

DOKTORI (Ph.D) ÉRTEKEZÉS

**AZ ÁTLAGOS MAXIMÁLIS HŐSZIGET-INTENZITÁS
STATISZTIKUS MODELLJE SZEGEDEN ÉS DEBRECENBEN**

BOTTYÁN ZSOLT

**TÉMAVEZETŐ:
DR. UNGER JÁNOS**

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM

Földtudományok Doktori Iskola

SZEGED

2007

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés	3
2. A város és a területén kialakuló klíma jellegzetességei	6
2.1. Az urbanizáció és rövid történeti áttekintése	6
2.2. A városklíma térbeli struktúrája és kialakulásának okai	7
2.3. A városi légkör összetétele	10
2.4. A városi felszín energia-háztartása és a városi éghajlati paraméterek módosulásai	12
2.5. A városi hősziget kialakulása	15
3. A városi hősziget modellezésének korábbi módjai és eredményei	20
4. Az alföldi régió földrajzi és éghajlati sajátosságai	31
4.1. Szeged és Debrecen földrajzi fekvése	31
4.2. A két város éghajlatának jellemző vonásai	32
5. A vizsgált területek lehatárolása és az adatgyűjtés módjai	36
5.1. A mintavételi területek és összehasonlításuk	36
5.2. Az adatgyűjtés és az alkalmazott paraméterek meghatározása	38
5.2.1. A hőmérsékleti értékek mérése	38
5.2.2. A beépítettségi arány meghatározása	40
5.2.3. Az égboltláthatósági faktor mérése és számítása	41
5.2.4. Az épületmagasságok kalkulációja	43
6. A városi hősziget és a vizsgált beépítettségi paraméterek területi eloszlása Szegeden és Debrecenben	44
6.1. Az átlagos maximális hősziget-intenzitás és a beépítettségi paraméterek területi eloszlása Szegeden	44
6.2. Az átlagos maximális hősziget-intenzitás és a beépítettségi arány területi eloszlása Debrecenben	50
7. Az éghajlati rendszer matematikai modellezésének módszerei	54
7.1. A dinamikus megközelítés elve	54
7.2. A statisztikus megközelítés elve	57
8. Eredmények	62
8.1. A Szegedre kifejlesztett (1. típusú) statisztikus modell felépítése	62
8.1.1. A modellben alkalmazott prediktorok tulajdonágai és térbeli kiterjesztésük	62
8.1.2. A többváltozós lineáris regresszió és a kollinearitás kérdése	69
8.1.3. A regressziós függvény meghatározása és a szignifikancia kérdése	73
8.2. A Szegedre és Debrecenre kifejlesztett (2. típusú) statisztikus modell felépítése és a paraméterek becslése	76
8.2.1. A modellben alkalmazott prediktorok tulajdonágai és térbeli kiterjesztésük	76
8.2.2. A regressziós függvény meghatározása és a szignifikancia kérdése	80
8.3. Az 1. típusú modell által generált és a valódi hőmérsékleti mező összehasonlítása Szegeden	84
8.4. Az 2. típusú modell által generált és a valódi hőmérsékleti mező összehasonlítása Szegeden és Debrecenben	88
8.5. Az alkalmazott modellek további felhasználásának lehetőségei és korlátai	92

9. Összefoglalás	96
9.1. Az átlagos maximális hősziget intenzitás	96
9.2. Az átlagos maximális hősziget területi eloszlása és a beépítettségi paraméterek közti kapcsolat	96
9.3. Az átlagos maximális hősziget-intenzitás statisztikus modellje	99
9.4. A modell megbízhatósága és korlátai	101
10. Summary	103
10.1. The mean maximum urban heat island intensity	103
10.2. Relationship between the spatial distribution of the mean maximum urban heat island and the urban parameters	103
10.3. Statistical model for estimating the mean maximum urban heat island	106
10.4. The reliability and limits of the applied statistical model	108
Irodalom	110
Mellékletek	116
Köszönetnyilvánítás	122

1. BEVEZETÉS

A múlt században világszerte rendkívüli mértékben felgyorsult a népesség városokba való áramlása. E folyamat eredményeként a városban élő emberek száma jóval meghaladja a kisebb településeken lakók számát. Különösen igaz ez a világ fejlett területeire, így Európára, Észak-Amerikára és Ausztráliára.

A kialakult különböző méretű városok jelentősen módosítják a településen belüli környezetet, amely visszahat az ott élő emberekre és magára a környezetre is. Ennek a komplex környezetmódosító hatásnak talán a legfontosabb eleme a települések területén kialakuló **városi klíma** (urban climate). A városklíma több sajátos vonással rendelkezik, melyek alapján jól elkülöníthető, elhatárolható a környezetében kialakuló éghajlattól. A legjellemzőbb vonása, a városok felett kialakuló hőmérsékleti többlet megjelenése, amely az ún. **városi hősziget** (urban heat island, UHI) formájában ölt testet. Ez a hatás már a kisebb települések esetén is kimutatható, a metropoliszoknál pedig igen jelentős mértékűvé válik.

A dolgozat 2. fejezetében a városklíma legfontosabb jellegzetességeit tárgyalom, különös tekintettel a hősziget tulajdonságaira, kialakulásának okaira.

Munkám 3. fejezetének célja, hogy áttekintsem a városi hősziget modellezésével kapcsolatos ismereteket. Ennek keretén belül röviden ismertetem azokat a módszereket, melyek segítségével - statisztikus és dinamikus megközelítési eljárást alkalmazva - fontosabb eredményeket sikerült elérni a hőmérsékleti többlet eloszlásának modellezésében. Természetesen mind a külföldi, mind pedig hazai a szakmai tevékenységet ismertetni fogom.

A következő, 4. fejezetben, a vizsgálatban részt vevő két helyszín (Szeged és Debrecen) rövid földrajzi és éghajlati elemzését fogom elvégezni. Rá fogok mutatni arra a fontos tényre, hogy ez a két alföldi város különösen alkalmas - a földrajzi adottságaikból fakadóan - a városi klímamódosító hatások általános elemzésére, összehasonlítására illetve ezek modellezésére. Mindkét város síkvidéki, lényegében azonos éghajlatú, hasonló méretű település, ahol a klímamódosító hatásokat viszonylag tisztán - geográfiai zavaró tényezőktől mentesen - vizsgálhatjuk, így megállapításaink a városi éghajlatról általánosíthatóak lesznek.

Dolgozatom a városi maximális hősziget-intenzitás statisztikus modelljének egy megközelítését mutatja be, így az 5. fejezetben először a munkámhoz nélkülözhetetlen mintavételi területek lehatárolása után, a hőmérsékleti adatok gyűjtésének módjáról írok.

Ezek során gépkocsira rögzített mobil automatával expedíciós méréseket végeztünk 1999. március és 2000. február között Szeged városában, majd ennek folytatásaként a 2002. április és 2003. március közötti időszakban Szegeden és Debrecenben. Ebben a részben mutatom be azokat a statikus paramétereket, melyeket a modellhez, mint prediktorokat használok, és röviden vázolom ezek fizikai hatásait a városi klíma kialakításában. Így a jelzett fejezetben kerülnek bemutatásra a beépítettségi arány, az égboltháthatósági faktor és az épületmagasság értékek számítási eljárásai.

Az expedíciós mérések alkalmával mért hőmérsékleti adatok feldolgozása után egyértelmű és világos képet kaptunk a maximális hősziget-intenzitás területi eloszlásáról, melyet mindkét vizsgált városra térképes formában bemutatok a 6. fejezetben. A hőmérsékleti többlet a városok sűrűn beépített, szűk utcákkal szabdaltsága területén valamint a nagy épülettömeget jelentő lakótelepi területeken mutatja a maximumát. Természetesen ezek elemzése során rámutatok a beépítettségi paraméterek hőmérséklet-módosító hatására, valamint részletesen elemzem az UHI mező ennek következtében kialakuló inhomogenitásait is Szeged és Debrecen estében.

A 7. fejezetben az éghajlati modellezés dinamikus és statisztikus megközelítési elvével foglalkozom és rámutatok arra, hogy a statisztikus modellezés alkalmazása nélkülözhetelen az éghajlati vizsgálatok során. A maximális UHI területi eloszlásában a városi beépítettségi paraméterek alapvető szerepet játszanak, mint statikus, kvázi állandó hatótényezők. Ezek hatásai rendkívül jól kezelhetők statisztikus megközelítéssel, míg ha az UHI időbeli változását, dinamikáját is le akarjuk írni, akkor a modellezést dinamikus alapokra is ki kell terjeszteni.

A modell alkalmazásával kapott eredmények alapján elmondhatjuk, hogy a korábban említett és felhasznált beépítettségi tényezők, mint prediktorok segítségével – felhasználva a modell egyenleteket – igen jól megközelíthető az átlagos maximális UHI mező területi eloszlása. A 8. fejezetben mutatom, a két város maximális UHI értékeinek többváltozós lineáris modelljét a prediktorok kiválasztási módszerével együtt (1. és 2. típusú modell). A modellek alkalmasak hasonló adottságú és földrajzi fekvésű városok átlagos maximális hőtöbbletének területi becslésére, de az UHI pontos térbeli és időbeli meghatározását csak további - elsősorban dinamikus - paraméterek bevonásával lehet megvalósítani, előre jelezni. Az 1. típusú modell által becsült UHI mező és egy független időszakból származó mező területi összevetéséből kiderül, hogy viszonylag kis számú, könnyen meghatározható statikus beépítettségi faktor segítségével igen jól közelíthető a hőtöbblet területi eloszlása,

így igazolva a modell használhatóságát. A fejezet végén a városi hőtöbblet eloszlásának modellezésével kapcsolatos további lehetőségeket és korlátokat is felvillantom.

Az urbanizációs folyamat gyorsulása azt eredményezi, hogy egyre több embert érint közvetlenül a városok okozta időjárási és éghajlati módosulás, így a városklíma kutatásoknak a jövőben is fontos szerepe lesz elsősorban a városi hőmérsékleti mező alakulásának becslésében. Ennek nyilvánvalóan nemcsak humán és bioklimatológiai oldala van (pl. hőstressz, komfortérzet, orvosmeteorológiai problémák, hőmérséklettel kapcsolatos kémiai reakciók által generált szennyeződések stb.), hanem gazdasági vetülete is. Gondoljunk csak arra, hogy télen a magasabb hőmérsékletek miatt kevesebb energia is elegendő a lakások fűtéséhez, nyáron viszont a környezeténél jóval melegebb városi területek légkondicionálása fogyaszt egyre több energiát. Másfelől, a városi építmények tervezésekor is célszerű figyelembe venni az épületek klímamódosító hatásait illetve megfelelő parkosítással és tagolással csökkenthetőek a hőtöbbletből származó káros hatások. Éppen ezért elsődlegesen fontos a települések hőmérsékleti eloszlásának minél pontosabb becslése, sőt előrejelzése is. Ennek a folyamatnak egyik magyarországi megközelítése a jelen tanulmányban ismertetett statisztikus modell az átlagos maximális UHI intenzitás becslésére.

2. A VÁROS ÉS A TERÜLETÉN KIALAKULÓ KLÍMA JELLEGZETESSÉGEI

2.1. Az urbanizáció és rövid történeti áttekintése

Jóllehet már az i.e. I. évezredben is voltak több százezres városok (pl. Babilon), globálisan az ipari forradalom adott hatalmas lendületet a városok fejlődésének és ezzel együtt a népesség városba áramlásának. A XVII-XVIII. századtól előbb Európában és Ázsiában, majd Észak-Amerikában egyre nagyobb kiterjedésű és lélekszámú városok alakultak ki (Unger, 1997). Jelenleg a legerőteljesebb urbanizáció a harmadik világban figyelhető meg (Becsei, 2001), amely alapvetően a robbanásszerű népesség-szaporulat következménye, például: Mexikóváros, Sao Paulo, Bombay, Lagos, Kairó (Unger és Sümeghy, 2002).

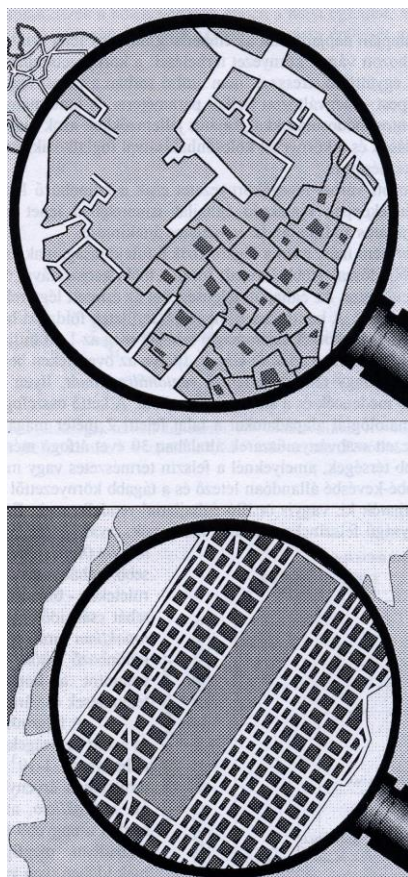
2.1.1 táblázat A városokban élő lakosság száma és aránya a teljes népességhez viszonyítva (1950-2000) (Unger és Sümeghy, 2002)

<i>Régiók</i>	<i>1950</i>		<i>1985</i>		<i>2000</i>	
	<i>(%)</i>	<i>(millió)</i>	<i>(%)</i>	<i>(millió)</i>	<i>(%)</i>	<i>(millió)</i>
világ	29,2	734,2	41,0	1982,8	46,6	2853,6
fejlett régiók	53,8	447,3	71,5	838,8	74,4	949,9
fejlődő régiók	17,0	286,8	31,2	1144,0	39,3	1903,7

Természetesen nem csak a városi települések száma emelkedett rohamosan, hanem a lakosság száma is. Míg 1800-ban Peking volt a lélekszám szerinti legnagyobb város 2,5 millió, addig 1914-ben már London 7,3 millió, 1939-ben New York 10,5 millió és napjainkban Mexikóváros több, mint 20 millió lakossal (Unger, 1997).

Az urbanizáció fontos mutatója, hogy a különböző korokban mennyi a városi lakosság aránya. 1800-ban a Föld teljes lakosságának mindössze 2,4%-a, 1900-ban 13,6%-a volt városlakó. A 2.1.1 táblázatból világosan látszik, hogy a múlt század közepétől felgyorsult az urbanizációs folyamat és 1950-ben bolygónk teljes populációjának 29,2%-a, 1985-ben 41%-a, és 2000-ben 46,6%-a élt városokban. Hazánkban jelenleg a lakosság több, mint 2/3-a él városokban.

Különböző korokban eltérő városszerkezeti formák alakultak ki, melyek visszatükrözik az adott időszakra jellemző hagyományokat, formákat és azt az életmódot, ahogyan akkoriban éltek az emberek. Az urbanizációval együtt jár a beépített területek nagyságának növekedése is.



2.1.1 ábra Jellegzetes városalaprajzok: arab-izlám - Fez (**fent**) és amerikai – New York (**lent**) (Mézes, 1995)

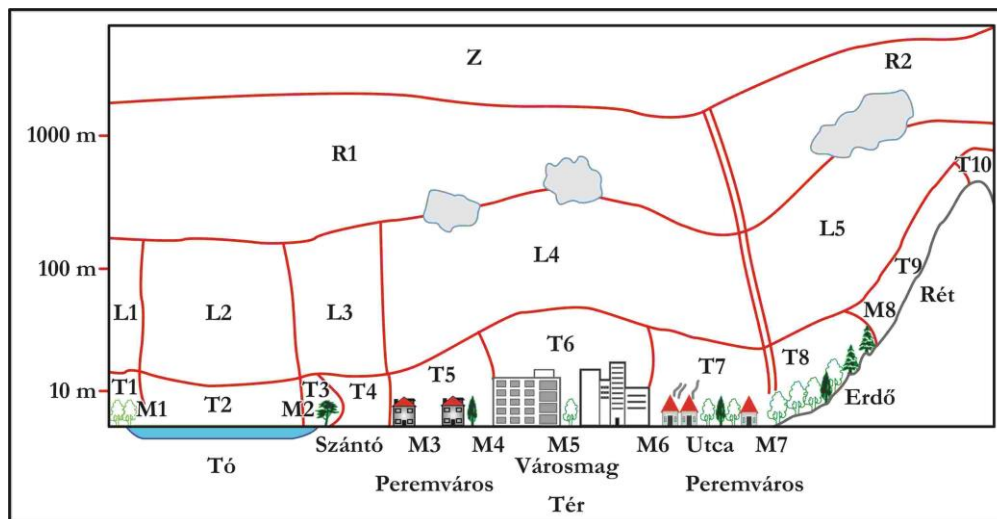
A világ egyes területein a geometria szabályai tükröződnek vissza a derékszögű háztömbökben és utcahálózatban. Így volt ez az ókori Rómában, a kínai városoknál és ez a szerkezet jelenik meg jóval később New York, valamint Buenos Aires esetében. Ezzel szemben az arab házak ötletszerűen vannak egymáshoz építve, befelé fordulók, kis belső udvarokkal (2.1.1 ábra) (Mézes, 1995). Európában a római típusú városok az V-VI. század táján szinte teljesen elpusztultak és az első ezredfordulóval kialakulóban lévő új városstruktúrák leginkább az arab stílust mintázták. A XIX. századtól kezdődően, körutas-sugárutas városformációk jelentek meg (pl. Párizs, Budapest és Szeged).

2.2 A városklíma térbeli struktúrája és kialakulásának okai

Ahogy az 1. fejezetben már utaltam rá, a városi területek éghajlati szempontból jelentősen eltérnek a környezetüktől. E különbségek kialakulását leginkább a városi és a várost övező környezet fizikai paramétereinek - olykor jelentős - eltérése indukálja. A mesterséges tényezők együttesen egy speciális helyi klímát (**városklímát**) határoznak meg.

A települések legnyilvánvalóbb klímamódosító hatása a **városi hőmérsékleti többlet** (Landsberg, 1981).

A megváltozott városi levegőkörnyezetet csak a különböző léptékű meteorológiai folyamatok eredményeképpen kialakuló éghajlat ismeretében lehet elemezni (Probáld, 1974). Az előforduló mikroklimák térben és időben egyaránt igen változékonyak, rövid életűek és kialakulásuk egy adott időjárási szituációhoz kapcsolódik. A városokban (főleg a nagyobbakban) fellelhető mikroklimákat mozaikstruktúra jellemzi. Az utcák, terek, parkok és udvarok mind sajátos éghajlattal rendelkeznek, amelyekben azonban közös vonások is vannak. Ezek a közös vonások éppen a lokális (helyi) éghajlat, a városklíma keretében jutnak kifejezésre. A különböző klímák térbeli szerkezetét, egymásra épülését a 2.2.1. ábra mutatja be egy szemléletes metszetben.



2.2.1. ábra Az éghajlati jelenségek térbeli dimenziói: **Z** = zonális (makro) klíma, **R** = regionális (mezo) klíma, **L** = lokális klíma, **T** = topoklíma, **M** = mikroklíma (Yoshino, 1975; Sümeghy, 2004)

A város földrajzi elhelyezkedése az adott nagytérségű éghajlati zónában, mérete, szerkezete, gazdaságának milyensége jelentős hatással van a kialakult éghajlati különbségek mértékére. A természetföldrajzi adottságok (pl. medencefekvés, domborzat, vízfelületek közelsége, növényzet stb.) erősíthetik vagy gyengíthetik az antropogén okok hatására bekövetkező változások szerepét. Hangsúlyozni kell azonban, hogy minden nagyobb város éghajlata rendelkezik olyan sajátos vonásokkal, amelyek csak arra az adott településre jellemzőek. Az említett változások főbb okozói a következők:

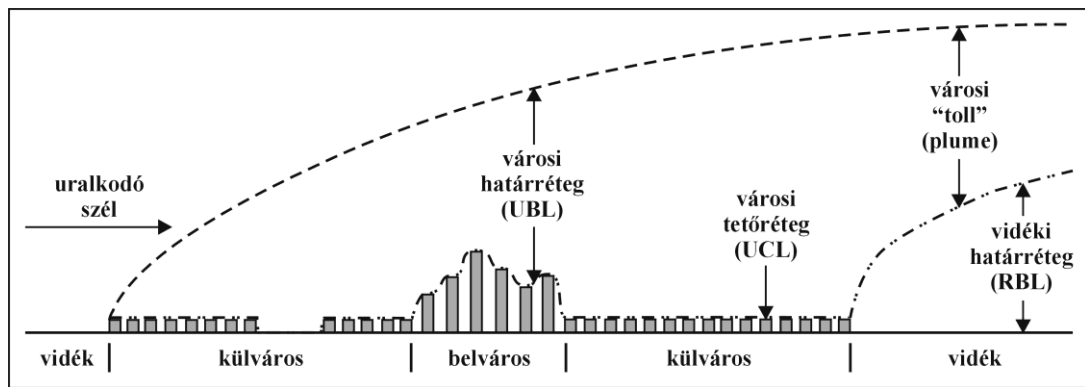
- A város területén a természetes felületet felváltja egy erősen szabdalt, mesterségesen létrehozott, nagy érdekességű, gyenge vízáteresztő képességű felszín, melynek vastagsága az utcák síkjától az épületek tetejéig terjed.

- A különböző építményekben alkalmazott (építő)anyagok fizikai tulajdonságai is alapvetően különböznek a városon kívüli természetben fellelhető felszín tulajdonságaitól. Nagyobb hőkapacitással, jobb hővezetési tulajdonságokkal, valamint kisebb albedóval rendelkeznek. Ezeknek a módosult tulajdonságoknak köszönhető, hogy kialakul a természetes helyett egy új, sugárzó felület a városi tetőszinten.
- A városban megjelenő helyi klíma fontos sajátossága, hogy az energiaegyenlegében az emberi tevékenység során termelt és kibocsátott hő jelentős szerepet játszik.
- Végül, de nem utolsó sorban az antropogén folyamatok (közlekedés, ipari termelés, fűtés stb.) során a várost lepelszerűen borítják be a keletkezett gázok, vízgőz, füst, korom és egyéb szilárd szennyezőanyagok (aeroszol).

A városok felett a levegő rétegzettsége is módosul a környezetében tapasztalthoz képest. A városklíma kialakulását és fennmaradását nagymértékben segítik ezek, a települések felett különböző magasságban megjelenő rétegek, melyeket röviden jellemezzük:

- **Légköri határréteg** – a talaj felett elhelyezkedő mintegy 600–1000 méter vastagságú légréteg, melyben a meteorológiai elemek értékét döntően a felszíni tulajdonságok határozzák meg, egy komplex kölcsönhatás-rendszeren keresztül. E réteg legalsó mintegy 100 méter magas övezetét talajközeli határrétegnek nevezzük.
- **Városi határréteg** (urban boundary layer – UBL) – települések felett kialakuló, mezoskálájú réteg, melynek vastagsága erősen függ a beépített területek érdességétől és alapja a városi tetőszint réteggel esik egybe.
- **Városi tetőszint réteg** (urban canopy layer – UCL) – a városok épületeinek tetőszintjét követő vékony réteg, mely mintegy a települések sugárzási felülete funkcionál és tulajdonságait mikroskálájú folyamatok kormányozzák (Oke, 1976).

A 2.2.2 ábrán látható, hogy a városi határréteg mintegy beburkolja magát a települést és magassága meghaladja a **vidéki határréteg** (rural boundary layer – RBL) magasságát. A nappali UBL szerkezete és dinamikája hasonló a vidéki határrétegéhez attól eltekintve, hogy annál valamivel turbulensebb, melegebb, szárazabb és szennyezettebb általában. Abban az esetben, ha az uralkodó szél gyenge vagy mérsékelt erősségű, a városi határréteg



2.2.2. ábra A városi légkör szerkezete (Oke, 1976; Unger, 1997)

deformálódik és a széllel ellentétes irányban hosszan elnyúlik a város környezete fölé, mint egy „toll” (plume).

2.3. A városi légkör összetétele

A városok feletti levegő összetételében a legfontosabb változást a különböző **szennyezőanyagok** megjelenése és feldúsulása jelenti. Ezek a szennyeződések elsősorban különböző égéstermékek, melyek csökkentik a napsugárzást, igen sok kondenzációs magot produkálnak és az élőlényekre is károsan hatnak. A városi éghajlat szempontjából két nagy csoportba sorolhatjuk ezeket a szennyező anyagokat:

- **Aeroszol részecskék** – Gáznemű közegben (levegő) finoman diszpergált szilárd vagy cseppfolyós részecskék együttes rendszere. Az aeroszol részecskék mérettartománya 1 nm – 20 μm -ig terjed. Rendkívül lassan mozognak, esési sebességük a 10^{-8} és 10^{-2} m/s közötti tartományban mozog. Kiülepedésük száraz, nedves vagy gravitációs módon történhet meg. Általánosan igaz rájuk, hogy minél nagyobb egy aeroszol részecske, annál kisebb a légköri tartózkodási ideje és fordítva. Légkörfizikai hatásuk, hogy egyes aeroszokok gátolják a rövidhullámú besugárzást, így hűtenek (pl. szulfátok), mások pedig elnyelve azt, melegítik a közeget (pl. korom). Mindegyik típusa csökkenti a látástávolságot. Mérésük $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -ben vagy db/cm^3 -ben történik. A kis részecskék ($< 0,1 \mu\text{m}$) koncentrációja vidéki területeken $\approx 10^4 - 10^5 \text{ db}/\text{cm}^3$, míg a városokban több mint $10^6 \text{ db}/\text{cm}^3$. Hasonló a helyzet a nagyobb ($0,5 \mu\text{m} - 10 \mu\text{m}$) részecskék esetében is, mert pl. egy konkrét mérésnél, melyet Lipcsében és környékén végeztek, a városban mért koncentráció

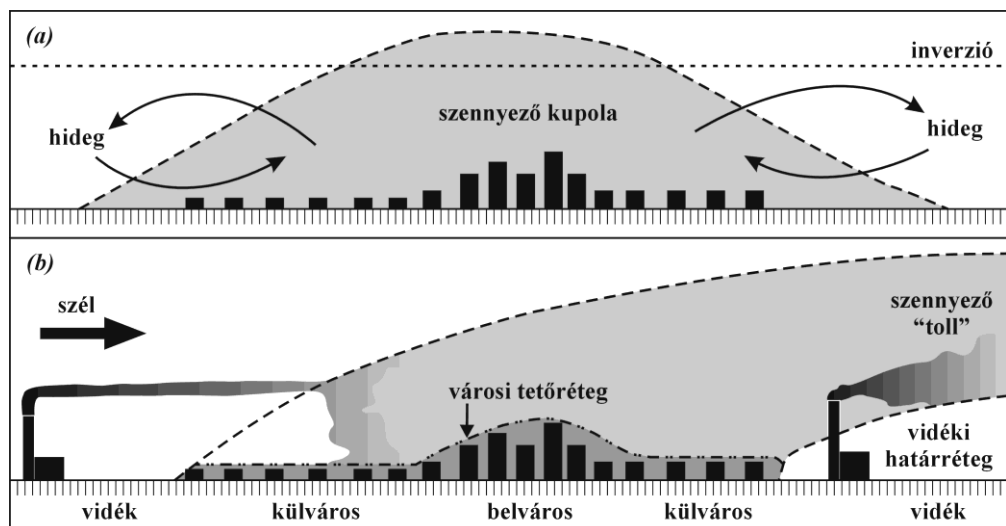
25-30 db/cm³ volt szemben a vidéken mért 1-2 db/cm³-es értékkel (Barry and Chorley, 1982). Jól szemlélteti a városok levegőjének szennyezettségét azoknak a napoknak az éves száma, amelyeknél az aeroszol koncentráció meghaladja a 260 µg/m³-es határértéket. 1974-ben Baltimore-ban 20, Birmingham-ben 30, Cleveland-ben 80 és az acélvárosnak nevezett Steubenville-ben 120 ilyen nap fordult elő!

- **Gázok** – Legfontosabbak a különböző fosszilis tüzelőanyagok elégetésekor keletkező gázok. Ezek közé tartozik a kén-dioxid (SO₂), szén-dioxid (CO₂), szén-monoxid (CO), nitrogén-oxidok (NO_x). A különböző kémiai reakciók által keletkező gázok is fontos szerepet játszanak a városi légkör szennyezésében. Ide soroljuk a nitrogén-oxidokat (NO_x), az ózont (O₃), a salétromsavat (HNO₃) és a peroxiacetil-nitrátot (PAN) stb. Koncentrációjukat ppm-ben adjuk meg. Jelentős szerepük van a troposzférikus ózon és a fotokémiai szmog kialakulásában is. A városok légkörében fellelhető legfontosabb szennyező gázok koncentrációit a 2.3.1 táblázatban láthatjuk.

2.3.1 táblázat Szennyező gázok koncentrációi a nagyvárosok levegőjében (ppm) (Unger, 1997)

<i>Szennyező gáz</i>	<i>Mennyiség (ppm)</i>
CO ₂	300-1000
CO	1-200
SO ₂	0,01-3
N-oxidok	0,01-1
aldehidek	0,01-1
oxidánsok (O ₃ is)	0-0,8
kloridok	0-0,3
NH ₃	0-0,21

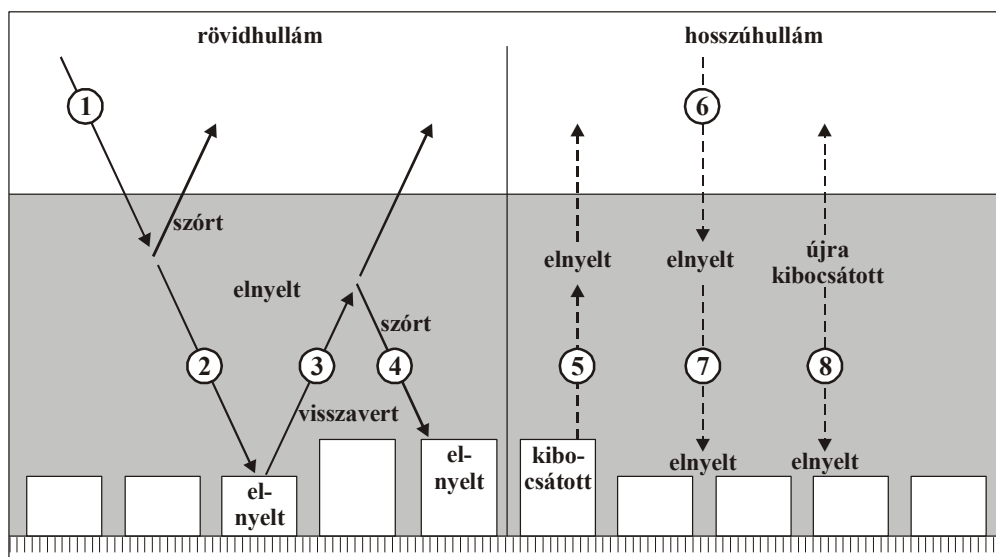
Természetesen a városi szennyezőanyagok eloszlása a település felett nem homogén. A meteorológiai elemek közül jelentősen befolyásolja az említett eloszlást a szél, hiszen a szélsébség növekedésével jelentősen hígul a káros anyagok koncentrációja. A másik igen fontos faktor a **hőmérsékleti inverzió** hatása. Az inverziós réteg áramlási mezeje lecsatolódik a felette levő levegő áramlásáról és így az inverzió által elválasztott légrések között lecsökken illetve leáll a légcseré. Ezért a talaj közelében a városi levegő rendkívül dús lesz szennyezőanyagokban, ugyanakkor alig tapasztalunk légmozgást ebben a rétegben. Ennek hatására kialakul az ún. **szennyező kupola**, mely azonban már kis szélsébség hatására is el tud mozdulni és ekkor már a korábban említett „toll”-formát veszi fel, ahogyan az a 2.3.1 ábrán látható.



2.3.1. ábra A városi szennyeződés alakzatai: (a) a városi szennyező kupola, (b) a városi szennyező toll stabil légköri rétegződés esetén (Barry and Chorley, 1982, Sümeghy, 2004)

2.4. A városi felszín energia-háztartása és a városi éghajlati paraméterek módosulásai

Korábban utaltam rá, hogy a beépített területek jelentős felszíni és légköri módosulásai befolyásolják a település klímáját. Ennek egyik fontos szegmense a **városi sugárzási mérleg** rövid- és hosszuhullámú összetevőinek megváltozása. A 2.4.1 ábrán láthatjuk a különböző hullámhosszú sugárzási folyamatok általánosított rendszerét a városi határrétegben.



2.4.1. ábra A rövid- és hosszuhullámú sugárzási folyamatok általános struktúrája a szennyezett városi határrétegben (Oke, 1982, Sümeghy, 2004)

A **rövidhullámú besugárzás** (1) és a felszín által visszavert (3) - szintén rövidhullámú - komponens egyaránt jobban gyengül a városi határrétegben, mint a

természetes környezet feletti légréteg esetén. A városi felszínen, a bevételi oldalon - direkt és szórt (2) valamint visszavert (4) - sugárzás hozzávetőlegesen 2-10%-os csökkenését tapasztalhatjuk Budapesten éves átlagban 8%-os besugárzás-csökkenés mutatható ki, amely érték a nyári félévben kisebb az intenzívebb turbulens átkeverő mozgások, feláramlások és a fűtés hiánya miatt, ugyanakkor télen ennél lényegesen magasabb értéket kapunk (*Probáld*, 1974). A rövidhullámú sugárzási egyenlegben nem jelentkezik markáns különbség a városi és a beépítetlen területek között, hiszen a települések szennyezettebb légkörében nagyobb a sugárzásvesztés, de ezt ellensúlyozza a városi felszín 0,05-0,10-del alacsonyabb albedója a vidéki területekhez viszonyítva.

A **hosszúhullámú komponens** esetében is hasonló – egymást kioltó – hatásokat tapasztalhatunk a vidéki és a városi felszínek közötti összehasonlításnál. Bár a szennyezettebb levegő és a városi felszín kevesebb energiát emittál, a városok hőszigetei magasabb hőmérsékletű sugárzást produkálnak, ami lényegében egy megnövelt kisugárzás (5). A hőszigetek által kibocsátott sugárzás egy jelentős része elnyelődik a légkörben és visszasugárzódik a felszín felé a beérkező égboltsugárzás (6) egy részével együtt (7). Ehhez járul hozzá még a hősziget feletti meleg levegő által kibocsátott sugárzás is (8). Az összegzett hosszúhullámú bevétel éjszaka a városban némileg nagyobb, mint a vidéki területeken (*Oke and Fuggle*, 1972). Végül soron elmondhatjuk, hogy a városi területek felett megnövekszik mind a hosszúhullámú bevétel, mind a kiadás is, ezért a különbözetük nem jelentős.

A fent leírtakból azonnal adódik, hogy a teljes sugárzási egyenlegnek a város és a külterülete közötti különbsége nem jelentős, általában 5%-nál kevesebb (*Probáld*, 1975).

Egy városi felszínre vonatkozó energiaegyenleget a következőképpen adhatjuk meg (az advekciótól eltekintünk):

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

ahol Q^* – a teljes sugárzási mérleg, Q_F – az antropogén hőtermelés, Q_H – az érzékelhető hő, Q_E – a látens hő és ΔQ_S – az energiatárolás változása.

2.4.1. táblázat Az energiaegyenleg összetevőinek tipikus arányai az átlagos napi sugárzási mérleghez viszonyítva a külterületen, az elővárosban és a belvárosban (*Oke*, 1982)

Beépítettség típusa	$\Delta Q_S/Q^*$	Q_H/Q^*	Q_E/Q^*
külterület	0,15	0,28	0,57
előváros	0,22	0,39	0,39
belváros	0,27	0,44	0,29

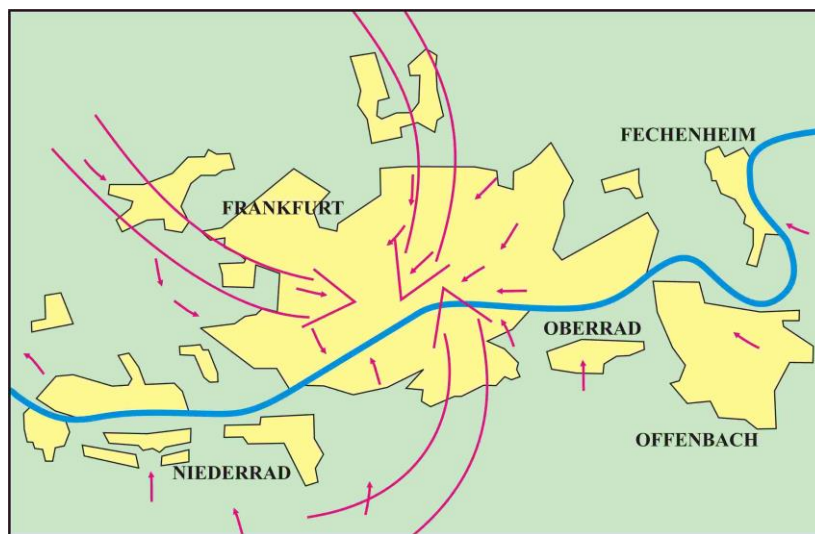
Az antropogén hőtermelés (Q_F) mellett a városi területeken rendkívül fontos a hőtárolási tag (ΔQ_S), melynek jelentős szerepe van a hősziget kialakulásában. A 2.4.1 táblázat világosan mutatja, hogy az erősebben beépített területeken a hőtárolás jóval nagyobb, mint a külterületeken. Ennek oka az, hogy az építkezésekhez felhasznált anyagoknak nagyobb a hővezető képessége és a hőkapacitása. Ez a hatás fontosabb az éjszaka folyamán, amikor a tárolási tényezőnek nagyobb szerepe van a teljes energiaegyenlegben, hiszen lényeges lehet a magasabb városi hőmérséklet fenntartásában. Meg kell azonban jegyezni, hogy a városi hőtöbblet kialakításában a felszín geometriája nagyobb szerepet játszik.

Az alábbiakban röviden áttekintjük azokat az éghajlati elemeket, amiknek a városi körülmények közötti módosulása jelentős és fontos. Mivel a városi felszínnek kevésbé párologtatnak és a növényzet is hiányos, ezért a **relatív nedvesség** ezeken a területeken alacsonyabb, mint vidéki környezetben. A legnagyobb eltérések (akár 10%) az esti időszakban és nyáron fordulnak elő.

A **ködképződésnek** rendkívül kedvez a városi légkörben nagy számban feldúsuló kondenzációs magok – szinte folyamatos – jelenléte. Nagyobb városokban – főleg ha folyó keresztezi, vagy nagyobb vízfelület van közel hozzá – gyakoribbak és tartósabbak a ködök, mint a vidéki területeken. Gyakran előfordul, hogy **száraz légköri homály** is megfigyelhető a nagyszámú légköri szennyezőanyag miatt a városokban.

Különösen fontos a **szél** módosulása a városi körülmények között, hiszen mind sebességben, mind irányban jelentős változást mutat a beépítetlen környezethez képest. A beépített területek felszíne rendkívül nagy tagoltsággal rendelkezik, így a légáramlás útjában komoly akadályok képződnek, ami a súrlódási faktor növekedését okozza. Ennek eredményeképpen a városok belterületén jelentős átlagos szélesebesség-csökkenést figyelhetünk meg, amely elérheti akár a 30%-ot is, míg a széllekedések esetén ez a csökkenés 10-20%-os (Unger, 1997). Ez a jelenség szükségképpen magában hordozza a szélnyírás és a turbulencia kialakulását is, amelyek fontos jellemzői a városi szélnek. Az átlagos szélesebesség mérséklődésével összhangban a szélcsendes esetek száma 5-20%-kal növekszik (Unger és Sümeghy, 2002). Másfelől, a szél irányának megváltozása talán még markánsabban jelentkezik a beépített területek felett, hiszen a kialakított utcák, terek kitérítik a szelet az eredeti irányából és mintegy „csatornába terelik” azt. Ekkor azonban az áramlási törvényeknek megfelelően a szél sebessége meg is nő, hiszen szűkül az áramlási keresztmetszet. A szélesebesség fentebb leírt megváltozása az emberek komfortérzetét a városokban nyáron kedvezőtlenül, télen viszont kedvezően befolyásolja. Anticiklonális

makroszinoptikus helyzetben (gyenge vezető áramlás mellett) – elsősorban a nyári félévben - megfigyelhető, hogy a városközpontban kialakult hőtöbbség hatására ott lassan felemelkedik a levegő és ennek pótlására a külterületek irányából radiálisan levegőbeáramlás indul meg befelé a tetőszint (UCL) felett. Ez a mechanizmus a városok természetes ventillátorának is tekinthető, hiszen a szennyezett levegő helyébe tisztábbat szállít a környező területekről, jóllehet a hatását jelentősen csökkenti, hogy nem az utcák szintjében, hanem a tetőszinten történik a tisztább levegő beáramlása. Ennek az ún. **városi szélrendszernek** egyik megjelenését mutatom be a 2.4.2 ábrán.



2.4.2. ábra Éjszakai összeáramlás Frankfurtban, nyugodt időjárási helyzetben (Stummer, 1939; Sümeghy, 2004)

A legfontosabb és legáltalánosabb klímamódosulás azonban a felszíni és felszín közeli **hőmérséklet** külterületekhez viszonyított növekedésében nyilvánul meg. Ez a városi hőmérsékleti többlet, amely a városi hősziget formájában ölt testet.

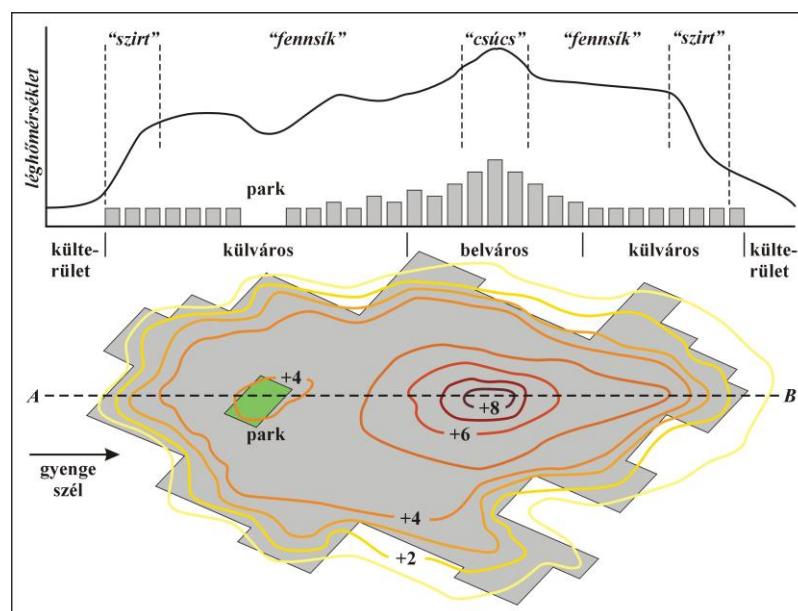
2.5. A városi hősziget kialakulása

A városi települések egyik legfontosabb éghajlat-módosító hatása tehát az a hőmérsékleti többlet, amely az erősen urbanizált részek és a külterületek közötti jelentős hőmérsékleti különbséggel reprezentálható. Ez a hőtöbblet alakítja ki a szakirodalomban széleskörűen vizsgált, ún. **városi hőszigetet** (UHI), melynek erőssége (intenzitása) a városon belül szignifikáns időbeli és térbeli változást is mutat (Oke, 1997; Kuttler, 1998). Ez a hőmérsékleti többlet, mely a vidéki területekhez viszonyítva értelmezhető, a felszínen,

a városi határrétegben és még akár 1-2 méterrel a felszín alatt is kimutatható. Munkám során kizárólag a városi légkörben, a felszín felett kialakuló hősziget jelenséggel foglalkozom, annak is a tetőszinti rétegben (UCL) kialakuló formációjának vizsgálata a célom.

A beépített területek feletti hőtöbblet kialakulásáért és fennmaradásáért a következő tényezők a felelősek:

- Az utcák geometriája (megnövekedett felszín és többszörös visszaverődés valamint korlátozott horizont) miatt emelkedik a rövidhullámú sugárzás bevételi oldala és csökken a hosszuhullámú energia-veszteség, valamint a turbulens hőszállítás.
- Az erősebben szennyezett légkörben a nagyobb elnyelés és visszasugárzás miatt megnő a hosszuhullámú sugárzás az égbolt irányából.
- A lakossági és ipari antropogén hőtermelésből származó veszteségek miatt többlet hő kerül a városok légkörébe.
- A felhasznált építőanyagok jó hővezető képessége, hőkapacitása és szinte zérus vízáteresztő-képessége miatt megnövekszik a felszín szenzibilis hőtárolási képessége és csökken az evapotranszpiráció (Oke, 1982).

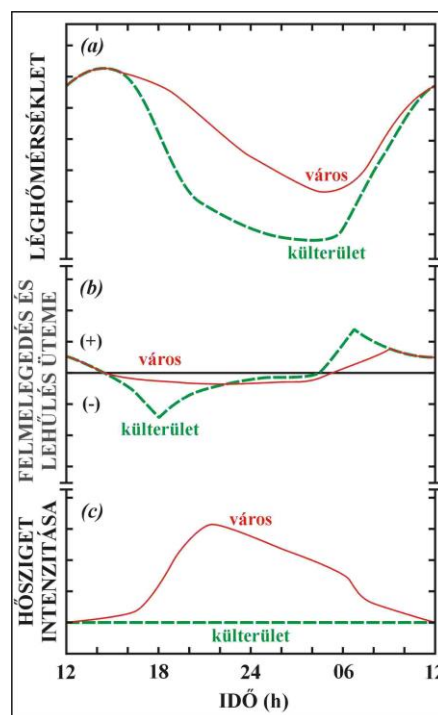


2.5.1. ábra A városi hőmérsékleti többlet sematikus területi eloszlása, keresztmetszeti képe (AB mentén) és horizontális struktúrája ideális időjárási körülmények között (Oke, 1982 után módosítva)

A városi hősziget területi (horizontális) szerkezetét a 2.5.1. ábra mutatja be Oke (1982) nyomán, amely igen jól láttatja, hogy mennyire találó a „sziget” elnevezés. Az

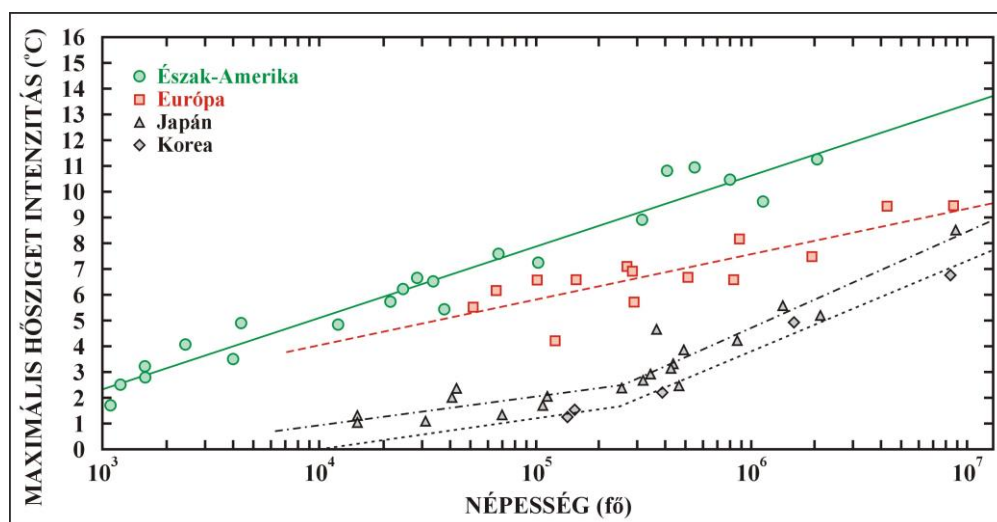
izotermák rendszere egy „sziget” alakját rajzolja ki, amelyet az annál hűvösebb vidéki környezet „tengere” vesz körül. A külterületek felől a belváros felé haladva a külváros peremvidékén erőteljesen megemelkedik a hőmérséklet („szirt”). Ezt követően lassú, de viszonylag egyenletes az emelkedés („fennsík”), amelyet csak a közbeékelődő parkok, tavak eltérő energiaegyenlege módosít valamennyire. A sűrűn beépített belvárosban észlelhető a legmagasabb hőmérséklet („csúcs”). Az is megfigyelhető az ábrán, hogy gyenge szél hatására az izotermák kissé eltolódnak a légáramlás irányának megfelelően. Természetesen ilyen viszonylag szabályos alakzat csak olyan időjárási helyzetekben jön létre, amely kedvező a kisebb léptékű klimatikus folyamatok kialakulásához, ezért általában csak rövid ideig áll fenn és változik is az idő múlásával.

A horizontális kiterjedés mellett természetesen vertikálisan is követhető a hősziget szerkezete, sőt a városi határréteg (UBL) fölé is emelkedik, de munkámban a hőmérsékleti többlet magasság szerinti alakulását nem tárgyalom. Általában a hősziget vertikális kiterjedése sekély, mintegy 20-300 méterig mutatható ki a városok felett és ebben a rétegben a függőleges hőmérsékleti gradiens kicsi. A környező beépítetlen régióban azonban a jelentős lehűlés miatt inverziós rétegződés alakul ki és egy bizonyos magasság elérése után a városon túli területek felett magasabb lesz a levegő hőmérséklete. Ezt nevezi a szakirodalom *cross-over jelenségnek* (Duckworth and Sandberg, 1954).



2.5.2. ábra A város és a külterület hőmérsékleti szempontból eltérő viselkedése ideális helyzetben: **(a)** hőmérséklet napi menete ($^{\circ}\text{C}$), **(b)** a lehűlés és felmelegedés üteme ($^{\circ}\text{C h}^{-1}$) a városban és a külterületen, valamint **(c)** a hősziget-intenzitása ($^{\circ}\text{C}$) (Oke, 1982; Sümegehy, 2004)

A 2.5.2. ábrán nyomon követhetjük a hőmérsékleti többlet időbeli alakulását, azaz a hősziget-intenzitás napi menetét. Jól látható, hogy napnyugta után a külterületeken a hőmérséklet gyorsabban csökken, így a városi területek melegebbek lesznek ekkor. A hőmérsékleti kontraszt a maximumát naplemente után mintegy 3-5 órával éri el, azaz ekkor a legnagyobb a hősziget-intenzitás értéke (Oke and Maxwell, 1975). Az is megfigyelhető, hogy a hajnali minimumhőmérséklet a városokban magasabb, mint környezetükben. A jelzett ábráról az is világosan kitűnik, hogy a városok tompítják a hőmérséklet ingadozásait a külterületekhez képest, azaz elmondható, hogy a külterületi lehülési és/vagy felmelegedési ütemek görbéi általában meredekebbek a városiaknál. A hősziget-intenzitás mértékének egyik fontos tényezője a város (település) mérete, horizontális kiterjedése. Ezzel jó korrelációban a települések méretét jellemezhetjük a lakosság számával is (P).



2.5.3. ábra A hősziget-intenzitásának maximuma (ΔT_{max}) és a lakosok száma közötti kapcsolat észak-amerikai, európai, japán és koreai településeken (Oke, 1979; Park, 1987; Sümeghy, 2004)

A 2.5.3. ábrán megfigyelhető, hogy a településen lakók száma hogyan hat a maximális hősziget-intenzitás értékeire a különböző kontinenseken. Fontos megjegyezni, hogy már egészen kis lélekszámú (1000 fő) településeken is ki lehet mutatni a hősziget jelenlétét. A legnagyobb metropoliszok esetében, pedig akár 12°C is lehet a különbség a városi és a vidéki hőmérsékletek között! A pontokra illesztett lineáris közelítések meredeksége más és más a különböző földrészekben, ami azt jelenti, hogy a lélekszám és a hősziget-intenzitás kapcsolatának jellege eltérő. Ez adódik abból, hogy a világ különböző területein egészen mások a várostervezés, a városépítés elvei és hagyományai, ezért a

városok méretének a lélekszámmal történő jellemzése önmagában általában nem lehet kielégítő a tanulmányozott fizikai jelenség magyarázatára (Oke, 1979; Park, 1987).

A települések felett kialakuló hőmérsékleti többlet eloszlását és intenzitását nyilván nem csak a városok statikus, fizikai paraméterei határozzák meg, hanem **dinamikus tényezők** is hatnak. Ezek közé tartoznak bizonyos meteorológiai elemek, mint pl. a szél, a felhőzet, a csapadék stb. A hősziget-intenzitás maximális kifejlődését leginkább a nyugodt, csapadékmentes, felhőzet nélküli, nagytérségű időjárási helyzetek segítik, így tipikusan anticiklonális hatás kedvez neki. Az erős szél és a csapadékhullás jelentősen csökkenti intenzitását, adott esetben teljesen meg is szüntetheti azt. A szél hatására vonatkozóan bevezethetünk egy ún. **kritikus szélesebességet**, amelynél nagyobb szél esetén a hősziget nem tud felépülni az átkeverő hatás miatt. A kapcsolatot a kritikus szélesebesség (v) és a lakosságszám (P) logaritmusai között a következő képlet (Oke and Hannell, 1970) adja meg:

$$v = 3,41 \cdot \lg P - 11,6 \quad (ms^{-1})$$

Így a kritikus szélesebesség Szeged és Debrecen esetén $v \approx 6 \text{ ms}^{-1}$ -nak adódik, azaz ennél nagyobb szélesebesség esetén már nem jelenik meg kimutatható hősziget a városok felett.

Összegzésképpen elmondhatjuk, hogy a városi hőmérsékleti többlet miatt a következő klimatikus hatásokkal kell számolnunk a települések esetén:

- Egyaránt meghosszabbodik a fagymentes és a növények vegetációs időszaka
- Eltolódnak a növényzet fenológiai fázisai
- Csökken a fagyos és a téli napok száma, valamint a fagyok erőssége
- Rövidül a hóval való borítottság ideje
- Csökken a fűtési napok száma

3. A VÁROSI HŐSZIGET MODELLEZÉSÉNEK KORÁBBI MÓDjai ÉS EREDMÉNYEI

Már az ókorból ismert számunkra, hogy a nagy kiterjedésű települések levegőminősége rosszabb, mint a környezetéé, hiszen maga *Hippokratesz* (i.e. V. sz.) utalt erre a tényre. A középkori városok szennyezettsége miatt a Brit-szigeteken két uralkodó (*I. Edward* király és *I. Erzsébet* királynő) is betiltotta egy időre a kőszénrel való fűtést. Természetesen ez csak átmeneti megoldást hozhatott, az adott korban rettenetesen szennyezetté vált városok levegőjének „hígítására”, mert pl. a London feletti füsttréteg még 1750-ben is több mint 100 km-ről látható volt (*Kratzer*, 1956).

A tudományos meteorológia kezdetei a XVII. század végére nyúlnak vissza, amikor néhány helyen megkezdődtek a rendszeres, műszerekre alapozott észlelések. 1783-ban a német *Deuer* Mannheimben a külváros és a botanikus kert között 6°C-os különbséget talált egy hideg téli éjszakán. A városi éghajlat alapvető jellegzetességeinek felismerése és az első városklíma-leírás az angol *Howard*-nak (1818) tulajdonítható, aki a londoni éghajlat és légszennyeződés sajátosságait tárgyalta. Legjelentősebb felismerése az volt, hogy a város központja melegebb, mint a környező vidéki területek (*Landsberg*, 1981).

Magát a „városklíma” kifejezést elsőként a német *Stifter* használta 1843-ban. A francia *Renou* 1855-ben Párizs példáján keresztül erősítette meg a város és környezete között fennálló hőmérsékleti különbség kialakulását. 1927-ben az osztrák *Schmidt* autóra szerelhető műszerekkel többször átszelte Bécs városának különböző beépítettségű területeit, hogy összehasonlító adatokat gyűjtsön. Ez az eljárás, több városi és városkörnyéki állomás méréseivel kiegészítve, a mai napig is használatos módszer.

A városklímáról az első nagy összefoglaló alapmű 1937-ben látott napvilágot, melynek szerzője a német *Kratzer* volt. A könyv bővített formája 1956-ban jelent meg.

Maga a „hősziget” kifejezés 1958 után honosodott meg az angol *Manley* (1958) nyomán. A városi hőszigetnek, azaz a települések legjellemzőbb klímamódosító hatásának a vizsgálata elsősorban Európa és Észak-Amerika városaiban folyt, például: Uppsalában (*Sundborg*, 1950, 1951) és Londonban (*Chandler*, 1960, 1962, 1967), illetve Kaliforniában (*Duckworth and Sandberg*, 1954; *Mitchell*, 1961). A kutatás középpontjában az állt, hogy a városi morfológia, a domborzat, az időjárási elemek és helyzetek változása milyen hatást gyakorol a hősziget kifejlődésére, illetve annak milyen (napi, heti és évszakos) dinamikája van.

Az elmúlt két évtizedben a városi hősziget területi és időbeli változásának modellezésére fektettek nagy hangsúlyt a kutatók világszerte. Ennek megfelelően számos statikus, dinamikus és statisztikus modellt dolgoztak ki az UHI pontosabb leírására.

Az egyik első *statikus leírást* Myrup adta meg, amikor a városi felszín - nagyon egyszerű - energia-háztartási egyenlegére építve megalkotta modelljét (Myrup, 1969). Leírásában a teljes sugárzási mérleget (Q^*) a szenzibilis (Q_H), a latens (Q_E) és a felszíni (Q_S) hőáramokkal adta meg. Miután az egyenlegben szereplő tagokat fizikailag leírta és behelyettesítette, egy olyan egyenletet kapott, melynek numerikus kiértékelése szinte megoldhatatlan feladat elé állította. Másfelől, az is nyilvánvalóvá vált, hogy ezzel az egyszerű megközelítéssel nem tudja az antropogén hőbevitelt kezelni.

Később, 1970-ben, egy tanulmányban kibővítve Myrup modelljét Bach (1970) a latens és a szenzibilis hőáramok becslésére a logaritmikus széltörvényt alkalmazva pontosabb eredményre jutott. Mérések alapján (Cincinnati, USA) megállapította továbbá, hogy az antropogén energia transzport nappal 5%-a, éjjel pedig kb. 25%-a a teljes sugárzási mérlegnek.

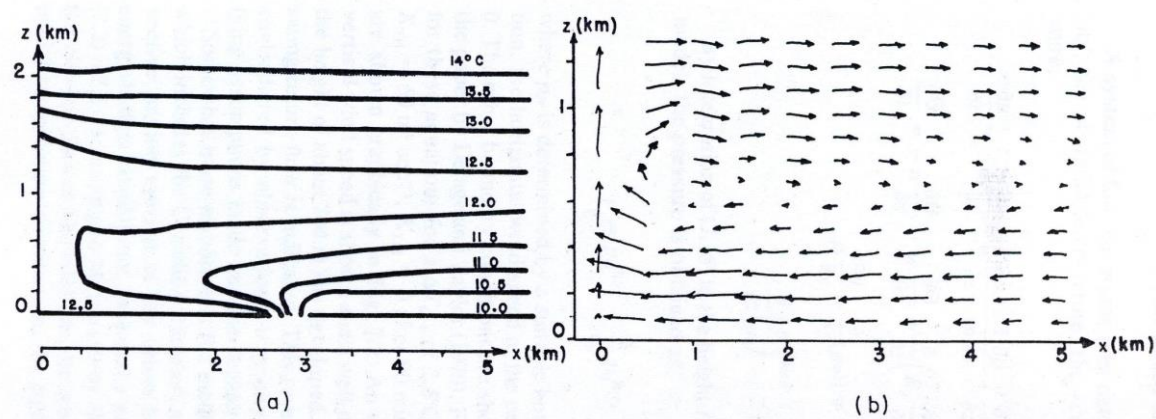
Jelentős lépés volt, amikor Montreal és Vancouver városainak hőtöbblete dinamikáját vizsgálva kimutatták, hogy a hősziget-intenzitásának maximuma kb. napnyugta után 3-5 órával jelentkezik és a felszín hűlésének sebességét, mértékét modellezték mindkét város esetén (Oke and Maxwell, 1975).

A mai napig az egyik legrészletesebb statikus modell lehetővé teszi, hogy a besugárzások és visszasugárzások bonyolult rendszerével egy rendkívül finom és részletes UHI mikroszerkezetet írassunk le (Terjung and O'Rourke, 1980).

A hősziget *dinamikus modellezésének* a számítástechnika fejlődése nyitott utat, hiszen ezekben a modellekben a hőmérsékletnek, mint meteorológiai elemnek a becslése a városi környezetben ható fizikai folyamatok matematikai leírásával történik és szinte mindig olyan differenciálegyenletek megoldását követeli meg, melyek csak numerikusan közelíthetőek. Tekintve, hogy ezek a modellek lehetővé teszik a városi hőmérsékleti mező időbeli és térbeli változásának leírását, alkalmasak – bizonyos korlátozásokkal – előrejelzésre is. Miután egy adott helyen a hőmérséklet értéke nem csak a helyi sajátosságoktól (besugárzás, albedó, anyagi minőség, stb.) függ, hanem jelentős advektációs hatással is számolni kell, így a dinamikus modelleknek kezelniük kell az áramlási viszonyokat is, ami rendkívül bonyolítja ezen modellek felépítését.

Az első dinamikus megközelítések általában időfüggő, 2 dimenziós dinamikus modellek voltak, melyekben a városi környezet egy x , z keresztmetszeti síkjában

határozták meg a hőmérséklet és a légáramlás értékeit. A kormányzó differenciálegyenlet-rendszer a vízszintes és függőleges sebesség, a potenciális hőmérséklet és a légnyomás meghatározását tették lehetővé megfelelő határ- és kezdeti feltételek mellett (Delage and Taylor, 1970). Ahogy a 3.1 ábrán látható, a város középpontjában kialakul a hőmérsékleti többlet és megjelenik a városi szélrendszerre jellemző áramlási profil. Mintegy 700 méter magasságig a központ felé történik az áramlás, majd feljebb a kompenzációs mozgást lehet megfigyelni, melynek szélvektorai kifelé mutatnak. Természetesen a kapott szélmező jóval egyszerűbb a megfigyelhetőnél, hiszen a modell nem vette figyelembe pl. a városi felszín tagoltságát, de mégis alapvetően összhangban állt a megfigyelésekkel.



3.1. ábra Hőmérsékleti keresztmetszet (a) és a szélmező (b) alakulása a hősziget felett. Az x tengelyen a 0 hely a hősziget középpontját jelöli (Delage and Taylor, 1970)

Egy komplexebb megközelítést alkalmazva Yu (1973) – felhasználva a korábban említett Myrup-féle modellt és kiegészítve azt a Navier-Stokes, a kontinuitási, potenciális hőmérséklet eloszlását leíró, a hidrosztatikai és a turbulens diffúzió momentum-átviteli egyenletekkel – már egy olyan modellt alkotott, melyben szerepel a városi felszín érdességét megadó koefficiens is. A modell egyenleteket – az általa meghatározott kezdeti és peremfeltételekkel – megoldva becslést kapott a potenciális hőmérséklet és a függőleges szélsősebesség értékeire. Eredményei azt mutatták, hogy a város központjában a potenciális hőmérséklet $3,5^{\circ}\text{C}$ -kal volt magasabb a vidéki területekhez képest és ugyanazon terület felett maximálisan $2,5 \text{ cm/s}$ nagyságú felszálló légáramlatot becsült a modell 5 órás futtatás után (Yu, 1973).

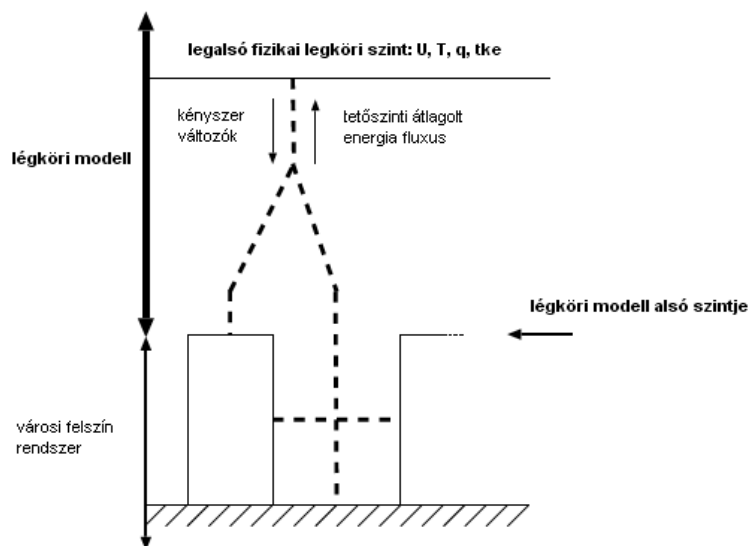
Meg kell említeni az egyik legrealisztikusabb dinamikus modellt, melyet URBMET-nek neveznek. Ebben a modellben a városi határréteg (UCL) stabilitási viszonyait a Monin-Obukhov elmélet alapján paraméterezték, amely nagyon érzékeny megközelítést

tesz lehetővé elsősorban a vertikális áramlási rendszerek vizsgálatánál (*Bornstein and Robock, 1976*). Ennek a modellnek a fejlesztése és 3 dimenziós adaptálása is megtörtént St. Louis városára (*Vukovich et al., 1976*).

Napjainkban már a mezoskálájú modellek részét képezik a városi határréteg (UCL) valamilyen reprezentációi, ezért a helyi sajátosságok figyelembe vétele is lehetővé válik. Az így megszerkesztett modellekkel az előrejelzések térben és időben is pontosabbá tehetők. Ennek a törekvésnek egy jó példája, amikor a numerikus modellbe beágyazva megjelenik a városi talaj és felszín finomabb felbontású reprezentációja (modellje) és a két rendszert csatolják (*Thielen and Troude, 2001*).

Rendkívül fontos momentum ezekben a modellekben a városi talajfelszín és a légkör közötti kölcsönhatások megvalósítása, azaz a városi tetőszint sugárzási egyenlegének meghatározása 3 dimenziós környezetben (városi tetőszinti modellek, urban canopy models, UCM). Ezekben a modellekben a következő rendező elvek érvényesülnek:

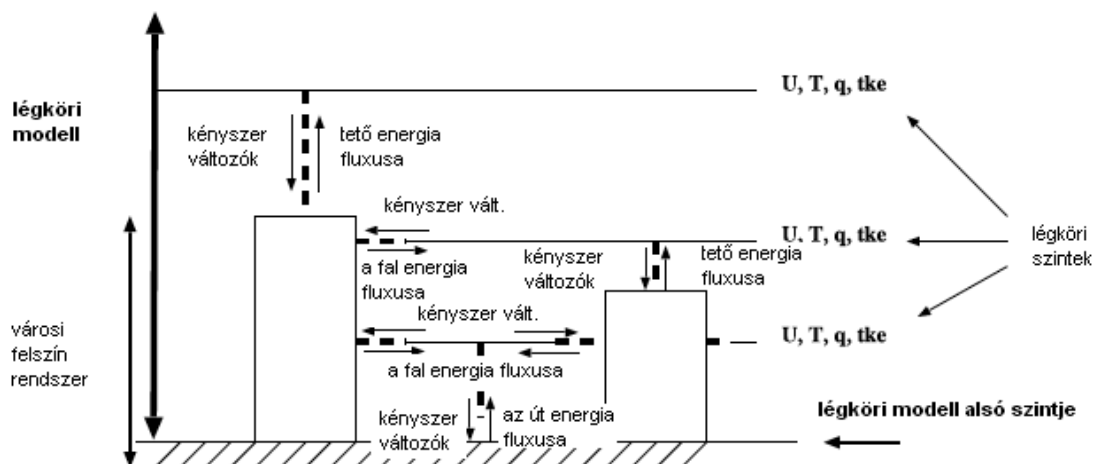
- Az épületek 3D-ban jelennek meg
- A városi szintben a falak, utak és tetők elkülönült energiaháztartással rendelkeznek
- A sugárzási kölcsönhatások az utak és a falak között explicit módon vannak megjelenítve



3.2. ábra. Vázlatos kép az egyrétegű városi felszín rendszerről. **U**: szélesség; **T**: hőmérséklet; **q**: légnedvesség; **tke**: turbulens kinetikus energia. A kölcsönhatásokat a vastag szaggatott vonalak jelzik (*Masson, 2006 nyomán*)

A városi tetőszinti modellekben (UCL) az egyszerűbb megközelítés során a légköri modell alsó szintje megegyezik a városi tetőszinttel, így jutunk az egyrétegű városi felszín rendszerhez (single-layer urban surface scheme) (3.2. ábra). Ebben az esetben minden felszín ugyanazzal az egy légköri szinttel van kölcsönhatásban, amelyikben elhelyezkedik, így jelentős egyszerűsödéssel számolhatunk, de a tetőszint alatti rétegben a levegő fizikai állapotjelzőit specifikálni kell. Pl. a logaritmikus szélprofil használható a városi tetőszintig, de lejjebb, az utcák alkotta szélcsatornáknakban (kanyonokban) már az exponenciális szélprofilot kell alkalmazni (Masson, 2006). Bonyolultabb kapcsolatrendszert hivatott ábrázolni a többrétegű városi felszín rendszer (multi-layer urban surface scheme), melynek sematikus szerkezetét a 3.3. ábrán láthatjuk.

Itt már figyelembe kell venni a sűrűdés hatását a különböző szinteken elhelyezkedő épületek miatt (városi érdesség, felületi inhomogenitás). A felszíni energia egyenlegeket az adott felületekre kiszámítjuk, de a levegő fizikai tulajdonságai már függnék a tetőszintek és a légkör adott szintjei közötti kölcsönhatásoktól (Masson, 2006). Pl. jól megfigyelhető,



3.3. ábra. Vázlatos kép a többrétegű városi felszín rendszerről. U : szélesség; T : hőmérséklet; q : légnedvesség; tke : turbulens kinetikus energia. A kölcsönhatásokat a vastag szaggatott vonalak jelzik (Masson, 2006 nyomán)

hogy a 3.3. ábrán látható nagyobb épület falfelülete az alsó és a középső légköri szintnek is ad át energiát, míg a teteje csak a legfelső szinttel van kölcsönhatásban.

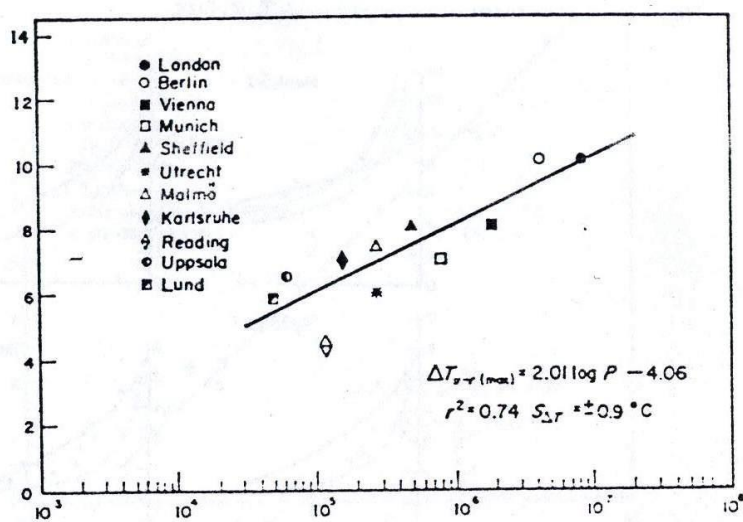
A városi hősziget modellezésének alapvetően más módja, amikor a területről rendelkezésre álló - különféle paraméterre vonatkozó - mérési adatokban fellelhető kapcsolatok alapján becsüljük a hőmérséklet eloszlását. Az adatokból különféle statisztikus

eljárásokkal nyerhetjük ki a számunkra fontos információt, összefüggéseket, így ezt a módszert *statisztikus modellezésnek* nevezzük.

A külföldi és a hazai szakirodalomban fellelhetőek az UHI intenzitás becslésére különféle statisztikus modellek, melyek sokféle meteorológiai vagy felszíni paramétert használnak.

Az első statisztikus becslést a városi hőtöbbletre vonatkozóan Sundborg munkájában találjuk, aki meteorológiai paraméterek – felhőzet mennyisége és helyi szélsebesség - segítségével modellezte Uppsala város UHI intenzitás értékét. Eredményei azt mutatják, hogy a városi hősziget-intenzitása a szélsebességgel fordítottan arányos, a borultság növekedésével pedig egyenes arányban csökken (Sundborg, 1950).

Ezt a munkát is felhasználva, Oke (1973) általános összefüggést talált az UHI intenzitás, a szélsebesség és a városban lakó emberek száma között. Dolgozatában bemutatta tíz város mérési eredményei alapján, hogy a helyi szélsebesség jó közelítéssel fordítottan arányos a hőtöbblettel és kidolgozta híres összefüggését, melynek segítségével becsülhetjük az UHI intenzitás maximális értékét pusztán a lakosság számának ismeretében (3.4. ábra).



3.4 ábra Összefüggés a maximális hősziget-intenzitás és a városi lélekszám között az európai települések esetén. Függőleges tengelyen a maximális hősziget-intenzitás értékei °C-ban, a vízszintes pedig a lélekszám van feltüntetve (Oke, 1973).

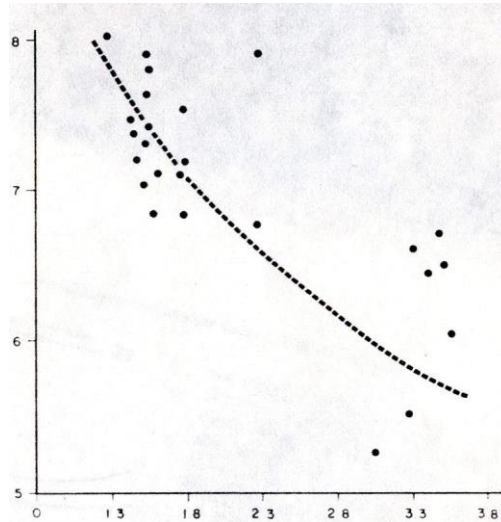
Az általa kapott általánosan érvényes statisztikai összefüggés a következő:

$$\Delta T_{u-r} = P^{0,27}/4,04u^{-0,56}$$

ahol ΔT_{u-r} az UHI intenzitás értéke, P a lakosság lélekszáma és u a helyi szélsebesség, illetve csak az európai városokra vonatkozó egyenlet:

$$\Delta T_{u-r(max)} = 2,01 \log(P) - 4,06$$

ahol, $\Delta T_{u-r(max)}$ az UHI intenzitás maximális értéke és P a lakosság lélekszáma (Oke, 1973).



3.5 ábra összefüggés az átlagos szélesebesség és az átlagos hősziget-intenzitás között Calgary-ban. Függőleges tengelyen az átlagos hősziget-intenzitás értékei °C-ban, a vízszintesen pedig az átlagos szélesebesség m/s-ban van feltüntetve (Nkemdirim and Truch, 1978).

Rendkívül alaposan és sok szempontból vizsgálták Calgary (51N, 114W) város hősziget-intenzitásának időbeli menetét az 1978-ban megjelent cikkükben Nkemdirim és Truch. Modelljükben hat paraméter szerepelt, melyek közül a városi szélesebesség (u), a felhőzet mennyisége (C), a légköri stabilitást reprezentáló hőmérsékleti gradiens (A_s) és a repülőtéren mért hőmérséklet (T_A) meteorológiai prediktor, míg a forgalom sűrűsége (P) és az antropogén hőveszteség mértéke (S) már más jellegű mennyiségek. A beléptetési többváltozós lineáris regressziós módszerrel (Stepwise Linear Regression, SLR) dolgoztak, így határozva meg a prediktorok fontossági sorrendjét a modellben. Azt találták, hogy a legerősebb hatást a szélesebesség gyakorolja az UHI intenzitásra és az összes többi paraméter már csak keveset ad hozzá a becslés pontosságához, aminek oka az erős keresztkorrelációt okozó prediktorok közötti függőség (3.5. ábra). Összességében a teljes 24 órára szóló becslésnél a megmagyarázott variancia 87% volt és a kapott regressziós egyenlet a következő:

$$\Delta T = 7,016 + 0,43S + 0,08P - 0,20u - 0,03C - 0,23A_s - 0,24T_A$$

ahol ΔT az UHI intenzitás értéke, a többi prediktor pedig a fentebb már jelzett azonosító kóddal van megadva (Nkemdirim and Truch, 1978).

További vizsgálatok eredményei is mutattak statisztikus összefüggést az UHI intenzitás és a területhasznosítási típusok és népesség (Park, 1986), a rövidhullámú besugárzás, a szélesebbesség valamint a felhőzet mennyisége (Chow et al., 1994), a felhőzet mennyisége, a szélesebbesség és a légnyomás alapján (Moreno-Garcia, 1994) Barcelonára vonatkozóan illetve a szélesebbesség és felhőzet között Melbourne-ben (Morris et al., 2001).

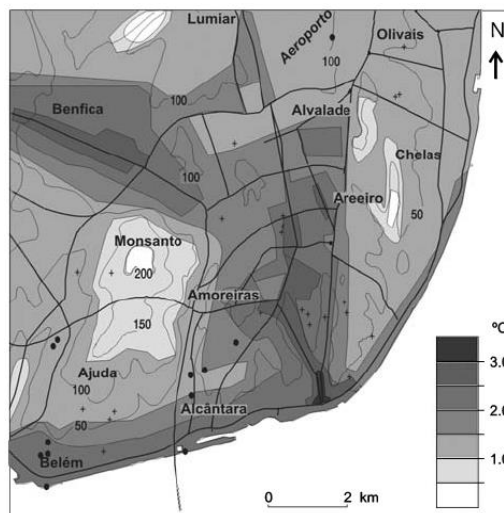
Az 1990-es évektől kezdve előtérbe került a városok statikus (beépítettséget, geometriát, alakot, épülettömeget, környező domborzatot stb. reprezentáló) paramétereinek, mint prediktoroknak az alkalmazása a statisztikus modellekben. Egy 1996-ban megjelent munkában a beépítettségi arány, magasság, szélesebbesség, idő, hőmérsékleti amplitudó alapján sztochasztikus elven modellezték egy keskeny völgyben elhelyezkedő város hőmérsékleti többletét (Kuttler et al., 1996).

Az elmúlt években is történtek vizsgálatok a beépítettségi faktorok és az UHI intenzitás közötti kapcsolatok feltárására statisztikus úton. Jó példa erre a brazil Belo Horizonte város hőmérsékleti többletének lineáris becslése az égbolt-láthatósági faktor és az épülettömeg segítségével (Goncalves et al., 2003), valamint Marseille esetében hasonló típusú regressziós egyenletek kerültek meghatározásra az épületsűrűség, épületmagasság-utcaszélesség arány, épületmagasság, épület térfogat és kerület, valamint az épületek északra néző felszínének nagysága segítségével (Long et al., 2003).

Rendkívül alapos és sok városi valamint meteorológiai prediktort alkalmazó statisztikus megközelítést láthatunk Hong Kong hőszigetének vizsgálatánál (Giridharam et al., 2005). Munkájukban igen specifikus városi paramétereket alkalmaztak, pl. üvegezett felszín-teljes felület arány, magasság-alapterület arány, felszíni albedó, zöld terület aránya 30 méteren belül, tengertől való távolság, égbolt-láthatósági faktor, szélesebbesség, magasság, globálsugárzás és beépített terület aránya. Három városi mérőhelyen végeztek méréseket különböző, a hősziget kifejlődése szempontjából kedvező meteorológiai helyzetekben. A többváltozós lineáris regressziós módszert alkalmazva kimutatták, hogy az említett paraméterek közül a legerősebb hatása a hősziget erősségére a tengertől való távolságnak, a globálsugárzásnak, a zöld területek arányának, a szélesebbességnek és az égbolt-láthatósági indexnek van.

Alcoforado and Andrade (2007) Lisszabon hőszigetének területi eloszlását vizsgálva megállapították, hogy az évi átlagos UHI intenzitás 2,5 °C volt a mérési időszakban, a maximálisan előforduló érték, pedig 4,0 °C fok volt. A beléptetési lineáris regressziós eljárást (SLRM) alkalmazva és felhasználva a városi beépítettségi, valamint néhány földrajzi paramétert megállapították, hogy a beépítettség, az égbolt-láthatósági faktor, az

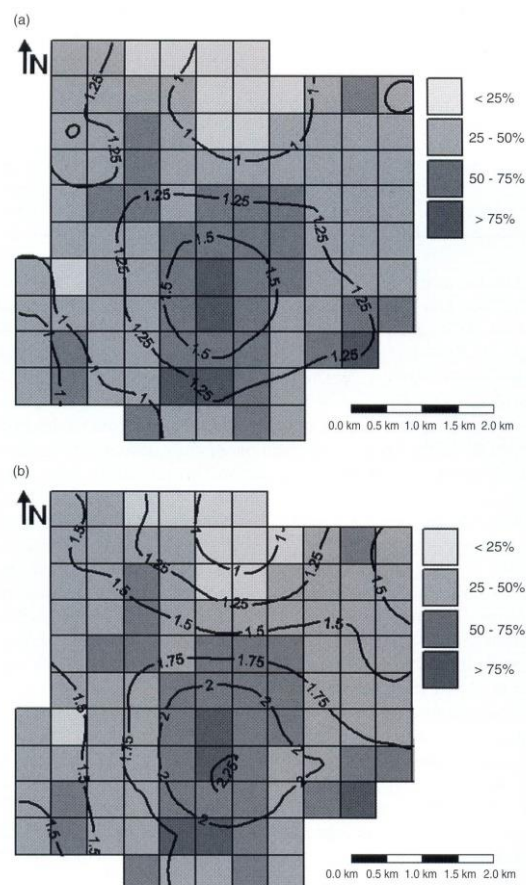
épületmagasság mellett a tengerszint feletti magasság és a Tagus folyótól mért távolság is jelentősen befolyásolja a hősziget kialakulását. Majd bővítve a prediktorok számát (távolság a fő útvonalaktól, utca irányultság) becslést adtak különböző meteorológiai helyzetben a hősziget területi eloszlására. A geometriai paraméterek és a fő útvonalaktól való távolság 74%-ban magyarázta a hőmérsékleti mező eloszlását. A modell alapján készített UHI intenzitás eloszlást láthatjuk egy téli, szélcsendes, derült napon a 3.6. ábrán. Jól megfigyelhető, hogy a magasabban fekvő és egyben kevésbé beépített területek hidegebbek.



3.6. ábra. Lisszabon város UHI intenzitásának területi eloszlása egy téli, szélcsendes, derült napon a modell alapján. A hőmérsékleti értékek referencia helye a repülőtér. (Alcoforado és Andrade, 2007)

A városi hősziget statisztikus modellezésével a Szegedi Egyetem Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszékén foglalkoztunk kollégáimmal az elmúlt közel tíz évben. Két hosszabb időszakot lefedő expedíciós jellegű mobil mérőssorozat adatai alapján, valamint különböző városi statikus paraméterek felhasználásával (városközponttól mért távolság és beépítettség arány illetve beépítettség arány, égbolt-láthatósági index, épületmagasság, vízfelszín arány) készítettünk becslést az átlagos maximális hősziget-intenzitás területi eloszlására Szeged vonatkozásában (Unger et al., 2000; Unger et al., 2001; Bottyán és Unger, 2001; Bottyán and Unger, 2002; Bottyán and Unger, 2003; Bottyán et al., 2003; Unger et al., 2004). Vizsgálatunk igazolta a statikus paraméterek fontos szerepét a hőtöbblet kialakításában és térbeli megjelenésében. Mind a **fűtési** (október 16-április 14) mind, pedig a **nem-fűtési félévekben** (április 16-október 15) elmondható, hogy a hőmérsékleti többlet megjelenéséért a városi geometria, és annak térbeli struktúrája alapvetően felelős. Vizsgálatunkba bekapcsolódott a Debreceni Egyetem Meteorológiai

Tanszéke is, így egy közös, szegedi és debreceni egyidejű méréssorozat adatai alapján lehetőségünk nyílt a két alföldi város hőszigetének összehasonlítására és statisztikus modellezésére. Mindkét város esetében a hősziget statisztikus becslését a beépítettségi arány felhasználásával végeztük el, de a paraméterezésnél speciális módon figyelembe vettük a vizsgált terület beépítettségét a távolság függvényében. Ezután a már említett FSMLR módszerrel előállítottuk a modell egyenleteket, majd ábrázoltuk az UHI intenzitás területi eloszlását mindkét városban, mindkét félévben (fűtési, nem-fűtési félév). Ahogy a 3.7. ábrán látható, a becsült átlagos maximális hősziget-intenzitást mutató izotermák futása rendkívül jól követi a beépítettségi értékek térbeli eloszlását, mutatva, hogy a modell jól reprezentálja a város geometriai, szerkezeti és anyagi tulajdonságainak fontos hatását, melyek alapvetően felelősek a hőtöbblet területi eloszlásáért (Bottyán *et al.*, 2004; Bottyán *et al.*, 2005).



3.7. ábra A modell által jelzett maximális UHI intenzitás(°C) és a beépítettségi arány (%) területi eloszlása Debrecenben: **(a)** fűtési félév; **(b)** nem-fűtési félév

A 3.1. táblázatban a városi hősziget statisztikus modellezésével foglalkozó – általam fontosnak tartott – tanulmányokat összefoglalva mutatom be, a könnyebb áttekinthetőség kedvéért.

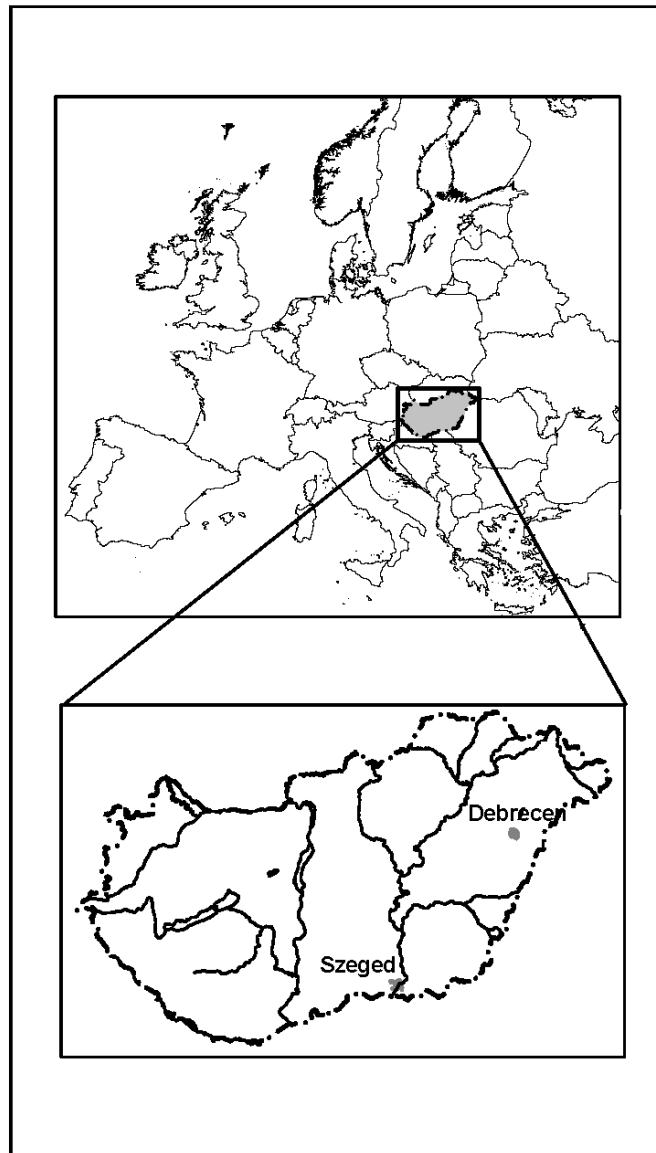
3.1. táblázat A városi hősziget (UHI) intenzitás statisztikus modellezésének egyes megközelítései

Modellezett változó	Alkalmazott prediktorok	Hivatkozások
UHI intenzitás	Szélesség, felhőzet	<i>Sundborg (1950)</i>
UHI intenzitás	Lakosság, szélesség	<i>Oke (1973)</i>
Max. UHI intenzitás	Lakosság	<i>Oke (1973)</i>
UHI intenzitás	Szélesség, felhőzet, légköri stabilitás, forgalom mennyisége, hőmérséklet, antropogén hővesztés	<i>Nkemdirim és Truch (1978)</i>
UHI intenzitás	Szélesség, területhasznosítási típusok	<i>Park (1986)</i>
UHI intenzitás	Szélesség, felhőzet, légnyomás	<i>Moreno-Garcia (1994)</i>
UHI intenzitás	Rövidhullámú besugárzás, szélesség, felhőzet	<i>Chow (1994)</i>
UHI intenzitás	Beépítettségi arány, magasság, szélesség, idő, hőmérsékleti amplitudó	<i>Kuttler et al. (1996)</i>
UHI intenzitás	Városközponttól való távolság, beépítettségi arány	<i>Unger et al. (2000)</i>
UHI intenzitás	Szélesség, felhőzet	<i>Morris et al. (2001)</i>
UHI intenzitás	Beépítettségi arány, égbolt-láthatósági index, épületmagasság, vízfelszín arány	<i>Bottyán és Unger (2003)</i>
UHI intenzitás	Égbolt-láthatósági index, épülettömeg	<i>Gonclaves et al. (2003)</i>
UHI intenzitás	Épületsűrűség, H/W arány, épületmagasság, épület térfogat és terület, épületek északi felszínének nagysága	<i>Long et al. (2003)</i>
UHI intenzitás	Beépítettségi arány	<i>Bottyán et al. (2005)</i>
UHI intenzitás	Beép. arány, égbolt-láthatósági index, épületmagass., tengersz. feletti magasság, folyótól mért távolság, utca irányultság	<i>Alcoforado és Andrade (2007)</i>

4. AZ ALFÖLDI RÉGIÓ FÖLDRAJZI ÉS ÉGHAJLATI SAJÁTOSSÁGAI

4.1. Szeged és Debrecen földrajzi fekvése

Szeged és Debrecen Európa közepén, a Kárpát-medence belsejében, az Alföld sík – orográfiai hatásoktól mentes - területén fekszik, nagy távolságra a klimatikus szempontból fontos szerepet játszó tengerektől (4.1.1. ábra).



4.1.1 ábra Szeged és Debrecen elhelyezkedése az európai kontinensen és Magyarországon

Szeged környezete természeti földrajzi szempontból az Alsó-Tiszavidékhez tartozik (Frisnyák et al., 1978). Magyarország legalacsonyabban fekvő régiójáról van szó, tengerszint feletti magassága alig változik, átlagosan mintegy 80 m körül van. A vidék

felszínén – néhány pleisztocén löszhalomtól eltekintve – holocén üledékek (folyóvízi homok, iszapos homok, agyagos iszap és réti agyag) a jellemzőek. A Tisza alacsony- és magas árterei jól elkülönülnek (*Mezősi*, 1983). A tájképi sajátosságokat az álló- és folyóvízi, valamint az eolikus formák adják, így például az alluviális síkságból eróziós peremmel emelkednek ki a löszhalmok. Az ősi növényzet maradványait a folyók menti ligeterdők, valamint a morotvák hínár- és mocsárvegetációi képviselik. Viszonylag nagy területeket foglalnak el a szikesek és a mocsárrétek. A talajok közül a réti öntéstalaj és a réti csernozjom a leggyakoribbak (*Keveiné Bárány*, 1988).

Debrecen a Hajdúhát magas löszplatójának déli peremén fekszik, a Hajdúhátba bevágódó Tócsó-ér völgye határolja a várost nyugatról, melynek tengerszint feletti magassága mintegy 120 méter. A várost nem szeli át folyóvíz, és a környékén sincs jelentősebb vízfelület. Alapvetően – hasonlóan Szegedhez – itt is az eolikus formák uralják környezetének formakincsét, melyek nem okoznak nagy inhomogenitást a felszín alakjában, így Debrecen földrajzi értelemben homogénebb képet mutat, mint Szeged. A Nyírség és a Hajdúhát a humuszban gazdag csernozjom és homoktalajok találkozási pontja (ez a város főutcájának vonalában fekszik), ettől keletre homok, nyugatra magas agyagtartalmú csernozjom az uralkodó talaj. A várostól délre, délnyugatra megjelennek a réti és a vízhatás alatt álló talajok, a szikesek is.

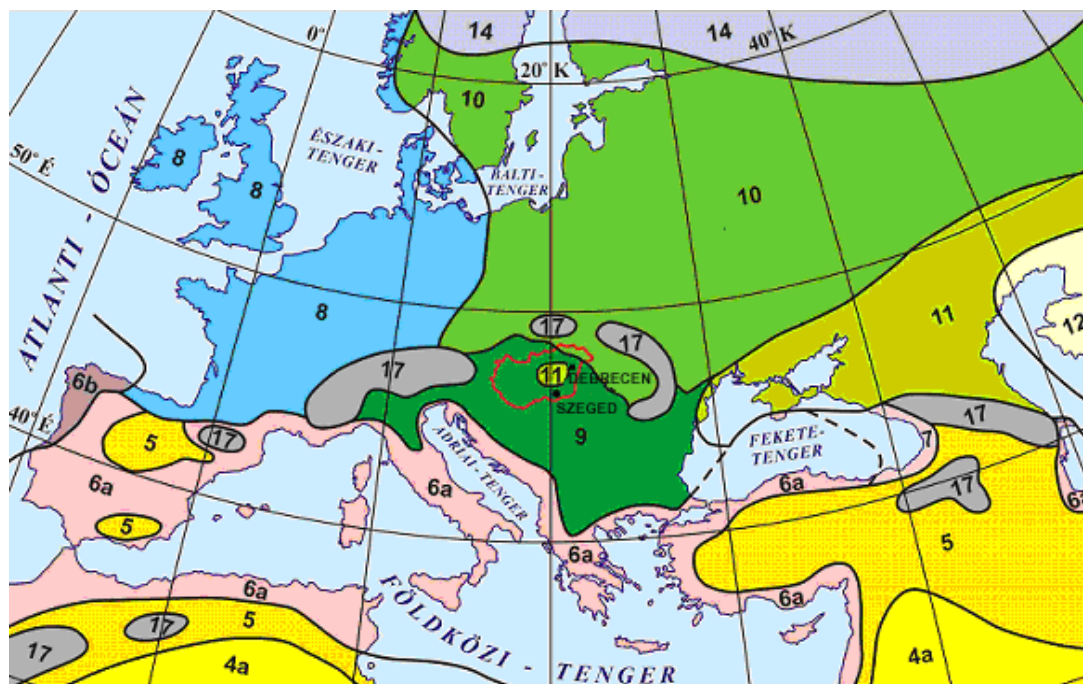
Hasonló éghajlatuk, földrajzi környezetük, méretük teszi alkalmassá e két várost a városi éghajlat hőmérsékleti mezejének egyidejű tanulmányozására és általános összefüggések megállapítására.

4.2. A két város éghajlatának jellemző vonásai

A két nagy globális klímaosztályozás szerint mindkét város a Köppen féle *Cf* (meleg-mérsékelt éghajlat, egyenletes évi csapadékeloszlással), illetve a *Trewartha*-féle *D.1* (kontinentális éghajlat, hosszabb meleg évszakkal) klímaövezetbe tartozik. *Péczeley* (1984) ez utóbbit a valóságos éghajlati viszonyok még jobb megközelítése érdekében módosította (4.2.1. ábra).

Az országon belüli finomabb körzetekre bontáshoz más osztályozási módszert kell alkalmazni, amit a víz- és energiaellátottság különbözőségeinek figyelembevételével lehet megoldani (*Péczeley*, 1979).

A vízellátottság mérésére a



4.2.1. ábra Európa éghajlati övezetei a módosított Trewartha-féle felosztás szerint: **(4a)** zonális sivatag; **(5)** szubtrópusi sztyepp éghajlat; **(6a)** meleg nyarú mediterrán éghajlat; **(6b)** hűvös nyarú mediterrán éghajlat; **(7)** csapadékos nyarú szubtrópusi éghajlat; **(8)** enyhe telű óceáni éghajlat; **(9)** nedves kontinentális éghajlat hosszabb meleg évszakkal; **(10)** nedves kontinentális éghajlat rövidebb meleg évszakkal és hideg téllal; **(11)** mérsékelt övi sztyepp éghajlat; **(12)** mérsékelt övi sivatagi éghajlat; **(14)** szárazföldi szubpoláris éghajlat; **(17)** hegyvidéki éghajlat (Péczely, 1984; Sümeghy, 2004)

$$H = Q^*/L \cdot p$$

ariditási index alkalmas, ahol Q^* – a sugárzási mérleg ($\text{MJm}^{-2}\text{év}^{-1}$), L – a párolgási hő (MJkg^{-1}) és p – a csapadék (mm). Ha a sugárzási mérleg országon belüli igen kis mértékű változásától eltekintünk, akkor az egységesen elfogadható értéket ($1760 \text{ MJm}^{-2}\text{év}^{-1}$) figyelembe véve a

$$H = 1760/2,5 \cdot p$$

kifejezés adódik, amelybe csak a csapadék évi összegét kell behelyettesíteni az ariditási index (H) kiszámításához. Az éghajlati körzetek kijelölésénél a következő fokozatokat alkalmazzák:

nedves	–	$H < 0,85$
mérsékeltlen nedves	–	$0,85 < H < 1,00$
mérsékeltlen száraz	–	$1,00 < H < 1,15$
száraz	–	$1,15 < H$

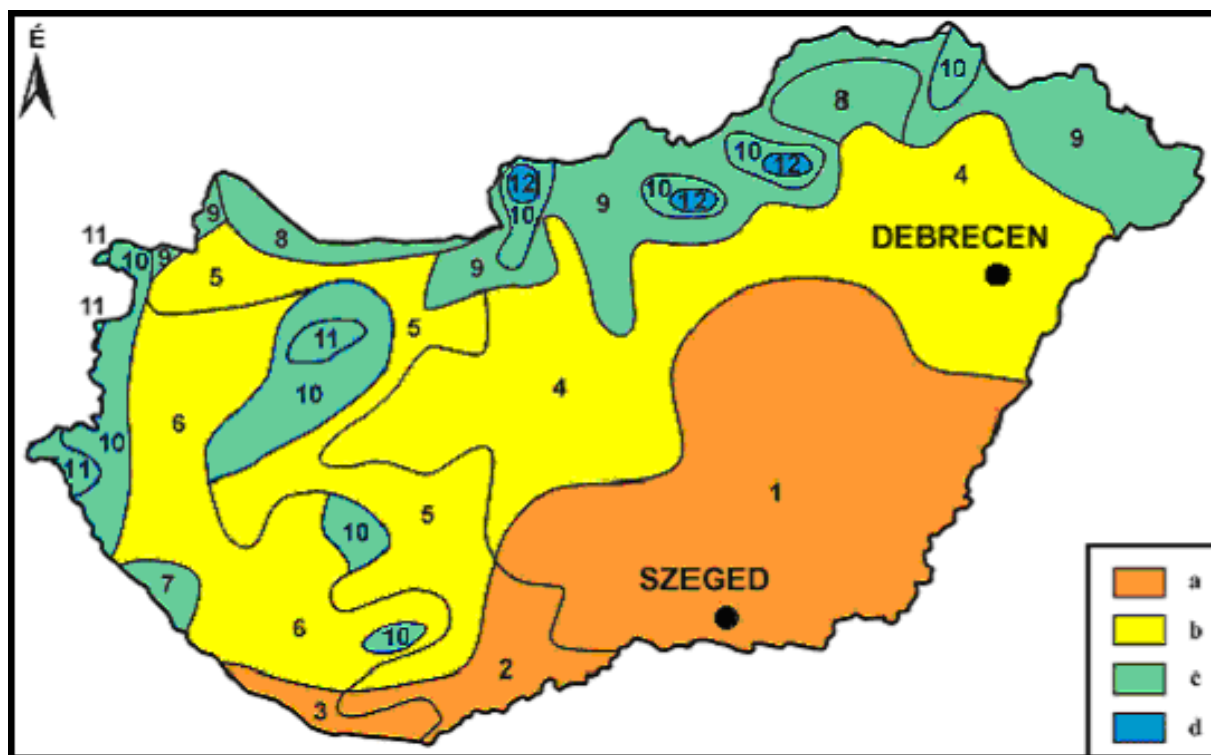
Az energia- vagy hőtényezőt a vegetációs időszak (április-szeptember) átlagos hőmérséklete (t_v) alapján lehet mérlegelni. Itt a kategóriák a következők:

hűvös	–	$t_v < 15,0^{\circ}\text{C}$
mérsékeltlen hűvös	–	$15,0^{\circ}\text{C} < t_v < 16,5^{\circ}\text{C}$
mérsékeltlen meleg	–	$16,5^{\circ}\text{C} < t_v < 17,5^{\circ}\text{C}$
meleg	–	$17,5^{\circ}\text{C} < t_v$

A két tényező elméletileg lehetséges 16 kombinációjából (éghajlati körzet) 12 realizálódik hazánk területén. Ezek a 4.2.1. táblázatban láthatóak.

4.2.1. táblázat Magyarország éghajlati típusai (Péczeley, 1979)

1. meleg – száraz	2. meleg – mérsékeltlen száraz
3. meleg – mérsékeltlen nedves	4. mérsékeltlen meleg – száraz
5. mérsékeltlen meleg – mérsékeltlen száraz	6. mérsékeltlen meleg – mérsékeltlen nedves
7. mérsékeltlen meleg – nedves	8. mérsékeltlen hűvös – nedves
9. mérsékeltlen hűvös – száraz	10. mérsékeltlen hűvös – mérsékeltlen száraz
11. mérsékeltlen hűvös – mérsékeltlen nedves	12. hűvös – nedves



4.2.2. ábra Magyarország éghajlati körzetei: (a) meleg: (1) meleg – száraz, (2) meleg – mérsékeltlen száraz, (3) meleg – mérsékeltlen nedves; (b) mérsékeltlen meleg: (4) mérsékeltlen meleg – száraz, (5) mérsékeltlen meleg – mérsékeltlen száraz, (6) mérsékeltlen meleg – mérsékeltlen nedves, (7) mérsékeltlen meleg – nedves; (c) mérsékeltlen hűvös: (8) mérsékeltlen hűvös – nedves, (9) mérsékeltlen hűvös – száraz, (10) mérsékeltlen hűvös – mérsékeltlen száraz, (11) mérsékeltlen hűvös – mérsékeltlen nedves; (d) hűvös: (12) hűvös – nedves (Péczeley, 1979)

A körzetek földrajzi elhelyezkedésére az a jellemző, hogy az ország legnagyobb részén, főleg az alföldi területeken meleg – száraz és mérsékelt meleg – száraz éghajlat uralkodik (4.2.2. ábra). Szegedre és környékére határozottan a meleg – száraz klíma jellemző, míg Debrecen a mérsékelt meleg – száraz éghajlati osztályba sorolhatjuk. Mindkét városban a nyár meleg, bőséges a napfénytartam, viszonylag alacsony a páratartalom és a felhőzet mennyisége, télen általában kevés a hó, emiatt vékony a hótakaró. Debrecen némileg erősebb kontinentalitás jellemzi.

A könnyebb összehasonlítás végett a 4.2.2. táblázat tartalmazza a két város 1961 – 1990-es klímanormáit, amiből megállapítható, hogy éghajlati szempontból lényegében azonosnak tekinthető a két környezet, jóllehet néhány klimatikus paraméterben eltérés figyelhető meg.

Összességében elmondhatjuk, hogy Szeged és Debrecen környezete hasonló földrajzi és éghajlati adottságokkal rendelkezik, ami jól összehasonlíthatóvá teszi a két város által indukált városi hősziget területi eloszlását, valamint általános következtetések levonását is lehetővé teszi a hőmérsékleti többlet tulajdonságait illetően.

4.2.2. táblázat Szeged és Debrecen klímanormái (CLINO) 1961 – 1990 között

Éghajlati paraméter	Szeged	Debrecen
Évi középhőmérséklet (°C)	10,4	9,9
Évi közepes ingás (°C)	22,6	22,9
Januári középhőmérséklet (°C)	-1,8	-2,6
Júliusi középhőmérséklet (°C)	20,8	20,3
Évi csapadékösszeg (mm)	497	566
Évi átlagos szélsősebesség (m/s)	3,4	2,8
Napsütéses órák száma (óra)	2102	1982

5. A VIZSGÁLT TERÜLETEK LEHATÁROLÁSA ÉS AZ ADATGYŰJTÉS MÓDJAI

5.1. A mintavételi területek és összehasonlításuk

Szeged és Debrecen földrajzi elhelyezkedése (orográfiai zavaró tényezőktől mentes síkságon fekszenek), népességszámuk (kb. 160,000 lakos illetve 220,000 lakos) és a különböző városmorfológiai típusok fellelhetősége (sűrű beépítettségű belváros, nagy panelházak alkotta lakótelepek, ipari körzetek, családi házas kertvárosi övezetek, parkok zöldterületei, és a külterületek mezőgazdasági földterületei) különösen alkalmassá teszi e két várost arra, hogy egy viszonylag zavartalan városi klíma jellegzetességeit tanulmányozzuk.

Az 1999-ben indult szegedi és a 2002-ben kezdődött közös szegedi – debreceni városklíma projekt keretében a kutatások a települések közigazgatási területének belső részeire irányultak. A városi hősziget térképezésének és az eredmények megjelenítésének kiindulási alapjául az Egységes Országos Vetületben (EOV) készült Egységes Országos Térképrendszer (EOTR) 1:10.000 méretarányú földmérési-topográfiai térképei szolgáltak. Szegedet és közvetlen környezetét valamint Debrecent és környékét – így természetesen benne a vizsgált területet is – tehát az említett EOTR 1:10.000 méretarányú térképeinek kilométerhálózati vonalai alapján, 500 m oldalhosszúságú négyzet alakú cellákat (gridek) tartalmazó rácshálózattal fedtük le. A különböző cellák korrekt azonosítása érdekében, pedig az egyes cellákat speciális – és a későbbiekben a kutatás igényeinek megfelelően zökkenőmentesen bővíthető – számozással láttuk el (1., 2. melléklet), mely azonosítást az ábrákon nem jelölünk külön, hiszen csak technikai értelemben fontos az alkalmazásuk.

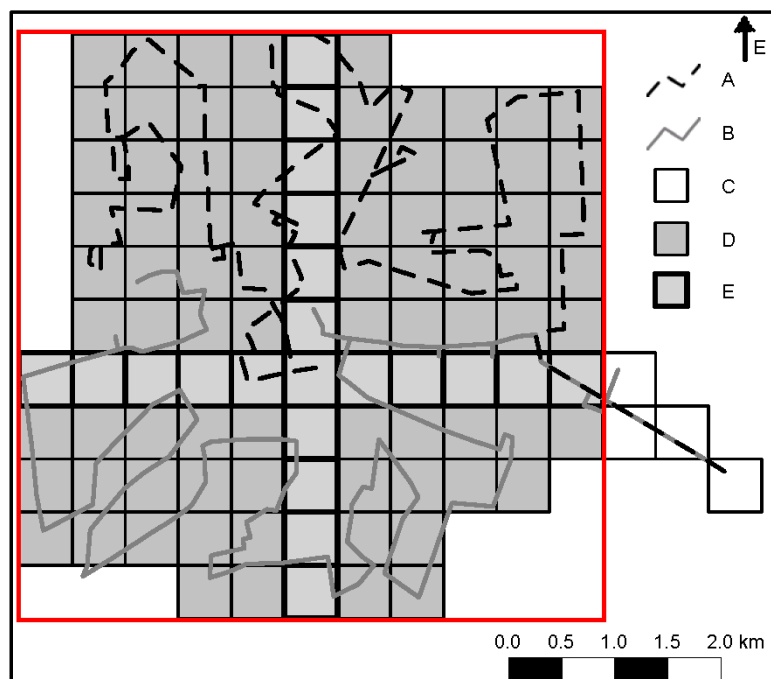
Ugyanilyen, 0,25 km² területű cellákat alkalmaztak korábban már több más városklíma-kutatásnál (pl. *Jendritzky and Nübler*, 1981; *Park*, 1986,), de hasonló cellamérettel találkozhatunk napjaink több más ilyen jellegű projektjében is (pl. *Lindberg et al.*, 2003; *Long et al.*, 2003).

Az általunk tanulmányozott terület Szegeden 107 négyzetből áll (azaz 26,75 km²-re terjed ki), mely Szeged városi és elővárosi negyedeit foglalja magában (5.1.1. ábra). Ugyanez a hálózat Debrecen esetében 105 cellát tartalmaz és a város 26,25 km²-ét fedi le, hasonló városrészeket reprezentálva, mint Szeged esetén (5.1.2 ábra). Az ezeken kívül eső részek már a városok tágabb értelemben vett külső környezetét alkotják és területükön már nem

jelentős a település éghajlat-módosító hatása. A vizsgált területhez tartoznak még azok a cellák (mindkét város esetében 4 cella), amelyek a kiindulási pontokat és a vizsgált területek határait kötik össze.



5.1.1 ábra Az adatgyűjtés területe és az alkalmazott 0,5x0,5 km-es négyzetháló, valamint (a) É-i terület, (b) D-i terület, (c) átfedési zóna, (d) É-i mérési útvonal, (e) D-i mérési útvonal és (f) a modellezéshez felhasznált terület határa Szegeden, valamint a mérési kezdőpont (R)



5.1.2 ábra A vizsgált terület Debrecenben (A)- a mérés útvonalának északi része (B)- a mérés útvonalának déli része (C)- az alkalmazott négyzethálózat (D)- a modellezéshez használt cellák (E)- a keresztmetszeti vizsgálatokhoz használt cellák. **Piros vonallal** a modellezéshez felhasznált terület határát jelöltük. Mérési kezdőpont a legkeletibb cellában volt.

Az eddig leírtakból következik, hogy mind a két város vonatkozásában ugyanolyan rácshálózatot alkalmaztunk, a vizsgált területek nagysága is lényegében megegyezik, ami célként került megfogalmazásra a mérések kezdetekor, a mérési eredmények későbbi összehasonlíthatóságának biztosítása céljából.

5.2. Az adatgyűjtés és az alkalmazott paraméterek meghatározása

5.2.1. A hőmérsékleti értékek mérése

A 2002. április és 2003. március közötti időszakban, a maximális UHI intenzitás vizsgálata egyidejűleg történt mindkét városban, és mérőkocsival gyűjtött adatokon alapult. (A 1999. – 2000. közötti időszakban csak Szegeden történt hasonló elven mérőssorozat.) A személygépkocsival végzett mobil mérést általános eljárásnak tekinthetjük bizonyos városklíma jellemzők detektálására, így kimondottan alkalmas a hőmérséklet mérésére is (pl. *Oke and Fuggle*, 1972; *Moreno-Garcia*, 1994; *Eliasson*, 1996; *Yamashita*, 1996; *Voogt and Oke*, 1997; *Klysik and Fortuniak*, 1999; *Comrie*, 2000; *Santos et al.*, 2003).

A cellák nagy száma és ebből következően a szükséges mérési útvonal hossza miatt célszerűnek látszott a területet két részre osztani mindkét város vonatkozásában. Szeged esetében az É-i szektor 54 négyzetből (13,5 km²), a D-i szektor pedig 53-ból (13,25 km²) áll (5.1.1. ábra). Debrecenben az É-i rész 49 (12,25 km²), míg a D-i szektor 56 (14,00 km²) négyzetet tartalmaz (5.1.2. ábra). Az útvonalak teljes bejárása egy-egy mérőautóval kb. 3-3 órát vett igénybe. Minden cella meglátogatása és a hőmérsékleti értékek egy időpontra vonatkozó átszámítása megkövetelte az ilyen hosszú idejű mérést és az ugyanazokon az útvonalakon való visszatérést.

Ahhoz, hogy kellő mennyiségű léghőmérsékleti adattal rendelkezünk a vizsgált területről és időszakból, a hónapok első, középső illetve utolsó harmadában végeztük a mobil méréseket. Az összesen Szegeden 35 illetve Debrecenben 32 alkalommal végrehajtott mérések (részletesen lásd az 3. mellékletben) biztosítják azt, hogy különböző időjárási helyzetekben (hulló csapadék kivételével természetesen) az UHI maximális kifejlődésének mértékéről részletes információkat kapjunk a teljes vizsgált területre nézve.

A nemzetközi szakirodalom (pl. *Oke*, 1988) és az ezzel a területtel foglalkozó korábbi szegedi kutatások (*Boruzs és Nagy*, 1999; *Unger és Sümeghy*, 2000) tapasztalatai

alapján az adatgyűjtést az adott útvonalak esetén úgy kellett időzíteni, hogy az UHI maximális kifejlődésének naplemente után 4 órával várható időpontja (a *referenciaidő*) előtt 1,5 órával kezdjük meg és utána 1,5 órával fejezzük be. A mért értékek átszámításánál felhasználtuk, hogy a hőmérséklet nagyjából lineárisan változott a mérés ideje alatt, azaz a naplementét követő órákban (Unger et al., 1999). Ennek az eljárásnak a helyességét külföldi vizsgálatok is alátámasztották, azzal a kiegészítéssel, hogy az eltérő hűlési gradiensek miatt ez csak hozzávetőlegesen igaz a külvárosi, elővárosi területekre (Oke and Maxwell, 1975).



5.2.1. ábra Az egyik mérőautó a rúdra szerelt hőmérsékleti szenzorral

Az észlelést végző mindkét mérőautó $0,01^{\circ}\text{C}$ -os érzékenységű, sugárzásvédelemmel ellátott automata hőmérsékleti szenzorral (LogIT HiTemp) volt felszerelve (5.2.1. ábra), amely az autók belsejében elhelyezett hordozható digitális LogIT SL adatgyűjtőkhöz (DCP Microdevelopments and SCC Research) kapcsolódott. A gyűjtők az adatokat 10 másodpercenként rögzítették, amely az autók átlagosan $20\text{--}30\text{ kmh}^{-1}$ -s sebességénél azt jelentette, hogy a mérési pontok között átlagosan 55-83 m volt a távolság a mérési útvonalak mentén. Természetesen a közlekedési viszonyok miatt nem lehetett mindig egyenletes sebességgel haladni, de a mérések késő esti órákban történő végzése miatti csekély forgalom nem bizonyult jelentős akadályozó tényezőnek. A feltétlenül szükséges megállások – pl. piros lámpa, sorompó – során rögzített adatokat értelemszerűen utólag töröltük az állományból. Az említett sebességtartomány pedig elegendő volt ahhoz, hogy

megfelelő szellőzést biztosítson a szenzor számára, s így az minden pillanatban valóban a környező levegő hőmérsékletét rögzítse. A szenzort 1,45 m magasan és 0,60 m-rel a kocsi eleje előtt helyeztük el egy rúdon (5.2.1. ábra), hogy a motorból és a kipufogóból származó hő hatása ne befolyásolja a mért értékeket – hasonlóan Ripley *et al.* (1996) Kanadában, Saskatoonban alkalmazott eljárásához.

Az összegyűjtött hőmérsékleti értékeket cellánként átlagoltuk és átszámítottuk az adott mérésre jellemző referenciaidőre, ami minden esetben a már említett, napnyugta utáni negyedik óra volt. A maximális abszolút UHI intenzitást, azaz a város és környezetének napi maximális hőmérsékleti különbségét (ΔT) a következőképpen értelmezhetjük cellánként:

$$\Delta T = T_{cella} - T_{cella(R)} \quad (^\circ C)$$

ahol T_{cella} az aktuális városi cella hőmérséklete, $T_{cella(R)}$ pedig a vidékinek tekintett – Szeged esetében a legnyugatibb (amelyben az OMSZ szegedi obszervatóriuma is található), Debrecenben, pedig a legkeletibb – cella hőmérséklete, (5.1.1. és 5.1.2. ábra).

A maximális UHI intenzitás mobil mérésekkel történő vizsgálata az említetteknek megfelelően nem 2002-ben, hanem 1999-ben kezdődött Szegeden, s az első észlelési kampány 1999. március és 2000. február között zajlott. Ennek területe és módszerei lényegében megegyeztek a fentiekben ismertetettekkel, ezért most csak az eltéréseket vázolom fel.

1999. március és 2000. február között a mérések kb. heti rendszerességgel történtek, s összesen 48 adatgyűjtés volt (részletesen lásd a 4. mellékletben). Ez azonban csak látszólag jelent több információt, ugyanis akkor még csak egy mérőautóval folyt a munka, ezért az egyik alkalommal kizárólag az É-i, másik alkalommal, pedig csak a D-i részt jártuk be. A mérési szektorok kiterjedése és az útvonalak hossza is eltért valamelyest a már bemutatottól: az É-i szektor 59 négyzetből ($14,75 \text{ km}^2$), a D-i szektor 60 ből (15 km^2) állt, s a folyamatos átmenet biztosítására (illetve a később tárgyalandó keresztmetszet menti mérések megalapozása érdekében) a kettő között egy 12 cellából (3 km^2) álló közös rész is szerepelt.

További különbség volt, hogy az első méréssorozatban az akkor még kevésbé korszerű kisebb gyűjtő az adatokat csak másfélszer ritkább (16 másodperces) időközönként tudta rögzíteni, amely az autó átlagos $20\text{--}30 \text{ kmh}^{-1}$ -s sebességénél azt jelentette, hogy a mérési pontok között átlagosan 89-133 m volt a távolság a mérési útvonalak mentén.

5.2.2. A beépítettségi arány meghatározása

A városi felszín fizikai – geometriai tulajdonságait többféle paraméterrel lehet jellemezni, melyek közül az egyik legfontosabb az ún. beépítettségi arány (B), mely egy adott gridcellára vonatkozóan a beépített területek %-os arányát mutatja az adott cella teljes területéhez viszonyítva. Ennek a városi felszíni paraméternek a meghatározása Szeged területére a SPOT műhold XS felvételének kiértékelésével, GIS módszerek kombinálásával, majd az ún. Normalizált Vegetációs Index (Normalised Vegetation Index – NDVI) számításával történt (Mucsi, 1996; Unger *et al.*, 2000). Az NDVI értékeit a pixelek értékeiből a következő egyenlet adja meg (Gallo and Owen, 1999):

$$NDVI = (IR - R) / (IR + R)$$

ahol IR – a pixel reflektancia értéke a közeli infravörös (0,72-1,1 μm) sávban és R – a pixel reflektancia értéke a vörös (0,58-0,68 μm) tartományban. Az NDVI értékek +1 és -1 között váltakoznak a zöldfelületek arányában: ha erdős vegetáció fedi a területet, akkor kb. 1, ha füves vegetáció, akkor 0,2-0,5 között van, ha pedig kopár sziklafelszín vagy aszfalt burkolat, akkor az érték -1 felé közelít. Így e mutató segítségével a zöldfelületeken kívül a beépített, a vízzel borított és az egyéb felszínek cellákon belüli arányát is el lehet különíteni. Debrecen esetében ugyan a kiindulási kép a LANDSAT TM műhold felvétele volt, de az alkalmazott eljárás megegyezik az előbb leírtakkal.

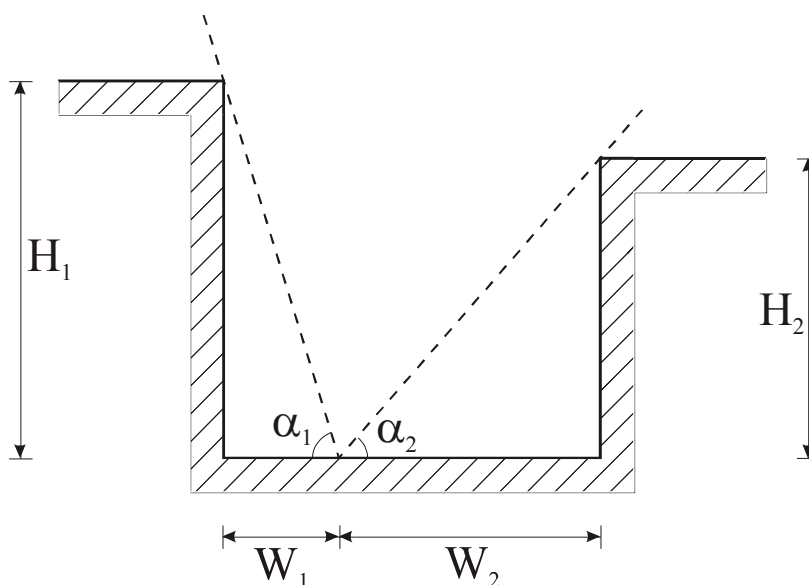
5.2.3. Az égboltláthatósági faktor mérése és számítása

A 2 dimenziós beépítettségi arány egymagában nyilvánvalóan nem reprezentálhatja pontosan a városi felszín tulajdonságait, hiszen pl. az épületek magassági kiterjedése okozta hatások figyelembe vételéhez 3 dimenziós paramétert kell származtatnunk. A városokban a szűk utcák és a magas épületek mély csatornákat (kanyonokat) alkotnak, melyek vertikális geometriája fontos szerepet játszik az UHI kifejlődésében és területi eloszlásában. Konkrétan a hőtranszportot és a hosszuhullámú kisugárzást csökkentő hatásról van szó, hiszen az érdesség növekedése a turbulencia gyengülésével, az épületek vertikális kiterjedése pedig az égbolt irányában korlátozott kisugárzási felülettel jár.

Munkánk során az égbolt városi felszínek feletti nyitottságának mennyiségi jellemzésére az ún. égboltláthatósági faktort (Sky View Factor, S) alkalmaztuk, melynek értéke teljes égbolt láthatóság esetén 1, míg – határesetben - teljes korlátozás mellett 0. Számos

megoldás ismeretes ennek a paraméternek meghatározására: teodolitos mérés segítségével (Szakály, 1962), halszemoptikával felszerelt fényképezőgéppel készített fényképek kiértékelésével (Oke, 1981; Barring et al., 1985; Park, 1987; Holmer et al., 1992), digitális kamerával, vagy automata tetőrétég analízátorral (Grimmond et al., 2001).

Vizsgálataink során Szeged városában teodolit segítségével mértük meg az S értékeit a következő módon. A mérési útvonal mentén 125 méterenként meghatároztuk azokat az α_1 és α_2 szögeket, amelyek az utca két oldalán lévő épületek legmagasabb pontjára vonatkozó emelkedési szögeket jelentik (5.2.3.1. ábra).



5.2.3.1. ábra Egy általános geometriájú utcakeresztmetszet a felszínen lévő mérési ponttal az égboltláthatósági faktor méréséhez

E szögek segítségével kiszámolhatóak a H_1 és H_2 magasságú határoló falak fal-láthatósági mutatói (wall view factor – WVF_1 és WVF_2), illetve ez utóbbi értékekből a teljes S érték a következő képletek felhasználásával (Oke, 1988):

$$WVF_1 = (1 - \cos \alpha_1) / 2 \quad \text{ahol } \alpha_1 = \tan^{-1}(H_1/W_1)$$

$$WVF_2 = (1 - \cos \alpha_2) / 2 \quad \text{ahol } \alpha_2 = \tan^{-1}(H_2/W_2)$$

$$S = 1 - (WVF_1 + WVF_2)$$

Összesen a város területén 532 mérési pontunk volt azon az útvonalon, melyen a hőmérsékleti adatok rögzítése is történt. Az egy négyzetben történt mérési értékekből előállított S értékeket átlagoltuk cellánként, tudva azt, hogy ezzel pontatlanságot indukálunk, de az adott nagyszámú mintavételezésből adódóan a kapott értékek jól közelítik a valóságot. Ahol az egyik mérési irányban park, növényzet vagy vízfelszín volt,

ott a mért szöget 0-nak tekintettük az adott irányban, mert a vegetáció okozta hatások miatt az S érték meghatározása problémás (Yamashita *et al.*, 1986). Meg kell jegyeznünk, hogy míg a korábban történt S meghatározások csak egy-egy város központi területére vagy bizonyos részeire terjedtek ki (Oke, 1981, 1988; Johnson, 1985; Yamashita *et al.*, 1986; Park, 1987; Eliasson, 1996; Grimmond *et al.*, 1991), Szeged esetében szinte az egész várost lefedő S értékekkel rendelkezünk!

5.2.4. Az épületmagasságok kalkulációja

Mivel különböző területhasznosítási típussal rendelkező területek (pl. szűk utcák alacsony épületekkel szemben széles utcák magas épületekkel) is rendelkezhetnek majdnem azonos S értékkel nyilvánvaló, hogy az S paraméter sem elegendő a város vertikális geometriai szerkezetének leírásához. Ezért fontos ismernünk a kanyonokat létrehozó épületeknek a függőleges méretét is.

Az S paraméter meghatározásához szükséges mérési adatok Szegeden (a korábban említett minden mérési pontban mért α_1 és α_2 szögeket) rendelkezésre álltak. Ezután meg kellett határoznunk a mérési talpponttól az utca mindkét széléig terjedő távolságokat (W_1 és W_2), melyek segítségével könnyen kiszámíthatóvá váltak az ún. falmagasságok, vagyis az utcák mentén levő épületek magasságai (H_1 és H_2). Figyelembe véve a teodolit 1,5 méteres magasságát az összefüggések (Bottyán and Unger, 2003):

$$H_1 = \operatorname{tg}(\alpha_1) \cdot W_1 + 1.5 \text{ m}$$

$$H_2 = \operatorname{tg}(\alpha_2) \cdot W_2 + 1.5 \text{ m}$$

Az utcák szélességeit Szeged légifotóinak felhasználásával határoztuk meg, melyeket digitalizálás után ortofotókká alakítottunk az ERDAS IMAGINE GIS szoftver segítségével. Ezeken a fotókon megjelölve a mérési pontokat, számíthatókká váltak a W_1 és W_2 távolságok, majd ezek után a tényleges épületmagasságok (H_1 és H_2) is. Mivel a légifotók nem teljesen fedték le a vizsgált területet, ezért a távolságok – és így az épületmagasságok – nem voltak meghatározhatóak a város 6 déli és 4 nyugati cellájában. Ebből adódóan a modellezéshez használt terület ezeket a cellákat nem fogja tartalmazni (Purnhauser és Zboray, 2000).

6. A VÁROSI HŐSZIGET ÉS A VIZSGÁLT BEÉPÍTETTSÉGI PARAMÉTEREK TERÜLETI ELOSZLÁSA SZEGEDEN ÉS DEBRECENBEN

6.1 Az átlagos maximális hősziget-intenzitás és a beépítettségi paraméterek területi eloszlása Szegeden

Tekintve, hogy az 1999. április és 2000. március közötti mérési sorozat alapján a markánsabb hősziget-intenzitásokat a **nem-fűtési félévben** mértük, a továbbiakban a hőszigetre vonatkozó megállapításokat ezen időszakra vonatkozóan tárgyaljuk. A jelzett időszakra szerkesztett átlagos maximális UHI koncentrikushoz közeli alakot mutat (6.1.1. ábra).

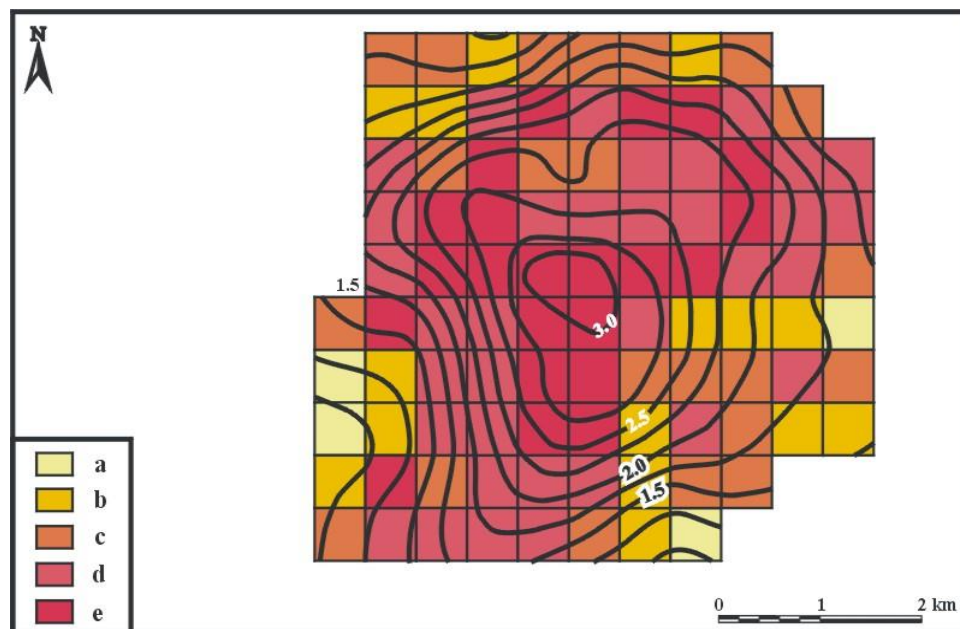


6.1.1. ábra Az átlagos maximális UHI területi eloszlása Szegeden a nem-fűtési félévben 1999-ben (Purnhauser és Zboray, 2000)

A város koncentrikus szerkezetéből adódóan a legmagasabb UHI érték a központi cellában található, melynek értéke $3,18^{\circ}\text{C}$ és a vizsgált terület 37%-át lefedő régióban kaptunk 2°C -nál magasabb hőmérsékletet. Meg kell jegyezni, hogy a **fűtési félévben** a maximális UHI érték szintén a középponti gridben volt $2,12^{\circ}\text{C}$ értékkel, de a 2°C -nál magasabb hőmérsékletet mutató cellák mindössze a vizsgált terület 2%-át tették ki (Unger et al., 2000).

Erősebb eltérések ettől a formától csak Szeged ÉK-i és ÉNy-i részein figyelhetők meg, amelyek egybeesnek a nagy panelépítésű lakótelepek területével. Péczely (1979) – valószínűleg még kevés adaton alapuló – megállapításával ellentétben az elsődleges hősziget nem helyeződött át ide a város centrumából. A hőmérsékleti gradiens legnagyobb értékei ($1,5-2,5^{\circ}\text{Ckm}^{-1}$) a hősziget É-i, DK-i és Ny-i részein mutatkoznak, amelynek az oka, hogy itt Szeged különféle szerkezeti-morfológiai típusai keskeny sávban, rendkívül gyorsan váltják egymást. Ebből adódóan ezek lesznek majd azok a régiók, melyek a modellezés során a legtöbb problémát okozzák ezzel a gyors térbeli változékonysággal. Megfigyelhető még az is, hogy a Tisza mentén az izotermák kissé „behúzódnak” a város belsőbb területei felé, azonban ez a hatás nem túl erős. Jól látható, hogy az izotermáknak az elméletben vázolt ideális alaktól eltérő futása hűen követi a város szerkezeti-morfológiai változásait, tehát a beépítettséggel szoros kapcsolatban alakul az UHI területi eloszlása.

Hogy jobban át tudjuk tekinteni a beépítettségi paraméterek és az UHI térbeli eloszlásának kapcsolatát, vizsgáljuk meg azokat az ábrákat, melyeken a statikus városi felszíni karakterisztikák és a - vizsgált időszak - nem-fűtési szezonra jellemző, átlagos maximális UHI intenzitás területi eloszlása együttesen van feltüntetve, Szeged vonatkozásában!



6.1.2. ábra A beépítettségi arány (a: 0-20%, b:20-40%, c:40-60%, d:60-80%, e:80-100%) és az átlagos maximális UHI ($^{\circ}\text{C}$) területi eloszlása Szegeden a nem-fűtési félévben (április 16-október 15), 1999-2000

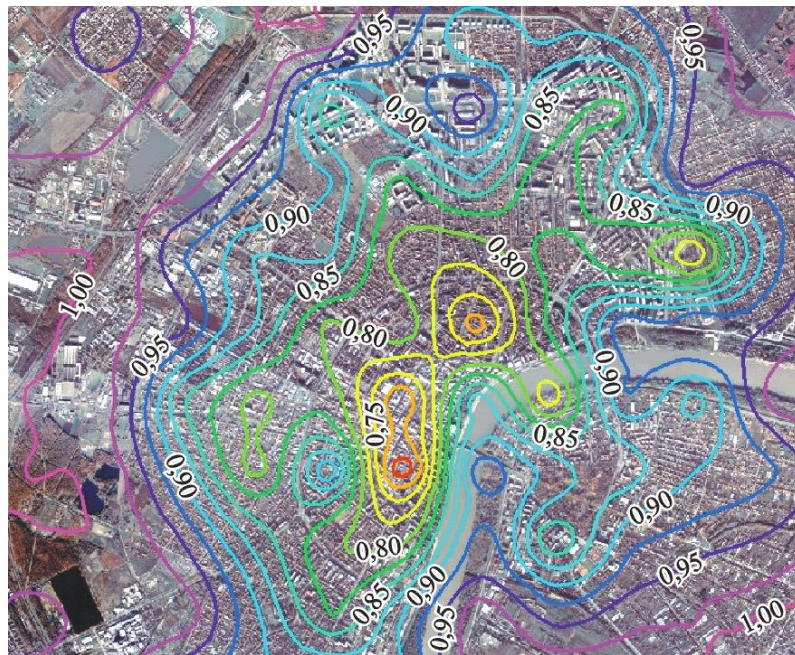
A 6.1.2. ábrán jól megfigyelhető, hogy a beépítettségi arány legkisebb előforduló értékei a vizsgált területen a Ny-i, a DK-i valamint a K-i peremterületeken jelentkeznek, melyek közül az utóbbiak a Tisza folyót és közvetlen parti területeit reprezentálják. A város Ny-i peremén elhelyezkedő területek alacsony beépítettsége az ott elhelyezkedő még jórészt beépítetlen területeknek, tavaknak és néhány ipari létesítménynek köszönhető. Az elméleti maximális beépítettségi arány (100%) egyik cellában sem található meg, azonban ahhoz közeli értékek nagy számban fordulnak elő, elsősorban a város középpontja közelében valamint az ÉK-i és ÉNy-i területeken megépült lakótelepek övezetében.

Ahogy korábban utaltunk már rá, Szeged a beépíttség szempontjából viszonylag koncentrikusnak tekinthető. Ahol ez a koncentrikusság megtörik, ott a hősziget szerkezetén is láthatjuk ennek nyomait. Erre példa a központi cellától ÉK-re és ÉNy-ra található két erősebb anomália, amely az izotermák megnyúlásában jelentkezik ezekben az irányokban. A beépíttség változása a terület Ny-DNy-i részén is hasonló következményekkel jár. Itt zöldterületek és tavak szakítják meg a városi felszínt, és ennek hatására az UHI gyengül, azaz az izotermák futása befelé görbül. A Tisza alacsony beépítettségű területe jól magyarázza a hőmérsékleti mező kismértékű megváltozását (6.1.2. ábra).

A vízborítás értékeinek területi szerkezetét illetően nem lehet általános következtetéseket levonni, ezért nem is vizsgáljuk részletesen. Ennek oka az, hogy cellánkénti átlagos értéke a terület egy jelentős részén nulla, vagy nullához közeli értéket vesz fel. Nyilvánvalóan a Tisza mentén lesz a vízborítás értéke a legmagasabb (akár 35-40%) és a mérési terület DNy-i részén található tavak is jelentősen növelik az adott cellák vízfelszín értékeit.

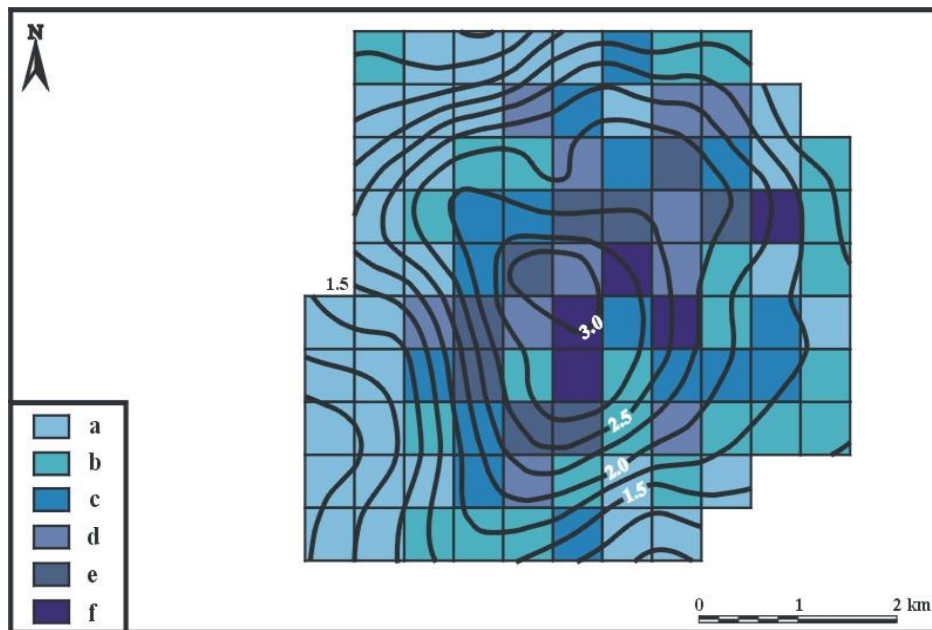
Azz égboltláthatósági faktor (S) értékei 1 és 0,668 között váltakoznak a vizsgált területen. Az 1-es érték azokra a (zöld vagy szabad) területekre vonatkozik, ahol az égbolt egésze látható. A 0,668-as érték annyit jelent, hogy az égbolt az adott cellában átlagosan 66,8%-ban látható, azaz a környező épületek az égbolt 33,2%-át kitakarják. Az égboltláthatóság értékeinek cellánkénti átlagait és a hősziget kapcsolatát szemléletesen a 6.1.3. ábra mutatja be. Az S értékek területi eloszlására kevésbé jellemző a koncentrikus elhelyezkedés, inkább szigetszerűen fordulnak elő az alacsony, illetve magas értékű területek. Magas égboltláthatósági értékkel jellemezhetőek a külterületi részek, vagy például a Tisza-part. Az alacsony S értékek a belvárosi, szűk utcákkal és viszonylag magas épületekkel jellemezhető részeken, illetve a centrumtól távolabb lévő magas panel-lakótelepeken fordulnak elő. Másfelől, a város peremén elhelyezkedő területek magas S értékkel rendelkeznek, hiszen ott a kisebb beépítés és a beépítés jellege miatt jóval

alacsonyabb az égbolt takarása, sőt sok esetben gyakorlatilag nulla a horizont korlátozás mértéke, azaz az S értékek 1-hez közel vannak.



6.1.3. ábra Az égboltláthatósági faktor (S) értékeinek területi eloszlása Szegeden (Purnhauser és Zboray, 2000)

Ennek megfelelően a belvárosi területek alacsony égboltláthatósági értékei az UHI intenzitás magas értékeivel társulnak. Az izotermák egyes „kiugrásai” (pl. a terület ÉK-i részén) összhangban vannak az S csökkenésével (6.1.4 ábra).



6.1.4. ábra Az égboltláthatósági faktor (**a**: 0,95-1,0; **b**: 0,90-0,95; **c**: 0,85-0,90; **d**: 0,80-0,85; **e**: 0,80-0,75; **f**: <0,75) és az átlagos maximális UHI (°C) területi eloszlása Szegeden a nem-fűtési félévben (április 16-október 15), 1999-2000



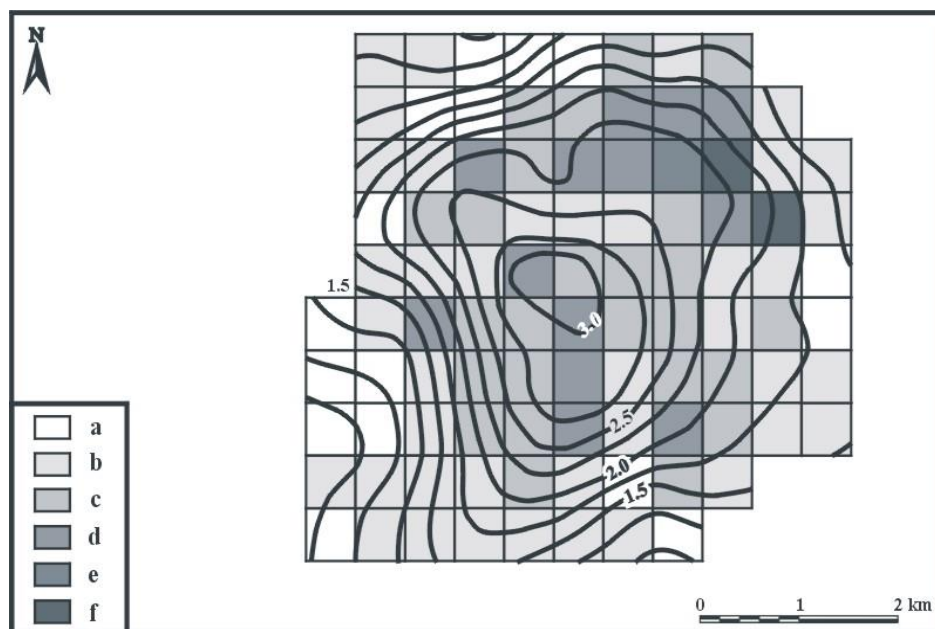
6.1.5. ábra Az épületmagasság értékeinek területi eloszlása Szegeden (Purnhauser és Zboray, 2000)

A legmagasabb épületek Szegeden a város ÉK-i részén elhelyezkedő, panelházakból álló lakótelepi régióban koncentrálódnak több, mint 20 méteres maximális értékkel. Meg kell említeni még a város déli területén előforduló 15 méternél nagyobb magasságú épületeket is, de további ilyen kiugróan magas épületek a város többi részén nem fordulnak elő. Ugyanakkor jól megfigyelhető, hogy a város jelentős területein vannak jelen a 10 méternél magasabb épületek, melyek jelentősen befolyásolják az UHI területi eloszlását.

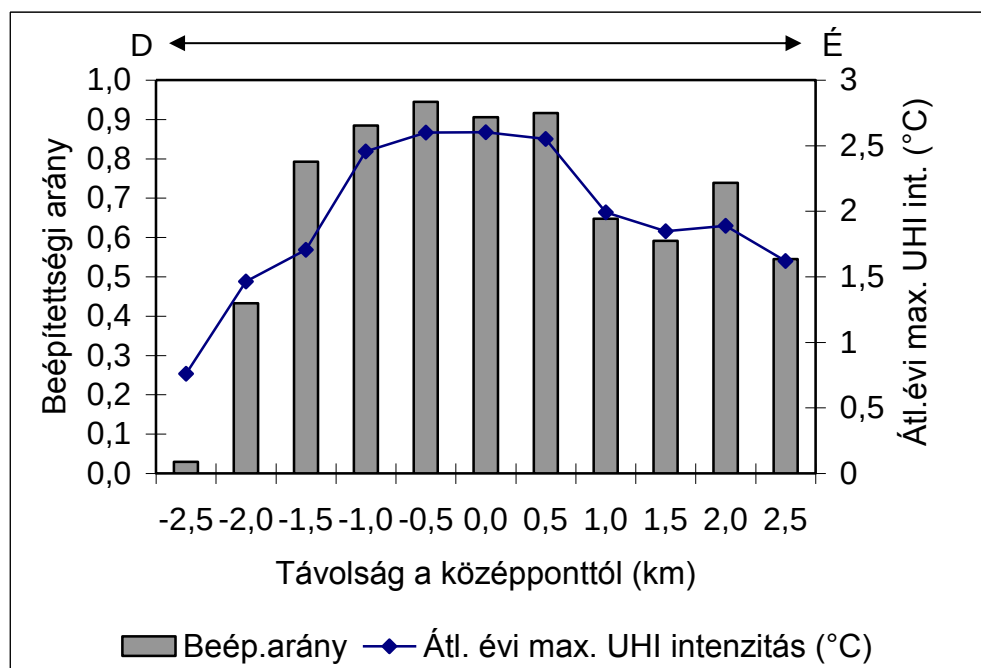
A 6.1.6. ábráról világosan látszik, hogy a város ÉK-i részén elhelyezkedő magas épületek irányába jelentősen kinyúlnak az UHI izotermái, ami mutatja a két paraméter közötti kvalitatív kapcsolat meglétét. Az alacsony épületmagassággal együtt járó anomáliák jól szembetűnnek a város Ny-i peremén, illetve a belső parkos, beépítetlen területeken valamint nem utolsó sorban, a Tisza medervonalában.

Ha megvizsgáljuk a város É – D irányú metszetében a beépítettségi arány és az átlagos maximális UHI intenzitás értékének változását, akkor azt tapasztalhatjuk, hogy a beépített területek aránya a középpont felől D-i irányban haladva előbb lassan, majd a Tisza meder ÉK – DNy-i vonala miatt hirtelen csökken a városon túli értékre (közel 3%-ra). Észak felé haladva ez a csökkenés előbb gyors, majd egy lakótelepi terület magasabb értékét leszámítva szinte megszűnik, és egy állandó (viszonylag magas) értéket vesz fel a beépítettségi arány. Ehhez a beépítettségi profilhoz jól illeszkedő menetet mutat az UHI

intenzitási görbe is, hiszen D-i irányban meredeken csökken a 2,6 °C értékről 0,3 °C alá, míg a másik irányban haladva egy meredekebb csökkenés után szinte stagnál 1,6 – 1,8 °C értékek között (6.1.7. ábra).

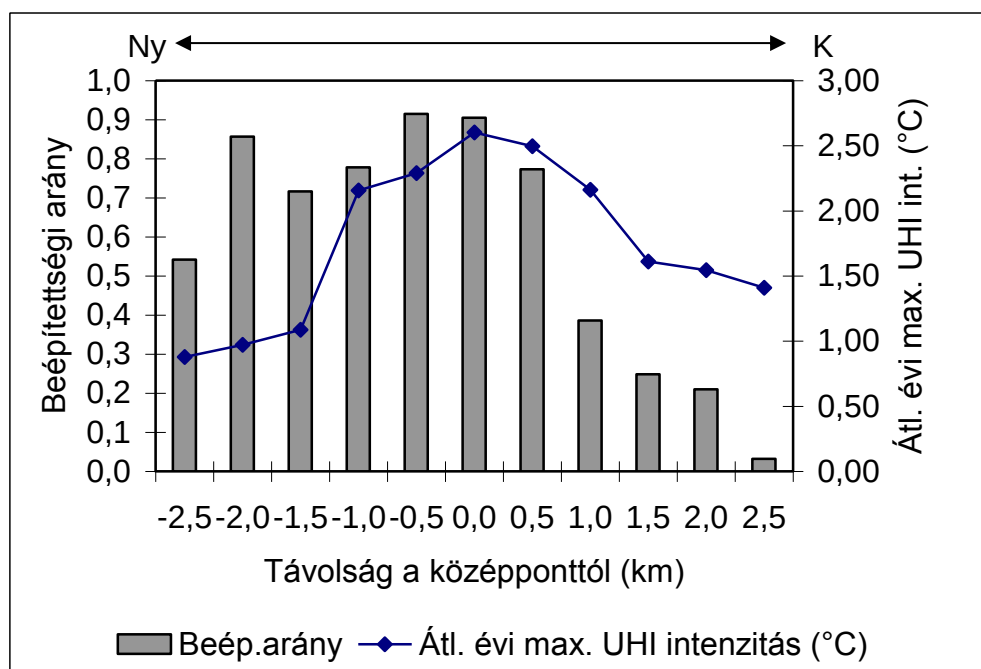


6.1.6. ábra Az épületmagasság (a: < 8 m; b: 8-12 m; c: 12-16 m; d: 16-20 m; e: 20-24 m; f: >24m) és az átlagos maximális UHI (°C) területi eloszlása Szegeden a nem-fűtési félévben (április 16-október 15), 1999-2000



6.1.7. ábra A beépítettségi arány és az átlagos évi maximális UHI intenzitás változása az Észak-Dél keresztmetszet mentén Szegeden a nem-fűtési évszakban (április 16-október 15), 1999-2000

A másik irányú keresztmetszeti ábrán (K – Ny) nagyon szépen megfigyelhető, hogy egy adott cellában mért beépítettség önmagában nem határozza meg a hőmérsékleti értékek alakulását. A város központi része körszimmetrikus tulajdonágú beépítettséget mutat ugyanakkor a Tisza folyó K-Ny-i irányban jelentősen csökkenti a beépítést a város K-i peremén, mégis az UHI intenzitás értéke csak lassan reagál erre, és így a mintegy 3%-os beépítettségű legszélső cellában is közel 1,5 °C az UHI intenzitás értéke. Másfelől a város Ny-i szélén még igen magas beépítettség (közel 60%) mellett is igen alacsony UHI intenzitást kapunk (mintegy 0,3 °C). Ezeknek a fentebb említett jelenségeknek az oka az, hogy a városban mért hőmérsékletet nem csak az adott hely közvetlen környezetének beépítettségi viszonyai határozzák meg, hanem lényegesebb szempont, hogy a hely nagyobb sugarú környezete legyen beépített! Hiszen pl. a K – Ny-i keresztmetszetben lévő Ny-i szélső cellák beépítettségi értékei magasak (54-86%), az őket D-ről határoló cellákban csak 3-28% közötti értékek fordulnak elő (6.1.8. ábra)! Erre a fontos problémára még visszatérünk később, amikor a modellezési eljárást tárgyaljuk.



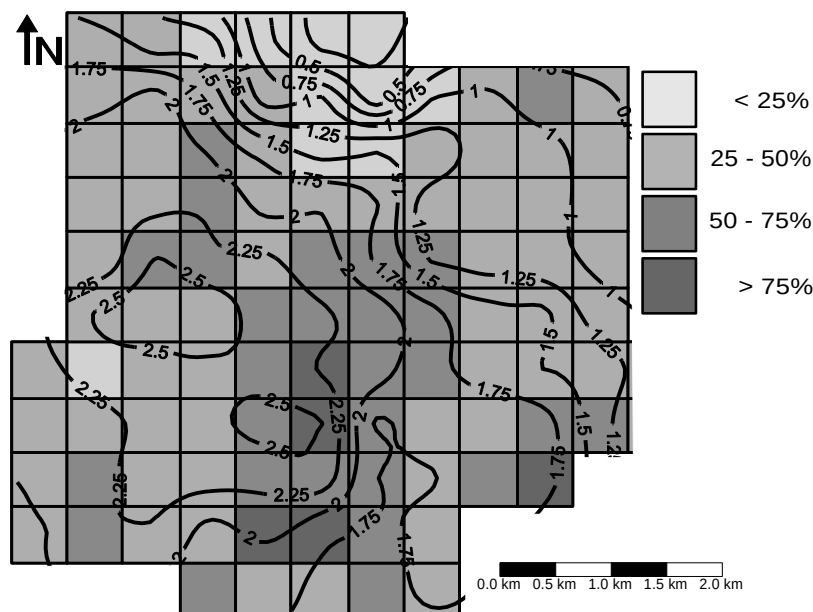
6.1.8. ábra A beépítettségi arány és az átlagos évi maximális UHI intenzitás változása a Kelet - Nyugat keresztmetszet mentén Szegeden a nem-fűtési évszakban (április 16-október 15), 1999-2000

6.2. Az átlagos maximális hősziget-intenzitás és a beépítettségi arány területi eloszlása Debrecenben

Debrecen esetében kizárólag a beépítettségi aránnyal tudjuk összehasonlítani az UHI intenzitás területi eloszlását, mert csak ez a statikus városi paraméter áll rendelkezésünkre. Hasonlóan a szegedi példához, itt is az adott időszak (2002. március és 2003. március

között) nem-fűtési félévének átlagos maximális UHI intenzitását vetjük össze a beépítettségi aránnyal.

Debrecen esetében a hőszigetet reprezentáló izotermák futása már nem olyan szembetűnően koncentrikus, mint Szeged esetében, jóllehet némileg még felfedezhető benne, kis mértékben. Alapvetően a beépítettségben egy **kétpólusú szerkezet** figyelhető meg (középponti rész magas és É-i terület alacsony beépítettség), mely jelentősen befolyásolja a hőtöbblet eloszlását (6.2.1. ábra).

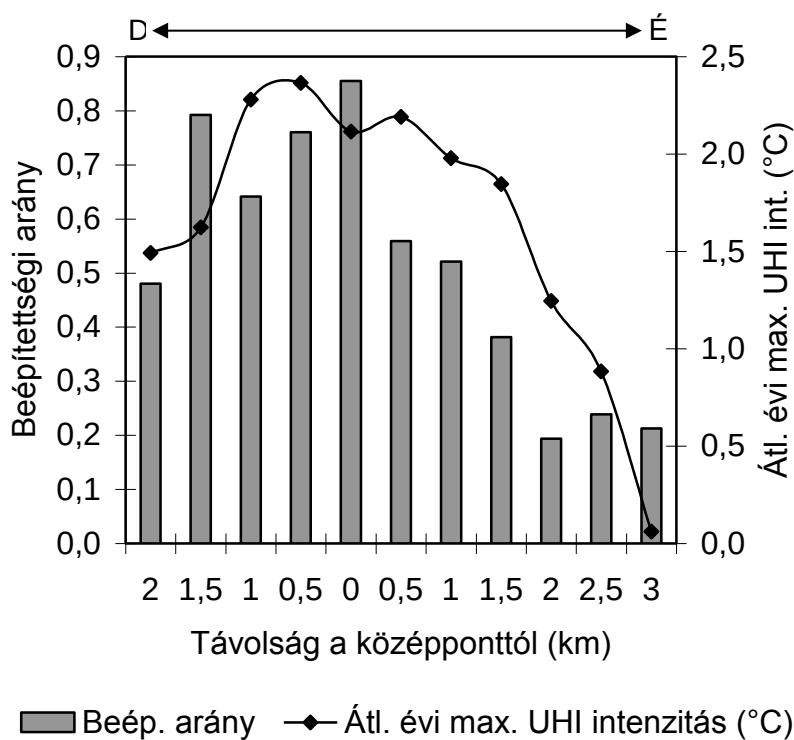


6.2.1. ábra A beépítettségi arány és az átlagos maximális UHI ($^{\circ}\text{C}$) területi eloszlása Debrecenben a nem-fűtési félévben (április 16-október 15), 2002-2003 (Bottyán et al., 2005 nyomán)

A városban a legmagasabb hőmérsékleti értékek a középső és a Ny-i területeken figyelhetők meg. Az átlagos maximális UHI intenzitás értéke eléri a $2,5^{\circ}\text{C}$ értéket a nem-fűtési évszakban, míg a leghidegebb rész az É-i erdős, ligetes terület, ahol a hőmérsékleti különbség alig érezhető már a város és környezete között ($< 0,5^{\circ}\text{C}$). Ebben az évszakban mért legmagasabb hőtöbblet értéke $5,8^{\circ}\text{C}$ volt 2002 június 16-án. A beépítettség területi eloszlásában is megfigyelhető, hogy Debrecen kissé szabálytalanabb, kevésbé koncentrikus szerkezetű, mint Szeged, de mégis jól látható, hogy a beépítettségi arány területi eloszlása itt is követ egy középpontból kifelé mutató csökkenést. Fontos megjegyezni azonban, hogy ez a gradiens már észrevehetően irányfüggő. Megfigyelhető Debrecen esetén is, hogy a középpontban helyezkednek el a leginkább beépített cellák (a maximális érték 86%), de É-i irányban (a Nagyerdő felé) a beépítettség igen gyorsan csökken a mintegy 15-20%-os értékre. A város keleti területein inkább kertes családi házak vannak, így itt a beépítettség

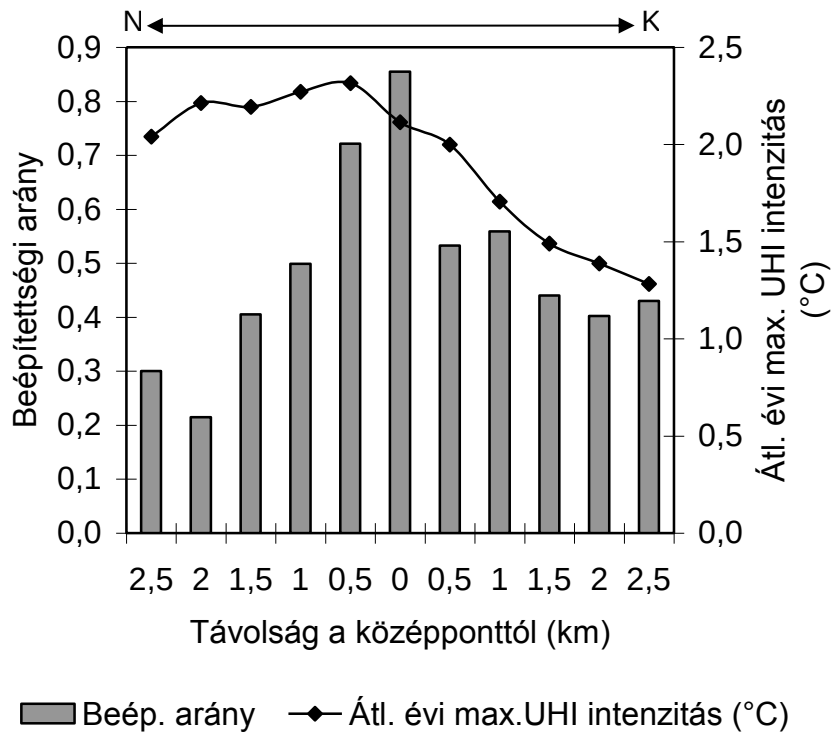
mértéke 25-50% között mozog, míg a Ny-i részeken magas panelházakból álló lakótelepeket találunk 10 emeletes házakkal, ahol a beépítettség 40-60%-os. A város D-i régiójában ipari létesítményekkel találkozhatunk, itt a beépítettség értéke igen magas, 60-80% közötti (6.2.1 ábra).

A beépítettségben meglevő asszimetriára jó példa a 6.2.2 ábrán látható észak-dél irányú keresztmetszeti diagram, mely együtt mutatja a beépítettségi arány és az évi átlagos maximális UHI intenzitás változását a középpontból való távolság függvényében. Míg a középponttól É felé haladva mind a beépítettség, mind az UHI intenzitás igen gyorsan csökken, addig D felé haladva, egy sokkal lassúbb csökkenést tapasztalunk mindkét paraméter esetében. Szépen látszik a beépítettség irány függése és az asszimetria is a területi eloszlásban.



6.2.2. ábra A beépítettségi arány és az átlagos évi maximális UHI intenzitás változása az Észak-Dél keresztmetszet mentén Debrecenben a nem-fűtési évszakban, 2002-2003(Bottyán et al., 2005 nyomán)

Ha megnézzük most a K-Ny irányú keresztmetszetet, akkor láthatjuk, hogy a beépítettségben egy szimmetria bontakozik ki, hiszen a középponttól távolodva mindkét irányban szinte ugyanolyan mértékben csökken a beépítettségi arány értéke. Az UHI intenzitás K-felé a beépítettséggel együtt csökken, míg Ny-i irányban alig változik, szemben a beépítettséggel (6.2.3 ábra).



6.2.3 ábra A beépítettségi arány és az átlagos évi maximális UHI intenzitás változása a Kelet-Nyugat keresztmetszet mentén Debrecenben a nem-fűtési évszakban, 2002-2003 (Bottyán et al., 2005 nyomán)

A fentebb vázolt beépítettségi sajátosságok miatt Debrecen esetében tehát az UHI intenzitás területi eloszlása jelentősen eltér a koncentrikustól, de alapjában véve a legerősebb hőtöbblet itt is a városközpont körül jelenik meg és a város pereme felé különböző gradienssel csökken.

7. AZ ÉGHAJLATI RENDSZER MATEMATIKAI MODELLEZÉSÉNEK MÓDSZEREI

7.1. A dinamikus megközelítés elve

Ahogy már korábban említettem, egy éghajlati rendszer matematikai modellezéséhez két alapvetően különböző módon lehet közelíteni.

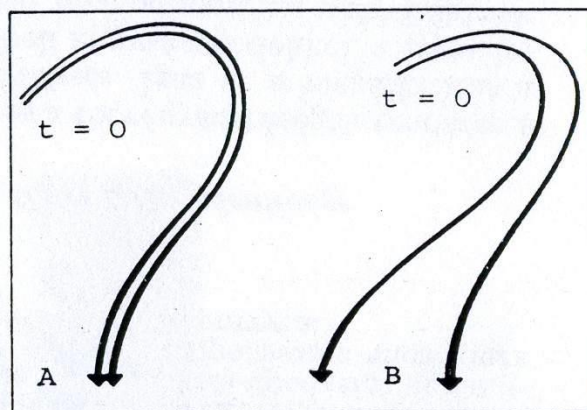
Az egyik lehetőség, amikor a rendszerben ható fizikai törvényeket leíró differenciálegyenleteket oldjuk meg valamilyen kezdeti és/vagy peremfeltételek mellett. Ugyanis, ha ismerjük a rendszer kezdeti állapotát, valamint a rendszerben ható termodinamikai és hidrodinamikai törvényeket matematikai alakban elő tudjuk állítani (általában differenciálegyenletek rendszere), akkor az állapotváltozások időbeli menetének kiszámítása egy kezdetiérték-feladat megoldását jelenti (Götz, 1976). Ez az ún. **dinamikus modellezés**.

Ez a módszer elvileg közvetlenül lehetővé teszi számunkra az éghajlati rendszer időbeli menetének leírását, azaz alkalmas az előrejelzésre, ugyanakkor a rendszerben ható folyamatok prognózisának sikere három fontos körülménytől függ:

- a) Mennyire pontosan tudjuk leírni (mérni) a rendszer pillanatnyi állapotát, azaz a kezdeti feltételeket adó mezők mennyire pontosak
- b) Milyen pontosan tudjuk matematikai formába önteni a rendszerben lezajló állapotváltozásokat kormányzó fizikai törvényeket
- c) Mennyire pontosak a rendszert leíró hidrodinamikai egyenletrendszer megoldását lehetővé tevő matematikai módszerek

Az a) és c) pontban leírt feltételek elemzéséből tudjuk, hogy a valóságban sem a mérések, sem pedig a numerikus megoldásokat reprezentáló sémák nem pontosak, így a prognózis mindig hibákkal terhelt lesz, ami időben halmozódik és egy ponton túl elrontja az előrejelzést. De a kutatásokból már ismert, hogy ha ideálisan teljesülne mindhárom említett feltétel, akkor is lenne határa az előrejelezhetőségnek. Hiszen, ha ugyanazon dinamikus modell leírását szolgáló kormányzó egyenleteit két egymáshoz igen közeli állapotból kiindulva integráljuk, akkor meghatározott idő elteltével a kapott két megoldás egymástól jelentősen különbözni fog (7.1.1. ábra). Fontos megjegyeznünk, hogy a megoldások divergenciájának oka nem a kezdeti állapot bizonytalanságában keresendő, hanem abban, hogy a különböző méretű rendszerek (melyek természetesen kapcsolódva

illetve beágyazódva vannak egymásba) között fellépő nem-lineáris kölcsönhatások miatt, az adott rendszer méretskálájának mindkét irányában energiacsere lép fel a kapcsolódó rendszerekkel (Götz, 1976).



7.1.1. ábra Két egymással csaknem megegyező kezdeti állapotból kiinduló prognózis időbeli fejlődésének rajza. **A:** a két megoldás egymástól alig tér el; **B:** a két megoldás időben gyorsan divergál (Götz, 1976)

Ez a bizonytalanság (mely nem kiküszöbölhető) felelős azért, hogy adott légköri folyamatok előrejelzésének létezik egy elméleti határa, azaz tetszőleges távra nem lehet megfelelő pontosságú előrejelzést készíteni! Pl. makro-skálán ez a határ mintegy 3-4 hét. A kezdeti értékek (mérések) pontatlansága, az alkalmazott numerikus sémák trunkációs hibái és a - fizikai törvények nem kellő ismeretéből fakadó - nem pontos matematikai reprezentáció miatt, a gyakorlati előrejelzések határa az elméleti határnál jóval rövidebb, pl. a már említett makro-skálán csak 4-5 nap.

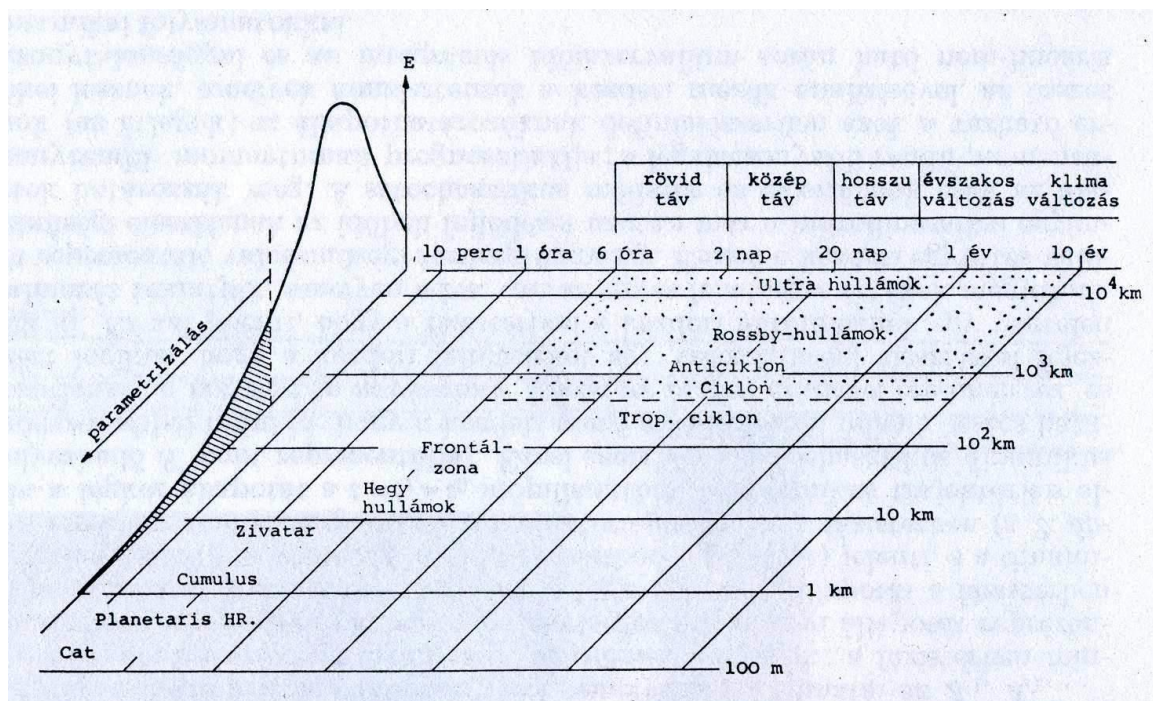
További problémával is szembe kell nézni a dinamikus modellek készítőinek. Az adott felszínt, melyre szeretnénk elkészíteni az előrejelzést, valamilyen ráccsal reprezentálhatjuk (pl. horizontális ortogonális rács). A rácshálózat rácstávolsága megszabja, hogy mekkora léptékű folyamatokat lehet kezelni ezen a hálózaton. Legyen a rácstávolság: d és a folyamat mérete: L . Ekkor a d rácstávolság mellett kezelhető (felbontható) folyamat legkisebb mérete:

$$L_{min} = 4d$$

Azaz pl. egy $d \sim 100$ km-es rácshálózattal csak a 400 km-nél nagyobb méretű folyamatok írhatók le (7.1.2. ábra). Ebben az esetben tehát a 400 km-nél kisebb folyamatok nem bonthatók fel ezzel a rácsszerkezettel, ugyanakkor a nem-lineáris kölcsönhatások

mechanizmusa szerint az L -nél nagyobb méretű (tehát kezelhető) folyamatok szempontjából energianyelőként vagy energiaforrásként jelennek meg. Az adott rácshálózat mellett már fel nem bontható folyamatok (szub-grid folyamatok) kezelése tehát megoldandó, hiszen figyelmen kívül hagyásuk igen durva közelítést adná a valóságnak (használatatlanná tenné a dinamikus modellt).

A probléma egy lehetséges megoldása az ún. **szub-grid skálájú parametrizáció**, amikor „az explicite nem kezelhető (adott ráccsal már nem felbontható) folyamatoknak a vizsgált skálára kifejtett hatását a modell paramétereinek a függvényében **statisztikailag** vesszük figyelembe” (Götz, 1976). A paraméterezésnél az adott hatás statisztikai átlagértékeit alkalmazzuk, vagy az adott hatás folyamatának erősen leegyszerűsített, empirikusan formulázott változatával dolgozunk (Práger, 1992).



7.1.2. ábra. A különböző légköri folyamatok tér-idő skálája és energiasűrűsége (E) a horizontális skála függvényében. A rajzon behatárolva a $d \sim 100$ km-es rácshálózattal felbontható folyamatok, valamint az energiaspektrum parametrizálandó része (Götz, 1976)

A dinamikus modelleknek a mezo- és mikro-skálára történő adaptálása nemcsak az előbb vázolt elvi okok miatt, hanem számítástechnikai oldalról is gondot jelent, hiszen az éghajlati rendszert leíró hidro-termodinamikai egyenletrendszer (parciális differenciál-egyenletek rendszere) csak numerikusan tudjuk megoldani, mely művelet rendkívüli pontosságot és műveletvégző sebességet igényel a komputerektől.

Ugyanakkor látni kell, hogy az éghajlati rendszer időben változó természetét rendkívül jól lehet megragadni a dinamikus modellekkel és a mai numerikus előrejelzésben szerepük meghatározó. Másfelől pedig a dinamikus megközelítések nem nélkülözhetik a statisztikus modelleket, hiszen a paraméterezési eljárásokhoz ezek felhasználása elengedhetetlen. A legújabb dinamikus modellek a kezdeti feltételek bizonytalanságának kezelésére is igénybe veszik a statisztikus megközelítést (**sztochasztikus dinamikus modellek**), de ezek ismertetése túlmutat ezen dolgozat témáján.

7.2. A statisztikus megközelítés elve

Ahogy az előző fejezetben láttuk, a dinamikus modellezés rendkívül mély elméleti és számítástechnikai ismereteket és apparátust igényel, ugyanakkor nem nélkülözheti, sőt igényli is a statisztikus megközelítési módokat (lásd pl. paraméterezés).

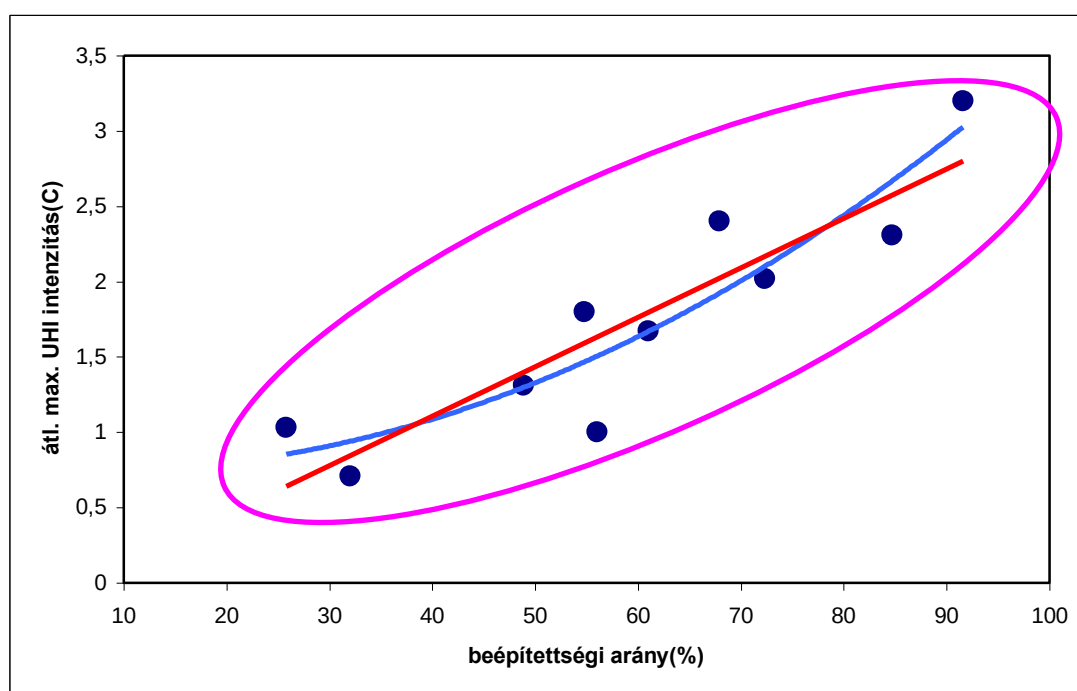
Egy éghajlati rendszeren belül ható folyamatok állapotjelzőinek megfigyelt (mért) értékeiből akkor is vonhatunk le következtetéseket, ha nem ismerjük explicit módon a közöttük ható fizikai kölcsönhatások természetét. Ebben az esetben a feladat az, hogy a mért paraméterek (prediktorok) konkrét értékei és a becsülni kívánt paraméter (prediktandus) értékei között állapítsunk meg matematikai kapcsolatot, pusztán a mérések alapján! Természetesen feladat az is, hogy megválasszuk azokat a prediktorokat a halmazból, amelyek a legjobban becsülik majd a prediktandust.

Ez a becslés természetesen csak **valószínűségi alapon** történhet, hiszen a mérések nem teljesen pontosak és a figyelembe vett prediktorok nyilvánvalóan nem tudják teljes egészében meghatározni a prediktandus értékét (a rendszer ennél sokkal bonyolultabb). Azt a módszert, amikor a rendszer egy paraméterére csupán a rendelkezésre álló, ugyanazon rendszerbeli más paraméterek mérési (megfigyelési) eredményeinek (**mintá**) kiválasztásával és felhasználásával adunk becslést a matematikai statisztika segítségével, **statisztikus modellezésnek** nevezzük.

A statisztikus megközelítésnek az alapja az a tény, hogy ha létezik fizikai kölcsönhatás a két paraméter közt, amely esetleg explicit módon nem, vagy nem teljesen ismert (azaz a két vizsgált paraméter nem független egymástól), akkor a két paraméter megfigyelt (mért) értékeinek sokaságában is vissza kell ennek a kapcsolatnak tükröződnie. Természetesen ez a kapcsolat matematikai értelemben nem függvénykapcsolat, hiszen egyik paraméter (független változó) a másikat (függő változó) nem határozza meg egyértelműen, hanem az véletlenszerűen ingadozik egy legvalószínűbb érték körül

(*sztochasztikus kapcsolat*) (Péczeley, 1979). Feladatunk annak az ún. *sztochasztikus függvénynek* vagy *regressziós egyenletnek* az előállítása, amelyik ezeket a legvalószínűbb értékeket megadja.

Vegyük példaként a beépítettségi arány és az átlagos maximális UHI intenzitás paraméter értékeit a vizsgált terület 10 négyzetéből Szeged esetén, és ábrázoljuk a mért értékeket pontdiagramon (7.1.2.1 ábra). A pontdiagramon jól látható, hogy a két paraméter mért értékei nem véletlenszerűen helyezkednek el a síkon, hanem a lila ellipszis által határolt területen belül fekszenek (geometriai valószínűség). Látszik tehát, hogy a beépítettség növekedésével – ha nem is függvény-kapcsolat módján – növekedik az UHI intenzitás is és fordítva is igaz.



7.1.2.1 ábra. A beépítettségi arány és az átlagos maximális UHI intenzitás közötti összefüggés 10 rács adatai alapján, Szegeden. A pontok a mért értékek, a piros vonal a legjobban közelítő egyenes, a kék pedig a legjobban közelítő másodrendű görbe.

A sztochasztikus függvények meghatározására többféle lehetőség van, az egyik leggyakrabban alkalmazott módszer a *legkisebb négyzetek módszere*, amikor azt a legjobban közelítő függvényt keressük, amelyiknél a mért értékek és a függvény által adott értékek közötti eltérések négyzetösszege minimális lesz. Természetesen a közelítő sztochasztikus függvény lehet lineáris, másodrendű, exponenciális, logaritmikus stb. A 7.1.2.1. ábrán piros színnel a legjobban közelítő lineáris, míg világoskék színnel a másodrendű sztochasztikus függvényt rajzoltuk meg. Nyilvánvaló, hogy tetszőleges ponthalmazhoz illeszthető a fent leírt módon egy és csak egy sztochasztikus függvény, de

ebből még nem következik, hogy a paraméterek között valóban létezik is kapcsolat a valóságban! A kapcsolat reális voltának eldöntése érdekében statisztikai vizsgálatot kell elvégeznünk, melynek során az ún. **korrelációs együtthatót** számítjuk ki, mely információt szolgáltat a paraméterek közötti kapcsolat erősségéről, realitásáról. Amennyiben a vizsgált minta elemszáma és a korrelációs együttható abszolút értéke együtt valósnak mutatja a sztochasztikus kapcsolatot, akkor meghatározható a legjobban közelítő, azaz a sztochasztikus függvény matematikai alakja.

A sztochasztikus kapcsolatok általában többváltozósak, hiszen a vizsgált jelenségekhez kapcsolódó folyamatok bonyolultsága, összetettsége megköveteli, hogy több prediktort vonjunk be a prediktandus becslésébe. Ekkor szembesülünk azzal a problémával, hogy hány paramétert és melyeket vonjunk be a becslésbe? Erre a kiválasztásra és egyben optimalizálásra jól ismert módszerek vannak (pl. előrehaladó beléptetési többváltozós lineáris regressziós analízis, Forward Stepwise Multiple Linear Regression, FSMLR), ugyanakkor a modell alkotójának kell meghatározni azt a prediktorhalmazt, amelyből dolgozni kíván, és ez a kiválasztási eljárás nem nélkülözheti az elméleti háttérrel az adott éghajlati rendszerben zajló fizikai folyamatokat illetően.

A statisztikus modellezés rendkívül fontos kérdése, hogy egy adott prediktandust, hogy lehet a legkevesebb prediktorral és a legegyszerűbb matematikai sztochasztikus függvénnyel becsülni úgy, hogy a becslés pontossága feleljen meg az elvárásoknak? Általánosan azt mondhatjuk, hogy abban az esetben, ha a prediktorok és a prediktandus eloszlása normális, akkor a legjobb becslést a lineáris módszer adja. Másfelől a prediktorok kiválasztása azon az elven történhet, hogy melyik bevonásával növekszik leginkább a becslés pontossága, és ha már újabb prediktorok bevonása nem javít a becslés pontosságán, akkor figyelmen kívül hagyjuk azokat.

Fontosnak tartjuk hangsúlyozni, hogy a kapott statisztikus modell által adott becslés minden esetben csak a legvalószínűbb értéket jelenti! Hiszen a regressziós egyenlet prediktor-együtthatóira kapott (lineáris vagy nem-lineáris) becslés általában 95%-os valószínűséget garántál az adott konfidencia intervallumon belül, így a prediktandusra adott becslés is bizonytalansággal terhelt lesz. Ezt az eredmények interpretálásakor figyelembe kell venni!

A statisztikus modell megalkotásának főbb lépései az alábbi pontokban foglalhatóak össze:

- A vizsgált éghajlati rendszerben meghatározzuk a becsülni kívánt paramétert, és számba vesszük a rendelkezésre álló és fizikailag számításba vehető prediktor paramétereket.
- A prediktandus és a korábbi eljárásban kiválasztott prediktorok mért (megfigyelt) mérési eredményeit statisztikai vizsgálatoknak vetjük alá (várható értékek, szórások, eloszlások meghatározása)
- A prediktorok között függetlenségi vizsgálattal (pl vizuális analízis pontdiagramon, majd keresztkorrelációk kiszámítása) meghatározzuk az egymástól nem független paramétereket (multikollinearitás), majd ezek közül az elemzés szempontjából kevésbé fontos prediktorokat töröljük.
- A rendszerben lévő fizikai folyamatok ismeretében meghatározzuk a regresszió típusát. Ez általában lineáris lesz vagy – matematikai értelemben – lineárisá tehető.
- A korábban említett FSMLR eljárással meghatározzuk azokat a prediktorokat, amelyek a legjobban megmagyarázzák a prediktandusz természetét és meghatározzuk a regressziós egyenletet a legkisebb négyzetek módszerének alkalmazásával. Az eljárás egyben szolgáltatja a többváltozós korrelációt is, amely alapján eldönthető a becslés realitása.
- Amennyiben a becslés statisztikailag reális, akkor a kapott regressziós egyenlet a prediktandus becslésére használható és az eredmények interpretálhatóak.

Látható tehát az eddig leírtakból, hogy a statisztikus modellezés létjogosultsága megkérdőjelezhetetlen az éghajlati/meteorológiai kutatásban. Olyan prediktor paraméterek ismeretében is lehetőség nyílik becslésre, amelyek nem közvetlen fizikai állapothatározók, de információt hordoznak a becsülendő paraméterre vonatkozóan. A statisztikus modellek számítástechnikai igénye elméleti és gyakorlati oldalról is lényegesen szerényebb, mint a dinamikus megközelítéseké, mert bár általában nagy mennyiségű adattal dolgoznak, nem kell bonyolult számítási algoritmusokat kezelni a megoldás során (pl. numerikus differenciál-egyenletek megoldására vonatkozóan). Meg kell azonban jegyeznünk, hogy a modell szolgáltatta becslés érvényessége csak azon a tartományon belül tartható fenn, amely tartományból a mintavételezés megtörtént! Ellenkező esetben olyan tartományról mondanánk véleményt a becslés által, amelyben a regressziós függvény viselkedését nem ismerjük (*Ezekiel és Fox, 1970*)! Ugyanakkor el kell mondanunk, hogy az előrejelzés

szempontjából a statisztikus modellek alkalmazhatósága alapvetően szűkebb határok között mozog, mint dinamikus esetben, viszont rendkívül jól kiegészíthetik egymást a dinamikus megközelítéssel.

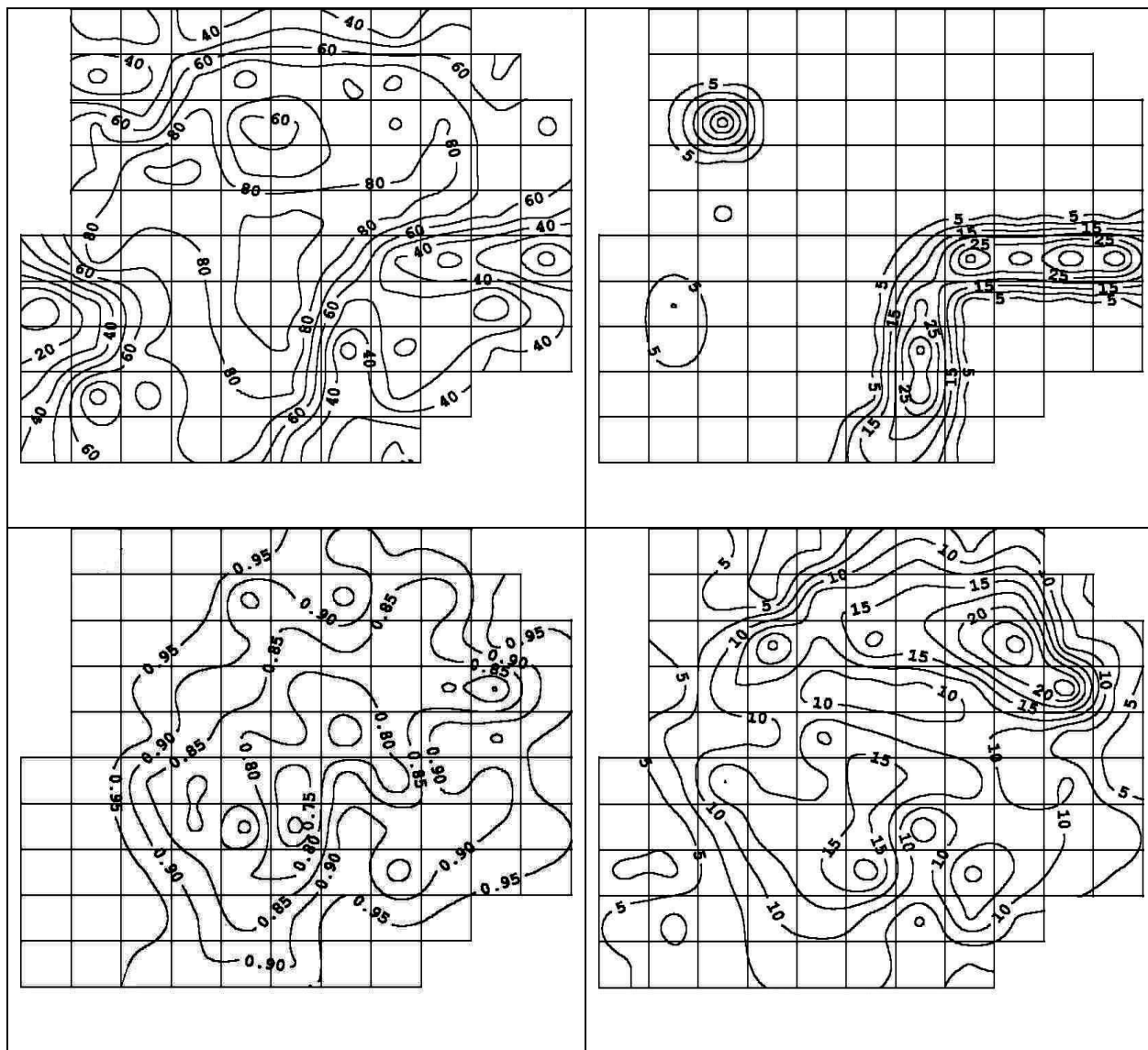
Ahogy a 3. fejezetben rámutattunk, számos korábbi statisztikus modell látott napvilágot a városi hősziget-intenzitásának becslésére különféle beépítettségi paraméterek bevonásával. Dolgozatunkban arra keressük a választ, hogyan tudunk becslést adni az átlagos maximális UHI intenzitás területi eloszlására, beépítettségi és felszíngeometriai (városi statikus) paraméterek segítségével Szeged és Debrecen vonatkozásában. A hőmérsékleti értékek esetében külön vizsgáljuk a kapcsolatot a fűtési és a nem-fűtési félévekre az 1999. március és 2000. február közötti időszakban Szegedre, illetve 2002. márciustól 2003. márciusig tartó intervallumban Szegedre és Debrecenre vonatkozóan.

8. EREDMÉNYEK

8.1. A Szegedre kifejlesztett (1. típusú) statisztikus modell felépítése

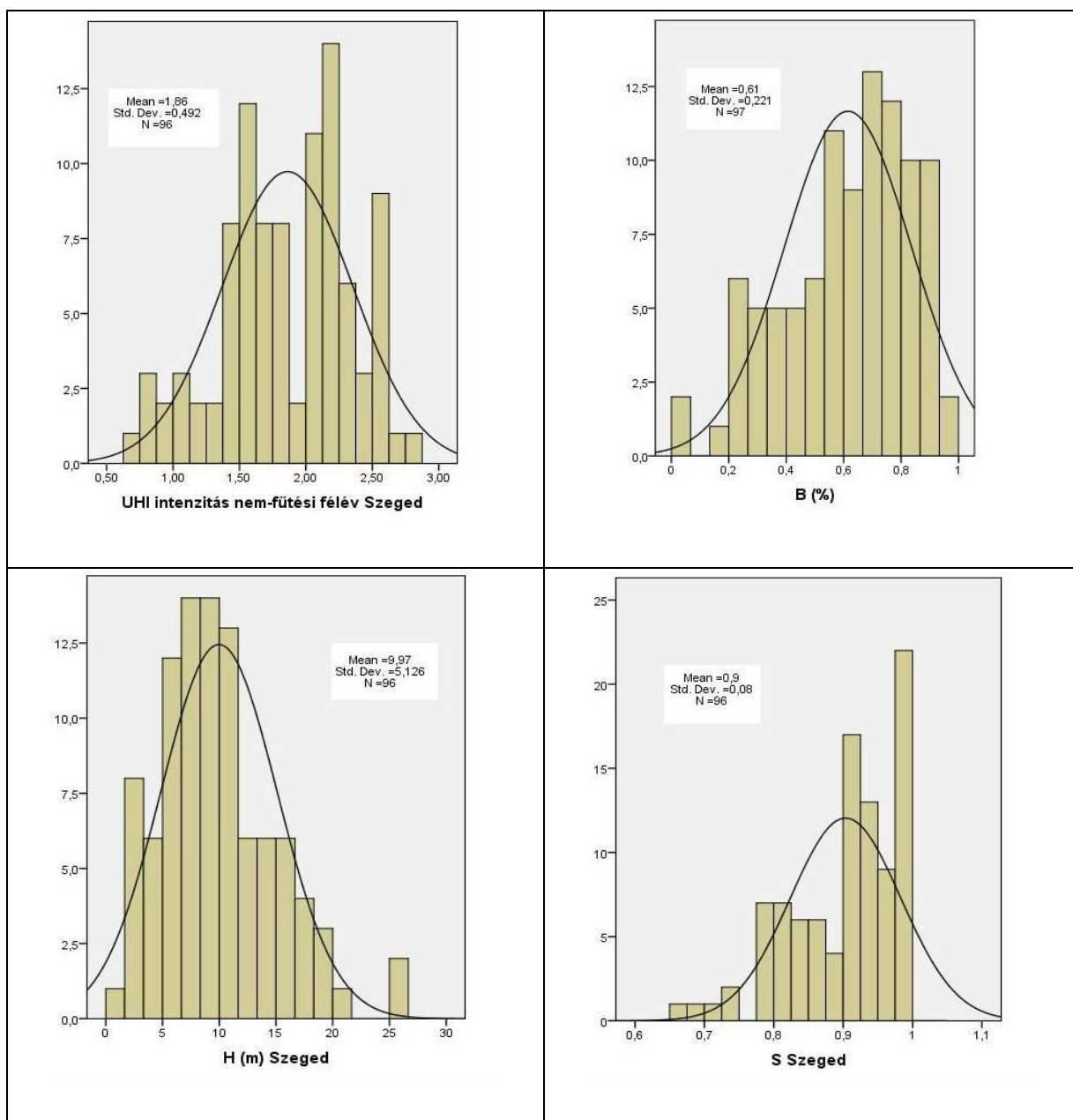
8.1.1. A modellben alkalmazott prediktorok tulajdonágai és térbeli kiterjesztésük

Az *1. típusú statisztikus modell* felépítése során Szeged 1999-2000-es UHI intenzitásának becsléséhez többféle felszínparamétert, így a beépítettségi arányt (B), a vízfelszín arányát (W), az égbolt-láthatósági faktort (S) és az épületmagasság (H) értékeit valamint ezek területi kiterjesztéseit használtuk fel.



8.1.1.1 ábra. A prediktor paraméterek területi eloszlása a vizsgált területen, Szegeden: **bal felső ábra:** beépítettségi arány (%); **jobb felső ábra:** vízfelszín aránya (%); **bal alsó ábra:** égbolt-láthatósági faktor; **jobb alsó ábra:** épületmagasság (m)

Területi eloszlásukat a 8.1.1.1. ábrán láthatjuk a vizsgált szegedi területen. Mind a négy paraméter fontos szerepet játszik a városi felszín sugárzási egyenlegének alakításában, hiszen befolyásolják az albedót (B , W), a hosszuhullámú kisugárzás intenzitását (S), a tárolt hőmennyiséget (B , W , S , H), a rövidhullámú besugárzást (S , H), az antropogén hő kibocsátását (B , W , H) és transzportját (S , H).



8.1.1.2. ábra A modellben alkalmazott prediktorok és a prediktandus empirikus sűrűségfüggvényei és a hozzájuk illesztett normális eloszlások Gauss-görbéi. Jól látható, hogy az S paraméter kevésbé jól közelíthető normális eloszlással, a többi viszont igen.

Munkánk során tehát a négy prediktor paraméter meghatározott értékeit vetjük össze az expedíciós mérések során észlelt és számított városi hőmérsékletekkel (5-6. melléklet).

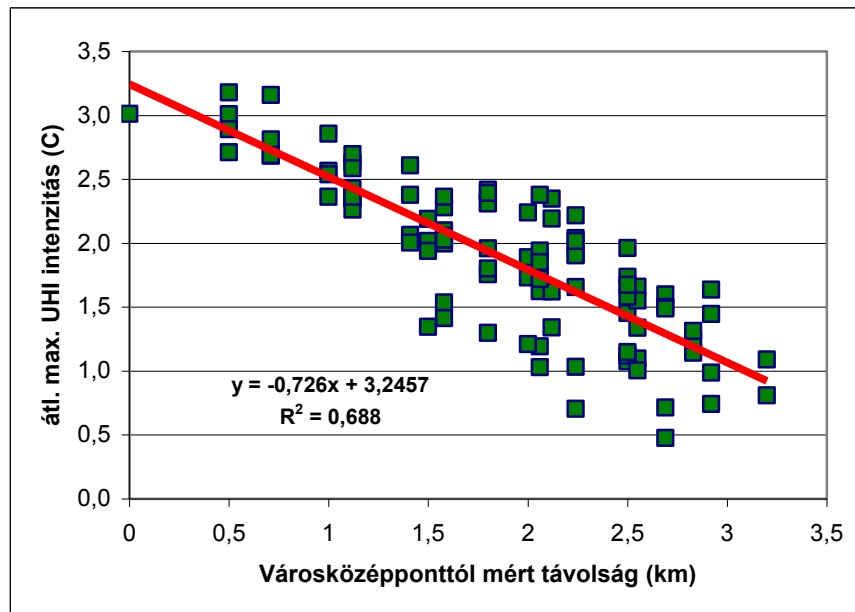
A 97 cellára vonatkozóan rendelkezésre álló paraméter adatok előzetes statisztikai feldolgozása arra irányult, hogy normális eloszlással közelíthetőek-e a mintaadatok eloszlásai? Ebben az esetben ugyanis a lineáris becslés a legjobb a regressziós függvény előállításához (Dévényi és Gulyás, 1988).

Statisztikus próbát (χ^2 -próba, illeszkedésvizsgálat) elvégezve mind az öt paraméterre (1 prediktandus: UHI intenzitás, 4 prediktor: B , W , S , H) azt kaptuk, hogy az S és a W paraméter nem közelíthető normális eloszlással, az UHI , B , H pedig igen (95%-os valószínűségi szinten). A 8.1.1.2. ábrán látható, hogy a bemutatott prediktorok közül az S paraméteren kívül a másik három (UHI , B , H) prediktor empirikus sűrűségfüggvényei jól közelítik a normális eloszlás sűrűségfüggvényét (haranggörbe). A vízfelszín-arány (W) – az S -hez hasonlóan – nem közelíthető jól normális eloszlással. Igaz ugyan, hogy a paraméterek között ugyan vannak nem normális eloszlásúak, mégis a lineáris regressziós eljárást alkalmaztuk, mert úgy ítéltük meg, hogy a lineáris megközelítéssel nem követünk el nagy hibát. A 3.1. táblázatban szereplő statisztikus megközelítések esetében sem alkalmaztak magasabb rendű approximációt hasonló paraméterek esetén. Ezen megfontolások miatt, a mi modellünk is a lineáris becslést fogja alkalmazni.

A város koncentrikus szerkezetéről már szoltunk korábban. Ez a struktúra visszatükröződik a prediktor paraméterek közül a B , S , kisebb mértékben a H területi eloszlásán. A W paraméter területi elhelyezkedése gyakorlatilag a Tisza medrét követi (8.1.1.1. ábra). Az UHI intenzitás koncentrikus szerkezetéről már korábban, a 6.1 fejezetben esett szó dolgozatunkban.

Ezekből a területi struktúrákból következik, hogy az UHI intenzitásnak egy viszonylag erős távolságfüggése van: a városközponttól mért távolság igen jól becsüli az UHI intenzitást (8.1.1.3. ábra.) Adódna a lehetőség, hogy prediktornak válasszuk a városközponttól mért távolságot, de ez nem lenne jó döntés, hiszen:

- Ebben az esetben a nem koncentrikus szerkezetű városok esetén a modellünk igen rossz becslést adna (irányonként nagy lenne az eltérés)
- Rossz lenne a becslés a nagyobb területű (nagyobb átmérővel rendelkező) városok esetén is, hiszen a becslési intervallum maximuma nem terjedhet túl a mintavételezésben előfordult legnagyobb értéknél. Jelen esetben a 3,5 km-nél nagyobb középponttól való távolságok esetén a becslést nem végezhetnénk el biztonságosan.

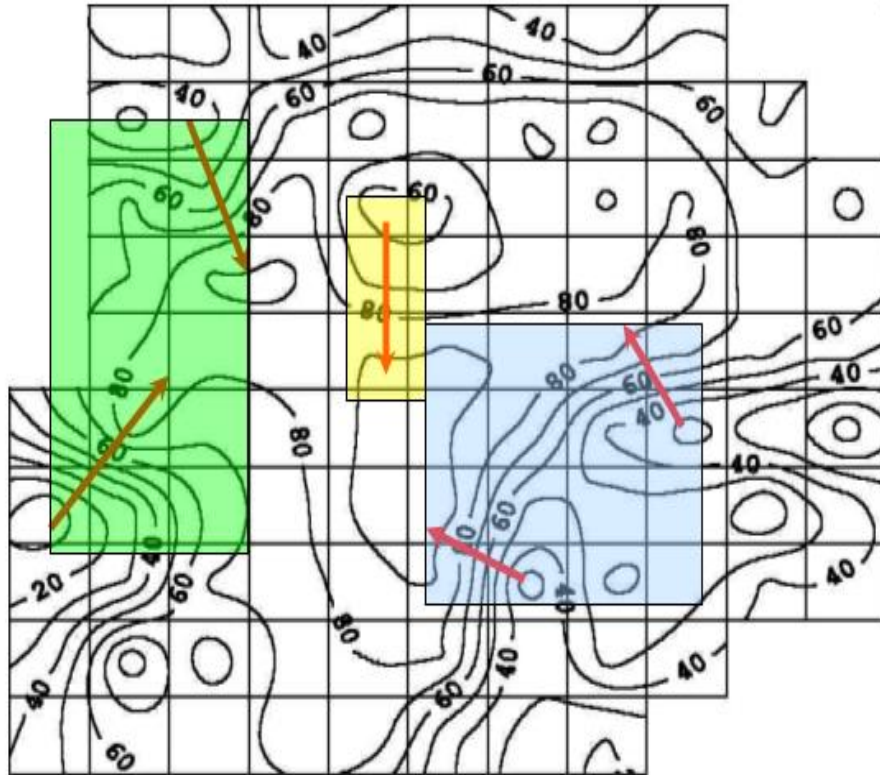


8.1.1.3. ábra Összefüggés a városközponttól mért távolság és az átlagos maximális UHI intenzitás között Szegeden (nem-fűtési félév, 1999-2000)

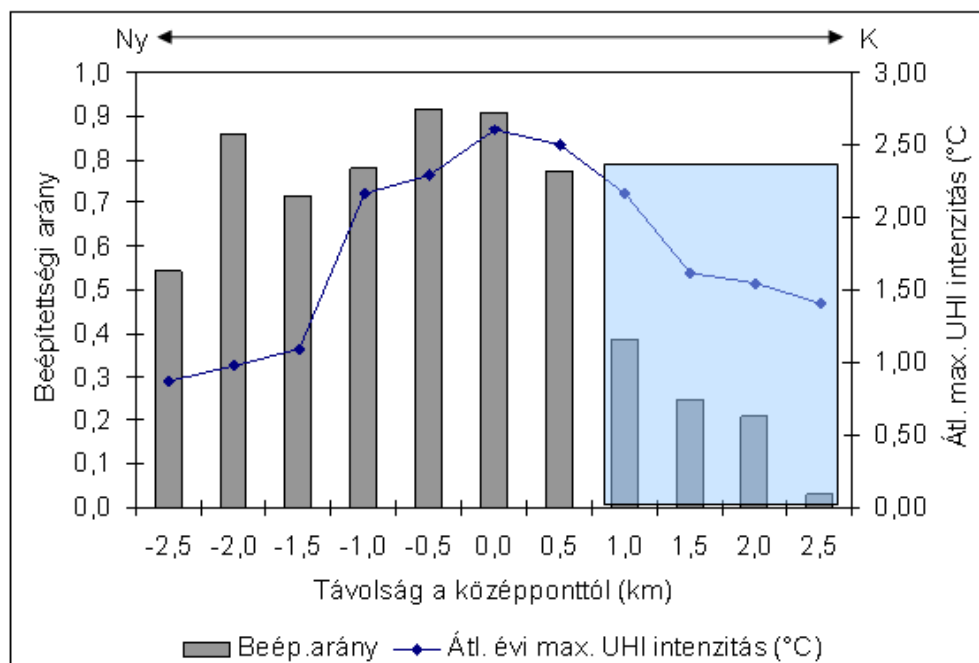
Mégis, a távolságfüggés problémájával foglalkoznunk kell két nagyon fontos ok miatt. Az egyik probléma az, hogy miként tudjuk figyelembe venni azt a fontos tény, hogy a prediktor paraméterek időben állandóak ugyan, de térben rendkívül gyorsan változhat értékük, ami az általuk kifizített mezőben óriási gradienseket eredményez. Ezeket főleg parkok, beépítetlen területek és a város szélén elhelyezkedő területek esetén, valamint a Tisza partvonala mentén tapasztalhatjuk. A 8.1.1.4. ábrán példaként bemutatott beépítettségi arány izovonalakkal ábrázolt mezejében megfigyelhető, hogy értéke a vizsgált területen több helyen hirtelen változik, melyek közül néhányat megjelöltünk:

- A zöld színnel jelzett területen, a város szélén hirtelen emelkedik a beépítettség mértéke
- A kék zónában a Tisza medrének mentén szintén nagy gradienssel változik a beépítettségi paraméter
- A város belsejében levő beépítetlen, parkos területen is gyorsan nő a távolsággal a vizsgált paraméter (sárgával jelölt terület).

Ugyanakkor a hőmérsékleti mező folytonos változása miatt nem követi a prediktorok hirtelen szakadásait (nem jelentkezik hasonlóan nagy gradiens a hőmérsékleti mezőben) (8.1.1.5. ábra).

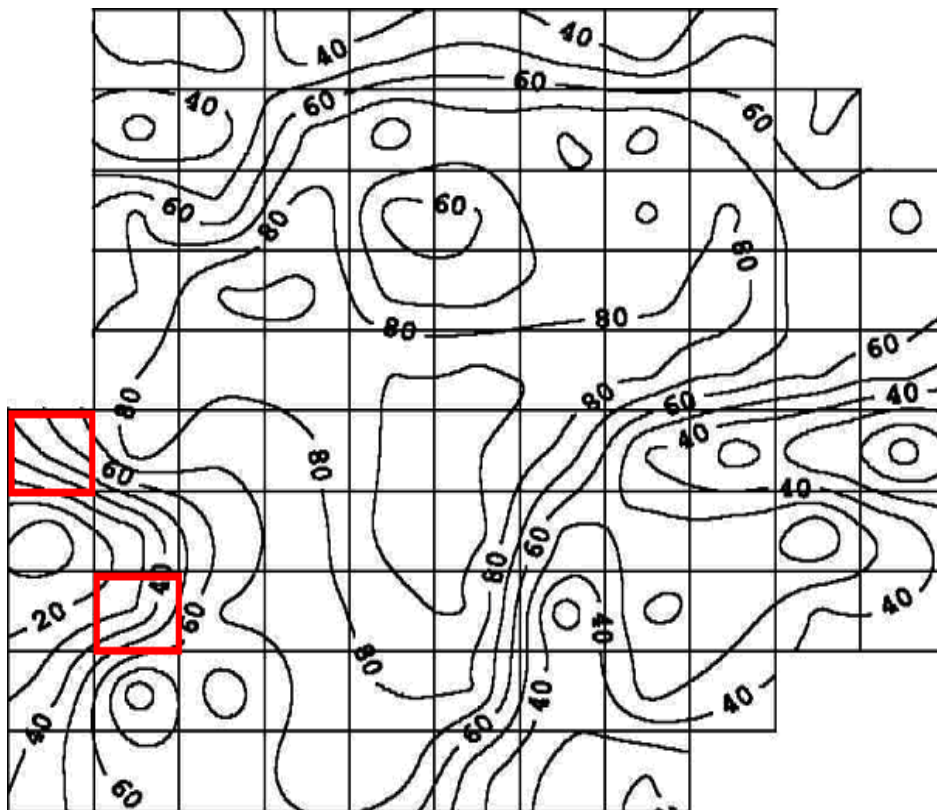


8.1.1.4 ábra nagy gradiensek a beépítettségi arány területi eloszlásában a vizsgált területen, Szegeden. **Zöld színű terület:** a város széle; **kék színű terület:** a Tisza medrének nyomvonala; **sárga színű terület:** a város belsejében park, beépítetlen terület



8.1.1.5. ábra A beépítettségi arány és az átlagos évi maximális UHI intenzitás változása a Kelet – Nyugat keresztmetszet mentén Szegeden a nem-fűtési évszakban (április 16-október 15), 1999-2000. A **kékkel jelölt téglalap** mutatja, hogy a K-i területeken a Tisza meder miatt rohamosan lecsökkenő beépíttség-változást csak kis mértékben követi az UHI intenzitás csökkenése, a nyugati területeken pedig fordított a helyzet.

A másik ok, amiért foglalkoznunk kell a távolság kérdésével az, hogy egy adott cellában meghatározott prediktor értékek lokálisan lehetnek jelentősen eltérőek a környezetüktől, mégis a hőmérsékleti mező szinte alig „reagál” erre. Pl. 87%-os beépítettség mellett az UHI intenzitás mindössze $1,1^{\circ}\text{C}$, míg egy másik cellában a 3%-os beépítettség mellett szintén $1,1^{\circ}\text{C}$ a mért UHI értéke (8.1.1.6 ábra). Ebből a tényből egyrészt következik, hogy a felhasznált prediktorok nem magyarázzák meg teljes egészében az UHI területi eloszlását (ami természetes is), másrészt, hogy egy cellában kialakuló hőmérséklet bizony a cellánál nagyobb területen végbemenő fizikai folyamatok is befolyásolják! A nagy kérdés az, hogy mekkora ez a *karakterisztikus távolság*?



8.1.1.6. ábra A **pirossal jelölt cellákban** az UHI intenzitás értéke a nem-fűtési félévben megegyező: $1,1^{\circ}\text{C}$, de a beépítettség az északi cellában 87%-os, míg a déliben mindössze 3%!

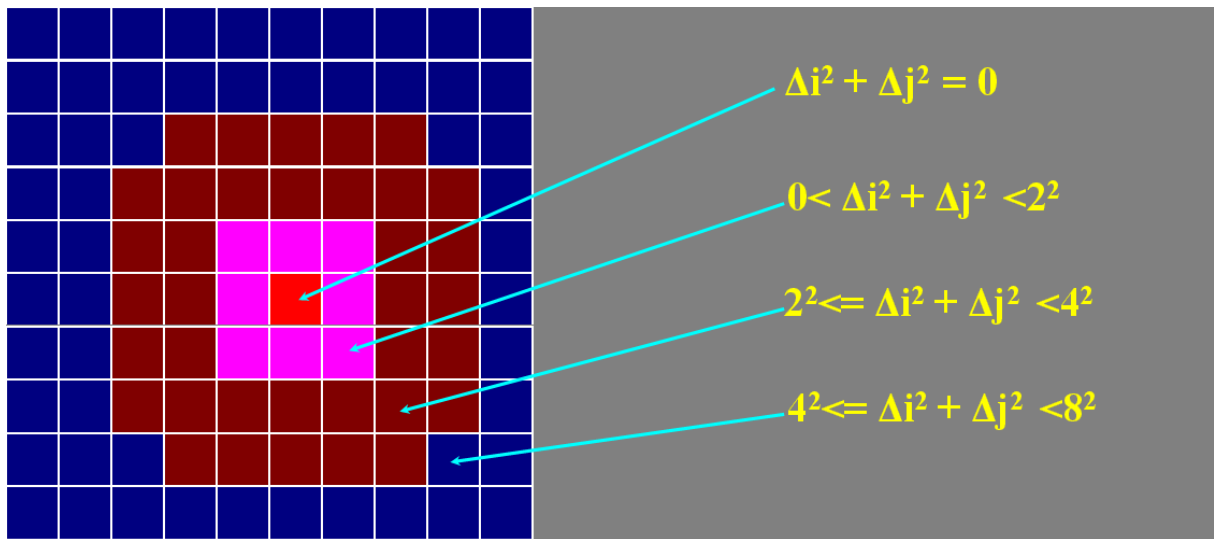
Ahhoz, hogy megbecsüljük ezt a karakterisztikus távolságot és próbáljunk megoldást találni a fentebb említett másik távolsággal kapcsolatos problémára, a modellünk felépítését kell úgy megkonstruálni, hogy a prediktorok között – ha implicit módon is – ott legyen a *távolságparaméter* is. Mivel a kiindulási prediktorok statikusak, ez csak úgy érhető el, ha bővítjük a prediktorok halmazát oly módon, hogy minden cellára vonatkozóan

a cellához hozzárendeljük minden prediktor távolsággal súlyozott értékeit is. Úgy járunk el, hogy a távolsággal exponenciálisan végezzük a súlyozást (Bottyán és Unger, 2003). Legyen egy cella középpontjának koordinátája (i,j) és a középpontban lévő cella az origó $(0,0)$, ahol i,j egészek. Ekkor a következő paramétercsoportokat hozhatjuk létre:

- Paraméter értékek a cellában (S, H, B, W) , melyekre $\Delta i^2 + \Delta j^2 = 0$,
- Átlagos értéke azon celláknak $(S1, H1, B1, W1)$, melyekre $0 < \Delta i^2 + \Delta j^2 < 2^2$
- Átlagos értéke azon celláknak $(S2, H2, B2, W2)$, melyekre $2^2 \leq \Delta i^2 + \Delta j^2 < 4^2$
- Átlagos értéke azon celláknak $(S3, H3, B3, W3)$, melyekre $4^2 \leq \Delta i^2 + \Delta j^2 < 8^2$

A 8.1.1.7. ábrán látható a fent leírt konstrukció, ahol a piros négyzet az (i,j) koordinátájú cella, a:

- rózsaszín cellák átlaga az $S1, H1, B1, W1$ paraméterek értékei,
- a sötétpiros cellák átlagai az $S2, H2, B2, W2$ paraméterek értékei,
- sötétkék cellák átlagai pedig az $S3, H3, B3, W3$ paraméterek értékei



8.1.1.7 ábra A távolsággal való exponenciális súlyozás sematikus rajza. A **piros négyzet** jelenti az általános cellát (i,j) koordinátával. A koncentrikus színezés a feltételeknek megfelelően kirajzolja azon cellák tartományait, ahonnan a négyzetekben lévő paraméterek átlagait számolni kell

Mivel több cellánál i és j irányban maximum 5 lehet az eltérés, így további csoportokat ezen a rácshálózaton nem tudunk definiálni ily módon. A rács széle felé nyilvánvaló, hogy nem lesz teljes kör az adott távolságú tartomány, így a peremen lényegesen kevesebb cellából számíthatnánk az átlagot. Ez persze torzítást jelent a rács szélén, nem beszélve arról, hogy a kérdéses tartomány egy része rácson kívülre esik, ahonnan nincs

információink a prediktorokra nézve. Ezért munkánk során a legtávolabbi tartományokból számított prediktorokat elhagytuk, így csak 12 prediktorral dolgoztunk. Azért is megtehettük ezt, mert még így is nagyszámú prediktor áll rendelkezésre a modell építéséhez és számolni kellett az esetleges *multikollinearitással* is. Más lenne a helyzet ha – mint ahogy majd a 2. típusú modell esetén látni fogjuk – csak egyfajta prediktor állna rendelkezésre, mert ekkor célszerű a legnagyobb távolságú kiterjesztés bevonása is a kiindulási prediktorok halmazába.

A fentebb említett karakterisztikus távolság meghatározását pedig majd maga a modell fogja szolgáltatni, amikor a később ismertetendő FSMLR eljárás segítségével kiválogatja a legerősebb prediktorokat a becsléshez és megadja ezek együtthatóira a becslést (meghatározzuk a többváltozós lineáris regressziós függvényt).

8.1.2. A többváltozós lineáris regresszió és a kollinearitás kérdése

A statisztikus modelleknél a prediktor változók megfigyelt (mért) értékeibe van beágyazva az az információ, mely lehetővé teszi a modellben szereplő prediktorok együtthatóinak meghatározását. A modellezésnél a prediktorok együtthatóját kell meghatároznunk úgy, hogy a kapott együtthatókkal és prediktorokkal képzett regressziós függvény a lehető legjobban közelítse a prediktandust (*Kőrösi et al., 1990*). Munkánkban a többváltozós lineáris regressziós (Multiple Linear Regression, MLR) eljárást alkalmazzuk a prediktandusok együtthatóinak becslésére, mely eljárásnak a lényegét az alábbiakban ismertetem *Dévényi és Gulyás (1988)* nyomán:

Legyen ξ prediktor és η prediktandus két sztochasztikusan összefüggő valószínűségi változó, melyek várható értéke és szórása

$$M(\xi), M(\eta), D(\xi), D(\eta)$$

és a köztük kapcsolatára jellemző a korrelációjuk:

$$r = \text{cor}(\xi, \eta) = \frac{M[(\xi - M(\xi))(\eta - M(\eta))]}{D(\xi)D(\eta)} = \frac{M(\xi\eta) - M(\xi)M(\eta)}{D(\xi)D(\eta)}$$

Az általános regressziós feladat optimális megoldása a

$$\min \{M[(\eta - g(\xi))^2]\}$$

kifejezésben, a legjobb becslést jelentő $g(\xi)$ regressziós függvény meghatározása valamely függvényosztályból, ahol M a várható értéket jelöli. Ha most a függvényosztályokat leszűkítve csak a lineáris függvények osztályán oldjuk meg a feladatot, akkor kapjuk a **lineáris regressziós feladatot**. Ha tehát $g(\xi; a, b, c, \dots)$ a ξ valószínűségi változónak az $a, b, c, \dots$ paraméterektől függő függvénye, akkor keressük azokat az $\hat{a}, \hat{b}, \hat{c}, \dots$ paramétereket, melyekre

$$M[(\eta - g(\xi; a, b, c, \dots))^2]$$

kifejezés minimális lesz. A regressziót a

$$g(\xi) \sim g(\xi; \hat{a}, \hat{b}, \hat{c}, \dots)$$

függvénnyel közelítjük és ez jelen esetben azt jelenti, hogy az η prediktandust a ξ prediktor lineáris függvényével akarjuk leírni

$$\eta = a\xi + b$$

alakban úgy, hogy teljesüljön a következő feltétel:

$$M[(\eta - (a\xi + b))]^2 = \min$$

Ennek a feladatnak a megoldása $\hat{a}, \hat{b}$ paraméterek meghatározása, azaz

$$\hat{a} = r \frac{D(\eta)}{D(\xi)}$$

$$\hat{b} = M(\eta) - r \frac{D(\eta)}{D(\xi)} M(\xi)$$

és ezután felírhatjuk a regressziós függvényünket is:

$$\hat{\eta} = r \frac{D(\eta)}{D(\xi)} \xi + M(\eta) - r \frac{D(\eta)}{D(\xi)} M(\xi)$$

Felmerül a kérdés, hogy a kiszámított $\hat{\eta}$ becslés mennyire közelíti η értékét? Belátható, hogy a becslés torzítatlan, azaz $\hat{\eta}$ és η várható értéke egyenlő. Ugyanakkor a közelítés hibája az r korrelációs együttható nagyságától függ:

$$\Delta^2 = M[(\eta - \hat{\eta})^2] = D^2(\eta)(1 - r^2)$$

Látható, hogy $r = 1$ -nél a hiba 0, $r = 0$ esetén pedig Δ^2 maximális. Ez utóbbi esetben a becslés nem függ a ξ prediktortól ($\hat{\eta} = M(\eta)$). Ez az a helyzet, amikor nincs olyan megfigyelés a becslendő változóra nézve, ami információt hordozna viselkedésére vonatkozóan. Ilyen információhiány esetén a meteorológiában a legjobb becslés (előrejelzés) az éghajlati átlag!

Az előbb leírt egyváltozós esetet általánosítva kapjuk a **többsváltozós lineáris regressziót**. Tekintsük a prediktorok

$$\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N)$$

rendszerét és ezek lineáris kombinációjával közelítsük meg a η prediktandust úgy, hogy

$$\hat{\eta} = a_0 + a_1\xi_1 + a_2\xi_2 + \dots + a_N\xi_N$$

és

$$M[(\eta - \hat{\eta})^2] = \min$$

legyen. A feladat elvi megoldásához ugyanaz az út vezet, mint amit az előbbieken bemutattunk (*Dévényi és Gulyás, 1988*).

A prediktandus és a prediktoraink mért (számított) értékeit felhasználva, az SPSS 9 statisztikai szoftvercsomag segítségével végeztük el a regressziós függvény együtthatóinak meghatározását, mely program az optimalizálás során a – korábban már említett – legkisebb négyzetek módszerével dolgozik.

Amikor több prediktorral dolgozunk egy statisztikus modellnél, felmerül a **multikollinearitás** problémája, azaz előfordulhat, hogy a prediktorok között lesznek nem-függetlenek (főképpen sok hasonló típusú paraméter esetén). Ez káros hatással van a becslésre hiszen:

- néhány prediktor esetén nagyon nagy lesz a becsült együttható szórása, ami bizonytalaná teszi a becslést
- a paraméterek becslései nagyon érzékenyek lesznek a megfigyelések és a modellszerkezet kisebb változásaira is
- a modell prediktandusra adott becslésének konfidencia intervalluma torzított lesz

Ezek közül a legfontosabb probléma a kollinearitásnál, hogy a prediktorok együtthatóinak a becslésekor megnő annak szórása, vagyis a becslés bizonytalanabb lesz. Amennyiben multikollinearitást tapasztalunk, ennek megszüntetésére a legegyszerűbb módszer azon prediktoroknak a figyelmen kívül hagyása, amelyek leginkább összefüggnek a többi prediktorral (Kőrösi et al., 1990).

8.1.2.1. táblázat A vizsgált prediktorok korrelációs mátrixa és a korrelációk abszolút értékének átlaga. A félkövéren jelzett prediktorokat kihagytuk a modellből (Unger et al., 2004)

Prediktor	B	S	W	H	B1	S1	W1	H1	B2	S2	H2	W2	Absz. érték átlaga
B	1.00	-0.50	-0.48	0.52	0.62	-0.50	-0.24	0.45	0.11	-0.12	0.01	-0.12	0.33
S		1.00	0.13	-0.72	-0.52	0.64	0.09	-0.55	-0.05	0.41	-0.33	0.02	0.36
W			1.00	-0.16	-0.13	0.02	0.29	-0.10	0.04	-0.22	0.18	0.16	0.17
H				1.00	0.43	-0.50	-0.16	0.57	-0.01	-0.42	0.23	-0.11	0.34
B1					1.00	-0.64	-0.49	0.57	0.15	-0.14	0.06	-0.21	0.36
S1						1.00	0.04	-0.84	-0.04	0.56	-0.49	0.08	0.39
W1							1.00	-0.14	-0.08	-0.27	0.17	0.24	0.20
H1								1.00	-0.03	-0.63	0.48	-0.08	0.40
B2									1.00	-0.10	0.21	0.02	0.08
S2										1.00	-0.85	-0.10	0.35
H2											1.00	0.13	0.28
W2												1.00	0.12

Tekintve, hogy a prediktor-halmazunk számossága 12, megvizsgáltuk, hogy az egyes prediktorok mennyire függetlenek egymástól. Ehhez elkészítettük a prediktorok keresztkorrelációs mátrixát és kiszámítottuk minden egyes változóra a korrelációk abszolút értékeinek az átlagát (8.1.2.1. táblázat). Minden, ugyanazon tartományhoz tartozó prediktorok közül elhagytuk a legnagyobb átlagos korrelációval rendelkezőt, melyet félkövéren szedtünk a 8.1.2.1. táblázatban. Tettük ezt azért, hogy egyenletesen

csökkentsük a prediktorok számát a távolság függvényében, mert így torzul legkevésbé az az elv, hogy a különböző távolságban levő prediktorok egyenlő súllyal legyenek reprezentálva a regressziós függvény meghatározásánál. Így sikerült elérni, hogy a megmaradt prediktorok multikollinearitása jelentősen gyengült. A prediktorok száma pedig 9-re csökkent (Unger et al., 2004).

Ezzel gyakorlatilag meghatároztuk a modell jellegét, amely többváltozós lineáris statisztikus modell az UHI intenzitás becslésére, 9 kiindulási prediktorral ($B, W, H; B1, S1, W1; B2, H2, W2$). Ezután, az eddigi eredményeket felhasználva meghatározzuk a regressziós függvény prediktorait és annak paramétereit, valamint megvizsgáljuk a becslés szignifikanciáját.

8.1.3. A regressziós függvény meghatározása és a szignifikancia kérdése

Miután a modellezési filozófiánk szerint azt szeretnénk elérni, hogy a viszonylag nagyszámú prediktor halmazból kerüljenek kiválogatásra azok a független változók, melyek a lehető legkisebb számban minél jobban tudják közelíteni a prediktandust, az ún. előrehaladó, beléptetési (forward stepwise) lineáris regressziós (FSMLR) szelekciós eljárást alkalmaztuk munkánk során.

A modellváltozók kiválasztását (beléptetését és eltávolítását) minden prediktor vizsgálatánál az algoritmus az adott független változó F-próba szerinti szignifikancia szintjének függvényében végzi el. Az adott változót kiválasztjuk, ha a hozzá tartozó F-próba szignifikancia szintje kisebb, mint a beléptetéshez – a felhasználó által előre – megadott érték és eltávolítjuk, ha az előbbi érték nagyobb, mint az eltávolításhoz megadott küszöbérték. Mindkét megadandó értéknek pozitívnak kell lennie és a beléptetési küszöbnek kisebbnek kell lennie az eltávolításhoz megadott értéknél. Az FSMLR eljárás lényege a következő lépésekből áll:

- első lépésben kiválasztja az adott prediktor halmazból azt a független változót, amely önmagában a legjobban becsli a prediktandust (legnagyobb abszolút értékű korrelációval rendelkezőt), majd belépteti a modell egyenletbe, ha teljesíti a beléptetési kritériumot, amit előre megadtunk
- a második prediktor kiválasztása úgy történik, hogy a maradék elemeket a prediktor halmazból megvizsgálva, a legnagyobb parciális korrelációt mutató elemet lépteti be a modellbe, ha megfelel a beléptetési kritériumnak

- Az eljárás addig folytatódik, amíg a prediktor halmaz üressé nem válik, vagy nincs már több olyan elem a halmazban, ami teljesítené a beléptetési feltételt.

Munkánk során az adott paraméter beléptetésére 0,01-es, míg eltávolítására 0,05-ös F-próba szignifikanciát írtunk elő, ami a paraméterek kiválasztását 95%-os valószínűséggel garantálja. Az alkalmazott eljárás a regressziós függvényben szereplő prediktorok kiválasztása után meghatározza a függvény együtthatóit is a legkisebb négyzetek módszerének alkalmazásával. Az FSMLR módszerről bővebb leírást Miller (2000) munkájában olvashatunk. Az FSMLR eljárást az SPSS 9 szoftver segítségével futtattuk le a 9 prediktorra és a prediktandusra vonatkozóan.

8.1.3.1 táblázat A többváltozós korrelációs együttható értékei és szignifikancia szintjei a vizsgált időszakokban Szegeden (elemszám, n=97) (Unger et al., 2004)

<i>Időszak</i>	<i>Beléptetett prediktor</i>	<i>Többvált. R </i>	<i>Többvált. R²</i>	<i>ΔR²</i>	<i>Becslés szórása</i>	<i>Szignif. Szint</i>
Ápr. 16 – Okt. 15 (nem-fűtési félév)	S1	0.806	0.649	0.000	0,368	0.1%
	S1, H	0.845	0.714	0.065	0,334	0.1%
	S1, H, B1	0.863	0.744	0.030	0,318	0.1%
	S1, H, B1, W1	0.902	0.814	0.070	0,272	0.1%
Okt. 16 – Ápr. 15 (fűtési félév)	S1	0.791	0.626	0.000	0,270	0.1%
	S1, H	0.834	0.696	0.070	0,244	0.1%
	S1, H, B1	0.852	0.726	0.030	0,233	0.1%
	S1, H, B1, W1	0.873	0.762	0.036	0,218	0.1%

A becslés jóságát jelen esetben a többszörös korrelációs együtthatóval mérjük (R), mely a prediktorok együttes becslésének erősségét jelzi. A 8.1.3.1 táblázat jól mutatja, hogy mindkét félévben igen magas többváltozós korrelációs együtthatókat kaptunk, hiszen a nem-fűtési félévben $R=0,902$ illetve a fűtésiben $R=0,873$. Ez azt jelenti, hogy az FSMLR eljárás segítségével kiválogatott 4 prediktor 81%-ban, illetve 76%-ban magyarázza meg a prediktandus változását. Igen magas az R érték szignifikanciája is, hiszen minden esetben 0,1%-os szinten reálisnak mondható statisztikai értelemben a korreláció, tehát a kapcsolat valósnak ítélnélhető a prediktorok és a prediktandus között. A becslés szórása is alacsony (ami szintén a megbízhatóságot jelenti), hiszen a nem-fűtési félévre kapott 0,272-es szám az előforduló maximális UHI intenzitás 3,18-as értékének csak 8,5%-a. Ez a maximális UHI intenzitás értékének becslésekor kb $\pm 0,5$ °C pontosságot ad 95%-os valószínűséggel. Ugyanez a pontosság a fűtési félévre vonatkozóan kb. $\pm 0,4$ °C mértékű.

Megfigyelhető, hogy mindkét időszakban a legmarkánsabb prediktor az $S1$ volt, hiszen önmagában több mint 60%-ban felelős a prediktandus viselkedéséért. Ez azt mutatja, hogy a hősziget kifejlődésében rendkívül nagy szerepe van a hosszúhullámú kisugárzás blokkolásának, hiszen az égbolt-láthatósági index implicit módon ezt reprezentálja. Ugyanakkor mindkét félév során az épületmagasság volt a második legfontosabb prediktor, ami azzal magyarázható, hogy ez egy 3 dimenziós változó és így burkoltan a hőt tárolni (és kisugározni) képes térfogatról ad információt. A beépítettség ugyan fontos, de szerepe már alárendelt (a többi paraméterhez viszonyítva), hiszen mindössze 3%-kal emeli a megmagyarázott hányadot. A nem fűtési félévben a vízfelszín aránya némileg erősebb tényező a beépítettségénél, ami a vízfelszínnek 0 beépítettségéből és erősen hűtő jellegéből fakad, de a téli félévben hatása lényegesen kisebbé válik. Fontos megjegyezni, hogy lényegesen eltérő módosító hatást mutat a hőmérsékleti mezőben egy tengerpart, pl. szemben egy keskenyebb folyóvölgygel (*Alcoforado and Andrade, 2006*).

Ami a korábban említett karakterisztikus távolságot illeti, az eljárás segítségével megállapíthatjuk, hogy az épületmagasságot kivéve, a többi változó esetén az 1-es indexű prediktorok kerültek be a regressziós egyenletbe (*8.1.3.1 táblázat*). Ez azt mutatja, hogy egy adott cella hőmérsékletét – a beépítettségi paraméterek esetén – leginkább a tágabb környezetének beépítettségi struktúrája determinálja! Tehát elsősorban nem az a fontos a hőmérséklet szempontjából, hogy a közvetlen környezetben milyenek a városi felszíni adottságok, hanem egy tágabb környezet tulajdonsági határozzák azt meg. Erre a kérdésre még az eredmények értékelésekor a 8.2 fejezetben visszatérünk.

Az FSMLR eljárással kapott prediktor együtthatók alapján felírhatóak a regressziós függvények is, amelyek mindkét félévre vonatkozóan 4 változósak lesznek:

$$\Delta T_{nf} = -4,291S1 + 0,035H + 0,023B1 + 0,042W1 + 3,824$$

$$\Delta T_f = -3,242S1 + 0,025H + 0,014B1 + 0,021W1 + 3,036$$

ahol ΔT_{nf} és ΔT_f rendre az UHI intenzitás értéke °C-ban a nem-fűtési és a fűtési félévben, $S1$, H , $B1$, $W1$ pedig a már ismert prediktorok.

A regressziós függvények együtthatói is, mint legvalószínűbb értékek jelennek meg, azaz bizonytalansággal terheltek. Ezért a *8.1.3.2 táblázatban* megadjuk a prediktorok együtthatóinak szignifikancia szintjeit, valamint a szórásukat és a 95%-os konfidencia intervallumhoz tartozó határértékeiket. Jól látható, hogy mindegyik prediktor együtthatója

szignifikáns 5%-on, még a fűtési félévben is. A szórások sem mutatnak magas értéket és az együtthatókhoz viszonyított értékeinek nagyságrendje megegyezik mindegyik esetben, ami szintén az együtthatók megbízhatóságát jelzi.

7.2.3.2 táblázat A prediktorok együtthatóinak értéke, szignifikancia szintjük, a szórásuk valamint a 95%-os konfidencia intervallumok határai a vizsgált időszakokban Szegeden (elemszám, n=97) (Unger et al., 2004)

Időszak	Prediktor.	Szignif. Szint	Együtth.	Prediktor szórása	95% konfidencia intervallum.	
					Alsó határ	Felső határ
Ápr. 16 – Okt. 15 (nem-fűtési félév)	S1	0.000	-4,291	0.787	-5,865	-2,717
	H	0.000	0.035	0.006	0,023	0,047
	B1	0.000	0.023	0.003	0,017	0,029
	W1	0.000	0.042	0.007	0,025	0,059
	Const.	0.000	3.824	0.897	2,030	5,618
Okt. 16 – Ápr. 15 (fűtési félév)	S1	0.000	-3.242	0.631	-4,504	-1,980
	H	0.017	0.025	0.005	0,015	0,035
	B1	0.006	0.014	0.003	0,008	0,020
	W1	0.022	0.021	0.006	0,009	0,033
	Const.	0.000	3.036	0.718	1,600	4,472

8.2. A Szegedre és Debrecenre kifejlesztett (2.típusú) statisztikus modell felépítése és a paraméterek becslése

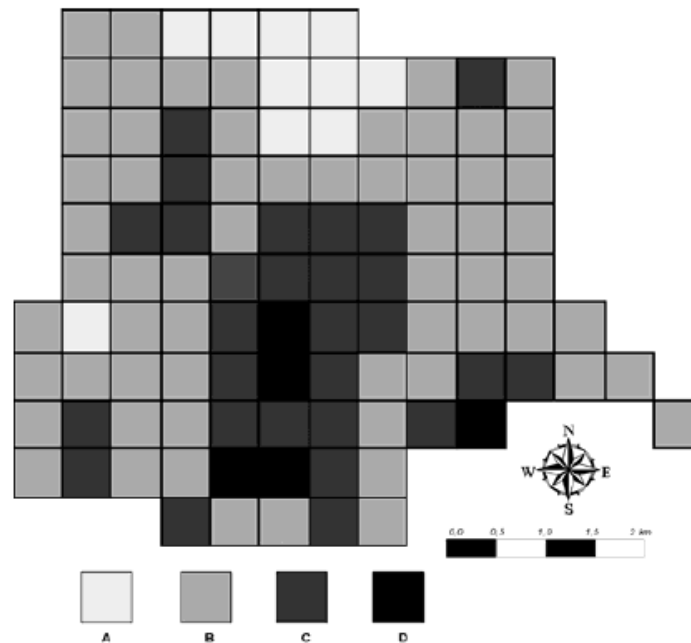
8.2.1 A modellben alkalmazott prediktorok tulajdonságai és térbeli kiterjesztésük

A 2002. márciusától 2003. márciusáig tartó debreceni és szegedi expedíciós mérési eredmények a városi hősziget-intenzitásra vonatkozóan lehetővé tették, hogy mindkét városra készítsünk egy-egy statisztikus modellt, melyben szintén beépítettségi paraméterek segítségével becsüljük az átlagos maximális UHI intenzitást.

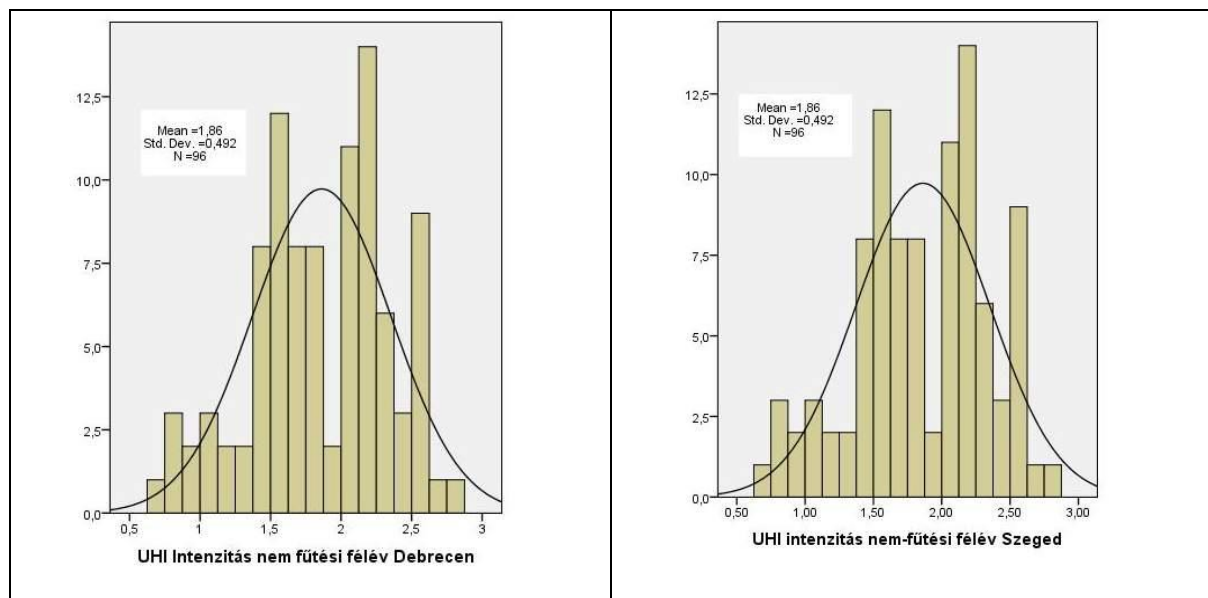
Mivel azonban Debrecen területéről akkoriban nem állt rendelkezésünkre megfelelő légifotó, a Szegednél alkalmazott beépítettségi paraméterek közül az égbolt-láthatósági faktor és az épületmagasság meghatározás GIS eszközökkel nem volt lehetséges. A beépítettségi arányt viszont az 5.2.2. fejezetben leírt módon LANDSAT TM műholdfelvételek segítségével a Szegedi Tudományegyetem kutatói meghatározták az ottani Alkalmazott Geoinformációs Laboratóriumban (7. melléklet). Így rendelkezésre állt a várost lefedő rácshálózatra a beépítettségi arány területi eloszlása, amit a 8.2.1.1. ábrán láthatunk.

A lehetőségeket figyelembe véve, a két városra olyan, **2. típusúnak nevezett statisztikus modellt** dolgoztunk ki, amely csak a beépítettségi arányt és annak területi

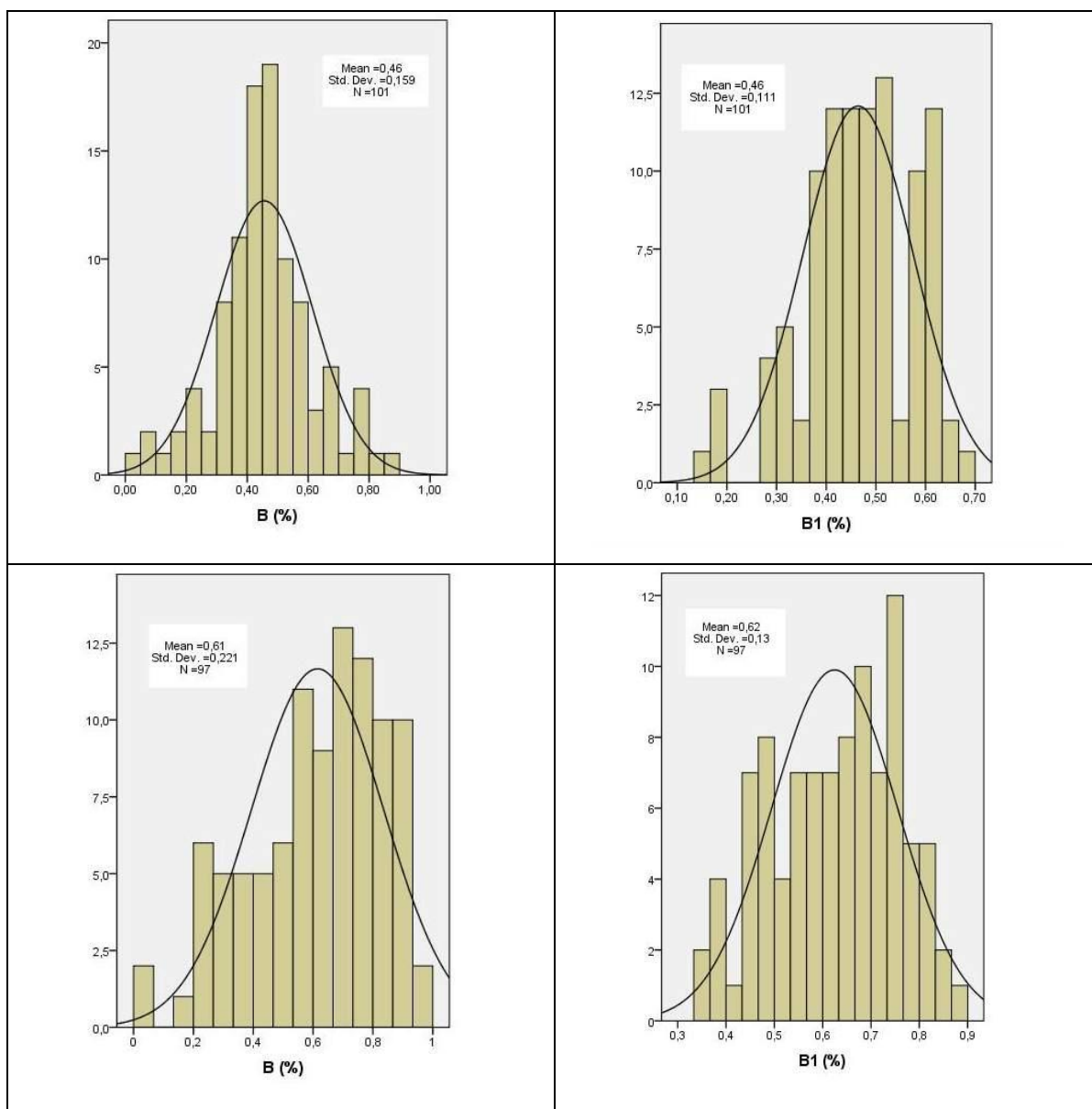
kiterjesztéseit használja fel prediktorként. A kiterjesztéseket a 8.1.1 fejezetben leírtak alapján végeztük el azzal a különbséggel, hogy most a *B3* paramétert is meghatároztuk mindkét városra vonatkozóan. Tettük ezt azért, mert így növeltük a távolságot, ahonnan információt kaphatunk, még akkor is, ha a legtávolabbi területekről származó kiterjesztést bizonyos hibák terhelik (ezekről szoltunk a 8.1.1. fejezetben).



8.2.1.1 ábra A beépítettség arány területi eloszlása a vizsgált területen Debrecenben.
A: <25%; B: 25-50%; C: 50-75%; D: >75% (Kircsi és Szegeci, 2003)



8.2.1.2. ábra Az UHI intenzitások empirikus sűrűségfüggvényei a nem-fűtési félévben Debrecenben és Szegeden, valamint az illesztett normális eloszlás Gauss-görbéi

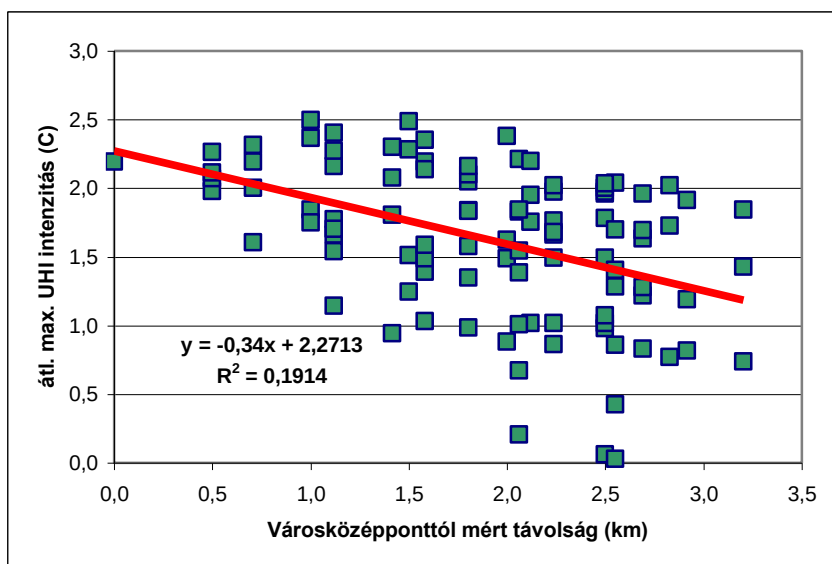


8.2.1.3. ábra A cellákhoz tartozó beépítettségi arány (B) és a cellához legközelebb eső tartományba eső beépítettségi arányok átlagának (B1) empirikus sűrűségfüggvényei és a hozzájuk illesztett normális eloszlások Gauss-görbéi. **Felső sor:** Debrecen, **alsó sor:** Szeged.

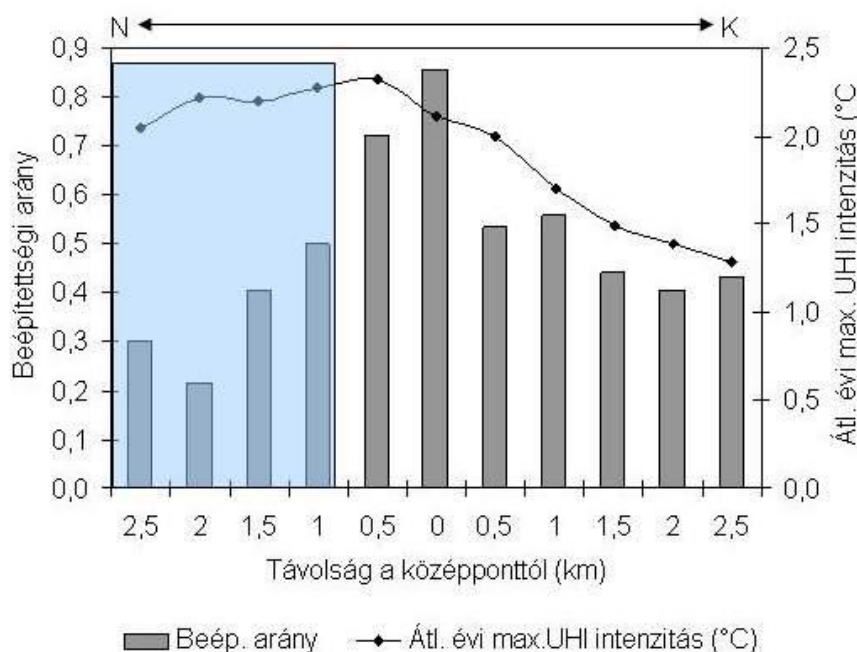
A beépítettségi arány eloszlásáról Szeged esetében már elmondtuk, hogy jól közelíthető normális eloszlással, csakúgy, mint maga az UHI intenzitás is. Elvégezve a szegedi prediktoroknál említett χ^2 -próbát, Debrecen és Szeged esetében is megállapítható, hogy jól közelíthetők normális eloszlással prediktandusok is, melynek szemléltetésére példaként, a 8.2.1.2. ábrát mutatjuk be. Hasonlóképpen igaz ez a beépítettségi arány és területi kiterjesztéseinek vonatkozásában is (8.2.1.3. ábra).

Hasonlóan Szegedhez, Debrecenben is kimutatható összefüggés van a városközponttól való távolság és az UHI intenzitás között, mely kapcsolatot a 8.2.1.4. ábrán mutatjuk be. Eszerint Debrecenben is fontos tényező a középonttól való távolság,

de távolról sem annyira erős a kapcsolat, mint Szeged esetében (8.1.1.3. ábra). Amíg ugyanis Szegednél a távolság az UHI intenzitás változásának mintegy 69%-át magyarázza meg, addig a megmagyarázott hányad Debrecennél csak 19%. Ez persze következik abból, hogy a cívis város szerkezete kevésbé koncentrikus, jelentősebb inhomogenitások vannak a városi felszín geometriájában, struktúrájában.



8.2.1.4. ábra Összefüggés a városközponttól mért távolság és az átlagos maximális UHI intenzitás között Debrecenben (nem-fűtési félév). Jól látható, hogy a megmagyarázott hányad csak 19% és a szórás is nagyobb, mint Szeged esetében 2002-2003



8.2.1.5. ábra A beépítettségi arány és az átlagos évi maximális UHI intenzitás változása a Kelet – Nyugat keresztmetszet mentén Debrecenben a nem-fűtési évszakban (április 16-október 15), 2002-2003. A késsel jelölt téglalap mutatja, hogy a Ny-i területeken a rohamosan lecsökkenő beépíttség-változást csak kis mértékben követi az UHI intenzitás csökkenése.

A korábban, a 8.1.1. fejezetben Szegednél már jelzett probléma, miszerint a hőmérsékleti mező folytonos (így fokozatos) változása miatt, nem követi a prediktorok hirtelen szakadásait (nem jelentkezik hasonlóan nagy gradiens a hőmérsékleti mezőben) a cívus városban is jól megfigyelhető, ahogy az a 8.2.1.5. ábrán szemléletesen látszik. A K - Ny irányú keresztmetszetet megfigyelve jól látható, hogy a város Ny-i pereme felől a városközpont felé igen nagy gradienssel nő a beépítettség, ugyanakkor a hőmérséklet szinte stabilan magas értékeket mutat, alig változik. Tehát Debrecen esetében is indokolt a beépítettségi paramétereknek a területi kiterjesztéseit bevonni a modellezési eljárásba.

Ennek megfelelően mindkét város esetében 4-4 prediktor lesz a kiindulási halmazban az FSMLR eljárás alkalmazása előtt (B , $B1$, $B2$, $B3$). Tekintve, hogy a modell építésének az elve pontosan ugyanaz, mint amit korábban bemutatunk, most rögtön rátérünk a modellegyenletek és szignifikanciájuk tárgyalására.

8.2.2. A regressziós függvény meghatározása és a szignifikancia kérdése

A beépítettségi arány (B) és területi kiterjesztései ($B1$, $B2$, $B3$) mindkét vizsgált város esetén a kiinduló prediktor-halmazt reprezentálták. A prediktorok kiválasztása ugyanazon a módon történt, mint a korábbi szegedi modellnél: az SPSS 9 program már említett FSMLR eljárását alkalmazva határoztuk meg a regressziós függvények prediktorait és azok együtthatóit, itt is lineáris közelítést alkalmazva. Jelen esetben a multikollinearitást nem vizsgáltuk a kis prediktor elemszám miatt, így nem zártunk ki előzetesen egyetlen prediktort sem. Értelemszerűen, mindkét város esetén fűtési és nem-fűtési félévekre határoztuk meg a regressziós egyenleteket.

8.2.2.1 táblázat A többváltozós korrelációs együttható értékei és szignifikancia szintjei a vizsgált időszakokban Szegeden (elemszám, $n=97$) (Bottyán et al., 2004)

Időszak	Beléptetett paraméter	Többvált. R	Többvált. R ²	ΔR^2	Becslés szórása	Szign. szint
Április 16 – Október 15 (nem fűtési félév)	$B1$	0.737	0.543	0.000	0,335	0.1%
	$B1, B$	0.801	0.641	0.098	0,298	0.1%
	$B1, B, B3$	0.820	0.673	0.022	0,286	0.1%
	$B1, B, B3, B2$	0.858	0.736	0.063	0,257	0.1%
Október 16 – Április 15 (fűtési félév)	$B3$	0.777	0.603	0.000	0,323	0.1%
	$B3, B$	0.842	0.709	0.106	0,275	0.1%
	$B3, B, B1$	0.860	0.739	0.030	0,246	0.1%

A 8.2.2.1. táblázatban láthatjuk a kapott modell korrelációs együtthatóit és a korreláció szorosságának szignifikancia szintjeit Szeged esetében, míg a 8.2.2.2 táblázatban ugyanezeket a statisztikákat Debrecenre vonatkozóan.

8.2.2.2 táblázat A többváltozós korrelációs együttható értékei és szignifikancia szintjei a vizsgált időszakokban Debrecenben (elemszám, $n=101$) (Bottyán et al., 2005)

<i>Időszak</i>	<i>Beléptetett paraméter</i>	<i>Többvált. R </i>	<i>Többvált. R²</i>	<i>ΔR^2</i>	<i>Becslés szórása</i>	<i>Szign. szint</i>
Április 16 – Október 15 (nem fűtési félév)	B1	0,561	0,315	0,000	0,421	0,1%
	B1, B3	0,588	0,346	0,031	0,412	0,1%
Október 16 – Április 15 (fűtési félév)	B3	0,451	0,203	0,000	0,486	0,1%
	B3, B1	0,505	0,255	0,052	0,442	0,1%
	B3, B1, B2	0,552	0,305	0,050	0,427	0,1%

Jól látható, hogy Szeged esetében mindkét félévben igen magas többváltozós korrelációs együtthatókat kaptunk, hiszen a nem-fűtési félévben $R=0,858$ illetve a fűtésiben $R=0,860$. Ez azt jelenti, hogy az FSMLR eljárás segítségével kiválogatott 4 prediktor mindkét esetben 74%-ban magyarázza meg a prediktandus változását. Igen magas az R érték szignifikanciája is, hiszen minden esetben 0,1%-os szinten reálisnak mondható statisztikai értelemben a korreláció, tehát a kapcsolat valósnak ítélnélhető a prediktorok és a prediktandus között (Bottyán et al., 2004). A becslés szórása is alacsony (ami szintén a megbízhatóságot jelenti), hiszen a nem-fűtési félévre kapott 0,257-es szám az előforduló maximális UHI intenzitás $2,70^{\circ}\text{C}$ -os értékének csak 9,5%-a. Ez a maximális UHI intenzitás értékének becslésekor kb. $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ pontosságot ad 95%-os valószínűséggel, amely a fűtési félévre vonatkozóan is ugyanennyi.

Ha a debreceni modellt statisztikákat nézzük, akkor szembejűnik, hogy a beépítettségi prediktorok a nem fűtési félévben már csak 35%-át magyarázzák meg az UHI intenzitás változásának, míg a fűtési félévben mindössze 31%-át. Ennek ellenére még 0,1%-os szinten szignifikáns a regresszió korrelációs együtthatója mindkét félévben. Nyilvánvalóan a szórások is nagyobbak, mert a megmagyarázott rész csökkenésével a bizonytalanság is nő a becslésben. A nem fűtési félév esetén a kapott 0,412-es szórásérték az adott félév UHI intenzitásának maximális értékéhez ($2,50^{\circ}\text{C}$) viszonyítva 16%, ami azt jelenti, hogy ennek a maximális értéknek a becslésekor a pontosság csak $\pm 0,8^{\circ}\text{C}$ 95%-os biztonsággal. A fűtési félévben az $1,87^{\circ}\text{C}$ -os maximális UHI intenzitás mellett a szórás már mintegy 23% és így a maximális UHI intenzitásnak a becslése pontossága $\pm 0,9^{\circ}\text{C}$ szintén 95%-os szinten.

Ha megvizsgáljuk a regressziós függvényben levő prediktorokat, akkor azt láthatjuk, hogy mindkét város esetében, a nem fűtési félévben, a B1 prediktor a legerősebb, ugyanakkor a fűtési időszakban a B3! Ez azt jelenti, hogy hasonlóan a korábbi szegedi eredményekhez, a nyári félévben mind a két vizsgált város esetén a beépítettség

szempontjából továbbra is az a meghatározó, hogy a tágabb környezet mennyire van beépítve. Tehát elsősorban nem az a fontos a hőmérséklet szempontjából, hogy a közvetlen környezetben milyenek a városi beépítettségi adottságok, hanem egy tágabb környezet tulajdonsági határozzák azt meg. A fűtési félévben a legerősebb prediktor mindkét városnál a *B3*. Azonban ha megfigyeljük a 8.2.2.3. és a 8.2.2.4 táblázatban a *B3* és *B2* prediktorok együtthatójának előjelét észre vehetjük, hogy azok negatívak! Ez azt jelenti, hogy akkor várhatunk magasabb UHI intenzitást, ha a nagyobb távolságban lévő területek beépítettsége kicsi, de a közelebbi környezet erősen be van építve, vagyis ha a városban a belső területeken vagyunk.

Az FSMLR eljárással kapott prediktor együtthatók alapján felírhatóak a regressziós függvények is, amelyek a következők lesznek Debrecenre vonatkoztatva:

$$\Delta T_{nf} = 2,258 B1 - 3,242 B3 + 2,056$$

$$\Delta T_f = -4,240 B3 + 1,252 B1 - 1,537 B2 + 3,281$$

illetve a Szegedre érvényes regressziós egyenletek:

$$\Delta T_{nf} = 0,082 B1 + 0,642 B - 7,340 B3 - 3,237 B2 + 8,080$$

$$\Delta T_f = -3,614 B3 + 0,743 B + 1,137 B1 + 2,789$$

ahol ΔT_{nf} és ΔT_f rendre az UHI intenzitás értéke °C-ban a nem-fűtési és a fűtési félévben, *B*, *B1*, *B2*, *B3* pedig a prediktorok. Megadjuk a prediktorok együtthatóinak szignifikancia szintjeit, valamint a szórásukat és a 95%-os konfidencia intervallumhoz tartozó határértékeiket. Jól látható, hogy mindegyik prediktor együtthatója szignifikáns 5%-on, még a fűtési félévben is mindkét vizsgált város esetében.

8.2.2.3. táblázat A prediktorok együtthatóinak értéke, szignifikancia szintjük, a szórásuk valamint a 95%-os konfidencia intervallumok határai a vizsgált időszakokban, Szegeden (elemszám, $n=97$)

Időszak	Prediktor.	Szignif. Szint	Együtth.	Prediktor szórása	95% konfidencia intervallum.	
					Alsó határ	Felső határ
Ápr. 16 – Okt. 15 (nem-fűtési félév)	<i>B1</i>	0,000	0,082	0,405	-0,728	0,892
	<i>B</i>	0,000	0,642	0,158	0,326	0,958
	<i>B3</i>	0,000	-7,340	1,290	-9,920	-4,760
	<i>B2</i>	0,000	-3,237	0,695	-4,627	-1,847
	<i>Const.</i>	0,000	8,080	1,402	5,276	10,884
Okt. 16 – Ápr. 15 (fűtési félév)	<i>B3</i>	0,000	-3,614	0,848	-5,310	-1,918
	<i>B</i>	0,000	0,743	0,159	0,425	1,061
	<i>B1</i>	0,000	1,137	0,346	0,445	1,829
	<i>Const.</i>	0,001	2,789	0,701	1,387	4,191

8.2.2.4. táblázat A prediktorok együtthatóinak értéke, szignifikancia szintjük, a szórásuk valamint a 95%-os konfidencia intervallumok határai a vizsgált időszakokban, Debrecenben (elemszám, $n=101$)

Időszak	Prediktor.	Szignif. Szint	Együtth.	Prediktor szórása	95% konfidencia intervallum.	
					Alsó határ	Felső határ
Ápr. 16 – Okt. 15 (nem-fűtési félév)	B1	0,000	2,258	0,471	1,316	3,200
	B3	0,033	-3,242	1,497	-6,236	-0,248
	Const.	0,014	2,065	0,824	0,417	3,713
Okt. 16 – Ápr. 15 (fűtési félév)	B3	0,000	-4,240	1,076	-6,392	-2,088
	B1	0,001	1,252	0,352	0,548	1,956
	B2	0,010	-1,537	0,585	-2,707	-0,367
	Const.	0,000	3,281	0,670	1,941	4,621

A kapott eredmények értékelését a 8.4. fejezetben tesszük meg, de egy fontos dologra itt szeretnénk rávilágítani. Miután a modellben csak a beépítettségi arány és annak korábban vázolt területi kiterjesztései szerepelnek, lehetőségünk van arra rámutatni, hogy mennyivel emelkedett a megmagyarázott hányad a becslésben ahhoz képest, hogy ha csak a kiindulási beépítettségi aránnyal (B) becsülnénk az UHI intenzitást. A 8.2.2.5. táblázat mutatja összesítve, hogy amennyiben bevonjuk a modell-építési eljárásba a kiterjesztett paramétereket is, az R^2 értékek jelentős mértékben megnőnek, ami azt jelzi, hogy a – minden esetben 0,1%-os szinten szignifikáns – regressziós egyenletek pontosabb becslést adnak. A megmagyarázott hányad növekedése Szegeden mintegy kétszer nagyobb, mint Debrecen esetében, de ez abból adódik, hogy a város erősen körszimmetrikus geometriája és struktúrája felerősíti a beépítettség szerepét. Ez megmutatkozik már a pusztán a beépítettségi arányból történő becslésnél is. A kiterjesztett prediktorok bevonásával nyert többlet a megmagyarázott hányadban a nem fűtési félévben 24%, míg a fűtésiben 23%!

Debrecennél viszont az említett szabálytalan városszerkezetből adódó hatások kevésbé magyarázhatók csak a beépítettséggel, így ott már az induló - csak B prediktorral

8.2.2.5. táblázat A megmagyarázott variancia növekedése a kiterjesztett prediktorok bevonása során a 2.típusú modellekben Debrecenben és Szegeden a vizsgált időszakban

Időszak	Város	Pediktorok	Többsvált. $ R $	Többsvált. R^2	ΔR^2	Szign. szint
Április 16 – Október 15 (nem fűtési félév)	Debrecen	B	0,469	0,220	0,126	0,1%
		$B1, B3$	0,588	0,346		0,1%
	Szeged	B	0,701	0,492	0,244	0,1%
		$B1, B, B3, B2$	0,858	0,736		0,1%
Október 16 – Április 15 (fűtési félév)	Debrecen	B	0,379	0,144	0,161	0,1%
		$B3, B1, B2$	0,552	0,305		0,1%
	Szeged	B	0,713	0,509	0,230	0,1%
		$B3, B, B1$	0,860	0,739		0,1%

történő – becslésnél is kisebb megmagyarázott varianciát kapunk (rendre 0,220 és 0,144 a nem fűtési és a fűtési félévben). A megmagyarázott hányad növekedése sem annyira látványos, mint Szegeden (rendre 12% és 16% a két félévben), mégis nagy jelentősége van elvi modellezési, és ebből adódóan gyakorlati szempontból egyaránt.

Jelentősége abban áll, hogy plusz információt nyertünk ki a mért (megfigyelt, számított) prediktor értékekből, anélkül, hogy újabb méréseket kellett volna végeznünk! Ez lehetővé teszi számunkra, hogy a meglévő kiindulási prediktor értékekből minél pontosabban becsljük a prediktandust. Gyakorlati értelemben pedig ezáltal megbízhatóbbá, használhatóbbá tettük statisztikus modelljeinket. Értelemszerűen ez a megállapítás az 1. és 2. típusú modellekre egyaránt vonatkozik.

8.3. Az 1. típusú modell által generált és a mért UHI mező összehasonlítása Szegeden

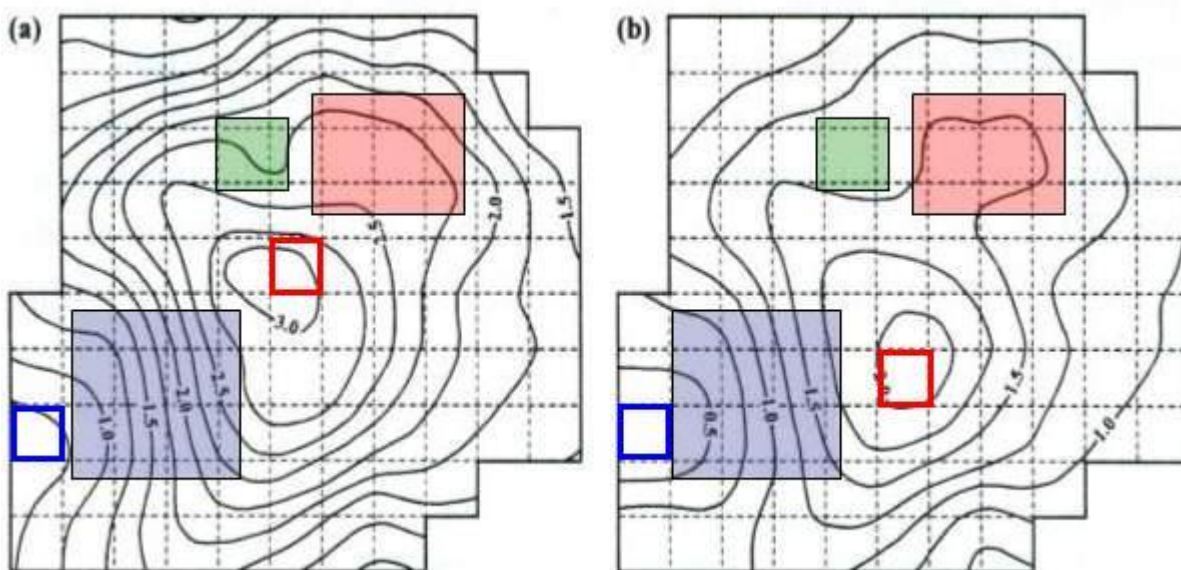
Ebben az alfejezetben a korábban meghatározott modellek (B , S , H , W és kiterjesztései) alapján bemutatjuk és összehasonlítjuk az UHI intenzitás területi eloszlását, mindkét félévre vonatkozóan, a ténylegesen mért, valamint a regressziós egyenletekből számított és interpolált UHI hőmérsékleti mező segítségével. Lehetőségünk volt Szeged esetében a modell által generált UHI mezőnek egy független mintával való összevetésére is. A modellt az 1999. március-2000. februárig tartó mérési kampányból származó hőmérsékleti értékekből származtattuk, de később a második expedíciós mérési időszakban (2002. március – 2003. március) felvett UHI adatokon tesztelhattuk.

Ahhoz, hogy a modellek által generált hőmérsékleti (UHI intenzitás) mezőket ábrázolni tudjuk, első lépésben minden egyes cellában (Szegeden $n=97$) meghatároztuk a regressziós függvény értékeit a figyelembe vett prediktorok alapján. Az UHI intenzitás mért és számított átlagértékei (mindkét félévre és az egész évre vonatkozóan) természetesen rendelkezésre álltak korábbról.

A hőmérsékleti mező területi eloszlásának megjelenítése célszerűen izovonalas ábrázolási mód, amennyiben 2 dimenzióban gondolkodunk. Mi ezt az ábrázolást választottuk, viszont ehhez szükség volt a cellaadatok interpolációjára is, amit a Surfer 7. programmal végeztünk el. Az alkalmazott interpolációs technika (mivel nem gyorsan változó, hanem térben folytonos mezőről van szó) a standard Kriging eljárás volt lineáris variogram alkalmazása mellett, amely széles körben alkalmazott geostatistikai interpolációs eljárás (*Bottyán és Unger, 2003*). A módszer előnye a vizuális megjelenítés

mellett az, hogy megpróbálja visszaadni az alapadatokban rejlő trendet: így fordulhat elő, hogy egy-egy cellán akár több izovonal is átfut (amihez a témához illeszkedő, de mégiscsak szubjektíven megválasztott izovonalköz is hozzájárul).

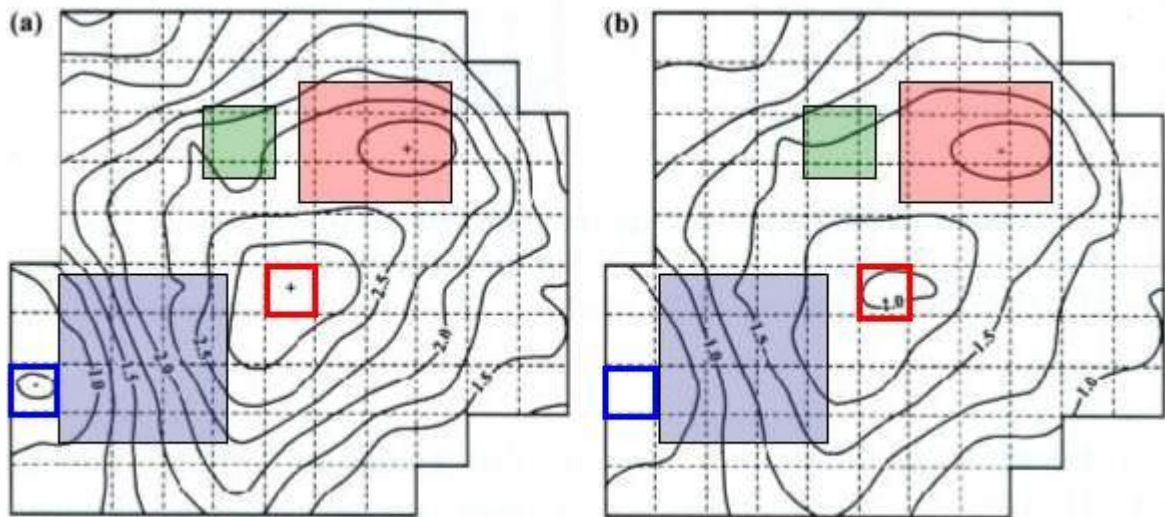
A 8.3.1. ábrán láthatjuk a mért átlagos maximális UHI intenzitás területi eloszlását Szegeden a jelzett (1999-2000) mérési időszakból származó mérések alapján, a nem fűtési és a fűtési félévben. Megfigyelhetjük a várost koncentrikusan lefedő izovonalakat, melyeknek futását a város felszínének geometriai és fizikai tulajdonságai befolyásolják. A 8.3.2. ábra pedig a modellek egyenletei alapján számított átlagos maximális UHI intenzitás területi eloszlását mutatja Szegeden mindkét félévre vonatkozóan.



8.3.1. ábra A mért átlagos maximális UHI intenzitás területi eloszlása Szegeden (1999-2000). (a) nem-fűtési félév, (b) fűtési félév. **Sötét piros cella:** maximális mért UHI intenzitás (°C) helye; **Sötét kék cella:** minimális mért UHI intenzitás (°C) helye. A színezett téglalapok magyarázatát lásd a szövegben (Bottyán et al., 2003, nyomán módosítva)

A 8.3.1. és 8.3.2. ábrákat összehasonlítva világosan látható, hogy a modell által leírt UHI intenzitás területi eloszlása jól követi a mért értékek eloszlását. A modellek statisztikai vizsgálatok már leírtuk azok kvantitatív „jóságát”, most vizuálisan is megállapíthatjuk, hogy a mért és a becsült mező területi szerkezete is nagyon jó összhangban van egymással. Észrevehető, hogy azokon a területeken, ahol a mért UHI intenzitás értéke nagy gradienssel változik, ott a modell által generált mező is nagyobb izoterma sűrűséget produkál, azaz jól követi a változást. Különösen igaz ez az említett ábrákon kék színű téglalappal jelzett DNy-i területre, ahol egyébként a városi felszíni tulajdonságok is gyorsan változnak. Fontos, hogy bár a hőmérsékleti mező alulbecsült a modellek által, a hősziget termikus szerkezetét ezeken a nagy gradiensű területeken is jól

közelítik a modell becslései. Térben a modell nagyon jól „fogja” az extrém hőmérsékletű területeket is (az említett mindkét félévben megfigyelhető alulbecsléssel együtt). Az ábrákon sötétpiros négyzet jelzi a legmagasabb, és kék a legalacsonyabb UHI intenzitást mutató cellát. A legalacsonyabb hőmérsékletű területek mindkét félévben ugyanott jelennek meg a mért és a becsült hőmérsékleti mezőben egyaránt. A maximum értékek pozíciója pedig szomszédos cellákban van mindkét félévben, mindkét mező esetén.



8.3.2. ábra A modell egyenletek alapján számított átlagos maximális UHI intenzitás területi eloszlása Szegeden. (a) nem fűtési félév, (b) fűtési félév. **Sötét piros cella:** maximális becsült UHI intenzitás (°C) helye; **Sötét kék cella:** minimális becsült UHI intenzitás (°C) helye. A színezett téglalapok magyarázatát lásd a szövegben (Bottyán et al., 2003 nyomán módosítva)

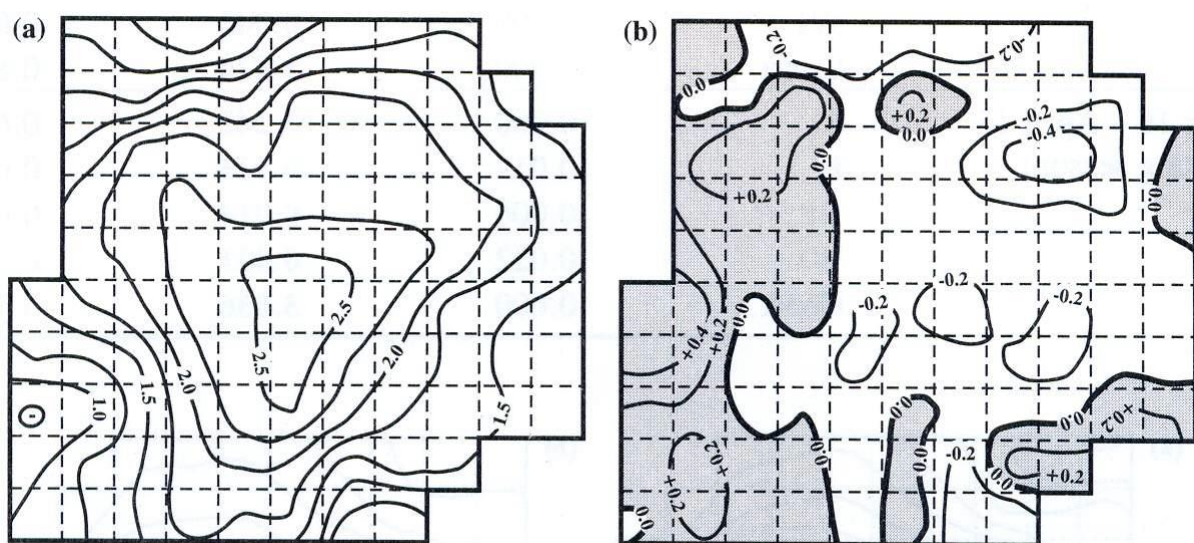
A város ÉK-i területén elhelyezkedő magas, tömbházas, panel épületekből álló lakótelepeken megjelenő magasabb hőmérséklet világosan megjelenik a 8.3.1. és a 8.3.2. ábra piros színű téglalapjával jelzett területen belül egyaránt. Ebben az irányban jelentősen megnyúlnak az izotermák a mért mezőkben, amely szerkezet nagyon jól megfigyelhető a becsült eloszlásban is.

Mindkét félévben, de különösen a nyári időszakban, a város középpontjától É-ra elhelyezkedő beépítetlen terület (ábrákon zöld négyzettel jelölve) alacsonyabb UHI értéke is markánsan jelenik meg a mért mezőben, amit az izotermák behajlása mutat (8.3.1. ábra). Ezzel összhangban a 8.3.2. ábrán szintén zöld téglalappal jelölt területén is megjelenik ez a lokális inhomogenitás a számított mezőkben, jó közelítéssel ott, ahol a mért inhomogenitás is elhelyezkedik. Különösen a nyári félévben látszik markánsan ez az anomália, a mért és a becsült mezőkön egyaránt.

Amint arra az alfejezet elején utaltunk, elvégeztük a nem fűtési félévre vonatkozóan a modell által generált UHI intenzitás területi eloszlásának összehasonlítását egy későbbi

időintervallumban történt mérés területi eloszlásával. Mint a 8.3.3. (a) ábrán látható, bemutatjuk a 2002-es év nyári (nem fűtési) félévében mért átlagos maximális UHI intenzitás területi eloszlását, ugyanazzal a módszerrel megjelenítve, ahogyan azt korábban leírtuk. Mellette pedig (8.3.3. (b) ábra) az említett mért UHI intenzitás (2002-ből) és a korábbi mérési időszak (1999-ből) adataiból kapott, az 1. típusú modell által szolgáltatott UHI intenzitás értékek különbségeinek területi eloszlását láthatjuk (Bottyán et al., 2003). A 8.3.3. (b) ábrán vastag fekete izovonal választja el egymástól a pozitív (sötét) és negatív (világos) anomáliájú területeket Szegeden. Erről a nagyon fontos ábráról a következő lényeges megállapításokat olvashatjuk le:

- A város teljes területén az eltérések abszolút értékben mindenütt kevesebbek, mint $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, vagyis a modell a teljes felületen produkálja ezt a pontosságot!
- A vizsgált terület kb. 57%-án (kb. 55 cella, $13,75\text{ km}^2$) a modell felülbecsli a tényleges hőmérsékletet, a többi részen pedig alatta marad annak.
- A legerősebb anomáliák a korábban említett felszíni (geometriai, szerkezeti) inhomogenitások közelében találhatók, pl. ÉK-i lakótelepek (negatív eltérés) és Ny-i városperem (pozitív eltérés), ahol a $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot is meghaladja a különbség. Ezek a területek azonban mindössze a teljes felszín 4%-ára terjednek ki (kb. 4 cella, 1 km^2).
- Ugyanakkor a $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál abszolút értékben kisebb anomáliával rendelkező régió a vizsgált terület 75%-át fedi le (73 cella , $18,2\text{ km}^2$), ami azt mutatja, hogy a város nagy területén igen megbízható a modell adta becslés.



8.3.3. ábra (a) A 2002-ben mért átlagos maximális UHI intenzitás($^{\circ}\text{C}$) területi eloszlása Szegeden a nem-fűtési félévre vonatkozóan. (b) A mért és a modell által becsült UHI intenzitás ($^{\circ}\text{C}$) különbségeinek területi eloszlása Szegeden a nem fűtési félévben (Bottyán et al., 2003).

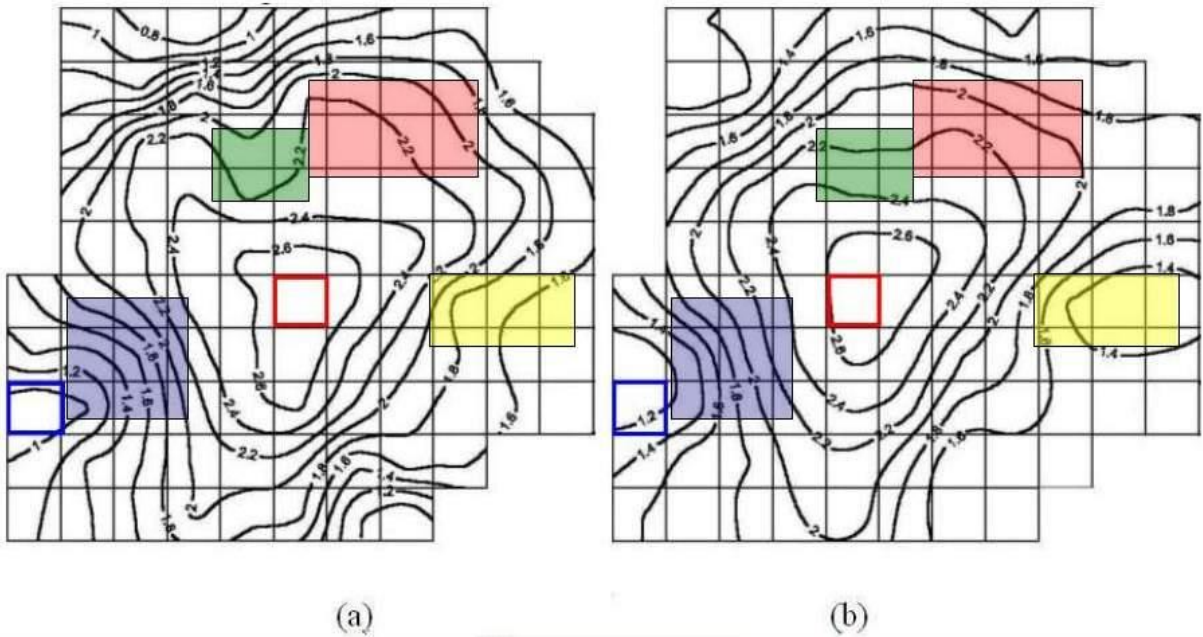
Összességében elmondható az általunk Szegedre kidolgozott 1. számú statisztikus évszakos modellekről, hogy az alkalmazott prediktorok és a modell felépítése lehetővé teszi számunkra, hogy az átlagos maximális UHI intenzitást jól tudjuk becsülni kvantitatív módon és térben egyaránt.

8.4. A 2. típusú modell által generált és a mért UHI mező összehasonlítása Szegeden és Debrecenben

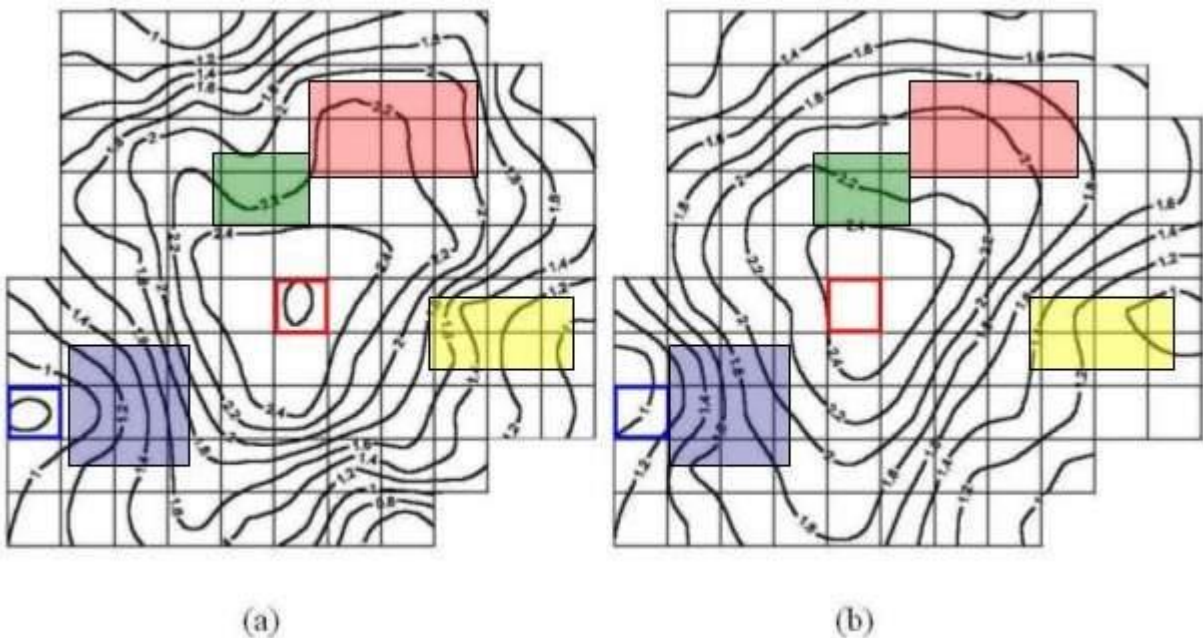
Az alábbiakban a 8.2. fejezetben bemutatott 2. típusú - csak a beépítettségi arányt (B) és annak kiterjesztéseit ($B1$, $B2$, $B3$) tartalmazó - statisztikus modellek által előállított UHI intenzitás-mezőket vizsgáljuk meg. (A modell kialakításához szükséges UHI intenzitás adatokat a 2002-2003-ban végzett mérési eredményekből számoltuk.)

A vizsgált területre vonatkozóan az UHI intenzitás területi eloszlását ugyanazzal az interpolációs és rajzolási technikával (standard Kriging) és szoftverrel (Surfer 7.) készítettük el, mint a korábbiakban. Annyiban tértünk csak el, hogy az izotermákat $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os sűrűség helyett $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ossal rajzoltuk, mert a 2002-2003-as expedíciós mérések során kisebb átlagos maximális UHI intenzitás csúcserőtekeket mértünk. Így szűkült az ábrázolandó hőmérsékleti tartomány, ezért ha elegendően sűrű izotermát akarunk látni a felszínen, csökkenteni kell a léptéket (sűrűbb izoterma hálózat finomabban rajzolja ki a mező termikus tulajdonságait). Mindkét városnál a korábban bevezetett két féléves bontást alkalmazzuk most is.

Szeged esetében a pusztán beépítettségi prediktorokon alapuló modellek lényegesen jobb közelítést adnak az UHI intenzitás területi eloszlására (ennek oka a már említett erősen körszimmetrikus városstruktúra) (*Bottyán et al.*, 2004). A nem fűtési félévben a minimális hőmérsékletű cellák helye megegyezik, a maximális értékek pedig igen közel (szomszédos cellában) találhatóak (8.4.1. ábra). Ugyanakkor a becslés UHI intenzitás értéke a minimumnál kb. $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, a maximumnál $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, ami igen jónak mondható. Jól követi a modell hőmérsékleti mezeje a városban található inhomogenitásokat is, pl. az ÉK-i lakótelepek magasabb hőmérsékleteit (piros téglalap), a DNy-i városperem kevésbé beépített régiójában létrejövő alacsonyabb UHI intenzitást (kék téglalap). Észrevehető – igaz, már kevésbé szembetűnő –, hogy a Szeged középpontjától kissé ÉNy-ra elhelyezkedő lokálisan alacsony hőmérsékletű terület (zöld téglalap) is megjelenik a modell által számított mezőben, hasonlóan a Tisza medre (sárga téglalap) okozta irregularitáshoz.

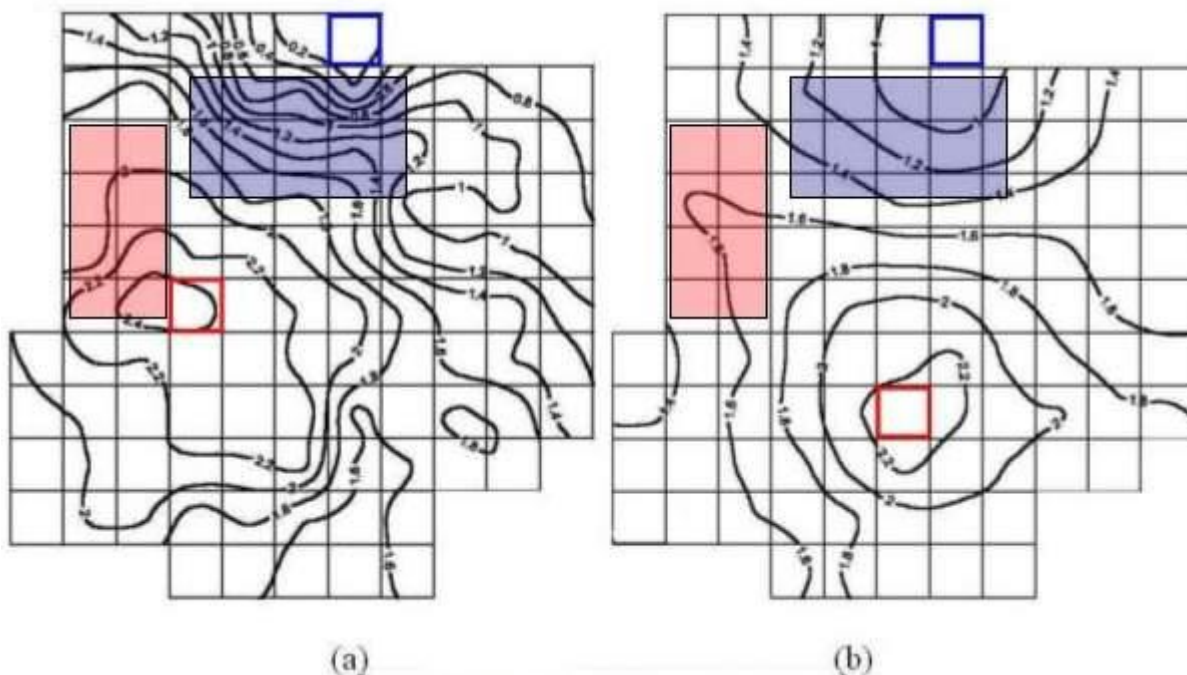


8.4.1 ábra **(a)** A 2002-ben mért átlagos maximális UHI intenzitás ($^{\circ}\text{C}$) területi eloszlása Szegeden a nem fűtési félévre vonatkozóan. **(b)** A modell által becsült UHI intenzitás ($^{\circ}\text{C}$) területi eloszlása Szegeden a nem fűtési félévben. A **piros színnel keretezett cellák** a legmelegebb, a **kék színnel keretezettek** a leghidegebb UHI intenzitást ($^{\circ}\text{C}$) jelzik. A színes téglalapok magyarázata a szövegben (Bottyán et al., 2004 nyomán módosítva).



8.4.2. ábra **(a)** A 2002-2003-ban mért átlagos maximális UHI intenzitás ($^{\circ}\text{C}$) területi eloszlása Szegeden a fűtési félévre vonatkozóan. **(b)** A modell által becsült UHI intenzitás ($^{\circ}\text{C}$) területi eloszlása Szegeden a fűtési félévben. A **piros színnel keretezett cellák** a legmelegebb, a **kék színnel keretezettek** a leghidegebb UHI intenzitást ($^{\circ}\text{C}$) jelzik. A színes téglalapok magyarázata a szövegben (Bottyán et al., 2004 nyomán módosítva).

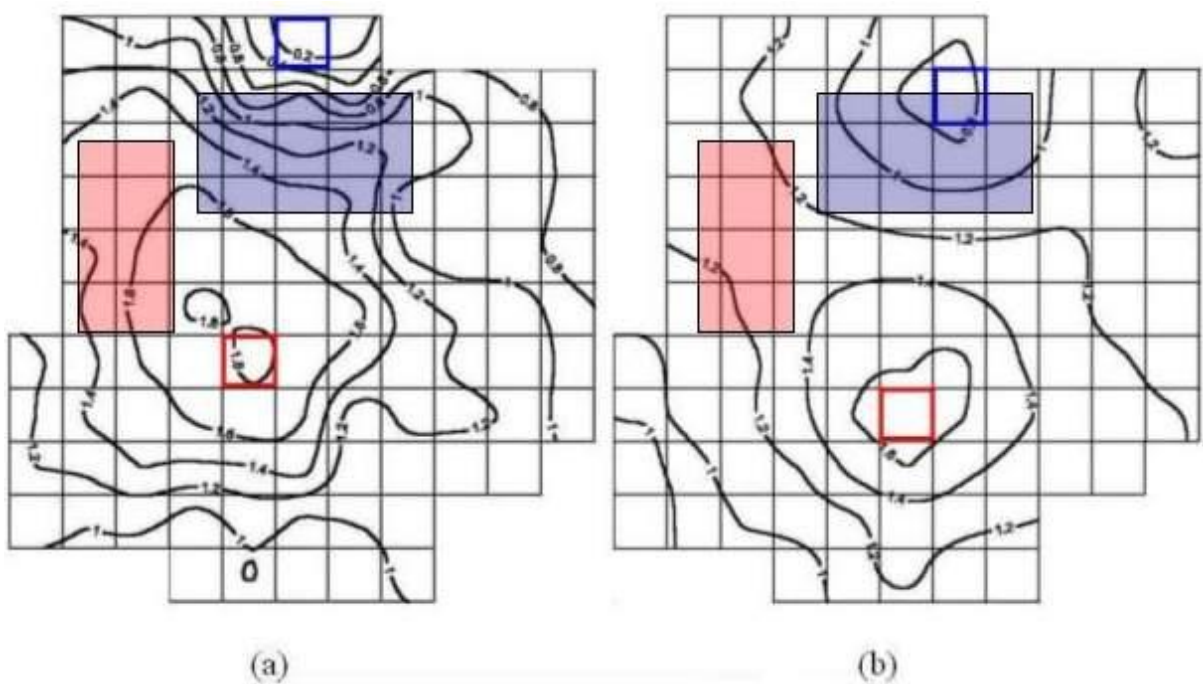
A fűtési félévben (8.4.2. ábra) alapvetően hasonló a két UHI intenzitás területi eloszlásának mintázata, mint ahogy a nem fűtési félévben láthattuk, de az értékek alacsonyabbak mind a mért, mind pedig a becsült mező esetén. A szélsőértékek helyeit jól adja meg a modell, viszont a téli félévben kb. 0,2 °C-kal alulbecsli a maximumot és ugyanennyivel többet ad a minimumra.



8.4.3. ábra **(a)** A 2002-ben mért átlagos maximális UHI intenzitás(°C) területi eloszlása Debrecenben a nem fűtési félévre vonatkozóan. **(b)** A modell által becsült UHI intenzitás (°C) területi eloszlása Debrecenben a nem fűtési félévben. A **piros színű cellák** a legmelegebb, a **kék színűek** a leghidegebb UHI intenzitást (°C) jelzik. A színes téglalapok magyarázata a szövegben (Bottyan et al., 2005 nyomán módosítva).

Debrecen nem fűtési fél évében a mért átlagos maximális UHI intenzitás területi eloszlását a 8.4.3.(a) ábrán látjuk. Mellette helyezkedik el a modell által adott becslés UHI intenzitás eloszlása ugyanarra az időszakra (8.4.2. (b) ábra). A cívis város kevésbé koncentrikus városszerkezete jól visszatükröződik a mért és a modell által meghatározott hőmérsékleti többlet eloszlásában egyaránt (inkább egyfajta dipólus szerkezet ismerhető fel). Jól megfigyelhető, hogy az izovonalak futásában van egy ÉNy – DK-i tengely mentén való elrendeződés, ami alapvetően a város északi peremén elhelyezkedő nagy kiterjedésű erdős-ligetes területnek köszönhetően alakult ki. Itt találjuk a város leghidegebb pontját (kék cellák) és itt láthatjuk a legnagyobb eltérést a mért és a modellből becsült UHI intenzitás között (kb. 0,8-0,9 °C-os fölébecslés). A mért UHI intenzitás mező nagy gradienssel csökken DNy-ÉK-i irányban, ami jól egybeesik a szintén itt megfigyelhető erős

beépítettség-csökkenéssel. A hőmérsékleti gradiens mértéke a mért UHI intenzitás mező alapján kb. $1,6\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ a kék téglalappal jelölt régióban, míg a becsült mező esetén mindössze $0,5\text{ }^{\circ}\text{C/km}$. A becsült UHI intenzitás mező ezt a gyors csökkenést nem tudja elég jól követni, így a kék színnel jelölt cellában kapott hőmérsékleti értékek között nagy lesz a különbség. A város Ny-i és DNy-i részén elhelyezkedő lakótelepek nagy blokkházai itt is módosítják az izotermák futását és ezen a területen mértük a legmagasabb UHI intenzitás értéket is (piros színnel jelölt cella a 8.4.3. (a) ábrán), amit a modell mintegy $0,2^{\circ}\text{C}$ értékkel alábecsül és a térbeli helyét is kb. $1,5\text{ km}$ -rel DK-re tolja el (piros színnel jelölt cella a 8.4.3. (b) ábrán).



8.4.4. ábra (a) A 2002-2003-ban mért átlagos maximális UHI intenzitás ($^{\circ}\text{C}$) területi eloszlása Debrecenben a fűtési félévre vonatkozóan. (b) A modell által becsült UHI intenzitás ($^{\circ}\text{C}$) területi eloszlása Debrecenben a fűtési félévben. A **piros színű cellák** a legmelegebb, a **kék színűek** a leghidegebb UHI intenzitást ($^{\circ}\text{C}$) jelzik. A színes téglalapok magyarázata a szövegben (Bottyán et al., 2005 nyomán módosítva).

A 8.4.4. ábrán Debrecen fűtési félévében a mért és becsült UHI intenzitás területi szerkezetét láthatjuk. Szembetűnő a hasonlóság a nem-fűtési időszak hőmérsékleti mezejével, de a mért és számított UHI intenzitás értékek alacsonyabbak csakúgy, mint Szeged esetében. Másrészt a leghidegebb területek (kék cellák) kissé távolodtak egymástól, a legmelegebbek (piros cellák) viszont közeledtek. A mintegy 1 km -re eső hőmérséklet-változás mértéke a kék téglalappal jelölt régióban mintegy $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ a mért UHI intenzitás esetén, (8.4.4. (a) ábra) míg a becsültnél ugyanekkora távolságra csak kb. $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (8.4.4.

(b) ábra). (Bottyán et al., 2005). A fűtési félévben a két mező dipólus szerkezete továbbra is megmarad, viszont a hőmérsékleti maximumok közelebb kerültek egymáshoz, mint a nem fűtési időszakban voltak. A legnagyobb gradiensű változások a téli félévben is lényegében ugyanott láthatóak, mint a nyári időszakban.

Összességében megállapíthatjuk, hogy a modellek által produkált UHI intenzitás mezők alapvető szerkezetében megegyeznek a mért mezőkkel, de az egyezés Szegednél területileg és értékben is lényegesen jobb, mint Debrecenben (persze ez már a modellek statisztikai vizsgálatakor is várható volt).

Debrecen kétpólusú hőmérsékleti szerkezetét kevésbé tudta megfogni a modell, ezért a becsült UHI intenzitás mezeje csak nagy vonalakban tükrözi a mért értékek eloszlását, attól lényegesen egyszerűbb, DK-i irányban részben deformálódott izovonal-szerkezetet kaptunk, melyben a mért mező létező hőmérsékleti inhomogenitásai elmosódnak, kevésbé felismerhetőek.

Szegednél a város középpontosan szimmetrikus szerkezete miatt ez a típusú közelítés is igen jó eredményt ad, mind a területi eloszlásra, mind pedig az értékekre vonatkozóan, sőt a mért UHI intenzitás mezejében meglévő területi inhomogenitásokat is jól visszaadja a modell.

8.5. Az alkalmazott modellek további felhasználásának lehetőségei és korlátai

A dolgozatunkban bemutatott statisztikus modellek az átlagos maximális UHI intenzitást becsülték szezonális szinten városi (beépítettségi, geometriai, strukturális) statikus paraméterek alapján Szegeden és Debrecenben.

Ebből fakadóan modelljeink is egy – adott felszíni geometriájú és szerkezetű – város téli vagy nyári féléves átlagos maximális hőszigetének a becslésére alkalmasak. Vagyis az adott település hőmérsékleti többletének *általános és statikus* leírását segítik elő. Statikus, hiszen a hősziget időbeli kialakulásának nyomon követését nem oldja meg, mert nem rendelkezünk olyan mérési adatokkal (technikai okok miatt), melyek speciálisan tervezett, időben kvázi-folyamatos mintavételezés eredményeképpen álltak volna elő.

Úgy gondoljuk, hogy a mérések, és a belőlük leszűrt összefüggések szép eredménye lenne, ha az UHI intenzitás térbeli és időbeli eloszlásának modellezését meg tudnánk valósítani. Ehhez azonban véleményünk szerint két járható megoldás létezik:

- Dinamikusan leírni a városi tetőszint fizikai folyamatait és így adni becslést az UHI eloszlására
- További statisztikus megfontolásokkal, időben változó mintával dolgozva, bevonva meteorológiai paramétereket is, alkotni új modelleket

A dinamikus megközelítéssel most nem foglalkozunk, de azt megemlíjtük, hogy az eddig statisztikailag feltárt összefüggésekre szükség lenne ebben az esetben is, hiszen bizonyos paraméterezéseket el kellene végeznünk a modell építése, illetve hangolása, tesztelése során.

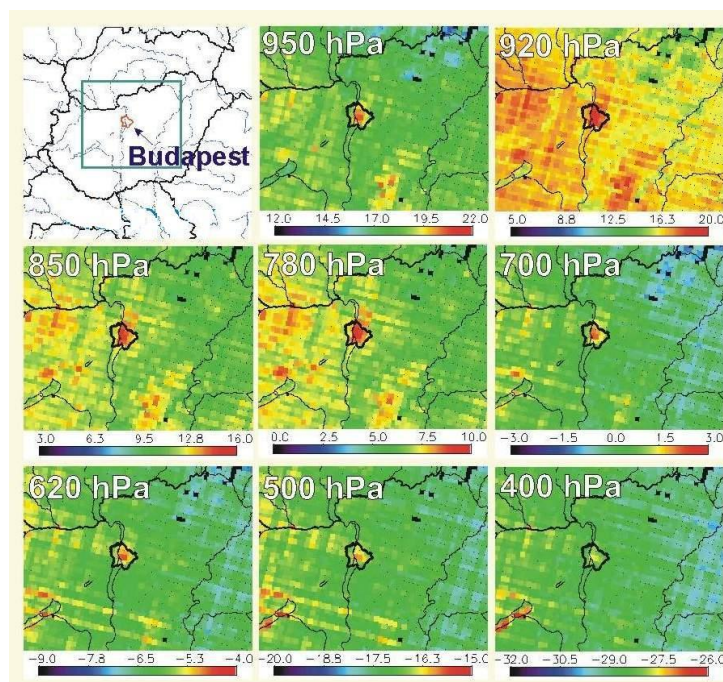
A statisztikus alapon történő megközelítés további fejlesztésének gondolata abból a megfontolásból indul ki, hogy – amennyiben adva vannak a hősziget kialakulásának meteorológiai feltételei – a ***hőmérsékleti többlet területi eloszlását*** alapvetően az általunk vizsgált városi statikus paraméterek határozzák meg. A városi felszint pontosabban leíró prediktorok konstruálása és modellbe illesztése tehát fontos további feladat, és erre már történtek is vizsgálatok (Gál *et al.*, 2007; Gál és Sümegehy, 2007).

Viszont magának az ***UHI intenzitásnak a valós értékét*** már nagyban befolyásolja az adott konkrét (szinoptikus vagy mezoléptékű) meteorológiai helyzet. Ezért mindenképpen érdemes lenne a szegedi és debreceni mérési eredményeket összevetni meteorológiai (klimatológiai) adatokkal, valamint bevonni őket a modellek építésébe. Erre vonatkozóan történtek már kezdeti vizsgálatok (Szegedi és Kircsi, 2003), de a pontos és részletes felbontású meteorológiai adatok beszerzésének problémája hátráltatta az ezirányú tevékenységet.

Rendkívül nehezen oldható meg, hogy időben folyamatos és nagy felbontású mintavételezéssel olyan hőmérsékleti adatokhoz jussunk, amelyek implicit módon tartalmazzák a hősziget időbeli változásával kapcsolatos információt a teljes vizsgált területről. Ez úgy lenne biztosítható, ha a városban elég sűrűn (hogy ez konkrétan mennyi, azzal most nem foglalkozunk) automata berendezések kerülnének felállításra és akár percenként is mérhetnének. Persze ez rendkívül drága és nehezen kivitelezhető (rongálás, lopás, karbantartás, stb.).

Másik lehetőség, hogy műholdas távérzékelési adatokat használjunk fel a hősziget dinamika leírására. Jelenleg az ELTE Meteorológia Tanszékén végeznek műholdfelvételek segítségével városklíma vizsgálatokat (Bartholy *et al.*, 2003; Dezső *et al.*, 2005) és biztató eredmények vannak, pl. a MODIS műhold felvételek alkalmazásának terén is (Kern *et al.*,

2006) (8.5.1. ábra). Az ábrán jól látható Budapest felett a hősziget megjelenése a troposzféra alsó felében.



8.5.1. ábra A hőmérsékleti mező Magyarország felett 8 geopotenciál szintjében. 2005. június 13. 9.49 UTC-kor. (Kern et al., 2006)

Egy harmadik megoldás lehetne az időfüggő hőmérsékleti adatokhoz való hozzájutásra, ha a város egy olyan keresztmetszeten végeznénk napnyugtától napkeltéig expedíciós méréssorozatot, ahol a külső területektől a középpontig és visszafelé haladva érintenénk különböző felszínű cellákat. Ugyanazt a mérési elvet alkalmazva, amit a korábbi szegedi és debreceni mérésnél használtunk, egy éjszaka akár 5-10 keresztmetszeti hőmérsékleti profilunk is lehetne (annak függvényében, hogy mennyi időbe telik a keresztmetszeti útvonal oda-vissza való megtétele). A korábbi mérésekből meghatározva a keresztmetszeti cellák és a többi cella közötti regressziókat, minden éjszakára lehetne szintén 5-10 teljes területi hőmérsékleti mezőt előállítani. Ezeket az adatokat kombinálva a meteorológiai paraméterek értékeivel, becslést adhatnánk statisztikus megközelítéssel a ***hősziget térbeli és időbeli eloszlására*** az adott városban.

Végezetül meg kell említenünk, hogy nem-lineáris megközelítéssel is lehetne statisztikus modelleket alkotni, bár ahogy jeleztük korábban, a lényegesen bonyolultabb apparátus alkalmazása nem feltétlenül állna arányban az eredmények pontosságával.

Végül, de nem utolsó sorban szólnunk kell az általunk készített modellek korlátairól is. Mint minden statisztikus modell, ezek is megadott hibával terheltek, melyekről

korábban szoltunk. A felhasználásukat tekintve azonban fontos tudni, hogy ezek a hibák, amikkel rendelkeznek és amelyeket ismerünk, csak akkor jellemzik a becsült értékek pontosságát, ha olyan prediktor adatokkal végezzük a becslést, amelyek hasonló fizikai környezetből származnak, mint azok a prediktor adatok, amelyekből meghatároztuk a regressziós függvényt. Mit is jelent ez?

A modell egyenletei mérési adatokból lettek számítva. Az így kapott egyenletek csak arra a tartományra érvényesek az adott hibával, amelyből meg lettek határozva! (Pl. nagy hiba lenne a szegedi modell regressziós függvényében szereplő magasság prediktor értékét 250 m-nek megadni, mert esetleg New York-ra szeretnénk becslést adni.) Ugyanis nem garantálható, hogy a modellhez felhasznált adattartományon túli intervallumban is ugyanazok a hatások érvényesülnek! Ezért nagy körültekintést igényel, pl. a szegedi modell egyenletekkel való becslés elvégzése, karakterisztikusan kisebb vagy nagyobb méretű városokra. (Itt szeretnénk megjegyezni, hogy elvi szempontból sem helyes, ha több különböző fizikai adottságú város mért adatait egy halmazba véve, határozzuk meg a modell egyenleteit, ugyanis eltűnnek az adottságra jellemző tulajdonságok a becslésben, ami *uniformizációhoz* vezet.)

Az is igaz, hogy a modelljeink pl. csak hozzávetőlegesen sík felszínen elhelyezkedő városokra adhatnak jó becslést, ahol hasonlóak a geográfiai és klimatikus viszonyok. Így nincs semmi értelme pl. Pécs városának UHI intenzitását ezekkel a modellekkel becsülni az eltérő domborzat miatt.

A leírtakat figyelembe véve az alföldi megyeszékhelyek UHI intenzitásának becslésére modelljeink alkalmasak, így használatukat javasoljuk az említett városok termikus viszonyainak vizsgálatához.

9. ÖSSZEFOGLALÁS

9.1. Az átlagos maximális hősziget-intenzitás

A nagyobb lélekszámú települések környezetében kialakuló speciális klíma (városklíma, urban climate) legfontosabb lokális módosító hatása, a városok területén megjelenő hőtöbblet az ún. városi hősziget (urban heat island). A hősziget jellemzésére a hősziget-intenzitást (UHI intenzitás, amely a városi és a városon kívüli hőmérsékletek különbsége) használjuk, melynek felső becslését a lakosság függvényében elsőként *Oke* adta meg:

$$\Delta T_{u-r(max)} = 2,01 \lg(P) - 4,06$$

ahol, $\Delta T_{u-r(max)}$ az UHI intenzitás maximális értéke (°C) és P a lakosság lélekszáma (*Oke*, 1973). Az ebből az összefüggésből számított maximális UHI intenzitás értéke Szegedre kb. 6,4 °C, illetve Debrecen esetében kb. 6,7 °C. A tapasztalat azt mutatja, hogy a valóságnál ennél magasabb értékek is előfordulhatnak (akár 8 °C is), így ez a becslés természetesen csak egy közelítő értéket jelez.

Munkánkban egy adott időszakban (fűtési és nem fűtési félévekben) előforduló, maximális hősziget-intenzitások átlagait vizsgáltuk és modelleztük. A hőmérsékleti adatok gyűjtése mobil mérések segítségével történt Szegeden 1999. március és 2000. február között. A 2002. márciustól 2003. márciusig terjedő időszakban pedig Szegeden és Debrecenben egyidejűleg végeztünk hasonló méréseket.

9.2 Az átlagos maximális hősziget területi eloszlása és a beépítettségi paraméterek közti kapcsolat

Mindkét város esetében elmondhatjuk, hogy a mérések során kapott adatokból elkészített átlagos maximális UHI intenzitás területi eloszlására a következő megállapítások érvényesek:

- Az UHI intenzitás legmagasabb értékei a városok belső régióiban elhelyezkedő, erősen beépített területeken mérhetők. Szegeden a mért maximális értéke 3,1 °C (1999-2000 között), Debrecenben pedig, 2,5 °C (2002-2003 között) volt a melegebb nem-fűtési félévben (*Unger et al.*, 2000, *Bottyán et al.*, 2005).

- A városi felszín geometriájának, beépítettségének, struktúrájának függvényében Szeged esetében közel körszimmetrikus, míg Debrecenben egy kétpólusú hősziget nagyszerkezet figyelhető meg (*Bottyán és Unger, 2003; Bottyán et al., 2005*).
- Mindkét városban, a megfigyelhető UHI intenzitás nagyszerkezetet helyi anomáliák módosítják (*Bottyán és Unger, 2003; Bottyán et al., 2005*).
- A nem fűtési félévben mindkét vizsgált településen magasabb UHI intenzitás értékeket mértünk, mint a fűtésiben, de a területi eloszlásban jelentős különbséget nem találtunk.

Az átlagos maximális UHI intenzitás területi eloszlásában fellépő inhomogenitások Szegeden:

- A város ÉK-i és ÉNy-i részein megépült, panelházakból álló lakótelepek területén jelentős pozitív UHI intenzitás-anomália vehető észre. Ugyanakkor, ezek határán a hőmérsékleti gradiens értéke nagy (*Bottyán és Unger, 2003*)
- A Tisza medrének módosító hatása a város K-i és DK-i területén figyelhető meg, mely a hőtöbbletet mérsékli ebben a régióban
- A középponttól É-ra egy beékelődött kevésbé beépített terület alacsonyabb hőmérséklete módosítja jelentősen a körszimmetrikus UHI szerkezetet
- A település Ny-i peremén rendkívül gyorsan csökken a hőmérséklet kifelé (nagy a gradiens), ami a statikus beépítettségi tulajdonságok gyors változását követi

Az átlagos maximális UHI intenzitás területi eloszlásának lokális változásai Debrecenben:

- A város É-i szélén rendkívül gyorsan változó (kifelé csökkenő) beépítettség és sajátos felszíni geometria miatt igen alacsony UHI intenzitás értékekkel találkozunk (a nem fűtési félévben mindössze kb. 0,2 °C.) (*Bottyán et al., 2004; Bottyán et al., 2005*)
- A Ny-i részen a magas beépítettségű lakótelepek növelik lokálisan a hőmérsékleti kontrasztot, így a maximális hőmérsékleti értékek a központtól kissé távolabb, itt jelennek meg

- Szintén a város Ny-i peremén a hirtelen csökkenő beépítettséget a hőmérséklet változása nem követi, ami egy pozitív UHI anomáliát okoz ott.

A városi hőmérsékleti többlet területi eloszlásáért alapvetően a városi mesterséges felszín fizikai és geometriai tulajdonságai a felelősek. Éppen ezért dolgozatunkban azt vizsgáltuk, hogyan függnek össze bizonyos statikus (városi felszínt jellemző) tényezők az átlagos maximális UHI intenzitással.

A városi statikus felszínjellemzők közül a beépítettségi arányt (B), a vízfelszín arányt (W), az égboltláthatósági faktort (S) és az épületmagasságot (H) használtuk fel az UHI intenzitás becslésére Szeged esetében (*1. típusú modell*), illetve a beépítettségi arányt Szegednél és Debrecennél egyaránt (*2. típusú modell*) (Bottyán és Unger, 2003; Bottyán et al., 2005).

A *beépítettségi* és *vízfelszín arányt* műholdfelvételek (Szeged esetében SPOT XS, míg Debrecen vonatkozásában LANDSAT TM) elemzéséből származtatott NDVI alapján határoztuk meg és ábráztuk, mindkét várost illetően (Mucsi, 1996; Unger et al., 2000). Értéke azt mutatja, hogy egy adott rácsra vonatkozó cellában mennyi a mesterségesen beépített terület illetve a szabad vízfelület aránya.

Szeged a beépítettség szempontjából viszonylag koncentrikusnak tekinthető. A legkisebb előforduló értékei a vizsgált területen a Ny-i, a DK-i valamint a K-i peremterületeken jelentkeznek, melyek közül az utóbbiak a Tisza folyót és közvetlen parti területeit reprezentálják, míg maximális értéke a város középpontjában fordul elő. A település Ny-i peremén elhelyezkedő területek alacsony beépítettsége az ott elhelyezkedő, még jórészt beépítetlen területeknek, tavaknak és néhány ipari létesítménynek köszönhető. A központi cellától ÉK-re és ÉNy-ra található két erősebb anomália, amely az izotermák megnyúlásában jelentkezik ezekben az irányokban. A beépítettség változása a terület Ny-DNy-i részén is hasonló következményekkel jár.

Debrecen kissé szabálytalanabb, kevésbé koncentrikus szerkezetű, mint Szeged, de a beépítettségi arány területi eloszlása itt is követ egy középpontból kifelé mutató csökkenést. Fontos megjegyezni azonban, hogy ez a gradiens már észrevehetően irányfüggő. Debrecen esetén nem a középpontban helyezkednek el a leginkább beépített cellák, hanem attól kissé Ny-ra. É-i irányban (a Nagyerdő felé) a beépítettség igen gyorsan csökken a mintegy 15-20%-os értékre. A város keleti területein inkább kertes családi házak vannak, így itt a beépítettség mértéke 25-50% között mozog, míg a Ny-i részeken magas panelházakból álló lakótelepeket találunk 10 emeletes házakkal, ahol a beépítettség magas

értéket vesz fel. A város D-i régiójában ipari létesítményekkel találkozhatunk, itt a beépítettség értéke igen magas, 60-80% közötti.

A *vízfelszín arány* alakulása Szegeden a Tiszához kötött, itt akár 35-40% is lehet értéke, míg másutt alig különbözik 0-tól.

Az *égboltláthatósági faktor* a városi geometria egyik fontos jellemzője, lényegében a horizont korlátozottságát jellemzi. Szegedi területi eloszlására kevésbé jellemző a koncentrikus elhelyezkedés, inkább szigetszerűen fordulnak elő az alacsony, illetve magas értékű területek. Az alacsony S értékek a belvárosi, szűk utcákkal és viszonylag magas épületekkel jellemezhető részeken, illetve a centrumtól távolabb lévő magas panel-lakótelepeken fordulnak elő. Magas égboltláthatósági értékkel jellemezhetők a külterületi részek, vagy például a Tisza-part (*Bottyán és Unger, 2003*).

Az *épületmagasság*ot illetően elmondható, hogy a város jelentős területein vannak jelen a 10 méternél magasabb épületek, sőt az ÉK-i panelházas régióban a 20 métert is meghaladják. A város K-i területén alacsonyak az épületmagasság értékek, a kertvárosi családi házak és a Tisza medre miatt.

9.3. Az átlagos maximális hősziget-intenzitás statisztikus modellje

Szeged átlagos maximális UHI intenzitásának becsléséhez a beépítettségi arányt (*B*), a vízfelszín arányát (*W*), az égbolt-láthatósági faktort (*S*) és az épületmagasság (*H*) értékeit valamint ezek kiterjesztett értékeit használtuk fel. A hőmérsékleti értékek esetében külön vizsgáljuk a kapcsolatot a fűtési és a nem-fűtési félévekre az 1999. március és 2000. február közötti időszakban Szegedre, illetve 2002. márciustól 2003. márciusig tartó intervallumra, Szegedre és Debrecenre vonatkozóan.

Tekintve, hogy egy városi terület hőmérsékletét nem csak közvetlen környezetének fizikai, geometriai jellege határozza meg, az említett statikus paraméterek területi kiterjesztéseit is bevontuk a prediktorok kiindulási halmazába. A kiterjesztést a távolsággal exponenciálisan történő súlyozással végeztük el (*Bottyán és Unger, 2003; Bottyán et al., 2005*).

Az UHI intenzitás, a beépítettségi paraméterek és kiterjesztései (mint kiindulási prediktor halmaz) közötti kapcsolatot többváltozós lineáris regresszióval becsültük, melynek prediktorait és annak együtthatóit, az FSMLR eljárás segítségével határoztuk meg az SPSS 9 szoftver segítségével (*Miller, 2000*).

Az említett eljárással kapott prediktor együtthatók alapján felírhatóak Szeged vonatkozásában a regressziós függvények is, amelyek mindkét félévre vonatkozóan 4 változósak lesznek (1. típusú modell):

$$\Delta T_{nf} = -4,291S1 + 0,035H + 0,023B1 + 0,042W1 + 3,824$$

$$\Delta T_f = -3,242S1 + 0,025H + 0,014B1 + 0,021W1 + 3,036$$

ahol ΔT_{nf} és ΔT_f rendre az UHI intenzitás értéke °C-ban a nem-fűtési és a fűtési félévben, $S1$, H , $B1$, $W1$ pedig a már ismert prediktorok. Mindkét félévben igen magas többváltozós korrelációs együtthatókat kaptunk, hiszen a nem-fűtési félévben $R=0,902$ illetve a fűtésiben $R=0,873$. A prediktor együtthatók becslései is szignifikánsak 5%-os szinten. Elvégeztük a nem fűtési félévre vonatkozóan, a modell által generált UHI intenzitás területi eloszlásának összehasonlítását egy későbbi időintervallumban (2002-2003) történt mérés területi eloszlásával. Az összevetés legfontosabb eredményei:

- A város teljes területén az eltérések abszolút értékben mindenütt kisebbek, mint 0,5 °C!
- A vizsgált terület kb. 57%-án (kb. 55 cella, 13,75 km²) a modell felülbecsli a tényleges hőmérsékletet, a többi részen, pedig alatta marad annak.
- A legerősebb anomáliák a korábban említett felszíni (geometriai, szerkezeti) inhomogenitások közelében találhatók, pl. ÉK-i lakótelepek (negatív eltérés) és Ny-i városperem (pozitív eltérés), ahol a 0,4 °C-ot is meghaladja a különbség. Ezek a területek azonban mindössze a teljes felszín 4%-ára terjednek ki (kb. 4 cella, 1 km²).
- Ugyanakkor a 0,2 °C-nál abszolút értékben kisebb anomáliával rendelkező régió a vizsgált terület 75%-át fedi le (73 cella, 18,2 km²).

Mindkét város esetében elvégeztük a modellépítést a beépítettségi arány (B) és annak területi kiterjesztései ($B1$, $B2$, $B3$), mint kiindulási prediktorok segítségével (2. típusú modell). Szeged esetében mindkét félévben igen magas többváltozós korrelációs együtthatókat kaptunk, hiszen a nem-fűtési félévben $R=0,858$ illetve a fűtésiben $R=0,860$. A kiválogatott 4 prediktor mindkét esetben 74%-ban magyarázza meg a prediktandus változását. Az R érték szignifikanciája magas, hiszen minden esetben 0,1%-os szinten

reálisnak mondható statisztikai értelemben a korreláció (Bottyán és Unger, 2004). Ha a debreceni modell statisztikákat nézzük, akkor szembetűnik, hogy a beépítettségi prediktorok a nem fűtési félévben már csak 35%-át magyarázzák meg az UHI intenzitás változásának, míg a fűtési félévben mindössze 31%-át. Ennek ellenére még 0,1%-os szinten szignifikáns a regresszió korrelációs együtthatója mindkét félévben.

Az FSMLR eljárással kapott prediktor együtthatók alapján felírhatóak a regressziós függvények is, amelyek a következők lesznek Debrecenre vonatkoztatva (2. típusú modell):

$$\Delta T_{nf} = 2,258 B1 - 3,242 B3 + 2,056$$

$$\Delta T_f = -4,240 B3 + 1,252 B1 - 1,537 B2 + 3,281$$

illetve a Szegedre érvényes regressziós egyenletek (2. típusú modell):

$$\Delta T_{nf} = 0,082 B1 + 0,642 B - 7,340 B3 - 3,237 B2 + 8,080$$

$$\Delta T_f = -3,614 B3 + 0,743 B + 1,137 B1 + 2,789$$

ahol ΔT_{nf} és ΔT_f rendre az UHI intenzitás értéke °C-ban a nem-fűtési és a fűtési félévben, B , $B1$, $B2$, $B3$ pedig a prediktorok.

A pusztán a beépítettségi arány értékeiből és annak kiterjesztéseiből alkotott prediktor halmaz jelentősége abban áll, hogy plusz információt nyertünk ki a mért (megfigyelt, számított) prediktor értékekből, anélkül, hogy újabb méréseket kellett volna végeznünk (Szeged esetében 23-24%-kal, míg Debrecennél 12-16%-kal kaptunk jobb becslést a kiterjesztések bevonásával)!

Megállapíthatjuk, hogy a modellek által produkált UHI intenzitás mezők alapvető szerkezetükben megegyeznek a mért mezőkkel, de az egyezés Szegednél területileg és értékben is lényegesen jobb, mint Debrecenben.

Debrecen kétpólusú hőmérsékleti szerkezetét kevésbé tudta megfogni a modell, ezért a becsült UHI intenzitás mezeje csak nagy vonalakban tükrözi a mért értékek eloszlását. Szegednél a város középpontosan szimmetrikus struktúrája miatt ez a típusú közelítés is igen jó eredményt ad, mind a területi eloszlásra, mind pedig az értékekre vonatkozóan.

9.4. A modell további fejlesztési lehetőségei és korlátai

A statisztikus alapon történő megközelítés további fejlesztésének lehetőségei:

- a városi felszínt pontosabban leíró prediktorok konstruálása és modellbe illesztése
- meteorológiai (klimatológiai) adatok bevonása a modellek építésébe
- időfüggő hőmérsékleti adatokhoz való hozzájutás, a város egy adott keresztmetszetén elvégzendő napnyugtától napkeltéig tartó expedíciós méréssorozat lebonyolítása és adatainak modellbe ágyazása.

A kapott statisztikus modelljeink felhasználásával kapcsolatos figyelembeveendő korlátok a következők:

- A kapott modell-egyenletek csak abból a prediktor-tartományból képesek érvényes becslést adni az adott hibával, amelyből meg lettek határozva
- modelljeink, pl. csak hozzávetőlegesen alacsony tengerszint feletti magasságon elhelyezkedő, sík felületű (alföldi) városokra adhatnak jó becslést, ahol hasonlóak a geográfiai és klimatikus viszonyok (*Bottyán és Unger, 2003*).

10. SUMMARY

10.1. The mean maximum urban heat island intensity

The most important local modifying effect of urban climate is the large amount of thermal excess over the cities so called Urban Heat Island (UHI). It had been characterized by the UHI intensity (the temperature difference between urban and rural areas) which had been predicted by *Oke* with the help of the following equation:

$$\Delta T_{u-r(max)} = 2.01 \lg(P) - 4.06$$

where $\Delta T_{u-r(max)}$ the maximum UHI intensity (°C) and P is the population of city (*Oke*, 1973). The values of UHI intensity which had been predicted from above mentioned equation are 6.4 (°C) and 6.7 (°C) in the case of Szeged and Debrecen respectively. As we know, there were higher values during our measurement periods (up to 8 °C) thus this prediction is an approximate value only.

In our work we examined and modeled the averages of the maximum UHI intensity which are occurred in a given period (heating and non-heating seasons). Collecting of air temperature values is based on mobile observations during the period of March 1999 to February 2000 in Szeged. There was an other measurement period of March 2002 to March 2003 in case of both cities which had the same sampling procedure.

10.2. Relationship between the spatial distribution of the mean maximum urban heat island and the urban parameters

The spatial distribution of the mean maximum UHI intensity generated from the measured values has the following features:

- The highest values of UHI intensity can be measured in the highly built-in inner region of cities. The maximum observed values of UHI intensity were 3.1 °C in Szeged (from 1999 to 2000) and 2.5 °C in the case of Debrecen (from 2002 to 2003) during the warmer non-heating season (*Unger et al.*, 2000, *Bottyan et al.*, 2005).
- As a function of structure, geometry and built-in mode of the urban surface we can detect a well-concentric shape of heat island over Szeged on the contrary Debrecen

has a two-pole heat island structure (*Bottyán and Unger, 2003; Bottyán et al., 2005*).

- The observed structure of UHI intensity is modified by local anomalies in case of both cities (*Bottyán and Unger, 2003; Bottyán et al., 2005*).
- There were higher UHI intensity values in the non-heating season in case of Szeged and Debrecen alike, but there were not any difference in the spatial distribution of UHI intensity between the two half years.

Observed inhomogeneities in the spatial distribution of UHI intensity in Szeged, are the following:

- The northeastern and northwestern part of the city has a large housing estates and we can recognize a significant positive UHI intensity anomaly there. On the other hand in the border of mentioned regions the gradient of temperature is very high (*Bottyán and Unger, 2003*).
- As it can be seen the altering effect of Tisza river is well observed at the eastern and southeastern region of Szeged which moderates the urban heat surplus locally.
- Toward the northern direction from the centre of city there is a hardly modified concentric UHI intensity structure by a cooler slightly built-in area.
- At the northern outskirts of the city the temperature decreases very fast towards the rural areas (the temperature gradient is high) which follows the rapid change of the static built-up characteristics.

The local changes of the spatial distribution of mean maximum UHI intensity in Debrecen:

- The northern border of Debrecen has a special surface geometry and rapidly decreasing built-up ratio values thus the UHI intensity is very low there (the value of UHI intensity is 0.2 °C only in the non-heating season) (*Bottyán et al., 2004; Bottyán et al., 2005*).
- The western parts of the city have large buildings thus the temperature contrast is locally high in compliance with it the maximum temperature values can be observed a little bit farther from the centre of city.

- The western outskirts of the city has a local positive UHI intensity anomaly because in spite of the decreasing of the built-up ratio, the temperature remains relatively high there.

The physical and geometrical attributes of artificial urban surface are in charge of the spatial distribution of urban heat excess. That is exactly why we examined the relationship between urban static surface parameters and mean maximum UHI intensity.

Among the static urban surface characteristics we used the built-up ratio (*B*), water surface ratio (*W*), sky view factor (*S*) and building height (*H*) to predict the mean maximum UHI intensity in Szeged (**model I.**) and we applied the built-up ratio (*B*) in the same prediction in the case of both cities (**model II.**) (Bottyán and Unger, 2003; Bottyán *et al.*, 2005).

The ratios of the built-up and water surface were determined by digital satellite analysis (in case of Szeged SPOT XS, and in terms of Debrecen LANDSAT TM) with the help of NDVI and we drew these parameters in both cities (Mucsi, 1996; Unger *et al.*, 2000). The values of the mentioned urban surface parameters show for us the ratio of the artificial built-up and water surface area related to the given cell surface.

Szeged has a highly concentric structure of built-up ratios. Its occurent smallest values can be observed on the northern, south-eastern and eastern part of the investigated area. The last mentioned region represents the Tisza river and its riverside. The maximum values of built-up ratio are located in the centre of the city. Thanks to the lakes, some industrial constructions and unbuilt areas, the western outskirts of the city has low built-up ratios. From the cell located in the centre of the city towards north-eastern and north-western direction there are two stronger positive UHI intensity anomaly so the isolines stretch out in the mentioned directions. The changing of built-up characteristics in the western and south-western part of the investigated area carries the same consequences.

Debrecen has a little irregular, less concentric shape than Szeged but the spatial distribution of the built-up ratio also follows a decreasing from the centre towards the rural areas. It is very important to note this gradient depends on given direction. In this city the maximum temperature values cannot be observed in the central position but rather a little bit farther in western direction. In the northern direction (towards the Nagyerdő) the built-up ratio decreases rapidly down-to 15-20%, but in the western part of the investigated area there are many large block houses thus the built-up ratio parameter is high there. In the southern region of Debrecen the built-up ratio also very high about between 60 and 80%.

In the case of Szeged the **water surface ratio** values are connected with the Tisza river and it has a relative high numbers about 35-40% but in the other areas its values are close to zero.

The **sky view factor** is a very important attribute of the urban surface geometry because it represents the limitation of the horizon. The spatial distribution of this parameter has not a concentric-like shape rather it has an island-like structures with locally highest and lowest values. Its low values can be seen in the downtown where there are narrow streets and relative high buildings and farther from the centre in the area of the large housing estates. The outskirts of the investigated area or for example the riverside of the Tisza have high sky view factor values (*Bottyán and Unger, 2003*).

As we can see there are large areas with higher buildings (higher than 10 meters) and on the north-eastern area we can find some huge buildings with height above 20 meters. The building heights values are lower in the eastern region of the investigated area because of the smaller houses and the riverside of the Tisza.

10.3. Statistical model for estimating the mean maximum urban heat island

In term of Szeged to predict the mean maximum UHI intensity we applied the values of built-up ratio (*B*), water surface ratio (*W*), sky view factor (*S*) and building height (*H*) and their extensions. In case of temperature values we examined the relationship between UHI intensity and above mentioned parameters in two different seasons (heating and non-heating seasons) during the March 1999 to Febr 2000 period in Szeged and during the March 2002 to March 2003 period in Szeged and Debrecen in the same time.

Since the temperature of the urban area depends on not only the physical, geometrical characteristics of the near environment thus the extensions of the mentioned static urban parameters had also been applied in the starting set of predictors. The extensions are based on exponential weighting of distance (*Bottyán and Unger, 2003; Bottyán et al., 2005*).

The relationship between UHI intensity and urban built-up parameters and their extensions was predicted by multiple linear regression method. The predictors and their coefficients was calculated by FSMLR procedure with the help of SPSS 9 software (*Miller, 2000*).

The regression equations were determined by the mentioned procedure are the following in case of Szeged (model I.):

$$\Delta T_{nf} = -4,291S1 + 0,035H + 0,023B1 + 0,042W1 + 3,824$$

$$\Delta T_f = -3,242S1 + 0,025H + 0,014B1 + 0,021W1 + 3,036$$

where ΔT_{nf} and ΔT_f are the UHI intensities (°C) in the non-heating and the heating seasons, respectively. $S1$, H , $B1$, $W1$ are the known applied predictors. In both seasons the multiple correlation coefficients has a high value: in the non-heating half year $R=0.902$, and in the heating period $R=0.873$. The estimate of the predictors coefficients are significant at 5% probability value. We compared the spatial distribution of the predicted UHI intensity field in the non-heating season with the same distribution and season of observed UHI intensity measured in the period of 2002-2003. The results of comparison are the next:

- The absolute differences are everywhere smaller than 0.5 °C in the whole area of Szeged.
- The estimate of our model gives higher values than measured ones in the larger part of the investigated area (e.g. 57%) and the other part of it the predicted values are smaller.
- The strongest anomalies are located close to the earlier mentioned urban surface (geometrical and structural) inhomogenities for example large housing estates in the north-eastern part of Szeged (negative anomaly) and western outskirts of the city (positive anomaly) where the difference is higher than 0.4 °C. These areas contain the very small part (4%) of the whole urban area (about 4 cells and 1km²).
- On the other hand the region that has a smaller anomaly than 0.2 °C means the dominant part of the investigated area with 75% value (73 cells and 18,2 km²).

Of course we have a similar linear statistical models in connection with both cities applying built-up ratio (B) and its areal extensions ($B1$, $B2$, $B3$) too (model II.). In both seasons there are high multiple correlation coefficients: in the non-heating season $R=0.858$ and in the heating one $R=0.860$. The selected 4 predictors determine the UHI intensity very well (variance is 74%). The significance level of R is very high in every cases higher than 0.1% (*Bottyán és Unger, 2004*). But in Debrecen the selected predictors determine the UHI intensity less than in case of Szeged. In the non-heating season the determining is about

35% and in the heating one it is only about 31%. In spite of it the significance level of multiple correlation coefficients are 0.1% in both seasons.

The given regression equations in reference to Debrecen are (model II.):

$$\Delta T_{nf} = 2,258 B1 - 3,242 B3 + 2,056$$

$$\Delta T_f = -4,240 B3 + 1,252 B1 - 1,537 B2 + 3,281$$

and the same equations in term of Szeged (model II.):

$$\Delta T_{nf} = 0,082 B1 + 0,642 B - 7,340 B3 - 3,237 B2 + 8,080$$

$$\Delta T_f = -3,614 B3 + 0,743 B + 1,137 B1 + 2,789$$

where ΔT_{nf} and ΔT_f represent the UHI intensities (°C) in the non-heating and the heating seasons respectively and $B, B1, B2, B3$ are the selected predictors.

We can see well, applying the extended starting predictor set could obtain for us a large amount of additional information about UHI intensity field without more other measurements. (The estimation is better with 23-24% in Szeged and with 12-16% in Debrecen, if we apply the extended predictors.)

It can be stated that the structures of predicted UHI intensity fields essentially fall in with the measured ones but this similarity in Szeged is much better than in the case of Debrecen.

Since Debrecen has a two-pole temperature structure our model prediction is a little bit poor but the estimated UHI intensity field gives for us the same structure belongs to measured one. In term of Szeged the UHI intensity field has a concentric shape thus the mentioned prediction has a good agreement with the observed temperature field.

10.4. The reliability and limits of the applied statistical model

The further possibilities of the modelling based on statistical approach are the following:

- using other predictors which are describing the urban surface characteristics much better

- applying meteo and climate data sets in the model building procedure
- applying time-dependent temperature values in the models

Of course our models have some limitation factors in their using:

- The model equations are determined by the given predictor values intervals. The given model equations can do a valid estimation from the same predictor values range only!
- Our models can only give a correct estimation for the cities have similar geographycal and climatic environment with the special regard to plain relief and low height above sea level (*Bottyán and Unger, 2003*).

IRODALOM

- Alcoforado, M.-J. and Andrade, H., 2007: Nocturnal urban heat island in Lisbon (Portugal): main features and modelling attempts main features *Theor. Appl. Climatol.* 84, 151-159.
- Bach, W., 1970: An urban circulation model. *Arch. Met. Geophys. Biokl. Ser. B.* 18, 155-168.
- Bärring, L., Mattsson, J.O. and Linqvist, S., 1985: Canyon geometry, street temperatures and urban heat island in Malmö, Sweden. *J. Climatol.* 5, 433-444.
- Barry, R.G. and Chorley, R.J., 1982: *Atmosphere, weather and climate*. Methuen, London – New York, 302-319.
- Bartholy, J., Pongrácz, R. and Dezső, Zs., 2003: Application of satellite information to urban climatology. 83rd American Meteorol. Soc. (AMS) Annual Meeting. CD-ROM, P1.10.
- Becsei J., 2001: *Fejezetek az általános társadalmi földrajz tanulmányozásához*. Ipszilon Kiadó, Budapest, 109-137.
- Borstein, R. D. and Rabbock, A. D., 1976: Effects of variable and unequal time steps for advective and diffusive processes in simulation of the urban boundary layer. *Mon. Weather Rev.* 104, 260-267.
- Boruzs T. és Nagy T., 1999: *A város hatása a klímaelemekre*. JATE szakdolgozat (kézirat), Szeged.
- Bottyán, Z., és Unger, J., 2001: A városi hősziget területi eloszlásának többváltozós lineáris statisztikus modellje. *A Magyar Földrajzi Konferencia tudományos közleményei*, Szeged, 2001. október 25-27. CD.
- Bottyán, Z. and Unger, J., 2002: The role of land-use parameters in the spatial development of urban heat island in Szeged, Hungary. *Proceed. 4th Symposium on Urban Environment*, Norfolk, VA, USA. CD.
- Bottyán, Z., Balázs, B., Gál, T. and Zboray, Z., 2003: A statistical approach for estimating mean maximum urban temperature excess. *Acta Climatologica et Chorologica Univ. Szegediensis* 36-37, 17-26.
- Bottyán, Z. and Unger, J., 2003: Urban heat island development affected by urban surface factors. *Theor. Appl. Climatol.* 75, 233-243.
- Bottyán, Z., Unger, J., Szegedi, S. és Gál, T., 2004: A városi hőmérsékleti többlet területi eloszlásának statisztikus modellezése a beépítettségi paraméter alapján, Szegeden és Debrecenben. *A II Magyar Földrajzi Konferencia tudományos közleményei*. Szeged, 2004. szeptember 2-4. CD.
- Bottyán, Z., Kircsi, A., Szegedi, S., and Unger, J., 2005: The relationship between built-up areas and the spatial development of the mean maximum urban heat island in Debrecen, Hungary. *International Journal of Climatology* 25, 405-418.
- Chandler, T.J., 1960: Wind as a factor of urban temperatures – a survey in north-east London. *Weather* 15, 204-213.

- Chandler, T.J., 1962: Temperature and humidity traverses across London. *Weather* 17, 235-241.
- Chandler, T.J., 1967: London's heat-island. *Proceed. of the 3rd Int. Biometeorol. Congr. Pau, France*. 589-597.
- Chow, S.D., Zheng, J. and Wu, L., 1994: Solar radiation and surface temperature in Shanghai City and their relation to urban heat island intensity. *Atmos. Environ.* 28, 2119-2127.
- Climatological Normals (CLINO) for the Period 1961-1990*. WMO/OMM-No. 847
- Comrie, A.C., 2000: Mapping a wind-modified urban heat island in Tucson, Arizona (with comments on integrating research with undergraduate learning). *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 81, 2417-2431.
- Delage, Y. and Taylor, P. A., 1970: Numerical studies of heat island circulations. *Boundary Layer Meteorol.* 1, 201-226.
- Dezső, Zs., Bartholy, J. and Pongrácz, R., 2005: Satellite-based analysis of the urban heat island effect. *Időjárás*. 109, 217-232.
- Dévényi, D. és Gulyás, O., 1988: *Matematikai statisztikai módszerek a meteorológiában*. Tankönyvkiadó, Budapest.
- Duckworth, F.S. and Sandberg, J.S., 1954: The effect of cities upon horizontal and vertical temperature gradients. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 35, 198-207.
- Eliasson, I., 1996: Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use. *Atmos. Environ.* 30, 379-392.
- Ezekiel, M. és Fox, K. A., 1970: *Korreláció és regresszióanalízis*. Közgazdasági és Jogi Könyvkiadó, Budapest.
- Frisnyák S., Futó, J., Göőz L., Kormány Gy., Moholi K., Páristáné Erdős M. és Süli-Zakar I., 1978: *Magyarország földrajza*. Tankönyvkiadó, Budapest.
- Gallo, K.P. and Owen, T.W., 1999: Satellite-based adjustments for the urban heat island temperature bias. *J. Appl. Meteorol.* 38, 806-813.
- Gál, T., Rzepa, M., Gromek, B. and Unger, J., 2007: Comparison between sky view factor values computed by two different methods in an urban environment. *Acta Climatologica et Chorologica Univ. Szegediensis* 40-41, 17-26.
- Gál, T. and Sümeghy, Z., 2007: Mapping the roughness parameters in a large urban area for urban climate applications. *Acta Climatologica et Chorologica Univ. Szegediensis* 40-41, 17-36.
- Giridharan, R., Lau, S.S.Y. and Ganesan, S., 2005: Nocturnal heat island effect in urban residential developments of Hong Kong. *Energy and Buildings*. 37, 964-971.
- Gonclaves, L.S., Gazzola, H.L. and Sad, E.A., 2003: A comprehensive approach of the sky view factor and building mass in an urban area of the city of Belo Horizonte, Brazil. ICUC-5, P.3.12. Lodz, Poland.
- Götz, G., 1976: Légköri folyamatok dinamikus modellezése. *Időjárás*. 27-41.

- Grimmond, C.S.B., Cleugh, H.A. and Oke, T.R., 1991: An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes. *Atmos. Environ.* 25B, 311-326.
- Grimmond, C.S.B., Potter, S.K., Zutter, H.N. and Souch, C., 2001: Rapid methods of estimate sky-view factors applied to urban areas. *Int. J. Climatol.* 21, 903-913.
- Holmer, B., 1992: A simple operative method for determination of sky view factors in complex urban canyons from fish eye photographs. *Meteorologische Zeitschrift* 1, 236-239.
- Jendritzky, G. and Nübler, W., 1981: A model analysing the urban thermal environment in physiologically significant terms. *Arch. Meteorol. Geoph. Biol. Ser.B.* 29, 313-326.
- Johnson, D.B., 1985: Urban modification of diurnal temperature cycles in Birmingham. *J. Climatol.* 5, 221-225.
- Kern, A., Gelybó, Gy., Barcza, Z., Bartholy, J. and Pongrácz, R., 2006: Study of the urban environment based on atmospheric profiles measured by polar orbiting satellites. (Extended abstract) *6th International Conference on Urban Climate (ICUC)*. Göteborg, Sweden. June 12-16, 2006. ISBN-10: 91-631-9000-1, 755-758.
- Keveiné Bárány I., 1988: Talajföldrajzi vizsgálatok Szeged környékén. *Alföldi tanulmányok* 12, 25-34.
- Kircsi, A. and Szegedi, S., 2003: The development of the urban heat island studied on temperature profiles in Debrecen. *Acta Climatologica et Chorologica Univ. Szegediensis* 36-37, 63-69.
- Klysik, K. and Fortuniak, K., 1999: Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Łódź, Poland. *Atmos. Environ.* 33, 3885-3895.
- Kőrösi, G., Mátyás, L. and Székely, I., 1990: *Gyakorlati ökonometria*. Közgazdasági és Jogi Könyvkiadó, Budapest.
- Kratzer, P.A., 1956: *Das Stadtklima*. F. Vieweg und Sohn, Braunschweig.
- Kuttler, W., Barlag, A-B. and Roßmann, F., 1996: Study of the thermal structure of a town in a narrow valley. *Atmos. Environ.* 30, 365-378.
- Kuttler, W., 1998: Stadtklima. In Sukopp, H. und Wittig, R. (eds): *Stadtökologie*. Gustav Fischer, Stuttgart – Jena – Lübeck – Ulm, 125-167.
- Landsberg, H.E., 1981: *The Urban Climate*. Academic Press, New York – London – Toronto – Sydney – San Francisco.
- Lindberg, F., Eliasson, I. and Holmer, B., 2003: Urban geometry and temperature variations. *Proceed. of the 5th Int. Conf. on Urban Climate (ICUC)*. eds.: Klysik, K., Oke, T.R., Fortuniak, K., Grimmond, C.S.B. and Wibig, J. *International Association for Urban Climate, World Meteorological Organization, University of Lodz. Lodz, Poland. Vol. 1.* 205-208.

- Long, N., Mestayer, P.G. and Kergomard, C., 2003: Urban database analysis for mapping morphology and aerodynamic parameters: the case of St Jerom sub-urban area, in Marseille during ESCOMPTE. *Proceed. of the 5th Int. Conf. on Urban Climate (ICUC)*. eds.: Klysik, K., Oke, T.R., Fortuniak, K., Grimmond, C.S.B. and Wibig, J. International Association for Urban Climate, World Meteorological Organization, University of Lodz. Lodz, Poland. Vol. 2. 389-392.
- Manley, G., 1958: On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* 84, 70-72.
- Masson, V., 2006: Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities. *Theor. Appl. Climatol.* 84, 35-45.
- Mézes F., 1995: Kultúrák – városszerkezetek. *HVG*, 1995. szeptember 16., 72-73.
- Mezősi G., 1983: Szeged geomorfológiai vázlata. *Alföldi tanulmányok* 7, 59-74.
- Miller, A. J., 2002: Subset selection in regression. 2. ed. Chapman&Hall/CRC, Boca Raton.
- Mitchell, J.M., Jr., 1961: The temperature of cities. *Weatherwise* 14, 224-229.
- Moreno-Garcia, M.C., 1994: Intensity and form of the urban heat island in Barcelona. *Int. J. Climatol.* 14, 705-710.
- Morris, C.J.G., Simmonds, I. and Plummer, N., 2001: Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city. *J. Appl. Met.* 40, 169-182.
- Mucsi, L., 1996: Urban land use investigation with GIS and RS methods. *Acta Geographica Univ. Szeged* 25, 111-119.
- Myrup, L. O., 1969: A numerical model of the urban heat island. *J. Appl. Meteorol.* 8, 908-918.
- Nkemdirim, L.C. and Truch, P., 1978: Variability of temperature fields in Calgary, Alberta. *Atmos. Environ.* 12, 809-822.
- Oke, T.R., 1973: City size and the urban heat island. *Atmos. Environ.* 7, 769-779.
- Oke, T.R., 1976: The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere* 14, 268-277.
- Oke, T.R., 1979: Review of urban climatology. *WMO Tech. Note* 169.
- Oke, T.R., 1981: Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. *J. Climatol.* 1, 237-254.
- Oke, T.R., 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 108, 1-24.
- Oke, T.R., 1988: Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings* 11, 103-113.
- Oke, T.R., 1997: Urban climates and global environmental change. In Thompson, R.D. and Perry, A. (eds): *Applied Climatology*. Routledge, London – New York, 273-287.
- Oke, T.R. and Fuggle, R.F., 1972: Comparison of urban/rural counter and net radiation at night. *Bound. Lay. Meteorol.* 2, 290-308.
- Oke, T.R. and Hannell F.G., 1970: The form of the urban heat island in Hamilton, Canada. In *Urban climates, WMO Tech. Note* 108, 113-126.

- Oke, T.R. and Maxwell, G.B., 1975: Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver. *Atmos. Environ.* 9, 191-200.
- Park, H-S., 1986: Features of the heat island in Seoul and its surrounding cities. *Atmos. Environ.* 20, 1859-1866.
- Park, H-S., 1987: Variations in the urban heat island intensity affected by geographical environments. *Environmental Research Center Papers 11*, The University of Tsukuba, Ibaraki, Japan, 1-79.
- Péczely Gy., 1979: *Éghajlattan*. Tankönyvkiadó, Budapest.
- Péczely Gy., 1984: *A Föld éghajlata*. Tankönyvkiadó, Budapest.
- Práger T., 1992: *Numerikus prognosztika I*. Tankönyvkiadó, Budapest.
- Probáld F., 1974: *Budapest városklímája*. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Probáld F., 1975: A városklimatológia időszerű feladatai. *Időjárás* 79, 69-76.
- Purnhauser P. és Zboray, Z., 2001: A városi hősziget és a városi szerkezet összefüggéseinek feltárása terepi és térinformatikai módszerekkel Szegeden. *OTDK dolgozat*. 25. OTDK, Pécs.
- Ripley, E.A., Archibold, O.W. and Bretell, D.L., 1996: Temporal and spatial temperature patterns in Saskatoon. *Weather* 51, 398-405.
- Santos, I.G., Lima, H.G. and Assis, E.S., 2003: A comprehensive approach of the sky view factor and building mass in an urban area of city of Belo Horizonte, Brazil. *Proceed. of the 5th Int. Conf. on Urban Climate (ICUC)*. eds.: Klysik, K., Oke, T.R., Fortuniak, K., Grimmond, C.S.B. and Wibig, J. *International Association for Urban Climate, World Meteorological Organization, University of Lodz, Lodz, Poland*. Vol. 2. 367-370.
- Stummer, G., 1939: Klimatische Untersuchungen in Frankfurt am Main und seinen Vororten. *Ber. Meteorol. Geophys. Inst., Univ. Frankfurt*, 5.
- Sundborg, Å., 1950: Local climatological studies of the temperature conditions in an urban area. *Tellus* 2, 222-232.
- Sundborg, Å., 1951: Climatological studies in Uppsala with special regard to the temperature conditions in the urban area. *Geographica (Geographical Institute, University of Uppsala)* 22, 1-111.
- Sümegehy Z., 2004: A szegedi városi hősziget területi és időbeli eloszlásának térképezése és elemzése. *PhD értekezés*, Szeged.
- Szakály J., 1962: A tényleges horizont meghatározása. Beszámolók az 1961-ben végzett tudományos kutatásokról. *OMI Hivatalos Kiadványai XXV. Kötet*, 304-309.
- Szegedi, S. and Kircsi, A., 2003b: Effects of the synoptic conditions in the development of the urban heat island in Debrecen, Hungary. *Acta Climatologica et Chorologica Univ. Szegediensis* 36-37, 111-120.

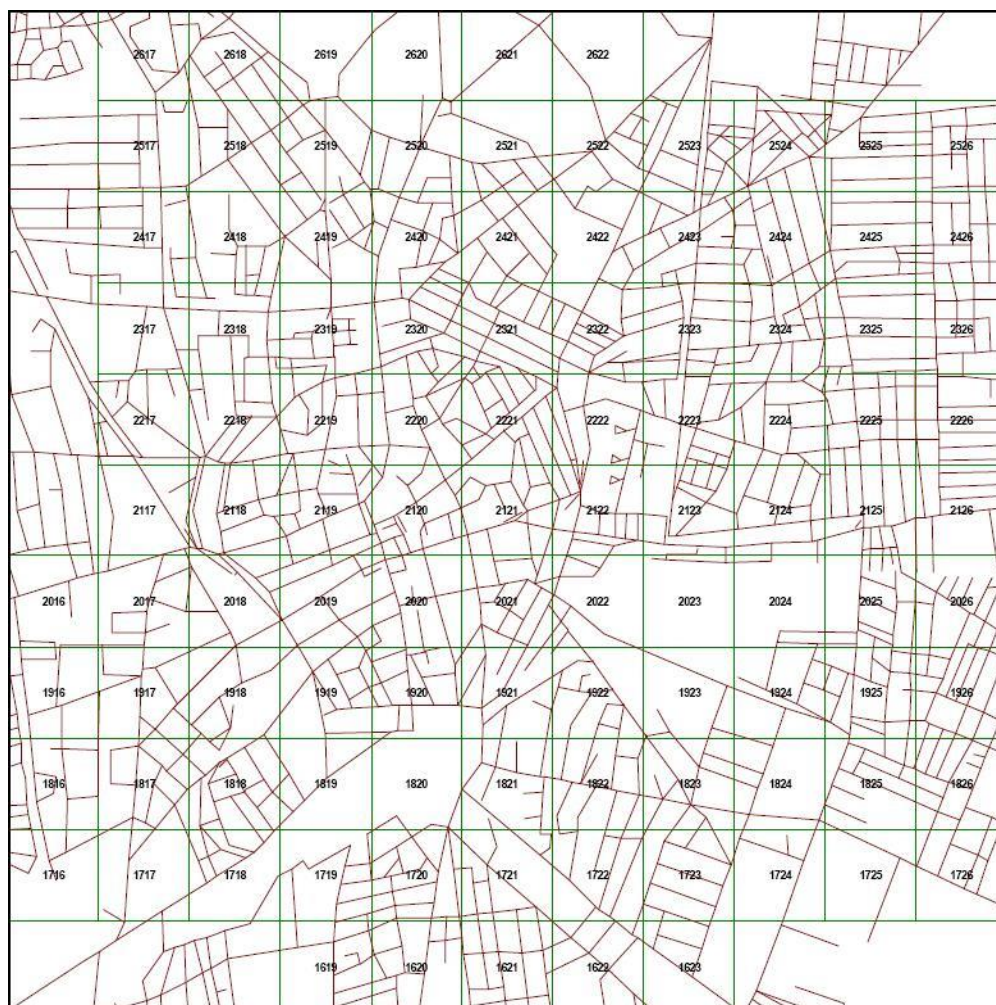
- Terjung, W. H. and O'Rourke, P. A., 1980: Simulating the casual elements of urban heat islands. *Boundary Layer Meteorol.* 19, 93-118.
- Thielen, J. and Troude, F., 2000: Representation of the urban atmospheric boundary layer in mesoscale models. *ERCA Vol 4.* 101-123.
- Unger J., 1997: Városklimatológia – Szeged városklímája. *Acta Climatologica Univ. Szegediensis* 31/B.
- Unger J. és Sümeghy Z., 2002: *Környezeti klimatológia. Kisléptékű éghajlatok, városklíma.* SZTE TTK jegyzet, JATEPress, Szeged.
- Unger J., Pál V., Sümeghy Z., Kádár E. és Kovács L., 1999: A maximális kifejlődésű városi hősziget területi kiterjedése tavasszal Szegeden. *Légkör* 44, No. 3., 34-37.
- Unger, J., Bottyán, Z., Sümeghy, Z. and Gulyás, Á., 2000: Urban heat island development affected by urban surface factors. *Időjárás.* 104, 253-268.
- Unger, J., Sümeghy, Z., Gulyás, Á., Bottyán, Z. and Mucsi, L., 2001: Land-use and climatological aspects of the urban heat island. *Meteorological Applications.* 8, No. 2. 189-194.
- Unger, J., Bottyán, Z., Sümeghy, Z. and Gulyás, Á., 2004: Connections between urban heat island and surface parameters: measurements and modelling. *Időjárás* 108, 173-194.
- Voogt, J.A. and Oke, T.R., 1997: Complete urban surface temperatures. *J. Appl. Meteorol.* 36, 1117-1132.
- Vukovich, F. M., Dunn, J. W. and Crissman, B., 1976: A theoretical study of the St. Louis heat island: The wind and temperature disribution. *J. Appl. Meteorol.* 15, 417-440.
- Yamashita, S., 1996: Detailed structure of heat island phenomena from moving observations from electric tram-cars in metropolitan Tokyo. *Atmos. Environ.* 30, 429-435.
- Yoshino, M.M., 1975: *Climate in a small area, an introduction to local climate.* University of Tokyo Press.
- Yu, T-W., 1973: Two-dimensional time-dependent numerical simulation of atmospheric flow over an urban area. *Rept. No. 32, Atmos. Science Group, Univ. of Texas, Austin, Texas, USA.* 114 pp.

MELLÉKLETEK

1. melléklet A vizsgált területen elhelyezkedő cellák azonosítói Szegeden (Sümeghy, 2004 nyomán módosítva)



2. melléklet A vizsgált területen elhelyezkedő cellák azonosítói Debrecenben (Kircsi és Szegedi, 2003 nyomán módosítva)



3. melléklet A mobil mérések alapadatai Szegeden és Debrecenben (2002. április – 2003. március)
A Debrecen esetén hiányzó 3 mérés technikai problémák miatt elmaradt. Az előfordult maximális UHI intenzitás érték félkövéren szedve

No.	Dátum	Referenciaidő (CET)	Szeged $\Delta T_{\max}$ (°C)	Debrecen $\Delta T_{\max}$ (°C)
1	2002. 04. 05.	22.15	0,82	1,24
2	2002. 04. 15.	22.15	2,57	2,36
3	2002. 04. 22.	22.45	3,21	-
4	2002. 05. 06.	23.00	2,19	2,65
5	2002. 05. 15.	23.15	4,84	3,56
6	2002. 05. 23.	23.30	1,18	1,84
7	2002. 06. 04.	23.30	4,07	2,11
8	2002. 06. 13.	23.45	4,75	2,63
9	2002. 06. 26.	23.45	4,26	5,78
10	2002. 07. 05.	23.45	4,79	4,67
11	2002. 07. 15.	23.30	3,48	2,45
12	2002. 07. 24.	23.30	1,18	1,93
13	2002. 08. 06.	23.15	0,97	1,23
14	2002. 08. 21.	22.45	3,83	4,75
15	2002. 08. 27.	22.30	2,00	4,43
16	2002. 09. 02.	22.30	1,00	1,06
17	2002. 09. 18.	22.00	4,47	1,81
18	2002. 09. 30.	21.30	1,43	1,26
19	2002. 10. 07.	21.15	3,11	1,13
20	2002. 10. 14.	21.00	1,83	2,26
21	2002. 10. 28.	20.30	1,11	-
22	2002. 11. 12.	20.15	2,62	1,56
23	2002. 11. 18.	20.00	3,21	4,14
24	2002. 11. 27.	20.00	2,76	3,64
25	2002. 12. 12.	20.00	0,35	3,57
26	2002. 12. 20.	20.00	2,40	-
27	2003. 01. 27.	20.30	1,06	1,53
28	2003. 02. 02.	20.45	4,42	0,71
29	2003. 02. 17.	21.15	3,94	2,93
30	2003. 02. 18.	21.15	5,05	1,48
31	2003. 02. 24.	21.15	1,60	3,38
32	2003. 02. 26.	21.30	5,06	4,86
33	2003. 03. 05.	21.30	2,62	1,02
34	2003. 03. 24.	22.00	6,82	2,72
35	2003. 03. 25.	22.00	5,70	5,60

4. melléklet A mobil mérések alapadatai Szegeden (1999. március – 2000. február). Az előfordult maximális UHI intenzitás érték félkövéren szedve

No.	Dátum	Referenciaidő (CET)	$\Delta T_{\max}$ (°C)
1	1999. 03. 02.	21.30	3,63
2	1999. 03. 16.	21.45	0,50
3	1999. 03. 23.	22.00	2,52
4	1999. 04. 06.	22.15	6,19
5	1999. 04. 15.	22.30	3,04
6	1999. 04. 20.	22.30	3,84
7	1999. 04. 29.	22.45	3,48
8	1999. 05. 10.	23.00	3,13
9	1999. 05. 13.	23.00	3,41
10	1999. 05. 19.	23.15	2,41
11	1999. 05. 25.	23.15	3,47
12	1999. 06. 01.	23.30	4,27
13	1999. 06. 09.	23.30	3,08
14	1999. 06. 15.	23.30	1,25
15	1999. 06. 23.	23.30	0,57
16	1999. 06. 29.	23.30	4,45
17	1999. 07. 05.	23.30	2,84
18	1999. 07. 13.	23.30	0,96
19	1999. 07. 21.	23.30	4,81
20	1999. 07. 31.	23.15	2,69
21	1999. 08. 03.	23.15	4,40
22	1999. 08. 09.	23.00	3,79
23	1999. 08. 17.	22.45	1,62
24	1999. 08. 24.	22.30	4,78
25	1999. 08. 29.	22.30	3,16
26	1999. 09. 07.	22.15	4,37
27	1999. 09. 14.	22.00	4,20
28	1999. 09. 20.	21.45	0,90
29	1999. 09. 29.	21.30	3,80
30	1999. 10. 07.	21.15	3,63
31	1999. 10. 12.	21.00	4,27
32	1999. 10. 18.	20.45	1,52
33	1999. 10. 26.	20.30	1,87
34	1999. 11. 02.	20.30	3,99
35	1999. 11. 12.	20.15	3,55
36	1999. 11. 18.	20.00	1,19
37	1999. 12. 01.	20.00	0,38
38	1999. 12. 06.	20.00	3,45
39	1999. 12. 07.	20.00	1,92
40	1999. 12. 18.	20.00	0,17
41	2000. 01. 04.	20.00	0,28
42	2000. 01. 14.	20.15	1,26
43	2000. 01. 19.	20.30	0,85
44	2000. 01. 25.	20.30	2,39
45	2000. 02. 01.	20.45	1,80
46	2000. 02. 08.	21.00	2,55
47	2000. 02. 15.	21.00	0,87
48	2000. 02. 22.	21.15	2,72

5. melléklet Az égboltláthatósági faktor (S) cellánkénti értéke Szegeden a vizsgált területen

Cella	S	Cella	S	Cella	S	Cella	S
1823	0,981	2033	0,955	2328	0,827	2525	0,993
1824	0,988	2123	0,999	2329	0,711	2526	0,934
1825	0,922	2124	0,992	2330	0,831	2527	0,908
1826	0,905	2125	0,893	2331	0,946	2528	0,816
1827	0,908	2126	0,787	2332	0,957	2529	0,873
1828	0,898	2127	0,926	2333	0,952	2530	0,797
1829	0,992	2128	0,668	2424	0,999	2631	0,812
1830	1,000	2129	0,948	2425	0,924	2632	0,957
1923	0,963	2130	0,896	2426	0,872	2724	0,932
1924	0,985	2131	0,861	2427	0,885	2725	0,965
1925	0,995	2132	0,900	2428	0,785	2726	1,000
1926	0,903	2133	0,919	2429	0,785	2727	0,998
1927	0,822	2223	0,998	2430	0,838	2728	0,703
1928	0,906	2224	0,984	2431	0,793	2729	0,869
1929	0,998	2225	0,848	2432	0,737	2730	0,906
1930	0,934	2226	0,791	2433	0,912	2731	0,906
1931	0,966	2227	0,817	2524	0,980		
2023	0,998	2228	0,701	2525	0,993		
2024	0,999	2229	0,896	2526	0,934		
2025	0,950	2230	0,746	2527	0,908		
2026	0,864	2231	0,929	2528	0,816		
2027	0,801	2232	0,859	2529	0,873		
2028	0,791	2233	0,987	2530	0,797		
2029	0,942	2324	0,985	2531	0,888		
2030	0,820	2325	0,963	2532	0,970		
2031	0,919	2326	0,879	2533	0,933		
2032	0,941	2327	0,794	2624	0,963		

6. melléklet A beépítettségi arány (B), a vízfelszín arány (W) és az épületmagasság(H) cellánkénti értékei Szegeden a vizsgált területen

Cella	B (%)	W (%)	H(m)	Cella	B (%)	W (%)	H(m)
1823	46,72	0,00	4,57	2328	91,60	0,00	13,02
1824	65,24	0,00	7,30	2329	90,08	0,00	11,10
1825	61,60	0,00	6,41	2330	83,60	0,00	10,36
1826	76,44	0,00	8,51	2331	72,36	0,00	8,66
1827	77,16	0,00	8,24	2332	63,52	0,00	5,89
1828	43,24	19,92	9,15	2333	55,68	0,00	4,56
1829	25,84	18,52	5,98	2424	69,60	0,00	2,48
1830	20,00	0,00	4,84	2425	98,17	1,36	12,46
1923	35,48	0,00	6,26	2426	92,04	0,00	11,36
1924	87,16	0,16	8,19	2427	70,81	0,00	7,58
1925	53,56	0,00	5,92	2428	85,99	0,00	8,31
1926	72,56	0,00	9,79	2429	72,52	0,00	8,85
1927	79,84	0,00	11,58	2430	75,68	0,00	10,61
1928	79,24	1,20	8,93	2431	86,09	0,16	18,42
1929	31,00	35,84	4,48	2432	60,28	0,00	25,26
1930	53,68	1,40	12,85	2433	66,52	0,00	6,50
1931	42,20	0,00	6,97	2524	71,28	5,96	6,03
2023	19,24	0,00	1,99	2525	61,35	34,08	8,68
2024	30,56	9,16	2,08	2526	91,54	0,04	18,60
2025	71,40	1,72	7,10	2527	83,25	0,00	11,63
2026	74,44	0,00	11,20	2528	64,37	0,00	18,25
2027	84,76	0,00	14,94	2529	79,00	0,00	16,56
2028	88,40	0,16	19,23	2530	67,98	0,00	21,56
2029	23,44	37,32	9,17	2531	82,77	0,00	26,63
2030	61,76	0,00	15,99	2532	60,96	0,00	8,21
2031	54,80	0,00	12,11	2533	72,16	0,00	7,15
2032	38,64	0,00	8,92	2624	25,12	0,00	6,39
2033	38,68	0,00	7,32	2625	35,32	0,36	3,37
2123	3,24	0,00	4,82	2626	70,76	0,16	1,50
2124	27,64	10,48	3,18	2627	85,44	0,16	14,87
2125	63,04	1,72	9,14	2628	78,86	3,32	13,70
2126	75,20	0,00	14,81	2629	81,67	0,00	16,26
2127	93,80	0,00	13,03	2630	81,76	0,64	16,81
2128	94,48	0,00	15,09	2631	67,40	0,00	18,22
2129	48,80	27,12	5,04	2632	48,76	0,00	5,84
2130	55,12	0,00	10,73	2724	55,04	0,00	6,75
2131	55,76	0,00	11,27	2725	56,60	0,00	6,39
2132	70,08	0,00	9,84	2726	32,20	0,00	1,75
2133	46,16	0,00	9,73	2727	44,48	0,00	2,58
2223	54,20	0,48	3,24	2728	54,48	0,00	11,96
2224	85,64	3,24	6,20	2729	43,56	0,00	7,13
2225	71,68	0,00	15,39	2730	33,20	0,32	10,80
2226	77,76	0,00	11,46	2731	53,28	0,00	13,02
2227	91,44	0,00	11,63				
2228	90,52	0,36	17,53				
2229	77,28	11,44	14,90				
2230	38,60	37,92	14,45				
2231	24,80	32,88	7,39				
2232	20,96	40,36	10,62				
2233	3,20	40,12	3,29				
2324	79,48	0,80	8,63				
2325	81,64	6,28	8,26				
2326	83,72	1,88	9,17				
2327	89,84	0,12	15,69				

7. melléklet. A beépítettségi arány (B) cellánkénti értéke Debrecenben a vizsgált területen

Cella	B (%)	Cella	B (%)	Cella	B (%)	Cella	B (%)
1619	54,9	1921	76,0	2126	41,8	2425	46,5
1620	31,9	1922	57,6	2217	46,8	2426	43,0
1621	48,0	1923	48,1	2218	57,5	2517	42,0
1622	66,3	1924	48,1	2219	59,8	2518	44,5
1623	44,5	1925	75,0	2220	47,9	2519	49,5
1716	38,4	1926	52,8	2221	52,1	2520	26,8
1717	64,8	1927	38,6	2222	50,8	2521	23,9
1718	42,6	1928	36,4	2223	53,0	2522	15,3
1719	40,1	2016	30,0	2224	46,0	2523	0,0
1720	75,5	2017	21,5	2225	46,8	2524	37,4
1721	79,3	2018	40,5	2226	40,3	2525	51,6
1722	66,0	2019	49,9	2317	38,4	2526	36,5
1723	44,5	2020	72,1	2318	48,6	2617	34,9
1816	65,3	2021	85,5	2319	52,9	2618	31,0
1817	30,3	2022	53,3	2320	39,3	2619	10,5
1818	54,6	2023	55,9	2321	38,1	2620	9,1
1819	61,9	2024	44,0	2322	41,8	2621	21,3
1820	45,0	2025	40,3	2323	45,3	2622	8,1
1821	35,9	2026	43,0	2324	48,3		
1822	32,6	2027	47,0	2325	46,3		
1823	53,8	2117	31,3	2326	42,9		
1824	31,3	2118	37,1	2417	36,5		
1825	18,4	2119	49,0	2418	39,5		
1829	59,9	2120	57,9	2419	52,9		
1916	30,5	2121	55,9	2420	32,6		
1917	43,6	2122	61,9	2421	19,4		
1918	40,3	2123	53,0	2422	22,8		
1919	48,9	2124	43,4	2423	31,8		
1920	55,3	2125	38,3	2424	45,5		

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Dolgozatom elkészítéséhez rengeteg szakmai segítséget kaptam témavezetőmtől Dr Unger Jánostól, így először neki tartozom köszönettel.

Tevékenységem során elért eredményeimhez számos munkatársam közreműködése is hozzájárult. Külön köszönöm kollégám, Dr. Sümeghy Zoltán és kolléganőm Kircsi Andrea korábban nyújtott segítségét.

Köszönöm továbbá prof. Dr. Keveiné dr. Bárány Ilonának, korábbi tanszékvezetőnek a munkám során tanúsított bizalmat és a támogatást.

Disszertációm elkészültéhez az adatgyűjtés, feldolgozás és megjelenítés területén végzett munkájukkal további kollégák, illetve hallgatók is hozzájárultak. Ezért köszönettel tartozom Balázs Bernadettnek, Fogarasi Sándornak, Gál Tamásnak, Dr. Mucsi Lászlónak, Purnhauser Pálnak, Robotka Ernőnek, Sódar Istvánnak, Dr. Szegedi Sándornak és Zboray Zoltánnak is.

Dolgozatom nem készülhetett volna el Sándor Endre volt tanszékvezetőm messzemenő támogatása nélkül, és köszönet illeti jelenlegi munkahelyemen Lukács Róbert alezredest is a támogatásért.

Végezetül, de nem utolsó sorban, hálával tartozom szüleimnek, feleségemnek, családomnak, valamint mindenkinek, akik célom eléréséhez megfelelő háttérrel biztosítottak, illetve támogattak.