorológiai Tanszék is található, a Petőfi híd lábánál, a Duna-parton helyezkedik el. Felszínhőmérséklete nyáron kb. 10 °C-kal, télen mintegy 5 °C-kal haladja meg a városkörnyék átlaghőmérsékletét.
13. Nádorliget-lakópark és egyéb irodaházak – A Szerémi út – Dombóvári út – Fehérvári út – Hauszmann Alajos utca által határolt terület a 2000-es évek elejétől nagy változásokon ment keresztül. Egy ingatlanberuházás keretében több ütemben hat-nyolcemeletes, nagy alapterületű társasházak épültek. A rendelkezésre álló műholdfelvételek az építkezések idejében készültek. Nyáron 15 °C feletti, télen 6-8 °C körüli hőmérsékleti többlet alakult ki ezen a területen.
14. A Budafoki út – Hauszmann Alajos utca – Szerémi út – Hengermalom út által határolt tömb ipari-kereskedelmi célú épületei – A nagy, többnyire lapos tetejű csarnoképületek és az aszfaltburkolatok felszíne nyáron 17-18 °C-kal, télen 10 °C-kal melegebb a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél.
15. Kopaszi-gát – A Lágymányosi-öböl és a Kopaszi-gát területe a vizsgálat időpontjában még rendezetlen terület volt, azóta itt sport- és szabadidőközpontot alakítottak ki. A félsziget felszíne mindkét képen hidegebb a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél.
16. Újbuda Center – Az egykori MKM Kábelgyár elhagyott csarnoképületéből 2006-ban bevásárló központot alakítottak ki. A műholdfelvételek készítésének időpontjában a csarnok még üresen állt, de felszíne nyáron 16 °C-kal, télen 9 °C-kal melegebb a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél.
17. A Szerémi út – Építész utca – Fehérvári út – Galvani utca által határolt tömb ipari-kereskedelmi célú épületei – Itt is többnyire hatalmas, lapos tetejű csarnokok találhatók, amiket nagy kiterjedésű aszfaltburkolatú parkolók vesznek körül. Ezek felszíne nyáron 17-18 °C-kal, télen 8-10 °C-kal melegebb a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél.
18. Az egykori Házgyár – E terület csarnoképületeiben ma irodák, üzemek, logisztikai központok helyezkednek el. Felszínük nyáron 16-18 °C-kal, télen 5 °C-kal melegebb a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél.

## 5. Összefoglalás

Az emberi tevékenység természetére gyakorolt hatásának egyik fontos megjelenési formája a városi hősziget. E jelenség tanulmányozására többféle elfogadott eljárás létezik, ezek egyike a műholdas sugázmérésekből meghatározott felszínhőmérséklet felhasználásán alapuló módszer. Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén kilenc évvel ezelőtt kezdődött meg az a kutatási program, aminek keretében komplex módszert dolgoztunk ki a magyarországi és közép-európai nagyvárosok hősziget-jelenségének felszínhőmérsékleti méréseken alapuló vizsgálatára, és elvégeztük azok részletes elemzését.

A kutatás során az első lépést a műholdas mérésekből származó felszínhőmérsékleti adatbázis elkészítése és folyamatos bővítése jelentette. Ehhez a Terra és az Aqua műhold fedélzetén található MODIS szenzor sugázméréseiből meghatározott 1 km<sup>2</sup>-es térbeli felbontású felszínhőmérsékleti adatokat a NASA Földfelszíni Folyamatok Adatainak Aktív Archiváló Központja (LPDAAC) bocsátotta rendelkezésünkre. Így egyedülálló adatbázist hoztunk létre, ami tartalmazza a teljes közép-európai térség felszínhőmérsékleti adatait 2000 tavaszától kezdve napi kettő, 2002 nyarától kezdve pedig napi négy időpontra vonatkozóan. Munkánk során közel 22.000 darab fájlt, 75 GB információt dolgoztunk fel.

A városi és városkörnyéki képpontok szétválasztására saját módszert dolgoztunk ki, melyhez felhasználtuk a MODIS felszínborítottsági adatbázist, a GTOPO 30 digitális terepmodell adatbázist, illetve a Google Earth adatbázis látható tartományú műholdfelvételeit. Mindegyik vizsgált városra vonatkozóan meghatároztuk a városi és városkörnyéki átlaghőmérsékletet, illetve – az ezek különbségeként definiált – hősziget-intenzitást 2001 és 2002 között napi kettő, 2003 és 2008 között napi négy időpontra vonatkozóan. Ezt követően részletes elemzéseket készítettünk, melyek során tanulmányoztuk az egyes nagyvárosokban kialakuló hősziget térbeli szerkezetét, elvégeztük a hősziget különböző irányú keresztmetszetének vizsgálatát, továbbá meghatároztuk a városi hősziget intenzitásának havi átlagát, illetve éves menetét.

Az elvégzett vizsgálatok legfontosabb eredményeit az alábbiakban foglaljuk össze:

- (1) A műholdas felszínhőmérsékleti mérések alapján meghatározott városi hősziget-jelenség az összes vizsgált városban megjelenik. A hősziget évi átlagos intenzitása 1-3 °C.

- (2) A hősziget-intenzitás maximuma az összes napszak esetében júniusra és júliusra esik. A legintenzívebb hősziget a városok többségében a nyári hónapokban a nappali időszakban figyelhető meg. Ennek erőssége városonként különböző: Milánó esetében meghaladja a 6 °C-ot, 4-5 °C között alakul Münchenben, 3-4 °C között alakul Varsó, Budapest, Bécs, Prága, Szófia, Zágráb, Debrecen, Miskolc, Pécs és Szombathely esetében, 2-3 °C Bukarest, Belgrád, Győr, Nyíregyháza és Székesfehérvár esetében, és 1-2 °C Szegeden és Kecskeméten. A legtöbb város esetében a nappali intenzitás éves menete két minimummal rendelkezik, az egyik március-áprilisban, a másik október-novemberben következik be, ekkor a hősziget intenzitása csupán 0-1 °C, sőt néhány város esetében negatív értéket vesz fel. A nappali órákban végzett mérésekből meghatározott városi hősziget hatás éves változékonysága jóval meghaladja az éjszakait. Az éjszakai intenzitás maximális értékét nyáron, minimumát télen veszi fel, e kettő között a legtöbb város esetében kb. 1 °C a különbség. A hősziget intenzitásának maximuma Közép-Európa milliós népességű városai esetén 2-3 °C között, míg Magyarország nagyvárosai esetén 1-2 °C között, néhány város esetében kicsivel 2 °C felett alakul.
- (3) Meghatároztuk a települést és környékét tartalmazó műholdkép-kivágat összes pontjában a felszínhőmérséklet városkörnyéki átlaghőmérsékletől vett eltéréseinek évszakos átlagát. Ilyen módon kirajzolódott a városi hősziget szerkezete, aminek felhasználásával mindegyik városban megvizsgáltuk a hősziget kiterjedését, annak centrumának elhelyezkedését, és ezek évszakos változásait. A legtöbb városban a hősziget maximuma a sűrűn beépített belvárosi területre esik, de – különösen a nagyobb városok esetében – bizonyos esetekben több hősziget-központ is megfigyelhető.
- (4) A térben folytonos felszínhőmérsékleti mérések felhasználásával lehetővé vált azon felszíni elemek hőszigetre gyakorolt hatásának a vizsgálata, melyek mérete az 1 km<sup>2</sup>-t meghaladja. Ilyen objektumok például a nagy kiterjedésű ipartelepek, bevásárló központok, repülőterek, melyek gyakran a városperemi fekvés ellenére is több fokkal melegebbek környezetüknél, illetve a parkok, erdők, vízfelületek, melyek sok esetben hatékonyan mérséklik a hősziget-hatást.
- (5) Mindegyik város esetében elkészítettük a város É-D-i, NY-K-i, ÉNY-DK-i és ÉK-DNY-i tengelye mentén a képpontok felszínhőmérsékletének városkörnyéki átlaghőmérsékletől vett eltéréseinek idősorát, majd ezek közül a város szerkezetét legjobban reprezentáló irányt mutattuk be. Az idősorokon markánsan kirajzolódnak a

metszésvonal által érintett különféle felszíni elemek (pl. zöldfelületek, folyók, ipari területek, stb.) felszínhőmérsékleti sajátosságai, így jól tanulmányozható ezek időbeli változékonysága.

- (6) A szerkezeti és keresztmetszeti ábrákból egyaránt kitűnik, hogy egyes városok esetében néhány km-es távolságon belül jelentős – akár 15 °C-ot is meghaladó – felszínhőmérséklet-különbség alakul ki. Ez különösen a nyári időszakban, a hegyek közelébe települt városok esetében szembetűnő.
- (7) Ha a városi hősziget-intenzitás nyolc éves idősorát megvizsgáljuk, megállapíthatjuk, hogy – bár az egyes években hasonló annak menete – mégis van különbség az egyes évek között. Ez jórészt az adott év hőmérsékleti és csapadékviszonyaira vezethető vissza. Jó példa erre a 2003-as és 2007-es év, amikor a magyarországi városokban és néhány külföldi nagyvárosban a hősziget intenzitása nyáron alacsonyabb volt, mint a többi évben. Ezek az évek rendkívül melegek és szárazak voltak, így a városon kívül sem állt rendelkezésre megfelelő mennyiségű nedvesség az evapotranspirációhoz, ami a városkörnyéki terület felszínének erőteljesebb felmelegedését vonta maga után. Így a városi és a városkörnyéki átlagos felszínhőmérséklet-különbség kisebb volt, de ez nem a városfelszín alacsonyabb, hanem a városkörnyék magasabb hőmérsékletének következménye. Ezt vegetációs index vizsgálatokkal is alátámasztottuk.
- (8) Összehasonlítottuk a négy vizsgálati időpont hősziget-intenzitásainak egymáshoz való viszonyulását is. Megállapítottuk, hogy a délelőtti és délutáni, illetve az esti és hajnali intenzitásoknak páronként nagyon hasonló az éves menete. A hősziget intenzitásának néhány tized fokos növekedése figyelhető meg a délutáni mérések esetében a délelőtti mérésekhez képest, hajnalra pedig az esti méréshez képest csökken a városi hősziget intenzitása.
- (9) Az ASTER szenzor méréseiből meghatározott 90 m-es felbontású felszínhőmérsékleti adatok csupán néhány napra vonatkozóan álltak rendelkezésünkre. Ezek felhasználásával esettanulmányt készítettünk Budapest XI. kerületére vonatkozóan, aminek során megvizsgáltuk, hogy egy nyári és egy téli napon mely objektumok felszínhőmérséklete tér el legnagyobb mértékben a városkörnyéki átlaghőmérséklettől. Megállapítottuk, hogy a nagy csarnoképületek, ipari üzemek, bevásárló központok, illetve a kiterjedt aszfaltfelszínek (parkolók) a legmelegebbek, ezek felszínhőmérséklete egy átlagos nyári napon akár a 45 °C-ot is meghaladja.



Kimutattuk, hogy az erdők, parkok, vízfelületek hatékonyan csökkentik a hősziget-hatást.

További terveink között szerepel az adatbázis folyamatos bővítése, a disszertációban bemutatott vizsgálatok elvégzése a 2008. december 31-e utáni időszakra is. Tervezzük újabb ASTER felszínhőmérsékleti adatok beszerzését, melyek felhasználásával azt szeretnénk tanulmányozni, hogy az elmúlt évtized építészeti nagyberuházásai (lakóparkok, bevásárló központok, stb.) milyen mértékben változtatták meg egy városrész felszínhőmérsékleti sajátosságait. E vizsgálatokkal az illetékes döntéshozók figyelmét is fel akarjuk kelteni, hogy a szabályok megalkotásánál, illetve az építési engedélyek kiadásánál a városklimatológiai szempontokat is vegyék figyelembe.

Kutatásaink másik fontos irányvonalként szeretnénk az itt bemutatott eredményeket a klímaváltozás hatásainak vizsgálata területén hasznosítani. Az ELTE Meteorológiai Tanszékén évek óta a kiemelt kutatási témák közé tartozik a globális klímaváltozás regionális hatásainak vizsgálata (*Bartholy et al., 2007; Bartholy és Pongrácz, 2006*). Mivel a regionális éghajlati modellek a városok karakterisztikus méreténél durvább (általában 50 km-es) felbontásúak, ezért e modellekben a város hatás nem szerepel. Ugyanakkor az éghajlati modellek előrevetítik a hőmérséklettel kapcsolatos (melegedés irányába mutató) extrém értékek gyakoriságának jövőbeni növekedését (*Bartholy et al., 2008*). A városok területén a hőmérséklet értékét a hősziget-hatás még inkább a szélsőségek irányába tolja el, illetve az éghajlati rendszer elemeinek módosulása és a beépítettség növekedése következtében maga a hősziget-hatás is fokozódhat.

Kutatásaink hosszabb távú célja a városklíma-kutatások eredményeinek gyakorlati alkalmazása az építészeti, városrendezési tervek készítésében, a különféle szabályozások megalkotásában, hisz ezek felhasználásával elő lehetne segíteni a városi ember életterének komfortosabbá tételét.

## Köszönetnyilvánítás

A felhasznált műholdas adatokat az Egyesült Államok Geológiai Hivatalának „Land Processes Distributed Active Archive Center” (LP DAAC) adatközpontja bocsátotta rendelkezésünkre (lpdaac.usgs.gov).

Kutatásainkat az OTKA T-038423, T-034867, T-049824, K-67626, K-69164, K-78125 számú pályázatait, az NKFP-3A/0006/2002, az NKFP-3A/0082/2004 és az NKFP-6/079/2005 pályázatok, valamint a Magyar Űrkutatási Iroda TP-241, TP-258, TP-287, TP-338 számú pályázatait támogatták. További segítséget nyújtott az EU VI. keretprogram CECILIA projektje (GOCE-037005), az MTA TKI Alkalmazkodás a klímaváltozáshoz című (2006/TKI/246) programja, valamint a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium.

Munkámat az Oktatási és Kulturális Minisztérium Deák Ferenc Ösztöndíjjal, a Magyar Meteorológiai Társaság a „Fiatal Éghajlatkutatók Fóruma” pályázat keretében ösztöndíjjal támogatta. Az Osztrák Csereszolgalat támogatásával 2003-ban 4 hónapot töltöttem a Bécsi Egyetem Meteorológiai és Geofizikai Intézetében, ami szintén hozzásegített e disszertáció elkészítéséhez.

Köszönetemet fejezem ki témavezetőmnek, dr. Bartholy Juditnak áldozatkész segítségéért, építő javaslataiért, és azért, hogy az elmúlt években szakmailag és emberileg is mindvégig mellettem állt.

Köszönöm dr. Pongrácz Ritának, hogy konzulensként munkámat számos tanáccsal segítette, ötleteivel gazdagította, és hogy magyar és angol nyelvű írásaimat nagy figyelemmel és alaposággal lektorálta.

Köszönöm dr. Barcza Zoltánnak a számítógépes feladatok megoldásában nyújtott segítséget.

Köszönöm dr. Mészáros Róbertnek, hogy a dolgozatban szereplő térképeket rendelkezésemre bocsátotta.

Köszönöm férjemnek, Viktornak, három gyermekünknek, Virágnak, Viktornak és Veronikának, szüleimnek és családom többi tagjának, hogy türelmükkel, szeretetükkel, biztatásukkal támogatták munkámat.

## Felhasznált irodalom

- Antrop, M. (2004): Landscape change and the urbanization process in Europe. *Landscape and Urban Planning*, 67, pp. 9-26.
- Aqua (2002): Science writers' guide to Aqua. NASA Goddard Space Flight Center, Earth Observing System Project Science Office, Greenbelt, 40p.
- ASTER (2001): ASTER Higher-Level Product User Guide, Version 2.0, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 80p.
- Bacsó N. (1958): Budapest és környékének éghajlata. In: Pécsi M. (szerk.) Budapest természeti képe, 744p.
- Balchin, W. G. V., Pye, N. (1947): A micro-climatological investigation of bath and the surrounding district. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 73, pp. 297-323.
- Baranka Gy. (1999): Near surface ozone concentration evaluation and prediction in Budapest. *Időjárás*, 103, pp. 107-121.
- Bartholy J., Pongrácz R. (2006): Comparing tendencies of some temperature related extreme indices on global and regional scales. *Időjárás*, 110: 35-48.
- Bartholy J., Pongrácz R., Barcza Z., Dezső Zs. (2004): Aspects of urban/rural population migration in the Carpathian Basin using satellite imagery. In: *Environmental Change and its Implications for Population Migration* (eds: Unruh, J.D., Krol, M.S., Kliot, N.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht and Boston. "Advances in Global Change Research" Vol. 20.
- Bartholy J., Pongrácz R., Dezső Zs. (2005): A hazai nagyvárosok hősziget hatásának elemzése finomfelbontású műholdképek alapján. "AGRO-21" Füzetek 44, pp. 32-44.
- Bartholy J., Pongrácz R., Gelybó Gy. (2007): Regional climate change expected in Hungary for 2071-2100. *Applied Ecology and Environmental Research*, 5, pp. 1-17.
- Bartholy J., Pongrácz R., Gelybó Gy., Szabó P. (2008): Analysis of expected climate change in the Carpathian Basin using the PRUDENCE results. *Időjárás*, 112, pp. 249-264.
- Ben-Dor, E., Saaroni, H. (1997): Airborne video thermal radiometry as a tool for monitoring microscale structures of the urban heat island. *International Journal of Remote Sensing*, London, 18(14), pp. 3039-3053.
- Berényi D. (1930): A városi háztömbök hatása az éjjeli lehülésekre. *Időjárás*, 34, pp. 46-49.
- Berkes Z. (1947): A csapadék eloszlása Budapest területén. *Időjárás*, 51, pp. 105-111.
- 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.

- Bottyán Zs., Unger J. (2003): A multiple linear statistical model for estimating mean maximum urban heat island . *Theoretical and Applied Climatology* 75, pp. 233-243.
- Bozó L., Eerens, H., Larssen, S., Millán, M. M., Moussiopoulos, N., Papalexiou, S., Samaras, Z. (1999): Air Pollution in European Cities – an Overview. In *Urban Air Pollution – European Aspects*. Kluwer Academic Publishers, pp. 433-463.
- Brinkhoff, T. (2009): City population. <http://www.citypopulation.de>
- Carlson, T. N., Augustine, J. A., Boland, F. E. (1977): Potential application of satellite temperature measurements in the analysis of land use over urban areas. *Bulletin American Meteorological Society*, 58, pp. 1301-1303.
- Chen, X-L., Zhao, H-M., Li, P-X., Yin, Z-Y. (2006): Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, 104, pp. 133-146.
- Deering, D. W. (1978): Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors. Ph.D. Dissertation, Texas A & M University, College Station, USA, 338p.
- Dezső Zs. (2000a): Nagyvárosok szélklímájának potenciális környezeti hatásai Budapest és agglomerációs körzetének példáján. *Tudományos diákköri dolgozat*, 32p.
- Dezső Zs. (2000b): Budapest szélklímájának és potenciális környezeti hatásainak elemzése. *Légkör*, 45, No. 3., pp. 29-34.
- Dezső Zs. (2002): A városi hősziget vizsgálata Magyarország nagyvárosaiban az újgenerációs TERRA/MODIS műholdképek felhasználásával. *Szakközlözet*, 77p.
- Dezső Zs., Bartholy J., Pongrácz R. (2005): Satellite-based analysis of the urban heat island effect. *Időjárás* 109, pp. 217-232.
- Dousset, B., Gourmelon, F. (2003): Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and landcover. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 58, pp. 43-54.
- Eliasson, I. (2000): The use of climate knowledge in urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 48, pp. 31-44.
- Gál T., Unger J. (2009): Detection of ventilation paths using high resolution roughness parameter mapping in a large urban area. *Building and Environment*, 44, pp. 198-206.
- Gallo, K. P., McNab, A. L., Karl, T. R., Brown, J. F., Hood, J. J., Tarpley, J. D. (1993a): The Use of NOAA AVHRR Data for Assessment of the Urban Heat Island Effect. *Journal of Applied Meteorology*, 32, pp. 899-908.
- Gallo, K. P., McNab, A. L., Karl, T. R., Brown, J. F., Hood, J. J., Tarpley, J. D. (1993b): The use of a vegetation index for assesment of the urban heat island effect. *International Journal of Remote Sensing*, London, 14(11), pp. 2223-2230.

- Gallo, K. P., Owen, T. W. (1999): Satellite-Based Adjustments for the Urban Heat Island Temperature Bias, *Journal of Applied Meteorology*, 38, pp. 806-813.
- Gallo, K. P., Tarpley, J. D. (1996): The comparison of vegetation index and surface temperature composites for urban heat-island analysis. *International Journal of Remote Sensing*, London, 17(15), pp. 3071-3076.
- Gillespie, A.R., Rokugawa, S., Hook, S.J., Matsunaga, T., Kahle, A.B. (1999): Temperature/Emissivity Separation Algorithm Theoretical Basis Document, Version 2.4. Department of Geological Sciences, University of Washington, Seattle, 64p.
- Gómez, F., Tamarit, N., Jabaloyes, J. (2001): Green zones, bioclimatics studies and human comfort in the future development of urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 55, pp. 151-161.
- 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, pp. 1713-1722.
- Hafner, J., Kidder S. Q. (1999): Urban heat island modeling in conjunction with satellite-derived surface/soil parameters. *Journal of Applied Meteorology*, Boston, MA, 38(4), pp. 448-465.
- Haszpra L., Szigeti A., Szilágyi I., Tarczay K. (2001): Emission Factors for the Hungarian Car Fleet. *EUROTRAC Newsletter*, 23, pp. 23-27.
- Helbig, A., Baumüller, J., Kerschgens, M. J. (szerk.) (1999): *Stadtklima und Luftreinhaltung*. Springer Verlag, Berlin, 467p.
- Howard, L. (1833): *Climate of London Deduced from Meteorological Observations*, 3d ed. Vol. 1-3. Harvey and Darton. 1138p.
- Huete, A., Justice, C., Leeuwen, W. (1999): MODIS Vegetation Index Algorithm Theoretical Basis Document, Version 3. U.S. Geological Survey Earth Resources Observation and Science Center, 129p.
- Iino, A., Hoyano, A. (1996): Development of a method to predict the heat island potential using remote sensing and GIS data. *Energy and Buildings*, 23, pp. 199-205.
- Jin, M., Dickinson, R. E., Zhang, D. L. (2005): The Footprint of Urban Areas on Global Climate as Characterized by MODIS. *Journal of Climate* 18, pp. 1551-1565.
- Kern A. (2001): Budapesti városklíma állomás az Eötvös Loránd Tudományegyetemen. *Tudományos diákköri dolgozat*, 37p.
- King, M.D. (2000): 24 EOS Measurements. Earth Sciences Portal, Earth Observing System Project Science Office.
- KSH (1995): *A Magyar Köztársaság helységnevtára, 1995.*, Központi Statisztikai Hivatal, Budapest.

- KSH (2000): A Magyar Köztársaság helységnévkönyve, Központi Statisztikai Hivatal, Budapest, 2000.
- KSH (2001): A magyar kisvárosok, Központi Statisztikai Hivatal, Budapest., <http://www.ksh.hu>
- KSH (2008): A Magyar Köztársaság helységnévkönyve 2008, Központi Statisztikai Hivatal, Budapest, 2008., <http://www.ksh.hu>
- Landsberg (1981): The Urban Climate. Academic Press, 275p.
- Lerner J. (1996): Térképészeti alapismeretek. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 240p.
- Matson, M., McClain, E. P., McGinnis, D. F., Pritchard J. A. (1978): Satellite detection of urban heat islands. Monthly Weather Review, 106, pp. 1725-1734.
- Molnár, K. (1999): Urban climatic features in Budapest. In: Proceedings of the 11th Conference on Applied Climatology (of the 79th AMS Annual Meeting and Exhibition), pp.78-81.
- Nichol, J. E. (1996): High-resolution surface temperature patterns related to urban morphology in a tropical city: a satellite-based study. Journal of Applied Meteorology, Boston, MA, 35(1), pp.135-146.
- Oke, T. R. (1982): The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 108, pp. 1-24.
- Pauleit, S., Duhme, F. (2000): Assessing the environmental performance of land cover types for urban planning. Landscape and Urban Planning, 52, pp. 1-20.
- Péczely Gy. (1959): Budapest légszennyeződése különböző makroszinoptikus helyzetekben. Időjárás, 63, pp. 19-27.
- Péczely Gy. (1962): A nagyváros által keltett helyi szélrendszer Budapesten. Időjárás, 66, pp. 354-360.
- Peterson, J. T., Stoffel, T. L. (1980): Analysis of urban-rural solar radiation data from St. Louis, Missouri. Journal of Applied Meteorology, 19, pp. 275-283.
- Pongrácz R., Bartholy J., Dezső Zs. (2006): Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis. Advances in Space Research, 37, pp. 2191-2196.
- Pongrácz R., Bartholy J., Dezső Zs. (2009): Application of remotely sensed thermal information to urban climatology of Central European cities. Physics and Chemistry of Earth (megjelenés alatt)
- Price, J. C. (1979): Assesment of the heat island effect through the use of satellite data. Monthly Weather Review, 107, pp. 1554-1557.
- Probáld F. (1963): Városi energiaforrások jelentősége Budapest éghajlatában. Időjárás, 67, pp. 162-165.

- Probáld F. (1965): A nagyváros éghajlati sajátosságai. Doktori értekezés, 118p.
- Probáld F. (1974): Budapest városklímája. Akadémiai Kiadó, Budapest, 127p.
- Rajasekar, U., Weng, Q. (2009): Urban heat island monitoring and analysis using a non-parametric model: A case study of Indianapolis. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64, pp. 86-96.
- Rao P. K. (1972): Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. Bulletin American Meteorological Society, 53, pp. 647-648.
- Réthy A. (1947): Budapest éghajlata, Budapest.
- Roth, M., Oke, T. R., Emery, W. J. (1989): Satellite-derived urban heat island from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. International Journal of Remote Sensing, London, 10(11), pp. 1699-1720.
- Sándor V. (1999): Budapest légszennyezettségének meteorológiai vonatkozásai. Éghajlati és agrometeorológiai tanulmányok, 1. Városklimatológiai munkaértekezlet, Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, pp. 32-43.
- 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 planning processes. Atmospheric Environment, 33, pp. 4185-4193.
- Scofield, R. A., Weiss, C. E. (1977): A report on the Chesapeake Bay Region NOWCASTING experiment. NOAA Technical Memorandum NESS 94, Washington D. C., 52p.
- Sódar I., Unger J. (1998): Városi humánkomfort esettanulmány Szegeden. Légkör, 43, No. 1., pp. 16-22.
- Soux, A., Voogt, J. A., Oke, T. R. (2004): A model to calculate what a remote sensor 'sees' of an urban surface. Boundary-Layer Meteorology, 111, pp. 109-132.
- Strahler, A., Muchoney, D., Borak, J., Friedl, M., Gopal, S., Lambin, E., Moody, A. (1999): MODIS Land Cover Product Algorithm Theoretical Basis Document, Version 5.0. Center for Remote Sensing, Department of Geography, Boston University, Boston, MA, 66p.
- Stull, R. B. (1989): An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 666p.
- Szegedi S. (2000): Spatial resolution of urban heat island in Debrecen. 3<sup>rd</sup> European Conference on Applied Climatology, Pisa, Italy, 5p., CD-ROM.
- Szegedi S. (2002): A városi környezet kutatása: városklíma mérések Debrecenben. Debreceni szemle 10, pp. 681-691.
- Szepesi D. (1981): A levegőkörnyezet (levegőminőség és humánkomfort) tervezése. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 201p.

- Szepesi D., Schirokné Kriston I. (1999): A városi levegőkörnyezet tervezésének aktuális kérdései. In: Éghajlati és agrometeorológiai tanulmányok, 1. Városlimnológiai munkaértekezlet (szerk. Szalay S.), Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, pp. 6-19.
- Terra (1999): Science writers' guide to Terra. NASA Goddard Space Flight Center, Earth Observing System Project Science Office, Greenbelt, 27p.
- Unger J (2006): Modelling of the annual mean maximum urban heat island with the application of 2 and 3D surface parameters. *Climate Research*, 30, pp. 215-226.
- 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, pp. 59-80.
- Unger J. (1992): Diurnal and annual variation of the urban temperature surplus in Szeged, Hungary. *Időjárás*, 96, pp. 235-244.
- Unger J. (1995): Szeged városklimájának bioklimatológiai értékelése. *Léggör*, 40, No. 3., pp. 29-33.
- 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., Bottyán Zs., Sümeghy Z., Gulyás Á. (2000): Urban heat island development affected by urban surface factors. *Időjárás*, 104, pp. 253-268.
- United Nations (1999): World Urbanization Prospects: The 1999 Revision, United Nations Population Division, Department of Economic and Social Affairs.
- United Nations (2006): World Urbanization Prospects: The 2005 Revision. Population Division, Department of Economic and Social Affairs.
- United Nations (2008a): World Urbanization Prospects: The 2007 Revision, United Nations Population Division, Department of Economic and Social Affairs, 244p.
- United Nations (2008b): Demographic Yearbook, Capital cities and cities of 100.000 and more inhabitants, United Nations Population Division, Department of Economic and Social Affairs.
- Voogt, J. A., Grimmond, C. S. B. (2000): Modeling Surface Sensible Heat Flux Using Surface Radiative Temperatures in a Simple Urban Area. *Journal of Applied Meteorology*, 39, pp. 1679-1699.
- Voogt, J. A., Lagouarde, J-P., Moreau, P., Irvine, M., Bonnefond, J-M., Sollic, F. (2004): Airborne experimental measurements of the angular variations in surface temperature over urban areas: case study of Marseille (France). *Remote Sensing of Environment* 93, pp. 443-462.
- Voogt, J. A., Oke T. R. (1997): Complete urban surface temperatures. *Journal of Applied Meteorology*, 36, pp. 1117-1132.



- Voogt, J. A., Oke, T. R. (2003): Thermal remote sensing of urban climate. *Remote Sensing of Environment* 86, pp. 370-384.
- Voogt, J.A. (2008): Assessment of an Urban Sensor View Model for thermal anisotropy. *Remote Sensing of Environment* 112, pp. 482-495.
- Vukovich, F. M. (1983): An analysis of the ground temperature and reflectivity pattern about St. Louis, Missouri, using HCMM satellite data. *Journal of Applied Meteorology*, 22, pp. 560-571.
- Wan, Z. (1999): MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document, Version 3.3. Institute of Computational Earth System Science, University of California, Santa Barbara, 75p.
- Weidinger T., Molnár K., Szalai S., Szentimrey T. (1999): Features of Budapest's heat island by the urban air quality monitoring network and by road measurements. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 1., No. 2., 24<sup>th</sup> General Assembly Hydrology, Ocean and Atmosphere, pp. 526.
- World Bank (2008): World Development Indicators Database, <http://web.worldbank.org>
- Xian, G. (2008): Satellite remotely-sensed land surface parameters and their climatic effects for three metropolitan regions. *Advances in Space Research*, 41, pp. 1861-1869.