

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar
Meteorológiai Tanszék

A humán komfort városklimatológiai vizsgálata Budapestre az 1961–2010 időszakra



Országos Tudományos Diákköri Dolgozat

Készítette: **Kovács Attila**
Meteorológus MSc

Témavezető: **Németh Ákos**
Országos Meteorológiai Szolgálat

Tanszéki konzulens: **Dr. Pongrácz Rita**
ELTE Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2012

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	4
2. A városklíma- és humán komfort kutatások rövid történeti áttekintése.....	5
3. Célkitűzés	8
4. A városklíma és a humán komfort kapcsolata.....	9
5. A bioklíma indexek	11
6. A humán komfort vizsgálat adatbázisa és módszerei	13
6.1. Vizsgált területek.....	13
6.2. Alkalmazott módszerek	15
7. Eredmények	17
7.1. A napszakos felbontású vizsgálat eredményei.....	17
7.2. Az órás felbontású vizsgálat eredményei	21
8. Az eredmények értékelése	26
9. Összefoglalás	28
Köszönetnyilvánítás	30
Irodalomjegyzék	31
Függelék	35

Összefoglaló

Földünk népessége ma már meghaladja a 7 milliárd főt, amelynek több mint fele városokban él. A városi lakosság számának gyors növekedése és a nagy népsűrűségű városi területek gyarapodása előreláthatóan folytatódni fog a jövőben. Egyre több emberre vannak hatással a városok – természetes környezethez képest nagymértékben átalakult – környezeti feltételei. A mesterségesen létrehozott városi környezet módosult klimatikus körülményeket teremt, melyek például termikus stresszként befolyással lehetnek az emberre, s egészségügyi problémákat okozhatnak. A városi humán bioklimatológia igen fontos feladata a városklíma termális komponensének vizsgálata, illetve ennek ismeretében olyan adaptációs stratégiák kidolgozása városi környezetekben, amelyek a termikus komfort viszonyt optimalizálják. A termikus komfort viszonyok bioklíma indexekkel írhatók le, melyek különböző meteorológiai elemek együttes hatását számszerűsítik.

Vizsgálataink során az Országos Meteorológiai Szolgálat mért meteorológiai adatait használjuk fel két eltérő adottságú budapesti mérőpont, a kertvárosi-külvárosi környezetet reprezentáló pestszentlőrinci állomás, és a sűrűn beépített belvárosi területen lévő Kitaibel Pál utcai állomás összehasonlító elemzésével. Célunk a két állomás bioklimatikus sajátosságainak és különbségeinek vizsgálata, a lehetséges okok megadása. Az összehasonlítás egy széles körben ismert bioklíma index, a PET (Physiologically Equivalent Temperature), és egy újonnan fejlesztett index, az UTCI (Universal Thermal Climate Index) alapján történik. Három éghajlati normálidőszakot (1961–1990, 1971–2000, 1981–2010) vetünk össze, s az utóbbi tíz évre (2001–2010) is részletes összehasonlítást végzünk. Eredményeink eltérő mértékű és irányú bioklimatikus különbségeket mutatnak az időszakok és az állomások között. A belvárosi területen általában nagyobb meleg és kisebb hideg hőterhelés uralkodik, azonban a kép ennél jóval árnyaltabb. A különbségek és a humán komfortra gyakorolt hatások jelentősen függnak az évszaktól és napszaktól, ami több sajátosságot eredményez. Az időszakok között detektálható tendenciák a meleg hőterhelés gyakoribbá válására, míg a hideg stressz csökkenésére utalnak mindkét vizsgált állomáson.

1. Bevezetés

Az élő szervezetet körülvevő légköri környezet több módon hatást gyakorol az emberi testre. Ennek mechanizmusát vizsgáló tudományág a humán bioklimatológia. A folyamatot a városi környezet jelentősen befolyásolja, amely számos ponton módosíthatja a városi légkör szinte valamennyi tulajdonságát, jellemzőjét. Ez megváltozott klimatikus körülményeket teremt a városi területeken. A globális népesség gyors növekedése, s az urbanizáció miatt egyre több ember van kitéve a módosult környezeti feltételeknek, melyek megnyilvánulhatnak többek között a fokozott légszennyezettségben, fény- és zajszennyezésben, különféle környezetvédelmi problémákban is. A megváltozott környezeti tényezők például termikus stresszként befolyásolhatják az egészséget, életminőséget. Az emberi egészség egyik meghatározó tényezője a humán komfort, amelynek optimális fenntartása kulcsfontosságú.

Budapesten idáig alig készült humán bioklimatológiai vizsgálat, a humán komfort városklimatológiai értékelése pedig hiányzik, pedig a téma rendkívül időszerű. A globális és regionális tendenciák (klímaváltozás, urbanizáció, fokozott életvitel, romló egészségi állapot) megkövetelik az ilyen kutatásokat. A különböző megközelítésű humán bioklimatológiai értékelések számos szakterület számára nyújthatnak fontos információkat. Figyelembe vételük a mindennapok során elengedhetetlen többek között az építészetnek, a várostervezésnek, a közegészségügynek, a turizmusnak, a szabadtéri rendezvényszervezésnek, de magának a közvéleménynek is, annak érdekében, hogy a városi lakosság életminősége, egészségi állapota fennmaradjon, esetleg javuljon. A termikus komfort, s a humán aktivitás csökkenése, az egészségi állapot romlása súlyos gazdasági-egészségügyi megterhelést jelenthet. A városi humán bioklimatológiának fontos célja, hogy a városi lakosság számára közérthetően prezentálja a humán komfort viszonyokat és tendenciákat. Hazánkban ugyanakkor a köztudatban és a tervezéskor, döntéshozatalkor többnyire hiányzik a humán bioklimatológiai szempontok számításba vétele.

E dolgozat témája két budapesti meteorológiai állomás, a Kitaibel Pál utcai és a pestszentlőrinci állomás bioklimatológiai összehasonlítása. Az elemzés a humán komfortra ható fő meteorológiai állapothatározókból számolt bioklíma indexek alapján történik. A helyszínek eltérő környezeti adottságú területet, sűrűn beépített belvárosi, illetve kertvárosi-külvárosi környezetet reprezentálnak, ezért feltételezhetjük, hogy a két terület más bioklimatikus jellemzőkkel rendelkezik.

2. A városklíma- és humán komfort kutatások rövid történeti áttekintése

A város klimatikus módosító hatását, s az atmoszférikus környezet emberi szervezetre gyakorolt hatását már az ókorban megfigyelték (pl. Hippokratész, i.e. 460–377). Az első tudományos vizsgálatok a városklimatológia területén a XVIII. század első felétől jelentek meg, melyek a városi klíma sajátosságait, s a meteorológiai elemek város és környéke között jelentkező különbségeit tanulmányozták mért adatok alapján. A múlt század közepétől indult igazán fejlődésnek a városklimatológia tudománya. Elsősorban a hősziget kifejlődését, s intenzitását (UHI) vizsgálták Észak-Amerika és Európa városaiban, majd az 1970-es évektől gyorsuló ütemben bővültek a vizsgálatok. Az utóbbi két évtized fő kutatási területe a városok sugárzási, energetikai folyamatainak és vízegyenlegének meghatározása, egyre több empirikus és numerikus modell fejlesztésével. Az elmúlt évek rendkívül szerteágazó kutatási irányai közül kiemelendő a felszínhőmérsékletekben jelentkező különbségek megismerésére irányuló vizsgálatok légi és űrfelvételek kiértékelése alapján (pl. Hartz et al., 2006), a városi felszíngeometriai viszonyok feltárása (pl. Lindberg, 2007), és nagy szerepet kap ennek a globális és regionális klímamodellekbe beágyazásának problémaköre is (pl. McCarthy et al., 2010). A városi klíma különböző léptékű osztályozása, klímazónákra felosztása is fontos kutatási terület (pl. Stewart, 2009).

Hazánkban a XIX. században és a XX. század első felében a budai és pesti klímaállomások mérési adatsorainak feldolgozásával megkezdődött Budapest éghajlatának megismerése. Az első kiemelkedő forrásértékű adatgyűjtemény és -feldolgozás Réthly (1947) monográfiája (Fő utcai és kőbányai, illetve krisztinavárosi és Szabadság-hegyi hőmérsékleti összehasonlítások). Az 1950-es évektől gyors fejlődésnek indult a budapesti városklíma-kutatás, tucatnyi klímaállomás szolgáltatott adatokat a főváros területén, s 1964–1970 között a belvárosban (Madách tér) is folyt mérés. Budapest és környékének éghajlatát összefoglalta Bacsó (1958), míg Péczely (1962) a város által keltett helyi szélrendszereket elemezte. Az 1960-as évektől maradandót alkotott a budapesti városklimatológia területén Probáld Ferenc. Kiemelkedő művében Probáld (1974) a városi állomások adatait természetes felszínen lévő állomás adataival hasonlította össze. Részletesen elemezte a város hatásait szinte mindegyik meteorológiai elemre, s lokális klímakörzeteket különített el. Később – hazánkban még egyedülként – a légköri környezet humán komfort viszonyait várostervezési vonatkozásokban is tárgyalta Probáld (1981). Hosszú szünet után az elmúlt évtizedben folytatódott a fővárosi városklíma-kutatás az Országos Meteorológiai Szolgálat és az ELTE

Meteorológiai Tanszék révén. A fő kutatási irány a város klímamódosító hatásának vizsgálata finomfelbontású infravörös műholdképek segítségével. Elemezték a városi hősziget struktúráját Magyarország (Dezső et al., 2005; Pongrácz et al., 2006a), valamint Közép-Európa nagyobb városaira (Dezső et al., 2006; Pongrácz et al., 2006b, 2010). Szeged és Debrecen esetében összehasonlították a felszíni és a műholdas léghőmérsékleti méréseket (Bartholy et al., 2009). A városklíma-kutatásokban Budapest mellett kiemelkedő helyet foglal el Szeged, ahol négy és fél évtizede folynak rendkívül sokrétű városklimatológiai vizsgálatok. Az utóbbi években fő tárgyak a hősziget-intenzitás keresztmetszet menti szerkezetének, struktúrájának elemzése s modellezése (Sümeghy és Unger, 2003; Unger et al., 2004), a városi felszíngeometria elemzése és a hőszigettel való kapcsolata (Unger, 2006; Balázs et al., 2009). Legújabbán a városi felszín- és léghőmérséklet kapcsolatát is kutatják (Unger et al., 2010).

Az elmúlt évtizedekben a városklíma-kutatással párhuzamosan egyre inkább előtérbe került a városi lakosság komfort viszonyainak, s az emberi szervezetet érő termikus terhelésnek a vizsgálata. A humán bioklimatológia csak a múlt század 20–30-as éveitől tekinthető önálló tudománynak, azonban már az ókorban megfigyeltek összefüggéseket a levegőkörnyezet és különböző megbetegedések között. A XX. század első felétől egyre nagyobb számú szakirodalom látott napvilágot. A kutatások a század középső harmadában főként orvosmeteorológiai szempontúak voltak, de ma is nagy jelentőséggel bír ez a kérdéskör a humán bioklimatológián belül. A nemzetközi trendnek megfelelően hazánkban is széleskörű orvosmeteorológiai kutatás bontakozott ki a múlt században. Az 1930-as évektől kezdve – a 60-as évektől igen dinamikusán fejlődve – kialakult a bioklimatológiának egy új, energetikai irányvonala, amely az emberi test és a környezete közötti energiaáramlási folyamatokat tárja fel, s ennek alapján a test energiaegyenlegét határozza meg. Ez a megközelítés a légköri környezet termális komponenseit abból a szemszögből értékeli, hogy a test a dinamikus egyensúlyának fenntartása érdekében milyen alkalmazkodásra képes, mekkora a környezet által kiváltott stressz, s így a komfortérzet. Ez az alapgondolat elvezetett a humán komfort kifejezésének és számszerűsítésének igényéhez, ami egyre összetettebb, helytállóbb és precízebb mérőszámok kifejlesztését eredményezett (Gulyás, 2009).

Az elmúlt években nemzetközi és hazai viszonylatban is fontos kutatási terület maradt az orvosmeteorológiai vonal (az időjárás, különösen a hőhullámok és az emberi egészség, halálozási mutatók kapcsolatának vizsgálata). A humán bioklimatológiának egy másik szegmense a városi területek humán komfort viszonyainak minél alaposabb megismerése, főként abból a célból, hogy olyan várostervezési stratégiákat dolgozzanak ki, melyek a komfort viszonyt optimalizálni képesek. Hazánkban a részletesebb humán komfort

vizsgálatok az 1990-es évektől Szegeden indultak meg, s azóta is töretlenül tartanak (Unger et al., 2005; Gulyás et al., 2006, 2010). Az elmúlt néhány évben kifejlődött, s rendkívül gyorsan teret hódított egy olyan megközelítése a humán komfort leírásának, amely objektív tényezők (tényleges fizikai folyamatok, mért paraméterek) mellett szubjektív emberi reakciókat is figyelembe vesz (Lin, 2011; Shimazaki et al., 2011; Andrade et al., 2011). Ez az irányvonal a hőérzet, s a komfortérzet kialakításában szubjektív, pszichológiai tényezőket is figyelembe vesz (múltbeli tapasztalatok, elvárások, pillanatnyi hangulat, aktivitás, elégedettség). E tényezők vizsgálata történhet például a térhasználat megfigyelésével (parkokban, kávézók teraszán stb. az aktivitás, viselkedés, alkalmazkodás megfigyelése), számlálással, kérdőívekkel, interjúkkal. Hazánkban – az országban egyedülként – Szegeden indult meg ilyen jellegű kutatás (Égerházi et al., 2009; Égerházi és Kántor, 2011). Budapestre vonatkozóan a humán komfort vizsgálatok száma minimális. A bioklíma változását vizsgálta néhány magyar városra – köztük Budapestre – Németh (2011) a PET és UTCI index alapján – utóbbit hazánkban elsőként vizsgálta. Horváth (2010) a PET-re végzett bioklíma elemzést.

A humán bioklimatológia humán komfortot vizsgáló területe napjainkban intenzív együttműködésre törekszik társtudományokkal. Emiatt egyre gyakoribb, hogy több ország különféle szakértői nemzetközi kutatási projektek keretében összefognak (Gulyás, 2009). A klíma által érintett területek (várostervezés, egészségügy, turizmus stb.) között fennálló kutatási és együttműködési hiányosságok hatására indult útnak 2005-ben a COST Action¹ 730 európai program, amelyben végül 23 ország 45 kutatója dolgozott együtt, s fejlesztett ki egy új, univerzálisan használható komfortindexet, az ún. UTCI-t. A cél az volt, hogy az új index bármely skálán, akármelyik klimatikus területen, s az év folyamán bármikor használható legyen, és így a humán bioklimatológia területein egységesen lehessen alkalmazni, s a kutatási eredmények összehasonlíthatók legyenek (Jendritzky et al., 2011).

Végezetül szeretném kiemelni Vanos et al. (2010) munkáját, amely rendkívül sokrétűen és színvonalasan összefoglalja a humán komfort összes aspektusát: a humán fiziológiai folyamatok problémakörét, a humán komfort modellezésének lehetőségeit, az objektív és szubjektív megközelítési módszereket, s a várostervezés és az emberi egészség kapcsolatrendszerét.

¹Cooperation in Science and Technical Development Action – együttműködés a tudományos és technikai fejlesztési tevékenységek területén

3. Célkitűzés

A dolgozat alapvető célja megalapozni egy korrekt városklimatológiai alapú humán komfort kutatást Budapestre vonatkozóan. Az eddig fennálló hiányt a következő szempontok alapján kívánjuk pótolni:

- jellemezni és számszerűsíteni a város két eltérő környezeti adottságú területén lévő meteorológiai állomás bioklimatikus sajátosságait mért meteorológiai adatokból számolt bioklíma indexek alapján;
- rávilágítani a két terület közötti humán komfort különbségek jellegére és erősségére;
- megkísérelni röviden megadni a bioklimatikus különbségeket előidéző lehetséges okokat;
- vizsgálni az elmúlt évtizedekre detektált változásokat;
- jellemezni a bioklimatikus viszonyok és tendenciák hatását a városi lakosság komfortérzetére;
- egy széles körben vizsgált bioklíma index mellett bevonni a vizsgálatba egy újonnan kifejlesztett indexet is.

4. A városklíma és a humán komfort kapcsolata

A városi környezet jelentősen eltér az őt körülvevő természetes környezettől. A módosulásokat számos tényező okozza, melyek jelentős hatással lehetnek a kialakult éghajlati különbségek mértékére. A város földrajzi elhelyezkedése, topográfiai viszonyai, mérete (kiterjedés, lakosság), szerkezete, s a környezetének természetföldrajzi adottságai módosíthatják a helyi klimatikus viszonyokat. A változások főbb okozó tényezői Gulyás (2009) és Unger (2010) szerint a következők:

- A természetes felszín épületek, vízátnemeresztő felületek (utak, járdák) helyettesítik, ami nagyon változatos vertikális és horizontális kiterjedésű felszíni geometriát eredményez.
- A mesterséges tereptárgyak anyagi és fizikai tulajdonságai (hőkapacitás, albedó, vízáteresztő képesség) is különböznek a természetes felszín sajátosságaitól.
- Bizonyos időszakokban a humán tevékenység által (közlekedés, ipar, fűtés) termelt és a levegőbe került szennyező anyagoknak, így például a vízgőznek, gázoknak, füstnek, illetve az antropogén hő kibocsátásának is nagy szerepe van.

A tényezők hatására a város sugárzási és vízegyenlege, továbbá számos meteorológiai állapothatározó módosulhat, úgy mint a hőmérséklet, a sugárzási összetevők, a relatív nedvesség, a csapadék, a szélesebbesség és -irány, a felhőzet, valamint a párolgás. A sugárzási viszonyok megváltozásának eredményeként a városokban hőmérsékleti többlet alakulhat ki. A jelenség a városi hősziget (UHI – urban heat island), amit a városi mesterséges és a városkörnyéki természetes felszínborítású terület hőmérséklet-különbségeként definiálhatunk. Térbeli és időbeli dinamikája igen változatos lehet, az intenzitása pedig számos tényezőtől függ (pl. időjárási helyzet, beépítettségi viszonyok, városok mérete), így évtizedek óta a nemzetközi és hazai városklimatológia egyik leggyakrabban kutatott területe (pl. Unger, 2006; Bartholy et al., 2009; Memon et al., 2009).

A város éghajlatmódosító hatása miatt a lakosságot akaratlanul megváltozott klimatikus terhelés éri, amelyhez alkalmazkodni kell, hogy a szervezet belső dinamikus egyensúlya fennmaradjon. A légköri környezet minden időpillanatban számos ponton befolyásolja az ember szervezetét. Az atmoszféra meteorológiai állapothatározói (pl. léghőmérséklet, sugárzás, légnedvesség, szélesebbesség), kémiai paraméterei (pl. a levegő összetétele), a zaj- és fényszennyezés, s a szaghatások együttesen, egymással szoros összefüggésben fejtik ki hatásukat az emberi szervezetre. Így a humán bioklimatológiában a tényezők külön-külön általában nem értelmezhetők, hanem csoportokba, ún. hatás-

komplexekbe sorolva őket tanulmányozhatók pontosabban a szervezet által kiváltott reakciók (Gulyás, 2009). A hatás-komplexek közül az emberi szervezet hőszabályozási folyamataira hatást gyakorló meteorológiai állapothatározókat a termikus komplex egyesíti. Ez magába foglalja a látható fény leghosszabb hullámhosszú tartományait, az infravörös sugárzást, a léghőmérsékletet, a szélsébséget és a légnedvességet (Jendritzky, 1993). Humán bioklimatológiai szempontból a városi környezet sugárzási, hőmérsékleti, szél- és légnedvességi viszonyainak módosulásai bírnak döntő jelentőséggel.

Az emberi hőszabályozás mechanizmusai a testmag állandó hőmérsékletének fennmaradása érdekében történnek, melyek a perifériás véráramlás, a reszketés, a verejtékezés és a viselkedési hőszabályozás (pl. a ruházkodás megváltoztatása) komplex folyamatai révén valósulnak meg. Ahhoz hogy a minket körülvevő termikus környezetet jellemezni tudjuk, a test és környezete közötti-körüli energiaáramlások, s így a test energiaegyenlegének leírása alapvető fontosságú. Az energiatermelés és -felvétel, illetve az energiaveszteség ellentétes irányú folyamatainak egyenlőknek kell lenniük, ami a test energia-egyensúlyának alapja. Az energiaegyenleg hőáramaira és a szervezet komfortérzetére a már említett meteorológiai állapothatározókon kívül a ruházat és a test személyes tényezői (a bőr albedója, a fizikai aktivitás, a testmagasság, a testtömeg, a kor és a nem) hatnak jelentősen.

A városi módosult légköri környezet szervezetre gyakorolt terhelése folyamatosan változik. Amikor a test belső dinamikus egyensúlya a legkisebb erőfeszítéssel egyensúlyban tartható, a szervezet komfortérzete optimális az adott környezeti feltételek mellett. A humán termikus komfort számos módon definiálható. Például egy olyan észmei tulajdonság, ami egyfajta elégedettséget fejez ki a termikus környezettel, és nem részesít előnyben sem pozitív, sem negatív irányú változást (ISO7730, 2005). Ha a komfortérzet például termikus stressz hatására kibillen egyensúlyából, számos módon hatással lehet az ember egészségére. Több tanulmány (pl. Vanos et al., 2010) megállapította, hogy a városlakók összességében csökkent egészséget és aktivitást mutatnak a mindennapi életben, és magasabb a hőstressz miatti többlethalálózásuk, ami fokozódik a hőmérséklet és a légszennyezés növekedésével. További káros hatás jelentkezik a munka- és sportteljesítményben, a mindennapi tevékenységben. A városi lakosság körében főként a fiatal és az idős korosztály veszélyeztetett, különösen a szív- és érrendszeri, valamint a légzőszervi megbetegedésekben szenvedők. További egészségügyi problémát okozhatnak a városi környezet nem megfelelő építészeti-konstruktív viszonyai, a rosszul átszellőzött utcák. Mindez az egészségügyi ellátórendszer és a gazdaság fokozódó megterheléséhez vezethet a városokban (Vanos et al., 2010).

5. A bioklíma indexek

A humán bioklimatológia kiemelkedő tárgyköre a termikus komfort kifejezése és a termikus komplex számszerűsítése, amely ún. bioklíma indexekkel vagy komfortindexekkel történik. A bioklíma indexek a humán komfortra ható tényezők összekapcsolásával kifejezik a komfortérzet és a fiziológiai terhelés jellegét, mértékét. Az elmúlt évtizedekben kifejlesztett indexek száma meghaladja a százat. Kezdetben csak egy vagy néhány meteorológiai paramétert integráltak, és nem vettek figyelembe fiziológiai, ruházati és személyes tényezőket. A későbbiekben egyre több, egyre összetettebb index született, melyek energiaegyenlegen alapuló modellekből származnak, és meteorológiai paramétereken kívül fiziológiai és személyi tényezőkön is alapulnak. Az újabb energia-egyensúlyi modellek a termikus komfortot kültéri környezetre is kiterjesztették.

E dolgozatban két indexet használunk vizsgálataink során. Az 1980-as évek ún. MEMI² modelljéből származik a PET³ index (Mayer and Höppe, 1987; Höppe, 1999). Definíciója szerint annak a standardizált fiktív környezetnek (ahol az átlagos radiációs hőmérséklet megegyezik a léghőmérséklettel, a vízgőznyomás 12 hPa, a szélesebbség $0,1 \text{ ms}^{-1}$) a °C-ban kifejezett hőmérséklete, amelyben a test az energia-egyensúly megtartása érdekében azonos fiziológiai válaszreakciókat ad (bőrhőmérséklet, verejtékezés ráta), mint a valós környezet komplex körülményei között. Az index egy standard személyre adja meg a termikus stressz mértékét, aki 35 éves, 175 cm magas, 75 kg tömegű férfi, ruházata $0,9 \text{ clo}^4$, alap-metabolizmusa és aktív-metabolizmusa egyaránt kb. 80 W. A PET index használata a nemzetközi szakirodalomban széles körben elterjedt és népszerű, és főként európai klimatikus körülmények között alkalmazható sikerrel. Hazánkban elsősorban Budapestre (Horváth, 2010) és Szegedre (Gulyás, 2005) történtek ezzel kapcsolatos vizsgálatok.

A másik használt bioklíma index a COST Action 730 európai program keretében kifejlesztett UTCI⁵ (Jendritzky et al., 2009). Energia-egyensúlyi modellek összehasonlításainak eredményeként megállapodás szerint a Fiala et al. (2001) által alkalmazott dinamikus modellen alapul. Definíció szerint az UTCI az a léghőmérséklet (°C), amely referencia körülmények között ugyanolyan a termikus terhelést ad, mint az aktuális

²Munich Energy Balance Model for Individuals – müncheni egyénre vonatkozó energia-egyensúlyi modell

³Physiologically Equivalent Temperature – fiziológiailag ekvivalens hőmérséklet

⁴A clo egység a ruházat hőszigetelésének mértékét adja meg. 1 clo nagyjából megfelel egy könnyű anyagú hosszúnadrág és zakó hőszigetelésének.

⁵Universal Thermal Climate Index – univerzális hőmérsékleti klíma index

termikus környezet (Blazejczyk et al., 2010). A referencia környezet meteorológiai és metabolikus jellemzői a következők:

- 10 m magasságban a szélsősebesség $0,5 \text{ ms}^{-1}$ (1,1 m magasan kb. $0,3 \text{ ms}^{-1}$),
- az átlagos radiációs hőmérséklet megegyezik a léghőmérséklettel,
- a relatív nedvesség 29°C léghőmérsékleten és ez alatt mindig 50%, ám 29°C feletti hőmérsékleteknél mindig a 20 hPa vízgőznyomás melletti relatív nedvesség,
- a fizikai aktivitás megfelel egy 4 kmh^{-1} ($1,1 \text{ ms}^{-1}$) sebességgel sétáló emberének, ami 135 Wm^{-2} metabolikus rátával ekvivalens (Jendritzky et al., 2009; Broede et al., 2011).

Az UTCI vizsgálata jelenleg még kísérleti fázisban van, de a nemzetközi irodalomban egyre inkább gyarapodnak az ezzel kapcsolatos eredmények. Hazánkban idáig ilyen vizsgálatok lényegében nem történtek. (E munkában a népszerűsége miatt elsődlegesen a PET indexen alapuló eredményeket fejtjük ki részletesebben.)

Az 1. táblázatban láthatók összefoglalva a PET és az UTCI indexre vonatkozó hőérzeti és termikus stressz határértékek, így a két index értékei (a megadott standard körülmények között) összevethetők. Az itt feltüntetett kategóriákat és színezést alkalmaztuk vizsgálatainkban. (A könnyebb kezelhetőség érdekében vizsgálatainkban gyakran egyben tekintettük és elemeztük a komfortosnál „melegebb” és „hidegebb” kategóriákat, és meleg, illetve hideg jelzőkkel illettük a hőérzetet és a fiziológiai terhelést.)

1. táblázat: A PET és UTCI index értékek egymásnak megfelelő küszöbértékei az emberi hőérzet és a fiziológiai stressz szint alapján (az adott standard körülmények között)
(Matzarakis and Mayer, 1996; Blazejczyk et al., 2010 alapján)

PET ($^\circ\text{C}$)	UTCI ($^\circ\text{C}$)	Fiziológiai hatás	Hőérzet
> 41	> 46	extrém meleg stressz	nagyon forró
-----	38 – 46	nagyon erős meleg stressz	nagyon forró
35 – 41	32 – 38	erős meleg stressz	forró
29 – 35	26 – 32	közepes meleg stressz	meleg
23 – 29	-----	gyenge meleg stressz	kissé meleg
18 – 23	9 – 26	nincs stressz	komfortos
13 – 18	0 – 9	gyenge hideg stressz	kissé hűvös
8 – 13	-13 – 0	közepes hideg stressz	hűvös
4 – 8	-27 – (-13)	erős hideg stressz	hideg
-----	-40 – (-27)	nagyon erős hideg stressz	nagyon hideg
0 – 4	< -40	extrém hideg stressz	nagyon hideg
-10 – 0		extrém hideg stressz	fagyos
< -10		extrém hideg stressz	nagyon fagyos

6. A humán komfort vizsgálat adatbázisa és módszerei

6.1. Vizsgált területek

Vizsgálataink során az Országos Meteorológiai Szolgálat mért meteorológiai adatai (léghőmérséklet, relatív nedvesség, szélesség, felhőzetmennyiség) alapján az 1961 és 2010 közötti időszakra elemezzük a budapesti Kitaibel Pál utcai és a pestszentlőrinci állomás bioklimatikus sajátosságait és különbségeit. A különbségek alapját az a feltételezés adja, hogy a Kitaibel Pál utcai állomás sűrűn beépített, a város viszonylag központi (belvárosi) területén történő elhelyezkedése reprezentálhatja a belváros klímamódosító hatását, a külvárosi fekvésű pestszentlőrinci állomással szemben (1. ábra). (A vizsgálatok során az egyszerűség kedvéért leginkább a belvárosi és külvárosi jelzővel illetjük az állomásokat.)



1. ábra: A Kitaibel Pál utcai (bal) és a pestszentlőrinci meteorológiai állomás elhelyezkedése

A pestszentlőrinci állomás (Marczell György Főobszervatórium) Budapest DK-i részén, kertváros jellegű területen fekszik. Délről erdős terület határolja, a többi irányban többnyire alacsony kertes házak veszik körül. Az általunk vizsgált időszakban a mérőműszerek elhelyezkedésében nem történt változás. A hőmérséklet mérése mindvégig 2 m, míg a szélességé 10 m magasságban folyt.

A Kitaibel Pál utcai állomás a főváros sűrűn beépített központi területén helyezkedik el, mindegyik irányban magas épületekkel határolva. A számunkra fontos időszakban a mérések helyében, a műszerek elhelyezkedésében változások történtek. 1910. március 1-jétől a terület beépítéséig, 1985. március 31-ig a mai Meteorológiai Szolgálat Kitaibel Pál utcai

saroktelkén lévő műszerkertben folyt a mérés. Még az 1930-as években a saroktelek két oldalán háromemeletes bérházak épültek, melyek alacsony napállás esetén a mérési helyszínt részben leárnyékolták. Ennek ellenére a mérési sorokban nem történt érdemleges változás. A hőmérséklet mérése a nemzetközi ajánlásnak megfelelően a talajfelszín felett kb. 2 méteres magasságban zajlott, duplán zsáuzott műszerházban. 1985. április 1-jétől a mérések a Kitaibel Pál utcai székház ötödik emeletén lévő 25,7 m magas teraszon folytatódtak. A teraszon ugyanúgy kb. 2 méteres magasságban történt a hőmérséklet mérése, ugyanolyan hőmérőházban, de az új elhelyezés nagyobb szellőzést eredményezett (Ambrózy et al., 2006). A szélmérő utcaszint feletti magassága 1985. április 1. előtt 10 m volt, utána pedig 42,57 m.

A humán bioklimatológiai vizsgálatok standard magasságban történnek. A meteorológiai állapothatározók mérése az európai nagyrassz testalkatára vonatkozó átlagos súlypont magasságában (1,1 m) történik (VDI, 1998), így a nemzetközi szakirodalomban is ezt a magasságot tekintik a számítások során. Gulyás (2009) szerint a szakirodalmi adatok alapján kis magasságkülönbségek (1,1–2 m) esetén a hőmérsékleti és a légnedvességi profil homogénnek tekinthető. Ennek megfelelően az 1985. március 31. utáni hőmérsékleti értékeket a belváros esetén 27,7 m-ről 1,1 m-re redukáltuk $\gamma = 9,86 \text{ }^{\circ}\text{Ckm}^{-1}$ vertikális hőmérsékleti gradienst feltételezve. Pestszentlőrinc esetén erre nem volt szükség. A külvárosi 10 méteres és a belvárosi 10, majd 42,57 méteres szélesség adatokat az alábbi összefüggés alapján redukáltuk 1,1 m magasságra (Kuttler, 1998):

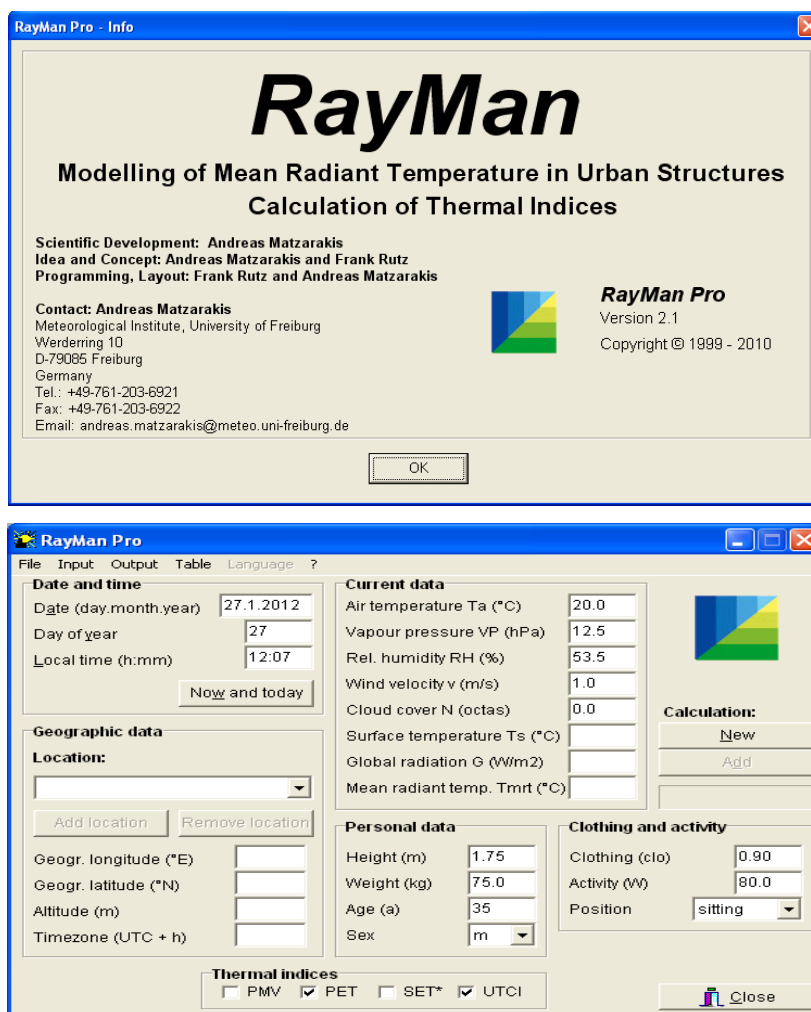
$$v_{1,1} = v (1,1 \text{ h}^{-1})^{\alpha}, \text{ ahol } \alpha = 0,12 z_0 + 0,18.$$

Az összefüggésben v a szélesség (ms^{-1}) a h magasságban, α empirikus kitevő pedig a z_0 érdességi paraméter függvénye. Az érdességi paraméter értékét a Kitaibel Pál utca esetén $z_0 = 2,0$ -nak vettük, mivel belvárosi sűrűn beépített területen helyezkedik el, míg a pestszentlőrinci állomás esetén $z_0 = 0,5$ értéket tekintettünk, ami fás-házass kertvárosi területet reprezentál (Troen and Petersen, 1989).

A Kitaibel Pál utcai állomás elhelyezkedése problémákat okoz, hiszen szükséges a hőmérséklet és szélesség jelentős magasságból történő redukálása, ez viszont nyilván mindkét állapothatározó esetén bizonyos megkötést igényel (állandó vertikális hőmérsékleti és szélességi profil feltételezése, adott érdességi paraméter használata). Az 1,1 m standard magasságra redukálás a korrekt bioklimatológiai vizsgálatokban viszont mindenképpen szükséges.

6.2. Alkalmazott módszerek

Vizsgálatainkban a két állomás léghőmérséklet, szélesebesség, légnedvesség és felhőzet mennyiség adatait használtuk fel PET és UTCI bioklíma indexek számításához. Az ehhez használt szoftver a humán bioklíma vizsgálatok egyik gyakran alkalmazott modellje, a RayMan bioklíma modell (Matzarakis et al., 1999, 2007) volt, melyet a németországi Freiburgi Egyetem Meteorológiai Tanszékén fejlesztettek ki. A modellt a sokrétű funkciói közül a két bioklíma index számítására használtuk fel. A modellt legfrissebb verzióját (RayMan Pro Version 2.1) alkalmaztuk (Andreas Matzarakis és Frank Rutz fejlesztése, 2010), ami az UTCI index számítására is alkalmas (2. ábra). Az input paraméterek a meteorológiai állapothatározók mellett az állomások földrajzi koordinátái, tengerszint feletti magasságai, és a standard személy perszonális tényezői voltak (35 éves, 175 cm magas, 75 kg tömegű férfi, akinek ruházata 0,9 clo, a fizikai aktivitása által termelt hő mennyisége 80 W, ami egy ülő személy metabolikus hőtermelésével ekvivalens).



2. ábra: A RayMan humán bioklíma modell nyitó és input ablaka

Elsőként négy napszakot jellemző időpontban hasonlítottuk össze a két mérőpont környezetének bioklimatikus terhelését az 1961. január 1. és 2010. december 31. közötti időszakokra. Az ehhez szükséges adatok a fenti meteorológiai állapothatározók napi 0, 6, 12 és 18 UTC-kor mért értékei voltak. A Kitaibel Pál utcai állomásra 0 UTC-s felhőzetadatok nem állnak rendelkezésre, ezért ezt a pestszentlőrinci állomás megfelelő adataival pótoltuk. A RayMan modell segítségével kiszámoltuk a PET és UTCI indexek értékeit. Három éghajlati normálidőszak (1961–1990, 1971–2000 és 1981–2010) szerint csoportosítottuk az adatokat, majd havi, évszakos, éves és 30 éves átlagokat számoltunk, hogy az időszakok és állomások közötti különbségeket minél részletesebben szemügyre vehessük. Az időszakokra és időpontokra az 1. táblázat PET és UTCI hőérzeti kategóriái alapján relatív gyakorisági eloszlásokat képeztünk, melyeket tíznaponként (dekádonként) csoportosítva bioklíma diagramokat hoztunk létre. Vizsgálatainkban minden esetben a fenti táblázat szerint vettük a kategóriákat, és egységes színskálát alkalmaztunk a könnyebb összehasonlítás érdekében. A táblázat PET kategóriáit az európai és magyarországi bioklimatikus viszonyok finomabb vizsgálata érdekében gyakran kiegészítik a hideg oldalon két újabb tartománnyal ($-10-0\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $<-10\text{ }^{\circ}\text{C}$), melyeket extrém hideg (fagyos) szinteknek nevezhetünk el. Vizsgálatainkban mi is ennek megfelelően jártunk el. A két helyszín összehasonlításakor a három normálidőszak közötti változásokat is elemeztük. E munkában az 1961–1990 és az 1981–2010 időszakok között detektálható változásokat mutatjuk be.

A következő lépésben az utóbbi tíz év (2001–2010) minden napjára az állomások óránkénti léghőmérséklet, szélesebbesség, relatív nedvesség és felhőzetmennyiség adataiból a RayMan modellel számolt indexek alapján is részletes összehasonlítást végeztünk. A vizsgálat során a tíz év ugyanazon napi órák átlagait tekintettük. Az órák felbontás miatt a napszakos sajátosságok és a napi változások még inkább kidomborodnak. A két terület bioklimatikus különbségeinek vizsgálatához a két mérőpont adatainak különbségét vettük, minden esetben a belvárosi adatokból kivonva a megfelelő külvárosi adatokat. Az így kapott izoplétákkal a bioklimatikus különbségek szemléletesen ábrázolhatók és elemezhetők.

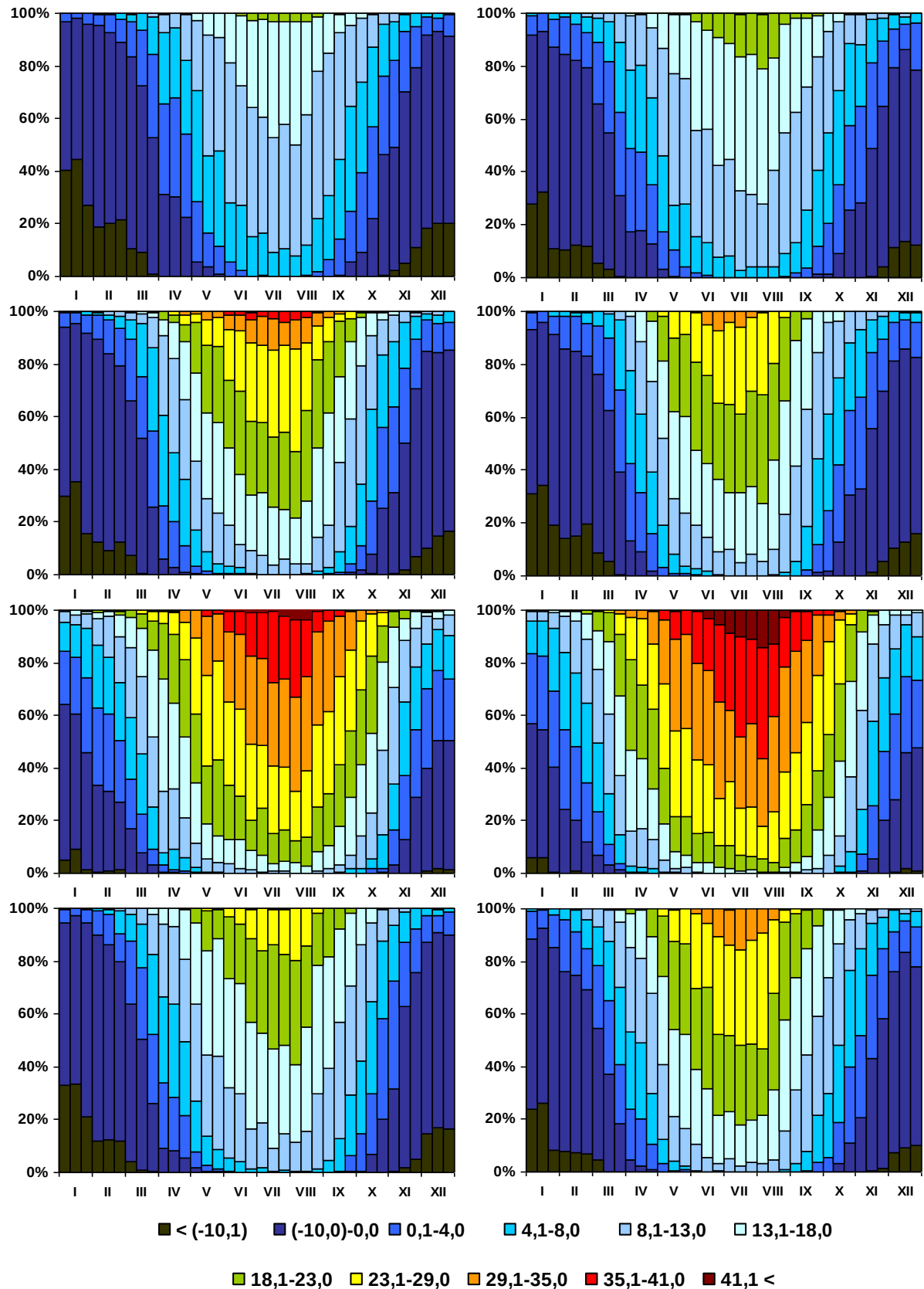
7. Eredmények

7.1. A napszakos felbontású vizsgálat eredményei

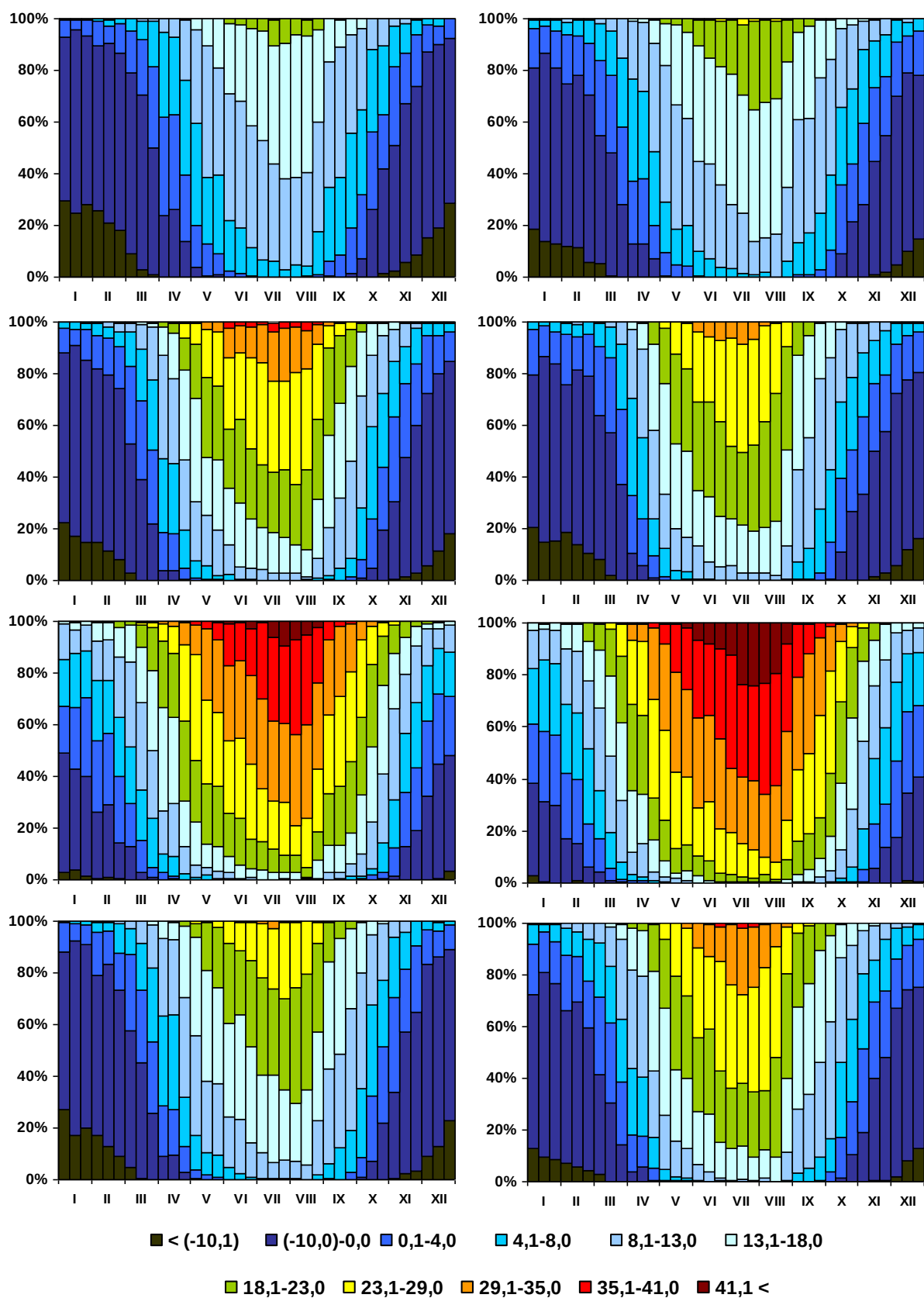
Először az 1961–1990 és az 1981–2010 normálidőszak alapján, a 0, 6, 12 és 18 UTC-s PET és UCI értékek gyakorisági eloszlásában a két állomás és a két időszak között tapasztalható eltéréseket elemezzük bioklíma diagramok formájában. Minden esetben a sötétebb pirosas (kékes) árnyalatú színek erőteljesebb meleg (hideg) termikus stresszt reprezentálnak a városlakók számára. A zöld szín jelenti a komfortos hőérzetű kategóriát.

A PET-re vonatkozó bioklíma diagramok a két bemutatott időszakra, időpontok szerint csoportosítva a 3. és a 4. ábrán láthatók. A kapott eredmények szerint 0 UTC-kor a hideg hőérzeti kategóriákba tartozó napok száma az 1961–1990 időszakban 2,5%-kal, míg az 1981–2010 időszakban 5%-kal kisebb a belvárosban. Nyáron ugyanakkor a belváros mutat fokozott terhelést. A belvárosban a nyár közepén kis gyakorisággal meleg (kissé meleg kategóriájú) hőterhelés is megjelenik a második időszakban. 6 UTC-re a hőterhelés-különbség megfordul, amely a nyári hónapokban a legszembetűnőbb. A meleg hőérzetű napok száma a belvárosban, a két időszakban 4%-kal, illetve 5%-kal kisebb, míg a hidegé 4,2%-kal, illetve 4,4%-kal nagyobb. A külvárosban, a nyári hónapokban – kis gyakorisággal – forró hőterhelés is megjelenik. A kora délutáni időszakban (12 UTC) a nyári évszakban ismét a belváros mutat fokozott meleg terhelést, ami 8,1%-kal, illetve 9,4%-kal gyakoribb ott a két időszakban. Önmagában a két leginkább szélsőséges nagyon forró és forró hőstressz gyakorisága együttesen 5,5%-kal és 7,5%-kal nagyobb. Télen ugyanakkor kisebb a hideg terhelés a belvárosban, mely a későbbi időszakra tovább csökken. 18 UTC-kor is megmarad az előbbi irányú különbség az állomások között. Ekkor a meleg hőstressz a vizsgált időszakokban, a belvárosban 7,6%-kal, majd pedig 10,1%-kal nagyobb, a hideg terhelés viszont 10,8%-kal, majd 11,4%-kal kisebb.

A két bemutatott normálidőszak között detektálható tendenciák mindkét vizsgált állomáson s mindegyik időpontban a meleg hőterhelés egyöntetű gyakoribbá válására, míg a hideg terhelés egyöntetű csökkenésére utalnak. (Ez a megállapítás akkor is igaz, ha az 1971–2000 időszakot is tekintjük, és az első két, illetve a második két időszak viszonyát nézzük. Az 1981–2010 időszakra detektált változás ugyanakkor mindegyik esetben nagyobb mértékű, mint az 1971–2000-esre.)



3. ábra: A PET index hőérzeti kategóriáinak (°C) dekádonként csoportosított gyakorisági eloszlása az 1961–1990 normálidőszakra, a külvárosi (balra) és a belvárosi (jobbra) mérőpontban, 0, 6, 12 és 18 UTC időpontban (fentről)



4. ábra: A PET index hőérzeti kategóriáinak (°C) dekádoként csoportosított gyakorisági eloszlása az 1981–2010 normálidőszakra, a külvárosi (balra) és a belvárosi (jobbra) mérőpontban, 0, 6, 12 és 18 UTC időpontban (fentről)

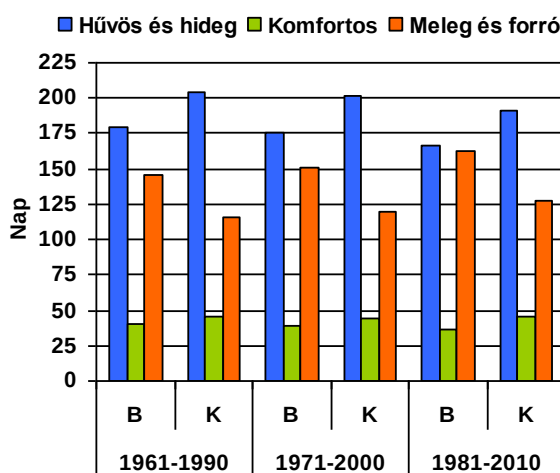
Az UTCI-re vonatkozó bioklíma diagramokat a Függelék 1. és 2. ábrái mutatják az 1961–1990 és az 1981–2010 időszakokra. Látható, hogy a mérőpontok közötti bioklimatikus különbségek irányai és a két időszak közötti tendenciák megegyeznek a PET index esetében látottakkal. Ugyanakkor kevesebb hőérzeti kategória jelenik meg egy-egy időpontban, mint a PET esetén. Ennek oka az UTCI más skálafélbontása. Nagy szerepet játszik, hogy a legtöbb kategória – különösen a komfortos hőérzetű – igen széles tartományt fog át.

A következőkben röviden áttekintjük, hogy a három éghajlati normálidőszak között milyen változások tapasztalhatók a PET index alapján. Ehhez segítséget nyújt a 2. táblázat, amely a négy vizsgált időpontban az időszakok PET átlagait mutatja évszakos bontásban, a két mérőpontban. Az egyre sötétebb narancssárga szín rendre nagyobb értéket jelöl. Ami a két mérőpont közötti különbségeket illeti, túlnyomóan a belváros rendelkezik magasabb index értékekkel. Ez alól kizárólag a 6 UTC időpont a kivétel, amikor tavasszal, nyáron és ősszel a külvárosban mutatkoznak a nagyobb PET értékek. Télen viszont a belvárosban kisebb a hideg terhelés az első két időszakban, míg az 1981–2010 időszakra szinte kiegyenlítődik a két állomás – a belvárosi növekedés igen csekély. A többi időpontban is megfigyelhető, hogy télen feltűnően kicsi a belvárosban az emelkedés a harmadik időszakra. A legnagyobb belvárosi többletek tavasszal és nyáron 12 és 18 UTC-kor fordulnak elő (3,0–4,5 °C). Az időszakok között (1971–2000 és 1961–1990, illetve 1981–2010 és 1971–2000 páronkénti különbségei) az esetek 96%-ában emelkedés látható, csupán három esetben van jelentéktelen csökkenés. A két legnagyobb mértékű növekedés (1,4 és 1,2 °C) ugyanúgy nyáron 12 UTC-kor detektálható mindkét területen, az 1981–2010-es időszakra.

2. táblázat: A PET index évszakos és éves átlagai (°C) az 1961–1990, 1971–2000 és 1981–2010 normálidőszakokra, 0, 6, 12 és 18 UTC időpontban, a belvárosi (B) és külvárosi (K) mérőpont esetén

PET (°C)	Idő (UTC) Időszak	0			6			12			18		
		61- 90	71- 00	81- 10	61- 90	71- 00	81- 10	61- 90	71- 00	81- 10	61- 90	71- 00	81- 10
Tavaszi	B	4.8	5.2	5.9	7.0	7.5	8.2	19.3	20.2	21.3	9.2	9.8	10.5
	K	2.5	2.8	3.2	8.5	9.0	9.8	16.1	16.7	17.5	6.7	7.0	7.5
Nyári	B	13.6	14.2	15.1	19.5	20.1	21.0	32.1	33.2	34.6	21.3	22.2	23.3
	K	11.6	12.0	12.7	21.2	21.9	22.9	28.8	29.6	30.8	17.1	17.7	18.5
Őszi	B	5.4	5.5	6.3	5.3	5.5	6.2	17.9	18.0	19.1	7.5	7.7	8.5
	K	2.9	2.9	3.4	7.0	7.1	7.9	15.9	15.8	16.7	5.9	5.7	6.2
Téli	B	-4.9	-4.0	-3.8	-5.5	-4.6	-4.4	1.9	3.2	3.8	-4.0	-3.0	-2.9
	K	-7.3	-6.6	-6.7	-6.2	-5.4	-4.5	0.9	1.9	2.2	-6.1	-5.4	-5.4
Évi	B	4.7	5.3	5.9	6.6	7.2	7.8	17.9	18.7	19.8	8.6	9.2	9.9
	K	2.5	2.8	3.2	7.7	8.2	9.1	15.5	16.0	16.9	6.0	6.3	6.8

A nemzetközi szakirodalomban túlnyomóan a 12 UTC időpont bioklimatikus vizsgálata gyakori, mert általában ez a nap legmelegebb időszaka, ekkor a legnagyobb a termikus stressz. Továbbá nagyjából ekkor tartózkodnak legtöbben szabadtéren, ebben az időszakban zajlik a napi munkatevékenység nagy része. Így a következőkben megvizsgáljuk e kitüntetett időpontban a humán komfort alakulását a két helyszínen a PET indexre vonatkozóan. Az 1. táblázat meleg, illetve hideg hőérzeti kategóriáihoz (melyekhez a 23 °C feletti, illetve a 18 °C alatti tartományokat összevontuk), valamint a komfortos kategóriához (18–23 °C) tartozó napok számát mutatja az 5. ábra a két mérőpontban, a három standard időszak átlaga alapján. Látható, hogy mindegyik időszakban a belvárosban élők szervezetét nagyobb meleg és kisebb hideg terhelés éri (átlagosan 32, illetve 25 nappal). A komfortos hőérzeti kategóriába tartozó napok száma a külvárosban nagyobb (átlagosan 7 nappal). Az időszakok között a meleg kategóriákba tartozó napok száma egyöntetűen növekszik, míg a hidegé csökken. A változások mértéke a belvárosban nagyobb (kivéve a hideg terhelés 1981–2010-es csökkenését). Mindegyik esetben az 1981–2010 időszakra történt változás jóval nagyobb mértékű.



5. ábra: A PET index meleg (>23 °C), illetve hideg hőérzeti kategóriáihoz (<18 °C), valamint a komfortos kategóriához (18–23 °C) tartozó időszakainak hossza a belvárosi (B) és külvárosi (K) mérőpontban, három normálidőszakra, 12 UTC esetén

7.2. Az órás felbontású vizsgálat eredményei

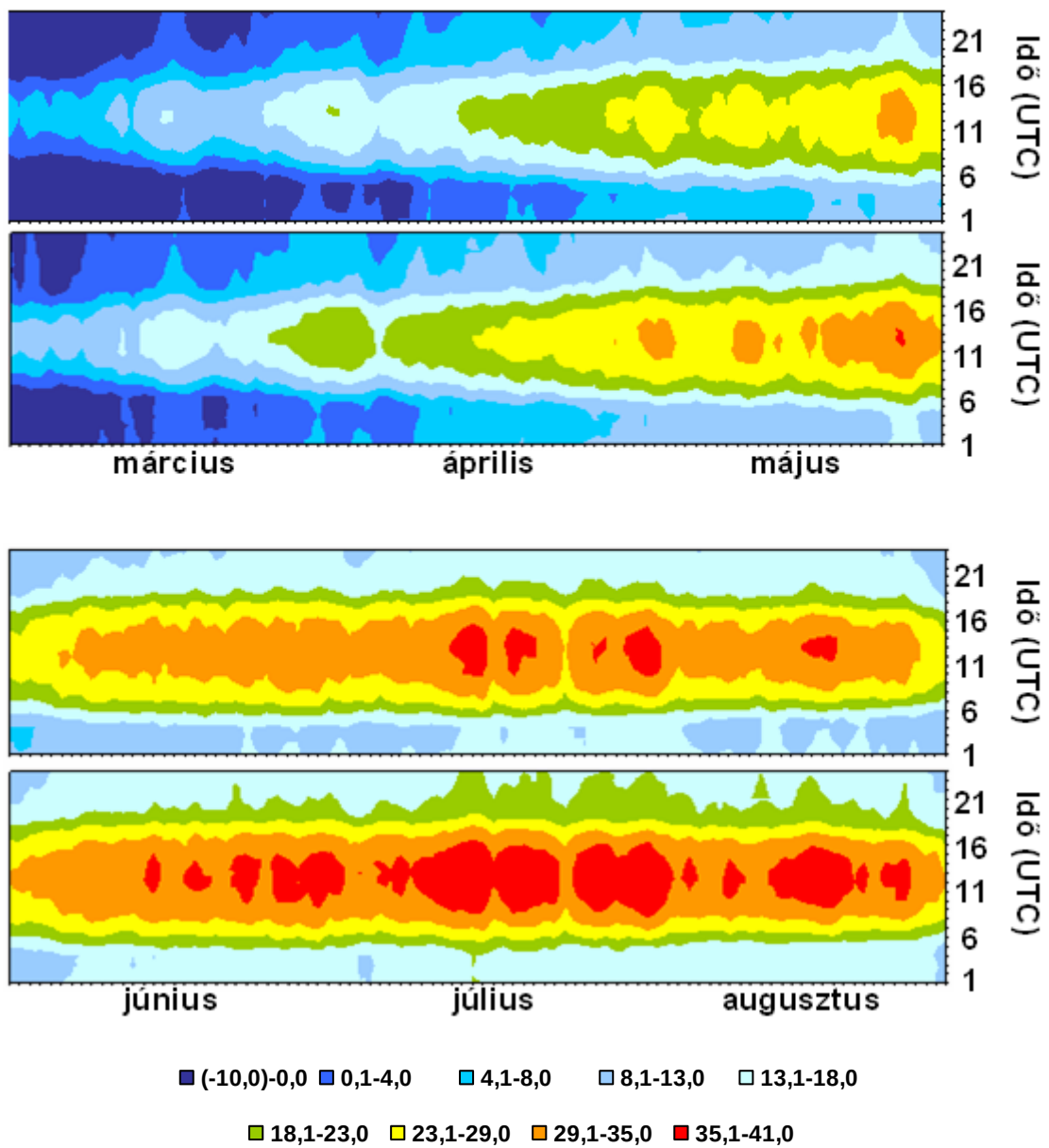
Az utóbbi tíz évre (2001–2010) kiszámolt óránkénti bioklíma index értékek alapján részletesen elemezhetjük a termikus komfort napon belüli változásait. A tíz év egészét tekintve a belváros átlagos PET értéke 3 °C-kal nagyobb. A maximális PET a belvárosban

kismértékben (0,9 °C-kal) több, a minimum értékben viszont 5 °C különbség mutatkozik a belvárosi terület javára.

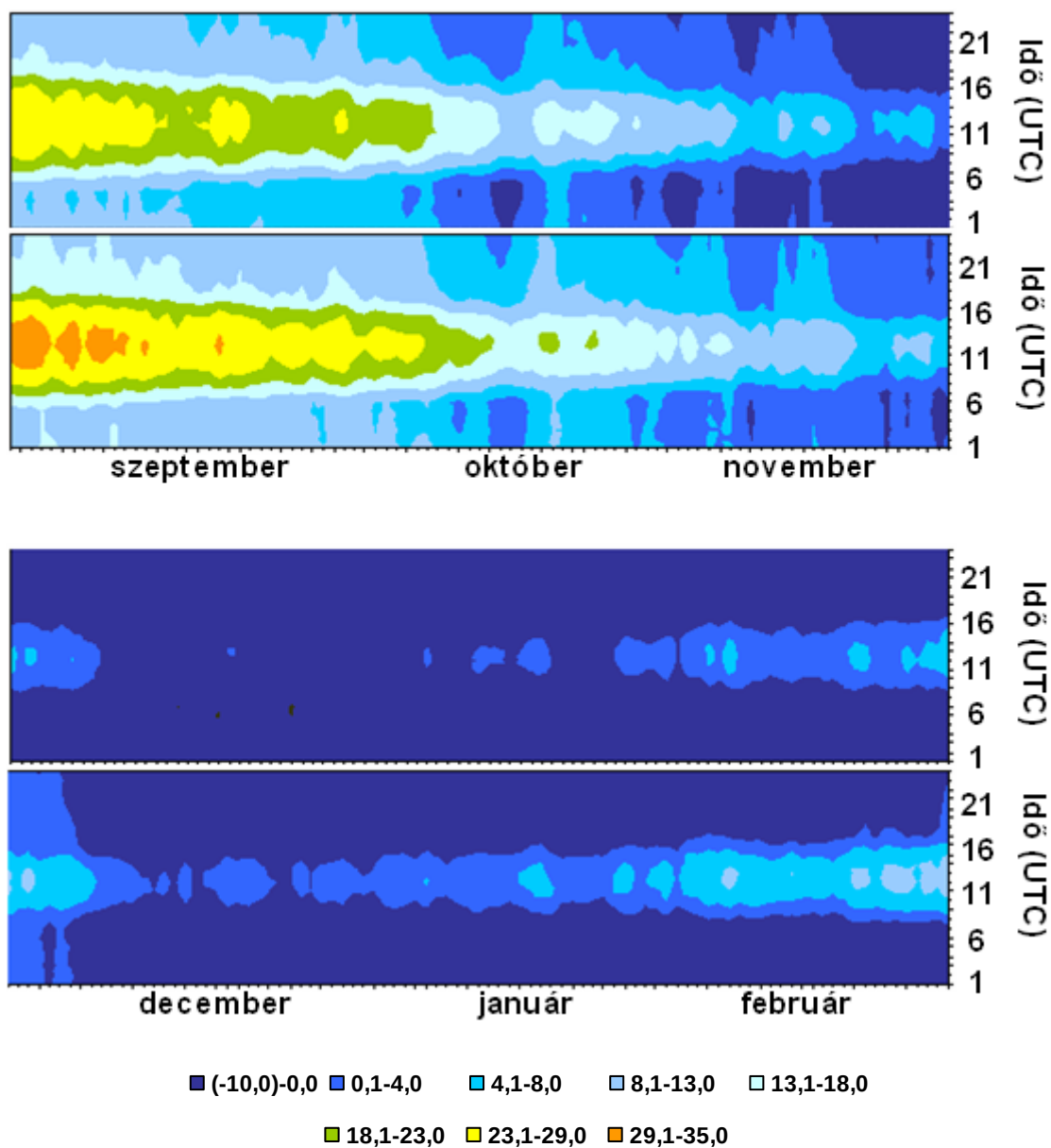
A tíz év ugyanazon napi órás belvárosi és külvárosi PET átlagainak napi eloszlását mutatja évszakonként csoportosítva a 6. és 7. ábra. A hőérzeti kategóriák ábrázolása ugyanúgy az 1. táblázat alapján, s a korábbi vizsgálatokkal megegyező színskálával történt. Általánosan a belvárosban nagyobb arányú meleg, és kisebb arányú hideg hőterhelés mutatkozik. Ha kiemelünk néhány jellegzetességet, megfigyelhető például, hogy tavasz végén a belvárosban már jelentős meleg hőérzeti kategória látható a nappali órákban, s megjelenik a forró kategória is, míg a külvárosban még az előbbi nagysága is csekély. Nyáron a belvárosban, a déli órákban a forró hőterhelés válik meghatározóvá. A július végi, augusztus eleji időszakban pedig szinte végig ez érvényesül. (A néhány naponkénti megszakadás általában fronttevékenységgel hozható összefüggésbe.) Az ősz elején a napközbeni meleg hőérzeti kategória a külvárosban hiányzik, az ősz végére pedig a déli órákat kivéve már a fagyos (extrém hideg stressz) kategória uralkodik a külvárosban. Télen extrém hideg terhelés dominál mindkét területen a tíz év átlagát tekintve, de a nappali órákban, a belvárosban általában kisebb hideg stressz hat a lakosságra.

Kiragadva a szabadtéri tevékenységek szempontjából kiemelkedő nyári évszakot, jellegzetes (különösen a legmelegebb nyár közepi időszakban) az esti órákban a hőstressz mértékének lassú csökkenése a belvárosi területen. Ezzel együtt éjjel a belvárosban a hideg oldalon általában egy kategóriával enyhébb termikus stressz érvényesül. A külvárosban intenzívebb a hőterhelés csökkenése.

Az UTCI-re vonatkozó napi eloszlásokat a Függelék 3. és 4. ábrái mutatják, évszakonként csoportosítva. Látható, hogy az UTCI más skálafelbontása miatt most is kevésbé változatos a kategóriák eloszlása. Ennek ellenére a mérőpontok között itt is kirajzolódtak bioklimatikus különbségek, melyek hasonló vonásokat mutatnak a PET esetében látottakkal.

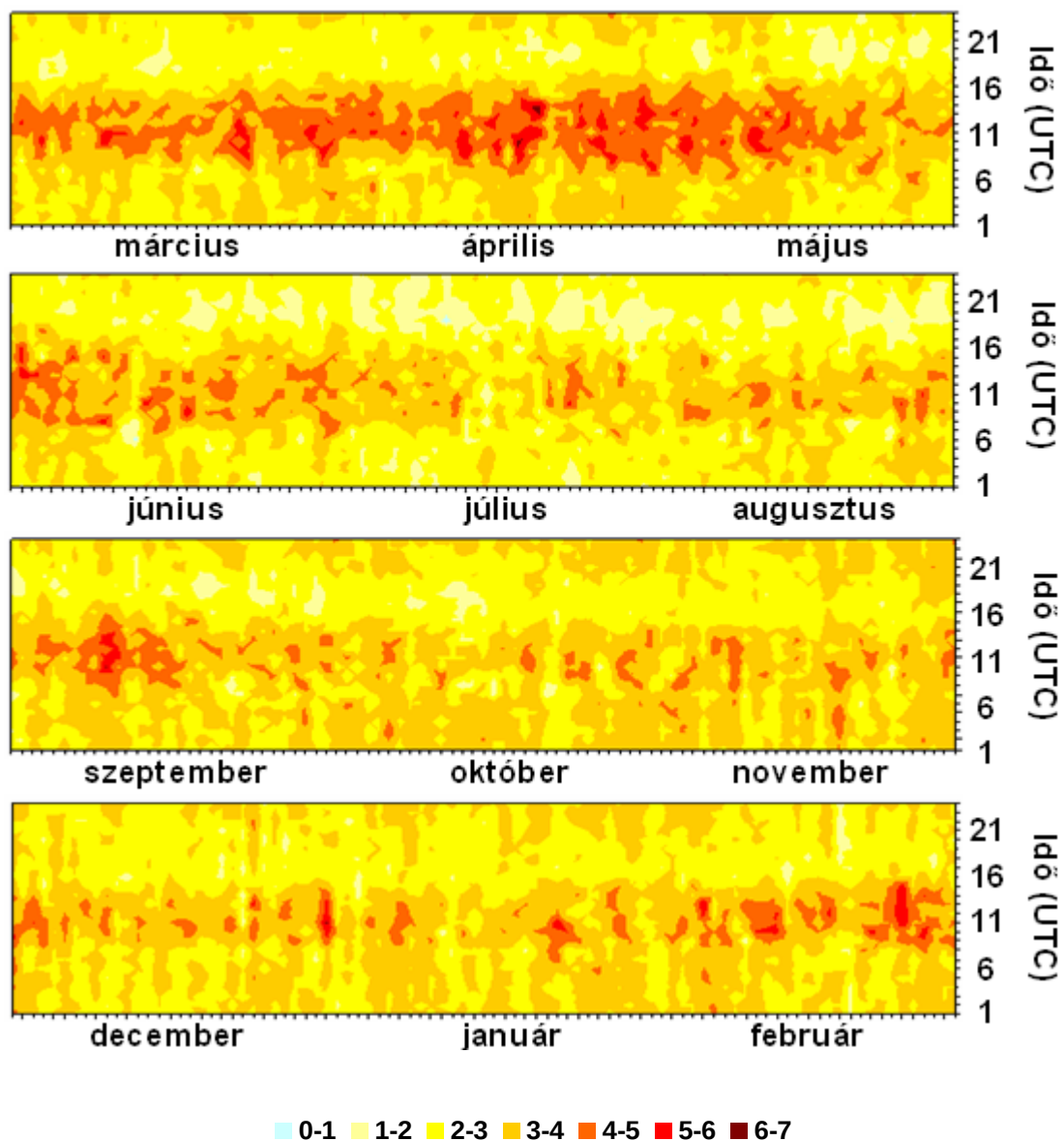


6. ábra: A külvárosi (felső) és belvárosi (alsó) terület órás hőterhelése páronként a PET index hőérzeti kategóriái alapján (°C), a 2001–2010 időszak átlagára, tavasszal (fent) és nyáron (lent)



7. ábra: A külvárosi (felső) és belvárosi (alsó) terület órás hőterhelése páronként a PET index hőérzeti kategóriái alapján (°C), a 2001–2010 időszak átlagára, ősszel (fent) és télen (lent)

A két terület bioklimatikus különbségeinek további jellemzéséhez vizsgálhatjuk az órás indexbeli különbségek napi eloszlását (8. ábra). E dolgozatban a PET-tel kapcsolatos eredményt mutatjuk be. Eredményeink alapján a tíz év átlagában mindig PET többlet mutatható ki a belvárosban, amely 0 és 6 °C között változik. Mindegyik évszakban a déli órákban jelentkezik a legnagyobb többlet (3–5 °C), ami tavasszal valamelyest nagyobb (4–6 °C). Az esti órákban jellemző a legkisebb többlet (általában 1–3 °C), az évszakokat tekintve ez nyáron a legszembetűnőbb. A késő esti órákban általában fokozódik a belvárosi többlet.



8. ábra: A belvárosi és külvárosi terület órás PET értékeinek különbsége (°C) a 2001–2010 időszak átlagára, évszakonként: tavasz, nyár, ősz, tél (fentről)

8. Az eredmények értékelése

A következőkben sorra vesszük, hogy az előző fejezetben bemutatott főbb eredményeink szerint a két mérőpont bioklimatikus jellemzői milyen hatással lehetnek a városi lakosság komfortérzetére. Választ keresünk továbbá arra, hogy a vizsgált területek elhelyezkedése miként befolyásolhatja a bioklimatikus viszonyokat.

A napszakos felbontású vizsgálat PET bioklíma diagramjait (3 és 4. ábra) értékelve éjjel a téli időszakban a belvárosi területen levőknek csekélyebb hideg termikus stresszhez kell alkalmazkodniuk a külvároshoz képest, amely kedvező hatással bír a komfortérzetre. Nyáron ugyanakkor a belvárosban fokozottabb a terhelés, melynek hatására a szervezet általában kevésbé tud regenerálódni az éjszaka folyamán. Reggel a mérőpontok közötti bioklimatikus különbség megfordul, aminek oka az lehet, hogy a belvárosi állomás a budai hegyek lábánál fekszik, ezért feltételezhetjük, hogy reggelre hűvösebb levegő áramlik ide. Ez eredményezheti a nyári reggeli kisebb hőstresszt. Télen ugyanakkor antropogén hatás (fűtés) és a sűrű beépítettség csökkentheti a hideg stresszt a belvárosban. A déli időszakra jellemző belvárosi fokozott meleg terhelés például a mindennapi szabadtéri munkavégzést károsan befolyásolhatja a nyári hónapokban. Télen viszont a kisebb hideg stressz a belvárosban mindenképpen kedvező hatású lehet. Az esti időszakban is a belvárosban uralkodik erősebb meleg terhelés, emiatt nyáron a pihenési, szellőztetési lehetőség korlátozott lehet a belvárosi területen, amely rendkívül kedvezőtlen hatással bírhat az emberi szervezetre. Azt sem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy a pihenés még kevésbé lehet hatékony a magas hőkapacitású, rosszul átszellőzött (pl. panel) lakásokban, ahol a kültérinél is jóval kedvezőtlenebb körülmények alakulhatnak ki (Gulyás, 2009).

A két bemutatott éghajlati normálidőszak (1961–1990 és 1981–2010) között detektálható tendenciák a meleg hőterhelés egyöntetű gyakoribbá válására, míg a hideg terhelés egyöntetű csökkenésére utalnak, mindkét állomáson és mindegyik időpontban. Ezek hatása a humán komfortra előnyös és káros is lehet az évszakoktól függően. Például a nyári nappali és esti növekvő tendenciájú meleg hőterhelés hátrányos (munkavégzés, pihenés, szellőztetés, szabadtéri események stb.), ugyanakkor télen a csökkenő hideg stressz kedvező hatású (esetleges szabadtéri tevékenységek, közérzet, közvetve a fűtési költségek csökkenése).

A PET indexnek a vizsgált normálidőszakokra és időpontokra vonatkozó évszakos átlagai (2. táblázat) túlnyomóan a belvárosra mutatnak magasabb értékeket. Egyedüli kivételt a 6 UTC időpontban a külvárosra kapott nagyobb értékek képeznek – ez összhangban van az

előbbi vizsgálatunkkal. Télen a belvárosra jellemző kisebb hideg terhelés például a sűrű beépítettség, a fűtés és a közlekedés miatt lehetséges. Feltűnő lehet a belvárosi állomás esetén detektált csekély téli PET növekedés az 1981–2010-es időszakra, mindegyik vizsgált időpontban. Ennek lehetséges oka az állomás 1980-as évekbeli tetőszintre költözése.

A bioklimatológiában leggyakrabban vizsgált 12 UTC időpont humán komfort alakulását elemezve (5. ábra) leszűrhető, hogy a belváros bioklimatikus módosító hatása a hideg fiziológiai terhelést csökkenti, míg a meleget fokozza. A három normálidőszak átlagai alapján a belvárosban élők szervezetét egyre nagyobb meleg, ugyanakkor kisebb hideg hőstressz éri 12 UTC-kor (a komfortos napok száma csekélyebb mértékben változik), s ez a tendencia erősödik.

Az utóbbi tíz év (2001–2010) órás felbontású vizsgálatát (6 és 7. ábra) értékelve elmondható, hogy a tíz év átlagában egy adott időpontban a belvárosban vagy ugyanolyan, vagy egy kategóriával erősebb meleg, illetve gyengébb hideg terhelés mutatkozik. Ez jól illeszkedik az éghajlati normálidőszakokra végzett napszakos vizsgálatunk eredményeihez. Kiemelve a szabadtéri tartózkodás legjellemzőbb időszakát, a nyári évszakot, a kapott eredményekből levonható, hogy a belvárosban mind az esti szabadtéri tevékenységek, mind az éjszakai pihenés során jelentős hőterhelés veszi igénybe szervezetünket (amihez hozzájárul a nagy hőkapacitású falak hőkibocsátása is).

Ha az elmúlt tíz évi órás PET értékek mérőpontok közötti különbségeinek napi eloszlását vizsgáljuk (8. ábra), feltűnhet, hogy a kapott eredmények közül némelyik kevésbé konzisztens eddigi vizsgálatainkkal. A késő esti órákban mutatkozott általában fokozódó belvárosi többletértékeket kétséget kizáróan magyarázhatjuk a hősziget-jelenséggel. Ugyanakkor váratlan, hogy a déli órákban nagyobb belvárosi többlet mutatkozik, mint az esti időszakban, és éppen este a legkisebb a többlet, ezen belül is leginkább nyáron. Az esti minimumokkal kapcsolatban magyarázatként szóba jöhet a budai hegyek közelsége miatt a nagy magasságban lévő állomásra könnyebben áramló hűvösebb levegő. Továbbá kérdéses, hogy tavasszal dél körül miért mutatkozik láthatóan nagyobb PET többlet (ez a kb. 1 °C-nyi többlet bioklimatológiailag nem tűnik jelentősnek, de nem hagyhatjuk figyelmen kívül). A kapott váratlan eredmények meggyőző magyarázata egyelőre hiányzik. A problémák tágabb értelemben visszavezethetők a belvárosi állomás 1980-as évektől fennálló városklimatológiailag problémás elhelyezkedésére, ami rámutat arra, hogy szükséges egy felszíni meteorológiai állomás létesítése egy még inkább belvárosi helyszínen, ahol a felszíni elhelyezkedés, az aszfaltozott felszínborítás jobban reprezentálhatja a belvárosi városklimatológiai viszonyokat (pl. Deák Ferenc tér, Madách Imre tér).

9. Összefoglalás

Vizsgálataink során a budapesti Kitaibel Pál utcai és a pestszentlőrinci meteorológiai állomás bioklimatikus sajátosságait és különbségeit elemeztük a PET és az UTCI bioklíma indexek alapján. A helyszínek humán komfort különbségeinek alapját az a feltételezés adta, hogy a központi fekvésű Kitaibel Pál utcai állomás a belváros klímamódosító hatását reprezentálhatja, míg a másik mérőpont belvárosi hatásoktól mentes környezetet. Összehasonlításunk első része négy különböző napszakot jellemző időpont esetén, három éghajlati normálidőszak alapján történt. Vizsgáltuk az időszakok közötti változásokat is. Vizsgálataink második részében pedig órás felbontásban, az utóbbi tíz évre vonatkozóan jellemeztük a bioklimatikus viszonyokat.

Elemzéseink alapján az alábbi főbb következtetéseket vonhatjuk le a humán komfort jellegét, különbségeit és változásait illetően:

- A mérőpontok bioklimatikus különbségeinek iránya és erőssége jelentősen függ a napszaktól. Az 1981–2010 időszakra vonatkozóan 0 UTC-kor télen a belvárosban kisebb hideg, míg nyáron erősebb meleg terhelés uralkodik. 6 UTC-re a hőterhelés-különbség megfordul. 12 UTC-kor nyáron ismét a belvárosi területen tartózkodókra hat fokozott meleg stressz, télen viszont kedvezően hathat a kisebb hideg terhelés. 18 UTC-kor a déli órákhoz képest még jelentősebb a belvárosi meleg terhelés növekedése és a hideg stressz csökkenése.
- A bioklíma diagramokon bemutatott két normálidőszak (1961–1990 és 1981–2010) között detektálható tendenciák a meleg hőterhelés gyakoribbá válására, ugyanakkor a hideg terhelés csökkenésére utalnak, mindkét állomáson és mindegyik vizsgált időpontban. Ezek hatása a humán komfortra előnyös és hátrányos is lehet az évszakoktól függően.
- A három normálidőszak évszagos és éves PET átlagait tekintve, a 6 UTC időpontot kivéve minden esetben a belvárosban mutatkoznak magasabb értékek, míg az időszakok között csaknem mindig emelkedés tapasztalható.
- A bioklimatológiában kitüntetett 12 UTC időpontot kiragadva, a három időszak PET átlaga alapján a belvárosban levők szervezetét mindig erősebb meleg, ugyanakkor kisebb hideg stressz terheli, s ez a tendencia egyre inkább fokozódik.
- Az utóbbi tíz év átlagára vonatkozóan a két állomás órás PET hőterhelése a korábbi időszakokra megállapított tendenciákat mutatja. Egy adott időpontban a belvárosban

vagy ugyanolyan, vagy egy kategóriával erősebb meleg, illetve gyengébb hideg terhelés uralkodik.

- Az UTCI indexre végzett vizsgálataink – eltérő kategória felbontás mellett – hasonló vonásokat mutatnak a PET index esetében tapasztaltakkal.
- A belvárosi állomás 1980-as évektől fennálló városklimatológiailag problémás elhelyezkedése rámutathat egy felszíni állomás létesítésének szükségességére, amely jobban reprezentálhatná a belvárosi város- és bioklimatológiai viszonyokat.

A munka folytatásaként klímamodellek alapján tervezzük elemezni a XXI. században valószínűsíthető budapesti bioklimatikus változásokat. Ezeknek a jövőbeli tendenciáknak a korrekt értékeléséhez nélkülözhetetlen lesz jelen kutatásunk eredményeinek figyelembevétele.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni témavezetőmnek, Németh Ákosnak a dolgozat elkészítéséhez, a felmerült problémák megoldásához nyújtott segítséget, valamint tanszéki konzulensemnek, Dr. Pongrácz Ritának a dolgozat pontosítását, hasznos tanácsait. Köszönöm az Országos Meteorológiai Szolgálatnak az adatsorokhoz való hozzáférést. Hálával tartozom továbbá Hollósi Brigittának és Sábitz Juditnak a kapott segítségért.

Irodalomjegyzék

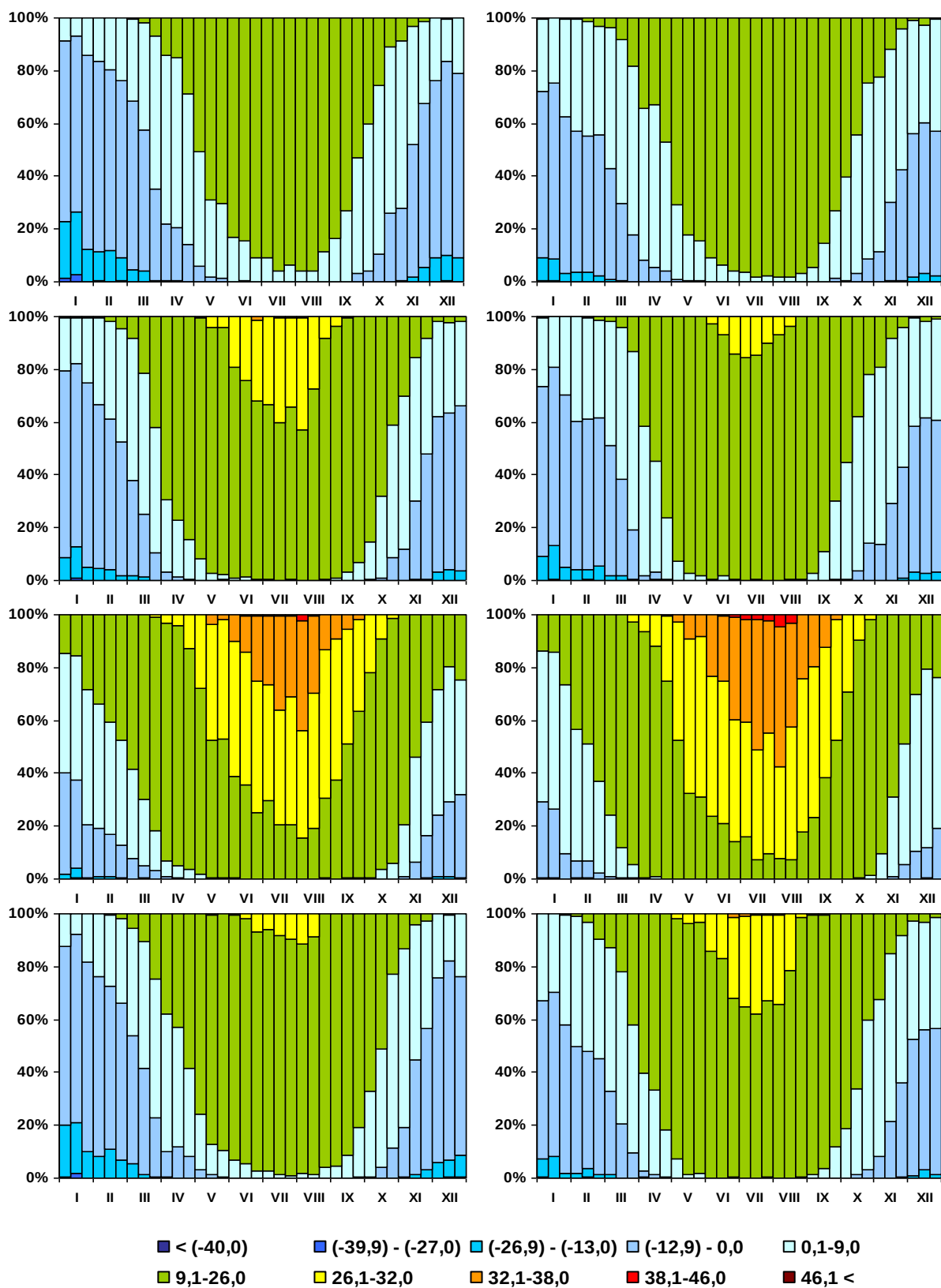
- Ambrózy P., Konkolyiné Bihari Z., Kövér Zs., Lakatos M., Nagyné Kovács E., Németh Á. (szerk.) (2006): Éghajlati adatsorok 1901-2000 (Budapest). CD-ROM. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest
- Andrade H., Alcoforado M-J., Oliveira S. (2011): Perception of temperature and wind by users of public outdoor spaces: relationships with weather parameters and personal characteristics. *Int J Biometeorol* 55, 665–680
- Bacsó N. (1958): Budapest és környékének éghajlata. In: Pécsi M. (szerk.): Budapest természeti képe. Akadémiai Kiadó, Budapest, 353–418
- Balázs B., Unger J., Gál T., Sümeghy Z., Geiger J., Szegedi S. (2009): Simulation of the mean urban heat island using 2D surface parameters: empirical modeling, verification and extension. *Appl Meteor* 16, 275–287
- Bartholy J., Pongrácz R., Lelovics E., Dezső Zs. (2009): Comparison of urban heat island effect using ground-based and datellite measurements. *Acta Climatol Chorol Univ Szegediensis* 42–43, 7–15
- Blazejczyk K., Broede P., Fiala D., Havenith G., Holmér I., Jendritzky G., Kampmann B., Kunert A. (2010): Principles of the new Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its application to bioclimatic research in European scale. *Miscellanea Geographica* 14, 91–102
- Broede P., Fiala D., Blazejczyk K., Holmér I., Jendritzky G., Kampmann B., Tinz B., Havenith G. (2011): Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Int J Biometeorol* 5/2011, Special Issue (UTCI)
- Dezső Zs., Bartholy J., Pongrácz R. (2005): Satellite-based analysis of the urban heat island effect. *Időjárás* 109, 217–232
- Dezső Zs., Bartholy J., Pongrácz R. (2006): Urban heat island analysis using MODIS and ASTER measurements for Central European large cities. In: Inspiro AB (ed): Preprints of the 6th Int Conference on Urban Climate. Göteborg University, Göteborg, Sweden, 806–809
- Égerházi L., Kántor N., Gulyás Á. (2009): Investigation of human thermal comfort by observing the utilization of open air terraces in catering places – a case study in Szeged. *Acta Climatol Chorol Univ Szegediensis* 42–43, 29–37

- Égerházi L., Kántor N. (2011): Area usage of two outdoor public places with regard to the thermal conditions – observation-based human thermal comfort study in the centre of Szeged. *Acta Climatol Chorol Univ Szegediensis* 44–45, 73–81
- Fiala D., Lomas K.J., Stohrer M. (2001): Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *Int J Biometeorol* 45, 143–159
- Gulyás Á. (2005): Differences in human comfort conditions within a complex urban environment: A case study. *Acta Climatol Chorol Univ Szegediensis* 38–39, 71–84
- Gulyás Á. (2009): Humán bioklimatológiai értékelések különböző léptékű megközelítésben. Doktori (PhD) Értekezés. SZTE Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék, Szeged, p. 115
- Gulyás Á., Unger J., Matzarakis A. (2006): Assessment of the microclimatic and human comfort conditions in a complex urban environment: modelling and measurements. *Build Environ* 41, 1713–1722
- Gulyás Á., Matzarakis A., Unger J. (2010): Comparison of the urban-rural comfort sensation in a city with warm continental climate. *Berichte des Meteorologischen Instituts de Albert-Ludwigs-Universität Freiburg* Nr. 20, 473–478
- Hartz D.A., Prashad L., Hedquist B.C., Golden J., Brazel A.J. (2006): Linking satellite images and hand-held infrared thermography to observed neighborhood climate conditions. *Rem Sens Environ* 104, 190–200
- Horváth B. (2010): Városi humán-komfort vizsgálatok Budapest példáján a fiziológiailag ekvivalens hőmérséklet (PET) felhasználásával. Diplomamunka. ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest, p. 61
- Höppe P. (1999): The physiological equivalent temperature – an universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *Int J Biometeorol* 43, 71–75
- ISO7730 (2005): International Organization for Standardization 7730. Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. ISO, Geneva
- Jendritzky G. (1993): The atmospheric environment – an introduction. *Experientia* 49, 733–738
- Jendritzky G., Havenith G., Weihs P., Batchvarova E. (eds) (2009): Towards a Universal Thermal Climate Index UTCI for assessing the thermal environment of the human being. Final Report COST Action 730, p. 26
- Jendritzky G., de Dear R., Havenith G. (2011): UTCI–Why another thermal index? *Int J Biometeorol* 12/2011, Special Issue (UTCI)

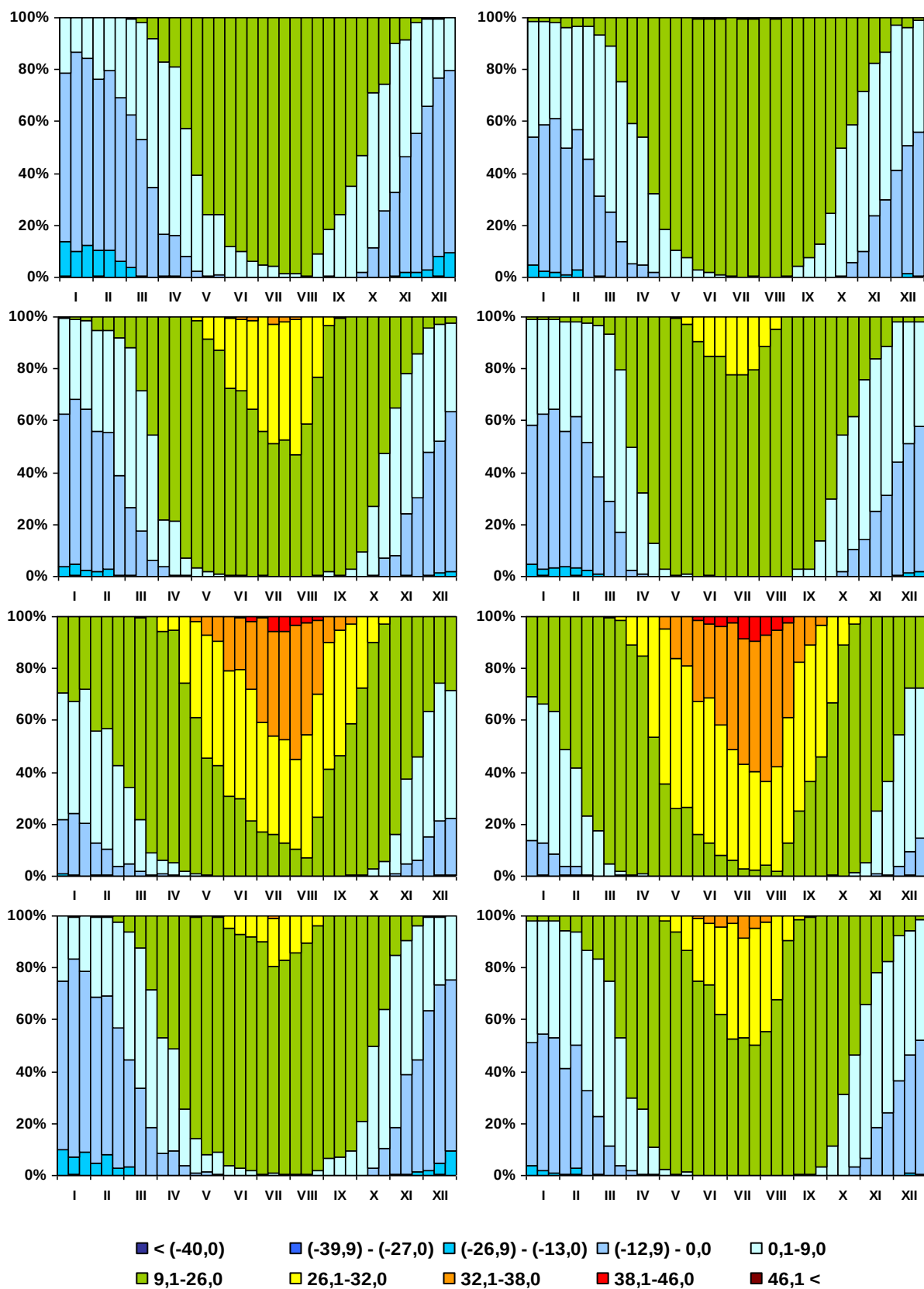
- Kuttler W. (1998): Stadtklima. In: Sukopp H., Wittig R. (eds): Stadtökologie. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart–Jena–Lübeck–Ulm, 125–167
- Lin T.P. (2011): Thermal adaptation and attendance in outdoor public spaces. *Urban Climate News* 40, 17–20
- Lindberg F. (2007): Modelling the urban climate using a local governmental geo-database. *Meteorol Appl* 14, 263–273
- Matzarakis A., Mayer H. (1996): Another kind of environmental stress: Thermal stress. *WHO Newsletters* 18, 7–10
- Matzarakis A., Mayer H., Iziomon M.G. (1999): Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *Int J Biometeorol* 43, 76–84
- Matzarakis A., Rutz F., Mayer H. (2007): Modelling radiation fluxes in easy and complex environments – Application of the RayMan model. *Int J Biometeorol* 51, 323–334
- Mayer H., Höppe P. (1987): Thermal comfort of man in different urban environments. *Theor Appl Clim* 38, 43–49
- McCarthy M.P., Best M.J., Betts R.A. (2010): Including cities in Met Office Hadley Centre global and regional climate projections. *Urban Climate News* 36, 5–9
- Memon R.A., Leung D.Y.C., Liu C-H. (2009): An investigation of urban heat island intensity (UHII) as an indicator of urban heating. *Atmos Res* 94, 491–500
- Németh Á. (2011): Changing thermal bioclimate in some Hungarian cities. *Acta Climatol Chorol Univ Szegediensis* 44–45, 93–101
- Péczely Gy. (1962): A nagyváros által keltett helyi szélrendszer Budapesten. *Időjárás* 66, 364–370
- Pongrácz R., Bartholy J., Dezső Zs. (2006a): Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis. *Advances Space Res* 37, 2191–2196
- Pongrácz R., Bartholy J., Dezső Zs. (2006b): A városi hősziget hatás elemzése közép-európai nagyvárosokra műholdas mérések alapján. In: A III. Magyar Földrajzi Konferencia tudományos közleményei. CD-ROM. MTA Földrajztudományi Kutatóintézet, Budapest, p. 10
- Pongrácz R., Bartholy J., Dezső Zs. (2010): Application of remotely sensed thermal information to urban climatology of Central European cities. *Physics and Chemistry of Earth* 35, 95–99
- Probáld F. (1974): Budapest városklímája. Akadémiai Kiadó, Budapest, p. 127
- Probáld F. (1981): A városi levegőkörnyezet humánkomfortjának tervezése. In: Szepesi D. (szerk.): A levegőkörnyezet tervezése. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 155–197

- Réthy A. (1947): Budapest éghajlata. Rheuma- és Fürdőkutató Intézet, Budapest, p. 147
- Shimazaki Y., Yoshida A., Suzuki R., Kawabata T., Imai D., Kinoshita S. (2011): Application of human thermal load into unsteady condition for improvement of outdoor thermal comfort. *Build Environ* 46, 1716–1724
- Stewart I.D. (2009): Classifying Urban Climate Field Sites by “Local Climate Zones”. *Urban Climate News* 34, 8–11
- Sümeghy Z., Unger J. (2003): Seasonal case studies on the urban temperature cross-section. *Acta Climatol Chorol Univ Szegediensis* 36–37, 101–109
- Szegedi S., Gyarmati R. (2009): Impacts of urban green spaces on the spatial structure of the urban heat island in Debrecen and different sized settlements in its neighbourhood. *Acta Climatol Chorol Univ Szegediensis* 42–43, 151–158
- Troen I., Petersen E.L. (1989): European Wind Atlas. Risoe National Laboratory, Denmark, 58. p
- Unger J. (2006): Modelling of the annual mean maximum urban heat island using 2D and 3D surface parameters. *Clim Res* 30, 215–226
- Unger J. (2010): A városi hősziget-jelenség néhány aspektusa. MTA Doktori Értekezés. Szeged, p. 108
- Unger J., Bottyán Z., Sümeghy Z., Gulyás Á., (2004): Connection between urban heat island and surface parameters: measurements and modeling. *Időjárás* 108, 173–194
- Unger J., Gulyás Á., Matzarakis A. (2005): Eltérő belvárosi mikrokörnyezetek hatása a humán bioklimatikus komfortérzetre. *Légkör* 50, 9–14
- Unger J., Gál T., Rakonczai J., Mucsi L., Szatmári J., Tobak Z., van Leeuwen B., Fiala K. (2010): Modeling of the urban heat island pattern based on the relationship between surface and air temperatures. *Időjárás* 114, 287–302
- Vanos J.K., Warland J.S., Gillespie T.J., Kenny N.A. (2010): Review of the physiology of human thermal comfort while exercising in urban landscapes and implications for bioclimatic design. *Int J Biometeorol* 54, 319–334
- VDI 3787 (1998): Methods for the human-biometeorological assessment of climate and air hygiene for urban and regional planning. Part I: Climate. VDI guideline 3787. Beuth, Berlin, p. 29

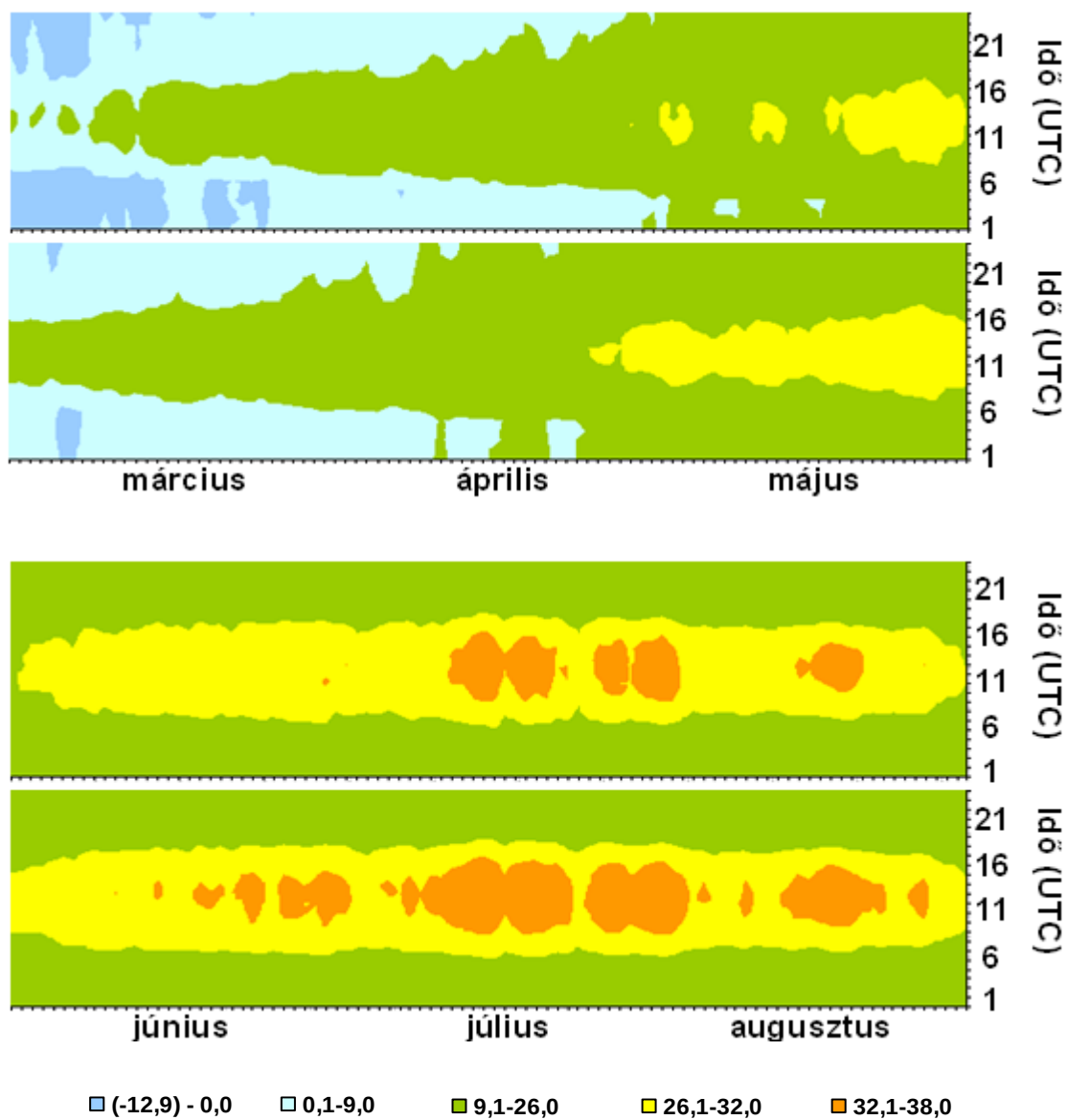
Függelék



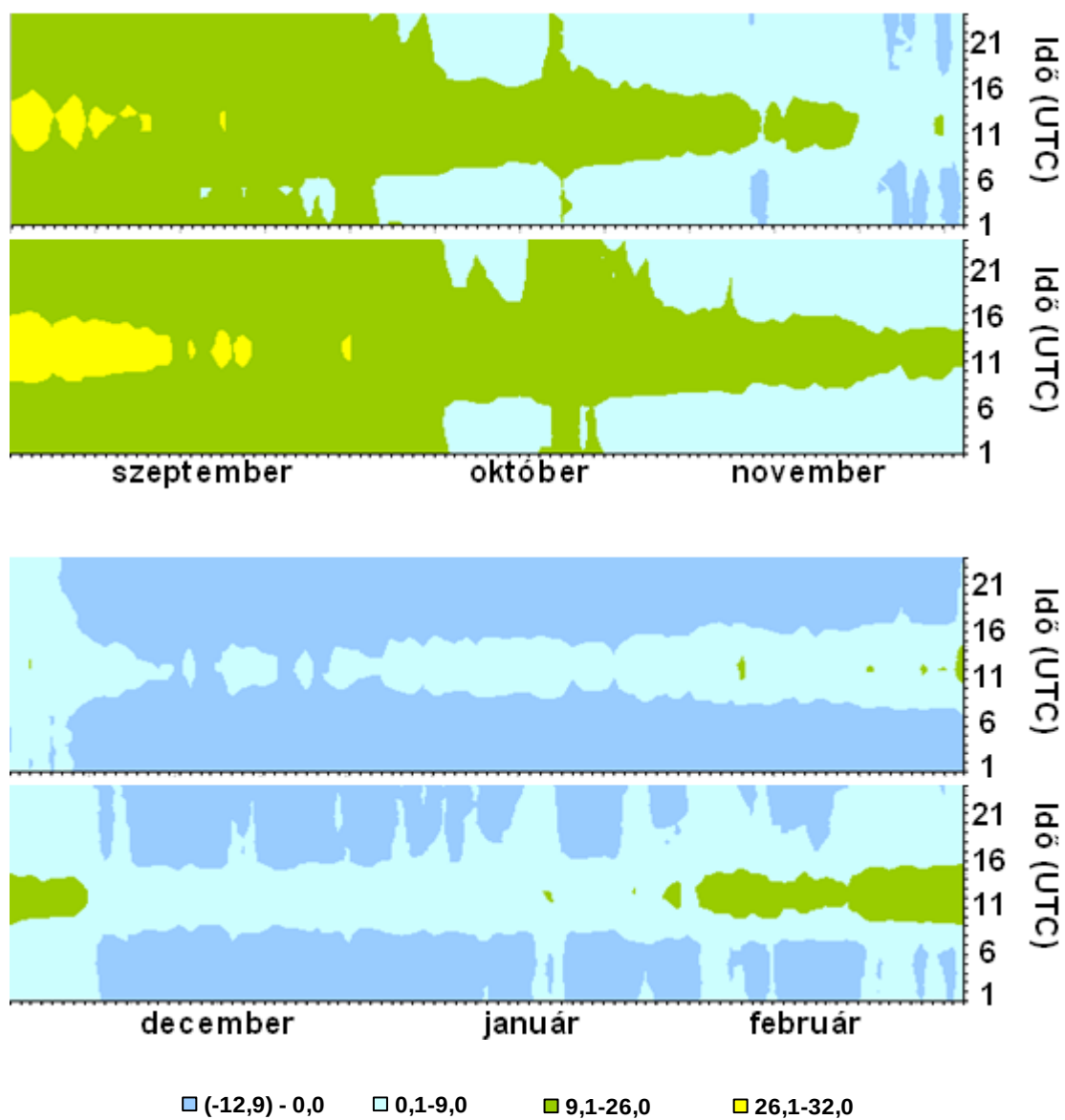
1. ábra: Az UTCI index hőérzeti kategóriáinak (°C) dekádonként csoportosított gyakorisági eloszlása az 1961–1990 normálidőszakra, a külvárosi (balra) és a belvárosi mérőpontban, 0, 6, 12 és 18 UTC időpontban (fentről)



2. ábra: Az UTCI index hőérzeti kategóriáinak (°C) dekádoként csoportosított gyakorisági eloszlása az 1981–2010 normálidőszakra, a külvárosi (balra) és a belvárosi mérőpontban, 0, 6, 12 és 18 UTC időpontban (fentről)



3. ábra: A külvárosi (felső) és belvárosi (alsó) terület órás hőterhelése páronként az UTCI index hőérzeti kategóriái alapján (°C), a 2001–2010 időszak átlagára, tavasszal (fent) és nyáron (lent)



4. ábra: A külvárosi (felső) és belvárosi (alsó) terület órás hőterhelése páronként az UTCI index hőérzeti kategóriái alapján (°C), a 2001–2010 időszak átlagára, ősszel (fent) és télen (lent)