



LIFE
Városi Eső
A VÁROSI ESŐ ARANYAT ÉR.

Budapest csapadékvíz- gazdálkodás tervezését támogató éghajlati előrejelzések

C.3 akció – Városi csapadékvíz lefolyás modellezése
D.C3.2 Demonstrációs tevékenységek koncepciójának
kidolgozása, a paraméterek meghatározása

Felelős partner | Trinity Enviro Kft.

Dátum | 2023 március



**Az Európai Unió
társfinanszírozásával**

A PROJEKT A MAGYAR ÁLLAM
TÁRSFINANSZÍROZÁSÁVAL VALÓSUL MEG.

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

SZERZŐK:

Dr. Honti Márk
Varga Laura



**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar**

Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék

LEKTORÁLTA:

Fülöp Bence

TÁMOGATÓINK:

A "LIFE in Runoff - VárosiEső" projekt a Budapest Főváros XII. kerület Hegyvidéki Önkormányzat vezetésével, Budapest Főváros VII. kerület Erzsébetvárosi Önkormányzat, Budapest Főváros XVIII. kerület Pestszentlőrinc-Pestszentimre Önkormányzata, Budapest Főváros Önkormányzata, a Klímabarát Települések Szövetsége és a Trinity Enviro Kft. együttműködésével 2021 és 2025 között valósul meg.

A projekt az EU 2021–2027 LIFE programja, valamint az Innovációs és a Nyugat-Balkáni Zöld Központ Nonprofit Kft. támogatásával valósul meg.

SUMMARY

Tasks in the field of urban hydrology require detailed temporal and spatial knowledge of local precipitation. Due to the changing precipitation patterns under climate change, stormwater management planning should also consider possible future changes. This is only possible by using meteorological time series downscaled from climate projections. The direct results of regional climate models are not well suited for application in urban environments due to the large cell sizes (10-25 km on average), which mask local phenomena. Moreover, an important characteristic of urban catchment runoff is short time of concentration, thus fine temporal resolution (min. 5-10 min) precipitation time series are required to perform network analyses with dynamic runoff simulation. So, the required resolutions are not available from regional climate models, one needs to apply downscaling procedures. Besides precipitation, time series of other climatic variables may be needed to calculate other processes on the catchment such as evaporation. For these, downscaling is not only a question of technique that maps to a different time resolution, but the frequent lack of local observed time series.

The aim of this work was to produce local time series of ~10-minute temporal resolution precipitation and daily time series for other climatic parameters for the city of Budapest for two future time horizons (~2030-2050, ~2050-2070). The ~10-minute precipitation time series were produced in two steps. In the first step, hourly-resolution time series were generated from the daily time series of the regional climate models, in the second step, ~10-minute (7.5 min) time series were generated from the hourly time series by downscaling. The precipitation-generator model was Neyman-Scott rectangular pulses (Cowpertwait, 1991) and the downscaling model was microcanonical cascade-based (Molnar and Burlando, 2005). Daily temperature, relative humidity, global radiation and wind speed time series were generated using the UKCP09 weather generator (Kilsby et al., 2007). The generated time series can be used for stormwater management planning and any other task requiring continuous high-resolution weather data. Statistical analysis of the time series for future periods was used to calculate climatic indices and other information such as Intensity-Duration-Frequency curve values to support planning.

TARTALOM

1	BUDAPEST CSAPADÉKVÍZ-GAZDÁLKODÁS TERVEZÉSÉT TÁMOGATÓ ÉGHAJLATI ELŐREJELZÉSEK ALKALMAZÁSI TERÜLETE	3
2	AZ ÉGHAJLATI ELŐREJELZÉSEK ELŐÁLLÍTÁSA	4
2.1	A TÁVLATI IDŐSZAKOKRA VONATKOZÓ ÉGHAJLATI IDŐSOROK ELŐÁLLÍTÁSÁNAK MÓDSZERTANA	4
2.2	A TÁVLATI IDŐSZAKOKRA VONATKOZÓ ÉGHAJLATI IDŐSOROK ELŐÁLLÍTÁSÁHOZ ALKALMAZOTT BEMENETI ADATOK ÉS HELYSZÍNEK	4
2.3	A TÁVLATI IDŐSZAKOKRA VONATKOZÓ ÉGHAJLATI IDŐSOROK STATISZTIKAI KIÉRTÉKELÉSE	6
3	EREDMÉNYEK	6
3.1	A TÁVLATI IDŐSZAKOKRA ELŐÁLLÍTOTT ÉGHAJLATI IDŐSOROK TÍPUSAI	6
3.2	A TÁVLATI IDŐSZAKOKRA ELŐÁLLÍTOTT ÉGHAJLATI IDŐSOROK STATISZTIKAI KIÉRTÉKELÉSE	7
3.2.1	CSAPADÉK ELŐREJELZÉSEK	7
3.2.2	HŐMÉRSÉKLET ELŐREJELZÉSEK	18
3.2.3	SZÉLSEBESSÉG NAPI ÁTLAGA ELŐREJELZÉSEK	22
3.2.4	NAPI GLOBÁLSUGÁRZÁS ELŐREJELZÉSEK	22
3.2.5	RELATÍV NEDVESSÉGTARTALOM ELŐREJELZÉSEK	22
4	A BUDAPESTEN VÁRHATÓ ÉGHAJLATI VÁLTOZÁSOK ÖSSZEGZÉSE	23
5	IRODALOMJEGYZÉK	23

1 BUDAPEST CSAPADÉKVÍZ-GAZDÁLKODÁS TERVEZÉSÉT TÁMOGATÓ ÉGHAJLATI ELŐREJELZÉSEK ALKALMAZÁSI TERÜLETE

A városi hidrológia területéhez kapcsolódó feladatokhoz a lokálisan jellemző csapadéktevékenység részletes időbeli és térbeli ismerete szükséges.

Az éghajlatváltozás következtében átalakuló csapadékvízviszonyok miatt a csapadékvíz-gazdálkodási tervezés során érdemes nemcsak a jelen állapotot, hanem a jövőben lehetséges változásokat is figyelembe venni. Ez az éghajlati előrejelzések eredményeként előálló meteorológiai idősorokkal lehetséges. A regionális klímamodellek eredményei a nagy cellaméretek (átlagosan 10-25 km) következtében, amelyek elfedik a lokális jelenségeket, direktben nem jól alkalmazhatók városi környezetben. Emellett a városi vízgyűjtők lefolyásainak egyik jellemzője a rövid összegyülekezési idő, ezért a méretezési feladatok és a dinamikus lefolyás szimulációval történő hálózati elemzések elvégzéséhez finom időbeli felbontású (min. 5-10 perc) csapadék idősorokra van szükség, azonban a regionális klímamodellekből ezek nem állnak rendelkezésre.

A városi vízháztartási mérleg elemei közé soroljuk a lefolyás (felszíni, felszín alatti) és a beszivárgás mellett a párolgást is. A csapadékvíz-gazdálkodás céljait szolgáló kék-zöld infrastruktúra beavatkozások hatékonyságának fontos indikátora az elpárologtatott víz mennyiségének növelése, hiszen ez segíti a mikroklima és a helyi vízmérleg pozitív irányú változását. A csapadék mellett tehát szükség lehet egyéb éghajlati elemek idősoraira is, melyekből a vízgyűjtő olyan folyamatait is számíthatjuk, mint például a párolgás. Ezek esetében jellemzően nem az időbeli felbontás a gond, hanem a térbeli felbontás, vagyis a vizsgált helyszínre lokálisan érvényes idősorok hiánya.

Jelen kutatás célkitűzése tehát finom térbeli és/vagy időbeli felbontású lokálisan érvényes csapadék és egyéb éghajlati paraméterek idősorainak előállítása Budapest területére, két választott távlati időszakra, melyek alkalmazhatók a helyi csapadékvíz-gazdálkodás tervezésében. A szükséges tér- és időbeli felbontású idősorokat a regionális klímamodellek idősorainak sztochasztikus alapú generálásával és leskálázással állítjuk elő. A modern szemléletű tervezésben előtérbe kerül az idősorok alkalmazása az eseményalapú számítások helyett, amelyet a kutatás során előállított idősorokkal támogatható.

A finom felbontású idősorok, illetve az azokból származtatott egyéb eredmények lehetséges alkalmazási területei:

- Csapadékvíz-elvezető és -gazdálkodó rendszerek méretezése és vizsgálata tapasztalati számítási módszerekkel és/vagy hidrodinamikai lefolyás szimulációt végző modellekkel;
- Városi mikroklima változásának vizsgálata;
- Bármilyen egyéb feladat, amelyhez éghajlati idősorokra van szükség.

2 AZ ÉGHAJLATI ELŐREJELZÉSEK ELŐÁLLÍTÁSA

2.1 A TÁVLATI IDŐSZAKOKRA VONATKOZÓ ÉGHAJLATI IDŐSOROK ELŐÁLLÍTÁSÁNAK MÓDSZERTANA

A távlati időszakokra előrejelzett éghajlati idősorokat időjárás-generátor és leskáázó modellek együttes alkalmazásával állítottuk elő.

A sztochasztikus időjárás-generátorok olyan számítógépes modellek, amelyeket szintetikus időjárási idősorokat készítenek („generálnak”) egy adott helyszínrre az ott mért éghajlati idősorok statisztikai jellemzőinek elemzéséből, míg a leskáázó modellek statisztikai alapon, az idősorokat adott szabályrendszert szerint bontják finomabb térbeli és/vagy időbeli felbontásra.

A ~10 perces csapadék idősorokat két lépésben állítottuk elő. Első lépésben a regionális klímamodellek napi idősoraiból óra felbontású idősorokat generáltunk, majd a második lépésben az órás idősorokból ~10 perces (7,5 perc) idősorokat hoztunk létre leskáázással. Az alkalmazott csapadék-generátor modell Neyman-Scott-féle (Cowpertwait, 1991), a leskáázó modell mikrokanonikus kaszkád-alapú (Molnar és Burlando, 2005).

A generálás és leskáázás elvégzéséhez szükség volt az adott helyszínekre számított modellparaméterekre. A modellek paramétereinek számításához a vizsgált helyszínen mért finom időbeli felbontású (jelen esetben órás és 10 perces) csapadék idősorok statisztikai elemzését végeztük el és határoztuk meg a paramétereket modelltől függően. A mért idősorokra számított paraméterek csak a jelen időszakra teszik lehetővé az idősorok generálását és leskáázását. A modellparaméterek az éghajlatváltozás következtében a csapadéktevékenység változása mentén változnak, ezért a regionális klímamodellek finomabb felbontásra hozásához szükséges lépés a paraméterek változásának becslése a távlati időszakokra is. Mivel a jövőbeli időszakokra többségében csak napi léptékű előrejelzések állnak rendelkezésünkre, ezért a változások becslésénél is csak ebből tudunk kiindulni. A klímamodellek jelen (mért idősorral megegyező időszak) és jövő (~2030-2050, ~2050-2070) időszakaikra számított statisztikai jellemzők relatív változása alapján becsültük meg településenként a csapadékviszonyok jövőbeni alakulását. A változás mértékével módosítottuk a csapadékgenerátor jelenre számított paramétereit, és létrehoztuk az órás idősorokat. A 10 percre való lebontásnál már nem vettünk figyelembe egyéb változást, hanem a jelen időszakra meghatározott paraméterekkel hajtottuk végre a leskáázást.

A napi hőmérséklet, relatív nedvesség, globálsugárzás és szélsősebesség idősorok az UKCP09 időjárásgenerátor (Kilsby és társai, 2007) alkalmazásával álltak elő.

2.2 A TÁVLATI IDŐSZAKOKRA VONATKOZÓ ÉGHAJLATI IDŐSOROK ELŐÁLLÍTÁSÁHOZ ALKALMAZOTT BEMENETI ADATOK ÉS HELYSZÍNEK

A regionális klímamodellek által szolgáltatott eredmények időbeli leskáázását négy budapesti helyszínrre készítettük el, amelyeknél automatán mérő meteorológiai állomások találhatók. Az állomások az Országos Meteorológiai Szolgálat mérőhálózatának részei:

- 44527 jelölésű állomás: Budapest Pestszentlőrinc (XVIII. kerület, koordináták: 47.4292, 19.1822, mért idősorok mérési időszaka: 2001-2021)
- 44121 jelölésű állomás: Budapest Belterület (II. kerület, koordináták: 47.5111, 19.0281, mért idősorok mérési időszaka: 1998-2021)

- 44165 jelölésű állomás: Budapest Újpest (IV. kerület, koordináták: 47.5733, 19.075, mért idősorok mérési időszaka: 2002-2021)
- 44505 jelölésű állomás: Budapest Lágymányos (XI. kerület, koordináták: 47.4747, 19.0619, mért idősorok mérési időszaka: 2000-2021)

A mért idősorokból a következőket alkalmaztuk a modellek kalibrálásához:

- 10 perces felbontású csapadék [mm],
- Napi hőmérséklet (maximum, minimum, átlag) [°C]
- Napi globálisugárzás összeg [J/cm²]
- Szélsebesség napi átlaga [m/s]
- Relatív nedvesség napi átlaga [%]

A regionális klímamodellek idősoraiból a következőket alkalmaztuk a kalibráláshoz és a generált és leskálázott idősorok előállításához:

- Napi csapadék [mm],
- Napi hőmérséklet (maximum, minimum, átlag) [°C]
- Napi globálisugárzás összeg [J/cm²]
- Szélsebesség napi átlaga [m/s]
- Relatív nedvesség napi átlaga [%]

Az EURO-CORDEX szimulációk a CMIP5 hosszú távú kísérletek globális éghajlati szimulációit veszik figyelembe a 2100-ig tartó időszakra. Ezek az üvegházhatású gázok kibocsátási forgatókönyvein alapulnak (reprezentatív koncentrációs útvonalak, RCP-k), amelyek a 21. század után a sugárzási kényszer 4,5 W/m²-nél történő stabilizálódásának (RCP4.5), a 21. század végén a sugárzási kényszer 8,5 W/m²-t meghaladó növekedésének (RCP8.5), valamint a 21. századon belül a sugárzási kényszer 3,0 W/m²-nél történő csúcsra jutásának és az azt követő csökkenésének (RCP2.6, más néven RCP3-PD) felelnek meg (pl. Moss et al, 2010; Van Vuuren et al., 2011).

A számításokat 15 különböző EURO-CORDEX (1.táblázat) regionális klímamodell szimulációból kiindulva, közepes emisszió forgatókönyv (rcp4.5) figyelembevételével végeztük el. Ebben a forgatókönyvben már sokkal jelentősebb szerepet játszanak a klímaváltozás mérséklésére törekvő rendelkezések, intézkedések az RCP 8.5-höz és az RCP 6.0-hoz viszonyítva.

Az alkalmazott regionális klímamodell-globális cirkulációs modell párosításokat az 1. táblázat foglalja össze. A szimulációs időszakok az egyes modellek esetén: 1951-2100 (150 év). A négy budapesti helyszín mindegyikére megkerestük, hogy melyik számítási rácsegységbe esnek, és mindegyikre külön-külön letöltöttük a regionális modellek által az adott területekre generált napi felbontású előrejelzett idősorokat.

1. táblázat – Az alkalmazott RCM-GCM párosítások

Regionális klímamodell (RCM)	Vezérlő globális klímamodell (GCM)	Fejlesztő intézet	Forgatókönyv
ALADIN53	CNRM-CM5	CNRM	rcp4.5
CCLM4-8-17	MPI-ESM-LR	CLMcom	rcp4.5
RCA4	CanESM2	SMHI	rcp4.5
RCA4	CNRM-CM5	SMHI	rcp4.5
RCA4	CSIRO-Mk3-6-0	SMHI	rcp4.5
RCA4	EC-EARTH	SMHI	rcp4.5
RCA4	IPSL-CM5A-MR	SMHI	rcp4.5
RCA4	MIROC5	SMHI	rcp4.5
RCA4	HadGEM2-ES	SMHI	rcp4.5
RCA4	MPI-ESM-LR	SMHI	rcp4.5
RCA4	NorESM1-M	SMHI	rcp4.5
RCA4	GFDL-ESM2M	SMHI	rcp4.5
REMO2009	MPI-ESM-LR	MPI-CSC	rcp4.5
WRF331F	IPSL-CM5A-MR	PSL-INNERIS	rcp4.5
WRF341I	CanESM2	UCAN	rcp4.5

2.3 A TÁVLATI IDŐSZAKOKRA VONATKOZÓ ÉGHAJLATI IDŐSOROK STATISZTIKAI KIÉRTÉKELÉSE

Az idősorokból számított statisztikai jellemzők (részletes leírásuk az eredmények részben):

- Extrém napi csapadék, hőmérséklet és egyéb (rendelkezésre állás függvényében: globálsugárzás összeg, szélsősebesség napi átlaga, relatív nedvesség napi átlaga) indexek meghatározása, kiszámítása a négy budapesti helyszínrre a két távlati időszakra (~2030-2050 és ~2050-2070).
- A csapadékvíz-elvezető rendszerek jövőbeli méretezéséhez szükséges tervezési paraméterek meghatározása, új csapadékmáximum-függvények kiszámítása.

3 EREDMÉNYEK

3.1 A TÁVLATI IDŐSZAKOKRA ELŐÁLLÍTOTT ÉGHAJLATI IDŐSOROK TÍPUSAI

A munkarész eredményeként a vizsgált budapesti helyszínekre az alábbi, távlati időszakokra generált idősorok álltak elő:

- 10 perces csapadék [mm],
- Napi csapadék [mm],
- Napi hőmérséklet (maximum, minimum, átlag) [°C],
- Napi globálsugárzás összeg [J/cm²],
- Szélsősebesség napi átlaga [m/s],
- Relatív nedvesség napi átlaga [%].

3.2 A TÁVLATI IDŐSZAKOKRA ELŐÁLLÍTOTT ÉGHAJLATI IDŐSOROK STATISZTIKAI KIÉRTÉKELÉSE

Az extrém indexek esetén az eredményeket havi/éves bontásban boxplot diagaramokon ábrázoltuk. Az ábrákon az eredeti, illetve a jelenre (eredeti idősorral megegyező időszak) és a két távlati időtávra (~2030-2050 és ~2050-2070) generált idősorokból számított statisztikai értékek jelennek meg. Az eredeti mért idősorral megegyező időszakra generált (jelen generált) idősorok kettős szerepet látnak el:

- Megmutatják, hogy a modell milyen jól képes leképezni a generált idősorokban az eredetire jellemző karakterisztikákat (statisztikai jellemzőt), illetve
- A modell hibáját kiküszöbölhetjük vele, mivel a statisztikai értékelésnél a generált jelen és jövő közötti értékek változását hasonlítjuk össze.

Az ábrákon bemutatjuk az egyes statisztikai jellemzők várható változásainak mértékét is. A változásokat a 15 regionális klímamodellből generált lokális idősorok alapján határoztuk meg, az előrejelzések medián értékét figyelembe véve (az összehasonlítás alapja a mért idősorokkal megegyező időtávra (jelen generált) és a távlati időszakokra generált idősorokból számított értékek összehasonlítása, ezzel kiküszöbölve az időjárás generátor modellek hibáit). Ebből az következik, hogy a változások mértéke lehet nagyobb vagy kisebb, illetve ellentétes irányú is, mint az ábrán megjelenített. Az NA% jelzés azt jelenti, hogy adott hónapban a változás mértéke nem volt meghatározható. Az ábrákon a 15 darab regionális klímamodell generált idősoraiból (50 darab/regionális klímamodell) számított értékek sokaságát ábrázoljuk, kihagyva a 7-es és 93-as percentilis alatti/feletti értékeket.

A változások iránya ritka esetben eltért állomásonként vagy egy-egy évszakon belül az egyes hónapok esetén, ezért az értékelést a következő kritériumrendszer alapján végeztük el:

- Egy évszakon belül a három hónapból legalább két hónapban jelentkező tendenciát tekintettük érvényesnek;
- A négy budapesti állomás közül legalább három esetén jelentkező tendenciát tekintettük érvényesnek;
- A szöveges összefoglalóban a változások irányát és mértékét a 2030-2050 közötti időperiódusra állapítottuk meg. Vannak esetek, amikor a 2050-2070 között ellentétes mértékű/irányú tendenciák figyelhetők meg. A tervezői célú feladatok esetén a két időtáv eredményei közül a kedvezőtlenebb figyelembevételét ajánljuk.
- Az évszakok határán lévő hónapok (jellemzően március, május, szeptember, június, augusztus) sokszor a megelőző vagy az utána következő évszak tendenciáját követik inkább, amely arra utal, hogy az évszakok határait nem lehet élesen megszabni, hanem érdemesebb havi bontásban is elemezni az eredményeket.

A csapadékmaximum-függvények a csapadékvíz-elvezető rendszerek méretezéséhez és vizsgálatához szolgáltatnak bemeneti adatot. Az értékei megadják, hogy egy adott időtartamú csapadék mekkora csapadékként intenzitással jelentkezik átlagos visszatérési idő (előfordulási gyakoriság) mellett. A csapadékmaximum-függvények értékeit 1, 2, 4, 5 és 10 éves visszatérési időkre és a 10, 20, 30, 60, 120 és 180 perces csapadékidőtartamok esetére határoztuk meg a ~10 perces idősorok elemzésével.

3.2.1 CSAPADÉK ELŐREJELZÉSEK

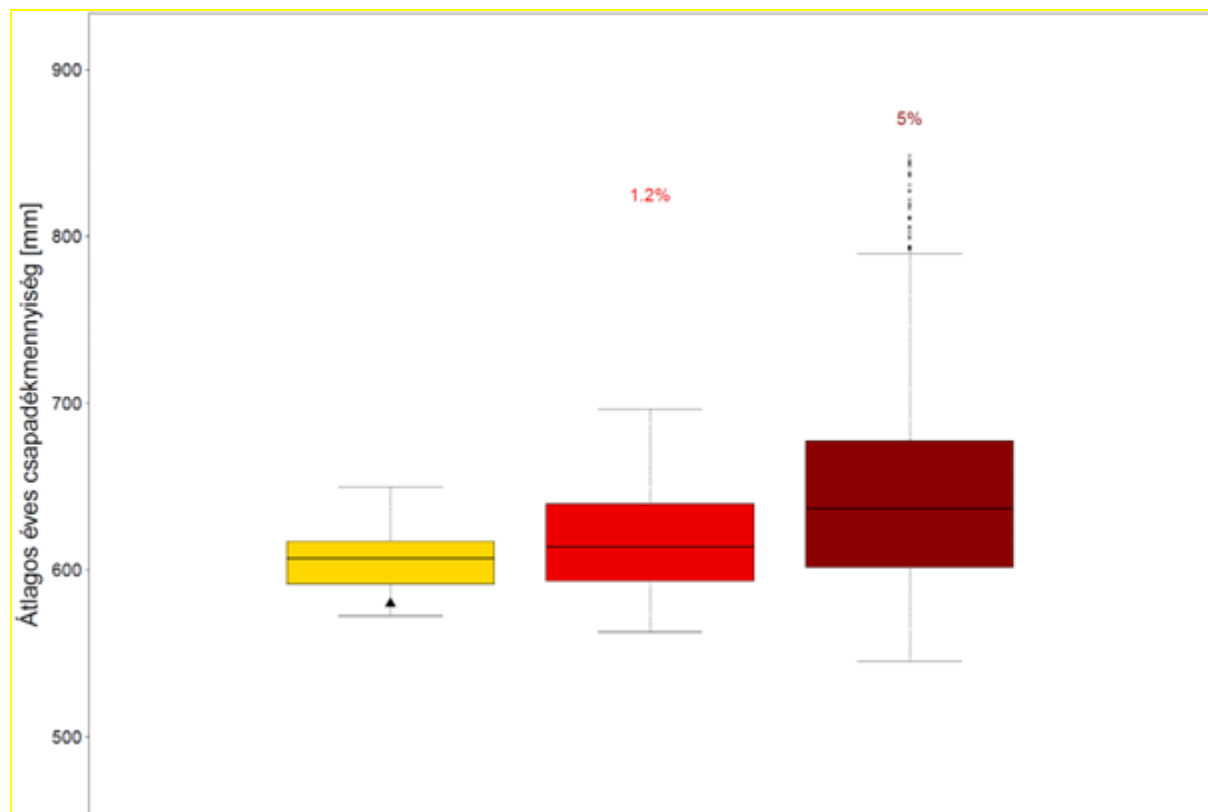
A lehulló csapadékmennyiségek lehetséges jövőbeli változásainak vizsgálatához az átlagos havi és éves értékeket határoztunk meg. A csapadéktevékenység szélsőségeit extrém napi indexekkel és a tervezésnél mértékadó extrém csapadékként intenzitásokkal (csapadékmaximum-függvény értékei) jellemeztük. Az alábbi alfejezetekben a becsült változások mértékét és irányait mutatjuk meg a 4 budapesti állomás esetére. Az ábrák a 44527-es állomás

részeredményeit mutatják, állomásonként a részletes eredményeket az I-IV. Mellékletek tartalmazzák.

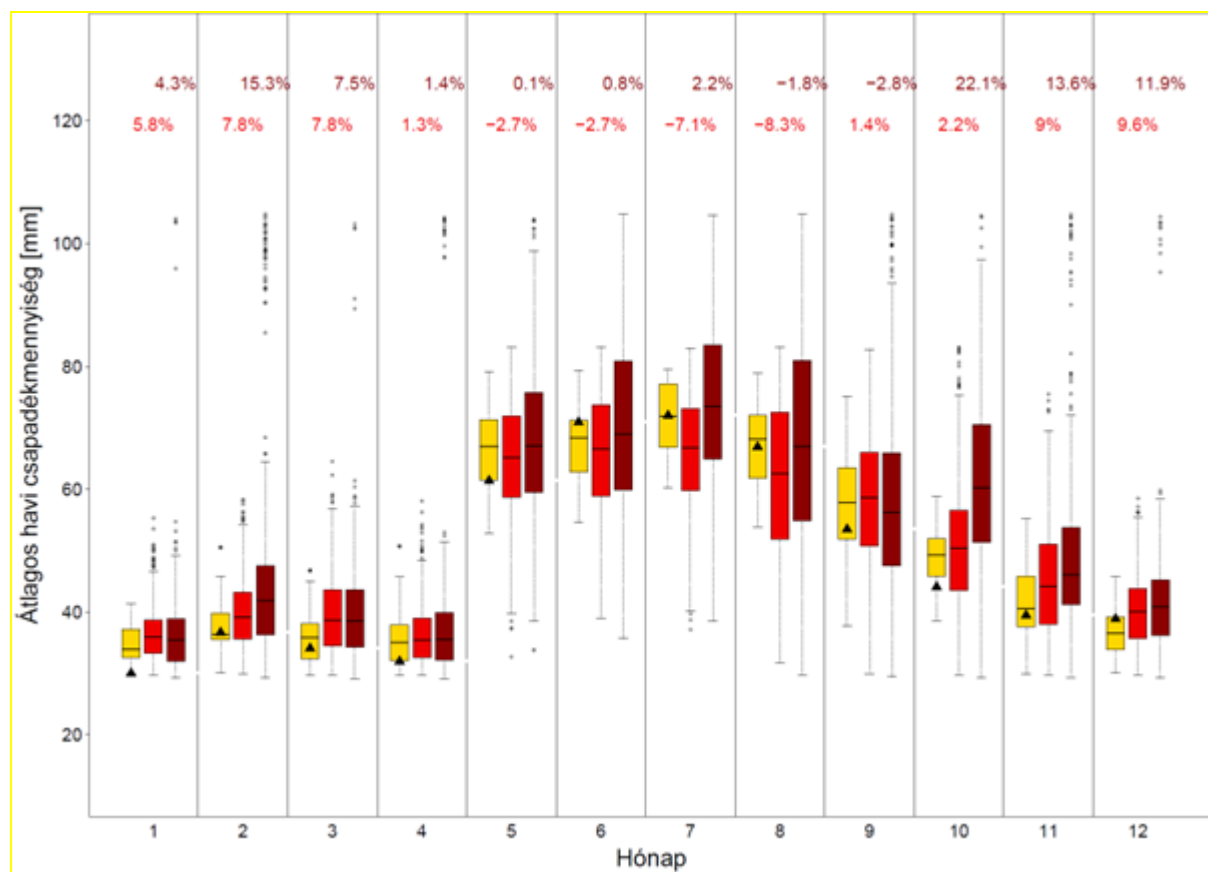
3.2.1.1 Az átlagos csapadékmennyiségek változása

Az átlagos éves csapadékmennyiségek várhatóan kismértékben növekednek ~2030-2050-re és ~2050-2070-re (átlagosan becsült érték 1% és 3-5% a két időszakra).

Évszakos bontást tekintve nyáron csökkenő tendenciát mutat a csapadék mennyisége, míg a többi évszakban várhatóan növekedni fog.



1. ábra – Az átlagos éves csapadékmennyiségek jövőben várható változása a 44527 állomás esetén. Fekete háromszög – mért idősből számolt érték (=valódi jelen), Sárga boxplot – jelenre generált értékek, Piros boxplot – közelebbi időtávra generált értékek (~2030-2050), Bordó boxplot - távolabbi időtávra generált értékek (~2050-2070). A százalékok a jelen és jövő generált értékeire számolt mediánok eltérését, vagyis az átlagosan becsült változás irányát mutatják.



2. ábra – Az átlagos havi csapadékmennyiségek jövőben várható változása a 44527 állomás esetén. Fekete háromszög – mért idősből számolt érték (=valódi jelen), Sárga boxplot – jelenre generált értékek, Piros boxplot – közelebbi időtávra generált értékek (~2030-2050), Bordó boxplot - távolabbi időtávra generált értékek (~2050-2070). A százalékok a jelen és jövő generált értékeire számolt mediánok eltérését, vagyis az átlagosan becsült változás irányát mutatják.

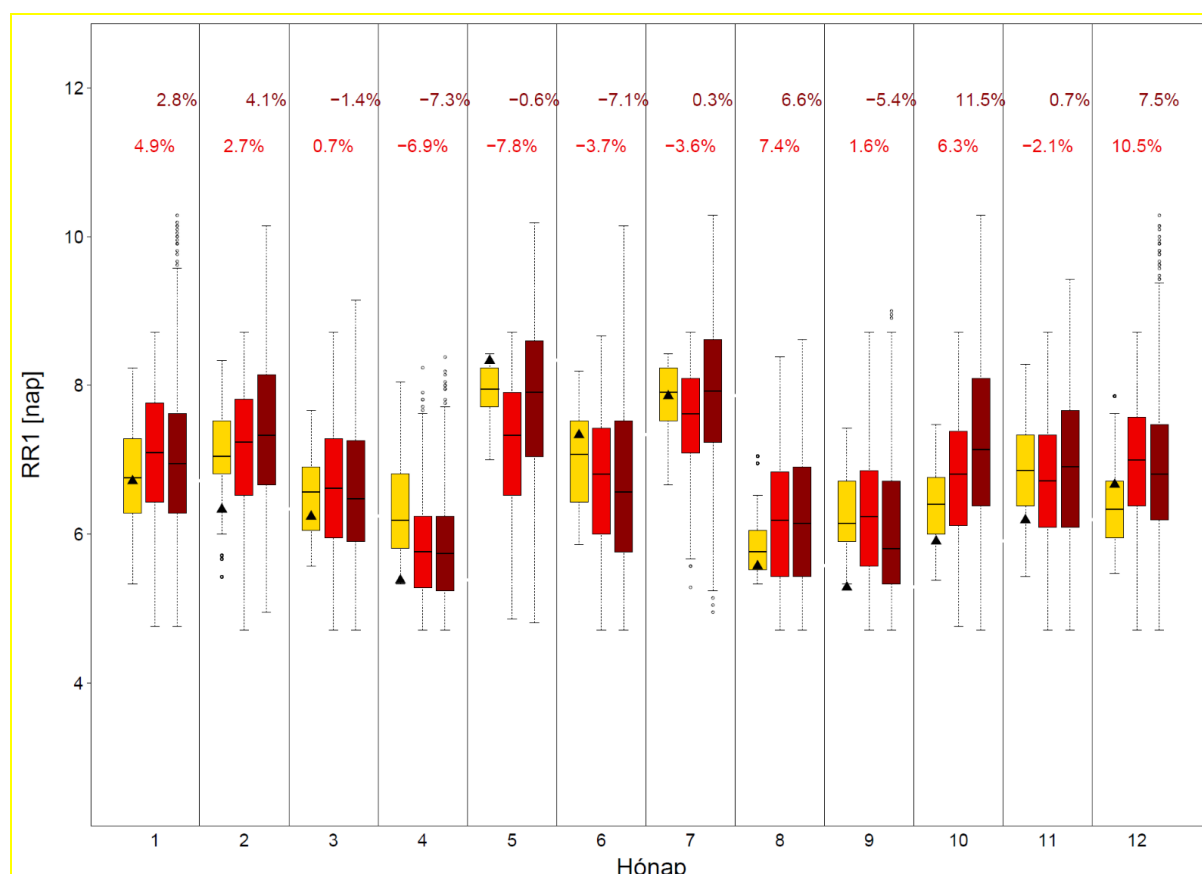
3.2.1.2 Az extrém napi indexek változása

Az alábbi indexeket határoztuk meg, ahol R_{nap} a csapadékösszeg napi értéke:

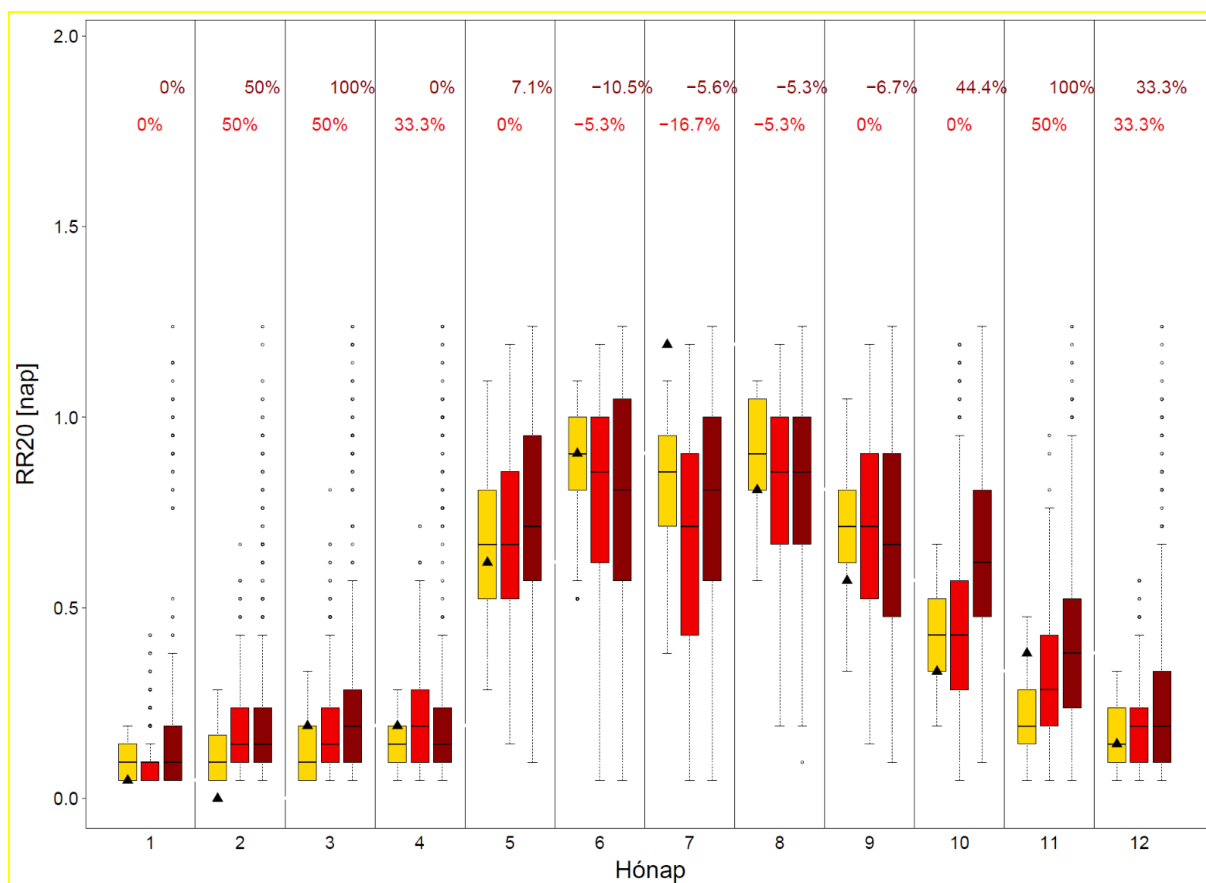
- $RR01$ ($R_{\text{nap}} \geq 0.1 \text{ mm [nap]}$) – Az olyan napok száma, amikor a lehulló csapadék mennyisége nagyobb, mint a küszöbérték.
- $RR1$ ($R_{\text{nap}} \geq 1 \text{ mm [nap]}$) – Az olyan napok száma, amikor a lehulló csapadék mennyisége nagyobb, mint a küszöbérték.
- $RR5$ ($R_{\text{nap}} \geq 5 \text{ mm [nap]}$) – Az olyan napok száma, amikor a lehulló csapadék mennyisége nagyobb, mint a küszöbérték.
- $RR10$ ($R_{\text{nap}} \geq 10 \text{ mm [nap]}$) – Az olyan napok száma, amikor a lehulló csapadék mennyisége nagyobb, mint a küszöbérték.
- $RR20$ ($R_{\text{nap}} \geq 20 \text{ mm [nap]}$) – Az olyan napok száma, amikor a lehulló csapadék mennyisége nagyobb, mint a küszöbérték.
- $RX1$ ($\text{Max}(R_{\text{nap}})$ [mm]) – Legnagyobb napi csapadékösszeg.
- CDD [nap] – Egymást követő száraz napok maximális száma: A leghosszabb időszak, amikor $R_{\text{nap}} < 1 \text{ mm}$.
- CWD [nap] – Egymást követő csapadékos napok maximális száma: A leghosszabb időszak, amikor $R_{\text{nap}} \geq 1 \text{ mm}$.

A csapadékos napok számát és napi csapadékkéntizások alakulását illetően hasonló tendencia mutatkozik mind a négy állomás esetén:

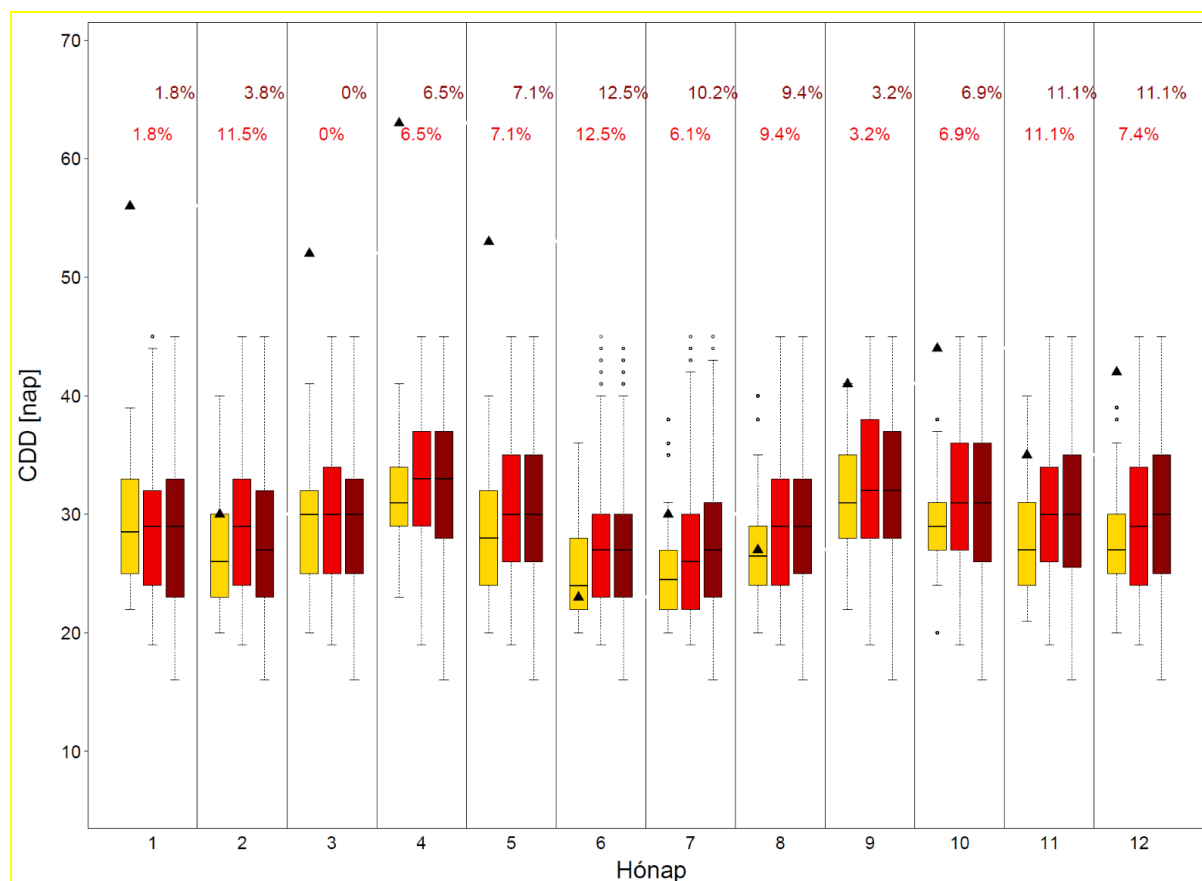
- RR01 és RR1: A csapadékos napok száma tavasszal és nyáron csökkenő, míg ősszel és télen növekvő tendenciát mutat.
- RR5, RR10 és RR20 közötti indexekről, amelyek a nagyobb napon belüli csapadékkoncentrációk számát írják le, általánosan elmondható, hogy tavasszal, ősszel és télen növekednek, míg nyáron hónapok többségében csökkenés a jellemző.
- Az RX1, vagyis a legnagyobb 1-napi csapadék értékei is hasonló tendenciát mutatnak, mint az RR5-RR20.
- Az egymást követő száraz időszakok maximális hossza minden évszak esetén jellemzően növekedést mutatott.
- Az egymást követő nedves időszakok maximális hossza esetén egyértelmű tendencia nem mutatható ki, a legtöbb esetben nem volt jelentős változás.



3. ábra – Az RR1 index jövőben várható változása a 44527 állomás esetén. Fekete háromszög – mért idősből számolt érték (=valódi jelen), Sárga boxplot – jelenre generált értékek, Piros boxplot – közelebbi időtávra generált értékek (~2030-2050), Bordó boxplot - távolabbi időtávra generált értékek (~2050-2070). A százalékok a jelen és jövő generált értékeire számolt mediánok eltérését, vagyis az átlagosan becsült változás irányát mutatják.



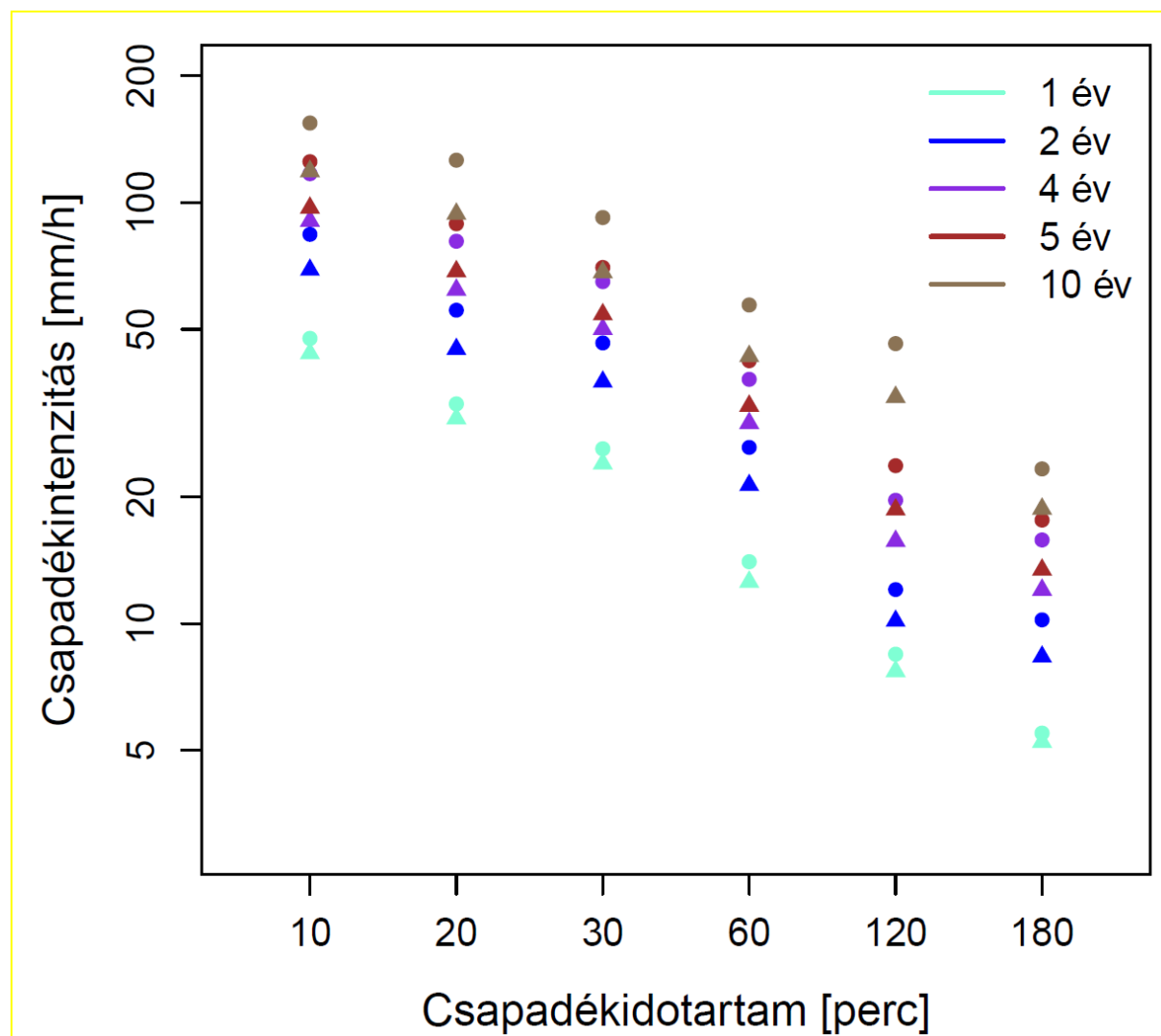
4. ábra – Az RR20 index jövőben várható változása a 44527 állomás esetén. Fekete háromszög – mért idősből számolt érték (=valódi jelen), Sárga boxplot – jelenre generált értékek, Piros boxplot – közelebbi időtávra generált értékek (~2030-2050), Bordó boxplot – távolabbi időtávra generált értékek (~2050-2070). A százalékok a jelen és jövő generált értékeire számolt mediánok eltérését, vagyis az átlagosan becsült változás irányát mutatják.



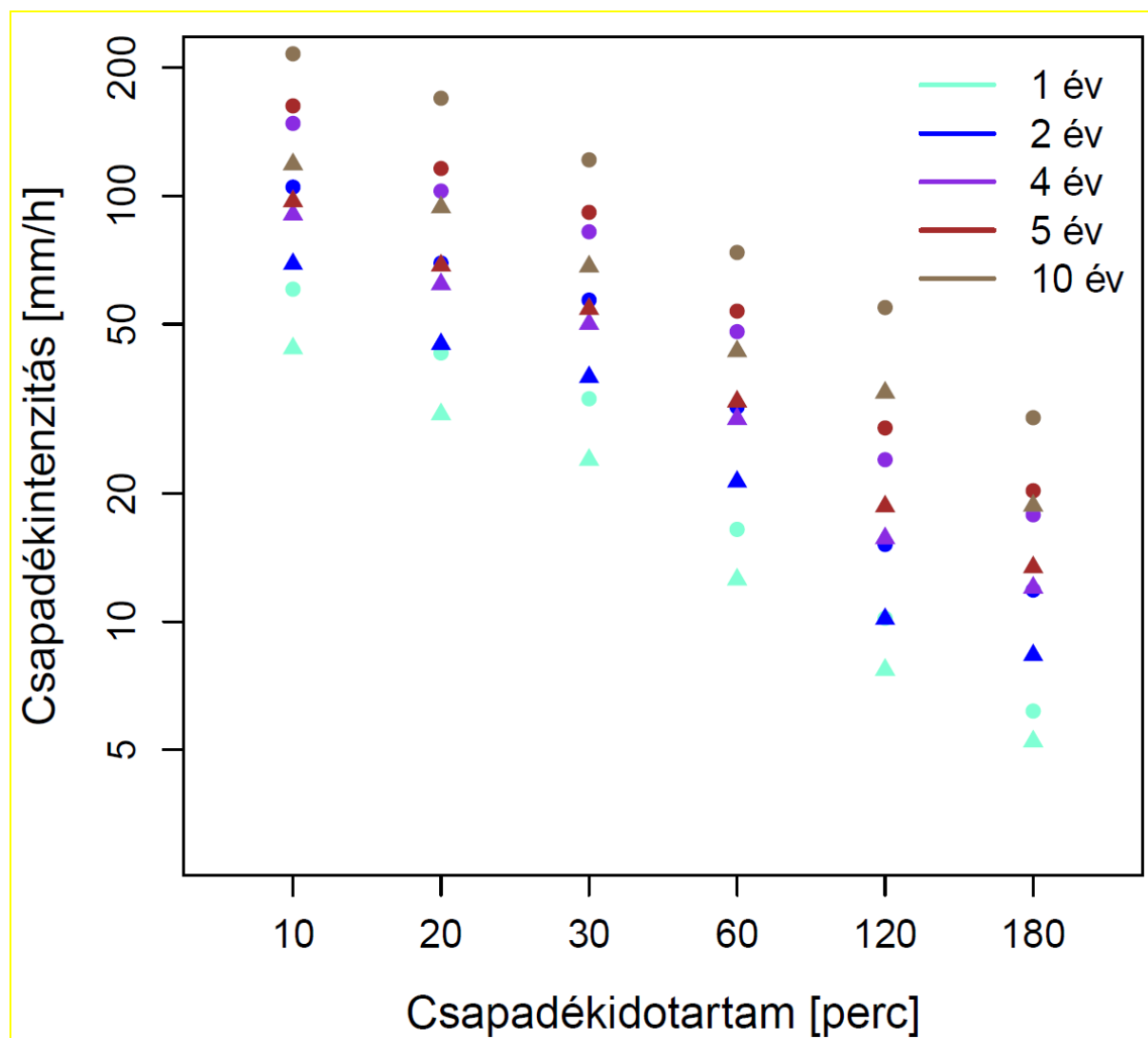
5. ábra – A CDD index jövőben várható változása a 44527 állomás esetén. Fekete háromszög – mért idősből számolt érték (=valódi jelen), Sárga boxplot – jelenre generált értékek, Piros boxplot – közelebbi időtávra generált értékek (~2030-2050), Bordó boxplot - távolabbi időtávra generált értékek (~2050-2070). A százalékok a jelen és jövő generált értékeire számolt mediánok eltérését, vagyis az átlagosan becsült változás irányát mutatják.

3.2.1.3 A csapadékmaximum-függvények értékeinek változása

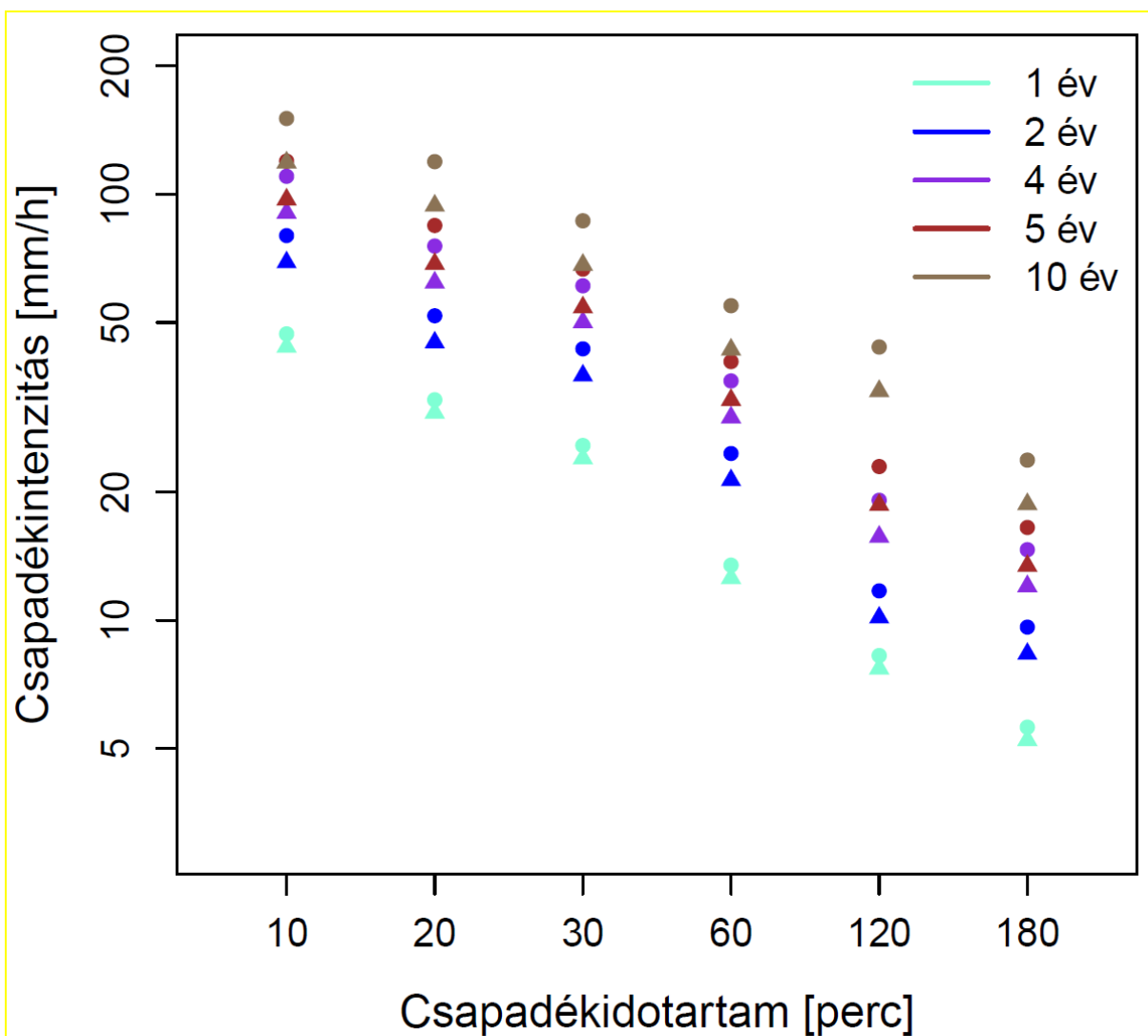
A csapadékmaximum-függvények értékeit 1, 2, 4, 5 és 10 éves visszatérési időkre és a 10, 20, 30, 60, 120 és 180 perces csapadékidőtartamok esetére határoztuk meg. A két távlati időszakra számított új függvény értékeket a 2-3. táblázatok tartalmazzák. A jelen állapothoz képesti változások mértékét, azaz a jelenre és a távlati időszakokra számolt függvényértékeket a 6-9. ábrák mutatják. A 15 darab regionális klímamodell leskálázott idősoraiból számított intenzitás értékeinek mediánját, 7-es és 93-as percentilisét adtuk meg. A jelenre számított függvényértékek növekedést mutatnak a jövőben, és a növekmény nagyobb a visszatérési idő (vagyis az előfordulási gyakoriság csökkenésével) és a percentilis növekedésével. A 2030-2050-es időszakra intenzívebb csapadékokat jeleztünk előre, mint 2050-2070-re. A változások mértéke pár százaléktól akár közel 100%-ig terjedhet (lásd: a mediánhoz és a 93-as percentilishoz tartozó ábrák).



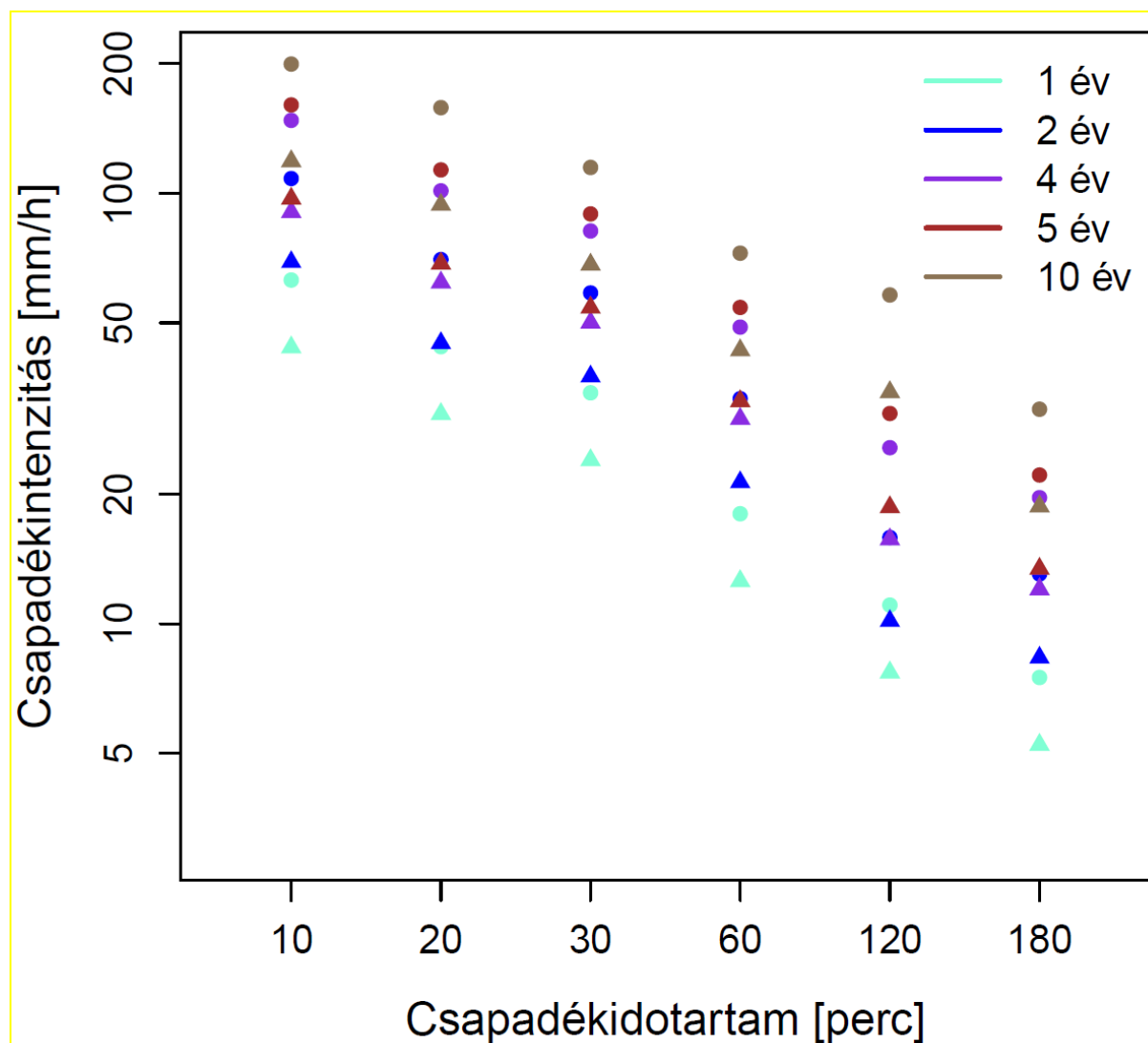
6. ábra –. Csapadékmaximum-függvény értékek 1, 2, 4, 5 és 10 éves visszatérési idők esetén a 44527 állomáson, a 15 darab regionális klímamodell leskálázott idősorainak medián értékeiből számítva (háromszög: mért idősorokból számított értékek, kör: leskálázott idősorokból számított értékek a közeli jövőre (~2030-2050)).



7. ábra – Csapadékmaximum-függvény értékek 1, 2, 4, 5 és 10 éves visszatérési idők esetén a 44527 állomáson, a 15 darab regionális klímamodell leskálázott idősorainak medián értékeiből számítva (háromszög: mért idősorokból számított értékek, kör: leskálázott idősorokból számított értékek a távoli jövőre (~2050-2070)).



8. ábra – Csapadékmaximum-függvény értékek 1, 2, 4, 5 és 10 éves visszatérési idők esetén a 44527 állomáson, a 15 darab regionális klímamodell leskálázott idősorainak 93-as percentilis értékeiből számítva (háromszög: mért idősorokból számított értékek, kör: leskálázott idősorokból számított értékek a közeli jövőre (~2030-2050)).



9. ábra – Csapadékmaximum-függvény értékek 1, 2, 4, 5 és 10 éves visszatérési idők esetén a 44527 állomáson, a 15 darab regionális klímamodell leskálázott idősorainak 93-as percentilis értékeiből számítva (háromszög: mért idősorokból számított értékek, kör: leskálázott idősorokból számított értékek a távoli jövőre (~2050-2070)).

2. táblázat – Állomás 44527: Csapadékmaximum-függvény becsült értékei ~2030-2050-re (Percentilisek: 15 darab regionális klímamodell 10 percre leskálázott 15*50 darab idősorából számítva).

	Visszatérési idő [év]														
	1			2			4			5			10		
	Percentilis														
Csapadék-időtartam [perc]	7	50	93	7	50	93	7	50	93	7	50	93	7	50	93
10	39.44	46.27	59.50	59.98	81.72	102.83	86.87	116.45	143.68	93.69	124.57	157.53	116.48	150.10	207.61
20	27.47	32.34	42.30	39.16	54.27	68.19	60.58	80.36	99.74	66.95	88.54	112.27	93.62	125.38	162.68
30	21.35	25.03	33.06	32.07	45.09	55.90	48.26	64.55	80.12	52.84	69.76	88.71	67.50	91.27	116.39
60	10.62	13.65	16.33	18.18	25.35	31.45	27.86	37.52	46.79	30.61	42.04	52.09	40.10	56.90	70.56
120	6.87	8.43	10.16	8.22	11.60	15.17	13.06	18.71	23.75	15.85	22.64	28.07	32.42	44.64	53.12
180	4.17	5.49	6.14	7.18	10.08	11.85	10.59	15.75	17.57	11.83	17.49	19.94	16.35	22.93	29.21

3. táblázat – Állomás 44527: Csapadékmaximum-függvény becsült értékei ~2050-2070-re (Percentilisek: 15 darab regionális klímamodell 10 percre leskálázott 15*50 darab idősorából számítva).

	Visszatérési idő [év]														
	1			2			4			5			10		
	Percentilis														
	7	50	93	7	50	93	7	50	93	7	50	93	7	50	93
Csapadék-időtartam [perc]	7	50	93	7	50	93	7	50	93	7	50	93	7	50	93
10	35.91	47.11	62.52	55.64	81.33	107.85	72.95	112.03	147.44	78.72	120.46	160.21	97.90	154.83	201.90
20	25.15	33.00	43.79	36.08	52.74	69.93	50.04	76.85	101.15	55.61	85.10	113.18	77.55	122.64	159.92
30	19.65	25.78	34.21	30.18	44.11	58.49	40.38	62.01	81.61	43.94	67.24	89.43	56.32	89.07	116.14
60	10.29	13.50	17.91	17.14	25.06	33.22	24.14	37.07	48.80	26.65	40.78	54.24	35.61	56.31	73.43
120	6.31	8.28	10.99	8.16	11.93	15.81	12.67	19.45	25.60	15.11	23.13	30.76	28.48	45.03	58.73
180	4.29	5.63	7.46	6.71	9.81	13.00	9.70	14.89	19.60	10.87	16.64	22.13	15.45	24.44	31.87

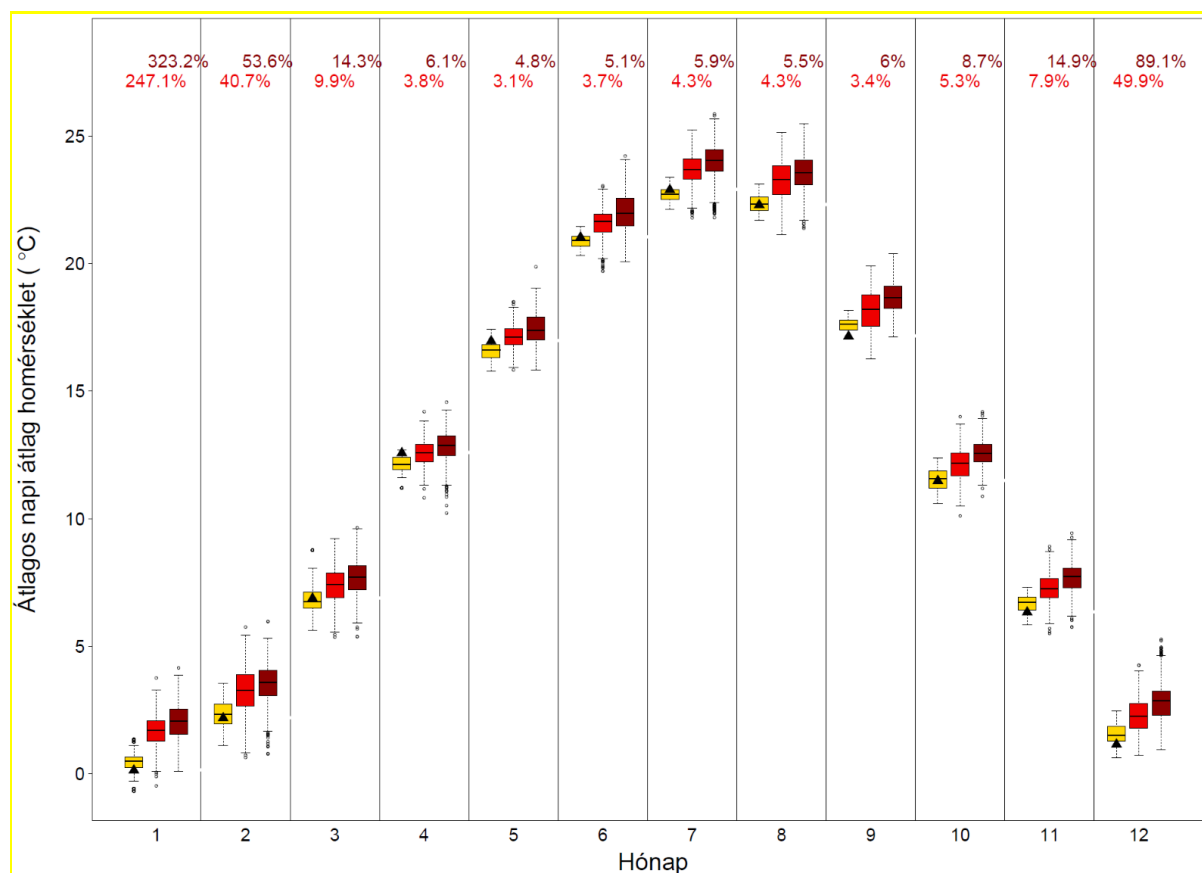
3.2.2 HŐMÉRSÉKLET ELŐREJELZÉSEK

A hőmérséklet jövőbeli változásainak vizsgálatához az éves átlagos maximális, átlagos és minimális napi értékeket, és a jellemző napi hőingásokat határoztuk meg. A hőmérsékleti szélsőségeket extrém napi indexekkel jellemeztük.

3.2.2.1 Az éves átlagos maximális, átlagos, minimális napi hőmérséklet és a napi hőingás változása

Az éves átlagos maximális, átlag és minimális napi hőmérsékletek esetén hasonló megfigyeléseket tettünk a 4 állomás esetén:

- Jellemzően az összes hónap melegedése várható: a téli hónapokban jelentős, akár +40-250%-os növekedés is tapasztalható a napi értékekben, míg a többi hónapban +3-10 körül várható a változás.



10. ábra – A havi átlag átlag napi hőmérsékletek jövőben várható változása a 44527 állomás esetén. Fekete háromszög – mért időszorból számolt érték (=valódi jelen), Sárga boxplot – jelenre generált értékek, Piros boxplot – közelebbi időtávra generált értékek (~2030-2050), Bordó boxplot – távolabbi időtávra generált értékek (~2050-2070). A százalékok a jelen és jövő generált értékeire számolt mediánok eltérését, vagyis az átlagosan becsült változás irányát mutatják.

3.2.2.2 Az extrém napi indexek változása

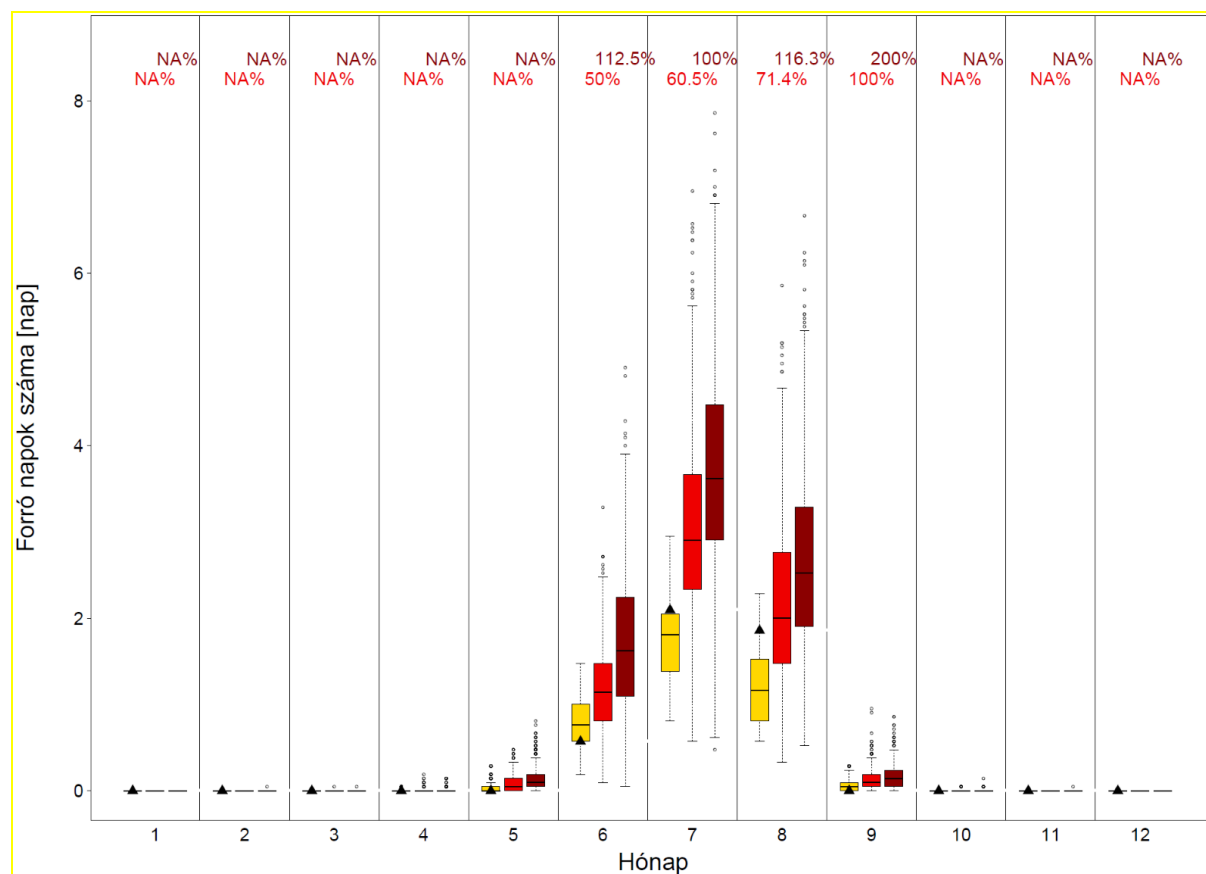
Az alábbi indexeket határoztuk meg, ahol $T_{\max}$, $T_{\text{átlag}}$, $T_{\min}$ a maximális, átlagos és minimális napi hőmérsékletek értéke:

- SU ($T_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$ [nap]) - Az olyan napok száma, amikor a napi maximális hőmérséklet nagyobb, mint a küszöbérték (nyári napok száma).

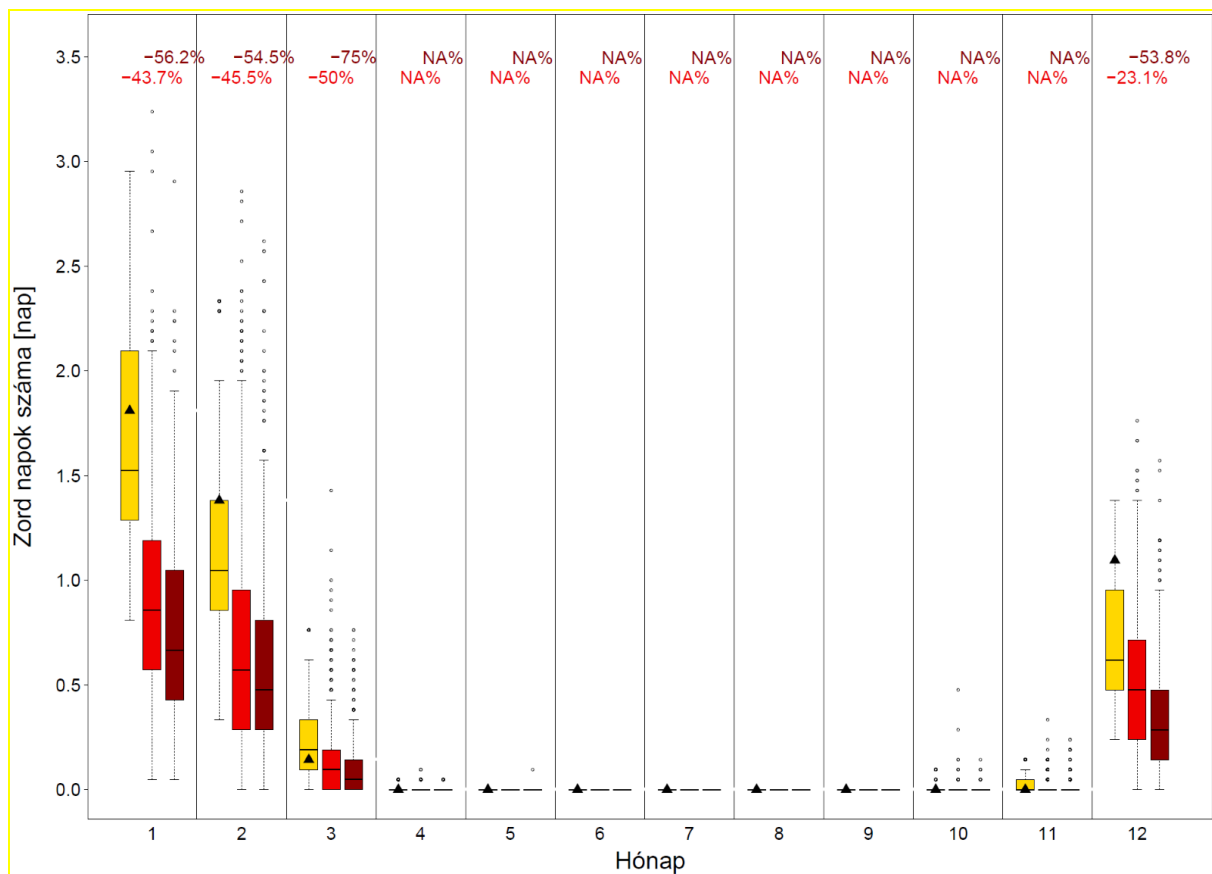
- TX30GE ($T_{\max} > 30 \text{ °C}$ [nap]) - Az olyan napok száma, amikor a napi maximális hőmérséklet nagyobb, mint a küszöbérték (Hőségnapok száma).
- TX35GE ($T_{\max} > 35 \text{ °C}$ [nap]) - Az olyan napok száma, amikor a napi maximális hőmérséklet nagyobb, mint a küszöbérték (Forró napok száma).
- TN20GT ($T_{\min} > 20 \text{ °C}$ [nap]) - Az olyan napok száma, amikor a napi minimális hőmérséklet kisebb, mint a küszöbérték (Túl meleg éjszakák száma).
- DTR ($T_{\max} - T_{\min}$ [°C]) -Napi hőingás.
- TN-10LT ($T_{\min} < -10 \text{ °C}$ [nap]) - Az olyan napok száma, amikor a napi minimális hőmérséklet kisebb, mint a küszöbérték (Zord napok száma).
- FD ($T_{\min} < 0 \text{ °C}$ [nap]) - Az olyan napok száma, amikor a napi minimális hőmérséklet kisebb, mint a küszöbérték (Fagyos napok száma).
- TX0LT ($T_{\max} < 0 \text{ °C}$ [nap]) - Az olyan napok száma, amikor a napi maximális hőmérséklet kisebb, mint a küszöbérték (Téli napok száma)

Az alábbi tendenciákat figyeltük meg az extrém napi indexek esetén:

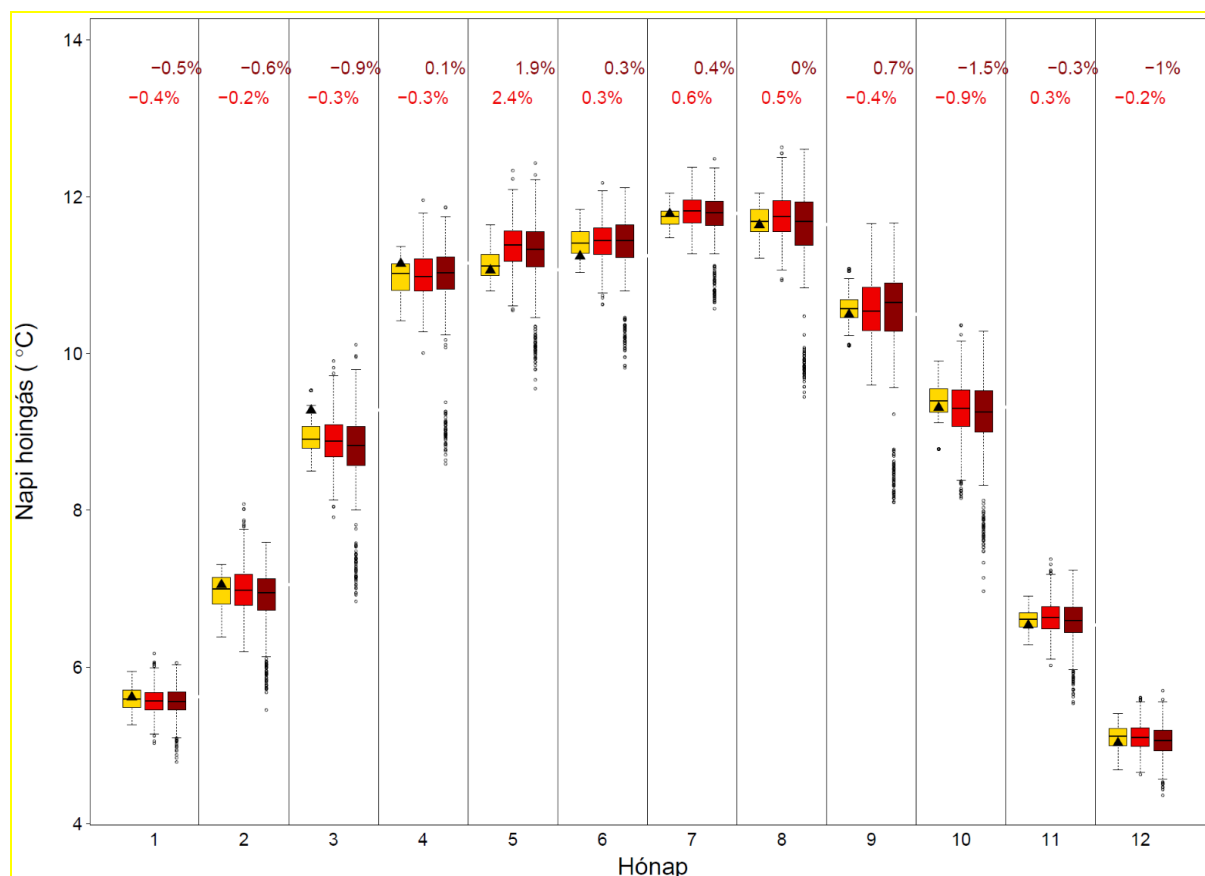
- Az SU és a TX30GE indexek, amelyek a meleg és forró napok számának változására utalnak jellemzően áprilistól-októberig 10-100%-os növekedést mutatnak.
- Az igazán forró napok (TX35GE) száma májustól-szeptemberig 10-100%-os növekedést mutat.
- A túl meleg éjszakák száma is várhatóan növekedni fog májustól-szeptemberig 10-50 %-kal.
- A távolabbi időtávon (2050-2070) a négy felmelegedésre utaló index további növekedése várható.
- Ezzel párhuzamosan csökken a téli, a fagyos és a zord napok száma jellemzően a márciustól-novemberig terjedő időszakokban.
- A napi hőingások értékében nincs jelentős változás, minden esetben 1% alatti, és jellemzően a májustól-júniusig terjedő időszakban mutat növekedést, a többi hónapban csökken.



11. ábra – Az éves átlagos forró napok számának (TX35GE) jövőben várható változása a 44527 állomás esetén. Fekete háromszög – mért idősből számolt érték (=valódi jelen), Sárga boxplot – jelenre generált értékek, Piros boxplot – közelebbi időtávra generált értékek (~2030-2050), Bordó boxplot - távolabbi időtávra generált értékek (~2050-2070). A százalékok a jelen és jövő generált értékeire számolt mediánok eltérését, vagyis az átlagosan becsült változás irányát mutatják.



12. ábra – Az éves átlagos zord napok számának (TN-10LT) jövőben várható változása a 44527 állomás esetén. Fekete háromszög – mért idősből számolt érték (=valódi jelen), Sárga boxplot – jelenre generált értékek, Piros boxplot – közelebbi időtávra generált értékek (~2030-2050), Bordó boxplot - távolabbi időtávra generált értékek (~2050-2070). A százalékok a jelen és jövő generált értékeire számolt mediánok eltérését, vagyis az átlagosan becsült változás irányát mutatják.



13. ábra – Az éves átlagos napi hőingás mértékének (DTR) jövőben várható változása a 44527 állomás esetén. Fekete háromszög – mért idősből számolt érték (=valódi jelen), Sárga boxplot – jelenre generált értékek, Piros boxplot – közelebbi időtávra generált értékek (~2030-2050), Bordó boxplot - távolabbi időtávra generált értékek (~2050-2070). A százalékok a jelen és jövő generált értékeire számolt mediánok eltérését, vagyis az átlagosan becsült változás irányát mutatják.

3.2.3 SZÉLSEBESSÉG NAPI ÁTLAGA ELŐREJELZÉSEK

A szélsőségek esetén az adatok rendelkezésre állásának függvényében 3 budapesti állomásra készültek generált idősorok (44527,44121,44505). A szélsőségek napi átlagai közül az 50 és 99 percentilishez tartozó értékeket vizsgáltuk hónaponként. Jelentős változás egyik hónapban sem várható, maximum 1-6%-os csökkenés vagy növekedés. Jellemzően a téli hónapokban növekszik majd az átlagos napi szélsőség.

3.2.4 NAPI GLOBÁLSUGÁRZÁS ELŐREJELZÉSEK

A napi globálisugárzás esetén az adatok rendelkezésre állásának függvényében 1 budapesti állomásra készültek generált idősorok (44527). A napi globálisugárzások közül az 50 és 99 percentilishez tartozó értékeket vizsgáltuk hónaponként. A májustól-szeptemberig kismértékű (1-2%) növekedés figyelhető meg, míg a többi időszakban kismértékű csökkenés.

3.2.5 RELATÍV NEDVESSÉGTARTALOM ELŐREJELZÉSEK

A relatív nedvesség napi átlaga esetén az adatok rendelkezésre állásának függvényében mind a 4 budapesti állomásra készültek generált idősorok. A relatív nedvesség napi átlagai közül az 50 és 99 percentilishez tartozó értékeket vizsgáltuk hónaponként. Jelentős változás egyik hónapban sem figyelhető meg.

4 A BUDAPESTEN VÁRHATÓ ÉGHAJLATI VÁLTOZÁSOK ÖSSZEGZÉSE

A következő évtizedekben várhatóan még szélsőségesebbé válik Budapest éghajlata. Az összefoglaló a regionális klímamodellek vizsgálata alapján becsült változások medián értékeiből levonható következtetéseket mutatja be. Természetesen a szélsőségesebb előrejelzések bekövetkezése is ugyanolyan valószínűséggel fordulhat elő a jövőben, mint az átlaghoz közeli, ezért a tervezésnél érdemes ezeket is számításba venni.

Budapesten az évente átlagosan lehulló csapadékösszeg kismértékű növekedése várható, míg az egyes hónapok között nem egyenletes a változás. A nyári hónapok többségében és májusban csökken, míg a többi hónapban növekszik a csapadék mennyisége. Az extrém csapadékiintenzitások gyakoribbá válása is jellemző. A napi indexeket tekintve a nyári periódust leszámítva minden hónapban intenzitásnövekedéssel kell számolni. Az összes hónapban jellemzően hosszabb száraz időszakok fognak jelentkezni egy-egy csapadékesemény között. A csapadékvíz-elvezető rendszerek terhelése nagymértékben növekedhet az intenzívebb csapadékok következtében. A vízgyűjtőn történő, csapadékvíz-visszatartásra szolgáló beavatkozások nélkül a lokális vízháztartási mérleg további romlása várható.

A felmelegedés folytatódni fog, amely leginkább a korábban hidegnek tekinthető téli hónapokban jelentkezik intenzíven. A városban élőknek több extrém meleg nappal kell számolniuk a nyári időszak környékén.

A csapadékvíz-gazdálkodási szempontokat tekintve egyre nagyobb hangsúlyt kell fektetni a vízgyűjtőkön olyan tározótér kialakítására, melyekkel növelhető a csapadékvíz talajba szivárgása és párolgása, és mérsékelhető a felszíni lefolyás mértéke, ezáltal kedvezőbbé téve a helyi mikroklímát és a hidrológiai ciklust. Tározók alkalmazásával lehetőség nyílik az egyenletlen csapadékhullás (intenzív csapadék, majd hosszú száraz időszak az egyes események között) bizonyos mértékű kiegyenlítésére, és a fellépő vízigények részleges/teljes mértékű kielégítésére csapadékvízből.

5 IRODALOMJEGYZÉK

Cowpertwait, P. S. P. (1991) Further developments of the Neyman-Scott clustered point process for modeling rainfall, *Water Resour. Res.*, 27, 1431– 1438.

Cowpertwait, P. S. P. (1994) A generalized point process model for rainfall, *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 447, 23– 37.

Kilsby, C.G., Jones, P.D., Burton, A., Ford, A.C., Fowler, H.J., Harpham, C., James, P., Smith, A., Wilby, R.L. (2007) A daily weather generator for use in climate change studies., 22(12), 1705–1719. doi:10.1016/j.envsoft.2007.02.005.

Molnar, P., Burlando, P. (2005). Preservation of rainfall properties in stochastic disaggregation by a simple random cascade model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 485-506.

Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, van Vuuren DP, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T, Meehl GA, Mitchell JFB, Nakicenovic N, Riahi K, Smith SJ, Stouffer RJ, Thomson AM, Weyant JP, Wilbanks TJ (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463:747–756. doi:[10.1038/nature08823](https://doi.org/10.1038/nature08823)

van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, Hurtt GC, Kram T, Krey V, Lamarque J-F, Matsui T, Meinshausen M, Nakicenovic N, Smith SJ, Rose SK (2011)

Representative concentration pathways: an overview. Climatic Change 109:5–31.
doi:[10.1007/s10584-011-0148-z](https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z) .