



A városi hőtöbblet mérséklésére vonatkozó érzékenységvizsgálatok Budapestre

Allaga-Zsebeházi Gabriella, Szépszó Gabriella

HungaroMet Nonprofit Zrt., zsebehazi.g@met.hu

DOI: 10.56474/legkor.2025.4.2

A SURFEX felszíni modell segítségével egyszerűsített kísérletekben megvizsgáltuk, hogy különböző alkalmazkodási intézkedéseknek milyen hőmérsékletmódosító hatása lehet városi környezetben. A városi hősziget mérséklésére irányuló intézkedések közül a szürke módszerek családjába tartozó felszíni albedó változtatás, illetve a zöld infrastruktúra megváltoztatásának hatását teszteltük Budapestre. Az eredmények alapján ezekkel a módszerekkel nagy hatást lehet elérni a felszíni hőmérséklet mérséklésében.

Sensitivity studies for reduction of the urban heat island in Budapest

In this study, the impact of different adaptation actions on urban heat island was assessed using the SURFEX surface model for Budapest. In the simulations, the modification of the surface albedo of the urban areas as well as changing the green area and the included tree fractions were explored in detail. The results proved that these actions are able to significantly reduce the surface temperature in the city.

A városoknak módosító hatása van a meteorológiai állapothatározókra, így a beépített területeket speciális, ún. *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 környező területek közötti hőmérsékletkülönbséggel definiálhatunk. Kialakulásának legfőbb oka, hogy napközben az épületek és a mesterséges burkolatok a beérkező sugárzás nagyobb részét tárolják a növényzethez képest; valamint a kevés vagy hiányzó vegetáció miatt a párolgás mértéke igen kicsi. Naplemente után a városi területek így lassabban hűlnek le, kialakítva ezzel az UHI maximumát az éjszaki

kai órákban (Oke, 1987). Ezek a lokális jellemzők kölcsönhatásban állnak a regionális klímával oly módon, hogy a klímaváltozás miatti bizonyos légköri változások (pl. minimum-hőmérséklet emelkedése, hóhullámos napok számának növekedése) jóval fokozottabban jelentkeznek a városokban. Például míg Magyarországon a trópusi éjszakák¹ száma az 1901–2023 időszakban átlagosan 2 nappal növekedett, Budapesten a változás mértéke 19 nap volt [1]. A szélsőséges hőmérsékleti események a jövőben is várhatóan fokozottabban növekednek a városban, mint a vidéki területeken

¹Trópusi éjszaka: amikor a napi minimum-hőmérséklet nem csökken 20 °C alá

(pl. *Allaga-Zsebeházi*, 2021; *Göndöcs*, 2018). A klímaváltozás hatásaival szemben a sűrűn lakott, nagy népességű települések sérülékenyek (például az extrém magas hőmérsékletnek negatív hatása van a városi infrastruktúrára, a nem klimatizált helységekből dolgozók munkaképességére, a kardio-vaszkurális megbetegedésekre (*IPCC*, 2022; *NÉS-2*, 2018).

A jövőben várható éghajlatváltozás 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 (*Allaga-Zsebeházi*, 2024).

Szakirodalom alapján a városi hősziget mérséklésére tett intézkedések két kategóriára oszthatók: szürke módszer, valamint a zöld infrastruktúra alakítása. 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 visszасzorítja nyáron az épületek energiafelhasználását (*Akbari et al.*, 2016). Az utakon alkalmazott albedónövelés szintén 10 °C körüli felszíni hőmérséklet-csökkentést 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 és kék felületeket foglalja magában: füves és fás parkokat, fákat az utcák mentén, zöld tetőket, növényzettel borított falakat, vízfelületeket. 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 (legfeljebb 10 °C) különbséget jelent (*Akbari et al.*, 2016; *Han et al.*, 2022),

de ez függ a park paramétereitől (a méretétől, az elhelyezkedésétől, a vegetáció típusától), 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 városon belüli vízfelületek párologtató felületekként funkcionálnak. Nagy hőkapacitásuk miatt a napközbeni hőmérsékletcsökkentésben játszanak nagy szerepet, ugyanakkor emiatt az esti órákban emelhetik a hőmérsékletet (*Zuvela-Aloise et al.*, 2016), ami nem kedvező az UHI szempontjából.

Jelen cikk célja, hogy a SURFEX felszíni modellel végzett kísérletek eredményei alapján bemutassa, hogy néhány kiválasztott adaptációs stratégia milyen hatással járna Budapest jövőbeli hőmérsékleti viszonyaira. A következő fejezetben részletesen bemutatjuk az alkalmazott modellt és az elvégzett kísérleteket. Ezután áttekintjük és értelmezzük az érzékenységvizsgálatok eredményeit, majd a cikket összefoglalással és kitekintéssel zárjuk.

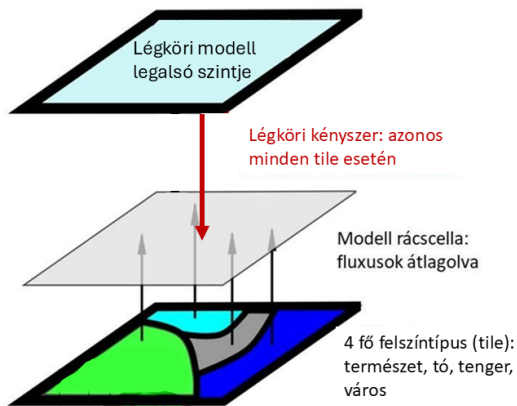
Modellék és módszerek

A SURFEX felszíni modell

A SURFEX felszíni modell (*Masson et al.*, 2013) (1. ábra) feladata a felszín és a légkör közötti kölcsönhatások, valamint a felszínt jellemző folyamatok részletes leírása. A modell négy fő felszíni kategóriát különböztet meg (1. ábrán tile): természetes földfelszín (növényzet, csupasz talaj, szikla), város, óceán és szárazföldi vízfelszín (tó, folyó). A modell a vizsgált tartomány rácselláihoz felszín típusokat rendel az 1 km x 1 km-es horizontális felbontású ECOCLIMAP-I felszínborítási adatbázis (*Masson et al.*, 2003) alapján, mely 255 felszín típusot tartalmaz. Ez azt jelenti, hogy az ECOCLIMAP megadja, hogy az egyes rácsellák hány százalékát borítja a négy fő felszíni kategória, valamint a további, számításához szükséges paramétereket (pl. a növényzet esetén a levélfelületi indexet², a városok esetén az épületek magasságát).

A fő felszíni kategóriákhoz tartozó számításokat külön modulok végzik, majd ezek eredményeinek súlyozott összege adja a rácsellára vonatkozó átlagot

²A levélfelületi index megadja, hogy 1 m² földfelszínre hány m² levélfelület jut úgy, hogy a leveleknek csak az egyik oldalát tekintjük. Az index a felszín-légkör kölcsönhatás modellezése során a növényállomány sűrűségének becsülésére szolgál.



1. ábra. A kísérletekben alkalmazott SURFEX felszíni modell felépítése és alapvető működése. (Masson et al., 2013 nyomán).

(pl. 2 m-es hőmérséklet és nedvesség, hő-, momentum- és nedvességfluxus). A természetes földfelszín folyamatait a SURFEX-ben az ISBA (Interaction Soil-Biosphere-Atmosphere; Noilhan és Planton, 1989), míg a városi felszín folyamatait a TEB (Town Energy Balance; Masson, 2000) almodul írja le. A TEB az ún. kanyon közelítést alkalmazza, mely a városi geometriát szemben álló, azonos magasságú és szélességű épületekre és ezek között húzódó útra bontja. A modell külön-külön számítja ki az energiaegyenletet az útra, a tetőre és a falra. Minden terület három rétegre osztott annak érdekében, hogy a felületeken keresztüli hővezetést leírja. A TEB ezenkívül figyelembe veszi az épületek árnyékoló hatását, valamint a sugárzás visszaverődését, többszöri elnyelődését is. Az ISBA a természetes szárazföldi felszín folyamatát az ún. *force-restore* módszerrel (Bhumralkar, 1975; Blackadar, 1976; Deardorff, 1977) közelíti, mely szerint a talaj három rétegre osztott (egy vékony felszíni rétegre, valamint a gyökérszónára és a mélytalaj rétegre). A modell e talajrétegek közötti hővezetés, nedvességfluxus egyszerű közelítésével számítja többek között a felszíni hőmérsékletet és nedvességet.

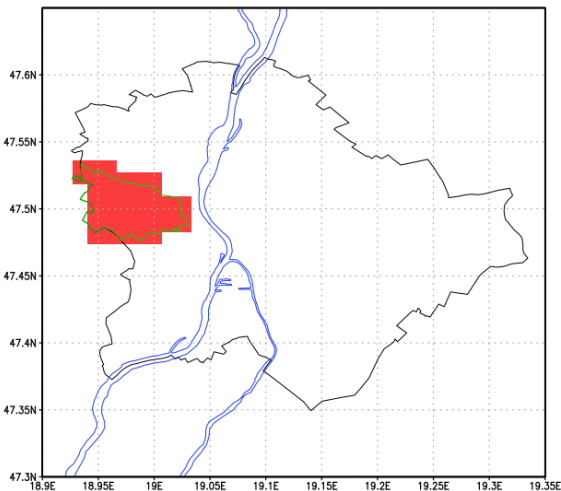
A SURFEX számára szükséges léggöri kényszereket (lefelé irányuló rövid- és hosszuhullámú sugárzást, hőmérsékletet, szélesebséget, szélirányt, specifikus nedvességet, légnyomást, csapadékot) a SURFEX az ALADIN regionális klímamodell 10 km-es felbontású eredményeiből (Bán et al., 2021), egy előre definiált magasságban (esetünkben 30 m-en) kapja meg. Mind a négy felszíntípus folyamatait leíró almodul ugyanezeket a léggöri kényszereket használja a számításokhoz.

A SURFEX-et offline módban használtuk, ami azt jelenti, hogy a felszíni és a léggöri modell közötti kapcsolatot egyirányú, a SURFEX nem hat vissza az ALADIN-ra.

Érzékenységvizsgálatok

A SURFEX modellel három érzékenységvizsgálat készült a következő témákban:

1. Az első 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 az alapértelmezett 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, tetők esetén pedig piros betoncserepet fehér PVDF-fel bevont fém felületre cserélnének. A szimulációkat egy 10-éves időszakra, 2046–2055-re végeztük el azért, hogy a felszínmódosítás hatását éghajlati szempontból is értékelni tudjuk. Az emberi tevékenység bizonytalanságát két antropogén forgatókönyv (RCP4.5 és RCP8.5) alkalmazásával vettük figyelembe.
2. A második kísérletben a zöldterület-arány növelésének és csökkentésének hatását vizsgáltuk (zöldterület alatt növényzettel borított felszínt értünk). A vizsgált terület Budapest XII. kerületének azon része, amely a modell felszínborítása alapján 100% városi kategória (2. ábra). Az ilyen rácspontok 60%-a városi, 40%-a természetes felszín. A kísérletek során az arányok módosításának hatását vizsgáltuk: a természetes felszín arányát növeltük 70%-ra a városi felszín terhére, illetve 10%-ra csökkentettük annak javára. A felszín aránya mellett a növényzet típusa is megváltoztatásra került. A referencia kísérletben a fás és a (bokrokkal, pázsittal és néhány elszórt fával jellemzett) parkos terület 50–50%-ban volt jelen, míg ez a megnövelt zöldterületű kísérletben 100%-ban fás, a csökkentett zöldterületű kísérletben 100%-ban 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 zöldterület-arány megváltoztatásának hatását különösen a késő tavasztól korai őszig terjedő időszakban érdemes vizsgálni (amikor a lombhullató fák levelesek), ezért a szimulációk egy héthónapos időszakra, 2045. április–októberre készültek az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek alapján.
3. A harmadik kísérlet célja annak meghatározása volt, hogy a városi növényzet öntözése és a burkolat locsolása Budapest területén milyen hőmérsékleti hatáshoz vezet attól függően, hogy a vizet a nap melyik időszakában juttatjuk ki ezekre a fel-



2. ábra. A vizsgált terület: Budapest XII. kerület (ábrán zöld vonallal jelölve) területére eső azon rácsponatok (pirossal jelölve), amelyek a modellbeli felszínborítás alapján 100% városi kategóriába tartoznak.

színekre. Feltételezzük, hogy a hatásnak elsősorban száraz és meleg időjárás esetén van jelentősége, ezért a vizsgálatokhoz egy-egy 4-napos, csapadékmentes, mérsékelt meleg és meleg nyári időszak került kiválasztásra az RCP8.5 forgatókönyvvel készült referenciakísérlet eredményei alapján 2045 augusztusából: az augusztus 1–4. időszak átlaghőmérséklete 22,9 °C, míg az augusztus 18–21. időszaké 24,5 °C. Mindkettőre 8 kísérlet készült, amikor az időszak minden napján a locsolás és az öntözés 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 vagy 21 UTC-kor történt. Adott időponthoz tartozó locsolás és öntözés során 3 óra alatt minden rácsponthan egyenletes intenzitással összesen 1 mm víz kijuttatásával történtek a számítások, amit technikailag 1 mm/3h csapadék a kényszerekhez való hozzáadásával valósítottunk meg. (Habár technikailag adott időpontban történt a csapadéktöbblet hozzáadása a kényszerekhez, az adat az előző 3 órában lehullott vízmennyiséget reprezentálja. A szövegben a továbbiakban csak a kényszer időpontjával hivatkozunk a különböző kísérletekre.) Ez a vízmennyiség egy reális felső becslés arra, ami zöld- vagy útfelületek locsolásakor általában kikerül a környezetbe, ennél kevesebb víz esetén viszont kérdéses a hatás megjelenése. Minden kísérletben az RCP8.5 kibocsátási forgatókönyvre támaszkodtunk, mert a tesztidőszak kiválasztását ennél a vizsgálatnál az időjárási körülmények határozták meg, s ilyen rövid időtávon az antropogén tevékenység hatása nem érvényesül.

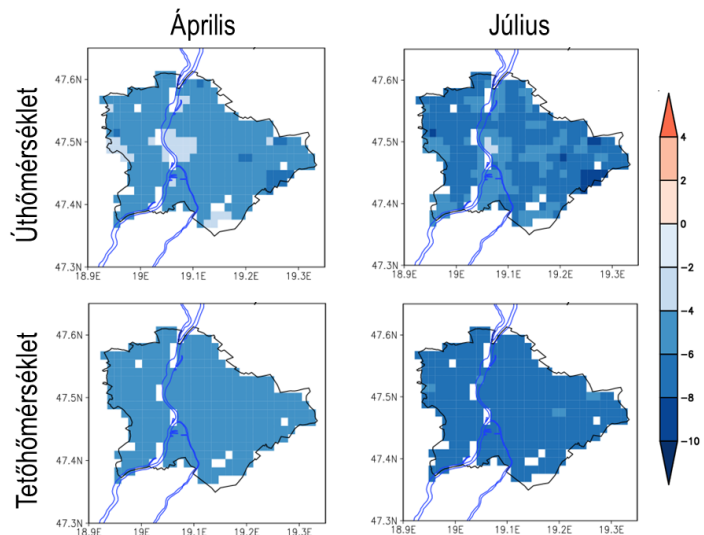
A módosítások hatását különböző hőmérsékleti értékekre és azokon alapuló éghajlati indexekre számszerűsítettük. Az eredmények minden esetben a referenciától való eltérésre vonatkoznak (azaz az új szimuláció és a referencia különbségére), ahol a referencia a vizsgálandó módosításokon kívül megegyező beállításokkal futtatott szimuláció.

Eredmények és diszkusszió

Utak és tetők albedójának növelése

A városi felületek albedójának növelése elsősorban tavasszal és nyáron az utak és tetők felszínhőmérsékletében okozott jelentősebb hatást. Ezenkívül a maximumhőmérsékletben látott változás mértéke jóval meghaladta a minimumhőmérsékletét, tehát a módosítás főként nappal érvényesült.

Az első kísérletben áprilistól augusztusig az utak napi átlagos felszínhőmérséklete a belvárost kivéve 4–6 °C-kal alacsonyabb a referenciához képest, míg a belvárosban kisebb, 2–4 °C-os volt a hőmérséklet-csökkenés (3. ábra). Ugyanakkor megjegyezzük, hogy a teljes városra vonatkozóan áprilistól augusztusig az útburkolat maximum-hőmérséklete átlagosan több, mint 10 °C-kal csökkent. A belvárosi és külvárosi területek közötti különbség azzal magyarázható, hogy a SURFEX-ben a belvárosi rácsponatok épületmagassága jóval nagyobb (30 m a belvárosban, 10 m

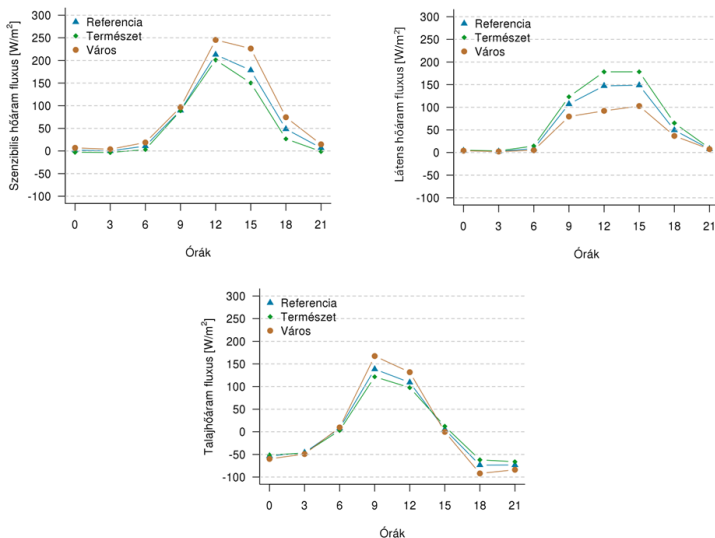


3. ábra. A módosított (utak esetén 0,08-ról 0,58-ra, a tetők esetén 0,15-ről 0,65-re növelt) albedóval kapott napi átlagos felszínhőmérséklet (első sor: utak, második sor: tetők) havi átlagának eltérése (°C-ban) a referencia-kísérlettel áprilisban (első oszlop) és júliusban (második oszlop) a 2046–2055 időszakra az RCP8.5 szcenárió alapján.

a külvárosban) és az utcák szűkebbek (az épületmagasság és az utcaszélesség aránya a belvárosban 1, a külvárosban 0,5), tehát csak magasabb napállásnál éri direkt napsütés a belvárosi utakat. Ezek az eltérések a felszíni karakterisztikákban megmagyarázzák azt is, hogy a repülőter területén a nyári hónapokban 8-10 °C-os csökkenés volt látható (hiszen a repülőter a SURFEX-ben is nyílt terület; pl. az épületmagasság mindössze 6%-a az utcaszélességnek).

A tetők felszínhőmérsékletének változása térben jóval homogénebb az utakhoz képest. A napi átlagban néhány fokos (adott hónaptól függően 3-6 °C-os; 3. ábra), míg a maximum-hőmérsékletben áprilistól augusztusig 10 °C-ot meghaladó csökkenést kaptunk (ábrán nem mutatjuk be). Az utak és tetők hőmérséklet csökkenését összevetve elmondható, hogy a maximum-hőmérsékletcsökkenés szeptembertől áprilisig a tetők esetében volt nagyobb, míg májustól augusztusig az utaké (az utak albedója kisebb, mint a tetőké, de tavasztól őszig az alacsonyabb napállás miatt kevesebb direkt napsugárzás éri az utakat).

A felszíni értékekhez képest a 2 m-es maximum-hőmérsékletben jóval kisebb, mindössze néhány tized fokos csökkenés volt látható (városi átlagban a nyári hónapokban maximum 0,16 °C, de az egyes rácspontokban is csak 0,2-0,3 °C). A minimum-hőmérsékletben, és az ezen alapuló trópusi éjszakák számában pedig alig mutatkozik változás. A két antropogén forgatókönyv nem okozott jelentős eltérést az eredményekben.

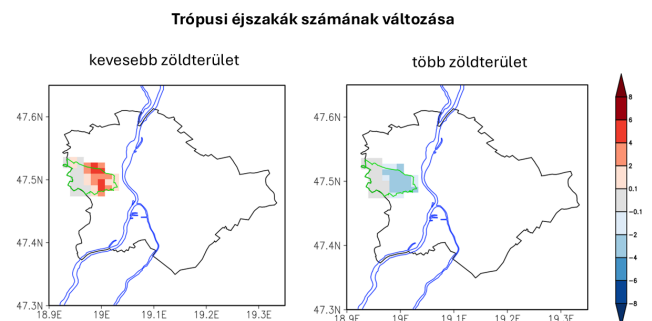


4. ábra. A szenzibilis, látens és talajhőáram átlagos napi menete (W/m^2 -ben) a referencia (kék), valamint a megnövelt (zöld) és csökkentett (barna) zöldterület kísérletben 2045. április-október időszakban az RCP8.5 scenárió alapján.

Zöldterület arányának és összetételének megváltoztatása

A természetes terület és benne a fák arányának növelésével a hőmérsékleti értékek csökkentek, csökkentésével pedig növekedtek. A továbbiakban zárójelben adjuk meg a zöldfelület-csökkentéssel kapcsolatos hatásokat. A legnagyobb hatás a napi minimum-hőmérsékletre és az abból származtatott trópusi éjszakák számára volt. Ez a felszíni energiaegyenleg tagjainak átlagos napi meneteiben bekövetkezett változásaival is magyarázható (4. ábra). A megnövelt (csökkentett) zöldfelület-arány hatására nappal a látens hőfluxus nőtt (csökkent) a referencia-kísérlethez képest, míg a szenzibilis hőáram és a talajhőáram csökkent (nőtt). A talajhőárambeli változások közvetlenül kihatnak a minimum-hőmérséklet alakulására, hiszen ha nappal több hőt kap a talaj, illetve a városi felszín, akkor éjjel többet is sugároz ki, tehát a minimum-hőmérséklet növekszik.

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 a kerület keleti felében legfeljebb 4 nappal csökkent (6 nappal növekedett) (5. ábra). A fluxusok nappali módosulása csak igen kis mértékben hatott a nappali 2 m-es hőmérséklet alakulására. Ennek oka részben az, hogy nappal, amikor nagyobb a turbulencia, ezek a változtatások kevésbé érvényesülnek a jobb átkeveredés miatt; másrészt az általunk használt SURFEX verzióban a városi és természetes területek feletti fizikai folyamatok elkülönülve kerülnek kiszámításra az egyes rácscellákban, emiatt a városi fák árnyékoló, párologtató hatása nincs figyelembe véve. Ennélfogva a napi maximum-hőmérséklet mindössze néhány tizedfokot változott mindkét

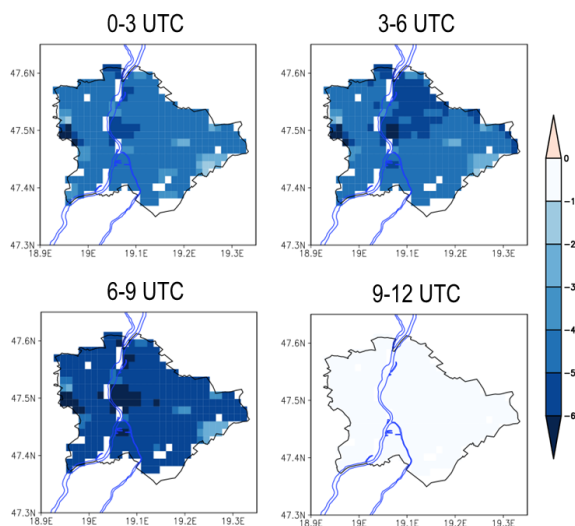


5. ábra. A meleg éjszakák számának változása (nappal) a referencia-kísérlethez képest a XII. kerület természetes terület csökkentésének (balra) és növelésének (jobbra), valamint a növényzet módosításának hatására 2045 augusztusára az RCP8.5 forgatókönyv alapján.

kísérletben, s a napi átlaghőmérséklet területi átlaga sem érte el az 1°C-ot. Az elsőfokú és a másodfokú hóhullámos napok³ számában néhány napos változás mutatkozott. Hasonlóan a trópusi éjszakákhoz, a fa arány növelésével kisebb módosulást értünk el az index értékében, mint csökkentésével. A két antropogén forgatókönyv alkalmazása ebben a kísérletcsoportban sem okozott jelentős eltérést.

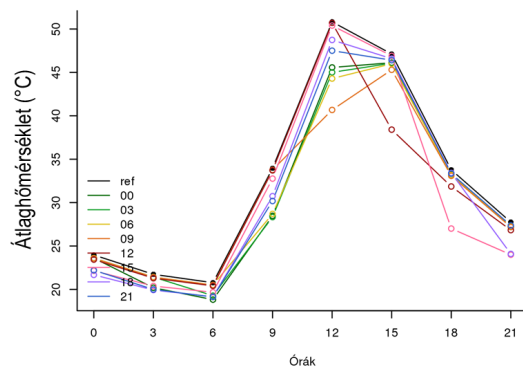
Öntözés és locsolás napon belüli időpontjának hatása

A locsolási és öntözési időpontok két csoportra oszthatók hatás szempontjából: nappali locsolás/öntözés 6, 9, 12 és 15 UTC-kor és éjszakai locsolás/öntözés 18, 21, 0 és 3 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 vízkijuttatás ezzel szemben elnyújtottan fejti ki hatását, amelynek mértéke kisebb, mint a nappali esetekben. 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 meleg időszakokra vonatkozó kísérletek között nem volt jelentős különbség, azonban a legtöbb esetben a meleg időszak kísérletében volt nagyobb eltérés a referenciától (elsősorban a minimum-hőmérséklet tekintetében).



6. ábra. Az utak napi átlagos maximum-hőmérsékletének változása (°C-ban) a 0 és 3, a 3 és 6; a 6 és 9; valamint a 9 és 12 UTC között történő öntözés/locsolás hatására a 2045. augusztus 18–21. időszakra az RCP8.5 forgatókönyv használatával.

A locsolási és az öntözés az időszaktól függetlenül a hőmérsékleti értékek csökkenését eredményezte, de a napi átlagértékek nem mutattak érzékenységet arra, hogy melyik időpontban történt a víz kijuttatása. A napi maximum-hőmérsékletekben akkor érhető el a legnagyobb csökkenés, ha a locsolás és az öntözés a maximum beállta előtt, tehát 12 UTC-ig történik. Ez 2 m-es magasságban közvetlenül előtte, a felszínen pedig a megelőző néhány órában értendő. A teljes területre vonatkozó átlagos maximum-hőmérséklet csökkenése előbbi esetén 0,01–0,7 °C, utak és tetők felszíni hőmérsékletében pedig 0,01–5,55 °C (6. ábra az utakra). A nappali – különösen a 12 és 15 UTC-kor történő – öntözés és locsolás hőmérsékletmódosító hatása szinte azonnal jelentkezik, de 3 óra elteltével már lényegében nem érzékelhető (7. ábra). A napi minimum-hőmérsékletek esetén akkor érhető el a legnagyobb csökkenés, ha a locsolás és az öntözés a minimum beállta előtti időszakban történik, jellemzően este vagy éjszaka. 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 kevésbé intenzív hőmérsékletmódosító hatás akár az esti órákig is kitarthat (7. ábra).



7. ábra. Az utak Budapest területére számított 3-óránkénti átlaghőmérséklete (°C-ban) a referenciakísérletben (fekete), valamint a különböző időpontokban történő öntözéssel, illetve locsolással számoló kísérletekben (színes görbék) a 2045. augusztus 18–21. időszakra az RCP8.5 forgatókönyv használatával.

Összefoglalás

A bemutatott vizsgálatokban a városi hősziget-intenzitás csökkentésére irányuló lehetőségeket és azok hatását modellkísérletek segítségével térképeztük

³Elsőfokú és a másodfokú hóhullámos napok: amikor a napi átlaghőmérséklet eléri, illetve 3 egymást követő napon eléri a 25 °C-ot.

fel a szakirodalom ajánlásai alapján. A szimulációkhoz a SURFEX felszíni modellt használtuk Budapest területére 1 km-es rácsfelbontással.

Az első szimulációs csoportban a tetők és az utak egész városra kiterjedő albedó-növelésének hatását vizsgáltuk, amit egy városban ezek átszínezésével illetve a burkolatuk cseréjével lehet elérni. A módosításnak a nyári hónapokban, és elsősorban a nappali órákban volt számottevő hatása: a napi felszínhőmérséklet maximumában 10 °C közeli, míg a 2 m-es hőmérsékletben kb. 0,2 °C csökkenés volt elérhető. Az eredmények felhívják a figyelmet arra, hogy a felszín burkolatának és/vagy színének megváltoztatása jelentősen csökkentheti például a kötőpályás közlekedés esetén a sínek hőterhelését vagy a lakásokban a tetőterek hűtésigényét.

A második szimulációs csoportban a természetes területek és benne a fák arányának megváltoztatásának hatását vizsgáltuk Budapest XII. kerületének egy részén. A füves és fás területek növelésének hatására a hőmérséklet csökkent, míg ezen területek megszüntetésével nőtt. A változtatás a napi minimum-hőmérsékletre és az abból számított trópusi éjszakák számára volt a legnagyobb hatással: 30%-os zöldterület növeléssel a meleg éjszakák száma legfeljebb 4 nappal csökkent, ugyanakkor 30%-os zöldterület csökkentéssel legfeljebb 6 nappal növekedett a vizsgált április-október időszakban. Tehát a csökkentés nagyobb negatív hatást eredményezett, mint a növeléssel elérhető pozitív hatás, ami kiemeli a meglévő zöldterületek megővésének fontosságát.

A zöldterületek hőmérséklet-csökkentő hatásukat csak megfelelő öntözés mellett tudják kifejteni. A harmadik szimulációs csoport célja ezért ennek napon belüli optimális időpontjának meghatározása volt. A nappali öntözés esetén a víznek nincs ideje beszivárogni a talajba, így az eredmények alapján a kiváltott intenzívebb hőmérséklet-csökkenés rövid ideig érvényesül. Éjszakai locsolás esetén a hatás intenzitása kisebb, de kitart a délutáni órákig, csökkenthető vele a jellemzően éjszakai órákban maximalizálódó városi hősziget. A legnagyobb hatás akkor érhető el, ha a víz kijuttatása a szélsőérték (a napi minimum- vagy maximum-hőmérséklet) beállta előtt történik. A megállapítások mind a felszíni, mind a 2-méteres hőmérsékletre érvényesek, ugyanakkor – az előző két kísérletcsoporthoz hasonlóan – ismét a felszíni hőmérsékletben mutatkozik csak jelentősebb, néhány fokos csökkenés.

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 adaptációs opciókat is egyszerűsített módon próbáltuk ki a szimulációkban. A legfrissebb modellverzió több lehetőséget ad a beállítások változtatására, ezért a további vizsgálatokhoz célszerű áttérni a használatára. Ugyanakkor napjainkban városi modellezés esetén a cél a néhány száz méteres térbeli felbontás elérése, melyhez elengedhetetlen a hasonlóan finom felbontású felszíni adatbázisok létrehozása.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben bemutatott eredmények a Városi Eső (LIFE20 CCA/HU/001774 azonosítószámú) projekt támogatásával készültek. A szerzők hálás köszönetüket fejezik ki *Zempléni Zsuzsannának* a vizsgálatok során végzett munkájáért. Továbbá köszönet illeti *Rózsa Zoltánt* és a projekt többi munkatársát, akik kérdéseikkel és észrevételeikkel nagyban hozzájárultak az eredmények hasznosíthatóságának meghatározásához.

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. <https://doi.org/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*, 25p
- Allaga-Zsebeházi, G., 2024: Estimating the climate change impacts in urban areas using the SURFEX land surface model. PhD disszertáció. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest. 149 p. doi: 10.15476/elte.2024.087
- Balany, F., Ng, A.W., Muttil, N., Muthukumar, S., and Wong, M.S., 2020: Green Infrastructure as an Urban Heat Island Mitigation Strategy - A Review. *Water*, 12, 3577. <https://doi.org/10.3390/w12123577>
- Bán, B., Szépszó, G., Allaga-Zsebeházi, G., and Somot, S., 2021: ALADIN-Climate at the Hungarian Meteorological Service: from the beginnings to the present day's results. *Időjárás* 125, 647–673. <https://doi.org/10.28974/idojaras.2021.4.6>
- Bhumralkar, C.M., 1975: Numerical experiments on the computation of ground surface temperature in an atmospheric general circulation model. *Journal of Applied Meteorology* 14, 1246–1258. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1975\)014<1246:-NEOTCO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1975)014<1246:-NEOTCO>2.0.CO;2)

- Blackadar, A.K., 1976: Modeling the nocturnal boundary layer. In: Proceedings of the Third Symposium on Atmospheric Turbulence, Diffusion, and Air Quality. *American Meteorological Society, Rayleigh*, 46–49.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.11.001>
- Deardorff, J.W., 1977: A Parameterization of ground-surface moisture content for use in atmospheric prediction models. *Journal of Applied Meteorology* 16, 1962–1982. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1977\)016<1182:A-POGSM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1977)016<1182:A-POGSM>2.0.CO;2)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2021.101600>
- Göndöcs, J., Breuer H., Pongrácz, R. and Bartholy, J., 2018: Projected changes in heat wave characteristics in the Carpathian Basin comparing different definitions. *International Journal of Global Warming* 16, 119. doi:10.1504/IJGW.2018.094552
- 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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.3390/buildings1207092512>
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution on Climate Change of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. *Cambridge University Press*, Cambridge (United Kingdom) and New York, NY (USA), 3056 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Masson, V., 2000: A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models. *Boundary-Layer Meteorology* 94, 357–397. <https://doi.org/10.1023/A:1002463829265>
- Masson, V., Champeaux, J.-L., Chauvin, F., Meriguet, C. and Lacaze, R., 2003: A global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models. *Journal of Climate* 16, 1261–1282. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)16<1261:AG-DOLS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)16<1261:AG-DOLS>2.0.CO;2)
- Masson, V., Le Moigne, P., Martin, E., Faroux, S., Alias, A., Alkama, R., Belamari, S., Barbu, A., Boone, A., Bouysse, 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. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-929-2013>
- NÉSZ-2, 2018: Second National Climate Change Strategy (in Hungarian). *Ministry of Innovation and Technology*, Budapest (Hungary), 251 p.
- Noilhan, J., Planton, S., 1989: A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly weather review*, 117(3), 536–549. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<0536:ASPOLS>2.0.CO;2](https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Oke, T.R., 1987: *Boundary layer climates*, 2nd ed. Routledge, New York (USA)
- 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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/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*. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-2024-2>

Internetes hivatkozások

- [1] https://www.met.hu/eghajlat/eghajlatvaltozas/megfigyelt_hazai_valtozasok/hosegindexek/