

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Városklimatológiai karakterisztikák vizsgálata Budapestre Landsat műholdképek alapján



Diplomamunka

Készítette:

Molnár Gergely

Meteorológia MSc II. évfolyam, éghajlatkutató szakirány

Témavezetők:

Dr. Pongrácz Rita, ELTE Meteorológiai Tanszék

Soósné Dr. Dezső Zsuzsanna, ELTE Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2015.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
3. A Normalizált Különböző Vegetációs Index	9
4. A Landsat műholdcsalád.....	11
5. Módszertan	13
6. Eredmények	18
6.1 A vizsgálat helyszínének és időpontjainak jellemzése.....	18
6.2 Az NDVI térbeli eloszlása.....	20
6.3 A felszínhőmérséklet térbeli eloszlása	25
6.4 A felszínhőmérséklet és az NDVI kapcsolatának jellemzése.....	32
7. Összefoglalás	48
Irodalomjegyzék	50
Internetes hivatkozások	52
Köszönetnyilvánítás.....	53
Függelék	53

1. Bevezetés

A település – mint mesterséges közeg – a felszínborítottság jellegében, az emberi beavatkozások intenzitásában jelentősen különbözik az őt körülvevő természetes környezettől. Ez a különбözőség a meteorológiai állapothatározókban (hőmérséklet, csapadék, szélsébség stb.) is megjelenik, ezért beszélhetünk városi éghajlatról. A városklíma a nagyfokú beépítettség és az antropogén hő- és nyomanyag-kibocsátás miatt kialakuló energiatöbblet eredménye. Kutatások szerint e lokális hatás annál határozottabb, minél nagyobb a település mérete, lakosainak száma. Ennélfogva az 1,7 milliós népességgel és 525 km²-es területtel rendelkező Budapest esetében is jól tanulmányozhatók a helyi éghajlati viszonyok.

A fővárosi meteorológiai mérőállomások száma és térbeli elhelyezkedése miatt az in-situ mérések felhasználása a városklíma kutatásokban korlátozott (*Lelovics et al.*, 2011), így a részletes elemzésekhez nagyfelbontású modellekre és/vagy különböző műhold-produktumokra van szükség. E dolgozat keretében – az utóbbi lehetőséget választva – az 1999 óta működő Landsat 7 műhold ún. ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus – Továbbfejlesztett Tematikus Térképező) szenzorának 30 m és 60 m felbontású méréseit alkalmaztuk vizsgálatainkhoz. Az Amerikai Egyesült Államok Geológiai Szolgálatának weboldaláról letölthető nyers képek előfeldolgozása után a vörös és a közeli infravörös csatornák reflektanciáinak megfelelő kombinációjával kiszámítottuk a vegetációt jól jellemző NDVI-t (Normalized Difference Vegetation Index – Normalizált Különbséges Vegetációs Index). E paraméter származtatásával a felszín emisszivitását is meghatároztuk, melynek ismerete nélkülözhetetlen a vizsgált terület felszínhőmérsékletének megadásához. Minthogy a nyári félévben, csekély mennyiségű felhőzet mellett a legkifejezettebb a felszínhőmérsékleten alapuló városi hatás Budapesten (*Dezső et al.*, 2005), ezért a 2011-es, a 2013-as és a 2014-es évek ezen évszakából kiválasztott, 10%-nál kisebb felhőborítottsággal jellemezhető műholdképek alapján végeztük elemzéseinket. Előállítottuk a jellemző mennyiségek (NDVI, felszínhőmérséklet) főbb statisztikai mutatóit (számítási közép, szórás, korrelációs együttható). Emellett fontosnak tartottuk, hogy néhány sajátos felszínborítottsággal rendelkező részt elkülönítsünk (pl. parkok, sűrűn beépített környezet), és ezekre egyenként meghatározzuk a két változó közötti kapcsolatot leíró regressziós egyenletet. Ez a módszer lehetőséget biztosít a vegetáció és a felszínhőmérséklet viszonyának egzakt tanulmányozására.

2. A városi környezet jellemzése

A városok fontos szerepet töltenek be a civilizációnkban, ugyanis életteret, lakóhelyet biztosítanak az ott élő polgárok számára. A települések száma a történelem során folyamatosan változott, ugyanakkor mindig is jó indikátorai voltak az egyes korok és nemzetek fejlettségének. Nem véletlen, hogy az ipari forradalmak okozta gazdasági fellendülés a városok számának markáns növekedését hozta. Ezt a folyamatot nevezzük urbanizációnak. Míg az 1800-as évek elején a Föld népességének mindössze 3 százaléka élt városokban, addig mára ez az arány meghaladja az 50 %-ot (kb. 3,5 milliárd fő). A becslések (pl. ENSZ, 2013) azt mutatják, hogy ez a tendencia tovább fog folytatódni.

Az urbanizáció a társadalmi vonatkozások mellett a környezeti viszonyokra is jelentős hatással van. A természetes felszínformákat (pl. növényzet, csupasz talaj) egyre nagyobb területen mesterséges anyagok váltják fel. Mindez a felszín fizikai tulajdonságainak drasztikus megváltozását eredményezi. Az utakat, épületeket alkotó beton, aszfalt vagy téglák kis albedóval, vízáteresztő-képességgel és érdekességgel, ugyanakkor nagy hőkapacitással rendelkeznek. Ezen anyagi jellemzők két fontos következménnyel járnak: egyrészt a településeken hőenergia-többlet alakul ki a természetes közeghez képest, másrészt a csapadékból származó víz nem képes a talaj nedvességtartalmát (és ezzel a párolgást) növelni, hanem közvetlenül lefolyik a csatornahálózatba, ami a levegő evaporációs hűtését akadályozza. E két hatás révén jön létre a városokban az ún. *városi hősziget jelenség*.

A hősziget jelenség során hőmérséklet-különbség alakul ki a belvárosi (T_u) és a vidéki (T_r) területek között (Landsberg, 1981), melynek számszerűsítésére a ΔT hősziget-intenzitást (UHI – Urban Heat Island Intensity) vezették be:

$$\Delta T = T_u - T_r. \quad (1)$$

Az UHI-t a város mérete, népessége, földrajzi elhelyezkedése, valamint az aktuális időjárási helyzet egyaránt befolyásolja. Van Hove et al. (2011) tanulmánya szerint a maximális hősziget-intenzitás (ΔT_{max}) és a népesség (P) között európai városokra a következő összefüggés adható meg:

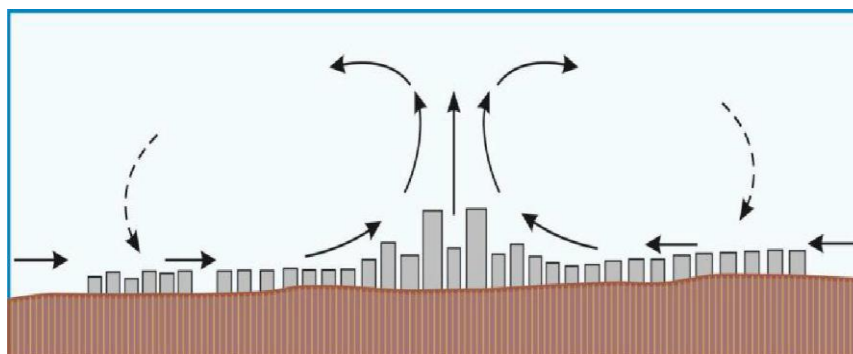
$$\Delta T_{max} = 2,93 \cdot \lg(P) - 11,95. \quad (2)$$

A (2) képletet felhasználva Budapestre 6,3 °C-ot, Szegedre 3,4 °C-ot kaphatunk. A legnagyobb értékek szélcsendes, felhő- és csapadékmentes időjárás esetén alakulhatnak ki, azaz különösen anticiklonális szinoptikus helyzetben intenzív a városi hatás.

A hősziget-intenzitást napi és éves menettel jellemezhetjük. A legerősebb UHI az éjszaka elején tapasztalható, hiszen ekkor a mesterséges felszínben tárolódott hő kisugárzódik, ami nem teszi lehetővé a levegő gyorsabb lehűlését (*Lopes et al.*, 2001). A maximális hőmérséklet-különbség leggyakrabban naplemente után pár órával következik be. Délelőtt – amikor kisebb szögben érik a napsugarak a felszínre – az épületek árnyékoló hatása miatt negatív hősziget is létrejöhet. Ezt hívja a szakirodalom ún. *cross-over* jelenségnek (*Duckworth és Sandberg*, 1954). A napsugárzás beesési szögének növekedésével újra pozitív intenzitást tapasztalhatunk, melynek amplitúdója a kora délutáni óráktól kezdve fokozatosan csökken (*Probáld*, 1974). Az évi menet kapcsán kijelenthető, hogy kiváltképpen a nyári, illetve a téli hónapokban legerősebb a hősziget. Ezt erősíti meg *Dezső et al.* (2012) munkája Budapestre, melyben az Aqua/Terra műholdak MODIS szenzorának megfigyeléseit, valamint állomási méréseket hasonlítottak össze a 2001 és 2010 közötti időszakokra. Az eredmények szerint a felszínhőmérséklet intenzitása nyáron, nappal meghaladhatja a 6 °C-ot. Rögtön ki kell emelnünk, hogy a hagyományos (2 méteren mért) hőmérséklet és a felszínhőmérséklet eltérő viselkedést mutat a városokban. Ez alapján meg kell különböztetnünk a „hagyományos” városi hőszigetet a felszíni városi hőszigettől (SUHI – Surface Urban Heat Island). Nappal ugyanis a felszín hőmérsékletének menete sokkal nagyobb fluktuációval rendelkezik (a felszín sokfélesége miatt), mint a léghőmérsékleté, éjszaka viszont mindkét állapotváltozó hasonló lefutást mutat. Ez tehát azt jelenti, hogy a SUHI térben és időben is igen változatos képet mutathat. Jelentős élettani következményekkel járhat, hogy a klímaváltozás következtében a hőhullámok száma és időtartama is nagy valószínűséggel emelkedni fog a Kárpát-medencében (*Bartholy et al.*, 2007), ezért a várostervezőknek és a települések lakóközösségének a hősziget mérséklésére és a környezeti viszonyokhoz való alkalmazkodásra kell törekedniük.

A települések speciális éghajlata nemcsak a hőmérséklet módosításában jelentkezik, hanem egyéb állapotváltozók esetében is eltéréseket okoz. Az épületek, gyárkémények, hidak akadályt képezhetnek a levegő szabad áramlásának, mely a megnövekedett felszíni érdességből származó súrlódáson keresztül az átlagos szélsősebesség csökkenéséhez vezet. A városok hőmérsékleti eloszlása horizontális nyomási gradienst hoz létre, ez pedig a nagyskalájú folyamatoktól független városi cirkulációt generál (1. ábra).

Ekkor a külső területek felől hűvös, nagyobb sűrűségű levegő áramlik a belváros irányába, ahol felmelegszik, és a száraz adiabata mentén kezd emelkedni. A felemelkedett levegő mintegy kompenzációs áramlásként a külváros felé advektálódik. A cirkuláció akkor a legerősebb, ha a hősziget-intenzitás maximális.



1. ábra: A városi cirkuláció sematikus képe (Emeis, 2011).

A városi cirkuláció hatásfokát növelik az ún. ventilációs (átszellőzési) csatornák, melyek akadálymentes beáramlást biztosítanak a vidéki eredetű, hűvös levegőnek. Ilyen átszellőzési csatornának tekinthetjük Budapesten a Dunát vagy Hűvösvölgyet. *Oke és Hannel* (1970) alapján számszerűsíthető (adott P népességszám mellett) egy olyan kritikus szélsősebesség (v), amely mellett megszűnik a hőmérséklet-különbség és a városi cirkuláció is:

$$v = 3,41 \cdot \lg(P) - 11,16. \quad (3)$$

Eszerint Budapesten és Szegeden a kritikus szélsősebesség rendre $10,1 \text{ m s}^{-1}$, illetve $6,7 \text{ m s}^{-1}$.

A csapadékból származó vízmennyiség a hidrológiai mérleg legjelentősebb forrástagja. Biztosítja a növényzet számára a fotoszintézishez nélkülözhetetlen vizet, növeli a talaj nedvességtartalmát, és ezzel fokozza a párolgást. A városokban lehullott csapadékvíz gyorsan lefolyik a csatornarendszerbe, így a párolgás is jóval kisebb lesz, mint a vidéki területeken. A belső részek hőtöbblete és a városi cirkuláció elősegítheti a konvektív (záporos) csapadékok gyakoribbá válását. *Borstein és Lin* (2000) atlantai hőmérséklet- és szélmerések alapján próbált magyarázatot találni az 1996. július 26. és augusztus 3. közötti időszak heves csapadéktevékenységére. Megállapították, hogy a gyenge hősziget-intenzitás mellett a szélmező helyi konvergenciája okozhatta az intenzív csapadékhullást. *Jaenicke* (1988) munkája szerint a városi levegő kb. tízszer több aeroszol részecskét tartalmaz, mint a vidéki „háttérlevegő”. Ezek elsődleges forrásai a fűtés, az ipar és a

közlekedés. *Halfon et al.* (2009) arra hívja fel a figyelmet, hogy a részecskék számának növekedése nem von maga után több csapadékot, ugyanis csupán a vízben jól oldódó anyagok tudnak kondenzációs magvakká alakulni. Sokszor csak kis cseppek keletkeznek, melyek ki sem hullnak (hiszen nem érik el a nukleáció során a kritikus méretet), hanem megmaradnak felhőelemként.

A gépjárművek számának növekedése, az ipari folyamatok és az emberi energia-felhasználás (fűtés, légkondicionálás) azt eredményezte, hogy bizonyos légköri nyomgázok (pl. NO, NO₂, N₂O, CO, CO₂, SO₂) és szilárd részecskék koncentrációja megnövekedett. *Páldy és Bobvos* (2011) felmérése szerint (1. táblázat) a szennyezőanyagok legjelentősebb forrásai az ipar és a közlekedés.

1. táblázat: A városi szennyezőanyagok forrásai Budapesten 2003-ban (tonna év⁻¹)
(*Páldy és Bobvos*, 2011).

Nyomgáz	Közlekedés	Fűtés	Ipar	Egyéb
SO ₂	275	625	1647	60
NO _x	98227	2608	3344	1529
PM ₁₀	1854	379	320	5

A városi légszennyezettség nemcsak a levegő minőségének romlásához vezet, hanem komoly egészségügyi kockázatokkal is jár. A PM_{2,5} (a 2,5 µm-nél kisebb átmérőjű szilárd anyagok) átlagos koncentrációja (33,7 µg m⁻³) alapján Budapest a második legszennyezettebb az európai nagyvárosok közül (*Páldy és Bobvos*, 2011). Az igen finom por a belégzés után eljut a tüdőbe, ott lerakódik, s ezzel fokozza a légúti betegségek kialakulását. Az Európai Környezetvédelmi Ügynökség (EEA – European Environmental Agency) 2011-es kimutatásából kiderült, hogy a PM_{2,5} a 30 év feletti fővárosi lakosság esetében átlagosan 19,3 hónap élettartam-csökkenést okozhat.

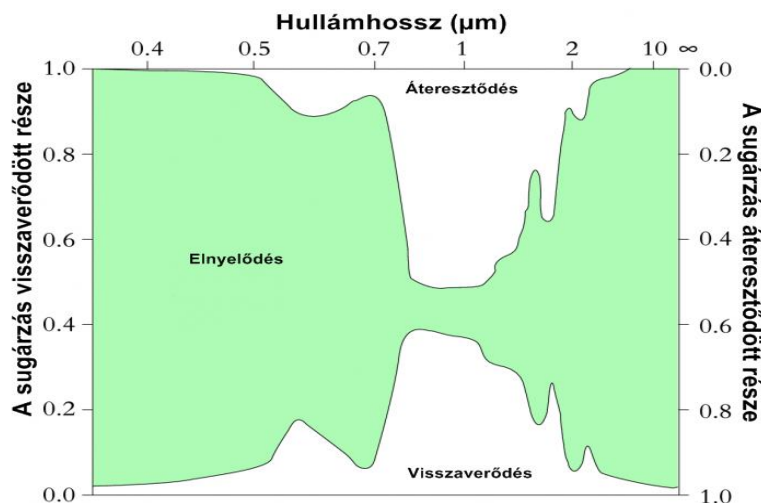
A légköri összetevők közül ki kell emelnünk az ózont, mely a légkör két tartományában, a troposzférában és a sztratoszférában is megtalálható. Az ózon erősen oxidatív gáz: köhögést, fejfájást okoz, irritálja a nyálkahártyát, csökkenti a növényzet produktivitását. A troposzférában való megjelenése főképpen a városokhoz kapcsolódik. A közlekedésből származó ún. prekursor anyagok (NO_x, CO, Illékony Szerves Vegyületek) fotokémiai reakciójaként keletkezik. Nyelői szintén kémiai átalakulások, mint például a belsőégésű motorokból származó nitrogén-monoxiddal történő reakció. Következésképpen az ózon koncentrációjának napi menete szoros kapcsolatot mutat a közlekedéssel: a reggeli csúcsforgalom idején veszi fel a minimumát, majd a besugárzás miatt kora délután adódik a maximuma, végül a délutáni forgalom-növekedés és a csökkenő besugárzás okán mennyisége fokozatosan csökkenni kezd. Advekciónak révén a legnagyobb koncentrációk nem a városok központjában, hanem az agglomerációban mérhetők.

A városi levegőszennyezés csökkentése alapvető fontosságú környezetünk és egészségünk megóvásához. Az intézkedés fogantatására helyi összefogásra van szükség. Lehetséges megoldásokként említhetjük a tömegközlekedés fejlesztését, a teherforgalom csökkentését, a P+R parkolók számának növelését vagy a kerékpárutak építését. E megoldások már számos európai nagyvárosban (London, Bécs, Berlin, Brüsszel stb.) pozitív változásokat idéztek elő (*Madarassy et al.*, 2013).

A településeken kialakuló hőtöbblet mérséklésének nélkülözhetetlen elemei a növények, melyek az árnyékoló hatásuk és az evapotranszspirációs folyamataik révén hozzájárulnak az emberek életterének komfortosabbá tételéhez (*Akbari et al.*, 1991). *Upmanis et al.* (1998) három göteborgi parkban (melyek kiterjedése: 3,4 ha, 3,6 ha és 156 ha) végzett mérések során megállapították, hogy a zöld terület kiterjedésének növelésével a hőmérséklet-különbség is emelkedik a park központjában és a környező utcákban felállított szenzorok között. Mindezek rávilágítanak arra, hogy a városokban a vegetáció mennyiségének és térbeli eloszlásának ismerete alapvető fontosságú. A mérséklés további eszközeinek tekinthetünk minden olyan anyagot, amely fizikai sajátosságaiban jobban hasonlít a természetes felszínhez, mint a beton vagy a bitumen. Ennek elérésére a tetők anyagának (növények telepítése) és színének megváltoztatása (sötétől világosra), a járdák vízáteresztő-képességének növelése, az épületek energiatakarékossá tétele hatékony eszköz lehet.

3. A Normalizált Különbséges Vegetációs Index

A vegetációs indexek segítségével hatékonyan leírható a növényzet sűrűsége, jellege és dinamikája. A közeli infravörös és vörös (látható) hullámhossz-tartományok között a beérkező sugárzás visszaverődésében nagy növekedés tapasztalható (2. ábra), ezt az „ugrást” igyekeznek a mutatók számszerűsíteni.



2. ábra: A különböző hullámhosszakra jellemző elnyelődés, visszaverődés és áteresztődés (Atwell et al., 1999).

Az is kitűnik, hogy a 0,4–0,7 μm-es sávban a sugárzás döntő része elnyelődik, ugyanakkor a levelek pigmentjei (klorofill) miatt a visszaverődésnek maximuma figyelhető meg a zöld spektrumnál (kb. 0,55 μm). A reflektancia értékekben tapasztalható éles emelkedés az egyes műholdprodukumokon is megmutatkozik: a vörös tartományban készült képeken a növényzettel borított területek sötét tónussal jelennek meg, míg közeli infravörösben világos árnyalatokkal.

A növényzet műholdas adatokkal történő jellemzésére használt egyik legelterjedtebb index a Rouse et al. (1973) által kidolgozott NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – Normalizált Különbséges Vegetációs Index):

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{RED} + \rho_{NIR}}, \quad (4)$$

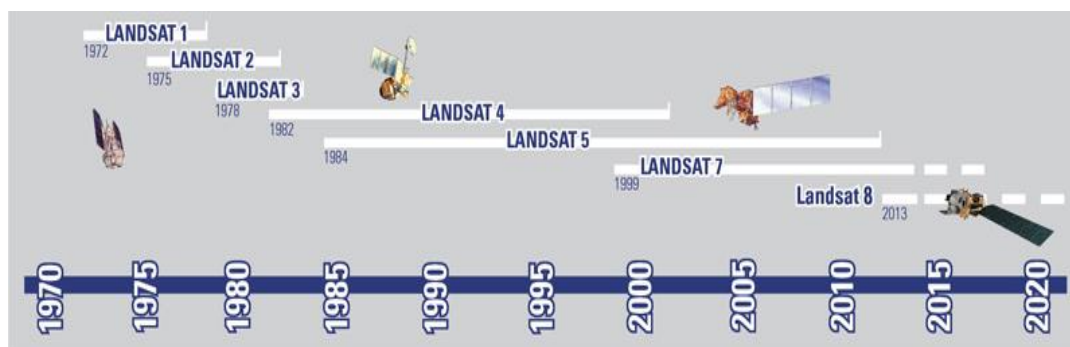
ahol ρ_{NIR} : az infravörös tartományban történő visszaverődés, ρ_{RED} : a vörös tartományban történő visszaverődés. Definíció alapján az NDVI -1 és 1 között változhat. Negatív számokat különböző vízfelületekre és sűrűn beépített városi környezetre

kaphatunk, 0 közeli értékek csupasz talajra utalhatnak, 1-hez közeledve pedig fokozódó növényborítottságra számíthatunk.

Az NDVI és a felszínhőmérséklet kapcsolatának műholdas elemzése széles körben megtalálható a szakirodalomban (*Mallick et al.*, 2008, *Alipour et al.*, 2011, *Senanayake et al.*, 2013). A vizsgálatok során meghatározzák a kijelölt terület felszínborítottságának jellegét, majd az egyes osztályok képpontjaira kiszámolják a két mennyiség közötti korrelációs együtthatót, végül felírják az összefüggést jellemző lineáris regressziós egyenletet. A korrelációs együtthatókkal a statisztikai kapcsolat iránya és erőssége jellemezhető, míg a regressziós egyenletekkel a városklíma-mérséklés szempontjából is értékes összefüggésekhez juthatunk.

4. A Landsat műholdcsalád

1960. április 1-jén bocsátották fel az első meteorológiai célt (is) szolgáló műholdat, a TIROS-1-et (Television InfraRed Observation Satellite – Televíziós Infravörös Megfigyelő Műhold), így ezt a dátumot tekintjük a műhold-meteorológia és a műholdas észlelések kezdetének. Az azóta eltelt mintegy 55 évben számos geostacionárius (pl. GOES) vagy kvázipoláris (pl. NOAA, MetOp) műhold végzett a légkörre és a felszínre vonatkozó méréseket. Kiemelt jelentőségű ezek közül a legrégebben működő Landsat műholdcsalád. Első tagját 1973. július 23-án (Landsat 1), míg a legutolsót (Landsat 8) 2013. február 11-én állították Föld körüli pályára (3. ábra).



3. ábra A Landsat műholdak időrendisége [1 – USGS Landsat weboldal].

Vizsgálatainkban az 1999. április 15-e óta működő Landsat 7 adatait használtuk fel (2. táblázat).

2. táblázat: A Landsat 7 pályaelemeinek jellemzői [1 – USGS Landsat weboldal].

Pályaelemek jellemzői	
A pálya típusa	Napszinkron
A pálya magassága	705 km
A pálya inklinációja	98,2°
Földkerülés időtartama	98,9 perc

A keringéshez szükséges energiát a napkövető tükrök és a két nikkél-kadmium elem biztosítja. A mozgást 4 pörgettyű, 3 égitestkövető antenna, nyomaték rúd, 1750 processzor, statikus Föld szenzor, momentummérő magnetométer és másodlagos (hidrazinnal működő) hajtómű segíti. A méréseket a nyolc sávban letapogató ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus – Továbbfejlesztett Tematikus Térképező) végzi, melynek főbb paramétereit a 3. táblázatban foglaltuk össze.

3. táblázat Az ETM+ szenzor által alkalmazott sávok alapvető tulajdonságai
[1– USGS Landsat weboldal].

Sáv sorszáma és neve	Hullámhossz-tartomány	Felbontás
1. Kék sáv	0,452–0,514 μm	30 m
2. Zöld sáv	0,519–0,601 μm	30 m
3. Vörös sáv	0,631–0,692 μm	30 m
4. Közeli infravörös sáv	0,772–0,898 μm	30 m
5. Közeli infravörös sáv	1,547–1,748 μm	30 m
6. Termális infravörös sáv	10,31–12,36 μm	60 m
7. Közepes infravörös sáv	2,065–2,346 μm	30 m
8. Pánkromatikus sáv	0,515–0,896 μm	15 m

A fedélzeti kalibrációt a Teljes Szoláris Apertúra Kalibrátor és a Részleges Szoláris Apertúra Kalibrátor, illetve két kalibrációs lámpa látja el.

2003. május 31-én a Landsat 7 ún. SLC (Scan Line Corrector – Letapogatási Sorjavító) eszköze meghibásodott, mely a műhold előrehaladását kompenzálta az ETM+ szenzor letapogatása idején. Az üzemzavar miatt a műholdképeken egymással párhuzamos, adatmentes vonalak jelentek meg, mindössze az ábrák középső része maradt hibátlan. Egyes becslések szerint (pl. Storey *et al.*, 2005) az SLC leállása 22%-os adatvesztést okoz minden egyes sávban, minden egyes időpontban.

5. Módszertan

A vizsgálatainknál felhasznált 4×8 műholdképet az Amerikai Egyesült Államok Geológiai Szolgálatának weboldaláról (<http://glovis.usgs.gov/>) érhattuk el. Az ingyenesen letölthető L1G szintű adatokat az USGS geometriailag és radiometriailag korrigálta, valamint georeferálta WGS84/UTM34 projekciót alkalmazva.

Az SLC műszer meghibásodása miatt hiányzó adatok pótlására számos eljárást dolgoztak ki (*Storey et al.*, 2005, *Zhang et al.*, 2007, *Zeng et al.*, 2013): a krigelés, a globális és lokális hisztogram összehasonlító, a súlyozott lineáris regressziót felhasználó vagy a háromszögeléses módszerek egyaránt alkalmazhatók. Az előfeldolgozás során a lokális hisztogram eljárást választottuk (*Storey et al.*, 2005), mely a gyakorlatban igen hatékonyan alkalmazható. A javításhoz két, azonos hullámhossz-tartomány méréseit ábrázoló műholdképre van szükségünk. Az ún. elsődleges képnek az SLC szenzor működészavara előtti időszakból (azaz 2003. május 31-e előttről) kell származnia, míg a javítandó ábra az általunk tanulmányozott időpontra vonatkozik. A lokális szó arra utal, hogy mindkét műholdképnél előre megadott kiterjedésű területekre vizsgálódunk. Ez 30 m-es felbontás esetén 19×19 képpont, míg a 60 m-es felbontású termális csatornánál 11×11 képpont. Először a két nyers ábra pixelértékeire (ezek ún. digitális számok – DN) kell kiszámítanunk a számtani közepeket [(5), (7)] és a szórásokat [(6), (8)]:

$$\mu_P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{elsődleges} DN_i, \quad (5)$$

$$\sigma_P = \frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (\text{elsődleges} DN_i - \mu_P)^2, \quad (6)$$

$$\mu_F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{javítandó} DN_i, \quad (7)$$

$$\sigma_F = \frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (\text{javítandó} DN_i - \mu_F)^2. \quad (8)$$

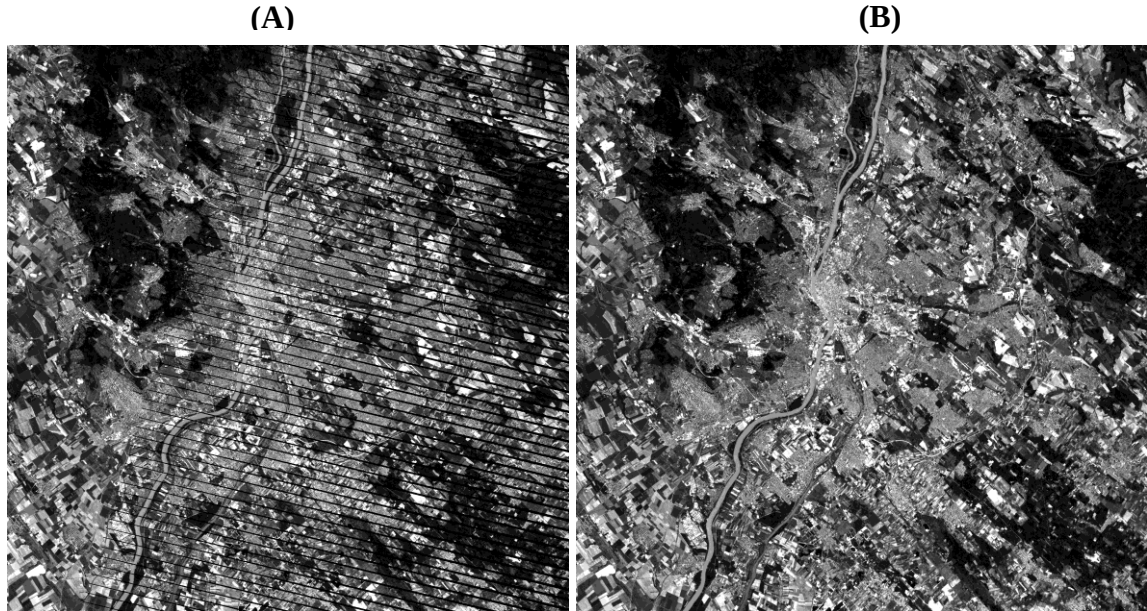
Ezután a növekedést (9) és a torzítottságot (10) kell meghatároznunk:

$$\text{növekedés} = \frac{\sigma_P}{\sigma_F}, \quad (9)$$

$$\text{torzítottság} = \mu_P - \mu_F \cdot \text{növekedés}. \quad (10)$$

E paraméterek felhasználásával – (11) alapján – megkapjuk a javított műholdkép (4. ábra) értékeit:

$$javítottDN = javítandóDN \cdot növekedés - torzítottság \quad (11)$$



4. ábra: A vörös sáv javítása előtti (A) és utáni (B) műholdkép Budapestre (2014.08.18., 09:30:53).

Meg kell jegyeznünk, hogy a műholdképeken megjelenő felhőzet csökkenti a módszer hatékonyságát. Ez ugyanakkor a mi esetünkben nem jelentett különösebb problémát, hiszen mindig kis felhőborítottságú (10% alatti) időpontokat tanulmányoztunk.

A következő fázisban a digitális számokat mérhető fizikai mennyiséggé, spektrális radianciává kell konvertálnunk [(12)-(13)-(14)] (Chandler *et al.*, 2009). Ehhez tudnunk kell, hogy a kezdeti nyers számok (Q) kalibrációjával megkapott 8 bites DN értékek 1 és 255 között változhatnak. Továbbá az utókalibrációval megállapítható elméleti spektrális radianciák maximumainak ($L_{max\lambda}$) és minimumainak ($L_{min\lambda}$) ismerete is alapvető fontosságú. Ezzel eljuthatunk a szükséges összefüggésekhez:

$$G = \frac{L_{max\lambda} - L_{min\lambda}}{DN_{max} - DN_{min}}, \quad (12)$$

$$B = L_{min\lambda} - G \cdot DN_{min}, \quad (13)$$

$$L_{\lambda} = G \cdot DN + B, \quad (14)$$

ahol L_λ : a spektrális radiancia [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$], $DN_{\max}$: a kalibrált maximális digitális szám, $DN_{\min}$: a kalibrált minimális digitális szám, $L_{\max\lambda}$: a $DN_{\max}$ -hoz tartozó spektrális radiancia [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$], $L_{\min\lambda}$: a $DN_{\min}$ -hez tartozó spektrális radiancia [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$], G : a sávspecifikus növekedési tényező [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$], B : a sávspecifikus torzítottsági tényező [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$].

Az NDVI származtatásához a vörös (0,631–0,692 μm) és a közeli infravörös (0,772–0,898 μm) sáv spektrális radianciáit reflektanciává (ρ_λ) kell átalakítanunk a következők szerint:

$$\rho_\lambda = \frac{\pi \cdot L_\lambda \cdot d^2}{ESUN_\lambda \cdot \sin \theta_s} \quad (15)$$

ahol d : a Nap–Föld távolság [csillagászati egységben], $ESUN_\lambda$: az átlagos szoláris irradiancia [$\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$], θ_s : a napmagasság szöge [fokban].

A műhold átvonulási időpontjára vonatkozó Nap–Föld távolság *Chandler et al.* (2009) műve alapján állt rendelkezésünkre, a napmagasság szögét pedig a metaadatokból olvastuk ki (a további lényeges információkat a 4. táblázat tartalmazza!).

4. táblázat: A reflektancia kiszámításához szükséges sávspecifikus paraméterek (*Chandler et al.*, 2009).

Sáv sorszáma	$L_{\min\lambda}$ [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$]	$L_{\max\lambda}$ [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$]	G [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$]	B [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$]	$ESUN_\lambda$ [$\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$]
1.	-6,2	191,6	0,778740	-6,98	1997
2.	-6,4	196,5	0,798819	-7,20	1812
3.	-5,0	152,9	0,621654	-5,62	1533
4.	-5,1	157,4	0,639764	-5,74	1039
5.	-1,0	31,06	0,126220	-1,13	230,8
6.	3,2	12,65	0,037205	3,16	–
7.	-0,35	10,80	0,043898	-0,39	84,90
Pánkromatikus	-4,7	158,3	0,641732	-5,34	1362

Fontos még megemlíteni, hogy a reflektancia a spektrális radianciánál jóval alkalmasabb mennyiség a különböző hullámhossz-tartományokba tartozó műholdképek összehasonlítására, hiszen a Nap–Föld távolság paraméteren keresztül jelentősen növeli az egybevetés pontosságát.

A visszaverődés alapján tehát a *Normalizált Különbséges Vegetációs Index* is előállítható az (4) összefüggés szerint. Láttuk, hogy az NDVI tipikus értékeihez különböző felszínborítottságú területek (pl. vízfelület, csupasz talaj, vegetáció stb.) rendelhetők. E karakterisztika módot ad az index és az anyagi minőségtől függő felszíni emisszivitás közötti kapcsolat felállítására. Az eljárás gyakorlati alkalmazhatósága hatékony eszközt

kínál a felszín emisszivitásának megadására, melynek ismerete elengedhetetlen a felszín-hőmérséklet kiszámításához (19). Az *NDVI Küszöbérték Módszer* (Sobrino és Raissouni, 2000) három kategóriát határoz meg az adott pixel és a talaj ($NDVI < NDVI_s$), a vegetáció ($NDVI > NDVI_v$) vagy a „vegyes terület” ($NDVI_v > NDVI > NDVI_s$) értékei között. Az egyes osztályokra a felszíni emisszivitás az alábbiak szerint írható fel:

$$\varepsilon_\lambda = \begin{cases} \varepsilon_{s\lambda}, & NDVI < NDVI_s \\ \varepsilon_{s\lambda} P_v + (\varepsilon_{v\lambda} - \varepsilon_{s\lambda}) P_v, & NDVI_s < NDVI < NDVI_v \\ \varepsilon_{v\lambda}, & NDVI_v < NDVI \end{cases} \quad (16)$$

A P_v tag a növényzet arányát fejezi ki a „vegyes területen” (Carlson és Ripley, 1997), melyre:

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \right)^2 \quad (17)$$

A definícióból következik, hogy ($NDVI = NDVI_v$) és ($NDVI = NDVI_s$) esetekben a P_v rendre 1-et és 0-t vesz fel.

Hibát követnénk el akkor, hogy ha a fenti (17) összefüggés alapján egy kategóriába vennénk a különböző talajtípusokat az egyes vízfelületekkel. Ezért a vízzel borított területekhez (amikor $NDVI < 0$) külön emisszivitást rendeltünk (ε_w). Vizsgálataink során a szakirodalomban fellelhető (Sobrino és Raissouni, 2000, Sobrino et al., 2008, Cristóbal et al., 2009) $NDVI_s = 0,2$, $NDVI_v = 0,5$, $\varepsilon_v = 0,99$, $\varepsilon_s = 0,7$, $\varepsilon_w = 0,98$ értékeket alkalmaztunk.

A felszínhőmérséklet térbeli eloszlásának ismeretében jól tanulmányozható a városokra jellemző hőtöbblet. Kiszámításához a termális infravörös sáv (10,31–12,36 μm) felhasználásával meg kell határoznunk a spektrális radianciát (14), majd ennek figyelembe vételével a fényességi hőmérsékletet is (T_B). (18) a Planck-függvény invertálásával állítható elő:

$$T_B = \frac{K_2}{\ln \left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1 \right)}, \quad (18)$$

ahol K_1 : az első kalibrációs állandó [$666,09 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu m^{-1}$], K_2 : a második kalibrációs állandó [$1282,71 \text{ K}$].

A felszínhőmérséklet (T_s) innen már könnyen származtatható:

$$T_s = \frac{T_B}{1 + \left(\lambda \cdot \frac{T_B}{\rho}\right) \ln \varepsilon}, \quad (19)$$

$$\rho = \frac{h \cdot c}{k}, \quad (20)$$

ahol λ : a kibocsátott sugárzás hullámhossza [m], ρ : a sugárzási állandó [$1,4386 \cdot 10^{-2}$ K m], h : a Planck-állandó [$6,63 \cdot 10^{-34}$ J s], c : a fény terjedési sebessége vákuumban [$3 \cdot 10^8$ m s⁻¹], k : a Boltzmann-állandó [$1,38 \cdot 10^{-23}$ J K⁻¹], ε : a felszín emisszivitása.

A felszín hőmérsékletének (y) és az NDVI (x) ismeretében a köztük lévő kapcsolat leírható a lineáris regresszió általános képletének alkalmazásával:

$$y = a \cdot x + b \quad (21)$$

Az a és b állandók az adatsorok átlagainak ($\bar{x}$, $\bar{y}$), várható értékeinek ($E[x]$, $E[y]$), szórásainak (σ_x , σ_y) és a korrelációjuk (r) ismeretében kiszámíthatók:

$$r = \frac{\sum_i (x_i - E[x]) \cdot (y_i - E[y])}{\sqrt{\sum_i (x_i - E[x])^2 \cdot \sum_i (y_i - E[y])^2}}, \quad (22)$$

$$a = r \cdot \frac{\sigma_y}{\sigma_x}, \quad (23)$$

$$b = \bar{y} - \bar{x} \cdot a. \quad (24)$$

A lineáris regressziók becslésének pontosságát az egyenletek abszolút hibájával [(25); *Absolute Error* – AE] és átlagos négyzetes hibájával [(26); *Mean Squared Error* – MSE] jellemeztük, melyek definíciója az y_i megfigyelt és az $\hat{y}_i$ becsült változók mellett:

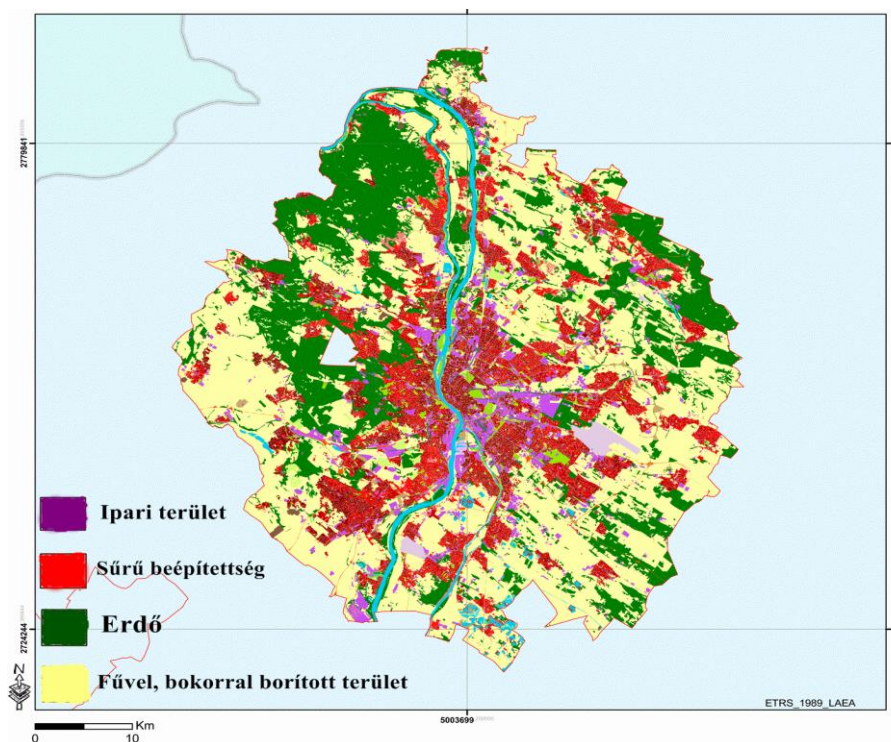
$$AE = \sum_i |y_i - \hat{y}_i|, \quad (25)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \cdot \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2. \quad (26)$$

6. Eredmények

6.1 A vizsgálat helyszínének és időpontjainak jellemzése

Magyarország fővárosa, Budapest a kelet-közép-európai térség egyik meghatározó gazdasági és kulturális központja. A területén áthaladó Duna folyó egy budai és egy pesti részre tagolja. Északról a Pilis és a Szentendrei-sziget, keletről a Gödöllői-dombság és a Pesti-síkság, délről a Csepel-sziget és a Mezőföld, nyugatról pedig a Tétényi-fennsík és a Budai-hegység határolja. *Péczely* (1979) a mérsékelt övben elhelyezkedő Budapestet a víz- és hőellátottság alapján mérsékeltén hűvös–száraz éghajlattal jellemezte. Az 1971–2000-es időszak alapján az évi középhőmérséklete 11,3 °C, az évi csapadékmennyiség 533 mm, a napsütéses órák száma 1930 óra volt. A 2014-es adatok szerint [2 – *Központi Statisztikai Hivatal weboldala*] a lakossága 1 744 665 millió fő, mellyel Európa 20. legnépesebb városa (Cox, 2013). 525 km²-es területével hazánk legnagyobb települése. Közigazgatásilag 23 kerületre osztották, melyek közül a legnagyobb területű a XVII. kerület (Rákosmente: 54,83 km²), míg a legkisebb a VII. kerület (Erzsébetváros: 2,09 km²). A legnépesebb kerület a XI. kerület (Újbuda: 145 510 fő), a legkevesebb lakossággal a XXIII. kerület (Soroksár: 19 982 fő) rendelkezik [2 – *Központi Statisztikai Hivatal weboldala*]. Az 5. ábra Budapest és környékének felszínborítottságát illusztrálja.



5. ábra: Budapest felszínborítottsági viszonyai
[3 – *European Environmental Agency weboldala*].

A sűrűn beépített, gyűrűs alakba rendeződő, körutakkal tagolt központi részeken kívül jól kivehetők az összefüggő ipari területek (pl. csepeli, óbudai és angyalföldi ipari központok), melyek többnyire a 19. század végén létesültek, és napjainkra nagyrésztük a város-rehabilitációs projektek színterei (pl. Külső-Ferencváros). A zölddel megjelenített, szigetszerűen elhelyezkedő parkok (pl. Városliget, Orczy-park, Népliget, Gellért-hegy, Margit-sziget, Vérmező) a fővárosi szabadtéri rendezvények és az aktív szabadidős programok fő helyszínei. A fenti városrészek mellett fontos megemlíteni a külső területeken található, erdővel borított részeket is (pl. Normafa, Hármashatár-hegy), melyek a környezeti és esztétikai szerepükön kívül a fővárosi turizmus kiemelt központjai.

E dolgozat célja az NDVI vegetációs index és a felszínhőmérséklet kapcsolatának elemzése Budapestre. Ehhez olyan időpontokat kellett választanunk, amikor kis felhőborítottság (10% alatt) és csapadékmentes időjárás uralkodott, ugyanis – mint láttuk – ekkor legintenzívebb a városi hatás. Ezen kívül figyelembe kellett vennünk, hogy a növényzet élettani sajátosságai miatt leginkább a nyári hónapokban érdemes vizsgálódnunk. Tekintettel arra, hogy az USGS weboldaláról csak átlagosan havi két műholdas megfigyelés érhető el, ezért az 5. táblázatban található időpontokra esett a választásunk.

5. táblázat: A vizsgálathoz felhasznált műholdas mérések időpontjai és főbb jellemzői.

Időpont (UTC)	Napmagasság (°)	Nap azimut (°)	Felhőborítottság (%)
2011.07.09. 09:26:46	59,87	139,04	0
2013.07.14. 09:28:38	59,33	140,22	4
2014.08.02. 09:30:53	56,03	144,16	1
2014.08.18. 09:30:53	51,96	148,19	0

Az egyes időpontok napjaihoz kapcsolódó időjárást az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) *Napijelentés kiadványa* alapján jellemeztük (6. táblázat).

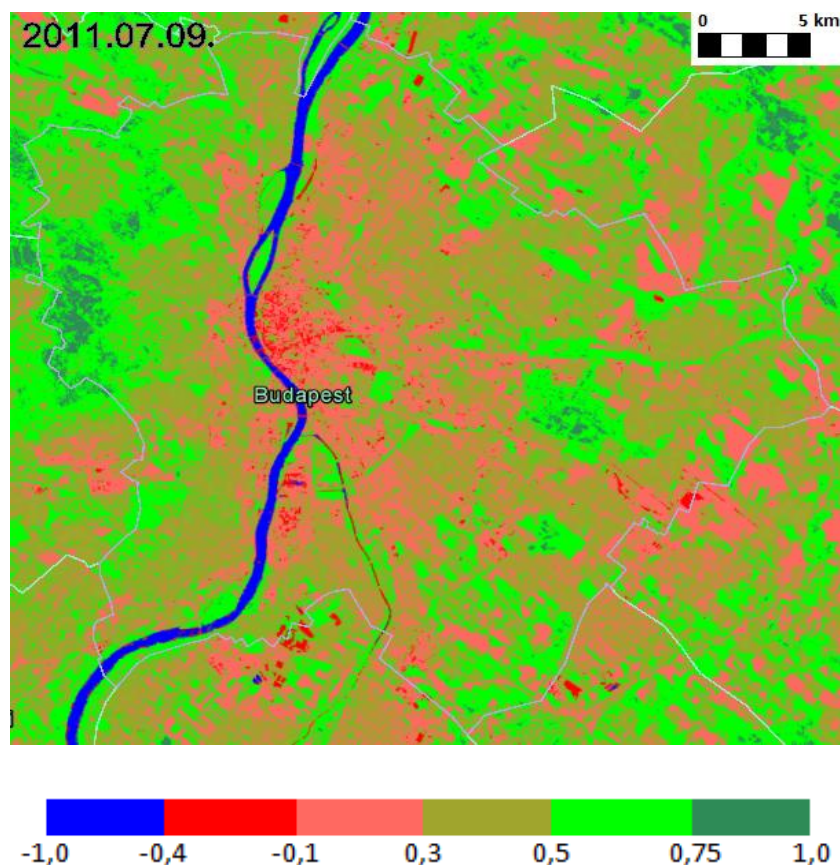
6. táblázat: Az elemzett időpontok meteorológiai viszonyai
[4 – *OMSZ weboldal: Napijelentés kiadvány*].

Időpont	Maximum hőmérséklet (°C)	Minimum hőmérséklet (°C)	Napi középhőmérséklet (°C)	Számított napfénytartam (óra)
2011.07.09.	35,6	18,2	27,9	15
2013.07.14.	27,6	14,3	22,1	15
2014.08.02.	31,9	19,8	25,5	12
2014.08.18.	25,4	10,9	18,7	13

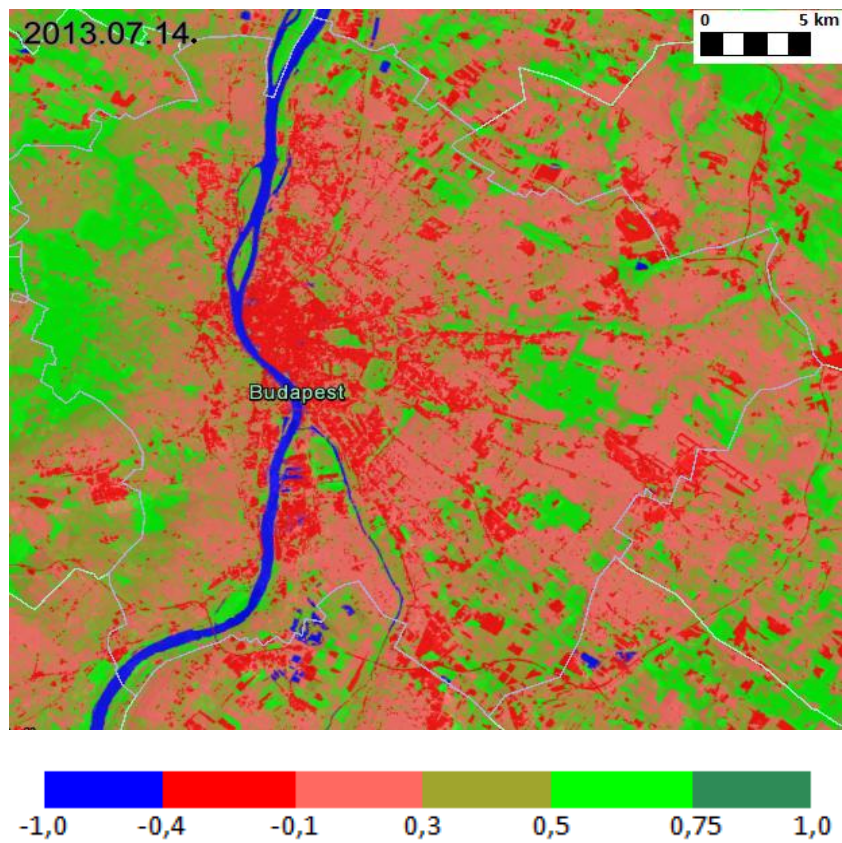
A Pestszentlőrinci Obszervatóriumban végzett felszíni mérések alapján megállapítható, hogy 2011. július 9-én, 2013. július 14-én és 2014. augusztus 2-án a napi közép-hőmérséklet a sokéves átlag felett alakult (rendre 7,5 °C-kal, 0,7 °C-kal és 3,2 °C-kal), míg 2014. augusztus 18-án 2,5 °C-kal elmaradt attól. A számított napfénytartam mindhárom nap jóval 10 óra felett volt. Csapadék egyik napon sem hullott.

6.2 Az NDVI térbeli eloszlása

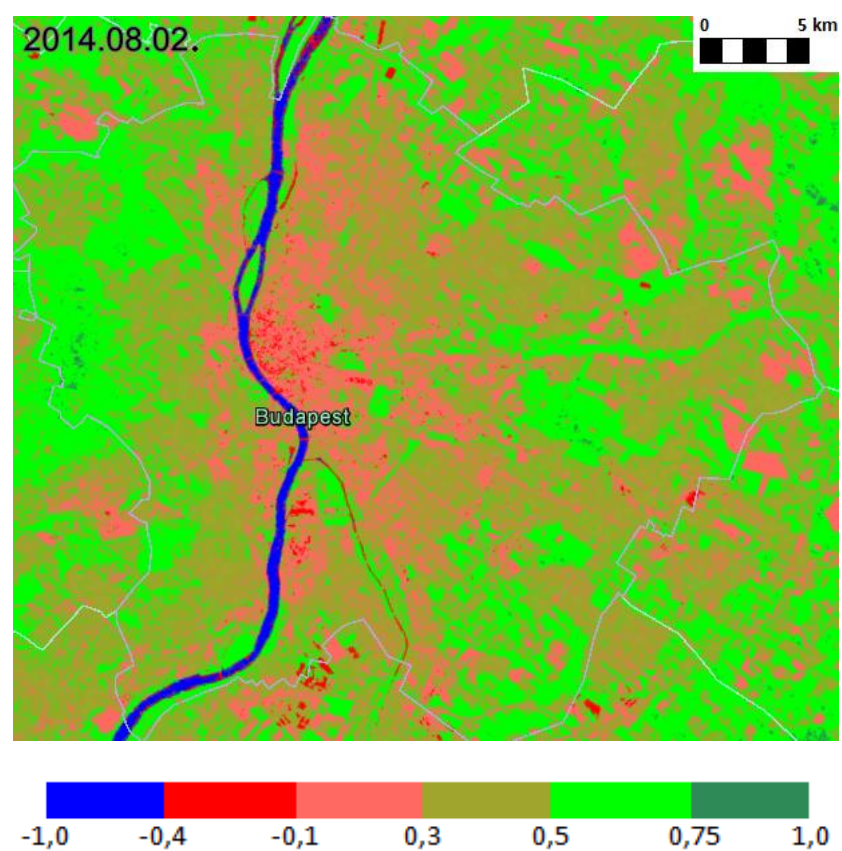
A Landsat 7 vörös és közeli infravörös csatornáinak 30 m-es felbontása lehetővé teszi a főváros felszínborítottságának részletes elemzését. Ehhez a legalkalmasabb időpontnak a nyári hónapok tűntek, hiszen leginkább ekkor különülnek el egymástól a természetes és mesterséges felszíninformák, mivel a vegetáció az év ezen időszakaszában a legfejlettebb. Ezért a skálát is úgy definiáltuk, hogy a vízfelület (Duna), a beépített terület és a növényborítottság mértéke jól elkülönüljön egymástól (6.-7.-8.-9. ábra).



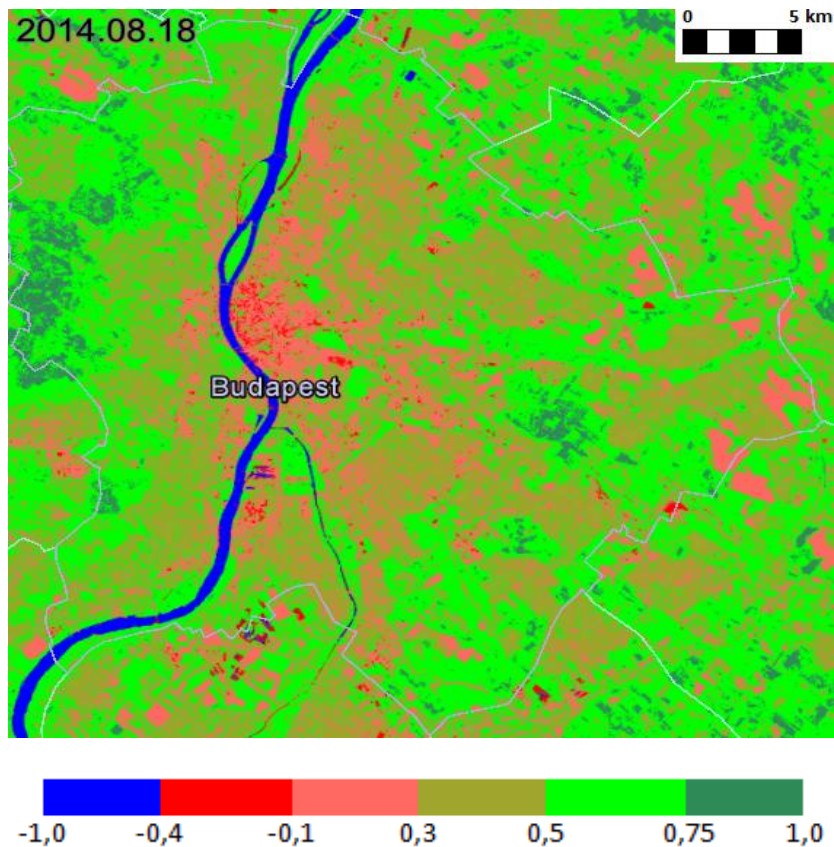
6. ábra: Az NDVI térbeli eloszlása Budapesten (2011.07.09.).



7. ábra: Az NDVI térbeli eloszlása Budapesten (2013.07.14.).



8. ábra: Az NDVI térbeli eloszlása Budapesten (2014.08.02.).



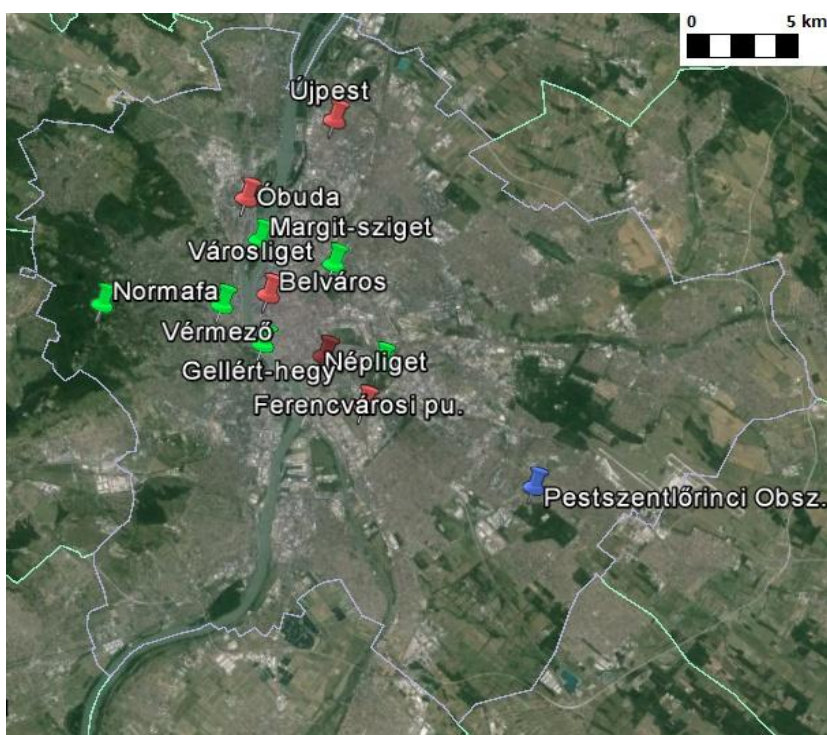
9. ábra: Az NDVI értékei Budapesten (2014.08.18.).

Megfigyelhető, hogy a belváros sűrűn beépített részei ($-0,3 < \text{NDVI} < 0,0$) blokkszerű egységet alkotnak, majd sugárirányban haladva a külső területek felé az NDVI a pozitív tartományba kerül. Ez érthető, hiszen a külvárosban a tömbházakat egyre inkább családi házak váltják fel, valamint a növényzet is egyre nagyobb százalékban jelenik meg. Budapest szigetszerűen elhelyezkedő parkjai (pl. Városliget, Népliget) és a Budai-hegységhez vagy a Gellért-hegyhez kapcsolódó vegetáció is jól kirajzolódik. Itt az NDVI tipikus értékei 0,3 és 0,6 közöttiek. A négy időpont eredményei között – a szerkezeti hasonlóságok ellenére – néhány lényeges különbség is mutatkozik. Elsősorban arra hívjuk fel a figyelmet, hogy míg 2013. július 14-én alapvetően a pirosas árnyalatok dominálnak ($-0,4 < \text{NDVI} < 0,3$), addig a 2011. július 9-ei térképeken az NDVI fokozatosan a magasabb értékek, azaz a zöldes árnyalatok felé tolódnak. Ennek valószínűsíthető magyarázata, hogy a növényzet élettanilag fejlettebb állapotban volt 2011 júliusának elején, kevesebb vízstressz érte a növekedése során, mint a rendkívül száraz 2013 júliusában. Stresszmentesen ugyanis több látható sugárzást nyel el és többet is ver vissza a növényzet, ezért magasabb NDVI-t kapunk.

Ez a biofiziológia folyamat magyarázza azt is, hogy míg 2013 nyarának közepén a maximális NDVI érték 0,75 alatt volt, addig a következő év augusztusának végén megközelítette az 1-et a Budai-hegység és a főváros-környéki erdőségek területén.

Az NDVI értékek részletesebb elemzéséhez 12 budapesti térséget választottunk ki, melyek között sűrű beépítettségű városrészek (Belváros, Ferencváros, Ferencvárosi pályaudvar, Óbuda, Újpest), parkok (Margit-sziget, Népliget, Városliget, Vörösmarty), magasabban fekvő helyek (Gellért-hegy, Normafa) és külvárosi terület (Pestszentlőrinc) egyaránt megtalálható (10. ábra és 7. táblázat). Megjegyezzük, hogy Ferencváros, Újpest és Óbuda kerületek csak bizonyos részeit vizsgáltuk meg:

- Ferencváros: Üllői út–Ferenc körút–Soroksári út–Haller utca által határolt terület (Függelék – 1/A. ábra).
- Gellért-hegy: Kelenhegyi út–Szt. István út–Sándor utca–Orom utca–Szent Gellért rakpart (Függelék – 1/B. ábra).
- Óbuda: Tímár utca–Bécsi út–Hévízi út–Bogdáni út–Óbudai rakpart–Árpád fejedelem útja (Függelék – 1/C. ábra).
- Újpest: Árpád út–Rózsa utca–Szent Imre utca–Türr István utca–Mildenberger utca–Baross utca–Váci út (Függelék – 1/D. ábra).
- Belváros: József Attila utca–Bajcsy-Zsilinszky út–Váci út–Szent István körút–Széchenyi rakpart–id. Antall József rakpart (Függelék – 1/E. ábra).



10. ábra: A vizsgálathoz felhasznált budapesti sűrű beépítettségű (piros), növényzettel borított (zöld) és külvárosi (kék) helyszínek [5 – Google Earth].

7. táblázat: A vizsgálathoz kiválasztott budapesti helyszínek főbb jellemzői.

Helyszín	Koordináták (φ , λ)	Átlagos tengerszint feletti magasság (m)	Képpontok átlagos száma
Belváros	47° 30' 16,65" É 19° 3' 1,26" K	105	939
Ferencváros	47° 28' 51,50" É 19° 4' 39,32" K	107	981
Ferencvárosi pályaudvar	47° 27' 42,67" É 19° 5' 48,06" K	112	156
Gellért-hegy	47° 29' 11,06" É 19° 2' 46,53" K	172	335
Margit-sziget	47° 31' 29,84" É 19° 2' 49,61" K	103	749
Népliget	47° 28' 39,09" É 19° 6' 23,84" K	116	1249
Normafa	47° 30' 12,66" É 18° 57' 54,68" K	470	28
Óbuda	47° 32' 25,91" É 19° 2' 28,87" K	107	1551
Újpest	47° 34' 4,87" É 19° 5' 20,41" K	110	1261
Pestszentlőrinci Obszervatórium	47° 25' 44,91" É 19° 10' 56,19" K	137	36
Városliget	47° 30' 53,32" É 19° 5' 5,51" K	105	710
Vérmező	47° 30' 5,33" É 19° 1' 34,33" K	124	124

A 12 helyszín három időpontra vonatkozó NDVI adatait a 8. táblázatban foglaljuk össze.

8. táblázat: A vizsgálathoz kiválasztott budapesti helyszínek átlagos NDVI adatai.

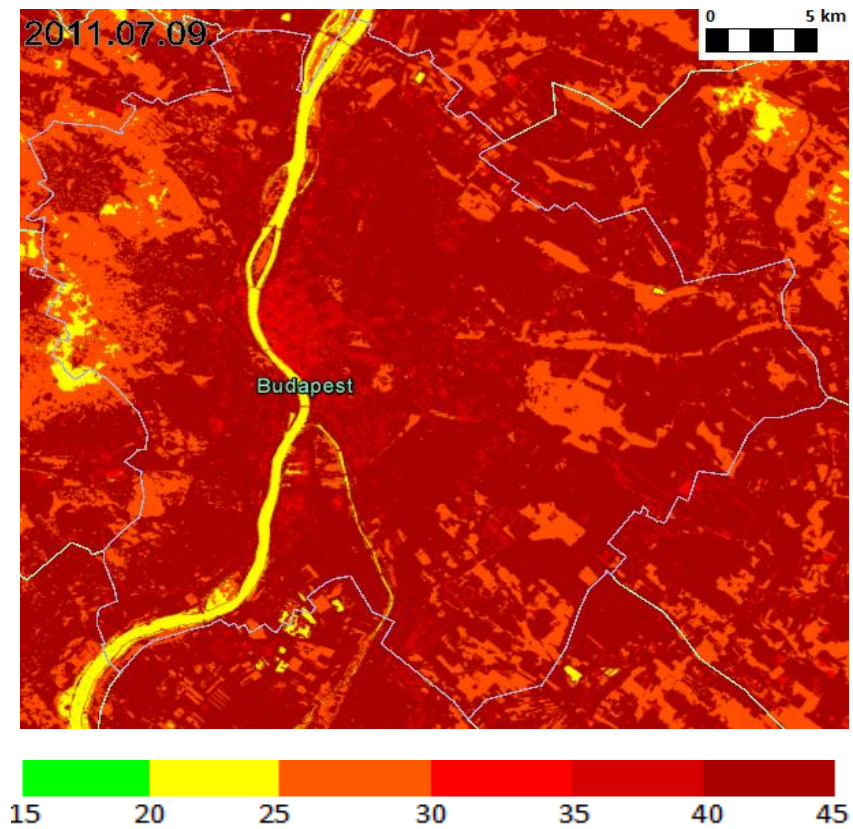
Időpont/Helyszín	2011.07.09.	2013.07.14.	2014.08.02.	2014.08.18.
Belváros	-0,02	-0,27	-0,02	-0,01
Ferencváros	0,06	-0,16	0,07	0,09
Ferencvárosi pu.	0,14	-0,19	0,10	0,20
Gellért-hegy	0,48	0,33	0,48	0,58
Margit-sziget	0,51	0,30	0,44	0,52
Népliget	0,51	0,30	0,50	0,57
Normafa	0,67	0,57	0,68	0,66
Óbuda	0,23	0,03	0,23	0,24
Újpest	0,10	-0,10	0,12	0,15
Pestszentlőrinci Obsz.	0,55	0,59	0,65	0,66
Városliget	0,45	0,23	0,49	0,53
Vérmező	0,47	0,37	0,50	0,52

A helyi adatok is megerősítik azt az észrevételünket, miszerint az utolsó időpontban, azaz 2014.08.18-án fordultak elő a legnagyobb NDVI értékek, melyek az uralkodóan

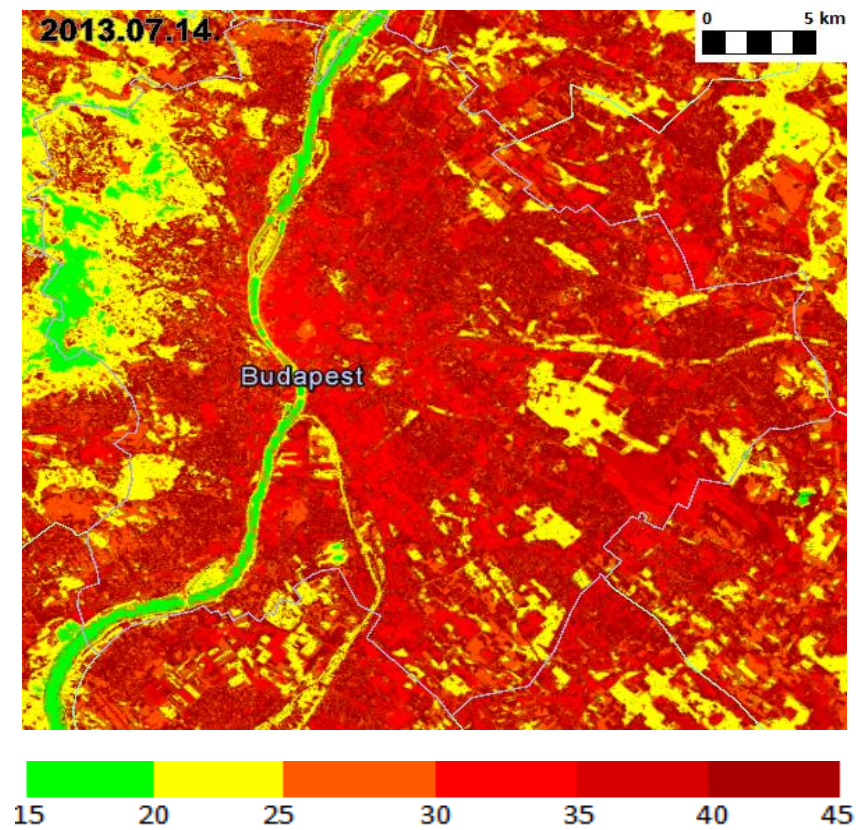
mesterséges felszínnel borított újpesti, ferencvárosi és óbudai részeken ekkor sem haladták meg a 0,25-öt. Az eredmények alapján a Belváros, a IV. és a IX. kerület tekinthető a legbeépítettebbnek, miközben a III. kerületben kevesebb mesterséges felszín, több zöldterület található. Természetesen jóval magasabb NDVI-t kaptunk a fővárosi parkokra. Közülük Budapest legnagyobb parkjában (Népliget) adódott a legmagasabb érték (0,57), de ez nem tér el lényegesen a Városligetre és Vérmezőre kiszámított 0,53-tól, illetve 0,52-től. A nagyobb tengerszint feletti magasságon található Gellért-hegyen és Normafán is igen magas NDVI maximumokat figyelhettünk meg (rendre 0,58 és 0,68). Ehhez a már említett ideális csapadék és hőmérsékleti viszonyokból eredő, a növényzet intenzív fejlődésének kedvező kisebb környezeti stresszhatás járulhat hozzá. Emellett a domborzat jellegéből adódó csekély beépítettség (különösen Normafánál) is fontos szerepet játszik. A Pestszentlőrinci Observatóriumhoz is igen magas, jóval 0,5 feletti számokat köthetünk, ami közepes növényborítottságra utal. Mindez azt erősíti meg, hogy e terület jól reprezentálhatja a vidéki sajátosságokat, ezért különösen alkalmas a belvárosi részekkel való kontraszt kiemelésére. Az NDVI értékeinek átlagos szórásából megállapíthatjuk, hogy a vizsgált területek felszínborítottsága mennyire homogén vagy inhomogén. Azt mondhatjuk, hogy a négy időpontra vett átlag alapján Normafa és Ferencváros tekinthető a leghomogénebbnek (kb. 0,06 és 0,08), míg a Margit-sziget és a Gellért-hegy rendelkezik a legváltozatosabb felszínnel (kb. 0,19 és 0,17).

6.3 A felszínhőmérséklet térbeli eloszlása

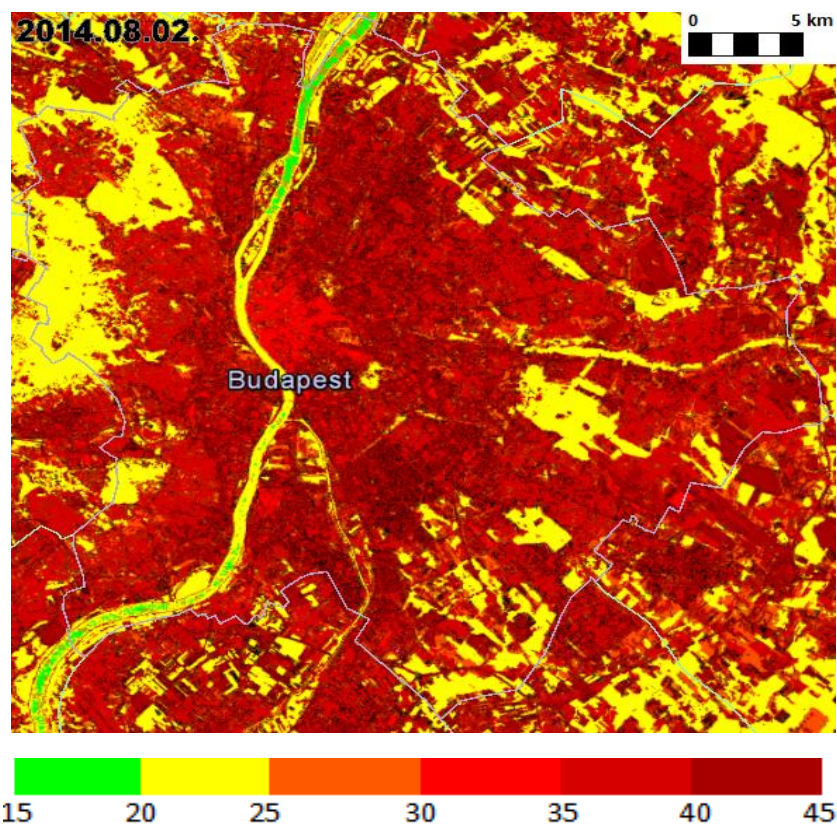
A 60 méteres horizontális felbontású termális csatorna alapján kiszámítottuk a felszínhőmérsékletet is, mellyel pontos képet kaphattunk ezen állapothatározó budapesti eloszlásáról, intenzitásáról és a felszín típusával való kapcsolatáról. Meg kell jegyeznünk, hogy a felszínhőmérséklet lényegesen eltérhet a meteorológiai gyakorlatban elterjedt 2 méteren mért léghőmérséklettől, hiszen míg előbbi a felszín jellege (fizikai paraméterei), geometriája határozza meg, addig utóbbi alapvetően a felszínben tárolt hő mennyiségétől és a levegő advekcijától függ. Egyes tanulmányok (pl. *Urban et al., 2013; Lelovics et al. 2011*) azt mutatják, hogy városi környezetben a nyári felszínhőmérséklet általában magasabb, mint a léghőmérséklet.



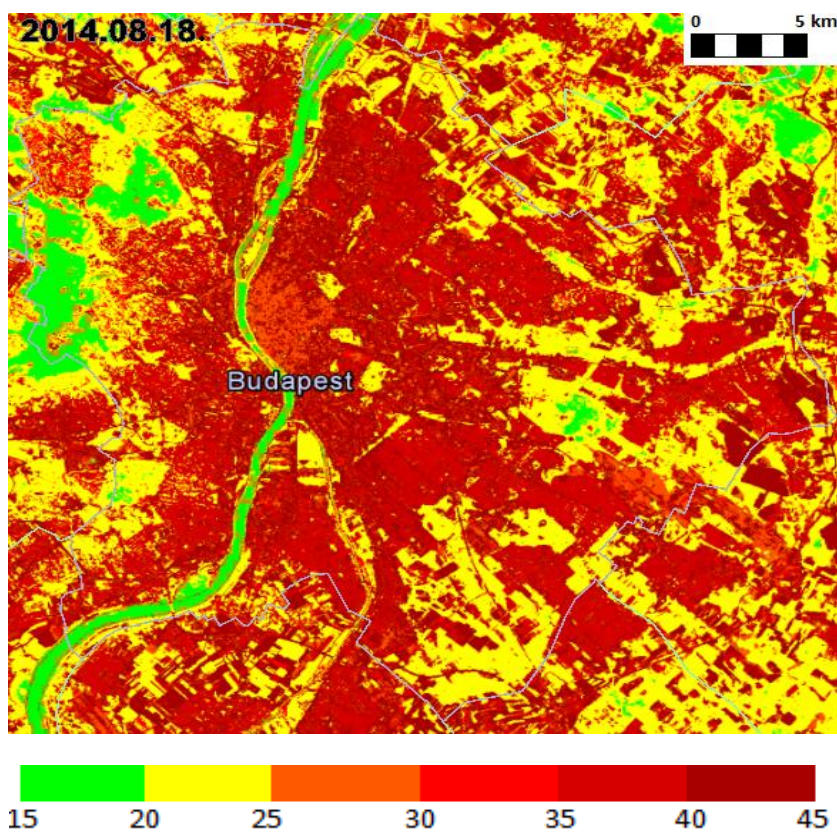
11. ábra: A felszínhőmérséklet (°C) értékei Budapesten (2011.07.09.).



12. ábra: A felszínhőmérséklet (°C) értékei Budapesten (2013.07.14.).



13. ábra: A felszínhőmérséklet (°C) értékei Budapesten (2014.08.02.).



14. ábra: A felszínhőmérséklet (°C) értékei Budapesten (2014.08.18.).

A 11.-12.-13.-14. ábra szerint a felszínhőmérséklet meglehetősen széles, mintegy 30 °C-os intervallumon belül mozgott. Ennek értelmezése a felszíntípusok sokféleségében kereshető. A felszínhőmérséklet térbeli eloszlása minden esetben hasonló jelleget mutatott: a központi részek rendszerint nagy hőtöbblettel rendelkeztek, míg a parkokban és a magasabban fekvő területeken alacsonyabb értékeket tapasztalhattunk. A *Napijelentés kiadvány* szerint 2011. július 9-én volt a legmagasabb és 2014. augusztus 18-án a legalacsonyabb a napi középhőmérséklet. Ez a különbség a felszínhőmérsékletben is megjelent: augusztus elején a legalacsonyabb értékek rendre 20 °C felett adódtak, ezzel szemben a hónap közepén a Budai-hegységben 15 °C-ot is megfigyelhettünk. Mind a négy esetben szembetűnő az is, hogy a felszínhőmérséklet maximumai nem a belvárosban voltak, hanem a külső kerületekben (pl. Újpesten). Ez főképpen a délelőtti megfigyelési időpontokból adódó kisebb napsugárzási beesési szögnek és az épületek árnyékoló hatásának együttesével indokolható. További magyarázat lehet, hogy a belváros aktív felszínének gyakran az épületek tetejét tekintjük, melyek anyagukban vagy egységességükben különböznek a külvárosi felszínektől.

A felszínhőmérséklet részletesebb vizsgálatához kiválasztott 12 fővárosi helyszín adatait a 9. táblázatban foglaltuk össze.

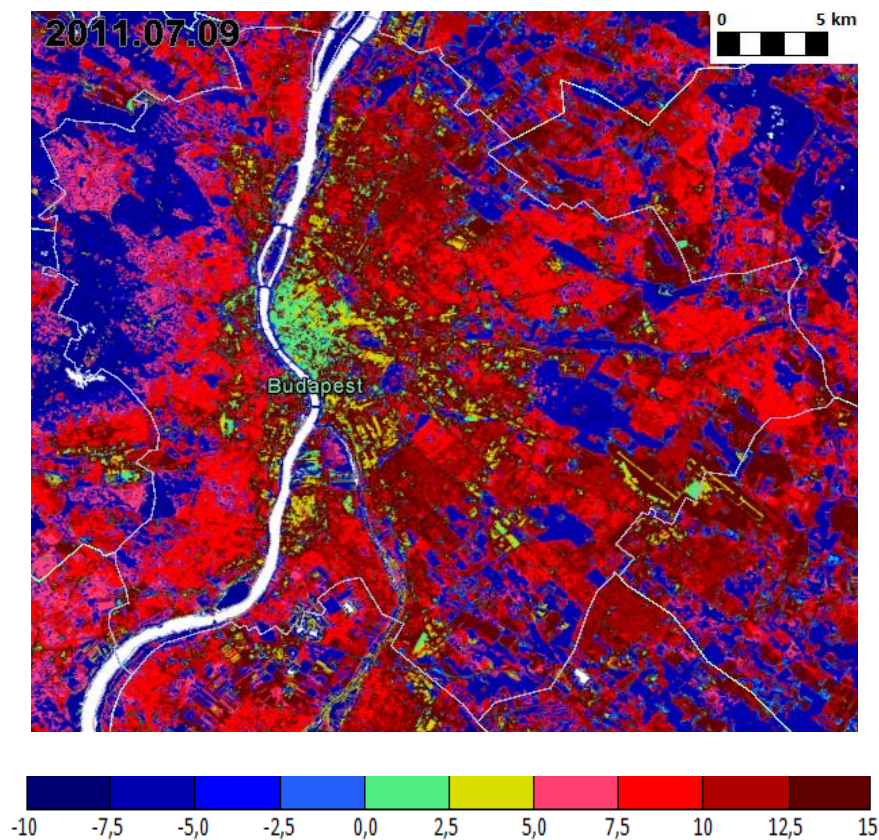
9. táblázat: A vizsgálatához kiválasztott budapesti helyszínek átlagos felszínhőmérséklete (°C).

Időpont/Helyszín	2011.07.09.	2013.07.14.	2014.08.02.	2014.08.18.
Belváros	40,1	30,7	32,1	33,9
Ferencváros	50,2	32,7	48,2	43,2
Ferencvárosi pu.	51,8	35,5	48,1	45,1
Gellért-hegy	35,7	27,9	31,2	25,2
Margit-sziget	33,8	27,9	29,7	25,7
Népliget	35,4	31,5	30,1	26,4
Normafa	27,2	20,8	22,9	20,2
Óbuda	49,3	39,5	45,6	29,4
Újpest	52,0	36,4	50,3	45,9
Pestszentlőrinci Obsz.	33,8	23,3	23,5	22,5
Városliget	37,6	31,6	30,9	25,9
Vérmező	37,2	28,4	30,7	28,9

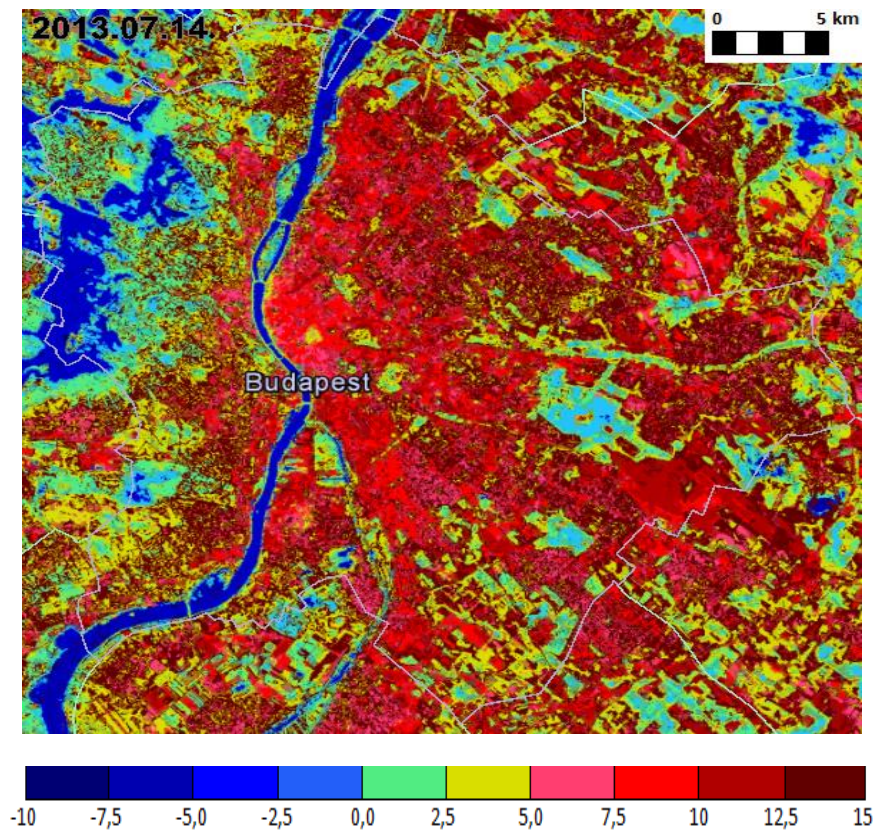
Eredményeink alapján Ferencvárosban, Újpesten és Óbudán bizonyult legmagasabbnak a felszínhőmérséklet a négy időpont átlagában. Külön kiemelendő a 2011.07.09-én megfigyelt újpesti 52,0 °C-os és ferencvárosi 50,2 °C-os hőmérséklet, ami rendkívül jelentős termális terhelést okozott. Ezzel szemben Normafán csupán 27,2 °C adódott, ami közel 25 °C-os eltérést jelentett a városi felszínekhez képest!

A parkok felszínhőmérséklet-mérséklő szerepét is megerősítik a kapott eredmények. A legmelegebbnek bizonyuló július eleji napon Népliget és a közeli Ferencváros között 14,8 °C-os különbség következett be. A zöldterület mérete is meghatározónak bizonyult: a négy vizsgált időpontból háromszor a Népligetben alakult ki a legalacsonyabb felszínhőmérséklet. A város központjában lévő Margit-szigeten és Gellért-hegyen is egyaránt alacsonyabb hőmérsékletek voltak Budapest beépített részeihez viszonyítva. Nem véletlen, hogy e két zöldövezet igen kedvelt pihenőhely a fővárosi lakosság körében.

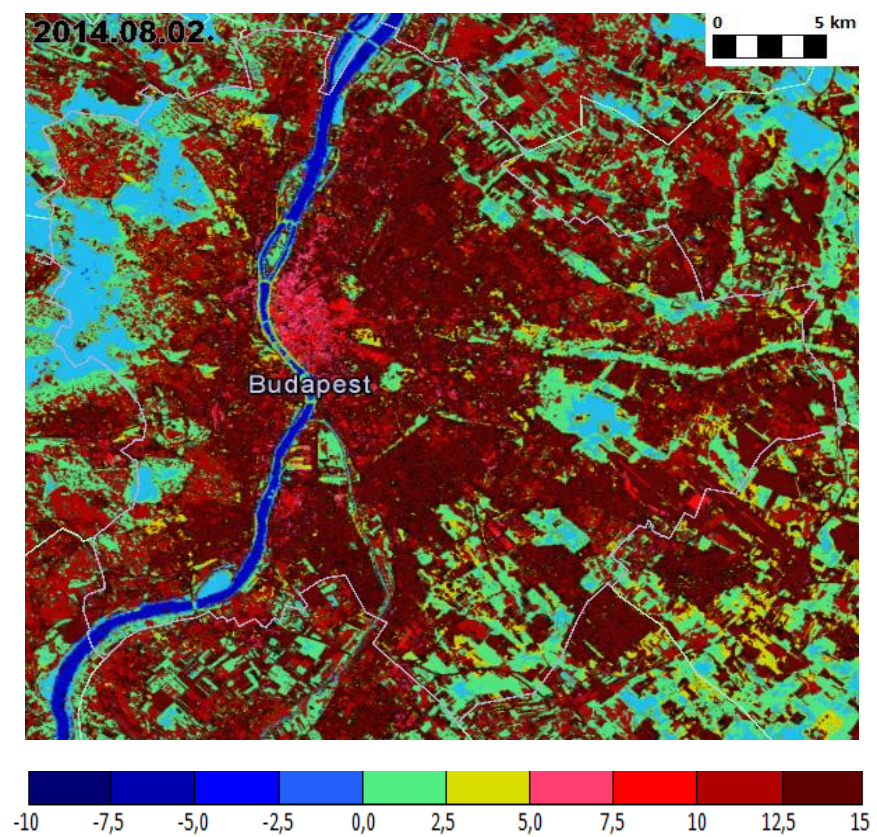
A kapott eredményekből megállapítottuk, hogy az NDVI magas értékei és földrajzi elhelyezkedése miatt a Pestszentlőrinci Observatórium környezete külvárosi (vidéki) területnek tekinthető. Ez lehetőséget biztosít az (1) felhasználásával megadható városi felszínhőmérséklet-intenzitás kiszámítására (15.-16.-17.-18.-19. ábra).



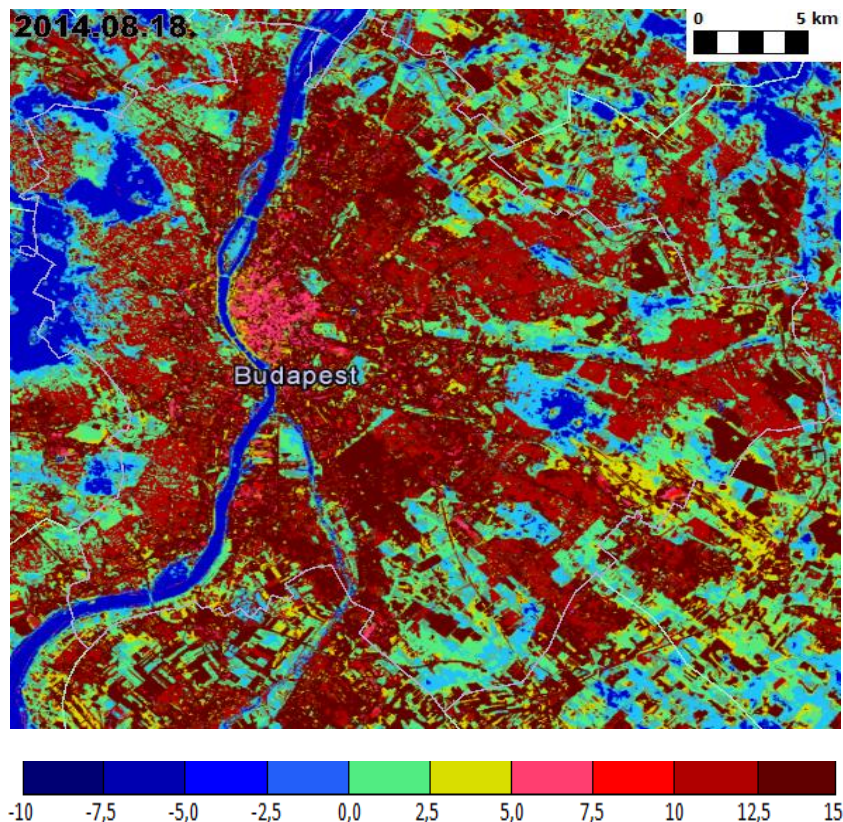
15. ábra: A felszínhőmérséklet intenzitásának (°C) értékei Budapesten (2011.07.09.).



16.ábra: A felszínhőmérséklet intenzitásának (°C) értékei Budapesten (2013.07.14.).

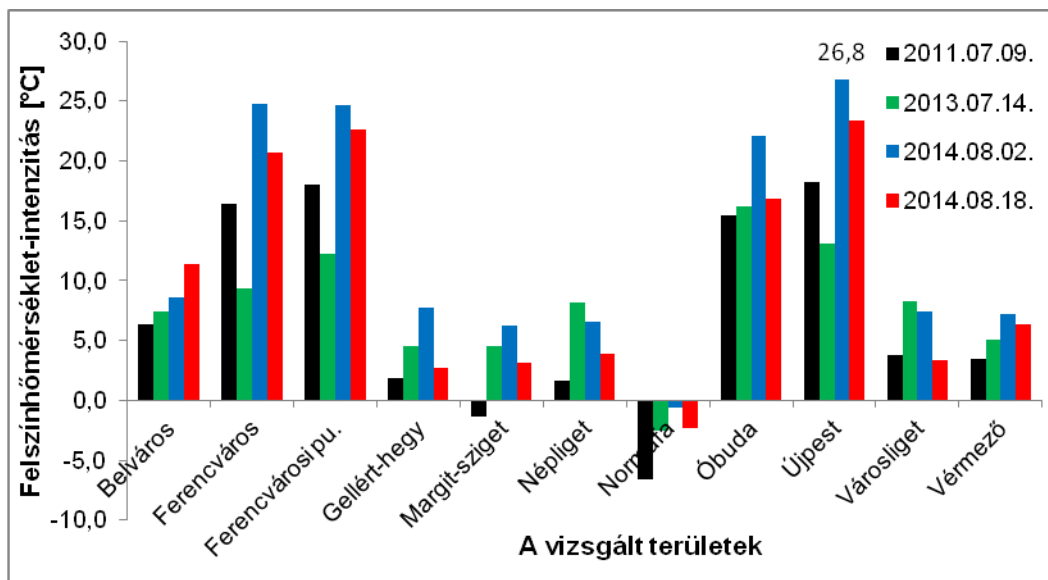


17. ábra: A felszínhőmérséklet intenzitásának (°C) értékei Budapesten (2014.08.02.).



18. ábra: A felszínhőmérséklet intenzitásának (°C) értékei Budapesten (2014.08.18.).

A vizsgált időszakban a felszínhőmérséklet intenzitása átlagosan -10 °C és 15 °C között változott, ezen intervallumon kívül eső értékek 2011.07.09-én és 2014.08.02-án jelentkezték. A négy időpont során az intenzitás abszolút minimuma -6,6 °C volt (Normafa, 2011.07.09.), az abszolút maximuma pedig 26,8 °C (Újpest, 2014.08.02.). Megfigyelhető, hogy negatív intenzitás csak a külvárosi erdőkben és a Budai-hegység magasabban fekvő, nem beépített részein fordult elő (itt a Dunával nem foglalkozunk külön). Az átlag alatti léghőmérsékletű nap (2011.08.18.) sem eredményezett határozott mérséklést a külváros és a belső területek felszínhőmérséklet-különbségében, hiszen az intenzitás még ekkor is – különösen Újpesten, Óbudán vagy Ferencvárosban – meglehetősen magas (15 °C felett) maradt. A legkisebb eltérések a 2011.07.09-ei forró napon ($T_{2m(max)} > 35$ °C) adódtak, azonban a természetes felszínhőmérséklet-csökkentő szerepe még inkább lényegessé vált. Következésképpen újra hangsúlyoznunk kell a parkok várostervezési jelentőségét, ahol ugyan mindig pozitív hőmérséklet-különbségek alakultak ki, de azok nagysága lényegesen elmaradt a belvárosban tapasztaltaktól. Ez is alátámasztja azt az észrevételt, miszerint a városi zöldfelületek létesítése elengedhetetlen eszközei a mitigációs stratégiáknak.



19. ábra: A kiválasztott helyszínek felszínhőmérsékleteinek átlagos intenzitása (°C).

6.4 A felszínhőmérséklet és az NDVI kapcsolatának jellemzése

A felszínhőmérséklet (T_{felsz}) és az NDVI (felszínborítottság) kapcsolatának jellemzésére a szakirodalmat (Weng *et al.*, 2004, Mallick *et al.*, 2008) követve lineáris regressziós egyenleteket írtunk fel. Az elemzésünkben számszerűsítettük a 12 helyszínrre a kapcsolat erősségét (melyet az r korrelációs együtthatóval jellemezhetünk) és az adatpontok illeszkedését leíró determinációs együtthatót (R^2). A módszer sikeressége a 10/a. és 10/b. táblázat alapján ellenőrizhető. A korrelációs együtthatókat tekintve egyértelműnek tűnik, hogy a nagy beépítettségű városrészekre (Belváros, Újpest, Ferencváros, Óbuda) az eljárás nem alkalmazható sikeresen, hiszen rendre kis r értékeket kaptunk. A magasabb NDVI értékű területek (Gellért-hegy, Margit-sziget, Népliget, Városliget, Vörösmarty) ellenben már jól korrelálnak a felszínhőmérséklettel. A legnagyobb növényborítottságú Pestszentlőrinci Obszervatórium és Normaia esetében óvatosan kell értékelnünk az eredményeket, mivel itt kevés képpontból vettük az adatokat, viszont egyenleteink pontossága a megfigyelések számának növekedésével javul. Ezzel együtt az esetek 83,3%-ában 0,5 feletti korrelációs értékeket kaptunk. A korrelációs együtthatók negatív előjelei arra engednek következtetni, hogy az NDVI és a felszínhőmérséklet között fordított arányosság van, ami megegyezik az előző fejezetekben leírtakkal. Az R^2 determinációs együtthatók is alátámasztják azon megállapításunkat, hogy a lineáris regresszió csak 0,4 feletti NDVI során adnak megfelelő becslést a felszínhőmérsékletre.

10/a. és 10/b. táblázat: A felszínhőmérséklet (°C) és az NDVI kapcsolatát leíró lineáris regressziós egyenlet, korrelációs és determinisztikus együttható a 4 nyári időpont során a 12 budapesti helyszínen.

Időpont/Helyszín	2011.07.09.	2013.07.14.
Belváros	$T_{\text{felsz}} = 37,73 \cdot \text{NDVI} + 40,69$ $r = 0,48, R^2 = 0,23$	$T_{\text{felsz}} = 23,09 \cdot \text{NDVI} + 37,07$ $r = 0,51, R^2 = 0,26$
Ferencváros	$T_{\text{felsz}} = 21,72 \cdot \text{NDVI} + 48,99$ $r = 0,18, R^2 = 0,03$	$T_{\text{felsz}} = 36,44 \cdot \text{NDVI} + 38,48$ $r = 0,54, R^2 = 0,30$
Ferencvárosi pu.	$T_{\text{felsz}} = -14,71 \cdot \text{NDVI} + 54,92$ $r = -0,19, R^2 = 0,04$	$T_{\text{felsz}} = 23,81 \cdot \text{NDVI} + 40,11$ $r = 0,48, R^2 = 0,23$
Gellért-hegy	$T_{\text{felsz}} = -55,80 \cdot \text{NDVI} + 62,66$ $r = -0,91, R^2 = 0,82$	$T_{\text{felsz}} = -32,04 \cdot \text{NDVI} + 38,39$ $r = -0,56, R^2 = 0,31$
Margit-sziget	$T_{\text{felsz}} = -38,17 \cdot \text{NDVI} + 51,81$ $r = -0,80, R^2 = 0,64$	$T_{\text{felsz}} = 7,53 \cdot \text{NDVI} + 25,59$ $r = 0,18, R^2 = 0,03$
Népliget	$T_{\text{felsz}} = -54,06 \cdot \text{NDVI} + 62,71$ $r = -0,90, R^2 = 0,81$	$T_{\text{felsz}} = -37,51 \cdot \text{NDVI} + 42,80$ $r = -0,58, R^2 = 0,34$
Normafa	$T_{\text{felsz}} = -8,93 \cdot \text{NDVI} + 33,13$ $r = -0,73, R^2 = 0,54$	$T_{\text{felsz}} = -12,46 \cdot \text{NDVI} + 27,88$ $r = -0,69, R^2 = 0,48$
Óbuda	$T_{\text{felsz}} = -35,20 \cdot \text{NDVI} + 57,46$ $r = -0,54, R^2 = 0,29$	$T_{\text{felsz}} = 18,05 \cdot \text{NDVI} + 39,03$ $r = 0,23, R^2 = 0,05$
Újpest	$T_{\text{felsz}} = 22,00 \cdot \text{NDVI} + 52,78$ $r = 0,21, R^2 = 0,04$	$T_{\text{felsz}} = 51,13 \cdot \text{NDVI} + 41,80$ $r = 0,60, R^2 = 0,36$
Obszervatórium	$T_{\text{felsz}} = -48,87 \cdot \text{NDVI} + 60,68$ $r = -0,91, R^2 = 0,82$	$T_{\text{felsz}} = -5,85 \cdot \text{NDVI} + 26,74$ $r = -0,38, R^2 = 0,14$
Városliget	$T_{\text{felsz}} = -36,93 \cdot \text{NDVI} + 54,21$ $r = -0,67, R^2 = 0,46$	$T_{\text{felsz}} = -18,65 \cdot \text{NDVI} + 35,93$ $r = -0,31, R^2 = 0,10$
Vérmező	$T_{\text{felsz}} = -52,48 \cdot \text{NDVI} + 62,07$ $r = -0,80, R^2 = 0,64$	$T_{\text{felsz}} = -54,30 \cdot \text{NDVI} + 48,35$ $r = -0,74, R^2 = 0,54$

Időpont/Helyszín	2014.08.02.	2014.08.18.
Belváros	$T_{\text{felsz}} = -20,07 \cdot \text{NDVI} + 31,73$ $r = -0,07, R^2 = 0,00$	$T_{\text{felsz}} = 31,07 \cdot \text{NDVI} + 34,22$ $r = 0,43, R^2 = 0,18$
Ferencváros	$T_{\text{felsz}} = 39,44 \cdot \text{NDVI} + 45,31$ $r = 0,36, R^2 = 0,13$	$T_{\text{felsz}} = 20,9 \cdot \text{NDVI} + 41,39$ $r = 0,23, R^2 = 0,05$
Ferencvárosi pu.	$T_{\text{felsz}} = 2,49 \cdot \text{NDVI} + 47,9$ $r = 0,03, R^2 = 0,00$	$T_{\text{felsz}} = -22,21 \cdot \text{NDVI} + 49,54$ $r = -0,35, R^2 = 0,12$
Gellért-hegy	$T_{\text{felsz}} = -52,57 \cdot \text{NDVI} + 56,66$ $r = -0,85, R^2 = 0,72$	$T_{\text{felsz}} = -43,17 \cdot \text{NDVI} + 50,10$ $r = -0,88, R^2 = 0,78$
Margit-sziget	$T_{\text{felsz}} = -22,30 \cdot \text{NDVI} + 39,45$ $r = -0,55, R^2 = 0,31$	$T_{\text{felsz}} = -21,76 \cdot \text{NDVI} + 36,92$ $r = -0,63, R^2 = 0,40$
Népliget	$T_{\text{felsz}} = -58,97 \cdot \text{NDVI} + 59,49$ $r = -0,89, R^2 = 0,79$	$T_{\text{felsz}} = -47,60 \cdot \text{NDVI} + 53,36$ $r = -0,92, R^2 = 0,84$
Normafa	$T_{\text{felsz}} = -9,81 \cdot \text{NDVI} + 29,63$ $r = -0,75, R^2 = 0,56$	$T_{\text{felsz}} = -6,29 \cdot \text{NDVI} + 24,37$ $r = -0,69, R^2 = 0,47$
Óbuda	$T_{\text{felsz}} = -33,87 \cdot \text{NDVI} + 53,35$ $r = -0,52, R^2 = 0,27$	$T_{\text{felsz}} = -18,44 \cdot \text{NDVI} + 43,77$ $r = -0,35, R^2 = 0,12$
Újpest	$T_{\text{felsz}} = 7,89 \cdot \text{NDVI} + 49,35$ $r = 0,08, R^2 = 0,01$	$T_{\text{felsz}} = -23,51 \cdot \text{NDVI} + 49,73$ $r = -0,32, R^2 = 0,10$
Obszervatórium	$T_{\text{felsz}} = -10,29 \cdot \text{NDVI} + 30,15$ $r = -0,59, R^2 = 0,35$	$T_{\text{felsz}} = -33,68 \cdot \text{NDVI} + 44,74$ $r = -0,89, R^2 = 0,79$
Városliget	$T_{\text{felsz}} = -43,81 \cdot \text{NDVI} + 52,19$ $r = -0,73, R^2 = 0,54$	$T_{\text{felsz}} = -20,70 \cdot \text{NDVI} + 36,81$ $r = -0,58, R^2 = 0,33$
Vérmező	$T_{\text{felsz}} = -49,79 \cdot \text{NDVI} + 55,41$ $r = -0,82, R^2 = 0,68$	$T_{\text{felsz}} = -48,62 \cdot \text{NDVI} + 54,09$ $r = -0,94, R^2 = 0,87$

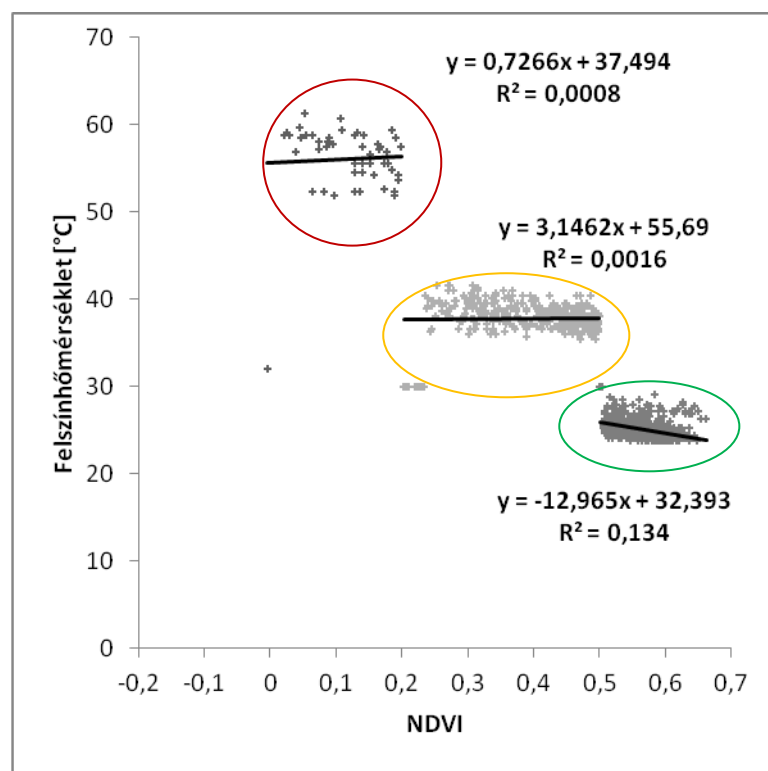
A fejezet eddigi részében megismert négy nyári időpont mellett további két tavaszi (2011.05.06., 2011.05.22.), illetve két őszi (2011.09.11., 2011.09.27.) időpontra is elemeztük a két változó viszonyát leíró regressziós egyenleteket (11/a. és 11/b. táblázat). Előbbiek a vegetációs periódus kezdetét, míg utóbbiak annak végét jellemezhetik. Megfigyelhető, hogy a sűrűn beépített területeken a felszínhőmérséklet és az NDVI között továbbra is egyenes arányosság mutatkozik, míg az uralkodóan növényzettel borított felszíneknél szintén fordított kapcsolat adódik. Az r korrelációs együttható tavasszal és ősszel egyaránt az esetek közel 66%-ában haladta meg a 0,5-öt. A nyolc eset alapján tehát leszűrhető, hogy az NDVI (felszínborítottsági) paraméter leginkább a nyári hónapokban befolyásolja a felszín hőmérsékletének alakulását. Ez azzal magyarázható, hogy az eltérő fizikai tulajdonsággal rendelkező felszínek szerepe leginkább akkor tud érvényesülni, amikor a Napból érkező rövidhullámú sugárzás intenzitása nagy. Ekkor ugyanis több energiát is tudnak tárolni a mesterséges felszínek, tehát különösen nyáron következhetnek be nagy különbségek a városi környezetekben. A determinisztikus együtthatók (R^2) arra engednek következtetni, hogy a két tavaszi időpont átlagában különösen a tipikus városi helyszíneken (pl. Ferencváros, Ferencvárosi pályaudvar, Újpest, Belváros) kaptunk magasabb (0,4 körüli) értékeket. Egyedül a Normafa környezete jelentett kivételt, ahol a lineáris kapcsolat továbbra is viszonylag határozottnak ($R^2_{\text{atl}}=0,47$) mutatkozott a növényzettel borított részek közül. Ezzel szemben az őszi eredmények már jobban hasonlítanak a nyáriakhoz: a Népliget, a Városliget, a Pestszentlőrinci Obszervatórium és a Vérmező helyszíneken is átlagosan 0,5 feletti determinisztikus együtthatókat kaptunk.

11/a. és 12/b. táblázat: A felszínhőmérséklet (°C) és az NDVI kapcsolatát leíró lineáris regressziós egyenlet, korrelációs és determinisztikus együttható a 2 tavaszi és 2 őszi időpont során a 12 budapesti helyszínen.

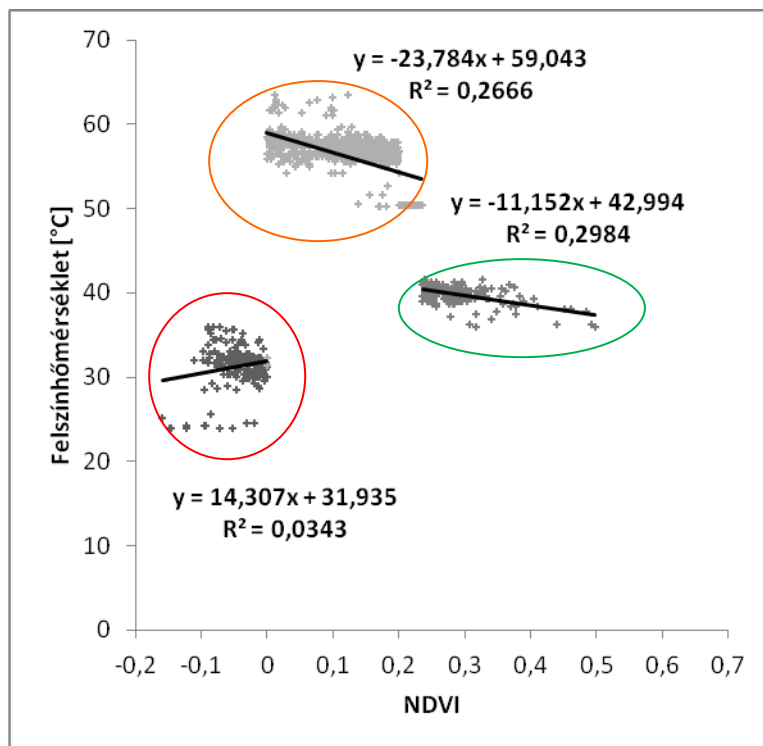
Helyszín/Időpont	2011.05.06.	2011.05.22.
Belváros	$T_{\text{felsz}}=23,93 \cdot \text{NDVI} + 31,98$ $r=0,59, R^2=0,35$	$T_{\text{felsz}}=27,65 \cdot \text{NDVI} + 38,60$ $r=0,61, R^2=0,38$
Ferencváros	$T_{\text{felsz}}=34,49 \cdot \text{NDVI} + 32,33$ $r=0,58, R^2=0,33$	$T_{\text{felsz}}=37,60 \cdot \text{NDVI} + 38,83$ $r=0,58, R^2=0,34$
Ferencvárosi pu.	$T_{\text{felsz}}=36,96 \cdot \text{NDVI} + 37,64$ $r=0,61, R^2=0,37$	$T_{\text{felsz}}=42,07 \cdot \text{NDVI} + 45,74$ $r=0,72, R^2=0,51$
Gellért-hegy	$T_{\text{felsz}}=-26,05 \cdot \text{NDVI} + 37,80$ $r=-0,56, R^2=0,31$	$T_{\text{felsz}}=-14,67 \cdot \text{NDVI} + 41,47$ $r=-0,35, R^2=0,12$
Margit-sziget	$T_{\text{felsz}}=-12,46 \cdot \text{NDVI} + 31,37$ $r=-0,32, R^2=0,10$	$T_{\text{felsz}}=-6,46 \cdot \text{NDVI} + 31,37$ $r=-0,17, R^2=0,03$
Népliget	$T_{\text{felsz}}=-21,71 \cdot \text{NDVI} + 45,17$ $r=-0,42, R^2=0,18$	$T_{\text{felsz}}=-32,12 \cdot \text{NDVI} + 49,32$ $r=-0,60, R^2=0,35$
Normafa	$T_{\text{felsz}}=-30,25 \cdot \text{NDVI} + 41,18$ $r=-0,58, R^2=0,34$	$T_{\text{felsz}}=-53,88 \cdot \text{NDVI} + 53,13$ $r=-0,77, R^2=0,59$
Óbuda	$T_{\text{felsz}}=24,65 \cdot \text{NDVI} + 34,06$ $r=0,39, R^2=0,16$	$T_{\text{felsz}}=36,06 \cdot \text{NDVI} + 41,24$ $r=0,50, R^2=0,25$
Újpest	$T_{\text{felsz}}=57,41 \cdot \text{NDVI} + 36,85$ $r=0,67, R^2=0,44$	$T_{\text{felsz}}=55,11 \cdot \text{NDVI} + 42,70$ $r=0,63, R^2=0,39$
Pestszentlőrinci Obsz.	$T_{\text{felsz}}=-40,51 \cdot \text{NDVI} + 44,63$ $r=-0,42, R^2=0,17$	$T_{\text{felsz}}=-67,83 \cdot \text{NDVI} + 63,70$ $r=-0,82, R^2=0,67$
Városliget	$T_{\text{felsz}}=-16,69 \cdot \text{NDVI} + 35,19$ $r=-0,42, R^2=0,18$	$T_{\text{felsz}}=-12,36 \cdot \text{NDVI} + 40,75$ $r=-0,28, R^2=0,08$
Vérmező	$T_{\text{felsz}}=-35,56 \cdot \text{NDVI} + 44,16$ $r=-0,76, R^2=0,58$	$T_{\text{felsz}}=-21,10 \cdot \text{NDVI} + 45,99$ $r=-0,44, R^2=0,20$

Helyszín/Időpont	2011.09.11.	2011.09.27.
Belváros	$T_{\text{felsz}}=29,77 \cdot \text{NDVI} + 34,56$ $r=0,49, R^2=0,24$	$T_{\text{felsz}}=41,58 \cdot \text{NDVI} + 30,64$ $r=0,57, R^2=0,33$
Ferencváros	$T_{\text{felsz}}=88,22 \cdot \text{NDVI} + 40,08$ $r=0,66, R^2=0,43$	$T_{\text{felsz}}=106,84 \cdot \text{NDVI} + 36,59$ $r=0,72, R^2=0,52$
Ferencvárosi pu.	$T_{\text{felsz}}=31,78 \cdot \text{NDVI} + 39,82$ $r=0,48, R^2=0,23$	$T_{\text{felsz}}=73,83 \cdot \text{NDVI} + 40,79$ $r=0,63, R^2=0,39$
Gellért-hegy	$T_{\text{felsz}}=-51,10 \cdot \text{NDVI} + 55,55$ $r=-0,86, R^2=0,73$	$T_{\text{felsz}}=-17,38 \cdot \text{NDVI} + 39,97$ $r=-0,45, R^2=0,20$
Margit-sziget	$T_{\text{felsz}}=-28,01 \cdot \text{NDVI} + 42,65$ $r=-0,65, R^2=0,43$	$T_{\text{felsz}}=-28,23 \cdot \text{NDVI} + 42,21$ $r=-0,61, R^2=0,37$
Népliget	$T_{\text{felsz}}=-44,74 \cdot \text{NDVI} + 50,91$ $r=-0,81, R^2=0,65$	$T_{\text{felsz}}=-38,47 \cdot \text{NDVI} + 48,47$ $r=-0,74, R^2=0,54$
Normafa	$T_{\text{felsz}}=-7,47 \cdot \text{NDVI} + 27,86$ $r=-0,68, R^2=0,46$	$T_{\text{felsz}}=-4,51 \cdot \text{NDVI} + 17,00$ $r=0,33, R^2=0,11$
Óbuda	$T_{\text{felsz}}=-23,30 \cdot \text{NDVI} + 49,05$ $r=-0,34, R^2=0,11$	$T_{\text{felsz}}=-10,96 \cdot \text{NDVI} + 43,15$ $r=-0,13, R^2=0,02$
Újpest	$T_{\text{felsz}}=31,26 \cdot \text{NDVI} + 45,37$ $r=0,31, R^2=0,10$	$T_{\text{felsz}}=47,26 \cdot \text{NDVI} + 42,84$ $r=0,39, R^2=0,15$
Pestszentlőrinci Obsz.	$T_{\text{felsz}}=-6,58 \cdot \text{NDVI} + 28,72$ $r=-0,67, R^2=0,44$	$T_{\text{felsz}}=-150,82 \cdot \text{NDVI} + 102,71$ $r=-0,76, R^2=0,57$
Városliget	$T_{\text{felsz}}=-50,58 \cdot \text{NDVI} + 55,96$ $r=-0,84, R^2=0,70$	$T_{\text{felsz}}=-30,54 \cdot \text{NDVI} + 44,47$ $r=-0,62, R^2=0,39$
Vérmező	$T_{\text{felsz}}=-49,04 \cdot \text{NDVI} + 56,31$ $r=-0,81, R^2=0,66$	$T_{\text{felsz}}=-27,57 \cdot \text{NDVI} + 43,85$ $r=-0,62, R^2=0,38$

A két változó közötti összefüggés linearitását (Népliget, 2014.08.02.; $R^2=0,79$) és nemlinearitását (Újpest, 2014.08.02.; $R^2=0,01$) a 20. és az 21. ábra is alátámasztja. Mindkét esetben 3-3 felszíni jelleg különíthető el, de azok felszínhőmérsékletéhez való hozzájárulása természetszerűleg különböző. A Népligetnél a mesterséges felszín ($NDVI_{\text{átl.}} \approx 0,1$, $T_{\text{felsz.átl.}} \approx 55^\circ\text{C}$, *piros karikával jelölve*), a vegyes felszínborítottság (csupasz talaj, füvel borított talaj, kisebb bokrok; $NDVI_{\text{átl.}} \approx 0,4$, $T_{\text{felsz.átl.}} \approx 35^\circ\text{C}$, *sárga karikával jelölve*) és a fás területek ($NDVI_{\text{átl.}} \approx 0,6$, $T_{\text{felsz.átl.}} \approx 25^\circ\text{C}$, *zöld karikával jelölve*) jelenléte mutatható ki. Újpesten pedig elsősorban a Váci út melletti nagyobb épületek, Újpest-Központ környéke ($NDVI_{\text{átl.}} \approx -0,1$, $T_{\text{felsz.átl.}} \approx 35^\circ\text{C}$, *piros karikával jelölve*), a kisebb épületek, lakóházak ($NDVI_{\text{átl.}} \approx 0,1$, $T_{\text{felsz.átl.}} \approx 55^\circ\text{C}$, *narancssárga karikával jelölve*) és a kis növényborítottsággal jellemezhető részek ($NDVI_{\text{átl.}} \approx 0,3$, $T_{\text{felsz.átl.}} \approx 40^\circ\text{C}$, *zöld karikával jelölve*) jelenléte detektálható. A IV. kerület általunk definiált területén a linearitást a 0-hoz közeli NDVI értékekkel rendelkező felszínekhez tartozó alacsonyabb felszínhőmérsékletek nem teszik lehetővé. A jelenség lehetséges oka – mint már a 6.3 fejezetben fejtegettük – a magas épületek árnyékoló hatása, valamint a tetőszint összetételéből adódó eltérő fizikai tulajdonságok (pl. hőkapacitás).



20. ábra: Az NDVI és a felszínhőmérséklet kapcsolata a Népligetben (2014.08.02.; képpontok száma: 1187; **piros karika=mesterséges felszín**, **sárga karika="vegyes" felszínborítottság**, **zöld karika=vegetáció**).



21. ábra: Az NDVI és a felszínhőmérséklet kapcsolata Újpesten (2014.08.02.; képpontok száma: 1215; **piros karika=nagyobb épületek**, **narancssárga karika=kisebb épületek**, **zöld karika=kismértékű növényborítottság**).

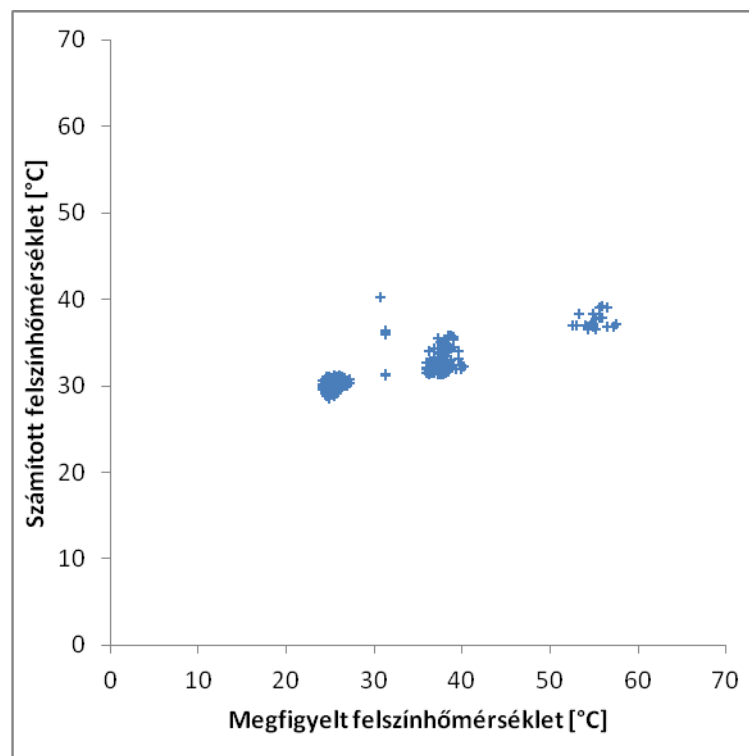
A 20. és 21. ábra alapján azt is elemeztük, hogy a különböző felszíntípusoknál is fennáll-e vagy elvethető-e a lineáris statisztikai kapcsolat az NDVI és a felszínhőmérséklet között. A Népliget esetében a mesterséges felszínre ($NDVI < 0,2$; 49 képpont; *piros karikával jelölve*) és a „vegyes” területre ($0,2 \leq NDVI \leq 0,5$; 351 képpont; *sárga karikával jelölve*) kapott determinisztikus együtthatók alig térnek el 0-tól. A növényzettel borított részre a ($NDVI > 0,5$; 787 képpont; *zöld karikával jelölve*) viszont nagyobb (0,13) a kapott determinisztikus együttható értéke. Újpest esetében a magas épületekkel jellemezhető részre ($NDVI < 0,0$; 171 képpont; *piros karikával jelölve*), a kisebb épületekkel tarkított területre ($0,0 \leq NDVI \leq 0,3$; 865 képpont; *narancssárga karikával jelölve*) és a „vegyes” régióra/vegetációs felszínre ($NDVI > 0,3$; 179 képpont; *zöld karikával jelölve*) az R^2 -kre rendre 0,03, 0,27 és 0,30 adódott. Mindezek azt jelentik, hogy az eltérő talajborítottságú környezetek kis szórással (Népliget: $\sigma_{mesterséges} = 4,3$ °C, $\sigma_{vegyes} = 2,05$ °C, $\sigma_{vegetációs} = 1,17$ °C; Újpest: $\sigma_{magas\ épület} = 2,45$ °C, $\sigma_{kisebb\ épület} = 2,93$ °C, $\sigma_{vegyes/vegetációs} = 1,07$ °C) adják vissza a felszín hőmérsékletét. Ez a felszín emisszivitásának meghatározásakor választott NDVI Küszöbérték Módszer (ld. 5. fejezet) következménye. Ez is megerősíti, hogy a talaj emisszivitásának nagyfelbontású adatbázisa nélkülözhetetlen a még pontosabb számításokhoz.

A vizsgálataink során arra is kíváncsiak voltunk, hogy a fenti regressziós összefüggések közül van-e olyan egy adott terület esetében, amely univerzálisan, kis hibával alkalmazható a további időpontok felszínhőmérsékletének kiszámításához az NDVI ismeretében. A következő eljárást csak a döntően növényzettel borított részekre (Gellért-hegy, Margitsziget, Népliget, Normafa, Városliget, Vérmező) végeztük el, hiszen láttuk, hogy – a tavaszi időpontok kivételével – a lineáris kapcsolat leginkább ott valósul meg. Először összevetettük minden egyes helyszínnél a nyolc időpontra kapott regressziós egyenleteket, ezzel új hőmérsékleti adatsort állítottunk elő az összes pixelre. Majd az eredeti és az egyenletek bevonásával kapott értékekre képpontonként meghatároztuk a becslések hibáját (abszolút hiba, átlagos négyzetes hiba). Ezzel egy pontosabb képet kaphattunk az adott területre felállított egyenleteink használhatóságáról.

A *Gellért-hegy* esetében megfigyelhető (12. táblázat), hogy a legkisebb hibát a 2014.08.18-ra kapott lineáris regressziós egyenlet eredményezte ($AE=5,29\text{ }^{\circ}\text{C}$, $MSE=0,18\text{ }^{\circ}\text{C}$), csak a 2013.07.14-i időpontra adott kifejezetten rossz becslést ($AE=10,00\text{ }^{\circ}\text{C}$, $MSE=0,38\text{ }^{\circ}\text{C}$), a többi esetben az átlagos abszolút hiba $4,49\text{ }^{\circ}\text{C}$ volt. Emellett további 4 olyan összefüggést is találhatunk, ahol az $AE\ 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ körüli volt. 2013.07.14-re különösen rossz becslések születtek, de ez nem meglepő, hiszen – mint láttuk a 6.3. fejezetben – ezen a napon az átlagosnál jóval magasabb felszínhőmérsékletek fordultak elő. Ez a megállapítás azt jelenti, hogy extrémebb helyzetekben az egyenletek alkalmazhatósága egyértelműen csökken. A 23. ábrán is látszik a felszínhőmérséklet klaszteres jellege, ami egyértelműen a különböző felszínborítottság eredménye. Minthogy a felszínhőmérséklet emelkedése növényborítottság mértékével arányos, ezért az olvasható le a diagramról, hogy a Gellért-hegyen a mesterséges felszínekre a legpontosabb egyenlettel (12. táblázat, **pirossal kiemelve**) számított értékek kb. $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal becsülnek felül a kis abszolút hibával jellemezhető ($AE=3,31\text{ }^{\circ}\text{C}$) 2014.08.02.-ei időpontra.

12. táblázat: A lineáris regressziós egyenletek abszolút és négyzetes hibái (°C) a nyolc időpontban a Gellért-hegyen (**pirossal kiemelve a legpontosabb becslést szolgáló összefüggés**).

Egyenlet/Időpont	2011.05.06	2011.05.22	2011.07.09	2011.09.11	2011.09.27	2013.07.14	2014.08.02	2014.08.18	Átlag	
$T_{felsz}=-26,05 \cdot NDVI + 37,80$		AE=8,73 MSE=0,27	AE=10,49 MSE=0,42	AE=6,84 MSE=0,24	AE=5,54 MSE=0,10	AE=5,49 MSE=0,18	AE=6,14 MSE=0,19	AE=2,76 MSE=0,06	AE=5,79 MSE=0,21	
$T_{felsz}=-14,67 \cdot NDVI + 41,47$	AE=8,85 MSE=0,31		AE=5,94 MSE=0,15	AE=5,46 MSE=0,15	AE=2,76 MSE=0,04	AE=11,78 MSE=0,43	AE=6,35 MSE=0,15	AE=8,63 MSE=0,27	AE=7,11 MSE=0,21	
$T_{felsz}=-38,17 \cdot NDVI + 51,81$	AE=12,76 MSE=0,75	AE=8,48 MSE=0,45		AE=5,32 MSE=0,13	AE=8,50 MSE=0,26	AE=16,63 MSE=1,04	AE=4,95 MSE=0,12	AE=5,30 MSE=0,12	AE=8,8 MSE=0,41	
$T_{felsz}=-51,10 \cdot NDVI + 55,55$	AE=8,41 MSE=0,37	AE=4,54 MSE=0,22	AE=5,04 MSE=0,11		AE=3,68 MSE=0,06	AE=11,95 MSE=0,56	AE=3,00 MSE=0,05	AE=2,32 MSE=0,04	AE=5,56 MSE=0,20	
$T_{felsz}=-17,38 \cdot NDVI + 39,97$	AE=6,63 MSE=0,20	AE=4,24 MSE=0,13	AE=5,39 MSE=0,13	AE=5,33 MSE=0,18		AE=9,76 MSE=0,31	AE=3,00 MSE=0,11	AE=5,43 MSE=0,04	AE=5,68 MSE=0,16	
$T_{felsz}=-7,53 \cdot NDVI + 25,59$	AE=4,94 MSE=0,12	AE=10,13 MSE=0,34	AE=12,81 MSE=0,56	AE=8,85 MSE=0,32	AE=6,99 MSE=0,16		AE=8,44 MSE=0,27	AE=5,38 MSE=0,12	AE=8,22 MSE=0,27	
$T_{felsz}=-52,57 \cdot NDVI + 56,66$	AE=8,97 MSE=0,41	AE=4,74 MSE=0,24	AE=4,71 MSE=0,10	AE=3,37 MSE=0,06	AE=4,09 MSE=0,07	AE=12,41 MSE=0,61		AE=2,39 MSE=0,04	AE=5,81 MSE=0,22	
$T_{felsz}=-43,17 \cdot NDVI + 50,10$	AE=6,18 MSE=0,24	AE=6,55 MSE=0,17	AE=4,71 MSE=0,17	AE=3,78 MSE=0,07	AE=2,49 MSE=0,03	AE=10,00 MSE=0,38	AE=3,31 MSE=0,07		AE=5,29 MSE=0,18	
$0 \leq AE \leq 1$	$1 < AE \leq 2$	$2 < AE \leq 3$	$3 < AE \leq 4$	$4 < AE \leq 5$	$5 < AE \leq 6$	$6 < AE \leq 7$	$7 < AE \leq 8$	$8 < AE \leq 9$	$9 < AE \leq 10$	$AE < 10$

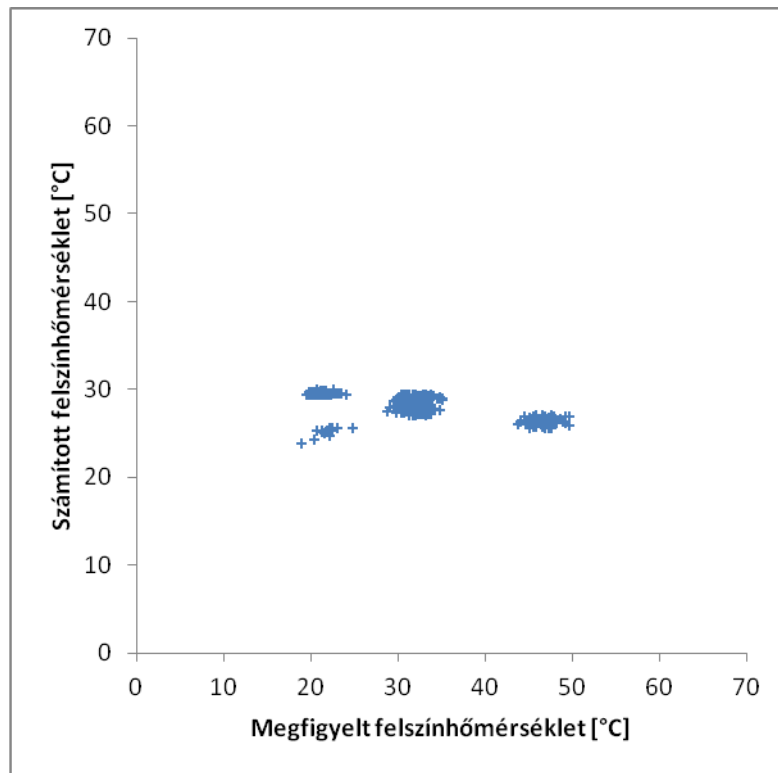


22. ábra: A legpontosabb egyenlettel (12. táblázat, **pirossal kiemelve**) számított ($AE=3,31\text{ }^{\circ}\text{C}$, $MSE=0,07\text{ }^{\circ}\text{C}$) és a megfigyelt (2014.08.02.) felszínhőmérséklet kapcsolata a Gellért-hegyen (356 képpont).

A Margit-szigetnél az egyenletek által nyújtott becslések kevésbé mutatkoztak pontosnak, mint az előző helyszínnél (13. táblázat): a legkisebb hibákat a 6. egyenlet (2013.07.14.) eredményezte (AE=7,19 °C, MSE=0,26 °C). Ez persze összefügg azzal, hogy a felszínhőmérséklet előállítása erre az „extrém” időpontra továbbra is nagy hibával terhelt a többi kapcsolatnál, hiszen mindegyik egyenlet abszolút hibája 17 °C felett adódott. Ezért eltekintve ettől az időponttól, a közelítéseink pontossága markánsan növekszik: ekkor már a jobb összefüggések átlagosan 5 °C körüli hibával bírnak. A 23. ábra is arra utal, hogy a 30 °C körüli értékek kivételével folyamatos felülbecslést okoz a 6. egyenlet. Érdeemes megfigyelni, hogy a különböző évszakokból származó időpontok lineáris regressziói igen jól „modellezik” az eltérő évszakok felszínhőmérsékletét, ami azt jelentheti, hogy az általunk vizsgált időszakban (május elejétől szeptember végéig) az NDVI viszonylag kis skálán változott a Margit-szigeten.

13. táblázat: A lineáris regressziós egyenletek abszolút és négyzetes hibái (°C) a nyolc időpontban a Margit-szigeten (**pirossal kiemelve a legpontosabb becslést szolgáló összefüggés**).

Egyenlet/Időpont	2011.05.06	2011.05.22	2011.07.09	2011.09.11	2011.09.27	2013.07.14	2014.08.02	2014.08.18	Átlag	
$T_{felsz}=-12,46 \cdot NDVI + 31,37$		AE=9,87 MSE=0,37	AE=7,51 MSE=0,29	AE=4,89 MSE=0,17	AE=6,46 MSE=0,17	AE=17,92 MSE=1,37	AE=5,24 MSE=0,21	AE=4,35 MSE=0,13	AE=8,03 MSE=0,40	
$T_{felsz}=-6,46 \cdot NDVI + 31,37$	AE=5,78 MSE=0,19		AE=4,61 MSE=0,20	AE=5,75 MSE=0,15	AE=6,01 MSE=0,19	AE=19,35 MSE=1,55	AE=6,17 MSE=0,19	AE=6,45 MSE=0,16	AE=7,73 MSE=0,38	
$T_{felsz}=-55,80 \cdot NDVI + 62,66$	AE=12,12 MSE=0,71	AE=5,23 MSE=0,26		AE=5,25 MSE=0,17	AE=6,02 MSE=0,19	AE=29,28 MSE=3,09	AE=6,33 MSE=0,28	AE=6,69 MSE=0,28	AE=10,13 MSE=0,71	
$T_{felsz}=-28,01 \cdot NDVI + 42,65$	AE=7,48 MSE=0,33	AE=5,66 MSE=0,19	AE=4,52 MSE=0,12		AE=3,56 MSE=0,08	AE=23,72 MSE=2,13	AE=3,00 MSE=0,16	AE=4,84 MSE=0,04	AE=7,54 MSE=0,44	
$T_{felsz}=-28,23 \cdot NDVI + 42,21$	AE=7,12 MSE=0,31	AE=6,04 MSE=0,20	AE=5,03 MSE=0,14	AE=3,92 MSE=0,10		AE=23,28 MSE=2,06	AE=4,71 MSE=0,16	AE=4,06 MSE=0,13	AE=7,74 MSE=0,44	
$T_{felsz}=-32,04 \cdot NDVI + 38,39$	AE=5,99 MSE=0,23	AE=8,73 MSE=0,37	AE=6,20 MSE=0,26	AE=7,34 MSE=0,23	AE=5,77 MSE=0,19		AE=7,60 MSE=0,28	AE=8,68 MSE=0,29	AE=7,19 MSE=0,26	
$T_{felsz}=-22,30 \cdot NDVI + 39,45$	AE=6,83 MSE=0,26	AE=6,40 MSE=0,20	AE=4,70 MSE=0,14	AE=4,36 MSE=0,11	AE=3,74 MSE=0,08	AE=22,37 MSE=1,92		AE=4,74 MSE=0,13	AE=7,59 MSE=0,41	
$T_{felsz}=-21,76 \cdot NDVI + 36,92$	AE=5,60 MSE=0,21	AE=8,25 MSE=0,26	AE=6,85 MSE=0,22	AE=4,35 MSE=0,13	AE=4,88 MSE=0,11	AE=20,32 MSE=1,65	AE=4,85 MSE=0,17		AE=7,87 MSE=0,39	
0<AE≤1	1<AE≤2	2<AE≤3	3<AE≤4	4<AE≤5	5<AE≤6	6<AE≤7	7<AE≤8	8<AE≤9	9<AE≤10	AE<10

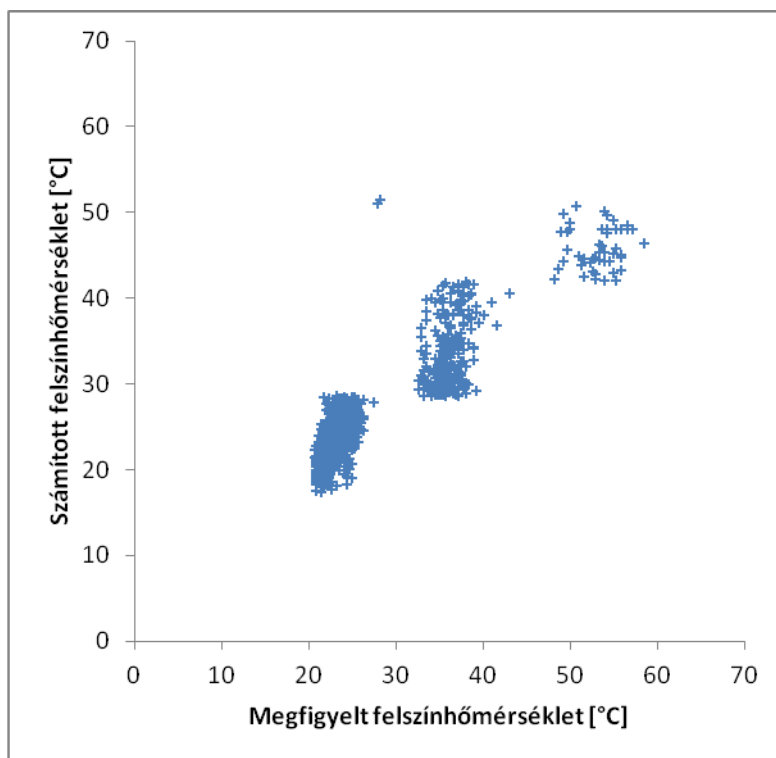


23. ábra: A legpontosabb egyenlettel (13. táblázat, **pirossal kiemelve**) számított ($AE=5,77\text{ °C}$, $MSE=0,19\text{ °C}$) és a megfigyelt (2011.09.27.) felszínhőmérséklet kapcsolata a Margit-szigeten (752 képpont).

A legpontosabb becslést ($AE=5,08\text{ °C}$, $MSE=0,04\text{ °C}$) átlagosan a 4. egyenlet (2011.09.11.) nyújtotta a felszínhőmérsékletre a *Népliget*nél (14. táblázat). 3 időpontra is (2011.09.27., 2014.08.02., 2014.08.18.) 3 °C alatti (rendre: $2,96\text{ °C}$, $2,97\text{ °C}$, $2,25\text{ °C}$) abszolút hiba adódott az átlagosan 1249 képpont kiterjedésű pesti parkra. Ezen egyenlet alapján 2014.08.18-ra kiszámított felszínhőmérsékleteinek három, határozottan elkülönülő halmaza jó közelítéssel a diagram tengelyeinek átlójában helyezkedik el, ez jól reprezentálja a kis differenciákat (24. ábra). A nyolc összefüggés között relatíve kis eltérés mutatkozott, hiszen a legrosszabb és legjobb közelítés között az átlagos $AE\ 3,67\text{ °C}$ volt, ezért az itt megjelenő egyenletek közel hasonló sikerességgel alkalmazhatók a felszínhőmérséklet megadására.

14. táblázat: A lineáris regressziós egyenletek abszolút és négyzetes hibái (°C) a nyolc időpontban a Népligetben (**pirossal kiemelve a legpontosabb becslést szolgáló összefüggés**).

Egyenlet/Időpont	2011.05.06	2011.05.22	2011.07.09	2011.09.11	2011.09.27	2013.07.14	2014.08.02	2014.08.18	Átlag
$T_{\text{felsz}} = -21,71 \cdot \text{NDVI} + 45,17$		AE=3,59 MSE=0,03	AE=4,94 MSE=0,03	AE=5,63 MSE=0,04	AE=4,37 MSE=0,02	AE=11,58 MSE=0,11	AE=6,45 MSE=0,04	AE=7,19 MSE=0,05	AE=6,25 MSE=0,05
$T_{\text{felsz}} = -32,12 \cdot \text{NDVI} + 49,32$	AE=8,48 MSE=0,08		AE=3,75 MSE=0,03	AE=5,11 MSE=0,03	AE=4,21 MSE=0,02	AE=11,74 MSE=0,12	AE=5,31 MSE=0,03	AE=5,56 MSE=0,03	AE=6,31 MSE=0,05
$T_{\text{felsz}} = -54,06 \cdot \text{NDVI} + 62,71$	AE=13,29 MSE=0,19	AE=6,54 MSE=0,07		AE=7,49 MSE=0,07	AE=8,18 MSE=0,07	AE=15,05 MSE=0,24	AE=5,54 MSE=0,03	AE=5,18 MSE=0,03	AE=8,75 MSE=0,06
$T_{\text{felsz}} = -44,74 \cdot \text{NDVI} + 50,91$	AE=5,97 MSE=0,06	AE=4,61 MSE=0,04	AE=7,21 MSE=0,06		AE=2,96 MSE=0,01	AE=9,57 MSE=0,09	AE=2,97 MSE=0,02	AE=2,25 MSE=0,01	AE=5,08 MSE=0,04
$T_{\text{felsz}} = -38,47 \cdot \text{NDVI} + 48,47$	AE=6,00 MSE=0,05	AE=4,69 MSE=0,04	AE=6,47 MSE=0,05	AE=3,86 MSE=0,02		AE=9,59 MSE=0,09	AE=3,37 MSE=0,02	AE=2,42 MSE=0,01	AE=5,20 MSE=0,04
$T_{\text{felsz}} = -37,51 \cdot \text{NDVI} + 42,80$	AE=4,39 MSE=0,04	AE=9,25 MSE=0,08	AE=11,61 MSE=0,13	AE=5,65 MSE=0,04	AE=5,72 MSE=0,04		AE=6,11 MSE=0,05	AE=4,91 MSE=0,03	AE=6,81 MSE=0,05
$T_{\text{felsz}} = -58,97 \cdot \text{NDVI} + 59,49$	AE=8,87 MSE=0,11	AE=4,14 MSE=0,04	AE=6,02 MSE=0,04	AE=4,23 MSE=0,03	AE=4,21 MSE=0,03	AE=11,58 MSE=0,16		AE=2,59 MSE=0,01	AE=5,96 MSE=0,06
$T_{\text{felsz}} = -47,60 \cdot \text{NDVI} + 53,36$	AE=6,99 MSE=0,07	AE=3,99 MSE=0,03	AE=6,25 MSE=0,04	AE=3,83 MSE=0,02	AE=3,14 MSE=0,02	AE=10,39 MSE=0,11	AE=2,93 MSE=0,01		AE=5,36 MSE=0,04
$0 \leq \text{AE} \leq 1$	$1 < \text{AE} \leq 2$	$2 < \text{AE} \leq 3$	$3 < \text{AE} \leq 4$	$4 < \text{AE} \leq 5$	$5 < \text{AE} \leq 6$	$6 < \text{AE} \leq 7$	$7 < \text{AE} \leq 8$	$8 < \text{AE} \leq 9$	$9 < \text{AE} \leq 10$

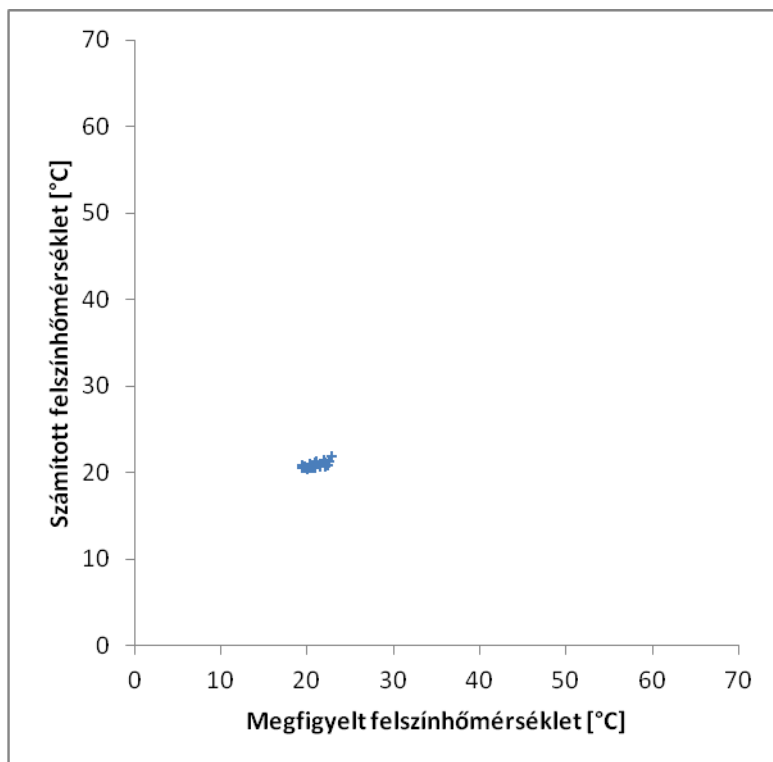


24. ábra: A legpontosabb egyenlettel (14. táblázat, **pirossal kiemelve**) számított (AE=2,25 °C, MSE=0,01 °C) és a megfigyelt (2014.08.18.) felszínhőmérséklet kapcsolata a Népligetben (1273 képpont).

A Normafára kapott eredmények interpretálásánál fontos hangsúlyoznunk, hogy e terület kis kiterjedése miatt (átlagosan 28 képpont) az összefüggések – elméleti megfontolások miatt – nem tekinthetők kielégítő pontosságúnak, ugyanakkor arra mindenképpen alkalmasak, hogy egy elsődleges becslést adjanak a két változó statisztikai kapcsolatáról. A 15. táblázatban összefoglalt értékek és a 25. ábra is nagymértékű kiegyensúlyozottságot mutatnak e területre. Mindeközben a közelítések átlagos abszolút hibái is a többi öt helyszín esetén kapott hibák alatt maradnak. A két utóbbi megállapítás annak a következménye, hogy a vizsgált terület jóval kisebb kiterjedésű a többinél, és emellett rendkívül homogén felszínborítottsággal rendelkezik, azaz az NDVI pixelértékek kis szórással jellemezhetők. A legjobb becslést az augusztus végi időpont (2014.08.18.) egyenlete adta (AE=3,25 °C, MSE=0,55 °C). Az eddig „kritikusnak” számító 2013-as időpont hibái itt nem mutatkoztak meghatározónak, ami elsődlegesen a nagyobb (kb. 400 m) tengerszint feletti magassággal magyarázható.

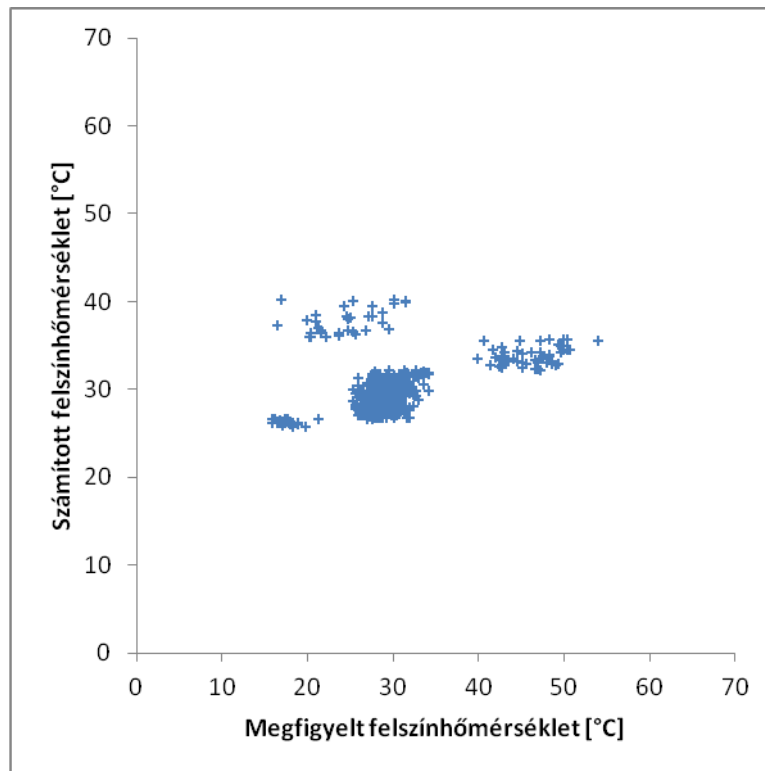
15. táblázat A lineáris regressziós egyenletek abszolút és négyzetes hibái (°C) a nyolc időpontban a Normafán (**pirossal kiemelve a legpontosabb becslést szolgáló összefüggés**).

Egyenlet/Időpont	2011.05.06	2011.05.22	2011.07.09	2011.09.11	2011.09.27	2013.07.14	2014.08.02	2014.08.18	Átlag
$T_{felsz} = -30,25 \cdot NDVI + 41,18$		AE=2,54 MSE=0,22	AE=6,13 MSE=1,47	AE=5,63 MSE=0,17	AE=4,17 MSE=0,44	AE=3,19 MSE=0,41	AE=2,44 MSE=0,22	AE=1,12 MSE=0,08	AE=3,60 MSE=0,43
$T_{felsz} = -53,88 \cdot NDVI + 53,13$	AE=8,04 MSE=1,53		AE=9,52 MSE=3,68	AE=5,29 MSE=1,19	AE=2,90 MSE=0,26	AE=2,16 MSE=0,35	AE=6,27 MSE=1,42	AE=2,69 MSE=0,37	AE=6,17 MSE=1,26
$T_{felsz} = -8,93 \cdot NDVI + 33,13$	AE=14,38 MSE=4,71	AE=6,69 MSE=1,26		AE=4,30 MSE=0,67	AE=8,40 MSE=1,68	AE=7,25 MSE=1,90	AE=5,54 MSE=0,56	AE=7,02 MSE=1,83	AE=7,65 MSE=1,80
$T_{felsz} = -7,47 \cdot NDVI + 27,86$	AE=9,98 MSE=4,08	AE=2,78 MSE=0,29	AE=4,30 MSE=0,69		AE=3,97 MSE=0,38	AE=2,81 MSE=0,30	AE=0,31 MSE=0,01	AE=2,72 MSE=0,28	AE=3,84 MSE=0,86
$T_{felsz} = 4,51 \cdot NDVI + 17,00$	AE=6,24 MSE=0,91	AE=2,15 MSE=0,40	AE=7,19 MSE=1,95	AE=2,87 MSE=0,31		AE=1,28 MSE=0,10	AE=2,84 MSE=0,28	AE=0,49 MSE=0,01	AE=3,29 MSE=0,57
$T_{felsz} = -12,46 \cdot NDVI + 27,88$	AE=7,03 MSE=1,14	AE=1,19 MSE=0,22	AE=7,59 MSE=2,15	AE=3,31 MSE=0,40	AE=1,11 MSE=0,04		AE=3,57 MSE=0,43	AE=0,61 MSE=0,02	AE=3,49 MSE=0,63
$T_{felsz} = -9,81 \cdot NDVI + 29,63$	AE=10,36 MSE=2,45	AE=3,12 MSE=0,33	AE=4,08 MSE=0,63	AE=0,37 MSE=0,01	AE=4,40 MSE=0,46	AE=3,25 MSE=0,40		AE=2,94 MSE=0,32	AE=4,07 MSE=0,66
$T_{felsz} = -6,29 \cdot NDVI + 24,37$	AE=7,19 MSE=1,19	AE=1,18 MSE=0,25	AE=7,00 MSE=1,83	AE=2,70 MSE=0,27	AE=1,16 MSE=0,04	AE=0,65 MSE=0,02	AE=2,85 MSE=0,28		AE=3,25 MSE=0,55
$0 \leq AE \leq 1$	$1 < AE \leq 2$	$2 < AE \leq 3$	$3 < AE \leq 4$	$4 < AE \leq 5$	$5 < AE \leq 6$	$6 < AE \leq 7$	$7 < AE \leq 8$	$8 < AE \leq 9$	$9 < AE \leq 10$



25. ábra: A legpontosabb egyenlettel (15. táblázat, **pirossal kiemelve**) számított ($AE=0,65\text{ °C}$, $MSE=0,02\text{ °C}$) és a megfigyelt (2013.07.14.) felszínhőmérséklet kapcsolata Normafán (28 képpont).

A Normafával szemben a *Városliget* már nem tekinthető teljesen homogén felszínűnek, mivel itt a zöldfelület mellett kisebb utak, épületek is megjelennek. Ennélfogva a nyolc egyenlet átlagos hibáiban is nagyobb differenciák adódtak, az eltérések (átlagos abszolút és négyzetes hiba) a legpontosabb (2013.07.14.; $AE=5,84\text{ °C}$, $MSE=0,09\text{ °C}$) és a legkevésbé pontos (2011.07.09.; $AE=8,95\text{ °C}$, $MSE=0,18\text{ °C}$) kapcsolatok között rendre $3,11\text{ °C}$ és $0,09\text{ °C}$ voltak (16. táblázat). Továbbá ki kell még emelnünk a 2011.09.27-re vonatkozó egyenletet, mely – a 2013-as alkalom kivételével – sokkal pontosabb becslést ad ($AE=5,02\text{ °C}$, $MSE=0,06\text{ °C}$). E helyszínnél a 2013.07.14-i mellett a 2011.07.09-i időpont felszínhőmérsékleteinek a közelítése is problémás volt, hiszen három egyenletnél is (2011.05.06., 2013.07.14., 2014.04.18.) 10 °C feletti abszolút hiba következett be. A legpontosabb egyenlettel (15. táblázat, **pirossal kiemelve**) számított és a megfigyelt felszínhőmérséklet (2011.05.06) kapcsolatát bemutató 26. ábrán is jelentkezik a felszínborítottság inhomogenitásából eredő hatások. A becslés relatíve kis hibáját ($AE=3,04\text{ °C}$, $MSE=0,04\text{ °C}$) az okozza, hogy a 30 °C körüli értékekre igen pontos közelítést kaptunk, és ezek száma meghaladja az egyéb csoportba tartozó pixeleket (itt nagyobb felülbecslések mutatkoznak).

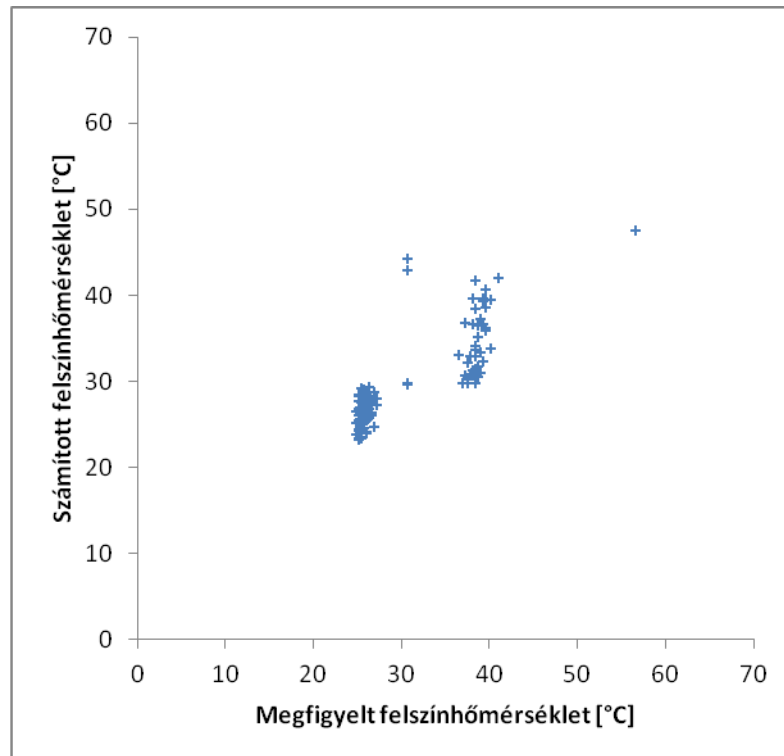


26. ábra: A legpontosabb egyenlettel (16. táblázat, **pirossal kiemelve**) számított ($AE=3,04\text{ °C}$, $MSE=0,04\text{ °C}$) és a megfigyelt (2011.05.06.) felszínhőmérséklet kapcsolata a Városligetben (683 képpont).

16. táblázat: A lineáris regressziós egyenletek abszolút és négyzetes hibái ($^{\circ}\text{C}$) a nyolc időpontban a Városligetben (**pirossal kiemelve a legpontosabb becslést szolgáló összefüggés**).

Egyenlet/Időpont	2011.05.06	2011.05.22	2011.07.09	2011.09.11	2011.09.27	2013.07.14	2014.08.02	2014.08.18	Átlag
$T_{\text{felsz}} = -16,69 \cdot \text{NDVI} + 35,19$		AE=7,94 MSE=0,11	AE=10,20 MSE=0,21	AE=6,01 MSE=0,09	AE=5,01 MSE=0,05	AE=8,51 MSE=0,18	AE=4,81 MSE=0,08	AE=4,17 MSE=0,05	AE=6,66 MSE=0,11
$T_{\text{felsz}} = -12,36 \cdot \text{NDVI} + 40,75$	AE=8,11 MSE=0,11		AE=6,50 MSE=0,08	AE=5,13 MSE=0,06	AE=4,29 MSE=0,04	AE=12,56 MSE=0,23	AE=6,32 MSE=0,08	AE=9,51 MSE=0,14	AE=7,49 MSE=0,11
$T_{\text{felsz}} = -36,93 \cdot \text{NDVI} + 54,21$	AE=12,10 MSE=0,27	AE=6,78 MSE=0,11		AE=5,05 MSE=0,05	AE=7,65 MSE=0,10	AE=16,14 MSE=0,47	AE=5,94 MSE=0,08	AE=9,02 MSE=0,17	AE=8,95 MSE=0,18
$T_{\text{felsz}} = -50,58 \cdot \text{NDVI} + 55,96$	AE=9,19 MSE=0,20	AE=4,67 MSE=0,11	AE=5,81 MSE=0,09		AE=4,70 MSE=0,05	AE=14,72 MSE=0,46	AE=3,37 MSE=0,04	AE=4,31 MSE=0,11	AE=6,68 MSE=0,15
$T_{\text{felsz}} = -30,54 \cdot \text{NDVI} + 44,47$	AE=5,40 MSE=0,08	AE=4,36 MSE=0,06	AE=7,56 MSE=0,12	AE=4,25 MSE=0,04		AE=11,48 MSE=0,23	AE=4,17 MSE=0,04	AE=4,35 MSE=0,06	AE=5,94 MSE=0,09
$T_{\text{felsz}} = -18,65 \cdot \text{NDVI} + 35,93$	AE=3,04 MSE=0,04	AE=7,91 MSE=0,11	AE=10,38 MSE=0,21	AE=5,97 MSE=0,09	AE=4,97 MSE=0,05		AE=4,75 MSE=0,08	AE=3,85 MSE=0,05	AE=5,84 MSE=0,09
$T_{\text{felsz}} = -43,81 \cdot \text{NDVI} + 52,19$	AE=7,85 MSE=0,15	AE=4,01 MSE=0,08	AE=6,26 MSE=0,09	AE=3,34 MSE=0,02	AE=3,81 MSE=0,04	AE=13,65 MSE=0,36		AE=4,20 MSE=0,09	AE=6,16 MSE=0,12
$T_{\text{felsz}} = -20,70 \cdot \text{NDVI} + 36,81$	AE=3,09 MSE=0,04	AE=7,79 MSE=0,11	AE=10,46 MSE=0,21	AE=5,92 MSE=0,08	AE=4,84 MSE=0,05	AE=8,75 MSE=0,18	AE=4,74 MSE=0,07		AE=6,51 MSE=0,11
0≤AE≤1	1<AE≤2	2<AE≤3	3<AE≤4	4<AE≤5	5<AE≤6	6<AE≤7	7<AE≤8	8<AE≤9	9<AE≤10
									AE<10

A Népligetnél és a Városligetnél kisebb kiterjedésű (átlagosan 124 képpont) budai parknál (Vérmezőnél) a legjobb becslést az utolsó időpont (2014.08.18.) egyenlete szolgáltatta (17. táblázat és 27. ábra; $AE=4,91\text{ }^{\circ}\text{C}$, $MSE=0,37\text{ }^{\circ}\text{C}$). Két esetben (2011.07.14. és 2013.07.14.) a felszínhőmérséklet közelítése jól láthatóan igen nagy hibákkal bír ($AE=12,28\text{ }^{\circ}\text{C}$, $MSE=1,42\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $AE=9,60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $MSE=0,86\text{ }^{\circ}\text{C}$), de a további hat időpontban csak átlagosan 5-6 $^{\circ}\text{C}$ -os abszolút hibákat figyelhetünk meg. A 2013.07.14-i időpontnál az esetek hozzávetőleg 57%-ában 10 $^{\circ}\text{C}$ alatti AE adódott, ami az eddigi helyszínekhez képest (kivételt jelent Normafa) javulást jelentett a felszín hőmérsékletének megadásában.



27. ábra: A legpontosabb egyenlettel (17. táblázat, **pirossal kiemelve**) számított ($AE=2,58\text{ }^{\circ}\text{C}$, $MSE=0,12\text{ }^{\circ}\text{C}$) és a megfigyelt (2014.08.02.) felszínhőmérséklet kapcsolata Vérmezőn (115 képpont).

17. táblázat: A lineáris regressziós egyenletek abszolút és négyzetes hibái (°C) a nyolc időpontban a Vérmezőn (**pirossal kiemelve a legpontosabb becslést szolgáló összefüggés**).

Egyenlet/Időpont	2011.05.06	2011.05.22	2011.07.09	2011.09.11	2011.09.27	2013.07.14	2014.08.02	2014.08.18	Átlag	
$T_{felsz}=-35,56 \cdot NDVI + 44,16$		AE=7,82 MSE=0,67	AE=9,90 MSE=0,99	AE=6,35 MSE=0,52	AE=2,92 MSE=0,12	AE=6,21 MSE=0,48	AE=4,40 MSE=0,29	AE=3,50 MSE=0,16	AE=5,87 MSE=0,46	
$T_{felsz}=-21,10 \cdot NDVI + 45,99$	AE=7,89 MSE=0,64		AE=4,89 MSE=0,22	AE=3,80 MSE=0,26	AE=5,03 MSE=0,22	AE=12,38 MSE=1,38	AE=5,87 MSE=0,40	AE=7,10 MSE=0,46	AE=6,71 MSE=0,51	
$T_{felsz}=-52,48 \cdot NDVI + 62,07$	AE=15,15 MSE=2,20	AE=9,45 MSE=1,12		AE=8,59 MSE=0,82	AE=13,26 MSE=1,53	AE=18,07 MSE=3,27	AE=10,29 MSE=1,04	AE=11,15 MSE=0,94	AE=12,28 MSE=1,42	
$T_{felsz}=-49,04 \cdot NDVI + 56,31$	AE=6,77 MSE=0,53	AE=4,67 MSE=0,11	AE=4,34 MSE=0,27		AE=3,75 MSE=0,44	AE=10,90 MSE=1,23	AE=3,10 MSE=0,13	AE=2,98 MSE=0,09	AE=5,22 MSE=0,40	
$T_{felsz}=-27,57 \cdot NDVI + 43,85$	AE=3,43 MSE=0,17	AE=5,53 MSE=0,45	AE=6,43 MSE=0,53	AE=4,86 MSE=0,28		AE=8,55 MSE=0,72	AE=3,66 MSE=0,17	AE=3,83 MSE=0,14	AE=5,18 MSE=0,35	
$T_{felsz}=-54,30 \cdot NDVI + 48,35$	AE=4,43 MSE=0,22	AE=10,01 MSE=1,02	AE=14,58 MSE=1,96	AE=10,23 MSE=1,09	AE=4,89 MSE=0,27		AE=9,52 MSE=0,87	AE=8,68 MSE=0,59	AE=9,60 MSE=0,86	
$T_{felsz}=-49,79 \cdot NDVI + 55,41$	AE=5,58 MSE=0,39	AE=3,81 MSE=0,43	AE=5,42 MSE=0,38	AE=3,60 MSE=0,15	AE=4,42 MSE=0,24	AE=9,95 MSE=1,04		AE=2,57 MSE=0,07	AE=5,05 MSE=0,39	
$T_{felsz}=-48,62 \cdot NDVI + 54,09$	AE=4,76 MSE=0,31	AE=4,08 MSE=0,42	AE=6,15 MSE=0,45	AE=3,77 MSE=0,18	AE=3,72 MSE=0,18	AE=9,33 MSE=0,91	AE=2,58 MSE=0,12		AE=4,91 MSE=0,37	
0≤AE≤1	1<AE≤2	2<AE≤3	3<AE≤4	4<AE≤5	5<AE≤6	6<AE≤7	7<AE≤8	8<AE≤9	9<AE≤10	AE<10

7. Összefoglalás

E dolgozatban a felszínhőmérséklet és a Normalizált Vegetációs Különbséges Index (NDVI) kapcsolatát vizsgáltuk a Landsat 7 műhold ETM+ szenzorának mérései alapján Budapestre. Ismert, hogy a nagyfokú beépítettség és az emberi tevékenységek együttes hatása okán létrejövő hőtöbblet sajátos éghajlatot eredményez a városokban. A települések környezeti terhelésének a csökkentésére az egyik leghatásosabb eszköz a zöldfelületek (parkok) számának és területének növelése, ugyanis a növényzet a magasabb albedója, árnyékoló hatása, evapotranszpirációja révén mérsékli a felszín és ezzel a levegő hőmérsékletét. Ennek okán a tanulmány fő célja az volt, hogy számszerűsítsük a vegetáció felszínhőmérsékletre gyakorolt hatását, valamint rámutassunk néhány olyan fővárosi területre, ahol a felszínborítottság jellegének módosítása szükséges lenne. Korábbi tapasztalatainkat felhasználva a 2011-es, a 2013-as és 2014-es nyári hónapok négy időpontjára esett a választásunk. Ezt egyrészt az indokolta, hogy a városi hatás intenzitása a nyári időszakban maximális Budapesten, másrészt a növényzet – élettani sajátossága miatt – ebben a periódusban járul hozzá kiváltképpen a hőtöbblet mérsékléséhez.

Első lépésben előállítottuk a vörös és közeli infravörös sáv reflektanciáiból az NDVI területi eloszlását. Láttuk, hogy a legalacsonyabb értékek (a Dunát nem tekintve) a sűrűn beépített belvárosi részeken adódtak, míg a szigetszerűen elhelyezkedő parkokra és a magasabban fekvő részekre rendre 0,4 feletti eredményeket kaptunk. Az időpontok közül a legutolsóban (2014.08.18.) figyelhettük meg átlagosan a legmagasabb NDVI-t, ami a növényzet dinamikájával és a fejlődés során bekövetkező kisebb hő- és vízstresszel magyarázható. Ezután 12 különböző fővárosi helyszínrre is értékeltük az eredményeket, melyekből egyértelműen kitűnik a Normafa nagymértékű növényborítottsága és a Belváros, Újpest, illetve Ferencváros sűrű beépítettsége.

A felszínhőmérséklet tanulmányozása során kiderült, hogy a legmelegebb napon (2011.07.09.) Újpesten akár 50,0 °C feletti értékek is megjelentek, ezzel szemben Normafán csupán 27,2 °C volt. Emellett a főváros parkjaiban (pl. Népliget, Városliget, Vörösmarty) is rendre alacsonyabb hőmérsékletek alakultak ki: az általunk definiált ferencvárosi tömb és a szomszédságában lévő Népliget között hozzávetőleg 15 °C-os eltérés jelentkezett. A leghűvösebbnek számító utolsó időpontban (2014.08.18.) ugyan mérséklődött a hőmérséklet-különbség a különböző jellegű részek között, de Újpesten és Ferencvárosban ekkor is jelentős hőtöbblet adódott, ami a beavatkozás fontosságára hívja fel a figyelmet.

Végül lineáris regresszióval kapcsolatot állítottunk fel a felszínhőmérséklet és az NDVI között. További négy időpontot vontunk be az elemzéseinkbe (két tavaszi és két őszi) annak érdekében, hogy még átfogóbb képet kapjunk a két változó viszonyáról a 12 helyszínen. Kiderült, hogy az NDVI paraméter leginkább nyáron befolyásolja a felszín hőmérsékletének alakulását, tavasszal és ősszel kisebb hatással bír, aminek alapvetően fizikai magyarázata van. Az egyenleteink viselkedéséről elmondható, hogy – elsősorban nyáron és ősszel – a sűrűn beépített területeken (Újpest, Ferencváros, Óbuda, Ferencvárosi pályaudvar) az eljárás nem igazán alkalmazható sikeresen, ugyanakkor a 0,4-nél nagyobb NDVI értékű helyszíneken általában magas ($r < -0,60$) negatív korrelációkat kaptunk, ami a két változó szoros kapcsolatát, és a köztük lévő fordított arányosságot emeli ki. A 8×12 egyenlet közül igyekeztünk kiválasztani azt a hatot, amelyek legjobban képesek megbecsülni az uralkodóan növényzettel borított területek (Gellért-hegy, Margit-sziget, Népliget, Normafa, Városliget, Vérmező) felszínhőmérsékletét a nyolc időpont összehasonlításában. Az egyenletek „jóságát” az átlagos abszolút és négyzetes hibával számszerűsítettük, amelyek alapján leszűrhető, hogy a legjobb összefüggések átlagosan $3-6\text{ °C}$ -os hibával képesek visszaadni a Landsat 7 által megfigyelt értékeket, így ezek az egyenletek felszíni viszonyok módosításának számszerűsítésénél lehetnek hasznosak.

A jövőben szeretnénk még tovább növelni az elemzett időpontok számát a folyamatok pontosabb feltérképezése érdekében, jóllehet, ebben az adatok hozzáférhetősége némi korlátot jelenthet. Terveink között szerepel, hogy a felszín emisszivitásának meghatározására egy részletesebb módszert alkalmazzunk, hiszen ez megalapozná a felszínhőmérséklet még pontosabb kiszámítását. Célunk, hogy az eredményeinket összehasonlítsuk más produktumokkal, ehhez azonban a felszíni mérések hiányában további műholdadatokat bevonására (pl. ASTER) vagy beágyazott modellfuttatásra (pl. WRF) lesz szükségünk.

Irodalomjegyzék

- Akbari, H., Rosenfeld, A.H., Taha, H. (1991): Summer heat island, urban trees, and white surfaces. Proceedings of the 1990, ASHRAE Winter Conference, 9p.
- Alipour, T., Sarajian, M.R., Esmaely, A. (2011): Land surface estimation from thermal band of Landsat sensor, case study: Alashtar city. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-4/C7, 6p.
- Atwell, B.J., Kriedemann, P.E., Turnbull, C.G.N. (1999): Plants in Action: Adaptation in Nature, Performance in Cultivation. Macmillan Education AU, 664 p.
- Bartholy J., Pongrácz R., Gelybó Gy., Szabó P. (2007): A hőmérsékleti extrémumok várható alakulása a Kárpát-medence térségében a XXI. század végén. *Klíma–23 Füzetek* **51**, pp. 7–17.
- Bornstein, R. és Lin, Q. (2000): Urban heat island and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies. *Atmospheric Environment* **34**, pp. 507–516.
- Carlson, T. N., and D. A. Ripley (1997): On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment* **62**, pp. 243–252.
- Chandler, G., Markham B.L., Helder, S.L. (2009): Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment* **113**, pp. 893–903.
- Cox, W. (2013): World Urban Areas: 9th Annual Edition (2013), Demographia, 173 p.
- Cristóbal, J., Jiménez-Munoz, J.C., Sobrino, J.A., Ninyerola, M., Pons, X. (2009): Improvements in land surface temperature retrieval from the Landsat series thermal band using water vapor and air temperature. *Journal of Geophysical Research* **114**, D08103.
- Dezső Zs., Bartholy J., Pongrácz R. (2005): Satellite-based analysis of the urban heat island effect. *Időjárás*, **109**, pp. 217–232.
- Dezső Zs., Bartholy J., Pongrácz R., Lelovics E. (2012): Városi hősziget vizsgálatok műholdas és állomási adatok alapján. *Léggör*, **57**, pp. 170–173.
- Duckworth, F.S. és Sandberg, J.S. (1954): The effect of cities upon horizontal and vertical temperature gradient. *Bulletin of American Meteorological Society* **35**, pp. 198–207.
- Emeis, S. (2011): Surface-Based Remote Sensing of the Atmospheric Boundary Layer. *Atmospheric and Oceanographic Sciences Library* **40**, Springer, 174 p.

- ENSZ, *Department of Economic and Social Affairs, Population Division* (2013): *World Population Prospects: The 2012 Revision, Volume I: Comprehensive Tables ST/ESA/SER.A/336*.
- European Environmental Agency* (2011): *Air quality in Europe – 2011 report. EEA Technical Report 12*, 88 p.
- Halfon, N., Levin, Z., Alpert, P. (2009): Temporal rainfall fluctuations in Israel and their possible link to urban and air pollution effects. *Environmental Research Letters* **4**, 12 p.
- Jaenicke, R. (1988): Aerosol physics and chemistry. *Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik* **4b**, pp. 391–457.
- Landsberg, H.E. (1981): *The urban climate*. The Academic Press, London, 275 p.
- Lelovics E., Pongrácz R., Bartholy J., Dezső Zs. (2011): Budapesti városi hősziget elemzése: műholdas és felszíni mérések összehasonlítása. *Légkör*, **56**, pp. 55-59.
- Lopes, C., Adnot, J., Santamouris, M., Klitsikas, N., Alvarez, S., Sanchez, F. (2001): Managing the growth of the demand for cooling urban areas and mitigating the urban heat island effect., *Eceee 2001 Summer Study*.
- Madarassy J., Simon G., Lukács A., Beliczay E., Lenkei P. (2013): Korommentes városok. Követendő példák a közlekedési légszennyezés csökkentésére. *Levegő Munkacsoport*, 46 p.
- Mallick, J., Kant, Y., Bharath, B.D. (2008): Estimation of land surface temperature over Delhi using Landsat-7 ETM+, *J. Ind. Geophys. Union* **12**, pp. 131–140.
- Oke, T.R. és Hannel F.G. (1970): *Urban Climates*. WMO, *Tech Note* **108**, pp. 113–126.
- Páldy A. és Bobvos J. (2011): *Local city report Budapest*, Aphekom, 30 p.
- Péczely Gy. (1979): *Éghajlat*, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 336 p.
- Probáld F. (1974): *Budapest városklímája*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 126 p.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. (1973): Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351 I, pp. 309–317.
- Senanayake, I.P., Welivitiya, W.D.D.P., Nadeeka, P.M. (2013): Remote sensing based analysis of urban heat islands with vegetation cover in Colombo city, Sri Lanka using Landsat-7 ETM+ data. *Urban Climate* **5**, pp. 19–35.
- Sobrino, J. A. és Raissouni, N. (2000): Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Morocco, *International Journal of Remote Sensing*, **21**, pp. 353–366.
- Sobrino, J. A., Jiménez-Munoz, J.C., Soria, G., Romaguera, M., Guanter, L., Moreno, J., Plaza, A., Martínez, P. (2008): Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *International Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **46**, pp. 316–327.

- Storey, J., Scaramuzza, P., Schmidt, G., Barsi, J. (2005): Landsat 7 scan line corrector-off gap-filled product development. Proceedings of Pecora 16 Global Priorities in Land Remote Sensing. October 23-27, South Dakota: Sioux Falls.
- Upmanis, H., Eliasson, I., Lindqvist, S. (1998): The influence of green areas on nocturnal temperature in high latitude city (Göteborg, Sweden). *International Journal of Climatology* **18**, pp. 681–700.
- Urban, M., Eberle, J., Hüttich, C., Schmullius, C., Herold, M. (2013): Comparison of Satellite-Derived Land Surface Temperature and Air Temperature from Meteorological Stations on the Pan-Arctic Scale. *Remote Sens.* **5**, 2348–2367.
- Van Hove, L.W.A., Steeneveld, G.J., Jacobs, C.M.J., Heusinkveld, B.G., Elbers, J.A., Moors, E.J., Holstaag, A.A.M. (2011): Exploring the Urban Heat Island Intensity of Dutch Cities., 63 p.
- Zeng, C., Shen, H., Zhang, L. (2013): Recovering missing pixels for Landsat ETM+ SLC-off imagery using multi-temporal regression analysis and a regularization method. *Remote Sensing of Environment* **131**, pp. 182–194.
- Zhang, C., Li, W., Travis, D. (2007): Gaps-fill of SLC-off Landsat ETM+ satellite image using a geostatistical approach. *International Journal of Remote Sensing* **28**, pp. 5103–5122.

Internetes hivatkozások

[1 – Az USGS Landsat weboldala]

http://landsat.usgs.gov/about_landsat7.php

[2 – Központi Statisztikai Hivatal weboldala]

http://www.ksh.hu/nepszamlalas/tablak_teruleti_01

[3 – European Environmental Agency weboldala]

<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/urban-atlas>

[4 – OMSZ weboldal: Napijelentés kiadvány]

http://met.hu/idojaras/aktualis_idojaras/napijelentes/

[5 – Google Earth]

<https://www.google.com/earth/>

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni a témavezetőimnek, Dr. Pongrácz Ritának és Soósné Dr. Dezső Zsuzsannának, hogy a témában szerzett tapasztalataikat megosztották velem, és a konzultációk során hasznos tanácsokkal láttak el. Továbbá hálás vagyok a családomnak, a barátaimnak, akik lelkesítettek, támogattak a feladat elvégzésében.

Függelék



1/A. ábra: A Ferencvárost reprezentáló terület (képpontok átlagos száma: 981)
[5 – Google Earth].



1/B. ábra: A Gellért-hegyet reprezentáló terület (képpontok átlagos száma: 335)
[5 – Google Earth].



1/C. ábra: Az Óbudát reprezentáló terület (képpontok átlagos száma: 1551)
[5 – Google Earth].



1/D. ábra: Az Újpestet reprezentáló terület (képpontok átlagos száma: 1261)
[5 – Google Earth].



1/E. ábra: A Belvárost reprezentáló terület (képpontok átlagos száma: 939)
[5 – Google Earth].