

¹ MTA-PE Levegőkémiai Kutatócsoport

² Országos Meteorológiai Szolgálat

³ Pannon Egyetem, Környezettudományi Intézet

A baj nem jár egyedül – hőhullámok és levegőszennyezettség

Az elmúlt két évtized tapasztalatai alapján az éghajlatváltozás napjainkban is érzékelhető megnyilvánulása az időjárási szélsőségek, ezen belül a hőhullámok számának és időtartamának jelentős mértékű növekedése. Az emberi szervezetet önmagában is erősen megterhelő tartós hőség rendszerint rendkívül rossz levegőminőséggel párosul: az ilyenkor jellemző meteorológiai paraméterek kedveznek a fotokémiai (másként Los Angeles-típusú) szmog kialakulásának. A nagy területekre kiterjedő, szinte kivédhetetlen szmog összetevői egészségkárosító hatásuk révén súlyosbítják a hőség által okozott panaszokat, és felelőssé tehetőek az ilyenkor nagy számban bekövetkező többlet-halálesetek egy részéért is. Mivel a jövőben nagy valószínűséggel a hőhullámok további erősödésére számíthatunk, nem árt, ha tisztában vagyunk annak társult veszélyeivel is.

Hőhullámok és hatásaik

Napjainkban az éghajlatváltozás a hatalmas léptékűvé növekedett emberi tevékenység természetére gyakorolt súlyos mellékhatásainak szimbólumává vált. A levegő összetételének és ezen belül a szén-dioxid és más üvegházhatású gázok koncentrációjának földtörténeti léptékben példátlanul gyors változását ma már egyértelműen az emberi tevékenységnek, kiemelten a fosszilis tüzelőanyagok égetésének tulajdonítjuk. Az összetétel változásának következményeit a laikusok várakozásával szemben nemcsak a légkörben, hanem más szférákban, az óceán felszíni hőmérsékletének alakulásában vagy a sarkvidéki tengeri jég példátlan sebességű zsugorodásában is megfigyelhetjük. A légkör dinamikus jellege és a helyi időjárás változékonysága ellenére az éghajlatváltozás a 20. század végére folyamatos mérési adatsorok tizezeinek értékelése alapján bizonyítható tényvé vált, amit objektív meteorológiai paraméterek (átlaghőmérséklet, extrémindexek, stb.) trendje támaszt alá.

Az éghajlatváltozás kérdése, akár az éghajlat múlt- vagy jövőbeli változásáról, akár annak következményeiről legyen szó, korábban élesen elkülönült a levegőminőség problémakörétől. Ez részben érthető is, hiszen a levegőminőség a laikusok számára elsősorban lokális (regionális) probléma, míg az éghajlatváltozás globális, és változásuk időléptéke is jelentősen eltérő (néhány nap, illetve évtizedek-évszázadok). Az éghajlat-

változás a közelmúltban felismert és a jövőben várhatóan jelentősen erősödő tényezői, az időjárási szélsőségek gyakoriságának növekedése azonban közvetlen hatással lehet a levegőminőség alakulására. A szélsőséges időjárási események az ökoszisztémákra, a mezőgazdaságra és magára az emberre is lényegesen nagyobb negatív hatást gyakorolnak, mint a meteorológiai paraméterek fokozatos, de lassú változásai. A szélsőséges időjárási események közül elsődlegesen a hőségnapok számának és a nappali maximum hőmérséklet értékének a növekedése, valamint az aszályos időszakok hossza hordozza magában a levegőminőség jelentős romlásának lehetőségét. E meteorológiai jelenségeket a közvélemény elsődlegesen a hőhullám fogalmával azonosítja.

A hőhullám fogalmára a mai napig nem született nemzetközileg egységes meghatározás; sem az Egészségügyi Világszervezet (WHO), sem a Meteorológiai Világszervezet (WMO) nem alkotott egységes definíciót. Az egyes országok a meteorológiai szolgálataik közreműködésével maguk határozzák meg a saját országaikra érvényes feltételeket. Minden esetben egy hőmérsékleti érték a küszöb, amihez viszonyítanak, ez az érték azonban országonként eltérő, ami érthető is, hisz a szokatlan meleg földrészenként, országonként mást-mást jelent. Magyarországon az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) által definiált besorolást használjuk, a rendszer háromfokozatú és az egészségügyi kockázat növekedésén alapul. Hazánkban akkor beszélünk hőhullámról, ha a napi átlaghőmérséklet három egymást követő napon meghaladja a 25 °C-ot (II. fokú hőségriasztás). A referencia-értéket az 1970 és 2000 közötti időszak meteorológiai és halálozási adatainak elemzésével határozták meg. (A 25 °C feletti átlaghőmérséklet 12 százalékos többelhalálozást okoz, lásd: *Páldy és Bobvos*, 2008.) Az OMSZ Budapestre vonatkozó állomásainak méréseiből a napi középhőmérsékletek alapján az 1961–1990 időszakban Budapesten 49 alkalommal lehetett volna II. fokozatú hőségriasztás, és mindösszesen csak 3 alkalommal kerülhetett volna sor III. fokozatú hőségriasztásra (a napi átlaghőmérséklet legalább három egymást követő napon elérte a 27 °C-ot). A várható éghajlatváltozás következményeként Magyarországon a modellek előrejelzései alapján a hőségiadó-fokozatokhoz tartozó esetszámok a 21. század utolsó évtizedeire várhatóan tízszeresére (II. fokozat), illetve százszorosára (III. fokozat) növekedhetnek (*Bartholy és mtsai*, 2013). Az esetszámok növekedésén túl várhatóan az egyes hőségriasztások időtartamának hossza is jelentősen megnövekszik a század végére.

A 2003-as európai hőhullám

Annak megtapasztalására, hogy milyen jellemző hőmérsékleti viszonyok várhatnak ránk az évszázad utolsó évtizedeiben, nem is kellett fél évszázadot várnunk. 2003-ban Európa nagy részét két rendkívüli hőhullám is sújtotta, júniusban és augusztus első felében. Ez a szélsőségesen forró időszak ízelítő lehetett azokból a nyarakból, amelyek az évszázad végére a modellek előrejelzései szerint már megszokottnak fognak számítani. A 2003-as esztendőben Európában a nyári átlaghőmérséklet 1,9 °C-kal haladta meg az éghajlati referenciaidőszaknak tekintett 1961–1990 között mért értéket, de Nyugat- és Dél-Európában 4–5,5 °C-kal is magasabb napi átlaghőmérsékleteket regisztráltak. Ezen időszakokban a napi maximum hőmérséklet Spanyolországban és Portugáliában a 40, Franciaországban a 36–38 °C-ot is meghaladta, ami a jellemző maximumnál 7–12 °C-kal magasabb értékeket jelent. Augusztus 1-én Portugáliában az Európában valaha mért legmagasabb hőmérséklet rekordja is megdőlt, a hőmérő higanyszála 47,3 °C-ig kúszott fel (*García-Herrera és mtsai*, 2010).

A rendkívüli hőhullám kialakulásának egyik oka az volt, hogy február és május között az ilyenkor szokásos csapadékmennyiség kevesebb, mint fele hullott Európa nagy részén, miközben az átlagosnál magasabb hőmérséklet és sugárzás a növények páro-

logtatásán (evapotranspirációján) keresztül gyorsan kiszárította a talaj felszíni rétegeit. A talaj kiszáradásának közvetve hatása volt az Európában kialakult hatalmas anticiklon tartós fennmaradásában is. A tartós hőség erősen igénybe vette még az egészséges emberek szervezetét is, az idősekről és a tartós betegségekben szenvedőkről nem is beszélve. Egészségügyi és halálzási statisztikák utólagos értékelése alapján csak az augusztusi európai hőhullám 35 ezer többlet- (az időszakra jellemző halálzáson felüli) halálesetet okozott, elsődlegesen az idősebb korosztályban (*Vautard és mtsai*, 2007). A legtöbb többlet-haláleset Franciaországban következett be, az 1946–2002 közötti időszak átlagos halálzási mutatóit 60 százalékkal múlta felül. A 75 évnél idősebbek között a növekedés 70 százalékos volt, de a 45–74 év közötti korcsoportban is 30 százalék halálzási többletet regisztráltak (*García-Herrera és mtsai*, 2010). A halálesetek a statisztikák alapján a 35 °C-ot meghaladó maximum és a 20 °C-ot meghaladó minimum hőmérsékletű napokkal hozhatók összefüggésbe. A halálzáások többségében keringési és légzőszervi problémák miatt következtek be, a nőknél nagyobb arányban, mint a férfiaknál.

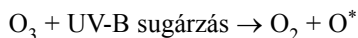
A más természeti katasztrófához képest példátlanul nagy, ámde a média által elhallgatott emberáldozatokon felül a hőség abban az évben jelentős termés kiesést okozott szerte Európában. Portugáliában rendkívül súlyos erdőtüzek pusztítottak, 431 ezer hektáros erdő, az ország területének 5 százaléka vált a lángok martalékává. A hőhullám által okozott gazdasági károkat Európában mindösszesen 10 milliárd dollárra becsülik. Franciaországban a hőség miatt az atomerőművek termelését korlátozni kellett, ami villamosenergia-ellátási zavarokhoz vezetett. Az Alpokban példátlan módon a fagyhatár 10 napig 4500 m fölé került, melynek következtében a gleccserek jégtömege 5–10 százalékkal csökkent (*García-Herrera és mtsai*, 2010). A hőhullám egyetlen pozitív hatásaként a pollenszezon jelentős mértékben lerövidült. Az is nyilvánvalóvá vált, hogy az európai hőhullám szinte teljesen felkészületlenül érte a hatóságokat és az egészségügyi ellátórendszereket. Mentségükre szóljon, hogy a 2003-as esztendő nyara a klímarekonstrukciók alapján legalább 600 éve a legforróbbnak számított.

A hőhullámok és a levegőszennyezés

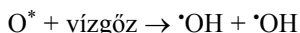
A hőhullámok kialakulásához szükséges meteorológiai feltételek sajnálatos módon különösen kedveznek a levegőszennyezés egy fajtájára, az úgynevezett Los Angeles-típusú szmog kialakulásának és súlyosbodásának is. A fotokémiai szmog időszakában az erős napsugárzás az emberi tevékenység által kibocsátott különböző légszennyező anyagokból, valamint a növényzet által kibocsátott, önmagukban ártalmatlan vegyületekből kémiai úton súlyosan egészségkárosító és szabad szemmel is jól látható levegőszennyezést, úgynevezett fotokémiai szmogot hoz létre. A fotokémiai szmog tehát másodlagos levegőszennyezés, amelynek összetétele és tulajdonságai lényegesen különböznek a klasszikus, a közvetlenül kibocsátó forrásokból (például kéményekből és kipufogócsövekből) származó elsődleges levegőszennyezésétől. Nemcsak nagyvárosokban képződik, hanem sokszor kontinensnyi kiterjedésű, az ellene való hatékony védekezés így szinte lehetetlen.

A fotokémiai szmog képződésében kulcsszereplő a nitrogén-monoxid, amely a nagy hőmérsékletű égés során keletkezik belsőégésű motorokban és erőművekben, valamint a biomassza égése során. A belőle a légkörben képződő nitrogén-dioxid ugyanis a troposzférában az egyetlen olyan vegyület, amely a Napból a felszínre lejutó ultravioleta sugárzás hatására bomlásával atomos oxigént képes létrehozni. Az atomos oxigén pedig oxigénmolekulával egyesülve ózont hoz létre. A sztratoszférában az ózon a sokkal nagyobb energiájú ultravioleta sugárzás hatására oxigénmolekulák bomlása révén keletkezik, erre azonban szerencsére a felszín közelében nincs lehetőség. Az ózon a felszínre lejutó ultra-

ibolya sugárzás (az úgynevezett UV-B sugárzás) hatására molekuláris oxigénre és nagy energiatartalmú (úgynevezett gerjesztett állapotú) atomos oxigénre bomlik:



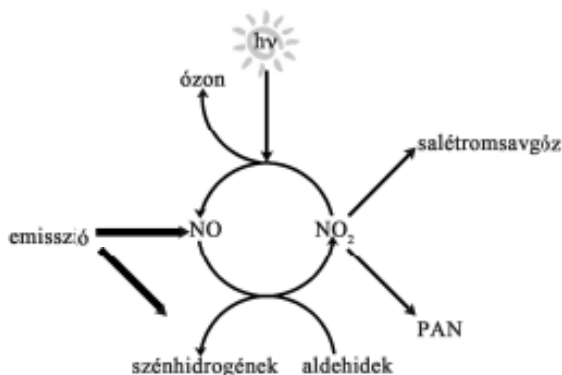
A keletkező atomos oxigén annyira nagy energiájú és reakcióképes, hogy még a vízgőzzel is képes kémiai reakcióba lépni, ugyancsak rendkívül reakcióképes hidroxilgyököt hozva létre:



A hidroxilgyök – amelyet rendkívüli reakcióképessége miatt a légkör utcaseprőjének neveznek – a légkörben a legtöbb anyagot képes oxidálni normál hőmérsékleten. A szén-monoxidot például szén-dioxiddá alakítja, miközben a folyamat végén a hidroxilgyök újraképződik. Sőt, a metánnal és más szénhidrogénnel való reakcióiban nemcsak hogy újraképződik a hidroxilgyök, hanem még további hidroxilgyökök is képződnek. Ez a folyamat az úgynevezett láncreakció, amelyben a szénhidrogénekhez képest milliószor kisebb koncentrációban jelenlevő hidroxilgyök rövid idő (vegyülettől függően néhány perc és néhány nap között) oxidálja a szénhidrogéneket.

A fotokémiai szmog képződésének másik kulcsszereplői tehát a szénhidrogének, hiszen hatékonyan képesek „felszaporítani” a légköri kémiai átalakulásokért felelős hidroxilgyököt. A járművek a tökéletlen égés melléktermékeként az el nem égett üzemanyagból és a kenőolajból származó szénhidrogéneket, szén-monoxidot és koromrészecskéket bocsátanak a levegőbe. Az üzemanyaggyártás és -szállítás során illékony szénhidrogének, az ipari tevékenység során oldószerek és más illékony vegyületek szabadulnak fel. Illékony szénhidrogéneket nagy mennyiségben növények is bocsátanak ki, egy részük jellegzetes illatát magunk is érezhetjük.

A fotokémiai szmog körülményei között a nagy koncentrációban jelenlevő kiindulási szénhidrogénekből rövid idő alatt nagy mennyiségben keletkeznek oxigéntartalmú szerves vegyületek, aldehidek, elsősorban a formaldehid és az acetaldehid. Az ugyancsak nagy koncentrációban megtalálható nitrogén-oxidok egy része salétromsavgőzzé alakul át, az acetaldehid és a nitrát reakciójában az erősen könnyfakasztó hatású peroxi-acetil nitrát (PAN) gőz keletkezik. A körfolyamat fő terméke természetesen az ózon, amely a kiindulási anyagok koncentrációjához képest jelentős mértékben feldúsul. A fotokémiai szmogra jellemző vegyületek nem egyidőben keletkeznek, hanem a kémiai reakciók által meghatározott sorrendben követik egymást. A rendkívül bonyolult körfolyamat lényegét az 1. ábra szemlélteti:



1. ábra. A fotokémiai szmog kialakulásának egyszerűsített körfolyamata

Némileg leegyszerűsítve tehát a fotokémiai szmog a légkör öntisztulási mechanizmusának „túlműködése”. Ha a légkört az emberi szervezethez hasonlítjuk, akkor a fotokémiai reakciókban megnyilvánuló öntisztulási mechanizmus az immunrendszer működésének felel meg, a fotokémiai szmog pedig annak túlműködésének, például az allergiának. Miként az emberi szervezet allergiás reakcióban, fotokémiai szmog esetén a légköri kémiai folyamatok is termelnek olyan kémiai anyagokat, amelyeket egyébként nem, más anyagokból pedig a normálisnál sokkal többet. Fotokémiai szmog esetén a meteorológiai helyzet miatt többé-kevésbé állandó kibocsátás mellett jelentősen feldúsuló nitrogén-oxidok és szénhidrogének tehát „túlterhelik” a légkör természetes öntisztulási rendszerét.

A fotokémiai szmog összetevői csökkentik a növények fotoszintetizáló képességét és ezzel gátolják szén-dioxid felvételüket. A pórusokba bejutó reaktív anyagok szabadgyököket hoznak létre, amelyek károsítják a növényi sejteket. Az emberi szervezetben csökkentik az oxigénfelvétel mértékét, a légzőszervek gyulladását okozhatják, súlyosbíthatják a meglévő keringési és légzőszervi betegségeket.

A fotokémiai szmog képződéséhez szükséges időjárási feltételek közül a két legfontosabb tényező az erős napsütés, ami a szmog kialakulásához szükséges energiát

Némileg leegyszerűsítve tehát a fotokémiai szmog a légkör öntisztulási mechanizmusának „túlműködése”. Ha a légkört az emberi szervezethez hasonlítjuk, akkor a fotokémiai reakciókban megnyilvánuló öntisztulási mechanizmus az immunrendszer működésének felel meg, a fotokémiai szmog pedig annak túlműködésének, például az allergiának.

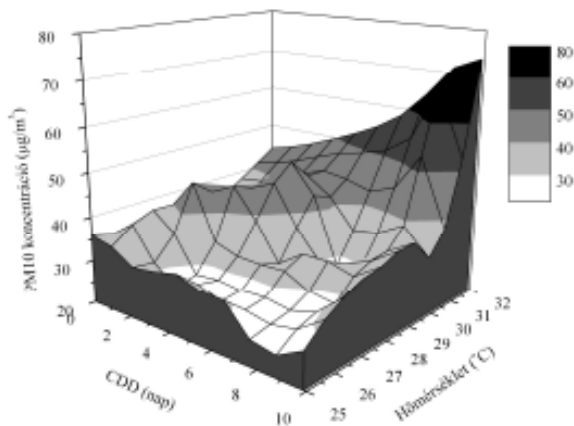
szolgáltatja, és a gyenge légmozgás, amely gátolja a kibocsátott légszennyező anyagok elkeveredését és felhígulását. Hőhullámos időszakban e két feltétel mindegyike teljesül, a hőhullám ugyanis hosszantartó anticiklonális meteorológiai körülmények között alakul ki. A kiszáradó talajfelszín és a növényzet csökkenő párologtatása miatt a légkör nedvességtartalma is kisebb, így a felhőképződés erősen gátolt, a besugárzás mértéke pedig maximális. Magas hőmérsékleten a kémiai reakciók sebessége is megnő. Elősegíti a szmog képződését, ha a légkörben a függőleges irányú átkeveredés gátolt, vagyis hőmérsékleti inverzió alakul ki. (Los Angelesben, földrajzi fekvésénél fogva, ezek a feltételek az év 300 napján teljesülnek, így nem véletlen, hogy ebben a nagyvárosban okozott elsőként súlyos problémát

ez a jelenség a II. világháborút követő években.) A nagyváros amúgy is kedvező terep a levegőszennyezés kialakulása szempontjából: a magas épületek között a levegő áramlása, a légszennyező anyagok kicserélődése gátolt. Hőhullámos időszakban az is teljesül, hogy a fotokémiai szmog kialakulásához szükséges stabil meteorológiai helyzet tartósan, több napon vagy héten át fennáll. Ilyenkor a fotokémiai szmog napról-napra súlyosbodik, a levegőminőség folyamatosan romlik, amíg a meteorológiai helyzet változása (például egy hidegfront érkezése) véget nem vet a szmoghelyzetnek és a hőhullámnak egyaránt.

A légkörbe került és ott átalakult kémiai anyagok rendszerint vagy a csapadékkal együtt távoznak onnan (kimosódás vagy nedves ülepedés), vagy pedig közvetlenül, úgynevezett száraz ülepedéssel. A felszinközeli ózont például a növények pórusaikon keresztül képesek felvenni. Ezek a folyamatok hatékonyan csökkentik a levegőben levő légszennyező anyagok koncentrációját. Hőhullámos időszakban csapadék szinte egyáltalán nem hullik, így kimosódás nincs. Ilyenkor a száraz ülepedés is gátolt, a hőség, a túl erős napsugárzás és a párologási veszteség csökkentése miatt a növények zárják gázcseréjét biztosító pórusaikat. Ezekben az időszakokban a különböző forrásokból kibocsátott és intenzíven képződő légszennyező anyagok egyaránt feldúsulnak, és a hőhullám egésze-

ségkárosító hatását jelentősen súlyosbító tartós és kiterjedt fotokémiai szmogot hoznak létre. A többé-kevésbé állandónak tekinthető légszennyező források – mint például a közlekedés vagy az ipari üzemek – mellett hőhullámos időszakban a szárazság és hőség hatására jelentősen megnő a tüzesetek száma, és a füsttel kibocsátott nitrogén-monoxid, szén-monoxid, illékony szerves vegyületek, koromrészecskék és más aeroszol részecskék tovább rontják a levegőminőséget.

A hőhullám idején szerepet játszó meteorológiai elemek hatását a legveszélyesebbnek tartott levegőszennyező, a PM10 (10 μm -nél kisebb átmérőjű, a légzőrendszerbe bejutó aeroszol részecskék, helytelen, de közismert nevén „szálló por”) 2004 óta Budapesten mért koncentrációján keresztül mutatjuk be a 2. ábrán.



2. ábra. A napi átlagos PM10 koncentráció alakulása hőhullámos időszakokban Budapesten 2004 óta a napi maximum hőmérséklet és megelőző csapadéktelen napok számának függvényében

A függőleges tengelyen a napi átlagos PM10 koncentráció, a vízszintes tengelyeken pedig az adott napon mért napi maximum hőmérséklet és az adott napot megelőző csapadéktelen napok száma (CDD) szerepel. Jól látszik, hogy a csapadéktelen napok száma (a kimosódás nélküli időszak hossza), illetve a maximum hőmérséklet a fent elmondottak alapján egyértelmű függvénykapcsolatban van a PM10-szennyezettség (-koncentráció) mértékével. Minél magasabb a hőmérséklet, és minél több nap telt el csapadék nélkül, annál nagyobb lesz a PM10 koncentráció értéke, azaz annál rosszabb lesz a levegő minősége. Megjegyzendő, hogy PM10 esetében $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ koncentráció az egészségügyi határérték, amit hőhullámos helyzetben sokszor jelentősen meghalad a mért koncentráció. Hasonló összefüggések természetesen más mért légszennyező anyagok esetében is ábrázolhatók lennének.

A Budapesten 2004 óta az Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat által folyamatosan mért napi átlagos PM10 koncentrációt és az ózon 8 órás átlagos maximum koncentrációját a hőhullámos időszakokra, illetve az azon kívüli nyári időszakokra külön-külön átlagoltuk. Az eredményeket az 1. táblázatban mutatjuk be.

1. táblázat. Budapesten 2004 óta előforduló hőhullámok időszakára (összesen 110 nap) és az azon kívüli nyári időszakokra (676 nap) átlagolt mért napi átlagos PM10- és 8 órás átlagos maximum ózonkoncentrációk és napi középhőmérsékletek

	PM10 koncentráció [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Ózon [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Napi átlaghőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]
Hőhullám	34,2	84,2	27,2
Nyár	22,6	64,0	20,7

Hőhullámos időszakokban a PM10 koncentráció a jellemző nyári átlagos érték másfélszeresére, az ózonkoncentráció pedig 30 százalékkal növekszik. Hőhullámos időszakokban tehát a levegőminőség a fent részletezett tényezők együttes hatására jelentős mértékben romlik, sokszor az egészségügyi határértéket meghaladó koncentrációértékek alakulnak ki. A helyzet azért különösen aggasztó, mert a hőhullámok eddig feltárt egészségügyi kockázatain felül számos tanulmány mutatott ki közvetlen kapcsolatot a napi halálos esetek száma és az ózon-, valamint a PM10 koncentráció értéke között. Az Egészségügyi Világszervezet (WHO) tanulmánya szerint a $70\mu\text{g}/\text{m}^3$ ózonkoncentráció felett minden további $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ koncentráció-növekedés 0,5 százalékkal emeli a halálozások számát, míg a PM10 részecskék esetében a $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ koncentráció elérése 2,5 százalékos mortalitás-emelkedést jelent (WHO, 2006). Úgy becsülik, hogy a 2003. augusztusi európai hőhullám többlet-halálos eseteit 14–38 százalékban az egyidejűleg fennálló rendkívül rossz levegőminőség is okozhatta (Jalkanen, é. n.).

Köszönetnyilvánítás

Jelen cikk *Az éghajlatváltozásból eredő időjárási szélsőségek regionális hatásai és a kárnyújtás lehetőségei a következő évtizedekben* című TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0064 projekt keretében készült. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Irodalomjegyzék

- Bartholy J., Dezső Zs., Gelybó Gy., Kern A., Pongrácz R. és Radics K. (2013): *Alkalmazott és városklimatológia*. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest.
- García-Herrera, R., Díaz, J., Trigo, R., Luterbacher, J. és Fischer, E. (2010): A Review of the European Summer Heat Wave of 2003. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **40**. 267–306.
- Jalkanen, L. (é. n.): *Forecasting Perspective from Europe*. WMO presentation.
- Páldy A. és Bobvos J. (2008): A 2007. évi magyarországi hőhullámok egészségi hatásainak elemzése – előzmények és tapasztalatok. „Klíma-21” Füzetek 2008, 52. sz. 3–15.
- Vautard, R., Beekmann, M., Desplat, J., Hodzic, A. és Morel, S. (2007): Air quality in Europe during the summer of 2003 as a prototype of air quality in a warmer climate. *Comptes Rendus Geoscience*, 339. sz. 747–763.
- WHO (2006): *Air Quality Guidelines: Global Update 2005. Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide*.