

A BEREGSZÁSZI HŐSZIGET INTENZITÁSÁNAK ÉS TÉRBELI SZERKEZETÉNEK VIZSGÁLATA⁶³

MOLNÁR JÓZSEF⁶⁴ – KAKAS MÓNIKA – MARGUCA VIOLA

EXAMINATION OF INTENSITY AND THE SPATIAL STRUCTURE OF THE MAXIMUM HEAT ISLAND IN BEREGSZÁSZ (BEREHOVE), UKRAINE

Abstract: The study deals with realization of the urban heat island (UHI) in the town of Beregszász (Berehove), Ukraine, with a population of 26,000. To examine the UHI mobile measurements were used in every decade in 2005. The main purpose was to establish the urban thermal excess in a relatively small town under different conditions, and to create an empirical model equation of the development of UHI in Beregszász effected by different weather terms. The spatial structure of the heat island was also studied.

Jelenleg Földünk népességének közel a fele városokban él. A városi környezet az ember által leginkább átalakított, megbolygatott tájtipusok közé sorolható, felfogható a természetes környezetre gyakorolt emberi hatás produktumaként is. Mint mesterséges tájegység, a természetközeli állapotú környezetétől sok szempontból eltér. E különbségek között egész sor mezo- és mikroklimatikus sajátosság van, mint például a városok légterében kialakuló kisebb-nagyobb mértékű hőtöbblet, amit városi hősziget néven emleget a szakirodalom.

A városi hőszigetkutatás évszázados múltra tekint ugyan vissza, ám időszerevése napjainkban, az urbanizációs folyamatok előrehaladtával csak fokozódik. A vizsgálatok előterében többnyire a nagyvárosok hőszigetjelenségei állnak. Az általunk választott Beregszász (Ukrajna, Kárpátalja), a maga 26 ezer lakosával, a kevésbé tanulmányozott klímájú városok kategóriájába tartozik.

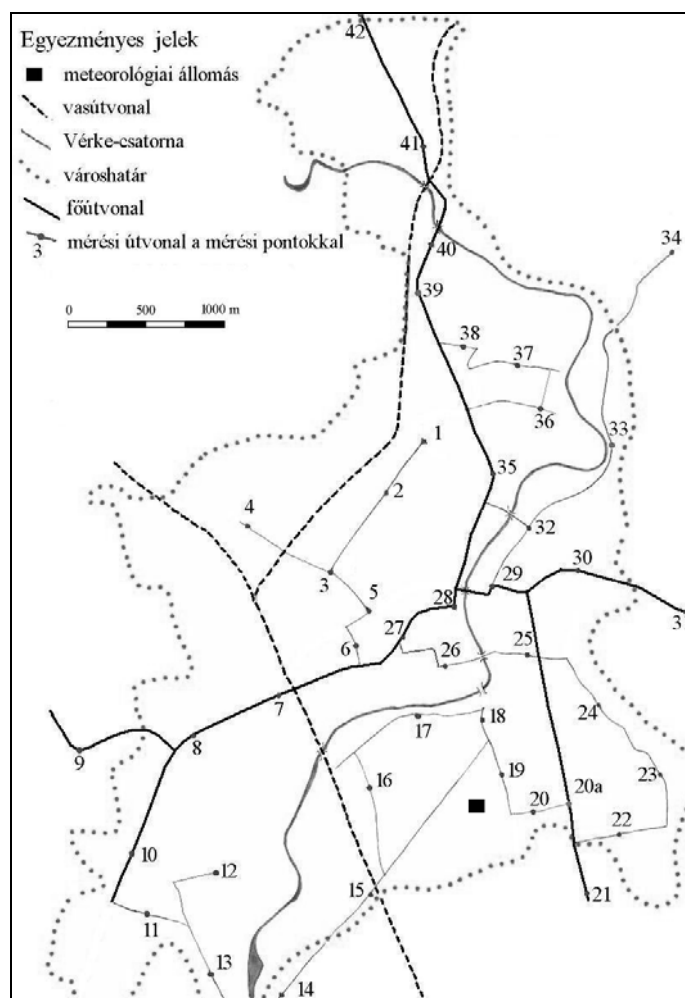
Míg a nagyobb városok (pl. Budapest) hőszigetének a vizsgálatára a műholdfelvételek az alkalmasabbak (*Bartholy J.* 2000), Beregszász esetében, a város méreteiből és a lehetőségeinkből kiindulva, a szegedi és a debreceni kutatók által bejártatott gépkocsis mobil méréses módszer adaptációját találtuk megfelelőnek (*Unger J. et al.* 2000a, *Szegedi S.* 2002). A rendszeres időközönként végzett mérésorozattal igyekeztünk átfogó képet kialakítani a városi hősziget kifejlődéséről Beregszászban évszaktól és időjárási helyzettől függően. A kapott adatok felhasználásával került sor a városi hősziget erősségét az időjárási viszonyok alapján előrejelző empirikus modell kifejlesztésére.

⁶³ Készült az Arany János Közalapítvány a Tudományért támogatásával.

⁶⁴ II. Rákóczi Ferenc Kárpátaljai Magyar Főiskola. UA-90200 Beregszász, Kossuth tér 6. E-mail: jozsi@kmf.uz.ua

A HŐSZIGET DETEKTÁLÁSA

Mivel a hősziget térbeli képét jelentősen befolyásolják a város beépítési viszonyai (Szegeci S. 2002), a mérési útvonal megtervezésénél felhasználtuk a város beépítettségi térképét. Az útvonalba beleszöttük a különböző beépíttségű utcákat, a településen kívüli beépítetlen területeket, és a Beregszászt keletről szegélyező hegygerincre felemelkedő utakat is. Az útvonalon kijelöltünk 42 mérési pontot, amelyek egyrészt reprezentálják a felsoroltakat, másrészt többé-kevésbé egyenletesen fedik le a város területét.



1. ábra A beregszászi mobil hőszigetmérések mérőpontjai
 Figure 1 The location of the measure points of the mobile UHI observations in Beregszász (Berehove)

A méréssorozatot egy éven keresztül (2005-ben) tíznaponkénti ütemezéssel végeztük. A dekádokon belül a konkrét mérőnapok kijelölése az időjárási viszonyok figyelembe vételével történt: az esős és az erősen szeles estéket kizártuk a mérési alkalmak közül, mivel ilyen feltételek mellett a hősziget nem fejlődik ki. A mérőkörtut napnyugta után kb. három órával kezdtük, amikor a hősziget kifejlődése a legerőteljesebb (*Unger J.* 1996). Mérőutunk során autóval végimentünk az előre megtervezett útvonalon, és a mérési pontokban manuálisan rögzítettük a hőmérsékleteket. A digitális hőmérő szenzorát az emberi komfortérzés szempontjából kiemelt 1,5 m-es magasságban helyeztük el, a gépkocsitól oldalirányban 30 cm-es távolságban, úgy, hogy a járműből kiáramló melegebb levegő ne érje. A mérőpontok bejárása után megismételtük a méréseket ugyanazon az útvonalon, csak visszafelé. Így minden pontban kétszer mértük a hőmérsékletet. A mérések észmei időpontjával a végponti (42-es mérőponti) mérés idejét vettük, mivel ez egyben a többi pont mérésidőinek az átlaga. Az *1. ábra* a mérési útvonalat és a mérőpontok helyét ábrázolja.

Az így mért hőmérsékleti értékeket összevetettük a Beregszász déli részén elhelyezkedő szinoptikus meteorológiai állomás (*1. ábra*) párhuzamosan működő termográfja által rögzített adatokkal. Kiszámítottuk a mérőponti hőmérsékleti anomáliákat a termográf által rögzített értékekhez képest. Végül, kivonva az egyes mérőpontoknak az oda- és a visszaútra meghatározott hőmérsékleti anomáliaértékeinek az átlagából azoknak a síksági külterületi mérőpontoknak a megfelelőjét, amelyek nem kerültek az esetlegesen kimozduló városi hősziget hatása alá, megkaptuk a mérőponti hősziget-intenzitás értékét.

EREDMÉNYEK

Méréssorozatunk eredményeként a beregszászi hősziget következő jellegzetességeit sikerült feltárni.

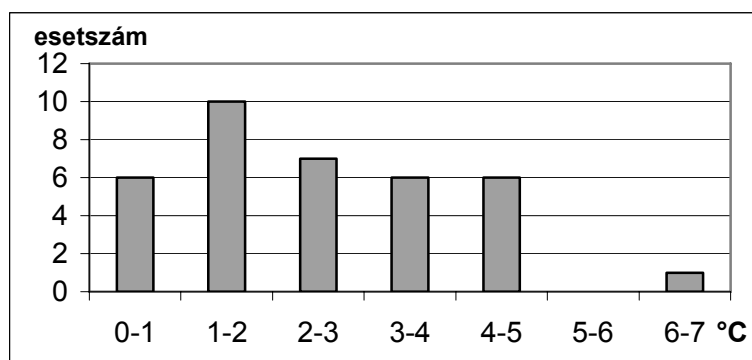
Az átlagos maximális napi hősziget-intenzitás a vizsgált 2005-ös évben a Beregszász belvárosában kijelölt 28-as számú mérőpontban (*1. ábra*) bizonyult a legnagyobbknak, 2,3°C-kal egyenlőnek. Itt a hősziget kifejlődését a központi fekvésen kívül a zárt, jellemzően kétszintes beépítés és az élénk gépkocsiforgalom is erősíti.

A szegedi vizsgálatok által kimutatott 2,6°C-os (*Unger J. et al.* 2000a) és a debreceni hőszigetkutatás eredményeként kapott 3°C-os átlagos maximális hősziget-intenzitással összevetve (*Szegedi S.* 2002), tekintetbe véve a városok nagyságának a különbségét (Szegednek 160 ezer, Debrecennek 200 ezer, Beregszásznak 26 ezer lakosa van), a beregszászi 2,3°C első látásra soknak tűnik. Azonban ne feledkezzünk meg a mérési és számítási módszerek eltéréseiről a két városban végzett vizsgálatok során, ami óvatosságra int az eredmények összehasonlításával. A debreceni kutatók a meteorológiai szabványnak megfelelő 2 méteres magasságban mértek, míg mi, a szegediekhez hasonlóan, az emberi komfortérzet

szempontjából érdekesebb 1,5 méteren. Továbbá, a hősziget intenzitásának a meghatározásakor mi kizártuk a viszonyítási alapul szolgáló külterületi mérőpontok közül azokat, amelyekre esetleg a hősziget „rácsúszott”.

Tekintve, hogy a hősziget maximális kifejlődése nem minden esetben a belvárosra esett, az átlagos maximális napi hősziget-intenzitást az egyes mérések maximális hősziget-intenzitásainak az átlagaként is kiszámítottuk. Az így előállított 2,6°C-os érték, a várakozásnak megfelelően, az előző módszer szerint meghatározottnál nagyobbak adódott, bár a kis különbség a belváros hőszigetközpontként játszott szerepének a stabilitására utal.

A beregszászi hősziget maximális intenzitásának a gyakorisági eloszlása a 2. ábrán látható. Leggyakrabban 1-2°C-os maximális hőtöbbletet sikerült detektálnunk. A maximális megfigyelt hősziget-intenzitás 6,6°C volt (2005. szeptember 22.). Ez némileg meghaladja a szakirodalom által a Beregszász-méretű európai városokra megadott 5°C-ot (Szász G. – Tőkei L. 1997).



2. ábra A Beregszászban 2005 folyamán megfigyelt maximális napi hősziget-intenzitások gyakorisági eloszlása

Figure 2 Frequential distribution of the maximal daily UHI intensity observed in 2005 in Beregszász (Berehove)

Az eloszlás jellegének az ellenőrzésére a Kolmogorov–Szmirnov-próbát választottuk. A próba, valószínűleg a kis elemszámnak (36) köszönhetően, a megfigyelt maximális hősziget-intenzitások eloszlását, az ábra sugallta látszat ellenére, nem találta a normális eloszlástól szignifikánsan eltérőnek. Azonban, figyelembe véve, hogy a hősziget maximális intenzitása nem vesz fel negatív értéket, tehát az eloszlás alulról korlátos, alkalmasabbnak tűnik a lognormális eloszlással közelíteni azt. Ellenőriztük ezt a feltételezést is. A Kolmogorov–Szmirnov-próba igazolta a várakozásunkat: a maximális hőszigetértékek lognormális eloszlását a normális eloszlásnál valószínűbbnek találta (76% a 60-nal szemben).

Vizsgálataink a beregszászi hősziget évszakfüggőségére is kiterjedtek. A legerősebb hősziget hatás alatt álló belvárosi mérőpont (a 28-as) összesen legnagyobbat, átlagosan 2,7°C-os hőtöbbletet a külterületekhez viszonyítva, más évszakokban viszont ennek értéke 2°C körül maradt. Hasonló irányú, de még na-

gyobb arányú eltérést sikerült detektálni az átlagos maximális hősziget-intenzitás egész városra vonatkozó értékeit vizsgálva is: ennek átlaga ősszel 3,4, míg a többi évszakban 2,1-2,5°C volt. Az évszakai átlagok összevetésére alkalmazott *t*-próba azonban egyik esetben sem találta 95%-os valószínűségi szinten szignifikánsnak az eltéréseket, így a mérési eredmények alapján nem igazolható a beregszászi hősziget intenzitásának az évszakfüggősége.

A következő lépésben az időjárási viszonyok, közülük is a szakirodalom által legfontosabbnak ítélt felhőzet és a szél hatását elemeztük a hősziget maximális intenzitására.

A méréseket az égből alapján három kategóriába soroltuk, elkülönítve a derült égből, a változékony felhőzet mellett és a borús ég alatt végzett megfigyeléseket.

A derős égből végzett mérések alkalmával a belvárosi mérőpontban 3,0°C-os hősziget-intenzitást sikerült kimutatni. Ugyanez változékony felhőzet esetén 1,4, borús esteiken pedig 1,1°C volt. A végrehajtott *t*-próba a különbséget a derült és a borús, illetve a derült és a változékony időben jelentkezett belvárosi hősziget-intenzitás között 95%-os valószínűségi szinten szignifikánsan eltérőnek találta. A változékony felhőzetű és a borús időjárás hőtöbbletének a különbsége viszont nem bizonyult jelzésértékűnek.

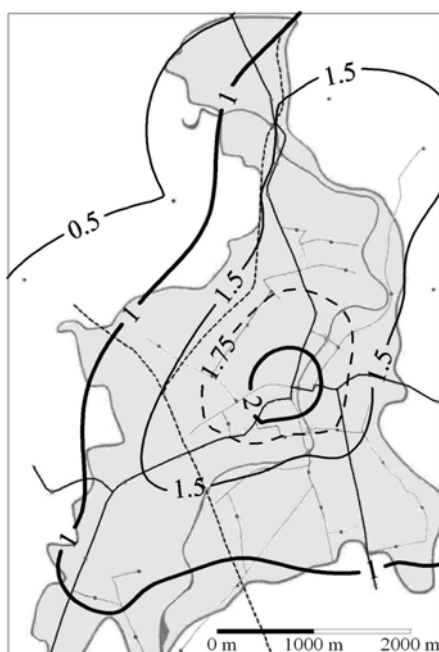
Az átlagos maximális hősziget-intenzitás egész városra vonatkozó megfelelő értékei 3,3, 1,4 és 1,5°C-nak adódtak. A *t*-próba eredménye alapján, a belvárosi értékekhez hasonlóan, csak a derült időjárási feltételek között detektált hősziget-intenzitások tértek el szignifikánsan a másik kettőtől.

Méréseink időpontjait igyekeztünk úgy megválasztani, hogy a hősziget kifejlődésének az időjárási feltételei kedvezőek legyenek, így a szélviszonyok vagy szélcsendként, vagy enyhe szélként (1-3 m/s-os szélesség) jellemezhetők. Az esetek többsége (25 alkalom) az első kategóriába tartozott, érezhető légmozgást csupán 11 mérésnél észleltünk. A szélcsendes feltételek mellett végzett mérések átlagos belvárosi hősziget-intenzitása 2,6°C volt, szemben az élénkebb légmozgású esetekben megfigyelt 1,5-del. A maximális hőtöbbletek megfelelő átlagai 2,9 és 1,9°C-nak adódtak. Az elvégzett *t*-próba a különbséget mindkét esetben szignifikánsnak találta. Ebből arra következtetünk, hogy már a gyenge szél is gyengíti a városi hőszigetet, nem csupán eltolja azt.

Az egyes pontok hősziget-intenzitása értékeinek a kiátlagolásával előállítottuk a Beregszászban kialakuló hősziget átlagos képét (3. *ábra*). A térkép a városi hősziget következő sajátosságait jeleníti meg:

- az átlagos maximális intenzitás a belvárosban a szakirodalom által is leírt „csúcs”-ként jelentkezik, 2°C-ot meghaladó értékekkel;
- innen a város szélei felé haladva fokozatosan csökken a hőtöbblet; az ún. „fennsík” jelensége, valószínűleg a város kis méreteiből adódóan, nem figyelhető meg;
- a Beregszász keleten szegélyező alacsony hegyvonulat lejtőinek az 1°C-ot meghaladó hőtöbblete összekapcsolódik a város hőszigetével;

- a beregszászi hősziget kisebb intenzitású (1°C körüli) nyúlványai kiterjednek a városhoz csatolt, korábban különálló falvak, Beregardó (északon) és Búcsú (délnyugaton), valamint a város szélén felépített tömbházas lakótelep (délekeleten) területére;
- a Beregszászi Meteorológiai Állomás (1. ábra) területének átlagos maximális hőtöbblete a városhatásnak köszönhetően $1,2^{\circ}\text{C}$, ami nem hagyható figyelmen kívül az ott mért adatok kiértékelésénél;
- az átlagos hősziget alacsony hőtöbbletű pereme, a hőszigetet kimozdító légáramlatok hatására, jóval túlnyúlik a beépített területek határain.

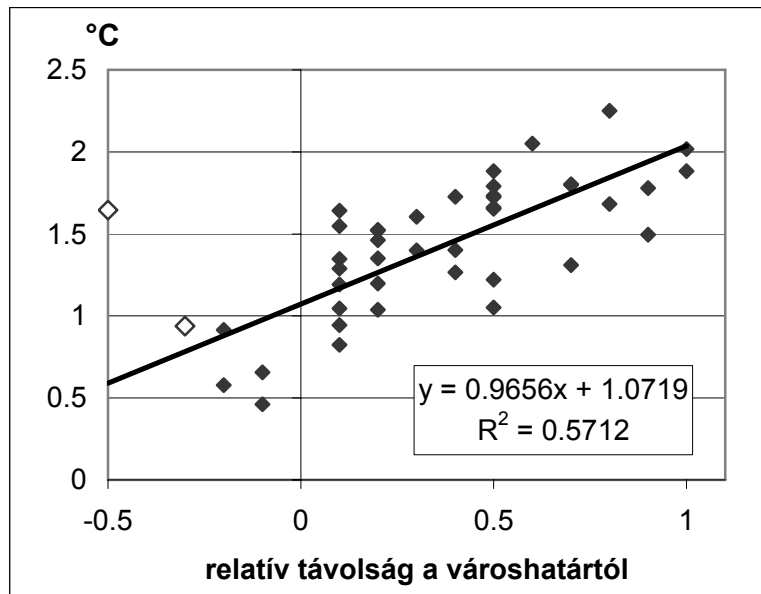


3. ábra A beregszászi átlagos maximális napi hősziget-intenzitás területi eloszlása a 2005-ös évben (izotermák $0,5^{\circ}\text{C}$ -onként, szaggatott vonallal jelöltük az $1,75^{\circ}\text{C}$ -os segédizotermát)
 Figure 3 Spatial distribution of the mean maximal daily UHI intensity observed in 2005 in Beregszász (Berehove) (isotherms shown at 0.5°C intervals, dotted line shows 1.75°C secondary isotherm)

nyított helyzetének függvényében való elemzésénél célszerűbbnek láttuk kihagyni őket a számításokból.

Az egyes mérőpontokban jelentkező hősziget-intenzitás a meteorológiai viszonyok mellett elsősorban a városhatártól való távolság, illetve a beépítettség függvénye. A mérőpontok városhatártól való távolsága hatásának a számszerűsítése érdekében meghatároztuk azok távolságát a város belterületének a határától egy relatív skálán, amelyen a 0 a városperemnek, az 1 pedig az attól befelé legtovább fekvő 5-ös és 27-es pontok távolságának felel meg (1. ábra). A külterületi mérőpontok értelemszerűen negatív távolságértékeket kaptak.

A 4. ábra a városhatártól való távolság (x) és az átlagos hősziget-intenzitás (y) összefüggését mutatja és számszerűsíti a regressziós egyenlettel. A pontok elhelyezkedése, akárcsak az R^2 magas értéke, megerősíti a szoros, lineáris kapcsolatot. Az általános tendenciától eltér a két városon kívüli nyeregi mérőpont, amelyek a külterületi síkvidékiektől általában melegebbnek bizonyultak (ezeket az ábra bal oldalán üres négyszögekkel jelöltük). Tekintve, hogy ezek hőtöbbletét nagyrészt nem a városhatás okozta, a mérőponti hőszigetek intenzitásának a pont városhatárhoz viszonyított helyzetének függvényében való elemzésénél célszerűbbnek láttuk kihagyni őket a számításokból.



4. ábra A mérőpontok ábrázolása a városhatártól mért relatív távolság (vízszintes tengely) és a hősziget átlagos intenzitása (függőleges tengely) koordinátarendszerben.

A nyeregi mérőpontokat üres négyszögekkel jelöltük.

A vastagított vonal a síksági adatpontokra fektetett trendegyenes.

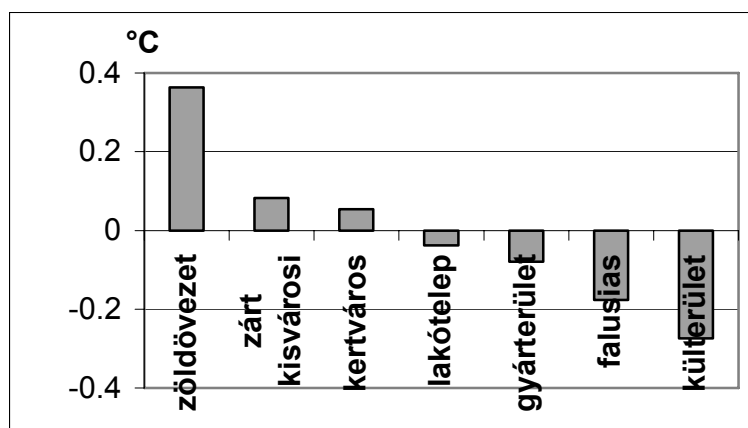
Az egyenes egyenlete, továbbá az illeszkedésének a jóságát megadó R^2 értéke jobbra lent
Figure 4 Chart of the measure points in the relative distance from the town edge (horizontal axis) – mean maximal daily UHI intensity (vertical axis) system of coordinates.

The hill measure points are shown by blank lozenges. The straight line is the trend line fitted to the plain data points. The equation of the trend line and R^2 value, which provides equation's goodness of fit shown in the lower right corner of diagram

Lássuk, hogyan befolyásolja a hősziget erősségét a beépítettség! A beépítettség többféle módon megadható, így, az épületek geometriájával, vagy az épületmagasság-utcaszélesség arányon keresztül is. Vizsgálataink jelen stádiumában ilyen jellegű adatokkal Beregszász vonatkozásában nem rendelkezünk, ezért maradtunk a pontatlanabb, de egyszerűbb módszernél – a város területének a beépítettség szerinti típusokba sorolásánál.

Az egyes beépítettségi típusok hősziget-generáló hatásának a vizsgálatához ki kellett iktatnunk a városhatártól való távolság markánsnak bizonyult befolyását. Ehhez kiszámítottuk a mérőponti átlagos hőtöbbleteket a város belterülete határától való távolság függvényében a 4. ábrán látható képlet felhasználásával. Majd a mért és a számított átlagok különbségét képeztük, így határozva meg a mérőpontok hőszigeterősségének az eltérését a városterületen belül elfoglalt helyük által meghatározottól. A kapott anomáliaértékek alapján számítottuk ki a beépítettségi típusok átlagos hozzájárulását a városi hőtöbbletnek, amit az 5. ábrán szemléltettünk. Mivel ezek csupán néhány tized fokot tesznek ki, megállapítható, hogy a hősziget intenzi-

tása Beregszászban döntően a városon belüli fekvéstől függ, és csak kis mértékben befolyásolja azt a beépítettség. Hasonló eredményekről számoltak be **Unger J. és munkatársai** (2000b), akik szegedi vizsgálataik során a városközponttól való távolságot találták a beépítettségénél meghatározóbbnak a hőmérséklet növekedésében.



5. ábra Az egyes beépítettségi típusok átlagos hősziget-intenzitásának eltérése a város területén belül elfoglalt helyzetük által indokolttól

Figure 5 Deviation of the mean maximal UHI intensity of the different urban built-up types from the justified by their position within town area

A méréssorozat eredményeinek a felhasználásával modelleztük a Beregszász belvárosában kialakuló hősziget intenzitását a meteorológiai viszonyok hatását figyelembe véve.

Méréseink alapján a hőtöbblet kialakulására az időjárási elemek közül a felhőborítottság gyakorolja a legnagyobb hatást, így először ezt építettük be a képletbe. Kiszámítottuk a felhőmentes, és a hősziget kifejlődése szempontjából egyébként is ideális feltételek (szélcsend, száraz, hómentes talajfelszín) között létrejött átlagos hőtöbblet értékét Beregszász belvárosában. A leírt feltételeknek 8 mérés körülményei feleltek meg, amelyek átlagos belvárosi hősziget-intenzitása 3,7°C-nak adódott.

Ezután meghatároztuk az előzőekkel azonos egyéb körülmények, ám borult égbolt mellett mért hőtöbbletek átlagát. Mindössze 3 esetből számítottuk az 1,0°C-os átlagot, de az egymáshoz közeli értékek (0,9, 1,3 és 0,9°C) alátámasztják annak a realitását. Így, a felhőzet átlagosan 2,7°C-kal módosítja az elemzett mutatót. A hősziget-intenzitás és a felhőzet értékeinek lineáris összefüggését feltételezve (ennek ellenőrzése további vizsgálatokat igényel), a Beregszász városközpontjában kialakuló hőtöbblet nagyságát a felhőzet függvényében az alábbi képlettel fejezhetjük ki:

$$BHI = 2,7(1 - F) + 1,0,$$

ahol BHI – a hősziget intenzitása Beregszász központjában, °C-ban, F – a felhőzöttség értéke a 0-1 terjedő skálán.

A települési hősziget intenzitását szignifikánsan befolyásolja a talajfelszín nedvessége is. A nedvesség, nagyobb fajhőjének köszönhetően, mérsékli a külterületi talajfelszínek éjjeli lehülési ütemét, így csökkentve a beépített városi területek hőtöbbletét. Vizsgálataink alapján, a felhőborítottságtól függetlenül, a nedves talajfelszín átlagosan 0,6-szeresére csökkenti a hősziget erősségét Beregszász belvárosában. A leírtak így módosítják a vizsgált hősziget-intenzitás képletét:

$$BHI = (2,7(1 - F) + 1,0)N ,$$

ahol száraz talajfelszín esetén $N = 1$, nedvesnél pedig $N = 0,6$.

Szignifikánsnak bizonyult a szeles és szélcsendes időjárási viszonyok között kialakult hőszigetek eltérése is, ezért a következő lépésben a szél hatását építettük be a modellbe. A szélesebb paraméterének beállításakor abból indultunk ki, hogy a szakirodalom a Beregszász-méretű városok esetében 3-4 m/s-ban határozza meg azt a szélesebbéget, amely a belvárosi hőtöbbletet 1°C alá csökkenti. Ezt, és a mérési eredményeket figyelembe véve a következő képletet kaptuk:

$$BHI = \frac{(2,7(1 - F) + 1,0)N}{\sqrt{1 + 0,7S^2}} ,$$

ahol S – a szélesebbéget m/s-ban, a többi jelölés a fentiek szerint.

Végül a hótakaró hőszigetfokozó hatását kívántuk számszerűsíteni. A hótakaró hőszigetelőként csökkenti a tározódott hő éjszakai feláramlását a talajból, ezzel fokozva a lehülést. Az egységesebb hóborítású külterületeken ez a hatás jobban tud érvényesülni, ami erősíti a városi hőszigetet. Vizsgálataink alapján a hóborítottság átlagosan 0,3°C-kal növeli a beregszászi belvárosi hőtöbbletet.

Összességében tehát Beregszász belvárosának a hősziget-intenzitása (BHI , °C) az időjárási viszonyok függvényében az alábbi képlettel számítható:

$$BHI = \frac{(2,7(1 - F) + 1,0)N}{\sqrt{1 + 0,7S^2}} + H ,$$

ahol F – a felhőzöttség értéke a 0-1 terjedő skálán; N – a talajnedvességet reprezentáló együttható, amely száraz talajfelszín esetén 1, nedvesnél pedig 0,6; S – a szélesebbéget m/s-ban; H – a hótakaró szerepét megjelenítő tag, amely annak hiányában 0, havas felszín esetén pedig 0,3. A modell alapján számított hőtöbbletek átlagos eltérése a mértéktől 0,5°C, az eltérések szórása 0,6°C.

A továbbiakban, a kisebb településeken kialakuló, eddig kevésbé feltárt hőszigetek tanulmányozását folytatva, a Beregszászban kialakuló hősziget vizsgálatán túl a hőszigetkutatás más kisebb városokra és falvakra való kiterjesztését is tervezzük.

IRODALOM

- Bartholy, J.** 2000. Estimation of the urban heat island effect for Budapest. Proceedings of 3rd European Conference on Applied Climatology. Pisa, Italy. CD-ROM.
- Szász G.–Tókei L.** (szerk.) 1997. Meteorológia mezőgazdáknak, kertészeknek, erdészeknek. Mezőgazda Kiadó, Budapest. p. 722.
- Szegedi S.** 2002. A városi környezet kutatása: városklíma mérések Debrecenben. Debreceni Szemle 10/4. pp. 681-691.
- Unger J.** 1996. Heat Island Intensity with Different Meteorological Conditions in a Medium-Sized Town: Szeged, Hungary. Theoretical and Applied Climatology. 54. pp. 147-151.
- Unger, J. – Bottyán, Zs. – Sümeghy, Z. – Gulyás, Á.** 2000a. Urban heat island development affected by urban surface factors. Időjárás 104/4. pp. 253-268.
- Unger, J. – Sümeghy, Z. – Gulyás, Á. – Zoboki, J. – Pál, V.** 2000b. Maximum urban heat island as a function of urban and meteorological factors. Proceedings of 3rd European Conference on Applied Climatology. Pisa, Italy. CD-ROM, Session V.