

Az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvekkel készített SURFEX városi éghajlatváltozási kísérletek kiértékelése

Allaga-Zsebeházi Gabriella
Országos Meteorológiai Szolgálat



Budapest, 2021. december

Tartalom

Motiváció	3
1. Bevezetés	3
2. A SURFEX felszíni modell	6
3. Modellkísérletek és kiértékelési módszerek	7
3.1. A városi projekciók értelmezése és a hibák figyelembevétele.....	8
3.2. Kiértékelési eszközök.....	9
4. Eredmények	11
4.1. Hőmérséklet	11
4.2. Városi hősziget-intenzitás.....	15
4.3. Éghajlati indexek.....	16
4.4. A város méretének és elhelyezkedésének hatása a városi éghajlatra – Budapest és Szeged összevetése	18
4.5. A hőmérséklet és hőmérsékleti indexek várható értékei Budapesten korrigált modelleredmények alapján.....	20
5. Összefoglalás	22
Irodalomjegyzék	23

Motiváció

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál (OMSZ) a magyarországi jövőbeli éghajlatváltozás becslése két regionális éghajlati modellen alapszik, az ALADIN-Climate és REMO modelleken. Ezekkel a modellekkel a korábbi években számos hatásvizsgálati tanulmányban vettünk részt, valamint eredményeik alapul szolgálnak a tervezési feladatokhoz és az éghajlatváltozással kapcsolatos alkalmazkodási döntések meghozatalához is. Ezek közül több esetben a hatásvizsgálat és tervezés tárgya a városok, városi lakosság volt. Például az Orientgate projektben a hőhullámok változását Budapestre és Veszprémre vizsgáltuk, míg a KRITÉR projektben a városlátogató turizmussal, valamint az egészségügyi kockázatokkal kapcsolatos hatásvizsgálatokhoz járultak hozzá regionális éghajlati szimulációink. Ezzel megvalósult az a célkitűzés, hogy az éghajlatváltozással kapcsolatos alkalmazkodási döntések számszerű regionális éghajlati modelleredményeken alapuló célzott hatásvizsgálatokra támaszkodjanak. Ugyanakkor hazai és nemzetközi szinten is mind nagyobb igény mutatkozik a városokban várható éghajlatváltozás részletesebb leírására. Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál a városi éghajlatváltozás leírására ún. *felszíni modellt* alkalmazunk, amely csak a légkör néhány 10 m-es rétegének fizikai folyamatait, valamint a felszínnel kapcsolatos kölcsönhatását írja le. Ennek köszönhetően a modell km-es skálán képes szimulálni a városok éghajlati folyamatait kis számításigény mellett.

A „KlimAdat – Az éghajlatváltozás magyarországi hatásainak feltérképezése regionális klímamodell-szimulációk elvégzésével és reprezentatív adatbázis fejlesztésével” KEHOP 1.1.0-15-2015-00001 számú projekt fő célkitűzése, hogy egy olyan éghajlati adatbázis épüljön ki az OMSZ-nál, amely objektív háttérként segíti az alkalmazkodással kapcsolatos tervezést és döntéshozatalt. Az adatbázisba mérések és regionális éghajlati modelleredmények mellett a SURFEX felszíni modellre támaszkodva 1 km-es horizontális felbontású városi éghajlati projekciós eredmények is bekerülnek.

Ehhez első lépésként a SURFEX modellt egy részletes tesztelésnek és validációs vizsgálatoknak vetettük alá, hogy megismerjük a modell viselkedését és éghajlati skálán való alkalmazhatóságát. Ezt követően eltérő antropogén forgatókönyvekkel meghajtva két szimulációt végeztünk el a XXI. századra Budapestre és Szegedre. Jelen beszámolóban ezeket a projekciós eredményeket mutatjuk be részletesen.

1. Bevezetés

A városok éghajlati jellemzője több tekintetben eltér a természetes területek éghajlatától, ami fizikai és morfológiai tulajdonságaik különbségeivel magyarázható. A városok jellemzően 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 hősugárzás 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.

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 egynegyedét 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 klímamodellek tehát önmagukban ma még nem alkalmazhatók arra, hogy részletes információt adjanak az éghajlatváltozás városi hatásairól. A regionális klímamodell-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.

A jövőbeli éghajlatváltozás modellezése bizonytalanságokkal terhelt, melyeket figyelembe kell vennünk a várható éghajlatváltozás lehetséges irányainak és mértékének becslésénél. A bizonytalanságok az alábbi forrásokból származnak:

1. Az éghajlati rendszer belső tulajdonsága a *természetes változékonyság*, melynek köszönhetően a rendszer külső kényszer nélkül is folyamatosan változik. Rövidebb időskálán ezzel magyarázható pl. az átlagosnál melegebb és hidegebb évek váltakozása.
2. A bizonytalanság másik lényeges összetevője abból ered, hogyan írjuk le a klímamodellekkel az éghajlati rendszerben zajló folyamatokat. Ugyan minden klímamodell az éghajlati rendszer viselkedését jellemzi közelítő módon, mégis a *fizikai folyamatok leírása* különbözőképpen történik az egyes modellekben. Ez a globális és regionális eredményekben eltérésekhez vezet, melyek hatással vannak a

felszíni modell viselkedésére. Az alkalmazott modellkombináció (globális-regionális-felszíni) hibáiról a validáció során szerzünk ismereteket.

3. A modellszimulációkban a természetes éghajlatalkító folyamatok mellett az emberi tevékenység hatását is figyelembe kell vennünk. Az antropogén tevékenység éghajlatmódosító hatását meghatározó politikai, gazdasági és társadalmi folyamatok jövőbeli alakulását azonban nem tudjuk egyértelműen előrejelezni, ezért ennek leírására különböző (pl. alacsony, magas, közepes mértékű kibocsátáshoz tartozó) ún. *forgatókönyveket (scenáriókat)* definiáltak. Ezeket a hipotetikus scenáriókat a globális és regionális éghajlati modellek az üvegházgázok és aeroszol részecskék koncentrációjának különböző jövőbeli időszoraként veszik figyelembe. A felszíni modellekben az emberi hatás közvetetten, az eltérő forgatókönyvekkel meghajtott globális és regionális modellek által leírt különböző légköri kényszerek útján jelenik meg. Ezeket a kísérleteket projekcióknak nevezzük.

A projekciók bizonytalanságát az ún. *ensemble* (együttes) *technika* segítségével számszerűsítjük az éghajlati modellezés során. Ez azt jelenti, hogy több modellszimulációt készítünk eltérő globális- és regionális klímamodellekkel, valamint forgatókönyvekkel, és ezeket a szimulációkat az éghajlatváltozás egy-egy lehetséges realizációjának tekintjük. A különböző regionális modellszimulációk eredményeit felhasználva több kísérletet végzünk a felszíni modellekkel is, ezzel vizsgáljuk azt, hogy az éghajlatváltozás egy-egy lehetséges iránya hogyan hat a városi éghajlat alakulására. A modellszimuláció-sokaságot együttesen tekintve az éghajlatváltozás lehetséges kimeneteinek valószínűségét adhatjuk meg.

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál az éghajlatváltozás városi hatásainak vizsgálatára a SURFEX (Surface Externalisé, *Masson et al., 2013*) felszíni modellt alkalmazzuk, melynek első változatát a francia meteorológiai szolgálatnál fejlesztették ki. Jelenleg két városra végzünk szimulációkat, Budapestre és Szegedre, mert ebben a két városban állnak rendelkezésre hosszabb időszakot felölelő városi és városkörnyéki állomási mérések, valamint méréseken és modellezésen alapuló városi éghajlatváltozási vizsgálatok (*Göndöcs, 2020; Gál et al., 2021, Dian et al., 2020*).

A SURFEX-et néhány évre vonatkozó érzékenységi vizsgálat során teszteltük, hogy a modell működését megismerjük és az optimális futtatási beállításokat meghatározzuk. Ezt követően több évtizedes múltbeli időszakra végeztünk validációt Budapestre és Szegedre (*Zsebeházi, 2020; Zsebeházi and Szépszó, 2020; Zsebeházi and Mahó, 2021*). A kísérletekben az ALADIN-Climate szolgáltatotta a légköri kényszereket a SURFEX számára. A vizsgálatok során megállapítottuk, hogy az ALADIN nyár kivételével alábecsüli a hőmérsékletet Budapest felett, míg nyáron erős felülbecslés adódott. A SURFEX az ALADIN hőmérséklet-eredményeit melegíti, ami nyáron kismértékben tovább növeli az ALADIN felülbecslését, míg a többi évszakban a regionális modell alulbecslését némileg kompenzálja. Az átlagos évszakos UHI napi menete jól közelíti a mért napi menetet, kivéve a délutáni órákban, amikor az UHI

kifejlődése a megfigyelésnél lassabban megy végbe. A legnagyobb felülbecslés tavasszal fordult elő.

A validációs vizsgálatok lezárultával jövőre vonatkozó városi projekciós kísérleteket készítettünk Budapestre és Szegedre, amelyekhez szintén az ALADIN-Climate regionális klímamodell szolgáltatotta a légköri kényszereket. A SURFEX-szel elsősorban a hőmérséklettel kapcsolatos jellemzőket vizsgáljuk, és a hőmérsékleti projekciók esetében a bizonytalanság elsődleges forrása az emberi tevékenység közelítő leírása. Ennek figyelembevételére egy közepes és egy magas kibocsátást feltételező forgatókönyvet alkalmaztunk a projekciókban.

A továbbiakban részletesen bemutatjuk a SURFEX modellt, a felhasznált adatokat, az elvégzett kísérleteket és a kapott eredményeket a hőmérsékletre és a hősziget-intenzitásra vonatkozóan.

2. A SURFEX felszíni modell

A SURFEX a felszín, valamint a felszínnel közvetlen kapcsolatban lévő légréteg (a planetáris határréteg) néhány 10 m-es rétege közötti fizikai folyamatokat és kölcsönhatásokat írja le. A modell négy fő felszín típust különböztet meg:

- 1.) a vegetációval borított, vagy vegetáció nélküli természetes földfelszín;
- 2.) a folyókat és tavakat;
- 3.) a tengereket;
- 4.) és a városokat.

Egy modellbeli rácscella felszínborítása e négy felszín típus relatív arányának kombinációja szerint áll elő. A négyféle felszín típus fizikai folyamatai igen eltérőek egymástól, ezért a számításokat különböző sémák végzik, melyek eredményei a számítási ciklus végén területarányosan átlagolódnak az egyes rácscellákra. Az egyes rácscellák felszíni paramétereit az ECOCLIMAP (*Masson, 2003*) 1 km-es felbontású globális felszíni adatbázis tartalmazza, mely összesen 255 felszínborítási kategóriát különböztet meg (pl. mérsékelt övi külváros, közép-európai szántó föld). Ez egy statikus adatbázis, a 90-es években megfigyelt felszínborítást mutat, és a felszínborítás azóta bekövetkezett változását (ami a városok esetében jelentős lehet) nem veszi figyelembe.

A városokban városi felszín és a nagyon sűrűn beépített belváros kivételével természetes területek is jelen vannak. A városi felszín felett a TEB (Town Energy Balance; *Masson, 2000*) séma, míg a természetes felszín felett az ISBA (Interaction Soil Biosphere Atmosphere; *Noilhan and Mahfouf, 1996*) séma végzi a számításokat. A TEB a városi tereket az ún. *kanyon közelítéssel* reprezentálja, miszerint az utcák egymással szemben álló, azonos tulajdonságokkal rendelkező épületekből állnak. Egy rácscellában egy utcakanyon található, tehát az épületek nem különülnek el rácscellán belül. A séma időtől függő (prognosztikus) változói a felszíni hőmérséklet és nedvesség, amelyek három különböző felszín típusra (tető, fal, út) három rétegben külön-külön kerülnek kiszámításra. A TEB figyelembe veszi a városok energiaháztartásában szerepet játszó antropogén hőtermelést, azaz az épületek fűtését, az

ipar és közlekedés hőkibocsátását is. Az ISBA séma a talaj hő- és nedvességtartalmának alakulását az ún. *force-restore* (Noilhan and Planton, 1989) módszerrel számítja. A séma a talajt két vagy három rétegre bontja: egy vékony felszíni rétegre és a legfeljebb kétrétegű mélytalajra. A legfontosabb prognosztikus változók a felszín és a mélytalaj hőmérséklete, nedvessége és fagyott víztartalma, valamint a növények levelein felfogott vízmennyiség (intercepció).

A SURFEX alkalmazható légköri modellhez kapcsoltan, illetve attól leválasztva is. A beszámolóban tárgyalt kísérletekben önmagában futtatjuk, a légkör állapotát pedig az ALADIN-Climate regionális klímamodell (Bán et al., 2021) eredményei írják le számára külső kényszerek formájában. Ezek a 30 m magasságban modellezett hőmérséklet, légnedvesség, szélsébség, szélirány, a felszíni légnyomás, a lefele irányuló rövid- és hosszuhullámú sugárzás, valamint az eső és hó formájában hulló csapadék. A felszín és a légköri kényszerek szintje közötti néhány 10 m-es légréteg folyamatait a modell 6 modellszinten számítja. A modellszintek a felszín közelében sűrűbben, attól távolabb ritkábban helyezkednek el. A 2 m-es hőmérséklet és 10 m-es szélsébség prognosztikai egyenletek segítségével kerül kiszámításra.

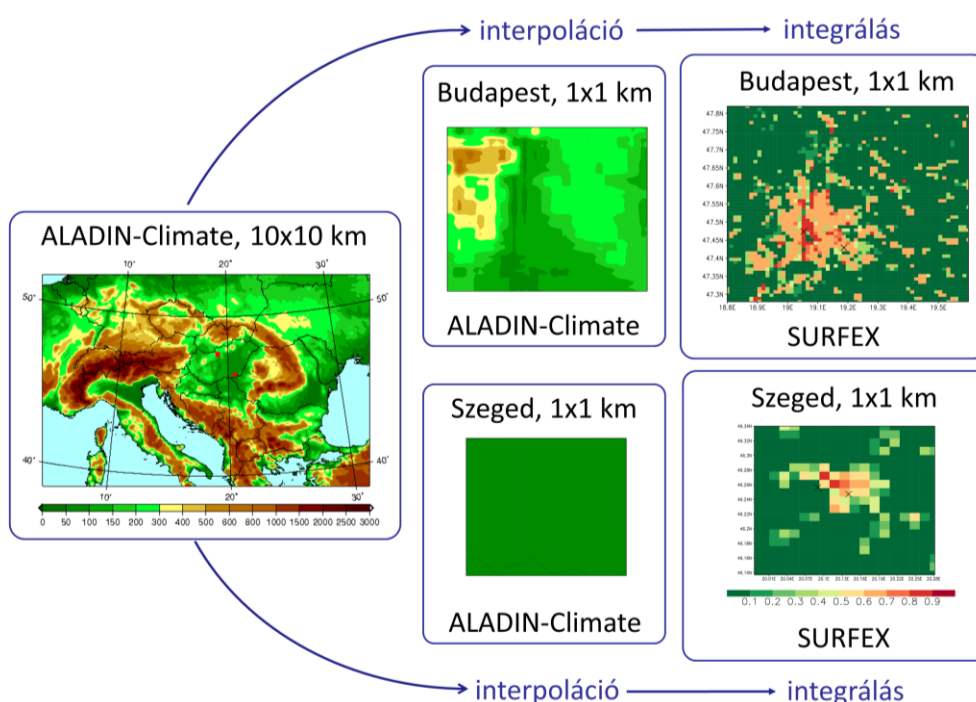
3. Modellkísérletek és kiértékelési módszerek

A jövőbeli városi éghajlatváltozás vizsgálatára a SURFEX-szel két-két 1 km-es horizontális felbontású szimulációt végeztünk Budapestre és Szegedre (**1. táblázat**). A kiindulási adatokat nyújtó ALADIN-Climate számára a CNRM-CM5 globális klímamodell (Voldoire et al., 2013) szolgáltatta a határfeltételeket, amit két lépésben (egy 50 km-es felbontású szimuláció közbeiktatásával) skáláztak le 10 km-es felbontásra. Az ALADIN kísérletekben az emberi tevékenység leírására a sugárzási kényszer változásán alapuló RCP (Representative Concentration Pathways; Meinshausen et al., 2011) forgatókönyvek közül a közepes kibocsátást feltételező RCP4.5 és a magas kibocsátást feltételező RCP8.5 forgatókönyveket alkalmazták, melyek az ipari forradalom szintjéhez képest rendre 4,5 és 8,5 W/m² sugárzási kényszernövekedéssel számolnak.

A 10 km-es felbontású ALADIN eredményeket először a domborzat és a légrétegződés figyelembevételével 1 km-es felbontásra interpoláltuk, valamint kiszámítottuk a szükséges változók 30 m magasságbeli értékét (**1. ábra**). A budapesti modelltartomány 72x72 rácspontból, a szegedi tartomány 25x25 rácspontból áll. Az előfeldolgozást követően elvégeztük a jövőre vonatkozó városi projekciókat a SURFEX-szel a 2006–2100 időszakra Budapestre és Szegedre. Az éghajlatváltozás vizsgálatához referencia-időszakot az 1960–2005 időszakra futtatott ún. *kontroll kísérlet* eredményeiből választunk, melyet a validáció során értékeltünk ki.

1. táblázat. A projekció során a SURFEX-szel elvégzett két kísérlet főbb jellemzői.

Kísérlet	SURFEX-ARP
Légköri kényszerek forrása (RCM_GCM)	ALADIN-Climate_CNRM-CM5
Légköri kényszerek felbontása	10 km
SURFEX horizontális felbontása	0,01 fok ~ 1 km
SURFEX integrálási időlépcsője	5 perc
Tartomány	Budapest, Szeged
Integrálási időszak	1960–2100
Antropogén forgatókönyvek	RCP4.5, RCP8.5



1. ábra. A SURFEX alkalmazásának folyamatábrája Budapestre és Szegedre. Első oszlop: 10 km-es felbontású ALADIN-Climate tartománya és domborzata. Középső oszlop: a budapesti és szegedi tartomány 1 km-es felbontású domborzata. Utolsó oszlop: az ECOCLIMAP adatbázis alapján a rácscellák területét borító relatív városi felszín arány.

3.1. A városi projekciók értelmezése és a hibák figyelembevétele

A regionális éghajlati projekciókhoz hasonlóan a városi felszíni modellszimulációk is hibákkal terheltek. Ezeket a hibákat a validációs vizsgálatok során felmértük (Zsebeházi, 2020) és a projekciós eredményekben figyelembe vesszük. A regionális klímamodellezésben ezt a legegyszerűbb módon úgy tesszük meg, hogy a referencia-időszak méréseit és a modelleredmények által a jövőbeli időszakra jelzett változást kombináljuk. Jelen beszámolóban bemutatott eredményeket változások formájában közöljük. A modelleredmények további (pl. hatásvizsgálatokban, tervezésben) felhasználása során

azonban gyakran nem elégséges a változást ismerni, ha a hatásvizsgálati módszer a modellezett meteorológiai változó várható jövőbeli értékét vagy idősorát igényli. Ilyen esetben a modelleredményeket megfigyelésekkel korrigáljuk, amelyre számos módszer létezik.

A legegyszerűbb hibakorrektív eljárás során a modell változásértékeit a hőmérséklet esetén additívan, a hőmérsékleti indexek esetén multiplikatívan kombináljuk a múltbeli referencia-időszak mért értékeivel. Ezt az eljárást *delta módszernek* nevezzük. Természetesen minden hibakorrektív eljárás igényli a jó minőségű, a modelleredményekkel összevethető részletességű rácsponti mérési adatok létezését. Magyarországra vonatkozóan ilyen a 0.1°-os (hozzávetőlegesen 10 km-es) térbeli felbontású, homogenizált, interpolált CarpatClim-Hu adatbázis (Bihari et al., 2017). Egy 10 km-es felbontású regionális klímamodell eredményeihez ez jól használható, az 1 km-es felbontású városi éghajlati projekciókhoz ugyanakkor nem tartalmaz elég részletes információt (pl. a városi jellemzőket nem adja vissza).

Megfelelő megfigyelési adatbázis hiányában ezért a városi éghajlati projekciók korrigált jövőbeli idősorát a következő módszer szerint állítjuk elő. Azt az elgondolást szem előtt tartva, hogy a SURFEX a regionális éghajlathoz képesti városi éghajlatmódosító hatást írja le, első lépésben a regionális éghajlati modell (jelen esetben az ALADIN-Climate modell) eredményeit korrigáljuk a CarpatClim-Hu adatbázissal, majd ehhez adjuk hozzá a SURFEX által szimulált városi jelet. Az eljárás alkalmazása a hőmérséklet és a hőmérsékleti indexek esetében különbözőképpen történik:

1. átlaghőmérséklet esetében: az ALADIN 30-éves átlagos hőmérséklet-változásához hozzáadjuk a CarpatClim-Hu 30-éves átlagos múltbeli értékét, majd ehhez adjuk a SURFEX által szimulált jövőbeli városi hősziget-intenzitást (a hősziget-intenzitást az egyes rácspontok hőmérséklete és városon kívüli természetes felszínborítású rácspontok térbeli átlagos hőmérsékletének különbségeként definiáljuk).
2. hőmérsékleti indexek esetében: első lépésben egy korrigált átlagos hőmérsékleti évet hozunk létre az ALADIN 30-éves átlagos napi adatainak CarpatClim-Hu-val történő korrekciójával, hozzáadva a SURFEX által szimulált 30-éves várható átlagos hősziget-intenzitást. A hőmérsékleti indexeket ebből a korrigált adatsorból számítjuk.

Meg kell jegyezni, hogy a városi hősziget számításával a SURFEX azon hibáit, ami a meghajtó regionális klímamodell és a felszíni modell kölcsönhatásából keletkezik, a fenti módon kiküszöböljük. Azonban városi skálájú rácsponti adatbázis hiányában a városi jel (városi hősziget kiterjedése és erőssége) érintetlenül marad, így a városi parametrizáció nem ismert hibáit nem szűrjük ki.

3.2. Kiértékelési eszközök

A jövőbeli változásokat két kitüntetett időszakon vizsgáljuk, 2021–2050-ben és 2071–2100-ban, hogy információt adjunk mind a következő évtizedekre vonatkozó felkészülési tervek kidolgozásához, mind a hosszútávú stratégiai döntésekhez. Referenciának csak olyan időszakot választhatunk, ami nem metszi a modellek projekciós időszakát. Ezért a nemzetközi gyakorlatot követve, a jövőbeli eredményeket az 1971–2000 időszak modellezett jellemzőihez viszonyítjuk. Vizsgálatainkat a hőmérséklet és a hősziget-intenzitás változókra végeztük el, órás, napi, éves, évszakos és éves skálán. Ezenkívül a hőmérséklet napi értékeinek alakulására

néhány éghajlati index változását is bemutatjuk, melyek a napi átlag-, maximum- vagy minimumhőmérséklet adott küszöbérték átlépési gyakoriságát számszerűsítik (**2. táblázat**). Közülük néhány az extrém hőmérsékleti értékek változását jeleníti meg.

2. táblázat. A beszámolóban elemzett éghajlati indexek.

Név	Definíció
Hőhullámos nap	Napi átlaghőmérséklet eléri vagy meghaladja a 25 °C-ot
Túl meleg éjszaka	Napi minimumhőmérséklet 20 °C feletti
Fagyos nap	Napi minimumhőmérséklet 0 °C alatti
Zord nap	Napi minimumhőmérséklet -10 °C alatti

A modelleredményeket az alábbi módszerekkel értékeltük:

- **térbeli átlagos változás:** minden rácspontban kiszámítottuk a jövőre és a referencia-időszakra vonatkozó modelleredmények átlagos éves és évszakos különbségét. A hőmérséklet és a hősziget-intenzitás esetén egyszerű különbséget, míg az éghajlati indexek esetében relatív különbséget tekintettünk. A térképeken a változások mértékét színárnyalatok reprezentálják.
- **átlagos változás:** kiszámítottuk az éves, évszakos és havi változás városokra átlagolt értékeit. Az átlagképzés során Budapest esetében csak a közigazgatási határon belül eső rácspontokat vettük figyelembe, hogy a modelltartományba eső kisebb agglomerációs településeket kiszűrjük. Szeged esetében viszont a közigazgatási határon belül sok beépítetlen terület van, valamint a modelltartományba nem esik más település, ezért ebben az esetben azokat a rácspontokat vettük figyelembe, amelyek tartalmazznak városi felszínt.
- **átlagos időbeli szórás:** az időbeli szóráshoz a városokra vonatkozó térbeli átlagok évenkénti éves és évszakos értékeinek szórását tekintettük a múltbeli, valamint a két jövőbeli időszakra.
- **változás időbeli fejlődése 30-éves mozgóátlagok alapján:** meghatároztuk az éves és évszakos átlaghőmérséklet évenkénti eltérését a referencia-időszak átlagától a városokra vonatkozóan. Az évek közötti változékonyságot úgy szűrtük ki, hogy az évenkénti változásokat 30-éves időablakokra átlagoltuk, amit évenként léptettünk. Így egy adott évhez tartozó változásérték a megelőző 30 év átlagos változását mutatja.
- **Whisker-box diagramok:** ezeket a diagramokat a modellszimulációk adott 30 éven belüli havi értékeire készítettük el, hogy az évenkénti változékonyságot vizsgáljuk az egyes hónapokban. A modellkísérletenként és időszakonként különböző színnel jelölt téglalapok alsó és felső határai rendre a minta alsó és felső kvartiliseit (25 és 75 %-os valószínűségeit) jelölik, míg a dobozok közepén lévő vonal a mediánértékeket (a minták középső elemét) mutatja. A dobozok alatt és felett lévő függőleges szaggatott vonalak az adott időszak 30 éve alatt előforduló minimális és maximális havi átlagértékekig nyúlnak (azaz a fennmaradó 25-25%-ot fedik le). Ezen a diagramon a nyers, korrekció nélküli modelleredmények átlagos értékei vannak megjelenítve. Ezért az ábra értelmezése során a konkrét értékek vizsgálata helyett inkább az eloszlás és a változékonyság alakulására fókuszálunk.

- sűrűségfüggvény: a városi rácspontokra átlagolt napi átlaghőmérséklet évszakos értékeinek gyakoriságait jelenítjük meg a múltbeli, valamint a jövőbeli 30-éves időszakokra. Ezek az ábrák is nyers modelleredményeket mutatnak, ezért ebben az esetben is az eloszlás alakjának változását vizsgáljuk és nem a konkrét értékeket elemezzük.
- szórásdiagram (vagy scatterplot): ezen a diagramon a referencia-időszak, valamint a két jövőbeli 30-éves időszak alatt előforduló nyári 0 UTC időpontbeli éjszakai hőszigetintenzitást a napi átlaghőmérséklet függvényében jelenítjük meg. A diagram lehetőséget ad a két változó közötti kapcsolat vizsgálatára. A modelleredmények ebben az esetben sem korrigáltak.
- hőtérkép: a diagramon az UHI napon belüli (3 óránkénti) átlagos értékeinek jövőbeli változását tüntettük fel minden egyes hónapra. A hősziget-intenzitás értékeket a változás mértékének függvényében színeztük. A diagram segítségével átlátható, hogy az UHI napi menete hogyan alakul az év során.

4. Eredmények

4.1. Hőmérséklet

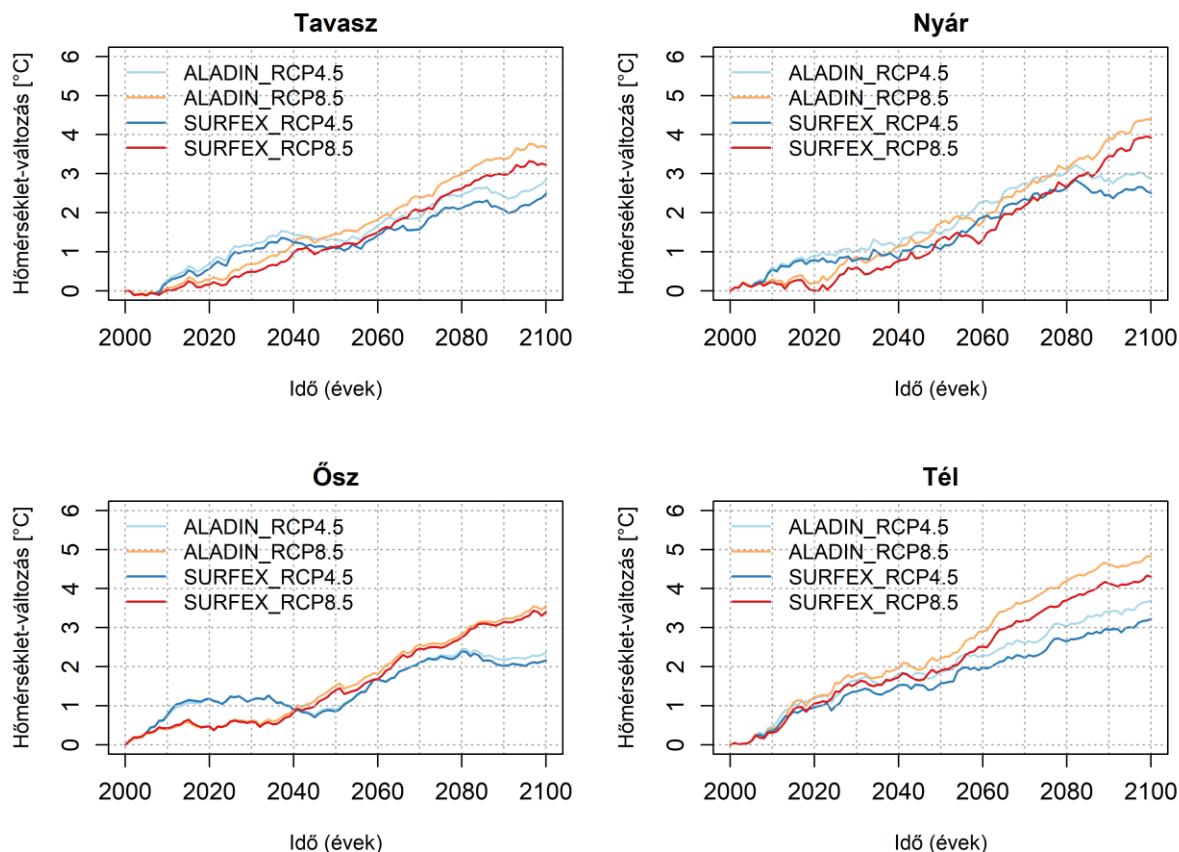
Első lépésként azt vizsgáljuk, hogy a városi folyamatokat részletesebben leíró SURFEX felszíni modell mennyiben ad más eredményeket a meghajtó ALADIN regionális klímamodell hőmérséklet-eredményeihez képest. Ez a kérdés két szempontból is érdekes: egyrészt eddig kizárólag a regionális éghajlati modellek szolgáltattak információt a városi éghajlatváltozásról; másrészt a validációs eredmények elemzése során kiderült, hogy a meghajtó modell viselkedése jelentősen befolyásolja a felszíni modell eredményeit (Zsebeházi, 2020).

A Budapestre vonatkozó évszakos átlaghőmérséklet időbeli fejlődését bemutató ábrán (**2. ábra**) megfigyelhető, hogy a SURFEX mindkét forgatókönyv esetében követi az ALADIN projekcióinak menetét, ugyanakkor a változás mértéke némileg kisebb a felszíni, mint a regionális klímamodellben. Ez a különbség ősszel a legkisebb, a többi évszakban a jelentől távolodva fokozódik és az évszázad végére 0,5 °C fokot ér el. Ez azonban nem jelenti azt, hogy a SURFEX eredményei az ALADIN-énál alacsonyabb városi hőmérsékletet vetítenek előre az évszázad végére, mert a változás a SURFEX esetében egy magasabb referencia-értékhez adódik hozzá részben a városi hősziget megjelenése miatt (Zsebeházi, 2020).

A különböző forgatókönyvekkel készített hőmérsékleti projekciók a XXI. század első felében kevésbé térnek el egymástól, sőt, tél kivételével az alacsonyabb sugárzási kényszerrel jellemzett RCP4.5 forgatókönyvvel nagyobb hőmérséklet-változás adódott, mint az RCP8.5-tel, részben amiatt, hogy az RCP4.5 forgatókönyvvel a hőmérséklet-változás alakulása nem egyenletes. A két szimuláció között az éves átlaghőmérsékletváltozás különbsége 2071–2100-ban 1,1 °C (**3. táblázat**). Tél kivételével minden évszakban megfigyelhető, hogy az optimista forgatókönyvvel meghajtott szimulációban a hőmérsékletváltozás mértéke az évszázad végére állandósul a sugárzási kényszer állandósulásával párhuzamosan.

A legnagyobb évszakos hőmérsékletváltozás a 2021–2050 és 2071–2100 időszakon egyaránt télen várható (**3. táblázat**), mértéke az RCP4.5 forgatókönyvvel rendre 1,6 és 3,2 °C, míg az RCP8.5 forgatókönyvvel 1,9 és 4,3 °C. A legkisebb változással jellemzett évszak

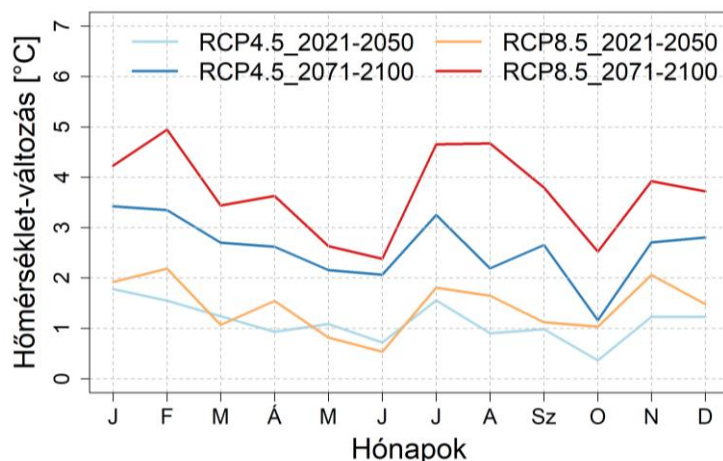
forgatókönyvenként eltérő, de abban minden kísérlet egyetért, hogy az átmeneti évszakok a nyárnál és télnél kevésbé melegednek majd. Az évszázad végére az egyes hónapok hőmérsékletváltozása nagyobb mértékű szórást mutat, mint a 2021–2050 időszakon, valamint az RCP8.5 forgatókönyv szerint július és augusztus igen erőteljesen, 4 °C-ot meghaladó mértékben melegszik (**3. ábra**).



2. ábra. Az átlagos évszakas átlaghőmérséklet változásának (°C) 30-éves mozgóátlaga Budapesten az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvekkel végzett ALADIN és SURFEX kísérletek eredményei alapján. Referencia-időszak: 1971–2000.

3. táblázat. Éves és évszakas átlaghőmérséklet-változás (°C) Budapesten 2021–2050-ben és 2071–2100-ban az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvekkel végzett SURFEX kísérletek eredményei alapján. Referencia-időszak: 1971–2000.

		Éves	Tavaszi	Nyári	Őszi	Téli
2021–2050	RCP4.5	1,1	1,1	1,1	0,9	1,6
	RCP8.5	1,5	1,1	1,3	1,4	1,9
2071–2100	RCP4.5	2,6	2,5	2,5	2,2	3,2
	RCP8.5	3,7	3,2	3,9	3,4	4,3



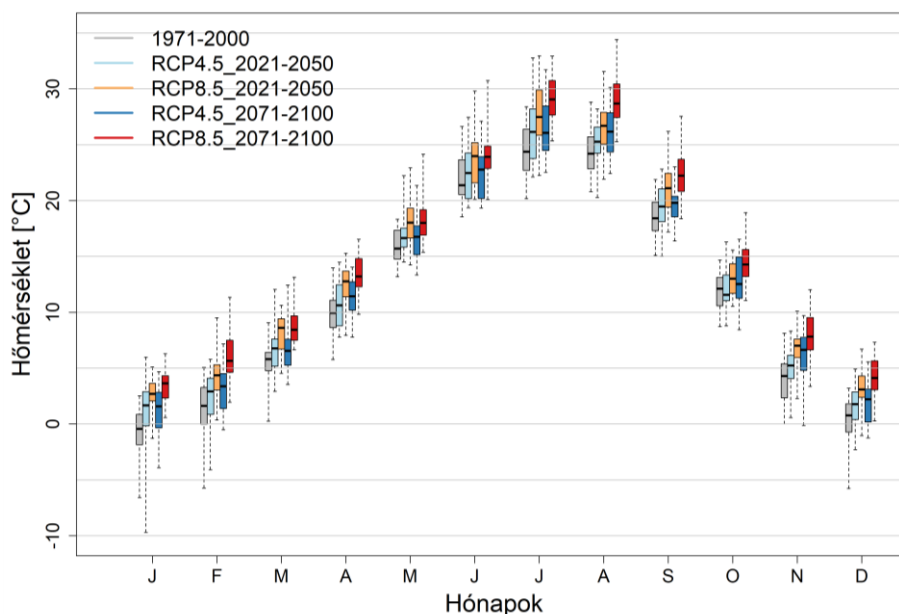
3. ábra. A havi átlaghőmérséklet változása (°C) Budapesten 2021–2050-ben és 2071–2100-ban az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvekkel végzett SURFEX kísérletek eredményei alapján. Referencia-időszak: 1971–2000.

A két vizsgált 30-éves időszakban előforduló havi átlaghőmérsékletek eloszlását Whisker-box diagramon ábrázoljuk (**4. ábra**). Az RCP4.5 forgatókönyvvel előfordulhatnak olyan évek a jövőben is, amikor néhány hónapban (pl. januárban, augusztusban, novemberben) a legalacsonyabb jövőbeli havi átlaghőmérséklet kisebb lesz, mint a referencia időszakban volt. A múltban az évszakos átlaghőmérsékletek változékonysága télen és nyáron hasonló volt (1,7 °C; **4. táblázat**), a jövőben azonban ez nyáron növekszik, míg télen inkább csökken (egy-egy időszakot és forgatókönyvet kivéve). Májusban és júniusban az eloszlás középső 50%-án (**4. ábrán** színes dobozok) kívül eső értékek közül a melegebbek többnyire jóval messzebbre nyúlnak, mint a hűvösebbek, ami arra utal, hogy az átlagosnál sokkal alacsonyabb értékek nem lesznek jellemzőek.

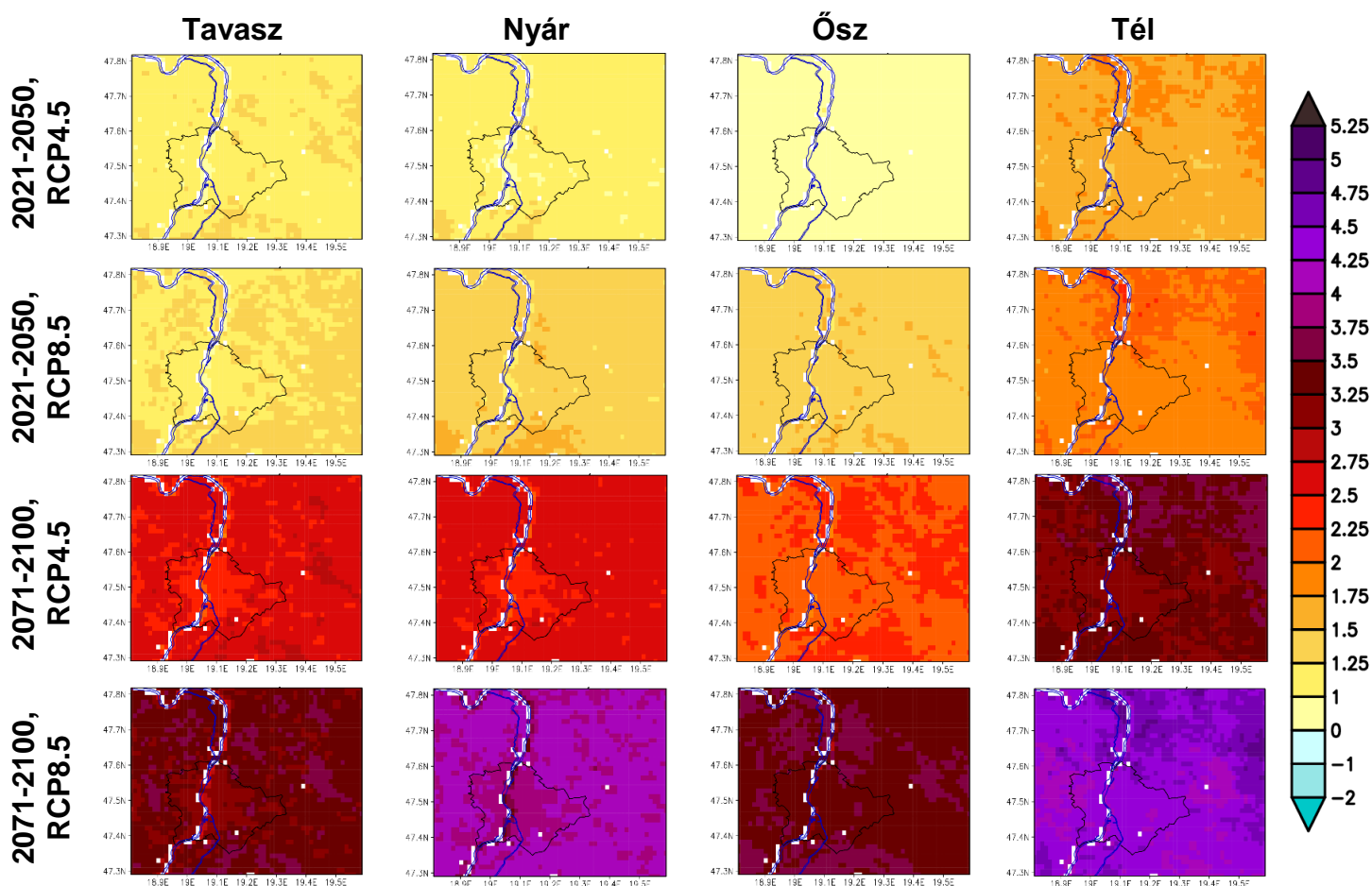
A hőmérséklet-változás térbeli eloszlását a városi és vidéki területek közötti különbségekre fókuszálva vizsgáltuk. A 2021–2050 időszakban a modelltartomány egészét tekintve nem figyelhető meg egyértelmű különbség a beépített és természetes területek felett (**5. ábra**), azonban az évszázad végére különösen tavasszal és nyáron a városi területek 0,25 °C-kal gyengébb mértékben melegednek környezetüknél.

4. táblázat. Évszakos átlaghőmérséklet időbeli szórása Budapesten 1971–2000-ben, 2021–2050-ben és 2071–2100-ban a (jövőre az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvekkel végzett) SURFEX kísérletek eredményei alapján.

		Tavasz	Nyár	Ősz	Tél
1971–2000		1,3	1,7	1,1	1,7
2021–2050	RCP4.5	1,4	1,9	1,3	2,0
	RCP8.5	1,3	1,9	1,1	1,4
2071–2100	RCP4.5	1,4	2,3	1,1	1,2
	RCP8.5	1,2	1,7	1,3	1,3



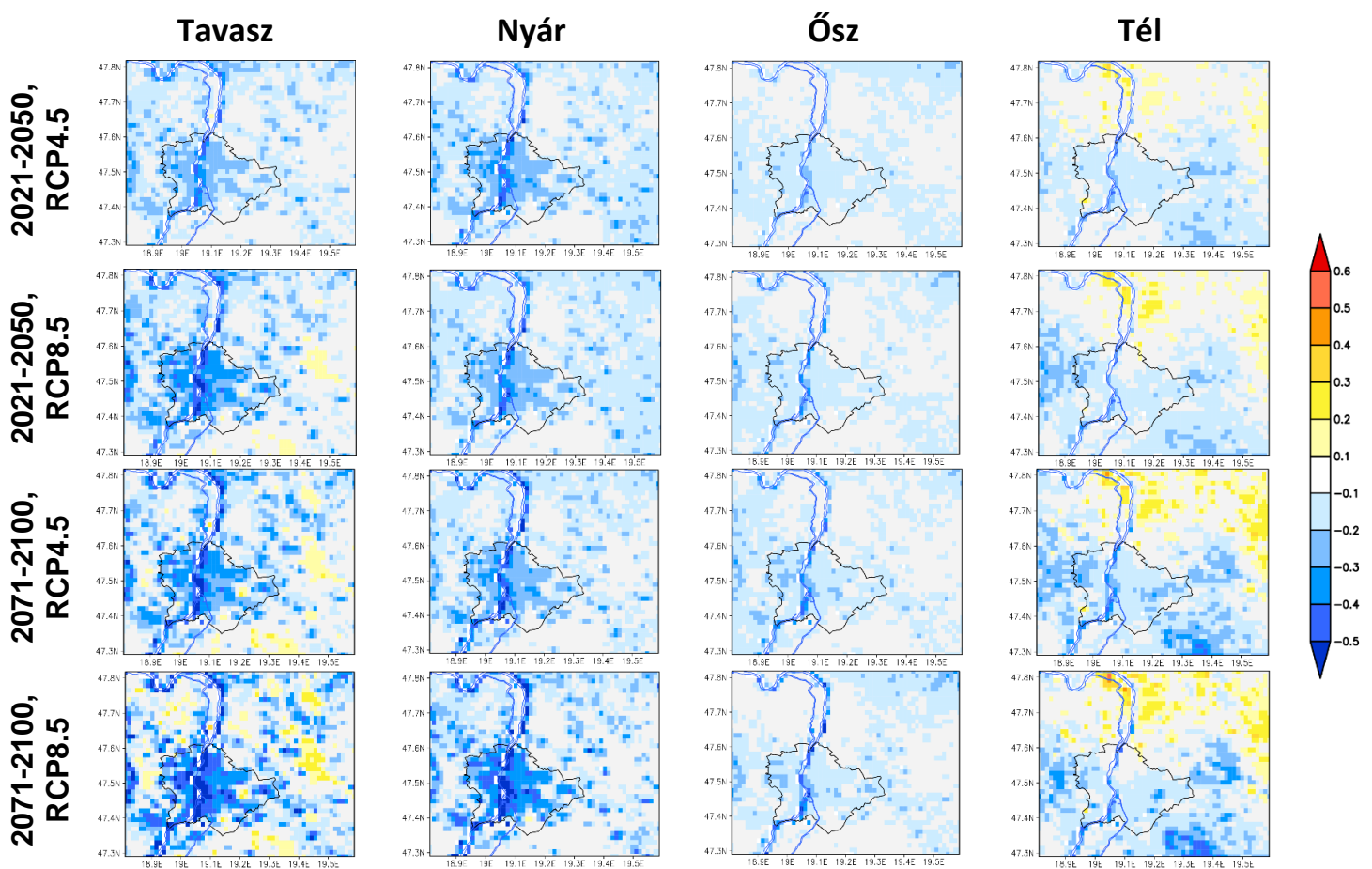
4. ábra. Az évenkénti havi átlaghőmérséklet értékei (°C) Budapesten 1971–2000-ben, 2021–2050-ben és 2071–2100-ban a (jövőre az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvekkel végzett) SURFEX kísérletek eredményei alapján.



5. ábra. Átlaghőmérséklet-változás (°C) Budapesten és környékén 2021–2050-ben és 2071–2100-ban az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvekkel végzett SURFEX kísérletek eredményei alapján. Referencia-időszak: 1971–2000.

4.2. Városi hősziget-intenzitás

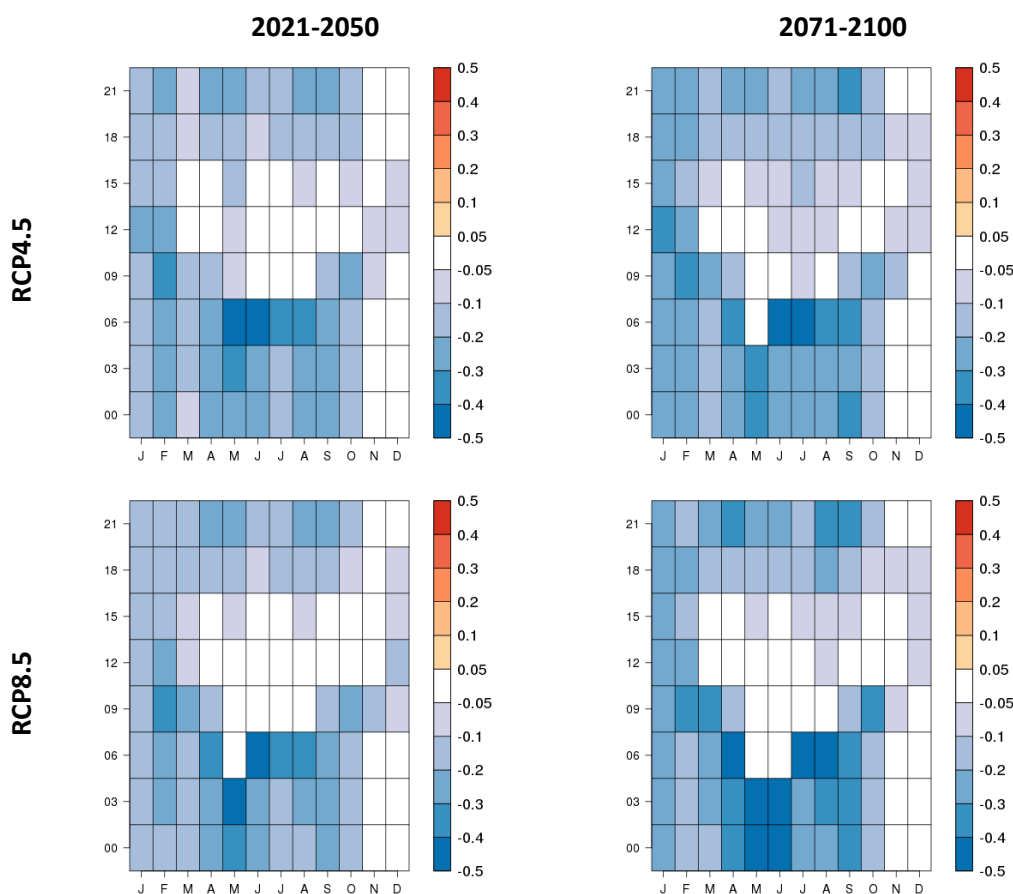
Az átlaghőmérséklet-változás térbeli alakulásának jellemzőiből kiindulva nem meglepő, hogy az éjszakai (0 UTC időpontbeli) városi hősziget intenzitása a jövőben különösen tavasszal és nyáron gyengül (**6. és 7. ábra**). Ha megvizsgáljuk az UHI napi menetének változását az egyes hónapokban, megfigyelhető, hogy a város és a vidék közötti hőmérsékletkülönbség november-december hónapot kivéve 18 és 6 UTC között – tehát az esti, éjszakai és hajnali órákban – változik, nagyobb mértékben az április-szeptember időszakban. A változás mértéke az évszázad végén, valamint az RCP8.5 forgatókönyvvel a legnagyobb, ekkor az egyes hónapokban elérheti a 0,5 °C-ot (a referencia-időszakban a város belső területein 2-3 °C volt az átlagos éjszakai UHI).



6. ábra. A 0 UTC időpontbeli UHI évszakos átlagos változása (°C) Budapesten és környékén 2021–2050-ben és 2071–2100-ban az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvekkel végzett kísérlet eredményei alapján. Referencia-időszak: 1971–2000.

A gyengülő hősziget-intenzitás nem jelenti a város és a környezete közötti hőmérsékletkülönbség megszűnését. A 0 UTC időpontbeli napi UHI intenzitások évszakos eloszlásán (**8. ábra**) megfigyelhető, hogy az UHI intenzitás csökkenéséért elsősorban az erősebb hősziget-intenzitások ritkábbá válása felel, míg az átlag körüli értékek gyakoribbá válnak. A jövőbeli nyári napi átlaghőmérséklet és éjfélbeli hősziget-intenzitás kapcsolatát scatterplot diagramon vizsgáltuk tovább a referencia, valamint a két jövőbeli időszakon (**9. ábra**). A pontfelhő jobbra tolódása jelzi a hőmérséklet növekedését, ugyanakkor a melegebb

értékekhez nem párosul erősebb UHI-intenzitás, sőt – ahogy a sűrűségfüggvény is mutatta – a nagy erősségű UHI-intenzitások gyakorisága csökken. Például a 25 °C-nál melegebb átlaghőmérsékletű napokon (hőhullámos nap) a múltban a legerősebb hősziget-intenzitás elérte a 3,5 °C-ot, az évszázad végén azonban legfeljebb inkább 3 °C körüli lehet.



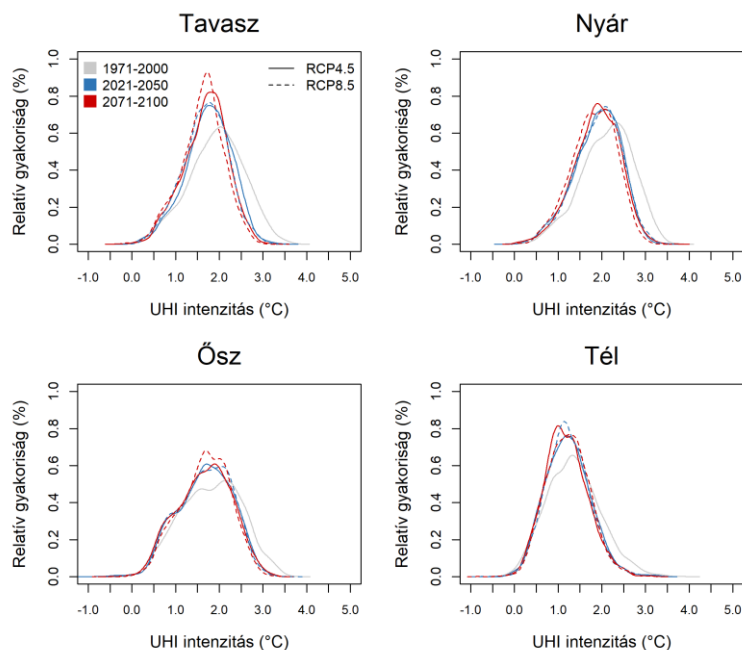
7. ábra. Az átlagos 3-órás hősziget-intenzitás havi értékeinek változása (°C) Budapesten 2021–2050-ben (bal oldali ábrák) és 2071–2100-ban (jobb oldali ábrák) az RCP4.5 (első sor) és az RCP8.5 (második sor) forgatókönyvekkel végzett SURFEX kísérletek eredményei alapján. A mátrix oszlopai a hónapokat, sorai a napon belüli (UTC-ben kifejezett) időpontokat jelölik.

4.3. Éghajlati indexek

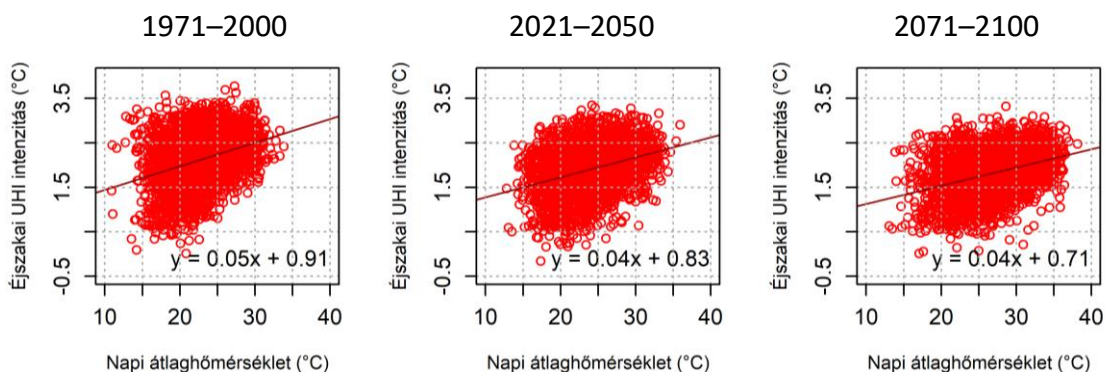
A magas hőmérséklettel kapcsolatos indexek közül a hőségnapokat, hőhullámos napokat és a túl meleg éjszakákat vizsgáljuk. A SURFEX szerint Budapesten a múltban közel azonos számban (33-36 nap között) fordultak elő az ilyen napok (**5. táblázat**). A jövőben a legkevésbé a hőségnapok száma növekszik, míg a hőhullámos napok és túl meleg éjszakák száma már a közeli jövőbeli időszakon 30%-nál nagyobb mértékű változást mutat, az évszázad végén pedig az RCP8.5 forgatókönyvvel legalább a duplájára emelkedik az előfordulásuk. Az indexek változásában megfigyelhető különbségek alapján a nyári minimumhőmérséklet növekedése felülmúlja a maximumhőmérséklet változását.

Az alacsony hőmérséklettel kapcsolatos indexek közül a fagyos napok száma az évszázad végére legalább a felére csökkenhet. A zord napok száma már 2021–2050-ben megfelelőzhet, az évszázad végén pedig szinte nem is fordul majd elő.

Az éghajlati indexek változásának térbeli alakulását vizsgálva elmondható, hogy a magas hőmérséklettel kapcsolatos indexek (a **10. ábrán** a hóhullámos napokat mutatjuk be) relatív értelemben kisebb mértékben változnak (növekednek) a belvárosban, mint a vidéki területek felett, míg az alacsony hőmérséklettel kapcsolatos indexek (a **10. ábrán** fagyos napok) esetén ez fordított.



8. ábra. A 0 UTC időpontbeli napi UHI értékek évszakos gyakorisága (%) Budapesten 1971–2000-ben, 2021–2050-ben és 2071–2100-ban a (jövőre az RCP4.5 és az RCP8.5 forgatókönyvekkel végzett) SURFEX kísérletek eredményei alapján.



9. ábra. A nyári napi átlaghőmérséklet (°C; x-tengely) és a 0 UTC időpontbeli éjszakai hőszigetintenzitás (°C, y-tengely) Budapestre 1971–2000-ben, 2021–2050-ben és 2071–2100-ban a (jövőre az RCP8.5 forgatókönyvvel végzett) SURFEX kísérlet eredményei alapján.

5. táblázat. Éghajlati indexek száma (nap) 1971–2000-ben, illetve gyakoriságuk változása (nap, %) Budapesten 2021–2050-ben és 2071–2100-ban a (jövőre az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvekkel végzett) SURFEX kísérletek eredményei alapján, referencia-időszak: 1971–2000.

	1971–2000 (modell)	Időszak	RCP4.5	RCP8.5
Hőhullámos nap	33 nap	2021-2050	13 nap / 39%	14 nap / 43%
		2071-2100	27 nap / 86%	40 nap / 127%
Hőségnap	36 nap	2021-2050	9 nap / 26 %	9 nap / 24%
		2071-2100	21 nap / 60%	30 nap / 84%
Túl meleg éjszaka	34 nap	2021-2050	15 nap / 49%	17 nap / 59%
		2071-2100	31 nap / 106%	47 nap / 164%
Fagyos nap	81 nap	2021-2050	-19 nap / -23%	-21 nap / -27%
		2071-2100	-38 nap / -47%	-50 nap / -62%
Zord nap	6 nap	2021-2050	-3 nap / -55%	-5 nap / -83%
		2071-2100	-6 nap / -99%	-6 nap / -100%

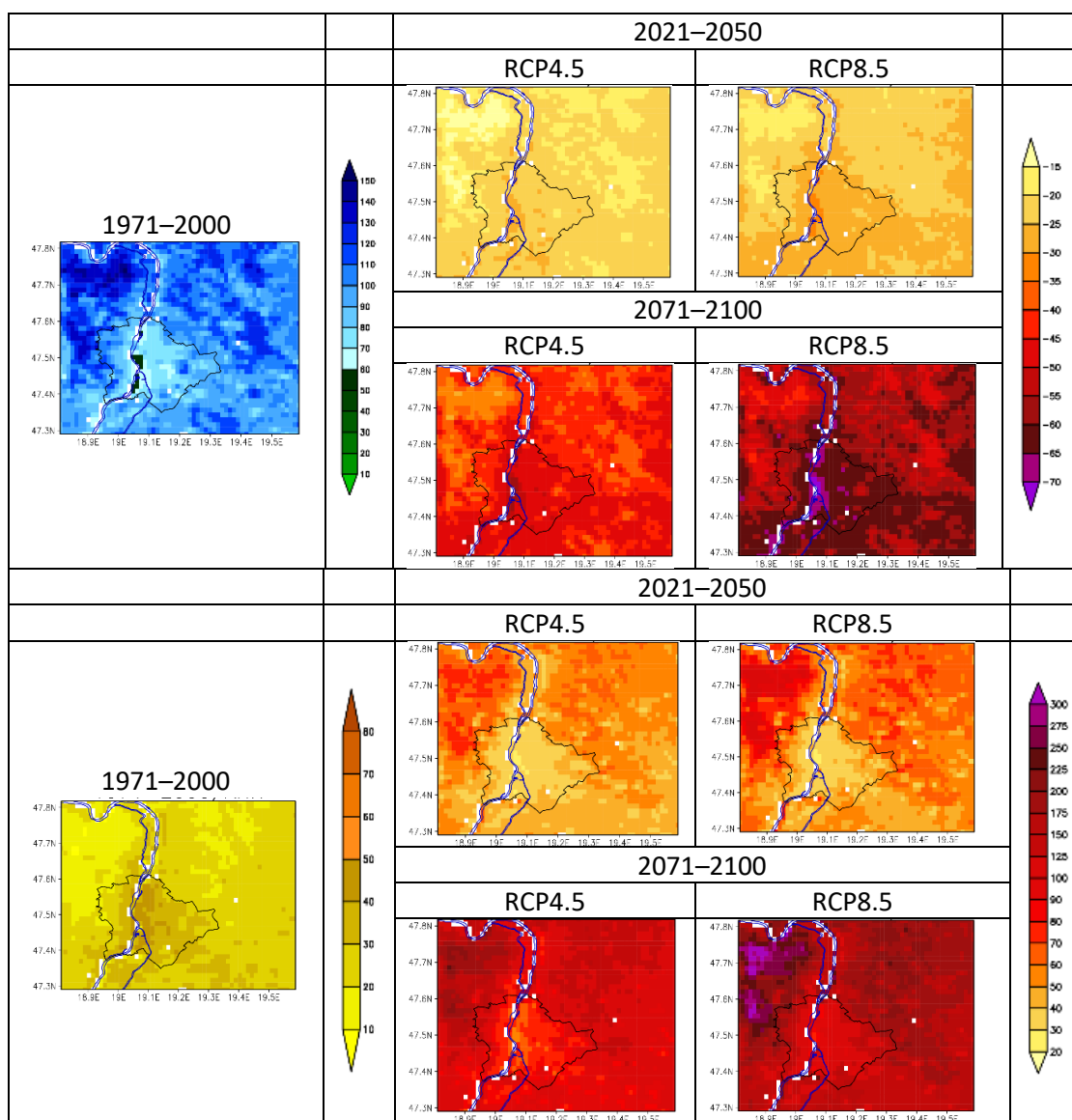
4.4. A város méretének és elhelyezkedésének hatása a városi éghajlatra – Budapest és Szeged összevetése

Szegeden a XXI. században a legnagyobb hőmérséklet-emelkedés Budapesthez hasonlóan szintén télen várható, a változás mértéke azonban a fővárosban nagyobb (**3. és 6. táblázat**). A különbség 0,1 és 0,3 °C közötti és évszakonként eltérő.

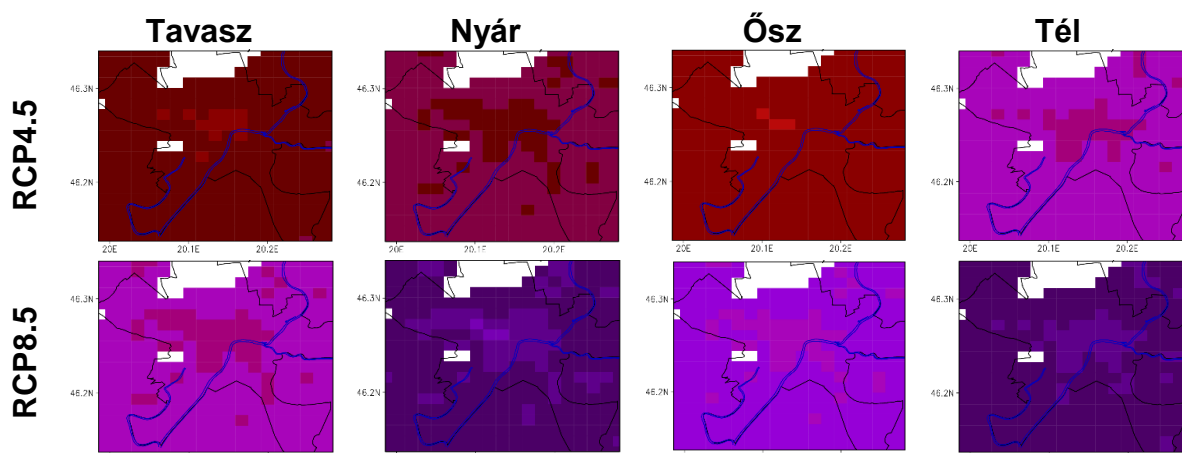
A melegedés mértéke Szeged belső területein is mérsékeltebb, mint a környező területeken (**11. ábra**). Ez a különbség már a 2021–2050 időszakon is megmutatkozik a tavaszi és nyári eredményekben, az évszázad végén pedig szinte minden évszakban látható mindkét forgatókönyv figyelembevételével. Általánosságban elmondható, hogy a városi hősziget-intenzitás havi változása (**12. ábra**) hasonló képet mutat Szegedre, mint Budapestre, de az éjszakai UHI-csökkenés mértéke gyengébb, májustól augusztusig 6 UTC-kor a legerősebb (0,4-0,5 °C), a többi időpontban és hónapban viszont a 0,3 °C-ot nem haladja meg (ugyanakkor a múltbeli UHI intenzitása is alatta marad a budapesti értékeknek).

6. táblázat. Éves és évszakai átlaghőmérséklet-változás (°C) Szegeden 2021–2050-ben és 2071–2100-ban az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvekkel végzett SURFEX kísérletek eredményei alapján. Referencia-időszak: 1971–2000.

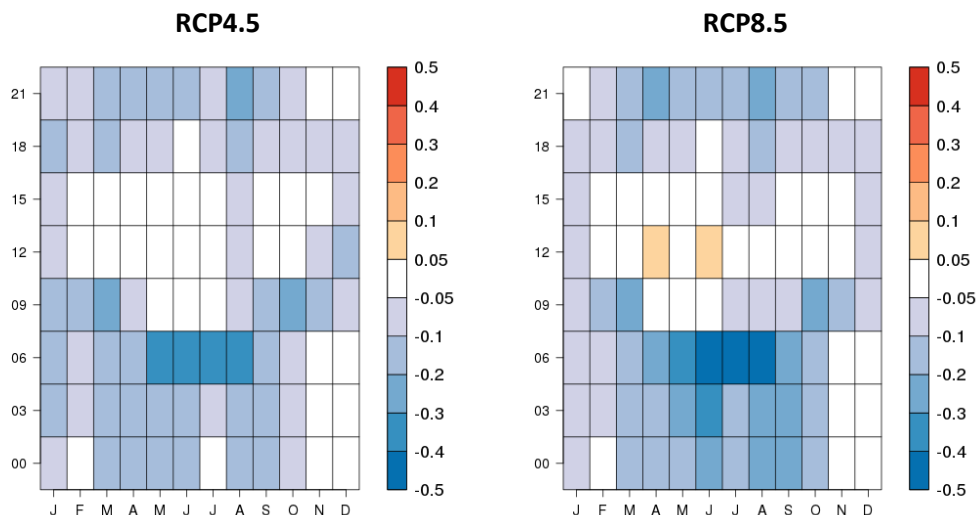
		Éves	Tavasz	Nyár	Ősz	Tél
2021–2050	RCP4.5	0,9	0,8	1,0	0,7	1,3
	RCP8.5	1,3	0,9	1,3	1,3	1,6
2071–2100	RCP4.5	2,4	2,3	2,4	2,1	3,0
	RCP8.5	3,5	2,9	3,9	3,2	4,0



10. ábra. A fagyos napok (fent), valamint a hóhullámos napok (lent) száma (nap) Budapesten és környékén 1971–2000-ben, valamint 2021–2050-ben és 2071–2100-ban várható relatív változása (%) a (jövőre az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvekkel végzett) SURFEX kísérletek eredményei alapján.



11. ábra. Évszakos átlaghőmérséklet-változás (°C) 2071–2100-ban Szegeden és környékén az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvekkel végzett SURFEX kísérletek eredményei alapján. Referencia-időszak: 1971–2000.



12. ábra. Az átlagos 3-órás hősziget-intenzitás havi értékeinek változása (°C) Szegeden 2071–2100-ban az RCP4.5 (első panel) és az RCP8.5 (második panel) forgatókönyvekkel végzett SURFEX kísérletek eredményei alapján. A mátrix oszlopai a hónapokat, sorai a napon belüli (UTC-ben kifejezett) időpontokat jelölik.

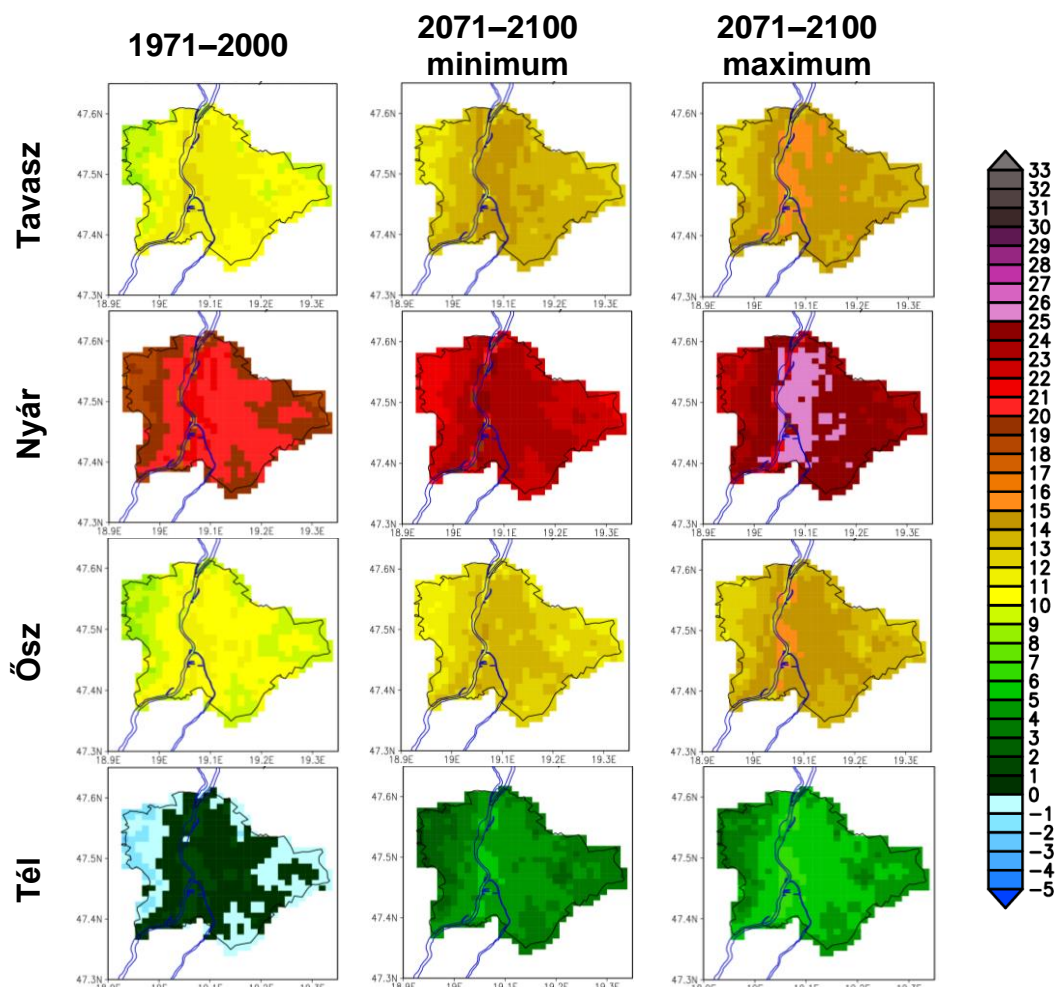
4.5. A hőmérséklet és hőmérsékleti indexek várható értékei Budapesten korrigált modelleredmények alapján

Végezetül néhány példán keresztül bemutatjuk a 3.2 pontban ismertetett módszertan alapján korrigált hőmérséklet és hőmérsékleti index eredményeket, ezzel bepillantást adva a KLIMADAT adatbázis városi projekciókat tartalmazó részébe.

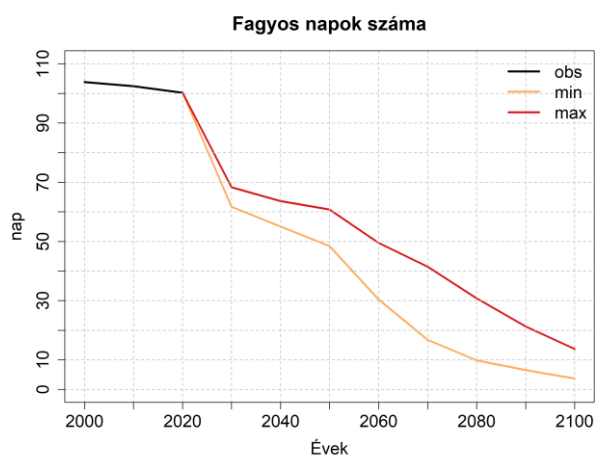
Ahogy korábban említettük, a hőmérsékletet az ALADIN-Climate CarpatClim-Hu megfigyelési adatbázissal korrigált hőmérsékletmezőinek és a SURFEX hősziget-intenzitás eredményeinek szuperpozíciójával állítottuk elő. Ezzel a módszerrel a múltbeli referenciaidőszakon is végrehajtottunk egy korrekciót: a városi jelet a CarpatClim-Hu eredményeihez adtuk hozzá. A jövőre várható változás bizonytalanságát az egyes forgatókönyvekkel készített szimulációk bemutatása helyett a két kísérlet korrigált eredményeiből rácspontonként előállított legkisebb és legnagyobb jövőbeli várható értékek formájában közöljük.

A **13. ábrán** látható, hogy a legmelegebb területek a jövőben is a város középső területei lesznek. Míg a CarpatClim-Hu mérésekhez adott SURFEX városi jellel az átlaghőmérséklet ezeken a területeken az 1971–2000 időszakban nem haladta meg a 21 °C-ot nyáron és a 2 °C-ot télen, addig az évszázad végén elérheti a 25 °C-ot illetve a 7 °C-ot.

A fagyos napok száma Budapesten még az 1991–2020 időszakon is 100 nap volt, a következő évtizedekben azonban markáns csökkenés várható (**14. ábra**). Számuk egyik modelleredmény szerint sem haladja meg a 20 napot, de az index teljes eltűnése a város felett nem várható ebben az évszázadban.



13. ábra. Átlagos évszakos 2-méteres hőmérséklet (°C) Budapesten 1971–2000-ben, valamint 2071–2100-ban mérésekkel korrigált modelleredmények alapján. A jövőbeli időszakon a bizonytalanságokat a két projekció rácspontként vett minimum- és maximumértékeivel reprezentáljuk.



14. ábra. A fagyos napok számának (nap) 10 évenként léptetett 30-éves mozgóátlaga Budapesten az 1971–2100 időszakon, a SURFEX mérésekkel korrigált eredményei alapján. A fekete vonal a mérések és a SURFEX eredményeinek kombinációjaként előállított eredményeket, a színes vonalak a két antropogén forgatókönyvvel végzett SURFEX modellkísérlet korrigált adatsorának minimumát és maximumát mutatja. A 2000, 2010 ... 2090, 2100 évekhez tartozó érték a megelőző 30 év átlagát reprezentálja (pl. a 2000-hez tartozó érték 1971–2000 átlagát mutatja).

5. Összefoglalás

Jelen beszámolóban a KlimAdat projekt keretében a SURFEX felszíni modellel 1 km-es felbontáson készített két városi éghajlatváltozási kísérlet eredményeit mutattuk be Budapestre és Szegedre. A SURFEX számára az ALADIN-Climate regionális klímamodell szolgáltatotta a légköri kényszereket, és az emberi tevékenység várható alakulását a közepes és a magas kibocsátást leíró RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek szerint vettük figyelembe. A városi éghajlatváltozás vizsgálatokor a hőmérsékletre, a hősziget-intenzitásra, valamint néhány hőmérsékleti index alakulására fókuszáltunk és az eredményeket a 2021–2050 és 2071–2100 időszakon tekintettük, referenciaként az 1971–2000 időszak modellezett eredményeit használva.

A Budapestre és Szegedre vonatkozó eredmények sok hasonlóságot mutattak. Megállapítottuk, hogy a hőmérsékletváltozás alakulása hasonló a 10 km-es felbontású regionális klímamodell és az 1 km-es felbontású városi modell eredményeiben, azaz télen várható a legnagyobb, míg az átmeneti évszakokban a leggyengébb melegedés. A felszíni modell őszi kivételével alacsonyabb hőmérséklet-emelkedést jelez az ALADIN-hoz képest. Figyelembe véve ugyanakkor a SURFEX által leírt folyamatos hőmérsékleti többletet, a városi modell mindkét jövőbeli időszakra a regionális modell által jelzethnél magasabb hőmérsékletet mutat.

Nem tapasztaltunk jelentős különbségeket a városi és városkörnyéki természetes területek hőmérsékletváltozásában, kivéve, hogy az évszázad végén tavasszal és nyáron a várost övező területek fél fokkal nagyobb mértékben melegedhetnek, gyengítve az éjszakai hősziget-intenzitást. A gyengülésért előszörban a nagyobb intenzitás-értékek ritkábbá válása felel (különösen a magas átlaghőmérsékletű napokon), helyettük a jövőben gyakrabban fordulnak elő átlaghoz közeli értékek.

A fagyos és a zord napok előfordulásában a belvárosi területeken várható nagyobb csökkenés, míg a másodfokú hóhullámos napok és a túl meleg éjszakák száma a vidéki területeken növekszik jobban. Annak ellenére azonban, hogy a természetes területek intenzívebben melegednek a városi területeknél, a belváros a jövőben is melegebb lesz környezeténél, amit a korrigált hőmérsékleti adatok is alátámasztottak.

Irodalomjegyzék

- Bán, B., Szépszó, G., Allaga-Zsebeházi, G., Somot, S., 2021: ALADIN-Climate at the Hungarian Meteorological Service: from the beginnings to the present day's results, *Időjárás*, 125, 647–673.
- Bihari, Z., Lakatos, M., Szentimrey, T., 2017: Felszíni megfigyelésekből készített rácsponti adatbázisok az Országos Meteorológiai Szolgálatnál. *Léggör*, 62, 148–151.
- Dian, Cs., Pongrácz, R., Dezső Zs., Bartholy, J., 2020: Annual and monthly analysis of surface urban heat island intensity with respect to the local climate zones in Budapest. *Urban Climate*, 31, 100573.
- Finta, S., Maczák, J., Kovács, B., Mátrai, R., 2013: Budapest 2030; Long term urban development plan (in Hungarian). Municipality of Budapest Mayor's Office, Budapest, Hungary, 218p.
- Gál, T., Mahó, S.I., Skarbit, N., 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.
- Göndöcs, J., 2020: A regionális éghajlatváltozás hatásainak megjelenése városi környezetben – budapesti városi hősziget vizsgálata. PhD disszertáció, ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest, 149p.
- Masson, V., 2000: A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Bound.-Lay. Meteorol.*, 94, 357–397.
- Masson, V., Champeaux, J.-L., Chauvin, F., Meriguet, C., Lacaze, R., 2003: A global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models. *J. Clim.*, 16, 1261–1282.
- 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., Lebeau-pin 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.
- Meinshausen, M., Smith, S.J., Calvin, Daniel, K.J.S., Kainuma, J-F., Lamarque, M.L.T., Matsumoto, K., Montzka, S.A., Raper, S.C.B., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G. J. M., van Vuuren, D.P.P., 2011: The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Clim. Chang.*, 109, 213–241.
- Noilhan, J., Mahfouf, J.-F., 1996: The ISBA land surface parameterisation scheme. *Glob. Planet. Change*, 13, 145–159.
- Noilhan, J. and Planton, S., 1989: A Simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Weather Rev.*, 117, 536–549.
- Oke, T.R., 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Q. J. R. Soc. Meteorol. Soc.*, 108, 1–24.
- 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, pp. 535-612.
- Voltaire, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Méliá, D., Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., Valcke, S., Beau, I., Alias, A., Chevallier, M., Déqué, M., Deshayes, J., Douville, H., Fernandez, E., Madec, G., Maisonnave, E., Moine, M.-P., Planton, S., Saint-Martin, D., Szopa, S., Tyteca, S., Alkama, R., Belamari, S., Braun, A., Coquart, L., Chauvin, F., 2013: The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation. *Climate Dynam.*, 40, 2091–2121.
- Zsebeházi, G., 2020: Az ALADIN-Climate-tal meghajtott SURFEX modellkísérletek eredményeinek validációja. *KlimaAdat projektbeszámoló*. 34p.
- Zsebeházi, G., Szépszó, G., 2020: Modeling the urban climate of Budapest using the SURFEX land surface model driven by the ALADIN-Climate regional climate model results. *Időjárás*, 124, 191–207.
- Zsebeházi, G., Mahó, S.I., 2021: Assessment of the urban impact on surface and screen-level temperature in the ALADIN-Climate driven SURFEX land surface model. *Atmosphere*, 12, 709.