



Az ALADIN-Climate-tal meghajtott SURFEX modellkísérletek eredményeinek validációja

Zsebeházi Gabriella

Országos Meteorológiai Szolgálat



Budapest, 2020. október

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Kohéziós Alap



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

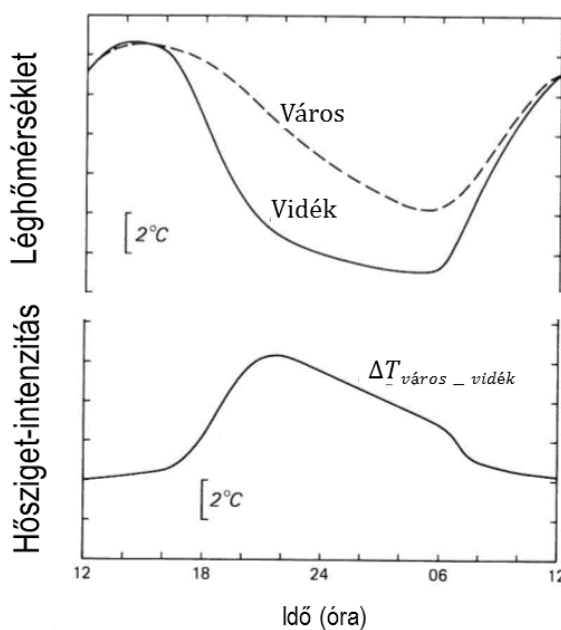
Tartalom

1. Bevezetés.....	3
2. A SURFEX felszíni modell	5
3. Modellkísérletek.....	7
4. Megfigyelési adatok	11
4. Eredmények.....	11
4.1. A meghajtó mezők vizsgálata	11
4.2. Hőmérséklet	14
4.3. Hősziget-intenzitás	18
4.4. Szélsébség	24
5. Összefoglalás	26
6. Irodalomjegyzék	31

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.

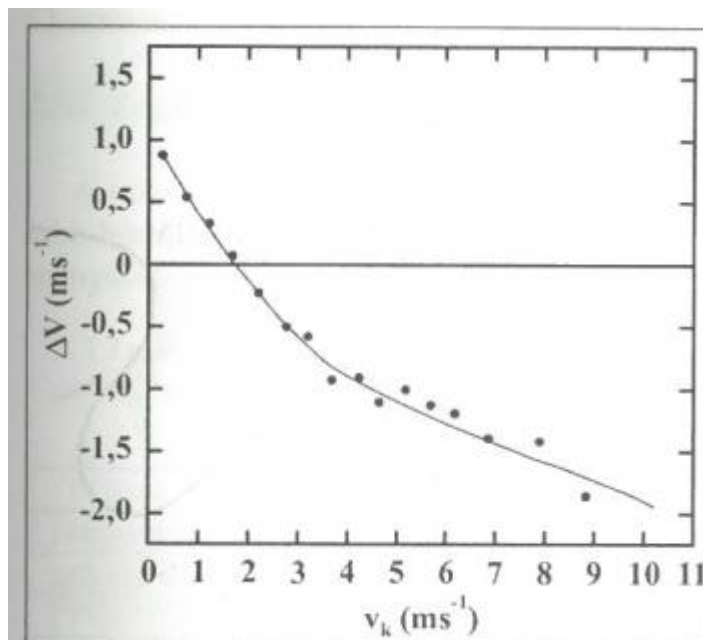
Napközben az épületek, burkolt felszínek nagyobb mértékben elnyelik és elraktározzák a Napból érkező sugárzást, mint a vegetációval borított földfelszín. A sűrű beépítésnek köszönhetően az épületek által kibocsátott hősugárzás csapdázódik, nem tudja a város légterét elhagyni. A raktározott többletenergia 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) jelenség alakul ki (**1. ábra**). A legnagyobb hőmérséklet-különbség napnyugta után 3-5 órával jelentkezik.



1. ábra. A 2-m léghőmérséklet jellemző nyári napi menete a városokban és a természetes területeken, valamint ezek különbsége, a hősziget-intenzitás. Forrás: Oke, 1987.

A szélesebbesség jellemzően alacsonyabb a városon belül, mint a külterületen, mivel az épületek, tereptárgyak akadályt képeznek az áramlásnak és lelassítják azt (**2. ábra**). Ugyanakkor közel szélcsendes időben, amikor kedvező a helyzet a városi hősziget kifejlődésének, a városban némileg magasabb szélesebbeségek is kialakulhatnak. Ennek oka az, hogy a városi hősziget miatt kialakuló hőmérséklet-, valamint nyomáskülönbség hatására a

hűvösebb vidéki területek felől megindul az áramlás a város belsejébe (Oke, 1987; Unger és Sümeghy, 2002).



2. ábra. A városi és a környező (vidéki) terület szélességkülönbségének alakulása az környező terület szélességének függvényében (Unger és Sümeghy, 2002).

E fenti jellemzők következtében 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. Mindezen tények alátámasztják azt, hogy elengedhetetlen, hogy a városi folyamatok, környezeti változások és a gyorsuló éghajlatváltozás kölcsönhatását tudományosan megalapozott módszerekkel előrebecsüljük, ezáltal 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* (RCM-ek) szolgálnak. Ma ezek a modellek jellemzően 10-25 km-es rácsfelbontásúak, tehát egy több száz km² kiterjedésű (pl. Budapest) várost 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.

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 (a Météo France-ban) fejlesztették ki. A modellt először egy mélyreható tesztelési fázisnak vetettük alá. Működésének megismeréséhez és az optimális futtatási beállítások meghatározásához néhány évre vonatkozó érzékenységi vizsgálatokat végeztünk Szegedre. Szeged kiválasztását az indokolta, hogy a város sík felszínen fekszik, ami kedvez a városklíma önmagában történő vizsgálatára, hiszen nem lépnek fel más befolyásoló tényezők. Emellett Szeged belvárosában 1999-től folynak meteorológiai mérések, ami lehetővé teszi a modell hibáinak objektív vizsgálatát. A tesztelési kísérletek során megállapítottuk, hogy a SURFEX – a regionális klímamoddellel ellentétben – képes a városi éghajlat egy alapvető jellemvonását, a városi hősziget térbeli jellemzőit és napi menetét kimutatni.

A következő lépésben validációs vizsgálatokat végeztünk, azaz többtízéves szimulációkat készítettünk a modellel múltbeli időszakokra, és az eredményeket mérésekkel vetettük össze annak érdekében, hogy a SURFEX képességeit és hibáit éghajlati skálán részletesen megismerjük.

Jelen beszámolóban a modell validációs eredményeit ismertetjük a hőmérsékletre és a szélsőségekre fókuszálva.

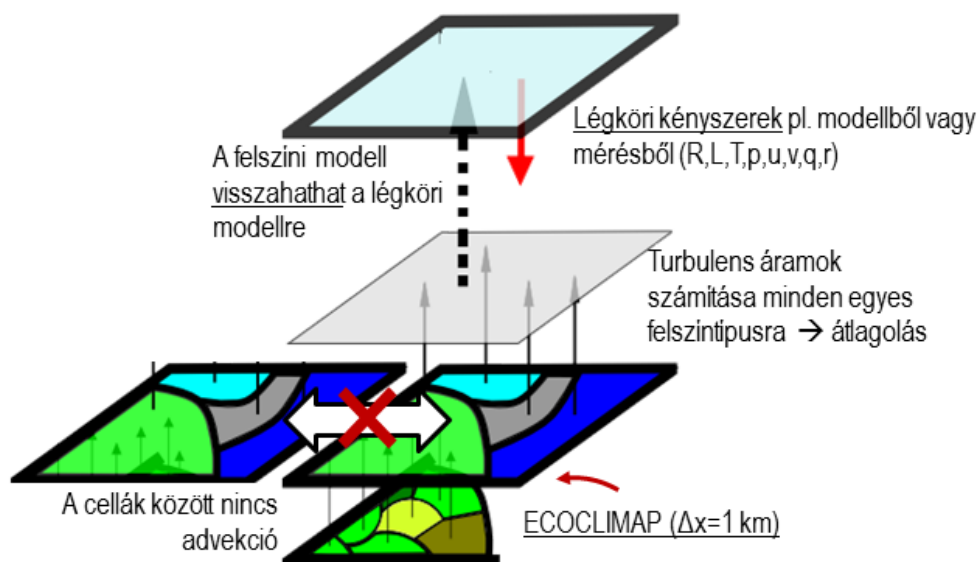
2. A SURFEX felszíni modell

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 (**Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**). A modell négy fő felszín típust különböztet meg:

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

Egy-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. Ennek illusztrálására tekintsük a következő példát: egy rácscella 40%-ban tartalmaz városi felszín és 60%-ban vegetációval borított felszín; ebben az esetben például a felszínhőmérsékletet a vegetációra, valamint a városra vonatkozó séma először külön-külön számítja, a rácscellára vonatkozó átlagos felszínhőmérsékletet pedig a $T_{\text{átlag}} = 0,4 * T_{\text{város}} + 0,6 * T_{\text{vegetáció}}$ képlet szerint számítja a modell. Az egyes rácscellák felszíntípus kombinációi mellett a modell számos további felszíni paramétert igényel (pl. a városok esetén épületmagasság, utcák szélessége; a természetes területeken a vegetáció típusa, magassága stb.). Ezen információk összességét a SURFEX számára az ECOCLIMAP (Masson, 2003) 1 km-es felbontású globális felszíni adatbázis biztosítja. Az ECOCLIMAP korábbi felszíni adatbázisok, éghajlati atlaszok és műholdas adatok felhasználásával készült, összesen 255 felszínborítási típust tartalmaz, amelyből 11 városi felszíntípust különböztet meg (például belváros, mediterrán külváros, mérsékelt övi külváros,



3. ábra. A SURFEX működése (Masson et al., 2003).

ipari területek, repülőterek, parkok stb.).

A városokban a nagyon sűrűn beépített belváros kivételével valamely arányban természetes területek is jelen vannak. A következőkben a városi és a természetes területek feletti folyamatok számításáért felelős sémákat mutatjuk be részletesen.

A városi felszínek felett a TEB (Town Energy Balance; Masson, 2000) séma végzi a számításokat. A TEB a városi tereket az ún. kanyon közelítés szerint 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. Egy-egy utcakannyonak ismert az átlagos utcaszélessége, épületmagassága, épületszélessége. Az utcák izotróp elhelyezkedésűek, azaz függetlenek a térbeli iránytól. A séma 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 hő- és nedvességkibocsátását is.

A természetes felszínek folyamatait az ISBA (Interaction Soil Biosphere Atmosphere; *Noilhan and Mahfouf*, 1996) séma írja le, amely 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, valamint a mélytalajra, ami legfeljebb két rétegű. A legfontosabb prognosztikus változók a felszín és a mélytalaj hőmérséklete, nedvessége és fagyott víztartalma, valamint a növények levelein tározott vízmennyiség (intercepció).

A SURFEX alkalmazható valamely légköri modellhez kapcsoltn, illetve attól leválasztva is. A városi éghajlat modellezésére a SURFEX-et önmagában futtatjuk, a légkör állapotát pedig az ALADIN-Climate regionális klímamodell eredményei írják le külső kényszerek formájában. A SURFEX-et meghajtó mezők a 30 m magasságban modellezett hőmérséklet, légnedvesség, szélsébség, szélirány, a felszíni légnyomás, valamint a lefele irányuló rövid és hosszúhullámú sugárzás és az eső és hó formájában hulló csapadék (**3. ábra**).

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 modellvalidáció szempontjából különösen fontos 2-m hőmérséklet és 10 m-es szélsébség prognosztikus módon kerül kiszámításra.

3. Modellkísérletek

Korábbi vizsgálataink alapján megállapítottuk, hogy a SURFEX eredményeit a meghajtó mezők hibái nagyon erősen befolyásolják (*Zsebeházi és Szépszó*, 2020). A jövőre vonatkozó hosszútávú városi éghajlati szimulációk megkezdése előtt meg kell győződnünk arról, hogy a felszíni modell alkalmazható-e a feladat elvégzésére, és fel kell mérnünk annak hibáit. Ez az ún. validációs eljárás, amikor a modellt hosszabb (többtízéves) múltbeli időszakon futtatjuk és eredményeit mérésekkel vetjük össze. Ebben a lépésben csakúgy, mint a regionális klímamodellek esetében két kísérletet végzünk el:

1. Az egyik esetben a SURFEX-nek légköri kényszereket adó regionális modellt ún. *reanalízisekkel* hajtjuk meg. A reanalízisek többek között felszíni, magaslégköri, távérzékelési és egyéb mérések, valamint rövidtávú előrejelzések kombinációjával áll elő a legkorszerűbb tudományos eszközöket felhasználva. Ennélfogva a lehető legjobb leírását adják a teljes 3-dimenziós földi légkörnek, ezért az ezekkel futtatott modellkísérlet határfeltétel mezői „tökéletesnek” mondhatók, s a kapott eredmények elsősorban a regionális modellek hibájáról nyújtanak információt.
2. Másik esetben a regionális klímamodellt azzal a globális éghajlati modellel (GCM-mel) hajtjuk meg, ami a jövőre vonatkozó szimuláció esetén is biztosítja a modell számára a

határfeltételeket. Erre azért van szükség, mert a jövőbeli klíma-projekciók során a határfeltételeket már csak globális éghajlati modellek szolgáltatathatják, ezért fontos tudni, hogy e határfeltételek és a regionális klímamodell jellemzői milyen együttes hibával rendelkeznek.

A SURFEX validációs kísérleteit Budapestre és Szegedre végeztük el, hogy vizsgálni tudjuk az összetettebb domborzatú főváros, valamint egy síkvidéki város éghajlatának modellezhetőségét is. A SURFEX számára a légköri kényszereket az RCMTÉR projektben megvalósított ALADIN-Climate modellkísérletek (Illy *et al.*, 2015) szolgáltatták. A validációs szimulációk során az ALADIN-Climate számára egyrészt a 80 km-es felbontású ERA-Interim reanalízis (jelölés: ALADIN-ERA; Dee *et al.*, 2011), másrészt az ALADIN-nal 50 km-es felbontásra leskálázott CNRM-CM5 globális klímamodell (jelölés: ALADIN-ARP) szolgáltatotta a határfeltételeket. A modelleredményeket először egy előfeldolgozásnak vetettük alá, amihez az ALADIN egy speciális programját (EE927 konfigurációt) használtuk. Ennek segítségével a 10 km-es felbontású ALADIN eredményeket 1 km-es felbontásra interpoláltuk, valamint kiszámítottuk a szükséges változók 30 m magasságbeli értékét (**4. ábra**). Az EE927 a horizontális és vertikális interpoláció során figyelembe veszi a részletesebb domborzat hatását, valamint a légrétegződést is. A budapesti modelltartomány 72x72 rácspontból, a szegedi tartomány 25x25 rácspontból áll.

A SURFEX-et az ERA-Interim határfeltétellel 1996–2005 időszakon (kísérlet jelölése: SURFEX-ERA), míg az ALADIN_ARP-zsel az 1960–2005 időszakon (kísérlet jelölése: SURFEX-ARP) futtattuk. A két kísérlet integrálási ideje közötti különbséget az indokolta, hogy az ERA-Interimmel meghajtott ALADIN-Climate eredményei mindössze 1996-tól álltak rendelkezésre 3 óránként, ezt megelőzően 6 óránként kerültek elmentésre az adatok. A légköri kényszereket azonban legalább 3 óránként kell frissíteni a SURFEX-ben, ugyanis, ha ezt ennél ritkábban tesszük meg, akkor a modell által szimulált meteorológiai változók napi menetében nagy hibák keletkeznek. A reanalízissel történő meghajtás esetén azonban – a kvázirealisztikus határfeltételek miatt – a modelltől elvárjuk, hogy az egyedi évek jellemzőit visszaadja, tehát ebben az esetben 10-éves vizsgálati időszak is megbízható eredményeket ad a modell viselkedéséről. Az integrálás során a légköri kényszerek 3 óránként kerültek frissítésre, míg az időlépcső hossza 5 perc volt. A két kísérlet legfontosabb beállítási paramétereit az **Az ECOCLIMAP** felszíni adatbázis alapján mindkét városban a *mérsékelt övi külváros* felszín típus dominál, emellett kisebb részben megjelenik a *belváros, ipari és kereskedelmi területek, utak és vasutak, parkok* valamint *sportlétesítmények*. Ezen felszín típusok egyik legjellemzőbb karakterisztikája a mesterséges burkolt felszínnek relatív területe a rácscellában (**4. ábra**, utolsó oszlop). A különböző városi felszín típusok paramétereit a



2. táblázat ismerteti.

1. táblázat tartalmazza.

Az ECOCLIMAP felszíni adatbázis alapján mindkét városban a *mérsékelt övi külváros* felszín típus dominál, emellett kisebb részben megjelenik a *belváros, ipari és kereskedelmi területek, utak és vasutak, parkok* valamint *sportlétesítmények*. Ezen felszín típusok egyik legjellemzőbb karakterisztikája a mesterséges burkolt felszínnek relatív területe a rácscellában (**4. ábra**, utolsó oszlop). A különböző városi felszín típusok paramétereit a

SZÉCHENYI  2020

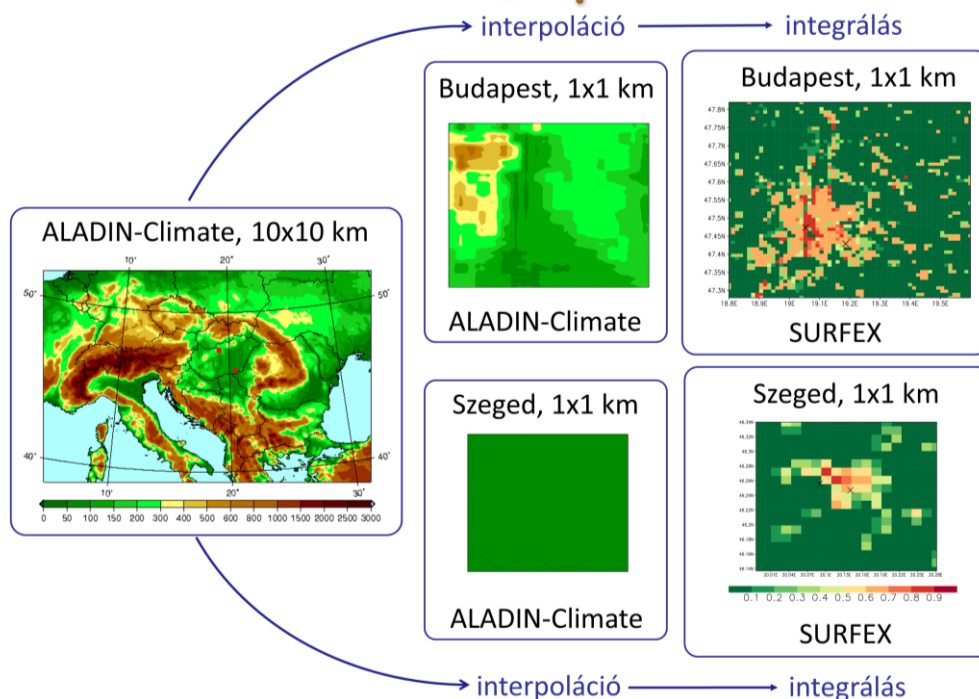


MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Kohéziós Alap



BEFECTETÉS A JÖVŐBE



4. 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. A validációhoz felhasznált állomási méréseket fekete x-szel jelöltük.

2. táblázat ismerteti.

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

Kísérlet	SURFEX-ERA1	SURFEX-ARP
Légköri kényszerek forrása (RCM_GCM)	ALADIN-Climate_ERA-Interim – jelölés: ALADIN-ERA1	ALADIN-Climate_10km_ALADIN-Climate_50km (határfeltétel:

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Kohéziós Alap



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

		CNRM-CM5) – jelölés: ALADIN-ARP
Légköri kényszerek magassága		30 m
Légköri kényszerek felbontása		10 km
SURFEX horizontális felbontása		1 km
SURFEX integrálási időlépcsője		5 perc
Séma a városi rácspontok felett		TEB
Séma a természetes rácspontok felett		ISBA (3-rétegű)
Felszíni adatbázis		ECOCLIMAP
Tartomány	Budapest (72x72 rácspont), Szeged (25x25 rácspont)	
Integrálási időszak	1996–2005	1960–2000

2. táblázat. A budapesti és szegedi tartományokon előforduló főbb városi felszín típusok paraméterei és felszín típusokat tartalmazó rácscellák száma (amelyik rácscella több felszín típust is tartalmaz, ott a nagyobb részarányú típust vettük figyelembe).

Felszín típus	Belváros	Mérsékelt övi külváros	Ipari és kereskedel mi terület	Utak, vasutak	Repülőtér	Bányaterül et és építkezés	Városi parkok	Sportlétesít mények
Városi felszín aránya	0,9	0,6	0,9	0,9	0,3	0,1	0,1	0,2
Természetes felszín aránya	0,1	0,4	0,1	0,1	0,7	0,9	0,9	0,8
Épületmagasság (m)	30	10	20	5	10	5	5	10
Building aspect ratio	1	0,5	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	1
Canyon aspect ratio	1	0,5	0,5	0,06	0,06	0,06	0,06	1
Domináns rácscellák száma Budapesten	14	539	76	0	20	12	9	48
Domináns rácscellák száma Szegeden	1	62	15	1	0	0	2	2

4. Megfigyelési adatok

A városi éghajlati modellek validációjának egyik legnagyobb kihívása a részletes megfigyelési adatbázis elérhetősége. Annak érdekében, hogy a modellezett meteorológiai változók térbeli és időbeli jellemzőit egyaránt vizsgáljuk, elemzéseinkhez többféle megfigyelési adatot felhasználtunk.

Eredményeinket egyrészt a CarpatClim-Hu (Bihari *et al.*, 2017) rácsponti megfigyelési adatbázissal vetettük össze. Ez az adatbázis állomási adatok felhasználásával készült a speciálisan meteorológiai célokra kifejlesztett MASH homogenizációs (Szentimrey, 2008) és MISH interpolációs (Szentimrey and Bihari, 2007) eljárások alkalmazásával. Napi részletességű adatokat tartalmaz 0,1-fokos (kb. 10 km-es) horizontális rácsfelbontáson. Előállításánál során városon belüli állomásokat nem vettek figyelembe, valamint térbeli és időbeli adatsűrűsége sem elég finom ahhoz, hogy a városklíma sajátos jellemzőit megfelelően leírja. Ezért elsősorban a SURFEX-et meghajtó ALADIN modelleredmények vizsgálatára használtuk fel.

A rácsponti adatbázis mellett a SURFEX eredményeit állomási mérésekkel vetettük össze. Budapesten és Szegeden az 1990-es évek végén kezdtek meg az automata állomások telepítését a belső városi területeken. Budapesten az ELTE Természettudományi Karának kertjében (É.sz. 47°28'29", K.h. 19°3'43") elhelyezett állomást tekintettük belvárosi állomásként, míg a Pestszentlőrinci szinoptikus állomást (É.sz. 47°25'45", K.h. 19°10'56") referencia-állomásként. Meg kell jegyezni azonban, hogy utóbbi (habár parkos területen helyezkedik el), külvárosi környezet veszi körül (**5. ábra**). Szegeden szintén a Szegedi Tudományegyetem kertében található a városi állomás. A külterületi állomás azonban a beépített területektől távolabb, a várostól nyugatra, szántófölddel körbevett területen található.

5. Eredmények

A SURFEX hőmérséklet- és hősziget-intenzitás eredményeinek Budapestre és Szegedre vonatkozó vizsgálata során jelentős különbségeket nem figyeltünk meg a tartományok között, ezért erre a két változóra csak a budapesti eredményeket közöljük. A szélsébség esetében azonban a domborzatbeli különbségek a modellhibákra is nagy hatást fejt ki, ezért a szélsébség-validációt mindkét területre bemutatjuk.

5.1. A meghajtó mezők vizsgálata

Első lépésben röviden áttekintjük a SURFEX számára légköri kényszereket adó ALADIN-Climate regionális klímamodell-szimulációk eredményeit, ugyanis ezek nagymértékben meghatározzák a meghajtott modell viselkedését.

Az ERA-Interimmal meghajtott ALADIN modellkísérlet a budapesti tartomány felett nyár kivételével alábecsüli a CarpatClim-Hu rácsponti megfigyelési adatbázis eredményeit, legnagyobb mértékben tavasszal (ekkor az átlagos hiba 1,7 °C; **3. táblázat**). Nyáron azonban

1,1 °C-os fölébecslés látható. A modell tél kivételével a referenciához képest túl sok csapadékot szimulál, tavasszal és nyáron a relatív hiba mértéke rendre 48% és 21%. A szélesség az egyes évszakokban 0,2-0,8 m/s-mal alacsonyabb a CarpatClim-Hu-hoz képest, ami feltehetően abból adódik, hogy a Budapest környéki összetettebb domborzatot a 10 km-es felbontású modell elégtelenül írja le. Megjegyezzük, hogy a szegedi tartomány felett a 10 m-es szélességet a modell kismértékben fölébecsüli, sőt ez a pozitív előjelű hiba az egész Alföldön megfigyelhető (Illy *et al.*, 2017).



5. ábra. A modellvalidációhoz felhasznált budapesti és szegedi városi és külterületi állomások (piros ponttal jelölve) műholdfotón. Forrás: Google térkép.

3. táblázat. A budapesti tartományon az ALADIN-ERA1 hőmérséklet-, csapadék- és szélességeredményeinek eltérése (°C-ban, %-ban, illetve m/s-ban) a CarpatClim-Hu-tól 1996-2005-ben.

	Éves	Tavasz	Nyár	Ősz	Tél
Csapadék	20	48	21	6	-2
Hőmérséklet	-0,6	-1,7	1,1	-0,8	-1,0
Szélesség	-0,5	-0,8	-0,2	-0,4	-0,5

Az ARPEGE globális klímamodell két-szeres beágyazással leskálázott ALADIN szimuláció eredményeit egyrészt szintén az 1996–2005 időszakon értékeltük ki, hogy a hibák összevethetők legyenek az ERA-Interimmal meghajtott kísérlet eredményeivel. Továbbá,

mivel ez a szimuláció 45 évet ölelt fel (1960-tól 2005-ig), azt is meg tudtuk vizsgálni, hogy egy tízéves validációs időszakon kapott eredmények mennyire tekinthetők robusztusnak, azaz egy másik, vagy egy hosszabb kiértékelési periódust választva a hibák előjele és nagysága mennyire hasonló. A globális modellel meghajtott kísérletnél ez azért különösen fontos, mert ebben az esetben a modell mindössze a légköri üvegházgáz és aeroszol koncentráción keresztül van kapcsolatban a valósággal. Ezért a modellel szemben támasztott elvárás az, hogy hosszútávon (tízéves időskálán) az éghajlati jellemzőket visszaadja, amit a meteorológiai változók statisztikai mutatóival számszerűsítünk.

A hőmérséklet tekintetében az 1996–2005 időszakon az ALADIN-ARP kísérletben tavasszal és nyáron azonos előjelű, de nagyobb mértékű a hiba (meghaladja a 2 °C-ot) az ALADIN-ERA1 kísérlethez képest, míg ősszel és télen a modelleredmények közelebb állnak a megfigyeléshez (**4. táblázat**. A budapesti tartományon az ALADIN-ARPEGE hőmérséklet-, csapadék- és szélességeredményeinek eltérése (°C-ban, %-ban, illetve m/s-ban) a CarpatClim-Hu-tól a két vizsgált időszakon.). Ugyanakkor ez utóbbi két évszakban a tíz- és harmincéves időszak hibái több, mint fél fokkal eltérnek egymástól, sőt míg az 1996–2005 időszakon enyhe fölébecslés jelentkezik, addig az 1971–2000 időszakon a modell a méréshez képest ősszel 0,7 °C-kal, télen 2 °C-kal hidegebb. A csapadégeredményeket vizsgálva szintén ősszel és télen láthatunk nagyobb eltéréseket a két kísérlet, valamint a két kiértékelési időszak között. Ősszel az ALADIN-ERA1 kismértékben felülbecsülte a csapadékot, míg az ALADIN-ARP hasonló mértékű, de ellentétes előjelű hibát eredményezett. A globális modellel meghajtott kísérlet télen az 1996–2005 időszakon a csapadékot 4%-kal felül-, míg az 1971–2000 időszakon 4%-kal alulbecsülte. A szélesség szintén túl alacsony a megfigyeléshez képest, az ALADIN-ERA1 eredményeitől leginkább nyáron (0,7 m/s-mal) különbözik. A két kiértékelési időszak között azonban csekély különbség látható.

A globális modellel meghajtott kísérlet esetében – annak érdekében, hogy az éghajlat változékonyságából adódó bizonytalanságokat kiküszöböljük – a továbbiakban csak azokat az eredményeket mutatjuk be, amelyek esetében a validációt elegendően hosszú időre el tudtuk végezni, vagy amely változók esetében egy rövidebb kiértékelési periódus is megbízható eredményekkel szolgál.

4. táblázat. A budapesti tartományon az ALADIN-ARPEGE hőmérséklet-, csapadék- és szélességeredményeinek eltérése (°C-ban, %-ban, illetve m/s-ban) a CarpatClim-Hu-tól a két vizsgált időszakon.

		Éves	Tavasz	Nyár	Ősz	Tél
1996-2005	Csapadék	15	37	22	-8	4
1971-2000		18	44	23	1	-4
1996-2005	Hőmérséklet	0,2	-2,3	2,5	0,1	0,3
1971-2000		-0,4	-2,0	2,9	-0,7	-2,0
1996-2005	Szélesség	-0,9	-1,1	-0,9	-0,7	-0,8
1971-2000		-1,0	-1,2	-0,9	-0,9	-1,0

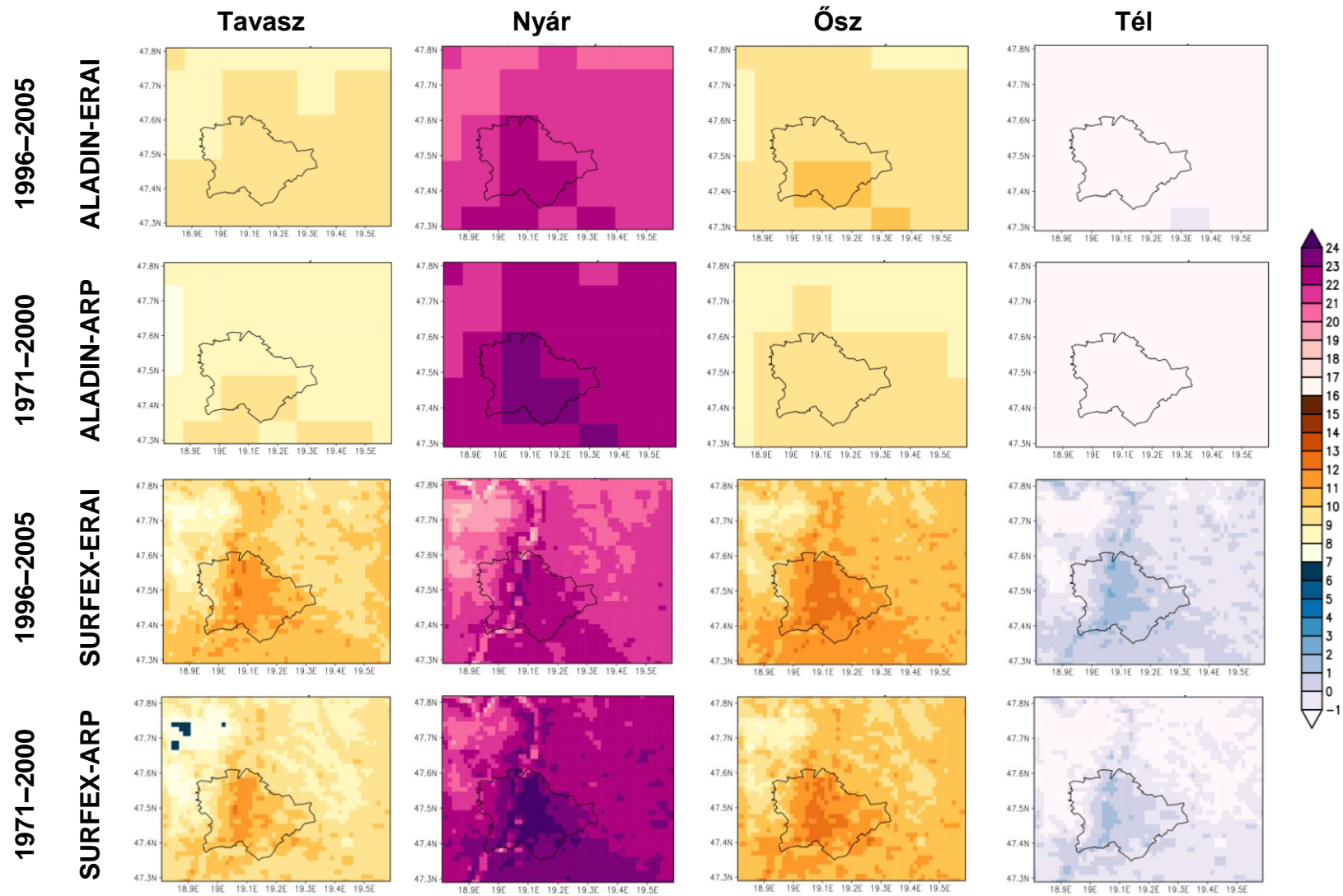
5.2. Hőmérséklet

A 2-m hőmérséklet napi átlagaiból számított évszakos átlagokat tekintve elmondható, hogy a SURFEX képes a városi éghajlat egyik legfontosabb jellemzőjének leírására: a legmelegebb területek minden évszakban Budapesten, illetve a belvárosban jelentkeznek (**6. ábra. Felső két sor: Az ALADIN-ERA1, valamint az ALADIN-ARP 2 m-es hőmérséklet-eredményeinek évszakos átlagai (°C) a budapesti tartomány felett rendre az 1996–2005 és 1971–2000 időszakon. Alsó két sor: az előbbi két modellkísérlettel meghajtott SURFEX eredmények.**). Az ábrákon továbbá az is megfigyelhető, hogy alacsonyabb hőmérsékletekkel jól kirajzolódik a Duna, a Budai-hegység, a Pilis-Visegrádi-hegység, valamint a Gödöllői-dombság, és melegebb értékekkel a Pesti-síkság. A domborzat okozta hőmérsékletkülönbségek realiztikus leírása az ALADIN 927 konfigurációjának köszönhető, ami a 10 km-es ALADIN eredmények interpolálásakor figyelembe veszi a domborzat hatását is.

Részletesebben megvizsgálva a meghajtó és a meghajtott mezőket elmondható, hogy a SURFEX a városi rádspontok mellett némileg a természetes, vidéki területeket is melegíti. Ez a hőmérsékleti többlet különösen ősszel és télen számottevő, 1 °C feletti, míg nyáron – amikor egyébként az ALADIN a legnagyobb pozitív hibával rendelkezik – elhanyagolható mértékű (**5. táblázat.** A budapesti tartományon a SURFEX-ERA1, valamint a SURFEX-ARP 2-m hőmérsékleteredményeinek eltérése (°C-ban) a CarpatClim-Hu-tól rendre az 1996–2005, illetve az 1971–2000 időszakon.). Bár az ALADIN modellben a felszín-légkör kölcsönhatás leírását szintén a SURFEX, azon belül a természetes földfelszín felett az ISBA séma végzi, a modellbeállítás a regionális klímamodell és a felszíni modell esetén némileg különböző. Például a 2-m hőmérséklet számítása az ALADIN-ban diagnosztikusan (azaz a felszínhőmérséklet és a legalsó modellszinti hőmérséklet felhasználásával empirikus formula segítségével) történik, míg a SURFEX-ben prognosztikusan (azaz a felszín és a 30 m magasságban lévő légköri kényszer közé több modellszint került beépítésre, ahol a légrézre ható turbulens folyamatok, valamint a tereptárgyak hatása expliciten van figyelembe véve). Az eltérő sémák alkalmazása különösen az éjszakai alacsony hőmérsékletű órákban okoz különbségeket (*Masson and Seity, 2009*). A prognosztikus séma megakadályozza, hogy a 2-m hőmérséklet éjszaka túlságosan lecsökkenjen – ez a diagnosztikus séma egyik jellemző hibája –, aminek hatására a SURFEX-ben magasabb éjszakai minimumhőmérsékletek adódnak, mint az ALADIN-ban (korábbi érzékenységvizsgálat eredményei alapján).

5. táblázat. A budapesti tartományon a SURFEX-ERA1, valamint a SURFEX-ARP 2-m hőmérsékleteredményeinek eltérése (°C-ban) a CarpatClim-Hu-tól rendre az 1996–2005, illetve az 1971–2000 időszakon.

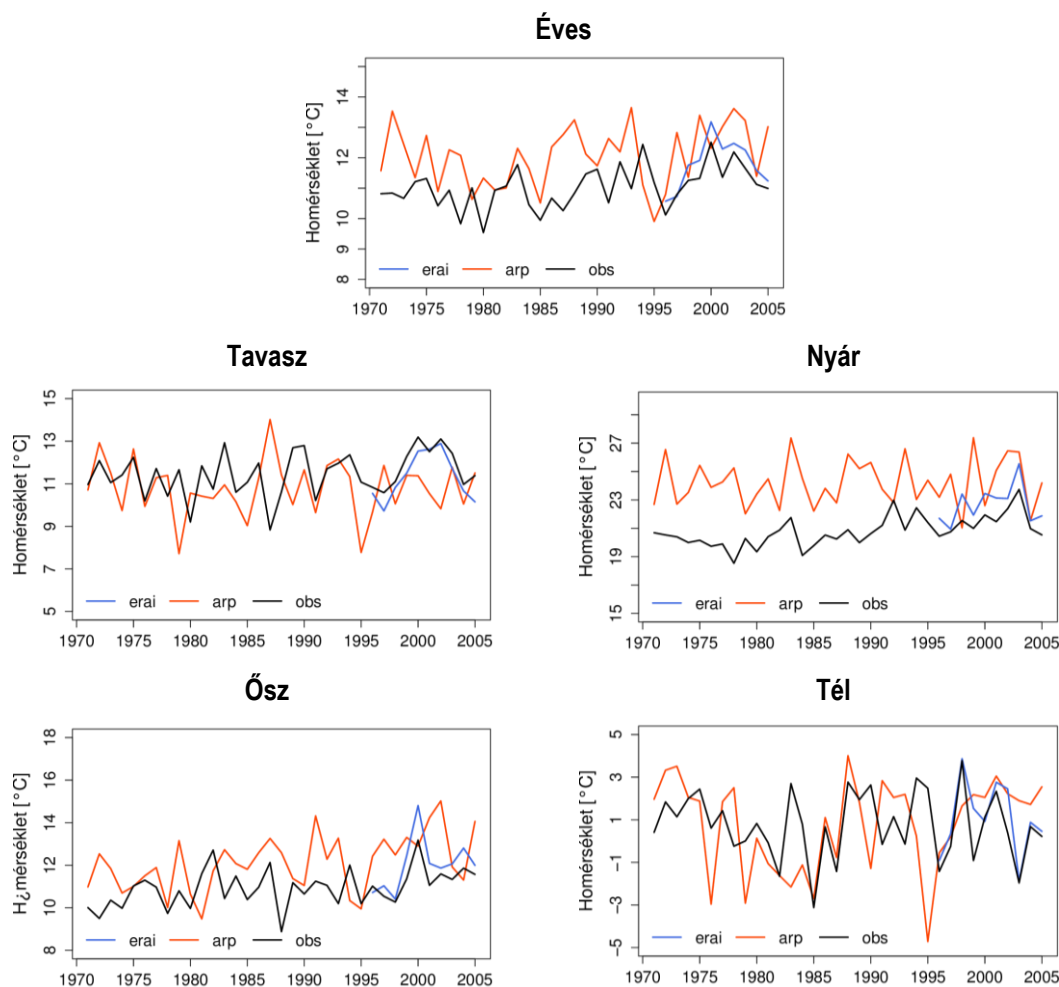
		Éves	Tavaszi	Nyári	Őszi	Téli
1996–2005	SURFEX-ERA1	0,2	-0,9	1,0	0,5	0,4
1971–2000	SURFEX-ARP	0,4	-1,2	3,0	0,6	-0,7



6. ábra. Felső két sor: Az ALADIN-ERAI, valamint az ALADIN-ARP 2 m-es hőmérséklet-eredményeinek évszakos átlagai (°C) a budapesti tartomány felett rendre az 1996–2005 és 1971–2000 időszakon. Alsó két sor: az előbbi két modellkísérlettel meghajtott SURFEX eredmények.

A továbbiakban a SURFEX hőmérséklet-eredményeit a két referenciapontban (a belvárosi lágymányosi és a külvárosi pestszentlőrinci pontokban) vizsgáljuk, hogy az eltérő beépítettség hatását részletesen feltárjuk. A lágymányosi mérőállomás 1999-ben került telepítésre, ezért a belvárosi pont modellezett értékeit csak a 2000–2005 időszakra tudjuk vizsgálni. Pestszentlőrincen azonban az 1950-es évektől regisztrálják a hőmérsékletet, tehát ebben a pontban hosszabb (az 1971–2000 időszakra vonatkozó) validáció lehetséges. Mivel Pestszentlőrinc Budapest agglomerációjában található, és a SURFEX-ben is az állomáshoz eső legközelebbi rácspont külvárosként van definiálva, a két pont közötti városi hősziget számításakor figyelembe kell venni, hogy az UHI értékek természetesen alacsonyabbak lesznek, mintha a referencia egy beépítetlen terület lenne. A felhasznált állomási adatok közül a pestszentlőrinci állomás adatai homogenizáltak, a lágymányosi állomásnál azonban a rövid kiértékelési periódus miatt ez nem volt szükséges.

A **7. ábra** a külvárosi pontban az éves és évszakos átlaghőmérséklet évenkénti értékeit jeleníti meg a megfigyelés és a SURFEX-ARP esetén az 1970–2005 időszakra, míg a SURFEX-ERA-Interim esetén az 1996–2005 időszakra. A kvázi-tökéletes (ERA-Interim) határfeltételekkel a modellszimuláció követi a megfigyelés évenkénti változékonyságát és a hibák szisztematikusak, hiszen pl. nyáron és ősszel a modellezett értékek minden évben magasabbak a mérésnél. A térbeli átlagos hibához képest (ahol a referencia a CarpatClim-Hu volt) ebben a pontban a SURFEX-ARP télen és tavasszal kisebb mértékű alábecslést, míg nyáron és ősszel erősebb fölébecslést szimulál az 1971–2000 időszakon az állomási méréshez képest (**6. táblázat**). Az éves és évszakos átlagok évenkénti változékonyságát (**7. táblázat**) a modell jellemzően felülbecsli, kivéve télen. A havi értékek változékonyságát bemutató boks- whisker diagram alapján elmondható, hogy novembertől márciusig a SURFEX-ARP nagy pontossággal közelíti a 30 év havi átlaghőmérsékleteinek eloszlását (**8. ábra**). Az évszakos szórásértékekben a legnagyobb eltérés (0,8 °C) nyáron látható, amikor a mérés a modellel ellentétben az első 20 évben (1970-től 1990-ig) csak nagyon kicsit ingadozott. Ebben az évszakban a méréseket tekintve egyértelmű melegedő tendencia látható, ami azonban a SURFEX eredményeiben nem jelenik meg. A havi boxplotokat tekintve a mérési és modelleredmények középső 50%-a (a színes dobozok) egyáltalán nem esik egybe. A trendbeli eltérés a szegedi vidéki pont eredményeiben is látható (ábrán nem mutatjuk be), tehát nem a pestszentlőrinci pont környezetének városiasodása okozza a hőmérséklet-emelkedést. Az ALADIN és a CarpatClim-HU magyarországi átlagos eredményei szintén hasonló viszonyt mutatnak (Csorvási et al., 2016).



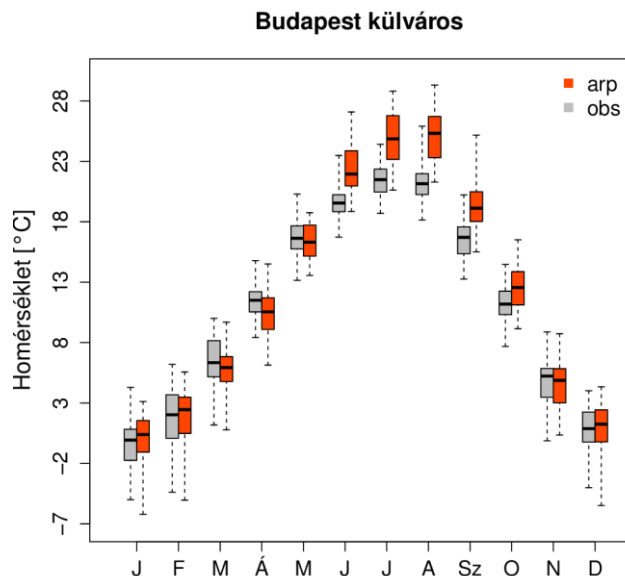
7. ábra. A SURFEX-ARP (narancs), valamint a SURFEX-ERA1 (kék) éves és évszakos átlaghőmérsékleteinek évenkénti értékei (°C) a külvárosi (Pestszentlőrinc) rácspontokban. A rácspontokhoz legközelebbi állomás adatait feketével jelöltük.

6. táblázat. A SURFEX-ARP éves és évszakos átlaghőmérsékleteinek hibája (°C) a budapesti külvárosi pontban 1971–2000-ben. Referencia: Pestszentlőrinc állomás hőmérséklet-eredménye.

Éves	Tavaszi	Nyári	Őszi	Téli
1,0	-0,5	3,5	1,1	-0,3

7. táblázat. A SURFEX-ARP, valamint a külvárosi állomás éves és évszakos átlaghőmérsékleteinek időbeli szórása (°C) a budapesti külvárosi pontban 1971–2000-ben.

	Éves	Tavaszi	Nyári	Őszi	Téli
mérés	0.7	1.0	0.9	0.9	1.6
SURFEX-ARP	1.0	1.4	1.7	1.2	1.7

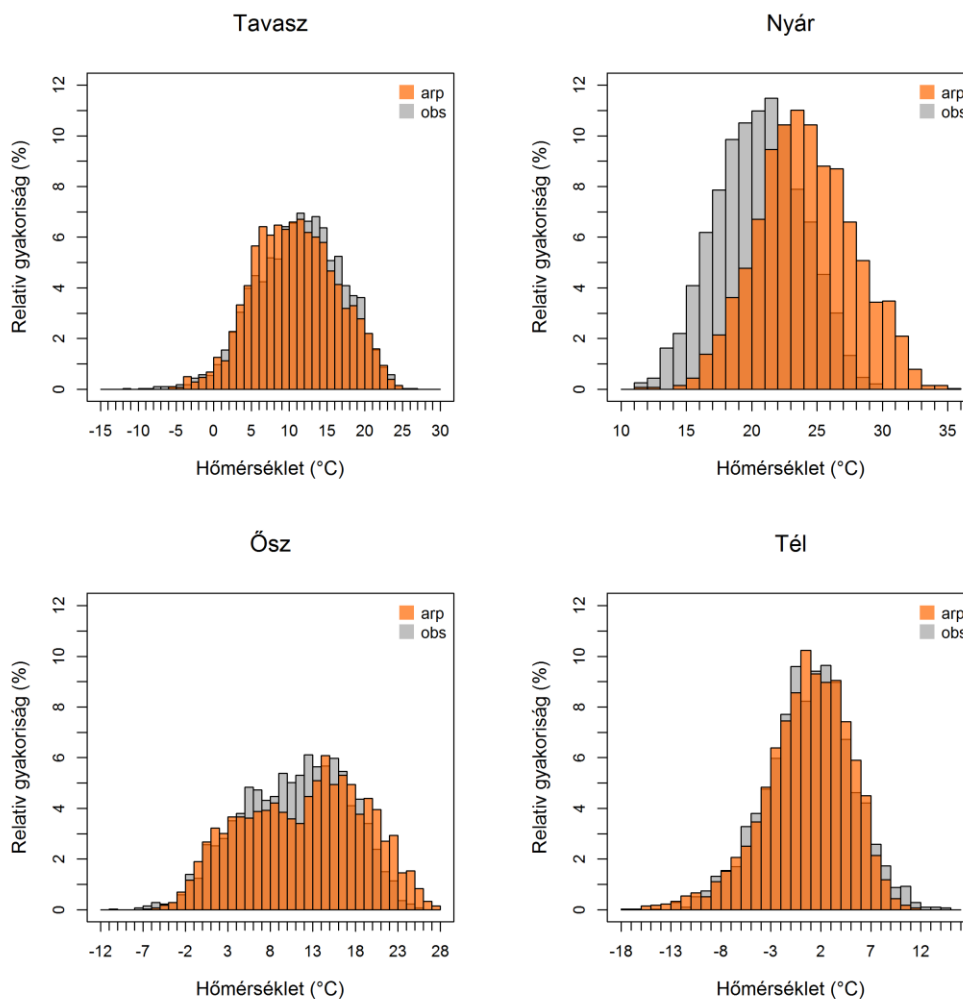


8. ábra. A SURFEX-ARP (piros) eredményeiből, valamint állomási adatokból számított havi átlaghőmérsékletek (°C) Box-Whisker diagramja a budapesti külvárosi pontban. Időszak: 1971–2000.

A modellezett és mért napi hőmérsékleti értékek eloszlásában jelentkező különbségeket a pezsztentlőrinci pontra hisztogramon mutatjuk be (**9. ábra**), aminek segítségével az átlagos hibák mellett az extrém értékek (amelyek az eloszlás szélein található) gyakoriságában jelentkező eltérések is feltárhatók. Tavasszal és télen a modell és a mérés szinte azonos eloszlást mutat. Nyáron a modell eloszlásfüggvényének alakja igen hasonló a méréshez, de az a pozitív irányba el van tolva, ami szintén bizonyítja a szisztematikus felülbecslést. Ősszel a mérésekkel ellentétben a modellértékek bimodális eloszlásfüggvényt (azaz mintha két Gauss-eloszlás kombinációja lenne) rajzolnak ki. Jól látható, hogy az átlag körüli értékek (5-15 °C) ritkábban fordulnak elő a modellben a melegebb hőmérsékleti értékek javára.

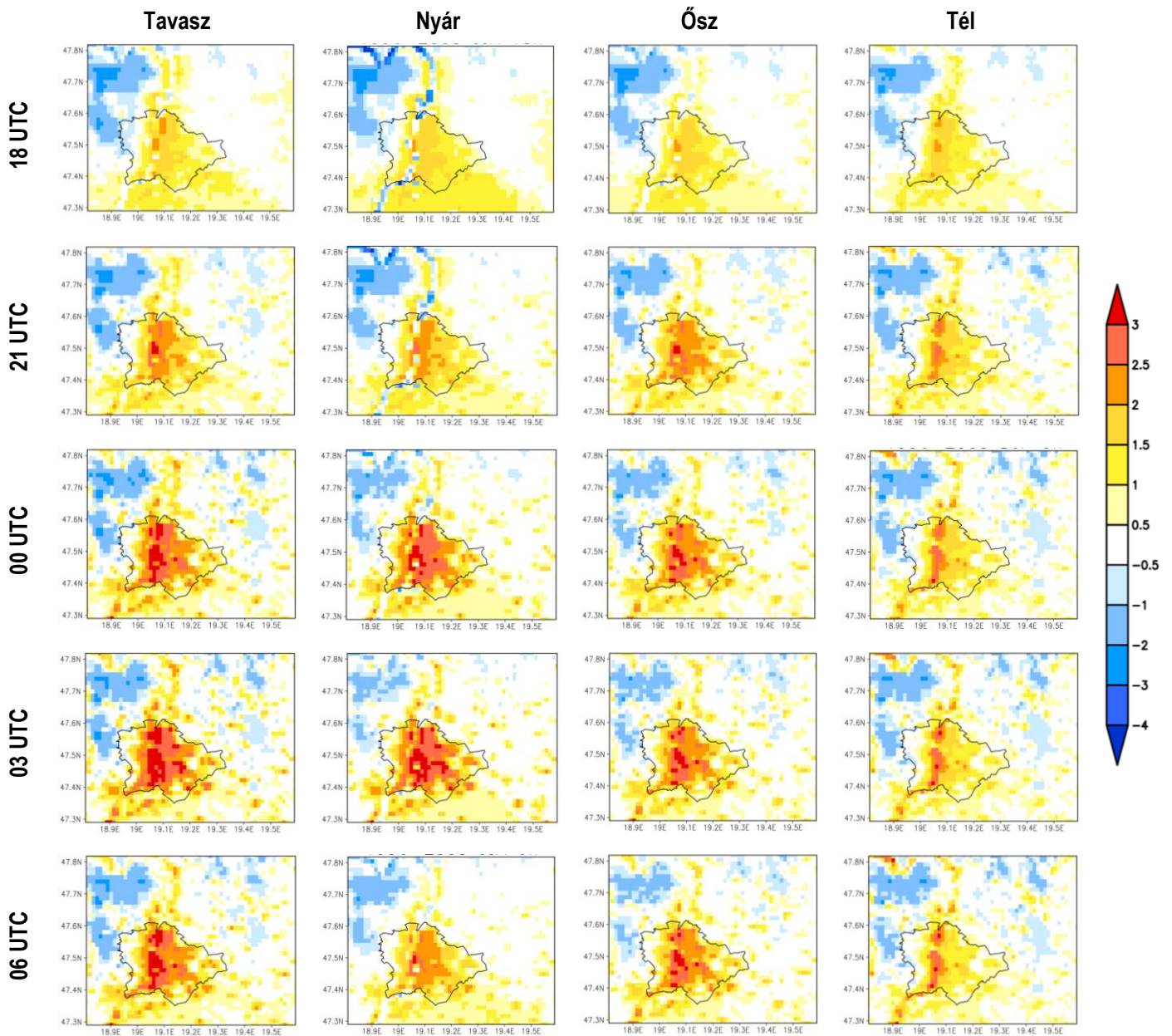
5.3. Hősziget-intenzitás

A városi hősziget-intenzitás térbeli eloszlásának vizsgálatához a 3 óránként rendelkezésre álló 2-m hőmérséklet-eredményekből először minden időpontra kiszámítottuk a nem városi rácspontok hőmérsékletének térbeli átlagát, majd ezt az értéket a rácsponti hőmérsékletértékekből kivontuk. Így előállt a városi hősziget-intenzitás adatsor, amiből a továbbiakban időbeli és térbeli átlagokat számítottunk. Mivel az UHI inkább a SURFEX városi éghajlatmódosító képességét mutatja és kevésbé tükrözi a klímamodell szisztematikus hibáit – ha a modell közel azonos hibával rendelkezik a városi és a vidéki pontokban, akkor a különbségképzéssel a hibákat kivonjuk –, a globális modellel meghajtott kísérlet esetében is elegendő tízéves időszakot tekinteni. Az UHI térbeli eloszlását tehát az 1996–2005 időszakra mutatjuk be, az állomási mérésekkel való validációt pedig a 2000–2005 időszakra.

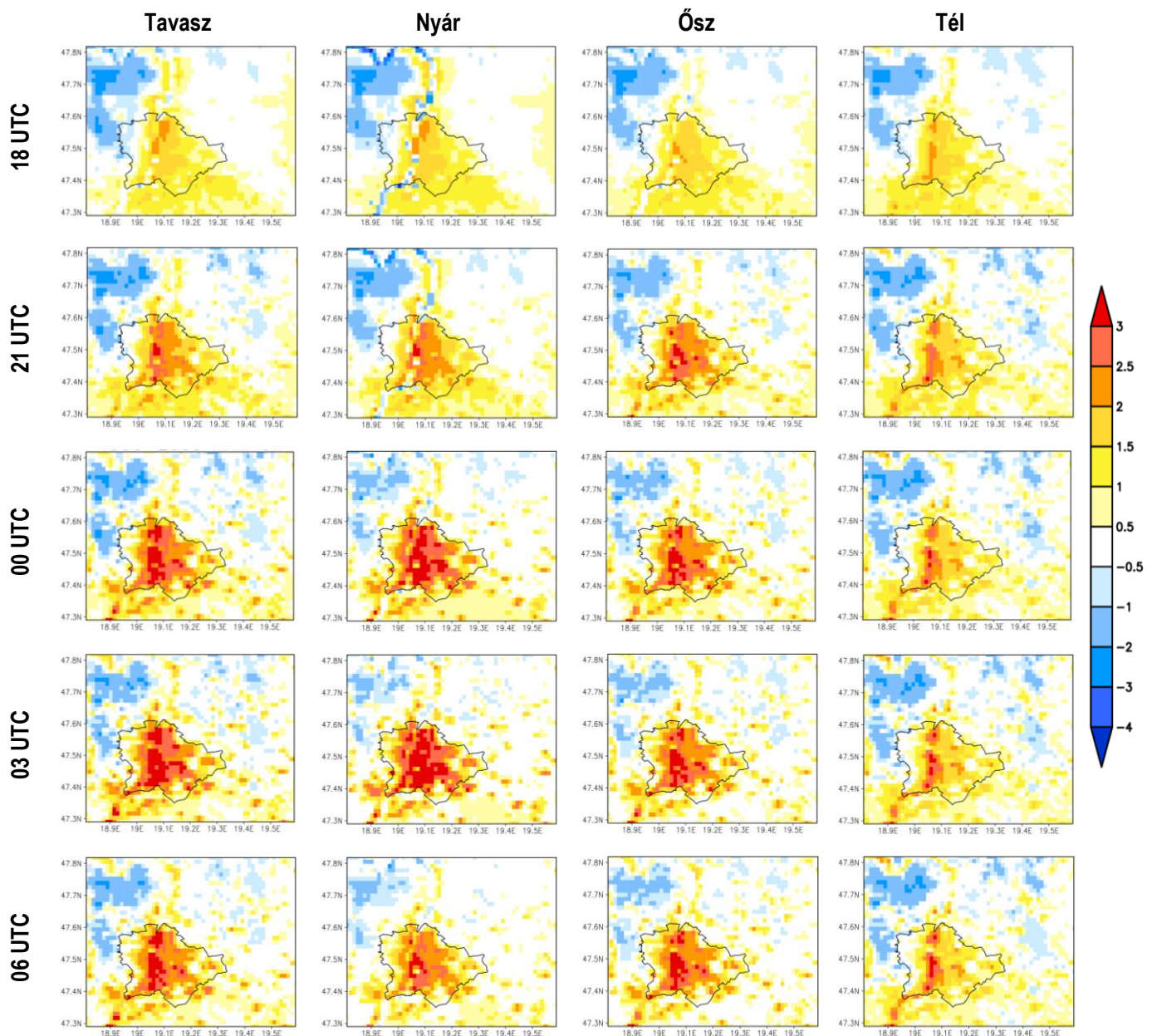


9. ábra. A SURFEX-ARP, valamint állomási adatokból számított napi átlaghőmérsékletek (°C) évszakos eloszlásfüggvénye a budapesti külvárosi pontban. Időszak: 1971–2000.

A korábban bemutatott SURFEX hőmérséklet-eredményeiből láthattuk, hogy Budapest felett a környező vidéki területekhez képest magasabb hőmérsékletek jelentkeznek az egyes évszakokban. A 2-m hőmérsékletből számított városi hősziget jellegzetes napi menettel rendelkezik, legmagasabb értékét az éjszakai órákban (napnyugta után 3-5 órával), míg a legalacsonyabb (akár negatív) értékeket a délelőtti órákban éri el (Unger és Sümeghy, 2002). A **10. ábra** és **11. ábra** rendre a SURFEX-ERA1 és SURFEX-ARP kísérletek éjszakai UHI-intenzitásának térbeli eloszlását láthatjuk 18 és 06 UTC között 3 óránként. Tavasztól őszig a hősziget-intenzitás térbeli eloszlása kismértékben különbözik az egyes évszakokban. Az átmeneti évszakokban 21 és 06 UTC-kor a belvárosban nagyobb hőtöbblet jelentkezik, mint nyáron. Nyáron 00 és 03 UTC-kor ugyanakkor a 2,5-3 °C-ot meghaladó UHI értékek a többi évszakhhoz képest a legnagyobb kiterjedésűek. Télen a legmagasabb értékek (2 °C) a belvárosban a Duna mentén fordulnak elő.



10. ábra. Az ALADIN-ERA1-mel meghajtott SURFEX évszakos átlagos hősziget-intenzitása (°C) a budapesti tartomány felett 18 és 06 UTC között 1996-2005-ben.

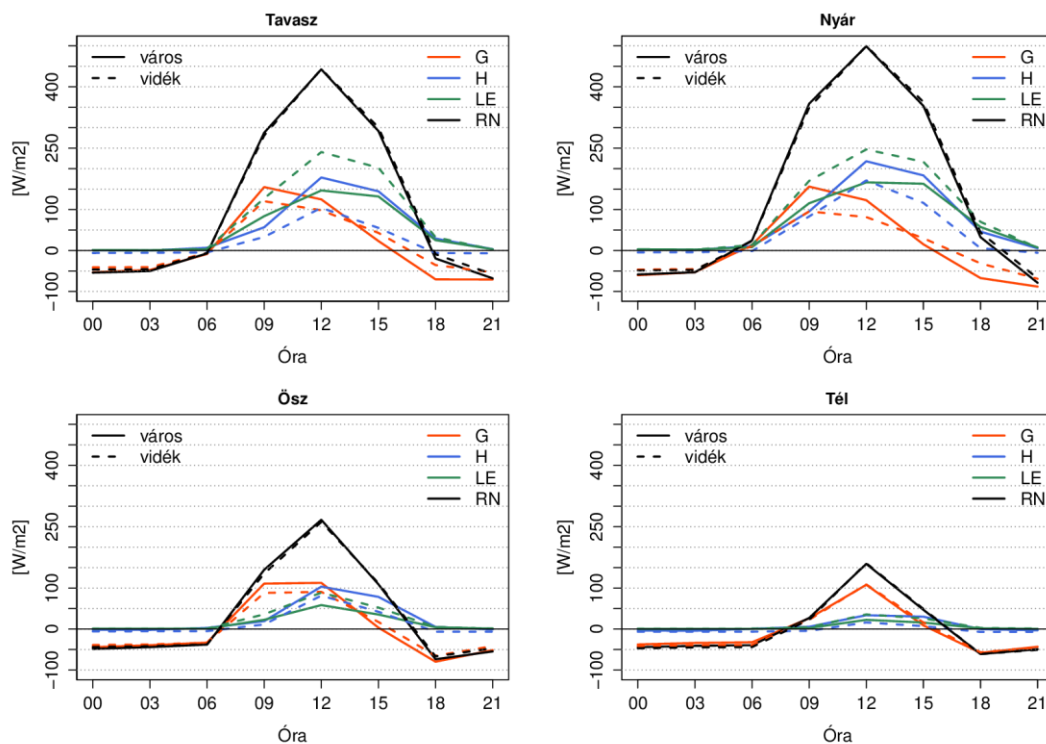


11. ábra. Az ALADIN-ARPEGE-zsel meghajtott SURFEX évszakos átlagos hősziget-intenzitása (°C) a budapesti tartomány felett 18 és 06 UTC között 1996-2005-ben.

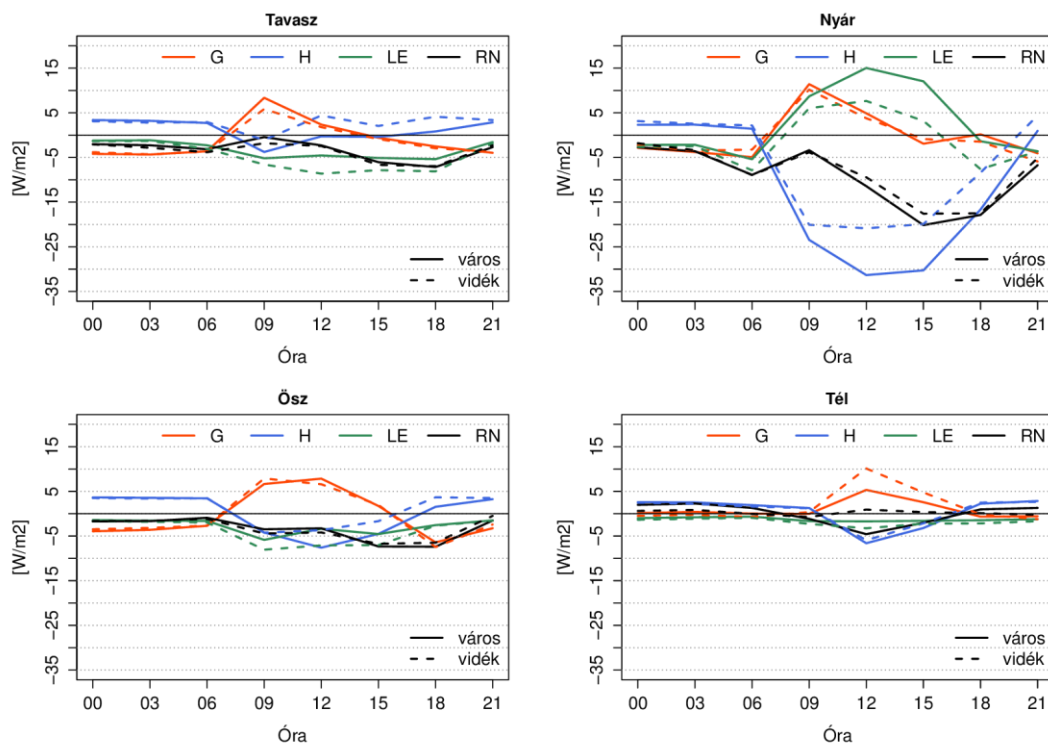
A két modellkísérlet eredményeit összevetve elmondhatjuk, hogy tél kivételével a globális klímamoddellel meghajtott szimuláció némileg erősebb városi hőszigetet szimulál a SURFEX-ERA1 kísérletnél. A városi hősziget-intenzitás kialakulásában az utak, épületek a vegetációnál jóval jelentősebb hőtározó képessége játszik szerepet. Ez a hatás a városi és vidéki területek talajhőáramának napi menetében jól megfigyelhető (ábrán csak az egyik kísérlet eredményeit mutatjuk be; **12. ábra**án G-vel jelölt): a délelőtti órákban a városi rácspontokban tavasztól ősziig a G magasabb értékeket ér el, mint a vidéki rácspontokban, éjszaka pedig nagyobb negatív értékbe süllyed, ami azt jelenti, hogy ekkor több hő bocsátódik ki a felszínről. A két kísérlet eredményei között a legnagyobb különbségek nyáron jelentkeznek (**13. ábra**), ugyanakkor az energiaáramok is ebben az évszakban érik el a legnagyobb értékeket. A talaj, illetve a városi felszínnek hőfluxusa (G) minden évszakban a nappali órákban

nagyobb, az éjszakai órákban pedig kisebb a SURFEX-ARP kísérletben a SURFEX-ERA1-hez képest. Mivel a G éjszaka negatív, tulajdonképpen több hő távozik a SURFEX-ARP kísérletben a felszínről, ami megmagyarázza a magasabb éjszakai UHI értékeket. Emellett a nappali órákban főként nyáron és ősszel a szenzibilis hőáram (H) kisebb a SURFEX-ARP kísérletben, tehát a beérkező energia inkább fordítódik hőtárolásra és kevésbé távozik turbulens fluxus révén (a H szenzibilis hőárammal). Ennek hátterében a szélesebbégek közötti különbségek állhatnak. A globális modellel meghajtott kísérletben alacsonyabb a 10 m-es szélesebbégek, azaz ebben az esetben kisebb a taljközeli átkeveredés mértéke, ami szorosan összefügg a turbulens áramokkal (lásd 4.4. fejezet).

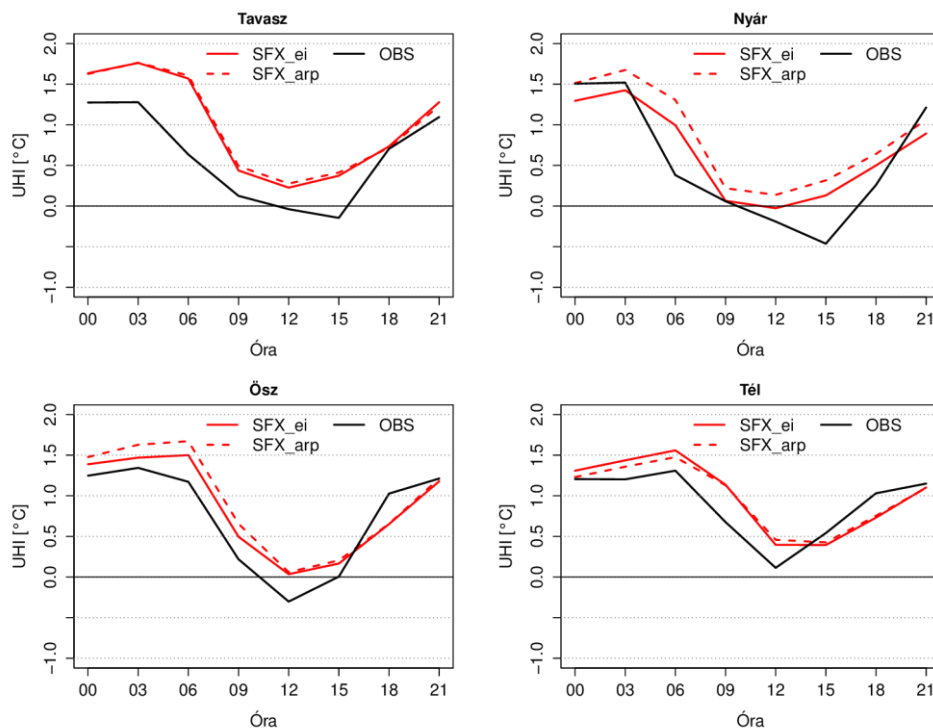
A következőkben a két kiválasztott rácspontbeli városi hősziget-intenzitás napi menetét összevetettük az állomási mérésekkel (**14. ábra**). A 12-15 UTC-kor bekövetkező UHI minimumokat a modellek az egyes évszakokban 0,2-0,8 °C-kal felülbecsülik, míg az éjszakai értékeket tavasz kivételével kis (0,3 °C alatti), jellemzően pozitív hibával írják le. Ellenben tavasszal jelentős, közel 0,5 °C-os felülbecslés látható. A hősziget-intenzitás délutáni kifejlődése minden évszakban lassabban megy végbe, mint a megfigyelés szerint.



12. ábra. A felszíni energiaegyenleg tagjai (G : talaj hőáram, H : szenzibilis hőáram, LE : látens hőáram, RN : nettó sugárzás; W/m^2) a SURFEX-ERA1 alapján a budapesti tartomány városi (folytonos), valamint természetes rácspontjaiban (szaggatott). Időszak: 1996–2005.



13. ábra. A SURFEX-ARP, valamint a SURFEX-ERA1 felszíni energiaegyenleg tagjainak (G: talaj hőárama, H: szenzibilis hőáram, LE: látens hőáram, RN: nettó sugárzás) különbsége (W/m^2) a budapesti tartomány városi (folytonos), valamint természetes rácspontjaiban (szaggatott). Időszak: 1996–2005.

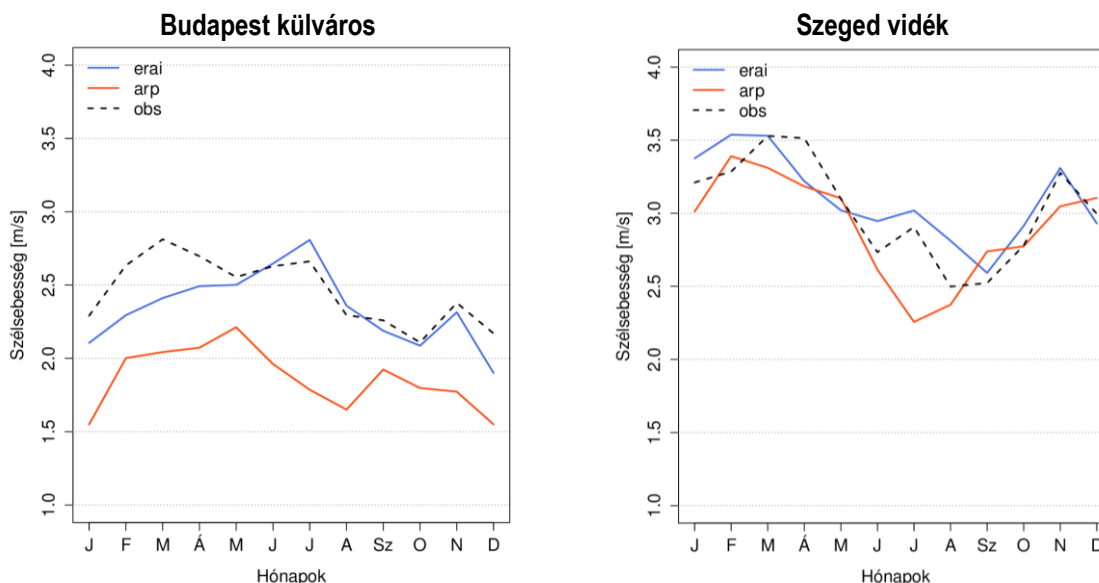


14. ábra. A SURFEX-ERA1 (piros folytonos), valamint a SURFEX-ARP (piros szaggatott) belvárosi és külvárosi rácsponthőmérséklet-értékekből számított hősziget-intenzitás ($^{\circ}C$) átlagos évszakos napi menete Budapesten. Fekete vonal az állomási mérési adatokból számított hősziget-intenzitás napi menetét jelöli. Időszak: 2000–2005.

5.4. Szélsébség

A SURFEX szélsébség eredményeit nemcsak Budapestre, hanem Szegedre is bemutatjuk, mivel az eltérő domborzat miatt a validációs eredmények nagyobb mértékben különböznek, mint a hőmérsékletre vonatkozóan. A belvárosi műszerek épületek tetején találhatóak, a felszíntől számítva Szegeden 34 m, Budapesten 56 m magasságban. Külterületen azonban 10 m magasságban történik a szél mérés, ezért a városi hatás a mérések összevetésével expliciten nem vizsgálható. Ezért a számszerű validációt a szélsébség esetében csak a külterületi mérések figyelembevételével végeztük el.

Az ALADIN eredmények vizsgálata során láthattuk, hogy az ALADIN-ARP jellemzően alacsonyabb havi átlagos szélsébségeket szimulált az ALADIN-ERAI-nél. Ez a különbség a SURFEX eredményeibe is átöröklődik (**15. ábra, 8. táblázat**). Budapesten a külvárosi (pestszentlőrinci) pontban a SURFEX-ARP kísérletben az egyes évszakokban 0,4-0,7 m/s-mal alacsonyabb szélsébségek fordultak elő. A SURFEX-ERAI azonban nyáron és ősszel szinte tökéletesen írta le a mért szélsébségértékeket, de a többi évszakban is a hiba mértéke legfeljebb 0,3 m/s. Szegeden számottevően jobbak a SURFEX eredményei, különösen a globális modellel meghajtott kísérletben láthatunk jelentős javulást (mindössze júliusban fordul elő nagyobb hiba). Az évszakos átlagos hiba egyik modellszimuláció esetén sem haladja meg a 0,3 m/s-ot.



15. ábra. A SURFEX-ERAI és a SURFEX-ARP átlagos havi szélsébségei (m/s) a budapesti külvárosi és a szegedi vidéki rácspontokban, valamint a rácspontokhoz legközelebbi állomások adatai alapján 2000–2005-ben.

Az éves és évszakos átlagok évenkénti értékeit tekintve a hosszú mérési időszorral rendelkező külvárosi, vidéki pontokban látható, hogy Pestszentlőrincen minden évszakban, míg Szegeden főként tavasszal és nyáron a szélsébség csökken (**16. ábra**) az 1970–2005 időszakon. Mivel a pestszentlőrinci állomás Budapest agglomerációjában helyezkedik el, amely területek az elmúlt évtizedekben jelentősen beépültek, a minden évszakban

megfigyelhető csökkenő tendencia nagyrészt a városiasodásnak köszönhető. Ugyanakkor a múltbeli mérések alapján elmondható, hogy az éghajlatváltozás következtében a Kárpát-medencében jellemzően csökken az átlagos szélesség (Spinoni et al., 2015; Péliné, 2015), ami a szegedi mérési sorok negatív trendjét magyarázza. A mérésekkel ellentétben a SURFEX-ARP kísérlet eredményeiben egyik városra sem figyelhetünk meg csökkenő szélességet. Ez részben azzal magyarázható, hogy a SURFEX-ben a földhasználat-változás nincs figyelembe véve, a városi beépítettség mértéke a '90-es évek állapotát tükrözi és a teljes szimuláció alatt konstans. Tehát a modellben a városiasodás okozta szélességcsökkenés e hiányosság miatt nem vizsgálható.

8. táblázat. A SURFEX-ARP évszakos szélességeinek hibája (m/s) a budapesti, valamint a szegedi külterületi rácsponthoz 2000–2005-ben. Referencia: állomási szélességadatok.

	Budapest külváros		Szeged vidék	
	ARP	ERA1	ARP	ERA1
Tavaszi	-0,6	-0,2	-0,2	-0,1
Nyári	-0,7	0,1	-0,3	0,2
Őszi	-0,4	-0,1	0,0	0,1
Téli	-0,7	-0,3	0,0	0,2

Az évszakos átlagos szélességek évek közötti változékonysága a mérések szerint az 1971–2000 időszakon télen és tavasszal némileg kisebb Budapesten, mint Szegeden (**9. táblázat**). A SURFEX-ARP Budapesten tavasz kivételével minden évszakban a mérésnél kisebb (legfeljebb 0,2 m/s-mal) változékonyságot eredményezett, míg a Szegedre vonatkozó szimulációkban egyedül nyáron figyelhető meg némileg alacsonyabb szórás.

A napi szélességértékek évszakos eloszlásfüggvényei alapján elmondható, hogy a budapesti külvárosi pontban a kis (2 m/s-nál alacsonyabb) szélességek felül, míg az ennél nagyobb szélességértékek alul vannak becsülve a SURFEX-ARP kísérletben az 1971–2000 időszakban, ami a szélesség szisztematikus alulbecslését eredményezi (**17. ábra**). A szegedi külterületi pontra vonatkozó eredmények némileg hasonló hibával bírnak, de a modell és a mérés eloszlásfüggvénye sokkal közelebb áll egymáshoz.

A városok szélességére gyakorolt hatásának vizsgálatához a szélesség napon belüli menetét kell tekintenünk. Nappal a napsugárzás hatására az alsó légrétegek instabillá válnak, megindul az átkeveredés (konvekció), ezáltal a nappali szélesség jóval erősebb, mint az éjszakai. A belső városi területeken nappal a beépítettségnek köszönhetően jellemzően kisebb a szélesség, mint a külterületen, ami a Szegedre vonatkozó modelleredményekben 12 és 15 UTC időpontokban egyértelműen megfigyelhető (**18. ábra**). Budapesten a domborzat és város szélességmódosító hatása kölcsönhat, emiatt nehéz a város hatását egyértelműen azonosítani.

9. táblázat. A SURFEX-ARP valamint a külvárosi állomás éves és évszakos szélességeinek időbeli szórása (m/s) a budapesti külvárosi és a szegedi vidéki pontban 1971–2000-ben.

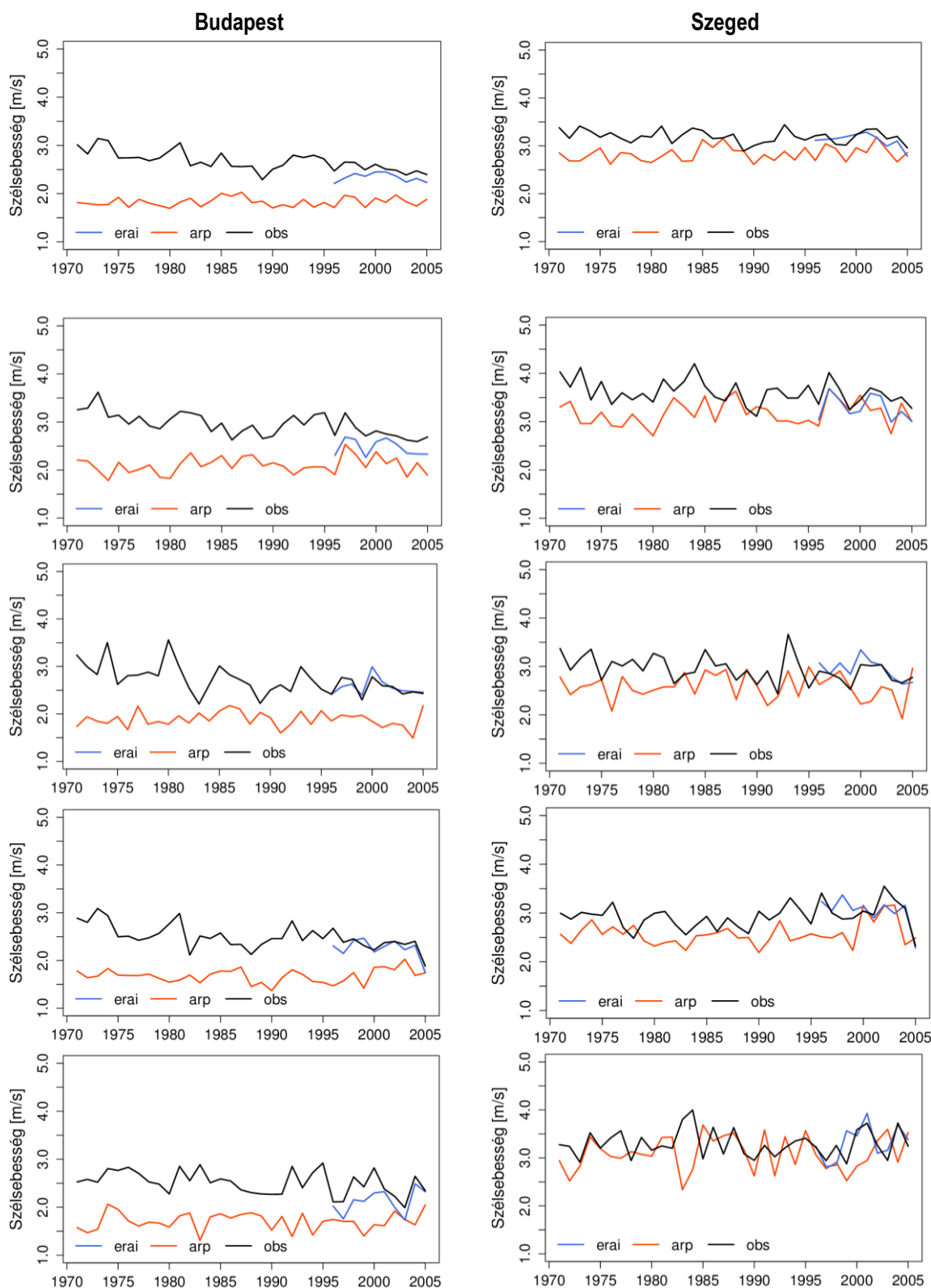
		Éves	Tavaszi	Nyár	Ősz	Tél
Budapest	mérés	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2
	SURFEX-ARP	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1
Szeged	mérés	0.1	0.3	0.3	0.2	0.3
	SURFEX-ARP	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3

6. Összefoglalás

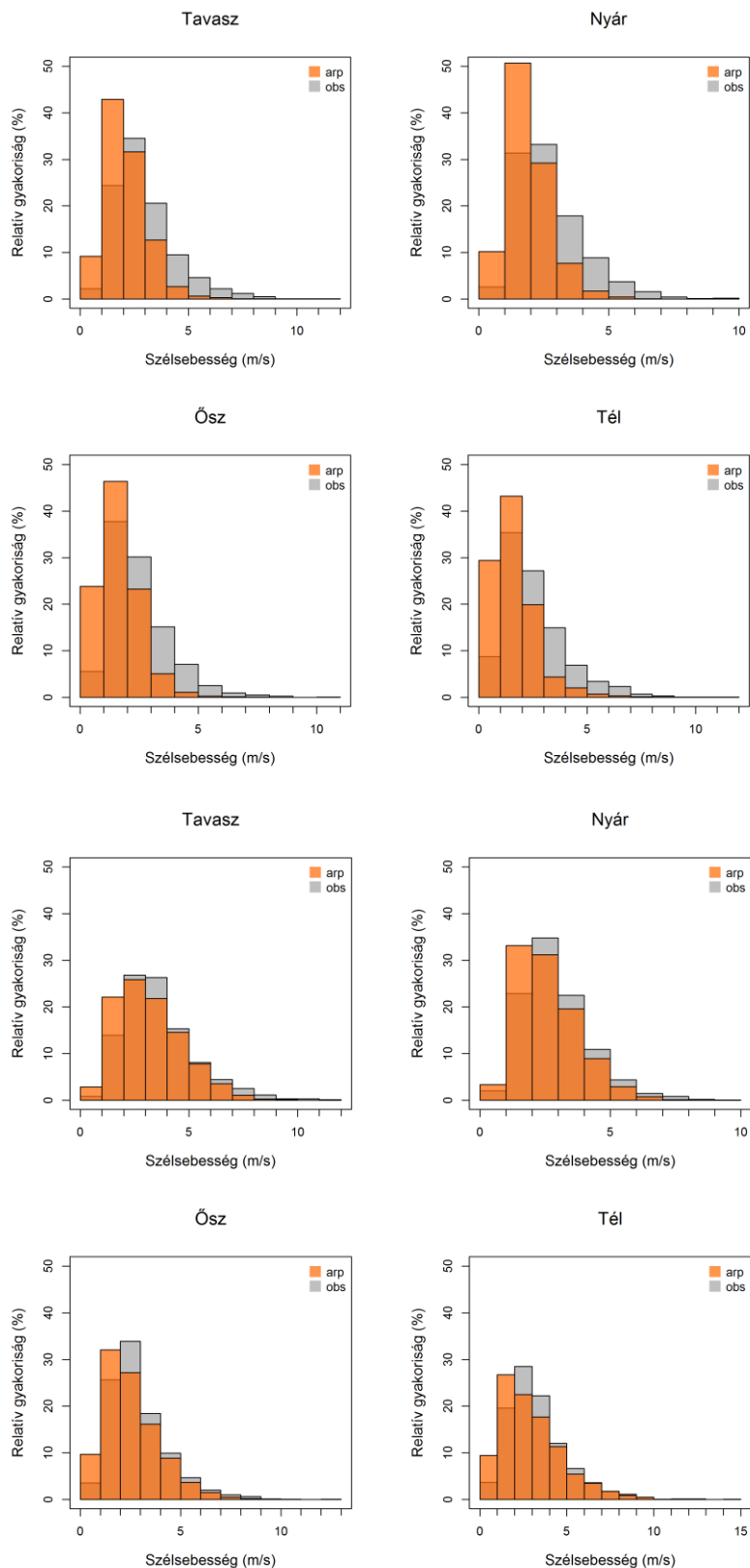
Jelen beszámolóban a SURFEX felszíni modell validációs eredményeit mutattuk be abból a célból, hogy ismertessük a modell képességeit hosszabb múltbeli időszakon a városi éghajlat leírása szempontjából.

A validációs vizsgálathoz két szimulációt végeztünk el Budapestre és Szegedre a SURFEX-szel 1 km-es horizontális felbontáson. A modell számára az RCMTÉR projektben elvégzett ALADIN-Climate regionális klímamodell-kísérletek szolgáltatották a légköri kényszereket. Az ALADIN egyrészt az ERA-Interim re-analízissel, másrészt az ARPEGE-Climate globális klímamodell 50 km-es felbontásra leskálázó ALADIN szimulációval volt meghajtva. A re-analízissel elvégzett szimulációt 1996–2005-re, a globális klímamodellel meghajtott kísérletet 1960–2005-re végeztük el. Budapestre és Szegedre fókuszálva az ALADIN eredményeket a CarpatClim-HU rácsponti megfigyelési adatbázissal vetettük össze, míg a SURFEX eredményeket egy-egy belvárosi és külvárosi, valamint külterületi állomás adataival validáltuk, mivel jelenleg nem áll rendelkezésünkre 10 km-es felbontásnál finomabb rácsponti megfigyelés. A modelleredmények közül a 2-m hőmérséklet, a városi hősziget-intenzitás, valamint a 10-m szélesség napi és napon belüli alakulásának havi, évszakos és éves átlagait vizsgáltuk.

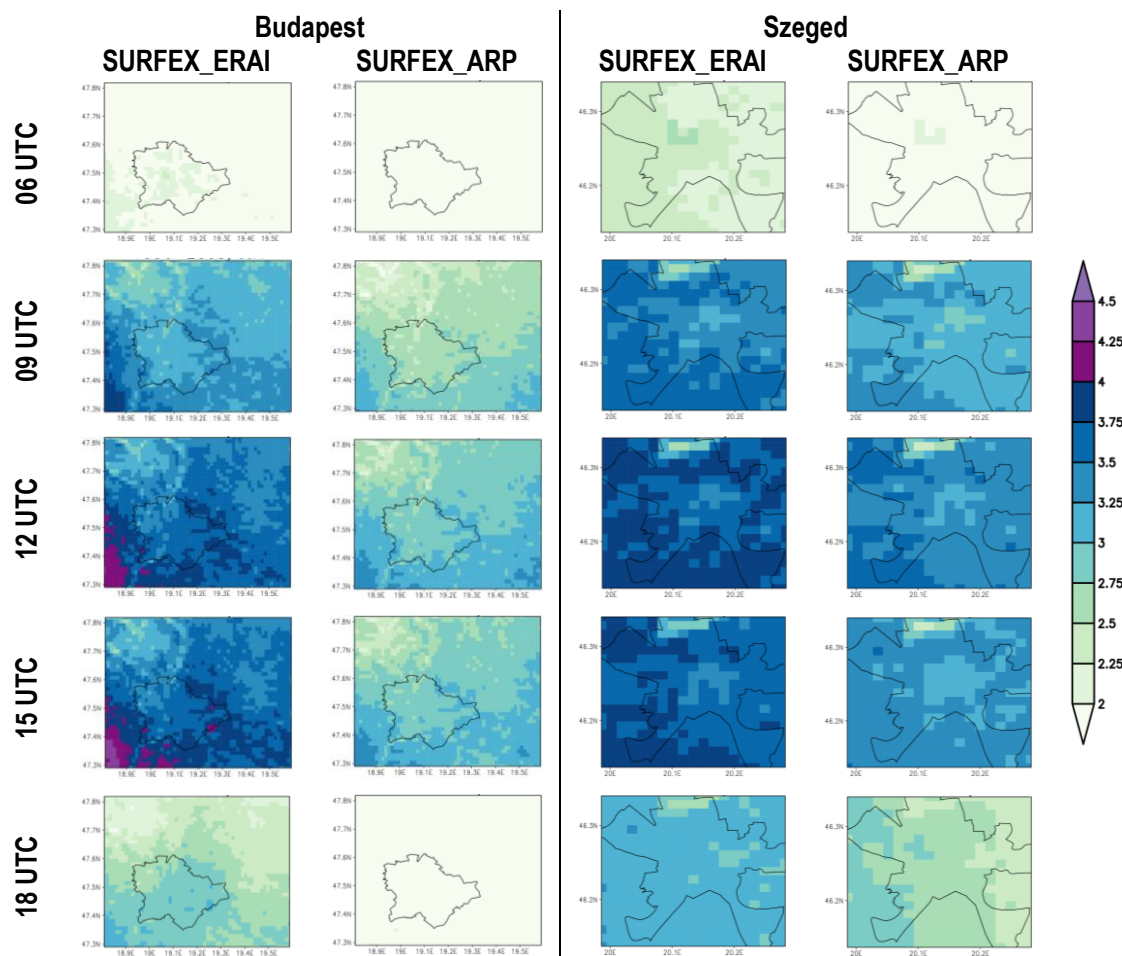
A vizsgálatok során kitértünk arra, hogy a globális klímamodellel közvetve meghajtott modellszimuláció hibái előjelüket és nagyságukat tekintve hogyan változnak egy hosszabb (1971–2000) és egy rövidebb (1996–2005) időszakon. A szélesség esetén jelentős különbségeket nem figyeltünk meg, a hőmérséklet és a csapadék validációs eredmények azonban nagyobb mértékben különböztek a vizsgálati időszak megválasztásának függvényében. Ezért az ARPEGE-Climate-tal meghajtott szimulációs eredményeket alapvetően az 1971–2000 időszakon tekintettük.



16. ábra. A SURFEX-ARP (narancs), valamint a SURFEX-ERA1 (kék) éves és évszakos szélsebességértékeinek (m/s) évenkénti értékei budapesti külvárosi, valamint a szegedi vidéki rácspontokban, A rácspontokhoz legközelebbi állomás adatait feketével jelöltük.



17. ábra. A SURFEX-ARP, valamint állomási adatokból számított napi szélsebességek (m/s) évszakos eloszlásfüggvénye a budapesti külvárosi (balra), valamint a szegedi vidéki (jobbra) pontban, Időszak: 1971–2000.



18. ábra. A SURFEX-ERA1 (1, és 3, oszlop), valamint a SURFEX-ARP (2, és 4, oszlop) tavaszi átlagos szélessége (m/s) a budapesti (1-2, oszlop), valamint a szegedi (3-4, oszlop) tartomány felett 06 és 18 UTC között 1996-2005-ben.

A meghajtó mezőket összevetve a CarpatClim-Hu adatbázissal megállapítottuk, hogy az ALADIN mindkét határfeltétellel nyár kivételével alábecsüli a hőmérsékletet Budapest felett (legfeljebb 2 °C-kal). Nyáron azonban a modelleredmények a méréshez képest túl magasak, különösen a globális klímamoddellel meghajtott kísérletben, ahol 3 °C-os felülbecslés adódott. A jellemzően túl alacsony hőmérsékletek mellé tavasszal és nyáron 20%-ot meghaladó csapadéktöbblet társul, míg ősszel és télen a hibák 10% alattiak. Budapesten feltehetően az összetettebb domborzat elégtelen leírásából adódóan a 10 km-es felbontású ALADIN eredmények jelentősen alábecsülik a szélességet (0,5 – 1 m/s-mal), nagyobb mértékben az ARPEGE határfeltétellel meghajtott kísérletben. Ezzel ellentétben Szegeden kismértékű felülbecslés mutatkozott.

A SURFEX hőmérséklet-eredményeit tekintve elmondható, hogy a modell képest a városi hősziget térbeli szerkezetének és időbeli menetének alapvető jellemvonásait visszaadni. A modell az ALADIN hőmérséklet-eredményeit melegíti, egyrészt a város felett a TEB városi sémának köszönhetően, másrészt különösen ősszel és télen a vidéki területek felett is, ami feltehetően a felszínközeli hőmérséklet eltérő parametrizációjával magyarázható. Az

évenkénti értékeket vizsgálva megállapítottuk, hogy az 1971–2000 időszakon a mérési eredmények melegedő tendenciát mutatnak, amit a modellszimuláció nem ad vissza. Ennek köszönhetően a nyári felülbecslés mértéke a jelenhez közeledve csökken.

A városi hősziget-intenzitás évszakos átlagos térbeli alakulása hasonló a két SURFEX-szimuláció esetén, a legerősebb és térben legkiterjedtebb éjszakai hőtöbblet nyáron fordul elő, tavasszal és ősszel azonban a 2 °C feletti éjszakai UHI intenzitás tovább fennáll. A SURFEX-ARP kísérletben különösen nyáron erősebb a városi hőtöbblet a SURFEX-ERAI kísérlet eredményénél, aminek hátterében az ALADIN-ARP magasabb hőmérséklete és alacsonyabb szélsősége miatti visszafogottabb felszínközeli átkeverés állhat. Az átlagos évszakos UHI napi menete jól közelíti a mért napi menetet, kivéve a délutáni órákban, amikor az UHI kifejlődése lassabban megy végbe a megfigyelésnél. A legnagyobb felülbecslés (0,5 °C) tavasszal fordult elő.

A modellezett szélsőségek-eredményeket tekintve szintén elmondható, hogy a SURFEX képes a városi hatás kimutatására, ugyanis napközben a város belső területein alacsonyabb szélsőségek jelentkeznek, különösen a síkságon elhelyezkedő Szegeden.

A számszerű validációt a szélsőségekre csak a külvárosi, külterületi állomások adataival tudtuk összevetni, mivel a belvárosi állomások épületek tetején találhatóak, több 10 m magasságban. A figyelembe vett mérések alapján a SURFEX-ERAI mindkét városban pontosan írta el a szélsőségek éves menetét. A SURFEX-ARP különösen Budapesten jelentősen alábecsülte a havi átlagokat, míg Szegeden mindössze júliusban fordult elő nagyobb alábecslés. A mért évenkénti évszakos értékekben jól megfigyelhető Budapesten a külvárosi terület jelentős beépítésének hatása, hiszen a szélsőségek a jelenhez közeledve minden évszakban csökken. Szegeden ez a tendencia csak tavasszal és nyáron jelentkezett, ami feltehetően az éghajlatváltozással magyarázható. A budapesti városiasodás hatása a SURFEX-ben az időben állandó beépítettség arány miatt nem figyelhető meg.

A validációs vizsgálatok alapján elmondhatjuk, hogy a SURFEX képes a városi éghajlat alapvető térbeli és időbeli jellemvonásait leírni. A modell objektív és számszerű validációja során azonban több esetben korlátokba ütköztünk, amik elsősorban a finomfelbontású rácsponti megfigyelési adatbázis, valamint a hosszú városi mérési adatsor hiányából fakadtak. A finomfelbontású rácsponti adatbázis szükségét már több ország felismerte, hiszen nemcsak a városklíma kutatás, de az éghajlati modellek fejlődése is elvárja a részletes mérési adatokat. Magyarországon az URBAN-PATH projekt keretében Szegeden létesítettek egy 23 állomásból álló hálózatot 2014-ben (Unger et al., 2015). Az állomáshálózatok fenntartása és fejlesztése remélhetőleg lehetőséget ad a jövőben a városklíma modellek részletesebb validációjára.

7. Irodalomjegyzék

- Bihari Z., Lakatos M., Szentimrey T., 2017: Felszíni megfigyelésekből készített rácsponti adatbázisok az Országos Meteorológiai Szolgálatnál. *Léggör*, 62 (4) 148-151.
- Csorvási A., Illy T., Sábitz J., Szabó P., Szépszó G., Zsebeházi G., 2016: Múltbeli időszakra vonatkozó modelleredmények validációja. NATÉR C13-10 projektbeszámoló. 41p.
- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E.V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N., and Vitart, F., 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 137, 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- Illy, T., Sábitz J., Szépszó G., 2015: Az ALADIN-Climate modellkísérletek eredményeinek validációja. NATÉR C13-10 projektbeszámoló. 19p.
- Masson, V., 2000: A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models. *Bound.-Lay. Meteorol.* 94, 357–397. <https://doi.org/10.1023/A:1002463829265>
- Masson, V. and Seity, Y., 2009: Including Atmospheric Layers in Vegetation and Urban Offline Surface Schemes. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 48, 1377–1397, <https://doi.org/10.1175/2009JAMC1866.1>.
- Noilhan, J. and Mahfouf, J.-F., 1996: The ISBA land surface parameterisation scheme. *Glob. Planet. Change* 13, 145–159. [https://doi.org/10.1016/0921-8181\(95\)00043-7](https://doi.org/10.1016/0921-8181(95)00043-7)
- Noilhan, J. and Planton, S., 1989: A Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models. *Mon. Weather Rev.* 117, 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., 1987: *Boundary Layer Climates*. 2nd edition. Methuen Publishers, London, United Kingdom. 435p. ISBN 0-415-04319-0
- Péliné Cs., 2015: A regionális szélklíma tendenciáinak elemzése a globális klímaváltozás függvényében. Doktori értekezés, ELTE Meteorológiai Tanszék, 100 p.
- 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.
- Unger J. és Sümegehy Z., 2002: *Környezeti klimatológia. Kisléptékű éghajlatok, városklíma*. SZTE TTK, JATEPress, Szeged, 202 p.
- Unger, J., Gál, T., Csépe, Z., Lelovics, E., Gulyás, Á., 2015: Development, data processing and preliminary results of an urban human comfort monitoring and information system. *Időjárás*, 119:337–354.
- Spinoni, J., Szalai, S., Szentimrey, T., Lakatos, M., Bihari, Z., Nagy, A., Németh, Á., Kovács, T., Mihic, D., Dacic, M., Petrovic, P., Kržič, A., Hiebl, J., Auer, I., Milkovic, J., Štěpánek, P., Zahradníček, P., Kilar,

- P., Limanowka, D., Pyrc, R., Cheval, S., Birsan, M.-V., Dumitrescu, A., Deak, G., Matei, M., Antolovic, I., Nejedlík, P., Štastný, P., Kajaba, P., Bochníček, O., Galo, D., Mikulová, K., Nabyvanets, Y., Skrynyk, O., Krakovska, S., Gnatiuk, N., Tolasz, R., Antofie, T. and Vogt, J., 2015: Climate of the Carpathian Region in the period 1961–2010: climatologies and trends of 10 variables. *Int. J. Climatol.*, 35: 1322-1341. doi:10.1002/joc.4059
- Szentimrey, T., 2008: Development of MASH homogenization procedure for daily data. Proceedings of the Fifth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases, Budapest, Hungary, 2006, WCDMP-No. 71, WMO/TD-NO. 1493, 123–130.
- Szentimrey, T., Bihari, Z., 2007: Mathematical background of the spatial interpolation methods and the software MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis). Proceedings of the Conference on Spatial Interpolation in Climatology and Meteorology (eds.: S. Szalai, Z. Bihari, T. Szentimrey, M. Lakatos) 2007, COST Office, Luxemburg, ISBN 92-898-0033-X, 17–28.
- Zsebeházi, G., Krüzselyi, I., Szépszó, G., 2015: Study of urban climatology over Budapest with SURFEX/TEB model at the Hungarian Meteorological Service. *ALADIN-HIRLAM Newsletter* 5, 107–113.
- 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 (2), 191–207. <https://doi.org/10.28974/idojaras.2020.2.3>