

BUDAPESTI VÁROSI HŐSZIGET ELEMZÉSE: MŰHOLDAS ÉS ÁLLOMÁSI MÉRÉSEK ÖSSZEHOSONLÍTÁSA

ANALYSIS OF THE BUDAPEST HEAT ISLAND: COMPARISON OF SATELLITE- AND GROUND-BASED MEASUREMENTS

Lelovics Enikő, Pongrácz Rita, Bartholy Judit, Dezső Zsuzsanna

ELTE Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest Pázmány Péter sétány 1/A
E-mail: lelovics.eniko@gmail.com, prita@elte.hu, bari@ludens.elte.hu, tante@nimbus.elte.hu

Összefoglalás: Vizsgálataink során a MODIS műholdas szenzorral mért felszínhőmérsékleti értékek és az Országos Meteorológiai Szolgálat mérőállomásain mért felszínközeli léghőmérsékleti értékek összehasonlító elemzését végeztük el a 2001-2008 közötti időszakokra.

Abstract: In the presented analysis satellite based surface temperature time series calculated from MODIS observations are compared to the air temperature time series measured at 2 m height by the Hungarian Meteorological Service for 2001-2008 period.

Bevezetés

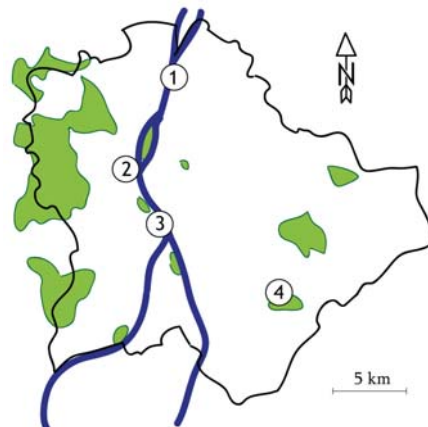
A nagyobb települések területén és közelében - a mesterseges felszínre jellemző módosult sugárzási és párolgási viszonyok, a kibocsátott többletenergia és a levegőbe kerülő szennyezőanyagok hatására - a növényzettel borított természetes felszínhez képest eltérő a terület hőmérséklete, sugárzási egyenlege, napfénytartama, szélviszonyai és vízháztartása (Oke, 1982). A város és környezete között a hőmérsékletben jelentkező különbséget városi hőszigetnek nevezzük (Landsberg, 1981). A városi hősziget az intenzitásával jellemezhető, melyet a város központi és környéki régióinak hőmérsékleti különbségéből számolhatunk (Probáld, 1974).

A vizsgálataink során alkalmazott műholdas felszínhőmérsékleti adatokat a NASA Aqua és Terra nevű műholdjain található, MODIS elnevezésű spektrális sugárzásmérő szolgáltatja, melyek hét infravörös csatorna 1 km²-es horizontális felbontású méréseiből származnak (Bartholy et al., 2005). Mindkét műhold kvázipoláris pályán kering a Föld körül, átlagosan 705 km magasan, és naponta két-két alkalommal haladnak át egy adott hely felett (NASA, 1999). A Terra által készített MODIS-képek általában 9-10 UTC és 20-21 UTC körül állnak rendelkezésre, míg az Aqua 12-13 UTC és 2-3 UTC körül ér fölének (Dezső et al., 2005). A műholdképek felhasználhatóságát a felhőzet korlátozza, így csak a felhőmentes időpontokról és helyekről vannak hőmérsékleti adataink. Ez a vizsgálatok során a rendelkezésre álló adatok számát mintegy 64%-kal csökkentette.

A műholdas mérésekkel nem a levegő, hanem a felszín hőmérsékletét határozzuk meg. Ennélfogva a kapott értékek a meteorológiai gyakorlatban szokásos léghőmérsékleti értékektől jelentősen eltérhetnek, térbeli és időbeli eloszlásuk is számottevően különbözhet. A műholdas vizsgálati módszernek nagy előnye a hagyományos meteorológiai mérésekhez képest, hogy nagy területet fed le

finom térbeli felbontással. A mérések nagy területen is közel egyidejűnek tekinthetők, mely kedvezőbb vizsgálati feltételeket tesz lehetővé, mint például a finom felbontású mobil mérések (Unger és Sümegehy, 2002).

A 2001-2008-as időszakra vonatkozó elemzéseink során a műholdas átvonulásokhoz időben legközelebb eső léghőmérsékleti értékeket az Országos Meteorológiai Szolgálat négy budapesti mérőállomásáról származó idősorokból választottuk le. Az állomások észak-déli irányban a következők: (1) IV. kerület, Újpest; (2) II. kerület, Országút (Kitaibel Pál utca); (3) XI. kerület, Lágymányos és (4) XVIII. kerület, Pestszentlőrinc (1. ábra). Az állomások közvetlen közelében lévő MODIS rácspontot a MODLAND koordináta-meghatározó eszközének (Tile Calculator) (NASA, 2005) felhasználásával határoztuk meg.



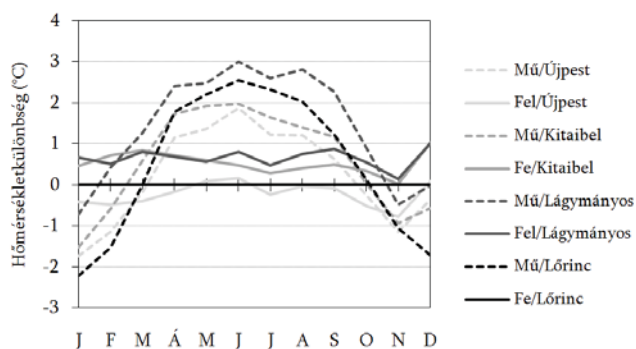
1. ábra: Az Országos Meteorológiai Szolgálat meteorológiai mérőhálózata Budapesten (1: Újpest, 2: Kitaibel Pál utca, 3: Lágymányos, 4: Pestszentlőrinc)

A műholdas és állomási mérések térbeli léptéke eltér egymástól. Míg a MODIS esetén egy rácspontra vonatkozó adat egy 1 km²-es területet jellemez, addig a meteorológiai mérőállomások értékei egy adott pontra vonatkoznak. Mivel a meteorológiai állomások korlátozott számban állnak rendelkezésre, így ezek nem szolgáltatnak elegendő információt a városi hősziget részletes térbeli szerkezetének elemzéséhez.

A hőmérsékleti értékek összehasonlítása

Vizsgálataink során kiszámítottuk a havi átlaghőmérsékleti értékeket mind a négy mérőhelyre, éjszakára és nappalra, a Terra és az Aqua műhold áthaladásának időpontjára is. A későbbiekben ezek átlagolásával készítettük el a hosszabb időszakra (négy évszakra, évre) vonatkozó hőmérsékleti átlagokat, hogy így egyforma súllyal vegyük figyelembe az év különböző időszakait. Ellenkező esetben a nyári adatok nagyobb száma miatt magasabb éves átlagértékeket kaptunk volna.

A havi átlaghőmérsékleti értékek esetén (2. ábra) az állomási adatsorok alapján a két pesti és a két budai állomás értéke hasonló, közöttük kb. 0,5-1 °C a különbség. A műholdas mérési adatok alapján a lágymányosi mérőpont értékei a legmagasabbak, a legalacsonyabbak pedig



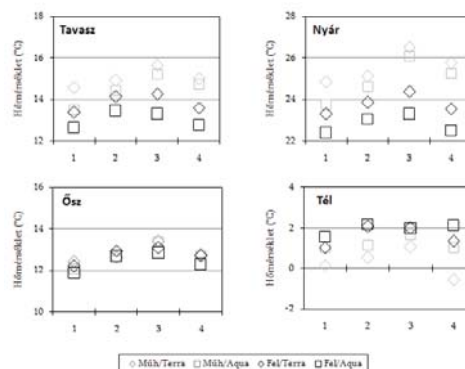
2. ábra: Havi átlaghőmérsékleti értékek eltérése a pestszentlőrinci felszíni mérésektől. Fe: felszínközeli légköri hőmérséklet (folytonos vonallal jelölve); Mű: műholdas felszínhőmérséklet (szaggatott vonallal)

az újpestiek, kivéve télen. Megfigyelhető, hogy tavasztól őszig a műholdas felszínhőmérsékleti mérések értékei magasabbak, mint az állomások légköri hőmérsékleti méréseinek havi átlagai. Leghűvösebb ebben az időszakban az újpesti állomási, legmelegebb a lágymányosi műholdas mérés. Télen ellenkezőleg, a műholdas mérések átlagértékei alacsonyabbak, különösen a pestszentlőrinci és az újpesti értékek alacsonyak. Legmagasabbak a Kitaibel Pál utcai és a lágymányosi állomási mérések átlagértékei. Évszakos szinten is megállapítható, hogy nappal általában a műholdas adatsorok alapján mutatható ki magasabb hőmérséklet, kivéve télen, amikor ez csak az Aqua műhold áthaladási időpontjában (dél körül) igaz. Tavasszal és nyáron akár 4-5 °C is lehet a kétféle módszer alapján meghatározott évszakos nappali átlaghőmérséklet között. Télen éjjel a két műholdas adatsor egyaránt kiug-

róan alacsony átlaghőmérsékletet mutat az állomási adatokhoz képest, míg más évszakokban az Aqua áthaladási időpontjában (éjfél után) detektálható alacsonyabb hőmérséklet. Éjszaka nincs a műholdas és állomási adatsorok átlagértékei között akkora különbség, mint nappal.

Összehasonlítottuk a havi átlaghőmérsékleti értékek napszakos eloszlását is. Azt tapasztaltuk, hogy nappal a műholdas mérések magasabb értéket mutatnak a felszínközeli légköri hőmérsékleti értékekhez viszonyítva, kivéve télen. Éjszaka pedig fordítva: az állomási mérések értékei a magasabbak, a kettő közötti különbség főleg télen jelentős. Kivételt képez az újpesti adatsor, itt ugyanis nyáron éjszaka is a műholdas mérések a magasabbak. Általában a műholdas mérések alapján a másik három mérési ponton nappal hidegebb van, mint Pestszentlőrincen, éjszaka pedig melegebb. Az állomási mérések alapján is hasonló a helyzet a két belvárosi állomásra nézve, viszont Újpesten nem: ott nappal van melegebb és éjszaka hidegebb.

A nappali és az éjszakai értékek átlagát véve képeztük az évszakos átlaghőmérsékleti értékeket (3. ábra). A Terra áthaladásakor (reggel és este) megfigyelt értékek magasabbak mindkét mérés adatai alapján, mint az Aqua áthaladásakor. Tavasszal és nyáron a felszínhőmérséklet egyértelműen magasabb, mint a légköri hőmérséklet. Ősszel a



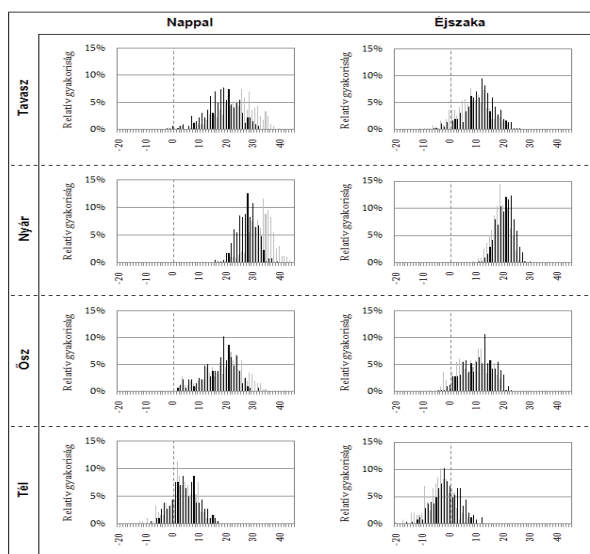
3. ábra: Évszakos átlaghőmérsékleti értékek Budapest négy mérési pontján (1: Újpest, 2: Kitaibel Pál utca, 3: Lágymányos, 4: Pestszentlőrinc)

legkisebb a különbség az értékek között, egy-egy állomáson nem haladja meg az eltérés a 0,5 °C-ot.

Télen az állomási mérések értékei magasabbak, főleg az Aqua áthaladásának időpontjaiban (délben és éjfél után). A kétféle módszerrel mért értékek között télen van a legkisebb különbség. Éves szinten a műholdas mérések alapján mind a négy mérőpontban magasabb átlaghőmérsékleti értékeket kaptunk, mint az állomási mérések alapján.

Mindkét mérési módszer esetén a legalacsonyabb hőmérsékleti érték az újpesti, a legmagasabb pedig a lágymányosi pontra vonatkozó. Legnagyobb a különbség a lágymányosi pont átlaghőmérsékleti értékei között (0,76 °C), legkisebb a Kitaibel Pál utcai pontra vonatkozó értékek között (0,02 °C).

Megvizsgáltuk a Welch-próba (Dévényi és Gulyás, 1988) segítségével, hogy a műholdas és állomási mérések alapján számolt havi átlagok között kimutatható-e szignifikáns különbség. Végrehajtottuk a statisztikai próbát 0,05-ös és 0,01-es szignifikancia szintre is. Míg Újpesten az év 6, illetve 8 hónapjában szignifikánsan nem különböznek a havi átlagok, Pestszentlőrincen csupán az év 2, illetve 4 hónapja ilyen. A havi átlaghőmérsékleti értékek általában a tavaszi és az őszi időszakban térnek el kevésbé, télen és nyáron tapasztalhatóak nagyobb különbségek a két különböző típusú mérés havi átlagértékei között. A napszakokat külön-külön vizsgálva általában a nappali mérésekből származó átlagértékek nem térnek el egymástól szignifikánsan, éjszaka jobban különböznek



4. ábra: Hőmérsékleti értékek (°C) eloszlása a Terra áthaladásának időpontjaiban, Pestszentlőrincen, 2001-2008 (Felszíni mérés; Állomási mérés)

az adatsorok. Kivételt jelentenek ez alól az újpesti mérések, amik alapján éjszaka majdnem minden hónapra igaz, hogy a kétféle átlaghőmérséklet nem különbözik szignifikánsan.

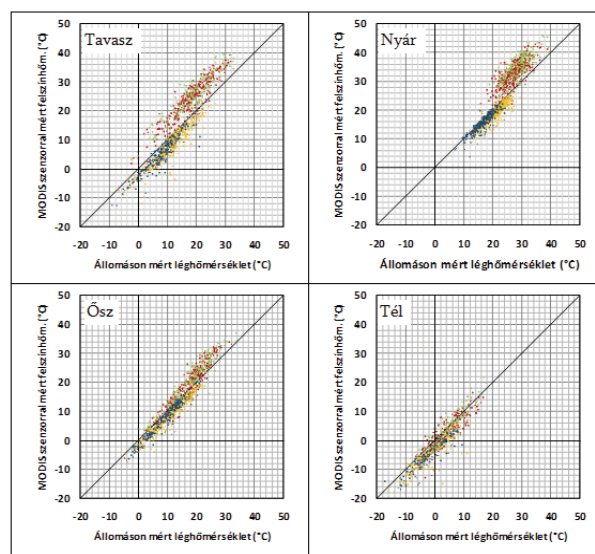
Az idősorok markáns éves menetének kiküszöbölésével meghatároztuk a hőmérsékleti anomália idősorokat. Majd ezekre kiszámítottuk a lineáris korrelációs együtthatókat. A műholdas és az állomási mérések közötti korreláció erős, az együtthatók értékei 0,85-0,95 közöttiek. Az összes korrelációs együttható 0,05-ös szinten szignifikáns a t-próba (Dévényi és Gulyás, 1988) alapján. A legalacsonyabb korrelációs együttható a Kitaibel Pál utcai, a legmagasabb az újpesti mérések alapján adódott.

Gyakorisági eloszlások összehasonlítása

A műholdas és az állomási mérések eloszlását évszakos bontásban hisztogramos formában is összehasonlítottuk nappalra és éjszakára, mind a négy mérőpontra. Terjedelmi okok miatt ebben a cikkben csak a Pestszentlőrincen

(4. ábra) vonatkozó Terra/MODIS műholdas felszínhőmérsékletre és a felszínközeli léghőmérsékletre vonatkozó mérési adatok évszakos relatív gyakoriságát mutatjuk be.

Éjszaka általában a felszínhőmérsékleti értékek között nagyobb az alacsonyabb értékek gyakorisága a léghőmérsékleti mérések adatsorához viszonyítva. Nappal ellenkezőleg: a műholdas értékek között nagyobb a magasabb értékek gyakorisága (kivételt csupán télen tapasztalhatunk). Ezek a gyakorisági értékek leginkább nyáron, a nappali mérések során különülnek el egymástól, amikor a felszín a legjobban felmelegszik. Ugyancsak nyáron a legkisebb a hőmérsékleti értékek szórása, ilyenkor egy 1 °C-os hőmérsékleti intervallum gyakorisága akár 12-15% is lehet. Mind a négy mérőpontra minden évszak-



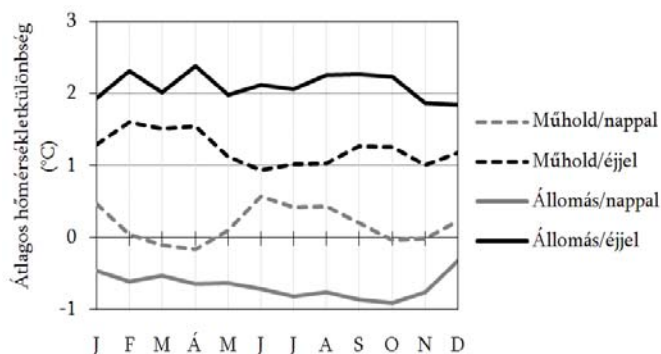
5. ábra: A műholdas és az állomási mérések összehasonlítása pontdiagramok segítségével Pestszentlőrincen, 2001-2008 (Nappal/Terra; Nappal/Aqua; Éjjel/Terra; Éjjel/Aqua)

ra létrehoztunk olyan pontdiagramokat, ahol az azonos időponthoz tartozó adatpárokat egy-egy pont jelképezi. Az egyik tengely az állomási mérések léghőmérsékleti értékeire vonatkozik, a másik tengely a műholdas mérések értékeire (5. ábra). A vízszintessel 45°-os szöget bezáró egyenesre kerülnének a pontok akkor, ha nem lenne a két mérés között egyáltalán különbség. A diagramokon eltérő színekkel jelöltük a napszakokat és a két műhold áthaladásaihoz tartozó időpontokat. Látható, hogy így minden diagramon jól elkülönülnek a nappali és az éjszakai mérések egymástól. Nappali mérések esetén a műholdas mérések értékei magasabbak (ekkor jobban szóródnak a pontok), éjszaka pedig alacsonyabbak, mint az állomási mérések.

Ilyenkor egy-két kiugró adat is megfigyelhető, mely valószínűleg nagyrészt a hófedettséggel magyarázható. A két műhold között kis különbség van, néhány esetben éjszaka az Aqua áthaladási időpontjában alacsonyabb értékeket mértek.

Városi hősziget-intenzitás a műholdas hőmérsékleti értékek alapján

Vizsgálataink során minden állomásra kiszámítottuk a műholdas felszínhőmérsékleti értékek városkörnyéki átlagtól való eltérését, mely az adott 1 km²-es terület városi hősziget-intenzitását adja meg. Ezeknek az intenzitásoknak a havi átlagát elemeztük napszakos bontásban. Az intenzitás értéke a légmányaosi mérőpontra a legmagasabb, s az újpestin a legalacsonyabb. Éjjel viszonylag kiegyenlítették, magasak az átlagértékek (1 és 5 °C között, de egy-egy mérőpontra 1,5 °C-os intervallumon belül mozognak). Pestszentlőrincen nyáron, a másik három mérőhelyen az év első negyedében van az átlagértékek maximuma. A nappali intenzitás értékek alacsonyok, az éven belül változókéonyabbak, mint az éjszakaiak. Tavaszszal és ősszel a Kitaibel Pál utcában és Újpesten negatív értékeket kaptunk, azaz ilyenkor az ott mért műholdas felszínhőmérsékletek alacsonyabbak, mint a városkörnyéki átlaghőmérséklet.



6. ábra: A két belvárosi és a két külterületi állomás közötti havi átlagos hőmérsékletkülönbség nappal és éjszaka, 2001-2008

A belvárosi és a külterületi mérőhelyek közötti hőmérsékletkülönbség elemzése

Mivel felszíni mérőállomások adatai csak négy helyről állnak rendelkezésünkre, így ezek segítségével szeretnénk a hősziget-intenzitást jellemezni. Általában Pesten a Nagykörutat, Budán pedig ennek a meghosszabbítását tekintjük a belváros határvonalának. A két budai meteorológiai állomás (Kitaibel Pál utca, Lágymányos) ennek a területnek a szélén van, így a vizsgálat során ezeket belvárosinak, a két pestit (Újpest, Pestszentlőrinc) pedig Budapest közigazgatási határához való közelsége miatt külterületinek tekintettük. A belvárosi és a külterületi állomások közötti hőmérsékletkülönbséggel jellemezhetjük a hősziget-intenzitást.

A belvárosi állomások átlagosan 0,75 °C-kal melegebbek, mint a külterületiek. A különbség éves menete

viszonylag gyenge, nem haladja meg a 0,6 °C-ot (6. ábra). Éjszaka magasabb értékeket kapunk, mint nappal, a műholdas és az állomási mérések alapján egyaránt. Az állomási mérések alapján meghatározott intenzitás éjszaka magasabb, nappal alacsonyabb, mint a műholdas mérések alapján. Ez utóbbi érték nappal negatív, azaz a pesti állomásokon az állomási mérések szerint nappal melegebb a felszínközeli légréteg, mint a budaiakon. Az állomási mérések alapján a legnagyobb a hőmérsékletkülönbség éjszaka, ami összhangban van a megfigyelésekkel, miszerint a hagyományos mérésekkel megállapított hősziget-intenzitás este a legerősebb, nappal viszont gyenge, vagy akár negatív is lehet (Unger és Sümeghy, 2002). A Terra és az Aqua műhold átvonulási időpontjában történő mérések átlagértékei között nem találtunk jelentős különbséget.

A teljes időszak minden egyes hónapjára képzett idősor a két belvárosi és a két külterületi állomás között fellépő átlaghőmérsékletek különbségét adja meg (7. ábra). A grafikonokon oszlopokkal jelöltük az adott hónap adott napszakához tartozó, rendelkezésre álló adatok számát. Jól látszik a felhasznált adatok egyenlőtlen éven belüli eloszlása. A téli félévben jóval kevesebb adatot használhattunk fel a felhőzet nagyobb gyakorisága miatt, mint a nyári félévben. Ezen kívül 2001-2002 során kevesebb az adat, melynek oka az Aqua műhold későbbi üzembe helyezése. Így például 2001 júniusából összesen 2 nappali adat állt rendelkezésre, s emiatt az átlag szélsőségesen alacsony. Az eredmények a korábbi vizsgálatok tapasztalatait erősítik meg. Nappal (7/a ábra) a műholdas mérések alapján 0-1 °C körüli, a felszíni mérőállomások adatai alapján pedig 0 °C alatti különbségértékeket kaptunk, azaz a műholdas felszínhőmérséklet a belvárosi mérőpontokon volt magasabb, míg a felszínközeli léghőmérséklet inkább a külterületi állomásokon. A műholdas felszínhőmérsékleti értékeknek nyáron és télen, a felszín közelében mért léghőmérsékleti értékeknek télen van maximuma. A 2003-as és 2007-es években hiányzik ez a műholdas nyári maximum, ami annak köszönhető, hogy ezek szélsőségesen meleg évek voltak, s ekkor az egész felszín egyenletesen átmelegedhetett (Dezső, 2009). Éjszaka (7/b. ábra) mindkét intenzitás-idősor egyértelműen a pozitív tartományba esik. A műholdas mérések közti havi átlagos hőmérsékletkülönbség nagyrészt 1-2 °C között vannak, az állomási mérések alapján számított havi átlagos különbségek ezt kb. 1 °C-kal haladják meg.

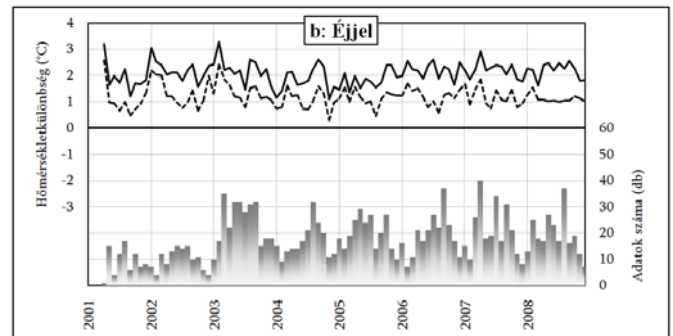
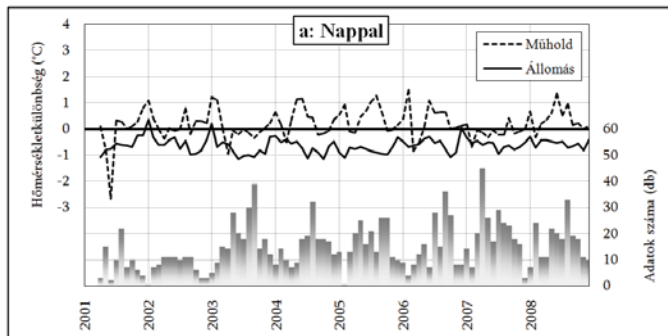
Összefoglalás

Vizsgálataink során az Aqua és a Terra műhold MODIS szenzora által 2001-2008 során mért felszínhőmérsékleti értékeket hasonlítottuk össze az Országos Meteorológiai Szolgálat Budapest területén található négy szinoptikus és klímaállomásán mért léghőmérsékleti értékekkel. Elemzéseink alapján az alábbi következtetéseket vonhatjuk le:

(1) A műholdas mérések havi átlaghőmérsékleti értékei nyáron magasabbak, télen alacsonyabbak, mint az állomási mérések átlagértékei. Ez a felszín erőteljesebb felmelegedésének és lehülésének köszönhető.

(2) A műholdas és az állomási mérések alapján meghatározott évszakos átlaghőmérsékleti értékek között összevetve találtuk a legkisebb különbséget. Tavasszal és nyáron

TP-338 számú pályázatait támogatták. További segítséget nyújtott az MTA TKI Alkalmazkodás a klímaváltozáshoz című (2006/TKI/246) programja, a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium, az Európai Regionális Fejlesztési Alap CC-WATERS nevű projektje (SEE/A/022/2.1/X), valamint az Európai Unió és az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával az "Európai Léptékel a Tudásért, ELTE-TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0003. A felső-



7. ábra: A két budai és a két pesti állomás közötti hőmérsékletkülönbség havi átlagai, valamint az átlagképzéshez használt adatok száma a vizsgált nyolc év során

nagyobb a kettő eltérése. Általában nappal a műholdas, éjszaka pedig az állomási értékek voltak magasabbak.

(3) Az éves átlaghőmérsékleti értékek az újpesti mérőponton a legalacsonyabbak, és a lágymányosi ponton a legmagasabbak. A műholdas és állomási mérések alapján meghatározott átlagértékek között a legkisebb a különbség a Kitaibel Pál utcában, a legnagyobb Lágymányoson.

(4) Két mérőállomást belvárosiként, kettőt külterületiként definiálva a közöttük fellépő hőmérsékletkülönbségeket a hősziget-intenzitás jellemzésére alkalmaztuk. Ezek az értékek éjjel magasabbak, nappal alacsonyabbak, vagyis a budapesti hősziget éjszaka erőteljesebb, nappal kisebb intenzitású. Az állomási mérések alapján szélsőségesebbek, mint a műholdas mérések alapján. Nappal akár negatív is lehet az állomási mérések különbségeként meghatározott hősziget-intenzitás, ami arra utal, hogy ilyenkor a külterületi állomásokon mért hőmérséklet magasabb, mint a belvárosi állomásokon.

Köszönetnyilvánítás

A műholdas felszínhőmérsékleti adatbázis előállítására és rendelkezésre bocsátására az amerikai NASA-nak köszönhető, melyhez a Földfelszíni Megfigyelőrendszer Adatközpontján keresztül jutottunk hozzá. Kutatásainkat az OTKA T-049824, K-67626, K-69164, K-78125 számú pályázatait, valamint az IHM TP-241, TP-258, TP-287,

oktatás minőségének javítása a kutatás-fejlesztés-innováció-oktatás fejlesztésén keresztül" pályázat. A felszíni léghőmérsékleti adatok leválasztásáért köszönetet mondunk az Országos Meteorológiai Szolgálatnak.

Irodalomjegyzék

- Bartholy J., Pongrácz R., Dezső Zs. 2005: A hazai nagyvárosok hősziget hatásának elemzése finomfelbontású műholdképek alapján. – *Agro-21 füzetek*. 44. pp. 32-44.
- Dezső Zs., Bartholy J., Pongrácz R. 2005: Satellite-based analysis of the urban heat island effect. – *Időjárás*. 109. pp. 217-232.
- Dezső Zs. 2009: A magyarországi és közép-európai nagyvárosokban kialakuló városi hősziget vizsgálata finom felbontású műholdképek alapján. – *Doktori (PhD) értekezés*. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest. 112 p.
- Dévényi D., Gulyás O. 1988: Matematikai statisztikai módszerek a meteorológiában. – *Tankönyvkiadó*, Budapest. 443 p.
- Landsberg, H. E. 1981: The Urban climate. – *Academic Press*. 275 p.
- NASA 1999: Science writers' guide to Terra. – *NASA Earth Observing System Project Science Office*, Greenbelt, MD. 26 p.
- NASA 2005: MODLAND Tile Calculator. <http://modis-250m.nascom.nasa.gov/cgi-bin/developer/tilemap.cgi>
- Oke, T. R. 1982: The energetic basis of the urban heat island. – *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 108. pp. 1-24.
- Probáld F. 1974: Budapest városklímája. – *Akadémiai Kiadó*, Budapest. 127 p.
- Unger J., Sümeghy Z. 2002: Környezeti klimatológia. Kisléptékű éghajlatok, városklíma. – *JATEPress*, Szeged. 202 p.