

MTA Doktori Értekezés tézisei

**A VÁROSI HŐSZIGET-JELENSÉG
NÉHÁNY ASPEKTUSA**

Unger János

Szeged

2010

1. Bevezetés

Az egész bolygónkat érintő globális környezeti és ezen belül az éghajlati változásnál mérsékeltebb figyelmet és nyilvánosságot kap a városoknak ugyan kisebb területre kiterjedő, mégis nagyon számottevő klímamódosító hatása. A városlakók szervezetét érő számos hatás között ugyanis fontos szerepe van a természetes környezethez képest jelentősen eltérő klimatikus körülményeknek is.

A felgyorsult és hatalmas méreteket öltött városiasodás révén világszerte mind több ember él urbanizált térségben. A városok jelentősen módosítják a levegőkörnyezet szinte minden jellemzőjét a környező területekhez viszonyítva, összességében egy helyi klímát (*városklímát*) alakítanak ki. E helyi klíma kifejlődése során a léghőmérséklet mutatja környezetéhez képest az egyik legszembetűnőbb módosulást, jellegzetesen elsősorban növekedést, ami az ún. *városi hősziget* (UHI) formájában nyilvánul meg.

A megjelenő hőtöbblet – a közepes földrajzi szélességeken, így hazánkban is – egyrészt télen és nyáron a fűtésre és a légkondicionálásra használt energia mennyiségét befolyásolja, másrészt nyáron a környezet hőterhelését növeli. A települések átlagosan magasabb hőmérséklete miatt meghosszabbodik a fagymentes időszak és a növények vegetációs időszaka, eltolódnak a fenológiai fázisok, csökken a fagyok intenzitása, megrövidül a hótakaróval borítottság ideje.

A városi hősziget *intenzitása* (ΔT) a település és az azt övező külterület szabad („természetes”) felszíne felett mért hőmérséklet különbségével definiálható. A „sziget” elnevezés igen találó, hiszen a külterületek felől a belváros felé haladva a település peremvidékén erőteljesen megemelkedik a hőmérséklet, majd ezt követően lassú és viszonylag egyenletes a növekedés, amelyet csak a közbeékelődő zöld területek módosítanak valamennyire. A sűrűn beépített belvárosban észlelhető a legmagasabb hőmérséklet. Természetesen ilyen viszonylag szabályos, ideális alakzat csak bizonyos ideig áll fenn, majd az idő múltával változik. Erőteljesen csak olyan időjárási körülmények között jön létre, amelyek kedvezőek a kisebb léptékű klimatikus folyamatok kialakulásához.

A horizontális kiterjedés mellett a hőszigetnek van egy vertikális kiterjedése is. A hőmérsékleti különbségekben kimutatható egy magassági függés, amely szerint a legnagyobb eltérés a város és a külte-

rület között a felszín közelében jelentkeznek, majd a különbség a magassággal csökken. A hősziget jelensége maximum néhány száz m-es magasságig terjed ki.

A városi hőmérsékleti többlet intenzitása jellegzetes napi menetet is mutat, ugyanis késő délután és este – a felszín 3D-s jellege és az épületek hőtárolása révén – mérsékeltebb a lehűlés, így a hajnali minimum hőmérséklet nem olyan alacsony, mint a külső területeken. Ugyanakkor napkelte után a város légtérsége – részben az épületek árnyékoló hatása miatt – lassabban melegszik fel. Ezek eredőjeként a ΔT napnyugta után gyorsan növekszik és kb. 3-5 órával később éri el a maximumát. Az éjszaka hátralévő részében lassan, de egyenletesen csökken a különbség, majd a csökkenés napkeltekor felerősödik.

Célom, hogy az SZTE Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszékén folyó sokrétű városklímakutatás eredményeinek az elmúlt évtizedre vonatkozó néhány fontosabb, a termikus módosulásokkal kapcsolatos szeletét bemutassam.

2. Vizsgált terület, adatgyűjtés, módszerek

A bemutatott eredmények Szegedhez kapcsolódnak, melyet földrajzi fekvése (sík, alföldi vidék, távol a domborzat és a kiterjedt vízfelületek klimatikus hatásaitól) különösen kedvező tereppé teszi városklimatológiai kutatásokra és az eredményekből levonható általános következtetésekre.

Szegeden a városi és elővárosi területek kb. 25-30 km²-t foglalnak el és nagyrészt az árvízvédelmi körtöltésen belül helyezkednek el. A vizsgálandó terület ezeket a városrészeket tartalmazza, amit 0,5x0,5 km nagyságú gridcellákra osztottunk (107 db – 26,75 km²), beleértve a város Ny-i peremének négy celláját is, melyek a vidék-város hőmérsékleti különbség megállapításához szükségesek.

A ΔT vizsgálata mérőkocsikkal két periódusban (1999. 03. – 2000. 02. és 2002. 04. – 2003. 03.) gyűjtött adatokon alapult, amely mérések során az autók minden cellát érintettek legalább egyszer. A nagy számban végrehajtott mérések biztosítják azt, hogy különböző időjárási helyzetekben (csapadék kivételével) a hőszigetről részletes információkat kapjunk a teljes területen.

Az észlelést végző mérőautók rúdra erősített automata hőmérsékleti szenzorral voltak felszerelve, úgy, hogy az autók hőhatása ne befolyásolja a mért értékeket. Az összegyűjtött adatokat cellánként átlagoltuk és átszámítottuk az adott mérésre jellemző referencia időpontra (napnyugta utáni 4. óra), amely a korábbi vizsgálatok alapján a legvalószínűbb ideje a nap folyamán a legerősebb hősziget bekövetkezésének Szegeden. A vizsgálatok során nemcsak az abszolút, hanem a normalizált intenzitás értékeket is felhasználásra kerültek.

A későbbiekben az adatgyűjtés az összetett városi felszín termikus módosulására is kiterjedt. A felszínhőmérsékleti adatokat kispülőgépre telepített termális kamera 2000 m-es magasságban készült, 2 m-es felbontású felvételei szolgáltatották. A termális értékek kalibrálása a különböző területhasználati típusokra egyidejűleg elvégzett közvetlen felszínhőmérsékleti mérések alapján, a képek georeferálása, összeillesztése és kiértékelése GIS módszerekkel történt. A felvételezéssel párhuzamosan mobil léghőmérséklet mérésekre is sor került egy 12 km hosszú városi keresztmetszet mentén, ahol az adatok pontos helyeit GPS rögzítette.

A kisléptékű éghajlati módosulásokban igen jelentős szerepe van a felszín sajátosságainak. A 2D-s zöld, beépített (burkolt) (B) és vízzel borított (W) felszínek cellánkénti százalékos arányának megállapítása űrfelvételek kiértékelésével, az NDVI (Normalizált Vegetációs Index) értékeinek meghatározásával valósult meg.

A város geometriai szerkezetének térbeli jellemzése a felszín alkotó fő elemeknek, az épületeknek a modellezésével történt egy 3D-s térinformatikai adatbázis létrehozásával, mely adatbázis digitális épületalaprajzon és légifelvételek kiértékelésén alapult. A modell nagy előnye, hogy alkalmazásával a tagolt városi felszín különböző morfológiai értékekkel jellemezhető, mint pl. égboltláthatóság (sky view factor – SVF), felhasználva a már rendelkezésre álló, illetve saját fejlesztésű térinformatikai algoritmusokat.

3. Eredmények, következtetések (tézisek)

Az 1999. március – 2000. február közötti mobil hőmérsékleti mérések adatai alapján a következő eredmények adódtak:

- (1) A városi hősziget (UHI) városon belüli változásainak vizsgálata révén megállapítottam, hogy (Unger et al. 2000, 2001b, 2004):
- I. A városi hősziget-intenzitás (ΔT) eloszlásának térbeli szerkezete szoros kapcsolatot mutat a beépítettségi értékekkel. Mintázatára a többé-kevésbé koncentrikus forma jellemző. Az ettől való eltérések jól magyarázhatók a beépítettség városon belüli változásával.
 - II. Az átlagos ΔT maximális értékeiben jelentős a különbség a fűtési és a nem-fűtési félévben ($2,12^{\circ}\text{C}$ és $3,18^{\circ}\text{C}$), ami elsősorban a két félév eltérő időjárási körülményeire vezethető vissza.
- (2) A városi hőmérsékleti keresztmetszeti vizsgálatok alapján kimutattam, hogy (Unger et al. 2001a, 2004):
- III. A vizsgált területen a ΔT változó volt az év folyamán, a mérsékelt öv évszakosan eltérő időjárási viszonyainak megfelelően.
 - IV. Mind a négy évszakos (abszolút) profil rendkívül jól követi a ΔT tipikus általános keresztmetszetét.
 - V. A normalizált ΔT évszakos profiljainak alakja független a szezonális időjárási viszonyoktól és menetüket elsősorban a városi tényezők határozzák meg.
 - VI. Ezért finomítottam a városi hőmérsékleti változó (M) értékeit megadó elméleti modellegyenletet egyszerű földrajzi környezetben elhelyezkedő települések esetében ($M = C + U$, ahol C a terület háttérklímájának hatása, U pedig tulajdonképpen a ΔT -vel egyenlő) úgy, hogy: $U = c \cdot u$ (azaz U az időjárási és városi tényezők szorzat formájában megadható együttes hatása), vagyis $M = C + c \cdot u$.
- (3) A hősziget területi eloszlásának többváltozós statisztikus modellezésére irányuló vizsgálataim során megállapítottam, hogy (Unger et al. 2000):
- VII. A bevont 2D-s felszínparaméterek, így a beépítettség mértéke (B) és a központtól mért távolság (D) egyenként is erős lineáris kapcsolatot mutatnak az éves és évszakos (fűtési, nem fűtési sze-

zon) átlagos ΔT -vel, viszont a vízfelület szerepe nem számottevő (pl. éves szinten $R^2 = 0,701, 0,469$ ill. $0,002$).

VIII. A teljes egy évre, valamint a fűtési és nem-fűtési időszakokra meghatározott modellegyenletek nagy pontossággal írják le az intenzitás területi eloszlását (pl. $\Delta T_{\text{év}}=0,007 \cdot B-0,466 \cdot D+2,683$ ($R^2=0,769$)). A cellánkénti átlagos abszolút eltérés minden időszakban kevesebb, mint $0,5^\circ\text{C}$.

A 2002. április – 2003. március közötti mobil hőmérsékleti mérések adatai alapján a következő eredmények adódtak:

(4) A hősziget-intenzitás területi eloszlásának tipizálására irányuló vizsgálatok során rámutattam, hogy (*Unger et al. 2010a*):

IX. A normalizált ΔT alkalmazásával lehetőség kínálkozik az egymástól jelentősen eltérő abszolút intenzitású esetek területi szerkezetének összehasonlítására. Fontos kihangsúlyozni, hogy ebben a megközelítésben az átlagos területi szerkezet meghatározásakor minden egyes eset azonos súllyal vesz részt.

X. A 35 egyedi eset kereszt-korreláción alapuló klasszifikációja szerint az egyedi ΔT mintázatoknak Szegeden hat típusa különböztethető meg. Az egyes típusokra bemutatott példák alapján megállapítható, hogy a csoportok elkülönülése mögött nagyrészt meteorológiai okok (szélirány és -sebesség) húzódnak meg.

(5) A hősziget-intenzitás és az égboltláthatóság (SVF) területi eloszlásának kapcsolatára irányuló vizsgálatok alapján a következő eredményekre jutottam (*Unger 2004, Unger 2009*):

XI. Az SVF közelítésére egy olyan algoritmus kifejlesztésére került sor, amely egy városi 3D-s épület-adatbázison alapul. Ez az eljárás kiterjedt területre szolgáltat nagy sűrűséggel és a korábbi módszerekhez képest gyorsan SVF értékeket.

XII.a. Az analitikus módszerrel közelített és az algoritmussal kétféle módon számított SVF és a ΔT városon belüli változása között szignifikáns a kapcsolat, ezen belül az algoritmus területi számításával kapott SVF alkalmazásával jön létre lényegesen szorosabb kapcsolat. Ekkor a felszíngeometria sajátosságai 17-18%-kal jobban megmagyarázzák a hőmérséklet városon belüli eloszlását a másik két megközelítéshez képest.

XII.b. A ΔT változása a léghőmérséklet változékonyságának léptéke miatt kellő alapossággal nem magyarázható a hőmérsékletmérés útvonala mentén mért SVF értékek változásával, mivel ez utóbbinak a térbeli változékonysága jóval kisebb skálán jelentkezik. Így, ha az SVF-et a ΔT területi eloszlásának magyarázatára kívánjuk felhasználni, akkor ezt a teljes vizsgált területet lefedő ponthálózatból származó értékkel célszerű elvégezni. Ez alátámasztja az SVF és az UHI közötti kapcsolat vizsgálatokor alkalmazott megközelítésünk helyességét.

XIII. A korábbi, hasonló vizsgálatok kis területre vonatkoztak és nem megfelelő elemszámú adatsorokon alapultak. A kapott eredmények feloldják ezek ellentmondásait, ugyanis a megfelelően választott méretű területre vonatkozó átlagos SVF értékeiben tulajdonképpen összegződnek az adott terület geometriájának sajátosságai ugyanúgy, mint ahogy a ΔT is a különféle – a város területére jellemző mozaikos – mikroklímák sajátosságainak eredője. Vizsgálatom az első olyan, ahol egy város teljes területén került meghatározásra az SVF értéke. Csak egy ilyen méretű adatbázis felhasználásával lehet statisztikailag kellően megalapozott következtetéseket levonni.

XIV. Természetesen a bemutatott SVF számítási eljárás, akár pontokra, akár egy hálózatra nézzük, nemcsak városi környezetben alkalmazható. Egy adott tetszőleges terepen lévő hely vagy terület mikroklimatikus vizsgálatához nagyon hasznos lehet az egyes pontok sugárzási viszonyait jellemző égboltláthatósági érték kiszámítása, amennyiben a környező terepről és a rajta lévő növényzetről, épületekről rendelkezésre áll a megfelelő 3D-s vektoros adatbázis. Ez elérhető például a raszteres DDM megfelelő felbontású vektoros állománnyá történő átalakításával, kiegészítve pl. a felmért fák (és épületek) jellemző paramétereivel.

A légi és felszíni hordozású hagyományos (közvetlen) és távérzékelésen alapuló (közvetett) eszközökkel 2008. augusztus 12-én és 14-én történő hőmérsékleti adatgyűjtés alapján a következő eredmények adódtak:

- (6) A városi felszínhőmérséklet (T_s) és léghőmérséklet (T_a) területi eloszlása közötti kapcsolat feltárására irányuló vizsgálatok során megállapítottam, hogy (Unger *et al.* 2010b):
- XV.** A T_a városon belüli változásának tartománya lényegesen kisebb, mint a T_s tartománya, valamint a T_a változása sokkal fokozatosabb, jóval kisebbek benne az ugrások rövid távolságon belül, mint a T_s esetében.
- XVI.** A T_a és T_s közötti kapcsolatkeresés során figyelembe vettem a léghőmérséklet adott helyen és adott időpontban kialakuló értékében szerepet játszó tágabb környezetet, az ún. forrásterületet. Legsoros kapcsolat az 500 m sugarú forrásterület esetében mutatkozik a két paraméter között, vagyis az ekkora környezetben (távolsággal súlyozva) figyelembe vett felszínnek hőmérséklete döntően befolyásolja az adott pontban lévő levegőelem hőmérsékletét.
- XVII.** A T_a és T_s közötti kapcsolatot leíró egyenletet felhasználva az eredmények kiterjesztésére, egy nagyobb városi területen modelleztem a léghőmérsékleti ill. ΔT mezőt a vizsgált két estén. Összességében, a területen egy kb. 2,5°C-os erősségű hősziget jelentkezik, ami az egyik estén nagyjából megegyezik, míg a másik estén egy kissé alulmúlja a keresztmetszet mentén mért városon belüli hőmérsékleti ingadozást.

4. Az értekezés eredményeihez közvetlenül kapcsolódó tudományos közlemények (időrendben)

Unger J, Bottyán Z, Sümeghy Z, Gulyás Á, 2000: Urban heat island development affected by urban surface factors. *Időjárás* 104, 253-268

Unger J, Sümeghy Z, Zoboki J, 2001a: Temperature cross-section features in an urban area. *Atmospheric Research* 58, 117-127

Unger J, Sümeghy Z, Gulyás Á, Bottyán Z, Mucsi L, 2001b: Land-use and meteorological aspects of the urban heat island. *Meteorological Applications* 8, 189-194

Unger J, 2004: Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach. *Climate Research* 27, 253-264

Unger J, Bottyán Z, Sümeghy Z, Gulyás Á, 2004: Connection between urban heat island and surface parameters: measurements and modeling. *Időjárás* 108, 173-194

Unger J, 2009: Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database. *Int J Environment and Pollution* 36, 59-80

Unger J, Sümeghy Z, Szegedi S, Kiss A, Géczi R, 2010a: Spatial patterns of the urban heat island and generalization of the individual cases. *Physics and Chemistry of the Earth* (in press)

Unger J, Gál T, Rakonczai J, Mucsi L, Szatmári J, Tobak Z, van Leeuwen B, Fiala K, 2010b: Modeling of the urban heat island pattern based on the relationship between surface and air temperatures. *Időjárás* 114 (in press)

5. Az értekezés szélesebb tárgykörében megjelent fontosabb tudományos közlemények (a PhD fokozat 1996-os megszerzése után, időrendben)

- Unger J**, 1996a: Heat island intensity with different meteorological conditions in a medium-sized town: Szeged, Hungary. *Theoretical and Applied Climatology* 54, 147-151
- Unger J**, 1996b: A városi hősziget és a szél kapcsolata Szeged példáján. *Légekör* 41/4, 21-23
- Unger, J**, 1997a: Some features of the development of an urban heat island. *Studia Univ Babes-Bolyai, Geographia* 42/1-2, 125-131
- Unger J**, 1997b: Városklimatológia - Szeged városklímája. *Acta Climatologica Univ Szegediensis* 31B (Urban climate special issue), 69 p
- Unger J**, 1997c: A városi hősziget hatása a fűtési energiaigényre Szegeden. *Légekör* 42/2, 18-19
- Unger J**, 1998: Urban influence on human comfort (on the example of Szeged). *Acta Univ Lodziensis, Folia Geographica Physica* 3, 539-546
- Unger J**, 1999a: Urban-rural air humidity differences in Szeged, Hungary. *Int Journal of Climatology* 19, 1509-1515
- Unger J**, 1999b: Comparisons of urban and rural bioclimatological conditions in the case of a Central-European city. *Int Journal of Biometeorology* 43, 139-144
- Unger J, Pál V, Sümeghy Z, Kádár E, Kovács L**, 1999: A maximális kifejlődésű városi hősziget területi kiterjedése tavasszal Szegeden. *Légekör* 44/3, 34-37
- Unger J, Sümeghy Z**, 2001: A városi hőmérsékleti többlet: keresztmetszet menti vizsgálatok Szegeden. *Légekör* 46/4, 19-25
- Unger J, Sümeghy Z, Mucsi L, Pál V, Kádár E, Kevei-Bárány I**, 2001c: Urban temperature excess as a function of urban parameters in Szeged, Part 1: Seasonal patterns. *Acta Climatologica Univ Szegediensis* 34-35, 5-14
- Unger J, Bottyán Z, Gulyás Á, Kevei-Bárány I**, 2001d: Urban temperature excess as a function of urban parameters in Szeged, Part 2: Statistical model equations. *Acta Climatologica Univ Szegediensis* 34-35, 15-21

- Bottyán Z, Unger J**, 2003: A multiple linear statistical model for estimating mean maximum urban heat island. *Theoretical and Applied Climatology* 75, 233-243
- Gulyás Á, Unger J, Balázs B, Matzarakis A**, 2003: Analysis of the bioclimatic conditions within different surface structures in a medium-sized city (Szeged, Hungary). *Acta Climatologica Univ Szegediensis* 36-37, 37-44
- Sümeghy Z, Unger J**, 2003a: Classification of urban heat island patterns. *Acta Climatologica Univ Szegediensis* 36-37, 93-100
- Sümeghy Z, Unger J**, 2003b: Seasonal case studies on the urban temperature cross-section. *Acta Climatologica Univ Szegediensis* 36-37, 101-109
- Sümeghy Z, Unger J**, 2003c: A települések hőmérséklet-módosító hatása – a szegedi hősziget-kutatások tükrében. *Földrajzi Közlemények* 127 (51), 23-44
- Sümeghy Z, Unger J**, 2004: A városi hősziget szerkezetének vizsgálata normalizált intenzitás segítségével. *Légekör* 49/2, 15-19
- Bottyán Z, Kircsi A, Szegedi S, Unger J**, 2005: The relationship between built-up areas and the spatial development of the mean maximum urban heat island in Debrecen, Hungary. *Int Journal of Climatology* 25, 405-418
- Unger J, Gulyás Á, Matzarakis A**, 2005: Eltérő belvárosi mikrokozonyezetek hatása a humán bioklimatikus komfortérzetre. *Légekör* 50/1, 9-14
- Unger J, Sümeghy Z**, 2005: A városi környezet hatására fellépő lokális és mikroklimatikus léptékű módosulások. "AGRO-21" Füzetek, *Klímaváltozás – Hatások – Válaszok* 44, 45-56
- Gulyás Á, Unger J, Matzarakis A**, 2006: Assessment of the microclimatic and human comfort conditions in a complex urban environment: modelling and measurements. *Building and Environment* 41, 1713-1722
- Unger J**, 2006: Modelling of the annual mean maximum urban heat island with the application of 2 and 3D surface parameters. *Climate Research* 30, 215-226
- Unger J, Gál T, Kovács P**, 2006a: A városi felszín és a hősziget kapcsolata Szegeden, 1. rész: térinformatikai eljárás a felszíngeometria számszerűsítésére. *Légekör* 51/3, 2-9

- Unger J, Gál T, Geiger J**, 2006b: A városi felszín és a hősziget kapcsolata Szegeden, 2. rész: a felszíngeometria és a hőmérséklet-eloszlás kapcsolata. *Légekör* 51/4, 8-14
- Gál T, Rzepa M, Gromek B, Unger J**, 2007: Comparison between Sky View Factor values computed by two different methods in an urban environment. *Acta Climatologica Univ Szegediensis* 40-41, 17-26
- Unger J, Makra L**, 2007: Urban-rural difference in the heating demand as a consequence of the heat island. *Acta Climatologica Univ Szegediensis* 40-41, 155-162
- Balázs B, Unger J, Gál T, Sümeghy Z, Geiger J, Szegedi S**, 2009: Simulation of the mean urban heat island using 2D surface parameters: empirical modeling, verification and extension. *Meteorological Applications* 16, 275-287
- Gál T, Lindberg F, Unger J**, 2009: Computing continuous sky view factor using 3D urban raster and vector data bases: comparison and application to urban climate. *Theoretical and Applied Climatology* 95, 111-123