



LIFE
Városi Eső
A VÁROSI ESŐ ARANYAT ÉR.

Budapest XII. kerület Klímamodellezés és érzékenységi szimulációk alkalmazkodási lehetőségekről

C1. - Helyi éghajlatváltozási modellek kidolgozása

Prepared by | Országos Meteorológiai Szolgálat
HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt.

Date | 2024. április



Az Európai Unió
társfinanszírozásával

A PROJEKT A MAGYAR ÁLLAM
TÁRSFINANSZÍROZÁSÁVAL VALÓSUL MEG.

AZ ANYAGBAN LEÍRT VÉLEMÉNYEK KIZÁRÓLAG A LIFE VÁROSI ESŐ PROJEKT PARTNERSÉGÉNEK FELELŐSSÉGI KÖRÉBE TARTOZIK. A MEGÁLLAPÍTÁSOK NEM SZÜKSÉGSZERŰEN TÜKRÖZIK A FINANSZÍROZÓ SZERVEZETEK ÁLLÁSPONTJÁT. A FINANSZÍROZÓK NEM TEHETŐEK FELELŐSSÉ AZ ITT KÖZÖLT TARTALMAK BÁRMILYEN FELHASZNÁLÁSÁÉRT.

Budapest éghajlatváltozással szembeni kitettségének számszerűsítése

Megyeri-Korotaj Otília Anna, Allaga-Zsebeházi Gabriella, Szépszó Gabriella

2023. február 16.

Az éghajlat modellezése

Az éghajlati rendszert kormányzó fizikai folyamatok és a rendszer egyes tagjai között fellépő kölcsönhatások leírására az ún. kapcsolt globális modellek képesek, melyekben az emberi tevékenység hatását az üvegházgázok légköri koncentrációján keresztül, külső kényszerként veszik figyelembe. Egy ország vagy kisebb térség éghajlatváltozásáról regionális éghajlati modellek segítségével nyerhetünk részletes információt. Ezeket a modelleket egy kiválasztott tartományon (pl. a Kárpát-medencére) 10-25 km-es rácsfelbontáson futtatják, amihez a globális modellek írják le a tartományon kívül zajló folyamatokat. Egy város vagy városrész lokális jellemzőit olyan, általában néhány száz méteres vagy km-es térskálán használt speciális felszíni modellek alkalmazásával lehet szimulálni, melyek kimondottan az adott felszíntípus és a légkör közötti folyamatok leírására koncentrálnak.

A várható változásokat leíró éghajlati szimulációk számos bizonytalanságot tartalmaznak, melyek az alábbi tényezőkre vezethetők vissza:

1. Az éghajlati rendszer természetes tulajdonsága a belső változékonyság (pl. csapadékosabb és szárazabb évek előfordulása).
2. A fizikai folyamatok leírása különböző módon történik az egyes modellekben, ami eltérő eredményekre vezethet. Ez a hatás különösen számottevő a felhő- és csapadékképződési folyamatok modellezésében.
3. A modellszimulációkban a természetes éghajlatalkító folyamatok mellett az emberi tevékenység hatását is figyelembe kell vennünk. Ennek leírására különböző (pl. alacsony, magas, közepes mértékű kibocsátáshoz tartozó) forgatókönyveket definiáltak, melyeket az éghajlati modellek az üvegházgázok koncentrációjának különböző jövőbeli idősoraként vesznek figyelembe.

E bizonytalanságokból adódóan a jövőbeli éghajlatváltozás leírását nem alapozhatjuk egyetlen modellkísérlet eredményére, hanem több modellel és kibocsátási forgatókönyvvel végrehajtott éghajlati szimuláció eredményeinek együttes vizsgálatára van szükség.

Módszertan

Budapest éghajlatváltozással szembeni kitettségét modelleredmények napi adatain alapuló éghajlati indikátorok segítségével adjuk meg, melyeket az 1. táblázat foglal össze. Az elemzést a 2031–2060 időszakra végeztük el a különböző szimulációk eredménye alapján számított, 30-éves átlagos jövőbeli éves változásértékek megadásával, referenciaként az 1971–2000 időszak (szintén szimulációk alapján számított) átlagértékeit tekintve. A csapadékkal kapcsolatos indikátorok esetében 4 modellkísérlet, az Országos Meteorológiai Szolgálat által futtatott ALADIN-Climate és REMO regionális klímamodellek kétféle – egy magas (RCP8.5) és egy

közepes (RCP4.5) antropogén kibocsátáshoz tartozó – forgatókönyvvel készített kísérleteinek eredményeit használtuk fel. A hőmérséklettel és a szélsőséggel kapcsolatos indikátorok számítása 2 modellkísérlet, a SURFEX felszíni modell kétféle forgatókönyvvel készített szimulációinak eredményei alapján történt. A 4 regionális modellszimuláció megjeleníti a regionális modellt, a határfeltételek és a forgatókönyv megválasztásából eredő bizonytalanságot, míg a 2 felszíni modellszimuláció a forgatókönyv-választás hatását mutatja. Részletes információk a modellkísérletek jellemzőiről a 2. táblázatban található.

1. táblázat: A kiszámított éghajlati indikátorok definíciója és az adatok forrása.

Változó	Definíció	Felhasznált modellek
Elsőfokú hőségriadós nap	A napi középhőmérséklet eléri a 25 °C-ot	SURFEX
Másodfokú hőségriadós napok	A napi átlaghőmérséklet legalább 3 napig eléri a 27 °C-ot	
Trópusi éjszaka	A napi minimumhőmérséklet meghaladja a 20 °C-ot	
Viharos nap	A napi maximális szélsőség eléri a napi maximális szélsőség 1971–2000 időszakra számított 90. percentiliséét	
Egymást követő száraz napok maximális száma	Az a leghosszabb időszak, amíg a napi csapadékösszeg 1 mm alatti	ALADIN-Climate REMO
Nagy csapadékú nap	A napi csapadékösszeg 10 mm feletti	
Extrém nagy csapadékú nap	A napi csapadékösszeg 20 mm feletti	

A regionális klímamodell szimulációk horizontális rácsfelbontása 0,1 fok, amivel Budapest területét egy 5 rácspontból álló tartománnyal reprezentáltuk (l. például az 5. ábrán). A SURFEX horizontális rácsfelbontása 0,01 fok, s a vizsgálatához azokat a rácspontokat tekintettük, melyek Budapest közigazgatási határán belül helyezkednek el (l. például a 3. ábrán). A rácspontok mindkét esetben a horizontális ráscellák közepén helyezkednek el.

2. táblázat: A vizsgálatban felhasznált modellkísérletek jellemzői.

Modell	Modell típusa	Határfeltétel	Kibocsátási forgatókönyv	Felbontás
ALADIN-Climate REMO	Regionális klímamodell	CNRM-CM5	RCP4.5 és RCP8.5	0,1 fok
		MPI-ESM-LR		
SURFEX	Felszíni modell	ALADIN-Climate 5.2	RCP4.5 és RCP8.5	0,01 fok

Eredmények

A hőmérsékleti indexeknél nagyobb mértékű változást mutatnak az RCP4.5 forgatókönyvvel készült kísérlet eredményei és akár 4-10 nap eltérés is van a két szimuláció eredményei között.

Az **elsőfokú hőségriadós napok éves száma** a SURFEX modell RCP4.5-ös scenáriója alapján 12-24 nappal, míg az RCP8.5-ös scenárióval végzett szimulációval 7-14 nappal növekedhet. A legnagyobb mértékű növekedés a pesti oldalon várható mindkét scenárióval, a legkisebb

pedig a Budai-hegyek térségében, habár utóbbi struktúra az RCP8.5 scenárió esetén nem jelenik meg. Ezenkívül a Duna hűtő hatása helyenként érvényesülhet.

A **másodfokú hőségriadós napok éves száma** is növekedést mutat a jövőben. Az átlagos kibocsátáshoz tartozó forgatókönyvvel készült szimuláció alapján 10-24 napos növekedés, míg a magas kibocsátással számoló forgatókönyvvel 7-14 napos növekedés várható. A változás térbeli elrendeződése az elsőfokú hóhullámos napok számához hasonló képet mutat azzal a különbséggel, hogy ebben az esetben az RCP8.5-tel készült szimulációnál is megfigyelhető a Budai-hegyek feletti kisebb mértékű melegedés.

A **trópusi éjszakák éves száma** esetén 12-26 napos növekedés várható. A legsűrűbb, 5. kerületi városrészben azonban mindkét forgatókönyv alapján a jövőben a forró éjszakák száma kevésbé emelkedik a város többi, alacsonyán fekvő részéhez képest. Azt azonban fontos kiemelni, hogy a város legmelegebb magja a jövőben is belváros lesz.

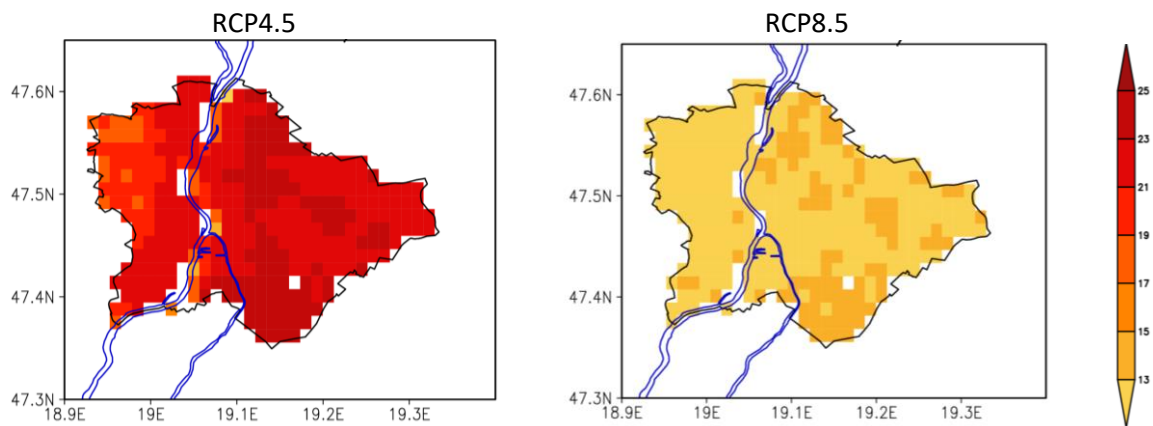
A **viharos napok éves száma** 3-11 nappal növekedhet az átlagos kibocsátáshoz tartozó scenárió alapján, míg 4-13 nappal az RCP8.5 scenárióval. Az eredmények alapján a dél-budapesti és keleti kerületekben várható a legnagyobb növekedés.

Az **egymást követő száraz napok éves maximális száma** az 1971–2000 időszakban Budapesten területi és időbeli átlagban kb. évi 32 nap* volt. Nem egyértelmű a változás iránya 2031–2060-ra. Az ALADIN modell RCP4.5 scenáriója a száraz időszakok hosszabbodását jelzi, míg a többi modellszimuláció csökkenést. Az RCP4.5-ös szimulációk alapján tehát (-2)–1 nap közötti változás lehetséges, míg a pesszimista forgatókönyvvel futtatott szimulációk alapján 2–4 napos csökkenés.

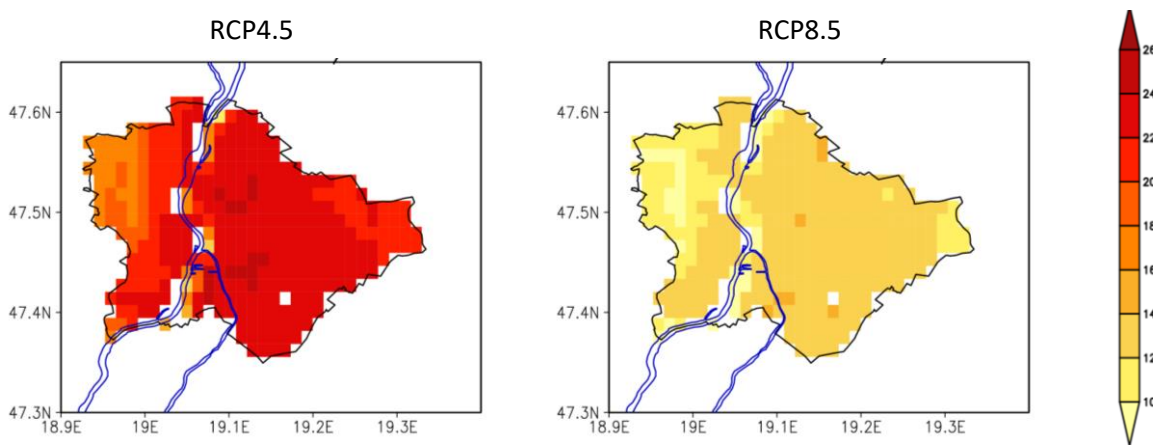
10 mm feletti csapadék az 1971–2000 időszakban Budapesten területi és időbeli átlagban kb. évi 16 napon* hullott. 2031–2060-ra az átlagos kibocsátással számoló modelleredmények alapján 2-3 nap, míg az RCP8.5 forgatókönyvvel 2-4 nap növekedésre számíthatunk. A legnagyobb mértékű növekedést a négy szimuláció közül az ALADIN modell RCP8.5-ös forgatókönyve mutatja, míg a legkisebb mértékűt az ugyanezen modell átlagos scenáriójával készített projekció.

20 mm feletti csapadék az 1971–2000 időszakban Budapesten területi és időbeli átlagban kb. évi 4 napon* hullott. Nem egyértelmű a változás iránya 2031–2060-ra. Az ALADIN modell RCP4.5-ös szimulációja az ezen napok minimális, 30-éves átlagban legfeljebb 1.5-napos csökkenését jelzi, míg a másik három szimuláció legfeljebb 1 napos növekedését.

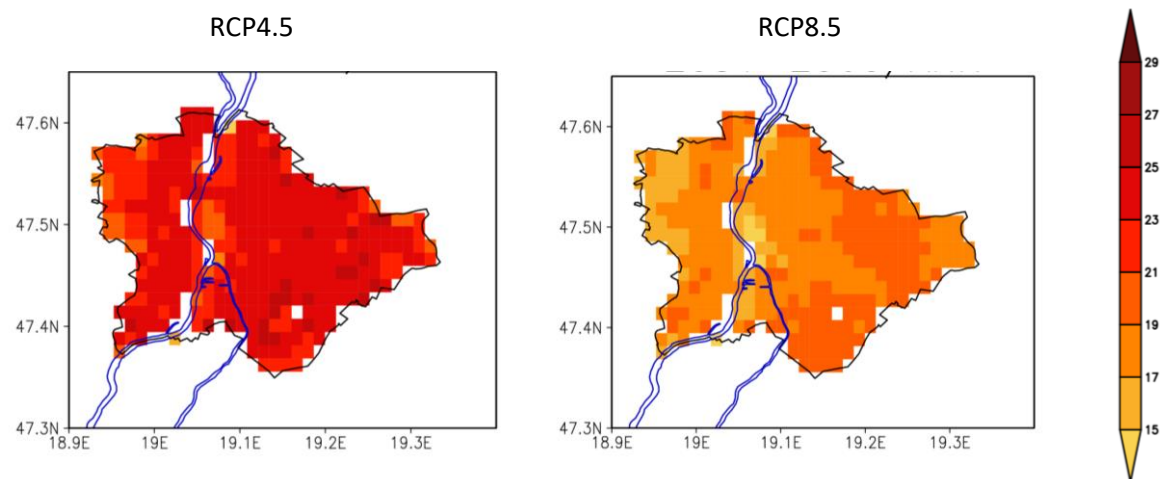
* A magyarországi állomási adatsorokból előállított 0,1-fokos felbontású rácsponti megfigyelési adatbázis adatai alapján.



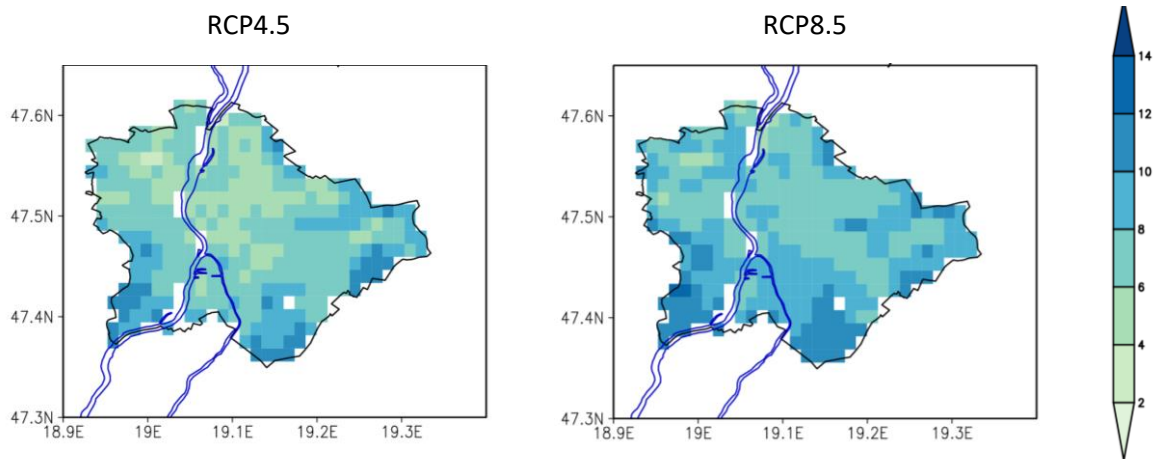
1. ábra: Elsőfokú hőségriadós napok számának változása 2031–2060-ra 1971–2000-hez képest Budapestre a SURFEX felszíni modell RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvvel készült eredményei alapján.



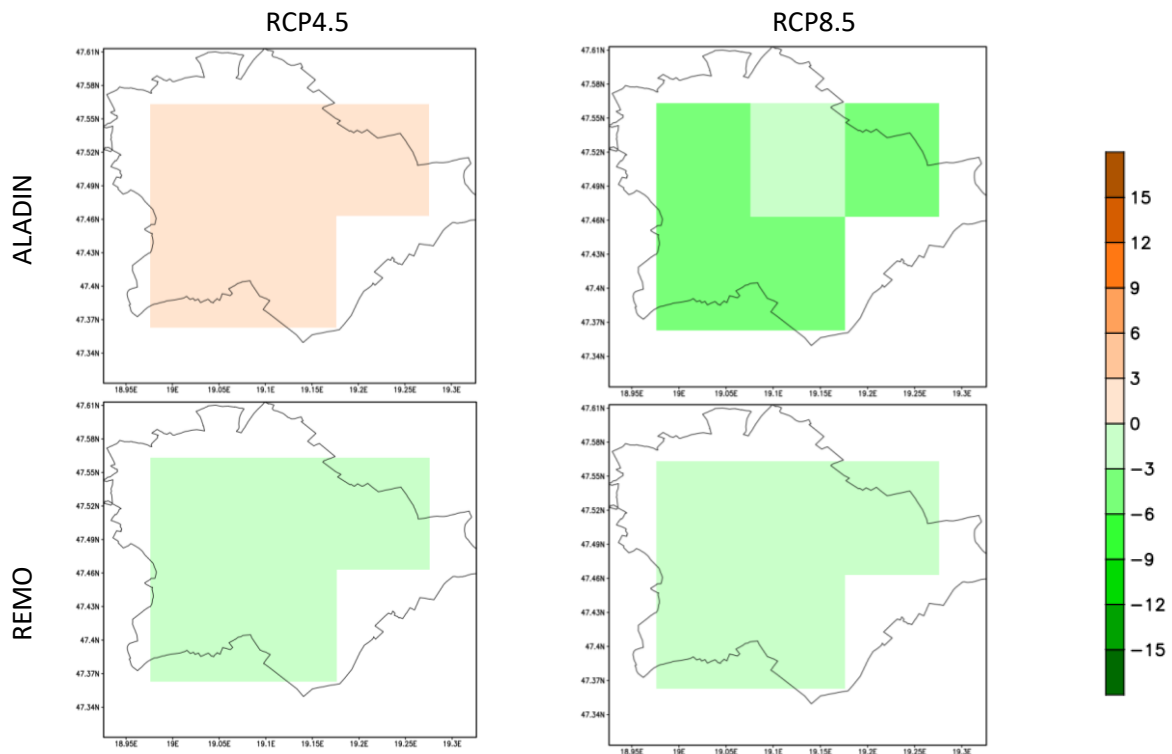
2. ábra: Másodfokú hőségriadós napok számának változása 2031–2060-ra 1971–2000-hez képest Budapestre a SURFEX felszíni modell RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvvel készült eredményei alapján.



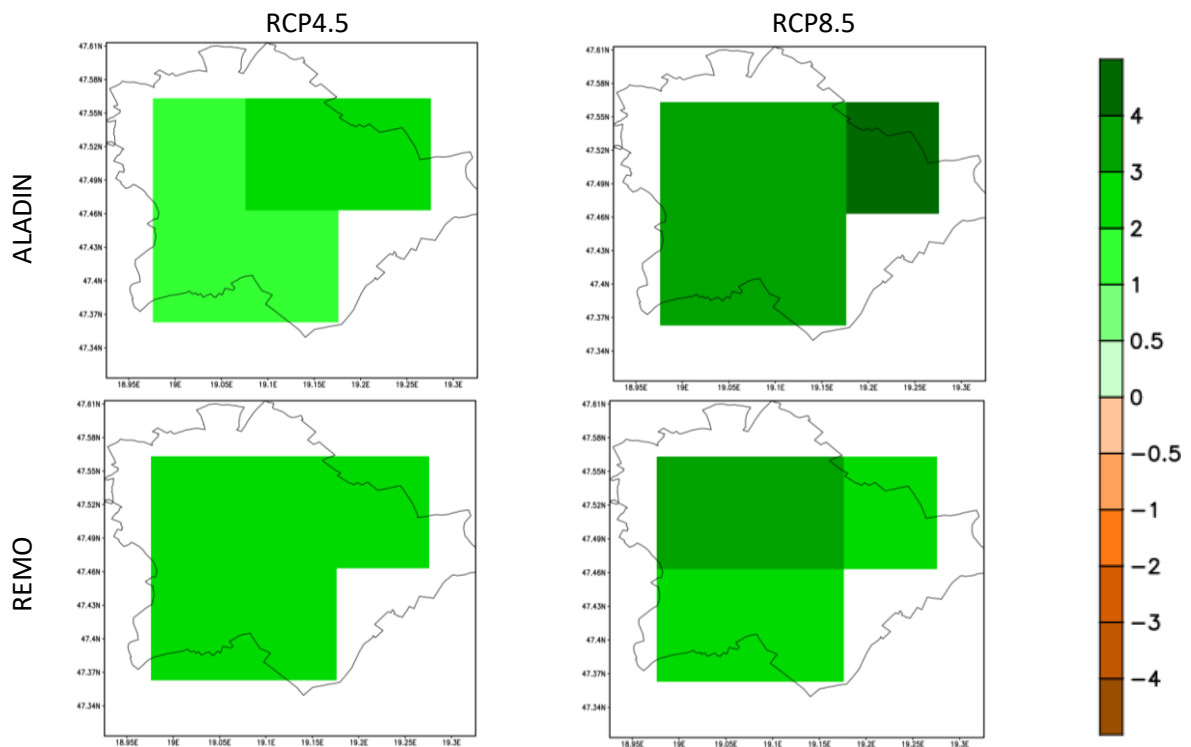
3. ábra: Trópusi éjszakák számának változása 2031–2060-ra 1971–2000-hez képest Budapestre a SURFEX felszíni modell RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvvel készült eredményei alapján.



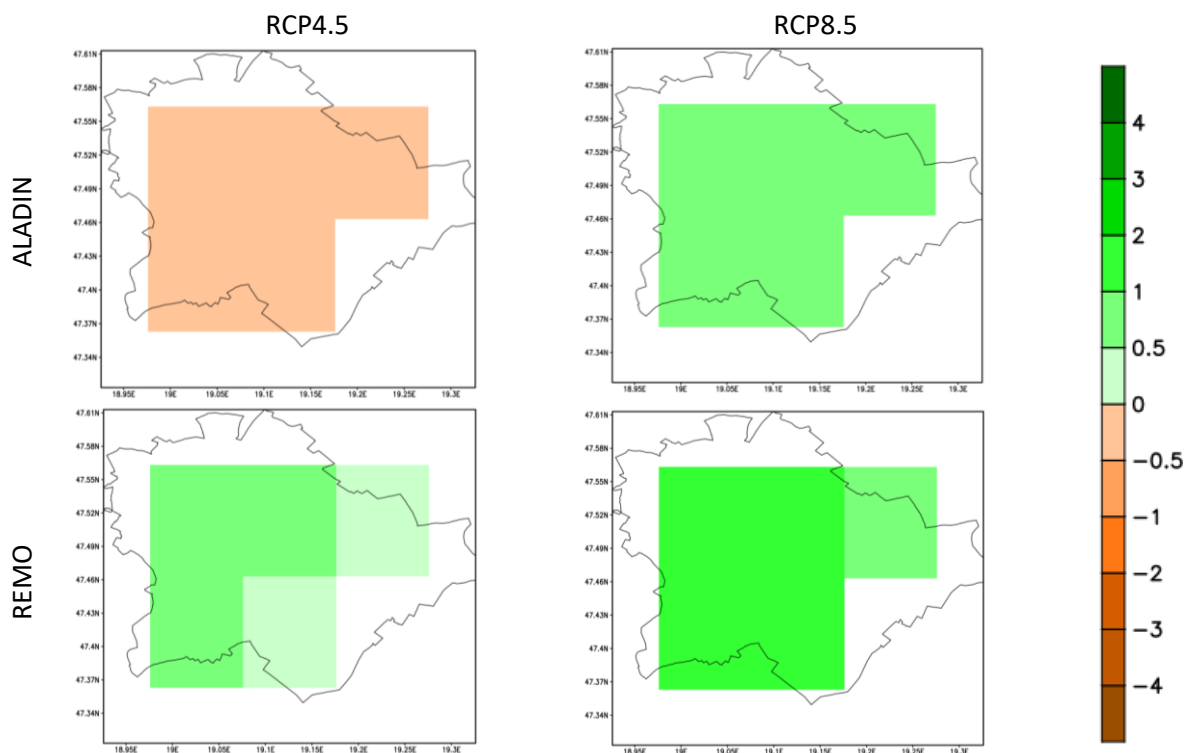
4. ábra: Viharos napok számának változása 2031–2060-ra 1971–2000-hez képest Budapestre a SURFEX felszíni modell RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvvel készült eredményei alapján.



5. ábra: Egymást követő száraz napok maximális éves számának átlagos változása 2031–2060-ra 1971–2000-hez képest Budapestre az ALADIN és a REMO regionális klímamodellek RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvvel készült eredményei alapján.



6. ábra: 10 mm-t meghaladó csapadékú napok éves számának változása 2031–2060-ra 1971–2000-hez képest Budapestre az ALADIN és a REMO regionális klímamodellek RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvvel készült eredményei alapján.



7. ábra: 20 mm-t meghaladó csapadékú napok éves számának változása 2031–2060-ra 1971–2000-hez képest Budapestre az ALADIN és a REMO regionális klímamodellek RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvvel készült eredményei alapján.

Irodalmi áttekintés a városi hőtöbblet mérséklésének lehetőségeiről

Városi Eső (LIFE in Runoff) projekt beszámoló

Készítette: Allaga-Zsebeházi Gabriella

Felelős: Szépszó Gabriella

Országos Meteorológiai Szolgálat

2023. február

Tartalom

1. Bevezetés	3
2. A városi hősziget mérséklésének lehetőségei szakirodalmi áttekintés alapján	4
2.1. Fizikai, geometriai tulajdonságok módosítása	4
2.2. Zöld- és kék infrastruktúra	6
2.3. Egyéb vizsgálatok	7
3. Összefoglalás	10
4. Irodalomjegyzék	11

1. Bevezetés

A városok éghajlati jellemzője több tekintetben eltér a természetes területek éghajlatától, ami fizikai és morfológiai tulajdonságaik különbségeivel magyarázható. Ezek ugyanis sűrűn beépítettek, nagy a burkolt felületek aránya, és az épületek nagy hőkapacitással bírnak, aminek következtében energiaháztartásuk jelentősen eltér a természetes területekhez képest.

Napközben az épületek, burkolt felszínek nagyobb mértékben elnyelik és elraktározzák a Naptól érkező sugárzást, mint a vegetációval borított földfelszín. A sűrű beépítésnek köszönhetően az épületek által kibocsátott hőszállítás egy része csapdázódik, nem tudja a város légterét elhagyni. A raktározott többletenergia következtében a délutáni, esti órákban a városi légkör lassabban hűl a vidéki felszínekhez képest, aminek következtében úgynevezett éjszakai *városi hősziget* (angolul Urban Heat Island, UHI; Oke, 1982) jelenség alakul ki. A legnagyobb hőmérséklet-különbség napnyugta után 3-5 órával jelentkezik. Nappal ugyanakkor a burkolt városi felszínek felszíni tulajdonságaik és a párologtatás hiánya miatt jóval nagyobb mértékben melegedhetnek fel, mint a vegetációval borított, városon kívüli területek. Ezt a jelenséget felszíni városi hőszigetnek (angolul Surface Urban Heat Island, SUHI) nevezzük, s jellemzően nappal, a legmelegebb órákban éri el maximumát. A felszínhőmérséklet erősen függ a felszínborítástól, emiatt a SUHI térben jóval változékonyabb az éjszakai UHI-nál.

Tehát a város légtere alapvetően melegebb, szárazabb és szennyezettebb a természetes területekhez képest. Az IPCC ötödik helyzetértékelő jelentése (Revi *et al.*, 2014) szerint ezek a tényezők az éghajlatváltozás bizonyos jellemzőivel kölcsönhatva világszinten növelik a városok éghajlatváltozásnak való kitettségét, sérülékenységét, a város méretétől, gazdasági helyzetétől és elhelyezkedésétől függő mértékben. A probléma súlyosságát az is fokozza, hogy ma a Föld lakosságának több mint a fele városokban él, és ez az arány a jövőben várhatóan növekedni fog. A nagyarányú városi lakosság Magyarországon is megfigyelhető, hiszen csak Budapest lakossága az ország lakosságának egyhatodát teszi ki (Finta *et al.*, 2013). Mindezek szükségessé teszik a városi folyamatok, környezeti változások és a gyorsuló éghajlatváltozás kölcsönhatásának becslését, ezzel objektív módon segítve a városi tervezőket és a döntéshozókat a felkészülésben és a megfelelő stratégiák megalkotásában.

Egy ország vagy régió éghajlatának jövőben várható változásáról számszerű információval a *regionális éghajlati modellek* szolgálnak. Ma ezek a modellek jellemzően 10-25 km-es rácsfelbontásúak, tehát egy több száz km² kiterjedésű várost (pl. Budapestet) mindössze néhány (3-5) rácsponttal fednek le. A feladat szempontjából elégtelen felbontás mellett a városi felszín és a városi légkör fizikai folyamatainak leírása jelenleg egyáltalán nem, vagy csak nagyfokú közelítéssel van figyelembe véve (pl. a város sziklatömbbel reprezentált). A regionális klíma-modellek tehát önmagukban ma még nem alkalmazhatók arra, hogy részletes információt adjanak az éghajlatváltozás városi hatásairól. A regionális klímamodellek-eredmények finomítására ún. *felszíni modelleket* alkalmazunk, amelyek a légkör egészében zajló mozgások helyett mindössze a felszín és az azzal közvetlen kapcsolatban álló (néhány 10 méteres kiterjedésű) légköri réteg közötti folyamatokat írják le, a regionális klímamodellek által leírt háttérklímát pedig kényszerként veszik figyelembe. Emiatt számítási igényük a klímamodellekénél jóval kisebb, ami finomabb (km-es skálájú) rácsfelbontást és tagoltabb városi felszín beépítését, továbbá a fizikai folyamatok részletesebb leírását engedi meg.

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál az éghajlatváltozás városi hatásainak vizsgálátára a SURFEX (Surface Externalisé, Masson *et al.*, 2013) felszíni modellt alkalmazzuk, mely-

nek első változatát a francia meteorológiai szolgálatnál fejlesztették ki. Az elmúlt években felhasználva az ALADIN-Climate regionális éghajlati modell eredményeit, városi éghajlatváltozási kísérleteket hajtottunk végre a SURFEX-szel 1 km-es horizontális felbontást alkalmazva Budapestre és Szegedre. A szimulációkat két antropogén forgatókönyvvel (a közepes és a magas kibocsátást feltételező RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvekkel) végeztük el az 1970–2100 időszakra vonatkozóan (Allaga-Zsebeházi, 2021).

A Városi Eső LIFE projekt keretében a SURFEX-szel érzékenységi vizsgálatokat végzünk a városi hőöbbllet mérséklésének lehetőségeire vonatkozóan. A vizsgálatok célja, hogy számszerű és objektív ajánlással szolgáljon a döntéshozóknak a különböző adaptációs lehetőségek várható éghajlati hatásairól városi és kerületi szinten. A felszíni jellemzők különböző változtatásával 10 éves kísérleteket fogunk készíteni Budapestre 1 km-es horizontális felbontást alkalmazva. Az eredményeket a már rendelkezésre álló városi éghajlati projekciókkal vetjük össze.

A kísérletek elvégzése előtt szakirodalmi áttekintést végeztünk arra vonatkozóan, hogy milyen városi hőöbbllet-mérséklési lehetőségek léteznek és azok milyen eredménnyel, milyen körülmények között alkalmazhatók. Jelen beszámoló célja, hogy összefoglalja a vizsgált szakmai cikkek legfontosabb megállapításait, aminek alapján meghatározzuk a projekt keretében végrehajtandó érzékenységvizsgálatok főbb irányait.

2. A városi hősziget mérséklésének lehetőségei szakirodalmi áttekintés alapján

A vizsgált szakirodalmak alapján a hősziget alapvetően három, jól elkülöníthető megoldással mérsékelhető. Az első módszert nevezhetjük *szürke módszernek*, mely az épületek, burkolatok fizikai tulajdonságainak módosítását és az épületek, utcák geometriai megváltoztatását foglalja magába. A második módszer a *zöld infrastruktúra*, ami magában foglalja a városi vegetációt, azaz a városi parkokat, útmenti fákat, zöld tetőket, vagy akár a zöld falakat is beleértve. A harmadik módszer a *kék infrastruktúra* a vízfelületek (tavak, folyók) együttesét takarja. A beszámoló során alapvetően eszerint a hármas tagolás szerint mutatjuk be a legfontosabb megállapításokat. Ezenkívül a fejezet végén a projektben tervezett érzékenységvizsgálatokhoz hasonló modellezésre alapuló néhány hazai és nemzetközi tanulmány eredményeit is ismertetjük.

2.1. Fizikai, geometriai tulajdonságok módosítása

A szürke megoldások közül elsőként a reflektív felületek alkalmazásával foglalkozunk. Ez azon a fizikai törvényszerűségeen alapszik, hogy a reflektív felületek (pl. fehér burkolatok) a beérkező napsugárzás nagyobb részét verik vissza, mint a sötétebb színű felszínek. Egy felület sugárzás visszaverő képességét *albedónak* nevezzük, ami egy 0-tól 1-ig terjedő mértékegység nélküli szám. Minél fehérebb a felszín, az albedó értéke annál nagyobb. Az albedó növelését alkalmazhatjuk a tetőkön, vagy az emberi élettér közvetlen környezetében a járdákon, utakon is.

Akbari et al. (2016) alapján az ún. hideg tetők (amit elérhetünk fehérre festéssel, fehér anyaggal történő borítással) jelentősen csökkentik az épületek energiafelhasználását, amivel kevesebb légkondicionáló általi hűtésre lehet szükség. A kutatók megemlítik a módszer hátrányát is, mely szerint a reflektív tetők télen némileg növelik a fűtési igényt, ugyanakkor kiemelik, hogy ez a többletenergia-igény jóval kisebb mértékű, mint amit nyáron megtakaríthatunk. New Yorkra vonatkozó szimulációs eredmények alapján ezzel a módszerrel a napi átlaghőmérséklet nyáron 0,18-0,36 °C-kal csökkenthető, míg a napi maximumhőmérsékletben 0,3-0,6 °C-

os mérséklés érhető el (*Han et al.*, 2022). A legnagyobb változás azonban a tetőhőmérsékletben mutatkozhat meg, melynek felszíni hőmérséklete 20 °C-kal lehet kisebb.

Reflektív felszíneket az útburkolaton is alkalmazhatunk. A világos felszínborítás nemcsak a beérkező sugárzás nagy részét veri vissza, de a felszín által elnyelt sugárzás nagy részét is kibocsátja, ezáltal a burkolat kevésbé melegszik. Mivel a felszín kevésbé melegszik fel, a városi hősziget-intenzitás is mérséklődik (*Han et al.*, 2022). A felszíni albedó 0,1-ről 0,5-re növelése 10,3 °C-kal csökkentheti a felszíni hőmérsékletet. Ez 0,5-1 °C-os léghőmérséklet-csökkenést eredményezhet. Reflektív útburkolatok alkalmazása azonban különösen akkor hatékony, ha viszonylag széles utcák és nem túl magas épületek jellemzik a városrészt (ez az ún. H/W arányszámmal számszerűsíthető, ahol H az épületmagasság és W az utcaszélesség). Ekkor ugyanis a napsugárzás nagyobb része eléri az utat, járdát.

Torontóban azzal, hogy az aszfaltot betonra cserélték, nyáron, délben 8 °C-os felszíni hőmérséklet-csökkenést értek el (*Hayes et al.*, 2022). A kutatók azonban kiemelték a világos útburkolatok egy jelentős hátrányát, miszerint a felszínről visszavert sugárzás elnyelődhet az épületekben, ezáltal melegítve azok belterét. Továbbá az utcán tartózkodó emberek számára erős napsütésben zavaró, balesetveszélyes lehet a fehér felület.

A szakirodalom alapján tiszta, fehér felület albedója kb. 0,85 (viszonyításképp a friss hó albedója 0,8-0,9 körüli). Az ilyen magas reflektivitású anyagok például a mészkő, vagy a titán-dioxiddal bevont felület. Meg kell említeni azonban, hogy a felület koszolódhat, a festés lekophat, ami csökkenti a sugárzás visszaverő képességet.

A szürke megoldások másik lehetséges módszere az utcák, épületek geometriai tulajdonságainak megváltoztatása. A városklimatológiában ezt a már korábban említett H/W aránnyal, valamint az égboltláthatóság tényezővel számszerűsíthetjük. Az égboltláthatóság (angolul Sky View Factor, SVF) kifejezi, hogy az utcaszintről felfelé tekintve a félgömb alakú térnek mekkora része fedett épületekkel és egyéb tárgyakkal, objektumokkal. *Balany et al.* (2020) és *Han et al.* (2022) is megemlíti, hogy a H/W arány növelésével, illetve az SVF csökkentésével – tehát magas épületek és szűk utcák esetén – csökkenthető a nappali hőmérséklet azon elv alapján, hogy a sugárzás nem ér le a járdaszintre. Jól ismert azonban, hogy a sűrű beépítettség az éjszakai hősziget-intenzitás mértékét nagyban meghatározza.

Végül *Qi et al.* (2019) vizsgálták az albedó változtatás éghajlat- és évszakfüggő hatását. Alapvetően megállapították, hogy ezt a módszert a kompakt városokban és a száraz klímájú helyeken érdemes alkalmazni, ahol a zöld felületek növelése nem vagy korlátozottan lehetséges. (A zöld felületeknek ugyanis nagy tér és elegendő nedvesség kell, hogy kifejtsék pozitív hatásukat.) Az albedó megváltoztatása némileg eltérő mértékű hősziget-mérséklő hatást fejt ki különböző éghajlaton. 0,05-ről 0,1-re növelt albedó nagyobb hőmérséklet-csökkenést okozott a mediterrán régióban, mint nedves-szubtrópusi és szemi-arid éghajlaton. A reflektív anyagok határfoka évszakfüggő is lehet. Hong Kong esetében ugyanolyan mértékű albedó növelés nyáron 1 °C-os, télen 0,5 °C-os hőmérséklet-csökkenést okozott. Athénban a „hideg felszínek” általi átlagos maximális hőmérséklet-csökkenés 6,5 °C volt nyáron és mindössze 0,5 °C télen. Az évszakfüggő hatás oka az évszakonként eltérő sugárzásmennyiség lehet. Ugyanezzel magyarázható az is, hogy a hűtő hatás nappal nagyobb, mint éjszaka: például mértéke nappal elérheti a 20 °C-ot, míg éjszaka mindössze 4 °C körüli. Megjegyezzük, hogy az albedó esetében nem csak a felület színe számít. Ugyanis a sima felület némileg nagyobb albedót eredményez az érdeshez képest, ugyanígy az anyagvastagság és az anyagtípus is meghatározó. Utóbbi esetben a fehér betonnak magasabb az albedója, mint a fehér aszfaltnak.

2.2. Zöld- és kék infrastruktúra

A zöld- és kék infrastruktúra magában foglalja a (zöld) növényzet és vízfelület (pl. tavak, csatornák) összességét a városon belül. A növényzet esetén számos megoldás létezhet: parkok létesítése, fák ültetése az utcák mentén, füvesítés, zöld tetők létrehozása, falak növényzettel való borítása. A zöld felület növelését a szakirodalom elsősorban mitigációs lehetőségként határozza meg. A vegetáció két módon képes csökkenteni a városi hőmérsékletet. Egyrészt fák esetében az árnyékoló hatás révén, másrészt a növényzet párologtató hatása (ún. evapotranszpiráció) miatti hűtés következtében.

A beszámolóban elsősorban a horizontális vegetációval foglalkozunk, tehát az utca- és a tetőszinten telepített növényzettel, a zöld falakkal nem. A fű, bokor és fa közül a legnagyobb hőmérsékletcsökkentő hatása a fáknak van, míg a legkisebb pozitív hatást a füvesítéssel érhetjük el (*Balany et al.*, 2020). A füvesítés gyakorlatilag csak a felszínhőmérséklet csökkentésében játszik szerepet, a léghőmérsékletre és ezáltal a humánkomfort javítására nincs hatással. A fákkal kapcsolatban elmondhatjuk, hogy egy önálló fa csak lokálisan, azaz közvetlen környezetében képes hűteni a hőmérsékletet, míg egy városi park egy meghatározott sugarú körben a parkon kívül is érezhető hatást (*Akbari et al.*, 2016). Ennek mértéke azonban függ a park méretétől, elhelyezkedésétől és a vegetáció típusától is. Szingapúrban például az év legforróbb időszakában a parkokban átlagosan 7,7-12 °C-kal hűvösebb a levegő, mint a környező területeken (*Balany et al.*, 2020). Sőt, a parkok a hőmérséklet-szabályozás mellett csökkentik a város zajterhelését, légszennyezést, a növényzet megköti a talajt, ezáltal csökken az erózió és végül növelik a városlakók komfortérzetét is. *Akbari et al.* (2016) szerint a városi parkok átlagosan 0,94 °C-kal hűvösebbek környezetüknél, nappal pedig 0,3-7 °C lehet a különbség. *Balany et al.* (2020) hasonló eredményt kapott Manchesterre, ahol megállapította, hogy amennyiben a városban 5%-kal növelik a kifejlett lombhullató erdők arányát, azzal 1 °C-os hőmérséklet-csökkenés érhető el. Meleg klímájú területeken a fák által biztosított árnyékos területen 3,3 °C-kal lehet alacsonyabb a hőmérséklet a napsütötte területekhez képest (*Han et al.*, 2022). Hong Kongban például 25%-ról 40%-ra növelték a fák arányát a városban, ami 0,5 °C-os nappali átlaghőmérséklet-csökkenéshez vezetett. Japánban 20%-os növelés a legmelegebb nyári időszakban 2,27 °C-os hűlést eredményezett. A sűrűn beépített belvárosi területekre telepített fák nagyobb mérséklő hatást képesek kifejteni a nyílt vagy szeles területekhez képest. Továbbá a nagy koronájú, sűrű fás területek azáltal, hogy kevesebb sugárzást engednek le a talajra, hatékonyabbak, mint a kevésbé lombos, ritka fák. Ugyanakkor az 5-15 m magas sűrű fák csökkenthetik az átszellőzést, ami ronthatja a komfortérzetet.

Akbari et al. (2016) alapján a hideg (világos) tetők és útburkolat, valamint a városi vegetáció együttes alkalmazása nemcsak az épületek energia-felhasználását csökkentik, hanem javítják a városlakók komfortérzetét és mérséklik a szmogos helyzetek kialakulásának esélyét is. A kombinált mitigációs megoldásokkal forró, nyári napon a város felszínhőmérséklete 3 °C-kal csökkenthető.

A horizontálisan telepített zöld infrastruktúra másik fajtája a zöldtető. Ezeket alapvetően két csoportra oszthatjuk, extenzív és intenzív zöld tetőkre. Intenzív esetben a tetőt vastag talajréteg borítja, amelyre fák, bokrok telepíthetők. Ez a típusú zöld tető öntözést és jelentős mértékű gondozást igényel. Az extenzív típus esetén a tetőt sekély talajréteg fedi, amelyre inkább csak fű telepíthető. Nem igényel sok vizet és sok törődést. A két típus közül a nagyobb hőmérséklet-csökkenést az intenzív zöld tetőkkel érhetjük el. Ugyanakkor a hűtés mértékét befolyásolja a talajréteg vastagsága, a növényzet típusa és a vegetáció mennyisége is. Továbbá az épületek

energiaigényére pozitív hatással vannak, csökkentik a hűtés mértékét és javítják a levegőminőséget.

A zöld tetők esetében a legnagyobb kérdés, hogy valóban van-e pozitív hatásuk az utcaszinten. A mitigációs hatásban az épületmagasság nagy szerepet játszik. *Han et al.* (2022) alapján, 10 m-es magasságú épület esetén 2 m-es szintben 0,4-0,8 °C-os hűlés érhető el. Ezenkívül az utcaszélesség is meghatározó, ugyanis szűk utcák esetén, ahol a H/W arány meghaladja az 1-et a zöld tetők nem hatékonyak (*Jamei et al.*, 2021). *Jamei et al.* (2021) továbbá vizsgálta a zöld tetők mitigációs hatását különböző éghajlaton. Nyáron a felszínhőmérséklet-csökkenés a meleg-nedves klímájú területeken volt a legnagyobb, közepes volt a mérsékelt övi klímában és elenyésző a forró-száraz klímában. Ellenben a tetőszinti léghőmérséklet a forró-száraz klímában csökkent a legnagyobb mértékben és a meleg-nedves klímában a legkevésbé. Az intenzív és extenzív zöld tetők közül az intenzív csökkentette jobban a hőmérsékletet mind a városlakók, mind a tetőszinten. Berlieni és madridi példa alapján intenzív zöldtetővel az utcaszinten 0,2-1 °C-kal csökkenthető a hőmérséklet.

A kék infrastruktúrával kapcsolatban jóval kevesebb kutatási eredményt találtunk, mint a vegetáció esetén. Meleg időszakban a vízfelület egyrészt párologtató hatása miatt, másrészt a víz nagy hőkapacitása miatt képes mérsékelni az UHI-t. Utóbbi azt jelenti, hogy a napsugárzás nagy része elnyelődik a vízben, ezáltal a vízfelület kevésbé melegszik például egy aszfalthoz képest, de az elnyelt energiát a víz éjszaka kibocsáthatja, ezáltal növelheti az éjszakai UHI-t. Ez a hatás tehát elsősorban a nappali hőmérséklet-csökkentésben játszhat szerepet. A vízfelszín a környező beépített területekhez képest 2-6 °C-kal lehet hűvösebb. A hőmérséklet-különbség hűtő hatást fejthet ki a környező beépített területekre is, 1,2 °C-kal csökkentheti azok hőmérsékletét. A vízfelület hűtő hatása függ a széliránytól is, ugyanis a széliránnyal ellentétes oldalon a hűtő hatás jelentősebb mértékű (*Han et al.*, 2020). *Yu et al.* (2020) alapján a vízfelület csökkenti a napi hőingást a nagy hőkapacitás miatt. Egy nagyobb kiterjedésű vízfelület nagyobb mértékű hőmérséklet-csökkentő hatást fejthet ki, mint több, elszórt kisebb vízfelület. Továbbá a hőmérsékletcsökkentő hatás annál nagyobb, minél alacsonyabb szélességen fekszik a város. A kék infrastruktúra mérséklő hatása alapvetően nappal nagyobb, mint éjszaka.

2.3. Egyéb vizsgálatok

Végezetül modell szimulációkon alapuló vizsgálatok átfogó eredményeit mutatjuk be a városi hősziget mérséklésére vonatkozóan.

Vigué et al. (2020) a hőhullámokkal kapcsolatos adaptációs lehetőségeket vizsgálta úgy, hogy lehetőleg a légkondicionáló berendezések (AC) használatát csökkentsék. A vizsgálati terület Párizs volt. A légkondíciók hátránya ugyanis, hogy növelik az energiafogyasztást, ami ha nem megújuló energiaforrásból származik, akkor a kibocsátás csökkentésre negatívan hathat, valamint a külső berendezések növelik az utcai levegő hőmérsékletét, ezáltal tovább fokozhatják a hőhullám intenzitását. A kutatásban olyan alternatív alkalmazkodási lehetőségeket vizsgáltak, mint az épületek hőszigetelése, utca- és városi szinten több városi park létesítése, város-tervezés (pl. épületek elhelyezkedése, beépítettség mértéke). A vizsgálatokhoz egy épületenergetikai modul is tartalmazó városklíma modellt, valamint egy földhasználat és közlekedés modellt használtak. Eredményeik alapján, ha a hőhullám intenzitásának mérséklésére AC-t használtak (az épület légtérét 23 °C-ra hűtötték energiahatékony készülékekkel), akkor hőhullám idején 81%-kal több energiát használtak fel a jelenlegi irodaépületek és lakóházak által hőhullám idején fogyasztott energiához képest. Ez tehát egy rendkívül nagy mértékű többletenergia-

igényt jelent. Az AC hatására a termálkomfort is romlott a városban, ugyanis az erős hőstressznek való kitettség időtartama átlagosan 20 perccel nőtt. Ez a hatás különösen negatívan érinti az utcán dolgozó embereket, vagy akik nem rendelkeznek légkondicionáló berendezéssel.

A kutatók ezt követően arra a kérdésre keresték a választ, hogy az AC használat kiváltható-e más adaptációs lehetőségekkel. 3 intézkedést vizsgáltak: zöld infrastruktúra, szürke infrastruktúra, viselkedés. A hatásokat városi, épület és háztartás szinten vizsgálták. A zöld infrastruktúra azt jelentette, hogy a városi terület 10%-át zöldre cserélték és öntözést alkalmaztak. A szürke infrastruktúra forgatókönyvvel a belvárosi történelmi épületeken kívül minden épületet szigeteltek és a tetőkön és falakon reflektív (magas albedójú) anyagokat használtak. A viselkedés szcenárió azt jelentette, hogy 23 °C-os beltéri hőmérséklet helyett a lakóépületeket 28 °C-ra, az irodákat 26 °C-ra hűtötték légkondicionáló berendezésekkel. Amikor mind a három stratégiát alkalmazták, az éjszakai léghőmérséklet 4,2 °C-kal csökkent. Azonban az AC használat kiváltására a zöld és szürke infrastruktúra bevezetése nem elég, ugyanis az épületen belül az erős hőstressznek való kitettséget 1,5 órával csökkentette, de így is kb. 6 óra volt. Viszont abban az esetben, amikor a fenti módszereket az AC-vel együtt használták, az energiafelhasználás kb. 60%-kal csökkent. Az egyes stratégiák hatását külön-külön vizsgálva arra az eredményre jutottak, hogy a parkok és zöldfelületek növelése önmagában csekély mértékben csökkentette az AC általi energiafogyasztást és a zöld felületek párologtató hatása nagymértékben függ az öntözéstől. A pozitív hatás eléréséhez szükséges vízmennyiség összemérhető volt a Szajna folyó átlagos várható vízhozamával 2100-ban. A hőszigetelés 17%-kal csökkentette az AC miatti energiafogyasztást. A kevesebb AC használat miatt és a reflektív felületek miatt a városi léghőmérséklet csökkent. A legnagyobb hatása a viselkedés-változásnak volt, ami 43%-kal csökkentette az AC-k energiafogyasztását a magasabb hőmérsékletre való beállítás miatt.

De Munck et al. (2018) a városi zöldfelület növelésének hatását modellezte Párizsra extrém hőség idején. A vizsgálatban 25, 50 és 75%-kal növelték a városi zöldfelület arányát, valamint vizsgálták az alacsony növényzet, az alacsony növényzet és lombhullató fák kombinációját, a zöld tetőket és mindezek kombinációját is. Eredményeik alapján a 2 m-es hőmérsékletre a zöld tetők alkalmazása csak akkor volt hatással, ha azokat öntözték, de akkor is 0,25-0,5 °C-os hőmérséklet-csökkenést értek el. Amennyiben a felszínen növelték a zöldfelületet, az éjszakai UHI-t annál jobban tudták csökkenteni, minél nagyobb arányú volt a zöld felület és a növényzetben minél nagyobb arányú volt a fás vegetáció. 3 °C-os hőmérséklet-csökkenést értek el úgy, hogy 33%-kal növelték a városi zöldfelület-arányt és zöld tetőket alkalmaztak, amit öntöztek. A modelleredmények alapján a kutatók megállapították, hogy ha fákat telepítenek, akkor kismértékű zöldfelület-arány növelésével ugyanolyan mérséklő hatás érhető el, mint nagy zöldfelület-arány növeléssel, de alacsony vegetációval.

Daniel et al. (2018) modell szimulációkkal Párizsra vonatkozóan vizsgálta az öntözés hatását városi zöld területeken, utakon és járdákon hóhullámos időszakban. Megállapították, hogy ha a zöld területeket nem öntözték, akkor azok hőmérséklet-csökkentő hatása elenyésző volt. Ha korlátlan mennyiségben állt rendelkezésre öntözővíz a növényzet számára, akkor nappal a külvárosi területeken 3,8 °C-os hőmérséklet-csökkenést értek el, míg 1 °C-ot a belvárosban (mivel ott kevesebb a vegetáció). Realisztikus öntözővíz mennyiséggel a külvárosban 1 °C-kal csökkent a hőmérséklet, míg a belvárosban így nem volt számottevő változás. Éjszaka a külvárosi területeken az öntözés 0,5-1,5 °C-os hőmérséklet-csökkenést eredményezett. Az utak és járdák öntözése a belvárosban érte el a legnagyobb pozitív hatást, ott 1 °C-os hűlést okozott. A teljes városra vonatkozóan a legjobb eredményt a kombinált módszerrel érték el, amikor mind

a városi zöldfelületek öntözését, mint a belső területeken az utakat, járdákat locsolták. A belvárosban a legnagyobb változás nappal (1,1 °C), míg a külvárosban éjszaka (2,6 °C) következett be.

Zuvela-Aloise et al. (2017) Bécsre vonatkozóan vizsgálta a zöld tetők és az albedó növelésének hatását a nyári UHI mérséklésében. Az albedó növelését a tetőkre alkalmazták, a jelenlegi állapothoz képest +0,25-tel és +0,5-tel növelték. Az albedó mérsékelt növelése (a megnövelt érték 0,45 volt) 0,25 °C-kal csökkentette az átlagos nyári hőmérsékletet a belvárosban, míg a jelentősebb fehérítés (0,7-es albedó) 0,5 °C-os hűlést eredményezett. Az eredmények alapján megállapították, hogy az albedó 0,1-gyel való növelése 0,1 °C-kal csökkenti az átlagos léghőmérsékletet. Továbbá megállapították, hogy az albedó növelés összemérhető hatást fejthet ki a zöld tetők alkalmazásával. Realisztikusan nézve azonban a magas albedójú tető jelentősen megváltoztatná a városképet (Bécsben jellemzően piros cserepek fedik az épületeket), ami nem feltétlenül engedélyezett, különösen a történelmi belvárosban. Ezenkívül a zöld tetők is csak meghatározott tetőtípusokra telepíthetők (elsősorban lapos tetőkre), amelyekből éppen a legmelegebb belvárosban van a legkevesebb. A legerősebb hőmérséklet-csökkentő hatást a zöld tetők és a reflektív tetők együttes alkalmazásával érték el, és pl. a zöld tetők beépíthetőségi kapacitásának 50%-a mellett alkalmazott reflektív tetők egy realisztikus megoldást jelenthet.

Szintén *Zuvela-Aloise et al. (2016)* a zöld és kék infrastruktúra hatását vizsgálta az UHI mérséklésében Bécsben. A szimulációs időszak 1981–2010 volt. A modellkísérleteket először idealizált esetre végezték el (meleg, száraz időjárási helyzetre), ezenkívül vizsgálták a szeles és a szélcsendes helyzetek hatását is. 4 parkot, illetve vízfelületet helyeztek el egymástól egyenlő, 1 km-es távolságra a lakóövezetben és a belvárosban. A legnagyobb hőmérséklet-csökkenést mind a lakóövezetben, mind a belvárosban az esti órákban érték el és a pozitív hatás szélcsendes helyzetben nagyobb volt, mint szeles időben. A két eltérő beépítettségű terület közül a nagyobb hőmérséklet-csökkenés a belvárosban jelentkezett és itt a park nagyobb sugarú körére terjedt ki a hűtő hatás. A tavak, amennyiben hőmérsékletük 18 °C volt, nappal markánsabb hőmérséklet-csökkenést eredményeztek mind a változás mértékében, mind kiterjedésében a parkokhoz képest. Az esti órákban a 18 °C-os tavak hasonló hűtőhatást eredményeztek, mint a parkok szélcsendes időben, szeles időben viszont a tavak felülmúlták a parkok hatását. Amennyiben 23 °C-os volt a tóhőmérséklet, szélcsendes időben éjszaka, a lakóövezetbeli léghőmérséklet alacsonyabb lehet a tóhőmérsékletnél, tehát ilyen helyzetben a tó inkább melegíti a környező területet. A hőmérséklet-csökkenés mértékét befolyásolja a környező beépítettség, az uralkodó szélirány és a napszak is. Minél nagyobb a hőmérsékleti gradiens a zöld, illetve kék felület és a város között, a mitigációs hatás annál nagyobb. Az idealizált kísérleteket követően realisztikus kísérleteket is végeztek. A kísérletek során azt találták, hogy ha a zöld területeket egyenletesen osztják el a városban, pl. közlekedési folyosók menték, akkor a zöld területeknek a környező beépített területekre kicsi hűtő hatásuk van. Jelentősebb változáshoz nagymértékű zöldítésre van szükség. Amennyiben az épületsűrűséget 10%-kal, a járdákat 20%-kal csökkentik, a vegetációt és vízfelületet pedig 20%-kal növelik, akkor átlagosan 10 nappal csökkenthető a nyári napok száma. Ahogy korábban is említettük, a vízfelületeknek hátránya azonban az lehet, hogy az esti órákban melegíthetik a közvetlen környezetüket.

Lemonsu et al. (2015) különböző városfejlődési scenáriók hatását vizsgálta a városi hősziget Párizsban. Egy földhasználat és közlekedési modell segítségével különböző városfejlődési scenáriókat határoztak meg 2100-ra (a város népessége mindegyik esetben azonos volt):

- város szétterjed: a múltbeli városterjedési folyamat tovább folytatódik a jövőben, azonban a populáció növekedése jelentősen csökken, a közlekedés hatékonysága viszont jelentősen nő.

- kompakt város: 2020-tól kezdve újabb zöld területet nem építenek be, új épületek a már beépített területre építhetők, ezáltal az épületsűrűség nő.
- 10, 30, 50% zöld: a 2020-as helyzethez képest a beépített területeken 10, 30, 50%-kal növelik a zöld területek arányát. Ennek eredményeképpen a városi terület térben kiterjed.

A kísérletben a hőhullámokra koncentráltak, ezért egy változó intenzitású és hosszúságú hőhullámok sorozatát alkották meg légköri modellezéssel. Ezeket az idealizált hőhullámos helyzeteket felhasználva városi szimulációkat készítettek Párizsra a TEB városi felszíni modellel. Az eredmények alapján a kompakt város scenárió esetén a belváros volt a leginkább kitett terület a hőhullám kockázatának. Ez a megállapítás azonban leginkább az éjszakára érvényes, nappal ugyanis a sűrű beépítettség miatti árnyékoló hatás következtében nem volt olyan erős az UHI más scenáriókhoz képest. A zöld scenárió esetén ugyan nappal nagyobb volt az UHI intenzitás, mint a kompakt scenárióval, azonban ha azt vizsgálták, hogy a lakosság mekkora hányada van kitéve erős hőstressznek, akkor a zöld scenárió jobban teljesített.

Gál et al. (2021) különböző zöldítési forgatókönyveket vizsgált Szegedre. 4 scenáriót határoztak meg: sűrű fák, elszórt fák, fű telepítése és ezek kombinációja. A vizsgált időszak 1981–2010, 2021–2050 és 2071–2100 volt. A szimulációkat a MUKLIMO_3 modellel végezték és a jövőbeli emberi tevékenység bizonytalanságának figyelembe vételére két antropogén forgatókönyvet (a közepes kibocsátást feltételező RCP4.5 és a magas kibocsátást feltételező RCP8.5 forgatókönyveket) alkalmaztak. Az eredmények alapján nappal a legnagyobb hőmérséklet-csökkentő hatásuk a városi parkoknak volt sűrű fákkal, ezt követte az elszórt fák telepítése, ami ugyanannyival csökkentette a forró napok számát, mint a fű telepítése. A mitigációs hatás azonban szinte csak a zöld területen és annak közvetlen környezetében érvényesült. Éjszaka a sűrű fák gyakorlatilag az egész város felett csökkentik a hőszigetet és a szórt fák is hasonló pozitív hatással bírtak. Ezekhez képest a fűvel való borítás esetén a mérséklő hatás kisebb mértékű volt. Ezenkívül a fű borítás esetén a belvárosban némileg melegebb területek is jelentkeztek, amit azzal magyaráztak, hogy a fű alatti talaj nappal jobban felmelegedett a többi vegetáció-típushoz képest. A hőmérséklet-csökkentő hatás minden esetben nappal nagyobb volt, mint éjszaka. Az eredmények alapján a kutatók azt is megállapították, hogy minél nagyobb a városi park, annál nagyobb a környezetére kifejtett hűtőhatás. 2071–2100-ban az RCP8.5 forgatókönyv alapján elvégzett kísérletek szerint a hűtőhatás mértéke növekszik és a park is tágabb környezetére fejt ki mérséklő hatást a korábbi időszakhoz képest. A fű esetén éjszaka különösen nagy a hűtött környezet sugara. Azonban ha a város körül telepítettek sűrű erdőt, az nem segítette a hőmérséklet-csökkenést valószínűleg az átszellőzés blokkolása miatt, ami a város környékén és a belső területeken is melegítő hatást eredményezett.

3. Összefoglalás

A beszámolóban a városi hősziget-intenzitás mérséklési lehetőségeit mutattuk be a szakirodalomban talált eredmények alapján. A módszereket három csoportra osztottuk: 1) szürke megoldások (tetők, utcák fehérre vagy világos színűre festése, utcák geometriai tulajdonságainak megváltoztatása) 2-3) zöld- és kék infrastruktúra (városi zöld és kék felületek arányának növelése). A megállapítások alapján a fizikai-geometriai megoldások (albedó növelés, H/W arány növelés, SVF csökkentés) elsősorban ott fejtik ki a legnagyobb hatást, ahol nagy a nappali besugárzás és a növényzet öntözése kevésbé megoldható. Főként a nappali UHI csökkentésére alkalmazhatók. A szűkebb utcák a nappali pozitív hatás mellett éjszaka rosszabb komfortérzetet nyújtanak azáltal, hogy kevésbé képesek az utca légtérét lehűteni.

Han et al. (2022) alapján a mérsékelt övi éghajlaton a legjobb UHI mitigációs stratégia a zöld és kék-felületek növelése. A zöld infrastruktúra közül a parkoknak és fás vegetációnak különösen jelentős a hőmérséklet-csökkentő hatása, amit a park mérete, a fás vegetáció aránya és az öntözés mértéke tovább fokozhat. A zöldtetőknek ugyanakkor kérdéses a hatása az utca-szinten, különösen a magas épületek és a szűk utcák esetén. A modell szimulációs vizsgálatok eredményei alapján a zöld infrastruktúra pozitív hatását az öntözés mértéke nagyban befolyásolja. A vízfelületek elsősorban a nappali városi hőtöbbletet képesek mérsékelni, de a hatás mértékében fontos tényező a tó hőmérséklete. Hátrányuk azonban, hogy éjszaka a víz nagy hőkapacitása miatt fűtő hatásuk is lehet.

Az eredmények alapján feltehetően nem lehet teljes mértékben kiváltani a nem természet-alapú UHI-mitigációs eszközöket (elsősorban a légkondicionáló berendezést), de azokat a természet-alapú megoldásokkal ötvözve jelentős pozitív hatás érhető el az energiafelhasználás terén, ami az éghajlatváltozás mérséklése szempontjából kiemelt feladat.

4. Irodalomjegyzék

- Akbari, H., Cartalis, C., Kolokotsa, D., Muscio, A., Pisello, A.L., Rossi, F., Santamouris, M., Synnef, A., Wong, N.H., and Zinzi, M., 2015:* Local climate change and urban heat island mitigation techniques – the state of the art. *Journal of civil engineering and management*, 22, 1–16. doi:10.3846/13923730.2015.1111934
- Allaga-Zsebeházi, G., 2021:* Az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvekkel készített SURFEX városi éghajlatváltozási kísérletek kiértékelése. *KlimAdat (KEHOP-1.1.0) projekt beszámoló*, 25 p.
- Balany, F., Ng, A.W., Muttill, N., Muthukumar, S., and Wong, M.S., 2020:* Green Infrastructure as an Urban Heat Island Mitigation Strategy—A Review. *Water*, 12, 3577. doi:10.3390/w12123577
- Daniel, M., Lemonsu, A., and Viguié, V., 2018:* Role of watering practices in large-scale urban planning strategies to face the heat-wave risk in future climate. *Urban Climate*, 23, 287–308. doi:10.1016/j.uclim.2016.11.001
- de Munck, C., Lemonsu, A., Masson, V., Le Bras, J., and Bonhomme, M., 2018:* Evaluating the impacts of greening scenarios on thermal comfort and energy and water consumptions for adapting Paris city to climate change. *Urban Climate*, 23, 260–286. doi:10.1016/j.uclim.2017.01.003
- Finta, S., Maczák, J., Kovács, B., Mátrai, R., 2013:* Budapest 2030; Hosszú távú városfejlesztési koncepció. Budapest Főváros Önkormányzat, Budapest, 218 p.
- Gál, T., Mahó, S.I., Skarbit, N., and Unger, J., 2021:* Numerical modelling for analysis of the effect of different urban green spaces on urban heat load patterns in the present and in the future. *Computers, Environment and Urban Systems*, 87, 101600. doi:10.1016/j.compen-vurbsys.2021.101600
- Han, D., Zhang, T., Qin, Y., Tan, Y., and Liu, J., 2022:* A comparative review on the mitigation strategies of urban heat island (UHI): a pathway for sustainable urban development. *Climate and Development*, 1–25. doi:10.1080/17565529.2022.2092051
- Hayes, A.T., Jandaghian, Z., Lacasse, M.A., Gaur, A., Lu, H., Laouadi, A., Ge, H., and Wang, L., 2022:* Nature-Based Solutions (NBSs) to Mitigate Urban Heat Island (UHI) Effects in Canadian Cities. *Buildings*, 12, 925. doi:10.3390/buildings12070925

- Jamei, E., Chau, H.W., Seyedmahmoudian, M., and Stojcevski, A., 2021: Review on the cooling potential of green roofs in different climates. *Science of The Total Environment*, 791, 148407. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.148407
- Lemonsu, A., Vigié, V., Daniel, M., and Masson, V., 2015: Vulnerability to heat waves: Impact of urban expansion scenarios on urban heat island and heat stress in Paris (France). *Urban Climate*, 14, Part 4, 586–605. doi:10.1016/j.uclim.2015.10.007
- Masson, V., 2003: A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models. *Boundary-Layer Meteorology*, 94, 357–397. doi:10.1023/A:1002463829265
- Oke, T.R., 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, 1–24. doi:10.1002/qj.49710845502
- Revi, A., Satterthwaite, D.E., Aragón-Durand, F., Corfee-Morlot, J., Kiunsi, R.B.R., Pelling, M., Roberts, D.C., Solecki, W., 2014: Urban areas. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 535–612.
- Qui, J.-D., He, B.-J., Wang, M., Zhu, J., and Fu, W.-C., 2019: Do grey infrastructures always elevate urban temperature? No, utilizing grey infrastructures to mitigate urban heat island effects. *Sustainable Cities and Society*, 46, 101392. doi:10.1016/j.scs.2018.12.020
- Vigié, V., Lemonsu, A., Hallegatte, S., Beaulant, A.-L., Marchadier, C., Masson, V., Pigeon, G., and Salagnac, J.-L., 2020: Early adaptation to heat waves and future reduction of air-conditioning energy use in Paris. *Environmental Research Letters*, 15, 075006. doi:10.1088/1748-9326/ab6a24
- Žuvela-Aloise, M., Koch, R., Buchholz, S., and Früh, B., 2016: Modelling the potential of green and blue infrastructure to reduce urban heat load in the city of Vienna. *Climatic Change*, 135, 425–438. doi:10.1007/s10584-016-1596-2
- Žuvela-Aloise, M., Andre, K., Schwaiger, H., Bird, D.N., and Gallaun, H., 2017: Modelling reduction of urban heat load in Vienna by modifying surface properties of roofs. *Theoretical and Applied Climatology*. doi:10.1007/s00704-016-2024-2

LIFE in Runoff

Kiegészítés az Érzékenységvizsgálat az albedó változtatásra kiértékeléshez

A bioklíma index: AT (Apparent Temperature – látszólagos hőmérséklet) bioklíma index a levegő hőmérsékletét, nedvességtartalmát és a szélsébséget veszi figyelembe. Az emberi test által érzékelt hőmérsékletet adja meg °C mértékegységben az alábbi képlet alapján

$$AT = T_a + 0,33e - 0,7ws - 4,$$

ahol T_a a 2-méteres léghőmérséklet [°C], e a vízgőznyomás [hPa] és ws a 10-méteres szélsébség [m/s].

Főbb eredmények:

- A tető és az út albedójának megváltoztatása sem volt nagy hatással az AT indexre: éves átlagban 0,01–0,05 °C csökkenés érhető el.
- A melegebb hónapokban (áprilistól augusztusig) érhető el a nagyobb csökkenés:
 - az út albedó változtatásának hatására 0,05–0,1 °C
 - a tető albedó változtatásának hatására 0,05–0,1 °C.
- Az RCP4.5 és az RCP8.5 forgatókönyvek között nincs jelentős eltérés.
- Összehasonlítva az albedó-változtatásnak a léghőmérsékletre gyakorolt hatásával az AT-ben kisebb változást okozott a maximum-hőmérséklethez képest (a melegebb hónapokban 0,1–0,2 °C-kal), és nagyobb változást a minimum-hőmérséklethez képest (0,05 °C-kal).

Érzékenységvizsgálat a zöldterület arányának megváltoztatására

Megállapítások

Városi Eső (LIFE in Runoff) projekt beszámoló

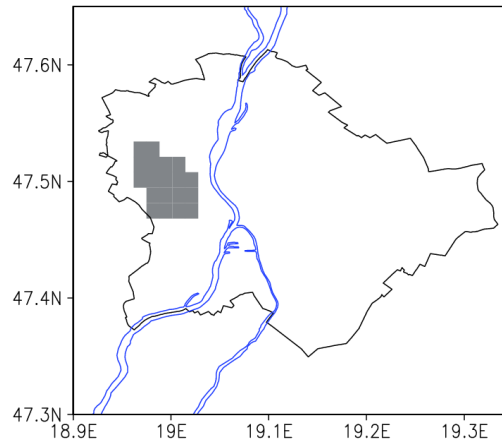
Készítette: Zempléni Zsuzsanna

Felelős: Szépszó Gabriella

Országos Meteorológiai Szolgálat

2023. szeptember

Vizsgált terület: XII. kerület azon része, amely felszínborítása a SURFEX-ben 100 % külvárosi (temperate suburban) kategória.



Két kísérlet (RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyv alapján):

1. kísérlet (nature): a természetes felszín arányának növelése
2. kísérlet (urban): a városi felszín arányának növelése

A következő táblázat a vizsgált rácspontokban a városi és természetes felszín arányát tartalmazza:

	városi felszín aránya	természetes felszín aránya
referencia	60 %	40 %
nature	30 %	70 %
urban	90 %	10 %

A kísérletekben eltérő a **növényzet típusa:**

- referencia: 50 % fa, 50 % park
- nature: 100 % fa (5 m magas fák, vastagabb gyökérszóna) – nagy vegetációs hatás
- urban: 100 % park – kis vegetációs hatás

Szimulációs időszak: 2045. április–október

Vizsgált változók:

- napi átlaghőmérséklet havi átlaga
- napi minimum-hőmérséklet havi átlaga
- napi maximum-hőmérséklet havi átlaga
- látszólagos hőmérséklet havi átlaga (hőmérséklet, nedvesség és szélsébség alapján számítva)
- elsőfokú hóhullámos napok száma (napi átlaghőmérséklet eléri a 25 °C-ot)

- másodfokú hőhullámos napok száma (napi átlaghőmérséklet legalább 3 egymást követő napon eléri a 25 °C-ot)
- trópusi éjszakák száma (napi minimum-hőmérséklet meghaladja a 20 °C-ot)

Eredmények:

Átlaghőmérséklet:

- A zöldterület arányának növelésével az átlagos 2-méteres hőmérséklet csökkent, csökkentésével pedig növekedett. A vizsgált területre vonatkozó átlag mindkét esetben 0,1–0,6 °C hőmérsékletváltozást jelentett (a legtöbb esetben 0,4 °C alatt).
- Adott rácspontban a csökkenés maximuma $\approx 0,8$ °C, a növekedés ≈ 1 °C.
- A legkisebb változást július-augusztus hónapokban okozta, a legnagyobb változást pedig a vizsgált időszak elején és végén (de elsősorban áprilisban).

Minimum-hőmérséklet:

- A minimum-hőmérséklet esetében volt elérhető a legnagyobb változás.
- A különbségek időbeli jellemzői (időszak elején nagyobb változások) hasonló az átlaghőmérsékletéhez.
- A zöldterület-arány növelésének hatására a minimum-hőmérséklet csökkenés területi átlaga 0,3–1,2 °C, a legtöbb esetben 0,6 °C alatti.
- A zöldterület-arány csökkentésének a hatására a minimum-hőmérséklet növekedés 0,6–1,2 °C.
- Adott rácspontban a csökkenés és a növekedés maximuma is $\approx 1,4$ °C.

Maximum-hőmérséklet:

- A zöldterület-arány változtatásnak a maximum-hőmérsékletre volt a legkisebb hatása: 0–0,3 °C különbség (legnagyobb esetben 0,2 °C alatt).
- A maximum-hőmérséklet esetén nem látszik egyértelműen a zöldterület növelésének hőmérsékletcsökkentő (és csökkentésének hőmérsékletnövelő) hatása.
- Adott rácspontban a csökkenés és a növekedés maximuma is $\approx 0,4$ °C.

Látszólagos hőmérséklet:

- A látszólagos hőmérséklet az átlaghőmérséklet felhasználásával került számításra, amelynek hatása megmutatkozik az értékekben: hasonló a változások nagysága, illetve

az időbeli jellemzők. A térbeli jellemzők is hasonlóak az átlaghőmérsékletre, de attól egyes rácspontokban akár 0,5 °C-kal is eltérhet.

- A zöldterület-arány növelésének hatására a látszólagos hőmérséklet csökkenés területi átlaga 0,1–0,6 °C, a legtöbb esetben 0,2 °C alatti.
- A zöldterület-arány csökkentésének hatására a látszólagos hőmérséklet növekedés 0,2–0,6 °C.
- Adott rácspontban a csökkenés és a növekedés maximuma is $\approx 1,4$ °C.

Elsőfokú hóhullámos napok száma:

- A zöldterület növelésének hatására a csökkenés: 1,8–2,2 nap (5–7 %).
- A zöldterület csökkentésének hatására a növekedés: 3,0–4,4 nap (7–16 %).
- Adott rácspontban a csökkenés maximuma 5 nap, a növekedésé 6 nap.

Másodfokú hóhullámos napok száma:

- A zöldterület növelésének hatására a csökkenés: 1,0–2,3 nap (2–10 %).
- A zöldterület csökkentésének hatására a növekedés: 2,4–5,6 nap (6–25 %).
- Adott rácspontban a csökkenés maximuma 7 nap, a növekedésé 9 nap.

Trópusi éjszakák száma:

- A zöldterület-arány változtatásának a minimum-hőmérsékletre volt a legnagyobb hatása, ezért ebben az indexben okozta a legnagyobb különbséget.
- A zöldterület növelésének hatására a csökkenés: 3,9 nap (8–11 %).
- A zöldterület csökkentésének hatására a növekedés: 6,8–7,9 nap (16–19 %).
- Adott rácspontban a csökkenés maximuma 8 nap, a növekedésé 12 nap.

Összegzés:

- A zöldterület-arány változtatásnak a legnagyobb hatása a minimum-hőmérsékletre volt (0,3–1,2 °C), és így az ebből származtatott trópusi éjszakák éghajlati indexre (≈ 4 –8 nap).
- A legkisebb változás a maximum-hőmérséklet értékekben volt elérhető (0–0,3 °C).
- A látszólagos hőmérséklet jellemzői hasonlóak az átlaghőmérsékletre, az elérhető változás nagysága: 0,1–0,6 °C.
- Az elsőfokú illetve a másodfokú hóhullámos napok száma 1–2 nappal csökkent a nature (1.), és 3–4 illetve 2–5 nappal növekedett az urban (2.) kísérletben.
- A két forgatókönyv között nem észlelhető szisztematikus különbség.

Érzékenységvizsgálat öntözés és locsolás napon belüli időpontjára

Megállapítások

Városi Eső (LIFE in Runoff) projekt beszámoló

Készítette: Zempléni Zsuzsanna

Felelős: Szépszó Gabriella

HungaroMet Zrt.

2024. február

Szimulációs időszak (az RCP8.5 forgatókönyv alapján):

1. időszak (meleg): 2045.08.18. – 2045.08.21.
2. időszak (mérsékelt): 2045.08.01. – 2045.08.04.

Mindkét időszak csapadékmentes, a meleg időszak átlagos hőmérséklete: 24,53 °C, a mérsékelt időszaké: 22,92 °C.

Kísérletek:

Mindkét időszakra vonatkozóan 8 kísérlet készült el: az időszak minden napján a locsolás és az öntözés 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 és 21 UTC-kor történt. Adott időponthoz tartozó locsolás/öntözés során 3 óra alatt összesen 1 mm víz kilocsolása történt meg, egyenletes intenzitással, minden rácspontban.

Vizsgált változók:

A modellben egy 1 × 1 km-es rácspont 4 felszín típusra osztható: természet, város, tó, tenger. A 4 alrészben különböző modulok számítják a folyamatokat, és az állapotváltozók értékét. A teljes rácspontra vonatkozó átlagos értékek pedig ezek területi arányával súlyozott összegeként állnak elő (2 m-es hőmérséklet, látszólagos hőmérséklet). A városi almodul számítja a 2 m-es hőmérsékletet a városi felszín felett, az utak és a tetők hőmérsékletét, a természet almodul pedig a 2 m-es hőmérsékletet a természetes felszín felett.

- 2 m-es hőmérséklet:
 - napi minimum-hőmérséklet teljes időszakra vonatkozó átlaga
 - napi maximum-hőmérséklet teljes időszakra vonatkozó átlaga
 - napi átlaghőmérséklet teljes időszakra vonatkozó átlaga
- látszólagos hőmérséklet teljes időszakra vonatkozó átlaga (hőmérséklet, nedvesség és szélsebesség alapján számítva)
- 2 m-es hőmérséklet a természetes felszín felett:
 - napi minimum-hőmérséklet teljes időszakra vonatkozó átlaga természetes területekre
 - napi maximum-hőmérséklet teljes időszakra vonatkozó átlaga természetes területekre
 - napi átlaghőmérséklet teljes időszakra vonatkozó átlaga természetes területekre
- 2 m-es hőmérséklet a városi felszín felett:
 - napi minimum-hőmérséklet teljes időszakra vonatkozó átlaga városi területekre
 - napi maximum-hőmérséklet teljes időszakra vonatkozó átlaga városi területekre

- napi átlaghőmérséklet teljes időszakra vonatkozó átlaga városi területekre
- utak felszíni hőmérséklete:
 - utak napi minimum-hőmérséklet teljes időszakra vonatkozó átlaga
 - utak napi maximum-hőmérséklet teljes időszakra vonatkozó átlaga
 - utak napi átlaghőmérséklet teljes időszakra vonatkozó átlaga
- tetők felszíni hőmérséklete:
 - tetők napi minimum-hőmérséklet teljes időszakra vonatkozó átlaga
 - tetők napi maximum-hőmérséklet teljes időszakra vonatkozó átlaga
 - tetők napi átlaghőmérséklet teljes időszakra vonatkozó átlaga

Eredmények:

Az eredmények minden esetben a referenciaszimulációtól (megegyező beállításokkal, locsolás/öntözés nélkül) való eltérésre vonatkoznak: új kísérlet – referencia. A változások intervalluma a teljes 4 napos időszakra és a teljes területre vonatkozó átlag.

Az eredmények alapján a locsolási/öntözési időpontok két csoportra oszthatók hatás szempontjából:

- nappali locsolás/öntözés: 6, 9, 12 és 15 UTC
- éjszakai locsolás/öntözés: 0, 3, 18 és 21 UTC

Nappali locsolás/öntözés esetén a folyamatnak közvetlen, nagymértékű felszíni és kisebb 2 m-es hőmérséklet-csökkentő hatása van, amely nem marad fenn hosszútávon.

Az éjszakai locsolás/öntözés ezzel szemben elnyújtottan fejti ki a hatását, amely mértéke kisebb, mint a nappali locsolás/öntözés esetén. Az értékek 15 UTC-re állnak vissza a referencia szintjére, addig mind a felszíni, mind a 2 m-es hőmérsékleti értékek a referencia alatt futnak.

A meleg és a mérsékelt kísérletek között nem volt jelentős eltérés, azonban a legtöbb esetben a meleg kísérletben volt nagyobb a különbség a referenciától (elsősorban a minimum-hőmérsékletek tekintetében).

Minimum-hőmérséklet:

- A minimum-hőmérséklet teljes területre vonatkoztatott átlagának csökkenése a referenciához képest: 0,05–0,29 °C
- Természetes területek esetén: 0,08–0,55 °C
- Városi területek esetén: 0,01–0,03 °C

- A minimum-hőmérsékletekben éjszakai locsolás/öntözés esetén lehetett elérni nagyobb csökkenést.

Maximum-hőmérséklet:

- A maximum-hőmérséklet teljes területre vonatkoztatott átlagának csökkenése a referenciához képest: 0,01–0,7 °C
- Természetes területek esetén: 0,01–0,73 °C
- Városi területek esetén: 0,01–0,44 °C
- A maximum-hőmérsékletekben csak akkor volt elérhető számottevő csökkenés (> 0,15 °C), ha a locsolás/öntözés közvetlenül a maximum-hőmérséklet beállta előtt történik (12 UTC).

Átlaghőmérséklet:

- A hőmérséklet-csökkenés teljes területre vonatkoztatott átlaga a referenciához képest: 0,16–0,31 °C.
- Természetes területek esetén: 0,22–0,52 °C
- Városi területek esetén: 0,07–0,1 °C
- Az átlaghőmérséklet-csökkenés mértéke nem tér el az éjszakai és a nappali locsolás/öntözés esetén.

Látszólagos hőmérséklet:

- A látszólagos hőmérséklet csökkenése a teljes területre vonatkoztatva a referenciához képest: 0–0,11 °C
- A látszólagos hőmérsékletben a legkisebb csökkenés 15, 18, és 21 UTC-kor történő locsolás/öntözés esetén alakult ki.

Utak felszínének minimum-hőmérséklete:

- Az utak minimum-hőmérsékletének csökkenése a referenciához képest: 0,26–1,95 °C.
- Az utak felszínére vonatkozó minimum-hőmérsékletekben éjszakai locsolás/öntözés esetén lehetett elérni nagyobb csökkenést.

Utak felszínének maximum-hőmérséklete:

- Az utak maximum-hőmérsékletének csökkenése a referenciához képest: 0,15–5,55 °C.

- A maximum-hőmérsékletekben csak akkor volt elérhető számottevő csökkenés ($> 1,6 \text{ }^\circ\text{C}$), ha a locsolás/öntözés a maximum-hőmérséklet beállta előtt történik (18, 21, 0, 3, 6, 9 UTC).

Utak felszínének átlaghőmérséklete:

- Az utak átlaghőmérsékletének csökkenése a referenciához képest: $1,52\text{--}2,09 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Az utak felszínére vonatkozó átlaghőmérséklet-csökkenés mértéke nem tér el az éjszakai és a nappali locsolás/öntözés esetén.

Tetők felszínének minimum-hőmérséklete:

- A tetők minimum-hőmérsékletének csökkenése a referenciához képest: $0,02\text{--}0,96 \text{ }^\circ\text{C}$.
- A tetők felszínére vonatkozó minimum-hőmérsékletekben 18 UTC-kor történő locsolás/öntözés esetén lehetett elérni nagyobb csökkenést.

Tetők felszínének maximum-hőmérséklete:

- A tetők maximum-hőmérsékletének csökkenése a referenciához képest: $0,01\text{--}2,27 \text{ }^\circ\text{C}$.
- A maximum-hőmérsékletekben csak akkor volt elérhető számottevő csökkenés ($> 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$), ha a locsolás/öntözés a maximum-hőmérséklet beállta előtt történik (18, 21, 0, 3, 6, 9 UTC).

Tetők felszínének átlaghőmérséklete:

- A tetők átlaghőmérsékletének csökkenése a referenciához képest: $0,93\text{--}1,53 \text{ }^\circ\text{C}$.
- A tetők felszínére vonatkozó átlaghőmérséklet-csökkenés mértéke nem tér el az éjszakai és a nappali locsolás/öntözés esetén.

Összegzés:

- A minimum-hőmérsékletek esetén akkor érhető el a legnagyobb csökkenés, ha a locsolás/öntözés a minimum-hőmérséklet beállta előtti időszakban történik, jellemzően ez az éjszakai locsolás/öntözés.
- A maximum-hőmérsékletek esetén akkor érhető el a legnagyobb csökkenés, ha a locsolás/öntözés a maximum-hőmérséklet beállta előtt történik. Ez 2 m-es hőmérséklet esetén közvetlenül előtte, felszíni hőmérséklet esetén pedig a megelőző időszakban értendő.
- A locsolás/öntözés napon belüli időpontjának nincs hatása sem a felszíni, sem a 2 m-es hőmérséklet átlagos értékének csökkenésére.

A városi hőtübblet mérséklésének lehetőségeire vonatkozó érzékenységvizsgálatok eredményei

Záróbeszámoló

Városi Eső (LIFE in Runoff) projekt beszámoló

Készítette: Zempléni Zsuzsanna

Felelős: Szépszó Gabriella

HungaroMet Zrt.

2024. április

Tartalom

1. Bevezetés.....	3
2. A SURFEX felszíni modell.....	4
2.1. A TEB városi parametrizációs séma	6
2.2. Az ISBA szárazföldi felszíni modell.....	6
3. Érzékenységvizsgálatok	6
3.1. Utak és tetők albedójának növelése	8
3.2. Zöldterület arányának és összetételének megváltoztatása	9
3.3. Öntözés és locsolás napon belüli optimális időpontjának meghatározása	10
4. Összefoglalás.....	12
5. Cselekvési javaslatok	13
6. Irodalomjegyzék.....	13

1. Bevezetés

A városoknak módosító hatása van a meteorológiai állapotatózókra, így a beépített területeket speciális, úgynevezett városi klíma jellemzi, amelynek kialakulását a természetes területektől eltérő felszínborítás és felszíni tulajdonságok okozzák. A városi klíma legjellemzőbb jelensége a városi hősziget (urban heat island, UHI; Oke, 1982), amelyet a városi és a többnyire növényzettel borított környező területek közötti hőmérsékletkülönbséggel definiálnak. Kialakulásának oka, hogy napközben a növényzettel borított felszínnel ellentétben a városi felszínen rendelkezésre álló energiát az épületek és a mesterséges burkolatok jobban eltárolják, és a növényzet hiánya miatt kisebb része fordítódik párolgásra. Naplemente után a városi területek így lassabban hűlnek le, kialakítva ezzel az UHI maximumát az éjszakai órákban. Ezek a lokális hatások kölcsönhatásban állnak a regionális klímával, így a klímaváltozás hatásaival szemben a sűrűn lakott, nagy népességű települések sérülékenyek. A jövőben várható változások vizsgálata regionális klímamodellek segítségével valósul meg, azonban a jellemzően 10–25 km felbontású modellek túl durvák és nem alkalmasak a városi folyamatok részletes leírására. Ugyanakkor a városi parametrizációval kiegészített felszíni modellek költséghatékony megoldást jelentenek kilométeres (vagy az alatti) skálájú modellezésre, és így az adaptációs lehetőségek vizsgálatára is.

Szakirodalom alapján a városi hősziget mérséklésére tett intézkedések három kategóriára oszthatók: szürke módszer, zöld és kék infrastruktúra. A szürke módszerbe tartozik az utcák, épületek és burkolatok geometriai vagy fizikai tulajdonságainak megváltoztatása. Olyan burkolatok, amelyeknek nagyobb az albedója, vagyis a rövidhullámú sugárzás-visszaverő képessége, alkalmazhatók tetőkön és utakon is. Az ún. hideg tető alkalmazásával a felszín hőmérséklete akár 20 °C-kal csökkenthető, de a nyári 2 m-es átlaghőmérsékletre és maximum-hőmérsékletre is van néhány tized fokos hőmérséklet-csökkentő hatása (Zuvela-Aloise et al., 2017; Han et al., 2022). Ugyanakkor a tetők hőmérsékletének csökkenése jelentősen visszaszorítja az épületek energiateljesítményét (Akbari et al., 2016). Az utakon alkalmazott albedónövelés szintén 10 °C körüli felszíni hőmérséklet-csökkenést eredményezhet (Han et al., 2022; Hayes et al., 2022), valamint a 2 m-es hőmérsékletben évszaktól függően 0,5–1 °C-os változást (Qi et al., 2019).

A zöld infrastruktúra a városi zöld felületeket foglalja magában: füves és fás parkokat, fákat az utcák mentén, zöld tetőket, növényzettel borított falakat. A növényzet egyrészt az árnyékoló hatása miatt (fák esetében) és a párologtató hatása által képes csökkenteni a hőmérsékletet. Legnagyobb hűsítő hatás fákkal, legkisebb pedig füvesítéssel érhető el (Balany et al., 2020; Gál et al., 2021). A fás területek hatása napközben csak lokálisan jelentkezik, az éjszaka folyamán azonban térben kiterjedtebb (Gál et al., 2021), így szerepet játszik az UHI

maximumának csökkentésében. A városi parkok lokálisan napi átlagban 1 °C-kal hűvösebbek a beépített területeknél, ami napközben néhány fokos különbséget jelent (kb. 10 °C-ig) (Akbari et al., 2016; Han et al., 2022), de ez függ a park paramétereitől (méret, elhelyezkedés, vegetáció típusa), valamint a terület éghajlatától is. A fák arányának növelése a beépített területeken néhány tized fokos - néhány fokos csökkenést eredményezhet a nyári időszakban (Balany et al., 2020). A zöldterületek öntözésével 2 °C-os csökkenés érhető el (míg az utak és a járdák locsolásával kb. 1 °C-os hatás várható; Daniel et al., 2018).

A kék infrastruktúra magában foglalja a városon belüli vízfelületeket, amelyek párologtató felületekként funkcionálnak. A nagy hőkapacitásuk miatt a vízfelületek a napközbeni hőmérsékletcsökkentésben játszanak nagy szerepet, ugyanakkor emiatt az esti órákban melegíthetik a léghőmérsékletet (Zuvela-Aloise et al., 2016), ami nem kedvező az UHI szempontjából.

A kutatás során megvizsgáltuk, hogy néhány kiválasztott adaptációs stratégia milyen hatással járna Budapest jövőbeli hőmérsékleti viszonyaira. Ehhez a SURFEX felszíni modellt használtuk, mellyel a 2045–2055 időszakra vagy annak egy részére hajtottunk végre érzékenységi vizsgálatokat néhány beállítás módosításával, a várost 1 km-es horizontális felbontással lefedve, a jövőbeli antropogén szennyezőanyag kibocsátásra két forgatókönyvet használva. A kísérletek eredményeit olyan referencia szimulációkhoz (Allaga-Zsebeházi, 2021) viszonyítottuk, melyekben a modell alapértelmezett beállításával hajtottunk végre ugyanezre az időszakra, területre, felbontással és forgatókönyvvel.

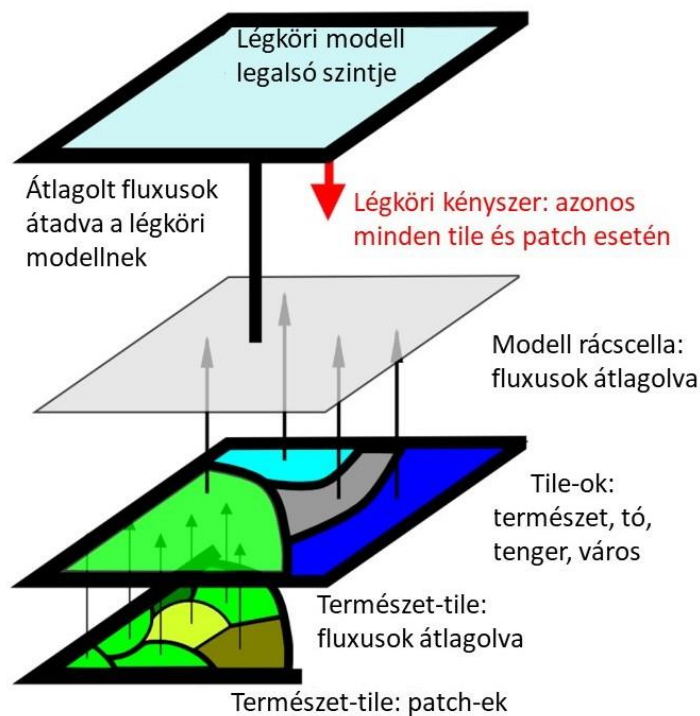
2. A SURFEX felszíni modell

A felszíni modell feladata a felszín és a légkör közötti kölcsönhatások, valamint a felszínt jellemző folyamatok részletes leírása. A SURFEX felszíni modell (Masson et al., 2013) négy felszíntípust különböztet meg: természetes felszínnek (ez további maximum 12 növénytípusra osztható), városok, óceánok és szárazföldi vízfelszínnek (1. ábra). Ez azt jelenti, hogy a választott horizontális rácsfelbontástól függően a modell az ECOCLIMAP-I. felszínborítási adatbázis alapján meghatározza, hogy az egyes rácscellák hány százalékát borítja a négy különböző felszíntípus. Az adatbázis 1 km × 1 km horizontális felbontású, így a szimulációk is ezzel megegyező felbontáson készültek. Minden felszíntípushoz tartozó számítást egy külön almodul végez el, majd ezek eredményeinek súlyozott összege adja a rácscellára vonatkozó átlagot. A természetes felszín folyamatait a SURFEX-ben az ISBA, míg a városi felszín folyamatait a TEB almodul írja le. A SURFEX számára szükséges légköri kényszereket (hőmérsékletet, csapadékot stb.) a SURFEX az ALADIN regionális klímamodell 10 km-es felbontású eredményeiből, egy előre definiált magasságban (esetünkben 30 m-en) kapja meg. Mind a négy felszíntípus folyamatait leíró almodul ugyanezeket a légköri kényszereket használja a számításokhoz.

Az almodulok tehát leírják azokat a folyamatokat, amelyek az egyes felszín típusokat jellemzik, és ezek figyelembevételével kiszámítják az állapotváltozókat (pl. 2 m-es hőmérséklet, 2 m-es nedvesség stb.) és a fluxusokat az adott felszín típusra vonatkozóan. Utóbbin keresztül valósul meg a kapcsolat a felszín és a légkör között. Majd a modell a területek arányában összegzi ezeket, amelyből előállnak az egyes rácscellákat jellemző értékek. (A rácscellák között oldalirányú kapcsolat nincs.) Tekintsük példaként Budapest XII. kerületének külvárosi felszínborítás-típussal rendelkező rácscelláit: ebben az esetben a cella 40 %-a természetes, míg 60 %-a városi felszín. Miután mindkét almodul elvégezte a folyamatokhoz tartozó számításokat és előállt pl. a 2 m-es hőmérséklet mind a természetes, mind a városi felszínnek felett, a rácscellára vonatkozó 2 m-es hőmérséklet a következő formában áll elő:

$$T2M_{rácscella} = 0,6 * T2M_{város} + 0,4 * T2M_{természet}$$

A SURFEX-et offline modellként használtuk, tehát légköri modell irányába való visszacsatolás nélkül.



1. ábra: A SURFEX felszíni modell felépítése: egy rácscella négy különböző felszín típusra osztható (tile), melyek közül a természetes felszín további 12 növény típusra (patch). Az ábra az online, légköri modellhez visszacsatolt verzióra vonatkozik. Offline esetben az átlagolt fluxusok nem kerülnek átadásra a légköri modellnek (Masson et al., 2013 nyomán).

2.1. A TEB városi parametrizációs séma

A TEB (Town Energy Balance, Masson, 2000) almodul végzi a városi felszín folyamatainak számítását. A modell a kanyon megközelítést alkalmazza, amely a városi geometriát szemben álló azonos magasságú és szélességű épületekre és ezek között húzódó útra bontja. Az út hossza sokkal nagyobbnak tekinthető, mint a szélessége, és a számítások során az összes útirány egyszerre kerül figyelembe vételre ugyanolyan valószínűséggel. Az épületek magassága felszínborítási kategória függvényében 10 vagy 30 m. A modell külön kezeli az út, tető és fal felületeket, tehát mind a három felszínre külön-külön számítja ki az energiaegyenleget, így figyelembe vehetők különböző folyamatok és állapotok, pl. a falak és a tetők esetén az épületből származó hő, vagy utak és tetők esetén a hó jelenléte. Minden felület három rétegre van osztva, így a modell leírja a falakon és a tetőkön keresztül a ház belső tere és a külső tér közötti, valamint az utakon keresztül a függőleges irányban történő hővezetést. A felszínre érkező napsugárzás mennyiségének a meghatározásakor a modell figyelembe veszi az épületek árnyékoló hatását az utakra és a szemközti épületre is, valamint a sugárzás (mind a rövid, mind a hosszuhullámú sugárzás) többszörös visszaverődését a felszíneken. Az antropogén hő- és nedvesség közül a lakossági fűtésből és a közlekedésből származó kerül figyelembevételre. Előbbi úgy, hogy az épületekben egy előre definiált állandó hőmérsékletet kell megtartani.

2.2. Az ISBA szárazföldi felszíni modell

Az ISBA (Interaction Soil-Biosphere-Atmosphere, Noilhan és Planton, 1989) földfelszín almodul végzi a természetes felszínek folyamatainak számításait, amely során figyelembe veszi a talajt, a növényzetet és esetlegesen a hó jelenlétét is. A talaj három rétegből áll, amelynek legfelső 0,01 m vastagságú része reprezentálja a felszínt. Ennek a felszíni hőmérsékletnek az alatta lévő talajréteg hőmérsékletéhez kell igazodnia, amely a napi menetet követi. Hogy a talaj hőmérsékletének értékei ne változhassanak szélsőséges irányba hosszabb szimulációk esetén, a középső szintnek a legalsó, állandó hőmérsékletű (274 K) talajréteghez kell igazodnia.

A felszínről a légkörbe a nedvesség a földfelszínről és a növényzet felszínéről párolgással (evaporációval), illetve a növényzet párologtatásával (transzspirációval) jut, amelyet együttesen evapotranszspirációnak neveznek. A növényzetet a modellben típustól függően paraméterek (pl. levélfelületi index, gyökérmélység) jellemzik, amelyek meghatározzák többek között, hogy mennyit tudnak párologtatni.

3. Érzékenységvizsgálatok

A projekt keretén belül összesen három érzékenységvizsgálat készült el a következő témákban: (1) az utak és a tetők albedójának növelése (ALBEDÓ), (2) a zöldterület arányának

és összetételének megváltoztatása (ZÖLDÍTÉS), valamint (3) az öntözés és a locsolás napon belüli optimális időpontjának meghatározása (ÖNTÖZÉS). A módosítások hatását különböző hőmérsékleti értékekre, azokon alapuló éghajlati indexekre és egy humánkomfort indexre számszerűsítettük. Az egyes kísérletcsoportokban az 1. táblázatban feltüntetett változókat vizsgáltuk és adtuk át.

	ALBEDÓ	ZÖLDÍTÉS	ÖNTÖZÉS
2 m-es napi maximum-hőmérséklet	×	×	×
2 m-es napi minimum-hőmérséklet	×	×	×
2 m-es napi átlaghőmérséklet		×	×
városi területeken 2 m-es napi maximum-hőmérséklet			×
városi területeken 2 m-es napi minimum-hőmérséklet			×
városi területeken 2 m-es napi átlaghőmérséklet			×
természetes területeken 2 m-es napi maximum-hőmérséklet			×
természetes területeken 2 m-es napi minimum-hőmérséklet			×
természetes területeken 2 m-es napi átlaghőmérséklet			×
felszíni napi maximum-hőmérséklet (utak, tetők)			×
felszíni napi minimum-hőmérséklet (utak, tetők)			×
felszíni napi átlaghőmérséklet (utak, tetők)			×
látszólagos hőmérséklet (humánkomfort-index) ¹	×	×	×
elsőfokú hóhullámos napok száma ²	×	×	
másodfokú hóhullámos napok száma ³	×	×	
trópusi éjszakák száma ⁴	×	×	

1. táblázat: Az egyes kísérletek során vizsgált változók

Az eredmények minden esetben a referenciától való eltérésre vonatkoznak (új szimuláció – referencia), ahol a referencia a vizsgálandó módosításokon kívül megegyező beállításokkal futtatott szimuláció.

¹ látszólagos hőmérséklet: $AT = T_a + 0,33e - 0,7w_s - 4$, ahol T_a a 2 m-es léghőmérséklet [°C], e a vízgőznyomás [hPa], w_s a 10 m-es szélesség [m/s]

² elsőfokú hóhullámos napok száma: a napi átlaghőmérséklet eléri a 25 °C-ot

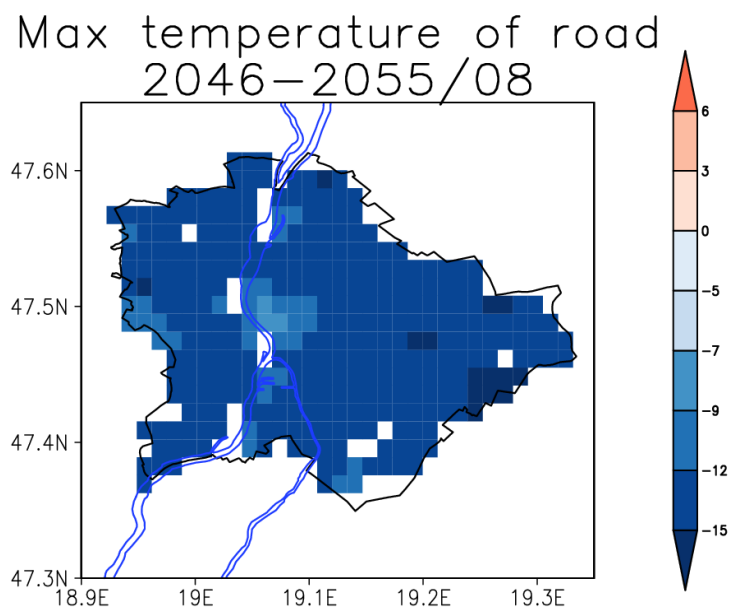
³ másodfokú hóhullámos napok száma: a napi átlaghőmérséklet legalább három egymást követő napon eléri a 25 °C-ot

⁴ trópusi éjszakák száma: a napi minimum-hőmérséklet 20°C feletti

3.1. Utak és tetők albedójának növelése

A kísérlet során azt vizsgáltuk, hogy milyen hatása van külön az utak és a tetők albedó növelésének Budapest teljes területén. Mindkét felszín esetén +0,5-tel módosított albedó értéket alkalmaztunk, így az utak albedója 0,08-ról 0,58-ra, a tetőké 0,15-ről 0,65-re változott. A változtatás mértéke megegyezik azzal, mintha utak esetén aszfaltot gránitra vagy betonra cserélnének, tetők esetén pedig piros betoncserepet fehér PVDF-fel bevont fém felületre. A szimulációk 10 éves időszakra (2046–2055) két forgatókönyv alapján (RCP4.5 és RCP8.5) készültek el.

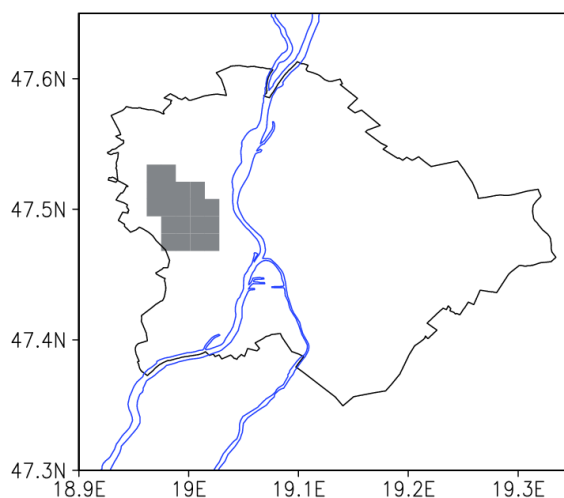
Az eredmények alapján az albedó növelésének elsősorban a nyári hónapokban és nappal van nagyobb hatása. Így a 2 m-es minimum-hőmérsékletben, és az ezen alapuló trópusi éjszakák száma éghajlati indexben alig látható változás, ugyanakkor a 2 m-es maximum-hőmérsékletben is mindössze néhány tized fokos volt a csökkenés (a nyári hónapokban, egyes rácspontokban 0,2–0,3 °C, míg teljes területre ez maximum 0,16 °C). A felszínhőmérsékletek tekintetében jelentősen nagyobb volt a változás. A felszíni maximum-hőmérséklet esetén évszakfüggő, hogy az utak vagy a tetők albedójának növelése okoz nagyobb hatást: szeptembertől áprilisig a tetők, míg májustól augusztusig az utak hőmérséklet-csökkenése a nagyobb (2. ábra). A nyári hónapokban a felszíni maximum-hőmérsékletben 10 °C-ot meghaladó csökkenés alakult ki. A két antropogén forgatókönyv között nincs jelentős eltérés.



2. ábra: Az utak napi maximális felszínhőmérsékletének változása az albedó-növelés hatására a 2046–2055 időszak augusztusi havi átlagára vonatkozóan az RCP8.5 forgatókönyv alapján

3.2. Zöldterület arányának és összetételének megváltoztatása

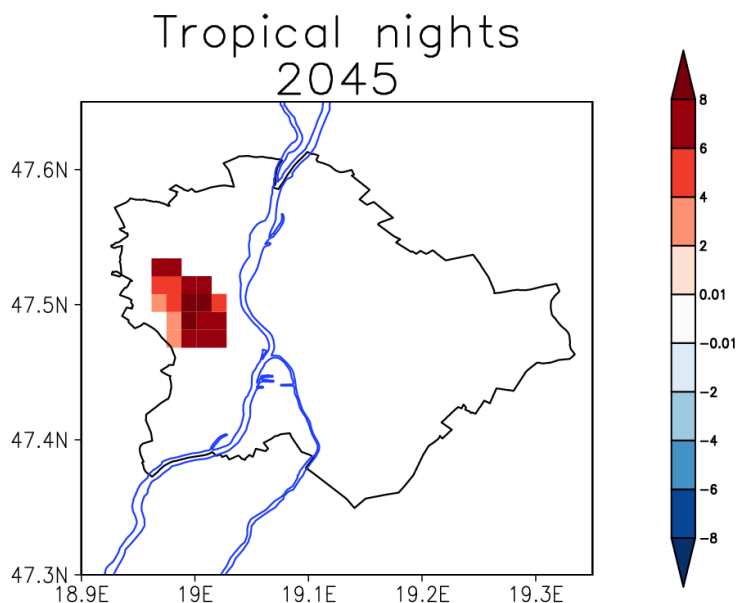
A kísérlet célja a zöldterület-arány növelés és csökkentés hatásának a vizsgálata. (A beszámolóban zöldterület alatt minden növényzettel borított felszínt értünk.) A vizsgált terület Budapest XII. kerületének azon része, amely a modell felszínborítása alapján 100 % városi kategória (3. ábra). Az ilyen rácspontok 60 %-a városi, 40 %-a természetes felszín. (A modellben használt természetes felszínnek nevezett kategória magában foglalja mind a növényzettel borított felszínt, mind a csupasz talajt.) A kísérletek során az arányok módosításának a hatását vizsgáltuk: a természetes felszín arányát növeltük 70 %-ra (NATURE kísérlet), és csökkentettük 10 %-ra (URBAN kísérlet) a városi felszín terhére, illetve javára. A felszín aránya mellett a növényzet típusa is megváltoztatásra került. A referencia kísérletben a fás és parkos terület 50–50 %-ban volt jelen, míg ez a NATURE kísérletben 100 % fás, az URBAN kísérletben 100 % parkos területre módosult. Előbbi esetén a növényzetet 5 m magas fák, és vastagabb gyökérszóna jellemzi, emiatt nagyobb a vegetációs hatása, utóbbi esetén pedig kisebb a gyökérmélység és nagyobb a levélfelületi-index. A szimulációk hét hónapos időszakra (2045. április–október) készültek RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek alapján.



3. ábra: A vizsgált terület: XII. kerület azon része, amely a modellbeli felszínborítás alapján 100 % városi kategória

A természetes terület és benne a fák arányának növelése hatására a hőmérsékleti értékek csökkentek, csökkentésének hatására pedig növekedtek. A legnagyobb hatás a napi minimum-hőmérsékletre és így az abból származtatott trópusi éjszakák számára volt. A természetes terület és fa arány növelésének (csökkentésének) hatására a minimum-hőmérséklet területi átlagban 0,3–1,2 °C-ot csökkent (0,6–1,2 °C-ot növekedett), a trópusi éjszakák száma pedig 4 nappal csökkent (7–8 nappal növekedett) (4. ábra). A legkisebb hatás a napi maximum-hőmérsékletre volt: 0–0,3 °C változás mindkét esetben. A napi átlaghőmérséklet

területi átlag a látszólagos hőmérsékletéhez hasonlóan 0,1–0,6 °C-kal változott mindkét esetben. Az elsőfokú és a másodfokú hőhullámos napok száma 1–2 napot csökkent (2–5 napot növekedett) a természetes terület és fa arány növelésének (csökkentésének) hatására. A két antropogén forgatókönyv között ebben a kísérletcsoportban sem volt jelentős eltérés.



4. ábra: A trópusi éjszakák számának változása a természetes terület csökkentésének és a növényzet módosításának hatására 2045 augusztusára vonatkozóan az RCP8.5 forgatókönyv alapján

3.3. Öntözés és locsolás napon belüli optimális időpontjának meghatározása

A kísérlet célja az egyidejű öntözés és locsolás napon belüli optimális időpontjának a meghatározása volt. Egy-egy néhánynapos melegebb (2045.08.18. – 2045.08.21.) és mérsékelt meleg (2045.08.01. – 2045.08.04.) nyári időszak került kiválasztásra az RCP8.5 forgatókönyvvel készült referenciakísérlet eredményei alapján. Az időszakok csapadékmentesek, előbbi átlaghőmérséklete 24,5 °C, utóbbié 22,9 °C. Mindkét időszakra vonatkozóan 8 kísérlet készült el: az időszak minden napján a locsolás és az öntözés 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 és 21 UTC kor történt. Adott időponthoz tartozó locsolás/öntözés során 3 óra alatt összesen 1 mm víz kilocsolása történt meg, egyenletes intenzitással, minden rácspontban. A kilocsolt vízmennyiség egy reális felső becslés, melynek látható a hatása. Ennél kevesebb víz esetén kérdéses a hatás megjelenése, több pedig nem valós öntözés és locsolás esetén. Technikailag ez a kényszerekhez plusz csapadék hozzáadásával valósult meg.

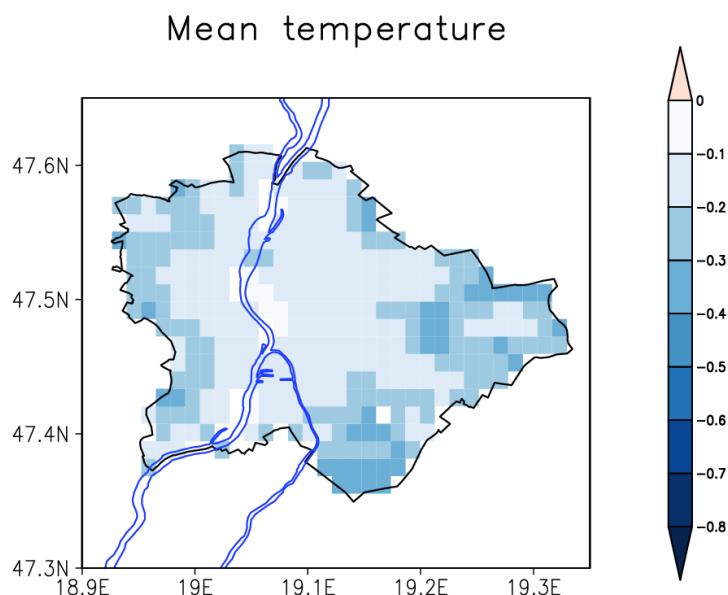
A locsolási/öntözési időpontok két csoportra oszthatók hatás szempontjából: nappali locsolás/öntözés 6, 9, 12 és 15 UTC-kor és éjszakai locsolás/öntözés 0, 3, 18 és 21 UTC-kor. Nappali locsolás/öntözés esetén a folyamatnak közvetlen, nagymértékű felszíni és kisebb 2 m-es

hőmérsékletcsökkentő hatása van, amely nem marad fenn hosszú távon. Az éjszakai locsolás/öntözés ezzel szemben elnyújtottan fejti ki hatását, amely mértéke kisebb, mint a nappali locsolás/öntözés esetén. Az értékek 15 UTC-re állnak vissza a referencia szintjére, addig mind a felszíni, mind a 2 m-es hőmérsékleti értékek a referencia alatt maradnak. A meleg és a mérsékelt időszakra vonatkozó kísérletek között nem volt jelentős eltérés, azonban a legtöbb esetben a meleg időszak kísérletében volt nagyobb különbség a referenciától (elsősorban a minimum-hőmérséklet tekintetében).

A locsolás/öntözés időszaktól függetlenül a hőmérsékleti értékek csökkenését eredményezte. A napi minimum-hőmérsékletek esetén akkor érhető el a legnagyobb csökkenés, ha a locsolás/öntözés a minimum beállta előtti időszakban történik, jellemzően éjszakai locsolás/öntözés alkalmával. A csökkenés mértéke a 2 m-es hőmérséklet esetén a teljes területre vonatkozó átlagban 0,05–0,29 °C, míg az utak és tetők felszíne esetén 0,02–1,95 °C.

A napi maximum-hőmérsékletekben akkor érhető el a legnagyobb csökkenés, ha a locsolás/öntözés a maximum beállta előtt történik. Ez 2 m-es hőmérséklet esetén közvetlenül előtte, felszíni hőmérséklet esetén pedig a megelőző néhány órában értendő. A teljes területre vonatkozó átlag csökkenése előbbi esetén 0,01–0,7 °C, utak és tetők felszíni hőmérsékletében pedig 0,01–5,55 °C.

A locsolás/öntözés napon belüli időpontjának nincs hatása sem a felszíni (utak és tetők esetén 0,93–2,09 °C), sem a 2 m-es hőmérséklet (0,16–0,31 °C) napi átlagos értékének csökkenésére (5. ábra).



5. ábra: A napi átlagos 2 m-es hőmérséklet változása a 0 UTC-s öntözés és locsolás hatására a meleg (2045.08.18. – 2045.08.21.) időszakra vonatkozóan RCP8.5 forgatókönyv alapján

4. Összefoglalás

A Városi Eső (LIFE in Runoff) projektben a városi hősziget intenzitás csökkentésére irányuló lehetőségeket modellkísérletek segítségével térképeztük fel a szakirodalom ajánlásai alapján. A szimulációkhoz a SURFEX felszíni modellt használtuk, Budapest területére 1 km-es rácsfelbontással.

A mitigációs opciók között a szürke módszerhez tartozik az utcák és épületek geometriai tulajdonságainak, valamint a burkolatok fizikai tulajdonságainak megváltoztatása. Ehhez kapcsolódott az első szimulációs csoport, amely során a tetők és az utak albedó növelésének hatását vizsgáltuk. A módosításnak a nyári időszakban, és elsősorban a nappali órákban volt a legnagyobb hatása. Így a nyári hónapokban a felszíni napi maximum-hőmérsékletben $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ körüli, míg a 2 m-es hőmérsékletben $\approx 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ csökkenés volt elérhető.

A zöld infrastruktúra alkotja a másik fontos mitigációs csoportot, ami a városi zöldfelületeket foglalja magában. Az ehhez kötődő második szimulációs csoportban a természetes területek és benne a fák arányának változtatása hatását vizsgáltuk Budapest XII. kerületének egy részén. A természetes területek és fa arány növelésének (csökkentésének) hatására a hőmérséklet csökkent (növekedett). A legnagyobb változás a napi minimum-hőmérsékletben alakult ki, amely esetén a változás területi átlag tekintetében $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ban maximalizálódott. Ugyanakkor az ebből származtatott trópusi éjszakák száma éghajlati index a zöldterület és fák csökkentésének hatására 7–8 nappal is növekedett.

Azonban a szakirodalom alapján a zöldterületek hőmérséklet-csökkentő hatásukat csak megfelelő öntözés mellett tudják kifejteni. A harmadik szimulációs csoport célja a növényzetöntözés és az útlocsolás napon belüli optimális időpontjának meghatározása volt. A nappali öntözés esetén a víznek nincs ideje beszivárogni a talajba, a hőmérséklet-csökkenés rövid ideig tart és intenzív, míg éjszakai locsolás esetén a hatás intenzitása kisebb, de kitart a délutáni órákig. A legnagyobb csökkenés akkor érhető el, ha a locsolás/öntözés a szélsőérték beállta előtt történik. Ez a 2 m-es hőmérsékletben néhány tized fokos, míg a felszíni hőmérsékletben néhány fokos csökkenést eredményezett.

Összességében megállapíthatjuk, hogy a kutatás során Budapestre kapott eredmények összhangban vannak a nemzetközi tapasztalatokkal. Mindazonáltal a következtetések felhasználók, döntéshozók felé való interpretálásánál fontos kiemelni, hogy mint minden modell, a SURFEX felszíni modell közelítésekkel írja le a valós folyamatokat, továbbá a különböző mitigációs opciókat is egyszerűsített módon próbáltuk ki a szimulációkban. A legfrissebb modellverzió több új lehetőséget ad a beállítások változtatására (pl. a városi növényzettel kapcsolatban), ezért a további vizsgálatokhoz célszerű annak használatára áttérni. Ugyanakkor

napjainkban városi modellezés esetén a cél a ≈ 100 m térbeli felbontás elérése, melyhez elengedhetetlen a hasonlóan finom felbontású felszíni adatbázisok létrehozása.

5. Cselekvési javaslatok

Az eredményeink összhangban vannak a nemzetközi szakirodalommal, azonban felhasználásuk során figyelembe kell venni a modellezés korlátait.

Hatás szempontjából az öntözés és a locsolás megfelelő időpontja függ annak céljától. Napközbeni locsolással közvetlen utána, rövid ideig fennálló hőmérséklet-csökkentő hatás érhető el: a felszínhőmérséklet esetén néhány fok, a léghőmérséklet esetében pedig néhány tized fok. Esti és éjszakai locsolással elnyújtott és kisebb hatás érhető el, ugyanakkor ezzel csökkenthető a jellemzően éjszakai órákban maximalizálódó városi hősziget.

Több esetben (albedó növelés és locsolás hatására) jelentősebb hőmérséklet-csökkenés alakult ki a felszíni hőmérsékletben, mint a léghőmérsékletben, ami fontos következmény lehet utak esetén a kötött pályás közlekedés, illetve tetők esetén a tetőtér hűtésigénye szempontjából.

A zöldterület és benne a fák arányának a megváltoztatása a napi minimum-hőmérsékletre és így az abból származtatott trópusi éjszakák számára volt a legnagyobb hatással. 30 %-os zöldterület növeléssel a trópusi éjszakák száma 4 nappal csökkent, ugyanakkor 30 %-os zöldterület csökkentéssel 7–8 nappal növekedett a vizsgált április-október időszakban. Tehát a csökkentés hatására kétszer akkora negatív hatás volt elérhető, mint a növeléssel, ami kiemeli a meglévő zöldterületek megóvásának fontosságát.

6. Irodalomjegyzék

Akbari, H., Cartalis, C., Kolokotsa, D., Muscio, A., Pisello, A.L., Rossi, F., Santamouris, M., Synnef, A., Wong, N.H., and Zinzi, M., 2016: Local climate change and urban heat island mitigation techniques – the state of the art. *Journal of civil engineering and management*, 22, 1–16.

doi:10.3846/13923730.2015.1111934

Allaga-Zsebeházi, G., 2021: Az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvekkel készített SURFEX városi éghajlatváltozási kísérletek kiértékelése. *KlimAdat (KEHOP-1.1.0) projekt beszámoló*, 25 p.

Balany, F., Ng, A.W., Muttill, N., Muthukumar, S., and Wong, M.S., 2020: Green Infrastructure as an Urban Heat Island Mitigation Strategy - A Review. *Water*, 12, 3577. doi:10.3390/w12123577

- Daniel, M., Lemonsu, A., and Viguié, V., 2018: Role of watering practices in large-scale urban planning strategies to face the heat-wave risk in future climate. *Urban Climate*, 23, 287–308.
doi:10.1016/j.uclim.2016.11.001
- Gál, T., Mahó, S.I., Skarbit, N., and Unger, J., 2021: Numerical modelling for analysis of the effect of different urban green spaces on urban heat load patterns in the present and in the future. *Computers, Environment and Urban Systems*, 87, 101600.
doi:10.1016/j.compenvurbsys.2021.101600
- Han, D., Zhang, T., Qin, Y., Tan, Y., and Liu, J., 2022: A comparative review on the mitigation strategies of urban heat island (UHI): a pathway for sustainable urban development. *Climate and Development*, 1–25.
doi:10.1080/17565529.2022.2092051
- Hayes, A.T., Jandaghian, Z., Lacasse, M.A., Gaur, A., Lu, H., Laouadi, A., Ge, H., and Wang, L., 2022: Nature-Based Solutions (NBSs) to Mitigate Urban Heat Island (UHI) Effects in Canadian Cities. *Buildings*, 12, 925.
doi:10.3390/buildings1207092512
- Masson, V. 2000: A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models. *Boundary-Layer Meteorology* 94, 357–397.
doi:10.1023/A:1002463829265
- Masson, V., Le Moigne, P., Martin, E., Faroux, S., Alias, A., Alkama, R., Belamari, S., Barbu, A., Boone, A., Bouyssel, F., Brousseau, P., Brun, E., Calvet, J.-C., Carrer, D., Decharme, B., Delire, C., Donier, S., Essaouini, K., Gibelin, A.-L., Giordani, H., Habets, F., Jidane, M., Kerdraon, G., Kourzeneva, E., Lafaysse, M., Lafont, S., Lebeaupin Brossier, C., Lemonsu, A., Mahfouf, J.-F., Marguinaud, P., Mokhtari, M., Morin, S., Pigeon, G., Salgado, R., Seity, Y., Taillefer, F., Tanguy, G., Tulet, P., Vincendon, B., Vionnet, V., and Voldoire, A. 2013: The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes, *Geosci. Model Dev.*, 6, 929–960.
doi:10.5194/gmd-6-929-2013
- Noilhan, J., Planton, S. 1989: A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly weather review*, 117(3), 536–549.
doi:10.1175/1520-0493(1989)117<0536:ASPOLS>2.0.CO;2
- Oke, T.R., 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, 1–24.
doi:10.1002/qj.49710845502

Qi, J.-D., He, B.-J., Wang, M., Zhu, J., and Fu, W.-C., 2019: Do grey infrastructures always elevate urban temperature? No, utilizing grey infrastructures to mitigate urban heat island effects. *Sustainable Cities and Society*, 46, 101392.

doi:10.1016/j.scs.2018.12.020

Žuvela-Aloise, M., Koch, R., Buchholz, S., and Früh, B., 2016: Modelling the potential of green and blue infrastructure to reduce urban heat load in the city of Vienna. *Climatic Change*, 135, 425–438.

doi:10.1007/s10584-016-1596-2

Žuvela-Aloise, M., Andre, K., Schwaiger, H., Bird, D.N., and Gallaun, H., 2017: Modelling reduction of urban heat load in Vienna by modifying surface properties of roofs. *Theoretical and Applied Climatology*.

doi:10.1007/s00704-016-2024-2