

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar
Meteorológiai Tanszék

A humán komfort városklimatológiai vizsgálata Budapestre mért és modellezett éghajlati adatok felhasználásával



Diplomamunka

Készítette: **Kovács Attila**
Meteorológus MSc

Témavezető: **Németh Ákos**
Országos Meteorológiai Szolgálat

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

Budapest, 2012

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
2. A városklíma- és humán komfort kutatások rövid történeti áttekintése.....	6
3. A városklíma és a humán komfort kapcsolata.....	9
4. A bioklíma indexek.....	12
5. A humán komfort vizsgálat adatbázisa és módszerei	15
5.1. Vizsgált területek.....	15
5.2. Alkalmazott modellek és módszerek.....	17
6. Eredmények	22
6.1. Mért adatokon alapuló eredmények	22
6.1.1. Napszakos felbontású vizsgálat.....	22
6.1.2. Órás felbontású vizsgálat	28
6.2. Modellszimuláción alapuló eredmények	33
7. Összefoglalás	44
Köszönetnyilvánítás	48
Irodalomjegyzék	49
Függelék.....	55

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. Földünk népessége ma már meghaladja a 7 milliárd főt, amelynek több mint fele városokban él (UNFPA, 2011). A globális népesség és a városi lakosság számának gyors növekedése, valamint a nagy népsűrűségű városi területek gyarodása előreláthatóan folytatódni fog a jövőben. Egyre több emberre vannak hatással a városok – természetes környezethez képest nagymértékben átalakult – környezeti feltételei, amelyek megnyilvánulhatnak többek között a fokozott légszennyezettségben, fény- és zajszennyezésben, különféle környezetvédelmi problémákban is. A mesterségesen létrehozott városi környezet módosult klimatikus körülményeket teremt, melyek például termikus stresszként befolyásolhatják az ember életminőségét, s egészségügyi problémákat okozhatnak. Az emberi egészség egyik meghatározó tényezője a humán komfort, amelynek optimális fenntartása kulcsfontosságú. A városi humán bioklimatológia igen fontos feladata ezért a városklíma termális komponensének vizsgálata, s ennek ismeretében olyan adaptációs stratégiák kidolgozása városi környezetekben, amelyek a termikus komfortviszonyt optimalizálják. A termikus komfortviszonyok bioklíma indexekkel írhatók le, melyek különböző meteorológiai elemek együttes hatását számszerűsítik.

Budapesten idáig alig készült humán bioklimatológiai vizsgálat, a humán komfort városklimatológiai értékelése pedig hiányzik, holott a téma rendkívül időszerű. A globális és regionális tendenciák (klímaváltozás, urbanizáció, fokozott életvitel, romló egészségi állapot) egyértelműen 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 és a humán aktivitás csökkenése, s az egészségi állapot romlása súlyos gazdasági-egészségügyi megterhelést jelenthet. A városi humán bioklimatológiának fontos célja, hogy a városi lakosság számára közzétehetően mutassa be a humán komfortviszonyokat és -tendenciákat. Hazánkban ugyanakkor a köztudatban és a tervezéskor, döntéshozatalkor többnyire hiányzik a humán

bioklimatológiai szempontok számításba vétele. Ezen a területen változás szükséges, a városi lakosság egészségvédelme elsődleges célt kell élvezzen.

Az elmúlt évek során az ELTE Meteorológiai Tanszéken több diplomamunka született e témakörben. Például a humán bioklimatológia és a turisztikai klimatológia területén végzett vizsgálatokat Katona (2007), aki két bioklíma index alakulását vizsgálta hazánk hat üdülőhelyére, míg Kovács (2010) a Balaton példáján keresztül hasonlított össze több indexet. Horváth (2010) Budapestre vonatkozóan végzett bioklíma vizsgálatot a PET index alapján. Az 1961–2009 időszakra, a négy főterminus időpontban vizsgálta a PET éves menetét a Kitaibel Pál utcai és a pestszentlőrinci állomáson. Szabó (2010) három hazai kiemelt üdülőkörzetre elemezte az éghajlatváltozás turizmusra gyakorolt hatását klímamodellek által prognosztizált változások és közvélemény-kutatás alapján. Marton (2010) a halálozási ráta és a hóhullámok kapcsolatát vizsgálta Budapest esetében többek között bioklíma indexek segítségével.

Diplomamunkámban a humán komfort alakulását városklimatológiai vonatkozásban vizsgáljuk a fővárosra vonatkozóan. Elsőként az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) mért meteorológiai adatait használjuk fel két eltérő környezeti adottságú budapesti mérőpont: a kertvárosi-külvárosi környezetet reprezentáló pestszentlőrinci állomás és a sűrűn beépített belvárosi területen lévő Kitaibel Pál utcai állomás összehasonlító elemzésével. Az eltérő elhelyezkedés miatt feltételezhetjük, hogy a két helyszín más bioklimatikus jellemzőkkel rendelkezik. Az összehasonlítás a humán komfortra ható fő meteorológiai állapothatározókból számolt bioklíma indexek alapján történik. Egy széles körben ismert index, a PET¹ (Mayer and Höpfe, 1987; Höpfe, 1999), illetve egy újonnan fejlesztett index, az UTCI² (Jendritzky et al., 2009) képezi vizsgálataink alapját. Három éghajlati normálidőszakot (1961–1990, 1971–2000 és 1981–2010) vetünk össze négy különböző napszakot jellemző időpontban, s a 2001–2010 időszakra is részletes összehasonlítást végzünk.

A városi humán komforthoz kapcsolódó jövőbeli alkalmazkodási lehetőségek kidolgozása céljából hatásmodellek kifejlesztése és vizsgálata szükséges. Ehhez hozzájárulva, vizsgálataink második részében az OMSZ által a közelmúltban, az 1961–1970 időszakra futtatott ún. SURFEX³ felszín-légkör kölcsönhatásokat leíró program (Le Moigne, 2009) városi felszínre kifejlesztett ún. TEB⁴ modulját (Masson, 2000) alkalmazzuk. A felszín és légkör cserefolyamatainak leírása rendkívül fontos a klímavizsgálatok során, különösen az

¹Physiologically Equivalent Temperature – fiziológiailag ekvivalens hőmérséklet

²Universal Thermal Climate Index – univerzális hőmérsékleti klíma index

³Surface Externalisée – külső felszíni programcsomag

⁴Town Energy Balance – városi energiaegyenleg

összetett geometriával rendelkező városi felszínek esetében. A modellhez a bemeneti adatokat az ALADIN-Climate regionális klímamodell (Spiridonov et al., 2005) szolgáltatta, amely nem vesz figyelembe mesterséges felszíneket, hanem a városi területeket is természetes felszínnek tekinti. A finom, 1 kilométer horizontális felbontású városi felszínt leíró SURFEX-TEB modellt a budapesti városi, illetve belvárosi humán komfortviszonyok kimutatására teszteljük a fenti időszakokra vonatkozóan. A modelleredményeket a léghőmérséklet és szélsőségek változóira, a városi környezet, alapvetően a városi hősziget kimutatása céljából Vértesi (2011) összevetette az ALADIN-Climate futásának eredményeivel. Általában a hagyományos meteorológiai változókkal validálják a modelleket. Mi közvetett módon, a modelleredményekből számolt PET és UTCI bioklíma indexek alapján vizsgáljuk a modell viselkedését, s a 6.1. alfejezetben vizsgált, mért adatok alapján kiszámolt indexekkel hasonlítjuk össze. Ezzel a módszerrel a humán komfort hatás validálása a célunk. A vizsgálat során a két meteorológiai állomáshoz legközelebbi modell rácspont adatait használjuk, és a városi bioklimatikus hatás kimutatása céljából egy városon kívüli pontot is veszünk.

A dolgozat alapvető célja megalapozni egy városklimatológiai alapú humán komfort kutatást Budapestre vonatkozóan, a jelenleg rendelkezéseinkre álló eszközök alapján. Ezt a következő szempontok szerint kívánjuk megtenni:

- jellemezni és számszerűsíteni a város két eltérő környezeti adottságú területén lévő meteorológiai állomás bioklimatikus sajátosságait, különbségeit és tendenciáit mért meteorológiai adatokból számolt bioklíma indexek alapján (ezzel választ keresünk arra, hogy a két terület elhelyezkedése hogyan befolyásolhatja a bioklimatikus viszonyokat, s ez hogyan hat a városi lakosság komfortérzetére);
- megvizsgálni egy városi felszínt részletesen figyelembe vevő modell viselkedését a városi bioklimatikus viszonyok kimutatására;
- egy széles körben vizsgált bioklíma index mellett bevonni a vizsgálatokba egy újonnan fejlesztett, Magyarországon még alig ismert indexet is.

A dolgozatban először áttekintjük a városklíma- és a humán komfort kutatások legfontosabb eredményeit szakirodalmi feldolgozás formájában, majd a két kutatási szakterület közötti kapcsolatot vizsgáljuk fel. Ezután a felhasznált bioklíma indexeket ismertetjük. Az 5. fejezetben vizsgálataink módszereit, a vizsgált területeket, az adatbázist s az alkalmazott modelleket mutatjuk be. A dolgozatot eredményeink ismertetésével és elemzésével folytatjuk, ami először a mért adatok, majd ehhez illeszkedve a modellszimuláció alapján történik.

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 (pl. Howard, 1833). 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 a Fő utcai és kőbányai, illetve krisztinavárosi és Szabadság-hegyi hőmérsékleti összehasonlításokról. 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 komfortviszonyait 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). Budapest, Szeged és Debrecen esetében összehasonlították a felszíni léghőmérsékleti és a műholdas felszínhőmérsékleti 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 komfortviszonyainak, 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, s 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 dinamikus 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 alap gondolat elvezetett a humán komfort kifejezésének és számszerűsítésének igényéhez, ami egyre összetettebb, helytállóbb és precízebb mérőszámok kifejlesztését eredményezte (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, halálzási mutatók kapcsolatának vizsgálata, pl. Páldy és Bobvos, 2008). A humán bioklimatológiának egy másik szegmense a városi területek humán komfortviszonyainak minél alaposabb megismerése, főként abból a célból, hogy olyan várostervezési stratégiákat

dolgozzanak ki, melyek a komfortviszonyt 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 az 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 alkalmazta. Horváth (2010) a PET éves menetét vizsgálta az elmúlt évtizedekre, Budapest két meteorológiai állomása esetén.

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 Action⁵ 730 európai program, amelyben végül 23 ország 45 kutatója dolgozott együtt, s fejlesztette ki a legújabb, 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. Így a humán bioklimatológia területein egységesen lehessen alkalmazni, s a kutatási eredmények összehasonlíthatók legyenek (Jendritzky et al., 2011).

Végezetül kiemelem Vanos et al. (2010) átfogó cikkét, amely gazdag irodalmi háttéranyaggal, 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.

⁵Cooperation in Science and Technical Development Action – együttműködés a tudományos és technikai fejlesztési tevékenységek területén

3. 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 (kiterjedése, lakosság száma), szerkezete, s a környezetének természetföldrajzi adottságai módosíthatják a helyi klimatikus viszonyokat. Az éghajlati tényezők módosulásaival a városklimatológia foglalkozik. A változások legfontosabb okai Gulyás (2009) és Unger (2010) szerint a következők:

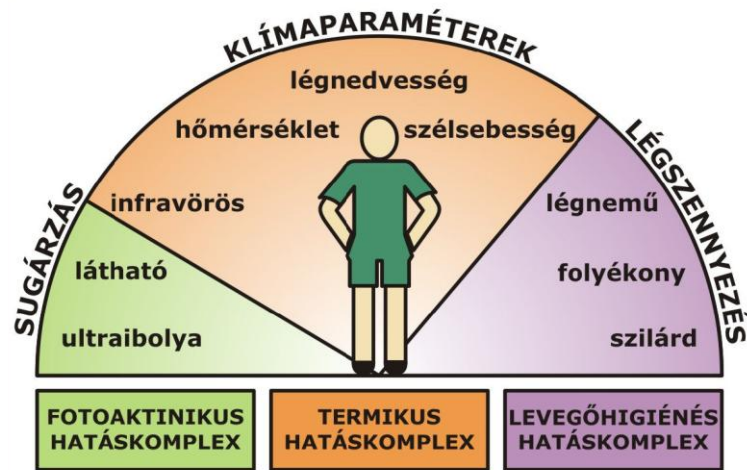
- A természetes felszín épületek, vízátnemeresztő felületek (utak, járdák) helyettesítik, ami nagyon változatos vertikális és horizontális kiterjedésű felszíni geometriát eredményez.
- A mesterséges tereptárgyak anyagi és fizikai tulajdonságai (hőkapacitás, albedó, vízáteresztő képesség) is különböznek a természetes felszín sajátosságaitól.
- Bizonyos időszakokban a humán tevékenység által (közlekedés, ipar, fűtés) termelt és a levegőbe került 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 állapotot meghatározó 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 hősziget⁶, 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, beépítettség 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 állapotot meghatározói (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

⁶UHI – urban heat island

tényezők külön-külön általában nem értelmezhetők, hanem csoportokba, ún. hatáskomplexekbe (1. ábra) sorolva őket tanulmányozhatók pontosabban a szervezet által kiváltott reakciók (Gulyás, 2009). A hatáskomplexek közül az emberi szervezet hőszabályozási folyamataira hatást gyakorló meteorológiai állapotátározókat a termikus komplex egyesíti. Ez magába foglalja a látható fény leghosszabb hullámhosszú tartományait, az infravörös sugárzást, a léghőmérsékletet, a szélsebességet és a légnedvességet (Jendritzky, 1993). Humán bioklimatológiai szempontból a városi környezet sugárzási, hőmérsékleti, szél- és légnedvességi viszonyainak módosulásai bírnak döntő jelentőséggel. Ezen állapotátározóknak az emberi egészségre s komfortérzetre gyakorolt hatásaival a városi humán bioklimatológia foglalkozik.



1. ábra: A legfontosabb hatáskomplexek a humán bioklimatológia területén
(Jendritzky, 1993; Kántor, 2012 nyomán)

Az emberi szervezet hőháztartását befolyásoló tényezők közül kitüntetett szerepe van a sugárzásnak, főleg a mérsékelt övben, és nyári, napos időben (ilyenkor a hőmérsékletnél is fontosabb humán komfort faktor lehet). Mivel nagyon sok rövid-, illetve hosszúhullámú összetevőt tartalmaz, igen bonyolult paraméter, különösen az összetett geometriájú városi területeken, ahol a mesterséges objektumok miatt a sugárzási komponensek folyamatosan más-más szögben és erősséggel érik a testet. A külső környezet minden irányából érkező rövid- és hosszúhullámú sugárzási fluxus hatásait egy komplex mérőszám, a T_{mrt}^7 ötvözi. Ez a paraméter a test által abszorbeált (emittált) °C-ban kifejezett sugárzási energiafelvételt (-leadást) számszerűsíti. Definíció szerint T_{mrt} egy olyan fekete testnek tekintett (emissziós együttható, $\epsilon=1$) környezetnek a hőmérséklete, amelyben az emberi testet érő sugárzási energiabevétel ugyanolyan hőérzetet kelt a szervezetben, mint az adott pillanatban a testet

⁷Mean Radiant Temperature – átlagos sugárzási hőmérséklet

körülvevő valós környezet (Matzarakis et al., 1999). Az energiaegyenleget befolyásoló másik fontos környezeti tényező a hőmérséklet, ezek közül is a legfontosabb a léghőmérséklet, ami az érzékelhető (konvektív) hőcsere irányát szabja meg. Hőség esetén az eredetileg hűvösebb környezet felé irányuló hőáram leállhat, vagy akár hőközléssé is válhat. A következő faktor, a légnedvesség a verejték elpárolgásának hatására történő látens hővesztés mértékét szabja meg. A szélsőségek pedig az érzékelhető és a látens hőcsere hatékonyságát egyaránt befolyásolja, növekedésével fokozódik a hőelvonás erőssége (Gulyás, 2009).

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 ruházatkód megváltoztatása) komplex folyamatai révén valósulnak meg. Ahhoz, hogy a minket körülvevő termikus környezetet jellemezni tudjunk, a test és környezete közötti, illetve körüli energiaáramlások, s így a test energiaegyenlegének leírása alapvető fontosságú. Az energiatermelés és -felvétel, illetve az energiavesztés ellentétes irányú folyamatainak egyenlőknek kell lenniük, ami a test energia-egyensúlyának alapja. Az energiaegyenleg hőáramaira és a szervezet komfortterzetére a már említett meteorológiai állapotváltozókon 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 komfortterzete 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 komfortterzet 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 rosszabb egészségi állapotot és csökkent aktivitást mutatnak a mindennapi életben, és magasabb a hőstressz miatti többlethalálozásuk, ami fokozódik a hőmérséklet és a légszennyezés növekedésével. További káros hatás jelentkezhet 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 (Vanos et al., 2010).

4. 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 állapothatározót integráltak, és nem vettek figyelembe fiziológiai, ruházati és személyes tényezőket. Ezen ún. éghajlati indexeket alapvetően még zárt térben levő személyre fejlesztették ki. Fiziológiai jelentőségük hiánya miatt általában korlátozott szerephez jutnak, de könnyen kezelhetőségük révén gyakran használják őket ma is.

A későbbiekben teret hódítottak az emberi szervezet hőszabályozási rendszerével kapcsolatos folyamatok modellezési lehetőségei. Ezáltal elterjedtek a test energiaegyenlegén alapuló modellek. Végeredményben egyre több, egyre összetettebb bioklíma index született, melyek az energiaegyenlegen alapuló modellekből származnak, és meteorológiai állapothatározókon kívül fiziológiai és személyi tényezőkön is alapulnak. Tehát figyelembe veszik a legtöbb, emberi hőháztartást befolyásoló tényezőt. Az újabb energia-egyensúlyi modellek a termikus komfortot kültéri környezetre is kiterjesztették. Az 1. táblázatban néhány fontosabb éghajlati és energia-egyensúlyon alapuló bioklíma indexet foglaltunk össze mértékegységeikkel.

Éghajlati index			Energia-egyensúlyi index		
ET	Effective Temperature (effektív hőmérséklet)	°C	HSI	Heat Stress Index (hőstressz index)	–
OT	Operative Temperature (operatív hőmérséklet)	°C	PMV	Predicted Mean Vote (várható átlagos hőérzet)	–
RSI	Relative Strain Index (relatív terhelési index)	–	PPD	Predicted Percent Dissatisfied (várható elégedetlenségi arány)	%
THI	Thermohigrometric Index (termohigrometrikus index)	°C	TCI	Tourism Climate Index (turisztikai klimatológiai index)	–
AT	Apparent Temperature (látszólagos hőmérséklet)	°C	PET	Physiologically Equivalent Temperature (fiziológiailag ekvivalens hőmérséklet)	°C
H	Humidex (fülleltségi index)	°C	OUT-SET*	new Standard Effective Temperature for outdoor (kültéri új standard effektív hőmérséklet)	°C
WCI	Wind Chill Index (szélcsípősségi index)	°F	UTCI	Universal Thermal Climate Index (univerzális hőmérsékleti klíma index)	°C

1. táblázat: Néhány fontosabb éghajlati és energia-egyensúlyi bioklíma index és mértékegysége

A dolgozatban két indexet használunk vizsgálataink során. Az 1980-as évek ún. MEMI⁸ modelljéből származik a PET index (Mayer and Höppe, 1987; Höppe, 1999). A MEMI ún. kétszegmensű (two-node) modell, ami a testet két koncentrikus henger alakúnak tekinti, amelyben a belső henger a testmagot, a külső pedig a testköpenyt reprezentálja. A hőáramlási folyamatok e két terület, illetve a testköpeny és a külvilág között folynak. A modell számba veszi a ruházat hőszigetelő képességét, illetve mennyiségét is (Gulyás, 2009). A PET definíció szerint annak a standardizált fiktív környezetnek (ahol az átlagos sugárzási hőmérséklet megegyezik a léghőmérséklettel, a vízgőznyomás 12 hPa, a szélesség $0,1 \text{ ms}^{-1}$) 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 $0,9 \text{ clo}$ ⁹, alap-metabolizmusa és aktív-metabolizmusa egyaránt kb. 80 W. A PET-et már kifejezetten kültéri környezetre fejlesztették ki. Használata a nemzetközi szakirodalomban széles körben elterjedt s népszerű, és főként európai klimatikus körülmények között sikeres az alkalmazhatósága. Hazánkban elsősorban Budapestre (pl. Horváth, 2010) és Szegedre (pl. Gulyás, 2005) történtek ezzel kapcsolatos vizsgálatok.

A másik használt bioklíma index a COST Action 730 európai program keretében kifejlesztett UTCI (Jendritzky et al., 2009). Energia-egyensúlyi modellek összehasonlításainak eredményeként megállapodás szerint a Fiala et al. (2001) által alkalmazott sokszegmensű (multi-node) dinamikus modellen alapul. Ez a napjainkban létező legkorszerűbb fiziológiai modell. A különböző testrészek, illetve a szervezet és a környezet közötti hőáramlási folyamatokat részletesen modellezi. Az UTCI létrehozásával a társtudományok területén is általánosan elfogadott index bevezetése volt a cél. Ezért fő szempontnak azt tartották, hogy bármely skálán, minden klímafajtára, minden időpontban (napszakban, évszakban) egységesen alkalmazható legyen. Definíció szerint az UTCI az a léghőmérséklet (°C), amely referencia körülmények között ugyanolyan termikus terhelést ad, mint az aktuális termikus környezet, s ezáltal ugyanolyan fiziológiai választ vált ki (Blazejczyk et al., 2010). A referencia környezet meteorológiai és metabolikus jellemzői a következők:

- 10 méter magasságban a szélesség $0,5 \text{ ms}^{-1}$ (1,1 m magasan kb. $0,3 \text{ ms}^{-1}$);

⁸Munich Energy Balance Model for Individuals – müncheni egyénre vonatkozó energia-egyensúlyi modell

⁹A clo egység a ruházat hőszigetelésének mértékét adja meg. 1 clo ($0,155 \text{ Km}^2\text{W}^{-1}$) nagyjából megfelel egy könnyű anyagú hosszúnadrág és zakó hőszigetelésének.

- az átlagos sugárzási 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 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 egyedül Németh (2011) és Kántor (2012) végzett UTCI-vel kapcsolatos vizsgálatot.

A 2. táblázatban összefoglaltuk a PET-re és az UTCI-re vonatkozó hőérzeti és termikus stressz határértékeket, így a két index értékei (a megadott standard körülmények között) összevethetők. Az itt feltüntetett kategóriákat és színezést alkalmaztuk vizsgálatainkban. (A diplomamunkában a népszerűsége miatt, illetve terjedelmi okokból elsődlegesen a PET indexen alapuló eredményeket fejtjük ki részletesebben. 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.)

PET (°C)	UTCI (°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		<i>extrém hideg stressz</i>	<i>fagyos*</i>
< -10		<i>extrém hideg stressz</i>	<i>nagyon fagyos*</i>

2. 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 kiegészítve)

*A táblázat PET kategóriáit elsősorban a hazai gyakorlatban gyakran kiegészítik a hideg oldalon a megjelölt két tartománnyal (-10-0 °C és <-10 °C), melyeket extrém hideg (fagyos) szinteknek nevezhetünk. Vizsgálatainkban mi is ennek megfelelően jártunk el.

5. A humán komfort vizsgálat adatbázisa és módszerei

5.1. Vizsgált területek

Vizsgálataink során elsőként az Országos Meteorológiai Szolgálat mért meteorológiai adatai (léghőmérséklet, relatív nedvesség, szélesség, felhőzetmennyiség) alapján az 1961 és 2010 közötti időszakra elemeztük 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 (2. ábra). (A vizsgálatok során az egyszerűség kedvéért leginkább a belvárosi és külvárosi jelzőkkel illettük az állomásokat.)



2. ábra: A Kitaibel Pál utcai (bal oldalon) és a pestszentlőrinci (jobb oldalon) meteorológiai állomás elhelyezkedése (Forrás: Google Earth)

A pestszentlőrinci állomás (Marczell György Főobszervatórium) Budapest délkeleti részén, kertváros jellegű területen fekszik. Délről erdős terület határolja, a többi irányban többnyire alacsony kertés házak veszik körül. Az általunk vizsgált időszakban a mérőműszerek elhelyezkedésében nem történt változás. A hőmérséklet mérése mindvégig 2 méter, míg a szélességé 10 méter 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 sűrű 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, de 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 méter magas tetőterazon folytatódtak. A terazon ugyanúgy kb. 2 méter 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 méter volt, utána pedig 42,57 méter.

A humán bioklimatológiai vizsgálatok standard magasságban történnek. A meteorológiai állapothatározók mérése az európai nagyrasz testalkatára vonatkozó átlagos súlypont magasságában (1,1 méter) 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 méter) esetén a hőmérsékleti és a légnedvességi profil homogénnek tekinthető. Ennek megfelelően az 1985. március 31. utáni hőmérsékleti értékeket a belváros esetén 27,7 méterről 1,1 méterre 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 méter magasságra (Kuttler, 1998):

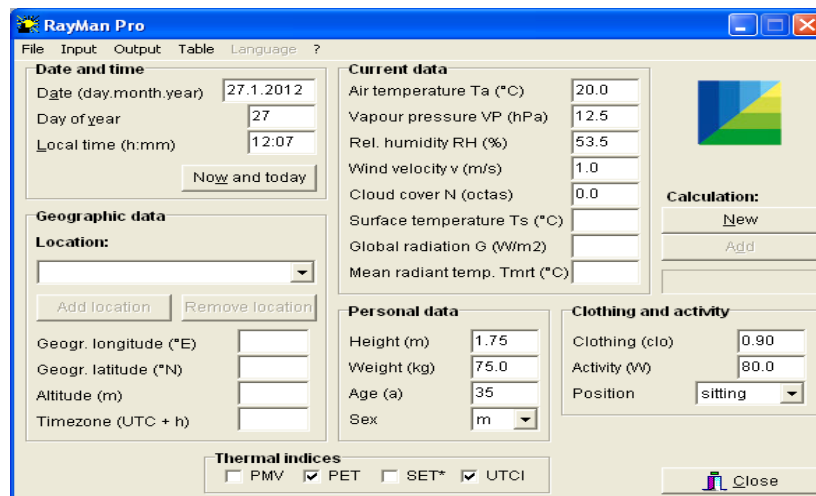
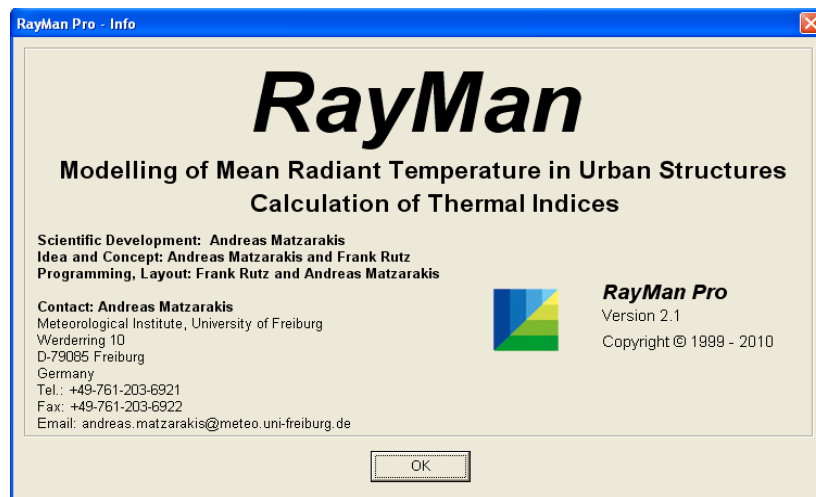
$$v_{1,1} = v (1,1 \text{ h}^{-1})^\alpha, \text{ ahol } \alpha = 0,12 z_0 + 0,18. \quad (1)$$

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-házás 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 méter standard magasságra redukálás a korrekt bioklimatológiai vizsgálatokban viszont mindenképpen szükséges, melyekhez a fenti módszereket alkalmazhatónak tartottuk.

5.2. Alkalmazott modellek és módszerek

Vizsgálataink első részében a két állomás mért léghőmérséklet, szélesebbég, légnedvesség és felhőzetmennyiség 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 modell legfrissebb verzióját (RayMan Pro Version 2.1) alkalmaztuk (Matzarakis és Rutz fejlesztése, 2010), ami az UTCI index számítására is alkalmas (3. ábra). A számításhoz szükséges input paraméterek a meteorológiai állapotváltozók mellett az állomások földrajzi koordinátái, tengerszint feletti magasságai és a standard személy személyes 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).



3. ábra: A RayMan humán bioklíma modell nyitó- és inputablaka

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 az UTCI indexek értékeit. Három éghajlati normálidőszak (1961–1990, 1971–2000 és 1981–2010) szerint csoportosítottuk az adatokat, majd havi, évszakos, éves és harmincéves átlagokat számoltunk, hogy az időszakok és állomások közötti különbségeket minél részletesebben szemügyre vehessük. Az időszakokra és időpontokra a 2. táblázat PET és UTCI hőérzeti kategóriái alapján relatív gyakorisági eloszlásokat képeztünk, melyeket tíznaponként (dekádonként) csoportosítva bioklíma diagramokat hoztunk létre. Vizsgálatainkban minden esetben a 2. táblázat szerint vettük a kategóriákat, és egységes színskálát alkalmaztunk a könnyebb összevetés érdekében. A két helyszín összehasonlításakor a három normálidőszak közötti változásokat is elemeztük. A dolgozatban az 1961–1990 és az 1981–2010 időszakok között detektálható változásokat mutatjuk be részletesebben.

A következő lépésben a 2001–2010 időszak minden napjára a már órás felbontásban rendelkezésünkre álló léghőmérséklet, szélsősebesség, relatív nedvesség és felhőzetmennyiség adatokból a RayMan modellel óránként kiszámolt indexek alapján is részletes összehasonlítást végeztünk. Az órás felbontás miatt a napszakos sajátosságok és a napi változások még inkább kidomborodnak. A vizsgálat során a tíz év ugyanazon napi órás átlagait tekintettük. 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.

A felszíni folyamatok és a felszín-légkör kölcsönhatások minél pontosabb leírása elengedhetetlen a klímavizsgálatok során. Különösen igaz ez a városi területre, amelynek felszíni struktúrája rendkívül összetett. A mért adatokon alapuló humán komfort elemzés után az OMSZ által a közelmúltban adaptált SURFEX felszín-légkör kölcsönhatásokat leíró modell (Le Moigne, 2009) városi felületre kifejlesztett TEB sémájának (Masson, 2000) viselkedését vizsgáltuk a bioklíma indexek alapján. A modelleredményt az azonos időszakra vonatkozó mért adatokkal vetettük össze. Általában az alapváltozókkal validálják a modelleket, mi egy lépéssel továbbhaladva, a kiszámolt bioklíma indexek alapján a humán komfort hatást validáltuk.

A SURFEX felszínmodellező programot a Météo France fejlesztette ki. Futtatható léggöri cirkulációs modellhez kapcsolva, amely során a modell visszahat a léggöri kényszert adó modellre, illetve önmagában („offline”) is, amikor nincs ez a kétirányú kapcsolat. Alapvetően a SURFEX-ben a rácsponatok között nincsen kölcsönhatás, nincs advekción, viszont „online” módban, a léggöri modellen keresztül kapcsolat létesül a felszíni modell rácsponatai között is. A modell a léggöri és sugárzási kényszerek révén a felszín turbulens kicserélődési folyamatainak fluxusait (momentum-, hő-, nedvességfluxusokat) számolja. A SURFEX négy felszín-típust különböztet meg: természetes és városi felszíneket, tengereket és édesvizeket. A különböző felszíneket speciális fizikai modellek szimulálják.

Munkánkhoz az almodellek közül a városi felszín és a léggör közötti kölcsönhatásokat leíró TEB modul használata volt szükséges. A TEB séma Oke (1987) által kidolgozott kanyonmodellen alapul. Kanyonként két szembenálló fal által határolt utca definiálható. A városi felszín három tipikus felületet reprezentálja a modellben: utak, tetők és falak, az energiamérlegben kulcsszerepet játszó karakterisztikákkal. A három felületre a séma külön-külön kiszámolja az energiaegyenlegeket, s ezek összege eredményezi a város energiamérlegét. E megközelítés lehetővé teszi az energiamérleggel kapcsolatos fizikai folyamatok, úgy mint a sugárzási, a momentum-, a nedvesség-, a szenzibilis és látens hőfluxusok, valamint a hőtárolási folyamatok reprodukálását. A modul reprezentálja a csapadék intercepcióját és lefolyását is, továbbá külön hősémát alkalmaz az utak és tetők esetén. Ezen kívül figyelembe vesz antropogén eredetű hő- és nedvességfluxusokat, amelyek a közlekedésből (belső égésű motorok), az ipari folyamatokkal járó égésből és a lakossági fűtésből erednek (Masson, 2000; Masson et al., 2002).

Vizsgálataink során az OMSZ Klímamodellező Csoportja által 2011 tavaszán „offline” módon futtatott, TEB sémát magában foglaló SURFEX modell eredményeit használtuk. A futtatáshoz az input adatokat az ALADIN-Climate regionális klímamodell (Spiridonov et al., 2005) 5.2 verziója adta. Az ALADIN-Climate modellt az ARPEGE-Climate léggör-óceán globális cirkulációs modell (AOGCM) és a nemzetközi együttműködésben kifejlesztett ALADIN időjárási modell alapján a Météo France dolgozta ki. Az ALADIN-Climate (továbbiakban ALADIN) múltra vonatkozó teszteléséhez a „kvázi-tökéletes” oldalsó peremfeltételeket az ECMWF (Európai Középtávú Időjárás-előrejelző Központ) ERA-40 re-analízis adatbázisa (Uppala et al., 2005) adta, amely megfigyeléseken alapulva a múlt éghajlatát a lehető legpontosabban képes leírni. Az ALADIN jelenleg nem vesz figyelembe mesterséges felszíneket, hanem a városi felszíneket is természetesként kezeli. Így az eredeti felszínleírással készült, 10 kilométer horizontális rácson rendelkezésre álló ALADIN

szimulációt előbb egy saját konfigurációjával 1 kilométer horizontális rácstra interpolálták, amely többletinformációt ad azáltal, hogy már finomabb domborzati viszonyokat, s felszínparamétereket vesz figyelembe. Majd ezen eredmények felhasználásával futtatták a SURFEX-TEB sémát (továbbiakban SURFEX), amelyhez szükséges légköri kényszereket az ALADIN modellből származó lefelé irányuló napsugárzás, lefelé irányuló termikus sugárzás, a léghőmérséklet, a horizontális szélkomponensek, a felszíni nyomás és a specifikus nedvesség adatok szolgáltatották. 1×1 kilométer felbontásra 3 órás időlépcsők (a fő- és mellékterminusok) felhasználásával kiszámolták az értékeket az 1961–1970 időszakra. A SURFEX outputjait többek között léghőmérséklet, horizontális szélesség, relatív nedvesség és különböző hőfluxusok alkották (Vértesi, 2011).

A tízéves, számunkra szükséges adatokat a Kitaibel Pál utcai és a pestszentlőrinci állomásokhoz legközelebbi rácspontok adatai szolgáltatották. A rácspontokat Google Earth szoftver segítségével beazonosítottuk (4. ábra). Ezáltal azt feltételezhetjük, hogy a vizsgált rácspontok megfelelően képesek reprezentálni a belvárosi és külvárosi állomás területére jellemző klimatikus és bioklimatikus viszonyokat, hiszen kb. 150, illetve 300 méterre található az állomások, s tengerszint feletti magasságuk is csaknem azonos az állomásokéval. A modell outputok közül a bioklíma indexek számításához szükséges adatokat a 2 méteres léghőmérséklet, a 2 méteres relatív nedvesség, s a 10 méteres meridionális és zonális szélkomponensek (melyekből kiszámoltuk a felszíni szélességeket) adták. Az indexek számításához szükséges negyedik, a felhőzetmennyiség vagy globálsugárzás output adat nem áll rendelkezésre, ezért ezt az ALADIN futásból származó adat tudta pótolni. A szélesség adatokat az (1) formula felhasználásával most is 1,1 méter magasságra redukáltuk a megfelelő érdességi paraméter felhasználásával. A PET és az UHCI index kiszámítása jelen esetben is a RayMan modell segítségével történt 3 órás léptékben, amelyhez a rácspontok pontos földrajzi koordinátáin túl szükséges tengerszint feletti magasságokat a Google Earth szoftverrel azonosítottuk.

A modell teszteléséhez választottunk továbbá egy harmadik SURFEX rácspontot is egy fővároson kívüli területről, mégpedig az Alföld irányában, a várostól délkeletre. A rácspont Ócsa és Monor között, erdővel tarkított mezőgazdasági területen, településektől távol található (4. ábra). Itt a szélesség redukálásához szükséges érdességi paraméterként Troen and Petersen (1989) felszín típus szerinti klasszifikációja alapján 0,1 értéket tartottuk megfelelőnek, amely természetesen jóval kisebb a városon belüli rácspontokra jellemzőknél.

A SURFEX modell eredményei 3 órás felbontásban állnak rendelkezésünkre. Mivel a belvárosi mérőállomáson a vizsgált időszakban 6 óránként, a főterminus időpontokban vannak

mérési adataink, ezért általában ilyen léptékben validáltunk. Mivel a humán komfort hatás és okai eltérőek lehetnek az egyes évszakokban, ezért az éves lépték mellett évszakos felbontásban is megvizsgáltuk az eltéréseket. Elsőként pontdiagramokat készítettünk 6 órás bontásban a mért-szimulált adatpárok alapján, éves, évszakos és havi bontásban, a két városi területre és a két indexre. Majd elkészítettük a két mért és három szimulált adatsor éves és évszakokra jellemző átlagos napi menetét, illetve a négy főterminusra vonatkozó átlagos évi menetét mindkét indexre. Kiszámoltuk az egyes adatsorokon belüli szórást, valamint a megfelelő mért és szimulált adatsorok közötti átlagos négyzetes hibát¹⁰, továbbá szignifikancia-vizsgálatot végeztünk.



4. ábra: A SURFEX-TEB modell vizsgált rácspontjai (kék ikonnal jelezve) földrajzi koordinátaikkal a Kitaibel Pál utcai és a pestszentlőrinci állomás közelében (bal, illetve jobb fent), valamint Ócsa környékén (lent)
(Forrás: Google Earth)

¹⁰RMSE – root mean square error

6. Eredmények

6.1. Mért adatokon alapuló eredmények

6.1.1. Napszakos felbontású vizsgálat

Először az 1961–1990 és az 1981–2010 normálidőszak alapján, a 0, 6, 12 és 18 UTC-s PET és UTCI értékek gyakorisági eloszlásában a két állomás és a két időszak között detektálható 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.

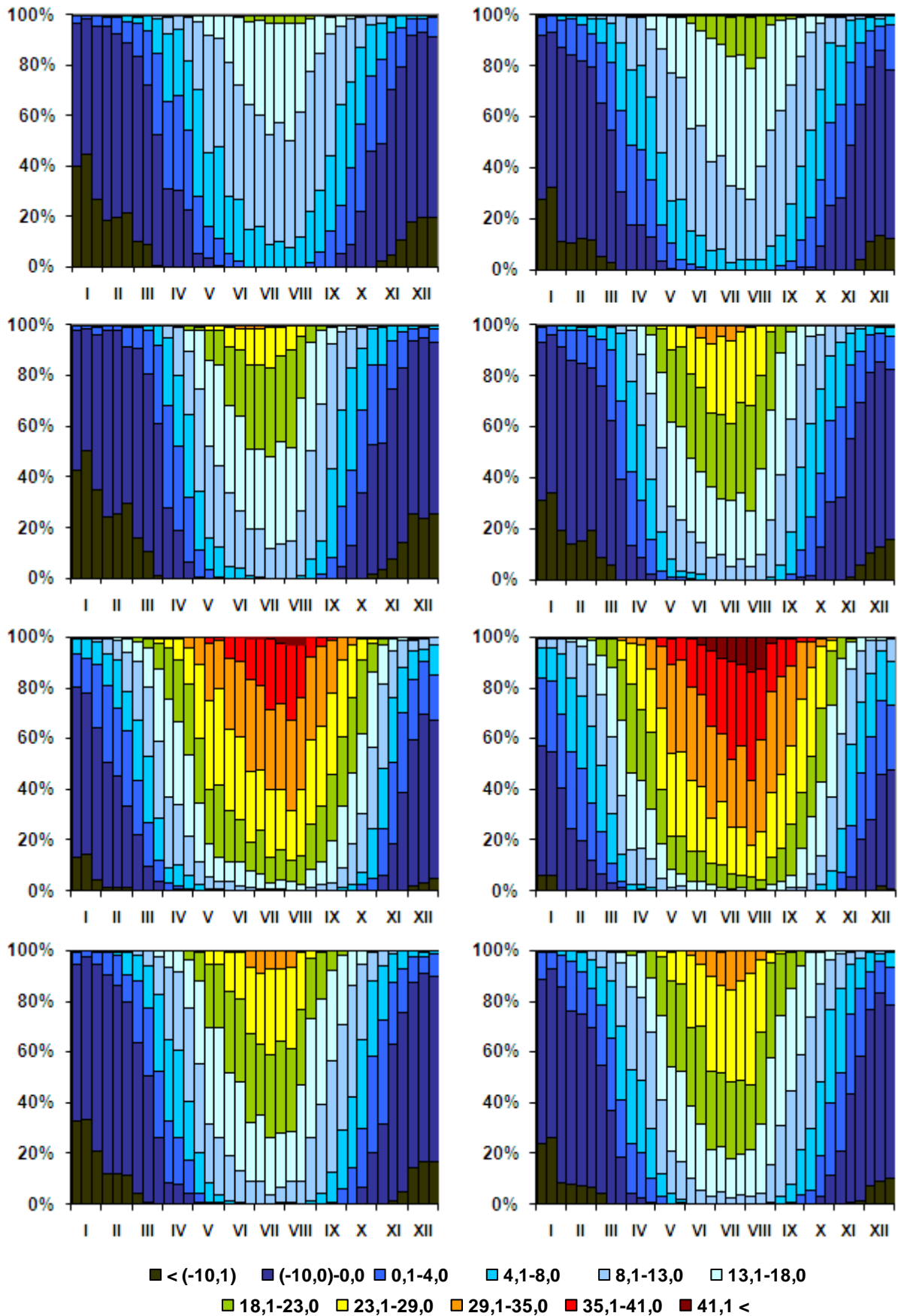
A PET-re vonatkozó bioklíma diagramok a két bemutatott időszakra, időpontok szerint csoportosítva az 5. és a 6. ábrán láthatók. A kapott eredmények szerint 0 UTC-kor a hideg hőérzeti kategóriákba tartozó napok száma az 1961–1990 időszakban 2,5%-kal, míg az 1981–2010 időszakban 5%-kal kisebb a belvárosban. Így a téli időszakban a belvárosi területen levőknek csekélyebb hideg termikus stresszhez kell alkalmazkodniuk a külvároshoz képest, amely kedvező hatással bír a komfortérzetre. Emellett közvetett hatásként például kisebb lehet a fűtési igény a belvárosi térségben. Nyáron ugyanakkor a belvárosban fokozottabb a terhelés, melynek hatására a szervezet általában kevésbé tud regenerálódni az éjszaka folyamán. A belvárosban a nyár közepén kis gyakorisággal meleg (kissé meleg kategóriájú) hőterhelés is megjelenik a második időszakban. A mérőpontok között mutatkozó bioklimatikus különbség valószínűleg a kifejlődött városi hősziget következménye. 6 UTC-kor is megmarad az előbbi irányú különbség az állomások között. A meleg hőérzetű napok száma a belvárosban, a két időszakban 4,4%-kal, illetve 5,8%-kal nagyobb, míg a hideg 7,6%-kal, illetve 8,3%-kal kisebb. A belvárosban például már a nyári reggeleken közel 10% relatív gyakorisággal közepesen meleg stressz hat a szervezetre, míg a külvárosban ez elenyésző. A kora délutáni időszakban (12 UTC) a nyári időszakban ismét a belváros mutat fokozott meleg terhelést, ami 8,8%-kal, illetve 10,3%-kal gyakoribb ott a két időszakban. Önmagában a két leginkább szélsőséges nagyon forró és forró hőstressz gyakorisága együttesen 5,4%-kal és 7,5%-kal nagyobb. A belvárosi erősebb meleg terhelés például a mindennapi szabadtéri munkavégzést károsan befolyásolhatja a nyári hónapokban. Télen ugyanakkor kisebb a hideg terhelés a belvárosban 7,6%-kal, mely a későbbi időszakra további 1%-kal csökken. Ez mindenképp kedvező hatású lehet az ott tartózkodók számára.

18 UTC-kor is hasonló tendencia figyelhető meg, de jóval kisebb mértékű az eltérés, mint a déli időszakban. Ekkor a meleg hőstressz a vizsgált időszakokban, a belvárosban 3,3%-kal, majd pedig 4,4%-kal nagyobb, a hideg terhelés viszont 5,1%-kal, majd 6,3%-kal kisebb. Nyáron az esti pihenési, szellőztetési lehetőség ezért korlátozott lehet a belvárosban, 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 átszellőztött (pl. panel) lakásokban. Itt a kültérnél is jóval kedvezőtlenebb körülmények alakulhatnak ki (Gulyás, 2009).

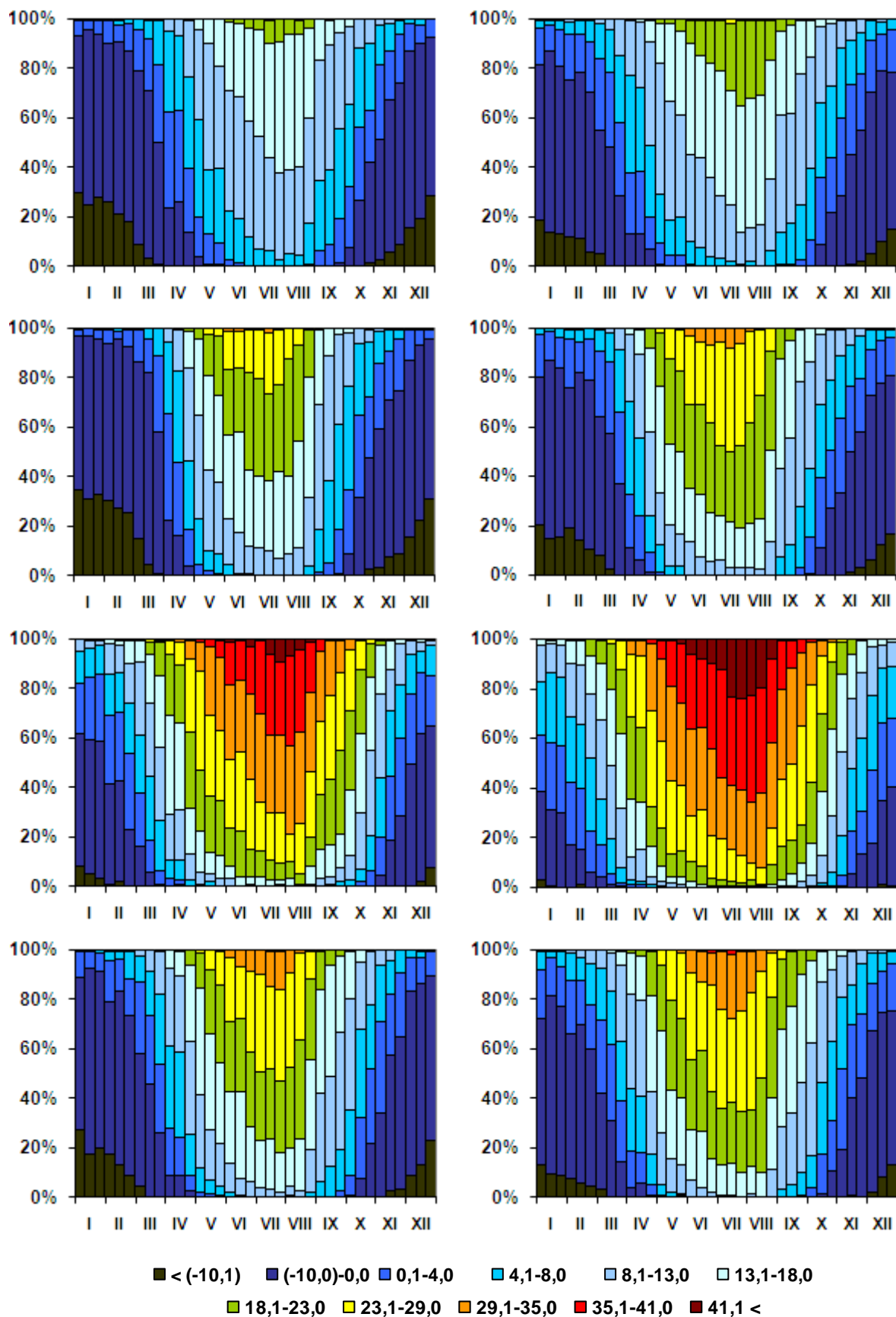
Tehát a PET relatív gyakorisági eloszlás alapján minden időpontban a belvárosra mutatkozik nagyobb mértékű meleg terhelés és kisebb hideg stressz. A legnagyobb mértékű eltérések a déli időszakban detektálhatók, épp amikor például nyáron a legerősebb melegforró terhelés jellemző, és igen aktív a szabadtéri tevékenység s munkavégzés. A legkisebb különbségek az esti és éjszakai időszakban mutatkoznak.

A két bemutatott normálidőszak között fennálló 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.) 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 fűtésköltségek csökkenése).

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



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



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

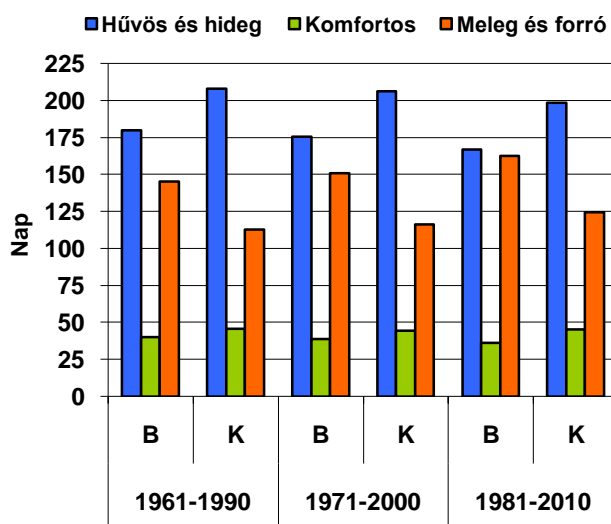
A következőkben röviden áttekintjük, hogy a három éghajlati normálidőszak között milyen változások detektálhatók a PET index átlagai alapján. Ehhez segítséget nyújt a 3. táblázat, amely a négy vizsgált időpontban az időszakok PET átlagait mutatja évszakos bontásban, a két mérőpontban. Az egyre sötétebb narancssárga szín rendre nagyobb értéket jelöl. Ami a két mérőpont közötti különbségeket illeti, minden normálidőszakban és minden évszakban a belváros rendelkezik magasabb index értékekkel, ami összhangban van előbbi vizsgálatunkkal. A legnagyobb belvárosi többletek a déli időszakban, tavasszal és nyáron fordulnak elő (3–4 °C), míg a legkisebbek ugyanezekben az évszakokban, de 18 UTC-kor detektálhatók. Az időszakok között (1971–2000 és 1961–1990, illetve 1981–2010 és 1971–2000 páronkénti különbségei) az esetek 96%-ában emelkedés látható, csupán négy esetben van jelentéktelen csökkenés. A két legnagyobb mértékű növekedés (1,4 °C és 1,2 °C) ugyanúgy nyáron 12 UTC-kor mutatkozik mindkét területen, az 1981–2010 időszakra. Észrevehető egy további jellegzetesség: télen mindkét állomáson és mindegyik időpontban a harmadik időszakra alig emelkedik a PET átlag, sőt olykor stagnál vagy csökken. Ennek magyarázatához megnéztük a PET egyes alapváltozóinak (léghőmérséklet, szélesebbesség és légnedvesség) a három normálidőszakra vonatkozó átlagát. Megállapítottuk, hogy a hőmérséklet okozhatja ezt a tendenciát, ugyanis a harmadik időszakra vonatkozóan kisebb az átlag mindkét állomáson (a belvárosban az időszakok átlaga sorrendben 1,6 °C; 2,3 °C és 2,2 °C; míg a külváros esetén 0,4 °C; 1,0 °C és 0,9 °C).

PET (°C)	Idő (UTC)	0			6			12			18		
		Időszak	61–90	71–00	81–10	61–90	71–00	81–10	61–90	71–00	81–10	61–90	71–00
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	4,2	4,4	5,1	15,7	16,2	17,0	7,5	7,8	8,4
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	16,7	17,1	18,1	28,9	29,6	30,8	19,6	20,2	21,1
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	2,6	2,4	3,0	14,6	14,3	15,3	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	-8,0	-7,4	-7,4	-1,3	-0,4	-0,1	-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	3,9	4,2	4,8	14,5	15,0	15,8	6,8	7,1	7,7

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

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. A 2. 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 a 7. ábra a két mérőpontban, a három normálidőszak átlaga alapján.

Látszik, hogy mindegyik időszakban a belvárosban élők szervezetét nagyobb meleg és kisebb hideg terhelés éri (átlagosan 35, illetve 30 nappal). A komfortos hőérzeti kategóriába tartozó napok száma a külvárosban nagyobb (átlagosan 7 nappal). Ez alapján leszűrhető, hogy a belváros bioklimatikus módosító hatása a hideg fiziológiai terhelést csökkenti, míg a meleget fokozza. Az időszakok között a meleg kategóriákba tartozó napok száma egyöntetűen növekszik, míg a hidegé csökken. A változások mértéke mindig a belvárosban nagyobb. Mindegyik esetben az 1981–2010 időszakra történt változás jóval nagyobb mértékű. Elmondható tehát, hogy 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 a tendencia pedig erősödik.



7. 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

6.1.2. Órás felbontású vizsgálat

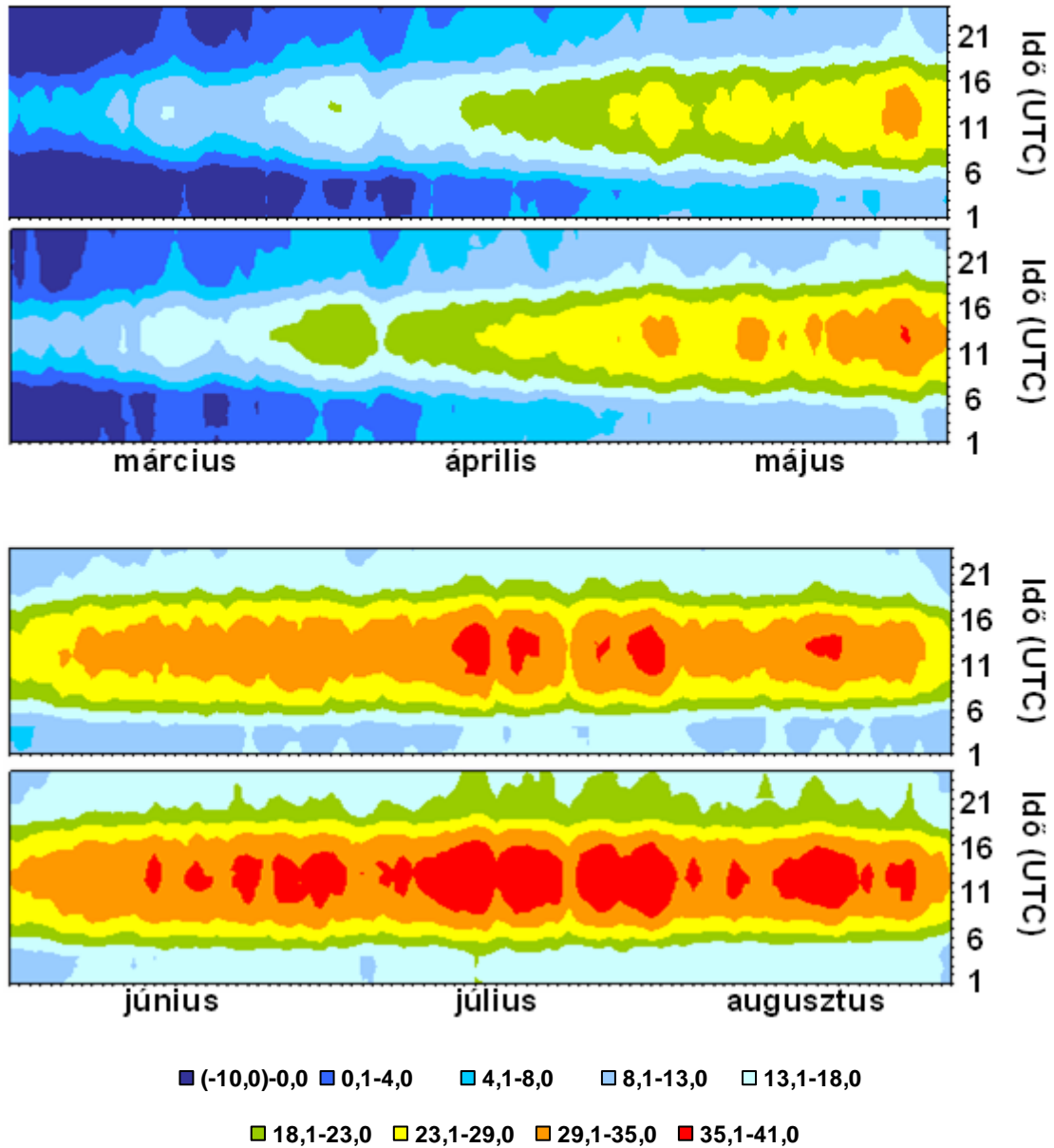
A 2001–2010 időszakra kiszámolt óránkénti bioklíma index értékek alapján részletesen elemezhetjük a termikus komfort napon belüli változásait. A tíz év egészét tekintve a belváros átlagos PET értéke 3 °C-kal nagyobb. A maximális PET a belvárosban kismértékben (0,9 °C-kal) több, a minimum értékben viszont 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 8. és 9. ábra. A hőérzeti kategóriák ábrázolása ugyanúgy a 2. táblázat alapján, s a korábbi vizsgálatokkal megegyező színskálával történt. Általánosan a belvárosban nagyobb arányú meleg és kisebb arányú hideg hőterhelés mutatkozik. Megfigyelhető, hogy tavasz végén a belvárosban már jelentős arányú 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. Ez kedvezően befolyásolhatja a komfortérzetet. Összefoglalva azt mondhatjuk, 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.

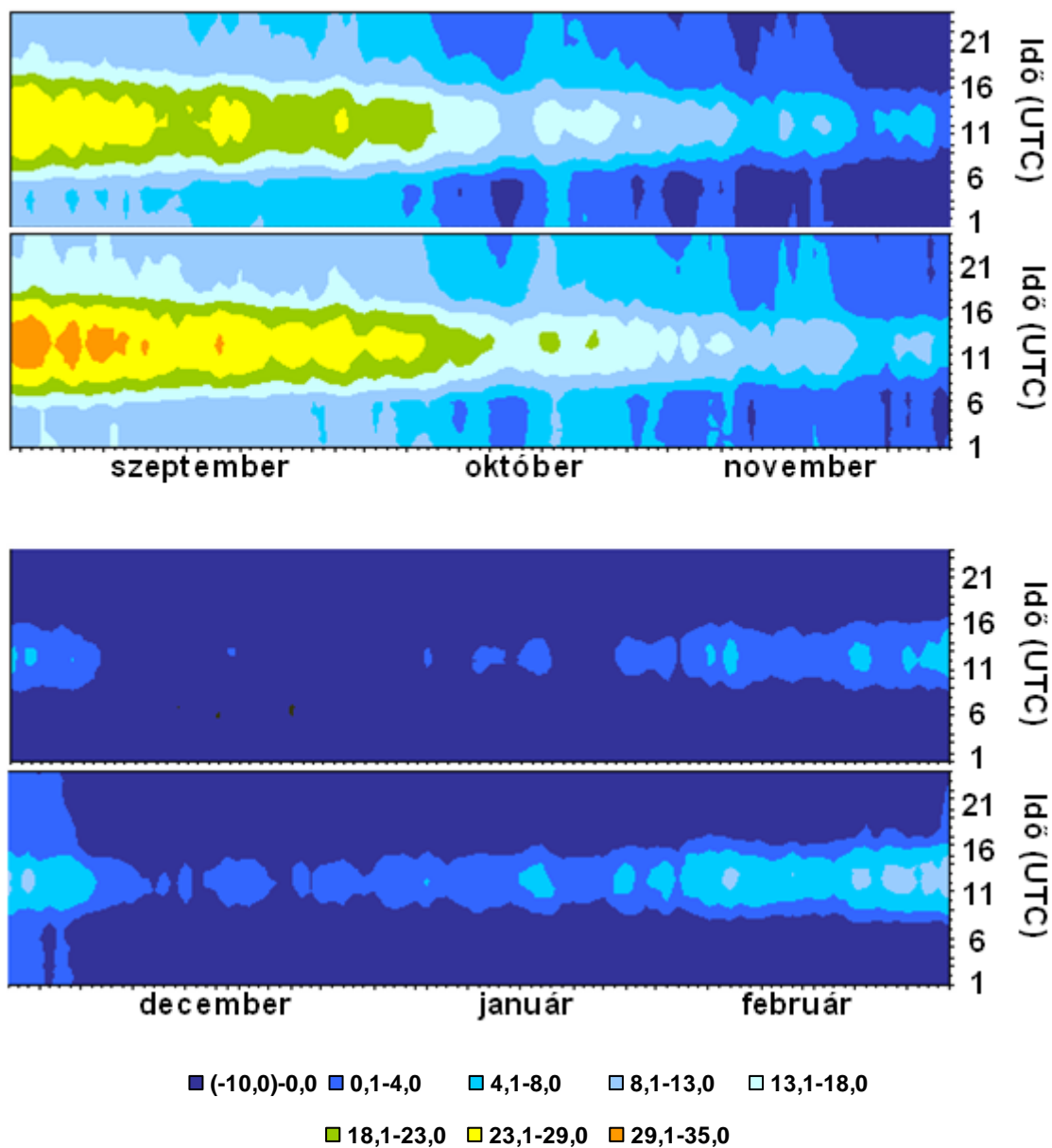
Kiragadva a szabadtéri tevékenységek szempontjából kiemelkedő nyári évszakot, jellegzetes (különösen a legmelegebb nyár közepi időszakban) az esti órákban a hőstressz mértékének lassú csökkenése a belvárosi területen. Ezzel együtt éjjel a belvárosban a hideg oldalon általában egy kategóriával enyhébb termikus stressz érvényesül. A külvárosban intenzívebb a hőterhelés csökkenése. Így a belvárosban mind az esti szabadtéri tevékenységek, mind az éjszakai pihenés során jelentős termikus stressz veszi igénybe szervezetünket (amihez hozzájárul a nagy hőkapacitású falak hőkibocsátása is).

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.

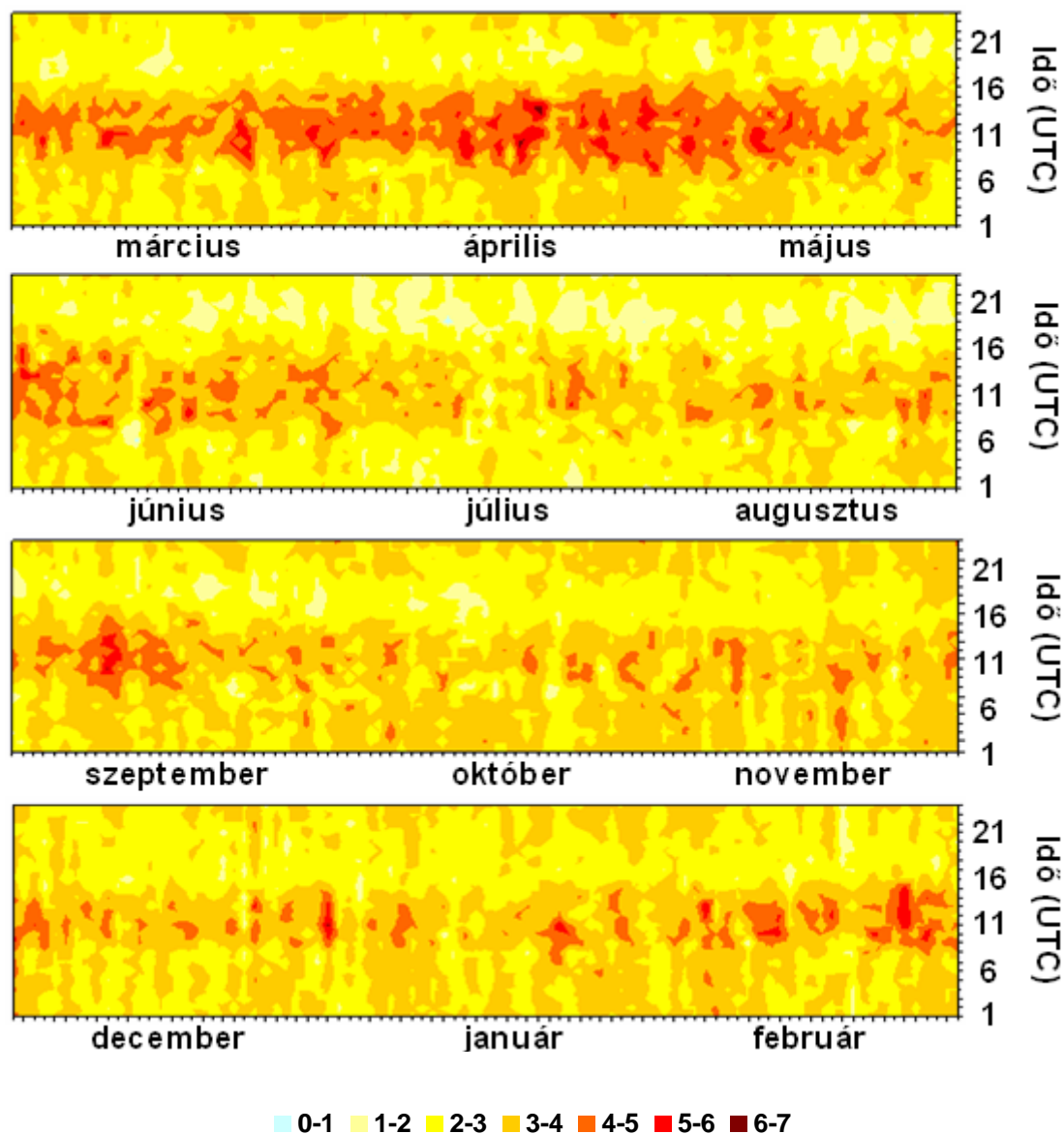


8. ábra: A külvárosi (felső) és belvárosi (alsó) terület órás hőterhelése páronként a PET index hőérzeti kategóriái alapján (°C), a 2001–2010 időszak átlagára, tavasszal (fent) és nyáron (lent)



9. 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 elemezhetjük a vizsgált tíz évi órás PET értékek mérőpontok közötti különbségeinek napi eloszlását (10. ábra).



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

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). Erre az időszakokra jellemző a szabadtéri aktivitás, munkavégzés nagy része. Így az eredmények

alapján éppen ekkor kell a belvárosban levőknek nyáron a legerősebb meleg terheléssel megküzdeni, télen viszont ekkor lehet legkellemesebb a komfortérzetünk a külvároshoz képest. Az esti órákban jellemző a legkisebb többlet (általában 1–3 °C), mely az évszakokat tekintve nyáron a legszembetűnőbb. A késő esti órákban általában fokozódik a belvárosi többlet.

Az itt kapott eredmények közül néhány váratlan például Gulyás (2009) szegedi hasonló vizsgálatához képest, ugyanakkor ő jelentősen eltérő módszerekkel és időszakra vizsgálódott, továbbá a mérőállomások elhelyezkedése, s a felhasznált alapadatok is több szempontban eltértek. Az esti kisebb többlettel kapcsolatban szóba jöhet helyi hatásként a budai hegyek közelsége miatt a nagy magasságban lévő állomásra könnyebben áramló hűvösebb levegő. A késő esti órákban mutatkozott általában fokozódó belvárosi PET többletértékeket magyarázhatjuk a hősziget-jelenséggel. Továbbá látható, hogy tavasszal dél körül nagyobb többlet jellemző, mint a többi évszakban. Ez a kb. 1 °C-nyi eltérés bioklimatológiailag nem tűnik jelentősnek, de nem hagyhatjuk említés nélkül. Megjegyezzük, hogy az itteni eredmények teljes mértékben összeesengenek a 6.1.1. alfejezetben a bioklíma diagramoknál (5–6. ábra) és a 3. táblázat átlagainál kapott konklúziókkal (más időszakok és időbeli felbontás mellett). Előreutalva, a következő fejezetben ismertetett SURFEX-TEB modellszimuláció a fenti eredménnyel – ugyan más időszakra vonatkozóan – nagyfokú hasonlóságot mutat, a modell megerősíti ezen tendenciákat. Fontos megjegyezni, hogy a belvárosi állomás problémás elhelyezkedésével kapcsolatos helyi hatások (domborzati viszonyok, tetőn elhelyezkedés), és – a valós bioklimatikus viszonyok vizsgálatához mindenképpen szükséges – hőmérsékleti és szélredukciók befolyásolhatják az eredményeket.

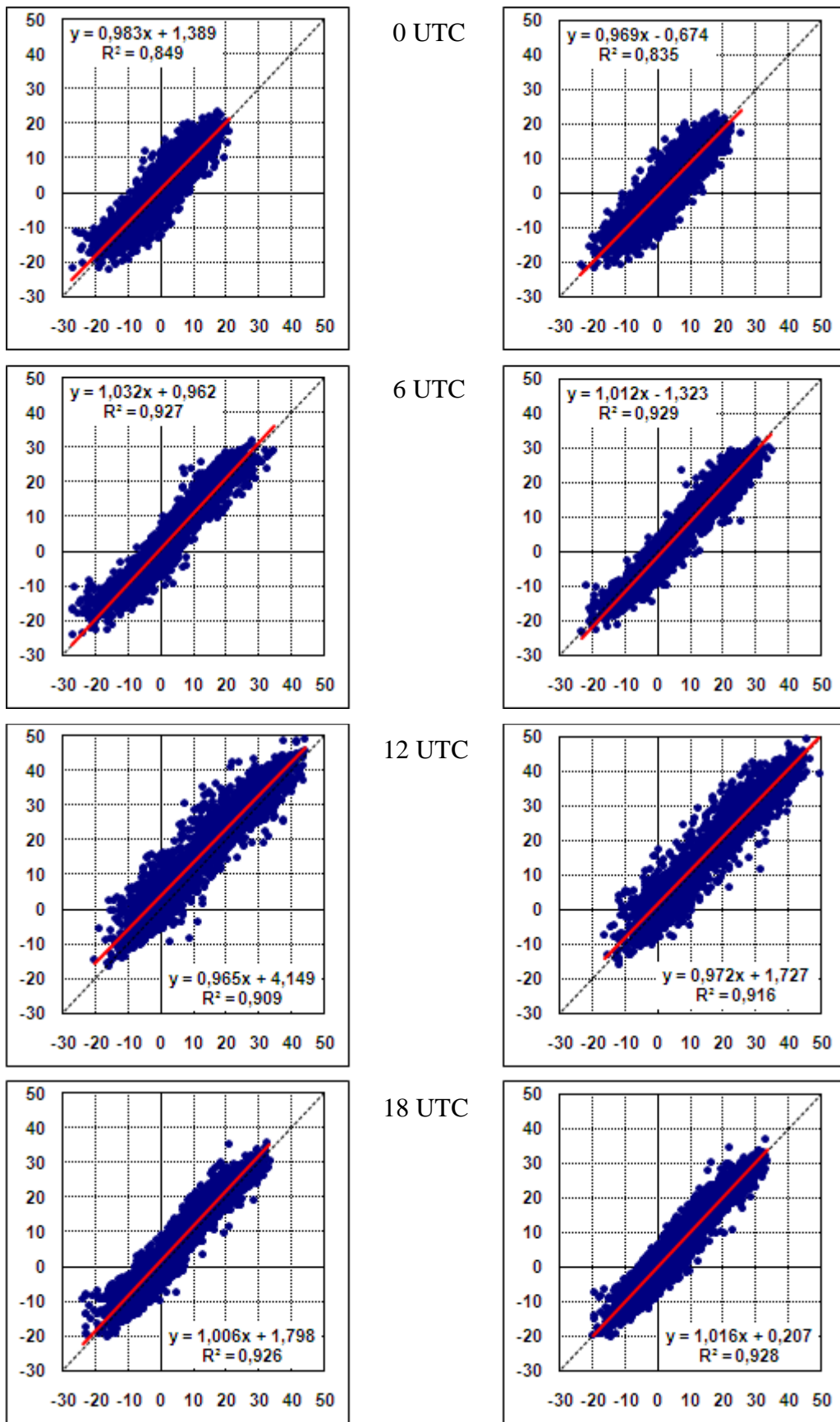
6.2. Modellszimuláción alapuló eredmények

A mérési adatokon alapuló humán komfort elemzés után a SURFEX modell viselkedését teszteljük a bioklíma indexeink alapján, melynek során a modell által szimulált eredményeinket összevetjük a mérési eredményekkel. Ezt a két városi pont esetében tudjuk megtenni, mivel Ócsa környékén nem folyik hiteles mérés. Ezzel párhuzamosan elemezzük a három pontra vonatkozó szimuláció közötti különbségeket is, választ keresve arra, hogy milyen irányú és mértékű bioklíma különbségek detektálhatók az egyes pontok között.

Az éves PET pontdiagramokat a 11. ábra mutatja a két állomásra s a négy főterminus időpontra. Itt és későbbi hasonló ábráinkon is egységesen a vízszintes tengely vonatkozik a mért, a függőleges pedig a szimulált értékekre. Az ábrákra regressziós egyenest, illetve 45° dőlésszögű tengelyt illesztettünk, továbbá kiírtuk a regressziós egyenes egyenletét s a korrelációs együttható négyzetét. A korrelációs együtthatók alapján éjjel mutatkozik a leggyengébb kapcsolat a mért és szimulált értékek között mindkét helyszínen, a többi időpontban egyöntetűen erős a korreláció ($> 0,9$), ezen belül is a déli időszakban némileg kisebb. A két állomás között nem számottevőek a különbségek, de kissé a belváros mutat szorosabb kapcsolatot. A grafikonokat tanulmányozva a legszembetűnőbb eltérés a külvárosban, 12 UTC-kor mutatkozik, ekkor jelentősen felülbecsül a modell. Ez kisebb mértékben még 18 UTC-kor is fennáll. A másik két időpontban kisebb felülbecslés detektálható. A belváros esetén jobban közelíti a mérési adatokat a modell, 0 és 6 UTC-kor némileg alul-, míg 12 és 18 UTC-kor itt is felülbecsül a modell.

Az UTCI-re vonatkozó éves pontdiagramokat a Függelék 5. ábrája tartalmazza. Ahogy látható, a mérési és a modelleredmények közötti eltérések irányai megegyeznek a PET-nél látottakkal, de nagyobb különbségek mutatkoznak az állomások között. Elsősorban a külváros esetén némileg gyengébb kapcsolat áll fenn a PET-hez képest, amit a több kiugró, alacsony érték okozhat. Nevezetesen, 0, 12 és 18 UTC-kor jelentősebb felülbecslés detektálható, ami láthatóan nagyobb mértékű az alacsonyabb értékekre. A belvárosi jobb egyezés az UTCI esetén még inkább fennáll, amit az is mutat, hogy ott mindegyik időpontban magasabbak a korrelációs együtthatók.

Kiszámoltuk az éves, évszakos és havi mért és szimulált adatsoroknak a szórását, illetve a megfelelő mért-szimulált adatsorok közötti átlagos négyzetes hibát, és megnéztük a két statisztikai mérőszámokban mutatkozó különbségeket. Az éves adatsorokra vonatkozó szórásokat és átlagos négyzetes hibákat tartalmazza a 4. táblázat a két területre, a két indexre és a négy időpontra. A statisztikai vizsgálat alapján látható, az átlagos négyzetes hibák



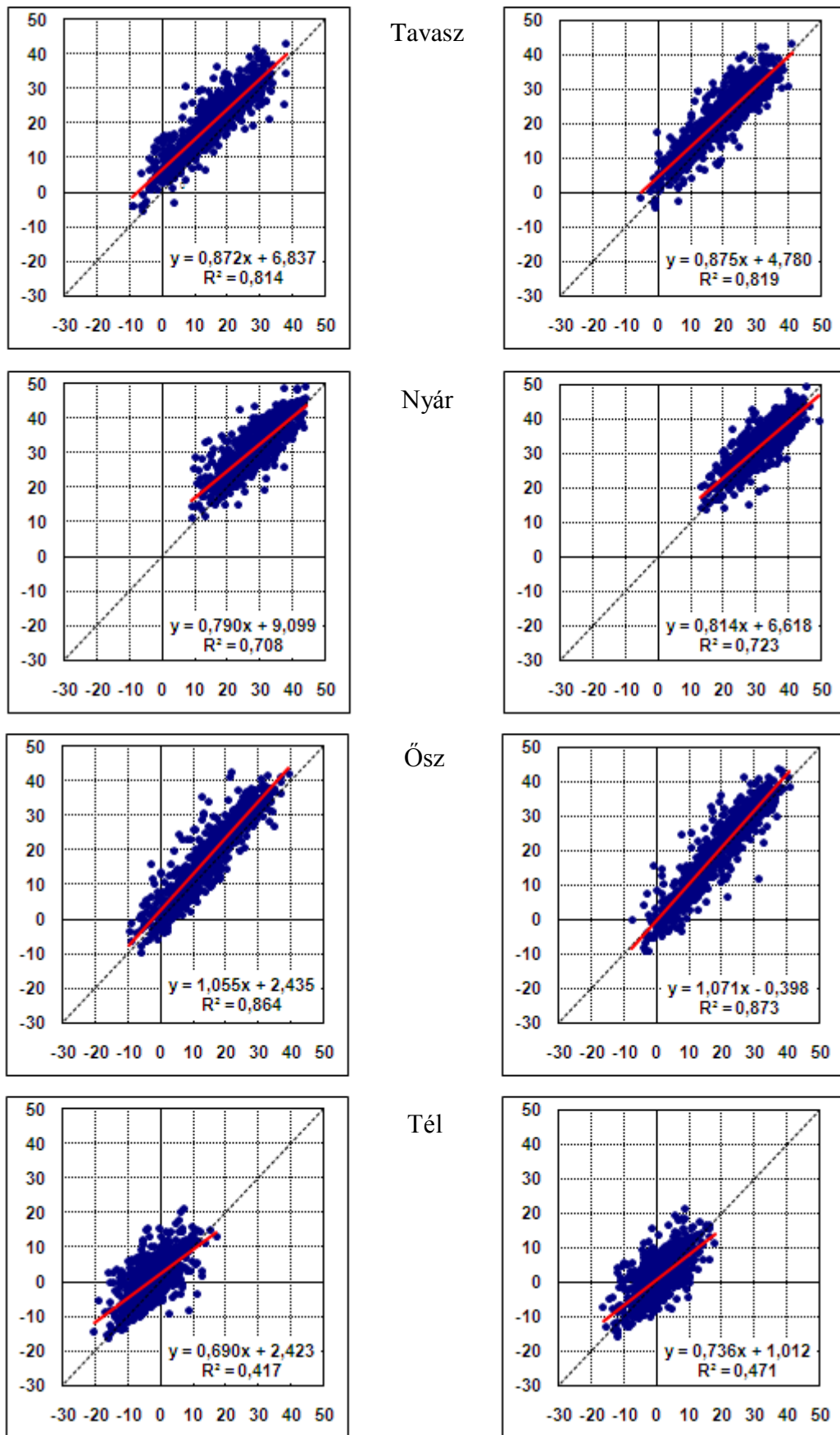
11. ábra: A mért (vízszintes tengely) és a SURFEX-TEB által szimulált állapotathározókból számolt PET (°C) éves kapcsolata a főterminus időpontokban, a külvárosi (bal oldalon) és belvárosi területre (1961–1970)

(kb. 3–5 °C) egyöntetűen jóval kisebbek a megfelelő szórásoknál (kb. 9–14 °C). A szórásokat tekintve megfigyelhető, hogy csaknem mindig a szimulált adatsoroké nagyobb. Az időpontokat nézve mindkét területen az éjjeli időpontban a legkisebb a szórás, és alapvetően a déli időszakban a legnagyobb, ahogy a pontdiagramokat bemutató ábráinkon is látható. Ez feltehetően a globálsugárzási komponens hatásának tudható be. A két helyszínt összehasonlítva pedig látható, hogy az UTCI esetén jelentősebb a szórások közötti különbség, és mindig a belvárosé a kisebb. Ami az átlagos négyzetes hibákat illeti, egy esetet kivéve egyöntetűen a belvárosra vonatkozók alacsonyabbak a külvárosiakhoz képest.

σ: szórás RMSE: átlagos négyzetes hiba		Külváros				Belváros			
		PET		UTCI		PET		UTCI	
		Mért	Modell	Mért	Modell	Mért	Modell	Mért	Modell
0 UTC	σ	8,84	9,43	10,03	10,09	8,79	9,32	8,83	9,48
	RMSE	3,91		5,18		3,88		4,27	
6 UTC	σ	11,12	11,91	12,08	12,43	11,45	12,02	10,91	11,87
	RMSE	3,40		3,90		3,43		3,31	
12 UTC	σ	13,72	13,89	12,92	11,98	13,70	13,92	11,19	11,28
	RMSE	5,58		5,42		4,23		3,36	
18 UTC	σ	11,39	11,91	12,20	12,33	11,36	11,98	10,98	11,72
	RMSE	3,72		4,45		3,22		3,26	

4. táblázat: A külvárosi és belvárosi terület mért és a SURFEX-TEB által szimulált állapotátározókból számolt, főterminusokra vonatkozó PET és UTCI adatsorainak (°C) szórása (σ) és átlagos négyzetes hibája (RMSE) az 1961–1970 időszakra

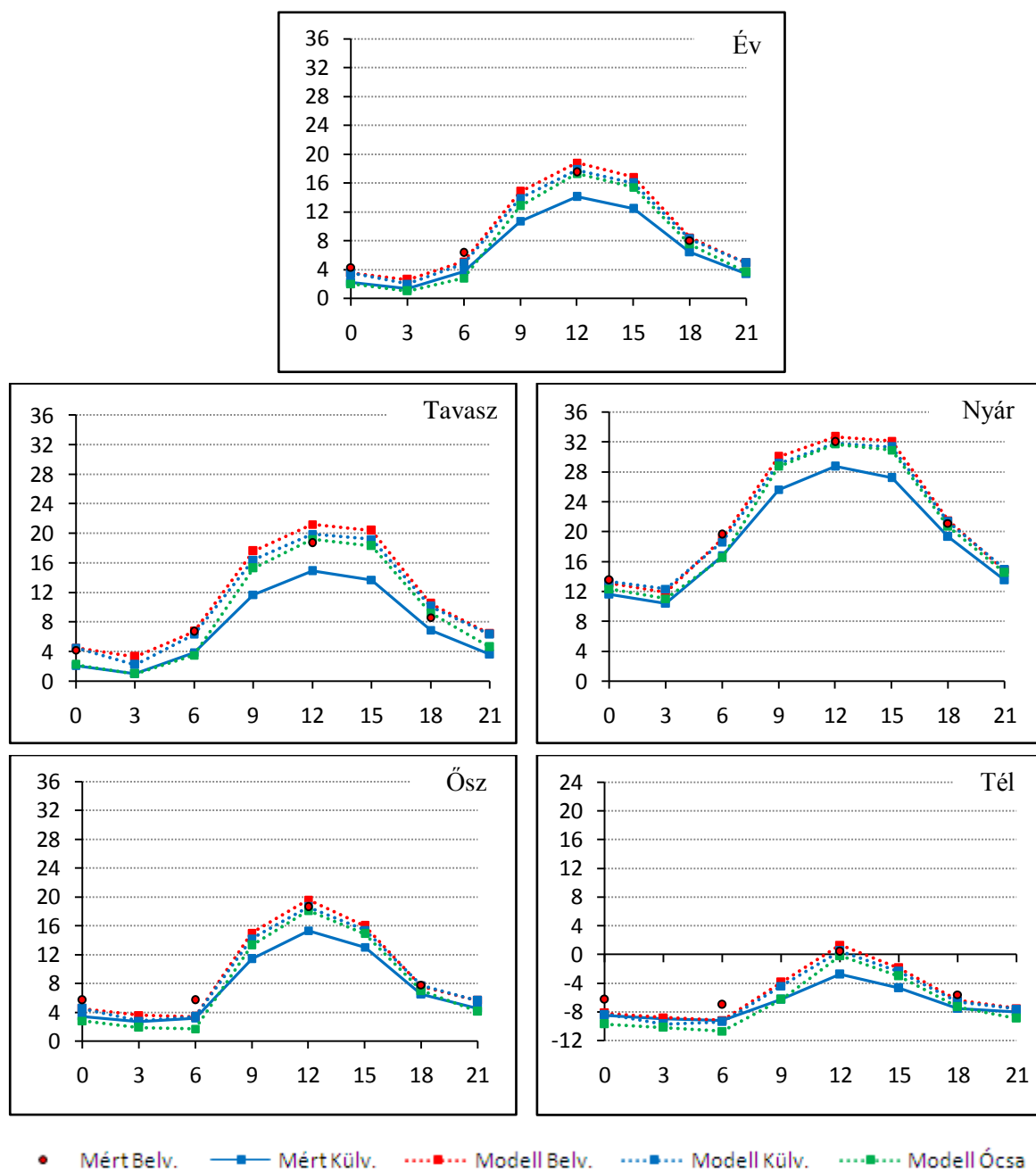
Az évszakos sajátosságok jellemzéséhez a következőkben a mért és szimulált állapotátározókból számolt indexek évszakos kapcsolatát vizsgáljuk pontdiagramok alapján, a két területre. A bioklimatológiában kitüntetett időpontra, a 12 UTC-re vonatkozókat a 12. ábrán láthatók, míg a 0, 6 és 18 UTC-hez kapcsolódókat a Függelék 6., 7. és 8. ábrája tartalmazza. A dolgozat keretei között a PET-tel kapcsolatos eredményeket ismertetjük. A korrelációs együtthatók alapján mindkét területen és mindegyik időpontban télen a leggyengébb, és tavasszal, illetve ősszel a legszorosabb a kapcsolat. Az időpontok alapján 0 UTC-kor általában a külváros, míg 6, 12 és 18 UTC-kor a belváros mutat erősebb kapcsolatot, de jelentős különbségek nem mutatkoznak. Az ábrákból kitűnik, hogy a téli évszakban minden időpontban az alacsonyabb értékeket felül-, a magasabbakat alulbecsli, és a kapcsolat mindig viszonylag gyengének mutatkozik. A tavasz és a nyár során 0 UTC-kor elsősorban a külvárosban felülbecslés jelentkezik, míg 12 és 18 UTC-kor mindkét területen



12. ábra: A mért (vízszintes tengely) és a SURFEX-TEB által szimulált állapotváltozókból számolt PET (°C) évszakos kapcsolata a külvárosi (bal oldalon) és belvárosi területre, 12 UTC-kor, az 1961–1970 időszakra

felülbecslés detektálható, ami a külvárosban jelentősebb. Szembetűnő továbbá, hogy a déli időpontban igen nagy a szórás minden évszakban.

A következőkben áttekintjük, hogy az átlagos napi és évi menetek alapján milyen különbségek detektálhatók egyrészt a két városi terület megfelelő mért-szimulált menetei, másrészt a két városi és a városkörnyéki pont szimulált menetei között. A PET-re vonatkozó éves és évszakokra jellemző, 3 óránként vett átlagos napi meneteket a 13. ábra mutatja.

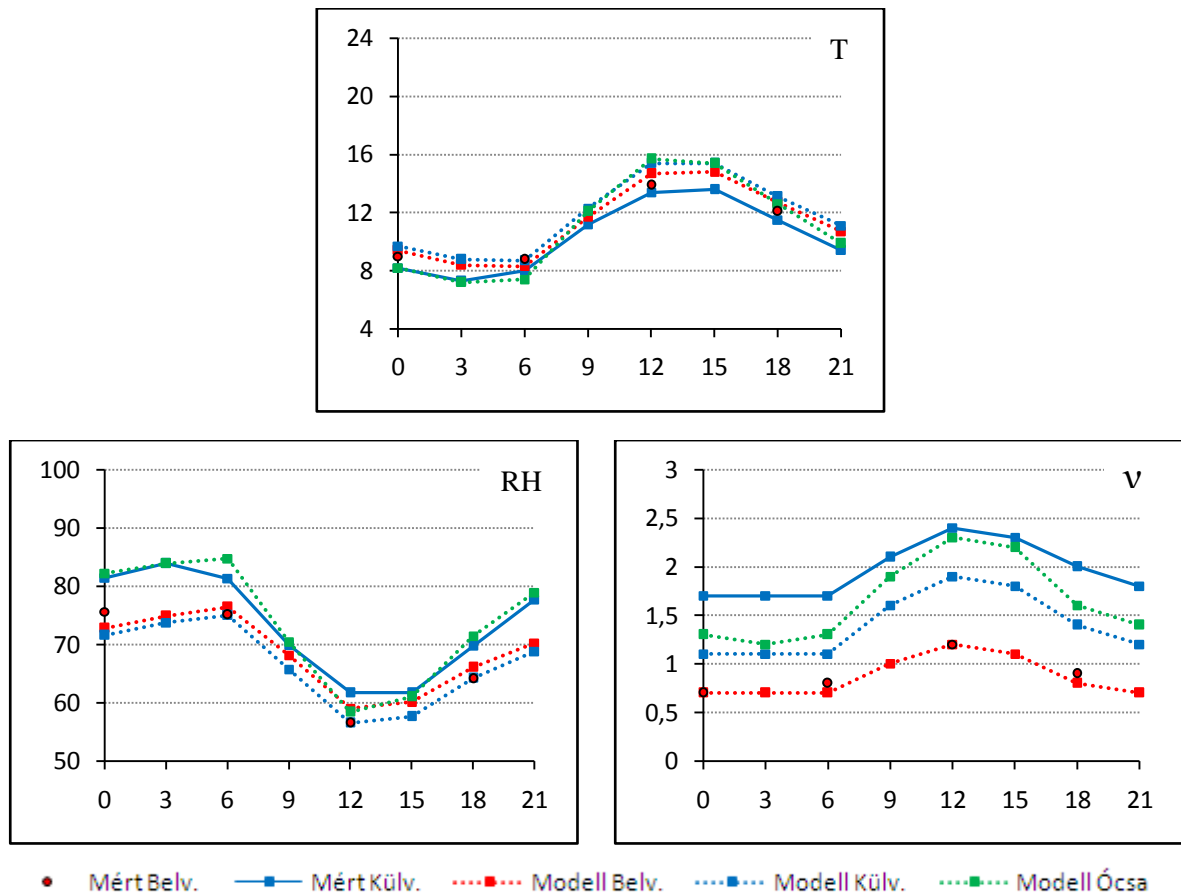


13. ábra: A mért és a SURFEX-TEB által szimulált állapotathározókból számolt PET (°C) éves és évszagos átlagos napi menete (UTC) az 1961–1970 időszakra

Minden esetben a folytonos görbék jelzik a mért, a szaggatott görbék pedig a szimulált átlagok meneteit (az ábrán a belvárosi mérésre vonatkozó adatpontokat nem kötöttük össze, illetve más alakú jelölővel ábrázoltuk, mivel ott csak a főterminus időpontokban történt mérés). Az UTCI-re vonatkozó átlagos napi és évi menetek a PET-hez nagyon hasonlóak, ezért ezek bemutatását jelen esetben mellőzzük. Az éves, illetve évszakos szimulált és mért átlagok közötti eltérések szignifikanciájának vizsgálatára Welch próbát (Dévényi és Gulyás, 1988) alkalmaztunk. A külvárosra vonatkozóan az esetek 83%-ában 95%-os szinten szignifikáns hibát kaptunk. Alapvetően csak a téli évszak esti, éjjeli és reggeli időpontjai esetén nem szignifikáns az eltérés. A belvárosra vonatkozóan 6 óránként vizsgálva az esetek 40%-ában szignifikáns az eltérés. Itt alapvetően nyáron mindegyik időpontban, továbbá ősszel és télen a déli és esti időpontokban jellemző nem szignifikáns hiba. A grafikonokat tanulmányozva szembetűnő a külvárosi mért és szimulált átlagok közötti nagyobb eltérés. Ez majdnem minden évszak és időpont esetén fennáll. Itt általában szignifikánsan felülbecsül a modell, ami 9 és 18 UTC között a legnagyobb mértékű, az évszakokat tekintve pedig tavasszal, ezután télig folyamatosan csökken az eltérés. A belvárosra vonatkozó szimulációk sokkal inkább egyeznek a mért értékekkel, itt 20 esetből 15-ször kisebb az eltérés abszolút értéke, mint a külváros esetén. Erre a rácspontra alapvetően 0 és 6 UTC-kor alulbecsül a modell, mely ősszel és télen szignifikáns, míg 12 és 18 UTC-kor felülbecsül, amely tavasszal szignifikáns. Tehát elmondható, hogy az eltérések irányai 12 és 18 UTC-kor megegyeznek, míg 0 és 6 UTC-kor pedig általában ellentétesek a két terület esetén, s a mértékük alapvetően a külvárosban nagyobb.

Emeljünk ki egy időpontot, 12 UTC-t, amikor a külvárosban a legjelentősebb eltérés mutatkozott! Ekkor a tízéves időszak mérésen alapuló PET átlagai a belvárosban jóval magasabbak (átlagosan 3,4 °C-kal), melyet a modell is szimulált, de kisebb mértékben (átlagosan 1 °C többletet). Mindkét helyszínre és minden évszakra vonatkozóan felülbecsül a modellszimuláció, és a külvárosra nagyobb eltérés mutatkozik. Az eredmény lehetséges származásához megnéztük a PET mért és szimulált alapváltozóinak (léghőmérséklet, relatív nedvesség, szélesebesség) a viselkedését is. Éves átlagos napi menetüket a 14. ábra mutatja. Tudni kell, hogy szakirodalmi adatok alapján a léghőmérséklet és a PET között erős pozitív lineáris, míg a relatív nedvesség és a PET között negatív lineáris kapcsolat jellemző (tehát például nagyobb relatív nedvesség kisebb PET-et eredményez). A szélesebesség és PET között is kimutatható összefüggés (például a szélesebesség növekedése csökkenti a meleg terhelést) főként nagyobb szélesebesség (2–5 ms⁻¹) esetén, kisebb értékeknél kevésbé egyértelmű a kapcsolat (Gulyás, 2009). Ábráinkon látható, hogy mindhárom alapváltozó esetén a

külvárosban jóval nagyobb az eltérés a mért és szimulált menet között, akárcsak a PET esetén. A léghőmérsékletre vonatkozóan felülbecsül, a külvárosra sokkal inkább, míg a relatív nedvességre a külvárosban alulbecsül. Mindez az előbb vázolt statisztikai kapcsolatrendszer alapján megfeleltethető a PET-nél látottaknak. A szélsőségre vonatkozóan negatív kapcsolat feltételezhető (éves átlagban a nagyobb szélsőség kisebb PET-et eredményezhet). A modell alulbecsül, ami a külvárosban jóval nagyobb mértékű, mint ahogyan a PET esetén a felülbecslés. Végeredményben tehát a PET-re vonatkozó mért-szimulált eltérések jól egyeznek az alapváltozókra vonatkozó eltérésekkel. (Évszakos bontásban is sok hasonlóság fellelhető, például a külvárosi tavaszi-nyári jelentős PET eltérés megjelenik a hőmérséklet és a szélsőség esetén.)



14. ábra: A mért és a SURFEX-TEB által szimulált léghőmérséklet (T , $^{\circ}\text{C}$), relatív nedvesség (RH , %) és (redukált) szélsőség (v , ms^{-1}) éves átlagos napi menete (UTC) a belvárosi, külvárosi és az Ócsa környéki vidéki területre, az 1961–1970 időszakra

A két városi pont között szimulált különbségekre (5. táblázat) vonatkozóan szignifikancia-vizsgálatként egymintás t -próbát (Dévényi és Gulyás, 1988) alkalmaztunk. Eredményünk alapján a két adatsor eltérése 95%-os szinten szignifikáns. Látható, hogy a

nyári éjszakai időpontokat kivéve egyöntetűen a belváros esetén némileg magasabb PET átlagok mutatkoznak. Tehát ez alapján a modell általában azonos irányú belvárosi bioklíma módosulást mutat ki a külvároshoz képest. Összevetve ugyanazon időszak mérési eredményeinek különbségeivel (6. táblázat), mind az eltérés irányát, mind a nagyságát illetően összhangban áll a szimuláció a méréssel, de a modell elsimítja, kisebbnek szimulálja a különbségeket. Ez minden időpontban és évszakban fennáll. A legnagyobb modellezett különbség a két városi terület között napközben (9, 12, 15 UTC), ezen belül is tavasszal – és kisebb mértékben nyáron – detektálható. A legkisebb különbség az éjjeli és reggeli időpontokban mutatkozik. Nyáron éjszaka pedig negatív eltérés is megjelenik. A két városi szimuláció különbségei mindhárom PET alapváltozóra mutatják a fenti tendenciákat, ahogy a 14. ábrán látható. Megemlítendő továbbá, hogy a 6.1.2. alfejezet 10. ábrája alapján – a 2001–2010 időszaki órás mért adatokra vonatkozóan – is hasonló tendenciákat állapítottunk meg, melyet tehát a SURFEX is szimulál.

Idő (UTC)	0	3	6	9	12	15	18	21
Éves	0	0,6	0,3	0,9	1,0	0,8	0,2	0
Tavas	0	1,1	0,4	1,2	1,3	1,2	0,4	0,1
Nyár	-0,2	-0,4	0,4	0,9	0,9	0,8	0,2	-0,2
Ősz	0	0,8	0	0,8	1,0	0,6	-0,1	0
Tél	0,1	0,9	0,2	0,5	0,8	0,5	0,2	0,1

5. táblázat: A SURFEX-TEB által szimulált állapothatározókból számolt PET különbség (°C) a belvárosi és külvárosi terület között, a fő- és mellékterminus időpontokra vonatkozóan, az 1961–1970 időszakra

Idő (UTC)	0	6	12	18
Éves	2,1	2,6	3,4	1,6
Tavas	2,1	2,8	3,8	1,7
Nyár	1,9	2,9	3,3	1,8
Ősz	2,3	2,5	3,3	1,3
Tél	2,2	2,2	3,2	1,9

6. táblázat: A mért állapothatározókból számolt PET különbség (°C) a belvárosi és külvárosi terület között, a főterminus időpontokra vonatkozóan, az 1961–1970 időszakra

Az Ócsa környéki városi hatástól mentes, természetes felszínborítású pontra a modell mindkét városi rácsponthoz képest alacsonyabb PET-et ad mindegyik évszakban és időpontban (7. táblázat). Ez alapján tehát a városon belüli eltérés mellett városi bioklíma módosulás is egyértelműen detektálható a város környékéhez képest a szimuláció alapján, ami

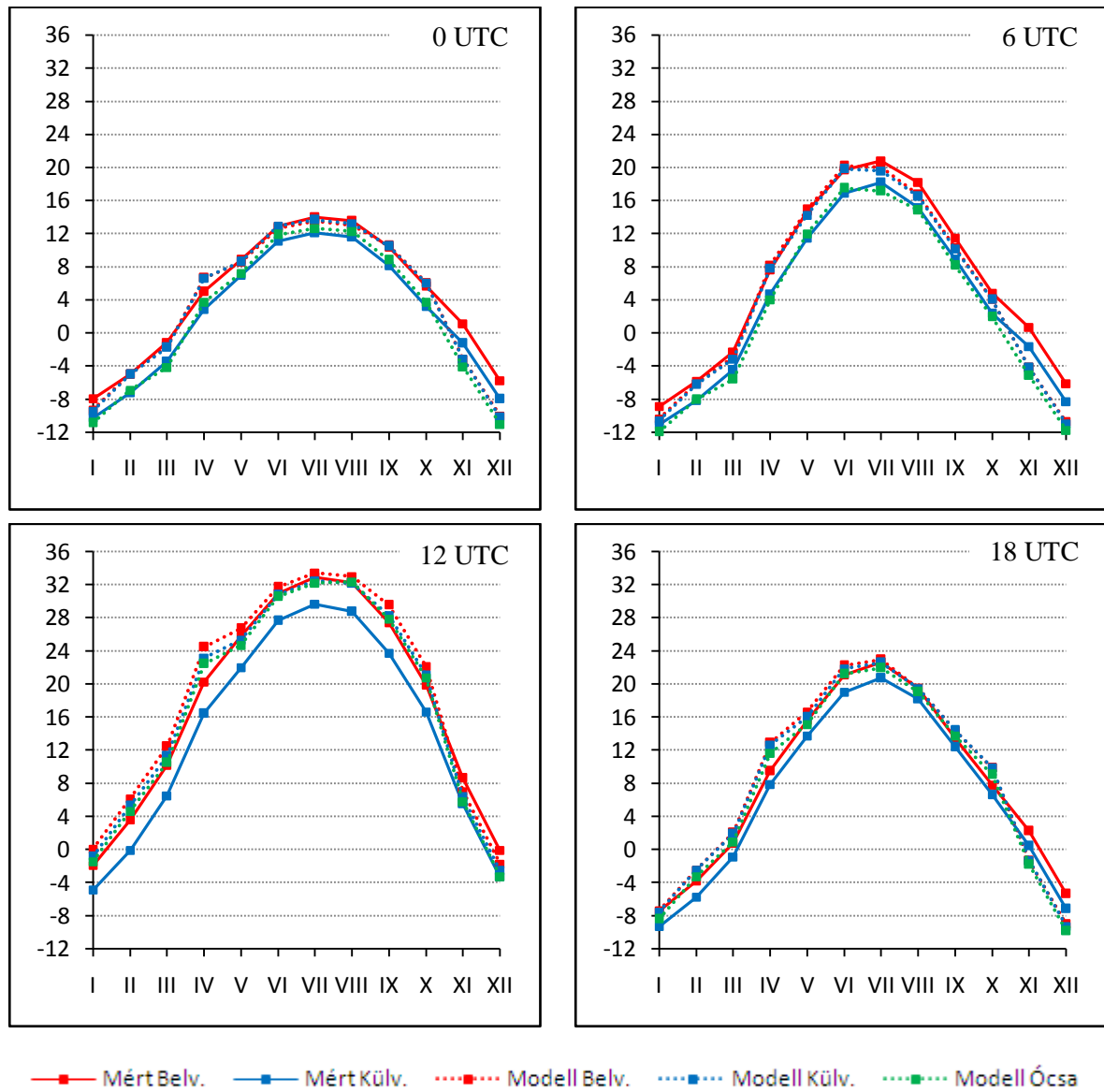
nyáron fokozott meleg stresszként, télen csökkent hideg terhelésként jelentkezhet a városi környezetben. A legnagyobb szimulált PET különbség a külváros és a vidéki pont között az éjszakai időpontokban és reggel jelentkezik, a legkisebb a déli, délutáni időszakban, ezen belül is a nyári évszakban. Este a vidéki terület gyorsabban és jobban lehülhet, míg délelőtt gyorsabban melegedhet, mint a város, amit már Oke (1982) is közölt mint jellemző városklimatológiai jelenség. Ez okozhatja az eltérő termikus stressz különbségeket. Mindezt megerősítik a 14. ábra szimulált átlagos hőmérsékletmenetei is. A déli, kora délutáni időszakra, a vidéki pontra például magasabb hőmérsékletet szimulál, míg éjjel jóval hidegebbnek valószínűsíthető ez a terület. A tendencia a relatív nedvesség esetén is egyértelműen megmutatkozik, a szélsébség esetén viszont napközben nagyobb minimálisan a különbség.

Idő (UTC)	0	3	6	9	12	15	18	21
Éves	1,5	1,0	2,0	1,1	0,5	0,6	0,7	1,3
Tavas	2,3	1,2	2,8	1,1	0,7	0,9	0,9	1,7
Nyár	1,0	1,3	2,1	0,4	0,1	0,4	0,6	0,5
Ősz	1,7	0,9	1,7	0,9	0,5	0,5	0,7	1,5
Tél	1,4	0,5	1,3	1,9	0,7	0,6	0,7	1,3

7. táblázat: A SURFEX-TEB által szimulált állapotátározókból számolt PET különbség (°C) a külvárosi és az Ócsa környéki vidéki terület között, a fő- és mellékterminus időpontokra vonatkozóan, az 1961–1970 időszakra

A 15. ábra a négy főterminusra mutatja a mért és szimulált átlagos évi meneteket. A havi átlagokra elvégzett Welch próba alapján azt kaptuk, hogy a külvárosban alapvetően csak a téli hónapokra jellemző 95%-os szinten nem szignifikáns hiba. A belvárosra vonatkozóan az esetek 65%-ában nem szignifikáns az eltérés, ami elsősorban a január, február, május és a nyári hónapok minden időpontjára teljesül. A grafikonokon elsőként a legszembevetőbb a külvárosi felülbecslés 12 UTC-kor, ami mindegyik hónapban fennáll, és a november és decembert kivéve 95%-os szinten szignifikáns. A másik három időpontban is mindegyik hónapban felülbecsül a modell a külvárosban, az utolsó két hónapot kivéve. A belváros esetében általában kisebbek a különbségek (48 esetből 37-szer kisebb az eltérés abszolút értéke, s általában csak november-decemberben nagyobb). Itt 0 és 6 UTC-kor három-három hónapot kivéve alulbecsül, míg 12 és 18 UTC-kor pedig felülbecsül a modell, ám az eltérések általában nem szignifikánsak. Novemberben és decemberben (a külvárosi 12 UTC időpontot kivéve) alapvetően mindkét állomáson, s minden időpontban szignifikánsan alulbecsül a modell. Megemlítendő, hogy erre vonatkozóan Vértesi (2011) a léghőmérséklet változó

alapján is jelentős alulbecslést tapasztalt (ugyan nem időpontok szerinti bontásban, hanem a tízéves átlag alapján, továbbá némileg más rácspont választási módszert alkalmazott).



15. ábra: A mért és a SURFEX-TEB által szimulált állapothatározókból számolt, főterminusokra vonatkozó PET (°C) átlagos évi menete az 1961–1970 időszakra

A két városi terület szimulációi közötti különbségekre jelen esetben is elvégeztük a t-próbát, s eredményünk alapján a két adatsor eltérése általában 95%-os szinten szignifikáns. Mindig a belváros esetén mutatkozik kissé nagyobb PET átlag, csak a nyári hónapokban 0 UTC-kor detektálható némileg kisebb. A napi menetnél írottakkal összhangban a legnagyobb többlet 12 UTC-kor, a tavaszi és kisebb mértékben a nyári hónapokban jelentkezik. A vidéki pontra – egyedül az augusztusi 12 UTC időpontot kivéve – minden hónapban, s mindegyik időpontban alacsonyabb PET átlag mutatkozik, mint a külvárosban.

Tehát ez alapján havi bontásban is csaknem mindig szimulálható városi hatás. A legnagyobb különbség a külváros és a városkörnyék között minden hónapban az éjszakai és a reggeli időpontokban jelentkezik, amit a vidéki terület erősebb lehűlése eredményezhet.

Összegzésképpen kiemeljük, hogy a belvárosra vonatkozóan általában jobban közelítette a modellt a valóságot. Egy feltételezhető oka lehet ennek, hogy mivel kanyonmodellen alapul a SURFEX-TEB, ezért sűrűbben beépített városi területre jobban alkalmazható. Ennek megerősítéséhez további vizsgálatok szükségesek. A PET alapváltozói is egyöntetűen kisebb eltéréseket mutatnak a belvárosra. A mért és a modelleredmények között különféle eltéréseket okozhat az is, hogy a bioklíma indexek számításához input sugárzási paraméternek – amely felhasználása elengedhetetlen bioklimatológiai vizsgálatokhoz – a mért adatok esetén felhőzetmennyiség adat, a modellszimuláción alapuló vizsgálathoz viszont globálsugárzás adat állt rendelkezésre. A két paraméter természetesen más hatással bír a bioklíma indexekre például azáltal, hogy a felhőzet – még ha „ugyanannyi” is a mennyisége – fajtájától, vastagságától függően eltérő mértékben befolyásolja a sugárzási viszonyokat. Ezért a két paraméter összevetése hibával terhelt.

A két területre detektált eltérések irányai a déli és az esti időpontban megegyeznek, a nagyságukban ugyanakkor különbségek adódnak, melyek általában a külvárosra vonatkozóan nagyobbak. A másik két időpontban a modell tévedése kisebb. Mindazonáltal véleményünk szerint a bioklimatikus viszonyokat kielégítően visszaadja a modellszimuláció. A rácspontok között a modell kimutatott városi, illetve belvárosi módosult humán komfort különbségeket, amelyek nagysága és iránya alapvetően megfelel a mért értékek tendenciáinak, ugyanakkor simítja a különbségeket.

7. Összefoglalás

A dolgozatban városklíma alapú humán komfort vizsgálatot végeztünk Budapest példáján. Elemzésünk első részében a budapesti Kitaibel Pál utcai és a pestszentlőrinci meteorológiai állomás bioklimatikus sajátosságait és különbségeit vizsgáltuk mérési eredmények alapján a PET és az UTCI bioklíma indexek segítségével. A helyszínek humán komfort különbségeinek alapját az a feltételezés adta, hogy a központi fekvésű Kitaibel Pál utcai állomás a belváros klímamódosító hatását reprezentálhatja. Összehasonlításunk első része négy különböző napszakot jellemző időpont szerint történt. Vizsgáltuk három éghajlati normálidőszak (1961–1990, 1971–2000 és 1981–2010) között a detektálható tendenciák jellegét is. Majd pedig óras felbontásban, az elmúlt évtizedre vonatkozóan is jellemeztük a bioklimatikus viszonyokat.

Ezt követően az 1 kilométer horizontális felbontású SURFEX-TEB városi felszint leíró modellt teszteltük a múltra vonatkozóan a városi, illetve belvárosi humán komforthatás kimutatása céljából, a vizsgált bioklíma indexek alapján. A modell eredményeit az ugyanazon időszakra vonatkozó mérési adatokkal validáltuk. A két meteorológiai állomáshoz legközelebbi modell rácspont adatait leválasztottuk (melyek igen közel találhatók a mérőpontokhoz), továbbá egy városon kívüli, mesterséges objektumoktól távol fekvő pont szimulált idősorát is. Megnéztük a rácspontok között szimulált különbségeket is.

A mérési eredmények alapján az alábbi fő következtetéseket vonhatjuk le a humán komfort jellegét, különbségeit és változásait illetően:

- A mérőpontok bioklimatikus különbségeinek iránya mind a négy főterminus időpontban megegyezik: a belvárosban erősebb meleg terhelés, illetve kisebb hideg stressz jellemző. Ez például nyáron károsan hathat az ott tartózkodók szervezétére, míg télen kedvezően befolyásolhatja a komfortérzetet. A legnagyobb eltérések a déli időszakban, míg a legkisebbek este és éjszaka jellemzők.
- A 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, egyöntetűen 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 felbontásban kirajzolt PET hőterhelési képei a korábbi időszakokra megállapított tendenciákat mutatják. Egy adott időpontban a belvárosban vagy ugyanolyan, vagy egy kategóriával erősebb meleg, illetve gyengébb hideg terhelés uralkodik.

A kapott bioklimatikus különbségek és tendenciák feltételezhető oka lehet, hogy a belvárosi területen a fokozódó beépítettség és a globális melegedés együttesen erősítette a városi hősziget hatást a vizsgált időszakban, míg a külváros esetén inkább csak a klímaváltozás játszhat szerepet a tendenciák fokozódásában.

A városi bioklimatikus viszonyok kimutatására szolgáló modellszimuláción alapuló vizsgálataink alapján az alábbi fő eredményeket foglalhatjuk össze:

- A modell kimutatott belvárosi humán komfort módosulást a külvárosi területhez képest, a különbség iránya megfelel a mért adatokon alapuló vizsgálat során detektált eredményekkel. A szimulált adatokból származó eltérés mértéke valamelyest kisebb, mint ami a mérésekből adódott.
- A városkörnyéki és városi rácspont között is szimulálható bioklimatikus különbség: a városban erősebb meleg terhelés és csökkent hideg stressz jellemző a vizsgált időpontokra vonatkozó évszakos és havi átlagok alapján.
- A külvárosra vonatkozóan kiemelkedő a modell nappali és esti felülbecsülése a mérési adatokhoz képest. A belvárosi eltérések nagysága általában csekélyebbnek mutatkozott a külvárosinál.
- A belvárosi területre kapott modelleredmények összességében jobb egyezést mutattak a mérésekkel, mint a külvárosra, ami a modell alkalmazhatóságát is jelzi.

Végeredményben úgy gondoljuk, hogy a modell alkalmazhatósága ilyen irányú vizsgálatokhoz megalapozott és folytatandó, de természetesen további vizsgálatokra van szükség a modell részletes megismerése érdekében, és modellfejlesztési munkák is nélkülözhetetlenek a gyengeségek csökkentése céljából.

Láthattuk, hogy az UTCI-re vonatkozó bemutatott eredményeink – eltérő skála felbontás mellett – hasonló vonásokat mutatnak a PET esetében tapasztaltakkal. Ennek kapcsán szeretnénk hangsúlyozni, hogy a nagyfokú egyezés nem véletlen, sőt nagy különbségek meglepőek lennének, mivel az UTCI elméleti alapja ugyanaz, mint a PET-é. Ugyanakkor más (a legújabb) fiziológiai modellen alapul, s a rá vonatkozó referencia környezet is eltérő.

Továbbá – mint láthattuk – az értéktartománya jelentősen szélesebb, különösen a komfortos tartományé. Mivel egy igen új indexről van szó, hazánkban ilyen irányú vizsgálatok alig történtek, ezért fontosnak tartottuk részletesebb vizsgálatát és megismerését.

A PET standard skálabeosztásával kapcsolatban megjegyezzük, hogy hazai klimatikus viszonyok között sok esetben túlságosan kiemeli az extrémumokat, amit a bemutatott ábráinkon is megfigyelhettünk. Ezért ennek globális használata nem feltétlenül szerencsés. A trópusi és szubtrópusi területeken speciális értéktartományt használnak (Lin and Matzarakis, 2008). Úgy gondoljuk, hazánkban is szükség van egy speciális skálabeosztás bevezetésére, ami csak igen nagy mintaszámú, és lehetőleg több várost is átfogó kérdőíves közvélemény-kutatás révén lehetne eredményes. Ez rendkívül időigényes folyamat, de előrelépések a témakörben megindulhatnak a jövőben.

A jövő egyik – jelenleg nemzetközi szinten is még kibontakozóban lévő – bioklimatikus kutatási iránya lehet például a XXI. században valószínűsíthető bioklimatikus tendenciák elemzése a budapesti két területre vonatkozóan, az egyre nagyobb számú és finomodó felbontású regionális klímamodellek révén. Egyelőre azonban e modellek és felbontásaik általában nem teszik lehetővé a két különböző felszínstruktúrájú városi terület megfelelő elkülönítését. Eredményeink rámutathatnak arra, hogy a belvárosi nyári fokozott termikus terhelés miatt a hőségriasztás rendszerének jövőbeli finomítása meggondolandó. Szükséges lenne egy speciális, Budapesten belüli, például külön a belvárosi térségre vonatkozó riasztási rendszer kidolgozása.

A bemutatott eredmények kapcsán nem lehet figyelmen kívül hagyni a belvárosi állomás 1980-as évektől fennálló városklimatológiai problémás elhelyezkedését. A belvárosi klimatikus és bioklimatikus viszonyok vizsgálatához szükséges elegendően hosszú mérési adatsor azonban máshol nem áll rendelkezésre. A téma fontossága és időszerűsége mindenképpen megköveteli az ilyen jellegű vizsgálatokat. Felmerülhetnek esetleges opcióként a főváros sok pontján megtalálható Országos Légszennyezettségi Mérőhálózati automata állomások, de itt nem mérnek globálsugárzást (illetve nem észlelnek felhőzetmennyiséget), amely paraméter nélkül humán komfort vizsgálat elképzelhetetlen, továbbá elegendően hosszú adatsor sem áll rendelkezésre. Mindenképpen szükséges lenne legalább egy felszíni meteorológiai állomás létesítése egy még inkább belvárosi helyszínen, ahol a felszíni elhelyezkedés, az aszfaltozott felszínborítás jobban reprezentálhatja a belvárosi város- és bioklimatológiai viszonyokat (pl. Deák Ferenc tér, Madách Imre tér). E téren javulás lehetséges a következő évek során, mivel az OMSZ bekapcsolódott az ún. UHI Project-be (www.eu-uhi.eu/tzuio/index.php), amely 2011 májusában indult, s 2014 áprilisában fejeződik

be. A 7 közép-európai ország 14 partnerét befogadó munkaprogram alapvető célja a globális hősziget-jelenséggel szembeni csökkentési és adaptációs stratégiák, illetve ezek alkalmazhatóságának kidolgozása. Egyik irányvonala pedig nemzetközi városklimatológiai mikroklíma mérőhálózatok szervezése, ami eredményes projekt esetén Budapesten is létrejöhet. Sikeres megvalósulás esetén részletes városi bioklíma kutatások is útnak indulhatnak majd, melyhez alapul szolgálhatnak jelen dolgozat eredményei.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni témavezetőmnek, Németh Ákosnak a dolgozat elkészítéséhez, a felmerült problémák megoldásához nyújtott segítségét, s nem utolsósorban a türelmét. Köszönöm tanszéki konzulensemnek, Dr. Pongrácz Ritának a dolgozat aprólékos pontosítását és hasznos tanácsait, segítségét.

Köszönetemet fejezem ki Kántor Noéminek, a Szegedi Tudományegyetem doktorjelöltjének, aki egy modellfutás alatt bekövetkezett hiba feltárásában nyújtott segítségével a dolgozat eredményes létrejöttét lehetővé tette.

Köszönöm az Országos Meteorológiai Szolgálat Klímamodellező Csoportjának a SURFEX és az ezzel kapcsolatos eredmények értelmezésében nyújtott segítségét, kiemelten Krüzselyi Ilonának, továbbá Szépszó Gabriellának, Kovács Máriának és Szabó Péternek.

Megköszönöm a fenti személyeknek az adatsorok rendelkezésemre bocsátását. Hálával tartozom továbbá Hollósi Brigittának, Sábitz Juditnak, és mindazoknak, akik bíztattak a dolgozat készítése során.

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 satellite 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), 14 p.
- Dévényi D., Gulyás O. (1988): Matematikai statisztikai módszerek a meteorológiában. Tankönyvkiadó Vállalat, Budapest, 444 p.
- 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, 115 p.
- 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 der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Nr. 20*, 473–478.
- Hartz D.A., Prasad 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, 62 p.
- Howard L. (1833): The climate of London deduced from meteorological observations made in the metropolis and at a various places around it. 3rd edition, Harvey & Darton, London, 355 p.
- 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

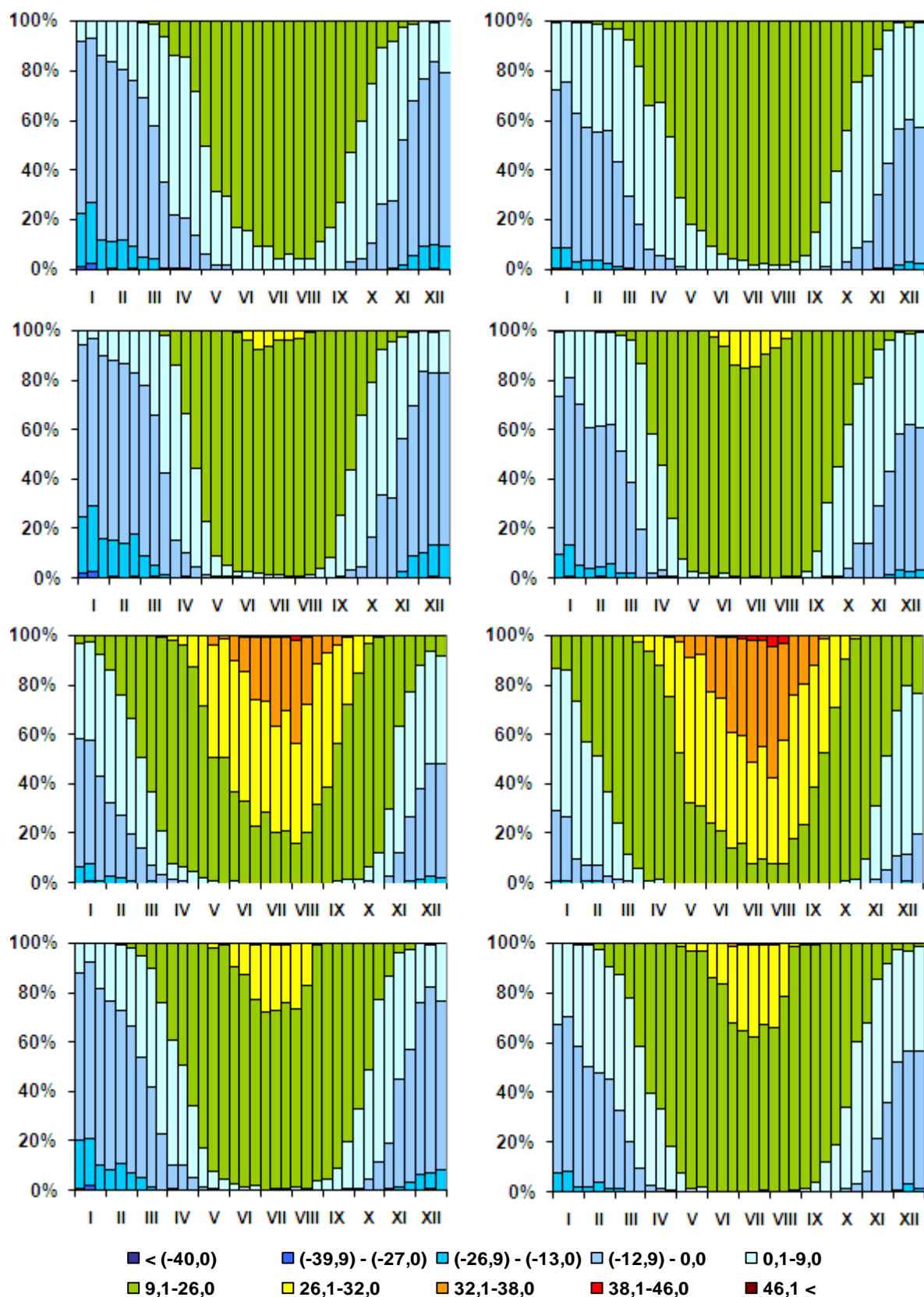
- Jendritzky G. (1993): The atmospheric environment – an introduction. *Experientia* 49, 733–738.
- Jendritzky G., Havenith G., Weihs P., Batchvarova E. (eds) (2009): Towards a Universal Thermal Climate Index UTCI for assessing the thermal environment of the human being. Final Report COST Action 730, 26 p.
- Jendritzky G., de Dear R., Havenith G. (2011): UTCI–Why another thermal index? *Int J Biometeorol* 12/2011, Special Issue (UTCI), 8 p.
- Kántor N. (2012): Városi közterületek termikus komfortviszonyainak értékelése Szeged példáján különös tekintettel a látogatók szubjektív reakcióira. Doktori (PhD) értekezés. SZTE Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék, Szeged, 173 p.
- Katona Á. (2007): Magyarország kiemelt üdülőhelyeinek turisztikai klimatológiai vizsgálata a klímaváltozás tükrében. Diplomamunka. ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest, 64 p.
- Kovács T. (2010): Különböző bioklíma indexek összehasonlító vizsgálata. Diplomamunka. ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest, 74 p.
- Kuttler W. (1998): Stadtklima. In: Sukopp H., Wittig R. (eds): Stadtökologie. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart–Jena–Lübeck–Ulm, 125–167.
- Le Moigne P. (2009): SURFEX scientific documentation. Note de centre du Groupe de Météorologie à Moyenne Echelle, 87, Météo-France, CNRM, Toulouse, France, 211 p.
- Lin T.P. (2011): Thermal adaptation and attendance in outdoor public spaces. *Urban Climate News* 40, 17–20.
- Lin T.P., Matzarakis A. (2008): Tourism climate and thermal comfort in Sun Moon Lake, Taiwan. *Int J Biometeorol* 52, 281–290.
- Lindberg F. (2007): Modelling the urban climate using a local governmental geo-database. *Meteorol Appl* 14, 263–273.
- Marton A. (2010): Hőhullámok vizsgálata Budapesten bioklímaindexek felhasználásával. Szakdolgozat. ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest, 57 p.
- Masson V. (2000): A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Bound-Lay Meteorol*, 94, 357–397.
- Masson V., Grimmond C.S.B., Oke T.R. (2002): Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) scheme with direct measurements from dry districts in two cities. *J Appl Meteorol*, 41, 1011–1026.
- 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.
- Oke T.R. (1982): The energetic basis of the urban heat island. *Q J Roy Meteorol Soc* 108, 1–24.
- Oke T.R. (1987): *Boundary Layer Climates*. 2nd ed, Methuen, London, 435 p.
- Páldy A., Bobvos J. (2008): A 2007. évi magyarországi hőhullámok egészségi hatásainak elemzése - előzmények és tapasztalatok. „*Klíma-21*” *Füzetek* 52, 3–15.
- 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, 10 p.
- 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, 127 p.
- 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, 147 p.

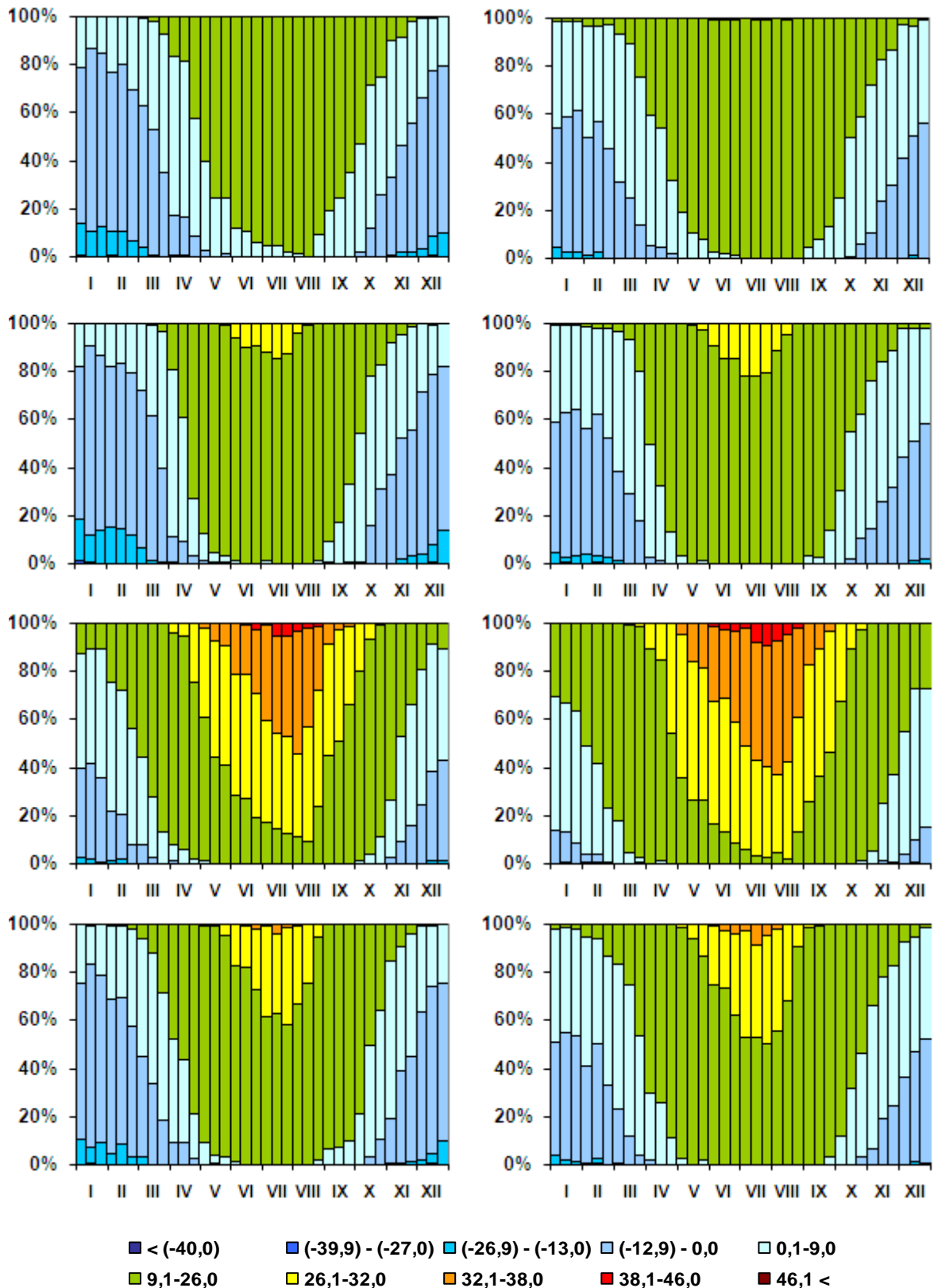
- Shimazaki Y., Yoshida A., Suzuki R., Kawabata T., Imai D., Kinoshita S. (2011): Application of human thermal load into unsteady condition for improvement of outdoor thermal comfort. *Build Environ* 46, 1716–1724.
- Spiridonov V., Déqué M., Somot S. (2005): ALADIN-Climate: from the origins to present date. *ALADIN Newsletter* 29
- Stewart I.D. (2009): Classifying Urban Climate Field Sites by “Local Climate Zones”. *Urban Climate News* 34, 8–11.
- Sümeğhy Z., Unger J. (2003): Seasonal case studies on the urban temperature cross-section. *Acta Climatol Chorol Univ Szegediensis* 36–37, 101–109.
- Szabó D. (2010): Az éghajlatváltozás hatása a hazai turisztikai kínálatra. Diplomamunka. ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest, 113 p.
- 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.
- UNFPA (2011): The State of World Population 2011. Report of the United Nations Population Fund. (www.unfpa.org)
- 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, 108 p.
- Unger J., Bottyán Z., Sümeğhy 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. *Légekör* 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.

- Uppala S.M., Kallberg P.W., Simmons A.J., Andrae U., Bechtold V.D., Fiorino M., Gibson J.K., Haseler J., Hernandez A., Kelly G.A., Li X., Onogi K., Saarinen S., Sokka N., Allan R.P., Andersson E., Arpe K., Balmaseda M.A., Beljaars A.C.M., Van De Berg L., Bidlot J., Bormann N., Caires S., Chevallier F., Dethof A., Dragosavac M., Fisher M., Fuentes M., Hagemann S., Holm E., Hoskins B.J., Isaksen L., Janssen P.A.E.M., Jenne R., McNally A.P., Mahfouf J.F., Morcrette J.J., Rayner N.A., Saunders R.W., Simon P., Sterl A., Trenberth K.E., Untch A., Vasiljevic D., Viterbo P., Woollen J. (2005): The ERA-40 re-analysis. *Q J R Meteorol Soc* 131, 2961–3012.
- 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.
- Vértesi Á.É. (2011): Budapest városi hősziget-hatásának modellezési lehetőségei. Szakdolgozat. ELTE Környezettudományi Centrum, Budapest, 78 p.
- 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, 29 p.

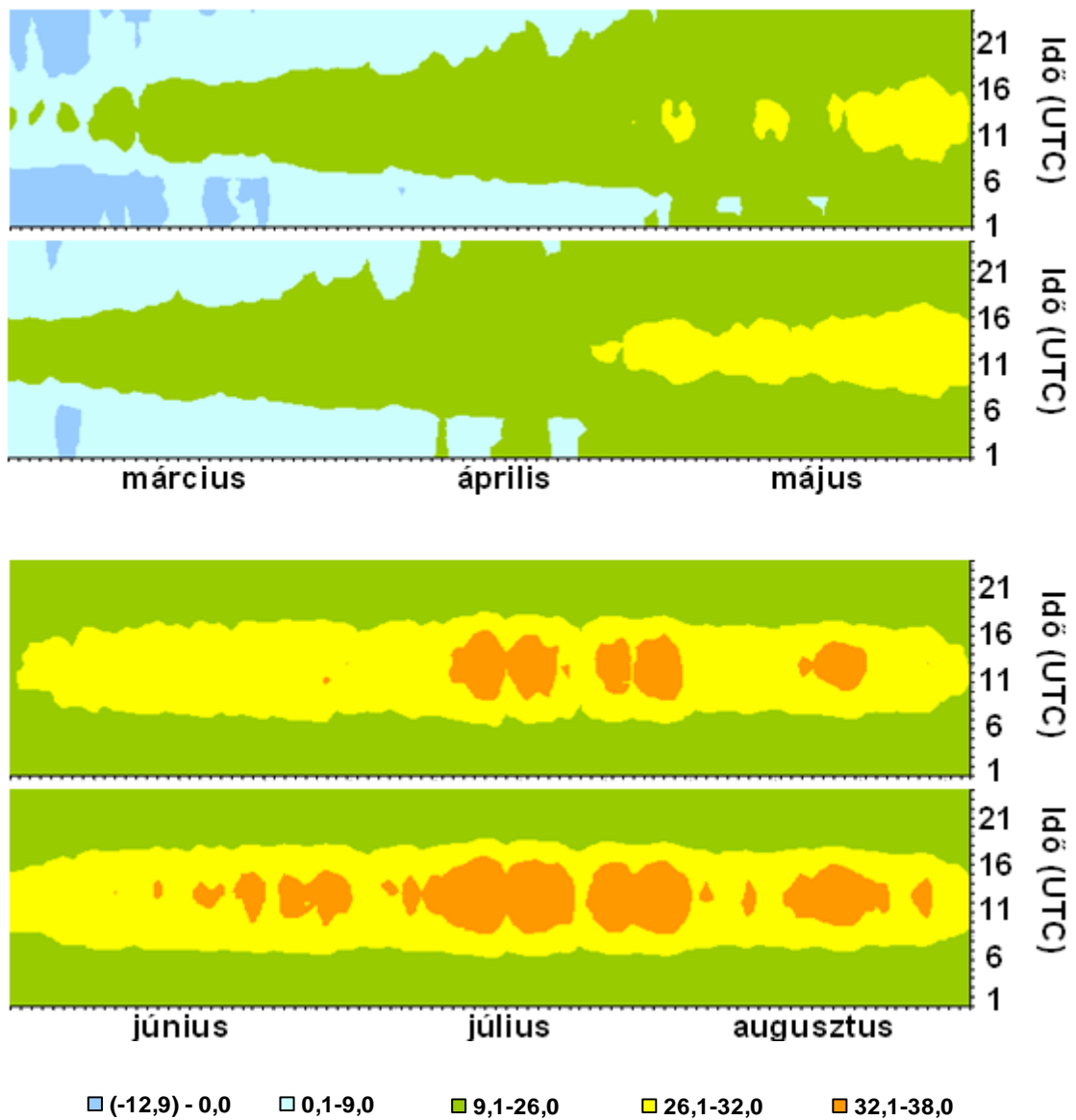
Függelék



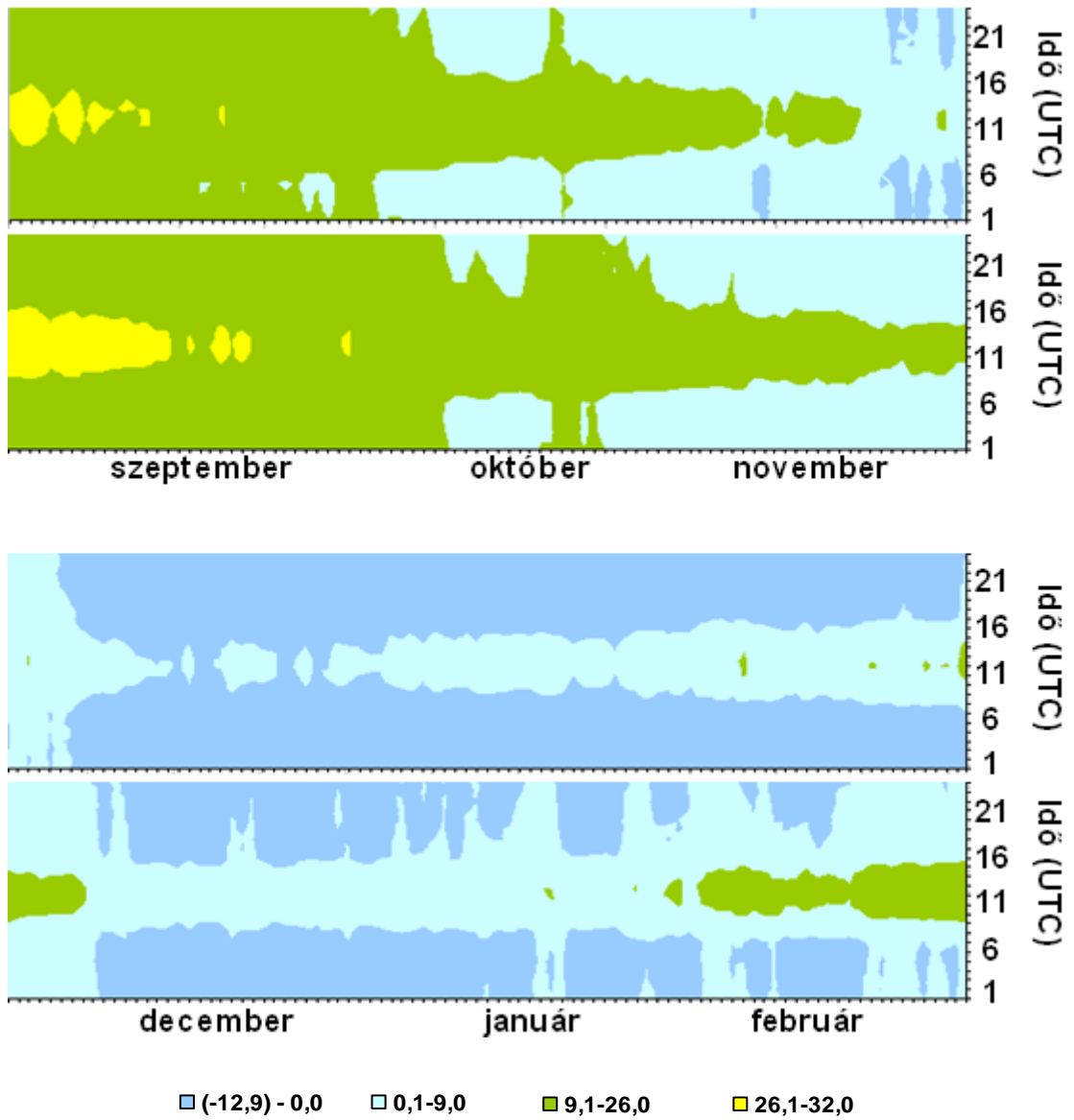
1. ábra: Az UTCI hőérzeti kategóriáinak (°C) dekádonként csoportosított gyakorisági eloszlása az 1961–1990 normálidőszakra, a külvárosi (bal oldalon) és a belvárosi területen, 0, 6, 12 és 18 UTC időpontban (fentről)



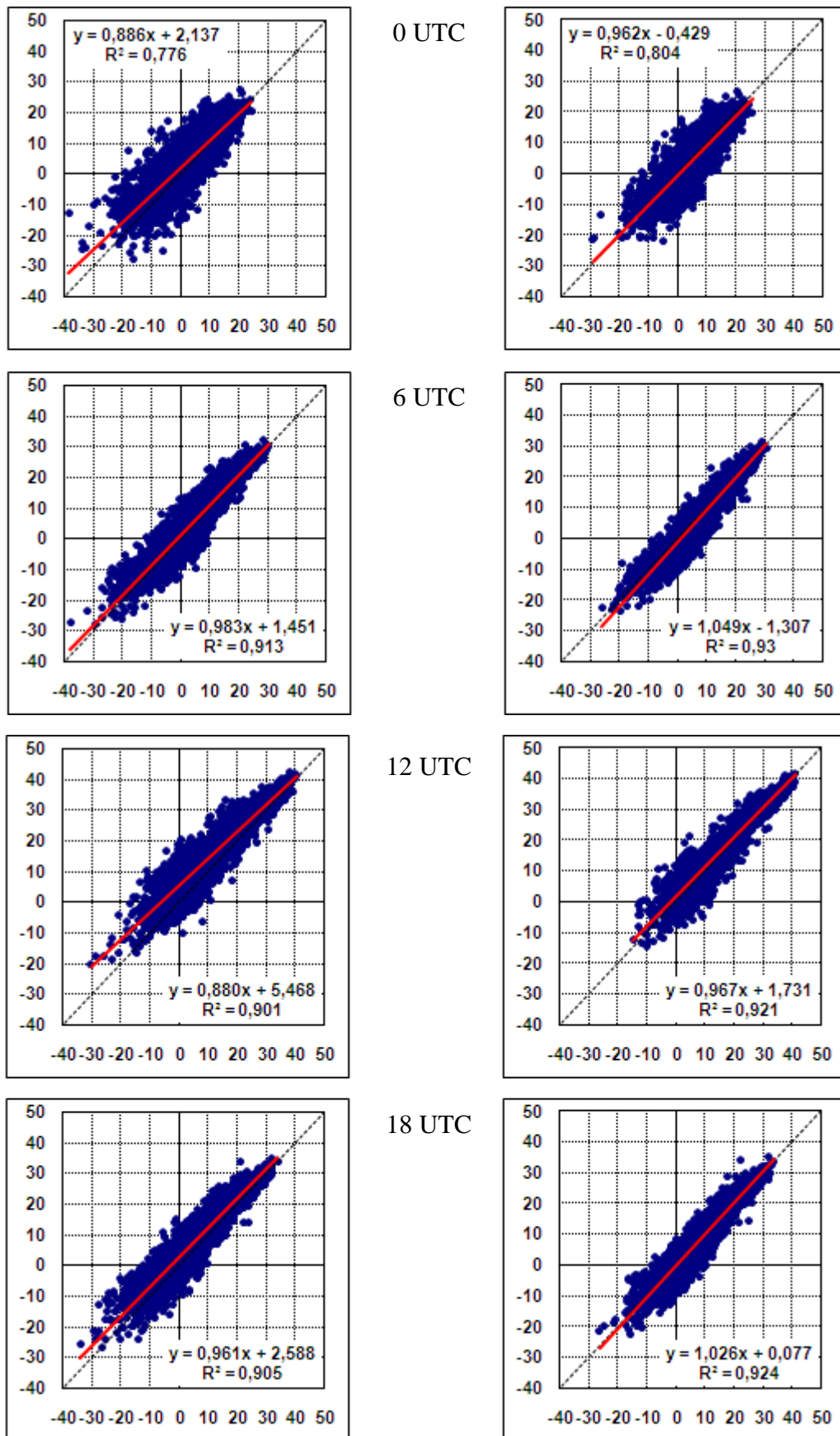
2. ábra: Az UTCI hőérzeti kategóriáinak ($^{\circ}\text{C}$) dekádoként csoportosított gyakorisági eloszlása az 1981–2010 normálidőszakra, a külvárosi (bal oldalon) és a belvárosi területen, 0, 6, 12 és 18 UTC időpontban (fentről)



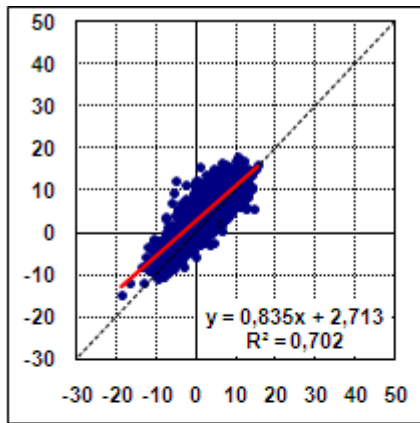
3. ábra: A külvárosi (felső) és belvárosi (alsó) terület órás hőterhelése páronként az UTCI index hőérzeti kategóriái alapján (°C), a 2001–2010 időszak átlagára, tavasszal (fent) és nyáron (lent)



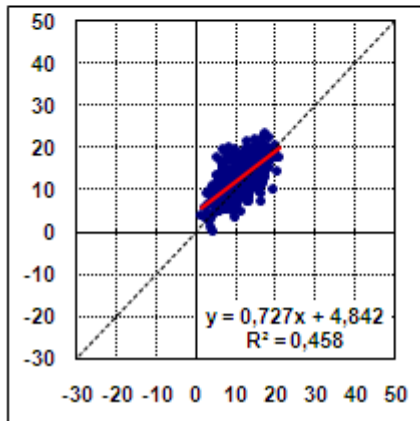
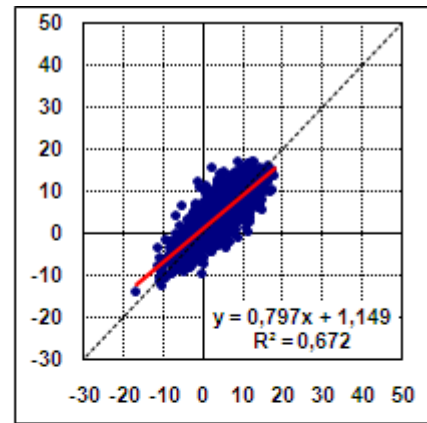
4. ábra: A külvárosi (felső) és belvárosi (alsó) terület órás hőterhelése páronként az UTCI index hőérzeti kategóriái alapján (°C), a 2001–2010 időszak átlagára, ősszel (fent) és télen (lent)



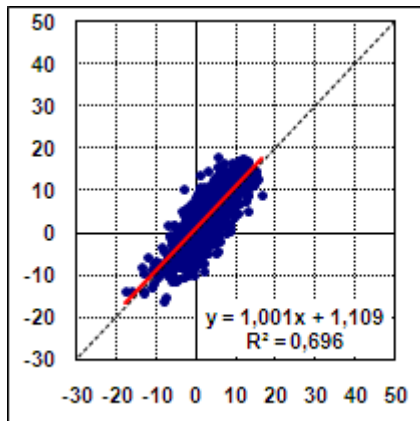
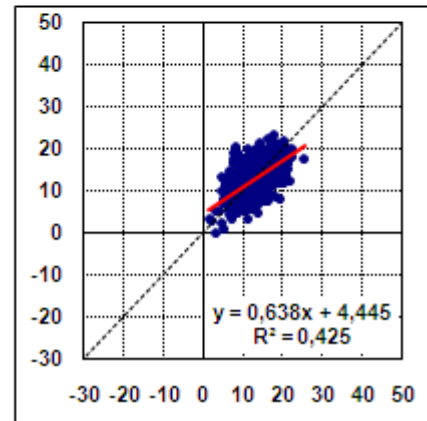
5. ábra: A mért (vízszintes tengely) és a SURFEX-TEB által szimulált állapotathározókból számolt UTCI (°C) éves kapcsolata a főterminus időpontokban, a külvárosi (bal oldalon) és belvárosi területre (1961–1970)



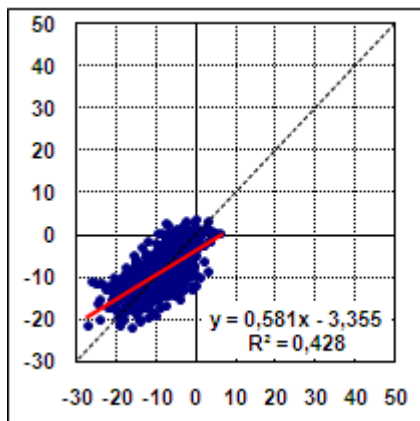
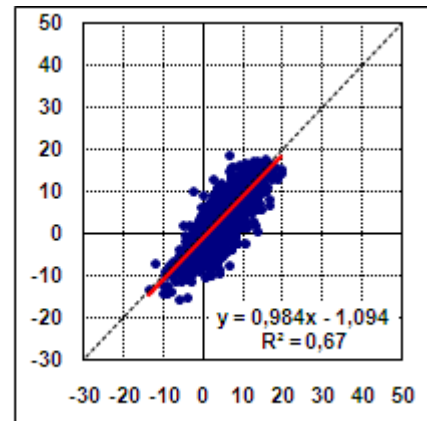
Tavas



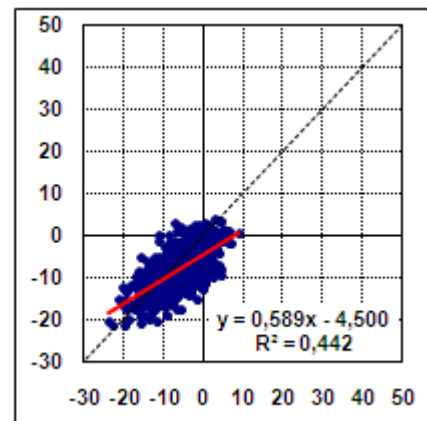
Nyár



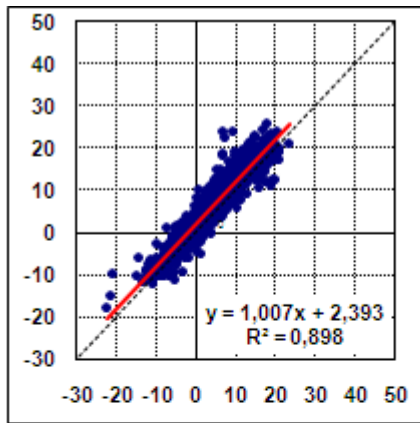
Ősz



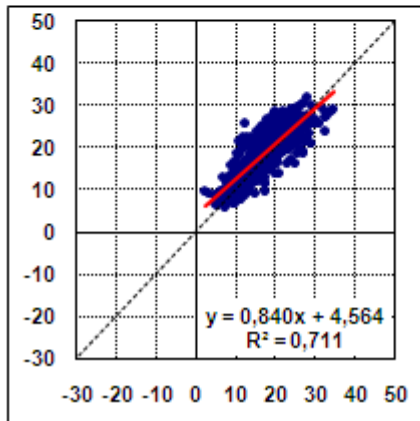
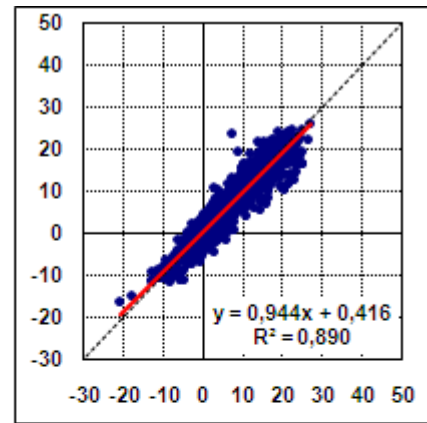
Tél



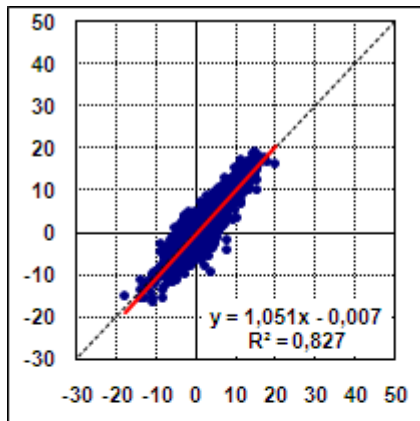
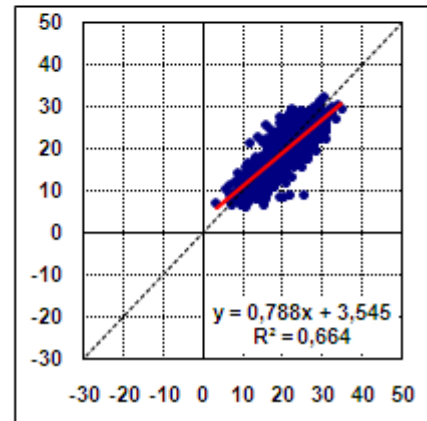
6. ábra: A mért (vízszintes tengely) és a SURFEX-TEB által szimulált állapotváltozókból számolt PET (°C) évszakos kapcsolata a külvárosi (bal oldalon) és belvárosi területre, 0 UTC-kor, az 1961–1970 időszakra



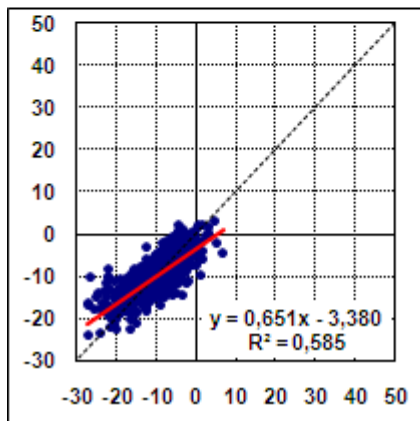
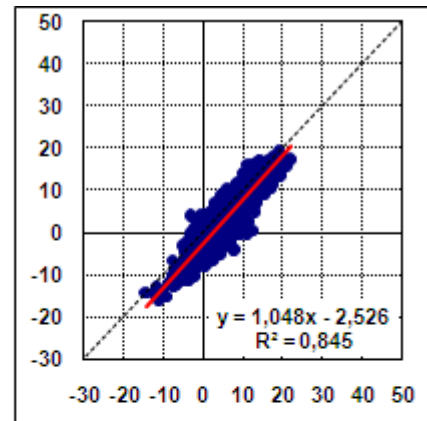
Tavaszi



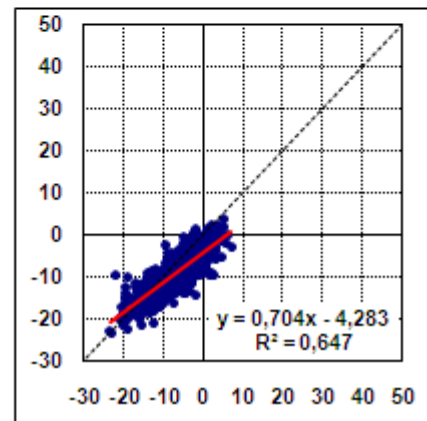
Nyári



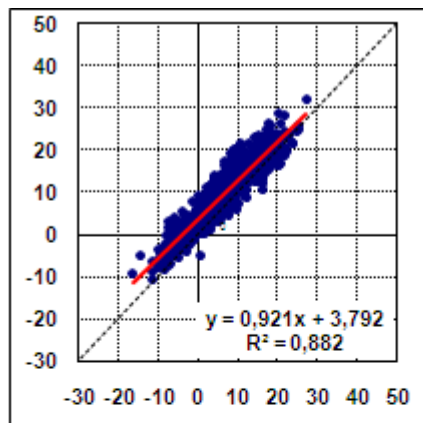
Őszi



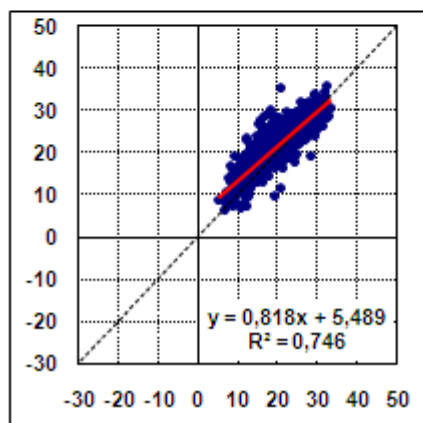
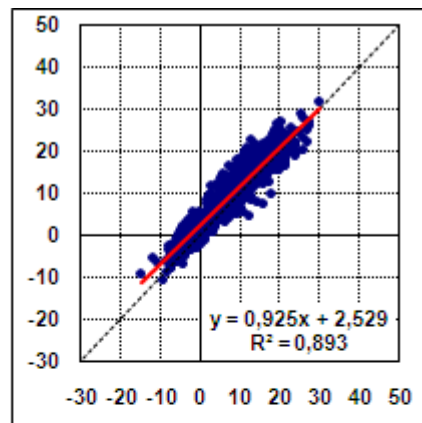
Téli



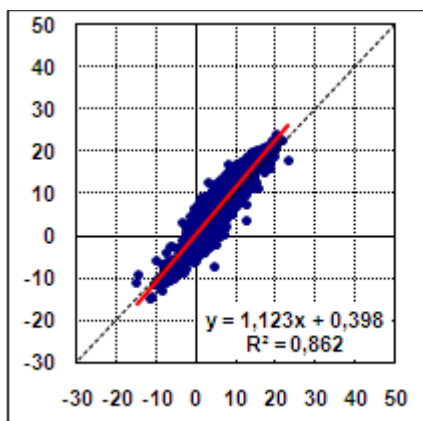
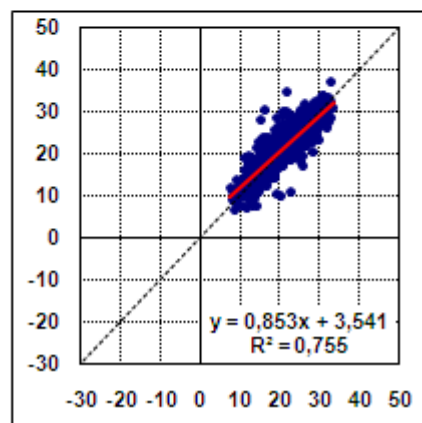
7. ábra: A mért (vízszintes tengely) és a SURFEX-TEB által szimulált állapothatározókból számolt PET (°C) évszakos kapcsolata a külvárosi (bal oldalon) és belvárosi területre, 6 UTC-kor, az 1961–1970 időszakra



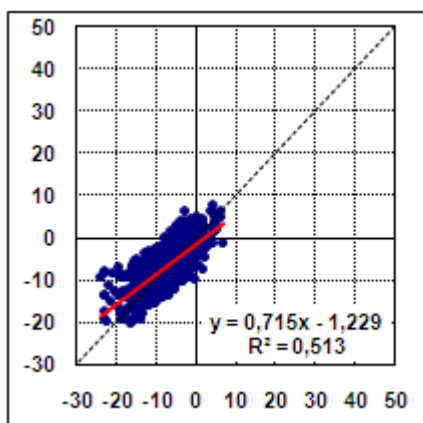
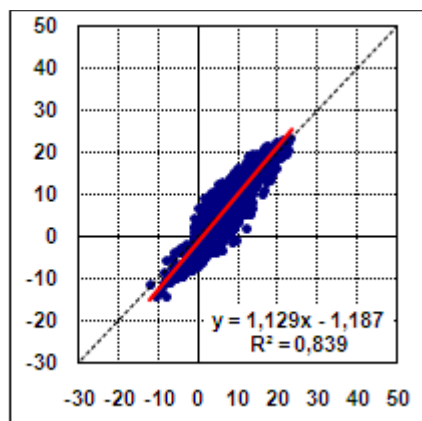
Tavas



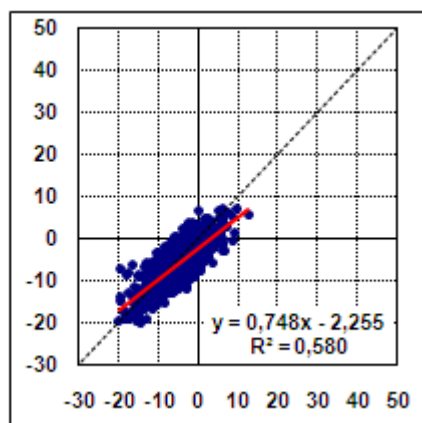
Nyár



Ősz



Tél



8. ábra: A mért (vízszintes tengely) és a SURFEX-TEB által szimulált állapothatározókból számolt PET (°C) évszakos kapcsolata a külvárosi (bal oldalon) és belvárosi területre, 18 UTC-kor, az 1961–1970 időszakra