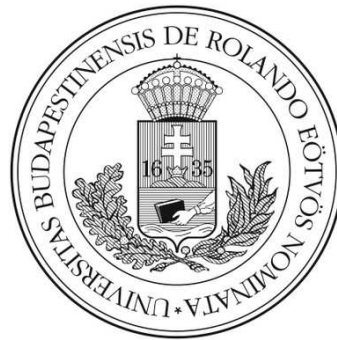


Eötvös Loránd Tudományegyetem
Meteorológiai Tanszék

Műholdas és állomási méréseken alapuló városi hősziget vizsgálat Budapest térségére



Készítette: Lelovics Enikő
Meteorológia MSc szak

Témavezetők:

Pongrácz Rita

Bartholy Judit

ELTE Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2012

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. A városok általános éghajlati jellemzői	7
3. Alkalmazott mérőrendszerek	13
3.1. Terra és Aqua kvázipoláris műholdak	13
3.2. Az Országos Meteorológiai Szolgálat mérőhálózata	16
3.3. A műholdas és állomási mérés tulajdonságainak összehasonlítása	22
4. Felhasznált adatok	23
4.1. Műholdas felszínhőmérsékleti adatok	23
4.2. Állomási léghőmérsékleti adatok	26
4.3. Távolság a város középpontjától	26
4.4. Tengerszint feletti magasság	27
5. Vizsgálatok és eredmények	29
5.1. A mérőállomásokhoz tartozó rácspontok vizsgálata	29
5.2. Az egyes mérőállomásokon tapasztalható hőmérsékleti többlet	35
5.3. Rácsponti információk alapján a léghőmérsékleti mező becslése	36
5.4. Intenzitás mezők meghatározása	41
6. Összefoglalás	49

1. Bevezetés

A városokban az emberi tevékenység erősen érvényesül, és kifejti hatását. Az antropogén tevékenység jelentősége elsősorban a levegő összetételének, sugárzási, hőtani és áramlástanai viszonyoknak a megváltoztatásában van (Probáld, 1974). Vizsgálatunk középpontjában az ennek hatására kialakuló hőmérsékleti többlet, a *városi hősziget* (Landsberg, 1981) áll.

A legelső városklímával fogalkozó mű majdnem 200 éve jelent meg, melyben London éghajlatát mutatja be Howard (1820). Ezután az első nagyobb, összefoglaló könyvet Kratzer (1956) készítette el.

Budán a rendszeres meteorológiai mérések 1779-ben kezdődtek, miután a nagyszombati egyetemet és az egyetemi csillagdat műszereivel és a megfigyeléseket végző professzorral együtt Budára költöztették. 1781-től ez lett az első nemzetközi mérőhálózat, a *Societas Meteorologica Palatina* legkeletibb pontja, amely már egységes műszerekkel és módszertannal biztosította a mérések összehasonlíthatóságát. A hőmérőket például egy épület északi oldalán kellett elhelyezni, árnyékos helyen. A szervezett mérésorozat az 1781–1792 időszakban zajlott, melyben a budai mérőhely végig részt vett (Czelnai, 2004). Más nagyvárosokban is végeztek méréseket a teljes időszakban (pl. München, Mannheim) vagy legalább időszakosan (pl. London, Róma, Brüsszel, Stockholm).

Később a budapesti mérőhelyeket bővítették, de igazán hosszú adatsorokat nem hoztak létre, sok mérőállomás csak rövid ideig működött. 1910 és 1970 között 24 állomás működött több-kevesebb ideig (1. táblázat). Összességében ezen időszak alatt egyedül a Kitaibel Pál utca rendelkezik hiánytalan idősorral, és a krisztinavárosi mérőhely végzett még az egész időszakban méréseket (igaz, annak adatsora nem hiánytalan). Ezek közül ma is működik a Kitaibel Pál utcai (automata mérések kezdete: 1997), és a pestszentlőrinci (1995) állomás, és van három azóta indult mérőállomás: Lágymányos (1999), Újpest (2001), és Ferihegy (2011).

Több, Budapest éghajlatának leírásával foglalkozó átfogó mű jelent meg ebben az időszakban, például Réthly (1947) és Bacsó (1958) tanulmánya. Ezek nem a városon belüli kisebb skálájú különbségeket vizsgálták, hanem egy-egy állomásra vonatkozó hosszú mérési adatsorok alapján jellemezték a térség makroklímáját.

1967–1971 időszakban egy nagy mérési sorozatot végeztek, főleg szélklimatológiai vizsgálat céljával. Ekkor 23 mérőállomás végzett szélmerést egyidőben Budapesten, és annak tágabb környezetében (pl. Dobogókő, Vác, Gödöllő) (Dezső, 2000).

1. táblázat. 1910-1970 között működő meteorológiai mérőállomások Budapesten (Probáld, 1974) alapján. Jelölések:

+: működött,

-: nem működött,

/: időszakosan, a tízéves időszakot nem hiánytalanul lefedve

		1911- -1920	1921- -1930	1931- -1940	1941- -1950	1951- -1960	1961- -1970
01	Kitaibel Pál utca	+	+	+	+	+	+
02	Szabadság-hegy	-	/	+	/	+	+
03	Gellért-hegy	/	+	+	/	/	/
04	Kamaraerdő	-	-	/	/	+	+
05	Nagytétény	-	-	-	/	+	+
06	János-hegy	+	/	-	-	-	-
07	Herman Ottó utca	+	/	-	-	/	-
08	Adyliget	-	-	-	-	-	/
09	Pesthidegkút	-	-	-	-	/	/
10	Krisztinaváros	+	+	+	/	+	+
11	Óbuda	-	/	/	-	-	-
12	Margit-sziget	-	/	+	/	-	-
13	Pestszentlőrinc	-	-	-	-	/	+
14	Pestszentimre	-	-	-	-	+	/
15	Kőbánya	+	/	-	-	-	-
16	Győri út	/	/	-	-	-	-
17	Népstadion út	-	-	-	/	+	/
18	Csepel	-	-	/	/	-	-
19	Rákospalota	-	-	-	-	/	+
20	Soroksár	-	-	-	-	/	/
21	Káposztásmegyér	/	-	-	-	-	-
22	Gyáli út	-	-	-	-	-	/
23	Madách tér	-	-	-	-	-	/
24	Állatkert	-	-	-	-	-	/
/	időszakos működés (db)	3	7	3	8	6	9
+	folyamatos működés (db)	5	3	5	1	7	7

Probáld (1974) jelentetett meg Budapest éghajlatáról egy részletes, minden állapotjelző vizsgálatára kiterjedő könyvet. Ő a városon belüli különbségek vizsgálatára törekedett, amire többek között az ekkoriban a város területén működött 6 éghajlatkutató állomás és a több, mint 50 csapadékmérő állomás nyújtott lehetőséget.

Több, mint tíz évre rendelkezésünkre áll a NASA két kvázipoláris műholdja által mért felszínhőmérsékleti mező. Ez jobb térbeli felbontású, mint amit hagyományos mérőállomások alkalmazásával elérhetünk (Wan, 1999). A különböző mérési módszerek alkalmazásával más-más mennyiséget mérhetünk, melyek térbeli és időbeli eloszlása jelentősen eltér (Voogt and Oke, 2003).

Az ELTE Meteorológiai Tanszékén 2000 óta a MODIS spektrális sugárzásmérő által távérzékeléssel mért adatokból származtatott felszínhőmérsékletet alkalmazzák a városklimatológiai kutatások céljára, amelyek azonban csak derült időben alkalmasak a hősziget vizsgálatára (Dezső et al., 2012). Korábbi vizsgálatokat végeztek Budapest esetére (Pongrácz et al., 2005), más hazai nagyvárosokra (Dezső et al., 2005), illetve közép-európai nagyvárosokra (Pongrácz et al., 2010). E vizsgálatokhoz kapcsolódva be tanulmányaim során. 2008–2009-ben a műholdas felszínhőmérsékleti mezőket finom felbontású léghőmérsékleti mezőkkel hasonlítottuk össze (Lelovics, 2008), amiket Szeged és Debrecen városában a 2002–2003-as autós mérési sorozat során hoztak létre. 2009–2010-ben a négy budapesti mérőállomás (északról délre: Újpest, Kitaibel Pál utca, Lágymányos, Pestszentlőrinc) és a hozzájuk tartozó felszínhőmérsékleti értékek – mint pontszerű idősorok – összehasonlítását végeztük a 2001–2008-as időszak értékei alapján (Lelovics, 2009). 2010–2011 során kibővítettük a vizsgált mérőpontokat két, városon kívüli mérőponttal (Penc és Kakucs), valamint figyelembe vettük a városi és a városkörnyéki mező átlaghőmérsékletének napi idősorát is (Lelovics, 2010). Jelen dolgozatban a mérési időszakot kibővítettük 2001–2010-re, és az időbeli meneten kívül a térbeli szerkezettel is foglalkozunk. Az egyes állomásokra, valamint azok különbségére vonatkozó idősorokon kívül az egész várost és környékét lefedő 70×70 pixeles műholdas felszínhőmérsékleti mezők alapján próbálunk hasonló térbeli felbontással rendelkező léghőmérsékleti (és intenzitás) mezőket előállítani, amihez többféle földrajzi állandót is figyelembe veszünk.

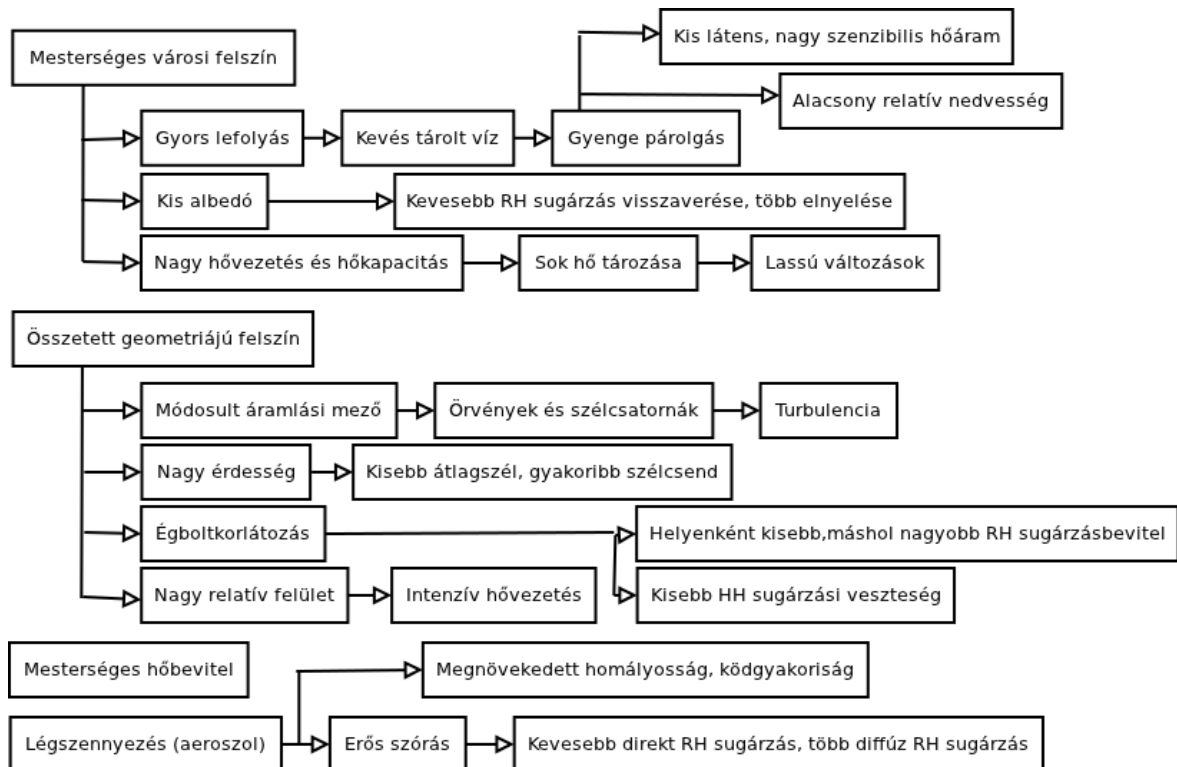
Jelen vizsgálatunk célja a felszínhőmérséklet és a léghőmérséklet kapcsolatának feltárása Budapest esetére, és a finom felbontással rendelkezésre álló felszínhőmérsékleti mező alapján a léghőmérsékleti mező becslése.

A dolgozatban először bemutatjuk a városklímát kialakító folyamatokat, leírjuk a városklíma általános jellemzőit és hatásait. Röviden áttekintjük a budapesti

városklíma-kutatás történetét (2. fejezet). Ismertetjük a műholdas mérőrendszert és az Országos Meteorológiai Szolgálat felszíni mérőhálózatának budapesti részét. Bemutatjuk az in-situ léghőmérséklet mérés és a műholdakról távérzékeléssel történő felszínhőmérséklet mérés közötti legfontosabb különbségeket (3. fejezet). Ismertetjük a felhasznált adatokat, az alkalmazásukhoz szükséges előfeldolgozást (4. fejezet). Leírjuk az elvégzett vizsgálatokat, és az azok során szerzett tapasztalatainkat (5. fejezet). Végül összefoglaljuk a legfontosabb eredményeket.

2. A városok általános éghajlati jellemzői

A városokban jelentkező természetátalakítás sokféle, bonyolult hatásokkal bír. Megváltoznak a sugárzási, hőtani, vízháztartási jellemzők valamint a légkör összetétele, és ezek a változások hatással vannak a városi területek éghajlatára. A legfontosabb összefüggéseket mutatja a 1. ábra Probáld (1974) és Unger és Sümeghy (2002) összegzései alapján.



1. ábra. A városklímát kialakító tényezők

A legfontosabb változások a természetes környezethez képest: (1) A felszín mesterséges anyagokkal van borítva, melyek hőtani, sugárzási és vízháztartási tulajdonságai eltérnek a természetes felszínétől. Emiatt megváltozik a sugárzási egyenleg, megváltozik az energiaegyenleg, lecsökken a rendelkezésre álló víz mennyisége a talajban, és a levegőben is, energiatöbbletet és szárazodást okozva. (2) A felszín érdessége a természetesnél jóval nagyobb, az egységnyi földfelszínre jutó teljes aktív felszín is megnő, és ez befolyásolja a sugárzási mérleget, a besugárzás területi inhomogenitását növeli, az áramlást gyengíti – kivéve ahol szélcatornák jönnek létre – és turbulensebbé teszi. (3) A mesterséges hőbevitel mint pozitív tag jelenik meg az energiaegyenlegben. (4) Az aeroszol-koncentráció megnő, ami befolyásolja a sugárzási mérleget.

A megváltozott sugárzási és hőháztartási egyenlegnek köszönhetően fellép a városokra jellemző hőmérsékleti többlet, amit *városi hőszigetnek* nevezünk. Ez a léghőmérsékleti térképeken úgy jelenik meg, hogy a várost zárt izotermák veszik körül – azaz, ha az izotermákat mint a domborzat szintvonalait tekintjük, a város szigetyszerűen kiemelkedik. Az izotermák a város szélén sűrűsödnek, a város belsejében már kisebb a hőmérsékleti gradiens (Oke, 1982).

Az így létrejött hőmérsékleti többlet hatására megnő a városi felszín által kibocsátott hosszuhullámú sugárzás (ezt használja ki a legtöbb felszínhőmérséklet mérő szenzor). A meleg felszín a felette elhelyezkedő levegő számára termikus kényszerként viselkedik, és melegítő hatást fejt ki. A város és környezete között fellépő hőmérsékletkülönbség a magasban nyomáskülönbséget okoz, ami pedig zárt helyi cirkulációt hoz létre (*városi szél*), a város területén feláramlást, a környezetében pedig leáramlást. A cirkuláció felszálló ága a gomolyfelhők képződését segíti, ennek eredményeképpen valamennyire csökken a napfénytartam, a direkt rövidhullámú besugárzás – ellenben megnő a diffúz sugárzás mennyisége, és megnő a konvektív csapadék mennyisége, ez utóbbit viszont némileg ellensúlyozza a város feletti légtérben lévő száraz levegő. A hőmérsékleti többlet miatt kevesebb hó hullik, és rövidebb ideig marad meg, ami miatt télen egyrészt az albedó még inkább alacsony marad a város környezetéhez képest, másrészt hó hiányában a víz kevésbé tározódik, gyorsabban elhagyja a területet, és a hó jelenléte esetén olvadásra fordítandó hó is hó hiányában többletként jelenik meg az energiamérlegben.

Ezek a hatások részben kimutathatók hosszú idősorok vizsgálatával. Ez esetben felmerül mint probléma az adatsorok esetleges inhomogenitása, például az észlelési módszerek fejlődése vagy a műszerek cseréje miatt. Például Réthly (1947) szerint a felhőzet változása Budapest fejlődése során a borult napok száma jelentősen nőtt, a derült napoké pedig csökkent (2. táblázat). Probáld (1974) többféle mérés vizsgálatával (napfénytartam, globálsugárzás, légköri homályosság) igazolta ezeket a változásokat Budapest esetén, habár jóval kisebb mértékűnek találta.

2. táblázat. Derült és borult napok száma Budapesten (Réthly, 1947)

	1861-1880	1910-1938	Változás
Borult napok száma	72,4 nap	113,3 nap	+40,9 nap (+56%)
Derült napok száma	69,5 nap	51,2 nap	-18,3 nap (-26%)

A hősziget-intenzitás értékét több tényező is befolyásolja. Alapvetően függ például a város méretétől, így egy – akár méretben, akár lakosság számában – nagyobb város által keltett hatás erősebb (Oke, 1973). Mivel az összefüggés nem lineáris, ezért a különböző

típusú településszerkezettel rendelkező városok esetén jelentős eltérés tapasztalható a hősziget-intenzitás alakulásában. A sűrűbben beépített és forgalmasabb területek melegebbek, a tavak, folyók és zöldfelületek környezete pedig hűvösebb. Ez az adott objektumok méretétől is függ, egy nagyobb tó hatása erősebb (Szepesi and Schirokiné, 1999). A zöldfelületek jelenléte különösen akkor kedvező, ha azokat locsolják (Oke, 1982).

Az időjárási helyzettől is erősen függ a hősziget létrejötte. Leginkább nyugodt, anticiklonáris helyzetben jellemző. A felhőzet és a szél jelenléte gyengíti, elmossa ezt a hatást. 3 m s^{-1} erősségű szélnél már kimutatható annak gyengítő hatása, míg 10 m s^{-1} szélsébség esetén már nem is jelentkezik a hősziget (Szepesi and Schirokiné, 1999).

A városi hősziget kialakulásából adódóan jellegzetes napi és éves menettel rendelkezik, mely attól függ, hogy milyen meteorológiai állapotjelző vizsgálatával defináltuk. Léghőmérséklet esetén valamivel napnyugta után lesz a legintenzívebb, mivel a városi felszín a természetesnél jobban tartja a hőt, és melegíti a felette található levegőt (Oke, 1982). A városi hősziget hatása a felszín közelében a legerősebb, attól távolodva csökken (Stull, 1989). Felszínhőmérsékleti mérések alapján viszont dél körül van az intenzitás maximuma, amikor a műhold által érzékelt vízszintes felületeket éri közvetlenül a besugárzás, és a mesterséges felületek ilyenkor erősebben felmelegszenek (Dezső, 2009).

Az S -el jelölt teljes sugárzási egyenleg az RH rövidhullámú (Naptól származó) és a HH hosszúhullámú (Föld-légkör rendszer hőmérsékleti sugárzásából adódó) sugárzási egyenleg eredőjeként kapható:

$$S = RH + HH = (R_{RH\downarrow} - R_{RH\uparrow}) + (R_{HH\downarrow} - R_{HH\uparrow}) \quad (1)$$

ahol az $R_{RH\uparrow}$ rövidhullámú felfelé irányuló sugárzás a visszavert napsugárzás, ami az α albedótól függ:

$$R_{RH\uparrow} = (1 - \alpha) \cdot R_{RH\downarrow} \quad (2)$$

Az albedó értéke alapvetően függ az anyagi minőségtől, és a felszín felépítésének szerkezetétől, tagoltságától, valamint a napmagasságtól is (azaz részben a napmagasság menete miatt, részben a felszínborítottság éves változása miatt van az albedónak napi és éves menete).

A városi felszín albedójának meghatározásához Probáld (1974) és munkatársai építettek meg valódi építőanyagokból Erdőhátpusztán egy viszonylag nagy méretű városmodellt, amely fölött sugázméréseket végeztek. Eredményeik alapján a mérések alapján a „városi felszín” albedója nagy napmagasságnál 0,10 körüli, alacsony napmagasságnál pedig 0,17 körüli értékeket vesz fel.

A hosszúhullámú sugárzás a Stefan–Boltzmann-törvény alapján a kisugárzó test hőmérsékletétől függ és annak anyagi minőségétől (emisszivitásától). A felfelé irányuló hosszúhullámú sugárzás esetén a kisugárzó test a felszín, a lefelé irányuló hosszúhullámú sugárzás esetén pedig a légkör és a felhők. További felfelé irányuló sugárzási tagként szerepel a légköri sugárzás felszínről visszaverődő része.

$$R_{HH\uparrow} = \varepsilon_{surf} \cdot \sigma \cdot T_{surf}^4 + (1 - \alpha) \cdot \varepsilon_{air} \cdot \sigma \cdot T_{air}^4 \quad (3)$$

$$R_{HH\downarrow} = \varepsilon_{air} \cdot \sigma \cdot T_{air}^4 \quad (4)$$

ahol ε a sugárzó testre jellemző emisszivitás (az elméletbeli abszolút fekete test esetén ez az érték 1, valódi testeknél ennél kisebb, 0,95 körüli Probáld (1974) szerint), σ a Stefan–Boltzmann-állandó, T pedig a sugárzó test hőmérséklete. A hosszúhullámú kisugárzás hétköznapi viszonyok között (pl. 10 °C körül) a felszínhőmérséklet 1 °C-os növekedésének hatására kb. 5 W m⁻²-rel nő. Ez tehát egy negatív visszacsatolásként a felmelegedő felszín hőmérsékletének csökkenését eredményezi. A hosszúhullámú visszasugárzás ($R_{HH\downarrow}$) nagyságát növelik egyes aeroszokok.

Ugyanez az összefüggés (a Stefan–Boltzmann-törvény) természetesen igaz a Napból érkező rövidhullámú sugárzásra is, de annak az értéke időben közel állandó és ismert, mely az S_0 napállandó egységnyi sík földfelszínre vonatkoztatott értéke:

$$R_{RH\downarrow} = S_0 = 340 \text{ Wm}^{-2} \quad (5)$$

Ez az elméleti maximum, felhőtlen, és aeroszoktól mentes légkör esetén. Valójában Budapest térségében ebből kb. 130 W m⁻² érkezik le. A Kitaibel Pál utcai mérőhelyen 1955–1968 között a pestszentlőrinci értéknél mintegy 9 W m⁻²-al kevesebb besugárzást mértek (Probáld, 1974).

A felszín által kibocsátott hosszúhullámú sugárzás értéke tehát nem a levegő, hanem a felszín hőmérsékletétől függ. E két érték egymástól jelentősen eltér, mivel a besugárzás

közvetlenül a felszínt melegíti, illetve amikor a besugárzás hiányzik, a felszín kezd el hűlni. A két érték egymástól Major és Tárkányi (1968) vizsgálatai alapján főleg a 10 °C-nál magasabb középhőmérsékletű napokon tér el.

Általánosságban az energia megmaradását jelentő energiaegyenleget az alábbi formában írhatjuk fel a felszínre:

$$S + Q_A = Q_H + Q_E + Q_G \quad (6)$$

ahol:

S sugárzási egyenleg

Q_A antropogén hőbevitel: a fűtés, légkondicionálás, közlekedés, életfolyamatok által termelt hő

Q_H szenzibilis hőáram: függ a légkör állapotától (hőszállítási képességétől)

Q_E látens hőáram: függ a rendelkezésre álló vízmennyiségtől, valamint a légkör állapotától (telítettségétől)

Q_G talajhőáram: függ a talaj hőtani tulajdonságaitól (hővezetés, hőkapacitás), és a nap folyamán nagyjából állandó Unger (1997) szerint

Ezt azt fejezi ki, hogy S a sugárzással beérkező és Q_A az emberi tevékenységnek köszönhetően megjelenő energia, melyek megoszlása az egyenleg jobb oldalán található három tag között az időjárási és felszíni körülményektől függ. Ha a Q_G talajhőáramot állandónak tekintjük, a szenzibilis és a látens hőáram aránya elsősorban a rendelkezésre álló nedvességtől függ. Az arányukat jellemző mennyiség a *Bowen-arány* (β), melynek megadásával gyakran jellemzik egy térség energiaháztartását.

$$\beta = \frac{Q_H}{Q_E} \quad (7)$$

Általában jellemző, hogy napközben a konvekció útján zajló szenzibilis hőáram a legfontosabb, éjszaka pedig a hővezetéssel történő talajhőáram (Unger, 1997). Az antropogén hőbevitel általában nem túl jelentős, – Budapest esetén az értéke éves átlagban körülbelül 42 W m⁻² (Probáld, 1974) – de egyes helyeken egészen nagy értékek fordulhatnak elő. Például Ichinose et al. (1999) vizsgálatai alapján Tokió belső

területein ez az érték nyáron kb. 200 W m^{-2} , és télen akár 400 W m^{-2} is lehet, ami már a teljes sugárzási egyenleggel azonos nagyságrendű mennyiség. Ez a tag a legkevésbé ismert, mivel a nagysága nem mérhető közvetlenül, hanem csak a városban zajló gazdasági tevékenység (pl. számszerűsíthető az áramfogyasztással, vagy a városi gáz fogyasztásával) alapján lehet rá becslést adni (Probáld, 1974).

A vízre vonatkozó megmaradást a hidrológiai egyenleg fejezi ki, melynek alakja egy talajszelvényt nézve:

$$P + A = ET + \Delta r + \Delta S \quad (8)$$

ahol:

P csapadék

A antropogén (mesterséges) vízbevitel

ET párolgás

Δr nettó lefolyás, azaz a talajfelszínen történő elfolyás és hozzáfolyás különbsége

ΔS a víztartalom változása

A vízegyenleg és az energiaegyenleg között a párolgás folyamata teremt kapcsolatot, az alábbiak szerint:

$$Q_E = L_v \cdot ET \quad (9)$$

ahol:

L_v párolgáshő: a víz esetén értéke $L_v = 2,50 \text{ MJkg}^{-1}$ ($0 \text{ }^\circ\text{C}$ -on).

3. Alkalmazott mérőrendszerek

3.1. Terra és Aqua kvázipoláris műholdak

Az amerikai NASA¹ 1999 decemberében, illetve 2002 májusában bocsátotta Föld körüli pályára a Terra (EOS² AM-1) és az Aqua (EOS PM) műholdakat, melyek néhány hónapos tesztidőszak után megkezdték a földmegfigyelő program adatbázisainak építését. A program célja egy sokféle környezeti állapotjelzőt tartalmazó homogén globális adatbázis létrehozása (NASA-EOS, 1999). A program fő célkitűzése a felszínborítás változása, az éghajlatváltozás, a légköri ózon és a természeti katasztrófák nyomon követése. Mindkét műhold pályája kvázipoláris, a Föld felszíne fölött átlagosan 705 km-rel keringenek. Mindkét műhold 16-szor kerüli meg a Földet naponta, és egy-egy adott pont fölött napjában 2 alkalommal haladnak át. A műholdak tervezett élettartama 15 év.

A Terra műholdon a következő szenzorok találhatóak: ASTER³, CERES⁴, MISR⁵, MODIS⁶, MOPITT⁷. Az Aqua szenzorai pedig az alábbiak: AIRS⁸, AMSR-E⁹, AMSU-A¹⁰, CERES, HSB¹¹, MODIS. Jelen vizsgálatban a MODIS által mért sugárzási adatokból származtatott hőmérsékleti mezőket használtuk. A MODIS szenzor 36 – látható és infravörös tartományú – csatornán méri a beérkező sugárzás intenzitását, amiből sokféle távérzékeléssel mért állapotjelzőt (pl. felszínhőmérséklet, hótakaró, hőmérséklet- és nedvességprofil, stb.) lehet származtatni. Egy áthaladás során a MODIS által belátott terület 2300 km széles sávként értelmezhető (NASA-EOS, 1999). A MODIS szenzor által mért felszínhőmérséklet abszolút pontossága szárazföld esetén 1 K, tengerfelszín esetén pedig 0,3 K (Wan, 1999).

¹NASA: National Aeronautics and Space Administration (nemzeti légügyi és űrhajózási hivatal)

²EOS: Earth Observing System (földmegfigyelő rendszer)

³ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (továbbfejlesztett űrbéli sugárzásmérő a hőmérsékleti sugárzás és a visszavert sugárzás mérésére)

⁴CERES: Clouds and the Earth's Radiant Energy System (a Föld-légkör rendszer energiaház-tartása)

⁵MISR: Multi-Angle Imaging Spectroradiometer (több szögben leképező spektrális sugárzásmérő)

⁶MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (közepes felbontású leképező spektrális sugárzásmérő)

⁷MOPITT: Measurements of Pollution in the Troposphere (a troposzférikus légszennyezés mérése)

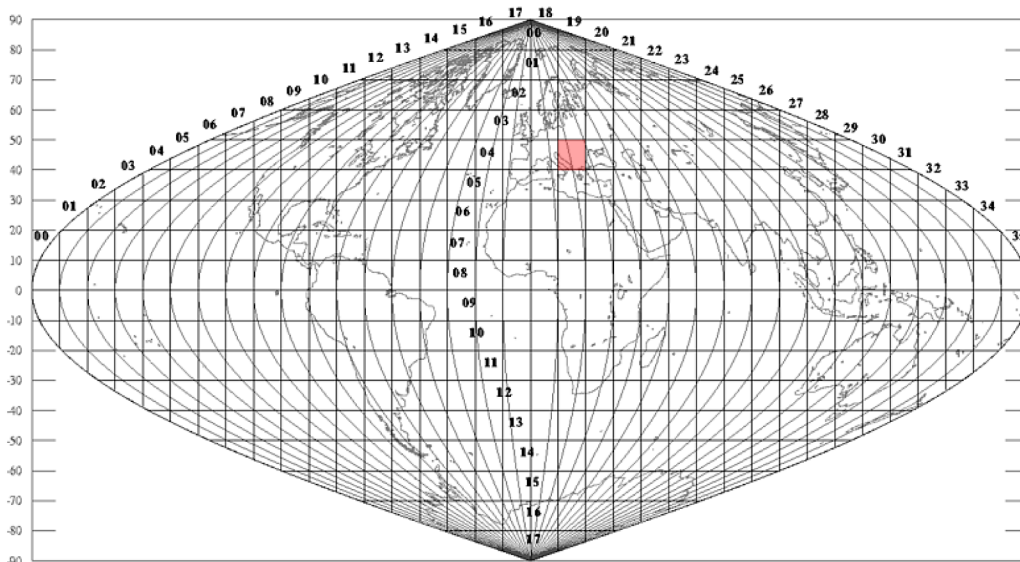
⁸AIRS: Atmospheric Infrared Sounder (légköri infravörös szondázó)

⁹AMSR-E: Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS (továbbfejlesztett mikrohullámú sugárzásmérő az EOS számára kifejlesztve)

¹⁰AMSU-A: Advanced Microwave Sounding Unit (továbbfejlesztett mikrohullámú szondázó)

¹¹HSB: Humidity Sounder for Brazil (nedvesség szondázó)

A MODIS szenzor térbeli felbontása látható tartományban 250 m, infravörös tartományban pedig 1 km. A MODIS által használt rácspontok egy szinuszoid vetületbeli rács pontjai (2. ábra), melyek az egész Földet egyenletesen lefedik (NASA, 2005). Egy-egy ilyen elem 1200×1200 rácspontból áll (az 1 km-es felbontás esetén).



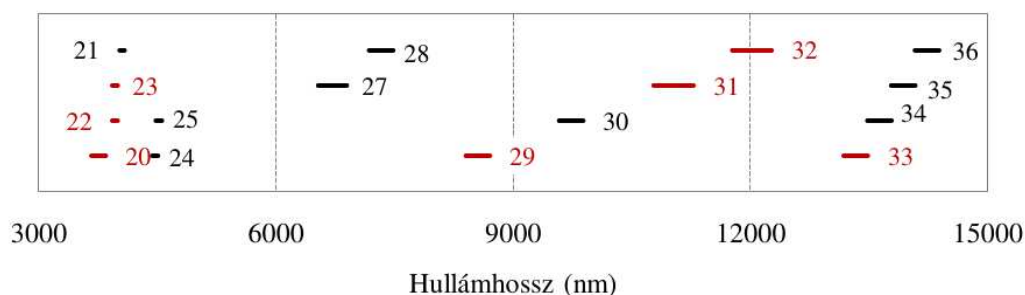
2. ábra. A MODIS által használt szinuszioid vetület. Forrás: NASA (2005). Térségünket a pirossal jelölt rész, a 4. sor 19. eleme fedti le.

A műholddal mért felszínhőmérséklet problémája az, hogy a műholdat a felszín felől elérő hosszuhullámú sugárzás nem kizárólag a felszín hőmérsékleti sugárzása, hanem tartalmazza a légkör sugárzásának felfelé irányuló részét, és a lefelé irányuló részéből azt, amit a felszín visszaver. Ezért nem elég a Planck-törvényt invertálni, hanem bonyolultabb módszerek alkalmazása szükséges. A légkör tetején mérhető sugárzásból számított, és a felszín valódi hőmérséklete között kb. $1\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$ különbség van, a körülményektől függően (Prata et al., 1995). Másrészt mivel a felszín nem abszolút fekete test, az emisszivitását sem ismerjük pontosan. Az emisszivitás függ a felszín tulajdonságaitól (pl. anyagától és szemcseméretétől), valamint a műhold szenzora és a földfelszín által bezárt szögtől (vagyis anizotróp). Három módszert alkalmaznak széleskörűen a felszínhőmérséklet távérzékeléssel történő meghatározásához (Wan, 1999): (1) A Single Infrared Channel¹² módszer egy infravörös csatornán mért irradiancia értékéből számít fényességi hőmérsékletet egy pontos sugárzásátviteli modell alkalmazásával. A módszer hátránya, hogy a modell nagyon adatigényes: a számításhoz ismerni kell a légköri hőmérséklet- és nedvességprofil, és a felszín emisszivitását. (2) A Split Window¹³ módszer több csatorna mérésein alapul, az

¹²Single Infrared Channel (egy infravörös csatornát használó módszer)

¹³Split Window (ablakok szeletelésén alapuló módszer)

azokon mért irradiancia különbségéből számol. (3) A Day/night MODIS Land Surface Temperature¹⁴ módszer az előbbieknél több sugárzási értéket, de kevesebb háttérinformációt használ bemenő paraméterként (Wan, 1999). A MODIS szenzor rendelkezik azzal az előnyös tulajdonsággal, hogy 36 különböző csatornán mér. Ebből ténylegesen a felszínhőmérséklet meghatározására 7 infravörös csatorna méréseit alkalmazzák (3. ábra).



3. ábra. A MODIS szenzor csatornái (a felszínhőmérséklet számításához alkalmazott csatornák pirossal kiemelve)

A meghatározáshoz figyelembe veszik minden rácsponton egyaránt a nappali és az éjjeli áthaladás idején mért értékeket. A számítás során a sugárzásátviteli egyenletből indulnak ki. Ekkor ismeretlen mennyiség a felszínhőmérséklet, a hőmérséklet- és a nedvességprofil, és a felszín emisszivitása minden egyes csatornára. Azaz n csatorna mérései esetén a meghatározandó ismeretlenek száma $n + 3$, és ismert n db sugárzási érték. Két mérés alkalmazása esetén, ha azzal a közelítéssel élnek, hogy egy adott napon egy adott rácsponton az emisszivitás és az anizotropitási faktor értéke megegyezik a nappali és az éjszakai mérés során, $2n$ ismert változó van, és $n + 7$ ismeretlen (2 felszínhőmérséklet, n emisszivitás érték, 2-2 hőmérséklet- és nedvességprofil, anizotropitási faktor). Tehát akkor lehet az egyenleteket megoldani, ha $2n \geq n + 7$ azaz $n \geq 7$. Ezért szükséges minimum 7 csatorna mérést alkalmazni. Ekkor megadhatók az ismeretlen mennyiségek a sugárzási értékekből meghatározott fényességi hőmérséklet függvényében. A köztük lévő függvénykapcsolatot statisztikai vizsgálatok alapján adják meg, többváltozós regresszió alkalmazásával. Wan (1999) szerint az ilyen módon kapott eredmények adják az ismeretlen változók legjobb becslését.

A távérzékelési eszközök segítségével mért felszínhőmérséklet jelentősen különbözik a hagyományos módszerekkel mérhető léghőmérséklettől. Ennek oka egyrészt, hogy a felszínhőmérséklet érzékenyebb a felszín fizikai tulajdonságaira (pl. a felszín albedójára)

¹⁴Day/night MODIS Land Surface Temperature (éjszakai és nappali sugárzásmérésen alapuló felszínhőmérséklet meghatározási módszer, melyet a MODIS számára fejlesztettek ki)

az adott, vizsgált pontban, mint a léghőmérséklet. Másrészt a léghőmérséklet esetén szerepe van az advekciónak és a konvekcióval történő adiabatikus térfogatváltozásnak, míg a felszínhőmérsékletet a sugárzási egyenleg és a hővezetés határozza meg. Általában azt mutatták ki (Arnfield, 2003), hogy nyugodt időjárási helyzet esetén a felszínhőmérséklet sokkal erősebb kapcsolatban van a mérőhely mikroskálájú tulajdonságaival. Ilyen tulajdonság például a beépítettség, ami a nyílt sík felszínhez viszonyítva árnyékosabb, illetve többlet besugárzással rendelkező helyeket hoz létre. Értelemszerűen, ha a műholdon található szenzor a napsütötte felületeket látja – jellemzően délben –, akkor magasabb hőmérsékleti értékeket mér. Ezen kívül a mérést befolyásolja az is, hogy a szenzor milyen irányból, s milyen látószöggel tekint a felszínre. Ezért előfordulhat az is, hogy homogén felszíni viszonyok ellenére a vizsgált mező szélén más értéket kapunk, mint a közepén. Ugyanígy eltérések lehetnek a vízszintes és a ferde felületeken mért értékek között.

3.2. Az Országos Meteorológiai Szolgálat mérőhálózata

Budapest az É 47,5°, K 19° térségében helyezkedik el. A Budapestre (főleg a Kitaibel Pál utcai mérőállomás adatai alapján meghatározott) jellemző sokéves éghajlati jellemzőszámokat mutatja be a 3. táblázat (OMSZ, 2008). Ennek figyelembe vételével Ács és Breuer (2011) számításai alapján Köppen (1918) klímaklasszifikációja szerint az itteni éghajlat Cf , azaz melegmésékelt klíma egyenletes évi csapadékeloszlással, Holdridge (1947) alapján a füves pusztta, száraz erdő és üde erdő határán található, míg Thorntwaite (1948) módszere alapján $C_1 B'_1 d b'_3$, azaz száraz szubhumid (gyengén aszályos) mezotermális (azaz közepes hőellátottságú), és az év során nincs jelentős víztöbblet. Összességében megállapítható tehát, hogy a terület hőellátottsága közepes, vízellátottsága viszonylag gyenge.

3. táblázat. Budapest átlagos havi éghajlati elemei 1901-2000 (OMSZ, 2008).

T_k : középhőmérséklet (°C), T_{min} : minimumhőmérséklet (°C),

T_{max} : maximumhőmérséklet (°C), cs : csapadékmennyiség (mm)

	J	F	M	Á	M	J	J	A	Sz	O	N	D
T_k	-0,4	1,5	6,2	11,5	16,5	19,7	21,6	20,9	16,7	11,2	5,5	1,5
T_{min}	-2,7	-1,3	2,4	6,9	11,5	14,6	16,4	15,9	12,2	7,5	3,1	-0,6
T_{max}	2,1	4,7	10,6	16,7	22,0	25,2	27,5	27,1	22,6	16,1	8,3	3,7
cs	38,5	36,7	37,4	47,2	64,5	69,8	50,4	49,5	42,7	46,9	59,9	49,3

Budapest domborzata meglehetősen változatos, természetföldrajzi szempontból három terület: a Budai-hegység, a Pesti-síkság és a Duna völgyének találkozásának fekszik. Tengerszint feletti magassága kb. 96 m (a Duna szintje középvízállásnál) és 529 m (János-hegy) közötti. A város szerkezete gyűrűs-sugaras, a központi rész – a Dunát leszámítva – nagyon sűrűn beépített. A város külterülete nem folytonosan van beépítve, hanem közigazgatásilag több, eredetileg különálló település tartozik hozzá, melyek helyileg még ma is meglehetősen elkülönülnek. Ezek a külső területek inkább kertés házakkal borítottak, illetve foltokban található lakótelepek is (pl. Békásmegyér, Káposztásmegyér, Rákoskeresztúr). A városba sugárirányban vezetnek „természetes folyosók”: a Duna felé több patak is tart (pl. Rákos-patak), melyeket erdős területek öveznek (Pogány et al., 2011).

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnak vizsgálataink kezdetén négy mérőállomása volt Budapesten: Újpest, Kitaibel Pál utca, Lágymányos, Pestszentlőrinc. Azóta a mérőhálózatot bővítették még egy automata mérőállomással (amit a ferihegyi repülőtéren telepítettek), de ennek még nincsen megfelelő hosszúságú mérési adatsora. A város közelében található még néhány mérőállomás: Aszód, Kakucs, Penc, Püspökszilágy, Martonvásár. Ezek közül mi a kakucsit és a pencit választottuk ki, mivel ezeken a helyeken régóta működik automata észlelőrendszer, így kellően hosszú adatsorokkal dolgozhatunk (4. táblázat). A kiválasztott mérőállomások elhelyezkedését és környezetét a 4. ábra mutatja be fényképek segítségével, és a 5. ábra a Google Maps műholdképei alapján. Ezeken a helyeken automata mérés zajlik Väisälä MILOS-500 és QLC-50 típusú adatgyűjtőkkel, HMP 35D és HHM 45D hőmérséklet-érzékelő szenzorokkal (Zárbok et al., 2005). Ezek egy 100 Ω körüli ellenállású platina szálát tartalmaznak, mely ellenállásának hőmérséklettől való függése ismert, illetve időnként kalibráció során újramérik és figyelembe veszik.

4. táblázat. Meteorológiai állomások elhelyezkedése (Zárbok et al., 2005)

Megnevezés	Földrajzi szélesség	Földrajzi hosszúság	Tengerszint feletti magasság	Mérések kezdete
Penc	É 47,7905°	K 19,2814°	240 m	1998.06.15.
Bp-IV. Újpest	É 47,5734°	K 19,0741°	100 m	2001.04.28.
Bp-I. Kitaibel Pál utca	É 47,5108°	K 19,0281°	120 m	1997.11.24.
Bp-XI. Lágymányos	É 47,4752°	K 19,0623°	105 m	1999.10.15.
Bp-XVIII. Pestszentlőrinc	É 47,4296°	K 19,1819°	130 m	1995.10.01.
Kakucs	É 47,2449°	K 19,3601°	120 m	1998.08.11.



(a) Penc



(b) Újpest



(c) Kitaibel Pál utca



(d) Lágymányos

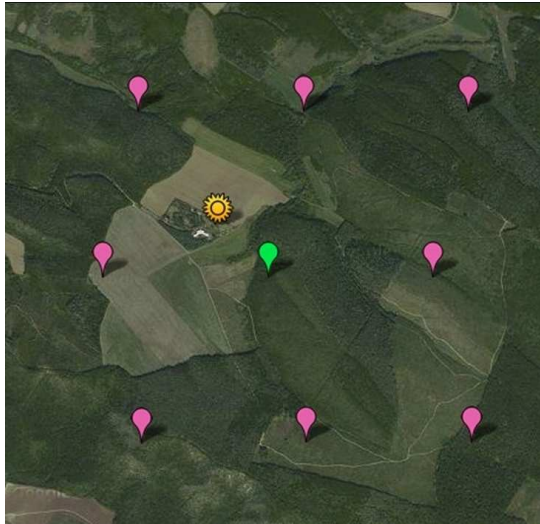


(e) Pestszentlőrinc

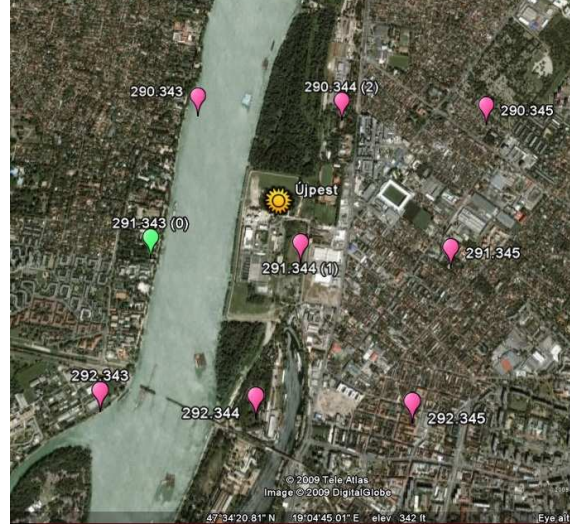


(f) Kakucs

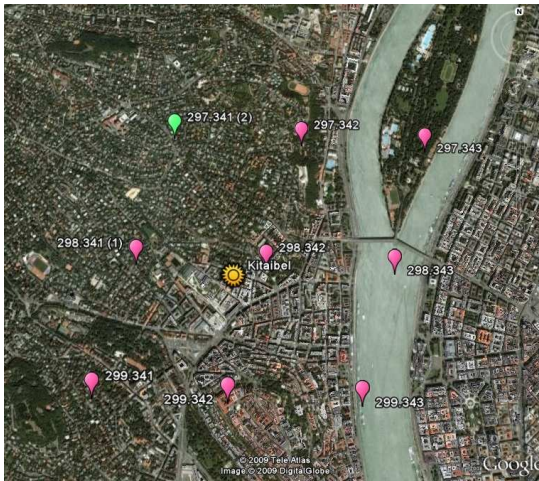
4. ábra. A hat mérőállomás látképe. Saját felvételek, kivéve Penc (FÖMI-KGI)



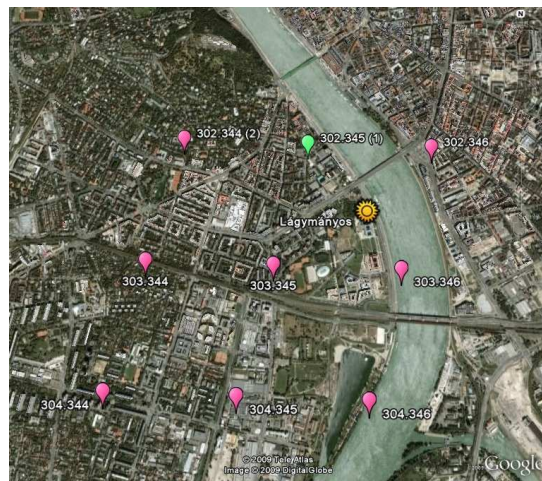
(a) Penc



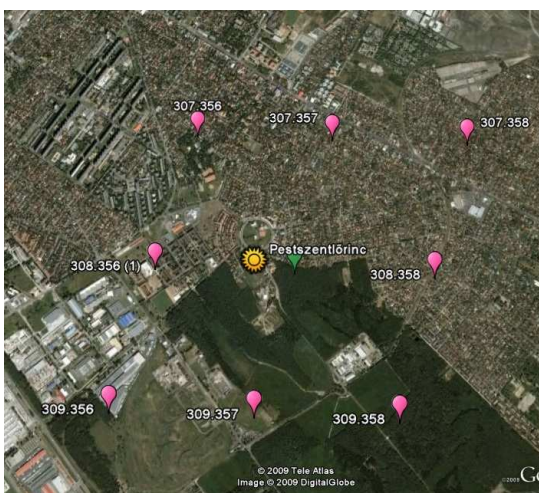
(b) Újpest



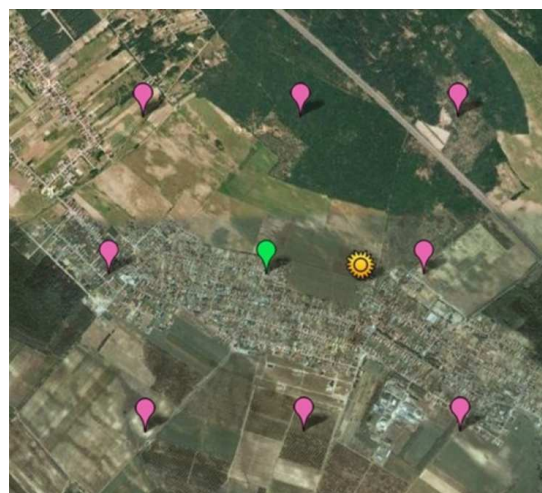
(c) Kitaibel Pál utca



(d) Lágymányos



(e) Pestszentlőrinc



(f) Kakucs

5. ábra. A hat mérőállomás környezete műholdfelvételen (Google Maps)
 sárga: mérőállomás, zöld: kiválasztott MODIS rácspontok bal felső sarka
 rózsaszín: nem kiválasztott MODIS rácspontok bal felső sarka

3.2.1. Penc

Penc Budapesttől messzebb, kb. 30 km-re található Vác közelében, a Gödöllői-dombság és a Cserhát találkozásánál, a Naszálytól délkeletre. A terület domborzata tagoltabb, dombok veszik körül. Az állomás a falutól távolabb, délkeleti irányba található, a településnél kicsivel magasabban, a Kozmikus Geodéziai Obszervatórium kertjében. Tengerszint feletti magassága 240 méter, míg a falu 200 méteren fekszik. Ugyanitt található az Ipoly Erdő Zrt.-nek is egy WS-3600 típusú automata meteorológiai állomása, melynek mérései valós időben elérhetőek a FÖMI weboldalán (<http://sgo.fomi.hu/meteo-adat.php>), és a MetNet amatőr meteorológiai portálon (<http://www.metnet.hu/index.php?m=os&action=showosdata&ostid=123&last=24>).

3.2.2. Budapest-IV. Újpest

Budapest északi határától nem messze, Újpesten egy klímaállomás található, majdnem közvetlenül a Duna-parton, a Csatornázási Művek vízkezelő létesítményének (Észak-Pesti Szennyvíztisztító Telep) területén. Tőle északra és délre erdősáv, keletre beépített területek, közvetlenül nyugatra pedig a Duna található, ami az elemzés során felhasznált rácspont területének körülbelül a felét lefedi.

3.2.3. Budapest-II. Országút

A belváros egyik erősen beépített részén található az Országos Meteorológiai Szolgálat központja. Több oldalról épületek határolják, illetve néhány száz méterre található tőle a tömegközlekedési csomópontként szolgáló Moszkva tér. Található még a közelben zöldterület, és a Duna sincs messze. A mérések az OMSZ székházának 5. emeletén lévő teraszon zajlanak. A műszerek itt hagyományos fa hőmérőházban találhatóak.

3.2.4. Budapest-XI. Lágymányos

A Duna budai oldalán, a Lágymányosi-öbölben található a XI. kerületi állomás, körülbelül másfél-két kilométerre a 235 méter magas, dolomitból felépülő Gellért-hegytől. Az általunk felhasznált rácsponthoz tartozó terület tartalmazza magát

a meteorológiai állomást, plusz az ELTE lágymányosi kampuszát, egy keveset a BME épületei közül, illetve egy nagy részt a Dunából.

A műszerkert az Eötvös Loránd Tudományegyetem északi épületének északkeleti oldalán helyezkedik el, lombos fák alatt, az épület közvetlen közelében. A másik oldalán egy ültetett fasor található, azon túl körülbelül 100 méterre pedig a Duna. Az épület környezetében egy nagyobb, viszonylag szellős, füves parkos rész található, kisebb fákkal. Mivel az újpesti mérőponthoz hasonlóan ez is egy automata klímaállomás, így a méréseket egy QLC-50 műszer végzi, hagyományos fa hőmérőházba helyezve (Kern, 2001).

3.2.5. Budapest-XVIII. Pestszentlőrinc

Pestszentlőrincen található az a szinoptikus főállomás, ahonnan a hivatalos budapesti adatok származnak. Itt az automata műszereken túl állandó észlelői jelenlét is van. Az állomást tartalmazó terület nagyjából erdős területeket tartalmaz, kertvárosi részeket, és egy ipari létesítményt. A vele nyugati irányban szomszédos területen bevásárlóközpontok találhatóak.

Ez a mérőállomás a város központjától távolabb helyezkedik el, a környezeténél valamivel magasabban, egy kisebb domb tetején. Közelebbi környezetében kertés házak találhatóak, délről pedig a Péterhalmi-erdő szegélyezi. Északnyugat felé 2-3 kilométerre lakótelep található, délnyugati irányban pedig bevásárlóközpontok és ipari létesítmények. Maga az állomás kertje egy viszonylag kopár, nagy terület, ahol szétszórva helyezkednek el a különböző műszerek, épületektől viszonylag távol. Főállomás lévén itt egy MILOS-500 automata gyűjti az adatokat, lamellás árnyékolóba helyezve.

3.2.6. Kakucs

Kakucs Budapesttől délkeletre, Dabas közelében található, teljesen sík területen. Maga a mérőállomás egy automata klímaállomás, ami a falu északi határán található, az M5-ös autópályától nem messze. Északról és nyugatról szántóföld határolja, délről és keletről pedig a település. A Vízművek telephelyén található. A hőmérő lamellás árnyékolóba van helyezve. Tengerszint feletti magassága 120 méter.

3.3. A műholdas és állomási mérés tulajdonságainak összehasonlítása

A kétféle mérés működési elvüknél fogva mást mér (5. táblázat), a T_a léghőmérséklet és a T_s felszínhőmérséklet alapvetően máshogy viselkedik. Megfigyelték, hogy a felszínhőmérséklet kapcsolata a felszíngeometriával jóval erősebb, mint a léghőmérsékleté, ami több tényezőtől függ (pl. légszennyezés, antopogén hőkibocsátás), ezért a T_s térbeli változékonysága jóval nagyobb (Barring et al., 1985). A kétféle hőmérsékleti érték közötti korreláció éjjel jóval erősebb, amikor a mikroskálájú advekciónak kevésbé jelentős (Voogt and Oke, 2003). Oke (2004) tapasztalatai alapján a legerősebb a kapcsolat egy adott pont léghőmérséklete és az azt körülvevő – a beépítettség sűrűségétől függő – kb. 0,5 km sugarú kör felszínhőmérséklete között.

5. táblázat. A kétféle mérés tulajdonságai

Tulajdonságok	Műholdas mérés	Állomási mérés
Jellege	Távérzékelés	In-situ mérés
Mért állapotjelző	Felszínhőmérséklet	Léghőmérséklet
Térbeli felbontás	MODIS szenzor esetén: 1 km × 1 km	Pontszerű mérések
Mérések időpontja	Napi 2 alkalommal műholdanként (Terra: 9–10, 20–21 UTC, Aqua: 12–13, 02–03 UTC),	Folytonos, adatrögzítés 10 percenként
Rendelkezésre állás	Felhőmentes időben	Tetszőleges
Adatok száma	Legfeljebb napi 4	Napi 144
Mérést végezték	NASA	OMSZ

A léghőmérséklet alakításában nem csak a vízszintes felületek vesznek részt, hanem mindegyik, viszont a műholdon elhelyezett szenzor alapvetően csak a vízszinteshez közeli felületek sugárzását méri, bár ez függ attól is, hogy a pásztázás során milyen helyzetben van a szenzor az adott pixel mérése esetén (Roth et al., 1989, Dezső, 2009). További hibalehetőség, hogy az épületek egymást és a közöttük található utcákat részben takarják a szenzor elől. Megfigyelték azt is, hogy bizonyos, nagy reflektivitású anyagokból készült tetők esetén a távérzékeléssel történő hőmérsékletmérés nem ad értékelhető eredményeket. További eltérést okoz, hogy a műholdas mérés nem különbözteti meg a földfelszínt a tetőktől, pedig az előbbi hőmérsékletének szorosabb a kapcsolata a 2 méteres magasságban mérhető léghőmérséklettel (Unger et al., 2010).

4. Felhasznált adatok

4.1. Műholdas felszínhőmérsékleti adatok

A műholdas felszínhőmérsékleti adatokat a NASA Land Processes Distributed Active Archive Center adatközpontjából kapjuk (Dezső et al., 2012). Korábbi vizsgálatok során megtörtént a rácspontok kategorizálása azok földrajzi helye, beépítettsége, MODIS felszínborítottság szerinti felszínborítottsága és domborzata alapján (Dezső, 2009). Ehhez a korábbi kategorizáláshoz igazodva városi pontnak tekintettük azokat, amelyek megfelelnek a következő feltételrendszernek:

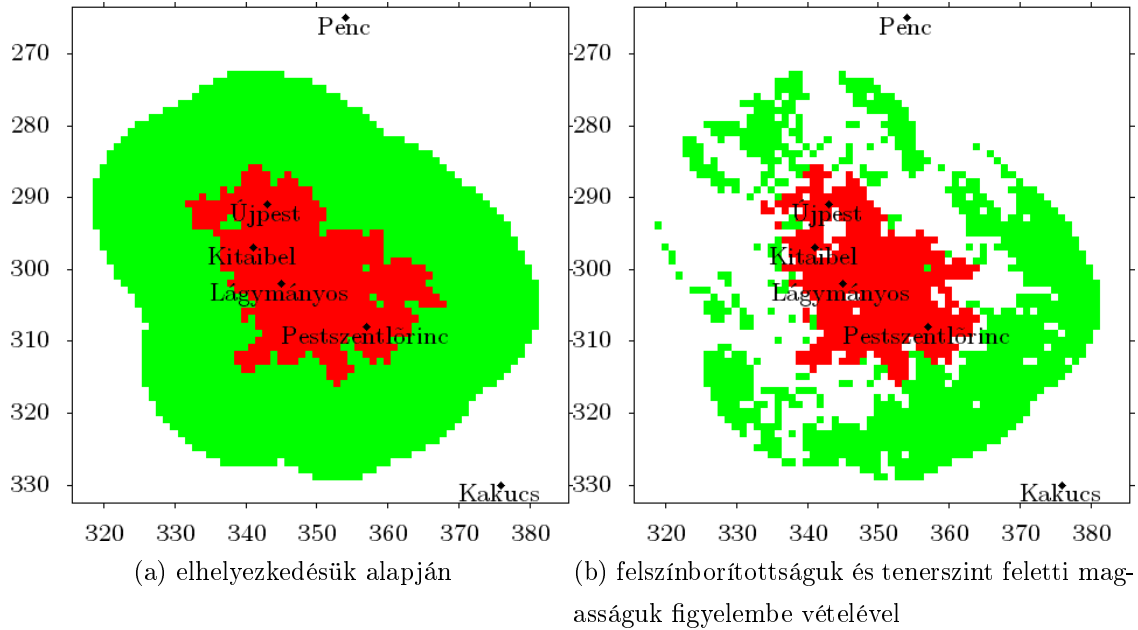
- A Google Earth műholdképe alapján beépített területre esik (6. (a) ábra)
- A MODIS felszínborítottsági adatbázisa alapján beépített terület (6. (b) ábra)
- Tengerszint feletti magassága az előző két feltételnek megfelelő pontok átlagértéke ± 50 m (6. (b) ábra)

A városkörnyéki rácspontoknak a következő feltételeknek kell eleget tenniük:

- A Google Earth alapján meghatározott beépített terület határától nincs messzebb, mint a város *átlagos sugara* ($\sqrt{\frac{A}{\pi}}$, ahol A a városi rácspontok száma) (6. (a) ábra)
- A MODIS felszínborítottsági adatbázis alapján nem beépített terület és nem víz (6.(b) ábra)
- Tengerszint feletti magassága az előző két feltételnek megfelelő pontok átlagértéke ± 100 m (6. (b) ábra)

A 6. ábrán mutatjuk be azokat a rácspontokat, amelyek (a) elhelyezkedésük alapján, (b) a tengerszint feletti magasságukat és felszínborítottságukat is figyelembe véve városi vagy városkörnyéki besorolást kaptak. A későbbiekben minden térkép ugyanezzel a vetülettel, ugyanezt a kivágatot ábrázolja. Minden olyan időpontra, amikor kellően sok adat áll rendelkezésre, a városi rácspontok hőmérsékletének átlagát véve kaptuk az adott időpontbeli *városi átlaghőmérsékletet* és a városkörnyéki pontok átlagaként pedig a *városkörnyéki átlaghőmérsékletet*.

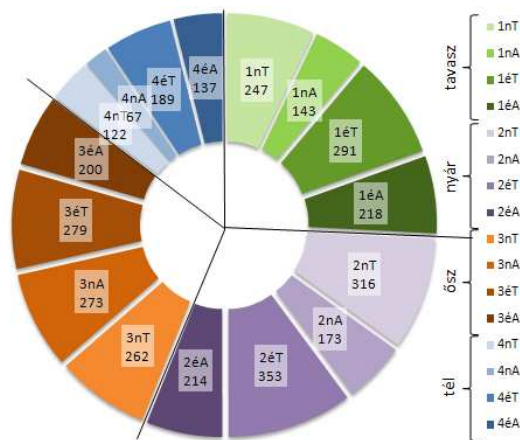
Műholdas felszínhőmérsékleti adatok elvileg napi 4 alkalommal állnak rendelkezésre. Ennek azonban korlátot szab a felhős ég miatt bekövetező adathiányok nagy száma.



6. ábra. A Budapest környéki MODIS rácspontok

Jelen esetben 2001-2010 között tartó időszakot vizsgáltuk, ahol 2001-2002 során csak a Terra által mért felszínhőmérséklet állt rendelkezésre, 2003-2010 során pedig már mindkét műhold szolgáltatott felszínhőmérsékleti adatokat.

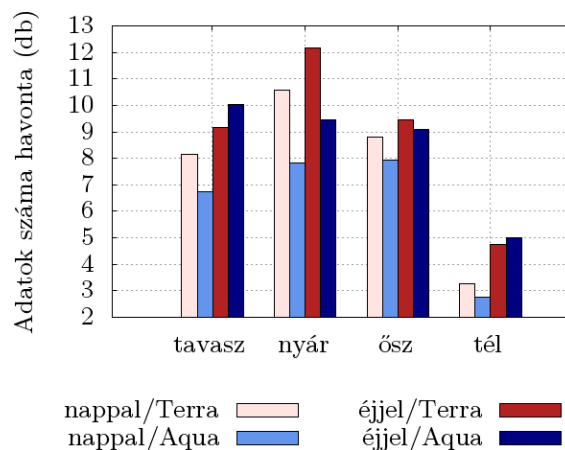
A felhős és felhőmentes időszakok eloszlásához igazodva a rendelkezésre álló adatok száma sem állandó az év során: télen kevesebb, nyáron pedig több adat áll rendelkezésünkre (7. ábra). Az adatok leválasztása megtörtént a Budapest körüli térségre, egy 70×70 pixelt tartalmazó területre. A mezőkből további leválasztás során a mérőállomásokhoz közeli – azzal ekvivalensnek tekintett – rácspontokra vonatkozó hőmérsékleti értékek idősorát is elkészítettük.



7. ábra. A rendelkezésre álló műholdas adatok eloszlása

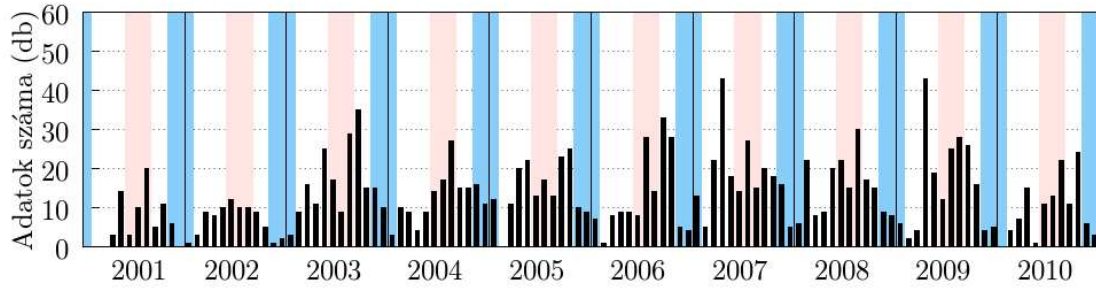
A két leválogatás szerint a vizsgálatba bevont esetek száma valamelyest eltér, mivel mások a felhasználhatóság kritériumai. A mező vizsgálatához az szükséges, hogy a vizsgált rácspontok nagy részén (min. 80%-án) felhőmentes legyen az idő, és így rendelkezésre álljanak adatok. A hat kiválasztott rácspont idősorainak vizsgálatához viszont elegendő az ezekről származó információ. Azokat az eseteket vizsgálva, amikor mind a hat mérőállomáshoz tartozó rácspontra rendelkezésre áll felszínhőmérsékleti érték (erre vonatkozik a 7. ábra), a következő megállapítások tehetőek:

- Télen van a legkevesebb adat (nappal 10,3%-a, éjszaka 16,6%-a a lehetségesnek), és nyáron a legtöbb (nappal 30,0%-a, éjszaka 35,3%-a a lehetségesnek). Ezek átlagos havi darabszámát mutatja be a 7. ábra.
- Jellemzően éjszaka több adat van, mint nappal (8. ábra). Ennek oka lehet – nyugodt időjárási helyzetben – a besugárzás hatására fellépő konvekció miatt jelentkező fokozott nappali gomolyképződés, majd a besugárzás gyengülésével ezek szétesése. A 8. ábra az átlagosan egy hónapra jutó adatok számát mutatja be. Ennél a vizsgálatnál kiküszöböltük azt a hatást, hogy az Aqua az operatív működését két évvel később kezdte, azaz ennyivel kevesebb adatot gyűjtött.

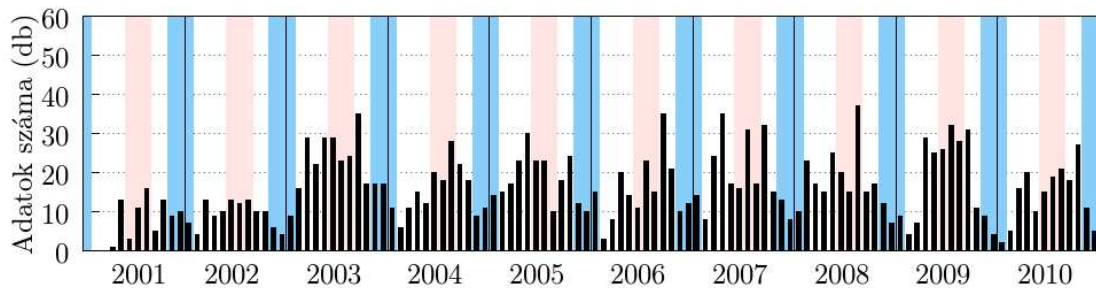


8. ábra. A rendelkezésre álló műholdas adatok száma átlagosan egy-egy hónapban

- A felhasználható adatok száma egyik hónapban sem éri el a 80-at (napi 3 alatt), és olyan téli hónapok is vannak, amikor csak 2–3 adat van, esetleg valamely napszaktól egyáltalán nincs adat (9. ábra).
- 2003-tól, az Aqua operatív munkába állásának köszönhetően az adatok száma jelentősen megnőtt.



(a) Nappal



(b) Éjjel

9. ábra. A rendelkezésre álló műholdas adatok száma egy-egy hónapban. A kék sávok a téli, a piros sávok a nyári időszakot jelölik.

4.2. Állomási léghőmérsékleti adatok

A vizsgálatba bevont hat meteorológiai mérőállomás hőmérsékleti adatait $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ felbontással az Országos Meteorológiai Szolgálat biztosította számunkra. Azokat az időpontokat választottuk le, amikor a hat kijelölt rácspontban rendelkezésre álltak műholdas felszínhőmérsékleti adatok. Az összehasonlító elemzéseket 2001. április 1. és 2010. december 31. közötti időszakra végeztük el, mivel az újpesti mérőállomáson az automata adatgyűjtővel történő mérések 2001 áprilisában kezdődtek.

4.3. Távolság a város középpontjától

A város középpontját a Google Maps (<http://maps.google.com>) segítségével vizuálisan határoztuk meg mint a Duna és a Nagykörút által határolt terület közepét. Így a város középpontjának tekintettük az $\text{É } 47,50^{\circ}$, $\text{K } 19,06^{\circ}$ koordinátapárral jellemezhető pontot. Két tetszőleges pont, például $P_1(\varphi_1, \lambda_1)$ és $P_2(\varphi_2, \lambda_2)$ távolságát a következőképpen határozhatjuk meg, ha R sugarú gömbként közelítjük a Föld alakját:

$$D = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad (10)$$

ahol

$$\Delta x = \Delta \lambda \cdot \frac{2R\pi}{360^\circ} \quad (11)$$

$\Delta \lambda = |\lambda_2 - \lambda_1|$, illetve

$$\Delta y = \Delta \varphi \cdot \frac{2R\pi}{360^\circ} \quad (12)$$

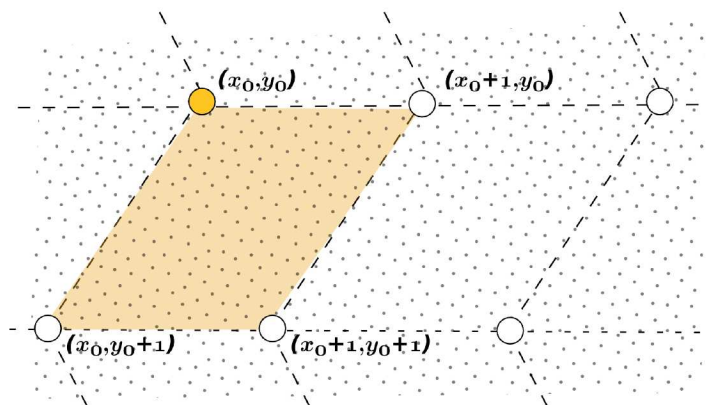
és $\Delta \varphi = |\varphi_2 - \varphi_1|$.

Ezt a D értéket minden egyes rácspontra kiszámoltuk a város középpontjához viszonyítva. Ehhez szükség volt az egyes rácspontok földrajzi koordinátaira, amit a NASA Modland Tile Calculator (NASA, 2005) programjának segítségével határoztunk meg. A Modland Tile Calculator honlapjáról szabadon letölthetőek a forrásfájlok, valamint egy Unix rendszerek számára előrefordított futtatható állomány, ami akár a nimbus-on is fut. Magát a futtatást a 4900 rácspontra automatizálva végeztük.

4.4. Tengerszint feletti magasság

A másik szükséges földrajzi állandó a tengerszint feletti magasság, amit a NASA által 2011-ben közreadott, a Terra műhold ASTER szenzora segítségével létrehozott új ASTER-GDEM domborzatmodellből (Tachikawa et al., 2011) vettünk át. A MODIS rácspontokra átszámításnál figyelembe vettük, hogy a MODIS rácspontok a lefedett terület sarokpontját jelölik ki, így egy-egy rácspont meghatározásánál mindig az egy-egy ilyen területre eső magasságadatokat átlagoltuk (10. ábra: a narancssárgával jelzett rácspontra vonatkozó értéket a halvány sárgás mezőbeli rácspontok értékeinek átlagolásával kapjuk).

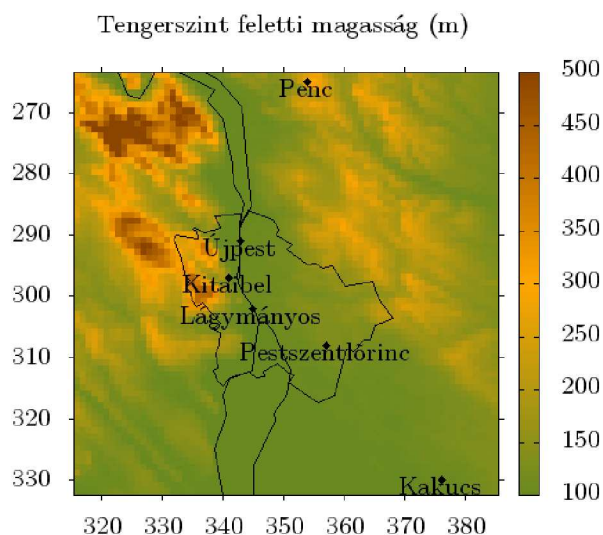
Az ilyen módon készített, ASTER domborzatmodellből az 1 km×1 km nagyságú MODIS rácspontokra átlagolt domborzati térképet a 11. ábra mutatja be. Így az egyes mérőállomások és az őhözjuk közel lévő, őket jellemző rácspontok tengerszint feletti magassága – ami egy 1 km²-es terület átlagos magassága – valamelyest eltér (6. táblázat), de ezel az eltérések a helyszínek ismeretében általában megmagyarázhatók.



10. ábra. A MODIS rácshálózat (nagy körökkel) által lefedett terület és egy tetszőleges finomabb rácshálózat (pontokkal) viszonya

6. táblázat. Állomások és környezetük tengerszint feletti magassága

Mérőállomás megnevezése	Mérőállomás magassága (Zárbok et al., 2005)	A közeli rácspont sorszama	A közeli rácspont átlagos magassága
Penc	240 m	(354,265)	275,1 m
Újpest	100 m	(343,291)	97,3 m
Kitaibel Pál utca	120 m	(341,297)	157,5 m
Lágymányos	105 m	(345,302)	100,5 m
Pestszentlőrinc	130 m	(357,308)	127,9 m
Kakucs	129 m	(376,330)	107,2 m



11. ábra. Az egyes rácspontokat jellemző tengerszint feletti magasság. A mérőállomások helyét, Budapest közigazgatási határát és a Duna vonalát feketével jelöltük

5. Vizsgálatok és eredmények

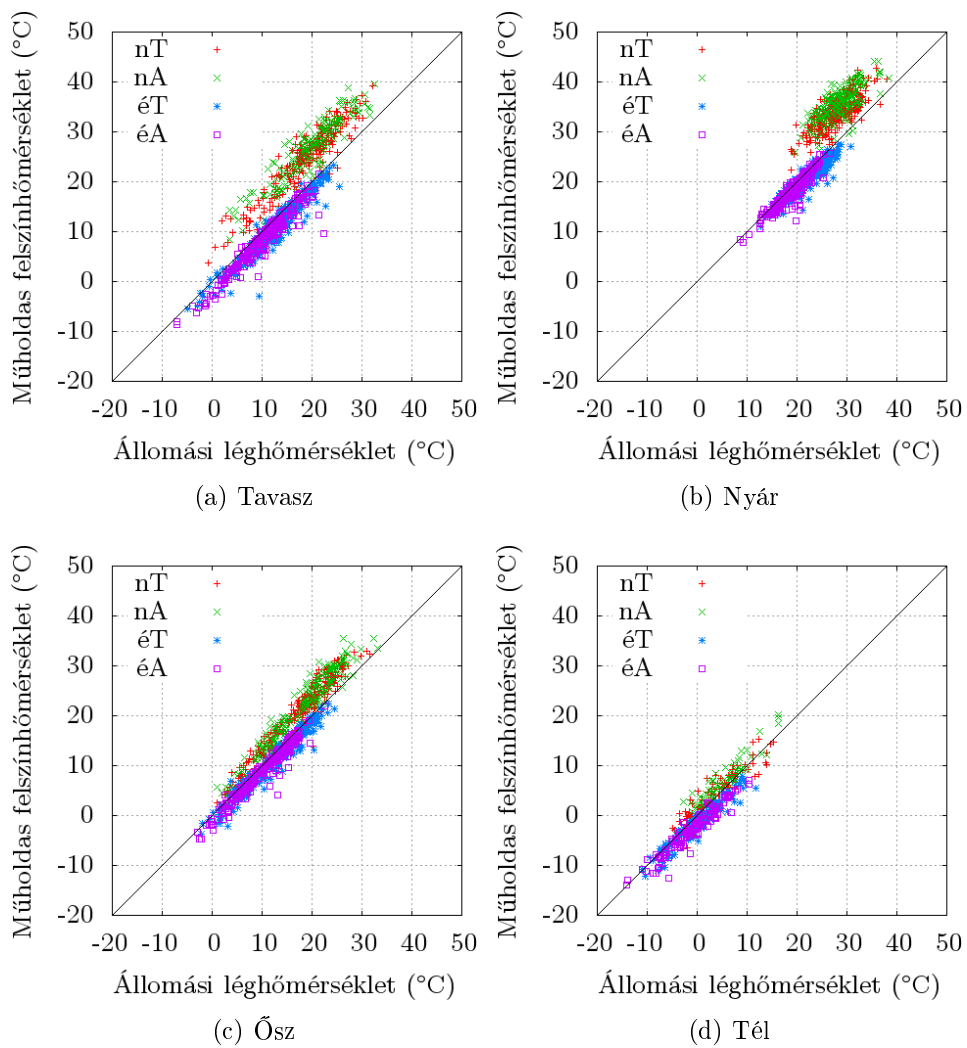
Az adatok feldolgozását saját készítésű, Fortran77 nyelven írt programokkal végeztük, valamint a koordináták átszámításánál igénybe vettük a NASA Modland Tile Calculator (NASA, 2005) programját. Az ábrákat főleg Gnuplot, kisebb részben Inkscape és a Google Maps felhasználásával készítettük. Budapest határvonalát és a Duna vonalát a Google Maps műholdképéről olvastuk le.

5.1. A mérőállomásokhoz tartozó rácspontok vizsgálata

Minden felszíni mérőállomáshoz társítottunk egy ahhoz közeli MODIS rácspontot, amelyen a mért felszínhőmérsékleti értéket az adott állomáshoz tartozónak tekintettünk. Ezek elhelyezkedését korábban bemutattuk a 5. ábra műholdfelvételein.

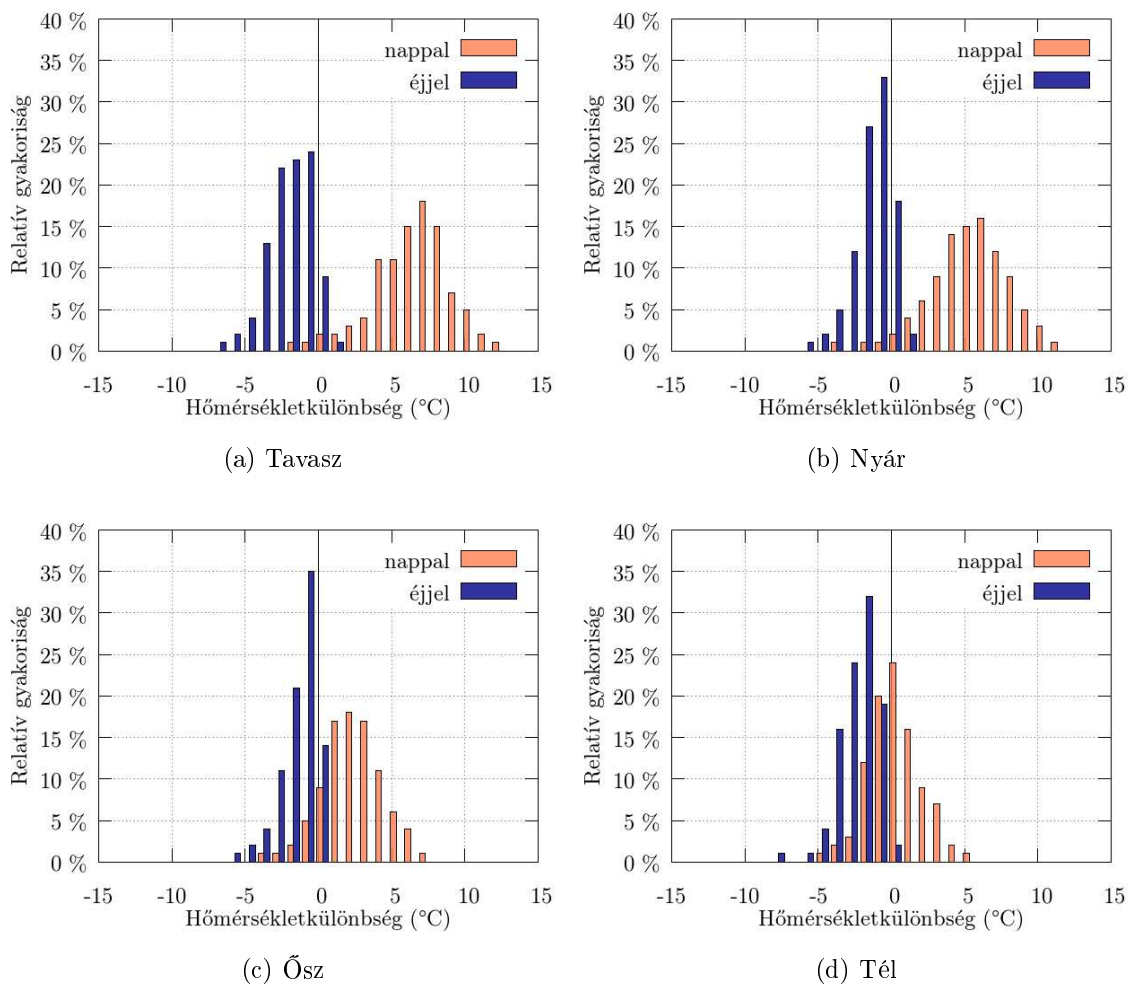
5.1.1. Az állomási léghőmérséklet és a műholdas felszínhőmérséklet kapcsolata

Mind a hat kiválasztott rácspontra évszakonkénti bontásban elkészítettük a műholdas felszínhőmérséklet műholdas felszínhőmérséklet és az állomási léghőmérséklet kapcsolatát bemutató pontdiagramokat. Példaképp a lágymányosi rácspontra kapott pontdiagramokat mutatjuk be a 12. ábrán. Az egy napon belüli négy lehetséges időpontot különböző színekkel jelöltük. Látszik, hogy a műholdas hőmérséklet jóval szélsőségesebb értékeket vesz fel (nappal magasabb, éjszaka pedig alacsonyabb értékeket, mint a léghőmérséklet), előfordulnak nagyon alacsony és nagyon magas felszínhőmérsékleti értékek is. Egy-egy időpontban a műholdas felszínhőmérséklet télen akár $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatt is lehet, illetve nyáron akár a $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot is elérheti. A 12. ábra jól illusztrálja, hogy a nappali és az éjjeli mérések egyértelműen elkülönülnek, s még az egyes napszakhoz tartozó két-két mérési időpontokból származó adatpontok is valamelyest elkülöníthetők. Nappal a műholdas felszínhőmérsékleti értékek néhány $^{\circ}\text{C}$ -al meghaladják az azonos időpontra vonatkozó állomási léghőmérsékleti értékeket. Főként nyáron és tavasszal figyelhetünk meg nagymértékű eltéréseket. Nyáron akár $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ is lehet a különbség. Éjjel jóval kisebb a kétféle mérés közti eltérés, a pontdiagram kék és lila szimbólumai az átlóra jobban rásimulnak, mint a nappali időszak piros és zöld szimbólumai.



12. ábra. Évszakos pontdiagramok a lágymányosi mérőállomásra vonatkozóan. A vizsgált időpontok: nT: nappali Terra (délelőtt), nA: nappali Aqua (dél), éT: éjjeli Terra (este), éA: éjjeli Aqua (éjjel)

A 13. ábrán a kétféle hőmérséklet különbségének évszakos relatív gyakoriságát mutatjuk be, a 12. ábrához hasonlóan a lágymányosi mérőállomásra. A pozitív hőmérsékletkülönbség azt jelenti, hogy a felszín melegebb, negatív hőmérsékletkülönbség esetén pedig a felszín hidegebb, mint a felszínközeli levegő. Tavasszal és nyáron nagyobb a különbség az egyes napszakok között, ilyenkor pl. nappal az esetek kb. 90%-ában a felszín a melegebb, éjjel pedig hasonlóan nagy részben az a hidegebb. Télen ellenben nappal is viszonylag sokszor (40–50%) a felszín a hidegebb. Mind a négy városi mérőpontra vonatkozó átlagos évszakos hőmérsékletkülönbségeket a 7. táblázatban foglaljuk össze.



13. ábra. A Lágymányoson mérhető felszínhőmérséklet és léghőmérséklet különbségének relatív gyakorisága

7. táblázat. Évszakos átlagos eltérés a műholdas felszínhőmérséklet és az állomási léghőmérséklet között (°C). A vizsgált időpontok: nappali Terra (délelőtt), nappali Aqua (dél), éjjeli Terra (este), éjjeli Aqua (éjjel).

Évszak	Napszak	Műhold	Penc	Újpest	Kitaibel	Lágymányos	Lőrinc	Kakucs
tavasz	nappal	Terra	2,90	3,42	4,79	5,74	6,63	6,75
		Aqua	3,26	3,23	5,59	6,87	7,41	7,82
	éjjel	Terra	-1,33	-0,01	-2,25	-1,81	-2,53	-2,56
		Aqua	-1,09	-0,38	-2,47	-1,86	-2,33	-1,56
nyár	nappal	Terra	0,89	2,94	4,79	6,00	6,21	5,25
		Aqua	0,87	2,57	5,48	7,17	6,92	5,38
	éjjel	Terra	-0,16	0,65	-1,67	-1,26	-1,29	-1,07
		Aqua	0,63	0,66	-1,50	-0,88	-0,67	0,10
ősz	nappal	Terra	0,67	0,80	1,95	3,02	2,69	2,58
		Aqua	1,04	0,74	2,16	3,62	3,16	2,92
	éjjel	Terra	-0,35	0,58	-1,66	-1,26	-1,56	-1,34
		Aqua	0,09	0,34	-1,55	-1,22	-1,29	-0,48
tél	nappal	Terra	-1,33	-0,74	-0,33	0,55	-0,51	-0,94
		Aqua	-0,21	0,15	0,48	1,70	0,77	0,29
	éjjel	Terra	-1,57	-0,20	-2,52	-1,60	-2,53	-2,17
		Aqua	-1,53	-0,65	-2,59	-1,88	-2,59	-1,80

Megvizsgáltuk a műholdas felszínhőmérséklet és az állomási léghőmérséklet közötti kapcsolat erősségét. Mivel az éghajlatunkon a hőmérsékletet – ahogy a többi meteorológiai állapotjelzőt is – erős évi menet jellemzi, ezért ennek kiküszöbölésére anomália idősort hoztunk létre. Minden egyes hőmérsékleti értékből kivontuk az adott mérőállomásra, az adott hónapban, az adott napszakban jellemző átlagértéket, vagyis az ettől való eltérés menetét vizsgáltuk. Az anomália idősorokra vonatkozó korreláció 95%-os szinten minden esetben szignifikáns. Penc esetén a korreláció értékek viszonylag alacsonyak, de a többi mérőállomásnál 0,9 fölöttiek (8. táblázat). Általában éjszaka kisebb az egyes idősorok szórása, kisebb az idősorok közötti átlagos négyzetes hiba értéke, és ilyenkor nagyobbak a korrelációs együtthatók.

8. táblázat. Az egyes mérőállomásokon mért hőmérsékleti értékekből képzett anomália idősorok néhány statisztikai jellemzője. SZM: a műholdas felszínhőmérsékleti értékek szórása. SZÁ: az állomási léghőmérsékleti értékek szórása.

Állomás neve	Napszak	SZM	SZÁ	RMSE	Korrelációs együttható
Penc	nappal	4,27	10,94	10,57	0,6201
	éjjel	4,04	7,01	5,59	0,7198
Újpest	nappal	16,74	17,17	2,31	0,9494
	éjjel	9,19	9,92	1,89	0,9636
Kitaibel	nappal	20,52	18,11	3,51	0,9497
	éjjel	10,98	12,58	2,42	0,9807
Lágymányos	nappal	23,08	19,14	4,67	0,9586
	éjjel	12,20	13,38	1,98	0,9838
Pestszentlőrinc	nappal	24,30	19,90	5,17	0,9536
	éjjel	11,44	12,50	2,30	0,9809
Kakucs	nappal	24,53	20,26	5,39	0,9363
	éjjel	10,10	10,80	2,45	0,9670

5.1.2. Városi és városkörnyéki pontok

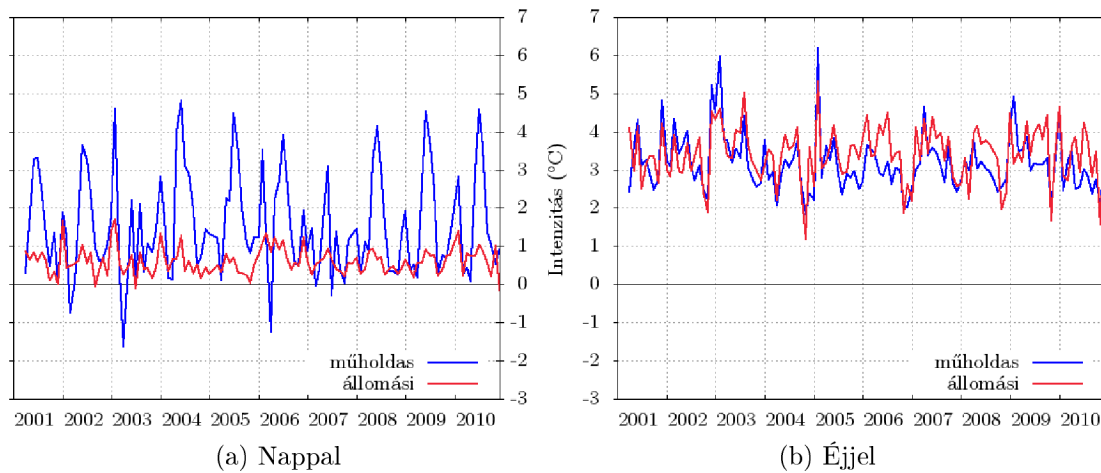
A földrajzi elhelyezkedésük alapján kijelöltünk belvárosi (Lágymányos és Kitaibel Pál utca), külvárosi (Újpest és Pestszentlőrinc) és városon kívüli (Penc és Kakucs) rácspontokat, melyek távolságát a városközponttól a 9. táblázat mutatja be.

9. táblázat. Egyes mérőállomások távolsága a városközponttól

Állomás neve	Távolság a városközponttól (km)	Iránya	Besorolása
Penc	40,8	ÉK	városon kívüli
Újpest	8,6	É	külvárosi
Kitaibel Pál utca	3,8	Ny	belvárosi
Lágymányos	2,5	DNy	belvárosi
Pestszentlőrinc	15,5	DK	külvárosi
Kakucs	43,6	DK	városon kívüli

A négy városi és a két városon kívüli rácspont átlagos hőmérsékletének különbségével is jellemezhetjük a hősziget-intenzitást. Ennek idősorát mutatja a 14. ábra. Nappal a műholdas felszínhőmérséklet alapján létrehozott intenzitás átlagos

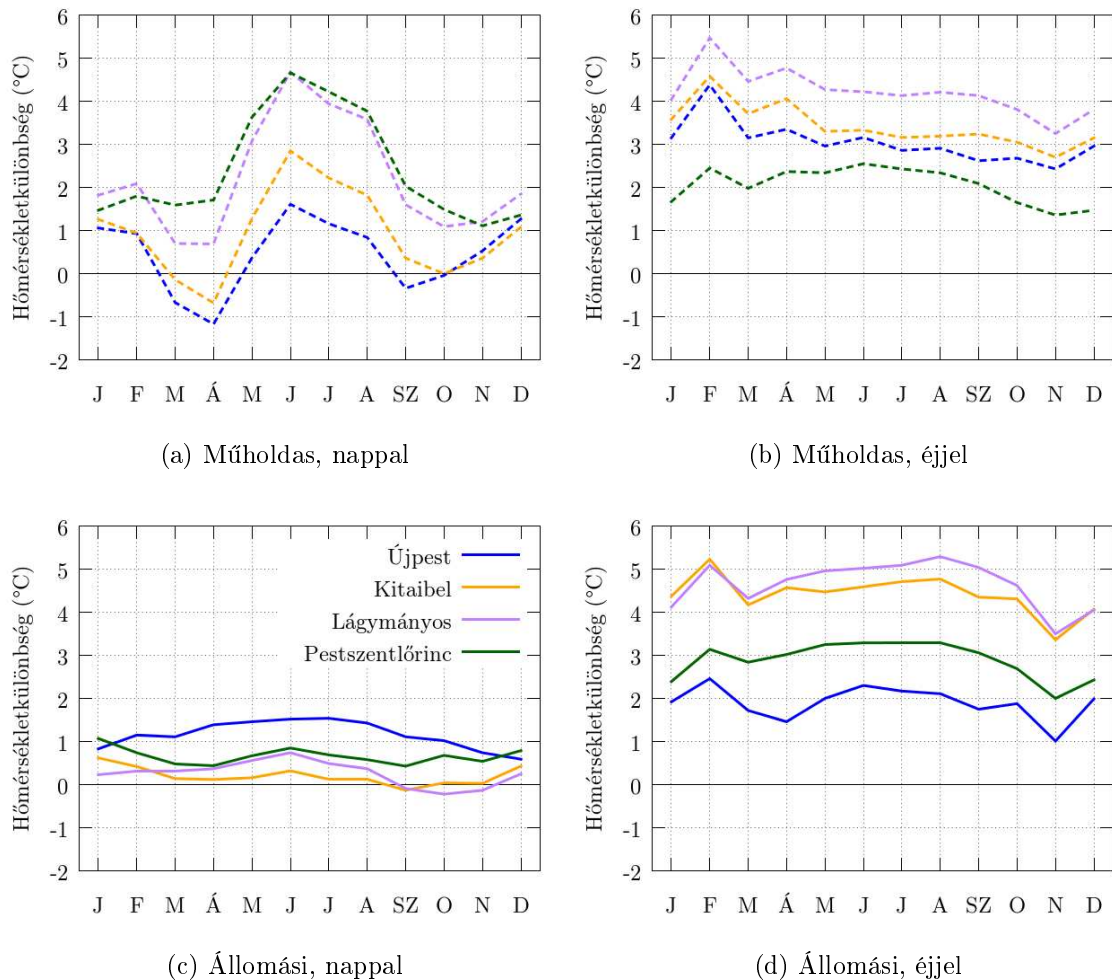
értéke ($1,54\text{ }^{\circ}\text{C}$) jelentősen felülmúlja az állomási léghőmérsékletből származtatott hősziget-intenzitást ($0,60\text{ }^{\circ}\text{C}$). Az éves menetük eltér egymástól: az állomási mérések alapján az intenzitás legnagyobb télen, míg a műholdas mérések eredményei alapján számított intenzitásnak csak a nyári maximumát követi egy téli másodmaximum. A nyári maximum 2003 és 2007 nyarán nem jelentkezik, aminek oka, hogy akkor a szokásosat jóval meghaladó hőségben a természetes felszínek is rendkívüli módon fel tudtak melegedni Dezső (2009). Az intenzitás havi átlagértéke az állomási mérések alapján szinte mindig pozitív, míg a műholdas felszínhőmérsékleti információk alapján tavasszal negatív is lehet (ilyenkor a város környezeténél lassabban melegszik fel). Éjszaka kisebb a különbség a műholdas (átlagosan $3,17\text{ }^{\circ}\text{C}$) és az állomási ($3,41\text{ }^{\circ}\text{C}$) értékek között, az időbeli menetük egészen hasonló.



14. ábra. A négy városon belüli pont és a két városon kívüli mérőpont átlagos hőmérsékletének különbségeként képzett hősziget-intenzitás idősora és átlagos értékei, 2001-2010

5.2. Az egyes mérőállomásokon tapasztalható hőmérsékleti többlet

Kiszámítottuk minden egyes mérőpontra az ott mérhető hőmérsékleti érték eltérését a két városon kívüli mérőállomás (Kakucs és Penc) hőmérsékletének átlagától, a műholdas felszínhőmérsékleti és az állomási léghőmérsékleti adatok alapján (15. ábra).



15. ábra. Az egyes mérőállomásokon mérhető hőmérséklet eltérése a két külterületi állomás értékének átlagától

Az éjszakai állomási mérésekből képzett intenzitás értékek a várakozásnak megfelelően működnek: legnagyobb intenzitás (4–5 °C) tapasztalható a belvárosi, és ennél valamivel kisebb (1–3 °C) a külvárosi mérőállomásokon az egész év során. Ekkor a műholdas felszínhőmérsékleti mérések is hasonlókat mutatnak, bár ott nem különülnek el egymástól ennyire a belvárosi és a városszéli állomások. A nappali állomási adatok alapján pont fordított a helyzet: a belváros 0–1 °C-al (de előfordulnak negatív értékek is), a város szélén található Újpest viszont 1–2 °C-al melegebb, mint a várostól távolabb

fekvő referenciapontok. A nappali műholdas mérésnek jelentősebb évi menete van: tavasszal egyes mérőhelyeken az intenzitás értéke negatív (ezek lassan melegszenek át), és nyáron a legnagyobbak (akár 4–5 °C-osak) ezek az értékek. Ilyenkor viszont a – város szélén, de viszonylag nyílt, füves területen található – pestszentlőrinci mérőállomás bizonyul a legmelegebbnek.

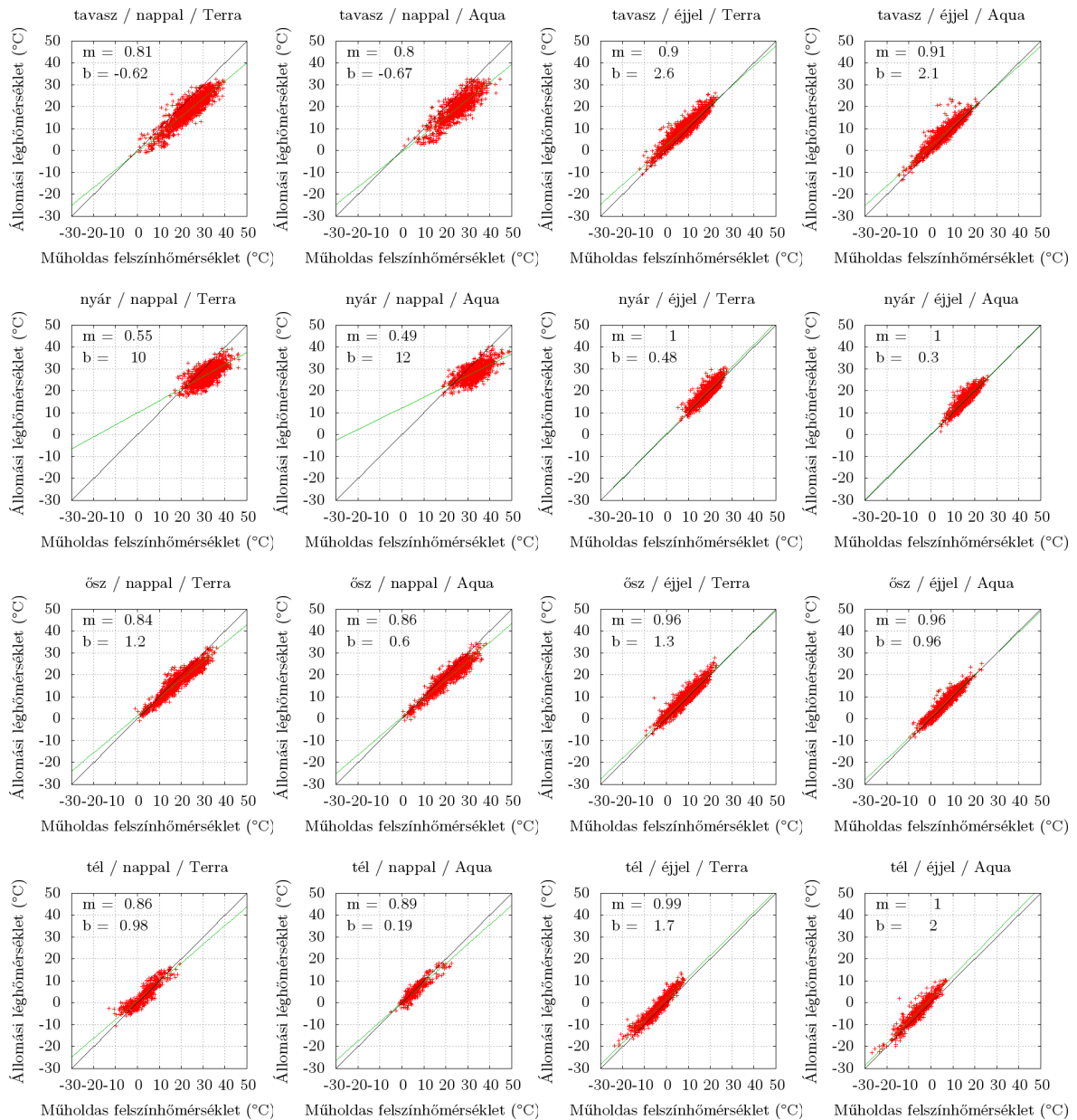
5.3. Rácsponti információk alapján a léghőmérsékleti mező becslése

Mivel állomási adataink csak 6 pontból álltak rendelkezésre, megpróbáltunk ezek alapján mezőt előállítani, amit azután össze lehet hasonlítani a műholdas mezők térbeli eloszlásával és időbeli viselkedésével.

5.3.1. Lineáris regresszió

Megvizsgáltuk a hat mérőponton, illetve az ezekhez tartozó rácspontokon mért hőmérsékleti értékek közötti kapcsolatot, melyhez illesztett regressziós egyeneseket mutatjuk be a 16. ábra pontdiagramjain. Az így kapott regressziós kapcsolatot felhasználva becsüljük a léghőmérséklet térbeli eloszlását. Mivel az 5.1.1. fejeztben megállapítottuk, hogy a különböző időpontokhoz tartozó hőmérsékleti értékek meglehetősen különbözőképp viselkednek, ezért teljesen külön kezeltük őket, viszont mind a hat állomás méréseihez tartozó adatpárokat figyelembe vettük. A 16. ábrán bemutatjuk a regressziós együtthatókat is (m : meredekség, b : tengelymetszet).

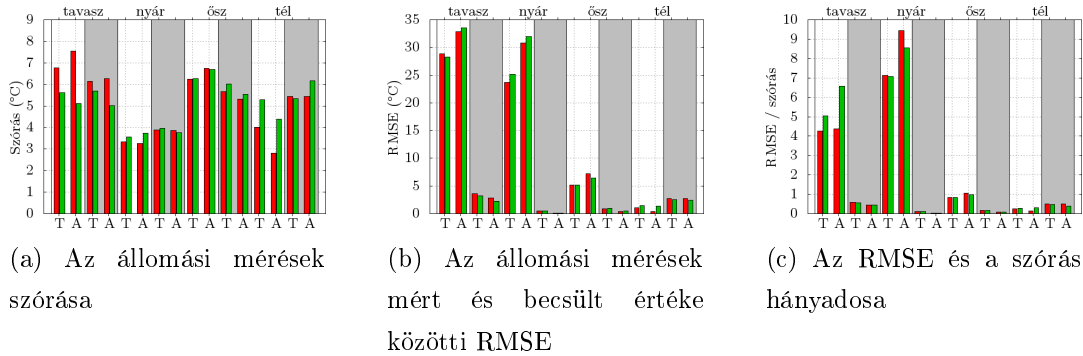
Megfigyelhető a műholdas mérés sajátossága, hogy az eltérés az állomási mérésektől nem állandó, hanem magasabb hőmérsékleti értékeknél nagyobb, a műholdas mérés javára. Ez a nappali időszakban, főleg nyáron figyelhető meg. Probáld (1974) megfogalmazása szerint, ilyenkor a felszín a léghőmérséklethez képest „túlmelegszik”. Ezzel ellentétes, bár jóval kisebb mértékű az eltérés a téli éjszakákon, amikor a felszín hidegebb, mint a felette található légréteg (pl. talajmenti fagyok).



16. ábra. Scatter-plot diagramok mind a négy évszakra (fentől lefelé: tavasz, nyár, ősz, tél). A bal felső sarokban szerepelnek az egyenes illesztésével kapott regressziós együtthatók (m : meredekség, b : tengelymetszet).

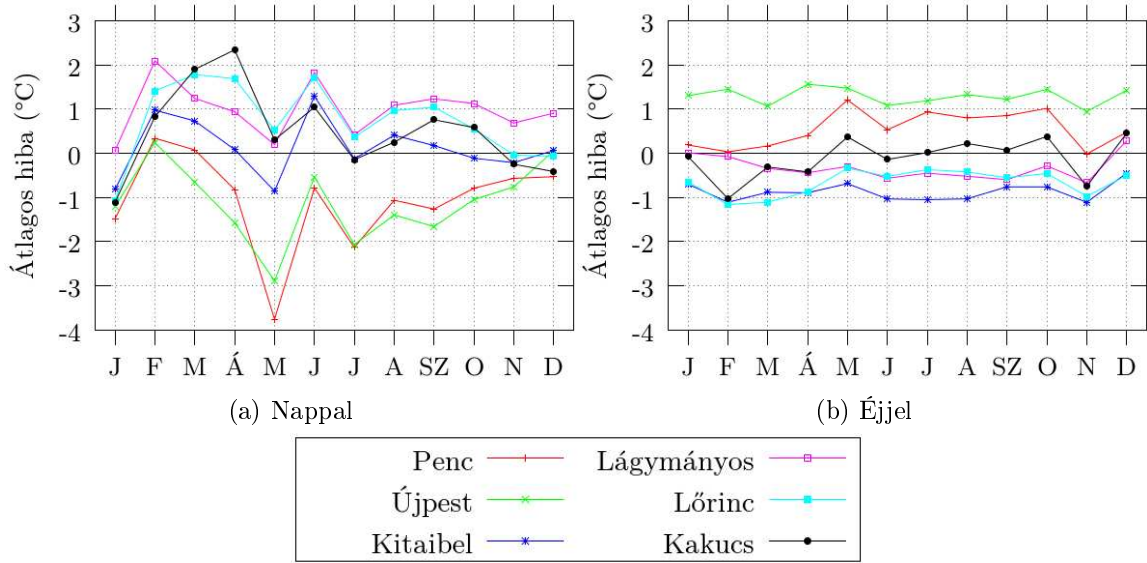
Hogy az eljárást tesztelhesük, különválasztottuk az időszakot két részre: *kalibrációs időszakra* (2001–2006) és *validációs időszakra* (2007–2010). Ezzel az Aqua mérési időszakát (2003–2010) feleztük el. Külön a kalibrációs időszak, és külön a validációs időszak adatait felhasználva regressziós egyenest illesztettünk a műholdas és az állomási mérések közé, minden egyes évszakra és időpontra. Kiszámítottuk a szórás és az átlagos négyzetes hiba értékeit mindkét időszakra (17. ábra). Megállapítható, hogy az átlagos négyzetes hiba értéke főleg tavasszal (a szórás 5–7-szerese) és nyáron (a

szórás 7–9-szerese), a nappali időszakban nagy. A szórás értékei is minden esetben nagyok (3–7 °C), és az átlagos négyzetes hiba értékei is (tavasszal és nyáron 25–35 °C, a többi évszakban 5 °C, vagy annál kisebb). A validációs időszakban nem lett nagyobb jelentősen az RMSE, mint a kalibrációs időszakban.



17. ábra. Szórás és RMSE értékek minden évszakra, napszakra (világos: nappal, sötét: éjjel), és műhold átvonulási időpontra (T: Terra, A: Aqua). Piros: kalibrációs időszak, zöld: validációs időszak.

Megvizsgáltuk az egyes állomásokra vonatkozóan a valódi, mért léghőmérséklet és a regresszióval becsült léghőmérséklet kapcsolatát. Az ilyen módon becsült léghőmérséklet a valóditól kb. 1–2 °C-al tér el, de egyes esetekben akár 7 °C-os eltérést is tapasztaltunk (egy időpontban legfeljebb 1–2 mérőállomás esetén). Elkészítettük az eltérések átlagát minden hónapra és napszakra (18. ábra). Nappal a hibák átlagosan 0–2 °C közöttiek, a legtöbb állomáson pozitívak. A két északi mérőállomás (Penc és Újpest) esetén viszont jellemzően alulbecslést követtünk el, ami főleg májusban nagymértékű (–4 °C; –3 °C). Éjszaka a hibák havi átlaga a (–1 °C; +2 °C) tartományba esik, ez esetben a két északi mérőállomáson tapasztalhatunk felülbecslést, a többin pedig alulbecslést.



18. ábra. A regresszióval képzett és a mért léghőmérséklet értéke közötti átlagos eltérés

Következő lépésként azt vizsgáltuk, hogy milyen hatással van az eredményre a városközponttól való távolság prediktor változóként való alkalmazása a regressziós modellben. Eredményeink alapján a léghőmérséklet és a felszínhőmérséklet kapcsolatát csupán nagyon kismértékben befolyásolja ez a paraméter, mivel a regressziós együtthatója 1–2 nagyságrenddel kisebb, mint a felszínhőmérsékletéhez tartozó regressziós együttható (10. táblázat).

Az egyszerű egyváltozós regresszióval képzett intenzitást korrigáltuk a mérőpontbeli adatokból képzett intenzitás értékek felhasználásával. Azaz a 4 városi és a 2 vidéki mérőpont hőmérsékletének különbsége alapján minden évszakra és napszakra képeztünk egy szorzótényezőt:

$$\alpha = \frac{aT_{OMSZ}}{aT_{reg}} \quad (13)$$

ahol aT_{OMSZ} az OMSZ mérőállomásain mért léghőmérsékletből képzett átlagos intenzitás, aT_{reg} pedig a mérőpontokhoz tartozó MODIS rácsponton mért műholdas léghőmérséklet alapján számított intenzitás érték. Ezt az α korrekciós tényezőt tehát meghatároztuk minden évszakra és napszakra, majd a regressziós intenzitás mezőket ezzel szoroztuk minden esetben.

10. táblázat. Regressziós egyenletek a léghőmérséklet becslésére.

T_m : műholdas felszínhőmérséklet($^{\circ}\text{C}$), D : távolság a város középpontjától (km)

Évszak	Napszak	Műhold	Egyváltozós	Kétváltozós
tavaszi	nappal	Terra	$-0,62 + 0,81 T_m$	$-0,57 + 0,81 T_m - 0,002 D$
tavaszi	nappal	Aqua	$-0,67 + 0,80 T_m$	$-0,60 + 0,80 T_m - 0,003 D$
tavaszi	éjjel	Terra	$2,56 + 0,90 T_m$	$2,57 + 0,90 T_m - 0,003 D$
tavaszi	éjjel	Aqua	$2,15 + 0,91 T_m$	$2,66 + 0,89 T_m - 0,02 D$
nyári	nappal	Terra	$9,99 + 0,55 T_m$	$9,03 + 0,57 T_m + 0,019 D$
nyári	nappal	Aqua	$12,18 + 0,49 T_m$	$10,93 + 0,52 T_m + 0,025 D$
nyári	éjjel	Terra	$0,48 + 1,02 T_m$	$1,05 + 0,996 T_m - 0,009 D$
nyári	éjjel	Aqua	$0,30 + 1,00 T_m$	$2,19 + 0,92 T_m - 0,036 D$
ősz	nappal	Terra	$1,18 + 0,84 T_m$	$0,99 + 0,84 T_m + 0,010 D$
ősz	nappal	Aqua	$0,60 + 0,86 T_m$	$0,43 + 0,86 T_m + 0,009 D$
ősz	éjjel	Terra	$1,26 + 0,96 T_m$	$1,46 + 0,96 T_m - 0,007 D$
ősz	éjjel	Aqua	$0,96 + 0,96 T_m$	$1,58 + 0,94 T_m - 0,025 D$
téli	nappal	Terra	$0,98 + 0,85 T_m$	$0,54 + 0,87 T_m + 0,021 D$
téli	nappal	Aqua	$0,19 + 0,89 T_m$	$-0,22 + 0,90 T_m + 0,019 D$
téli	éjjel	Terra	$1,73 + 0,99 T_m$	$1,64 + 0,99 T_m + 0,006 D$
téli	éjjel	Aqua	$1,96 + 1,02 T_m$	$2,02 + 1,02 T_m - 0,004 D$

5.3.2. Lineáris interpoláció a domborzati viszonyok figyelembe vételével

Az egyes rácspontok különböző tengerszint feletti magasságát figyelembe véve végeztünk interpolációt, mely megadja a léghőmérséklet becsült térbeli eloszlását. Ehhez kiindulásképp a hat OMSZ állomás horizontális koordinátáinak és magasságának értékét vettük alapul. A két városon kívüli állomást tekintettük referenciának, melyek hőmérsékletét ismerve a véges különbségek módszerével becsültük a vertikális hőmérsékleti gradiens értékét:

$$\gamma \approx \frac{T_1 - T_2}{z_1 - z_2} \quad (14)$$

ahol T_i az egyes mérőpontokra jellemző léghőmérséklet, z_i pedig a tengerszint feletti magasság ($i = 1, 2$).

Ezek után az egyes mérőállomások tengerszint feletti magasságának ismeretében a kiszámított γ hőmérsékleti gradiens segítségével transzformáltuk őket egységesen a tengerszintre, a következő módon:

$$T|_{z_0+\Delta z} = T|_{z_0} + \gamma \cdot \Delta z \quad (15)$$

Majd az így előállt hat ismert pont alapján lineáris interpolációt végeztünk, és így megadtuk mind a 4900 MODIS rácspontra a tengerszintre becsült léghőmérsékleti értéket. Az interpoláció során minden egyes rácspontra az állomásoktól vett távolságok reciprokával súlyozott átlagot képeztünk az alábbi képlet szerint:

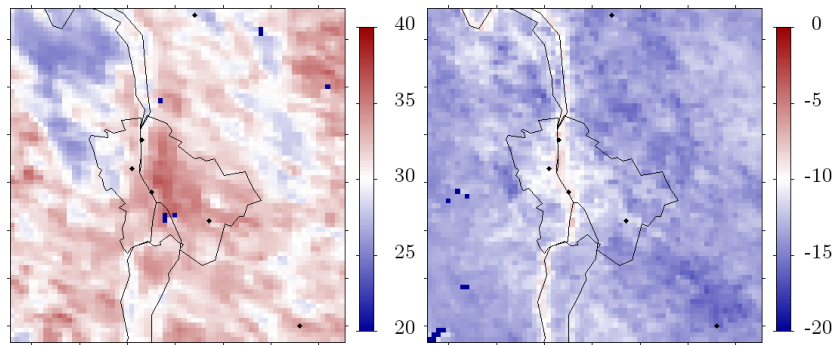
$$T_{int}(x, y) = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \frac{T_{OMSZ}(i)}{D[(x, y), (x_i, y_i)]} \quad (16)$$

ahol $D[A, B]$ az $A(x_A, y_A)$ és $B(x_B, y_B)$ pont távolsága. Ezek után a korábban használt γ hőmérsékleti gradiens alkalmazásával az összes rácspont hőmérsékleti értékét átszámítottuk az adott rácspont 4.4. fejezetben leírt módon képzett magasságára. Így kaptunk egy interpolált mezőt, ami az OMSZ állomási mérései alapján lefedi Budapest térségét, és figyelembe veszi a tengerszint feletti magasság különbségei miatt jelentkező eltéréseket.

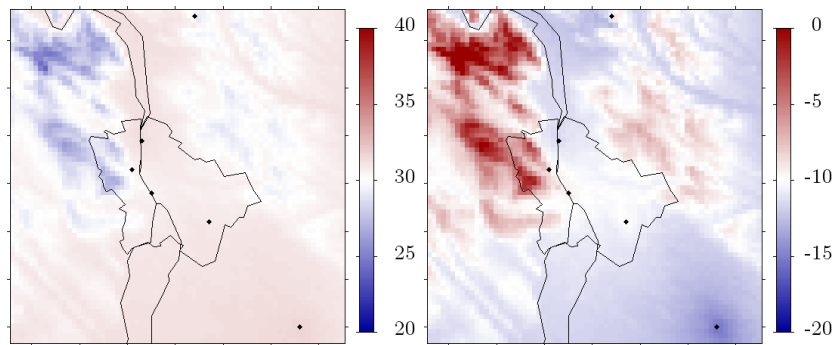
5.4. Intenzitás mezők meghatározása

Az 5.3. fejezetben bemutatott módszerek felhasználásával elkészítettük minden egyes időpontra a teljes állomási léghőmérsékleti mezőt (és a műholdas felszínhőmérsékleti mező a rendelkezésünkre állt), melyek közül egy nyári nappali és egy téli éjszakai példát mutatunk be a 19. ábrán. Az intenzitás mezőt úgy számítottuk ki, mint az egyes rácspontok hőmérsékletének eltérése a 4.1. fejezetben definiált városkörnyéki pontok átlagos hőmérsékletétől. Ennek alkalmazására például a 19. ábra mutat, ugyanarra a két időpontra, amik a 19. ábrán is szerepeltek.

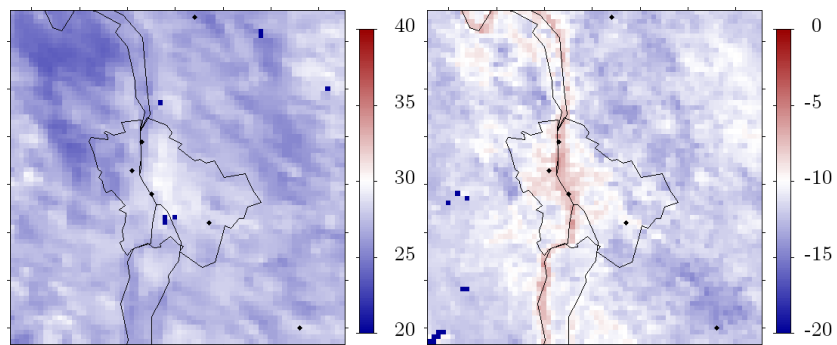
A műholdas térképsorozaton megjelenik a domborzat (Budai-hegység, Gödöllői-dombság, Pilis, Visegrádi-hegység, Cserhát), a vizek hatása (Duna, Velencei-tó) és a belváros is. A regresszióval létrehozott léghőmérsékleti mező ehhez hasonló, csak a szélsőségeket és a különbségeket csökkentette a módszer – a nyári meleg felszínen hűtött, a téli hideg felszínen melegített, és az intenzitás értékeit összességében csökkentette. A korrekciós faktor alkalmazása a nappali intenzitás értékeket csökkentette, az éjjelieket csökkentette, s így valósághűbb eredményeket adott. Az interpolációval létrehozott mezőkön a domborzat hatása kivehető, viszont mivel a városon kívülről kevés információ van, ezért nem a város jelenik meg



(a) műholdas



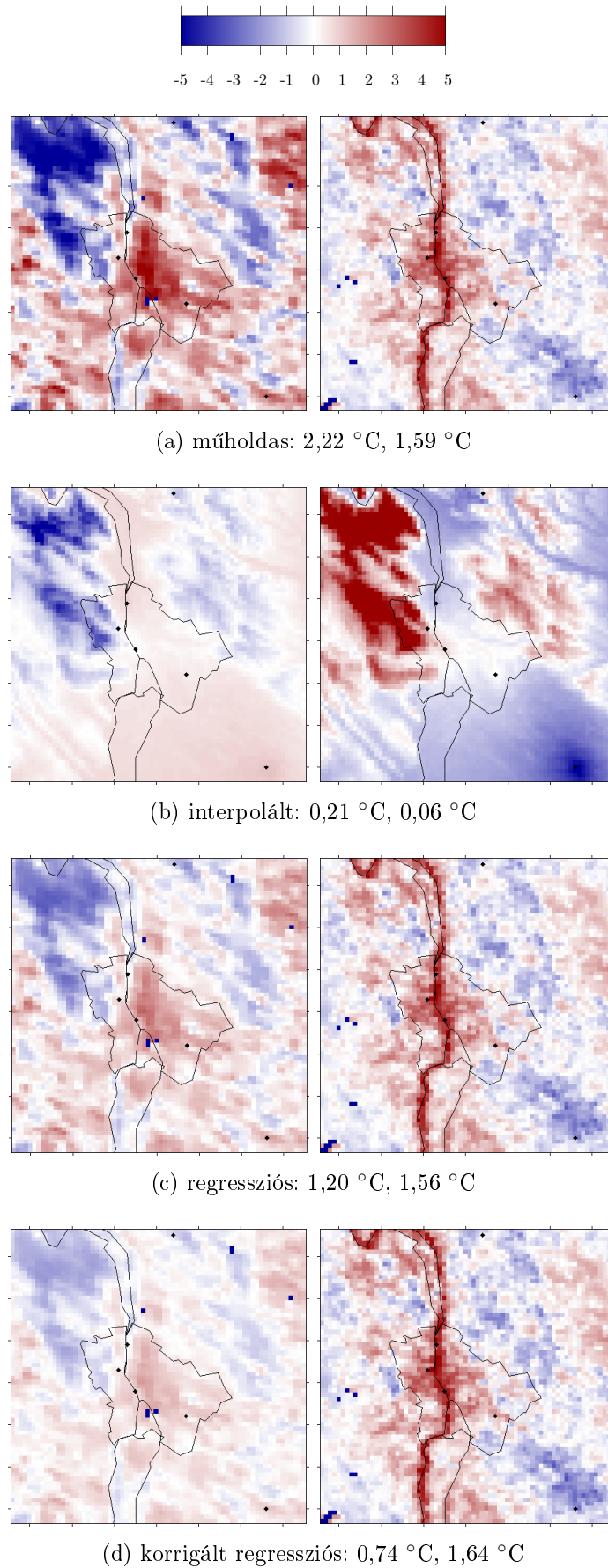
(b) interpolált



(c) regressziós

19. ábra. Hőmérsékleti mező ($^{\circ}\text{C}$) egy nyári nappal (balra: 2001.08.01.) és egy téli éjjel (jobbra: 2002.01.04.) esetén

szigetszerűen a viszonylag homogén környezetben, hanem a városi mérések adják az alapot, amihez képest mint kiugró érték jelentkezik az egy-két városon kívüli mérés eredménye.

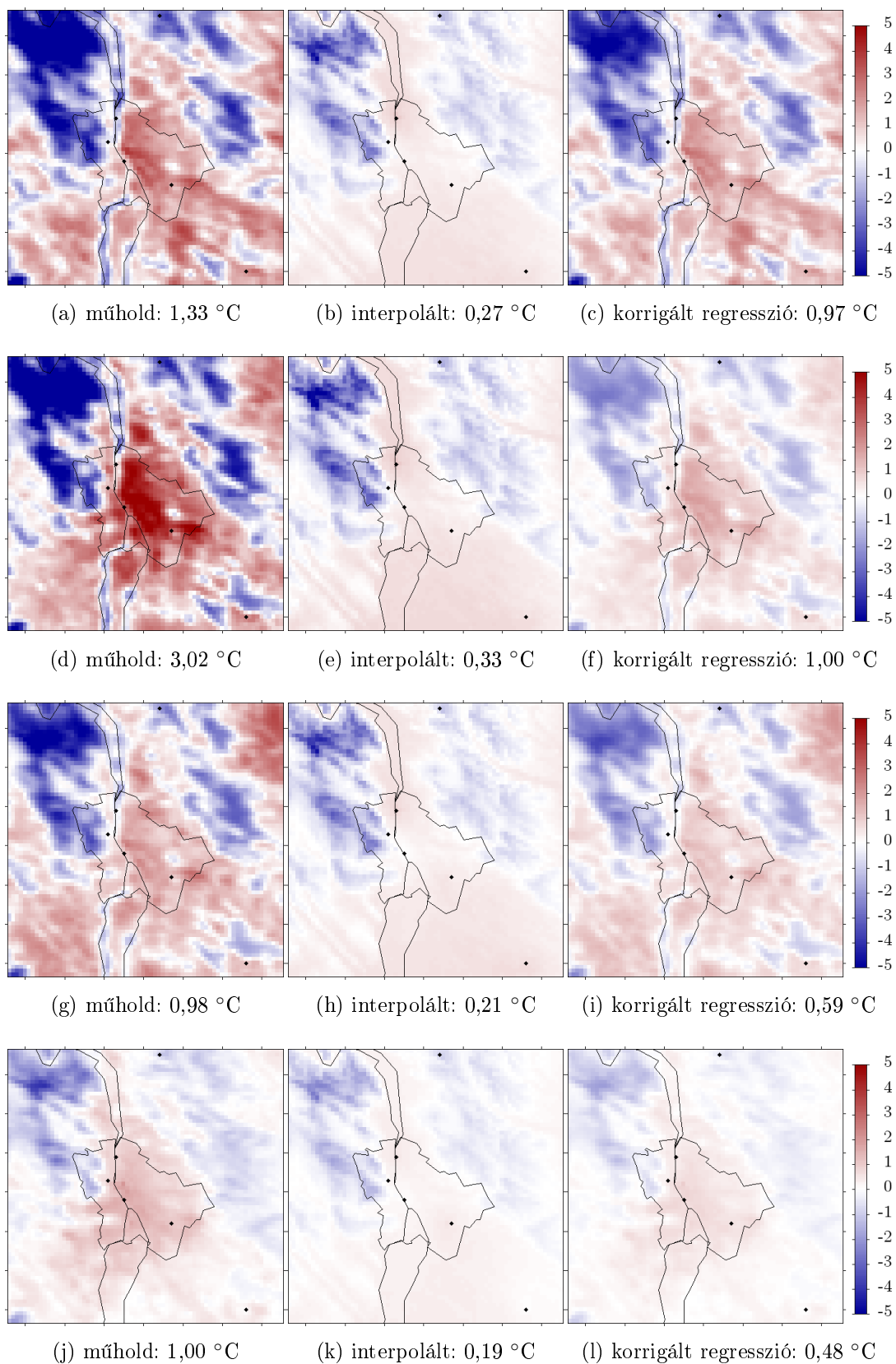


20. ábra. Intenzitás mező (°C). Balra: 2001.08.01. nappal, jobbra: 2002.01.04. éjjel.
A térképek alatti értékek a város egészének átlagos hősziget-intenzitását jelzik.

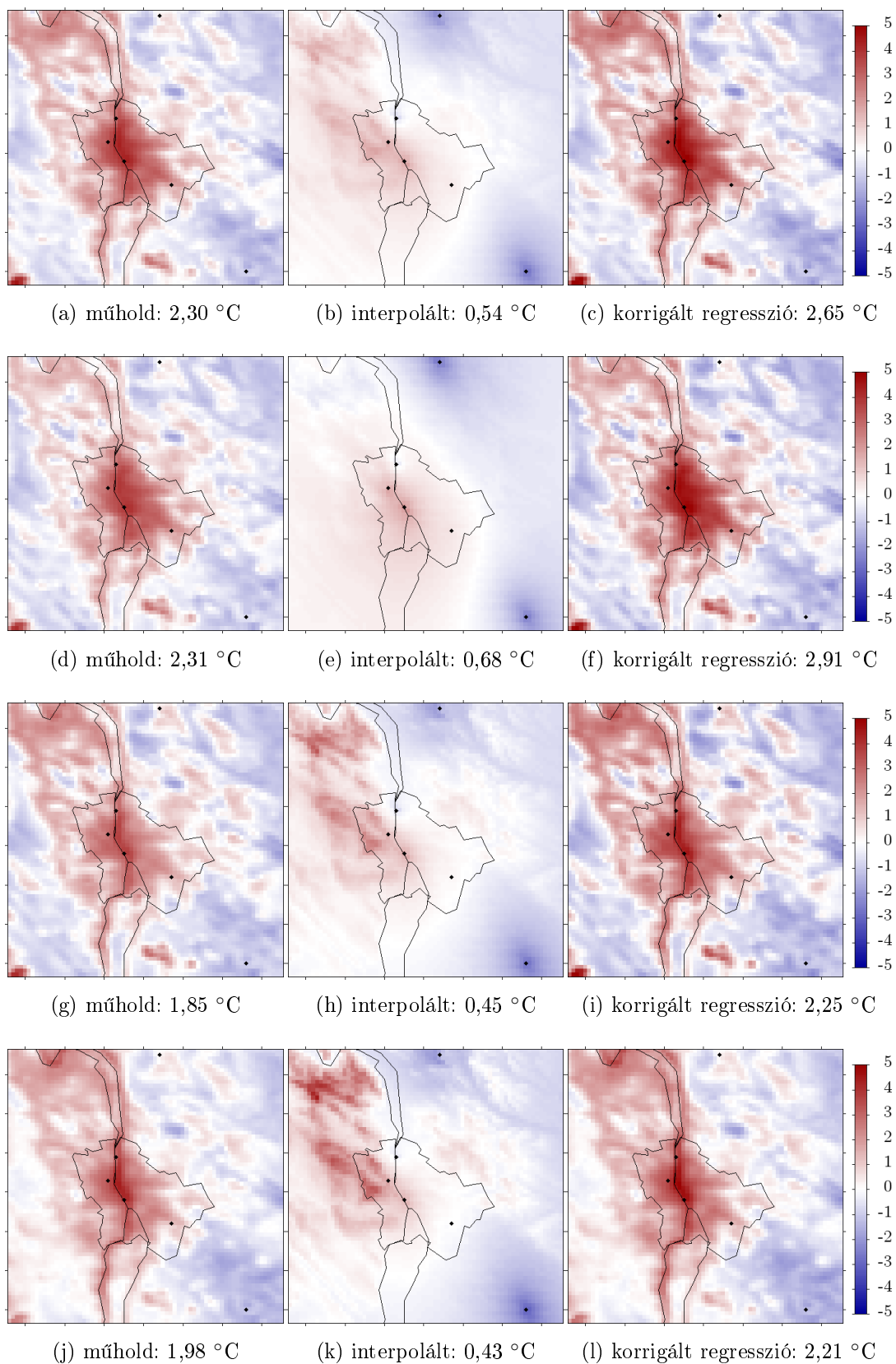
A napi intenzitás mezők felhasználásával elkészítettük az évszakai intenzitás mezőket – azaz az egyes rácspontok hőmérsékletének eltérését a városkörnyéki rácspontok átlagától – minden napszakra és évszakra.

A nappali időszakban (21. ábra) a műholdas mezőn főleg tavasszal és nyáron rajzolódik ki látványosan a város, mint pozitív hőmérsékleti anomália, a Budai-hegység és a Gödöllői-dombság, valamint a Duna mint negatív anomália. Ugyanez az állomási adatsor interpolációjából képzett mezőn kevésbé látványos, bár a hegyvidékek ott is kitűnnek hűvösségükkel, de ott a város nem annyira különül el környezetétől. Ennek oka, hogy a viszonylag sík területen az interpolációra használt pontok nagy része a városban található, így inkább azt tekintjük ezáltal alapnak, amitől egy-két pontban eltérést tapasztalunk. A korrigált regressziós becslés a műholdas felszínhőmérséklet alapján számítottnál kisebb intenzitást eredményez.

Éjszaka (22. ábra) minden évszakban melegebb a város környezeténél, illetve ilyenkor a Duna is mint pozitív hőmérsékleti anomália jelentkezik, és valamennyire – az ilyenkor gyakoribb inverzió miatt – a Budai-hegység is. Az interpolált állomási mező alapján is látszik, hogy egyértelműen melegebb van a városi állomásokon, mint a városon kívülieken, de ezt az interpoláció – a ritka mérőhálózat miatt – nem adja szépen vissza. A regresszióval, és még inkább a korrigált regresszió alkalmazásával a műholdashoz képest valamivel nagyobb intenzitás értékeket kapunk.



21. ábra. A hősziget-intenzitás átlagos évszakos mezői nappal
(soronként: tavasz, nyár, ősz, tél)



22. ábra. A hősziget-intenzitás átlagos évszakos mezői éjjel
(soronként: tavasz, nyár, ősz, tél)

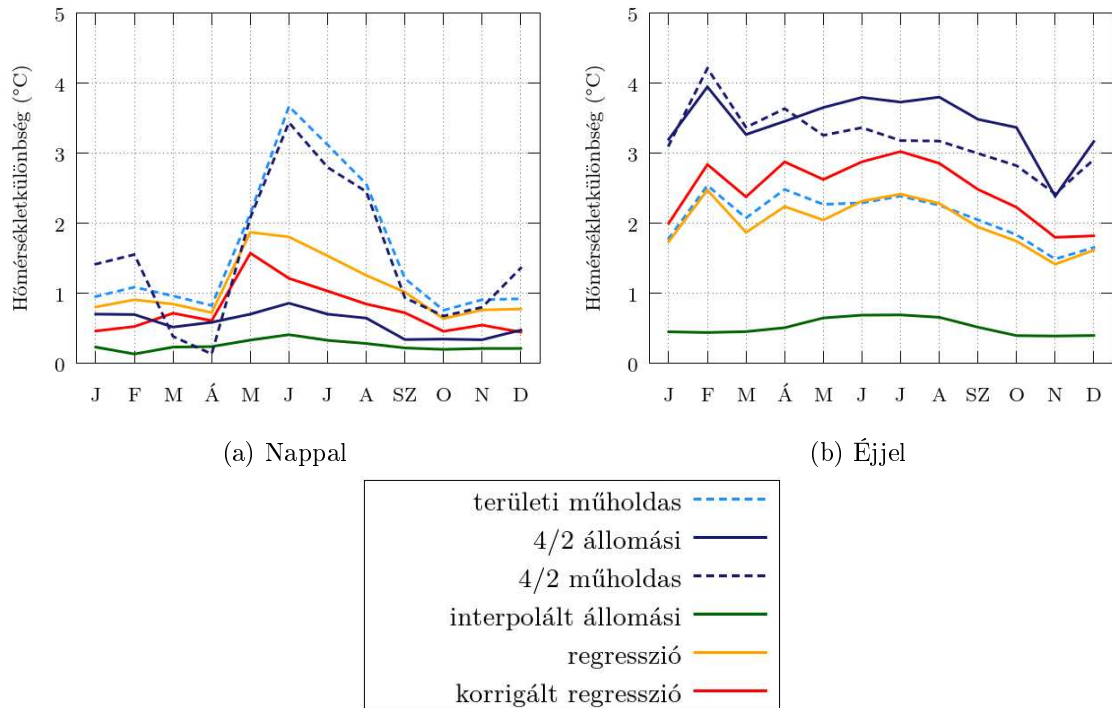
A hősziget-intenzitás alapvetően a város és környezete közötti hőmérsékletkülönbség. Megvizsgáltuk mint egy konkrét, a város egészét jellemző értéket, aminek az időbeli menetére voltunk kíváncsiak.

Mindkét mérési módszer alapján rendelkezésünkre áll az egyes mérőállomásokhoz tartozó hőmérsékleti adatsor. Ebből képeztük a négy városi állomás és a két vidéki állomás hőmérsékletének különbségét (23. ábrán kékkel). Ebből az adatsorból jól látszik a műholdas felszínhőmérséklet és az állomási léghőmérséklet eltérő évi menete. Éjjel mindkét módszerrel hasonló értékeket (3–4 °C) kapunk, nappal viszont az állomási mérések alapján 0–1 °C-os, a műholdas mérések alapján pedig nyáron akár 4 °C-os intenzitást is kimutathatunk.

Közvetlenül a mért adatsorokból származtatható még a világoskéssel jelölt területi intenzitás, amit a városi és a városközponti rácsponatok átlagos hőmérsékletének különbségeként számítottunk ki. Ez a mennyiség tényleg a város területének és környékének egészét jellemzi, viszont ilyen jellegű információnk az állomási mérések alapján nincs. Léghőmérséklet alapján referenciaként használható mennyiségünk egyedül a négy városi és két vidéki mérőállomás különbsége van, viszont az a műholdas mérések esetén látszik, hogy ennek az intenzitásnak az éves menete nem egyezik meg a területi átlagokból képzett intenzitás éves menetével. A kétféle műholdas intenzitásból képzett éves menet nappal pontosan egyezik (télen a leggyengébb, de ilyenkor is 1 °C alatt van a különbségük), viszont éjszaka erősen eltér (1–2 °C van közöttük).

A származtatott léghőmérsékleti mezők alapján is elvégeztük ezt a területi átlagolást. Az interpolációval létrehozott mező alapján (zölddel jelölve) az intenzitás egész évben gyenge, – ezzel a módszerrel kaptuk a leggyengébb intenzitást – éjszaka valamivel nagyobb, de ekkor is csupán 0–1 °C. Az éves menete viszont inkább a műholdas mezőre emlékeztet, nyáron nagyobb, mint télen. A sárgával jelölt idősort hoztuk létre a regresszióval előállított mezőből, ami lényegében megegyezik a műholdas intenzitás értékkel, csak nyáron nem válik annyira intenzívvé, mint az (3–4 °C helyett maximum 2 °C). A regressziós mező korrigálásával létrehozott, az ábrán pirossal jelölt intenzitás éves menete megegyezik az egyváltozós regresszióéval, de nappal annál kisebb, éjszaka pedig nagyobb az értéke. A korrigált regressziós mezőből képzett intenzitás nappal az év nagy részében az állomási mérésekből közvetlenül képzett intenzitást követi, viszonylag kis eltéréssel. Legnagyobb a különbségük májusban (1 °C). Éjszaka jobban eltér a valós (mérőponti) és a származtatott (mezőre vonatkozó) léghőmérsékletre vonatkozó intenzitás, a kettő között nagyjából akkora a különbség, mint a műholdas felszínhőmérsékletből ugyanilyen módon számított kétféle intenzitás érték között. Így, bár mérések hiányában validálni nem tudjuk a léghőmérsékleti

mezőt, egyértelműen a korrigált regressziós módszer tűnik a legkedvezőbbnek. Egyedüli hiányossága, hogy a szakirodalmi ismereteink alapján várt téli intenzitás-maximumot nem állítja elő.



23. ábra. Hősziget-intenzitás éves menete. A folytonos vonalak a léghőmérsékletre, a szaggatottak a felszínhőmérsékletre utalnak.

6. Összefoglalás

Jelen dolgozatban röviden áttekintettük a városklíma kialakulását befolyásoló legfontosabb tényezőket. Bemutattuk a felhasznált adatokat (műholdas felszínhőmérséklet, állomási léghőmérséklet, a városközponttól való távolság, tengerszint feletti magasság), ezek mérésének módját, az adatok származtatását. A korábban Budapest térségében tanulmányozott 65×65 rácspontból álló vizsgálati területet kibővítettük 70×70 pixelesre, hogy a fővárostól észak-északkeletre fekvő Penc mérőállomása is még szerepeljen benne. Elkészítettük a vizsgált terület bemutató térképsorozatot, mely bemutatja a térség domborzatát, a felhasznált városi és városkörnyéki rácspontok elhelyezkedését, valamint a hőmérsékleti mezők térképei számára leválogattuk a város közigazgatási határát és a Duna vonalát, műholdfelvételek alapján.

A mérőállomásokra vonatkozó állomási léghőmérsékleti értékek, valamint a mérőállomásokhoz közeli rácspontra vonatkozó műholdas felszínhőmérsékleti értékek alapján az alábbi következtetéseket foglalhatjuk össze:

→ Megállapítottuk, hogy nyáron áll a rendelkezésre a legtöbb adat (30–35%-a az összesnek), és télen a legkevesebb (10–15%-a). Ez összhangban van a felhőzet előfordulásával. Éjszaka a nappali időszakhoz viszonyítva valamivel több adat van, valószínűleg a besugárzás, és emiatt a gomolyfelhők képződésének erős napi menete miatt. Az elvileg lehetséges napi 4 adatból legjobb esetben is csak 3 áll rendelkezésre havi átlagban.

→ A nappali és az éjszakai mérési időpontok eredményei egyértelműen elkülönülnek egymástól, valamennyire az Aqua és a Terra mérései is elkülöníthető egymástól, így érdemes a feldolgozás során a napi 4 áthaladásból származó méréseket teljesen külön kezelni. Várakozásunknak megfelelően nappal a felszínhőmérséklet meghaladja a léghőmérsékletet, éjszaka pedig alulmúlja ezt. Ennek hátterében az áll, hogy a légkör közvetve melegszik és hűl, a felszín révén. Télen előfordul viszonylag sok olyan eset is, amikor nappal sem melegszik fel a felszín.

→ A felszínhőmérsékleti és a léghőmérsékleti mérések anomália értékei közötti lineáris kapcsolat erős, a korrelációs együttható szignifikánsan különbözik nullától. A korrelációs együttható értékei Penc esetén 0,6–0,7, a többi mérőállomáson 0,9 fölöttiek. Éjszaka nagyobbak a korrelációs együtthatók, és kisebb a kétféle anomália közötti eltérés, valamint az egyes anomália értékek szórása is.

→ A földrajzi elhelyezkedésük alapján a mérőpontok egyértelműen feloszthatók belvárosi, városzéli és városon kívüli helyekre. A hősziget-intenzitást értelmezhetjük úgy, mint a négy városi és a két városon kívüli mérőpont különbségét. Az így képzett idősorok éves menete a szakirodalom alapján elvárt menettel elfogadható egyezést mutat. Nappal az állomási mérések alapján gyengén pozitív (0–1 °C) értékeket kapunk, téli maximummal. Ugyanekkor a műholdas mérések szerint nyári maximumot kapunk (4–5 °C), téli lokális másodmaximummal, és tavaszi minimummal, mely akár negatív is lehet. Éjszaka a kétféle intenzitás érték nagyon hasonló, az állomási mérések alapján átlagosan 0,2 °C-al nagyobb, mint a műholdas mérések alapján.

A városi hősziget térbeli eloszlásának vizsgálatához hőmérsékleti mezőkre van szükségünk. A műholdas információk rendelkezésünkre álltak 1 km 1 km felbontású szabályos rácstra (a vizsgált területet összesen 4900 rácspont fedi le), állomási idősorok viszont csak az OMSZ által működtetett hat mérőállomásról elérhetők. Többféle statisztikai módszerrel is próbálkoztunk, hogy ebből a hat pontból térben folytonosnak tekinthető mezőt állítsunk elő. Ezzel kapcsolatos tapasztalatainkat, eredményeinket az alábbiakban foglaljuk össze.

(1) Lineáris regressziós modellt alkalmaztunk a kétféle (műholdas és állomási) idősor felhasználásával, az eseteket különböztetve évszakok, napszakok, és mérési időpontok szerint. Megállapítottuk, hogy a tavaszi és a nyári nappalokon kívül a többi esetben a kétféle hőmérsékleti érték elég jól illeszkedik egy egyenesre (az átlagos négyzetes hiba a legtöbb esetben kisebb, mint az adatok szórása). Minden egyes évszakra, napszakra és időpontra külön meghatároztuk a regressziós egyenest, aminek a segítségével becslést adtunk a léghőmérsékleti mezőre minden időpontra vonatkozóan.

→ Az így létrehozott hőmérsékleti mezők értékei között valamelyest kisebbek a különbségek, mint a műholdas mérések alapján meghatározott eredeti mező esetén. A nyári meleg felszín hűvösebb, a téli hideg felszín pedig enyhébb lett. Ezáltal a különbségek tehát – így a hősziget-intenzitás is – kis mértékben csökkennek. Az ilyen módon létrehozott hőmérsékleti mező térbeli szerkezete az eredeti, műholdas felszínhőmérsékleti mezőtől kevésbé tér el.

→ Ennek megfelelően az összes városi és az összes városkörnyéki hőmérsékleti érték átlagaiból képzett különbség (azaz a hősziget-intenzitás) is egész évben együtt fut a műholdas felszínhőmérsékleti mező alapján meghatározott éves menettel. A két intenzitás között főleg nyáron van különbség, amikor a városi felszínen különösen magas hőmérséklet – és egyúttal intenzitás – értékek jelentkeznek, ezen tompít a regresszió módszere. Így például a júniusi nappalokra vonatkozó kb. 3,5 °C-os maximális

felszíni intenzitás idején a regresszióval létrehozott léghőmérsékleti mezőben csak kb. 2 °C-os hősziget-intenzitást tapasztalhatunk. Az intenzitás nyáron a legnagyobb (nappal 1,49 °C, éjjel 2,33 °C – ezzel szemben télen: nappal 0,84 °C, éjjel 1,93 °C). Tehát a szakirodalom alapján a léghőmérséklettől várt téli intenzitás-maximumot ezzel a módszerrel nem tudtuk elérni.

(2) A két városon kívüli mérőpontot mint „a város által háborítatlan” mérőhelyet tekintve, a kettő közötti hőmérsékletkülönbséget egyedül a magasságkülönbség hatásának tekintve a Kakucs és Penc közötti hőmérsékletkülönbség alapján megbecsültük a térségre jellemző átlagos vertikális hőmérsékleti gradiens értékét. Ennek alkalmazásával a hat mérőpont léghőmérsékletét átszámítottuk egy közös magasságra, majd a 4900 rácspontra a távolság reciprokával súlyozott interpolációt végeztünk. Ezt követően az előbbi hőmérsékleti gradienst ismét figyelembe véve az összes rácspontra az interpolációval létrehozott léghőmérsékleti értéket átszámítottunk az adott rácspont átlagos tengerszint feletti magasságára (amit a NASA ASTER szenzorral létrehozott, a MODIS rácshálózatnál finomabb felbontású terepmodelléből készítettünk).

→ Az ilyen módon létrehozott térképek a domborzat hatását hihetően mutatják (pl. éjszakai inverzió). Az is látszik, hogy ehhez a módszerhez sajnos nem elegendő a rendelkezésre álló néhány állomás mérése – feltétlenül szükséges lenne további mérések figyelembe vétele. Különösen éjszaka feltűnő a megfigyelések hiánya, amikor a városi és a vidéki mérőpontok között nagyok a különbségek – azaz amikor nagy a hősziget-intenzitás. Ilyenkor a kevés városon kívüli mérőállomásról származó információ mint kiugró folt jelenik meg a városi mérőállomások által meghatározott alap hőmérsékleti mezőben – szemben a várakozásainkkal, miszerint a város területén van kiugróan magas hőmérséklet a külterülethez képest. További problémát jelent az, hogy a tulajdonképpeni belváros területén – ahova a hősziget-intenzitás maximumát várnánk – egyáltalán nincs mérés. Mivel az interpoláció során súlyozott átlagot képzünk, ezért ebből adódóan az ilyen módon kapott mező úgy fog kinézni, hogy mindenképpen egy-egy mérőpont fogja adni a szélsőértékeket, az interpolált adatok pedig ezek között fognak elhelyezkedni. Így, ha nem mérünk azon a részen, ahol a legnagyobb az intenzitás, interpolációval nyilvánvalóan nem fogjuk tudni a magas értékeket előállítani.

→ A kevés pont alapján készült, és így viszonylag homogén mezőben az intenzitás viszonylag kicsi lett. Ezen a domborzat némileg módosít ugyan, de az igazán magasan fekvő területek definíciószerűen nem számítanak a területi átlag képzésére alkalmazott rácspontok közé. Ennek megfelelően az ezzel a módszerrel számított területi intenzitás értékek a leggyengébbek (nappal 0,2–0,3 °C, éjjel 0,4–0,7 °C évszakos átlagban). A télre várt intenzitás-maximumot itt sem tudtuk elérni.

A kapott eredmények alapján megállapíthatjuk, hogy a felhasznált statisztikai módszerekkel nem tudtuk a léghőmérsékleti mezőre teljes mértékben kielégítő becslést adni. Az alkalmazott módszerek közül az állomásokon mért hőmérsékleti értékek különbségeként képzett intenzitás alapján korrigált regressziós módszer bizonyult a legjobbnak. A továbbiakban ezt kellene javítani további felszínparaméterek bevezetésével, vagy egy numerikus modell alkalmazásával. Szintén fontos lenne a felszíni mérőállomások számának növelése, hogy ily módon több információ álljon rendelkezésre akár a regressziós modell, akár az interpolációs technika sikeresebb felhasználásához.

Köszönetnyilvánítás

A műholdas felszínhőmérsékleti adatbázis előállítása és rendelkezésre bocsátása az amerikai NASA-nak köszönhető, melyhez a Földfelszíni Megfigyelőrendszer Adatközpontján keresztül jutottunk hozzá. Kutatásainkat az OTKA K-67626, K-69164, K-78125 számú pályázatai, valamint az IHM TP-241, TP-258, TP-278, TP-338 számú pályázatai támogatták. További segítséget nyújtott az Európai Unió és az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával az "Európai Léptékkal a Tudásért, ELTE-TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0003. A felsőoktatás minőségének javítása a kutatás-fejlesztés-innováció-oktatás fejlesztésén keresztül" pályázat, valamint az MTA TKI Alkalmazkodás a klímaváltozáshoz című (2006/TKI/246) programja.

A műholdas felszínhőmérsékleti adatbázist a NASA állítja elő, és bocsátja rendelkezésünkre a Földfelszíni Megfigyelőrendszer Adatközpontján keresztül. Az adatok leválogatásáért köszönetet mondok Dezső Zsuzsának.

Az állomásokon mért léghőmérsékleti adatokat az Országos Meteorológiai Szolgálatnak köszönhetjük.

Az ASTER GDEM domborzatmodellt a NASA és a METI készítette el, és tette szabadon hozzáférhetővé.

Irodalomjegyzék

ARNFIELD, A. J. (2003) Two decades of urban climate research. A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology* 23. pp. 1–26.

ÁCS F., BREUER H. (2011) Biofizikai éghajlat-osztályozási módszerek. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, megjelenés alatt.

BACSÓ N. (1958) Budapest és környékének éghajlata. Megjelent: Budapest természeti képe (szerk: Pécsi M.) pp. 353–418. Akadémiai Kiadó, Budapest.

BÄRRING, L., MATTSSON, J. O., LINDQVIST, S. Canyon geometry, street temperatures and urban heat island in Malmö, Sweden. *International Journal of Climatology* 5. pp. 433–444.

CZELNAI R. (2004) Bevezetés a meteorológiába I.: Légekörtani alapismeretek. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest. 8. kiadás, 247 p.

DEZSÓ ZS. (2000) Budapest szélklímájának és potenciális környezeti hatásainak elemzése. *Légekör* 45/3. pp. 29–34.

DEZSÓ ZS., BARTHOLY J., PONGRÁCZ R. (2005) Satellite-based analysis of the urban heat island effect. *Időjárás* 109. pp. 217–232.

DEZSÓ ZS. (2009) A magyarországi és közép-európai nagyvárosokban kialakuló városi hősziget vizsgálata finom felbontású műholdképek alapján. PhD dolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, 113 p.

DEZSÓ ZS., BARTHOLY J., PONGRÁCZ R., LELOVICS E. (2012) Városi hősziget vizsgálatok műholdas és állomási mérések alapján. *Légekör*, megjelenés alatt.

Google Maps. <http://maps.google.com>

HOLDRIDGE, L. R. (1947) Determination of world plant formations from simple climatic data. *Science* 105. pp. 367–368.

HOWARD, L. (1820) *The climate of London*. London, 348 p.

ICHINOSE, T., SHIMODOZONO, K., HANAOKI, K. (1999) Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmospheric Environment* 33. pp. 3897–3909

LANDSBERG, H. E. (1981) *The Urban Climate*. Academic Press, London, 275 p.

LELOVICS E. (2008) A városi hősziget vizsgálata in-situ és távérzékelési módszerek használatával. Tudományos Diákköri Dolgozat, ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest, 35 p.

LELOVICS E. (2009) A városi hősziget vizsgálata in-situ és távérzékelési módszerekkel Budapesten. Tudományos Diákköri Dolgozat, ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest, 32 p.

LELOVICS E. (2010) A budapesti városi hősziget összehasonlító elemzése műholdas és állomási mérések felhasználásával. Tudományos Diákköri Dolgozat, ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest, 31 p.

KERN A. (2001) Budapesti városklíma állomás az Eötvös Loránd Tudományegyetemen. Tudományos Diákköri Dolgozat, ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest, 37 p.

KÖPPEN, W. (1918) Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahresablauf. Petermanns Geographische Mitteilungen 64. pp. 193–203, 243–248.

KRATZER, P. A. (1956) Das Stadtklima. Verlag Vieweg, Braunschweig, 143 p.

MAJOR GY., TÁRKÁNYI ZS. (1968) A sugárzási egyenleg meghatározás eredményei és kritikai vizsgálata a NyNNÉ-ben végzett mérések tapasztalatai alapján. Beszámoló, 1967, pp 179–199. Országos Meteorológiai Intézet, Budapest.

NASA (1999) Science writers' guide to Terra. NASA Earth Observing System Project Science Office, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, 26 p.

NASA (2005) MODLAND Tile Calculator.

<http://landweb.nascom.nasa.gov/developers/tilemap/note.html>

OKE, T. R. (1973) City size and the urban heat island. Atmospheric Environment 7. pp. 769–779.

OKE, T. R. (1982) The energetical bases of the urban heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 108. pp. 1–24

OKE, T. R. (2004) Siting and exposure of meteorological instruments at urban sites. 27th NATO/CCMS International Tech Meeting on Air Pollution Modelling and Application, 14 p.

OMSZ (2008) Éghajlati adatsorok 1901–2000 – Budapest. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest. http://owww.met.hu/eghajlat/eghajlati_adatsorok/bp

POGÁNY A., NIEDETKY A., TATAI Zs., ZÉTÉNYI D. (2011) Budapest város-szerkezete. Megjelent: Budapest városfejlesztési koncepciója, 7. fejezet, pp. 117–144. Budapest Főváros Önkormányzat, Budapest.

PONGRÁCZ R., BARTHOLY J., DEZSŐ Zs. (2005) A budapesti városklíma vizsgálata műholdképek felhasználásával. Légkör 50/4. pp. 8–12.

PONGRÁCZ R., BARTHOLY J., DEZSŐ Zs. (2010) Application of remotely sensed thermal information to urban climatology of Central European cities. *Physics and Chemistry of Earth* 35. pp. 95–99.

PRATA, A. J., CASELLES, V., COLL, C., SOBRINO, J. A., OTTLÉ, C. (1995) Thermal remote sensing of land surface temperature from satellites: current status and future prospects. *Remote Sensing Reviews* 12. pp. 175–224.

PROBÁLD F. (1974) Budapest városklímája. Akadémiai Kiadó, Budapest, 127 p.

RÉTHLY A. (1947) Budapest éghajlata. Rheuma- és fürdőkutató Intézet, Budapest, 147 p.

ROTH, M., OKE, T. R., EMERY, W. J. (1989) Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *International Journal of Remote Sensing* 10. pp. 1699–1720.

STULL, R. B. (1989) *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 666 p.

SZEPESI D., SCHIROKINÉ K. I. (1999) A városi levegőkörnyezet tervezésének aktuális kérdései. I. városklimatológiai munkaértekezlet, pp. 6–18. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest.

TACHIKAWA, T., HATO, M., KAKU, M., IWASAKI, A. (2011) Characteristics of ASTER GDEM version 2. IGARSS pp. 3657–3660. <http://ersdac.or.jp/GDEM/E/1.html>

THORNTHWAITTE, C. W. (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38. pp. 5–94.

UNGER J. (1997) Lokális és mikroklímák. József Attila Tudományegyetem, Szeged, 157 p.

UNGER J., SÜMEGHY Z. (2002) Környezeti klimatológia. Szegedi Tudományegyetem, Szeged, 202 p.

UNGER J., GÁL T., RAKONCZAI J., MUCSI L., SZATMÁRI J., TOBAK Z., B. VAN LEEUWEN, FIALA, K. (2010) Modelling of urban heat island pattern based on the relationship between surface and air temperatures. *Időjárás* 114. pp. 287–302.

VOOGT, J. A., OKE, T. R. (2003) Thermal remote sensing of urban climate. *Remote Sensing of Environment* 86. pp. 370–384.

WAN, ZHENGMING (1999) MODIS Land-Surface Algorithm Theoretical Basis Document (LST ATBD) version 3.3. Institute for Computational Earth System Science, University of California, 77 p.

ZÁRBOK ZS., GILI B., TAKÁCS L., ZSOLDOS E., GORDON L. (2005) Az automata mérőhálózat felépítése területi eloszlása. *Intenzív meteorológiai megfigyelések – A 30. meteorológiai tudományos napok előadásai* pp.47–58. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest.