

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

A városi hatások tanulmányozása budapesti felszíni meteorológiai mérések alapján



Szakdolgozat

Készítette:

Molnár Gergely

Földtudomány alapszak, meteorológia szakirány

Témavezető:

Dr. Baranka Györgyi, *Országos Meteorológiai Szolgálat*

Belső konzulens:

Dr. Weidinger Tamás, *ELTE Meteorológiai Tanszék*

Budapest, 2013.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. A városi hősziget jelenség	4
2.1. Kialakító tényezők	6
2.2. Típusai.....	7
3. A városi energiamérleg	9
4. A városi vízmérleg.....	13
5. A városi levegőszennyezés és következményei.....	15
6. A meteorológiai paraméterek alakulása a városokban	18
6.1. Hőmérséklet.....	18
6.2. Szél.....	21
6.3. Csapadék	22
7. Budapesti felszíni meteorológiai mérések	25
7.1. A mérések helyszínei	25
7.2. A vizsgálat részletei	28
7.3. A mérőállomások adatainak feldolgozása (2011 és 2012 nyár).....	29
7.3.1. Területi és időbeli eloszlások	29
8. Összefoglalás	43
9. Irodalomjegyzék	45
10. Internetes források	48

1. Bevezetés

Földünk éghajlatát összetett, dinamikusan változó rendszerként kell értelmeznünk, hiszen a földi időskálát tekintve számos változáson ment keresztül. Ezeket a változásokat sokrétű folyamatok összegeként értelmezhetjük, hiszen a légkörben található gázok mennyisége, a kontinensek elhelyezkedése (lemeztektonika), csillagászati tényezők (excentricitás, precesszió), valamint egyéb folyamatok egyaránt fontos szerepet játszhatnak. A Föld kialakulása óta eltelt mintegy 4,6 milliárd évben az embernek igen kis szerep jutott, mégis annál nagyobb változást okozhat a bolygó arculatában. A kontinensek felszínének alakítása mellett a légkör összetételét, a nyomanyagok forgalmát is befolyásolja az emberi tevékenység. A 18. század végétől kezdődő ipari forradalmak révén (széntüzelés, fokozódó ipari termelés, szénhidrogénnel működő gépjárművek megjelenése, stb.) bizonyos légköri gázok (CO_2 , NO_x) és szilárd vagy cseppfolyós részecskék (aeroszolok) mennyisége jelentősen növekedett, amire az éghajlati rendszer érzékenynek bizonyult. Az antropogén folyamatok nemcsak globális, regionális, hanem lokális skálán is kifejtik hatásukat, ennek egyik megjelenése a városklíma. A nagyvárosok központi területei, valamint a külvárosi részek között hőmérséklet-különbség jöhet létre; a centrumban rendre magasabb értékek adódnak. Ennek a hőtöbbletnek a morfológiai sajátosságai okán a jelenséget városi hőszigetnek nevezték el.

Dolgozatom első felében a hősziget jelenség kialakulásának főbb okait, sajátosságait mutatom be. Fontosnak tartom áttekinteni a városok energia- és vízmérlegét, ami szerves részét képezi napjaink városklíma kutatásainak. E mesterséges környezet befolyásolja a meteorológiai állapotthatározók, a hőmérséklet, a szél, a csapadék és a sugárzási mérleg komponensek alakulását. A második részében a 2011-es és a 2012-es év nyarára vonatkozó adatok alapján tanulmányozom a városi hatásokat az OMSZ Kitaibel Pál utcai belvárosi mérőhelyének és a pestszentlőrinci Observatórium (12843) adatainak összevetésével. Eredeti célom a városi hősziget hatásainak kimutatása volt, de mint e két állomás példáján látni fogjuk, a lokális hatások gyakran komoly befolyással bírnak. Feldolgoztam az Országos Levegőtisztasági Mérés Hálózat (OLM) budapesti ózonadatait is. A vizsgálatok során a különböző meteorológiai paraméterek időbeli változásaira és a két év adataiban megfigyelhető különbségekre igyekszem következtetéseket levonni.

2. A városi hősziget jelenség

A városok mindig fontos szerepet töltek be civilizációnkban: közös, egységes lakóhelyként és élettérként jelentek meg. Már az ókori görögök is poliszokat (városállamokat) hoztak létre, amelyek a lakhatás mellett védelmet és megélhetést biztosítottak polgárainak. A városok számának növekedése, az urbanizáció a történelem folyamán több hullámban zajlott, mégis talán a leginkább a 18. század végétől vált jelentőssé. A folyamat napjainkban is meghatározó, ennek színterei az úgynevezett fejlődő országok, mint Kína és India. Míg a 1800-as évek elején a Föld lakosságának hozzávetőleg 3%-a, mára több mint a fele (~53%) él városi környezetben. Tekintve, hogy jelenleg a bolygó lakossága 7 milliárd felett van, így ez hozzávetőleg 3,5 milliárd fő! A jelenlegi legnagyobb lakosságú városi terület Tokió (37 millió fő), az első nem ázsiai város (8. hely) New York (21 millió fő), az első európai pedig Moszkva (16 millió fő) (15. hely). Magyarország fővárosa, Budapest (1,7 millió fő) a 264. helyen áll a világon, míg Európában a 20. (1. táblázat).

1. táblázat. A világ legnagyobb agglomerációi.

Forrás: *Demographia World Urban Areas: 9th Annual Edition (2013)*.

	Város	Ország	Lakosság (millió fő)
1.	Tokió	Japán	37,2
2.	Jakarta	Indonézia	26,7
3.	Szöul	Dél- Korea	22,9
4.	Újdelhi	India	22,8
5.	Sanghaj	Kína	21,8
6.	Manila	Fülöp-szigetek	21,2
7.	Karachi	Pakisztán	20,9
8.	New York	USA	20,7

A fenti adatok alapján is nyilvánvaló igénynek tűnhet a városok és szűkebb környezetük klimatológiai sajátosságainak vizsgálata.

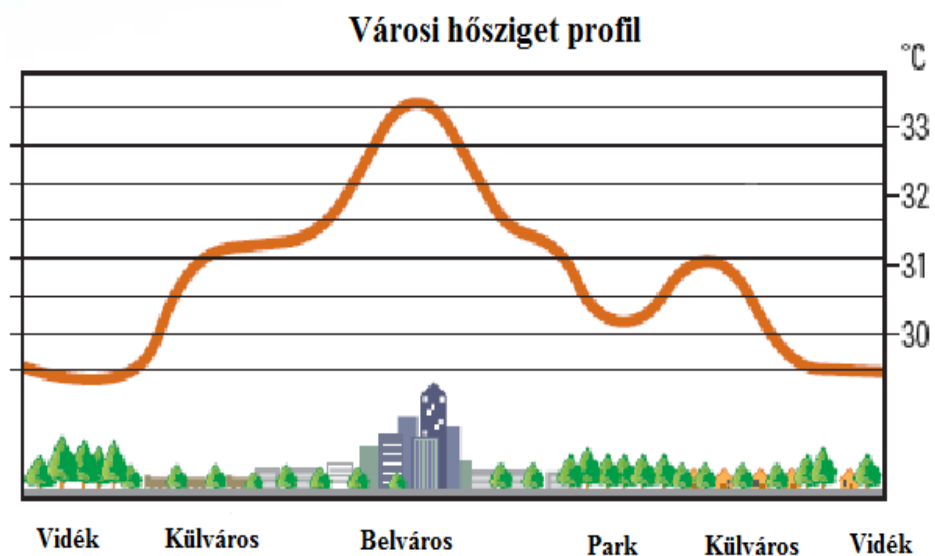
Az első városklímával foglalkozó mű Luke Howard tollából született meg *Climate of London* címmel. A két kötetből álló könyv első része 1818-ban, míg a második 1833-ban jelent meg. 1806 és 1830 között végzett méréseket Londonban, amelyeket összehasonlított a *Royal Society* eredményeivel. Tapasztalatai szerint a hőmérsékleti értékek eltértek a város különböző pontjain, ezt pedig a település változó szerkezetével, a lakosság növekedésével, valamint a széntüzelés fokozódásával magyarázta. Ezután egyre több hasonló témájú könyv íródott, közülük az egyik legátfogóbb a német Albert Kratzer (*Das Stadtklima*, 1956) munkája. Tanulmányában a városi klíma általános bemutatása után a levegő szennyezettségével foglalkozik (aeroszol részecskék, légköri nyomgázok). Kratzer könyvében kitér az energia és sugárzási mérlegekre – ezek a modern városklíma alapjai –, valamint az egyes meteorológiai elemek városbeli sajátosságait is tárgyalja. Az általa felvázolt problémák a következő évtizedekben intenzív kutatások alapjául szolgáltak. Howardéhoz hasonló címmel, majd 140 évvel később jelent meg Tony Chandler könyve (*The Climate of London*, 1965). Elődjének munkáját követve klasszikus tárgyalásmódban mutatja be az angol főváros éghajlatát.

A magyarországi városklíma-kutatás első jelentős alkotói Bacsó Nándor és Réthly Antal voltak (*Időjárás- éghajlat és Magyarország éghajlata*, 1938; *Budapest éghajlata*, 1947). Fontos megemlíteni Probáld Ferenc nevét is, aki könyvében (*Budapest városklímája*, 1974) több évtizedes mérési tapasztalatot foglal össze. Foglalkozik a főváros energiaháztartási viszonyaival, a különböző időjárási elemek (hőmérséklet, szél, csapadék, légnedvesség, látástávolság és köd) térbeli és időbeli alakulásával, valamint a levegőszennyeződés hatásaival. Az *ELTE Meteorológiai Tanszék* is végez vizsgálatokat a témával kapcsolatban (Bartholy et al., 2010), valamint a szegedi városklíma kutatások nemzetközileg is jelentősek (Unger és Gál, 2011).

A számítástechnika fejlődésével, az egyre finomabb felbontású műholdképek megjelenésével a városklíma kutatás is új eszközökkel bővült (pl. távérzékelés, numerikus modellezés). A cél, hogy minél pontosabb képet kapjunk a rohamosan növekvő városi környezet éghajlati viszonyairól.

2.1. Kialakító tényezők

A városklíma az emberi tevékenység révén megjelenő mezoklíma. Kialakulásának legfőbb oka a vidéki területektől, mint természetes környezettől való eltérés. A városok esetében a felszínt borító mesterséges anyagok (aszfalt, beton) merőben más fizikai tulajdonságokkal (albedó, hőkapacitás, hővezetés) bírnak, mint a talaj vagy a növényzettel rendelkező vidék. A nagyfokú beépítettség következtében a vegetáció mennyisége csekély, ami az evapotranszpirációs folyamatok hőmérséklet szabályozását csökkenti. Emellett a kevés növényzet a levegő oxigén utánpótlását is mérsékelheti. A települések funkciója is meghatározó tényező: egy ipari város esetében a légszennyezésből származó nyomgázok jelenléte, a korom révén megnövekedett aeroszol részecskék száma, a hőtöbblet egyaránt hatással lehetnek a helyi viszonyok alakulásában. A földrajzi elhelyezkedés is befolyásolhatja az éghajlatot: egy magasan fekvő város több csapadékot kaphat, vagy egy vízparton elhelyezkedő esetében a cirkulációs viszonyok lehetnek eltérőek a parti szél miatt. E folyamatok együttese vezet a városklíma kialakulásához, amelynek tipikus megjelenési formája a hősziget jelenség. Ez lényegében azt jelenti, hogy a városok központi területei és az őket határoló vidék között hőmérséklet-különbség alakul ki (Landsberg, 1981). A városban mért azonos hőmérsékleti értékeket összekötve (izotermák), majd ezt ábrázolva, jól kirajzolódik a szigetszerű alakzat. A felszínközeli hőmérséklet városi metszetét az 1. ábra illusztrálja, ami jól követi a település beépítettségét (Voogt, 2004).



1. ábra. A városi hősziget szemléltetése. Forrás: Voogt, 2007.

A városi hősziget intenzitásának (ΔT) megadására a városban (T_u) és a vidéki területeken (T_r) mért hőmérséklet-különbség szolgál, azaz:

$$\Delta T = T_u - T_r .$$

Az hősziget-intenzitás kedvező feltételek mellett (gyenge légáramlás, kevés felhőzet, valamint csapadékmentes időjárás) esetén a városmérettől függően meghaladhatja a 2–3 °C-t. Összességében elmondható, hogy az anticiklonális helyzet segíti a nagy hősziget-intenzitás kialakulását.

2.2. Típusai

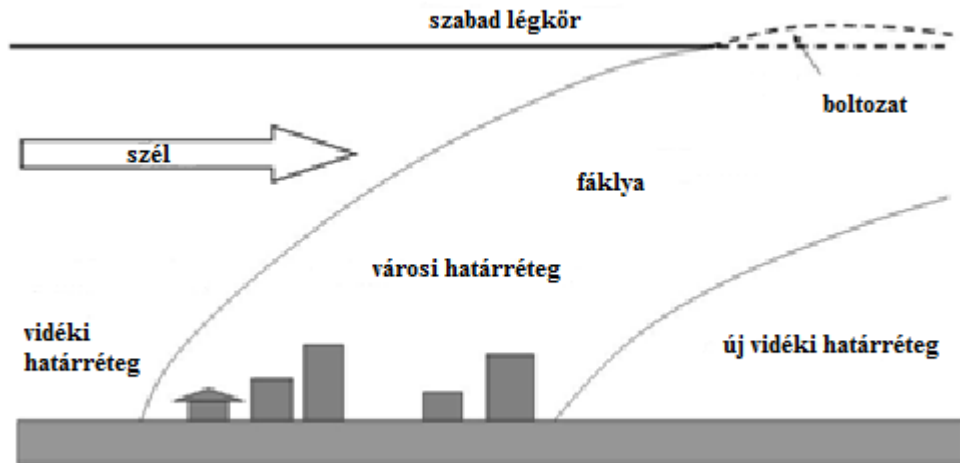
A hőszigetnek három típusát különböztetjük meg aszerint, hogy azok milyen magasságban fordulnak elő a városok felett (Oke, 1976). A mesterséges (vagy természetes) felszín mentén megjelenő hősziget (szakirodalomban: SUHI¹) az alsó pár centiméteres magasságban alakul ki. E szint mutatja a három közül a legnagyobb intenzitási értékeket. A nappali erős besugárzás hatása miatt ekkor alakul ki a városi és vidéki felszínek között a legnagyobb hőmérséklet-különbség, ami éjszaka is pozitív marad. Mérése távérzékelési módszerekkel, infravörös csatornán (pl. IR 10,8 μm) történik. A következő réteg közvetlenül a felszín felett található, körülbelül a fák lomb szintjéig terjedő CLUHI². Mind térben, mind időben a leginkább változó tulajdonságokkal rendelkezik. Intenzitásának maximuma napnyugta után pár órával mutatkozik, ugyanakkor a kora reggeli órákban előfordulhat, hogy negatív értékeink vannak, azaz a vidéki területeken magasabb a hőmérséklet, mint a város belsejében. E felett helyezkedik el a városi határréteg (BLUHI³). Térben ez is igen változó, hiszen maga a határréteg is rendelkezik napi, illetve évszakos menettel. Általánosan elmondhatjuk, hogy a határréteg nappal 1-2 km-es magasságig terjed, erős átkeverődés (turbulencia) jellemzi, míg éjszaka az inverzió miatt pár 100 méter vastag.

¹ SUHI: Surface Urban Heat Island (Felszíni városi hősziget)

² CLUHI: Canopy Layer Urban Heat Island (Tetőszinti városi hősziget)

³ BLUHI: Boundary Layer Urban Heat Island (Határréteg városi hősziget)

A városközpont felett keletkező hőtöbblet feláramlása során gyakran kupola alakzatot formál a határréteg, ami a szél hatására fáklya formájú is lehet (2. ábra).



2. ábra. A városi határréteg. Forrás: Emeis, 2011 (szerkesztve).

A nap folyamán szinte végig pozitív értékek jellemzik a városi hőszigetet, igaz, ez sokkal kisebb mértékű, mint éjszaka (Voogt, 2004). Az utóbbi két réteg mérése egyaránt in situ módszerekkel történhet: a CLUHI meteorológiai állomások hőmérséklet mérése során, a BLUHI pedig magassági (rádiószondás felszállás) adatok alapján határozható meg.

3. A városi energiamérleg

A klasszikus városklíma kutatások nélkülözhetetlen része az adott környezet energia és sugárzási viszonyainak ismerete, amit már a 20. század közepén felismertek (*Kratzer*, 1956; *Bacsó*, 1959). Földünk energiáját a Napból érkező elektromágneses sugárzás biztosítja. Ennek teljesítménye a légkör tetején (szoláris állandó) megközelítőleg 1367 W m^{-2} . A Föld felszínén, 1 m^2 -en a rendelkezésre álló mennyiség 341 W m^{-2} lenne, de a légköri visszaverődésből (79 W m^{-2}) és elnyelődésből (78 W m^{-2}) származó veszteségek miatt ez 184 W m^{-2} -es értékre redukálódik (*Trenberth et al.*, 2008). A napsugárzás spektrumának maximuma $0,5 \text{ }\mu\text{m}$ (látható tartomány). A sugárzási egyenleg (Q) alakja:

$$Q = K \downarrow + K \uparrow + I \downarrow + I \uparrow,$$

ahol

$K \downarrow$ a Napból érkező rövidhullámú (direkt és diffúz) sugárzás,

$K \uparrow$ a felszín által visszavert sugárzás,

$I \downarrow$ a felszín irányába érkező hosszúhullámú sugárzás (vagy égbolt sugárzás),

$I \uparrow$ a felszín hosszúhullámú kisugárzása.

A felszín energiaegyenlege a következő módon írható fel általános esetben:

$$Q = Q_H + Q_E + Q_G,$$

ahol

Q_H a szenzibilis hő,

Q_E a látens hő,

Q_G a talajba jutó hőáram.

Városi környezetben ugyanakkor nem tekinthetünk el az antropogén hatásoktól sem, amellyel az előző egyenlet az alábbiak szerint módosul (Oke, 1988):

$$Q + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_A + \Delta Q_S,$$

ahol

Q_F az antropogén folyamatokból származó hőáram,

ΔQ_A a mesterséges anyagok hőtárolása,

ΔQ_S pedig a hő advekciónakból származó tag.

A levegőbe jutó szennyeződések körülbelül 10%-kal csökkentik a $K_{\downarrow}$ mennyiségét (Oke, 1982). Pigeon et al. (2007) számításai alapján a Q_F évi átlagos értéke Toulouse (860 ezer lakos) esetében $40\text{--}45 \text{ W m}^{-2}$. Az emberi hőtermelés a települések központjában jelentős, az egyéb részeken elhanyagolható. A mérsékelt övi városoknál nagyobb télen, mint nyáron (Taha, 1997). A háztartásokból származó hőkibocsátás forrása télen a fűtés, nyáron pedig a légkondicionálók használata. Az ipar hőkibocsátását mutatta be Klysik és Fortuniak (1999) egy lengyelországi példán keresztül. Lódz városában januárban 66 W m^{-2} , míg júliusban 16 W m^{-2} ipari energiafelhasználás adódott. Ugyancsak Klysik (1996) mérte fel a közlekedés szerepét az antropogén hőkibocsátásban: ez az érték a nyári hónapokban 39%.

Mivel városi környezetben az albedó 5–10%-kal kisebb, így a $K_{\uparrow}$ is kevesebb (Oke, 1974). A hosszúhullámú sugárzás (I) eredendően nagyobb a településeken, de a veszteségek (elnyelődés, visszaverődés) miatt a vidéki területekéhez hasonlóvá válik. A látens hő a növényzet evapotranszpirációjából, valamint a felszínen megjelenő víz (csapadék) elpárolgásából adódik. Ez a nappali időszakban hangsúlyosabb, illetve azokban a városokban lényeges, amelyeket folyó szel át, ahol tavak vannak, vagy gyakori a csapadékhullás (pl. trópusi, vagy monszun éghajlat). A mesterséges anyagok alkotta felszín csökkenti az evaporáció mértékét, ez pedig azok hőmérsékletének emelkedéséhez vezet. Éjszaka a levegő rétegzettsége (a felszín sokkal melegebb, mint a felette lévő rétegek) következtében a betonban, bitumenben tárolódott hő szenzibilis hőként áramlik magasabb szintekre. A szenzibilis és a látens hő hányadosát a Bowen-arány (β) fejezi ki. Ennek tipikus értéke a városok sűrűn beépített területeire

1,5–2, a több növényzettel borított vidéki területeken 0,5–0,8, ugyanis itt a párolgás nagyobb.

2. táblázat. Az energiaegyenleg egyes komponenseinek nagysága.
Forrás: Oke, 1983; Unger, 2001.

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

Egy város beépítettségi foka és annak szerkezete is fontos tényező a sugárzási viszonyok vizsgálatánál. Ehhez első lépésben be kell vezetni a városi kanyon (UC^4) kifejezést. Ez nem más, mint két épület és a köztük lévő tér alkotta struktúra. Az UC jellemzésére használatos az AR^5 -t, ami két épület távolságának és azok magasságának arányát jelenti. A városi kanyon magasabb épületei nappal elnyelik a rövidhullámú sugárzást, valamint visszaverik a felszín által kibocsátott hosszuhullámú sugárzások egy részét. E folyamatok mérséklék a hőmérséklet csökkenését a késő esti órákban erősítve ezzel a hősziget intenzitását. Nappal a nyugat-kelet irányú kanyon sokkal több sugárzást kap, mint egy észak-déli, tehát jobban felmelegszik. Az árnyékos és a napsütötte városi kanyonok lokálisan nagy hőmérsékleti különbségeket eredményezhetnek. Ez a tényező tapasztalati összefüggések megállapítására is alkalmas:

$$\Delta T_{max} = 3,97 \cdot \ln\left(\frac{H}{W}\right) + 7,45 ,$$

ahol

H az épületek magassága,

W pedig a köztük lévő távolság.

Az Oke (1981) által felállított összefüggés tehát kimondja, hogy minél nagyobb az AR, annál erősebb a hősziget. A városi geometria másik mérőszáma az „égboltláthatósági” faktor (SVF^6), ami megadja, hogy az égboltra tekintve annak mekkora része látszódik.

⁴ UC: Urban Canyon (Városi kanyon)

⁵ AR: Aspect Ratio (Épületek távolságának és magasságának aránya)

⁶ SVF: Sky View Factor („Égboltláthatósági” faktor)

Az SVF ismeretében a következő empirikus formula adható meg az európai és észak-amerikai városok maximális hősziget intenzitására (Oke, 1981):

$$\Delta T_{max} = 15,27 - 13,88 \cdot SVF .$$

Az „égboltláthatósági” tényező 0 és 1 között változhat, így elméletileg a maximális intenzitás 15,27 °C és 1,39 °C között lehet. A külvárosi parkok szerepe felértékelődik az energetikai vizsgálatok alapján (itt SVF 1 körüli).

A növényzet jelenléte megváltoztatja az energiamérleg tagjainak alakulását. A nyári időszakban a parkokat gyakran locsolják, hogy a növényzet ne száradjon el. Ilyen környezetben a szenzibilis és a látens hőáram (Q_H és Q_E) mennyisége, és ezzel az összenergia is nő (oázishatás), ugyanakkor a Bowen-arány csökken (nő a párolgás). A magyarázat pedig a vegetáció kis albedója, a fokozott párolgás és a fák árnyékolása (Grimmond *et al.*, 1996).

4. A városi vízmérleg

Grimmond és Oke (1991) értelmezése szerint a városok vízmérlege a következőképpen adható meg:

$$p + I + F = E + r + \Delta A + \Delta S ,$$

ahol

p a csapadék,

I vezetékes vízkészlet,

F az egyéb emberi tevékenységek következtében megjelenő víz,

E az evaporáció,

r a lefolyással távozó víz,

ΔA a nedvesség időbeli változása (advekciónak),

ΔS a vízkészlet változása egy vizsgált periódus alatt.

Az egyenlet két oldalán megjelenő tagok nagyságrendi vizsgálatánál elmondhatjuk, hogy a bal oldali bevételi tagoknál a csapadék, illetve a kertek, parkok locsolásából származó víz tekinthető jelentősnek, a másik oldalon található kiadási (vagy veszteségi) tagok közül a párolgás, valamint a lefolyás jelentős. Az evaporációs folyamatok fontos szerepet játszanak környezetük hőmérsékletének alakulásában. A párolgáshoz hőfelvételre van szükség. A hőt a környezet adja a rendszernek, s ennek hatására a levegő (környezet) hőmérséklete csökken:

$$Q = L_v \cdot E ,$$

ahol

L_v a párolgási hő,

E a vízgőz turbulens árama.

A városok felszínének nagy részét olyan anyagok borítják, amelyek nem képesek a vizet áteresztetni. Ennek az a következménye, hogy egy nagy esőzés után a keletkező

vízmennyiség nem marad meg, hanem lefolyik a vízelvezető csatornába, ami csökkenti a párologni képes felület nagyságát, ez pedig a hűlési folyamatot mérsékli. Látható, hogy az evaporáció a természetes (vidéki) területekhez képest jóval kisebb mértékű, ami pedig elősegíti a hősziget megjelenését és fennmaradását.

5. A városi levegőszennyezés és következményei

A gépjárművek nagyobb számban történő megjelenése, az egyre nagyobb energiafelhasználás révén aeroszol részecskék és gáz halmazállapotú szennyezőanyagok kerülnek a légkörbe, megváltoztatva annak fizikai és kémiai sajátosságait. Egy felmérés alapján (*Blacksmith Institution*, 2011) a Föld 10 legszennyezettebb városa közül az első 4 Indiában és Kínában található, de 3 volt szovjet tagállam (Oroszország, Ukrajna, Azerbajdzsán) települése is felkerült a listára. Európa nagyvárosaiban, a $PM_{2,5}$ ($2,5\ \mu m$ -nél kisebb átmérőjű szilárd anyagok) koncentrációjának adatai ismeretében (*Páldy és Bobvos*, 2011) a legszennyezettebb város Bukarest, a második Budapest, a harmadik Ljubljana. A 25 vizsgált város közül Stockholm végzett az első helyen. Az egészségügyi világszervezet (WHO – World Health Organization) legutóbbi felmérésében adatokat tett közzé, amelyben a porszennyezettség miatt a 30 évesnél idősebb embereknél becsülték a várható élettartam csökkenését. Ez a román főváros esetében ez eléri a 2 évet, míg Budapesten az 1,5 évet (3. táblázat).

3. táblázat. A szállópor koncentrációja és az abból származó élethossz csökkenés Európában.

Forrás: *WHO's Air Quality Guideline*, 2011.

	Város	Ország	$PM_{2,5}$ ($\mu g\ m^{-3}$)	Élettartam csökkenés (hónap)
1.	Bukarest	Románia	38,2	22,1
2.	Budapest	Magyarország	33,7	19,3
3.	Ljubljana	Szlovénia	29,4	14,5
4.	Barcelona	Spanyolország	27,0	13,7
5.	Athén	Görögország	29,4	12,8
25.	Stockholm	Svédország	9,4	0

A budapesti légszennyezettség legjelentősebb forrása (4. táblázat) a közlekedés és az ipar (*Páldy és Bobvos*, 2011).

4. táblázat. A városi szennyezőanyagok forrásai Budapesten 2003-ban (tonna $év^{-1}$).

Forrás: *Páldy és Bobvos*, 2011.

Szennyezőanyag	Közlekedés	Fűtés	Ipar	Egyéb
SO_2	275	625	1647	60
NO_x	98227	2608	3344	1529
PM_{10}	1854	379	320	5

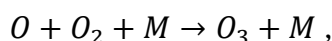
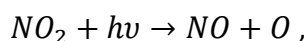
A légköri nyomanyagok mennyiségének (koncentrációjának) el kell érnie bizonyos szintet, hogy a levegőt szennyezettnek vagy erősen szennyezettnek tekintsük, ez pedig három fogalom megismeréséhez vezet. Abban az esetben, ha az adott anyag koncentrációja az egészségügyi határérték alatt van, akkor ez az emberi egészségre nem jelent kockázatot, a levegő minősége megfelelő. A koncentráció növekedésével, a tájékoztatási küszöbérték elérésével különösen az idősebb korosztály, illetve a fiatalabbak vannak veszélyben, a riasztási küszöbérték túllépésével pedig már az emberi szervezetre veszélyes mennyiség halmozódhat fel, fokozott intézkedésekre van szükség (OMSZ honlap – Levegőkörnyezet-védelem).

5. táblázat. A szennyezőanyagok egészségügyi szempontból kritikus értékei ($\mu\text{g m}^{-3}$).

Forrás: OMSZ honlap – Levegőkörnyezet-védelem.

Szennyezőanyag	Egészségügyi határérték	Tájékoztatási küszöbérték	Riasztási küszöbérték
Nitrogén-dioxid	100	350	400
Kén-dioxid	250	400	500
Ózon	–	180	240
PM ₁₀	50	75 ⁷	100 ⁸

Az ózon mind a troposzférában, mind a sztratoszférában egyaránt megtalálható. A városklíma kutatások szempontjából a troposzférikus ózon a meghatározó, amelynek a koncentrációja az elmúlt 50 évben jelentősen megnőtt, s napjainkra eléri átlagosan a 30 ppb-s ($\approx 60 \mu\text{g m}^{-3}$) szintet. Tudvalevő, hogy az ózon üvegházhatású gáz, ezért explicit módon közrejátszik az éghajlatváltozásban. Kialakulása a troposzférában elsődlegesen közlekedésből származó, úgynevezett prekursor anyagok (NO_x , CO, VOC⁹) napsugárzás hatására bekövetkező fotokémiai reakciójának az eredménye:



⁷ két egymást követő napon

⁸ két egymást követő napon és az OMSZ szerint nem várható javulás a következő napon sem

⁹ VOC: Volatile Organic Compound (Illékony Szerves Vegyület)

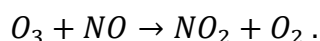
ahol

h a Planck-állandó ($6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s),

ν a sugárzás frekvenciája (s^{-1}),

M az egyéb reakcióban résztvevő anyag.

Az ózon napi menetére jellemző, hogy maximuma a kora délutáni órákra, minimuma pedig a reggeli csúcsforgalom idejére tehető. Utóbbinak az oka, hogy nyelői elsődlegesen kémia átalakulások:



A nyári anticiklonális helyzetekben – amikor erős a besugárzás és gyenge a levegő átkeveredése –, az ózon koncentrációja jelentősen megnőhet, ami kedvez a Los Angeles- típusú szmog kialakulásának. Az ilyen jellegű fotokémiai szmog fokozottan veszélyes az élő szervezetre, hiszen az ózon erősen mérgező és oxidatív. (Ugyanakkor hozzá kell tenni, hogy a Budapesten kialakuló nagy szennyezőanyag koncentrációjú helyzetek nem ilyen típusúak.) Az ózon reakciója során NO_2 is keletkezik, ami a szabad gyökei miatt igen reaktív, az ózonhoz hasonlóan üvegházhatású. Az átlagos városi koncentrációja $20\text{--}400 \mu g m^{-3}$ között alakul.

Amman et al. (*Health risks of ozone from long-range transboundary air pollution*, 2008) által végzett felmérés szerint az Európai Unió országokban évente 21 000 ember idő előtti halála köthető az ózonhoz. Nagy koncentrációban (ld.: 5. táblázat) köhögést, fejfájást okoz, irritálja a nyálkahártyát. Elsődlegesen a fiatalok, idősebbek és az asztmások a leginkább veszélyeztetettek. A növények fotoszintézisére és evapotranszpirációjára is negatív hatással van. Az előbb említett tanulmány az O_3 2020-ig bekövetkező alakulására is kitér: a modelleredmények szerint Európa nyugati és középső részei (beleértve hazánkat is) csökkenni fog azoknak a napoknak a száma, amikor a koncentráció meghaladja a $70 \mu g m^{-3}$ -es értéket. Nagy-Britannia, a Skandináv országok és Oroszország területén ez gyengén növekvő tendenciát fog mutatni. Egy másik tanulmány szerint (Koloszi-Komjáthy et al., 2011) az ózon száraz ülepedési sebessége csökkenni fog 2021–2100 között, ami viszont hosszabb távon az O_3 mennyiségének növekedését eredményezheti.

6. A meteorológiai paraméterek alakulása a városokban

6.1. Hőmérséklet

A hőmérséklet-különbség egy nagyobb város és a környező vidéki területek között nappal átlagosan kisebb, éjszaka nagyobb (akár 2 °C is lehet) (*Landsberg, 1981*). A hősziget-intenzitást (ΔT) nagymértékben meghatározza, hogy az adott település milyen szerkezetű, mennyire beépített, hány ember lakik ott és milyen tevékenységet végeznek. Los Angeles lakossága például 60 év alatt 2 millióról 3,8 millióra nőtt. Ez alatt minden évtizedben 1 °C-kal emelkedett az átlaghőmérséklete, fokozódott a hősziget intenzitása (*Voogt, 2004*). Viterito (1989) kimutatatta, hogy a Baltimore-Washington folyosó mentén elhelyezkedő városok és a vidék között átlagosan 2 °C különbség adódott az 1950 és 1979 között bekövetkezett népességnövekedés miatt.

Oke (1973) empirikus formulákat állított fel a lakosság száma (P) és a maximális hősziget intenzitás (ΔT) között Észak- Amerikára

$$\Delta T_{max} = 3,06 \cdot \log(P) - 6,79$$

és Európára

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

A standard hiba az első formulánál $\pm 0,7$ °C, a másodiknál pedig $\pm 0,9$ °C. Egy hollandiai tanulmány (*van Hove et al., 2011*) szerint az Európára vonatkozó formula az alábbiak szerint is megadható:

$$\Delta T_{max} = 2,93 \cdot \log(P) - 11,95 .$$

6. táblázat. A mért és az empirikus összefüggésekkel meghatározott ΔT_{max} .

Forrás: van Hove et al., 2011 (szerkesztve).

Város	Ország	Lakosság (millió fő)	Mérés (°C)	Oke formulájával becsült (°C)	van Hove formulájával becsült (°C)
Moszkva	Oroszország	11,5	9,8	10,1 (+3%)	8,7 (-11%)
Párizs	Franciaország	2,2	8	8,7 (+9%)	6,6 (-18%)
London	Anglia	8,2	8,6	9,8 (+14%)	8,3 (-3%)
Barcelona	Spanyolország	1,6	8,2	8,4 (+2%)	6,2 (-24%)
Róma	Olaszország	2,8	5	8,9 (+78%)	6,9 (+38%)
München	Németország	1,4	8,2	6,2 (-24%)	3,1 (-138%)
Szeged	Magyarország	170	2,6	6,5 (+150%)	3,4 °C (+36%)

A 6. táblázatban megjelenő európai és hazai példák is megerősítik, hogy a lakosság számának fontos szerepe van a jelenség vizsgálatánál.

Láttuk, hogy a nyugodt csendes időjárás jótékony hatással van a hősziget kialakulására és fejlődésére. Ugyanakkor a nagyobb szélsébség okán fellépő átkeverő hatás csökkentheti vagy akár meg is szüntetheti a hőmérséklet kontrasztot. Oke és Hannel (1970) nyomán számszerűsíthető az a szélsébség (v), amely mellett elmosódik a hőmérséklet-különbség a város és vidék között adott (P) népességszám mellett:

$$v = 3,41 \cdot \log(P) - 11,16.$$

A reláció szerint nagyobb lakosságú városokhoz (P) nagyobb kritikus szélsébség (v) tartozik. Ezt a megfontolást támasztja alá Klysik és Fortuniak (1999) is, akik szerint a hősziget következő formáit különböztetjük meg. A többcellás típus kialakulásához szélcsendes idő szükséges. Az egycellás forma pedig akkor jöhet létre, ha a szélsébség $2-4 \text{ m s}^{-1}$. Ennél nagyobb szelek nagyobb átkeverődést jelentenének, ami a hőmérséklet-kontraszt csökkenését okozza, ez pedig – különösen kisebb városoknál – a jelenség mérséklődéséhez vezet.

A városi hősziget-intenzitás napi és éves menettel rendelkezik. Éjszaka a legnagyobb az intenzitás, ugyanis a nappali órákban a mesterséges felszínben tárolódott hő ekkor kisugárzódik, ami akadályozza a léghőmérséklet csökkenését (Lopes *et al.*, 2001). A maximális hőmérséklet-különbség naplemente után pár órával következik be. Délelőtt viszont a vidéki részeket „korlátlan” napsugárzás éri, míg a kisebb beesési szög miatt a város belső részén elhelyezkedő magasabb épületek árnyékolása folyamán csökken a különbség, sőt esetenként negatív hősziget is kialakulhat, amelyet *cross-over* jelenségnek hívnak (Duckworth és Sandberg, 1954). A déli, kora délutáni időszakban (13–15 óra) a magasabb napállás következtében újra pozitív lesz a hősziget, majd délután ismét mérséklődés következik be (Probáld, 1974). Az évi menet kapcsán azt említhetjük, hogy a mérsékelt övben található városoknál a nyári, valamint a téli hónapok hangsúlyosak (Voogt, 2004). Isaev és Lokoschenko (2003) Moszkva területére végzett kutatásukban azt kapták, hogy a téli éjszakák a központi részekén sokkal melegebbek, mint a külvárosban. Továbbá azt is megállapították, hogy ez a különbség nyáron sokkal kisebb. Hasonló eredményre jutott Probáld (1974) Budapesten: 1965–67 között a Madách téren és Pestszentlőrincen végzett méréseket, amelyeket 7. táblázat foglal össze. Januárban és áprilisban adódtak a legnagyobb, illetve legkisebb különbségek. Az átmeneti évszakokban rendre kis értékeket kapott.

7. táblázat. A havi középhőmérséklet (°C) alakulása Budapesten 1965–1967 között.
Forrás: Probáld, 1974.

Hónap	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.
T (°C)	1,52	1,36	1,01	0,95	1,06	0,98	1,28	1,17	1,09	1,08	1,23	1,36

A nyári hősziget ugyanakkor sokkal hangsúlyosabb a városlakók szempontjából. Míg télen a jelenség a hidegebb időjárást enyhíti, ezzel csökkentve a fűtésszámlát, addig nyáron fokozza a meleget. További problémát jelent nyáron, hogy a hőhullámok során a városban még kevésbé tud lehűlni éjszaka a levegő, és ilyenkor a jól megszokott szellőztetés sem jelent felüdülést. A kutatások (Bartholy *et al.*, 2007; Trenberth *et al.*, 2012) szerint ezeknek a száma, illetve időtartama is növekedni fog. Leginkább az idősebb korosztály veszélyeztetett, akiknek gyakran egyedül, segítség nélkül kell átvészelniük ezt a nehéz időszakot. A hőhullámok jelentőségét emeli ki, hogy 2003-ban Franciaország területén az augusztusban bekövetkező forró periódus alatt 14 802 ember

halt meg, ami az átlagosnál 60%-kal magasabb (Kovats és Ebi, 2006). Kovács (2012) szakdolgozatában a budapesti humán komfort viszonyokat vizsgálva megállapította, hogy az 1981–2010 közötti periódusra kiszámított PET bioklíma index értékei a belvárosra 34,6 °C, a külvárosra pedig 30,8 °C (12 UTC), ami meleg hőérzetet és közepesen meleg stressz hatást jelent.

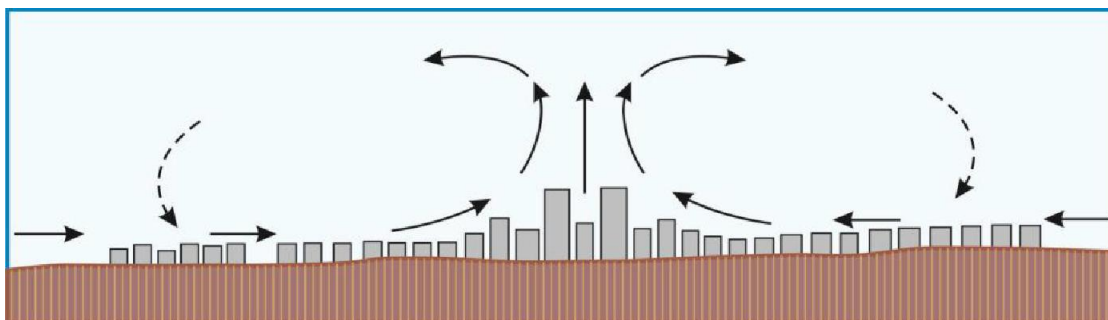
Egy meleg nyári napon a folyópart és egy árnyékos park nyújthat menedéket, így egyre fontosabb a városi parkok és zöldfelületek szerepe. Egy svéd tanulmány szerint (Upmanis et al., 1998) a parkok hűvösebbek, mint a környezetük. Göteborgban 3 helyen végzett autós és szenzoros mérés alapján a maximális hősziget értékek naplemente után pár órával adódtak, a mérési időszak alatt meghatározott legnagyobb különbség a park és a mellette lévő beépített terület között 5,9 °C volt. Megemlítik ugyanakkor, hogy a hatás függ a zöld felület méretétől, városbeli elhelyezkedésétől, szélesebségtől, felhőzet mennyiségétől is. Taha (1997) szerint a zöldterület növelésével és ezzel együtt az albedó növelésével a települések átlagos hőmérséklete 2 °C-kal is csökkenthető lenne.

6.2. Szél

A városi szélviszonyok több szempontból is különböznek az egyéb területekkel való összehasonlításban. A sűrűn beépített településeket az épületekből származó nagyfokú érdeesség jellemzi. Ez a súrlódás révén a szélesebség csökkenéséhez vezet, így a városi szélesebség a kisebb értékek felé tolódik a vidékihez képest. Több kutatásban is megjelenik (Bornstein és Johnson 1976, Siedlecki, 2003) az úgynevezett kritikus szélesebség fogalma, amely érték alatt a vidék felől a város irányába áramló szél felgyorsul, valamint ennél nagyobb sebességeknél lelassul. Ez New Yorkban nappal 3 m s⁻¹, éjszaka 4 m s⁻¹, illetve Lódzban (Lengyelország) 1,1–1,7 m s⁻¹ volt. Nagyobb értékek esetén a hősziget–intenzitás is csökken, hiszen ekkor az átkeverő hatás miatt a hőmérséklet jobban homogenizálódhat.

A városok saját cirkulációs viszonyokkal bírnak (UC¹⁰), függetlenül a nagyobb skálájú szélviszonyoktól (3. ábra).

¹⁰ UC: Urban Circulation (Városi cirkuláció)



3. ábra. A városi cirkuláció sematikus képe. Forrás: Emeis, 2011.

A városi cirkuláció a fő hajtóereje a hőmérséklet-különbség miatti horizontális nyomási gradiens, ami a hűvösebb, sűrűbb vidéki levegőnek a városközpont irányába történő advekcióját jelenti, és ez a belső területek hűléséhez, levegőjének tisztulásához vezet. A városközpontban a meleg levegő feláramlik, és a magasban egy kompenzációs áramlás következik be. Az UC időben más-más karakterisztikákkal rendelkezik. Míg nappal a feláramlás és a cirkuláció ellenára a tetőszint felett következik be, addig éjszaka ez a felszínen megy végbe. A folyamat este a legerősebb, ugyanis ekkor maximális a hőmérséklet-különbség. Az UC „hatásfokát” növelik a ventilációs (átszellőzési) folyosók, amelyek akadálymentes beáramlást biztosítanak a centrumba a hűvös, tiszta vidéki levegőnek. Ilyen folyosó lehet például Budapest esetében a Duna (általánosan a folyók) vagy a város nyílegyenes sugárútjai. A városi levegő minősége a széliránytól is függ, hiszen a főváros egyes kerületeinek (IX., X) erősen szennyezett levegője dél- délkeleti áramlás mellett az eredendően tisztább budai részek felé áramlik, ezzel kiegyenlítve a város feletti szennyezőanyagok koncentrációjának térbeli eloszlását (Probáld, 1974).

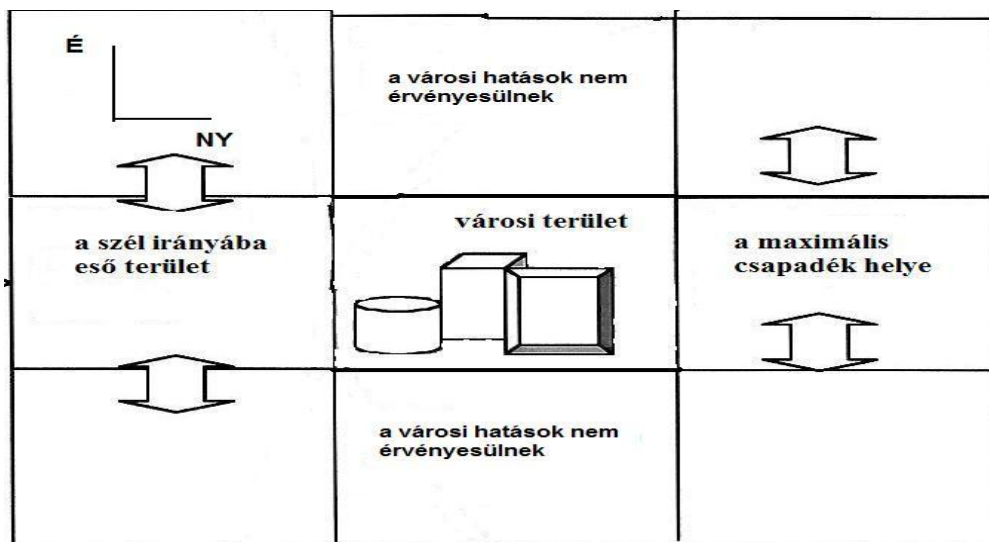
6.3. Csapadék

A csapadékviszonyok vizsgálata a sűrűn lakott településeknél is különösen fontos, hiszen a vízmérleg egyik bevételi tagja. Biztosítja a növényzet számára szükséges vizet,

a párolgás révén csökkenti a felszín, s így a levegő hőmérsékletét, ugyanakkor, mint láttuk, a csapadék nagy része a mesterséges felszíneken elfolyik a csatornarendszerbe. A lehulló vízmennyiséget elsősorban a földrajzi elhelyezkedés (domborzati viszonyok, éghajlat), időjárási helyzet határozza meg.

A városok levegője hozzávetőleg két nagyságrenddel több aeroszol részecskét tartalmaz (Oke, 1993) mint a háttérlevegő, ami a csapadék lokális növekedését vezethet. Másrészt a megnövekedett aeroszol nagyobb számú, de kisebb méretű felhőcsepp kialakulásához vezet, ami összességében csökkentheti a csapadék tevékenységet (Halfon et al., 2009), tehát a kondenzációs magok számának a növekedése nem okoz automatikusan nagyobb csapadékot.

Az UC során a meleg levegő feláramlása (konvergenciája) történik meg, ami kedvez a konvektív események (záporok, zivatarok) létrejöttének. Ankarában az 1956–2001 között vizsgálták a melegebb hónapok (májustól szeptemberig) csapadékviszonyait (Cicek és Turkoglu, 2005). Azt találták, hogy a török fővárosban 50%-kal több csapadék esett, mint a környezetében. A heti menetet illetően kimutatták, hogy a hétköznapokon több csapadék hullik. Ez egy általánosnak mondható jelenség, amely abból adódhat, hogy hétfőtől péntekig a közlekedésből származó aeroszol részecskék mennyisége is nagyobb. Bornstein és Lin (2000) az atlantai olimpia (1996) évében július 26. és augusztus 3. közötti időszakban kialakuló heves esőzések okát vizsgálta. A szélmező vizsgálatának elvégzése után azt állapították meg, hogy Atlanta gyenge hőszigete mellett bekövetkező konvergencia felelős az eseményekért, amelyek többnyire a kora délutáni órákra estek. Shepherd et al. (2001) 1998–2000 között öt amerikai nagyvárosban (Atlanta, Montgomery, Nashville, San Antonio, Waco, Dallas) elemezték a csapadékmező szerkezetét radaros csapadékmérések és szélmező ismeretében a májustól októberig terjedő időszakban. A városokat és környezetüket először egy széliránnyal megegyező és egy vele ellentétes szektorra (50×50 km) osztották fel, majd további hat területet határoztak meg (a hetedik maga a város). Az utóbbi hatban a városi hatások nem módosítottak jelentősen a mérési eredményeiken. A centrumtól a város széléig terjedő külső szektorban (értsd másképp: lee oldal) a csapadék mennyisége átlagosan 6%-kal magasabb volt (4.ábra).



4. ábra. A városi környezet szektorokra történő felosztása.
 Forrás: *Shepherd et al.*, 2011 (szerkesztve).

Budapest esetében az orográfia okozza a legnagyobb eltéréseket. Probáld (1974) 14 évet felölelő adatsorból (1956–70) a csapadékmennyiség 6%-os növekedését mutatta a központi Fővárosi Tanács (570 mm) és a külvárosi Pestszentlőrinci Obszervatórium (537 mm) között, igaz, a közlekedésből adódó kondenzációs magvak szerepe akkoriban elhanyagolható volt.

7. Budapesti felszíni meteorológiai mérések

7.1. A mérések helyszínei

A szakdolgozatomban felhasznált adatok az *Országos Meteorológia Szolgálat* méréseiből származnak. Az adatokat a következőképpen lehet kategorizálni:

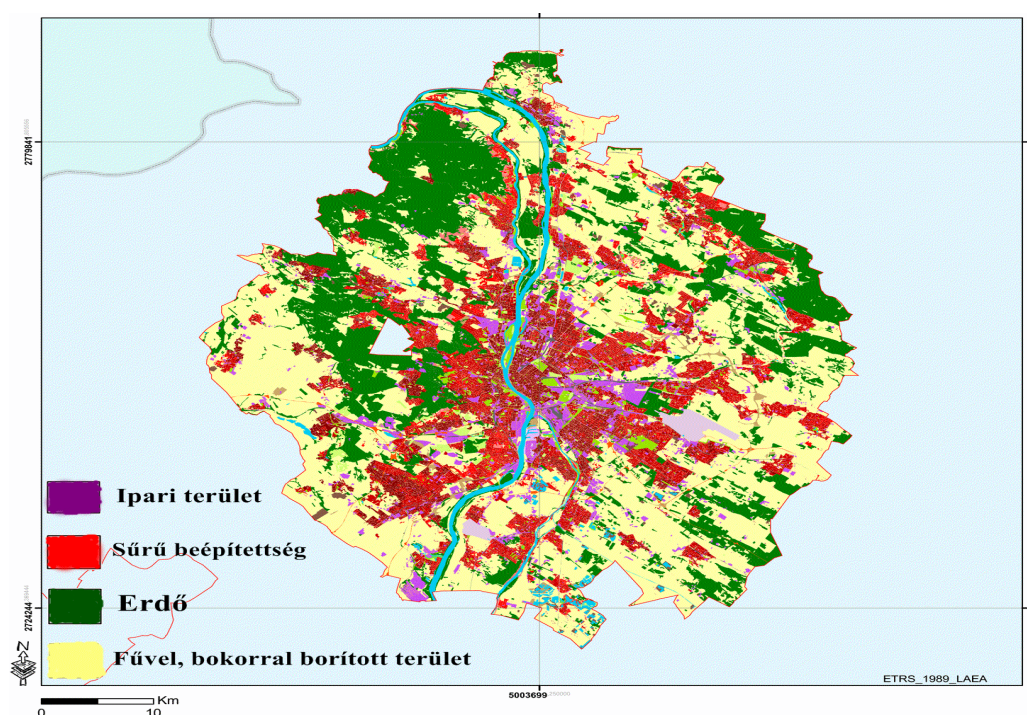
- felszíni mérések: hőmérséklet, relatív nedvesség, szélirány, szélesebség,
- ózonkoncentráció mérések az OLM (Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat) budapesti állomásairól

A hősziget jelenség vizsgálatához mindenképpen olyan mérési területeket kellett választani, amelyek között jól megmutatkozik az egyes meteorológiai paraméterek eltérése. E szempontok miatt a pestszentlőrinci Obszervatórium és az OMSZ Kitaibel Pál utcai állomásának adatait használtam fel. Látjuk majd a vizsgálatok során, hogy ezt a „feltételt” a két állomás csak részben teljesíti. A Budán található Kitaibel Pál utcai (II. kerület) mérőhely a városközponti, míg a pestszentlőrinci Obszervatórium (XVIII. kerület) a külvárosi viszonyokat szemlélteti. Fontos szempont volt, hogy mindkét mérőhely azonos tengerszint feletti magasságban helyezkedjen el, ugyanis a főváros esetében a legfontosabb tényező a Budai-hegység. Ez teljesül is: a budai 153 m-es tengerszint feletti magasságban, míg a pesti mérőhely 139 m-en van. További lényeges szempont az állomások környezete (pl.: beépítettség, albedó, érdesség, rendelkezésre álló nedvesség, vegetáció). A különböző városi felszínek sajátosságait a 8. táblázat foglalja össze.

8. táblázat. A felszíntípusok tulajdonságainak alakulása. Forrás: Sailor, 1994.

Felszín típus	Albedó	Érdességi magasság (m)	Rendelkezésre álló nedvesség ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	Antropogén hő (W m^{-2})
Sűrűn beépített lakóterület	0,16	0,35	0,05	20,0
Ritkábban elhelyezkedő házak	0,15	0,30	0,08	10,0
Városközpont	0,14	1,25	0,03	40,0
Ipari terület	0,12	0,60	0,05	60,0
Park	0,20	0,15	0,25	0,0
Mezőgazdasági terület	0,20	0,10	0,30	0,0

A belvárosi állomásnál meg kell jegyezni, hogy a mérések az OMSZ épületének a felső szintjén folytak (25,7 m-en), tehát a tetőtér feletti réteg viszonyait tükrözik, ami megjelenik majd a magasabb szélességeken és a délutáni, esti – az utcaszintnél – alacsonyabb hőmérsékletekben. A *European Environmental Agency* által 2010-ben kiadott városi atlaszban Budapest felszínborítottsági viszonyai is szerepelnek (4.ábra). Ez alapján az OMSZ Kitaibel Pál utcai mérőhelye sűrűn beépített, míg a pestszentlőrinci Obszervatórium ritkán beépített területen, zöld környezetben található.



4. ábra. Budapest beépítettségi viszonyai.
Forrás: *European Environmental Agency*, 2010 (szerkesztve).

A mérési helyszínek elhelyezkedését azért kell fokozottan kiemelni, mivel több szempontból is befolyásolják a „mintavételezés” hitelességét. Stewart és Oke (2009) Nagano (Japán) példáján elkészítették a városok „helyi klímazónáit”. Ez azért lényeges, mert így könnyebb értelmezni a lokális viszonyok okozta eltéréseket. 11 kategóriát határoztak meg, amelyekre megadták a különböző (városi) karakterisztikák (pl.: SVF, AR, jellemző épületmagasság, albedó, antropogén hőáram) értékeit. Ez alapján a Kitaibel Pál utcát a sűrűn beépített, közép magas épületekkel (10–25 m) körülvett helyszíneként lehet leírni. Széles utcákkal, közepes vagy erős forgalommal, kevés növényzettel és sok mesterséges felszínnel (járda) definiálják ezt a típust. A

pestszentlőrinci helyszín a ritkábban lakott kategóriába kerülhet, amit közepes vagy kisméretű épületekkel (3–10 m), alacsony forgalommal és parkokkal, sok zöld felülettel jellemeztek. A mérések szempontjából nélkülözhetetlen tényezőket a két mérőállomásra a 9. táblázat szemlélteti.

9. táblázat. A Kitaibel Pál utcai és pestszentlőrinci mérőállomások környezetének néhány sajátossága Stewart és Oke (2009) nyomán.

Helyszín	Albedó	Átlagos épületmagasság	SVF	AR	Antropogén hőáram
Kitaibel Pál utca	0,1–0,2	10–25 m	0,3–0,6	0,75–2	$< 75 \text{ W m}^{-2}$
Pestszentlőrinc	0,1–0,25	3–10 m	$< 0,5$	0,1–0,25	$< 10 \text{ W m}^{-2}$

Az O_3 koncentráció elemzéséhez több budapesti állomás adatait használtam. Közöttük belvárosi (Széna tér, Kosztolányi tér, Teleki tér) és külvárosi (Budatétény, Pesthidegkút, Káposztásmegyer, Kőrakás park, Csepel, Gilice tér) mérőhelyek egyaránt vannak (5. ábra). A vizsgált időszakban (2011 és 2012 nyara) rendelkezésre álltak (helyenként hiányosan) az órás mérési adatok minden OLM állomásról. A légszennyezettségi mérőhálózatot az Országos Meteorológiai Szolgálat egységeként a Levegőtisztaság-védelmi Referencia Központ működteti (OML honlap – Információk). A fővárosban összesen 12 állomás van: a fent felsoroltak mellett az Erzsébet téren (V. kerület) és a Gergely utcában (X. kerület) is mérnek. Az adatgyűjtés során az O_3 , NO_x , CO, SO_2 , PM_{10} koncentrációjának meghatározása történik.

A pestszentlőrinci és Kitaibel Pál utcai OMSZ mérőállomás adatai is órás felbontásban álltak rendelkezésemre. E két meteorológiai helyszín a Széna téri és a Gilice téri levegőszennyezettségi mérőpontok közelében helyezkedik el (5. ábra).



5. ábra. A vizsgálatban felhasznált meteorológiai és légszennyezettségi mérőhelyek (Wikimédia – internetes forrás).

7.2. A vizsgálat részletei

A városi hősziget intenzitása a téli és nyári hónapokban a legnagyobb, az átmeneti évszakokban a szerepe kevésbé hangsúlyos. Láttuk, hogy élettani szempontokból a nyári periódus a veszélyesebb, gondoljunk csak a fotokémiai reakciókból származó ózonra vagy a nyári hőhullámokra. Ezek figyelembe vételével a 2011-es és a 2012-es év nyári (június-augusztus) adatai alapján mutatom be a budapesti városklíma néhány sajátosságát. Az elmúlt 112 év tekintetében (1901-től napjainkig) a 2011-es volt a 16., míg a 2012-es a 2(!) legmelegebb nyár. A lehullott csapadék alapján a 2011-es év átlagos csapadékú nyár (2%-kal tért el a sokéves átlagtól), míg a 2012-es év jóval szárazabb volt (32%-os eltérés a sokéves átlagtól). Két különböző csapadékú, meleg nyarat elemzek (10. táblázat).

10. táblázat. A 2011-2012- es évek nyarának hőmérsékleti és csapadékbeli sajátosságai (zárójelben az elmúlt 30 év (1981–2010) átlagától vett eltérés %-ban)

Forrás: OMSZ honlap- Éghajlati visszatekintő.

Év	Nyári nap ($T_{max} \geq 25\text{ °C}$)	Hőségnap ($T_{max} \geq 30\text{ °C}$)	Forró nap ($T_{max} \geq 35\text{ °C}$)	Csapadékos nap ($P \geq 0,1\text{ mm}$)
2011	62 (+6)	25 (–7)	4 (+3)	33 (+4)
2012	73 (+17)	42 (+24)	13 (+12)	24 (–4)

T_{max} – napi maximális hőmérséklet, P – napi csapadékösszeg

Elsőként az egyes meteorológiai elemek (hőmérséklet, csapadék, szélirány, szélsébség) és az O_3 koncentráció időbeli változását, valamint a sokéves átlaghoz való viszonyulását vizsgálom. Ezután foglalkozom az ózon mennyiségének kilenc állomásra vonatkozó térbeli alakulásával. Akbari et al. (1990) kimutatták, hogy az O_3 és a hőmérséklet változása szoros összefüggést mutat a városokban, így ezt Budapestre is ellenőrzöm. Ezt követően összehasonlítom a különböző meteorológiai elemek belvárosi (OMSZ, Kitaibel Pát utcai mérőhely) és külvárosi (pestszentlőrinci szinoptikus állomás) értékeit

7.3. A mérőállomások adatainak feldolgozása (2011 és 2012 nyár)

7.3.1. Területi és időbeli eloszlások

Elsőként a hőmérsékleti adatokkal foglalkozom. A belvárosi (A – OMSZ, Kitaibel Pál utca) és a külvárosi állomás (B – Pestszentlőrinc) összehasonlítását a 11. táblázat mutatja. Az eredmények alátámasztják a szakirodalomban foglaltakat, miszerint a városok központja általában melegebb, mint az azokat határoló külvárosok (Landsberg, 1981). Látható tehát, hogy az OMSZ Kitaibel Pál utcai mérőhelyén közel 0,6 °C-kal nagyobb értéket mértek, mint Pestszentlőrincen. A legnagyobb eltérés júniusban, míg a legkisebb júliusban adódott.

11. táblázat. A havi átlaghőmérsékletek (°C) alakulása a belvárosi (A – OMSZ, Kitaibel Pál utca) és külvárosi (B – Pestszentlőrinc) mérőhelyen 2011 és 2012 nyarán.

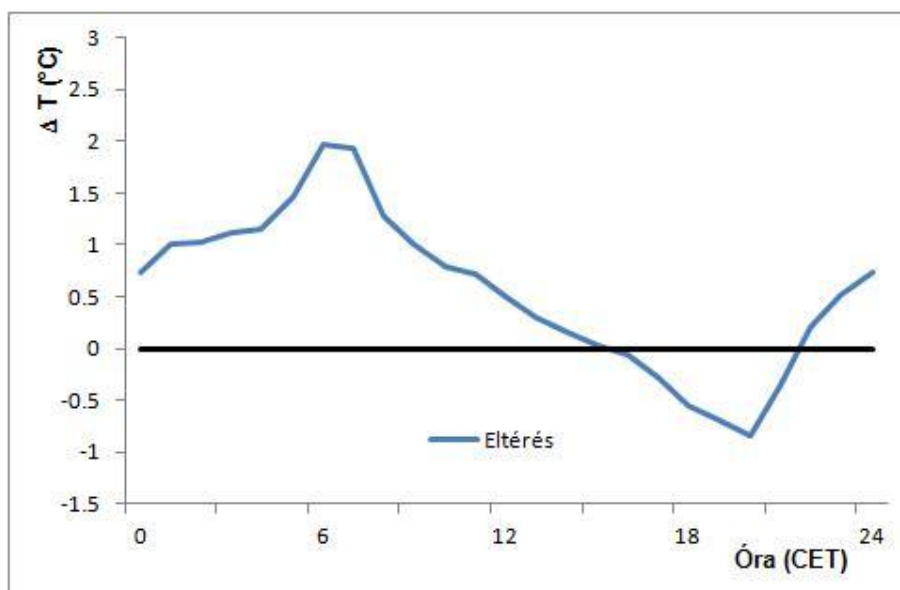
Mérőhely/hónap	VI.	VII.	VIII.	Összesen
A	22,7	23,9	24,7	23,8
B	22,0	23,5	24,2	23,2
A-B	0,7	0,4	0,5	0,6

A közel 2 °C-kal melegebb 2012 nyarán az eltérés nagyobb volt, mint 2011. azonos időszakában (12. táblázat). Az átlagos hőmérsékletben megjelenő különbség azonban az előzetes várakozásainknál kisebb. Az ok a Kitaibel Pál utcai mérőhely elhelyezkedése: a hőmérséklet mérés az épület tetején történik, ahol már a tetőtér feletti áramlás hatása érvényesül, ami az utcaszintnél alacsonyabb hőmérsékleteket ad, különösen a délutáni és az esti órákban. A dolgozat rávilágít ennek a speciális tetőtéri mikroklímának néhány sajátosságára is. Ez magyarázza a várt (tankönyvi) menetekről vett eltéréseket.

12. táblázat. A 2011-es, illetve a 2012-es év nyári hónapjainak átlaghőmérséklete (°C) a belvárosi (A – OMSZ, Kitaibel Pál utca) és külvárosi (B – Pestszentlőrinc) mérőhelyen.

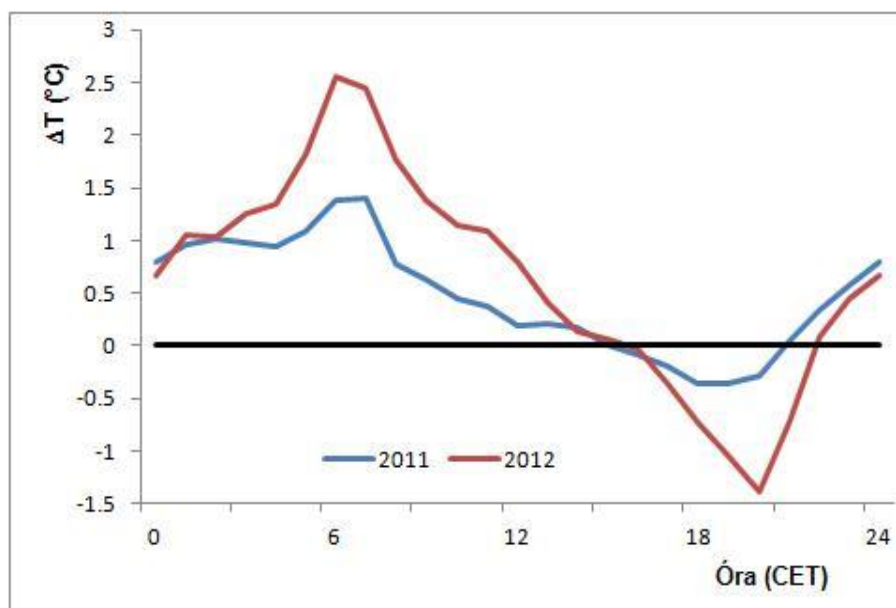
Mérőhely/hónap	VI.	VII.	VIII.	Összesen
A ₂₀₁₁	22,1	22,1	24,0	22,8
A ₂₀₁₂	23,3	25,7	25,4	24,8
B ₂₀₁₁	21,4	21,7	23,7	22,3
B ₂₀₁₂	22,6	25,2	24,7	24,2
(A–B) ₂₀₁₁	0,7	0,4	0,3	0,5
(A–B) ₂₀₁₂	0,7	0,5	0,7	0,6

A két év hat hónapja során 35 olyan nap volt a 184-ből (19%), amikor a külvárosi mérőhelyen magasabb volt a napi középhőmérséklet. A belvárosi és a külvárosi hőmérséklet-különbség átlagos napi meneténél egy maximum és egy minimum figyelhető meg (6. ábra). A legnagyobb különbségek kora reggel (6–7) alakulnak ki, ami a különböző felszínborítottság miatti eltérő éjszakai hűlési sebességgel magyarázható. Ez egyezik a városi hőszigettről alkotott képpel. Érdekes, hogy 17–22 óra között a két állomás összehasonlítása során negatív hőmérséklet-különbséget látunk. Ez a tetőszint feletti eleve hűvösebb levegővel és az este kialakuló stabil határréteggel magyarázható.



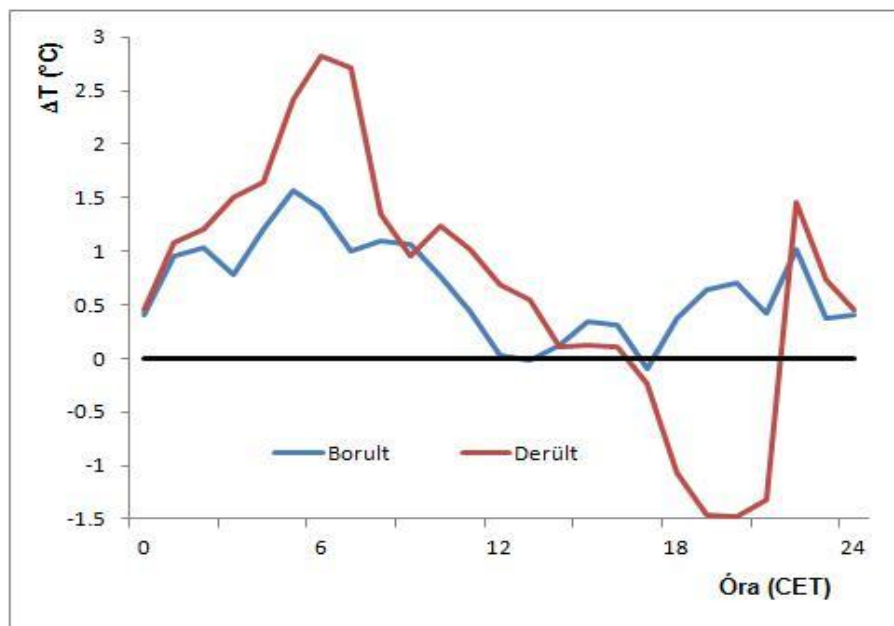
6. ábra. Az átlagos napi menet során jelentkező hőmérséklet-különbség a belvárosi (OMSZ, Kitaibel Pál utca) és a külvárosi (Pestszentlőrinc) mérőhely között 2011 és 2012 nyarán.

Az átlagos 2011-es, valamint az átlagnál jóval magasabb hőmérsékletű 2012-es nyár számos eltérést mutat a két állomás (OMSZ, Kitaibel Pál utca, Pestszentlőrinc) hőmérséklet-különbségének napi menetében. A két görbe jellege természetesen hasonló (7. ábra), ugyanakkor a 2012-ben a maximum és a minimum is markánsabban jelenik meg. A két állomás közötti legnagyobb eltérés 7,7 °C volt 2011. július 30-án 14 órakor, míg a legnagyobb negatív értéket 2012. augusztus 8-án 17 órakor mérték, ami –9,8 °C volt. A legvalószínűbb ok mindkét esetben a felhőzet eltérő mennyisége lehetett.



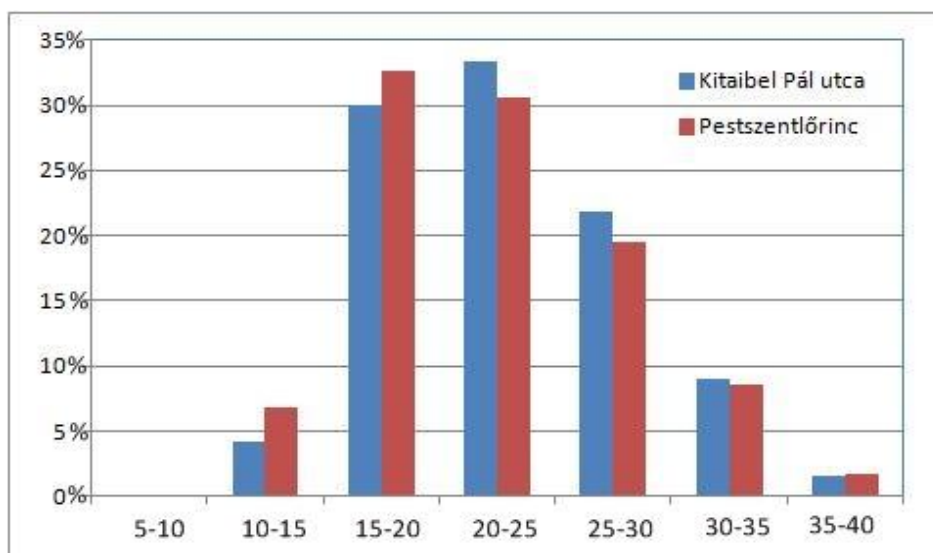
7. ábra. 2011, valamint 2012 nyarán az átlagos napi menetben kialakuló hőmérséklet-különbség a belvárosi (OMSZ, Kitaibel Pál utca) és külvárosi (Pestszentlőrinc) mérőhely között.

Eddig olyan napi meneteket tekintettem, amelyek tetszőleges időjárású napok lehettek, ugyanakkor meg kell vizsgálni azokat az esetet is, amikor nyugodt, derült vagy csapadékos meteorológiai helyzet volt. 2012. július 1. és 9. között Budapesten egy rövid zápor kivételével csapadégmentes, nyugodt idő volt, a napsütéses órák száma minden nap 13 óra felett adódott. 2011. július 20. és 29. között csapadékos időjárás uralkodott. A napfénytartam egyik napon sem haladta meg az 5 órát. (OMSZ honlap – *Napijelentés kiadvány*) E két időszakra elkészített átlagos napi hőmérsékleti menetet a 8. ábra szemlélteti. A derült időszak jól követi a már látott, két szélsőértékkel rendelkező menetet (6–7. ábra). Ismét meg kell említeni a tetőtér felett kialakuló esti stabil határréteg szerepét, ami a hőmérséklet csökkenésében jelentkezik az esti, kora éjszakai órákban. Ezzel szemben borult, csapadékos időjárású helyzetben teljesen eltűnik a késő délutáni minimum, ami azzal magyarázható, hogy az erős felhőzettség miatt a besugárzás gyenge, így az árnyékoló hatás sem tud kiteljesedni. A másik észrevétel, hogy a borús periódusban a napi menet sokkal kiegyensúlyozottabb, nem jelennek meg ingadozások.



8. ábra. Derült és borult időszakok során kialakuló hőmérséklet-különbség a belvárosi (OMSZ, Kitaibel Pál utca) és a külvárosi (Pestszentlőrinc) mérőhelyen 2011–2012 között.

A következő lépésben tekintsük az órás hőmérsékleti eloszlásokat a két nyár összes adatának bevonásával (9. ábra). Az órás hőmérsékletek eloszlásánál láthatjuk, hogy a magasabb értékeknél (20 °C felett) a belvárosi mérőhely kerül kismértékű többségbe (9%), a két szélső kategóriába (10–15 °C és 35–40 °C) mindkét helyszínnél közel megegyező számú eset került (0,1% az alsó és 0,2% a felső kategóriában). A Kitaibel Pál utcánál a 20–25 °C (33,3%), míg Pestszentlőrincnél a 15–20 °C (32,6%) közötti hőmérsékletek voltak a leggyakoribbak.



9. ábra. A hőmérséklet órás adatainak gyakorisága a belvárosi (Kitaibel Pál utca) és külvárosi (Pestszentlőrinc) mérőhely tekintetében 2011 és 2012 nyarán.

Az ózon az egyik meghatározó városi légszennyező. A prekursor anyagok fotokémiai reakciói során keletkező ózon oxidatív gáz, nagyobb mennyiségben (lásd: 5. táblázat) káros lehet az élő szervezetekre, így igen fontosnak tartom a városbeli alakulásának áttekintését. Ismert, hogy az O_3 koncentrációja és a hőmérséklet szoros összefüggésben van egymással, hiszen erősebb besugárzás erőteljesebb fotokémiai reakciókat, nagyobb mennyiségű ózont és magasabb hőmérsékletet eredményez. A rendelkezésemre álló kilenc mérőhely 2011–2012 nyarára vonatkozó átlagos koncentrációit a 13. táblázat foglalja össze.

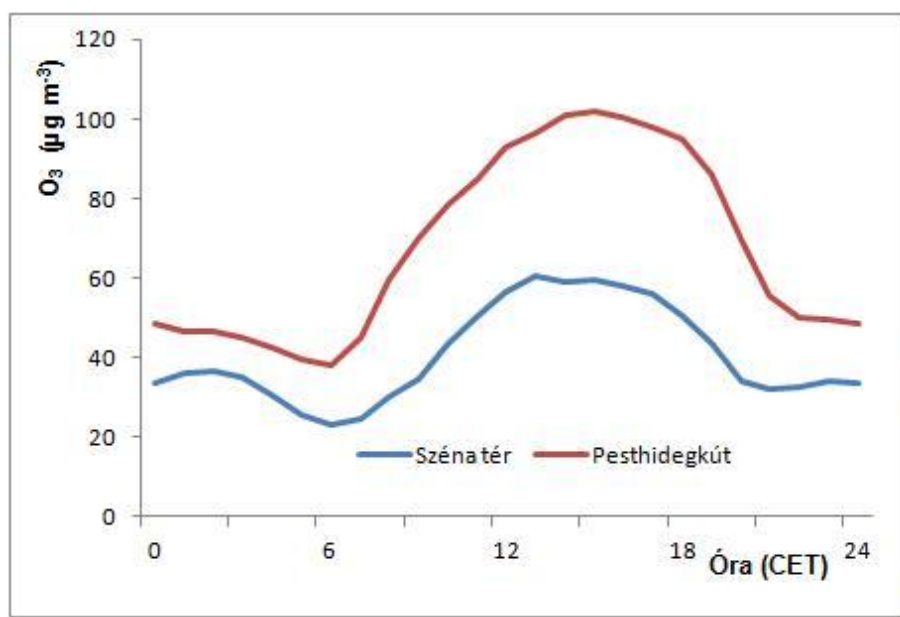
13. táblázat. 2011–2012 nyarának átlagos ózon koncentrációi ($\mu g\ m^{-3}$) (A *-gal jelölt eredmények csak a 2011-es adatok alapján készültek).

Mérőhely/hónap	VI.	VII.	VIII.	Összesen
Budatétény	66,7	56,2*	62,7*	61,9
Csepel	47,0*	54,0*	42,5	48,8
Gilice tér	66,8	68,6	67,0	67,5
Káposztásmegyer	62,1	65,5	60,2	62,6
Kosztolányi tér	46,1	44,4*	39,0*	43,2
Kőrakás park	67,4*	62,1*	67,7	65,7
Pesthidegkút	71,8	76,0	69,7	72,5
Széna tér	35,6	43,7	35,8	38,4
Teleki tér	64,4	67,5	59,9	64,0

Az eredmények alátámasztják azt az elképzelést, miszerint az O_3 maximumok nem a belvárosban, hanem a külső területeken jelentkeznek. Egyik ok a szennyező

anyag transzmissziója, más részt a központi területeken a nyelő anyagok mennyisége is nagyobb.

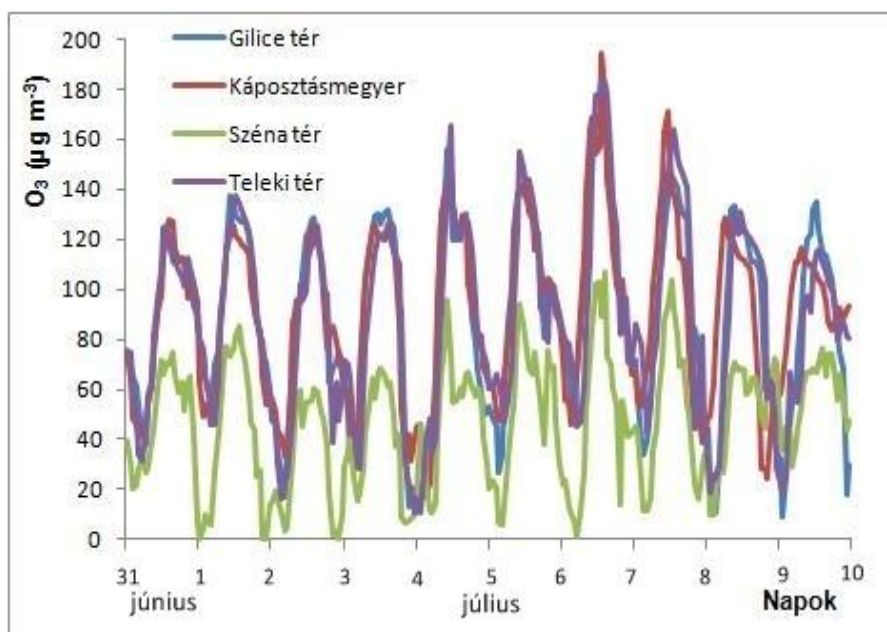
E különbségek a tipikus napi menetek során is megjelennek (10. ábra). Az uralkodó északnyugatias széliránnyal magyarázható, hogy a két külvárosi állomás (Pesthidegkút és Gilice tér) közül Pesthidegkúton mérték a magasabb értékeket. Kora reggel még csökken a koncentráció, mivel a gyenge besugárzás nem tudja kompenzálni a reggeli csúcsforgalom „termékeként” megjelenő nyelők szerepét. Ezután az erősödő besugárzás és a kisebb gépjárműforgalom miatt az ózon mennyisége növekedésnek indul, és körülbelül 13–14 óra (CET) között éri el a maximumát. Ezután a késő délutáni növekvő forgalom hatására újbóli csökkenés megy végbe (ekkor a besugárzás is csökken). Napnyugta után megszűnnek a fotokémiai folyamatok, este 21 óra és hajnali 4 óra között közel állandó az ózon koncentráció.



10. ábra. Egy belvárosi (Széna tér) és egy külvárosi (Pesthidegkút) mérőhely ózon koncentrációinak átlagos napi menete 2011 és 2012 nyarán.

A magasabb hőmérséklet nagyobb ózon koncentrációkkal jár együtt, így a vizsgálatot a következőkben a hőhullámok idejére korlátoztam. E vizsgálat azért fontos, mert növekvő hőterhelés mellett a megnövekedett ózon koncentráció további nehézségeket jelent a szervezetnek. A *Meteorológiai Világszervezet* (WMO) szerint hőhullám akkor fordul elő, ha a napi átlaghőmérséklet legalább egymást követő öt napon 5 °C-kal meghaladja a sokéves napi átlaghőmérsékletet. A vizsgált két nyár során

ilyen 3 alkalommal fordult elő. Ezek közül a leghosszabb a 2012. június 31. és július 9. közötti 10(!) napos időszak volt (11. ábra). Az ábra tanulsága szerint a területi különbségek továbbra is fennmaradtak a belvárosi (Széna tér, Teleki tér) és a külvárosi (Gilice tér, Péstszentlőrinc, Káposztásmegyer) helyszínek között. A hőhullám harmadik és negyedik napján voltak a legmagasabb napi hőmérsékleti átlagok (32,4 °C illetve 32,1 °C), ezzel szemben az ózon koncentráció maximumai az ezt követő harmadik napra estek meg. Ezt a regionális hatásokkal (növekvő O₃ háttérkoncentráció) magyarázható. A hetedik napon kialakuló maximális O₃ értékek Káposztásmegyeren (194 µg m⁻³) és a Teleki téren (183 µg m⁻³) kissé meghaladták a 180 µg m⁻³ (90 ppb) tájékoztatási küszöbértéket.



11. ábra. Az ózon koncentrációk napi menetei 4 különböző mérőállomáson a 2012. június 31. és július 9. között bekövetkező hőhullám ideje alatt.

A 10 napra átlagolt ózon koncentráció adatok alapján (12. ábra) nyilvánvaló, hogy a differencia a belvárosi és a külső területek között még inkább nőtt a meleg periódus alatt (30%-os emelkedés). Meglepő a belvárosi területen lévő Teleki tér magas O₃ koncentrációja. (Talán a kis gépjárműforgalom és a gyenge légmozgás lehet a magyarázat.) A két nyár (2011, 2012) alatt mindössze tíz olyan óra volt, amikor a kilenc mérőhely tekintetében az ózon koncentráció meghaladta a 180 µg m⁻³-es szintet, ebből kettő 2011-ben, nyolc 2012-ben következett be.



12. ábra. Az ózon koncentráció átlagai ($\mu\text{g m}^{-3}$) 2012. június 31. és július 9. között az öt működő budapesti ózonszűrő állomáson.

Eddig viszonylag kevés szó esett a dolgozatban a relatív nedvesség alakulásáról. A belvárosi hőtöbblet, illetve a mesterséges felszínek kisebb párologtató képessége miatt a települések levegője szárazabb, mint a környezeté. A két nyár adataiból a belváros és a külváros relatív nedvességi értékei közötti átlagos eltérés 6% volt. A két év nyarára kiszámított értékeket és különbségeket tartalmazó 14. táblázat is alátámasztja a várakozásokat. A legnagyobb eltérés mindkét nyáron júniusban adódott, rendre -8% és -6% .

14. táblázat. A relatív nedvesség havi átlagértékei (%) a belvárosi (A – OMSZ, Kitaibel Pál utca) és külvárosi (B – Pestszentlőrinc) mérőhelyen 2011–2012 nyarán.

Mérőhely/hónap	VI.	VII.	VIII.	Összesen
A	58	58	51	56
B	65	64	56	62
A-B	-7	-6	-5	-6

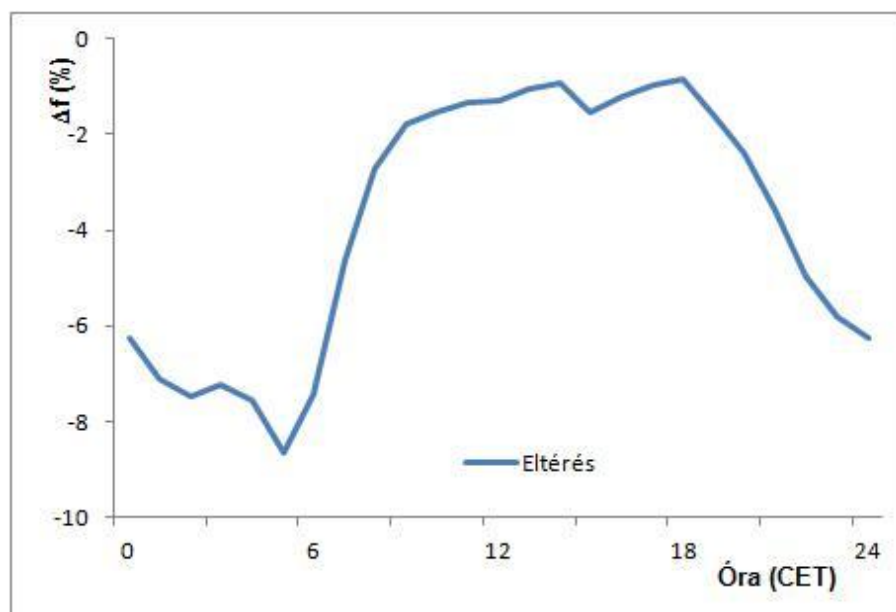
Tudjuk, hogy a hőmérséklet szerepe igen lényeges a relatív nedvesség alakulásában, azaz arra számíthatunk, hogy a melegebb 2012-es évben alacsonyabb

százalékok jelennek meg. A belvárosi mérőhelyen (A) a csökkenés 9%, a külvárosin (B) pedig 11% volt. A két állomás közötti különbség 11%-ról 9%-ra csökkent (15. táblázat).

15. táblázat. A 2011-es, illetve 2012-es év nyári hónapjainak relatív nedvessége (%) a belvárosi (A – OMSZ, Kitaibel Pál utca) és a külvárosi (B – Pestszentlőrinc) mérőhelyen.

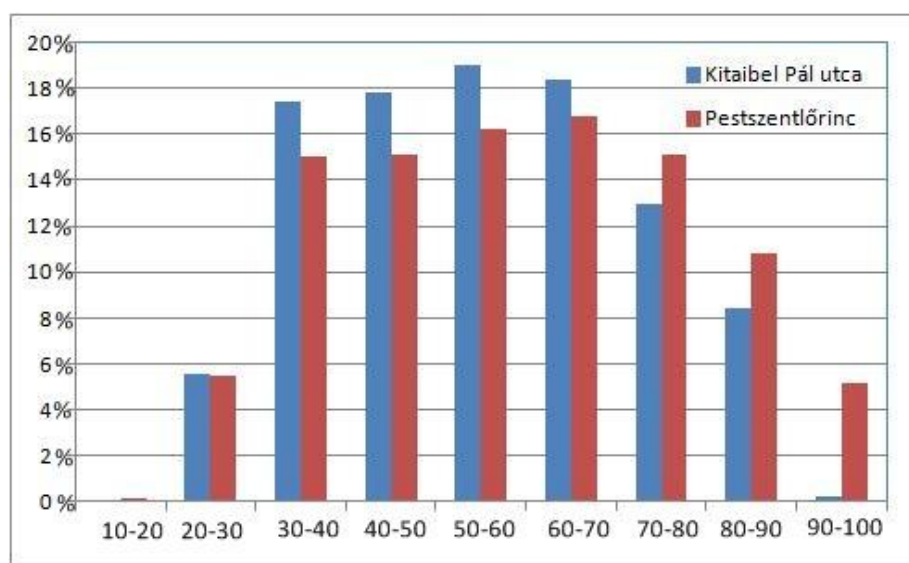
	VI.	VII.	VIII.	Összesen
A ₂₀₁₁	58	61	56	58
B ₂₀₁₁	66	68	62	65
A ₂₀₁₂	58	55	46	53
B ₂₀₁₂	64	60	51	58
A-B ₂₀₁₁	-8	-7	-6	-7
A-B ₂₀₁₂	-6	-5	-5	-5

A relatív nedvesség napi futását (13. ábra) két részre lehet osztani. 9 és 19 óra között csaknem állandó, 1% körüli a különbség (az OMSZ Kitaibel Pál utcai mérőhelyén (belváros) mértek kisebb értékeket). A naplemente után nagyobb változás kezdődik a külváros javára, ami az ottani nagyobb mértékű lehűléssel magyarázható. A legnagyobb különbségek közvetlenül napfelkelte előtt, 6 óra körül figyelhetők meg. Majd a hőmérséklet emelkedésével újra visszaáll a késő délelőtti, délutáni közel állandó különbség. Amennyiben az időjárási helyzetek szerint vizsgálódunk, azt mondhatjuk, hogy borús, esős idő esetén a belvárosba lehullott csapadék gyors párolgásával emelkedik a levegő nedvességtartalma. Emellett a hőmérséklet-kontraszt is mérséklődik, így ezek együttes hatására csökken a relatív nedvességek különbsége a két mérőállomás között.



13. ábra. A relatív nedvesség átlagos napi menete során kialakuló eltérés a belvárosi (OMSZ, Kitaibel Pál utca) és a külvárosi (Pestszentlőrinc) mérőhely között 2011 és 2012 nyarán.

A belvárosban az értékek nagyrészt 30% és 90% között alakultak (14. ábra). A külvárosban az 50% feletti relatív nedvességek az összes eset valamivel kevesebb, mint 2/3 részében fordultak elő. A 90%-nál magasabbak túlnyomó része Pestszentlőrincen (külvárosi mérőhely) fordultak elő. A belvárosi levegő nedvességtartalma kisebb, mint a külvárosi levegőé, mind az utcaszinten, mind a tetőszinten. Itt nem kaptunk az előzetes várakozásoktól eltérő eredményeket.



14. ábra. A relatív nedvesség órás adatainak gyakorisága a belvárosi (OMSZ, Kitaibel Pál utca) és a külvárosi (Pestszentlőrinc) mérőhely esetében 2011 és 2012 nyarán.

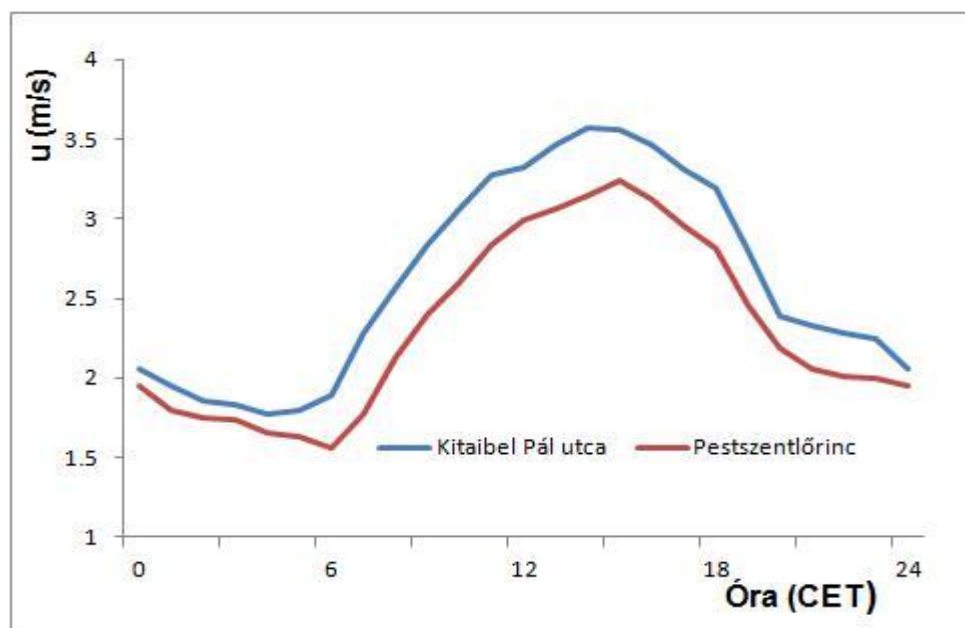
A következő meteorológiai elem a szél. Az áramlási kép vizsgálatánál több szempontot is figyelembe kell venni. Elsődlegesen a tágabb környezetben az uralkodó szélirányt, majd a belső és külső területek hőmérsékleti kontrasztja miatt létrejövő lokális nyomási gradiens okozta városi cirkulációt, továbbá Budapest esetében a domborzati viszonyok és a Duna, mint szélcsatorna által alakított lokális áramlási viszonyokat. Jelen vizsgálatban az adatsorok rövidege és a feladat összetettsége miatt csak néhány általános következtetés levonására vállalkozom. A szélmérések kiértékelésénél figyelembe kell venni, hogy az OMSZ Kitaibel Pál utcai mérőhelyén az anemométer az épület tetején, 25,7 m magasan, míg a Pestszentlőrincen a szokásos 10 m-es magasságban működik.

A 16. táblázat szerint a Kitaibel Pál utcai mérőállomáson átlagosan 14%-kal nagyobb szélsébség értékek fordultak elő, mint Lőrincen, és ez a különbség a nyári hónapok alatt egyenletesen oszlik el. Az utcaszinten a pestszentlőrinci szélsébség adatoknál kisebb értékeket kellene mérnünk!

16. táblázat. A havi szélsébség értékek (m s^{-1}) alakulása a belvárosi (A – OMSZ, Kitaibel Pál utca) és külvárosi (B – Pestszentlőrinc) mérőhelyen 2011 és 2012 nyarán.

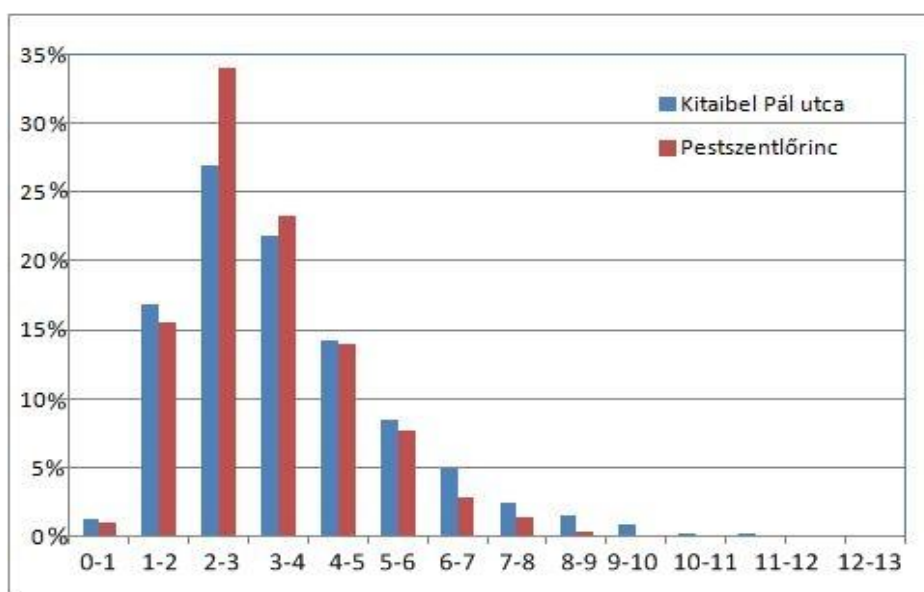
	VI.	VII.	VIII.	Együttes
A	2,8	3	2,5	2,8
B	2,5	2,6	2,2	2,4
A-B	0,3	0,4	0,3	0,3

A szélsébség napi menetét illetően elmondható, hogy a Kitabel Pál utcai állomáson és a pestszentlőrinci Observatóriumban mért szélsébség-különbség egész nap megfigyelhető. A reggeli és nappali órákban nagyobb, éjszaka kisebb, követve a szélsébség napi menetét. A legnagyobb eltérés (22%) a reggeli órákban (7–8 óra) figyelhető meg. Éjszaka a turbulens folyamatok megszűnésével már csak a városi cirkuláció (és a hegy-völgyi hatás) jelenlétével számolhatunk, így a differencia hajnalban (4 óra táján) minimális. Mindkét állomás szélsébsége a turbulens kicserélődési folyamatoknak köszönhetően délután éri el a maximumát (15. ábra).



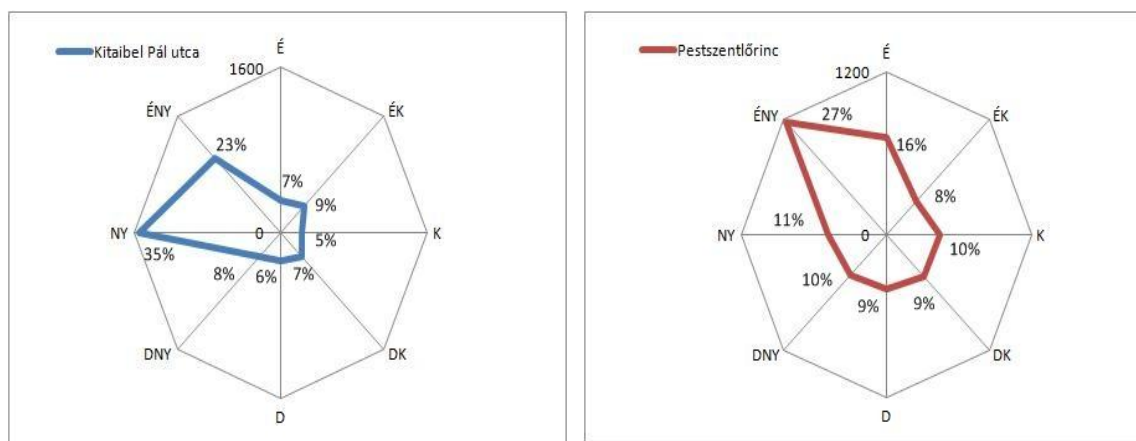
15. ábra. A szélsébség átlagos napi menete a belvárosi (OMSZ, Kitaibel Pál utca) és külvárosi (Pestszentlőrinc) mérőhelyen 2011 és 2012 nyarán.

A szélsébség gyakoriságok ismerete megerősíti a belvárosi mérőhely „többségét” (16. ábra). A szélsébséges órákból a belvárosban és a külvárosban is 1% volt (többségében 2012-ben). A nagyobb szélsébségek felé haladva a Kitaibel Pál utcai mérőhely dominanciája figyelhető meg. 7 m s⁻¹ feletti sebességek az OMSZ állomásán az esetek 3%-ában, míg Pestszentlőrincnél mindössze 0,3%-ban fordultak elő.



16. ábra. A szélsébség órás adatainak gyakorisága a belvárosi (OMSZ, Kitaibel Pál utca) és a külvárosi (Pestszentlőrinc) mérőhelyen 2011 és 2012 nyarán.

A szélirány alakulásában fontos tényező a beépítettség, az épületek struktúrája a regionális domborzat (pl. szélcsatornák), átszellőzési folyosók. A Kitaibel Pál utcai mérőhelyen a nyugatias szelek túlsúlya jellemző (56%), amiben szerepet játszik a beépítettség és Budai-hegyek közelsége, illetve a tetőszint feletti szélvmérés. Pestszentlőrincen többségében északias szeleket látunk (51%), amiben szerepe lehet a városi cirkulációnak. A szél gyakran a város felől fúj, ami a helyi levegő minőségének romlásához vezethet (17. ábra).



17. ábra. A szélirány órás adatainak gyakorisága a belvárosi (OMSZ, Kitaibel Pál utca) és külvárosi (Pestszentlőrinc) mérőhelyen 2011 és 2012 nyarán.

8. Összefoglalás

A Föld lakossága különösen a fejlődő országokban fokozatosan növekszik, ezzel együtt a városi népesség részaránya is emelkedik. Egyre fontosabbá válik a városi éghajlat tanulmányozása.

Budapest lakossága az 1990-es évek óta csökken, de így is hazánk népességének közel 1/5-e, az agglomerációval együtt pedig a lakosság $\sim 1/3$ -a él itt. A rendszerváltozás után az ipar fontossága csökkent, de a közlekedésből származó szennyezőanyagok továbbra is sok problémát jelentenek (NO_x , O_3 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$). Európában Budapest a 2. a $\text{PM}_{2.5}$ szállópor koncentrációjában, ami az emberek várható élettartamát akár két évvel is csökkentheti (*Páldy és Bobvos*, 2011). A klímaváltozás hatással lehet a hazánk időjárására, ezért az aktuális viszonyok felmérése nélkülözhetetlen a jövőbeli védekezés tekintetében.

A dolgozatom célja az OMSZ két állomásán (Pestszentlőrinc, külvárosi terület, OMSZ, Kitaibel Pál utca, belváros, de tetőszinti adatok) összehasonlítása, a legfontosabb meteorológiai állapothatározók (hőmérséklet, relatív nedvesség, szélsébség és szélirány) meneteinek vizsgálata az átlagos hőmérsékletű 2011-es és a rekordokkal tarkított 2012-es nyári hónapokban. A két év azonos évszakjainak a nagyfokú eltérése arra is rávilágíthat, hogy az esetleges hőmérséklet emelkedés hatására miként változhat Budapest hőszigetének néhány sajátossága.

A felszíni méréseknél láttuk, hogy a két mérőhely közötti átlagos hőmérséklet különbség $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ volt, ami a melegebb 2012-es évben erősebben jelent meg. A várostervezés és az épületek kialakítása szempontjából érdekes, hogy a tetőszint környékén késő délután több fokkal hűvösebb lehet, mint a belváros utcáiban (a pestszentlőrinci hőmérsékleti adatok voltak nagyobbak).

Az légszennyezők közül az ózon koncentráció budapesti eloszlását elemeztem az OLM mérőállomások adatai alapján. A maximális koncentrációk – a várakozásnak megfelelően – a külső területeken jelentkeztek. A két nyár során 10 óra során haladták meg a koncentrációk a $180\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ tájékoztatási küszöbértéket.

A szélsébségmérések összehasonlításában – dacára a beépített belvárosnak – a tetőszint felett egyértelmű városi többletet figyelhattuk meg. Ez a budai szélcsatorna hatását, fontosságát is jelzi. Valamint jól mutatja az OMSZ közelében lévő, volt ipari minisztérium épületének lebontása után tervezett park fontosságát.

A belvárosi mérőhelyen inkább a nyugatias, míg a külvárosinál az északias szelek dominanciáját láttuk.

Az általam végzett összehasonlító vizsgálatok felhívják a figyelmet a városi mérőhelyek elhelyezkedésükből származó sajátosságok figyelembevételére. A hőmérsékleti menetek vizsgálata (a tetőszint módosító hatása) a városi meteorológiai profilmérések szükségességét emelik. Az OMSZ Kitaibel Pál utcai állomása nem reprezentálja a felszín közeli légtér városi hősziget intenzitását. Ezt figyelembe kell venni a további analíziseknél.

Terveim között szerepel az OLM mérőhálózat meteorológiai és levegőkörnyezeti méréseinek feldolgozása több nyári időszakra, valamint a budapesti rádiószondás mérések bevonása a vizsgálatba. Ennek kezdeti lépései (szél, hőmérséklet profilok vizsgálata) már elkezdődött.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni a témavezetőmnek, Dr. Baranka Györgyinek, hogy a témában szerzett tapasztalatait megosztotta velem, és bármikor rendelkezésemre állt, ha konzultációra volt szükség. Köszönettel tartozom Dr. Weidinger Tamásnak a dolgozat elkészítéséhez nyújtott segítségével, szakmai tanácsaiért. Végül, de nem utolsó sorban ki kell emelnem a családom, a barátok szerepét, akik lelkesítettek, támogattak a feladat elvégzésében.

9. Irodalomjegyzék

- Akbari, H., Rosenfeld, A.H., Taha, H. (1990): Summer heat island, urban trees, and white surfaces. *Proceedings of the 1990 ASHRAE Winter Conference*, 9p.
- Amman, M., Derwent, D., Forsberg, B., Hänninen, O., Hurtle, F., Kryzanowski, M., de Leuw, F., Liu, J.S., Mandin, C., Schneider, J., Schwarze, P., Simpson, D. (2008): Health risk of ozone from long-range transboundary air pollution. WHO, 95 p.
- Annual Report 2011, Blacksmith Institution, 31 p.
- Bacsó, N. és Réthly, A. (1938): Időjárás-éghajlat és Magyarország éghajlata, Magyar Meteorológiai Társaság, 202 p.
- Bacsó, N. (1959): Magyarország éghajlata, Akadémiai Kiadó, 302 p.
- Bartholy, J., Pongrácz, R., Gelybó, Gy., Szabó, P. (2007): A hőmérsékleti extrémumok várható alakulása a Kárpát-medence térségében a XXI. század végén. *Klíma–23 Füzetek* **51**, 7–17.
- Bartholy, J., Dezső, Zs., Pongrácz, R. (2010): A városi hősziget műholdas vizsgálata Magyarország nagyvárosaiban. *Természet Világa* **141**, 254–258.
- Bornstein, R. és Johnson, D.S. (1976): Urban-rural wind velocity differences. *Atmospheric Environment* **11**, 597–604.
- Bornstein, R. és Lin, Q. (2000): Urban heat island and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies. *Atmospheric Environment* **34**, 507–516.
- Chandler, T.J. (1965): The climate of London, Hutchinson, 122 p.
- Cicek I., Turkoglu, N. (2005): Urban effects on precipitation in Ankara. *Atmosfera* **18**, 173–187.
- Demographia World Urban Areas: 9th Annual Edition (2013), Demographia, 175 p.
- Duckworth, F.S. és Sandberg J.S. (1954): The effect of cities upon horizontal and vertical temperature gradient. *Bulletin of American Meteorological Society* **35**, 198–207.
- Emeis, S. (2011): Surface-Based Remote Sensing of the Atmospheric Boundary Layer. *Atmospheric and Oceanographic Sciences Library* **40**, Springer, 174 p.
- Fortuniak, K. és Klysik, K. (1999): Singularities of urban climate– Łódź case study. The 7th International Conference on Urban Climate, 477–488.
- Grimmond, C.S.B. és Oke T.R. (1991): An evaporation-interception model for urban areas. *Water Resources Research* **27**, 311–326.
- Grimmond, C.S.B., Souch, C., Hubble, M.D. (1996): The influence of three cover on summertime energy balance fluxes, San Gabriel Valley, Los Angeles. *Climate Research* **6**, 45–57.

- Halfon, N., Levin, Z., Alpert, P. (2009): Temporal rainfall fluctuations in Israel and their possible link to urban and air pollution effects. *Environmental Research Letters* **4**, 12 p.
- Howard, L. (1833): The climate of London.
- Klysik, K. (1996): Spatial and seasonal distribution of antropogenic heat emissions in Lodz, Poland. *Atmospheric Environment* **30**, 3397–3404.
- Kolozsi–Komjáthy, E., Mészáros, R., Lagzi, I. (2011): Effects of climate change on regional ozone dry deposition. *Advances Science & Research* **6**, 103–107.
- Kovács, A. (2012): A humán komfort városklimatológiai vizsgálata Budapestre mért és modellezett éghajlati adatok felhasználásával. (Szakdolgozat).
- Kovats, R. és Ebi, K.L. (2006): Heat waves and public health in Europe. *European Journal of Public Health* **16**, 492–559.
- Kratzer, P.A. (1956): Das Stadtklima. F. Vieweg und Sohn Braunschweig, 184 p.
- Landsberg, H.E. (1981): The urban climate. The Academic Press London, 275 p.
- Lokoshchenko, M.A., Issaev, A.A. (2003): Influence of Moscow city on air temperature in central Russia., 5th International Conference on Urban Climate, 5p.
- Lopes, C., Adnot, J., Santamouris, M., Klitsikas, N., Alvarez, S., Sanchez, F. (2001): Managing the Growth of the Demand for Cooling Urban Areas and Mitigating the Urban Heat Island Effect., Eceee 2001 Summer Study.
- Oke, T.R. és Hannel, F.G. (1970): The form of urban heat island un Hamilton, Canada. *WMO Tech Note* **108**, 113–126.
- Oke, T.R. (1973): City size and urban heat island. *Atmospheric Environment* **7**, 769–779.
- Oke, T.R. (1974): Review of urban climatology 1968–1973. *WMO Tech Note* **134**, 152 p.
- Oke, T.R. (1976): The distinction between canopy and boundary-layer urban heat island. *Atmosphere* **14**, 268–277.
- Oke, T.R. (1979): Review of Urban climatology 1973–1976. *WMO Tech Note* **169**, 114 p.
- Oke, T.R. (1981): Canyon geometry and nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observation. *Journal of Climatology* **1**, 237–254.
- Oke T.R. (1982): The energetic basis of urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **108**, 1–24.
- Oke T.R. (1988): The urban energy balance. *Progress in Physical Geography* **12**, 471–508.
- Oke T.R. (1997): Urban Climates and Global Environmental Change. Applied Climatology: Principles & Practices. New York, NY: Routledge, 273–287.

- Páldy, A. és Bobvos, J.* (2011): Local city report Budapest, Aphekom, 30 p.
- Pigeon, G., Legain, D., Durand, P., Masson, V.* (2007): Anthropogenic heat release in an old European Agglomeration (Toulouse, France). *International Journal of Climatology* **27**, 1969–1981.
- Probáld, F.* (1974): Budapest városklímája. Akadémiai Kiadó, 126 p.
- Réthly, A.* (1947): Budapest éghajlata. Rheuma és Fürdőkutató Intézet, Bp., 147 p.
- Sailor, J.D.* (1994): Simulated Urban Climate Response to Modifications in Surface Albedo and Vegetative Cover. *Journal of Applied Meteorology* **34**, 1694–1704.
- Sheperd, J.M., Pierce, H., Negri, A.J.* (2001): Rainfall Modifications by Major Urban Areas: Observations from Spaceborne Rain Radar on The TRMM Satellite. *Journal of Applied Meteorology* **41**, 689–701.
- Siedlecki, M.* (2003): Urban-rural wind speed differences in Lodz, 5th International Conference on Urban Climate, 4p.
- Stewart, I. és Oke, T.R.* (2009): Classifying urban climate field sites by „local climate zones”: The case of Nagano, Japan. The 7th International Conference on Urban Climate, Japan.
- Taha, H.* (1997): Urban climates and heat islands: albedo, evaporation, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings* **25**, 99–103.
- Trenberth, K., Fasullo, J.T., Kiehl, J.* (2008): Earth’s global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society* **90**, 311–324.
- Trenberth K., Meehl, J., Masters, J., Sommerville, R.* (2012): Heat Waves and Climate Change, 13 p.
- Unger, J.* (2010): A hősziget-jelenség néhány aspektusa (MTA Doktori Értekezés), 108 p.
- Unger, J. és Gál, T.* (2011): Automata állomáspár Szegeden– A városi klímamódosító hatás online megjelenítése. *Időjárás* **53**, 93–96.
- Upmanis, H., Eliasson, I., Lindqvist, S.* (1998): The influence of green areas on nocturnal temperature in high latitude city (Göteborg, Sweden). *International Journal of Climatology* **18**, 681–700.
- Urban Heat Island Mitigation (2011): An innovative way to reduce air pollution and energy usage, Healthy Air Living TM, 24 p.
- Van Hove, L.W.A., Steeneveld, G.J., Jacobs, C.M.J., Heusinkveld, B.G., Elbers, J.A., Moors, E.J., Holstaag, A.A.M.* (2011): Exploring the Urban Heat Island Intensity of Dutch Cities., 63 p.
- Viterito, A.* (1989): Changing Thermal Topography of The Baltimore-Washington Corridor: 1950–1979. *Climatic Change* **14**, 89–102.

Voogt, J.A. (2004): Hotter Cities., 8p.

Voogt, J.A. (2007): How Researchers Measure Urban Heat Island. U.S. Environmental Protection Agency, 34 p.

WHO's Air Quality Guideline, 2011.

10. Internetes források

Országos Levegőszennyezettségi Mérőhálózat:

<http://www.kvvm.hu/olm/info.php>

Országos Meteorológiai Szolgálat– Napijelentés kiadvány:

http://met.hu/idojaras/aktualis_idojaras/napijelentes/

Országos Meteorológiai Szolgálat– Levegőkörnyezet–védelem:

http://met.hu/levegokornyezet/varosi_legszennyezettseg/

Országos Meteorológiai Szolgálat– Éghajlati visszatekintő:

http://met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/eghajlati_visszatekinto/

European Environmental Agency– Urban Atlas (Budapest, 2010):

<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/urban-atlas>

Az 5. és 10. ábra forrása:

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/af/Hungary_budapest_districts_.jpg