

A városok termikus viszonyainak vizsgálata
MODIS műholdképek segítségével
Budapest XII. kerületének példáján

SZAKDOLGOZAT

FÖLDTUDOMÁNYI ALAPSZAK
METEOROLÓGUS SZAKIRÁNY



Készítette:

Fricke Cathy

Témavezetők:

Dr. Pongrácz Rita

Soósné Dr. Dezső Zsuzsanna

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék
Budapest, 2014

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. A városi hősziget hatás és kutatási területei	5
2.1. A városklíma kutatási területei	5
2.2. A város energiaegyenlege.....	6
2.3. A városi hősziget és termális tulajdonságai	11
3. XII. kerület (Hegyvidék) bemutatása.....	19
3.1. A Hegyvidék általános jellemzői	19
3.2. A kerület zöldterületeinek bemutatása	23
4. Felhasznált adatok bemutatása	26
4.1. Terra, Aqua műholdak és a MODIS szenzor	26
4.2. GTOPO30	28
5. Vizsgálatok és eredmények	29
5.1. Vizsgálati módszerek.....	29
5.2. A XII. kerület termikus tulajdonságainak elemzése.....	31
5.2.1. A beépített és a zöld területek termikus különbségei	38
5.2.2. Különböző magasságú területek összehasonlítása	41
5.2.3. A XII. kerület keresztmetszeti vizsgálata.....	45
6. Összefoglalás.....	48
Köszönetnyilvánítás	50
Irodalomjegyzék.....	51

1. Bevezetés

Egy terület éghajlatát számos befolyásoló tényező együttes hatása alakítja ki. A legfontosabb ilyen tényező a napsugárzás, melynek energiája a földrajzi szélességtől függően függően eltérő lehet. Fontos szerepet játszik még az óceántól való távolság és a domborzat. A domborzat. A növényzetnek és a talajnak mezo-, illetve mikroléptékű módosító hatása van egy adott területre. A városi környezetnek, azaz lakóépületek sokaságának, utcahálózatoknak és ipari területeknek is ilyen mezo-, illetve mikroklimát módosító hatása figyelhető meg (Marosi és Szilárd, 1959). Ezt a hatást városi hősziget hatásnak (UHI¹) nevezzük.

Jelenleg a Föld teljes lakosságának 54%-a él a városokban, 2050-re pedig ez az arány elérheti a 66%-ot is (ENSZ, 2014). Magyarország népességének 70%-a él városokban, – és a 100 000 főt meghaladó lakosságszámú nagyvárosokban élők teljes népességhez viszonyított aránya megközelíti a 30%-ot (KSH, 2014a, 2014b), ezáltal indokolt a városok környezetre gyakorolt hatásait részletesen tanulmányozni. Hazánkban jellemzően a nagyobb lélekszámú városokban (Budapesten, Debrecenben, Miskolcon, Pécsen, Szegeden) figyelhető meg szignifikáns hősziget hatás, melyek hőtöbblete az 5 °C-ot is meghaladhatja (Pongrácz et al., 2013).

Az első városklimatológiával kapcsolatos tanulmány Howard (1818) nevéhez köthető, aki London éghajlatát és levegőminőségét jellemezte a XIX. század elején. Budapesten 1779 óta végeznek meteorológiai megfigyeléseket, ezek egy részének a háborús időkben nyoma veszett, de végül Dr. Berkes Zoltán Bécs, Prága és Temesvár megfigyeléseit felhasználva kiegészítette a hiányos adatsort. Fővárosunk éghajlatáról több összefoglaló mű is született, ezek közül érdemes kiemelni Réthly Antal (1947), Bacsó Nándor (1958) és Probáld Ferenc (1974) monográfiáját, melyek több évtizedes észlelési sorozatokat dolgoztak fel.

Korunk fejlett technológiájának köszönhetően már műholdak is rendelkezésünkre állnak a meteorológiai állapotváltozók megfigyeléséhez. Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén 1998 óta folyó városklíma-kutatást a 2002-ben telepített műholdvevő állomás nagymértékben elősegítette, és lehetőséget nyújtott Budapest városklímájának részletesebb vizsgálataira (Kern et al., 2005). A műholdas mérésen alapuló adatokat felhasználva több városra is készült termikus viszonyokat tárgyaló tanulmány (Dezső et al., 2005; Pongrácz et al., 2010), illetve a felszíni mérőállomások léghőmérsékleti értékeit és a műholdas szenzorral mért felszínhőmérsékleti adatokat összehasonlító elemzés is született

¹ Urban Heat Island

Magyarország nagyvárosaira vonatkozóan (Bartholy et al., 2009; Lelovics et al., 2011; Dezső et al., 2012). A kutatások Közép-Európa nagyvárosaira is kiterjedtek (Dezső, 2009; Pongrácz et al., 2006, 2010).

Budapest hősziget intenzitása a felszíni adottságoktól függően a különböző kerületekben igen eltérő lehet. A XII. kerület a Budai-hegység és a Pesti-síkság találkozásánál helyezkedik el, így kivételes földrajzi adottságainak (összefüggő erdők, hegyvidéki jellegű területek) köszönhetően sajátos szerepet tölt be fővárosunk éghajlatában. A kerületben a növényzet mellett a domborzati viszonyok éghajlatra gyakorolt hatása is számottevő. Szakdolgozatomban Budapest XII. kerületéről részletes termikus elemzést készítek, amellyel hozzájárulok ahhoz, hogy további vizsgálatokkal kiegészítve átfogóbb képet kapjunk Budapest éghajlatáról.

Elsőként áttekintjük a városi hősziget-hatás jellemzőit és vizsgált speciális területeit, kitérünk a város energiamérlegének leírására és annak termikus sajátosságokra gyakorolt hatásaira (2. fejezet). Ezután a 3. fejezet a XII. kerület társadalmi- és természetföldrajzi jellemzőit mutatja be. A 4. fejezetben a műholdas mérőrendszert és a felhasznált domborzati adatbázist ismertetjük. Az 5. fejezetben áttekintjük az általunk végzett vizsgálati módszereket és beszámolunk a vizsgálati eredményekről. Végül összegezzük a legfontosabb eredményeket.

2. A városi hősziget hatás és kutatási területei

2.1. A városklíma kutatási területei

A városi hősziget egy olyan mezoskálájú éghajlati rendszer, melyet a városi környezet által keltett helyi, illetve mikroklimatikus hatások összessége határoz meg; és több szempontból eltérést mutat a várost körülvevő makroskálájú környezet éghajlati viszonyaihoz képest. Ilyen sajátos mezoklimát kialakító tényezők például a domborzat és a városszerkezet, emellett fontos szerepet játszanak a kisebb területre kiterjedő – utca, tető, udvar stb. – mikroklimatárségek folyamatai is (Probáld, 1974).

A városklíma kutatása az alkalmazott módszerek, a vizsgált területek és állapothatározók szerint több szakterületre bontható. A városi hatás megfigyelése a következő módszerekkel történhet (Landsberg, 1981):

- meteorológiai / klimatológiai mérőállomáson
- a városon áthaladó járműre felszerelt szenzorokkal
- tornyokra felszerelt műszerekkel
- rögzített vagy szabadon sodródó ballonokon elhelyezett mérőműszerekkel
- magasba emelkedő rádiószonda segítségével
- műholdra vagy repülőgépre helyezett szenzor segítségével

A kutatások a különböző állapothatározók, paraméterek városokban jelentkező módosulásának részletesebb vizsgálataira is kiterjednek:

- Termikus sajátosságok (lég- és felszínhőmérséklet): A hősziget hőmérsékleti jellemzőinek mozgó járművel történő mérése (Conrads és van der Hage, 1971; Klysik és Fortuniak, 1999; Unger, 2011) általános eljárásnak tekinthető, mely a műholdas vizsgálati módszerekkel (Matson et al., 1978; Pongrácz et al., 2007; Dezső, 2009) szemben nem csak derült, hanem bármilyen időjárási viszonyok között is alkalmazható.
- Energetikai és sugárzási tulajdonságok: e kutatási terület az egyes városok sugárzási viszonyait elemző (Gál és Unger, 2013) és energia egyenlegüket meghatározó (Oke, 1982), illetve modellező (Grimmond et al., 2010) tanulmányokat foglalja magába.
- Turbulencia és áramlási viszonyok: A városi területeken módosult (csökkent) szélsébség (Bornstein és Johnson, 1977; Dezső, 2000), a városi szél (város-vidék hőmérsékleti különbség következtében a város centruma felé konvergáló légmozgás) jelensége (Péczy, 1962), valamint a városi cirkuláció modellezése (Kristóf et al., 2006) számos tanulmány tárgyát képezi.

- Légekri szennyeződés (aeroszolrészecskék, gázok): e témakör kutatási területei közé tartozik a város légszennyezettségi viszonyainak feltárása (Mórik, 1961, Baranka, 1999) mellett a levegőszennyezés területi eloszlásának elemzése (Mészáros és Nagy, 1965; Yuan et al., 2014) és modellezése (Szűcs, 2011).
- Csapadék, légnedvesség: számos kutatási eredmény (Berkes, 1947; Hoffmann et al., 2009) bizonyítja a városok csapadéknövelő hatását, mely többek között annak köszönhető, hogy a hőszigetre labilis egyensúlyi állapot jellemző, így a városi környezetben gyakrabban indulnak be konvektív folyamatok, valamint a város szennyezett levegője több kondenziós magvat szolgáltat a csapadékképződés folyamatához (Probáld, 1974). A csapadék területi eloszlásának vizsgálata mellett a városi vízmérlegről (Unger és Gulyás, 2000) és légnedvesség változásáról is készültek részletes elemzések.
- Humánkomfort vizsgálatok: városi ökoszisztémák emberi életminőségre gyakorolt hatásainak kutatása (Unger, 1995; Kovács és Németh, 2012) különféle biometeorológiai indexek (Gulyás és Matzarakis, 2009) alkalmazásával.

Ezenkívül a paramétereket térben és időben megváltoztató hatások vizsgálata – például a növényzet (Szegedi és Gyarmati, 2009) vagy a beépítettség mértékének változásának követeése – és minél pontosabb modellezése is fontos területét képezi a városklíma kutatásának. A városok mezoskálájú folyamatainak elemzése mellett az utcák (Nunez és Oke, 1977), parkok (Oke, 1989) és épületek belsejének sajátos mikroklímáját vizsgáló kutatások is születtek.

2.2. A város energiaegyenlege

A városklíma – és bármely mezoklíma – tanulmányozásában nélkülözhetetlen az energiaforgalom összetevőinek részletes megismerése. A városi energiaegyenleg alakulását többek között a sajátos, mesterséges felszín és a légkör – antropogén energiefelszabadító folyamatai által keltett – helyi módosulásai határozzák meg. Ezenkívül a levegő szennyezettsége által megváltozott sugárzási viszonyok is hozzájárulnak a városi energiaegyenleg módosulásához. A megváltozott energiaforgalom és sugárzási viszonyok felelősek legfőképpen a klímaparaméterek módosulásaiért, így a városban megfigyelhető hőtöbblet kialakulásáért is.

Egy adott terület energia-kicserélődési folyamatát a teljes sugárzási mérleg (Q^*) írja le (Unger és Sümeghy, 2002):

$$Q^* = K^* + L^* = K_{\downarrow} - K_{\uparrow} + L_{\downarrow} - L_{\uparrow}$$

ahol

K^* - Rövidhullámú sugárzási mérleg

L^* - Hosszúhullámú sugárzási mérleg

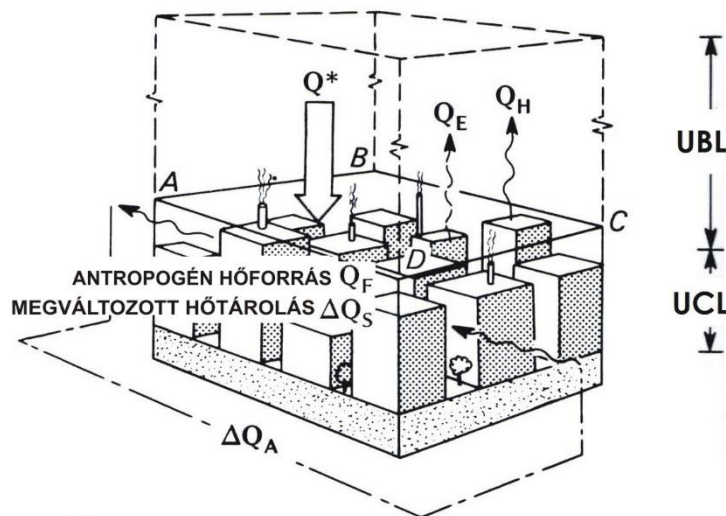
$K_{\downarrow} / L_{\downarrow}$ – Felszín által kapott rövidhullámú (globális) sugárzás / hosszúhullámú visszasugárzás

$K_{\uparrow} / L_{\uparrow}$ – Visszavert rövidhullámú / hosszúhullámú kisugárzás

A város energiaegyenlegét a következő egyenlet adja meg (Oke, 1978):

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A,$$

ahol Q^* az adott terület teljes sugárzási mérlege, melyhez városi környezetben hozzáadódnak a Q_F antropogén eredetű (ipar, közlekedés, fűtés) hőforrások. Q_F értékét a lakosság átlagos energiafogyasztása és az adott város népsűrűsége határozza meg. Napi menetében általában két csúcs (a reggeli és az esti órákban) figyelhető meg. Térbeli eloszlását tekintve igen változó értékei lehetnek egy adott városon belül, de maximális értékei jellemzően a városmagban észlelhetők. Q_H és Q_E rendre a szenzibilis és a látens hőt jelöli. ΔQ_S a városi felszín és épületek hőtárolásának változása, ΔQ_A pedig a szél által keltett horizontális irányú nettó szenzibilis és látens hőszállítás (1. ábra).



1. ábra: Városi energiaegyenleg összetevői a városi határrétegben (UBL²) és a városi tetőrétegben (UCL³) (forrás: Oke, 1978 - szerkesztve)

² Urban Boundary Layer

³ Urban Canopy Layer

1. táblázat: Változások a városi tetőrég (UCL) energiaegyenlegében (Oke (1978) alapján)

Módosító tényező	Hatás	Energiaegyenleg összetevőinek megváltozása	Napszak, melyben jobban érvényesül
Szennyezett levegő	L↑ elnyelése és visszaverődése	L↓ megnő	-
Utca-kanyonok geometriája	SVF ⁴ csökkenése	L* csökken	Este
	Szélesség csökkenése	Q _H csökken	
	Visszaverődés módosulása	Megnő K* elnyelése	Nappal
Emberi tevékenység	Épületek hőleadása	Q _F megjelenése	
Városi felszínnek, épületek anyaga	Megváltozott termális tulajdonságok	Nő a ΔQ _S	Nappal
	Csekély növényzet, impermeábilis városi felszín	Csökken párolgás	

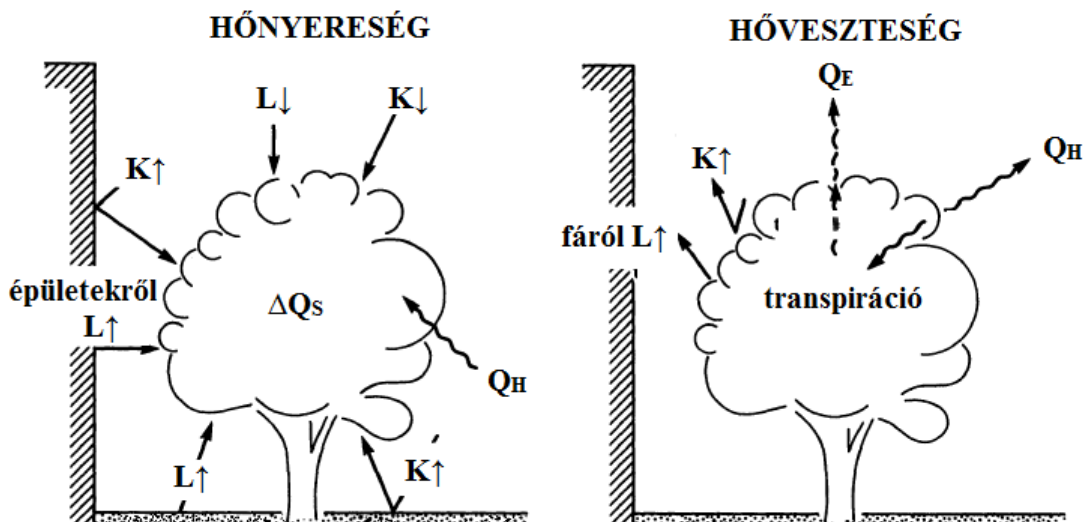
A város és a vidék globális sugárzását tekintve jelentős különbség nem figyelhető meg (1. táblázat). E sugárzási összetevő alakulását a levegő szennyezettsége és a városban 0,05-0,1-del alacsonyabb albedó határozza meg. A hosszuhullámú felszíni kisugárzás és légköri visszasugárzás egyaránt fokozódik a városi területeken, tehát a város és a vidék hosszuhullámú sugárzási mérlege között nagymértékű eltérés nem tapasztalható. Összességében a környező terület és a városok teljes sugárzási mérlegbeli különbsége kevesebb, mint 5% (Oke, 1982).

A nappal beérkező rövidhullámú sugárzás elősegíti az éjjeli hősziget kialakulását a nappali hőtárolás (ΔQ_S) fokozódása miatt, viszont a szél éppen ellenkező hatással van rá, gyengíti azt (Djen et al., 1994). Az éjjeli energiaegyenleg komponensei közül a legjelentősebb módosulás a hőtárolásban (ΔQ_S) jelentkezik. Ekkor a városmagban a tárolt hő leadása általában kétszer akkora, mint a vidéki területeken (Christen és Vogt, 2004). Ez azt jelenti, hogy a városi felszín éjszaka leadja a nappal elraktározott hőt, ami a határrétegben városon belüli magasabb hőmérsékletet eredményez.

⁴ Sky View Factor – Égboltiláthatósági érték

A városi tetőréteget (UCL) felépítő változatos felszínek energiaforgalma és egyéb paraméterei bizonyos városi környezetre jellemző egységekbe (utca-kanyonok, parkok és utak) tagolva pontosabban meghatározhatók. Az olyan várost felépítő egységek, mint az utca-kanyonok sugárzási viszonyainak vizsgálata során meghatározó tényező a kanyon geometriája és iránya. Nunez és Oke (1977) egy utca-kanyon energia viszonyairól készített részletes elemzést, mely során a kanyont felépítő különböző fekvésű falak és az utca (három különböző felület) felszíni energiaegyenleg komponenseinek (Q_H , Q_E és Q_G , ahol Q_G : a vezetéssel történő energiacsere) napi menetét külön vizsgálta. Az egyes felületekhez tartozó maximális értékek eltérő időpontokban voltak megfigyelhetők, mely a felszíneket különböző szögben érő szoláris besugárzással magyarázható. A falak esetében másik falról történő visszaverődés következtében egy második, csekélyebb mértékű maximum is megfigyelhető volt. A kanyon rendszerében a nappali sugárzási többlet 60%-a szenzibilis hővé alakult, 30%-a a kanyont felépítő anyagokban raktározódott és a maradék 10% pedig párolgásra fordítódott.

A városban található növényzet, illetve nagyobb parkok változásokat idéznek elő a városi energiaegyenlegben és vízmérlegben (Spronken-Smith et al., 2000). A városi utca-kanyonban található egyedülálló fa energiaforgalmában (2. ábra) hőtöbblet és hőveszteség is megfigyelhető.



2. ábra: Egy fa és az utca-kanyon közötti energiaforgalom (forrás: Oke, 1989 - szerkesztve)

A hőnyereséget a következő folyamatok eredményezik (Oke, 1989):

- a városi felszínekről nagy mennyiségű rövidhullámú sugárzás verődik vissza;
- az alacsony SVF érték és az épületek állandó hőtöbblete következtében megnő a beérkező hosszuhullámú sugárzás;
- gyakran az utca-kanyon léghőmérséklete magasabb, mint a falevelek hőmérséklete, s ez mikrooázis-típusú szenzibilis hőáramlást eredményez;
- a növény kipárolgásának (transpiráció) hűsítő hatása következtében csökken a hosszuhullámú kisugárzás és a szenzibilis hőszállítás.

A fákkal borított városi területeken megnő a látens hőáram értéke (Q_E), miközben a szenzibilis hőáram értéke lecsökken (Q_H), emellett a kisebb albedó és felszínhőmérséklet következtében csökken a rövid-, illetve hosszuhullámú sugárzási veszteség, mely növeli a teljes sugárzási mérleg értékét (Grimmond et al., 1996).

A sugárzásmérő műszerek gyakran városoktól távoli területeken lettek elhelyezve, ezzel kiküszöbölve a városokban felhalmozódott szennyezőanyagok zavaró hatását. A város sűrűn beépített területein inkább csak a beérkező sugárzás mérése oldható meg, a visszavert sugárzás megfigyelése csak néhány városi állomáson történik, így a rövid-, a hosszuhullámú és a teljes sugárzási mérlegről általában kevés hosszabb adatsor áll rendelkezésre. A piranométereket és egyéb sugárzásmérő műszereket vízszintes, rázkódásmentes helyen, árnyékoló objektumoktól távol javasolt elhelyezni; e feltételeknek kiválóan megfelel egy magas épület lapos teteje. Az elhelyezés során ügyelni kell arra is, hogy világos színű falról történő erős visszaverődés ne érje a szenzort. A szenzor üvegburáját erősen szennyezett városi környezetben ajánlott szabályos időközönként (naponta) letisztítani (Oke, 2004).

A sugárzás és a vele összefüggő éghajlati elemek megfigyelése Budapesten több évtizede zajlik. A legkorábbi észlelések a Kitaibel Pál utcában (II. kerület), a szabadság-hegyi csillagvizsgálóban (XII. kerület) és a pestszentlőrinci obszervatóriumban (XVIII. kerület) történtek. A sugárzással szorosan összefüggő paraméterek – mint a napfénytartam és a légköri homályosság – vizsgálatai során az állomások között jelentős különbségek voltak észrevehetők (Probáld, 1974). Például az 1955 és 1969 közötti napfénytartamra vonatkozó mérés-sorozatban kimutatható volt, hogy a hegyi állomáson több volt a napsütéses órák száma a többi állomáshoz képest. A Kitaibel Pál utcai és pestszentlőrinci állomás átlagos évi napfénytartama között alig volt különbség, ám a téli félévben a pestszentlőrinci állomáson, a nyári félévben pedig a budai állomáson volt több a napfényes órák száma. A budai oldalon megfigyelt nyári napfénytartam-

többség hátterében a Budai-hegység előterében gyakran megfigyelhető csekély fönhatás áll, aminek következtében itt a derült napok száma is több. A Szabadság-hegyen mért napsütés nélküli napok száma 14 év átlaga alapján 5,3 nappal volt kevesebb, mint a Kitaibel Pál utcai állomáson. A globálsugárzás mérése 1936-ban kezdődött meg fővárosunkban kezdetben a Kitaibel Pál utcában és a Szabadság-hegyen, majd 1955-ben kiegészítve a pestszentlőrinci állomással (Probáld, 1974). A sugárzás mérése Robitzsch-piranográfval történt. 1966-ban egy a Madách téren elhelyezett piranográfval bővült a méréssorozat, mely jelentősen hozzájárult a városban megváltozott sugárzási viszonyok részletesebb vizsgálatához. Az adatsor alapján jól látható volt, hogy a város az egész év folyamán alacsonyabb rövidhullámú sugárzási adatokkal rendelkezik, mint a környezete. A vizsgálatok során a Budapesten megfigyelhető visszaverődés mértéke csekélyebb volt a környezetéhez képest, ezzel ellensúlyozva a globálsugárzásban fellépő hiányt (Probáld, 1974).

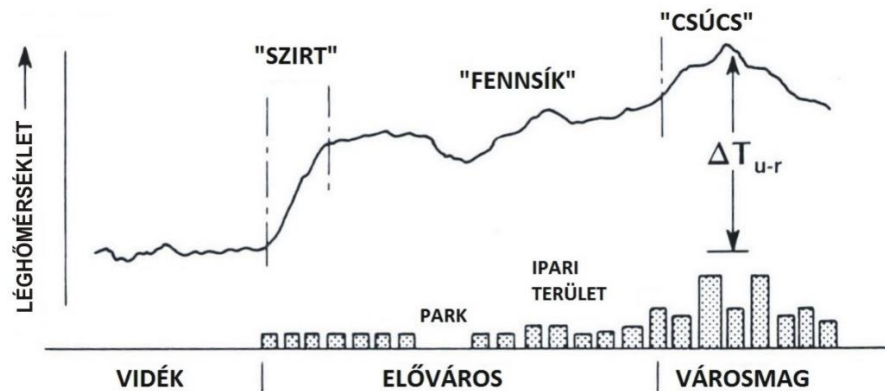
2.3. A városi hősziget és termális tulajdonságai

Az energiaegyensúly és a sugárzási viszonyok lokális megváltozásának hatására termikus anomáliák is megfigyelhetők a városok térségében. A hősziget mérete és formája a meteorológiai, helyi és városi tényezőktől függően térben és időben eltérő lehet. A városi hősziget kialakulása a város természetföldrajzi adottságai mellett a következő tényezőkkel magyarázható (Unger és Sümeghy, 2002):

- a természetes felszín nem vízáteresztő rétegek váltják fel;
- a városi felszín rendkívül komplex felépítésű;
- az eltérő fizikai tulajdonságok (albedó, hővezetés, hőkapacitás) jelentősen befolyásolják a terület energiaegyenlegét, melynek módosulásához hozzájárul még az emberi tevékenység által kibocsátott hő is;
- a városi területeken a légköri összetétel megváltozik.

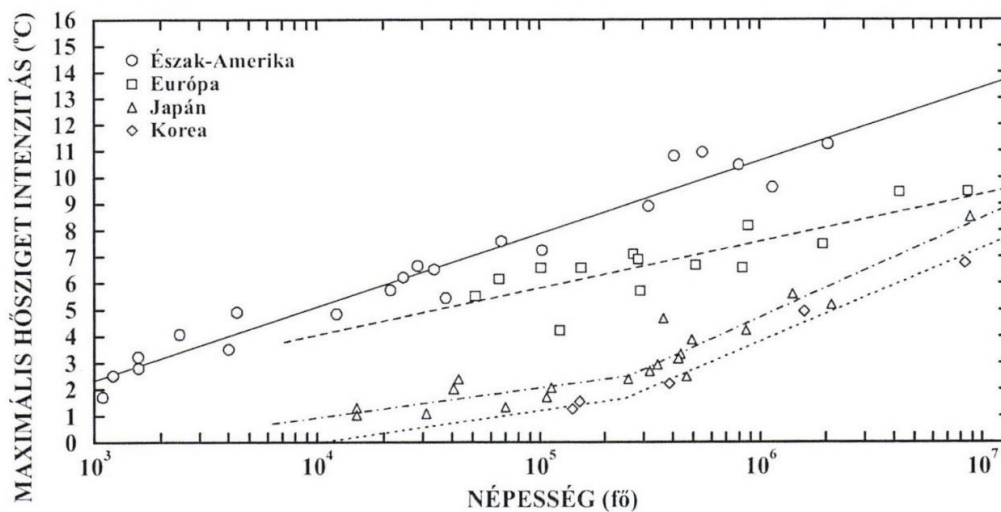
Egy város metszetéhez tartozó léghőmérsékleti eloszlást ábrázolva a város melegebb területei szigetként emelkednek ki az ezt körülvevő hűvösebb környezetből (3. ábra). A város és a külterület határán hirtelen hőmérsékletemelkedés figyelhető meg a belváros felé haladva. Ezt az ún. „szirtet” követően már jóval lassabban emelkedik a hőmérséklet a belváros felé haladva („fennsík”). Ezt az egyenletességet néhol városi parkok vagy ipari területek hőmérsékleti anomáliái szakíthatják meg. A hőmérséklet emelkedése tovább folytatódik és a maximális

értékét a város magjában („csúcs”) éri el. A külterületen és a város központi részén mért hőmérsékleti értékek különbsége adja meg a városi hősziget intenzitás értékét (Oke, 1978).

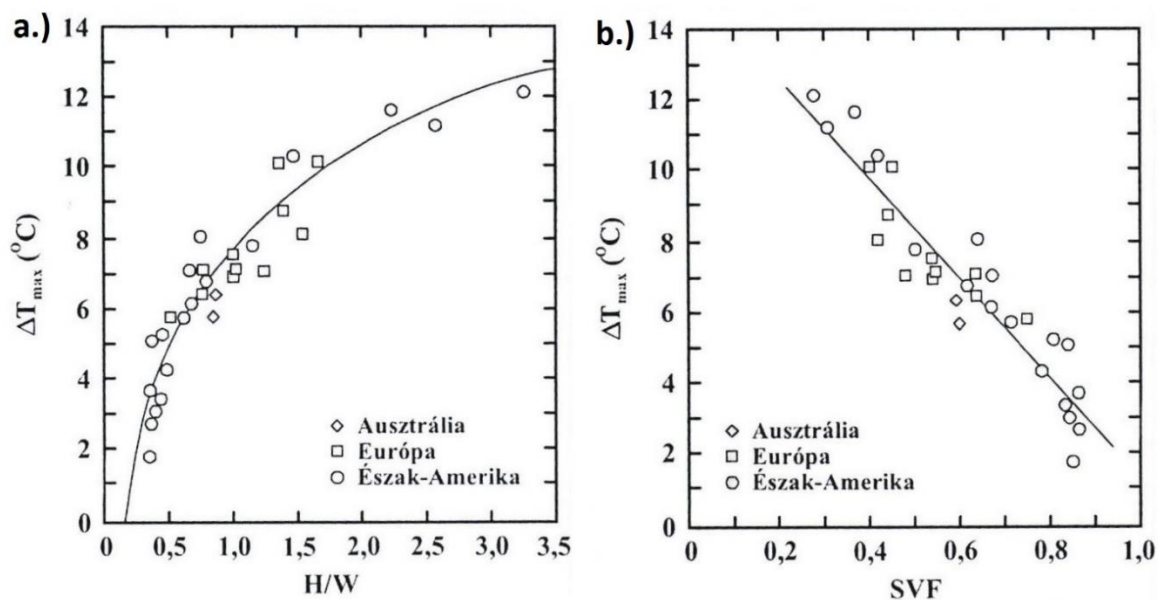


3. ábra: A városi hősziget metszete (forrás: Oke, 1978 - szerkesztve)

A hősziget intenzitás mértéke kapcsolatban áll a város alakjával és méretével. Oke (1973) a város népességének számát felhasználva határozta meg a városméret és a hősziget intenzitás logaritmikus összefüggését. A hősziget hatás már 1000 fős településeknél, sőt bevásárló központoknál is észlelhető volt. A legerősebb hősziget hatás a többmillió nagyvárosokban akár a 12 °C-ot is elérte. A 4. ábrán megfigyelhető, hogy egyes földrajzi térségekben a különböző várostervezési és városépítési elvek következtében eltérő meredekségű görbe írja le a népességszám és a városi hősziget-intenzitás maximuma közötti kapcsolatot. Ugyanis a városi népességszámon kívül lényeges szempont még – többek között – a beépítettség jellege és sűrűsége is (Unger és Sümegehy, 2002).



4. ábra: A hősziget intenzitás maximuma és a lakosok száma közötti logaritmikus kapcsolat a Föld különböző tájain (forrás: Unger és Sümegehy, 2002)



5. ábra: A hősziget intenzitás maximuma és a H/W arány (a), valamint a hősziget intenzitás maximuma és az SVF égboltláthatóság (b) kapcsolata (forrás: Unger és Sümeghy, 2002)

A beépítettség mérőszámának tekinthető a H/W arány – ahol H az épületek átlagos magassága, W pedig az utcák átlagos szélessége – és az SVF égboltláthatósági érték. Az 5. ábra grafikonjain jól látszik, hogy a zártabb beépítettség intenzívebb városi hősziget hatást eredményez (Unger és Sümeghy, 2002).

A hősziget intenzitás sajátos napi menettel rendelkezik. A városi hősziget hatása nappal kevésbé figyelhető meg, sőt egyes városokban negatív értéket vesz fel a déli órákban, ami abból adódik, hogy reggel az alacsonyabb szögben beeső napsugárzást a sűrűn beépített területek akadályozzák, és így lassítják a város felmelegedését. A késő délutáni és esti órákban a hősziget-intenzitás gyors növekedése figyelhető meg a város és külterületeinek különböző ütemben történő lehülése miatt, ekkor két-háromszor erősebb hősziget intenzitás figyelhető meg, mint a nappali órákban (Pongrácz et al., 2011). Az intenzitás a maximumát napnyugta után 3-5 órával éri el, majd az éjszaka folyamán a város és a városon kívüli területek léghőmérséklete közel azonos ütemben csökken (Oke és Maxwell, 1975). A reggeli órákban a külterületek gyorsabb felmelegedése miatt a város és a környező területek közötti hőmérsékletkülönbség folyamatosan csökken (Oke, 1978).

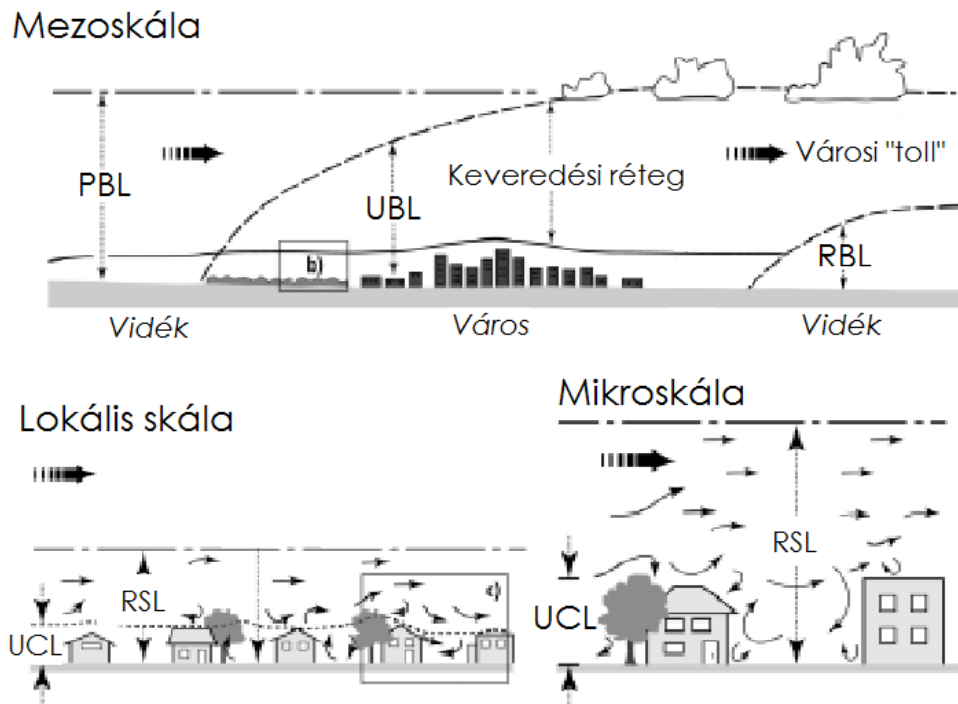
A település és környezetének természetföldrajzi adottságai (topográfia: völgy, lejtő, medence; tó- vagy tengerparti elhelyezkedés; illetve felszínjelleg: mocsaras, sivatagos, stb.) erősíthetik vagy gyengíthetik a városban bekövetkező változások mértékét (Unger, 2011). Az intenzitás nagyságát az időjárási tényezők is befolyásolják. A hősziget kialakulásához a derült

égbolt és szélcsendes (anticiklonáris) időjárási helyzet teremt ideális feltételeket. Az erős szél hatására a hősziget-hatás gyengülhet vagy meg is szűnhet, viszont a nagyobb városok esetében – melyek nagyobb intenzitással rendelkeznek – erősebb szél szükséges a hősziget kialakulásának megakadályozásához (Oke, 1978).

A városi hősziget nagyságának és alakjának meghatározása bonyolult feladat. A város hatásának legoptimálisabb meghatározása az lenne, ha a város kialakulását megelőző méréseket és a jelenlegi megfigyelések adatait összevetnénk. Mivel ez a legtöbb esetben nem megvalósítható, leginkább a városmag és a külterület éghajlati adatsorainak összehasonlítása alapján történik a hősziget hatás mértékének becslése. Különösen fontos az állomáspárokat olyan területen elhelyezni, ahol nem érvényesülnek az olyan külső hatások, mint például a domborzat vagy a kiterjedt vízfelület (Oke, 1978). A városban elhelyezett műszereket olyan feltételek mellett helyezzük el, amelyek jellemzik az adott terület adottságait. Számos városi meteorológiai állomás nyitott, füvesített területen (parkok, játszóterek) működik, amely nyilvánvalóan nem a városi környezetet reprezentálja, és így nem mutatható ki egyértelműen az állomás-páros alapján a városi hatást tükröző hőmérsékleti különbség. A háztetőket is gyakran használják meteorológiai megfigyelésekre, ám ezeknek sajátos, jól körülhatárolható mikroklímájuk van, ami befolyásolhatja a hiteles mérést (Oke, 2004).

A hősziget vertikális kiterjedését tekintve több réteget különböztetünk meg (6. ábra). Az UBL – városi határréteg – jellemzőit a városi felszín által keltett lokális- és mezoskálájú folyamatok alakítják ki. A határréteg alapját az épületek átlagos tetőszintje képezi, és magasságát a város érdességi viszonyai határozzák meg. Vastagsága nappal a termikus konvekciónak köszönhetően az 500-1500 métert is elérheti, míg éjszaka 100-300 méterre terjed ki (Oke, 1978, 1982). E határréteg vastagsága az erőteljes éjjeli átkeveredés miatt jelentősen eltér a külterületek határrétegének (RBL⁵) vastagságától, ahol az éjszakai órákban erőteljes inverziós rétegzettség alakul ki. Az külterületek határrétegénél turbulensebb, melegebb és szennyezettebb városi határréteg légtömegének sokszor több 10 km-es, szélirányban történő elmozdulása is kimutatható (Unger és Sümeghy, 2002). Az UBL alatt található UCL – városi tetőréteg – az épületek átlagos magasságáig terjed, így tulajdonságait az épületek közötti ún. utca-kanyonok összetett, mikroskálájú folyamatai határozzák meg.

⁵ Rural Boundary Layer



6. ábra: Különöző városi rétegek kiterjedése - PBL⁶ - planetáris határréteg, RSL⁷ - érdességi alréteg
(forrás: Oke, 2004 - szerkesztve)

Az energiaegyenlegen belül a látens és szenzibilis hőárammal szoros kapcsolatban álló felszínhőmérséklet (LST⁸) kiemelkedő fontossággal bír a városklíma kutatási területén, hiszen egy adott felszín tulajdonságait e paraméter reprezentálja a legjobban, emellett hasznos bemeneti változója az áramlási és egyéb modelleknek. Az LST értékét a felszín sugárzási és termodinamikai jellemzői határozzák meg, melyek a következők (Voogt és Oke, 2003):

- nedvesség;
- hőelnyelő képesség;
- kisugárzó képesség;
- felszín által kapott légköri és szoláris sugárzás;
- turbulens hőszállítás.

Az LST meghatározza a felszínközeli léghőmérsékletet, azonban a felszíntől távolodva a felszíni sajátosságok – az advekciónak és a légköri hatások következtében – egyre kevésbé játszanak szerepet a léghőmérséklet alakulásában (Carlson et al., 1977).

⁶ Planetary Boundary Layer

⁷ Roughness Sublayer

⁸ Land Surface Temperature

A felszínhőmérséklet *in situ* mérése csak ritkán történik meteorológiai állomásokon, a városi felszín komplex felépítése miatt részletesebb vizsgálatokat repülőgépre vagy műholdra szerelt szenzorok adatai segítségével végezhetünk (Oke, 2004). A legkorábbi ilyen nagyobb területet lefedő megfigyeléseket Lorenz (1961) végezte, aki repülőgépről készített méréseket. A léghőmérséklet és a felszínhőmérséklet különbségeiről a következőket tapasztalta: az erdős területek felszínhőmérséklete általában 1-2 °C-kal volt alacsonyabb a léghőmérsékletnél, a betonozott, illetve aszfaltozott területek felszínhőmérséklete viszont jelentősen (8 °C-kal, illetve 17 °C-kal) meghaladta a levegő hőmérsékletét.

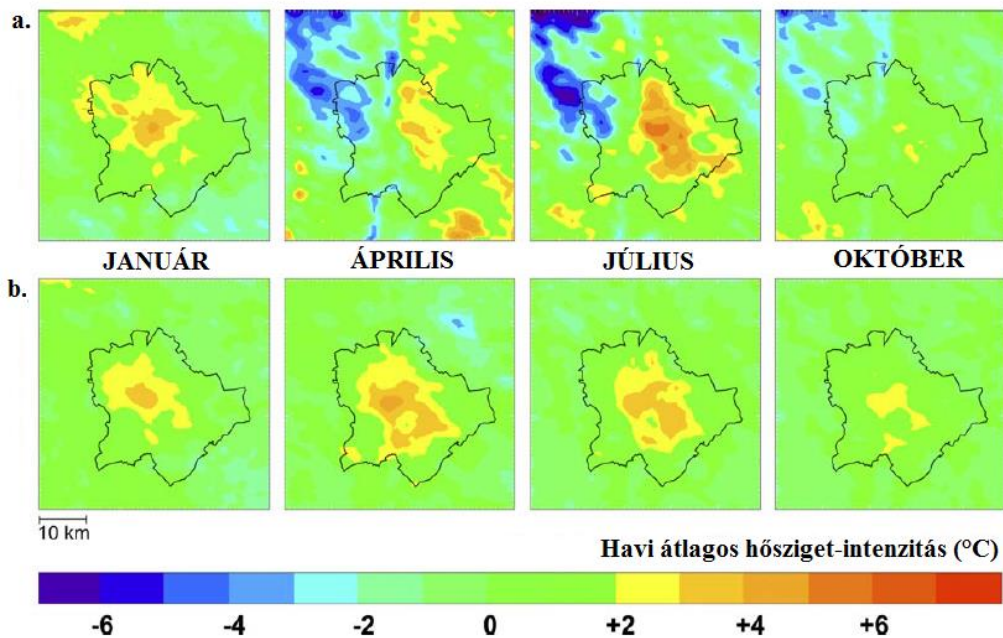
A műholdas távérzékelési eszközök megjelenésével lehetőség nyílt a város termikus sajátosságainak egyidejű megfigyelésére. Kezdetben a városfelszíni hősziget (SUHI⁹) műholdas méréseire durva felbontás (7-8 km) volt jellemző (Rao, 1972), majd ezt követően a technika fejlődésének eredményeként nagyobb területek finomabb felbontású adatai is rendelkezésre álltak. Carlson et al. (1977) a NOAA¹⁰ -3 műhold 1 km-es felbontású műholdas adatai alapján megállapította, hogy a legmagasabb hőmérséklet a városmag közelében és az ipari területeken volt jellemző. A magyar nagyvárosokra vonatkozóan a Terra és az Aqua műholdakon elhelyezett MODIS szenzor nappali és éjjeli órákban mért adatainak feldolgozásával sikerült a SUHI intenzitásának térbeli eloszlásait meghatározni (Dezső et al., 2005). Az egyes hónapokra lebontott SUHI intenzitásokra nappal nagyobb változékonyság volt jellemző, mint az éjjeli órákban. A legintenzívebb (5 °C-ot elérő) SUHI a nyári időszakban volt megfigyelhető, melynek maximális hatása a nappali órákban érvényesült (Dezső et al., 2005). A felszín erőteljesebb felmelegedésének és lehülésének köszönhetően a felszínhőmérséklet átlagértékei magasabbak nyáron, illetve alacsonyabbak télen, mint a léghőmérséklet átlagértékei. A nappali, illetve éjszakai időszakra vonatkozóan a felszín- és a léghőmérséklet közötti különbség nappal pozitív, éjjel pedig negatív, ami azzal magyarázható, hogy a nappali órákban a besugárzást elnyelő felszín felmelegíti a felette található légréteget, éjjel viszont a felszín kisugároz – melyhez szükséges energiát a légkörtől vonja el – azaz a légkör alulról hűl le. A két hőmérsékleti érték közötti legnagyobb különbség nyáron és tavasszal figyelhető meg, mivel ebben az időszakban intenzív besugárzás jellemző (Lelovics et al., 2008, 2011).

Debrecen és Szeged területén távérzékelési módszerekkel mért LST éves átlagértékei a mozgó járművel gyűjtött léghőmérséklet éves átlagértékeihez képest 0,5-1 °C-kal nagyobb hősziget-intenzitást mutattak, a nyári hónapokban viszont a műhold által mért adatok mutattak

⁹ Surface Urban Heat Island

¹⁰ National Oceanic and Atmospheric Administration – Nemzeti Óceáni és Légköri Hivatal

alacsonyabb intenzitást (Bartholy et al., 2009). Dezső et al. (2012) állomási és műholdas mérési módszer alkalmazását összehasonlító vizsgálati eredményei azt mutatták, hogy a 2001-2010 időszakra vonatkozó OMSZ automata állomás léghőmérsékleteiből számított hősziget valamelyest intenzívebb (0,2 °C) volt, mint a távérzékeléssel meghatározott SUHI (7. ábra). Budapesten anticiklonális időjárási helyzetben nagyobb SUHI intenzitás jellemző, melynek nagyságában és térbeli eloszlásában döntő szerepet játszik a város lakóinak száma és a domborzat (Pongrácz et al., 2006b).



7. ábra: A havi átlagos SUHI intenzitásának évi menete (a) nappal és (b) este

(forrás: Pongrácz et al. 2006b)

A domborzat, a növényzettel borított területek, a folyók és tavak jelentős hatással vannak a városi hőmérséklet térbeli eloszlására. A magasabban fekvő területeken, erdővel borított részekén és közvetlen környezetükben jóval alacsonyabb hőmérséklet tapasztalható, mint a sűrűn lakott, belvárosi területeken (Pongrácz et al., 2006b).

Gábor és Jombach (2008) a zöldfelület intenzitás és a városi hősziget jelenségének összefüggéseit Budapest területén Landsat TM¹¹ műholdfelvételek felhasználásával vizsgálta. Kutatásuk során a zöldfelületi intenzitás és felszínhőmérséklet között negatív korreláció volt megfigyelhető, azaz ahol a zöldfelületek intenzitása magas volt ott alacsonyabb

¹¹ Thematic Mapper – Tematikus Feltérképező

felszínhőmérséklet, ahol a zöldfelület aránya kisebb volt, ott magasabb felszínhőmérséklet volt jellemző (2. táblázat).

2. táblázat: Városi területek zöldfelületi intenzitása és felszínhőmérséklete

(forrás: Gábor és Jombach, 2008)

Terület használat	Minta		zöldfelület int. (NDVI)			felszínhőmérséklet (C°)		
	terület db	terület ha	átlag	szórás	max	átlag	szórás	max
Nagyvárosias lakó	5	53	0,02	0,05	0,45	33,92	1,47	37,00
Kisvárosias lakó	6	120	0,27	0,12	0,61	28,35	2,14	34,50
Kertvárosias lakó	10	288	0,22	0,09	0,55	29,79	1,92	35,50
Házgyári lakó	9	232	0,19	0,11	0,56	30,48	1,53	36,00
Gazdasági	6	270	0,05	0,08	0,59	34,87	2,76	43,50
Kereskedelmi	4	47	0,03	0,07	0,44	35,30	3,28	44,00
Mezőgazdasági	13	596	0,34	0,21	0,70	27,59	5,37	41,50
Városi park	4	258	0,40	0,16	0,64	25,15	2,65	36,50
Egyéb park, közkert	9	51	0,35	0,17	0,65	28,20	3,14	38,00
Temető	2	68	0,40	0,13	0,65	26,62	2,39	34,00
Strand	3	29	0,35	0,18	0,63	24,94	2,11	33,00
Erdő	11	1207	0,59	0,10	0,85	20,58	2,45	33,00
Vasúti	5	70	0,03	0,08	0,42	35,51	1,42	39,00
Közúti	8	18	0,01	0,04	0,33	33,53	1,13	30,50
Össz (Σ),	95	3307			0,58	29,63	2,41	36,86
Átlag (á)			0,23	0,11				

A zöldfelületi intenzitás mérőszámaként általában az ún. NDVI¹² vegetációs indexet alkalmazzák, ami a műholdas vizsgálati módszerek esetében a közeli infravörös és a látható vörös hullámhossztartományra vonatkozó visszaverő képesség (reflektancia) különbségének normalizálásával állítható elő. A felszínhőmérsékleti értékek egy nyári napon már a reggeli órákban is 18 °C és 44 °C között alakultak, azaz a felszínhőmérsékleti különbség meghaladta a 25 °C-ot (Gábor és Jombach, 2008). A kutatás során azt is megállapították, hogy a közparkok területén mért felszínhőmérséklet 12 °C-kal alacsonyabb a nagyvárosi lakóterületek hőmérsékleténél, azonban jelentős kondicionáló hatással nem bírtak a szomszédos területekre.

¹² Normalized Difference Vegetation Index – Normalizált Különbségen alapuló Vegetációs Index

3. XII. kerület (Hegyvidék) bemutatása

3.1. A Hegyvidék általános jellemzői



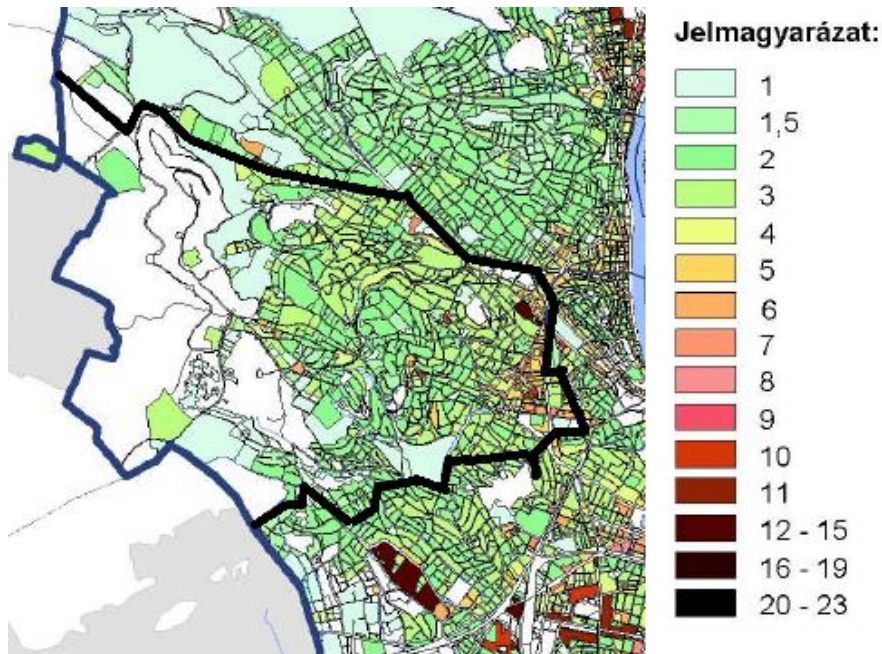
8. ábra: Budapest XII. kerület elhelyezkedése (forrás: BHÖ¹³, 2008)

A középkorban főként vadászati területként ismert, majd szőlőültetvénnel borított területet (8. ábra) kedvező adottságainak köszönhetően a XIX. századtól fokozatos betelepülés jellemezte. A beépített területek terjeszkedése – a természeti környezet nagyobb erőfeszítést kívánó megváltoztatása miatt – lassabban történt a pesti oldalhoz képest. A folyamat a két világháború között felgyorsult, és az urbanizáció erősödésével a zöldterületek fokozatosan felszámolásra kerültek (BHÖ, 2011).

Az 1960-as ÁRT¹⁴ céljai között szerepelt a vertikális lakásépítés és lakótelepek létesítése, mely lehetővé tette a lakások számának bővítését anélkül, hogy a beépített terület arányát növelte volna (9. ábra). Ezt követően az 1970-ben készült rendezési terv (Budapest környéke általános rendezési terve) a laza városias lakóterületi szerkezet megtartását írta elő a villanegyedek területén. Az ÁRT lakóterületek kiterjesztését megcélzó tervezete alapján 4400 lakással bővült a Mártonhegy – Orbánhegy területe.

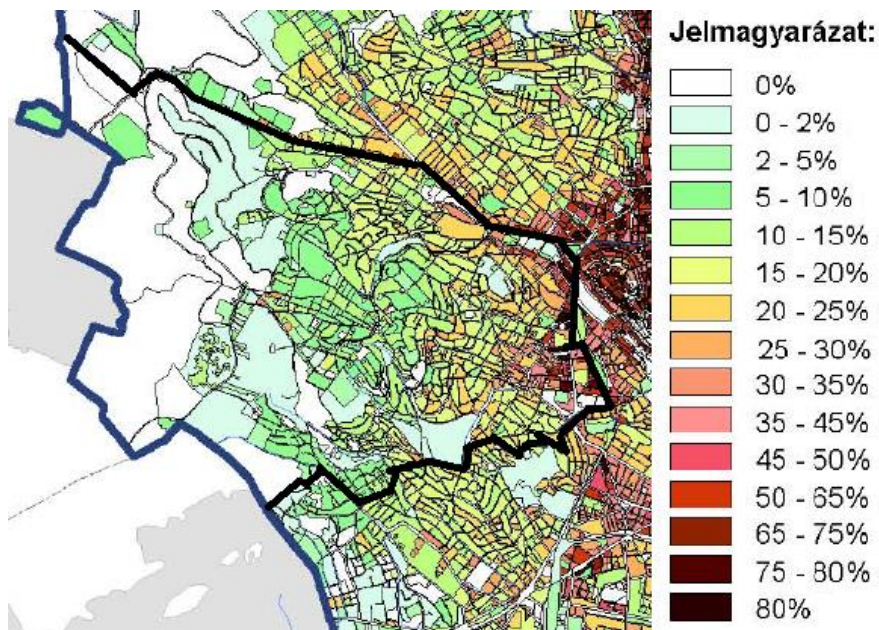
¹³ Budapest XII. kerület Hegyvidéki Önkormányzat

¹⁴ Általános Rendezési Terv



9. ábra: A lakások átlagos szintszáma (forrás: BFÖ¹⁵, 2011)

Az urbanizációnak köszönhetően 1960 és 2005 között körülbelül 80%-kal nőtt meg a kerület lakásainak száma. A 2004-es Budapesti Fővárosi Településszerkezeti Tervében a hegyvidéki zóna sajátos kertvárosi lakónegyedeinek megőrzése és zöldterületeinek védelme szerepel. A kerületre jelenleg a többnyire szabadon álló, villa-szerű, illetve családi és társasházias beépítés jellemző (10. ábra) (Izsák és Probáld, 2007).

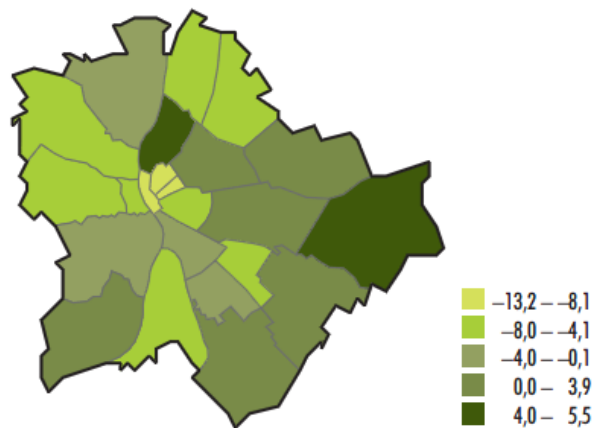


10. ábra: A kerület beépítettségének mértéke (forrás: BFÖ, 2011)

¹⁵ Budapest Főváros Önkormányzat

A kertvárosias lakóterületek között nagy területtel zöldbeágyazott intézmények is találhatóak. Az épületek nagyrészt téglá- vagy kőfalazatúak (96%), és ehhez képest csekély a beton, panel-, fa- vagy vályogépületek száma (KSH, 2011).

A XII. kerület méreteit és lakosságát tekintve Budapest középmezőnyébe sorolható (BHÖ, 2011). A kerületet 2163 fő/km² népsűrűség jellemzi, amely a budapesti átlagértékhez képest 34%-kal kevesebb. A kerületben 1980 és 2014 közötti népszámlálási adatok szerint 6%-os népességfogyás (11. ábra) figyelhető meg, lakóinak száma 58 068 főre csökkent az elmúlt évtizedek alatt (KSH, 2011, 2014).

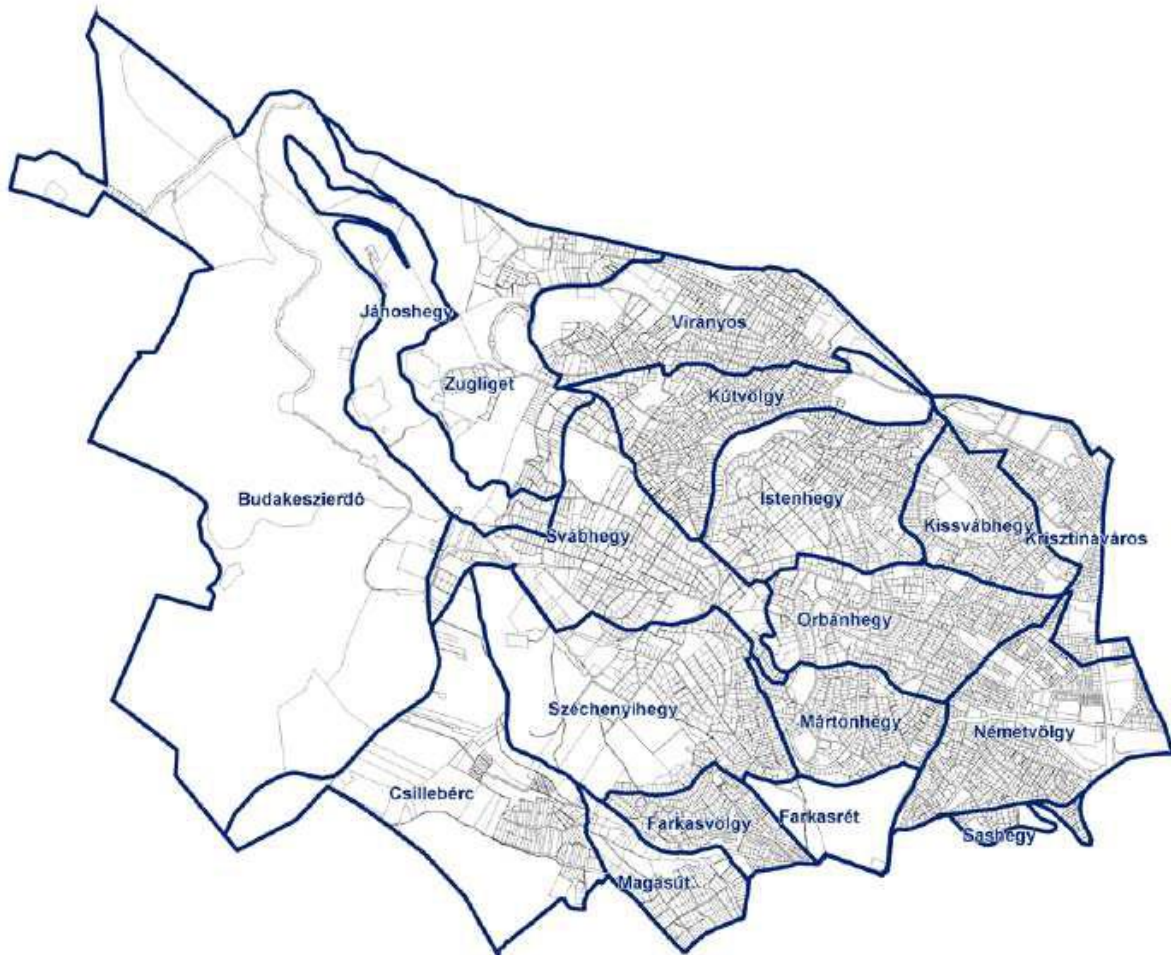


11. ábra: Budapest kerületeinek lakónépesség változása (%) 2001 és 2011 között (BHÖ, 2011)

A kerület 26,67 km²-nyi területen fekszik, melynek harmadát erdőség borítja. Zöldövezeti karakterét inkább erdővel, gyepvel borított hegyoldalak túlsúlyának köszönheti és csak részben – az erdőségből belvárosba átmenetet képező – kertvárosi beépítésnek.

A kerületet több belső régióra oszthatjuk fel (12., 13. ábra). Észak-hegyvidék a Budai-hegység fővárosba beékelődő vonulatait foglalja magába, melyek a Duna-Ipoly Nemzeti Park - Budai Tájvédelmi Körzetének részei. Ide tartozik Budakeszitől a zöldterületek pótlásának céljából megvásárolt Budakeszi erdő, ahol a Csillebérci Szabadidőközpont, az MTA¹⁶ Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, a Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet, illetve az Országos Korányi TBC és Pulmonológiai Intézet épült. A városrészben található még Budapest legmagasabb pontja, a János-hegyen 529 m magasan található Erzsébet-kilátó; a kirándulók és téli sportok üzöinek kedvelt célpontja, a Normafa (471 m) (Thirring, 1900); a Zugligeti Libegő, illetve a 259 m magas Kis-Svábhegy 7,2 hektáros természetvédelmi terület (Barta, 2007).

¹⁶ Magyar Tudományos Akadémia



12. ábra: A XII. kerület részei (forrás: BHÖ, 2008)

A Dél-Hegyvidék részét képezi a Széchenyi-hegy (427 m), ahol a Gyermekvasút mellett golfpálya is épült; valamint a hegy délkeleti lábánál fekvő Farkasrét, amelynek túlnyomó részét temető fedi le.

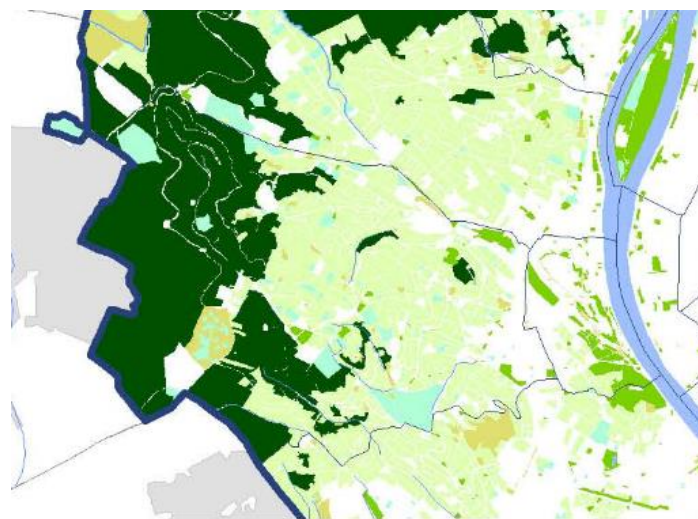


13. ábra: A Hegyvidék nagyobb régiói (forrás: BHÖ, 2008)

A Kelet-Hegyvidék a kerület sűrűn beépített, alacsonyabb zöldfelületi arányokkal rendelkező része, ahol a zsúfolt városi környezetben a Városmajor, a Gesztenyés-kert és a Sashegy Természetvédelmi terület északi része képeznek zöld szigeteket.

3.2. A kerület zöldterületeinek bemutatása

A kerület mozaikos szerkezetű zöldfelületi rendszerét összefüggő erdők, rétek, parkok és közkertek alkotják (14. ábra). Az összefüggő erdőterületek magas aránya miatt városökológiai szempontból kiemelkedő jelentőséggel bír fővárosunkban, amelyet gyakran Budapest „tüdejeként” emlegetnek. Az összefüggő zöldfelületek kedvező tulajdonságait tekintve ideális feltételeket nyújtottak a klíma iránt igényes intézmények – kórházak, szanatóriumok, szociális otthonok – elhelyezésére, illetve kirándulások, téli sportok számára is kiválóan alkalmasak (Probáld, 1974). A 971 hektárnyi telepített erdőterület fenntartását a Pilisi Parkerdő Zrt. végzi el, melynek 96%-a külterületi erdő.



Jelmagyarázat:

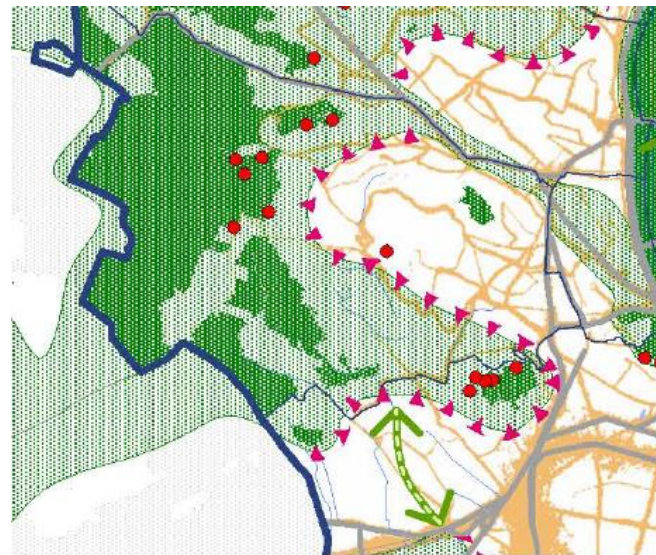
- Erdő
- Zöldterület (közkert, közpark)
- Jellemzően beépítetlen, gyepszinten borított terület
- Jelentős zöldfelülettel bíró jellemzően lakóterület
- Jelentős zöldfelülettel bíró intézményterület

14. ábra: A XII. kerület zöldfelületei (forrás: BFÖ, 2011)

Az erdőterületek város felőli határa csipkés szerkezetű az urbanizáció terjeszkedésének következtében. A hegység beépítése, a javuló közlekedési feltételek és a növekvő autós turizmus fokozott terhelésnek teszi ki a védett területeket (15. ábra). Az erdőségek peremének folytonos elmozdulása, egyre magasabbra való tolódása néhány évtizedes távlatban is jól kimutatható (BHÖ, 2011). Kiemelkedő fontosságú, fokozott fenntartást igényelnek a sűrűn látogatott kirándulóhelyek, mint például a Normafa, a Libegő, a Béka tó és Makkosmária.

Az erdővel borított hegyvonulatok fontos szerepet játszanak a főváros légcseréjében. A domborzati adottságoknak köszönhetően helyi légáramlások – hegy-völgyi szélrendszer –

alakulnak ki, ami által a magasabban fekvő, erdős területek felől tisztább hűvösebb levegő áramlik a fővárosba. Ez a jelenség leginkább meleg nyári estéken figyelhető meg például Hűvösvölgyben, az Ördögárok-völgyében és a Zugligeti-völgyben. A kis sebességű (3 m/s) hegy-völgyi szél esti szellőztető hatását gátolják a völgyek jelentősen beépített területei; a domboldalakon egyre növekvő beépítettség következtében pedig a szélrendszer nappali, város felőli áramlásának szűrőhatása csökken (BHÖ, 2011).



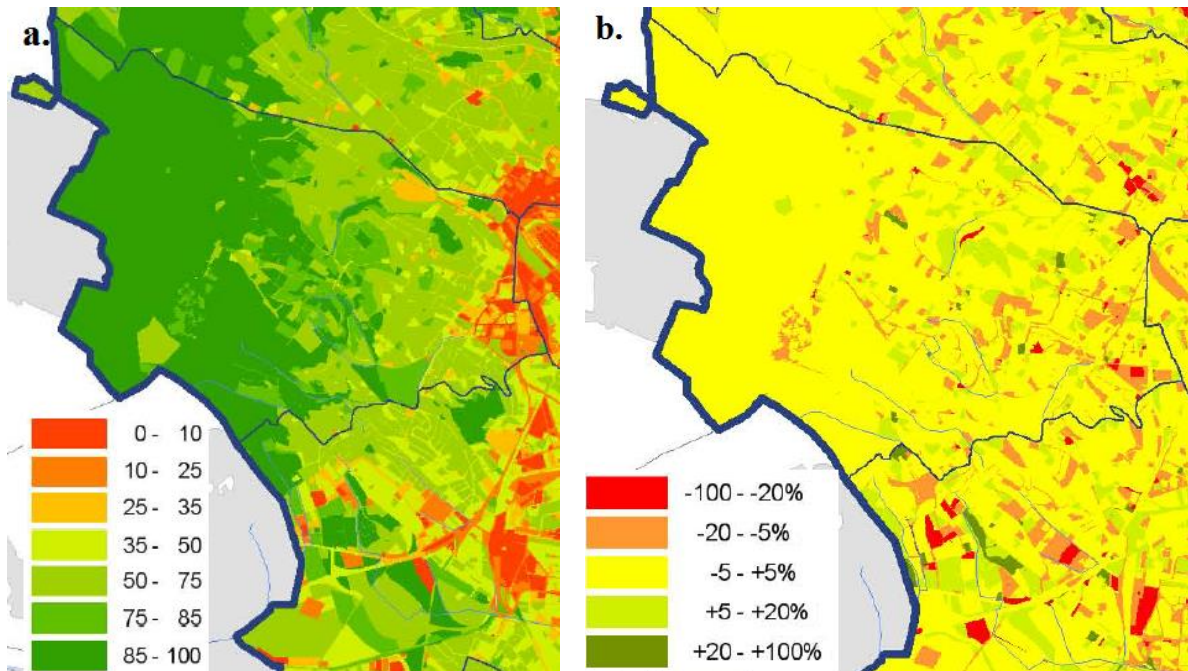
Jelmagyarázat:

- Zöldfelületi zóna
- Izoláló hatású infrastruktúra elem
- Zöldfelületi kapcsolat hiánya
- Beépítési konfliktus zóna
- Lakóterületi beépítés természetvédelmi területen (TK, Natura 2000, Ökológiai hálózat magterületén)
- Zajkonfliktussal érintett terület

15. ábra: A beépített és az összefüggő zöld területek határai (forrás: BFÖ, 2011)

Jombach et al. (2007) a főváros zöldfelületével kapcsolatos kutatásukban a Landsat 5-ös műhold TM szenzorával vizsgálta Budapest zöldfelületi intenzitását és 1990-2005 közötti változását. A tanulmány szerint Budapesten a teljes beépítettség aránya a Hegyvidéken volt a legalacsonyabb (0,82%), és ezzel párhuzamban a 100%-os zöldfelületi borítottságú területekkel leginkább lefedett zóna is a Hegyvidék (34,46%). A vizsgálat eredményeként a hegyvidéki zónában a kertvárosi lakónegyedben a zöldfelület-intenzitás növekedése, illetve csökkenése egyaránt megfigyelhető volt, emellett a budai erdőterületeken kismértékű növekedést tapasztaltak. További zöldfelületi intenzitással kapcsolatos vizsgálatok 2005 és 2010 között is készültek (16. ábra) a Budapesti Corvinus Egyetem Tájtervezési és Területfejlesztési Tanszékén, melyben kimutatták a hegyvidéki területek zöldfelületi intenzitásának 0,5%-os

csökkenését (BFÖ, 2011). A kerületen belül a legnagyobb zöldfelületi intenzitás csökkenés a sűrűn beépített területekre volt jellemző.



16. ábra: A zöldfelületi intenzitás értékei (%) (a) és a zöldfelületi intenzitás változása 2005-2010 között (b) a XII. kerületben (forrás: BFÖ, 2011)

A Hegyvidék azon kevés önkormányzatok közé tartozik, mely tagja a Klímabarát Települések Szövetségének. Így a kerület számos olyan programot dolgozott ki, amelyek a természet változásaihoz való helyi szintű alkalmazkodást segítik elő. Az elmúlt években három óvodában is napelemes (fotovoltaikus) villamosenergia-ellátást alakítottak ki, valamint a szennyvízhő hasznosítását oldották meg a MOM Művelődési Központ fűtéséhez és hűtéséhez. Emellett hat éve működő komposztálási programmal járulnak hozzá a zöldhulladék kertben történő újrahasznosításához. A kerületben UV- sugármérőt is elhelyeztek, ami veszélyes mértékű UV-B sugárzás esetén automatikusan értesítést küld a regisztrált kerületi lakóknak (KTSZ, 2014).

4. Felhasznált adatok bemutatása

4.1. Terra, Aqua műholdak és a MODIS szenzor

A Terra és az Aqua kvázipoláris pályájú földmegfigyelő műholdakat a NASA¹⁷ EOS¹⁸ program keretében indították útjukra Kaliforniában. Feladatuk, hogy több műholddal (Landsat 7, ICESat¹⁹) együtt, globális szinten összehasonlítható adatokat szolgáltatassanak a Föld különböző szféráiról. A műholdak 705 km magasságból gyűjtenek hatalmas mennyiségű adatot a rajtuk elhelyezett detektorokkal, melyek az elektromágneses spektrum különböző hullámhossztartományaira érzékenyek. Először a Terra műholdat állították Föld körüli pályára 1999-ben, majd ezt követte az Aqua 2002-ben. A műholdak körülbelül 100 perc alatt kerülik meg a Földet, s ezt az utat naponta 16-szor teszik meg (NASA, 2006).

A Terra műhold napszinkron pályája miatt helyi idő szerint délelőtt 10:30-kor halad át az Egyenlítőn északról dél felé haladva (leszálló ágban), erről a délelőtti időpontról árulkodik a műhold hivatalos elnevezése is (EOS AM-1). A szárazföldi területek megfigyelésére a reggeli órák a legkedvezőbbek, mivel ekkor nem képez akadályt jelentős mennyiségű felhőzet. Az Aqua – eredeti nevén: EOS PM – Egyenlítőn való áthaladása felszálló ág esetén helyi idő szerint délután 13:30-kor, leszálló ága esetén éjjel 01:30-kor történik meg (NASA, 2006). A két műhold által különböző időpontban készült megfigyelések kombinációja lehetővé teszi a különböző légköri és felszíni paraméterek napi változásának részletes elemzését.

A Terra műhold öt fedélzeti műszeregyüttese a különböző hullámhosszú tartományokban beérkező sugárzást méri. A műszerek közül az ASTER²⁰ szolgál a legfinomabb felbontású adatokkal (15-90 m), ezáltal hozzájárul ahhoz, hogy a felszíni hőmérséklet és a sugárzási paraméterek területi eloszlásáról részletes ábrázolás készüljön. A MISR²¹ kilenc különböző szögben méri a beérkező sugárzást, ezzel vizsgálva a sugárzást akadályozó, illetve gyengítő tényezőket, mint például a légköri aeroszol és a növényzet. A MOPITT²²-ot a metán és szén-monoxid légköri koncentrációjának becslésére alkalmazzák. A CERES²³ a felhőzetről, a légköri vízgőzről, illetve a sugárzási paraméterekről gyűjt adatokat, mellyel a klímaváltozás és hatásait

¹⁷National Aeronautics and Space Administration - Nemzeti Légügyi és Űrkutatási Hivatal

¹⁸ Earth Observing System - Földmegfigyelő Rendszer

¹⁹ Ice, Cloud, and land Elevation Satellite – Jég, Felhőzet, és Domborzat Műhold

²⁰ Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer - Továbbfejlesztett űrbeli hőmérsékleti emissziót és a visszavert sugárzást mérő sugárzásmérő

²¹ Multi-angle Imaging SpectroRadiometer – Többszögben képalkotó spektroradiométer

²² Measurements of Pollution in The Troposphere – Szennyeződés mérése a troposzférában

²³ Clouds and the Earth's Radiant Energy System - Felhőzet és a Föld Sugárzási Energia Rendszere

megcélzó kutatásokat segíti. Végül a MODIS²⁴ folyamatos adatokkal szolgál a sugárzási és termális paraméterekről az egész bolygó területén, melyek széles körben felhasználhatók (NASA, 1999, 2006). MODIS és CERES szenzorral az Aqua műhold is rendelkezik. Az Aqua berendezéseit inkább a Föld vízkészletének részletes elemzésére tervezték – ebből adódóan kapta a latin „víz” elnevezést, de fontos szerepe van a sugárzási paraméterek mérésének is. A MODIS és a CERES mellett három szondázó és egy passzív sugárzásmérő műszer található a műholdon. Az AMSU²⁵ és HSB²⁶ mikrohullámú tartományban szondázó műszerek képesek sűrű felhőzetben keresztül is precíz nedvességi és hőmérsékleti méréseket végezni. Az AMSR-E²⁷ a hidrológiai állapotathatózók megfigyelésére alkalmazott detektor, az AIRS²⁸ szenzor pedig hőmérsékleti profilt képes előállítani 2378 infravörös tartományba eső csatornájával (NASA, 2002).

A 0,405 – 14,385 μm között, 36 különböző hullámhossz tartományban érzékelő MODIS szenzor többféle feladatot lát el a Földet tanulmányozó kutatásokban. Látómezeje viszonylag nagy területre, 2300 km-nyi széles sávra terjed ki, és három különböző felbontásban (250 m, 500 m, 1000 m) készít méréseket. A 250 m-es finomfelbontás két látható tartományba eső csatornára, az 500 m-es felbontás öt közeli infravörös tartományba eső csatornára jellemző (Kern et al., 2005). A többi 29 elektromágneses hullámhossz tartományban a mérések térbeli felbontása egységesen 1 km. Az Aqua és Terra műholdakon elhelyezett MODIS szenzor a következő adatcsoportokkal szolgál (Lindsey és Herring, 2002):

- Földfelszíni sajátosságokat jellemző adatok (albedó, felszínhőmérséklet, vegetációs indexek, sugárzási paraméterek)
- Felszínborítottság kategorizálása és időbeli változásai
- Felhőzet, légköri aeroszolok hatásának részletes elemzéséhez szükséges adatok
- Vízfelszín hőmérsékleti adatok
- Hóval/ jéggel borított területek feltérképezéséhez szükséges adatok
- Fitoplanktonok viselkedésének vizsgálatához szükséges adatok
- Termikus anomáliák (pl.: erdőtüzek detektálásához)

Az ELTE Meteorológiai Tanszékén 2000-ben indultak meg a MODIS képeket feldolgozó kutatások (Dezső, 2002). A későbbiekben a lágymányosi kampuszra telepített műholdvevő

²⁴ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer – Közepes felbontású képalkotó spektrométer

²⁵ Advanced Microwave Sounding Unit - Továbbfejlesztett mikrohullámú szondázó egység

²⁶ Humidity Sounder for Brazil – Brazil páratartalom szondázó

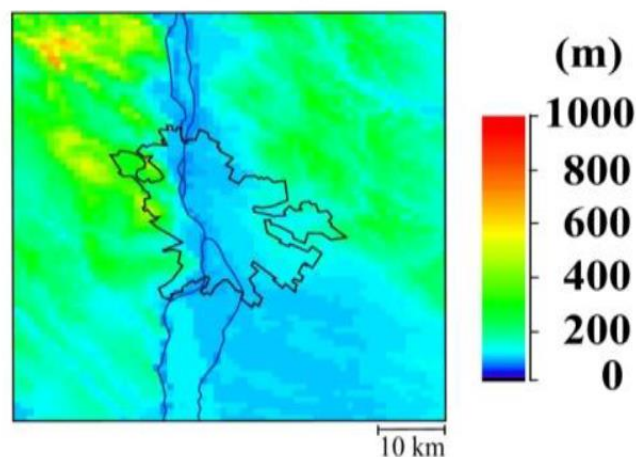
²⁷ Advanced Microwave Scanning Radiometer – Továbbfejlesztett mikrohullámú letapogató sugárzásmérő

²⁸ Atmospheric Infrared Sounder – Légköri infravörös szondázó

állomás közvetlen hozzáférhetőséget biztosított a szenzor által érzékelt adatokhoz, mely elősegítette többek között a műholdképek feldolgozásán alapuló városklíma kutatást. Vizsgálataim során a MODIS szenzor sugárzási adataiból nyert felszínhőmérsékleti adatbázist használtam fel.

4.2. GTOPO30

A GTOPO30 digitális terepmodellt (17. ábra) az amerikai USGS²⁹ készítette (USGS, 1996). A Föld egészére kiterjedő magassági adatbázis kontinentális és regionális léptékű kutatásokban is egyaránt felhasználható. Végleges formáját 3 év fejlesztés után 1996-ban érte el. Horizontális térbeli felbontása 30 szögmásodperc (kb. 1 km). Az adatbázist különböző magassági modellek adataiból állították elő. Az adatbázis 50%-át a DTED³⁰ 90 méteres felbontású raszteres topográfiai adatállomány, 30%-át pedig a DCW³¹ vektoros térképi adatai teszik ki. További forrásként szolgált például a USGS Digitális Magassági Modell (USGS, 1993) és a Nemzetközi Világtérkép. A modell magassági adatainak segítségével lehetőség nyílik a topográfia városklímára gyakorolt hatásának tanulmányozására is.



17. ábra: Budapest és környékének topográfiája a GTOPO30 adatbázis alapján

(forrás: Dezső et al., 2012)

²⁹ U.S. Geological Survey – Amerikai Geológiai Hivatal

³⁰ Digital Terrain Elevation Data – Digitális Domborzati Adatbázis

³¹ Digital Chart of the World – Digitális Világtérkép

5. Vizsgálatok és eredmények

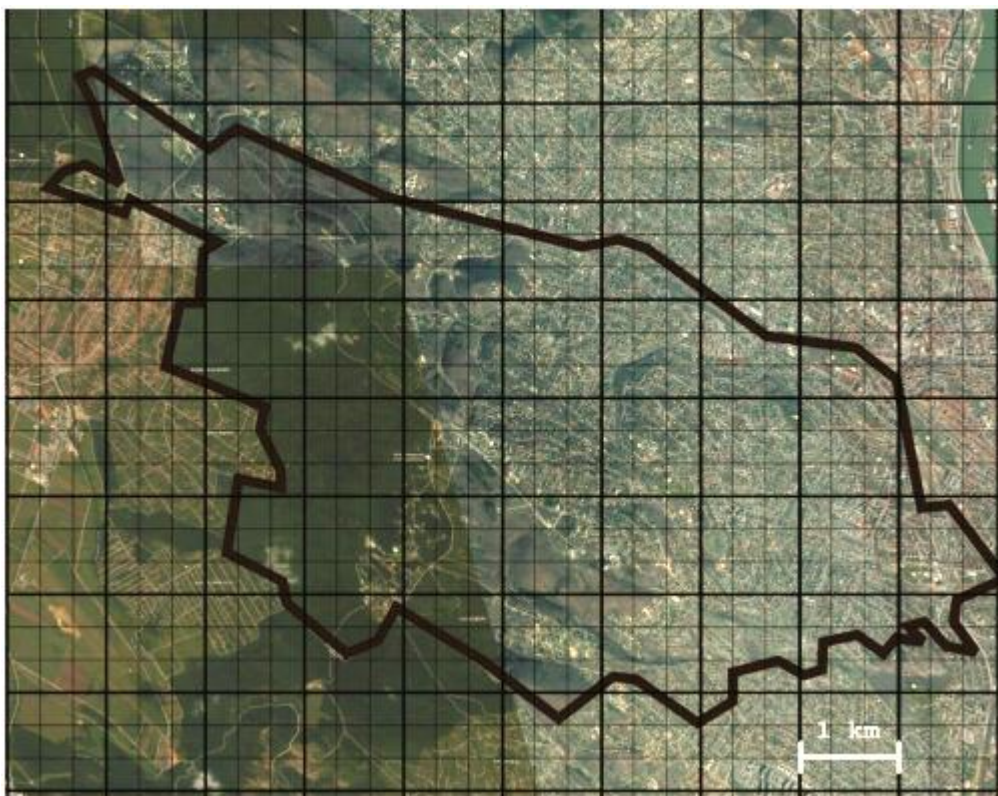
5.1. Vizsgálati módszerek

A városi hősziget által módosított termális tulajdonságok vizsgálatát ebben a dolgozatban Budapest XII. kerületének példáján végeztük el. Vizsgálatainkhoz a távérzékelte Terra/MODIS 2001. januártól, Aqua/MODIS esetében 2003. januártól 2013. decemberig rendelkezésre álló adatait használtuk fel. Az infravörös tartományban érzékelt adatok alapján előállított felszínhőmérsékleti, illetve hősziget-intenzitási értékek $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ felbontásúak, mely a meteorológiai felszíni állomások sűrűségéhez képest jóval finomabb térbeli felbontást jelent. A távérzékelés hátránya viszont, hogy a felszíni állomásokkal szemben mérései nem terjednek ki tetszőleges időpontra. A műholdas megfigyelés során 2001 és 2002 közötti időszakban napi kettő – délelőtt és este –, illetve 2003 és 2013 között napi négy – délelőtt, délután, este és hajnalban készült – mérés áll rendelkezésünkre.

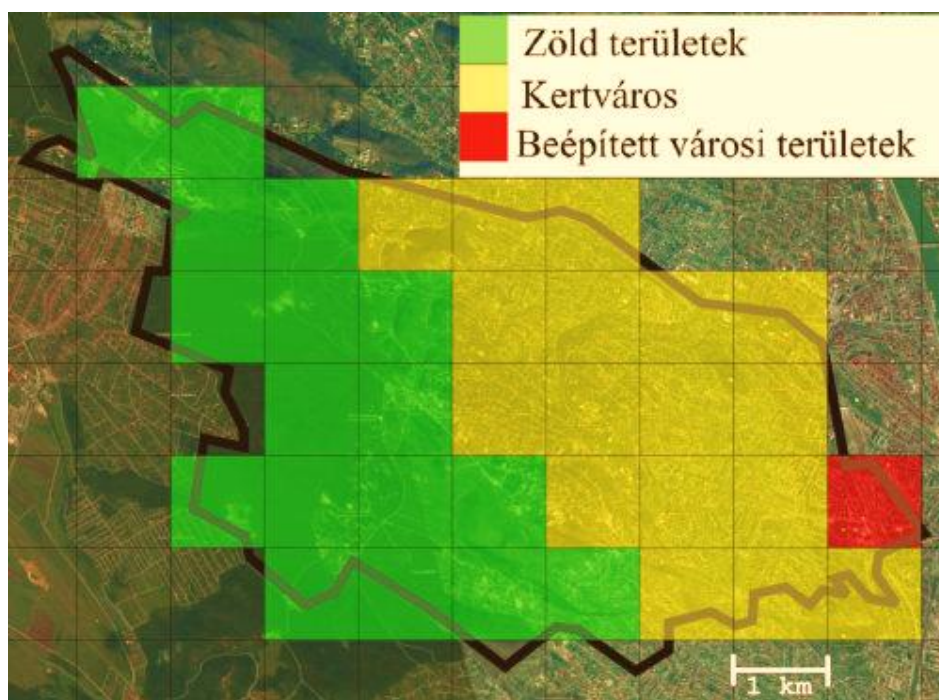
A MODIS hibás, felhős időben mért adatai már a feldolgozást megelőzően ki lettek szűrve. Az intenzív hősziget-jelenségeknek kedvező derült időben mért felszínhőmérsékleti adatokból télen jóval kevesebb áll rendelkezésre, mint nyáron, mivel a Kárpát-medencében a téli időszakban gyakoribb a borult vagy ködös időjárás. Mivel egy mezoskálájú éghajlatra jelentős hatással van egy adott terület domborzata, vizsgálatainkban a GTOPO30 digitális terepmodell adatait is felhasználtuk.

A Google Earth adatbázis nagy felbontású műholdfelvételei (18. ábra) segítségével meghatároztuk a különböző beépítettségű városrészek egyes kategóriáit (19. ábra). Vizsgálataink során egy adott rácscellát akkor osztályoztunk, ha a rácscella legalább 50%-ára egy adott kategória felszínborítottsága volt jellemző, ellenkező esetben nem használtuk fel elemzéseinkben. A kerületen belül a következő szerkezeti kategóriák különíthetők el:

- Sűrűn beépített területek: Keskeny utcákkal tagolt, több szintes épületekből álló belvárosi rész, ahol rendkívül alacsony a növényzettel borítottság aránya.
- Kertváros: Laza beépítésű, családi házas övezet 1-2 szintes lakóépületekkel. A kerti növényeknek és fáknek köszönhetően viszonylag nagyobb zöldfelület jellemző.
- Zöldterületek: E kategóriába soroljuk az olyan összefüggő növényzettel rendelkező területeket, mint a városi parkok, külterületi rétek, illetve erdőségek.

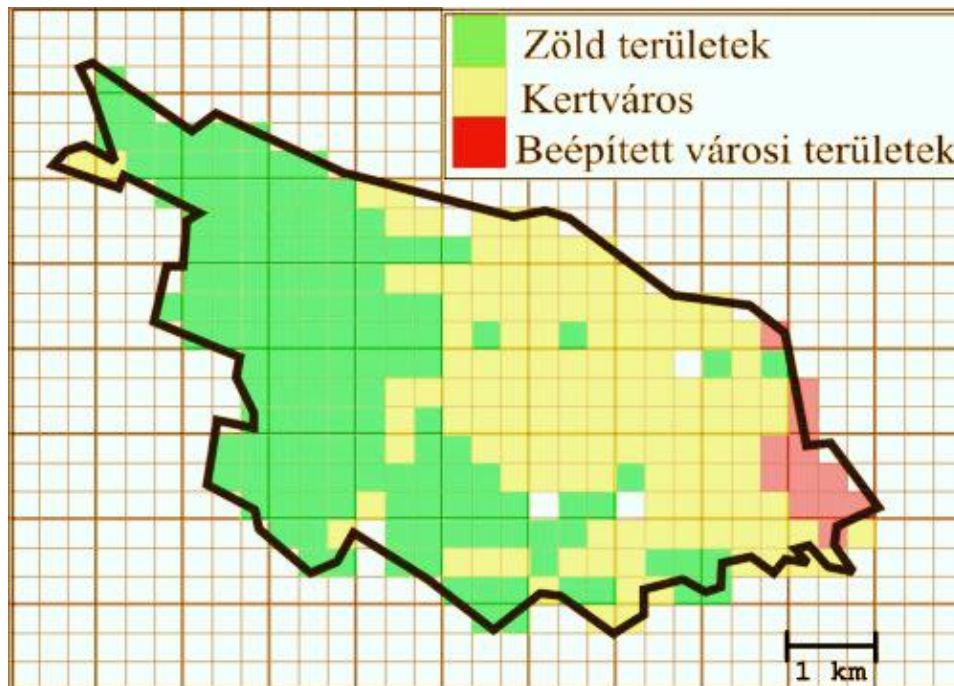


18. ábra: A vizsgált terület felosztása különböző méretű cellákra a Google Earth térképen



19. ábra: A durva felbontású (1 km) rácscellák osztályozása

Az 1 km-es térbeli felbontású rácsot interpolációs módszerrel tovább finomítottuk, így egy adott rácscellát 3×3 darab cellára bontottunk fel (20. ábra). A kapott hőmérsékleti adatok felhasználásával meghatároztuk az egyes kategóriák átlagértékeit, melyek segítségével tanulmányozható a hősziget térbeli eloszlása és időbeli változása.



20. ábra: A finomabb felbontású (333 m) rácscellák osztályozása

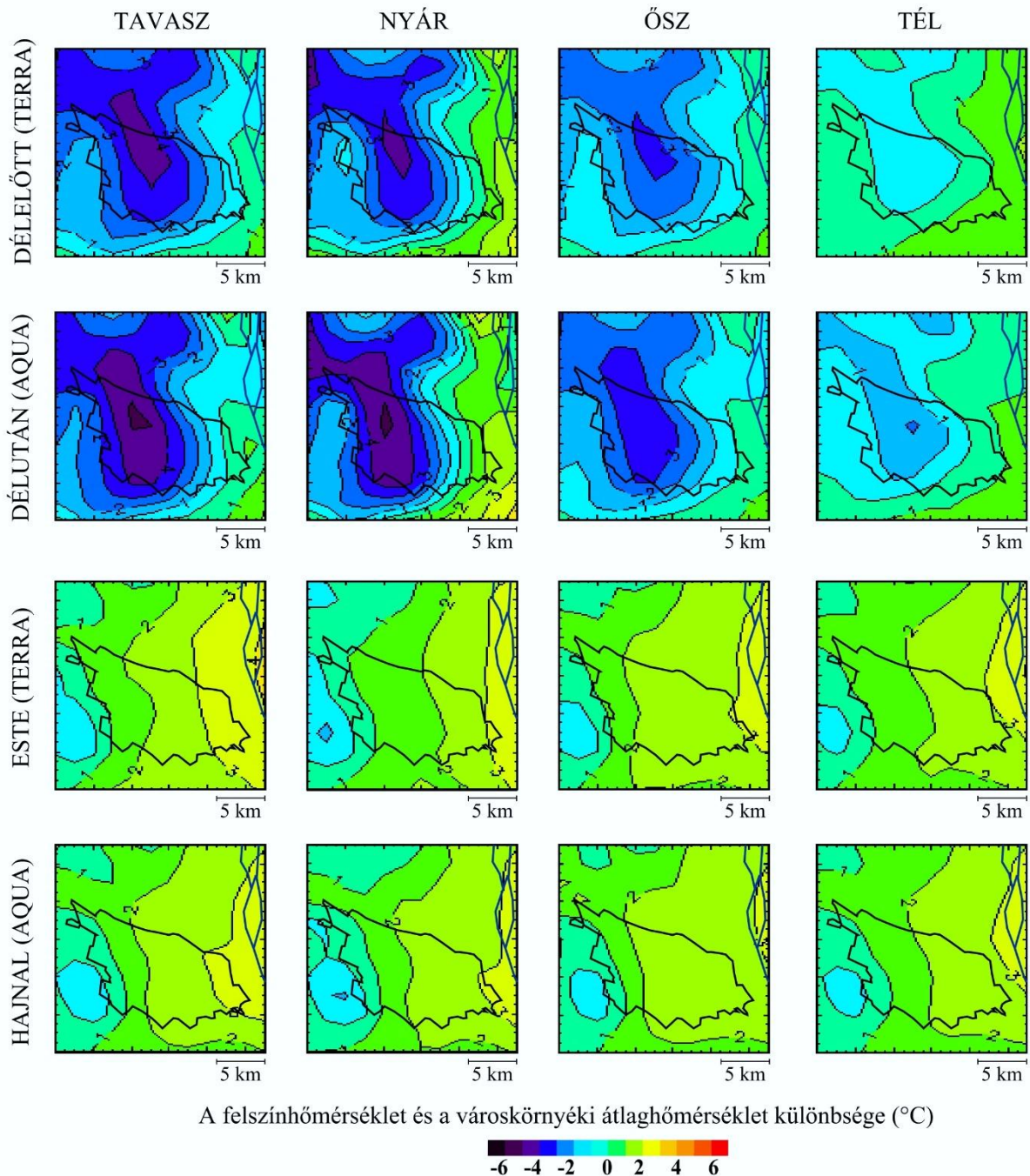
5.2. A XII. kerület termikus tulajdonságainak elemzése

A műholdas mérések lehetővé teszik a hősziget térbeli szerkezetének és időbeli változásának részletes elemzését. A hősziget XII. kerületen belüli térbeli eloszlását a 21. ábra illusztrálja. A hősziget magja a pesti oldalon helyezkedik el, így a kerületben a hősziget városperem felé fokozatosan gyengülő intenzitását figyelhetjük meg, melyhez részben hozzájárul még a domborzat hatása és a zöldterületek nagyobb aránya. A tavaszi-nyári nappali időszakot tekintve a Budai-hegység erdővel borított, hidegebb felszínhőmérsékleti régiói – melyek még a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél is átlagosan 4-5 °C-kal hidegebbek – erőteljesen kirajzolódnak. Ebben az időszakban a kerületen belül a városi és a hegyvidéki jellegű területek között 8 °C átlagos hőmérsékletkülönbség is kialakulhat.

Az éjszakai órákban a hősziget szerkezete jelentősen eltér a nappaltól. Az éjjeli műholdmérésekből származtatott térképek jóval kisebb mértékű éven belül ingadozást

mutatnak. A legnagyobb átlagos hősziget-intenzitás – mely a 3 °C-ot is meghaladja – az esti órákban figyelhető meg a tavaszi hónapokban.

Egész évre jellemző, hogy a délelőtti és a délutáni órákat tekintve a kerület általában hűvösebb a városkörnyéki területeknél, az esti és a hajnali órákban viszont pozitív (kb. 2 °C-os) hőmérsékleti anomália észlelhető, vagyis a Budai-hegyek melegebbek a városkörnyékhez viszonyítva.



21. ábra: A városi hősziget átlagos évszakos szerkezete a XII. kerületben (a Terra/MODIS 2001-2013, és az Aqua/MODIS 2003-2013 időszakra vonatkozó felszínhőmérsékleti mérései alapján)

A különböző kategóriákba sorolt területek hősziget intenzitásának meghatározásához a városkörnyéki és a városi területek átlagos felszínhőmérséklete közötti anomáliát használtuk fel. A Terra és az Aqua által mért délelőtti és délutáni, illetve esti és hajnali adatsorok között lévő eltérés maximum $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ volt (22. ábra). A legkisebb különbség a kertvárosi részen figyelhető meg, ahol a görbék páronként nagyjából együtt futnak.

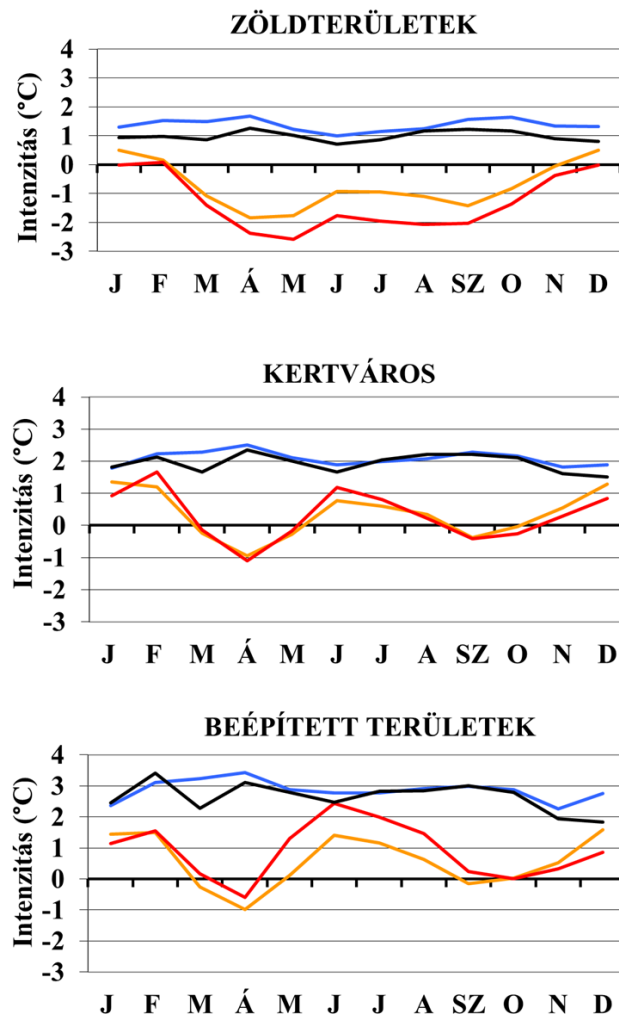
A beépített területeken a délutáni órák hősziget-intenzitásának maximuma ($2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) nyáron (júniusban) jelentkezik a városi területeken, amely a fokozottabb rövidhullámú besugárzással hozható kapcsolatba. A júniusi maximum mellett a nappali görbék éves menetét tekintve a kertvárosi és a beépített területeken egy második alacsonyabb ($1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) – kertváros esetében a júniusi átlagértéket kissé meghaladó – mértékű maximum is megfigyelhető februárban. Ebben a hónapban a hajnali órákban mért intenzitásokra is az átlagértékhez képest magasabb anomáliaérték jellemző. A beépített és a kertvárosi területeken a nappali átlagos intenzitást tekintve áprilisban és az őszi (szeptember, október) hónapokban városi hőtöbblet nem figyelhető meg, valamint áprilisban e két kategóriába sorolt területek felszínhőmérséklete átlagosan $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal hűvösebb a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél.

A zöldterületek nappal mért átlagos intenzitásának éves menetében májusi minimum látható és ezt követően a nyári hónapokban – a kertvárosi és a beépített területekkel szemben – nem figyelhető meg jelentős intenzitás-növekedés, tehát a kertvárosi és a beépített területekhez képest egész évben jóval gyengébb intenzitás figyelhető meg, mivel e területeken a beépített területekkel szemben az év jelentős részében a látens hőáram játszik fontos szerepet a terület energia-kicserélődési folyamataiban. A zöldterületeken nappali órákban mért átlagos intenzitás értékei télen a legmagasabbak – ekkor nem negatív a hősziget-intenzitás –, amely azzal magyarázható, hogy télen, amikor a talaj fagyott vagy hóval borított, az energiaegyenleg összes összetevője szenzibilis hővé alakul át, amely hővezetéssel a fákat vagy konvekcióval a légkört melegíti (Unger és Sümeghy, 2002).

Az éjszakai órákban végzett mérésekből meghatározott hősziget hatás évi ingadozása a nappalihoz képest jóval kisebb mértékű, mivel e napszakhoz tartozó sugárzási egyenleget csak a bejövő és a kimenő hosszuhullámú sugárzás határozza meg, mely nem olyan változékony, mint a rövidhullámú sugárzás, ezért éjjel a felszínhőmérsékleti görbék amplitúdója is gyengébb. Az esti órákban mért intenzitások általában meghaladják a hajnali órákét, ám a különbség csekély, nem haladja meg a $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot. Az éjszakai órákban mért intenzitásértékek a terület egészére vonatkozóan jóval meghaladták a nappali intenzitásokat. A két napszakra vonatkozó

intenzitások legnagyobb eltérése – mely a 3 °C-ot is meghaladta – áprilisban volt megfigyelhető. A beépített területeken egész évben 3 °C körüli intenzitás volt jellemző az esti órákra.

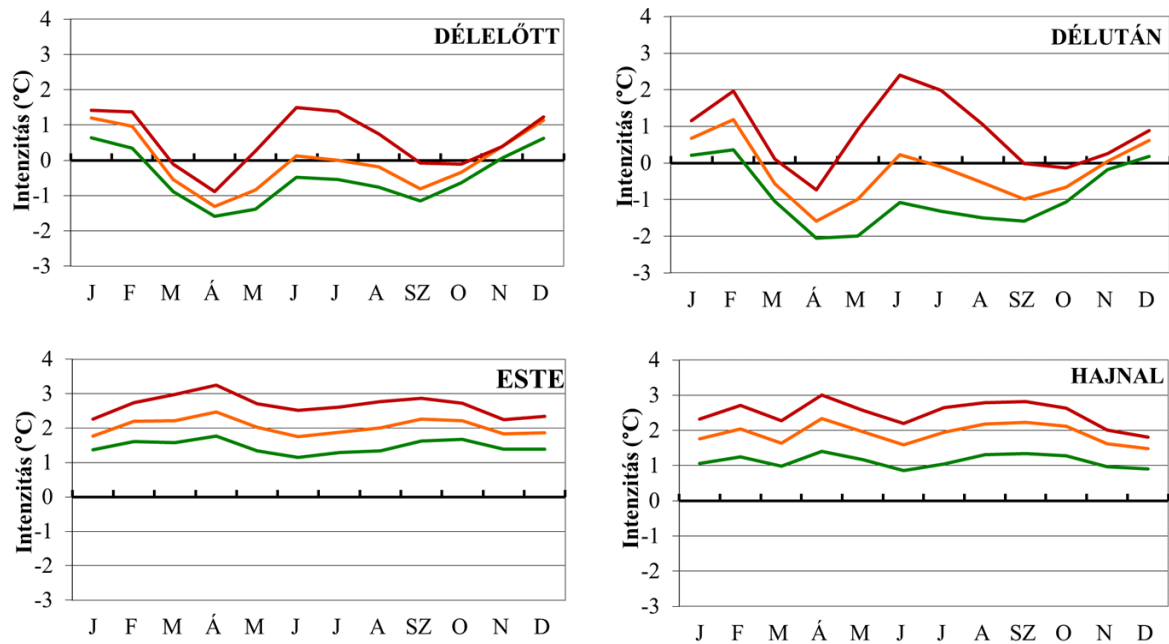
A beépített és az erdős területek átlagos intenzitásai közötti legnagyobb különbség nyáron a délutáni órákban látható, ekkor kb. 4 °C eltérés volt tapasztalható. A zöld területeken a délelőtti intenzitás átlagos értékei 1 °C-kal meghaladták a délutáni átlagos intenzitást, a városi területeken pedig fordított volt a helyzet, mely azzal magyarázható, hogy az erdős területek felmelegedésének az alacsonyabb szögben beérkező rövidhullámú sugárzás, míg a városi területeken az összetett, akadályt képező objektumok miatt a felszínhőmérséklet emelkedésének a magasabb napállás kedvez.



22. ábra: A három felszínhasználati típus átlagos hősziget-intenzitásainak éves menete különböző időpontokban: délelőtt (Terra), délután (Aqua), este (Terra), hajnal (Aqua)

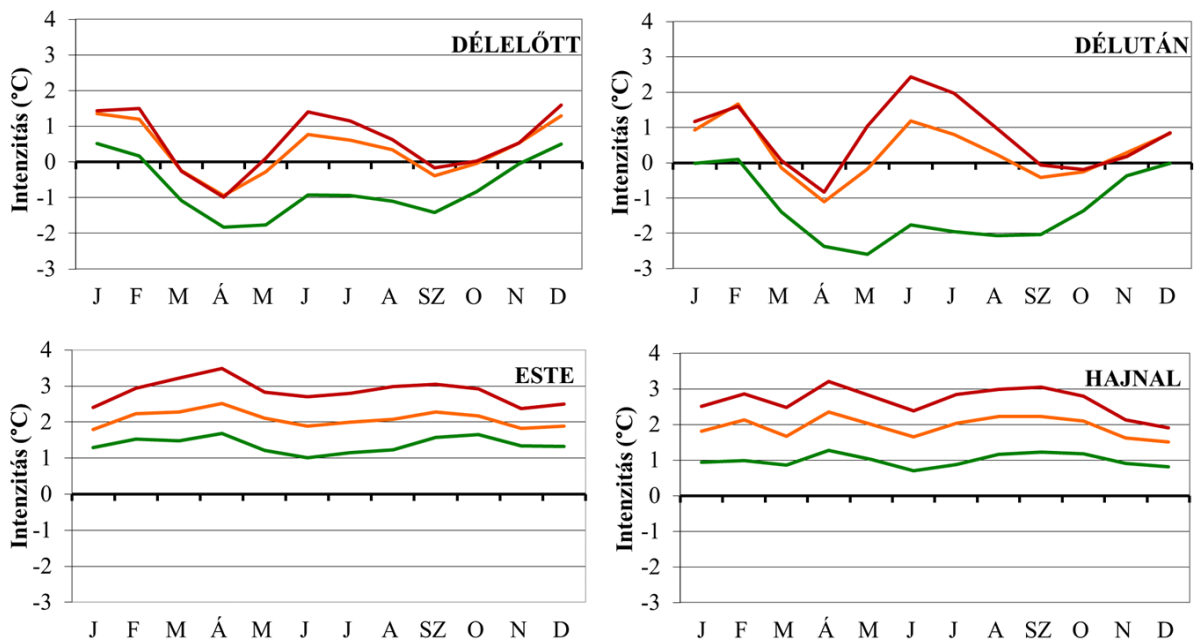
Az interpolációs technikával finomított (23. ábra) és az 1 km-es durvább felosztásban megadott kategóriákat (24. ábra) külön-külön vizsgálva a különböző felbontás következtében

történő szignifikáns eltérés nem tapasztalható az alkalmazott cellatávolságokon alapuló lineáris interpolációs módszertanból adódóan. A dolgozatban a továbbiakban a durvább felbontású kategóriák adatsorait vizsgáljuk, mivel ezek felbontása azonos az eredeti műholdas adatok 1 km × 1 km-es felbontásával.



23. ábra: A finomabb felosztású különböző kategóriájú területek (beépített, kertvárosi, zöld)

havi átlagos hősziget-intenzitásainak éves menete



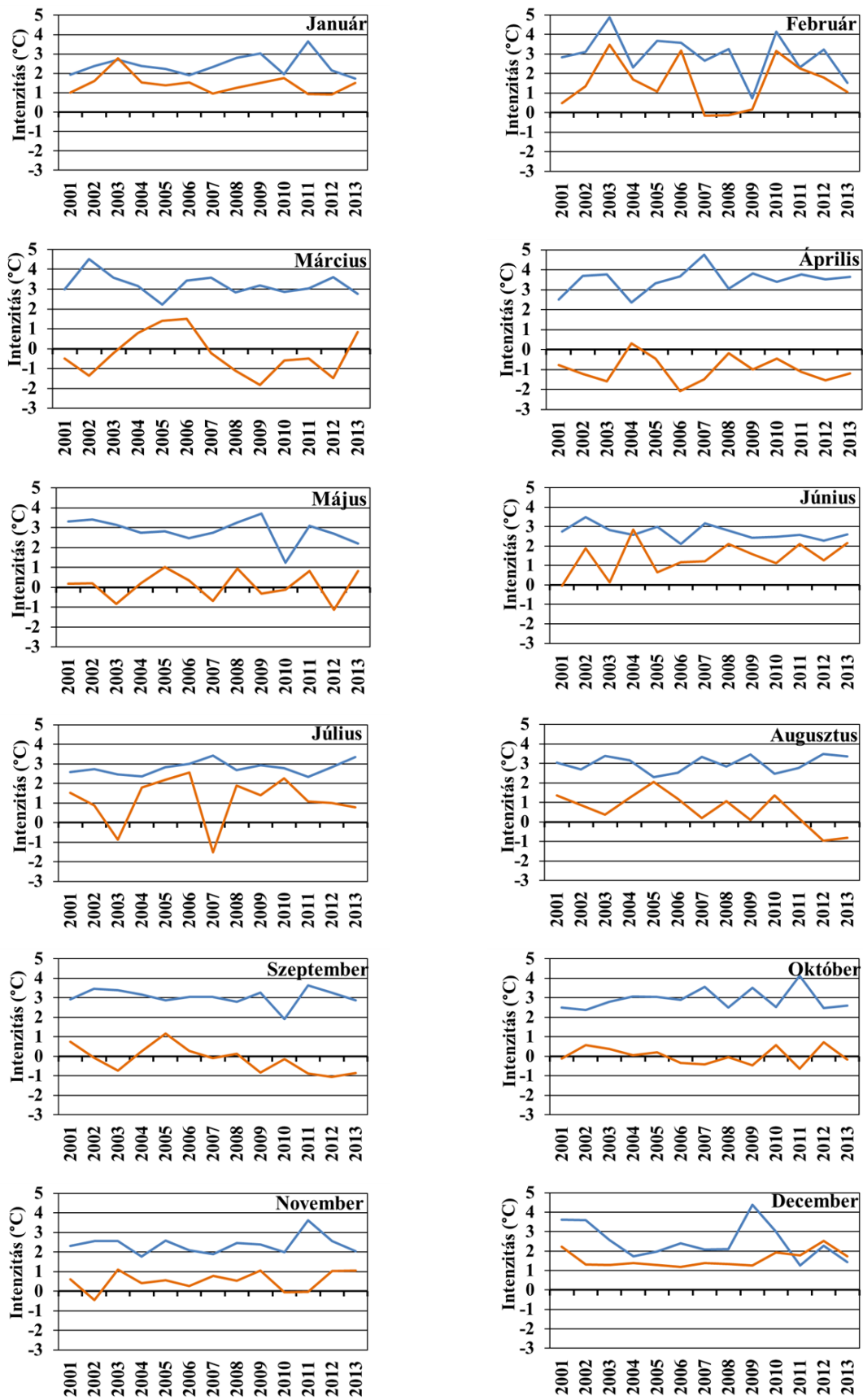
24. ábra: Az 1 km-es térbeli felbontásban kategorizált területek (beépített, kertvárosi, zöld)

havi átlagos hősziget-intenzitásainak éves menete

A beépített városi területek havi átlagos délelőtti és esti órákban mért hősziget-intenzitásának 2001 és 2013 közötti időszakra vonatkozó évek közötti változásait a 25. ábra szemlélteti. Az évek során megfigyelt intenzitásokra viszonylag nagy szórás jellemző, ezért a hősziget-intenzitás szignifikáns megváltozása nem mutatható ki az adatsor alapján.

Az esti intenzitás a legtöbb hónapban $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ körül alakult, ami a városi mesterséges felszínnek eltérő hőtároló képességéből adódik. Az esti órákra vonatkozó kimagasló intenzitási értékeket – melyek az $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot is megközelítik – 2003 februárjában, 2002 márciusában és 2007 áprilisában figyelhetjük meg. $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot meghaladó intenzitást e hónapokon kívül 2011 októberében és 2009 decemberében tapasztaltunk.

A délelőtti intenzitásokat tekintve általában mintegy $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal az esti átlagos érték alatt alakulnak a legtöbb hónapban, kivéve 2011 és 2013 közötti decembert, amikor a nap folyamán egyáltalán nem vagy alig változott a hősziget-intenzitás erőssége. A délelőtti intenzitás legnagyobb értékei februárra jellemzők, ekkor az intenzitás kiugró értékei 2003-ban, 2006-ban és 2010-ben meghaladták a $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot is. A decemberi és januári méréseket tekintve a 13 éves időszak alatt közel egyenletes, $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot meghaladó délelőtti intenzitás tapasztalható, az őszi hónapokban $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ között ingadozik, illetve áprilisban szinte minden évben negatív értéket vesz fel. A két napszakban mért értékek közötti legnagyobb ($3\text{ }^{\circ}\text{C}$) intenzitás különbség a tavaszi és az őszi hónapokban (szeptember, október) figyelhető meg.



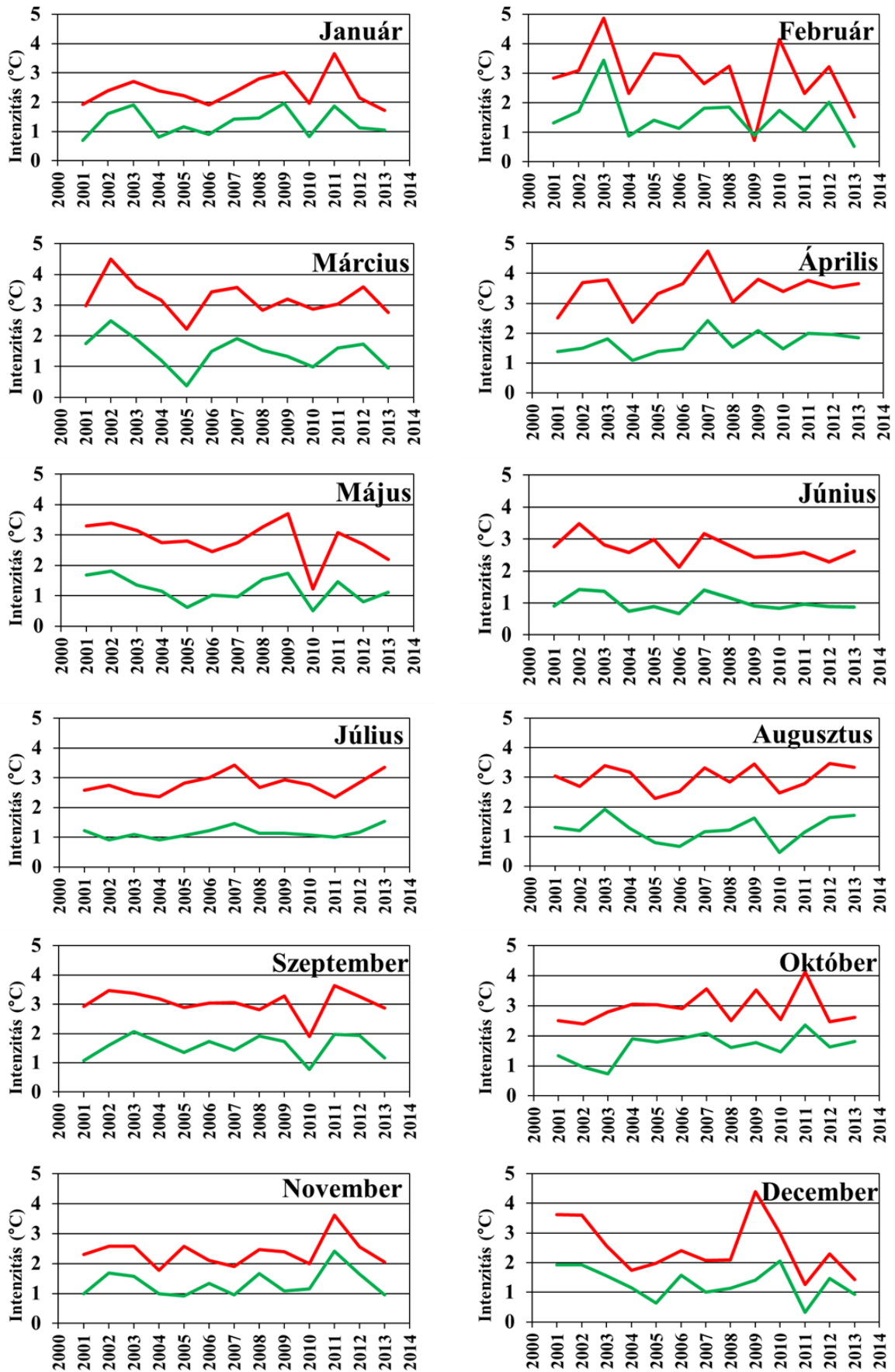
25. ábra: Beépített városi területek hősziget-intenzitása délelőtt (Terra) és este (Terra)

5.2.1. A beépített és a zöld területek termikus különbségei

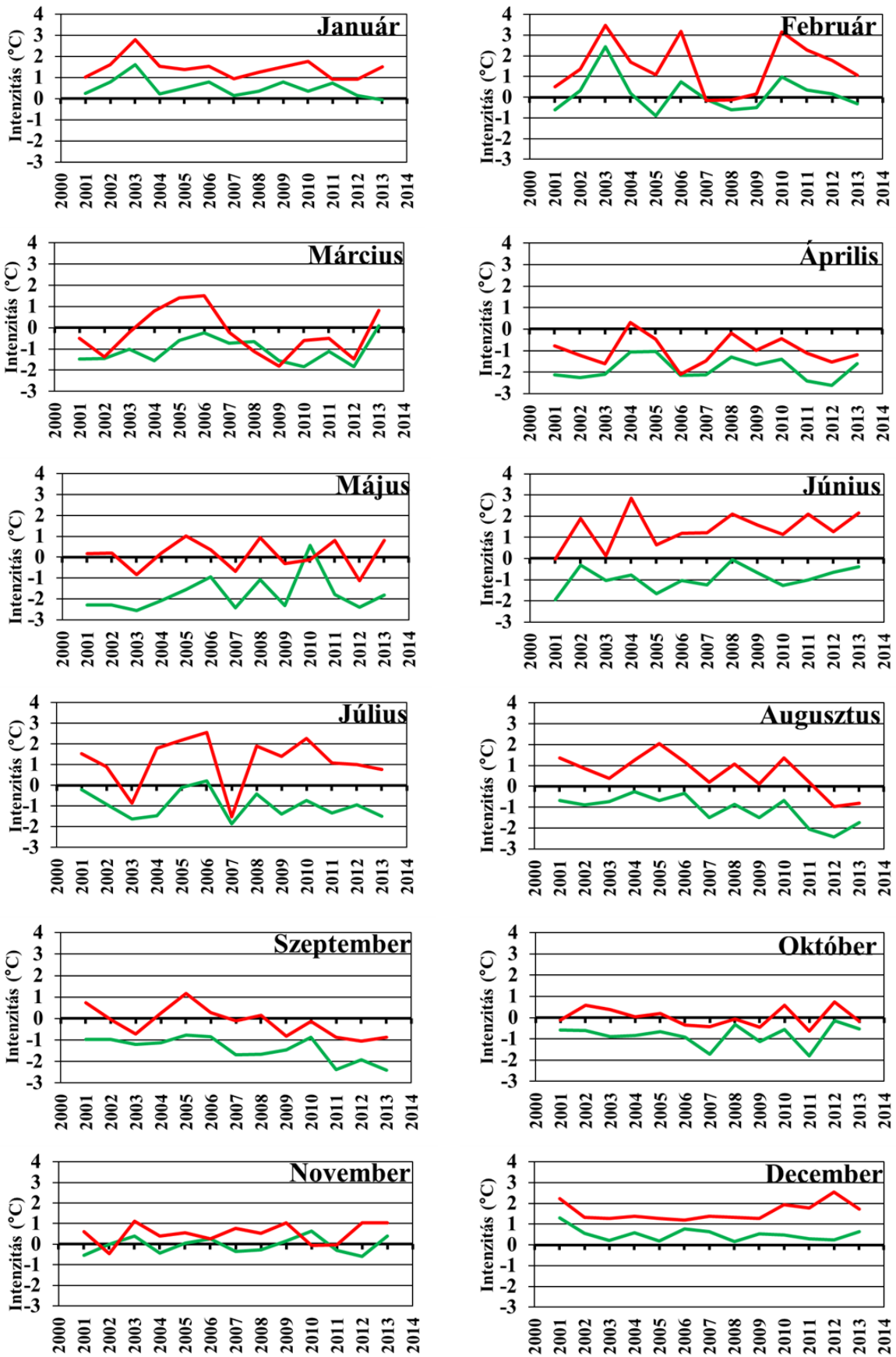
Az eddigiek alapján látható, hogy a beépített és az erdővel borított területek intenzitásai a vizsgált napszaktól függően különböző erősségűek lehetnek. A következő ábresorozaton e két terület esti (26. ábra) és délelőtti (27. ábra) intenzitásainak teljes 2001-2013 időszakra vonatkozó havonkénti idősorát együtt jelenítettük meg.

Az esti intenzitások értékeit vizsgálva, megállapítható, hogy a legtöbb hónapban a beépített és a zöld területek görbéi közel párhuzamosan futnak, tehát az évek során közel azonos intenzitás-különbség tapasztalható a két terület között. A tavaszi-nyári időszakban ez mintegy 2 °C-os, míg az őszi hónapokban kb. 1-1,5 °C-os eltérést jelent. Decemberben és februárban viszont a két eltérő jellegű terület hősziget-intenzitása közötti különbség nem tekinthető ilyen egyenletesnek, mivel az intenzitások közötti különbség jelentősebben változott a vizsgált 13 év során.

A délelőtti intenzitási értékek havonkénti idősorait tekintve (27. ábra) a beépített területeken jelentősebb hősziget-intenzitás októberben egyáltalán nem vagy csak alig volt tapasztalható a 13 év folyamán. A beépített és a zöld területek közötti legnagyobb különbség (kb. 2 °C) júniusban, a legkisebb eltérés november volt megfigyelhető, emellett maximum 1 °C-os intenzitás-különbség volt tapasztalható januárban, áprilisban és októberben. Decemberben és januárban egyik évben sem jelentkezett negatív mértékű hősziget-intenzitás egyik területen sem. Áprilisban mind a beépített, mind a zöldterületek intenzitása végig negatív értékeket vett fel, ami azt jelzi, hogy minden egyes év áprilisában a délelőtti órákban a XII. kerület beépített és zöld területeinek felszínhőmérsékletei egyaránt alacsonyabbak voltak, mint a városkörnyéki átlagos felszínhőmérséklet. Augusztusban és szeptemberben mindkét típusú terület intenzitásában 2001 és 2013 között csökkenő, míg júniusban növekvő tendencia figyelhető meg.

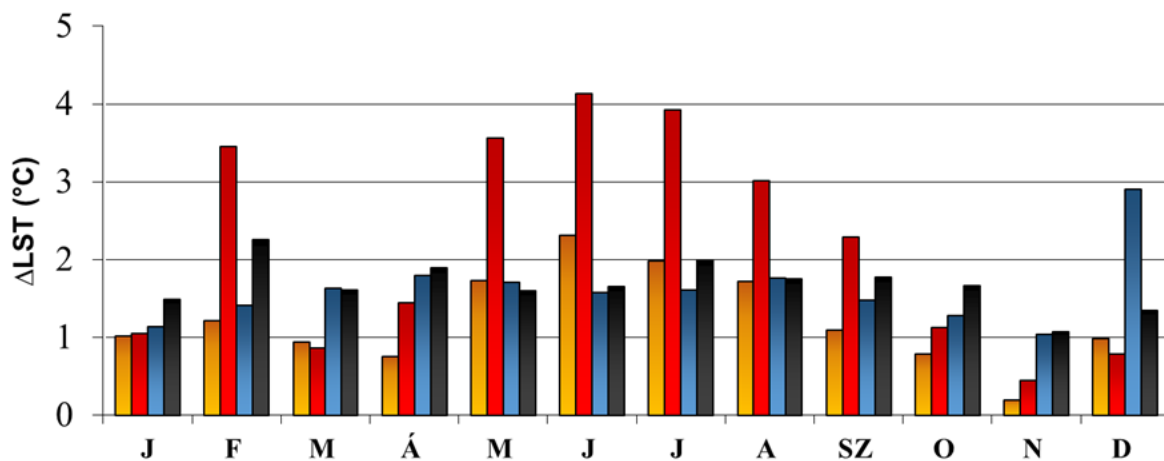


26. ábra: *Beépített* és *zöld* területek esti (Terra) hősziget-intenzitása.



27. ábra: *Beépített* és *zöld* területek délelőtti (Terra) hősziget-intenzitása.

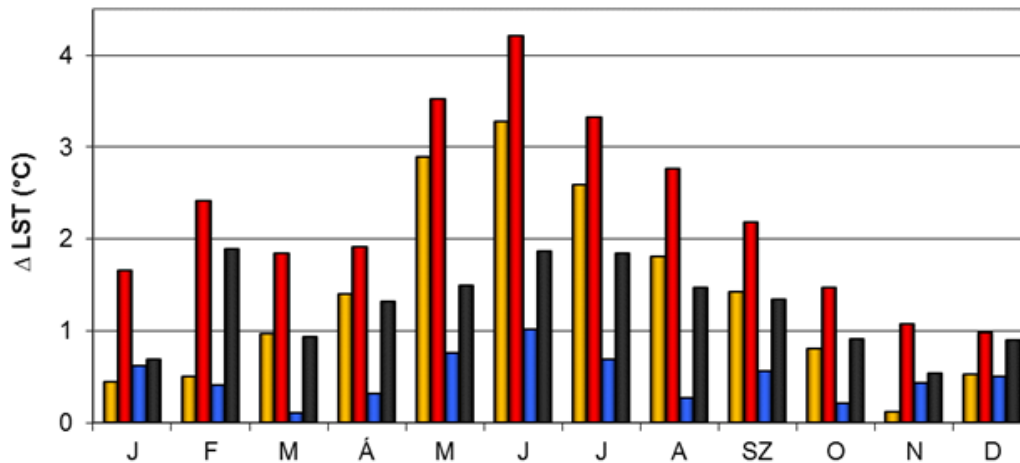
A beépített és a zöld területek között a délutáni órákban mért átlagos felszínhőmérsékleti különbség (28. ábra) május-június-július hónapok mellett februárban volt a legnagyobb (3-4 °C). A hajnali órákban mért LST-különbségek nagyjából állandónak (1-2 °C) tekinthetők. Decemberben kimagaslóan nagy átlagos LST-különbség volt megfigyelhető az esti órákra vonatkozóan, melynek értéke csaknem elérte a 3 °C-ot. A 26. ábra alapján láthatjuk, hogy ezt az átlagértéket egy 2009-ben, a beépített területeken mért kiugróan magas (a városkörnyéki átlagos felszínhőmérsékletet 4 °C-kal meghaladó) felszínhőmérséklet emelte meg.



28. ábra: A beépített és a zöld területek közötti átlagos felszínhőmérsékleti különbség a különböző időpontokban: *délelőtt (Terra)*, *délután (Aqua)*, *este (Terra)*, *hajnal (Aqua)*

5.2.2. Különböző magasságú területek összehasonlítása

Vizsgálataink során a zöld területi osztályba sorolt rácscellák közül kiválasztottunk egy magasabban (424 m) és egy alacsonyabban fekvő (171 m) rácscellát, melyek összehasonlításával a domborzati viszonyok hatását elemeztük. A két cella felszínhőmérsékleti értékeinek különbségét bemutató 29. ábra alapján megállapítható, hogy a legnagyobb eltérés leginkább a délutáni órákra jellemző, emellett a délelőtti órákban is viszonylag nagy átlagos LST-eltérések tapasztalhatók, vagyis a különbségek a rövidhullámú besugárzás változásával állnak szoros kapcsolatban. Jelentős eltérés (3-4°C) leginkább májustól júliusig tartó nyár eleji időszakra mutatható ki. Továbbá megfigyelhető, hogy a hajnali órákban detektálható átlagos LST-különbség nagyobb, mint a kora esti órákban.

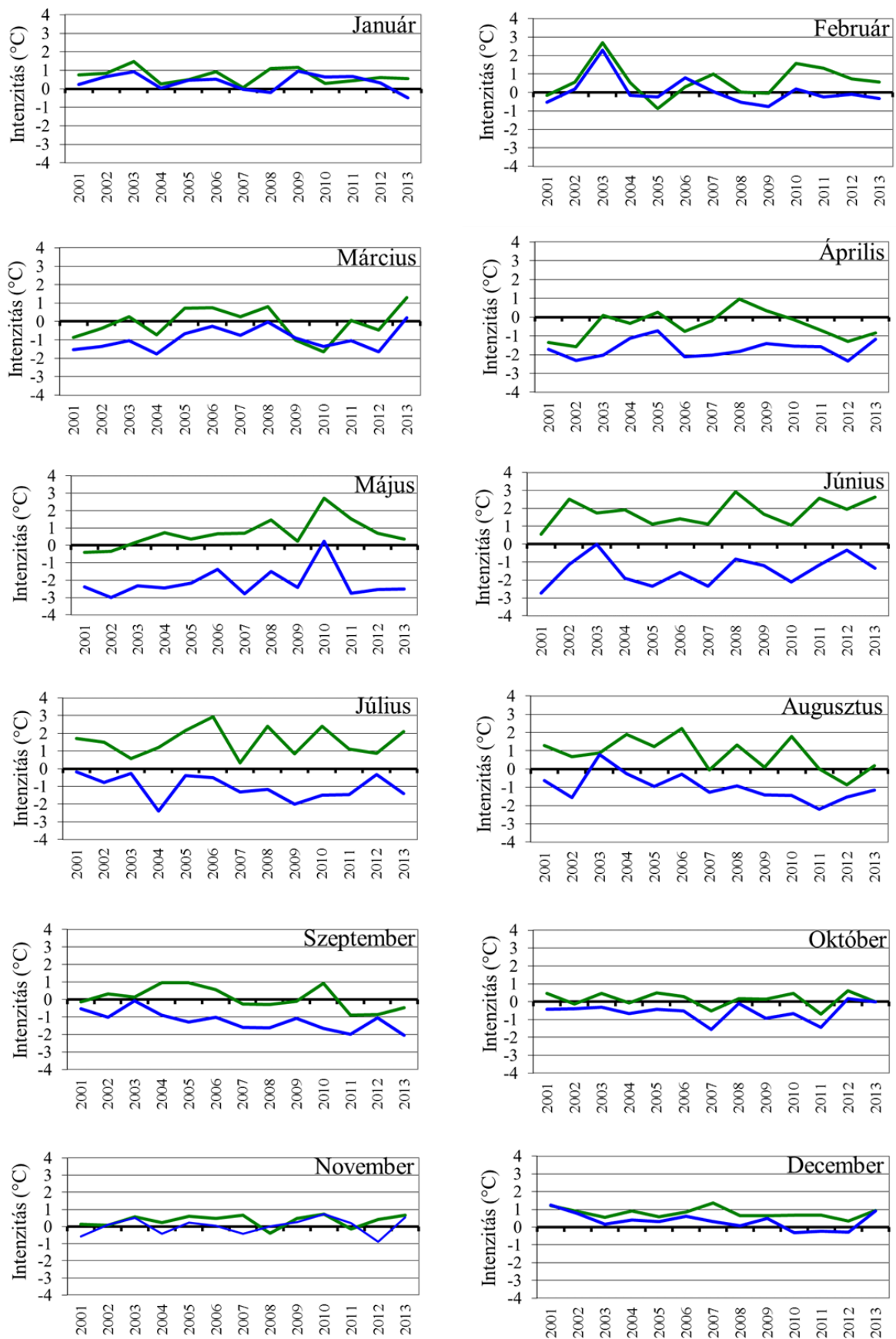


29. ábra: Hegytetőn (424m), illetve völgyben (171m) felvő cellák átlagos havi felszínhőmérsékletének különbségei a zöld területeken különböző időpontokban:

délelőtt (Terra), délután (Aqua), este (Terra), hajnal (Aqua)

A különböző tengerszint feletti magasságú területek havonkénti hősziget intenzitási idősorait összehasonlító grafikonok (30. ábra) alapján a magasabban fekvő (424 m) és az alacsonyabban fekvő (171 m) területek esti hősziget-intenzitási értékei között a legkisebb különbség januárban, novemberben és decemberben figyelhető meg, tehát ekkor a domborzat hatása egyáltalán nem vagy alig figyelhető meg. A decemberi és januári intenzitások ugyan alapvetően pozitívak voltak a vizsgált 13 év során, de végig 2 °C alatt maradtak az egyes években. Májustól augusztusig az alacsonyabban fekvő területek intenzitásai az egyes években általában pozitív értékeket vesznek fel, míg a magasabban fekvő területek felszíne (2003-at kivéve) minden évben hűvösebb, mint a külterületek átlaga.

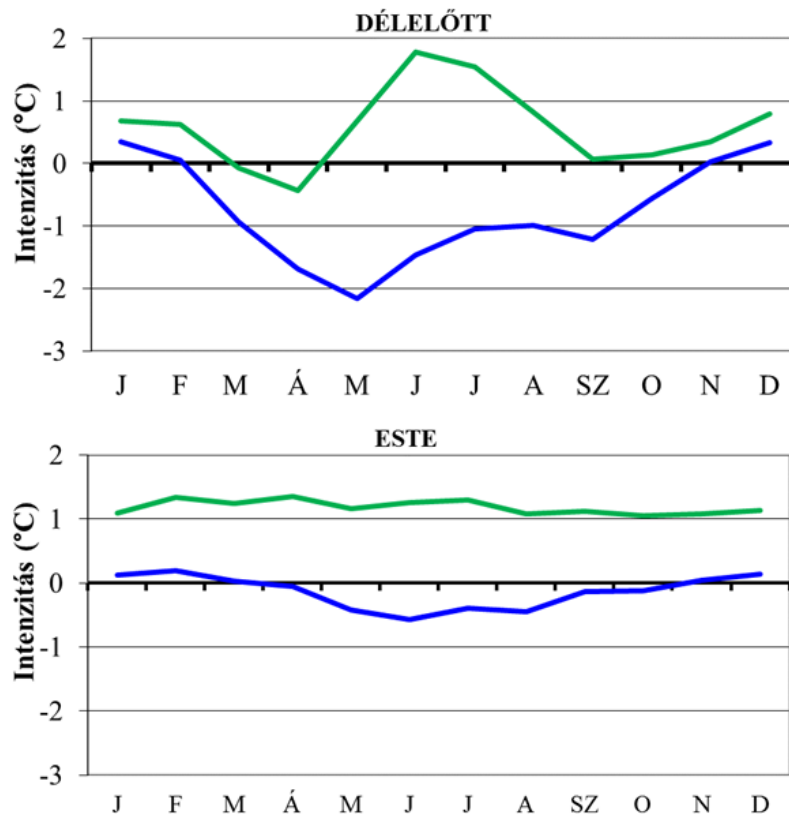
A két terület intenzitása közötti legnagyobb különbség májusban és a nyári hónapokban volt megfigyelhető, tehát ezekben a hónapokban volt észlelhető legjobban a magasság hőmérsékletmódosító hatása. Júliusban és augusztusban a zöld területek intenzitási értékeiben nagy szórás figyelhető meg.



30. ábra: A zöld területeken belül hegytetőn (424m) és völgyben (171m) található cellák havi átlagos hősziget-intenzitásai a délelőtti (Terra) órákban

A magassági különbségekből adódó hőmérsékleti anomáliák a délelőtti és az esti napszakban is észlelhetőek a két terület havi átlagait bemutató 31. ábra alapján. A két terület havi átlagos hősziget intenzitásai az esti órákban az évek során egyenletesen jelentkeztek, míg a délelőtti órákban – elsősorban a nappali sugárzási okok miatt – jelentősebb változásokat figyelhetünk meg az évi menetben.

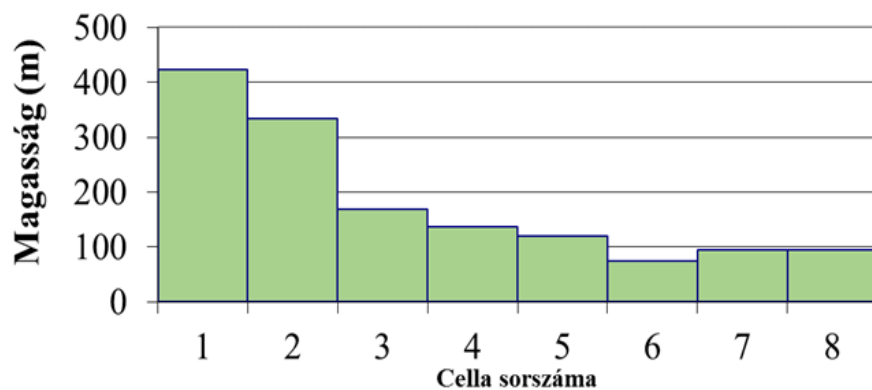
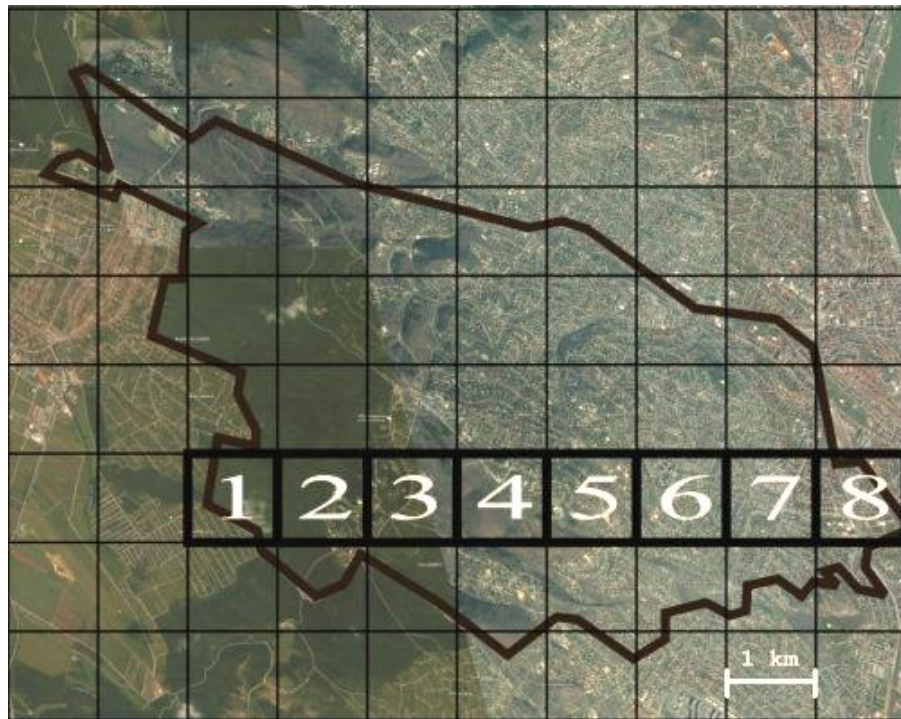
A magasabban fekvő területek átlagos esti intenzitásának havi átlagait tekintve pozitív értékeket csak a téli hónapokban vesznek fel, de ezek is csak kevéssel haladják meg a városkörnyéki átlaghőmérsékletet. Ezzel szemben az alacsonyabban fekvő területeken megfigyelt egyes hónapokhoz tartozó átlagos esti hősziget-intenzitás mindig meghaladja az 1 °C-ot. Az alacsonyabban fekvő területek délelőtti átlagos hősziget-intenzitása júniusban volt a maximális (csaknem 2 °C), a többi hónapban az átlagos intenzitás 1 °C alatt maradt, s áprilisban negatív volt. A magasabban fekvő területeken mért havi átlagos intenzitások a délelőtti órákra vonatkozóan is csak decemberben és januárban voltak pozitívak, ám az intenzitási értékek ekkor is viszonylag gyengék voltak. A délelőtti órákban májusban átlagosan 2 °C-kal volt hűvösebb a hegyvidéki jellegű cella a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél.



31. ábra: *Hegytetőn (424m)*, illetve *völgyben (171m)* fekvő cellák átlagos hősziget intenzitásainak éves menete a délelőtti (Terra) és esti (Terra) órákban

5.2.3. A XII. kerület keresztmetszeti vizsgálata

A hősziget térbeli eloszlását és időbeli változékonyságát együttesen a kerület megfelelő keresztmetszeti idősorainak felhasználásával is reprezentálhatjuk. Az elemzéseinkhez a magasabban fekvő, nyugati városperem felől egyre sűrűbb beépítésű cellákból álló keresztmetszetet (32. ábra) választottunk ki, amelyet vizsgálva jól szemléltethető a város központi része felé haladva növekvő hősziget-intenzitás.

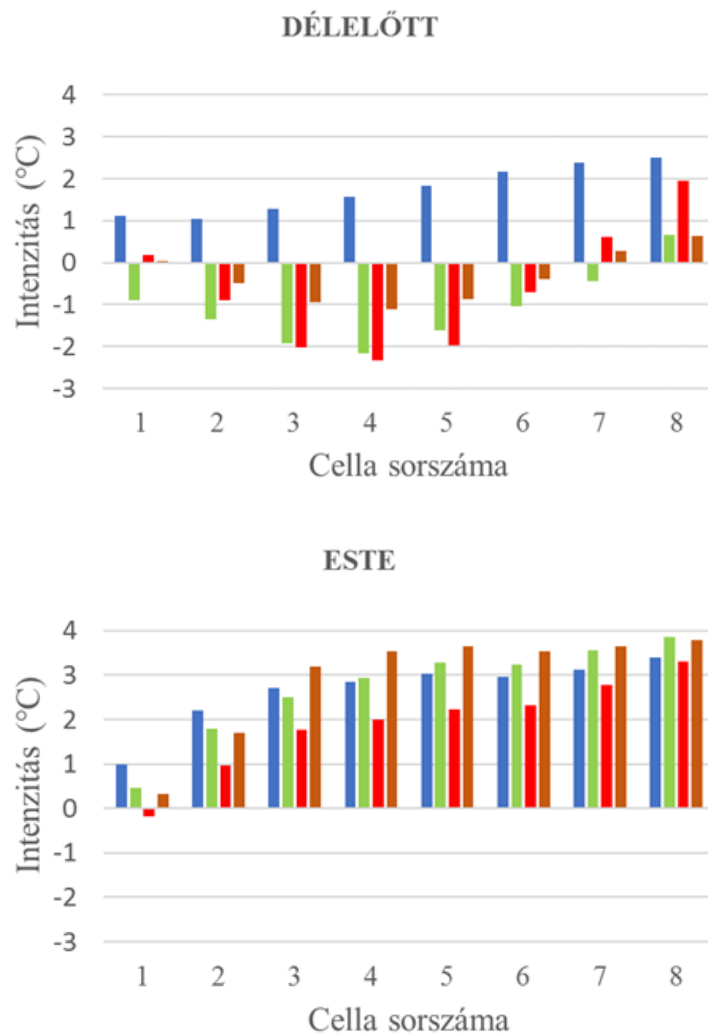


32. ábra: A vizsgálatainkhoz kiválasztott városi keresztmetszet (sorszámokkal) és az ezt alkotó egyes cellák tengerszint feletti magassága

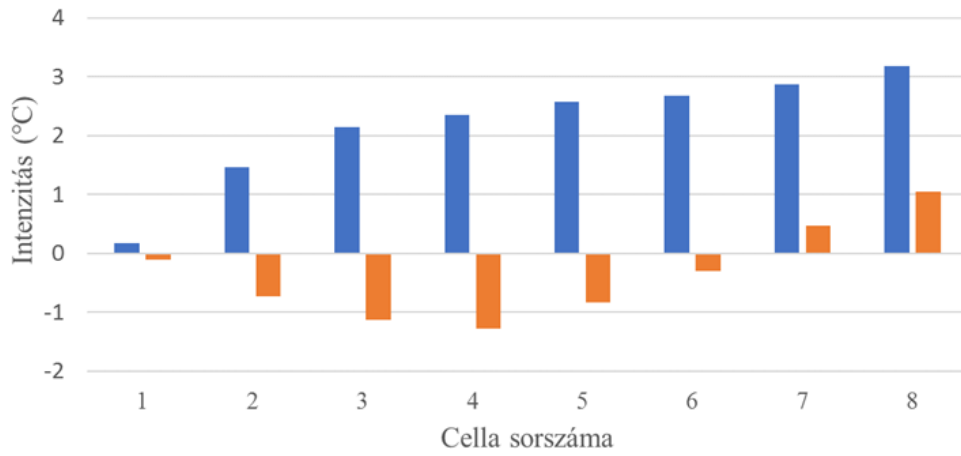
Az egyes keresztmetszeti cellák délelőtti és esti átlagértékeinek a 2001-2013 közötti időszakra vonatkozó maximumait évszakonként 33. ábra, a teljes évre pedig a 34. ábra mutatja. A téli hónapok délelőtti időszakát tekintve az átlagos hősziget intenzitás maximális értékei a keresztmetszet mentén a belváros felé haladva egyértelműen növekednek. A többi évszakban

és az év egészét egyben tekintve viszont a vizsgált keresztmetszetet alkotó középső cellákban az összefüggő erdőségek miatt jóval alacsonyabb átlagos intenzitási maximumok figyelhetők meg. A délelőtti órákban nyáron és ősszel a két-két belső cellában, míg tavasszal csak a sűrűn beépített városi cellában figyelhető meg pozitív hősziget intenzitási érték.

A vizsgált keresztmetszet mentén fekvő egyes cellák esti órákban mért átlagos intenzitásainak maximumát tekintve minden évszakra egyértelmű növekedés volt jellemző a belváros felé haladva.



33. ábra: Az átlagos hősziget-intenzitás maximális értékei a különböző évszakokban (tél, tavasz, nyár, ősz) délelőtt (Terra) és este (Terra) a kiválasztott keresztmetszet mentén 2001-2013 időszakban



34. ábra: Maximum hősziget-intenzitás *délelőtti (Terra)*, *esti (Terra)* éves átlagai a keresztmetszet mentén

6. Összefoglalás

E szakdolgozatban bemutattuk a városi hősziget hatás kialakító és módosító tényezőit, majd az előidézett hőmérsékleti anomáliákat és az azok háttérében álló energia-kicserélődési folyamatokat ismertettük. A termikus jellegzetességek vizsgálatát Budapest XII. kerületére végeztük el, ugyanis a kerület összefüggő erdőségeinek és hegyvidéki jellegének éghajlatra gyakorolt hatásai következtében e kerületben sajátos hőmérsékleti viszonyok alakulnak ki. Mivel a városi hősziget tér- és időbeli szerkezete a műholdas távérzékelési adatok segítségével tanulmányozható a legfinomabb felbontásban, a dolgozatban a termikus sajátosságok elemzéséhez az Aqua és a Terra műholdon elhelyezett MODIS szenzor általa naponta négy különböző időpontban készített mérésekből származtatott, 1 km²-es térbeli felbontású felszínhőmérsékleti (és felszíni hősziget-intenzitás) adatokat használtuk fel.

Vizsgálataink során először lehatároltuk a kerülethez tartozó 1 km × 1 km-es rácsellákat, majd nagyfelbontású műholdképek alapján három különböző felszintípushoz tartozó kategóriába (beépített, kertváros, zöldterületek) soroltunk minden kerülethez tartozó cellát.

A kerület hőmérsékleti anomáliáiról a különböző csoportba tartozó területek átlagos felszínhőmérsékleteinek különbségeivel, illetve a városkörnyéki átlagértékhez viszonyított értékeivel (hősziget-intenzitással) készítettünk részletes elemzést.

Az elemzések során kapott eredményeink alapján az alábbi általános következtetéseket vonhatjuk le:

- A Budai-hegyvidék hűvösebb területei és a beépített területek tavaszi-nyári időszak nappali óráiban mért átlagos intenzitási értékei között akár 8 °C különbség is megfigyelhető volt. A kerületen belüli jelentős anomáliaértéket az eredményezi, hogy a hegyvidéki területek felszínhőmérséklete a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél is alacsonyabb, míg a beépített területek felszínhőmérsékletében a városi területekre jellemző hőtöbblet észlelhető.
- A kerület hősziget-intenzitásának napszakoktól függő változását vizsgálva megállapítható, hogy a nappali órákban a kerület jelentős részére negatív, illetve az éjszakai órákban pozitív intenzitási értékek jellemzők. Tehát a kerületben az esti órákban nagyobb városfelszíni hősziget (SUHI) intenzitási érték jellemző, mint nappal.
- Az éjszakai órákban mért hősziget-intenzitást mutató görbék kisebb amplitúdójúak, mint a nappali órákban, mivel az éjszakai órák sugárzási egyenlegét csupán a

hosszúhullámú sugárzás határozza meg, mely nem mutat olyan nagy mértékű éven belüli változékonyságot, mint a rövidhullámú sugárzás.

- A beépített területek átlagos esti intenzitási értéke a legtöbb hónapban 3 °C körül ingadozott, a délelőtti órákban viszont gyengébb intenzitás volt jellemző. Az esti, erősebb hősziget-intenzitás részben annak köszönhető, hogy a mesterséges anyagok nagyobb hővezetőképessége és hőkapacitása következtében az energiaegyenlegben megnő a tárolt hő szerepe és a termikus tehetetlenségből adódóan a városi felszín a nappal folyamán elnyelt hőt az éjjeli órákban adja le. A délelőtti és esti intenzitás értékek között a legjelentősebb különbség a tavaszi és őszi hónapokban volt megfigyelhető, tehát átlagosan ezekben a hónapokban változott a városi területek intenzitása legjobban egy nap folyamán.

A beépített és az erdős területekhez tartozó kerületi egységeket összehasonlító vizsgálataink során a következőket állapítottuk meg:

- Az átlagos nappali intenzitás havi átlagainak éves menetét tekintve a beépített területeken júniusi maximum (2,5 °C) volt megfigyelhető, ezzel szemben az erdős területeken az e felszíntípushoz tartozó eltérő energiaegyenlegből adódóan a májusi minimumot követően egész év folyamán a városi területekhez képest jóval alacsonyabban alakult az egyes hónapok átlagos intenzitása. A két terület átlagos intenzitása közötti különbség a nyári hónapok nappali időszakában volt a legnagyobb (4 °C).
- Az erdős és beépített kategóriába tartozó területek között az évek során az esti órákban közel azonos intenzitás-különbség volt tapasztalható; a beépített területek intenzitása általában kb. 2 °C-kal meghaladta az erdőségek intenzitását. Ez azzal magyarázható, hogy a beépített területeken az éjszaka folyamán is maradt a szenzibilis hő, emellett a látens hő szerepe a zöld területekhez képest tovább csökkent. A két terület átlagos felszínhőmérsékletei között a legnagyobb különbség (3-4 °C) májustól júliusig volt megfigyelhető. Legkisebb eltérés (1 °C) novemberre volt jellemző mind a négy vizsgált napszakban.
- A két terület 2001 és 2013 közötti időszakára vonatkozó intenzitásértékei között a tavaszi-nyári időszakokra 2 °C eltérés volt jellemző. Áprilisban a délelőtti órákban a városi és a zöld területek felszínhőmérséklete egyaránt alacsonyabb volt, mint a városkörnyéki átlaghőmérséklet

Az eltérő tengerszint feletti magasságú területek átlagos felszínhőmérsékletének különbségeit vizsgálva, a jelentősebb domborzati hatás a délutáni órákban, leginkább májustól júliusig (3-4 °C) volt tapasztalható. Ehhez hasonló mértékű hőmérsékleti különbség volt megfigyelhető az erdővel borított és a beépített területek között is az említett hónapokban. Az alacsonyabban fekvő területek havi átlagos hősziget-intenzitásai általában pozitív értéket vettek fel, míg a magasabban fekvő területek felszínhőmérséklete minden évben alacsonyabb volt a városkörnyéki átlaghőmérsékletnél. A két különböző magasságban fekvő terület között az esti órákban közel azonos (1 °C), a délelőtti órákra télen kisebb, illetve nyáron nagyobb intenzitás-különbség volt jellemző a rövidhullámú sugárzás évi menetéhez hasonlóan.

A XII. kerületről keresztmetszeti vizsgálat is készült, mely során a kapott eredmények azt jelzik, hogy az egyes cellák esti órákban mért átlagos hősziget-intenzitásainak maximumai a belváros felé haladva egyértelműen növekednek.

Szakedolgozatom vizsgálati eredményei alapján láthatjuk, hogy a növényzet és a topográfia módosító hatásának milyen jelentős szerepet tulajdoníthatunk egy város klímájának kialakulásában. Későbbi céljaim közt szerepel vizsgálataim kiterjesztése Budapest többi kerületére, ahol a lokális vagy mikroskálájú módosító hatások feltárásával részletesebb képet kapunk Budapest hőszigetének térbeli szerkezetéről.

Köszönetnyilvánítás

A műholdas felszínhőmérsékleti adatbázis előállítására és rendelkezésre bocsátására az amerikai NASA-nak köszönhető, melyhez a Földfelszíni Megfigyelőrendszer Adatközpontján keresztül jutottunk hozzá. A dolgozat keretében végzett kutatásokat támogatta a FuturICT.hu TÁMOP 4.2.2.C-11/1/KONV-2012-0013 kutatási pályázat és az AGRÁRKLIMA2 projekt (VKSZ_12-1-2013-0001).

Köszönetem szeretném kifejezni Dr. Pongrácz Ritának, aki a gyakori konzultációk során hasznos tanácsokkal segítette munkámat. Továbbá köszönet illeti Soósné Dr. Dezső Zsuzsannát, aki szakmai észrevételekkel, illetve adatokkal és a témához kapcsolódó ábrákkal látott el. Külön köszönettel tartozom Dr. Breuer Hajnalkának a programozási feladatok megoldásában nyújtott segítségéért. Végül, de nem utolsó sorban hálával tartozom édesanyámnak, aki mindvégig lelkesített és támogatott a dolgozat megírásában.

Irodalomjegyzék

- Bacsó N., 1958: Budapest és környékének éghajlata. In: Budapest természeti képe (szerk.: Pécsi M.), Akadémiai Kiadó, Budapest. 355-417.
- Baranka Gy. 1999. Near surface ozone concentration evaluation and prediction in Budapest. *Időjárás*, 103, 107-121.
- Bartholy J., Pongrácz R., Lelovics E., Dezső Zs., 2009: Comparison of urban heat island effect using ground-based and satellite measurements. *Acta Climatologica et Chorologica Universitatis Szegediensis* 42–43, 7–15.
- Barta B., 2007: A Kékköves-hegy Természetvédelmi Terület. *Hegyvidék* 37. (10) <http://www.hegyvidekujzag.eu/archivum/archivum-2007-xxxvii/kissvabhegy>
- Berkes Z., 1947: A csapadék eloszlása Budapest területén. *Időjárás*, 51, 105-111.
- BFÖ, 2006: Budapest zöldfelületi-rendszerének fejlesztési koncepciója és programja. Budapest Fővárosi Önkormányzat, Budapest.
- BFÖ, 2011: Budapest Városfejlesztési Koncepciója – Helyzetelemzés. Budapest Fővárosi Önkormányzat, Budapest.290p.
- BHÖ, 2008: Integrált Városfejlesztési Stratégia, CompArt Stúdió Tervező Kft., Budapest.
- BHÖ, 2011: Környezetvédelmi Programja 2011-2016 évekre. Budapest XII. kerület Hegyvidéki Önkormányzat, Budapest. <http://www.hegyvidek.hu/download.php?docID=4797>
- Bornstein R. D., Johnson D. S., 1977: Urban-rural wind velocity differences. *Atmospheric Environment*, 11, 597-604.
- Carlson T. N., Augustine J. A., Boland F. E., 1977: Potential application of satellite temperature measurements in the analysis of land use over urban areas. *Bulletin American Meteorological Society*, 58, 1301-1303.
- Christen A., Vogt R., 2004: Energy and radiation balance of a Central European City. *International Journal of Climatology*, 24, 1395–1421.
- Conrads L. A., van der Hage J. C. H., 1971: A new method of air-temperature measurement in urban climatological studies. *Atmospheric Environment*, 5, 629–635
- Dezső Zs., 2000: Budapest szélklímájának és potenciális környezeti hatásainak elemzése. *Légekör* 45, 29-34.
- Dezső Zs., 2002: A városi hősziget vizsgálata Magyarország nagyvárosaiban az újgenerációs TERRA/MODIS műholdképek felhasználásával. Szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszék, Budapest. 77p.
- Dezső Zs., Bartholy, J. and Pongrácz, R., 2005: Satellite-based analysis of the urban heat island effect. *Időjárás* 109, 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. 112p.
- Dezső Zs., Bartholy J., Pongrácz R., Lelovics E.,2012: Városi hősziget vizsgálatok műholdas és állomási mérések alapján. *Légekör*, 57, 170-173.
- Djen S. C., Jingchun Z.,Lin W., 1994: Solar radiation and surface temperature in Shanghai City and their relation to Urban Heat Island intensity. *Atmospheric Environment*, 28, 2119-2127.
- ENSZ, 2014: World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights (ST/ESA/SER.A/352)
- Gábor P., Jombach S., 2008: A zöldfelület intenzitás és a városi hősziget jelenségének összefüggései Budapesten. *Falu-Város –Régió*, 2008/1, 31-36.
- Gál T, Unger J., 2013: Theoretical and real solar energy gain on roofs in a densely built urban area with trees. *International Review of Applied Sciences and Engineering* 4, 1, 13-20.
- Grimmond C. S. B, Souch C., Hubble M. D., 1996: Influence of tree cover on summertime surface energy balance fluxes, San Gabriel Valley, Los Angeles. *Climate Research*, 6, 45-57.

- Grimmond C. S. B., Blackett M., Best M. J., Barlow J., Baik J-J., Belcher S. E., Bohnenstengel S. I., Calmet I., Chen F., Dandou A., Fortuniak K., Gouvea M. L., Hamdi R., Hendry M., Kawai T., Kawamoto Y., Kondo H., Krayenhoff E. S., Lee S-H., Loridan T., Martilli A., Masson V., Miao S., Oleson K., Pigeon G., Porson A., Ryu Y-H., Salamanca F., Shashua-Bar L., Steeneveld G-J., Tombrou M., Voogt J., Young D., Zhang N., 2010: The International Urban Energy Balance Models Comparison Project: First Results from Phase 1. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49, 1268–1292.
- Gulyás A., Matzarakis A., 2009: Seasonal and spatial distribution of physiologically equivalent temperature (PET) index in Hungary. *Időjárás*, 113, 221-231.
- Hoffmann P., Schlünzen K. H., Rosenhagen G., 2009: Observational study of the urban heat island and the urban impact on precipitation of Hamburg. *The seventh International Conference on Urban Climate*, Yokohama, Japan.
- Howard L. 1818: *Climate of London deduced from meteorological observations, made at different places in the neighbourhood of the metropolis*. London. 377.
- Izsák É., Probáld F., 2007: *Klimatikus környezet és városfejlesztés Budapesten*. Települési Környezet Konferencia, Debrecen.
- Jombach S., Ongjerth R., Gábor P., 2007: A biológiai aktivitás változása Budapesten és a Budapesti Agglomerációban 1990-2005 között. *4D: Tájépítészeti és Kertművészeti Folyóirat*, 5, 21-28.
- Kern A., Bartholy J., Pongrácz R., 2005: Az ELTE Környezetfizikai Tanszékcsoport műholdvevő állomása. *Légkör*, 50, 18-21.
- Klysik K., Fortuniak K., 1999: Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Łódź, Poland. *Atmospheric Environment*, 33, 3885–3895.
- Kovács A., Németh Á., 2012: Tendences and differences in human thermal comfort in distinct urban areas in Budapest, Hungary. *Acta Climatologica et Chorologica Universitatis Szegediensis*, 46, 115-124.
- Kristóf G., Rácz N., Bányai T., Gál T., Unger J. Weidinger T., 2006: A városi hősziget által generált konvekció modellezése általános célú áramlástanai szoftverrel–példaként egy szegedi alkalmazással. III. Magyar Földrajzi Konferencia. Budapest.
- KSH, 2011: 2011. évi népszámlálás. Központi Statisztikai Hivatal, Budapest. <http://www.ksh.hu>
- KSH, 2014a: Magyarország közigazgatási helynévkönyve 2014. január 1. Központi Statisztikai Hivatal, Budapest <http://www.ksh.hu>
- KSH, 2014b: Néesség, népmozgalom. Budapest, 2014. http://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_wnt001b.html
- KTSZ, 2014: Rendkívüli időjárási jelenségek - klímabarát válaszok. Klímabarát Települések Szövetsége, Budapest.
- Landsberg H. E., 1981: *City Climate*. In: *General Climatology*,3 (szerk.: Landsberg H. E.). Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam-Oxford-New York.299-334.
- Lorenz D., 1962: Messungen der Bodenoberflächentemperatur vom Hubschrauber aus. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, 11, 29.
- Lelovics E., Pongrácz R., Bartholy J., Dezső Zs., 2011: Budapesti városi hősziget elemzése: műholdas és felszíni mérések összehasonlítása. *Légkör* 56, 55–59.
- Lelovics E., Pongrácz R., Bartholy J., Dezső Zs., 2012: A budapesti városi hősziget hatás elemzése műholdas és felszíni mérések alapján. VI. Magyar Földrajzi Konferencia, 530-537.
- Lindsey R., Herring D., 2002: MODIS. Goddard Space Flight Center, Earth Observing System Project Science Office, Greenbelt. 26p. http://modis.gsfc.nasa.gov/./media/modis_brochure.pdf
- Marosi S., Szilárd J. 1959: Budapest éghajlata. In: *Budapest természeti földrajza* (szerk.: Pécsi M.). Akadémiai Kiadó, Budapest.197-241.
- Matson M., McClain E. P., McGinnis D. F. Jr., Pritchard J. A., 1978: Satellite Detection of Urban Heat Islands. *Monthly Weather Review*, 106, 1725-1734.

- Mészáros E., M. Nagy Á., 1965: Budapest légszennyezettség hatásának kiterjedése. *Időjárás*, 69, 291-293.
- Mórik J., 1961: Budapest levegőjének szennyezettsége. *Településtudományi Közlemények*, 13, 33-49.
- NASA, 1999: Science writers' guide to Terra. NASA Goddard Space Flight Center, Earth Observing System Project Science Office, Greenbelt, 27p.
- NASA, 2002: Science writers' guide to Aqua. NASA Goddard Space Flight Center, Earth Observing System Project Science Office, Greenbelt, 40p.
- NASA, 2006: Earth Science Reference Handbook. National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C. 277p.
- Nunez M., Oke T. R., 1977: The Energy Balance of an Urban Canyon. *Journal of Applied Meteorology* 16, 11-19.
- Oke T. R., 1973: City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* 7, 769-779.
- Oke T. R., Maxwell G.B., 1975: Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver. *Atmospheric Environment*, 9, 191-200.
- Oke T. R., 1978: *Boundary Layer Climates*. Methuen & Co Ltd., London-New York. 373p.
- Oke T. R., 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, 1-24.
- Oke T. R., 1989: The micrometeorology of the urban forest. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B* 324, 335-349.
- Oke T. R., 2004: Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. Instruments and observing methods report No. 81, WMO
- Péczely Gy., 1962: A nagyváros által keltett helyi szélrendszer Budapesten. *Időjárás* 66, 364-370
- Pongrácz R., Bartholy J., Dezső Zs., 2006a: A városi hősziget hatás elemzése közép-európai nagyvárosokra műholdas mérések alapján. III. Magyar Földrajzi Konferencia, Budapest.
- Pongrácz R., Bartholy J., Dezső Zs., 2006b: Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis. *Advances in Space Research*, 37, 2191-2196.
- Pongrácz R., Bartholy J., Dezső Zs., 2007: Thermal structure of large central European cities using remotely sensed data. In: Štrelcová, K., Škvarenina, J. & Blaženc, M. (szerk.): "BIOCLIMATOLOGY AND NATURAL HAZARDS" International Scientific Conference, Poľana nad Detvou, Szlovákia. ISBN 978-80-228-17-60-8
- 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, 95-99.
- Pongrácz R., Bartholy J., Lelovics E., Dezső Zs., 2011. Analysis of the urban heat island effect – comparison of ground-based and remotely sensed temperature observations. 91st AMS Annual Meeting. Seattle, WA. Paper 163. <http://ams.confex.com/ams/91Annual/webprogram/Manuscript/Paper185840/PR-et-al-163.pdf>
- Pongrácz R., Bartholy J., Dezső Zs., Gelybó Gy., Kern A., Radics K., 2013: Alkalmazott és városklimatológia. Eötvös Loránd Tudományegyetem. http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/alkalmazott_es_varosklimatologia/index.html
- Probáld F., 1974: Budapest városklimája. Akadémiai Kiadó, Budapest. 126p.
- Rao P. K., 1972: Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 53, 647- 648.
- Réthly A., 1947: Budapest éghajlata. Rheuma- és Fürdőkutató Intézet, Budapest.
- Spronken-Smith R. A., Oke T. R., Lowry W. P., 2000: Advection and the surface energy balance across an irrigated urban park. *International Journal of Climatology*, 20, 1033-1047.
- Szegedi S., Gyarmati R., 2009: Impacts of urban green spaces on the spatila structure of urban heat island in Debrecen and different sized settlements in its neighbourhood. *Acta Climatologica et Chorologica Universitatis Szegediensis*, 42-43, 151-158.

- Szűcs J., 2011: Városi légszennyezettség vizsgálata terjedési modell alkalmazásával. *Légekör*, 56, 65-68.
- Thirring G., 1900: Budapest környéke. Magyar Turista-egyesület Budapesti Osztálya, Budapest. 431p.
- Unger J., Gulyás Á., 2000: A városi vízmérleg jellemzői. *Légekör*, 45, 19-23.
- Unger J., 1995: Szeged városklímájának bioklimatológiai értékelése. *Légekör* 40, 29-33.
- Unger J., Sümeghy Z., 2002: Környezeti klimatológia, Szegedi Tudományegyetem Természettudományi Kar, Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék, Szeged. 202p.
- Unger J., 2011: Városklíma – hősziget – alföldi városok. In: Rakonczai J. (szerk.): Környezeti változások és az Alföld. Nagyalföld Alapítvány Kötetek 7. (ISBN 978-963 85437 8 3) Békéscsaba. 245-256.
- USGS, 1993: Digital Elevation Models – Data User Guide 5. Reston, Virginia.
- USGS, 1996: GTOPO30 Documentation. <https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30>
- Voogt J. A., Oke T. R., 2003: Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86, 370–384.
- Yuan C., Ng E., Norford L. K., 2014: Improving air quality in high-density cities by understanding the relationship between air pollutant dispersion and urban morphologies. *Building and Environment*, 71, 245-258.