

A Balaton vízforgalmának a klímaváltozás hatására becsült változása

Kutatási jelentés

Szerzők:

Nováky Béla — Varga György — Homolya Emese —
Szépszó Gabriella — Csorvási Anett



NAK NEMZETI ALKALMAZKODÁSI KÖZPONT
Magyar Földtani és Geofizikai Intézet

2016. január 15.



TARTALOM

ÁBRAJEGYZÉK.....	3
TÁBLÁZATJEGYZÉK	5
VEZETŐI ÖSSZEFOGLALÓ	7
BEVEZETÉS.....	12
1 A Balaton vizsgálatba vont vízháztartási tényezőinek jellemzése.....	13
1.1. A tó zárt vízmérlegei alapján rendelkezésre álló — a 1921–2014 időszakra vonatkozó csapadék-, hozzáfolyás- és párolgás-idősorok jellemzői	13
1.2. A természetes vízkészlet-változás — a tó vízforgalmát leíró integrált mutatószám — értelmezése és jellemzése (tendenciák, periodicitás, stacionaritás).....	15
1.3. Az évi éghajlati elemek és a természetes vízkészlet-változás kapcsolatának jellemzése	19
2 A Balaton évi vízmérlegére eddig elvégzett éghajlati hatásvizsgálatok összefoglalása	22
2.1. Történeti áttekintés	22
2.2. A hatásvizsgálatok rövid bemutatása és összefoglaló értékelése	24
2.2.1. Az egyes hatásvizsgálatok eredményei.....	24
2.2.2. A hatásvizsgálatok összefoglaló értékelése	27
3 Az OMSZ ALADIN-Climate és CARPATCLIM-Hu (cc) modelladatainak köre és használata	29
3.1. A Balaton-vízgyűjtőre érkező csapadék területi átlagának számítása a klímaablakokra	31
3.2. A Balaton vízfelületére érkező csapadék területi átlagának számítása a klímaablakokra	33
3.3. A Balaton-vízgyűjtő évi középhőmérséklete területi átlagainak számítása a klímaablakokra	36
3.4 A Balaton-vízgyűjtő évi tényleges párolgása időszakos területi átlagainak számítása a klímaablakokra	39
3.5. A Balaton vízgyűjtő területéről történő évi lefolyás (a Balaton vízháztartásban a hozzáfolyás) időszakos átlagértékeinek számítása a klímaablakokra	41
3.6. A Balaton vízfelületéről történő párolgás időszakos összegeinek átlagainak számítása a klímaablakokra	42
3.6.1. A Balaton vízfelülete feletti léghőmérséklet területi átlagainak számítása a klímaablakokra.....	42
3.6.2. A Balaton vízfelülete feletti relatív nedvesség területi átlagainak számítása a klímaablakokra..	44
3.6.3. A Balaton vízfelülete feletti szélsősebesség területi átlagainak számítása a klímaablakokra	47
3.6.4. A Balaton párolgásának számítása a klímaablakokra	50
3.7. A Balaton évi természetes vízkészlet-változásának számítása a klímaablakokra	54
4 A Balaton vízforgalmában a viszonyítási időszakhoz (1961–1990) képest a 21. századi két klímaablakban (2021–2050 és 2071–2100) várható változások összefoglaló értékelése és összevetése korábbi hasonló céllal készült eredményeivel	57
5 Javaslat a tanulmány felhasználásra	60
5.1. Javaslat a várható vízforgalmi változásokat leíró adatok felhasználhatóságára	60
5.2. Javaslat a várható célközönség meghatározására, valamint laikus és szakmai érdeklődőknek adandó információk körére, módjára, felhasználási feltételeire és korlátaira	61
5.3. Javaslat a esetleges adathiányból fakadó problémák megoldására, módszertani fejlesztési lehetőségekre	62
6 Irodalom.....	63
7 F Ü G G E L É K.....	65

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra. A Balaton felületére hulló csapadék évi területi átlagértékei
2. ábra. A Balaton évi hozzáfolyása
3. ábra. A Balaton évi párolgása
4. ábra. A Balaton évi természetes vízkészlet-változása
5. ábra. Az évi természetes vízkészlet-változás eloszlásfüggvényei az 1980-2009 (zöld színnel jelölve) és az 1921-1990 (kék színnel jelölve a 70%-os és a 95%-os megbízhatósági sávokkal)
6. ábra. Az évi lefolyási tényező változása a Balaton-vízgyűjtőn 1921-2014 között
7. ábra. A vízgyűjtő tárolt vízmennyisége a Kis-Balaton és a halastavak párolgása nélkül (világoskék), illetve a többletpárolgás figyelembe vételével (sötétkék)
8. ábra. A vízgyűjtőben tárolt vízmennyiség kapcsolata a lefolyási tényezővel
9. ábra. Az évi természetes vízkészlet-változás vízmérlegből számított és modellezett idősorai
10. ábra. Az évi természetes vízkészlet-változás és az ariditási mutató kapcsolata
11. ábra. A tó természetes vízkészlet-változása különböző éghajlati forgatókönyveket figyelembe véve
12. ábra. A természetes vízkészlet-változás csökkenése az éghajlati ariditási index függvényében
13. ábra. A Balaton-vízgyűjtőjére érkező csapadék 30 éves területi átlagának havi, félévi és évi tény (1961–1990 időszakra) és becsült (2021–2050 és 2071–2100 időszakra) értékei (mm)
14. ábra. A Balaton-vízgyűjtőjére érkező csapadék 30 éves területi átlaga (mm) és az attól való abszolút eltérések a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (mm)
15. ábra. A Balaton-vízgyűjtőjére érkező csapadék 30 éves területi átlaga (mm) és az attól való relatív eltérések a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (%)
16. ábra. A Balaton vízfelületére érkező csapadék 30 éves területi átlagának havi, félévi és évi tény (1961–1990 időszakra) és becsült (2021–2050 és 2071–2100 időszakra) értékei (mm)
17. ábra. A Balaton vízfelületére érkező csapadék 30 éves területi átlaga (mm) és az attól való abszolút eltérések a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (mm)
18. ábra. A Balaton vízfelületére érkező csapadék 30 éves területi átlaga (mm) és az attól való relatív eltérések a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (%)
19. ábra. A Balaton-vízgyűjtő évi középhőmérséklete 30 éves területi átlagának havi, félévi és évi tény (1961–1990 időszakra) és becsült (2021–2050 és 2071–2100 időszakra) értékei (°C)
20. ábra. A Balaton-vízgyűjtő havi, félévi és évi középhőmérsékletének a referencia időszak átlagától való abszolút eltérései a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (°C)
21. ábra. A Balaton feletti légtér évi középhőmérséklete 30 éves területi átlagának havi, félévi és évi tény (1961–1990 időszakra) és becsült (2021–2050 és 2071–2100 időszakra) értékei (°C)
22. ábra. A Balaton feletti légtér havi, félévi és évi középhőmérsékletének a referencia időszak átlagától való abszolút eltérései a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (°C)
23. ábra. A Balaton feletti légtér relatív nedvessége 30 éves átlagának havi, félévi és évi tény (1961–1990 időszakra) és becsült (2021–2050 és 2071–2100 időszakra) értékei (%)
24. ábra. A Balaton feletti légtér havi, félévi és évi relatív nedvességének a referencia időszak átlagától való abszolút eltérései a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (%)
25. ábra. A Balaton feletti légtér havi, félévi és évi relatív nedvességének a referencia időszak átlagától való relatív eltérései a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (%)

-
26. ábra. A Balaton feletti légtér átlagos szélességének havi, félévi és évi tény (1961–1990 időszakra) és becsült (2021–2050 és 2071–2100 időszakra) értékei (m/s)
27. ábra. A Balaton feletti légtér havi, félévi és évi átlagos szélességének a referencia időszak átlagától való relatív eltérései a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (m/s)
28. ábra. A Balaton feletti légtér havi, félévi és évi átlagos szélességének a referencia időszak átlagától való relatív eltérései a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (%)
29. ábra. A Balaton párolgásának a klímaablakok havi, félévi és évi időszakaira számított átlagértékei (mm)
30. ábra. A Balaton párolgásának a jövőbeni klímaablakokra számított értékeinek abszolút eltérése a referencia időszak értékeitől (tómm)
31. ábra. A Balaton párolgásának a jövőbeni klímaablakokra számított értékeinek relatív eltérése a referencia időszak értékeitől (%)

TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat. A Balaton vízmérleg 1991–2012 közötti éghajlati hatásvizsgálatai
2. táblázat. A Balaton-vízgyűjtőjére érkező csapadék 30 éves területi átlagának havi, félévi és évi tény (1961–1990 időszakra) és becsült (2021–2050 és 2071–2100 időszakra) értékei (mm)
3. táblázat. A Balaton-vízgyűjtőjére érkező csapadék 30 éves területi átlaga (mm) és az attól való abszolút eltérések a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (mm)
4. táblázat. A Balaton-vízgyűjtőjére érkező csapadék 30 éves területi átlaga (mm) és az attól való relatív eltérések a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (%)
5. táblázat. A Balaton-vízgyűjtőre érkező tényleges és becsült évi csapadék (mm) klímaablakonkénti statisztikai jellemzői
6. táblázat. A Balaton vízfelületére érkező csapadék 30 éves területi átlagának havi, félévi és évi tény (1961–1990 időszakra) és becsült (2021–2050 és 2071–2100 időszakra) értékei (mm)
7. táblázat. A Balaton vízfelületére érkező csapadék 30 éves területi átlaga (mm) és az attól való abszolút eltérések a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (mm)
8. táblázat. A Balaton vízfelületére érkező csapadék 30 éves területi átlaga (mm) és az attól való relatív eltérések a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (%)
9. táblázat. A Balaton vízfelületére érkező tényleges és becsült évi csapadék (mm) klímaablakonkénti statisztikai jellemzői
10. táblázat. A Balaton-vízgyűjtő évi középhőmérséklete 30 éves területi átlagának havi, félévi és évi tény (1961–1990 időszakra) és becsült (2021–2050 és 2071–2100 időszakra) értékei (°C)
11. táblázat. A Balaton-vízgyűjtő havi, félévi és évi középhőmérsékletének 30 éves területi átlaga (°C) és az attól való abszolút eltérések a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (°C)
12. táblázat. A Balaton-vízgyűjtő évi középhőmérsékletének (°C) klímaablakonkénti statisztikai jellemzői
13. táblázat. A Balaton-vízgyűjtő tényleges párolgásának meghatározásához figyelembe vett erdőfedettségi és szabad vízfelület kiterjedés, valamint becsült többletpárolgás adatok
14. táblázat. A Balaton-vízgyűjtő évi tényleges párolgásának (mm/év) klímaablakonkénti statisztikai jellemzői
15. táblázat. A csapadék, a területi párolgás és a számított lefolyás alakulása a klímaablakok időszakos átlagában a Balaton vízgyűjtő területén (mm/év)
16. táblázat. A Balaton vízfelülete feletti légtér évi középhőmérséklet 30 éves területi átlagának havi, félévi és évi tény (1961–1990 időszakra) és becsült (2021–2050 és 2071–2100 időszakra) értékei (°C)
17. táblázat. A Balaton vízfelülete feletti légtér havi, félévi és évi középhőmérsékletének 30 éves területi átlaga (°C) és az attól való abszolút eltérések a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (°C)
18. táblázat. A Balaton vízfelülete feletti légtér évi középhőmérsékletének (°C) klímaablakonkénti statisztikai jellemzői
19. táblázat. A Balaton feletti légtér relatív nedvességtartalmának időszakos átlagértékei klímaablakonként (%)
20. táblázat. A Balaton feletti légtér relatív nedvességtartalmának a jövőbeni klímaablakokra számított értékeinek abszolút eltérése a referencia időszak értékeitől (%)
21. táblázat. A Balaton feletti légtér relatív nedvességtartalmának a jövőbeni klímaablakokra számított értékeinek relatív eltérése a referencia időszak értékeitől (%)

-
22. táblázat. A Balaton vízfelülete feletti légtér relatív nedvességének (%) klímaablakonkénti statisztikai jellemzői
23. táblázat. A Balaton feletti légtér szélességének időszakos átlagértékei klímaablakonként (m/s)
24. táblázat. A Balaton feletti légtér átlagos szélességének a jövőbeni klímaablakokra számított értékeinek abszolút eltérése a referencia időszak értékeitől (m/s)
25. táblázat. A Balaton feletti légtér átlagos szélességének a jövőbeni klímaablakokra számított értékeinek relatív eltérése a referencia időszak értékeitől (%)
26. táblázat. A Balaton vízfelülete feletti légtér szélességének (m/s) klímaablakonkénti statisztikai jellemzői
27. táblázat. A Balaton párolgásának a klímaablakok havi, félévi és évi időszakaira számított átlagértékei (tómm)
28. táblázat. A Balaton párolgásának a jövőbeni klímaablakokra számított értékeinek abszolút eltérése a referencia időszak értékeitől (tómm)
29. táblázat. A Balaton párolgásának a jövőbeni klímaablakokra számított értékeinek relatív eltérése a referencia időszak értékeitől (%)
30. táblázat. A Balaton párolgásának klímaablakonkénti statisztikai jellemzői (tómm)
31. táblázat. A Balaton természeti tényezők által meghatározott vízháztartási tényezőinek és az ezekből származtatott természetes vízkészlet-változás becsült évi átlagértékei (tómm/év)

VEZETŐI ÖSSZEFOGLALÓ

A Föld éghajlata az elmúlt másfél évszázadban megközelítőleg 1,0 °C-kal melegedett. Nagyon valószínű, hogy a melegedést részben az üvegházhatású gázok (szén-dioxid, dinitrogén-dioxid, metán) kibocsátásának az ipari forradalmat követően kezdődött és az utóbbi évtizedekben gyorsuló ütemű növekedése okozta (IPCC, 2007). A melegedés nem rendkívüli az éghajlat történetében, a jelenlegi antropogén eredete és minden korábbit meghaladó gyors üteme teszi azzá. Az üvegházhatású gázok kibocsátásának 21. századi folytatódásának ütemétől függően a globális hőmérséklet a század végéig 2–5 °C-kal emelkedhet.

Az éghajlatváltozás hidrológiai hatásainak elemzését többféle bizonytalanság terheli:

- a gazdasági–társadalmi fejlődés és a kibocsátás bizonytalanságai
- a globális klímamodellek bizonytalanságai
- a regionális klímamodellek bizonytalanságai
- a hidrológiai modellek bizonytalanságai

Hazai nagytavaink (Balaton, Velencei-tó, Fertő-tó, Tisza-tó) kivétel nélkül jellegzetes sekély tavak, átlagmélységük nem haladja meg az 5 m-t. A mérsékelt éghajlati öv sekély tavainak fontos jellemzője a környezeti (ezen belül az éghajlati) tényezők tér- és időbeli változásaira való nagyfokú mennyiségi és minőségi érzékenység.

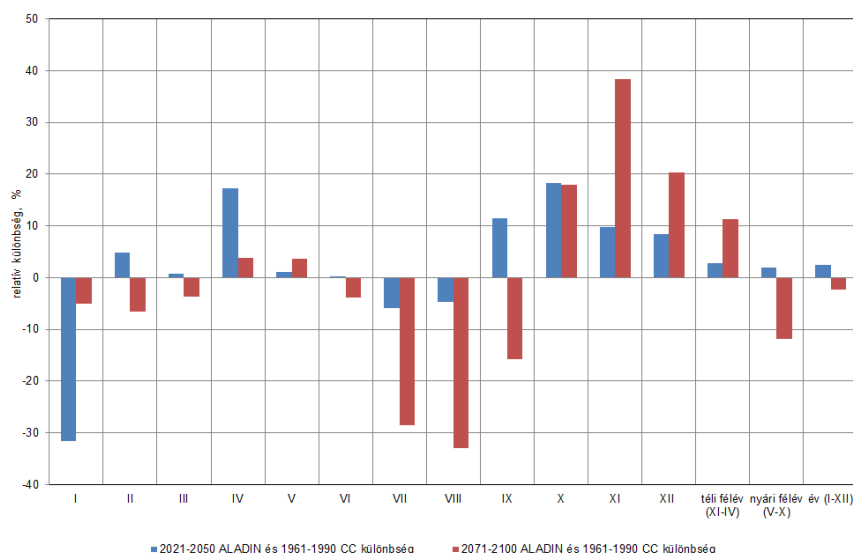
A mennyiségi érzékenység a tó vízháztartásának (jellemző vízforgalmának) alakulásában, ennek következményeként vízszintjének, vízkészletének és vízfelületének jellemzően egyirányú változásban nyilvánul meg.

A tanulmány legnagyobb tavunk, a Balaton vízforgalmának a klímaváltozás hatására becsült változásának irányával és mértékével foglalkozik.

A tanulmány a Balaton vízháztartási viszonyainak — a vízforgalmat meghatározó természeti tényezők (a csapadék, a hozzáfolyás és a párolgás algebrai összegeként értelmezett természetes vízkészlet-változás) — becsült változásait az Országos Meteorológiai Szolgálat az 1961–1990 referencia időszakra és a 2021–2050, valamint a 2071–2100 közötti 30 éves klímaablakokra vonatkozó ALADIN-Climate modellfuttatási eredményeire alapozott és elvégzett hidrológiai számítások eredményeit tartalmazza.

A 2021–2050 klímaablakra vonatkozó adatokat áttekintve megállapítható, hogy a tó vízgyűjtő területére hulló csapadék becsült alakulásában a referencia időszak átlagértékeihez viszonyítva félévi és évi időhorizonton számottevő mértékű ($\pm 10\%$ -t meghaladó) változás nem valószínűsíthető. Az egyes hónapokhoz tartozó relatív eltérések szerint áprilisban és a szeptember-november időszakban 10% -t meghaladó növekedés, ugyanakkor januárban 32% -os csökkenés mutatkozik.

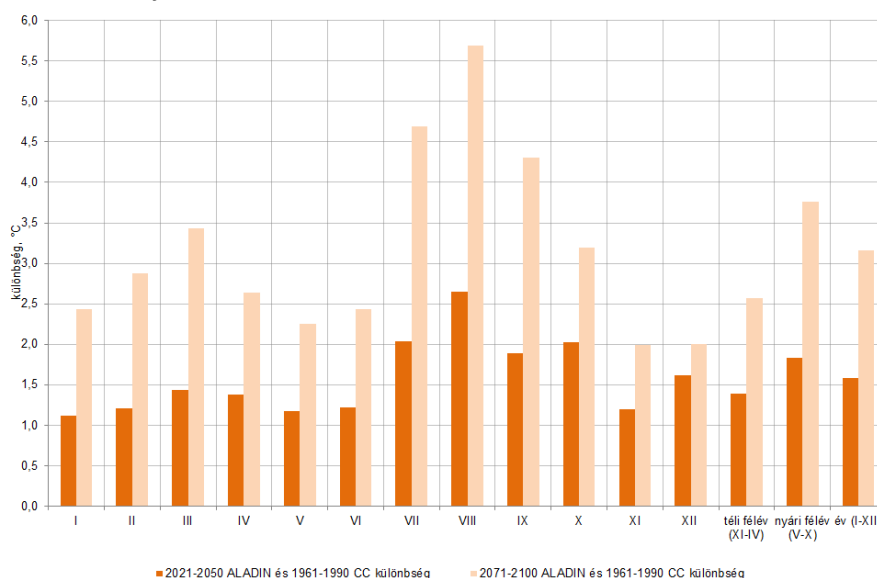
A 2071–2100 klímaablakra vonatkozó adatokat áttekintve megállapítható, hogy a tó vízgyűjtő területére hulló csapadék becsült alakulásában a referencia időszak átlagértékeihez viszonyítva évi időhorizonton számottevő mértékű ($\pm 10\%$ -t meghaladó) változás nem valószínűsíthető. Az évi csapadékösszeg időbeli átrendeződésére utal az az eredmény, hogy félévi időhorizonton a referencia időszak értékeihez képest nyáron 10% -ot meghaladó csökkenés, télen 10% -ot meghaladó növekedés mutatkozik. A nyári félévi becsült csapadékcsökkenés súlypontja a július-augusztus időszakra, a téli félévi csapadéknövekedés súlypontja pedig a november-december időszakra koncentrálódik.



A Balaton-vízgyűjtőre érkező csapadék 30 éves területi átlaga (mm) és az attól való relatív eltérések a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (%)

A 2021–2050 klímaablakra vonatkozó adatokat áttekintve megállapítható, hogy a Balaton-vízgyűjtő középhőmérsékletének alakulásában a referencia időszak átlagértékeihez viszonyítva félévi és évi időhorizonton számottevő mértékű (1 °C-t meghaladó) változás valószínűsíthető. A nagyobb mértékű melegedés (1,8 °C) a nyári félévre becsülhető. A naptári éven belül a legerőteljesebb hőmérséklet-emelkedés július-október időszakra koncentrálódik.

A 2071–2100 klímaablakra vonatkozó adatokat áttekintve megállapítható, hogy a Balaton-vízgyűjtő középhőmérsékletének alakulásában a referencia időszak átlagértékeihez viszonyítva félévi és évi időhorizonton számottevő mértékű (2 °C-t meghaladó) változás valószínűsíthető. A nagyobb mértékű melegedés (3,8 °C) a nyári félévre becsülhető. A naptári éven belül a legerőteljesebb hőmérséklet-emelkedés márciusra és a július-október időszakra koncentrálódik.



A Balaton-vízgyűjtő havi, félévi és évi középhőmérsékletének a referencia időszak átlagától való abszolút eltérései a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (°C)

A vízgyűjtőre érkező becsült átlagos évi csapadékmennyiség a referencia időszak átlagához képest a jövőbeni klímaablakok időszakos átlagában $\pm 2\%$ -ot nem meghaladó változást valószínűsít. Ez arra

utal, hogy a tényleges párolgás becsült növekedésének alapvetően nem a csapadékmennyiség változása az oka.

A tényleges magyarázat minden bizonnyal a becsült hőmérséklet-emelkedésben — az erőteljes melegedésben — keresendő. Az ALADIN-Climate modell a Balaton vízgyűjtő területén a referencia időszak átlagához képest 2021–2050 között átlagosan 1,6 °C-os, 2071–2100 között átlagosan 3,2 °C-os melegedést valószínűsít.

A jövőbeni klímaablakok időszakában a becslés szerint alig változó átlagos évi csapadékmennyiség mellett a párolgás jelentős mértékű emelkedése valószínűsíthető. Ez a vízgyűjtő területen a csapadék és tényleges párolgás különbségének csökkenését vetíti előre, ami a Balaton vízháztartása szempontjából jelentős hozzáfolyás-csökkenést eredményezhet.

A 30 éves klímaablakokon belül a negatív előjelű évi csapadék-párolgás különbséggel jellemezhető évek száma az alábbi képet adta:

- az 1961–1990 időszakban 1 év
- a 2021–2050 időszakban 6 év
- a 2071–2100 időszakban 13 év

Azokban az években, amikor a vízgyűjtő területen a csapadék-párolgás különbség negatív előjelű, akkor is van lefolyás, de ez túlnyomó részben felszín alatti vízkészletekből származik. A csapadékosabb évjáratokban a vízgyűjtő területre érkező csapadék eleinte ezeket a hiányzó felszín alatti készleteket pótolja és csak ennek megtörténte után várható a felszíni lefolyás megjelenése.

Tekintve, hogy a felszíni alatti vízkészletek vízforgalma és ennek részeként regenerálódása a felszíni vízkészletekhez képest lényegesen lassabban megy végbe, a felszín alatti készleteket érintő változások hatása — mint áthúzódó hatás — több egymást követő évre is kiterjedhet.

A 2021–2050 klímaablakra vonatkozó adatokat áttekintve megállapítható, hogy a Balaton párolgásának alakulásában a referencia időszak átlagértékeihez viszonyítva félévi és évi időhorizonton számottevő mértékű (10%-ot meghaladó) változás valószínűsíthető. Havi szinten 15% feletti eltérés július-szeptember időszakban állapítható meg.

A 2071–2100 klímaablakra vonatkozó adatokat áttekintve megállapítható, hogy a Balaton párolgásának alakulásában a referencia időszak átlagértékeihez viszonyítva nyári félévi és évi időhorizonton számottevő mértékű (40%-ot meghaladó növekedés!) változás valószínűsíthető. Havi szinten referencia időszakhoz képest a legnagyobb eltérések (57–73%!) a július–szeptember időszakban mutatkoztak.

A Balaton párolgásának becsült nagymértékű növekedése lényegében azzal magyarázható, hogy a melegedéssel a magasabb léghőmérséklethez magasabb telítési párányomás érték tartozik, ugyanakkor a klímamodell mindkét jövőbeni klímaablakra (azon belül a nyári félévi időszakra) csökkenő relatív nedvességet valószínűsít. Ez együttesen azt jelenti, hogy a levegő telítési hiányának — a telítési és a tényleges párányomás különbsége — erőteljes növekedése valószínűsíthető. A telítési hiányt a Balaton párolgásának számítására alkalmazott empirikus formula tartalmazza, arra kiemelten érzékeny.

A Balaton vízháztartásán a természetes vízkészlet-változás azon vízháztartási tényezők algebrai összegét értjük, amik térbeli és időbeli alakulása csak természeti tényezők által meghatározott. Ezek: a tó felületére hulló csapadék, a tóhoz történő hozzáfolyás és a tó felületéről történő párolgás.

Az elvégzett számítások szerint a 30 éves klímaablakokon belül a negatív előjelű évi természetes vízkészlet-változással jellemezhető évek száma az alábbi képet adta:

- az 1961–1990 időszakban 7 év

- a 2021–2050 időszakban 9 év
- a 2071–2100 időszakban 19 év

Az ALADIN-Climate modell jövőbeni klímaablakokra vonatkozó becslései szerint a Balaton vízgyűjtő területén jelentős éghajlatváltozás következhet be a 2021–2050 és a 2071–2100 időszakban a viszonyítási időszakban (1961–1990) mért éghajlati adatokhoz képest. A legmarkánsabb és leghatározottabb változás a hőmérséklet becsült emelkedésben mutatkozik meg. A hőmérséklet emelkedése több többletenergiát szolgáltat a párolgás számára, aminek következtében a vízgyűjtő területen és a szabad vízfelületen egyaránt a párolgás növekedése valószínűsíthető. A vízgyűjtő területen a területi párolgás (az evaporáció és a transzspiráció együttes folyamata) növekedése valószínűsíthető, még akkor is, ha a párolgás számára hozzáférhető vízkészlet jellemzően korlátos. A növekvő területi párolgás miatt megváltozik a vízgyűjtő vízháztartási képe, ami a párolgásnövekedés következményeként jelentős lefolyáscsökkenést eredményez.

A lefolyáscsökkenés a Balaton vízmérlegének bevételi oldalán hiányt okoz és a vízháztartás deficiteségét erősíti.

A párolgás növekedése még erőteljesebben mutatkozik meg a korlátlan vízellátottságú szabad vízfelületen. A vízháztartási mérleg kiadási oldalának súlya nő, a vízmérleg alakulását a kiadási oldal határozza meg.

Összességében a Balaton vízháztartásában a bevételi oldal csökkenése és a kiadási oldal növekedése valószínűsíthető. Ez a kettős hatás a referencia időszak átlagos viszonyaihoz képest — különösen a második jövőbeli klímaablak időszakában (2071–2100) — alapvetően megváltoztatja a tó hidrológiai képét. A tó vízcseré-aktivitása jelentősen romlik, gyakrabban és tartósabban fordulnak elő lefolyástalan időszakok, sőt a 21. század utolsó évtizedeiben a Balaton gyakorlatilag lefolyástalan tóvá változhat.

Nem hagyható figyelmen kívül az a tény sem, hogy a tartósan deficites vízháztartási helyzet miatt a tó fokozatosan új hidrológiai egyensúlyi állapot felé mozdul el. Ez a vízszintcsökkenés mellett felületcsökkenést is jelent. Ennek a változásnak a következtében a vízmérleg-elemek szélsőségei mérséklődhetnek, ugyanakkor a tó hasznosításával kapcsolatos igények fenntartható kielégítése napjainkban ismert tartalmában és formájában nem lesz lehetséges.

Az éghajlat várható változásának becslése — ezen belül az egyes éghajlati elemek értékeinek becsült alakulása — hibákkal, bizonytalanságokkal terhelt, amik elkerülhetetlenül — a hidrológiai számítások módszertanában meglévő hibák, bizonytalanságok és általánosítások mellett — erősítik a hidrológiai számítási eredmények bizonytalanságát.

A Balaton természeti tényezők által meghatározott vízháztartási tényezőinek és az ezekből származtatott természetes vízkészlet-változás becsült évi átlagértékei (tómm/év)

Időszak	Csapadék	Hozzáfolyás	Párolgás	Természetes vízkészlet-változás
1961–1990 CC	609	1001	807	803
2021–2050 ALADIN	631	725	926	430
2071–2100 ALADIN	602	224	1137	–311

Megjegyzés: 1 tómm ~ 600000 m3 vízmennyiségnek felel meg

A teljes vízforgalom alakulásában — ami végeredményben összegzetten a vízállás változásában mutatkozik meg — a természeti tényezők szerepe mellett nem hagyható figyelmen kívül az antropogén hatás.

Ezen hatások közül a legfontosabbak a következők.

A Balaton alulról szabályozott tó, ami azt jelenti, hogy lefolyása a Sión keresztül szabályozottan történik. A vízszint-szabályozás elvei és gyakorlata a tó vízjárásához igazodik, ennek jövőbeli módosulásai nem ismertek. Napjainkban a medertározás növelésével (a vízszint-szabályozási sáv felső határának 5-10 cm-es emelésével) igyekeznek a negatív vízháztartási szélsőségek következtében kialakuló kisvizek szintjét emelni. Ez jó megoldás, ugyanakkor kérdés az, hogy ez a megoldás több évtizedes időtávlatban elegendőnek bizonyul-e a fenntartható tóhasználat igényeinek kielégítésre. Jelen tanulmány eredményei szerint erre a kérdésre a válasz egyértelműen nemleges.

A vízgyűjtő területen létező és a tavat közvetlenül érintő vízhasználatok (vízkivételek, vízbevezetések a vízrendszerben) is hatással vannak a vízforgalomra. Ugyancsak tekintettel kell lenni a vízgyűjtő területhasználatára, annak természetes és emberi hatásra történő változásaira (erdősültség, művelési ágak és módszerek változása, a lefolyás szabályozása, szabad vízfelületek kiterjedésének változása stb.)

A felsorolt antropogén tényezők hosszú távú (6–8 évtizedre előretekintő) alakulását gyakorlatilag lehetetlen megbecsülni. Ez a tény további bizonytalansággal terheli a „vízügyi szektor” eredményeit, egyúttal azok felhasználásával kapcsolatban nagyfokú óvatosságra és a bizonytalanságok kiemelésére hívja fel a figyelmet.

BEVEZETÉS

A Föld éghajlata az elmúlt másfél évszázadban megközelítőleg 1,0 °C-kal melegedett. Nagyon valószínű, hogy a melegedést részben az üvegházhatású gázok (szén-dioxid, dinitrogén-dioxid, metán) kibocsátásának az ipari forradalmat követően kezdődött és az utóbbi évtizedekben gyorsuló ütemű növekedése okozta (IPCC 2007). A melegedés nem rendkívüli az éghajlat történetében, a jelenlegi antropogén eredete és minden korábbi meghaladó gyors üteme teszi azzá. Az üvegházhatású gázok kibocsátásának 21. századi folytatódásának ütemétől függően a globális hőmérséklet a század végéig 2-5 °C-kal emelkedhet.

Az éghajlatváltozás hidrológiai hatásainak elemzését többféle bizonytalanság terheli:

- a gazdasági-társadalmi fejlődés és a kibocsátás bizonytalanságai
- a globális klímamodellek bizonytalanságai
- a regionális klímamodellek bizonytalanságai
- a hidrológiai modellek bizonytalanságai

A modellezés bizonytalanságai a tér- és időbeli lépték csökkenésének irányában növekednek és akkor a legnagyobbak, ha szélsőségek előrejelzésére irányulnak.

Több évtizedes múltbeli hidrológiai mérések, feldolgozások és vízmérleg-szemléletű értékelések eredményei alapján ismeretes, hogy vizeink — vízfajtatól függően — érzékenyek a környezet és ezen belül kiemelten az éghajlati elemek időbeli és térbeli változásaira. Ez különösen a csapadék és a léghőmérséklet esetében állapítható meg.

Hazai nagytavaink (Balaton, Velencei-tó, Fertő-tó, Tisza-tó) kivétel nélkül jellegzetes sekély tavak, átlagmélységük nem haladja meg az 5 m-t. A mérsékelt éghajlati öv sekély tavainak fontos jellemzője a környezeti (ezen belül az éghajlati) tényezők tér- és időbeli változásaira való nagyfokú mennyiségi és minőségi érzékenység.

A mennyiségi érzékenység a tó vízháztartásának (jellemző vízforgalmának) alakulásában, ennek következményeként vízszintjének, vízkészletének és vízfelületének jellemzően egyirányú változásában nyilvánul meg.

Jelen tanulmány legnagyobb tavunk, a Balaton vízforgalmának a klímaváltozás hatására becsült változásának irányával és mértékével foglalkozik.

A tanulmányban a Balaton vízháztartási viszonyainak — a vízforgalmat meghatározó természeti tényezők (a csapadék, a hozzáfolyás és a párolgás algebrai összegeként értelmezett természetes vízkészlet-változás) — becsült változásait az Országos Meteorológiai Szolgálat az 1961–1990 referencia időszakra és a 2021–2050, valamint a 2071–2100 közötti 30 éves klímaablakokra vonatkozó ALADIN-Climate modellfuttatási eredményeire alapozott és elvégzett hidrológiai számítások eredményei alapján mutatjuk be.

Jelen tanulmányt a VITUKI Hungary Kft. készítette a Magyar Földtani és Geofizikai Intézet (MFGI) részére, az EEA-C11-1 NATÉR Projekt keretében.

1 A BALATON VIZSGÁLATBA VONT VÍZHÁZTARTÁSI TÉNYEZŐINEK JELLEMZÉSE

A tó vízháztartásának fontos jellemzője a természetes vízkészlet-változás, a tó adott időszakra vonatkozó természetes vízbevitelének és vízkiadásának különbsége. A vízbevitel a tó felületére hulló csapadék (P) és a tó vízgyűjtőjéről érkező hozzáfolyás (R_{vg}) a vízgyűjtő (F) és a tófelület (f) F/f arányában tófelületre átszámított értékének (R_H) összege, a vízkiadás a vízfelületi párolgás (E_w).

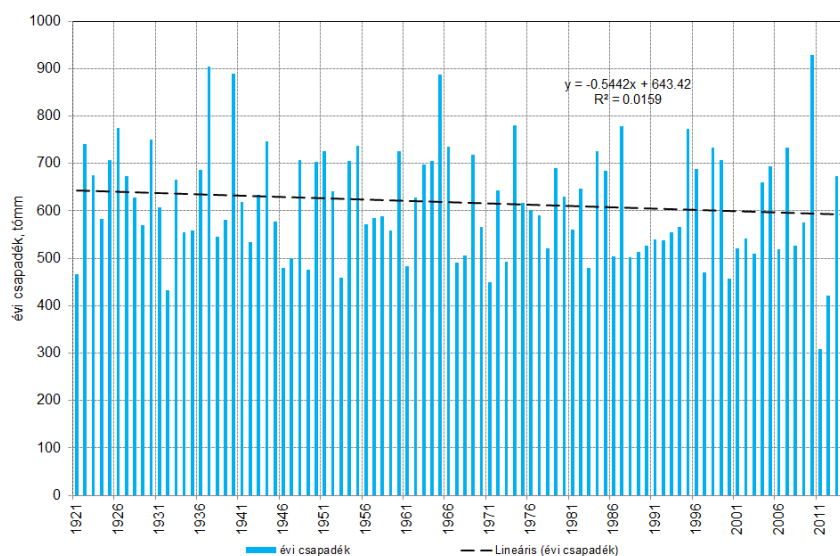
A természetes vízkészlet-változás számítása a

$$\Delta S_T = P + R_{vg}(F/f - 1) - E_w \quad (1)$$

képlet alapján történhet. A természetes vízkészlet-változás értéke függ a tófelület mindenkori nagyságától. A tófelület a tó vízjárására jellemző 40 cm és 120 cm vízállás tartományában csak kismértékben, 590 és 610 km² értékek között változik (OVH 1968), ennek megfelelően az F/f szorzótényező értéke 8,79 és 8,47 közötti értéket vehet fel. A természetes vízkészlet-változás (1) egyenlet szerinti számításánál az F/f értékét 8,70 értékben fogadják el, ami nagyjából (-2) — 1 % közötti, elhanyagolható mértékű relatív hibát eredményez a hozzáfolyás tófelületre való átszámításában.

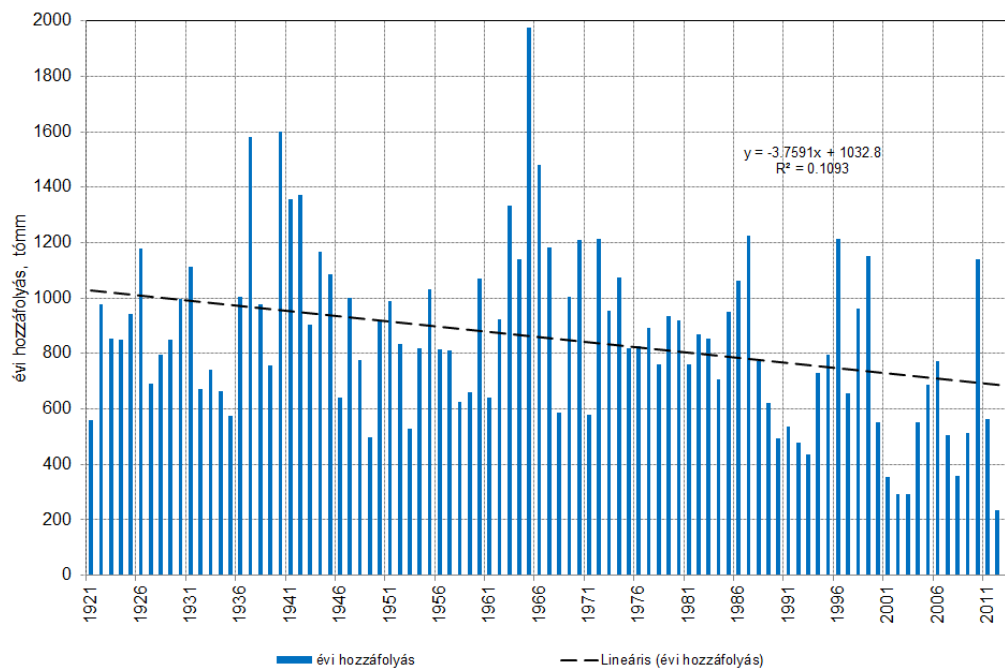
1. 1. A tó zárt vízmérlegei alapján rendelkezésre álló — a 1921–2014 időszakra vonatkozó csapadék-, hozzáfolyás- és párolgás-idősorok jellemzői

A tó felületére érkező csapadék (1. ábra) számítása 1970-ig a tó közvetlen vízparti területén elhelyezkedő állomások adatainak számtani, 1971-től a Thiessen-módszer szerinti súlyozott átlagolásával történt. A figyelembe vett állomások száma 1970-ig 12 volt, számuk 1971-től előbb 25-re nőtt, később 19-re, majd ismét 12-re csökkent. A figyelembe vett állomások számának csökkenése a területileg átlagolt csapadék nagyságát érdemben nem érintette (VARGA 2011).



1. ábra. A Balaton felületére hulló csapadék évi területi átlagértékei

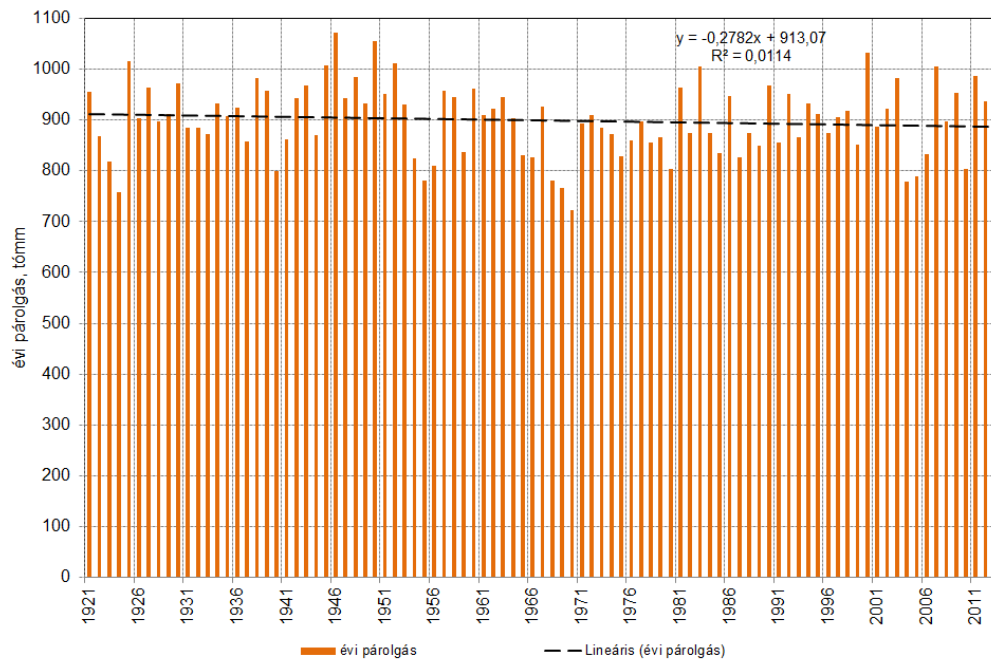
A hozzáfolyás (2. ábra) számításának problémája, hogy a lefolyás mérése csak a felszíni vízfolyásokra, azoknak is csak egy részére terjed ki, és jószereivel hiányzik a Balatonba kerülő közvetlen lefolyásra, és a felszín alatti táplálásra. A teljes vízgyűjtő vízhozam mérésekkel lefedett hányada az 1970-es években mintegy kétharmadot, az 1980-as évek közepén 80%-ot tett ki, a Zala vízgyűjtő teljes lefedettsége mellett az északi vízgyűjtőnek csupán 60%-át (BRATÁN 1988). A vízhozam mérések száma is eltérően alakult. Leginkább teljesnek a tó legnagyobb hozzáfolyását adó Zala vízhozam mérései tekinthetők, ahol 1975 közepétől állnak rendelkezésre folyamatos napi vízhozam adatok. Napjainkra a vízhozamméréssel folyamatosan ellenőrzött terület aránya a vízgyűjtőn 90% felett van. A mérésekkel le nem fedett vízgyűjtők hozzáfolyását az analógia időben változó módszerével számították (VIRÁG 1997).



2. ábra. A Balaton évi hozzáfolyása

A vízfelületi párolgást (3. ábra) meteorológiai állomások méréseiből (léghőmérséklet, a telítési és a tényleges párányomás különbségeként számított telítési hiány, szélesebesség) számítással határozták meg. A számításhoz 1921–1974 között a Meyer-képletet, 1974–1986 között az Országos Meteorológiai Szolgálat Központi Légtörfizikai Intézete és a VITUKI által több éven át folytatott kísérleti mérései alapján szerkesztett ún. Antal-képletet (ANTAL et al. 1971), 1986-tól annak pontosított változatát használták (VARGA 2011).

A számításba vont meteorológiai állomások száma az időszak folyamán több ízben változott. Az 1931–1970. időszakra végzett összehasonlító vizsgálat azt mutatta, hogy az empirikus képlet az átlagos évi párolgásra alacsonyabb értéket ad, mint a Meyer-képlet.



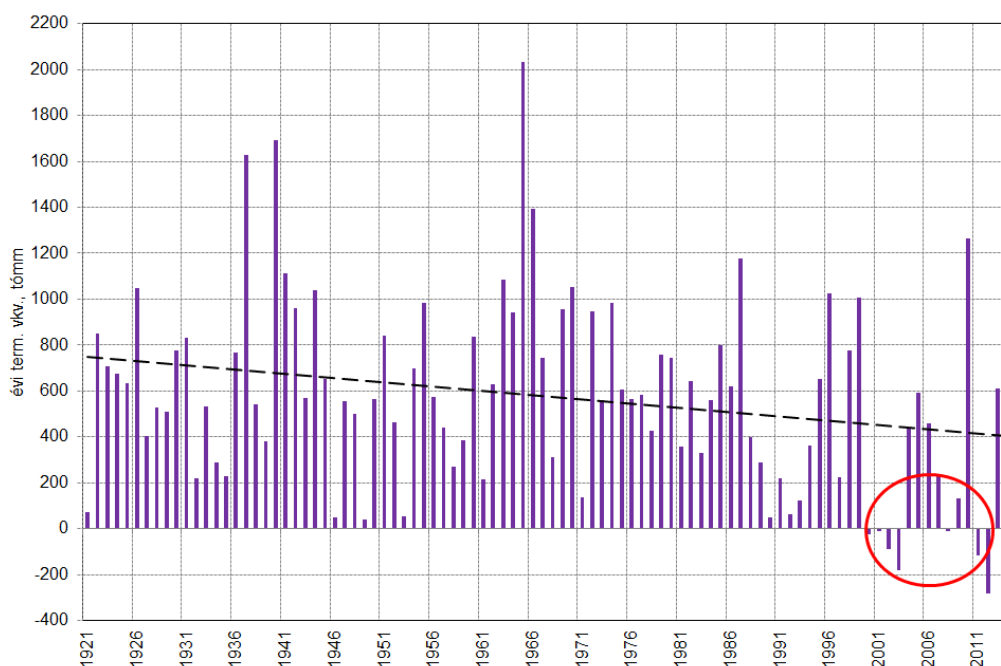
3. ábra. A Balaton évi párolgása

A vizsgált időszakban a tóra hulló csapadék némileg csökkent, üteme mintegy 6 mm/évtized, azaz 1%/évtized. Lényegesen nagyobb ütemben csökkent a vízgyűjtő hozzáfolyása, amelynek mértéke mintegy 33 mm/évtized, azaz 3%/évtized. Ez az érték a vízgyűjtőn nagyjából 3,8 mm/évtized ütemnek felel meg.

A tóra hulló csapadék és a hozzáfolyás együttesen mintegy 39 mm/évtized ütemmel csökkent, aminek nagyobb részét, 85%-át a hozzáfolyás fogyatkozása váltotta ki. A tó párolgás kismértékben csökkent, üteme mintegy 3 mm/évtized értékre tehető.

1.2. A természetes vízkészlet-változás — a tó vízforgalmát leíró integrált mutatószám — értelmezése és jellemzése (tendenciák, periodicitás, stacionaritás)

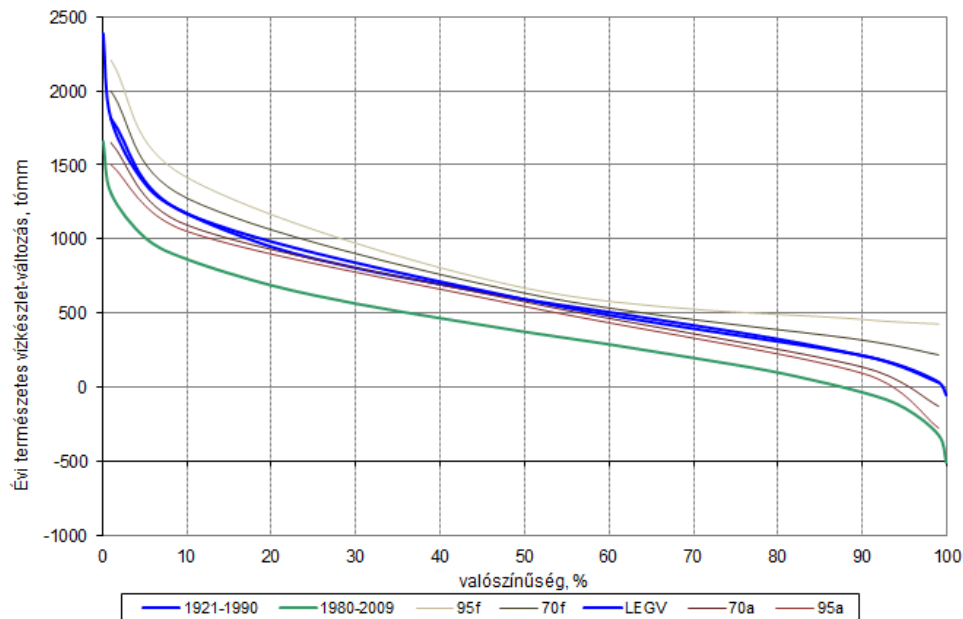
A természetes vízkészlet-változás időszora (4. ábra) a csapadék, a párolgás és a hozzáfolyás számításában beállt módszertani és a számításokhoz felhasznált állomásokban bekövetkezett változások miatt közelítő jellegűnek lehet tekinteni (VITUKI 1990).



4. ábra. A Balaton évi természetes vízkészlet-változása

Az évi természetes vízkészlet-változás ($TVK_{év}$) 1921-2014 közötti közel 100 éves időszora csökkenő tendenciát mutat. A tendencia a hidrológiai gyakorlatban elterjedten alkalmazott Mann-Whitney nem paraméteres próba (REIMANN, V. NAGY 1984) szerint 98%-os valószínűségi szinten szignifikáns, azaz nem véletlen jellegű. Egy korábbi vizsgálat (NOVÁKY 2013) szerint az 1921-től kezdve folyamatosan növelt idősorban 2000-ig nem igazolható szignifikáns trend, 2000. évet követően azonban a trend növekvő megbízhatósággal szignifikánssá változik. Ezt a folyamatot erősíti meg a 94 éves idősor viselkedése. Az idősorban továbbá kimutatható a 24 éves, és annak néhány alharmonikusaként jelentkező, rövidebb periódus jelenléte, amelyek együttesen az évi természetes vízkészlet-változás változékonyságának mintegy 12%-át magyarázzák. A periódusok figyelembe vétele csak némileg ad magyarázatot az évi természetes vízkészlet-változása idősorának 2000. év utáni viselkedésére, a 2000-es évek rendkívül alacsony értékeit kizárólag a periodicitás nem indokolja.

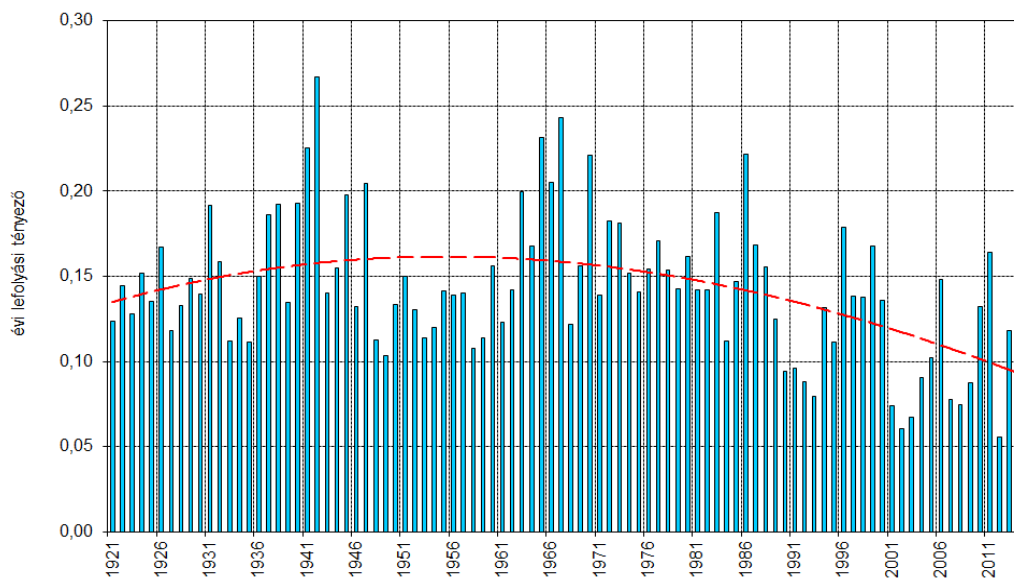
Az évi természetes vízkészlet-változás elegendő terjedelmű mintákon számított statisztikai mutatói, várható értéke és szórása 1980-as évekig nem mutat statisztikai értelemben szignifikáns eltérést, ezért az idősor — a stacionárius folyamat meghatározása szerint (REIMANN, V. NAGY 1984, DÉVÉNYI, GULYÁS 1988) — stacionáriusnak tekinthető. Az idősor az 1980-as éveket követően megváltozott: a várható érték határozott csökkenést mutat, az 1980-as évekig stacionárius folyamat ezt követően nem stacionáriussá alakult. Az 1980-as éveket követően lényeges változás állt be az évi természetes vízkészlet-változás valószínűségi eloszlási függvényében (3. ábra, NOVÁKY 2013). Az 1921-1990 és az 1980-2009 időszakok egybevetésével látható, hogy az utóbbi időszak valószínűségi eloszlásfüggvénye jelentősen megváltozott, korábbi önmagához képest „eltolódott” oly mértékben, hogy a korábbi állapotot jellemző eloszlásfüggvény Kendal-módszerrel számított 95, sőt 70%-os megbízhatóságú konfidencia sávján is kívül esik. A jelentős eltérés is alátámasztja, hogy a folyamat nem stacionárius, az évi természetes vízkészlet-változás folyamatában a teljes időszakot tekintve változás állt be.



5. ábra. Az évi természetes vízkészlet-változás eloszlásfüggvényei az 1980-2009 (zöld színnel jelölve) és az 1921-1990 (kék színnel jelölve a 70%-os és 95%-os megbízhatósági sávokkal) (NOVÁKY 2013)

A statisztikai vizsgálatok eredménye intő jel arra, hogy a Balaton évi természetes vízkészlet-változásának viselkedése a 20. század utolsó évtizedeiben megváltozott a korábbi évekhez képest. Az idősorban beállt változást a tóra hulló csapadék és tófelület párolgás egyenletes és kismértékű csökkenése nem indokolja, ugyanakkor a hozzáfolyásban (vízgyűjtő lefolyásban) jelentős, a természetes vízkészletéhez hasonló idő szerinti változás mutatható ki (HONTI in NOVÁKY et al. 2013).

A hozzáfolyás csökkenési üteme az 1980. évet követően gyorsult fel, hasonlóan az évi természetes vízkészlet-változáséhoz. A hozzáfolyás csökkenése részben a vízgyűjtőre hulló csapadék, és főként a lefolyó hányad csökkenésével magyarázható (6. ábra).



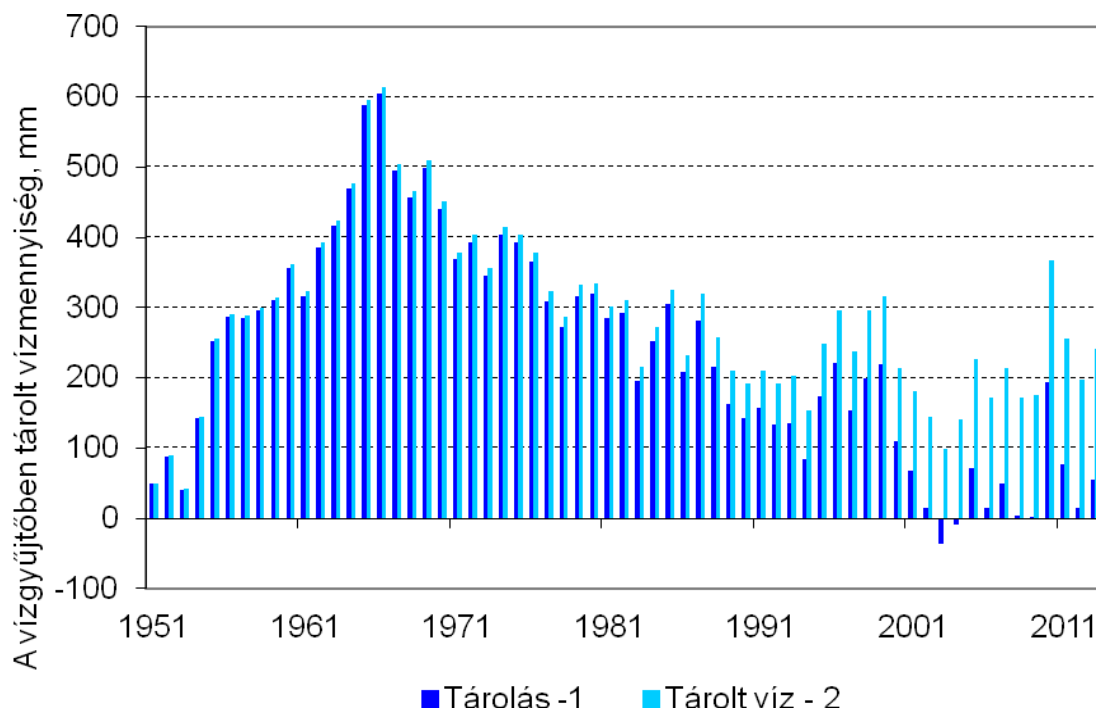
6. ábra. Az évi lefolyási tényező változása a Balaton-vízgyűjtőn 1921-2014 között

A lefolyási tényező csökkenésének okát keresve, felmerül a kérdés, hogy játszhatott-e ebben szerepet a vízgyűjtő természetes tárolt vízmennyiségének csökkenése. A lefolyási tényező és a tárolt vízmennyiség között, erősen közelítő feltétellel szerkesztett összefüggés szerint, jó kapcsolat van (HONTI in NOVÁKY et al. 2013). Jelen tanulmány célul tűzte ki a kapcsolat pontosítását.

A vízgyűjtő tárolt vízmennyiségének i -dik évi változása ($\Delta S_{vgy,i}$) a vízgyűjtő csapadékból ($P_{vgy,i}$) származó bevitelének, és a területi párolgás ($E_{vgy,i}$) és lefolyás ($R_{vgy,i}$) kiadásának összegéből számítható a

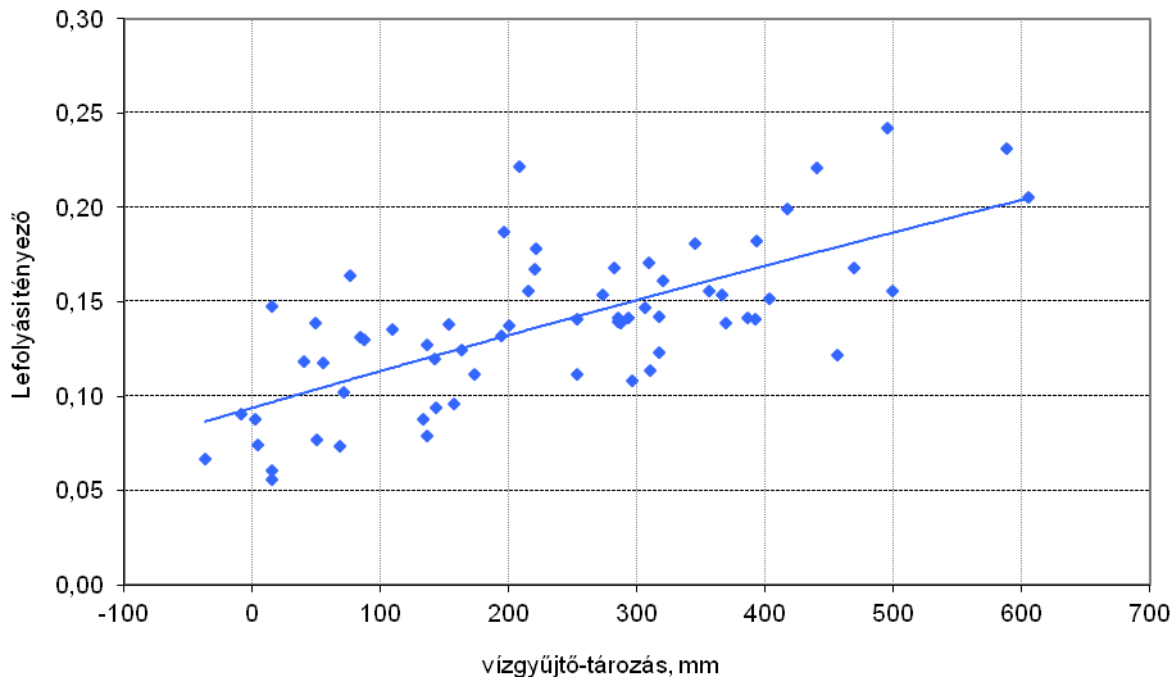
$$\Delta S_{vgy,i} = P_{vgy,i} - (E_{vgy,i} + R_{vgy,i}) \quad (2)$$

képlet szerint, az évi tárolt vízmennyiség — valamely kezdeti évtől indulva — az évenkénti tározó-változás folyamatosan göngyöltett összegzésével állítható elő. A tárolt vízmennyiség számításához szükséges az évi területi párolgás ismerete, amelynek számítása a Turc-féle módszerrel történt, értékei 1951-től állnak rendelkezésre. A párolgás magában foglalja a halastavak és az 1986-ban üzembe lépett Kis-Balaton párolgás értékeit is. A vízgyűjtőben tárolt vízmennyiség időbeli alakulását a Kis-Balaton és a halastavak párolgása nélkül, illetve ez utóbbiak többletpárolgásának figyelembevételével számítva az 7. ábra mutatja be. A halastavak és főként a Kis-Balaton többletpárolgása csökkentette a vízgyűjtő tárolt vízmennyiségét, az 1986. évet követően, mintegy ráépülve az éghajlat szárazodása hatására, számottevően hozzájárult a vízgyűjtő „kiszáradásához”.



7. ábra. A vízgyűjtő tárolt vízmennyisége a Kis-Balaton és a halastavak párolgása nélkül (világoskék), illetve a többletpárolgás figyelembe vételével (sötétkék)

A lefolyási tényező jó kapcsolatban van a vízgyűjtő tárolt vízmennyiségével (8. ábra), és követi a tárolt vízmennyiség csökkenését.



8. ábra. A vízgyűjtőben tárolt vízmennyiség kapcsolata a lefolyási tényezővel

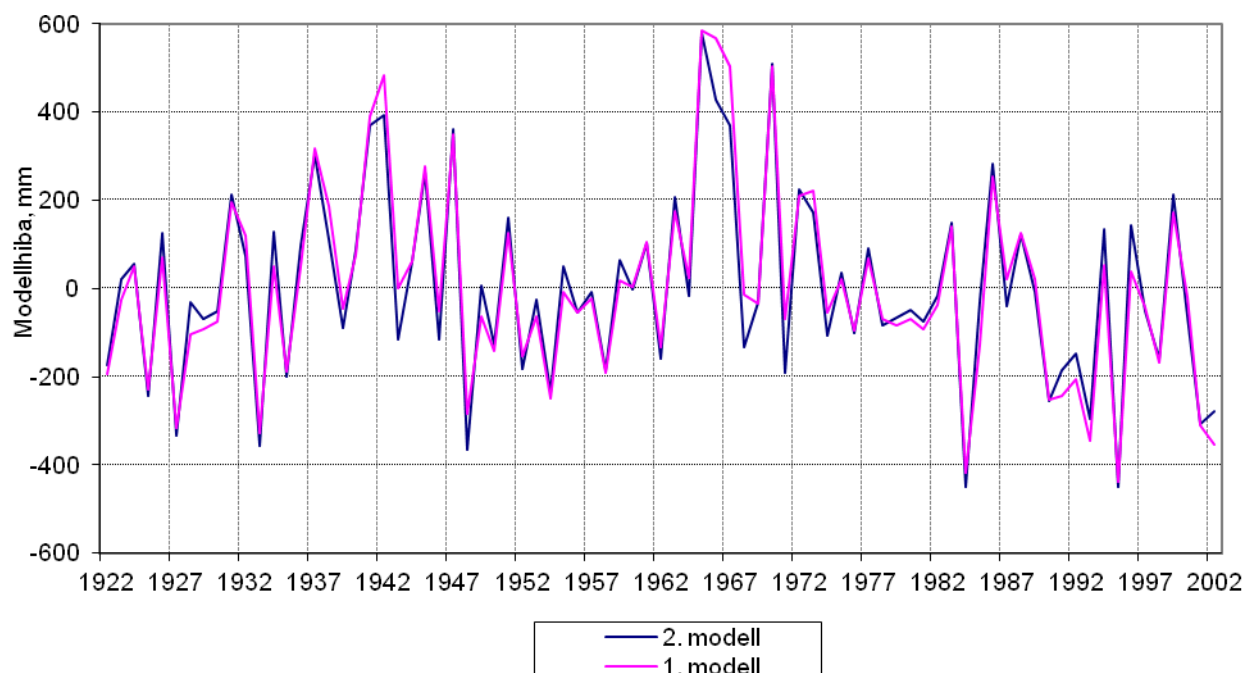
A Kis-Balaton és a halastavak többletpárolgása az elmúlt évtizedekben, különösen az 1980-as évektől felerősödve, közel 200 mm-rel csökkentette a vízgyűjtő tárolt vizeit, ami viszont hozzájárult a vízgyűjtőben a csapadék lefolyó hányadának (a lefolyási tényezőnek), és azon keresztül a Balatonhoz való hozzáfolyás csökkenéséhez. A lefolyási tényező csökkenésében a Kis-Balaton és a halastavak többletpárolgása mellett szerepet játszott a vízgyűjtő éghajlati ariditásának utóbbi évtizedekben tapasztalat növekedése.

1.3. Az évi éghajlati elemek és a természetes vízkészlet-változás kapcsolatának jellemzése

Az évi természetes vízkészlet-változás alakulása szorosan összefügg a csapadék és a párolgást alapvetően meghatározó hőmérséklet évi alakulásával. A kapcsolat a múltbeli észlelési adatok alapján modellezhető egyszerűbb esetben lineáris regresszióval. A bemutatott modellekben a bemenő adatokat a tóra hulló csapadék és a Keszthely állomás hőmérséklete, a kimenő adatokat az évi természetes vízkészlet-változás 1921-2002. évek közötti értékei jelentették.

Az első modell (MODELL-1) nem vizsgálja a modellezett és észlelt értékek közötti eltérések (a maradéktag) viselkedését, a második modell (MODELL-2) a maradéktag viselkedése alapján a lineáris regressziós modellt egy, a maradéktag idősorára illesztett egylépéses AR(1) modellel egészíti ki.

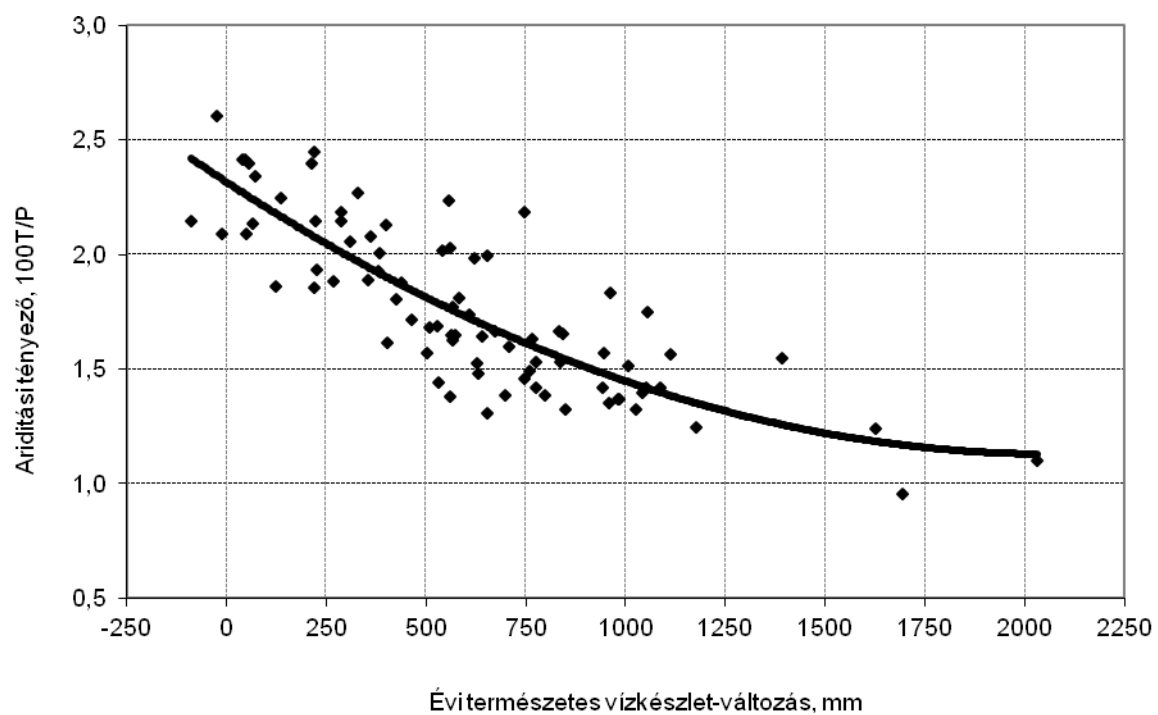
Mindkét modell jól közelíti az észlelt értékeket: a kapcsolat szorossága 0,80-at meghaladó korrelációs tényezővel írható le, a modellek maradéktagja — a csúcspróba (DÉVÉNYI, GULYÁS 1988) szerint — fehérzaj folyamatnak tekinthető. A modellezett és észlelt idősor jó egyezése, továbbá a kétféle módon modellezett idősorok jó egyezése nyilvánvaló (9. ábra).



9. ábra. Az évi természetes vízkészlet-változás vízmérlegből számított és modellezett idősorai

A csapadék és a hőmérséklet az a két alapvető meteorológiai tényező, amelyek meghatározó mértékben alakítják a tó természetes vízkészlet-változását.

A két meteorológiai elemet az $ARI = 100T/P$ képlet szerinti ariditási mutatóba összevonva, eléggé egyértelmű kapcsolat építhető fel az éghajlat jellegét átfogóan jellemző mutató és az évi természetes vízkészlet-változás értékei között (10. ábra). Az ábráról egyértelműen kitűnik, hogy az éghajlat ariditásának (száraz jellegének) növekedésével az évi természetes vízkészlet-változás csökken, az ariditási mutató 2,3 értékénél negatívba fordul át, azaz éves szinten a tó természetes vízkészlete fogyatkozik.



10. ábra. Az évi természetes vízkészlet-változás és az ariditási mutató kapcsolata

2 A BALATON ÉVI VÍZMÉRLEGÉRE EDDIG ELVÉGZETT ÉGHAJLATI HATÁSVIZSGÁLATOK ÖSSZEFOGLALÁSA

2.1. Történeti áttekintés

A tavak, különösen a Balatonhoz hasonló sekély tavak éghajlati érzékenysége régóta ismert. Történeti kutatások kimutatták, hogy a tó vízjárása, a vízjáráshoz kapcsolódóan a tó felülete a múltban többször, esetenként jelentősen változott az éghajlat ingadozásával összefüggően (VIRÁG 1997). Adott éghajlathoz meghatározható az egyensúlyi tófelület, aminél a tó párolgás teljes egészében felemésztí a tó csapadékból és hozzáfolyásból származó vízbevételét, a tóból kifolyás nincs, azaz többévi átlagban a tó zárt, lefolyástalan tóvá alakul (SZESZTAY 1959).

Az egyensúlyi felület éghajlatfüggő, követi az éghajlat ingadozását. A számítások szerint értéke az 1921–1950. években 1730 km^2 (SZESZTAY 1959), 1921–2000 között 1300 km^2 (NOVÁKY 2005), az 1921–2002. években 988 km^2 (KONCSOS et al. 2005). A Balaton vízforgalmára végzett érzékenységi vizsgálat szerint a tó vízforgalma, különösen a kifolyása igen érzékeny az éghajlat akár kisebb változására, hatása a kifolyásban felerősödik (NOVÁKY 1985).

A tó teljes vízmérlegének éghajlati forgatókönyvekhez kapcsolódó hatásvizsgálatai az 1990-es évek elejétől kezdődtek. Készült éghajlati hatásvizsgálat a tó szélsőségesen alacsony vízállásának tartósságára, továbbá a foszfor- és nitrogénforgalomra. A 2000-es évek első évtizedének közepétől a hatásvizsgálatok egyre inkább nemzetközi projektek keretében — PRUDENCE/GEF/UNDF, CLIME-EVKI-CT, CLAVIER, EULAKES — folytak. A közel két évtizedes múlttra visszatekintő vizsgálatokat a következő tendenciák jellemzik.

— A hatásvizsgálatok eltérő éghajlati forgatókönyvekre épültek. A legkorábbi vizsgálat a légköri széndioxid koncentráció megkétszereződését feltételező egyensúlyi éghajlati modellekre (BMO, GISS, GFDL, NCAR), azok regressziós kapcsolattal a Balaton tágabb térségére történt leskálázásával kapott értékeire épült. Az ezredfordulót követően a hatásvizsgálatok regionális éghajlati forgatókönyveket használtak, amelyek hátterét a tranziens éghajlati modellek, főként az angliai HadCM3 és a németországi ECHAM4 globális modellek vagy ezek változatai biztosították, és amelyek általában az üvegházgázok légköri kibocsátásának közepes ütemével (A1B közepes kibocsátási forgatókönyv) számoltak. A korai éghajlati forgatókönyvek kimenetei többnyire hosszabb időszakok (év, évszak, hónap) középhőmérsékletének és csapadékanak átlagos értékeire szorítkoztak, a regionális éghajlati forgatókönyv biztosítani képes a két éghajlati elem rövid időléptékű idősorait. Ritka kivételként az éghajlati háttért a jövőben várható éghajlat múltbeli időbeli analógiája jelentette.

— A hatásvizsgálatok kezdetben az átlagos évi vízmérlegre szorítkoztak, empirikus-statisztikus modelleket használtak: regressziós összefüggéseket, egyszerű felépítésű, empirikus éghajlat-lefolyás modelleket, mint az érzékenységi vizsgálatokban is használt Budyko-modellt. Az empirikus modellek használata később sem tűnt el: az ezredforduló utáni EULAKES projekt a hozzáfolyást a csapadék és területi párolgás különbségeként számította, az utóbbit az évi középhőmérséklet és csapadék ismeretét igénylő, az erdősültséget figyelembe vevő empirikus Turc-képlettel. Az empirikus modellek előnye, hogy közvetlenül csatlakoztathatók a csak átlagos éghajlati elemeket biztosító éghajlati forgatókönyvekhez. A fizikai (konceptuális) modellek az ezredfordulót követően jelennek meg, korszakváltást jelentve a hatásvizsgálatok történetében. Többféle fizikai modellt alkalmaztak, főként külföldi kidolgozásúakat (SWAT, GWFL vagy WetSpa lefolyás modellt), esetenként hazai modellt

(ARESz) is. A fizikai modellek általában igénylik a hőmérséklet és a csapadék napi idősorait, amit a regionális éghajlati forgatókönyvek biztosítani képesek.

— Az éghajlati hatásvizsgálatokban használt mind a statisztikus-empirikus, mind a fizikai modelleket az észlelt adatok alapján kalibrálják, majd elfogadják a modell stabilitását, azt a feltételezést, hogy a modell az éghajlatváltozás esetén is használható. A modellek független adatokon való igazolása (verifikálása) gyakorlatilag elmarad, részleges igazolásra is csak ritkán, elsősorban az empirikus-statisztikus modellek esetében került sor.

— A vizsgálatok általában két időtávon, rövidebb (2020–2050) és hosszabb (2070–2100) távon várható változásokra terjednek ki, míg a referencia állapot előbb az 1961–1990. évek, később az 1971–2000. évek voltak. A hatásvizsgálatokban a teljes vízmérleget, esetenként csak egyes elemeit modellel állították elő mind a jelen és jövő állapotra, a változást a modellezett jövő és jelen közti különbszeteként értékelték. A hatásvizsgálatok többnyire a megjelölt időtávra vonatkozó átlagos évi vízmérlegre terjednek ki, de kivételesen történtek vizsgálatok az átlagos havi víz vízmérlegekre is. 1991–2012 között végzett hatásvizsgálatokat átfogóan az 1. táblázat mutatja be.

1. táblázat. A Balaton vízmérleg 1991–2012 közötti éghajlati hatásvizsgálatai

Vízmérleg elem	Éghajlati forgatókönyv		Hatásvizsgálati módszer		Szerző
	globális	Regionális	hozzáfolyás	tópárolgás	
Évi TVK	egyensúlyi modellek (BMO, GISS, GFDL, NCAR)	GCM statisztikus (regressziós) leskáálázása (<i>Mika 1988</i>)	Budyko-modell	regresszió	NOVÁKY (1993)
ÉVI TVK	Nem publikált	BALALONE BALACOOOL	SWAT-modell		Balaton Integrációs Közhasznú Nonprofit Kft. 2004
Évi és havi TVK		GCM statisztikus leskáálázása (<i>Mika 1999</i>), majd múltbeli analóg éghajlat	Idősorgenerálás (Thomas-Fiering)	regresszió	KONCSOS et al. (2005)
ÉVI TVK	A2B2/ECHAM4 és HadCM3	Globális éghajlati forgatókönyvekből az adott régióra kiolvasható változások t	Osztott paraméterű Budyko-modell	Regresszió	NOVÁKY (2006)
ÉVI TVK		PRUDENCE projekt regionális éghajlati forgatókönyvei			PRUDENCE/GEF/UNDF KUTICS et al. 2007
Évi TVK	HadAM3p és ECHAM4/OPYC3	Rosby Centre RCM (RCAO) és a Hadley Center RCM (HadRM3p) Napi adatok: RCAO időjárás generátor	GWLF ARESz WetSpa		CLIME-EVKI-CT PADISÁK (2006) KOVÁCS, CLEMENT 2009 PADISÁK 2006

Vízmérleg elem	Éghajlati forgatókönyv		Hatásvizsgálati módszer		Szerző
	globális	Regionális	hozzáfolyás	tópárolgás	
Évi tópárolgás	A1B/ ECHAM/MPI- OM	REMO 5.0 és REMO 5.7		Módosított Morton eljárás	JACOB, HORÁNYI 2009 CLAVIER Kovács, SZILÁGYI 2010
Évi vízmérleg, TVK	A1B SREsen alapuló éghajlati forgatókönyv	EULAKES regionális éghajlati forgatókönyvek	Csapadék- területi párolgás Területi párolgás Turc- képlet	Balaton-képlet	EULAKES Kravinszkaja (2012 VARGA (2012)

2.2. A hatásvizsgálatok rövid bemutatása és összefoglaló értékelése

2.2.1. Az egyes hatásvizsgálatok eredményei

A Balaton átlagos évi vízmérlegére irányuló, vélhetően első éghajlati hatásvizsgálat a globális melegedés alacsonyabb fokozatában az évi középhőmérséklet 0,5 °C emelkedésével és az évi csapadék 5% csökkenésével, magasabb fokozatában a hőmérséklet 2 °C emelkedése mellett a csapadék 5% növekedésével számolt (NOVÁKY 1993). A Budyko-féle éghajlat lefolyás kapcsolatra épülő modell kalibrálása a múltbeli észlelések alapján, részleges igazolása a teljes múltbeli észlelési időszakot két egyenlő részre vágva nyert rövidebb idősorokon történt. Mindkét éghajlati forgatókönyv a tó vízmérlegének romlását jelzi előre, amit a csapadék csökkenése mellett a topárolgás növekedése és a hozzáfolyás csökkenése vált ki. A topárolgás 2 °C globális melegedés esetén 10% feletti, 0,5 °C melegedés esetén bizonytalan, akár kisebb növekedése sem zárható ki.

A hozzáfolyás csökkenése a globális melegedés mindkét fokozatában számottevő, mértéke — a bizonytalanságot is figyelembe véve — 6% és 27% között becsülhető. Mindezek következményeként várható a vízforgalom romlása, nagyobb mértékű melegedésnél a tó kifolyása akár 60–70%-kal csökkenhet, a kifolyás/párolgás arány 0 felé közelítésével a tó közelebb kerülhet lefolyástalan (zárt) állapotához.

A fizikai alapú modelleken alapuló első, ismert hatásvizsgálat a PRUDENCE regionális éghajlat-modellezés keretében a rövidebb távra, a 2011–2040 közötti időszakra készült (Balaton Integrációs Közhasznú Nonprofit Kft. 2004). A hatásvizsgálatban a tó vízgyűjtőjét hét, egyenként 50×50 km-es cellára osztották. A csapadék és a hőmérséklet változását cellánként az 1961–1990 referencia időszakhoz képest számították két, részletesebben nem ismertett BALALONE és a BALACOOl éghajlati forgatókönyvnek megfelelően. A forgatókönyvek az évi középhőmérséklet emelkedésével számolnak, aminek mértéke a BALALON esetében 2,4 °C, a BALACOOl esetében 1,5 °C. A forgatókönyvek az évi csapadék csekély változásával számolnak: a BALACOOl 0,6% növekedéssel, a BALALONE 1,4% csökkenéssel. A tó vízmérlegében várható változások a vizsgált időszak közepére, 2026-ra értelmezhetők. A lefolyás modellezése a SWAT (Soil Water Assessment Tool) modellel történt, ami figyelembe veszi a domborzatot, a területhasználatot és a talaj típusát. Mindkét forgatókönyv szerint várható a lefolyás csökkenése, a BALACOOl szerint télen és tavasszal kismértékben, a BALALONE esetében egész évben, és mértéke 10-40% közt lehetséges

A 2000-es évek elején a tó szélsőségesen alacsony vízállásainak jelentkezése ismét felvetette az éghajlati hatásvizsgálat szükségességét (SOMLYÓDY 2005). A hatásvizsgálat az elkövetkező 30-35

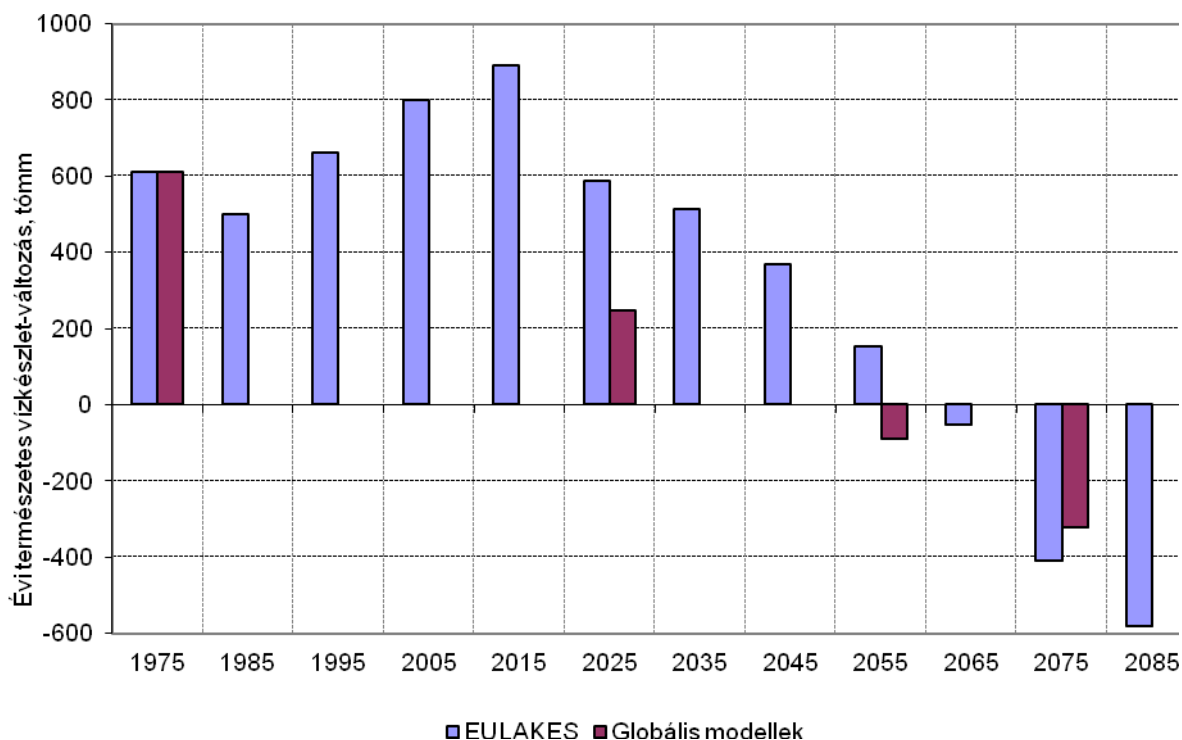
évben, nagyjából 2040-ig az évi középhőmérséklet $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ növekedése mellett az évi csapadék 10 %-os csökkenésével számolt a csapadék éven belüli számottevő átrendeződésével. A vizsgálatban megkeresték az új éghajlat múltbeli analógiáját, olyan éveket válogatva le, amelyek átlagos éghajlati jellemzői egyeznek a jövőben várhatóéval.

Az éghajlat analógiája — elfogadva a hasonlósági hipotézist - kiterjeszthető a természetes vízkészlet-változásra is (NOVÁKY 2005). Az analóg éghajlat megválasztását követően mind az 1921–2002. évek jelen éghajlatára, mind az analóg évek éghajlatára a Thomas-Fiering modell szerinti idősor-generálással előállították a természetes vízkészlet-változás 5000–5000 éves havi idősorait az analóg éghajlatra azzal a feltétellel, hogy a természetes vízkészlet-változás átlagos havi értékek megegyezzenek az analóg éghajlathoz választott évekre számítottakkal, egyéb statisztikai jellemzői (szórás, korrelációs tényezők) a teljes múltbeli időszak észlelései szerint számítottakkal. A havi természetes vízkészlet-változás jövő éghajlatra generált idősorait egybevetve a 1921–2002. évekkal jellemzett jelen állapothoz szintén generálással előállított idősoraival előre jelezhető a várható változás. Eszerint az évi természetes vízkészlet-változás 22%-kal csökken jelentős éven belül átrendeződés mellett: havi értékük április-novemberben csökken, a téli hónapokban nő.

A VAHAVA projekt keretében készült éghajlati hatásvizsgálat éghajlati forgatókönyvek mindegyike a hőmérséklet emelkedésével számolt: rövidebb távon $1,5\text{--}2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, hosszú távon, a forgatókönyvek közötti nagyobb eltérés mellett, $4\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$ értékkel, csapadék tekintetében rövidebb és középtávon általában 5–15% csökkenéssel, hosszabb távon 25% körüli csökkenés és néhány %-os növekedés közötti tartományban.

A hatásvizsgálat a módosított Budiko-modell térben osztott paraméterű változatát használta a tóvízgyűjtő cellákra (grid) osztásával. A modell a módosított Budyko-féle összefüggés alapján előbb számolja a cellánkénti lefolyást (grid-runoff), majd azok értelemszerű összegzésével a vízgyűjtő teljes lefolyását (catchment runoff). A modell kalibrálása a Balatont tápláló Zala folyó három vízhozam-mérő állomása által észlelt adatok alapján történt.

Tesztvizsgálat szerint a modell-konstans valójában nem állandó, változik az évi csapadék függvényében, a modellezett változás, úgy tűnik érzékeny a modell-konstansra, sokkal inkább, mint az éghajlatra magára. A hatásvizsgálat az éghajlati forgatókönyvek mindegyike esetében, de forgatókönyvenként eltérő ütemmel, az évi természetes vízkészlet-változás csökkenését jelzi előre (9. ábra), aminek következményeként az évszázad közepétől a tó átlagos vízmérlege akár negatívra válhat. Ezt úgy kell értelmezni, hogy lehetnek/lesznek évek, amikor a tó vízbevétele meghaladja a kiadását, ami biztosítja a tó fennmaradását — a mainál kisebb egyensúlyi felület mellett.



11. ábra. A tó természetes vízkészlet-változása különböző éghajlati forgatókönyveket figyelembe véve

A GEF/UNDF projekt keretében hosszabb távra, az 2071–2100 közötti időszakra készült éghajlati hatásvizsgálat (KUTICS et al. 2007). A hatásvizsgálat a PRUDENCE projekt során előállított, az A2 és B2 kibocsátási forgatókönyvekre épülő regionális éghajlati forgatókönyvekből indult ki. A forgatókönyvek a nyári (június–augusztus) csapadék 25%-ot is elérhető csökkenésével, a téli (november–január) csapadék hasonló mértékű növekedésével számoltak.

A hőmérséklet változásáról részletes információk nem állnak rendelkezésünkre. A lefolyás modellezése a SWAT modell alapján történt. Kedvezőbb kibocsátási (B2) forgatókönyv esetén a vízfolyások többségén az átlagos évi lefolyás általában nő, kivételt néhány a Balaton északi vízgyűjtőjének kis- vagy időszakos vízfolyása jelent, ahol az évi lefolyás legfeljebb 20%-os csökkenése lehetséges. Az A2 kibocsátási forgatókönyv esetén a vízgyűjtő keleti felében esetenként 50%-os csökkenéssel lehet számítani, amit azonban a vízgyűjtő nyugati felében várható erőteljes növekedés ellensúlyoz. A Zala és mellékfolyóin az A2 forgatókönyv esetén 50%-ot, a B2 forgatókönyv esetén egyes mellékfolyókon 200%-ot is meghaladó lehet a növekedés.

A CLIME EVKI-CT-2002-00121 több európai tóra kiterjedő nemzetközi projekt (PADISÁK 2006, KOVÁCS, CLEMENT 2009) keretében az éghajlatváltozásnak a tavak foszfor és nitrát forgalmára várható hatásait vizsgálták. A vizsgálathoz a hidrológiai modellt a Generalized Watershed Loading Functions (GWLF), a hazai fejlesztésű 250×250 m térbeli felbontású ARES (KONCSOS 2007) modell, és a WetSpa modell adták. A kétféle kibocsátási forgatókönyvvel (A2 és B2) és kétféle éghajlati modellel összesen négyféle éghajlati forgatókönyvet állítottak elő a 2070–2100. évekre. A forgatókönyvek az évi középhőmérséklet 3,6–5,7 °C emelkedésével, az évi csapadék 4 % csökkenés és 8,5% növekedés közötti változásával számolnak. Készültek hatásvizsgálatok közelebbi időtávra, a 2025–2034. évekre, amihez az éghajlatváltozás mértéke a CLIME modellben előre jelzett értékek egyszerű felezésével

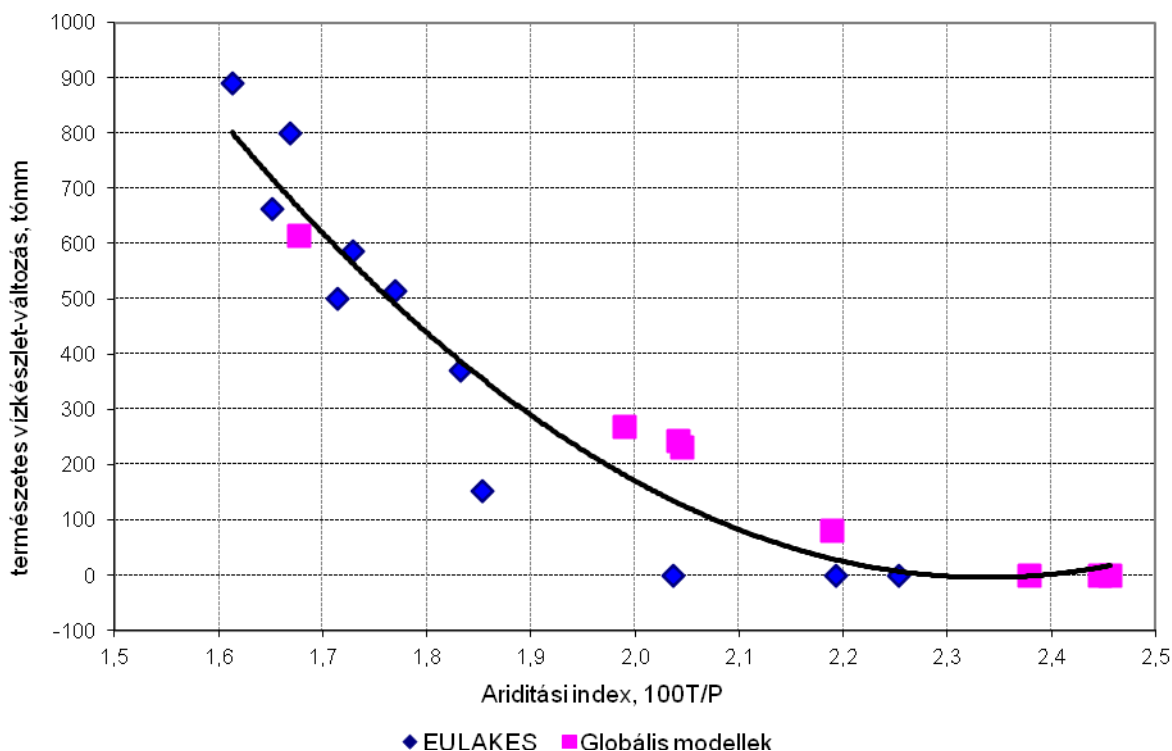
történt. Az éghajlati hatásvizsgálat az átlagos évi lefolyás viszonylag kismértékű csökkenését jelzi előre. Az ARES modellel végzett számítások szerint éghajlati forgatókönyvenként eltérően a csökkenés 6–16% között, a GWLF szerint 2–18% között lehet. A WetSpa modell az átlagos évi hozzáfolyás változását a 4% csökkenés és 12% növekedés között jelzi előre (KOVÁCS, CLEMENT 2009).

A CLAVIER projekt keretében a tóparólgásra készült hatásvizsgálat a REMO 5.0 és REMO 5.7 regionális éghajlati modelleken alapuló regionális éghajlati forgatókönyvek jelentették. Ezek szerint a jelen referencia időszakhoz (1961–1990) képest a jövőben (2020–2050) a tó térségében az évi középhőmérséklet 1,2–1,4 °C emelkedése várható. A tóparólgás számítására a Penman- és Priestley-Taylor párolgászámító eljárások kombinációjával új empirikus képletet dolgoztak ki (JACOB, HORÁNYI 2009, KOVÁCS, SZILÁGYI 2010). A 2020–2050. évekre mindkét éghajlati forgatókönyv az átlagos évi párolgás csekély mértékű növekedését jelzi előre: a REMO 5.0 esetében a növekedés 3,2%, a REMO 5.7 esetében 1,0%. A REMO 5.7 szerint a párolgás növekedése a 2001–2050. évekre az 1%-ot sem haladja meg. (KOVÁCS, SZILÁGYI 2010). A növekmény lényegesen kisebb, mint amilyen az empirikus képletekből kaphatók, amelyek a REMO modellekben figyelembe vett hőmérsékletemelkedés esetén 6,3–8,6% növekedést jeleznek előre.

EULAKES (2012) projekt keretében regionális éghajlati forgatókönyvre támaszkodva készült vizsgálat a Balaton vízmérlegére (KRAVINSZKAJA et al. 2012). A jelenlegi 1971–2000 közötti időszakhoz képest a közepes kibocsátást feltételező regionális éghajlati forgatókönyvek a hőmérséklet előbb lassú, majd erősödő ütemű növekedését jelzik előre. A század utolsó évtizedeiben az évi középhőmérséklete 13,2 °C lehet, 3,3 °C-kal magasabb a jelenleginél. A forgatókönyvek a csapadék növekedését jelzik előre, mértéke a 21. század első évtizedeiben 8%-ot is meghaladhatja, míg a század utolsó évtizedeiben mindössze 1%-ot. A projekt keretében végzett előzetes hatásvizsgálat empirikus összefüggéseken alapult. A hatásvizsgálat szerint rövidtávon, 2021–2050-ig a tó vízmérlege, a természetes vízkészlete nem változik, sőt átmenetileg, a csapadék növekedése miatt javulhat is. A tóparólgás 2030-ig kismértékben, mintegy 3%-kal nő, 2030 után a növekedés jelentős, a század utolsó harmadában 45%-kal magasabb a jelenleginél (VARGA, KRAVINSZKAJA 2012). A csapadék és a hőmérséklet éghajlati forgatókönyvekben előre jelzett változásai következtében a Balaton vízmérlegének a 21. század első évtizedeiben javuló, majd 2030-at követően egyre fokozódó romlását valószínűsítik. A tó természetes vízkészlet-változása közelebbi távon, a csapadék növekedése miatt, átmenetileg növekedhet, de a 21. század közepétől várhatóan csökken és a század utolsó évtizedeiben a tó lefolyástalan állapotba kerülhet.

2.2.2. A hatásvizsgálatok összefoglaló értékelése

A különböző éghajlati forgatókönyvekből kiinduló, eltérő módszerekkel készített vizsgálatok egyfajta értékelő összehasonlításra is lehetőséget adnak. A hatásvizsgálatok abban egyeznek, hogy a globális melegedés következtében a tó vízmérlege romlik, a hatásvizsgálatok többsége szerint az évi természetes vízkészlet-változás csökken. Jelentős eltérések vannak azonban a romlás mértékében, sőt vannak vizsgálatok, amelyek a közelebbi évtizedekben a vízmérleg akár javulásával is számolnak. Figyelemre méltó, hogy a csökkenés mértéke szorosan összefügg az éghajlat ariditásának növekedésével, amit kiválthat a csapadék csökkenése, a hőmérséklet emelkedése, és a kettő együttes jelentkezése (12. ábra).



12. ábra. A természetes vízkészlet-változás csökkenése az éghajlati ariditási index függvényében

Az éghajlat ariditásának változása alapvetően meghatározó lehet a tó vízmérlegét tekintve, ugyanakkor a változásának bizonytalansága a vízmérleg jövőbeli becslésének alapvető forrása. Kulcskérdés tehát az éghajlat alakulása — ennek pontosítása, bizonytalanságainak csökkentése, illetve a bizonytalanságok figyelembe vétele a tó jövőbeli sorsát illetően — alapvető feladat.

3 AZ OMSZ ALADIN-CLIMATE ÉS CARPATCLIM-HU (CC) MODELLADATAINAK KÖRE ÉS HASZNÁLATA

A Balaton vízforgalmának a referencia időszakhoz (1961–1990) viszonyított, jövőbeni időszakokra (2021–2050 és 2071–2100) vonatkozó becsléséhez szükséges hidrológiai számításokhoz igényelt meteorológiai adatok az alábbiak szerint álltak rendelkezésünkre.

A CARPATCLIM (CC) adatokat a referencia időszakra (1961–1990) tényleges mérési eredmények alapján, az ALADIN-Climate adatokat a klímaablakokra (1961–1990, 2021–2050 és 2071–2100) modellezéssel határozták meg.

Az adatok a felsorolt időszakokra havi időhorizontra vonatkoznak és súlyozott területi átlagra (vízgyűjtő terület, a tó vízfelülete) reprezentálnak. A területi leválogatást és a súlyozott területi átlagok számítását Homolya Emese (MFGI) végezte.

A kutatáshoz használt adatok:

- a tó vízgyűjtő területére vonatkozó súlyozott területi átlagok
- havi csapadékösszeg (mm) (1961–1990 CC; 1961–1990 ALADIN; 2021–2050 ALADIN, 2071–2100 ALADIN)
- havi középhőmérséklet (°C) (1961–1990 CC; 1961–1990 ALADIN; 2021–2050 ALADIN, 2071–2100 ALADIN)
- a tó vízfelületére vonatkozó súlyozott területi átlagok
- havi csapadékösszeg (mm) (1961–1990 CC; 1961–1990 ALADIN; 2021–2050 ALADIN, 2071–2100 ALADIN)
- havi középhőmérséklet (°C) (1961–1990 CC; 1961–1990 ALADIN; 2021–2050 ALADIN)
- havi közepes szélesség 10 m-en (m/s) (1961–1990 CC; 1961–1990 ALADIN; 2021–2050 ALADIN, 2071–2100 ALADIN)
- havi relatív nedvesség (%) (1961–1990 CC; 1961–1990 ALADIN; 2021–2050 ALADIN)

A felsorolt meteorológiai adatok hidrológiai számítások során történő felhasználásáról (lehetőségekről és korlátokról), valamint az eredmények értelmezéséről és értékelésről a tanulmány készítése során rendszeresen konzultáltunk Szépszó Gabriellával az OMSZ szakértőjével.

A szakmai együttműködés részeként „ALADIN-Climate modellszimulációk eredményei” címmel Szépszó Gabriella és Csorvási Anett összefoglaló tanulmányt készített, amit teljes terjedelmében jelen tanulmány Függelékében mutatunk be.

Az alábbiakban a tanulmány azon részleteit és megállapításait foglaljuk össze, amiket szakmai irányításként használtunk fel meteorológiai adatok felhasználásának, a hidrológiai számításoknál és azok eredményeinek értékelésénél.

A klímaváltozás vizsgálata éghajlati modellek segítségével lehetséges, s Magyarországon négy regionális klíma-modellt alkalmazunk a 21. században a térségünkben várható változások feltér-

képezésére. Ezek közül jelen esetben az Országos Meteorológiai Szolgálatnál alkalmazott ALADIN-Climate eredményeinek felhasználási lehetőségeit és korlátait foglaljuk össze.

Így a klasszikus értelemben vett „hosszútávú előrejelezhetőség” az éghajlati modellekkel nem valószínűsíthető meg. A globális kapcsolt modellek az egész Föld cirkulációjára és éghajlatára lassú kényszerítő hatással bíró folyamatokat és kölcsönhatásokat képesek leírni, ezért segítségükkel az éghajlati rendszer viselkedésének aszimptotikus jellemzői határozhatók meg. Éghajlati időskálán a klíma-modellek eredményeit tehát mint statisztikai sokaságot kell tekintenünk, ahol nincs prognosztikai jelentősége annak, hogy adott előrejelzés melyik konkrét időpontra vonatkozik, s a modellek megbízhatóságát aszerint osztályozzuk, hogy egy kiválasztott időszak statisztikai jellemzőit milyen pontossággal képesek visszatükrözni.

A regionális (és globális) modelleredmények szükségszerűen kisebb-nagyobb hibával terheltek, amit figyelembe kell venni a jövőre vonatkozó projekciók kiértékelése során. Ezt megtehetjük úgy, hogy változásértékeket adunk meg: a jövőre vonatkozó modelleredményeket nem önmagukban, hanem a modellek saját referencia-időszakához viszonyítva értelmezzük, így a jövőre és a múltra vonatkozó szisztematikus modellhibák a különbségképzéssel részben eliminálják egymást; illetve a változásértékeket hozzáadjuk a referencia-időszakra a mérések alapján kiszámított értékekhez (relatív változás esetén pedig összeszorozzuk a mérési és a változási értéket).

Ahogy a múltbeli modelleredmények, úgy a jövőre vonatkozó adatok sem értelmezhetők az „éghajlatváltozás előrejelzett idősoraként”, csupán a meteorológiai változók egyik lehetséges realizációjaként. A harmincéves időszakokon belül az évenkénti adatok olyan statisztikai sokaságot alkotnak, melyek időben felcserélhetők. Ez azt jelenti, hogy egy tetszőleges éves adatsor az időszak bármelyik évének megfeleltethető.

Nem illeszthető trend az időszakon belüli adatsorra, s az adott évre vonatkozó adat nem tekinthető hosszú távú időjárás-előrejelzésnek. Arra is fel kell hívni a figyelmet, az éghajlati rendszer egy nem-lineárisan fejlődő rendszer, ezért egy adott időszak tendenciájából nem következtethetünk egy másik időszak jellemzőire.

Egyetlen — jelen esetben az ALADIN-Climate — modellszimuláció eredményeinek vizsgálatával nem tehetők megalapozott kijelentések az eredmények bizonytalanságáról. Ahogy korábban említettük, nincs garancia arra, hogy a múltat jól leíró modellek a jövőre vonatkozóan hasonlóan sikeres éghajlati becsléseket adnak, ezért a validációnál kiszámított hibák és a jövőre becsült változások nem „vegyíthetők össze”. A bizonytalanságok korrekt módon csak több modellkísérlet segítségével írhatók le. Két modell alkalmazása már jó kiindulási alapot nyújt a bizonytalanságok alapfokú számszerűsítésére. Ezért a jövőbeli változások értelmezéséhez mindenképpen szükséges legalább még egy alkalmasan megválasztott modellkísérlet eredményeinek vizsgálata.

A további 3.1–3.7. alfejezetekben részletezett számításokat és értékeléseket a fenti megállapítások figyelembe vételével végeztük el.

3.1. A Balaton-vízgyűjtőre érkező csapadék területi átlagának számítása a klímaablakokra

Az OMSZ szakértőinek javaslata alapján — a szisztematikus modellhibák minimalizálása céljából — a 2021–2050 és a 2071–2100 időszakra vonatkozó csapadékat az alábbi korrekcióval vettük figyelembe:

ALADIN 2150 (korr.) = (CC 6190)*k, ahol k = (ALADIN 2150)/(ALADIN 6190 átlag)

ALADIN 7100 (korr.) = (CC 6190)*k, ahol k = (ALADIN 7100)/(ALADIN 6190 átlag)

Az eredményeket a 2–5. táblázatokban és a 13–15. ábrákon szemléltetjük.

2. táblázat. A Balaton-vízgyűjtőre érkező csapadék 30 éves területi átlagának havi, félévi és évi tény (1961–1990 időszakra) és becsült (2021–2050 és 2071–2100 időszakra) értékei (mm)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Téli félév (XI-IV)	Nyári félév (V-X)	Év (I-XII)
1961–1990 CC	39	37	43	53	68	81	76	76	56	45	67	48	289	402	689
2021–2050 ALADIN (korr)	27	39	44	62	69	81	71	72	62	54	74	52	297	409	706
2071–2100 ALADIN (korr)	37	34	42	55	71	78	54	51	47	53	93	58	321	354	673

3. táblázat. A Balaton-vízgyűjtőre érkező csapadék 30 éves területi átlaga (mm) és az attól való abszolút eltérések a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (mm)

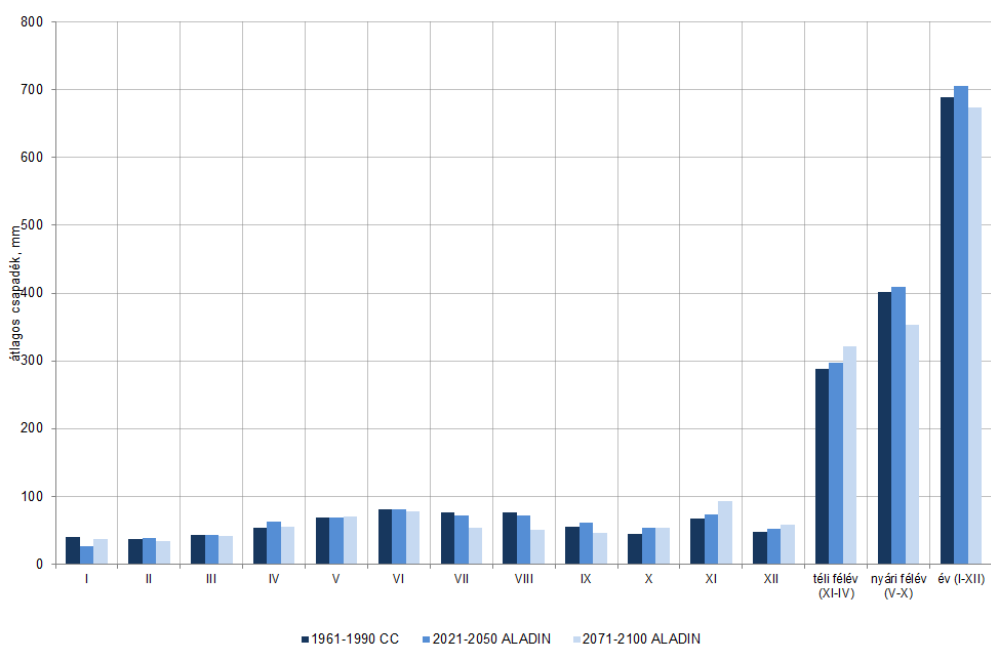
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Téli félév (XI-IV)	Nyári félév (V-X)	Év (I-XII)
1961–1990 CC	39	37	43	53	68	81	76	76	56	45	67	48	289	402	689
2021–2050 ALADIN (korr)	-12	2	0	9	1	0	-4	-4	6	8	7	4	8	8	17
2071–2100 ALADIN (korr)	-2	-2	-2	2	3	-3	-22	-25	-9	8	26	10	33	-48	-16

4. táblázat. A Balaton-vízgyűjtőre érkező csapadék 30 éves területi átlaga (mm) és az attól való relatív eltérések a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (%)

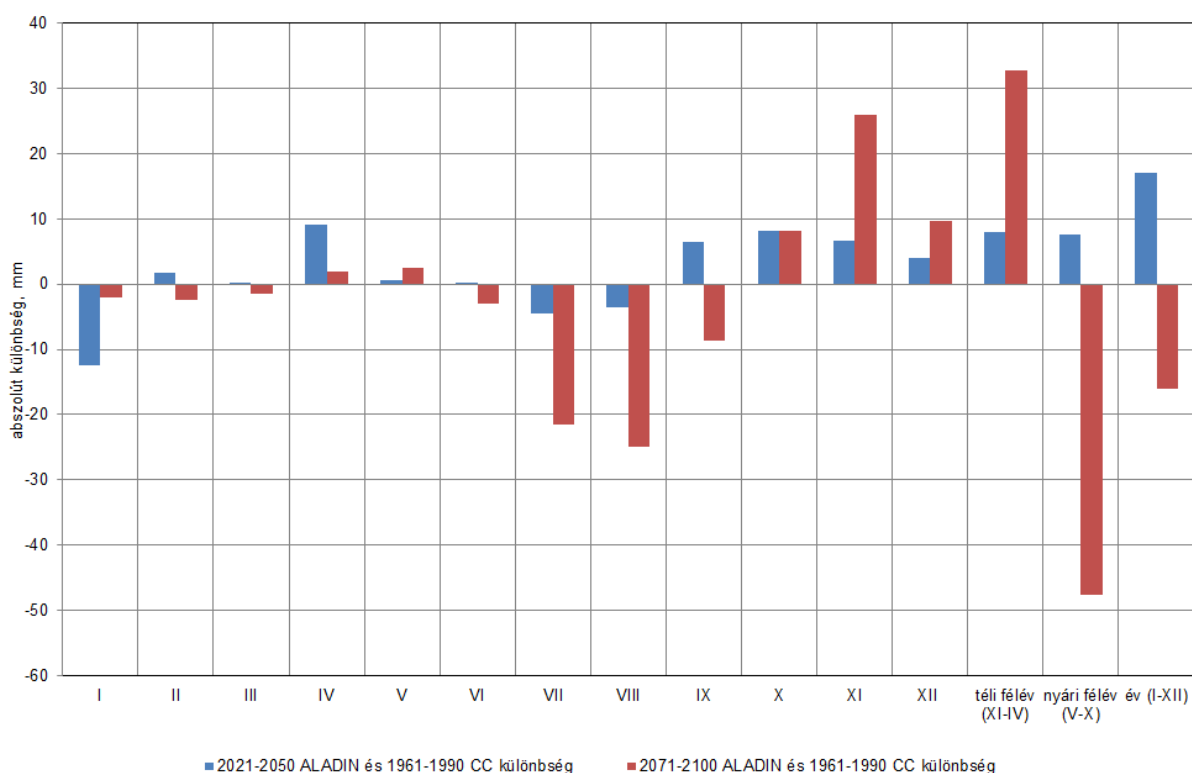
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Téli félév (XI-IV)	Nyári félév (V-X)	Év (I-XII)
1961–1990 CC	39	37	43	53	68	81	76	76	56	45	67	48	289	402	689
2021–2050 ALADIN (korr)	-32	5	1	17	1	0	-6	-5	11	18	10	8	3	2	2
2071–2100 ALADIN (korr)	-5	-7	-4	4	4	-4	-29	-33	-16	18	38	20	11	-12	-2

5. táblázat. A Balaton-vízgyűjtőre érkező tényleges és becsült évi csapadék (mm) klímaablakonkénti statisztikai jellemzői

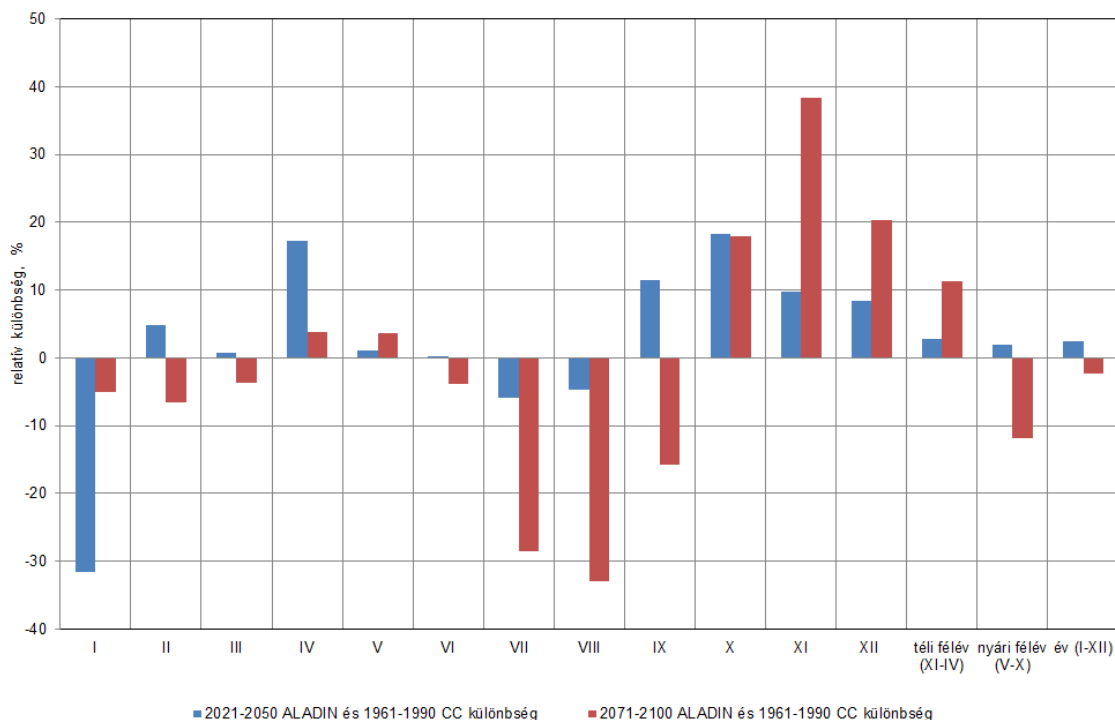
Időszak	Min	Átlag	Max	Szórás
1961–1990 CC	481	689	988	115,72
2021–2050 ALADIN (korr)	418	706	911	125,81
2071–2100 ALADIN (korr)	430	673	905	131,58



13. ábra. A Balaton-vízgyűjtőjére érkező csapadék 30 éves területi átlagának havi, félévi és évi tény (1961–1990 időszakra) és becsült (2021–2050 és 2071–2100 időszakra) értékei (mm)



14. ábra. A Balaton-vízgyűjtőjére érkező csapadék 30 éves területi átlaga (mm) és az attól való abszolút eltérések a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (mm)



15. ábra. A Balaton-vízgyűjtőjére érkező csapadék 30 éves területi átlaga (mm) és az attól való relatív eltérések a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (%)

A 2021–2050 klímablakra vonatkozó adatokat áttekintve megállapítható, hogy a tó vízgyűjtő területére hulló csapadék becsült alakulásában a referencia időszak átlagértékeihez viszonyítva félévi és évi időhorizonton számottevő mértékű ($\pm 10\%$ -ot meghaladó) változás nem valószínűsíthető. Az egyes hónapokhoz tartozó relatív eltérések szerint áprilisban és a szeptember-november időszakban 10% -t meghaladó növekedés, ugyanakkor januárban 32% -os csökkenés mutatkozik. Megjegyezzük, hogy a vizsgált időszak hosszának csökkenése a modelleredmények bizonytalanságával jár együtt.

A 2071–2100 klímablakra vonatkozó adatokat áttekintve megállapítható, hogy a tó vízgyűjtő területére hulló csapadék becsült alakulásában a referencia időszak átlagértékeihez viszonyítva évi időhorizonton számottevő mértékű ($\pm 10\%$ -ot meghaladó) változás nem valószínűsíthető. Az évi csapadékösszeg időbeli átrendeződésére utal az az eredmény, hogy félévi időhorizonton a referencia időszak értékeihez képest nyáron 10% -ot meghaladó csökkenés, télen 10% -ot meghaladó növekedés mutatkozik. A nyári félévi becsült csapadékcsökkenés súlypontja a július-augusztus időszakra, a téli félévi csapadéknövekedés súlypontja pedig a november-december időszakra koncentrálódik.

3.2. A Balaton vízfelületére érkező csapadék területi átlagának számítása a klímablakokra

Az OMSZ szakértőinek javaslata alapján — a szisztematikus modellhibák minimalizálása céljából — a 2021–2050 és a 2071–2100 időszakra vonatkozó csapadékadatokat az alábbi korrekcióval vettük figyelembe:

$$\text{ALADIN 2150 (korr.)} = (\text{CC 6190}) \cdot k, \text{ ahol } k = (\text{ALADIN 2150}) / (\text{ALADIN 6190 átlag})$$

$$\text{ALADIN 7100 (korr.)} = (\text{CC 6190}) \cdot k, \text{ ahol } k = (\text{ALADIN 7100}) / (\text{ALADIN 6190 átlag})$$

Az eredményeket a 6–9. táblázatokban és a 16–18. ábrákon szemléltetjük.

6. táblázat. A Balaton vízfelületére érkező csapadék 30 éves területi átlagának havi, félévi és évi tény (1961–1990 időszakra) és becsült (2021–2050 és 2071–2100 időszakra) értékei (mm)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Téli félév (XI-IV)	Nyári félév (V-X)	Év (I-XII)
1961–1990 CC	37	35	38	46	59	73	64	68	46	38	61	45	263	347	609
2021–2050 ALADIN (korr)	25	34	40	58	60	77	62	61	52	45	70	47	273	357	631
2071–2100 ALADIN (korr)	35	33	36	48	66	73	46	44	37	43	87	55	294	309	602

7. táblázat. A Balaton vízfelületére érkező csapadék 30 éves területi átlaga (mm) és az attól való abszolút eltérések a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (mm)

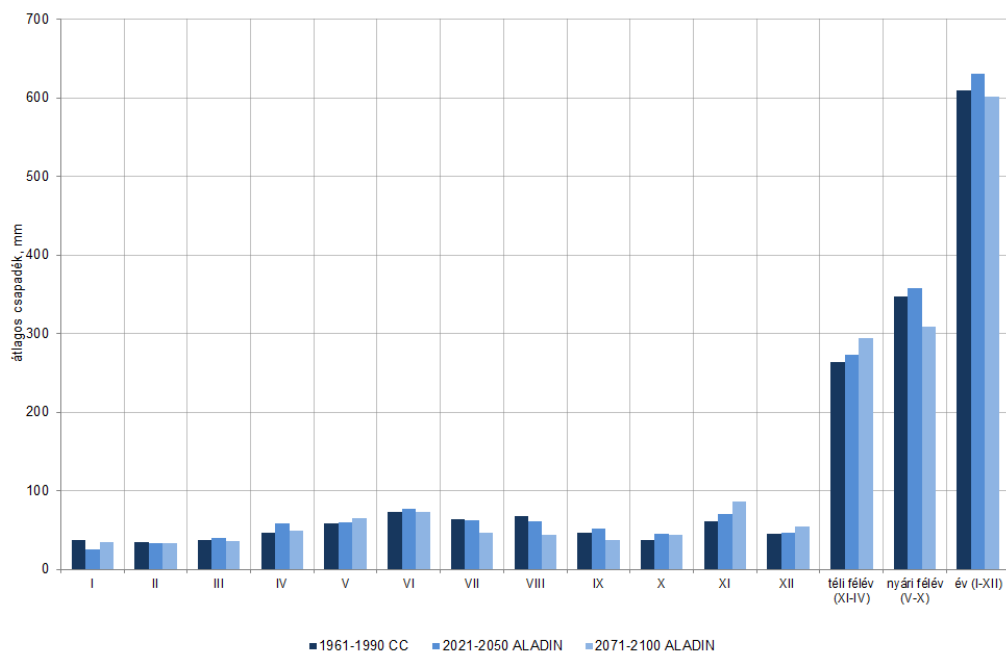
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Téli félév (XI-IV)	Nyári félév (V-X)	Év (I-XII)
1961–1990 CC	37	35	38	46	59	73	64	68	46	38	61	45	263	347	609
2021–2050 ALADIN (korr)	-12	-1	2	12	1	5	-1	-7	6	7	9	1	10	10	21
2071–2100 ALADIN (korr)	-2	-2	-2	2	7	1	-17	-24	-10	5	25	9	31	-39	-7

8. táblázat. A Balaton vízfelületére érkező csapadék 30 éves területi átlaga (mm) és az attól való relatív eltérések a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (%)

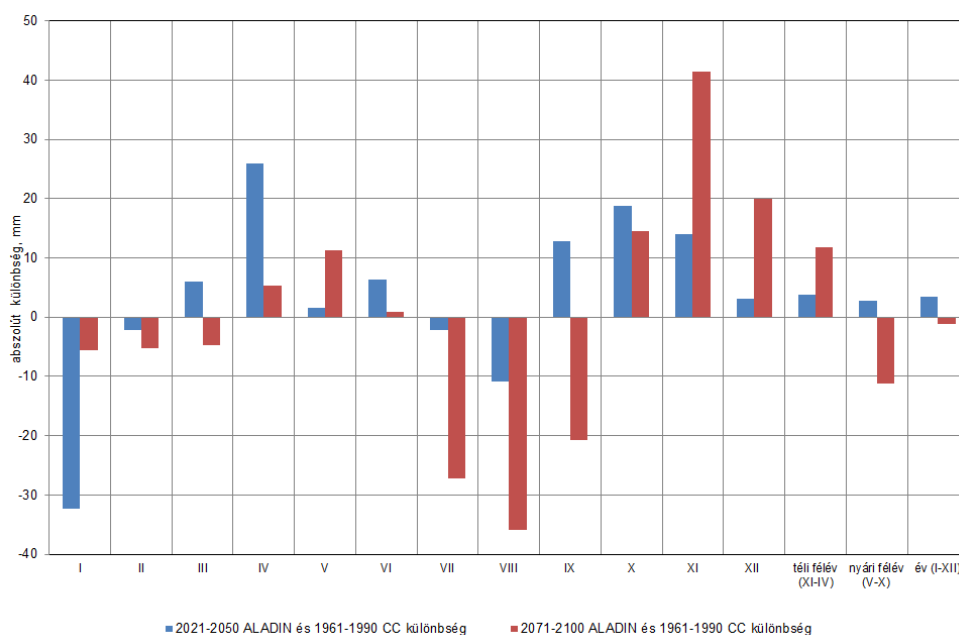
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Téli félév (XI-IV)	Nyári félév (V-X)	Év (I-XII)
1961–1990 CC	37	35	38	46	59	73	64	68	46	38	61	45	263	347	609
2021–2050 ALADIN (korr)	-32	-2	6	26	2	6	-2	-11	13	19	14	3	4	3	3
2071–2100 ALADIN (korr)	-6	-5	-5	5	11	1	-27	-36	-21	15	42	20	12	-11	-1

9. táblázat. A Balaton vízfelületére érkező tényleges és becsült évi csapadék (mm) klímaablakonkénti statisztikai jellemzői

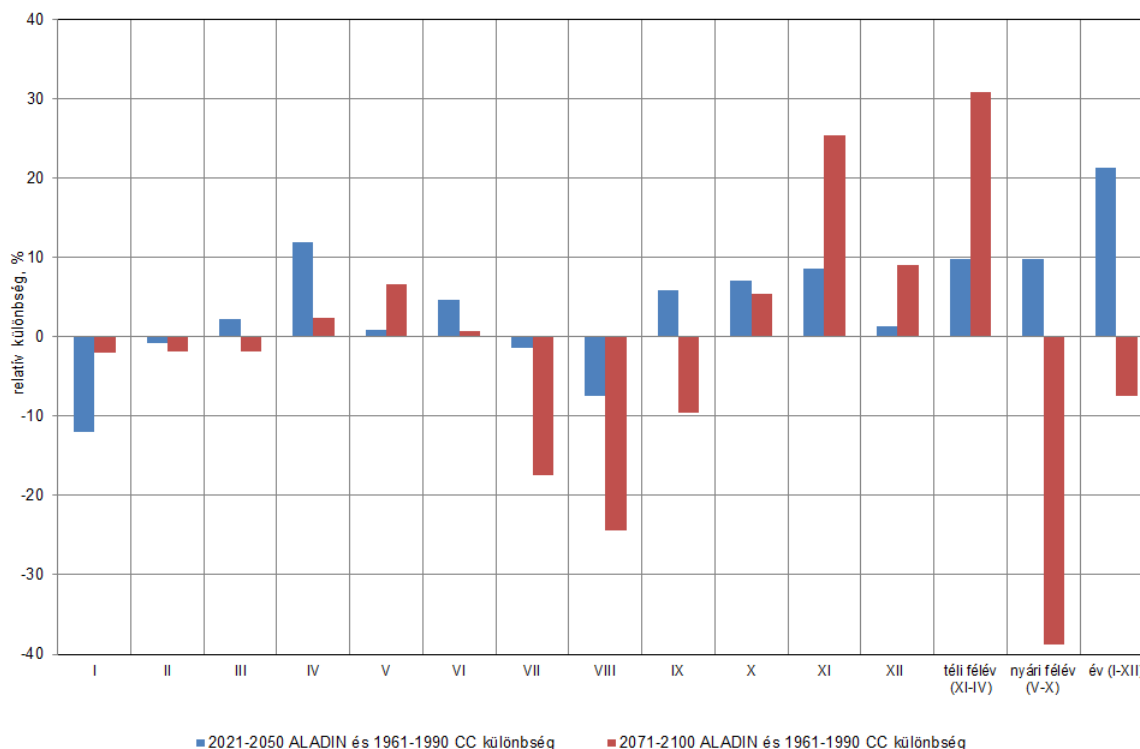
Időszak	Min	Átlag	Max	Szórás
1961–1990 CC	459	609	877	105,61
2021–2050 ALADIN (korr)	386	631	847	122,35
2071–2100 ALADIN (korr)	349	602	808	117,01



16. ábra. A Balaton vízfelületére érkező csapadék 30 éves területi átlagának havi, féleli és évi tény (1961–1990 időszakra) és becsült (2021–2050 és 2071–2100 időszakra) értékei (mm)



17. ábra. A Balaton vízfelületére érkező csapadék 30 éves területi átlaga (mm) és az attól való abszolút eltérések a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (mm)



18. ábra. A Balaton vízfelületére érkező csapadék 30 éves területi átlaga (mm) és az attól való relatív eltérések a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (%)

A 2021–2050 klímaablakra vonatkozó adatokat áttekintve megállapítható, hogy a tó vízfelületére hulló csapadék becsült alakulásában a referencia időszak átlagértékeihez viszonyítva félevesi és évi időhorizonton számottevő mértékű ($\pm 10\%$ -ot meghaladó) változás nem valószínűsíthető. Az egyes hónapokhoz tartozó relatív eltérések szerint áprilisban és a szeptember–november időszakban 10% -ot meghaladó növekedés, ugyanakkor januárban 32% -os, júliusban 11% -os csökkenés mutatkozik. Megjegyezzük, hogy a vizsgált időszak hosszának rövidülése a modelleredmények növekvő bizonytalanságával jár együtt.

A 2071–2100 klímaablakra vonatkozó adatokat áttekintve megállapítható, hogy a tó vízgyűjtő területére hulló csapadék becsült alakulásában a referencia időszak átlagértékeihez viszonyítva évi időhorizonton számottevő mértékű ($\pm 10\%$ -ot meghaladó) változás nem valószínűsíthető. Az évi csapadékösszeg időbeli átrendeződésére utal az az eredmény, hogy félevesi időhorizonton a referencia időszak értékeihez képest nyáron 10% -ot meghaladó csökkenés, télen 10% -ot meghaladó növekedés mutatkozik. A nyári félevesi becsült csapadékcsökkenés súlypontja a július-szeptember időszakra, a téli félevesi csapadéknövekedés súlypontja pedig a november-december időszakra koncentrálódik.

3.3. A Balaton-vízgyűjtő évi középhőmérséklete területi átlagainak számítása a klímaablakokra

Az OMSZ szakértőinek javaslata alapján — a szisztematikus modellhibák minimalizálása céljából — a 2021–2050 és a 2071–2100 idősakra vonatkozó léghőmérséklet adatokat az alábbi korrekcióval vettük figyelembe:

$$\text{ALADIN 2150 (korr.)} = k + \text{CC 6190, ahol } k = \text{ALADIN 2150} - \text{ALADIN 6190 átlag}$$

ALADIN 7100 (korr.) = k + CC 6190, ahol k = ALADIN 7100 — ALADIN 6190 átlag

Az eredményeket a 10–12. táblázatokban és a 19–20. ábrákon szemléltetjük.

10. táblázat. A Balaton-vízgyűjtő évi középhőmérséklete 30 éves területi átlagának havi, félévi és évi tény (1961–1990 időszakra) és becsült (2021–2050 és 2071–2100 időszakra) értékei (°C)

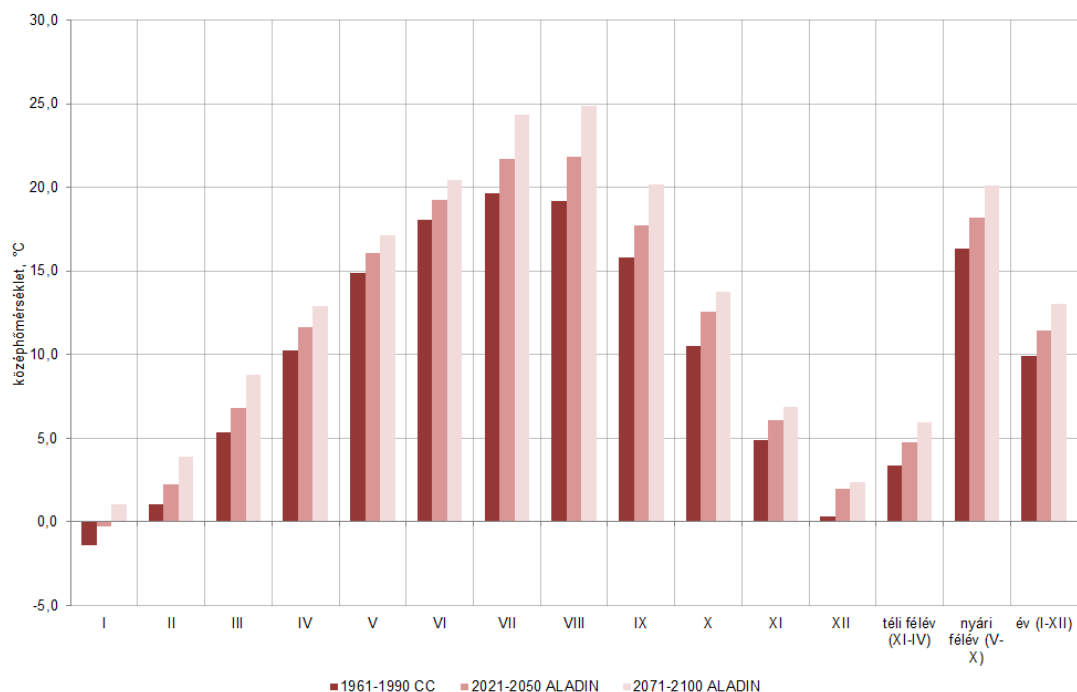
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Téli félév (XI-IV)	Nyári félév (V-X)	Év (I-XII)
1961–1990 CC	-1,4	1,1	5,4	10,2	14,9	18,0	19,7	19,2	15,8	10,5	4,9	0,3	3,4	16,4	9,9
2021–2050 ALADIN (korr)	-0,3	2,3	6,8	11,6	16,1	19,3	21,7	21,8	17,7	12,6	6,1	2,0	4,8	18,2	11,5
2071–2100 ALADIN (korr)	1,0	3,9	8,8	12,9	17,1	20,5	24,3	24,9	20,2	13,7	6,9	2,4	5,9	20,1	13,1

11. táblázat. A Balaton-vízgyűjtő havi, félévi és évi középhőmérsékletének 30 éves területi átlaga (°C) és az attól való abszolút eltérések a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (°C)

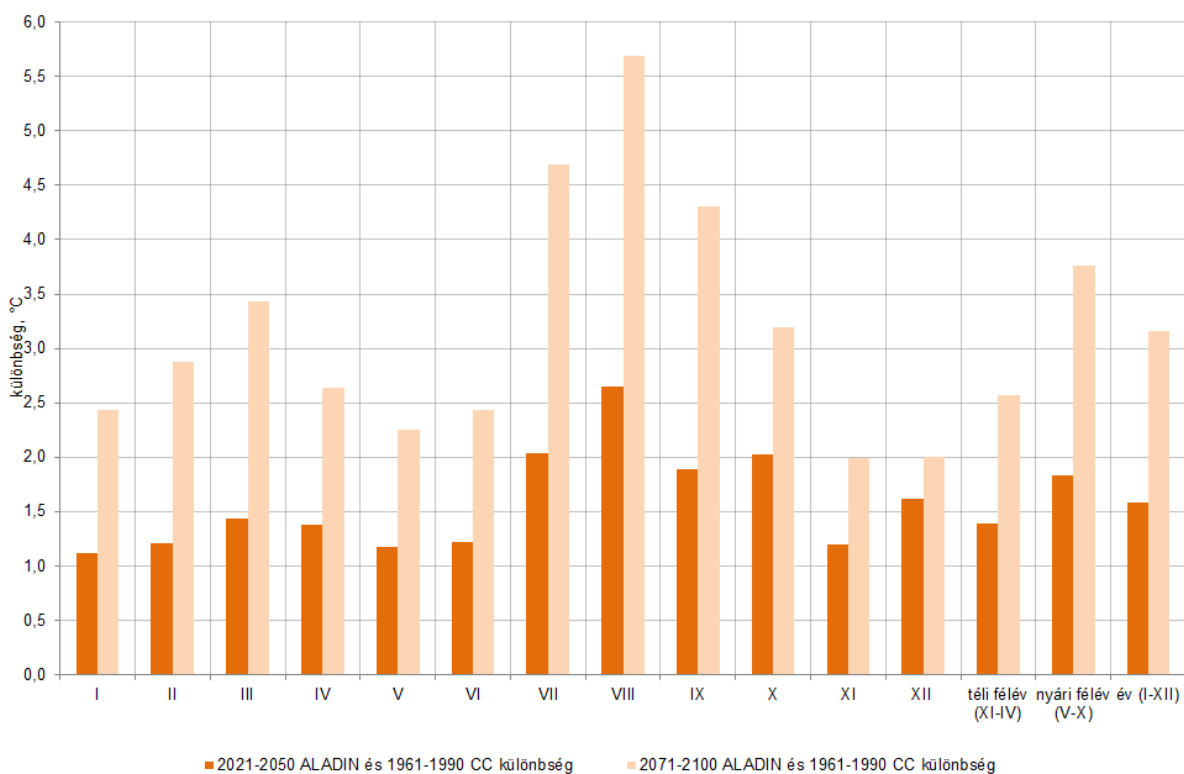
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Téli félév (XI-IV)	Nyári félév (V-X)	Év (I-XII)
1961–1990 CC	-1,4	1,1	5,4	10,2	14,9	18,0	19,7	19,2	15,8	10,5	4,9	0,3	3,4	16,4	9,9
2021–2050 ALADIN (korr)	1,1	1,2	1,4	1,4	1,2	1,2	2,0	2,6	1,9	2,0	1,2	1,6	1,4	1,8	1,6
2071–2100 ALADIN (korr)	2,4	2,9	3,4	2,6	2,3	2,4	4,7	5,7	4,3	3,2	2,0	2,0	2,6	3,8	3,2

12. táblázat. A Balaton-vízgyűjtő évi középhőmérsékletének (°C) klímaablakonkénti statisztikai jellemzői

Időszak	Min	Átlag	Max	Szórás
1961–1990 CC	8,9	9,9	10,8	0,58
2021–2050 ALADIN (korr)	9,6	11,5	13,5	0,79
2071–2100 ALADIN (korr)	11,3	13,1	14,1	0,72



19. ábra. A Balaton-vízgyűjtő évi középhőmérséklete 30 éves területi átlagának havi, félévi és évi tény (1961–1990 időszakra) és becsült (2021–2050 és 2071–2100 időszakra) értékei (°C)



20. ábra. A Balaton-vízgyűjtő havi, félévi és évi középhőmérsékletének a referencia időszak átlagától való abszolút eltérései a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (°C)

A 2021–2050 klímaablakra vonatkozó adatokat áttekintve megállapítható, hogy a Balaton-vízgyűjtő középhőmérsékletének alakulásában a referencia időszak átlagértékeihez viszonyítva félévi és évi időhorizonton számottevő mértékű (1 °C-t meghaladó) változás valószínűsíthető. A nagyobb mértékű melegedés (1,8 °C) a nyári félévre becsülhető. A naptári éven belül a legerőteljesebb hőmérséklet-emelkedés július–október időszakra koncentrálódik. Megjegyezzük, hogy a vizsgált időszak hosszának rövidülése a modelleredmények növekvő bizonytalanságával jár együtt.

A 2071–2100 klímaablakra vonatkozó adatokat áttekintve megállapítható, hogy a Balaton-vízgyűjtő középhőmérsékletének alakulásában a referencia időszak átlagértékeihez viszonyítva félévi és évi időhorizonton számottevő mértékű (2 °C-t meghaladó) változás valószínűsíthető. A nagyobb mértékű melegedés (3,8 °C) a nyári félévre becsülhető. A naptári éven belül a legerőteljesebb hőmérséklet-emelkedés márciusra és a július–október időszakra koncentrálódik. Megjegyezzük, hogy a vizsgált időszak hosszának rövidülése a modelleredmények növekvő bizonytalanságával jár együtt.

3.4 A Balaton-vízgyűjtő évi tényleges párolgása időszakos területi átlagának számítása a klímaablakokra

A vízgyűjtő évi tényleges (területi) párolgásának számítására a hidrológia használja az ún. Turc-képletet, amely kis adatigényű, és viszonylag megbízható eredményt szolgáltat. Ezért a területi párolgás éves értékeit e képlet segítségével számítottuk a csapadékösszeg és az évi középhőmérséklet területi átlagainak felhasználásával:

A Turc-képlet alakja az alábbi:

$$E_{tp}^T = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{K^2}}}$$

ahol $K = 300 + 25 \cdot T + 0,05 \cdot T^3$
 P az évi csapadékösszeg (mm)
 T az évi középhőmérséklet (°C)
 E_{tp}^T a csupasz talaj tényleges párolgása (evaporáció) (mm)

A teljes területi párolgás evaporáción felüli része a talajt borító növényzet párologtatása, a transzspiráció, amelyet a számításoknál az alábbi összefüggés szerint vettünk figyelembe:

$$E_{tp}^e = a \cdot E_{tp}^T$$

ahol E_{tp}^T - a csupasz talaj párolgása (evaporáció) (mm)
 E_{tp}^e - a talaj és a növényzet együttes párolgása (evapotranszspiráció) (mm)
 a - növényzeti konstans

Az „a” növényzeti konstans értékét kísérleti vízgyűjtő területen hosszúidejű mérésorozatokkal határozták meg, amely szerint erdő nélküli (gyeptakaróval, alacsony szintű növényzettel) területen „a” számértéke 1,13; erdővel fedett területen pedig 1,62 (Major 1974).

A vízgyűjtő terület tényleges párolgásának számításánál a 13. táblázatban összefoglalt erdőfedettségi és szabad vízfelület kiterjedés és becsült többletpárolgás adatokat területarányosan vettük figyelembe.

Megjegyezzük, hogy a 2021–2050 és a 2071–2100 időszakra közölt erdőfedettségi és szabad vízfelület felület adatok napjaink aktuális értékei, tekintettel arra, hogy ezek jövőbeni alakulását nem ismerjük.

13. táblázat. A Balaton-vízgyűjtő tényleges párolgásának meghatározásához figyelembe vett erdőfedettségi és szabad vízfelület kiterjedés, valamint becsült többletpárolgás adatok

Időszak	Az erdőfedettség időszakos alapja (%)	Szabad vízfelületek időszakos átlagos felülete (km ²)		Szabad vízfelületek időszakos átlagos többletpárolgása (mm/year)	
		Kis-Balaton Vízüdelmi Rendszer (KBVR)	halastavak, kisebb tározók	Kis-Balaton Vízüdelmi Rendszer (KBVR)	halastavak, kisebb tározók
1961–1990	25	3*	32**	300	250
2021–2050	29	72	37	350	290
2071–2100	29	72	37	400	330

Megjegyzés: *1961–1985: 0 km²; 1986–1990: 18 km², ** 1961–1980: 30 km²; 1981–1990: 37 km².

A vízgyűjtő klímaablakokra számított, évi időhorizontra vonatkozó számított párolgásértékeit a 14. táblázatban foglaltuk össze.

14. táblázat. A Balaton-vízgyűjtő évi tényleges párolgásának (mm/év) klímaablakonkénti statisztikai jellemzői

Időszak	Min	Átlag	Max	Szórás
1961–1990 CC	484	573	640	35,48
2021–2050 ALADIN (korr)	480	622	717	53,33
2071–2100 ALADIN (korr)	501	647	768	69,34

A 14. táblázatban közölt adatokat áttekintve megállapítható, hogy a referencia időszak átlagához képest 2021–2050 között — időszakos átlagban — mintegy 9%-os, 2071–2100 között — időszakos átlagban — mintegy 13%-os tényleges párolgásnövekedés becsülhető.

A 3.1 alfejezetben közöltek szerint a vízgyűjtőre érkező becsült átlagos évi csapadékmennyiség a referencia időszak átlagához képest a jövőbeni klímaablakok időszakos átlagában $\pm 2\%$ -ot nem meghaladó változást valószínűsít. Ez arra utal, hogy a tényleges párolgás becsült növekedésének alapvetően nem a csapadékmennyiség változása az oka.

A tényleges magyarázat minden bizonnyal a becsült hőmérséklet-emelkedésben — az erőteljes melegedésben — keresendő. Az ALADIN-Climate modell a Balaton vízgyűjtő területén a referencia időszak átlagához képest 2021–2050 között átlagosan 1,6 °C-os, 2071–2100 között átlagosan 3,2 °C-os melegedést valószínűsít (3.3. alfejezet).

A jövőbeni klímaablakok időszakában a becslés szerint alig változó átlagos évi csapadékmennyiség mellett a párolgás jelentős mértékű emelkedése valószínűsíthető. Ez a vízgyűjtő területen a csapadék

és tényleges párolgás különbségének csökkenését vetíti előre, ami a Balaton vízháztartása szempontjából jelentős hozzáfolyás-csökkenést eredményezhet.

3.5. A Balaton vízgyűjtő területéről történő évi lefolyás (a Balaton vízháztartásban a hozzáfolyás) időszakos átlagértékeinek számítása a klímaablakokra

A tó vízgyűjtő területéről történő a lefolyást — a vízmérleg maradéktagjaként — a vízgyűjtő területre érkező csapadék és a párolgással onnan távozó vízmennyiség különbségeként értelmezzük.

A tanulmány 3.1. alfejezetében részletesen foglalkoztunk a vízgyűjtőre hulló évi csapadék, a 3.4. alfejezetben pedig a vízgyűjtőről történő évi párolgás klímaablakonkénti időszakos átlagának meghatározásával és értékelésével.

A 15. táblázatban szemléltetjük a csapadék, a párolgás, a kettő különbségeként értelmezett lefolyás és ez utóbbinak a területarányosan a Balaton felületére átszámított és hozzáfolyásnak nevezett a klímaablakok időtartamára vonatkozó időszakos átlagértékeit.

15. táblázat. A csapadék, a területi párolgás és a számított lefolyás alakulása a klímaablakok időszakos átlagában a Balaton vízgyűjtő területén (mm/év)

Időszak	Csapadék (P)	Területi párolgás (ET)	Számított lefolyás (P-ET)	A Balaton számított hozzáfolyása (I)
1961–1990	689	573	116	1001
2021–2050	706	622	84	725
2071–2100	673	647	26	224

A 15. táblázatban közölt adatok szerint — döntően a területi párolgás növekedésének következményeként — a jövőbeni klímaablakok időszakos átlagában a Balaton-vízgyűjtőn a csapadék-párolgás különbség erőteljes csökkenése becsülhető.

Számításaink szerint a 30 éves klímaablakokon belül a negatív előjelű évi csapadék-párolgás különbséggel jellemezhető évek száma az alábbi képet adta:

- az 1961–1990 időszakban 1 év
- a 2021–2050 időszakban 6 év
- a 2071–2100 időszakban 13 év

Azokban az években, amikor a vízgyűjtő területen a csapadék-párolgás különbség negatív előjelű, akkor is van lefolyás, de ez túlnyomó részben felszín alatti vízkészletekből származik. A csapadékosabb évjáratokban a vízgyűjtő területre érkező csapadék eleinte ezeket a hiányzó felszín alatti készleteket pótolja és csak ennek megtörténte után várható a felszíni lefolyás megjelenése.

Tekintve, hogy a felszín alatti vízkészletek vízforgalma és ennek részeként regenerálódása a felszíni vízkészletekhez képest lényegesen lassabban megy végbe, a felszín alatti készleteket érintő változások hatása — mint áthúzódó hatás — több egymást követő évre is kiterjedhet.

3.6. A Balaton vízfelületéről történő párolgás időszakos összegeinek átlagainak számítása a klímaablakokra

A Balaton párolgásának meghatározására 1986-ban a VITUKI és az OMSZ szakmai együttműködésének eredményeként a Meyer-alapképletből a Balatonra adaptált alábbi empirikus formulája került meghatározásra:

$$E_w = a \times (E - e) \times (0,59 + 0,013 \times v) \times n$$

ahol E_w — a szabad vízfelület havi párolgása (mm)

E — a havi középhőmérséklethez tartozó telítési párányomás (mb)

e — a tényleges párányomás havi átlagértéke (mb)

v — havi közepes szélesség (m/s)

n — a hónap napjainak száma

a — tapasztalati állandó:

március $a = 0,7$

április $a = 0,8$

október $a = 1,3$

november $a = 1,4$

(a többi hónapban $a = 1$)

A Balaton vízfelületéről történő párolgás számításához szükséges meteorológiai adatok előkészítéséről és értékeléséről a következő 3 alfejezetben (3.6.1-3.) adunk számot.

3.6.1. A Balaton vízfelülete feletti léghőmérséklet területi átlagának számítása a klímaablakokra

Az OMSZ szakértőinek javaslata alapján — a szisztematikus modellhibák minimalizálása céljából — a 2021–2050 és a 2071–2100 időszakra vonatkozó léghőmérséklet adatokat az alábbi korrekcióval vettük figyelembe:

ALADIN 2150 (korr.) = $k + CC\ 6190$, ahol k = ALADIN 2150 — ALADIN 6190 átlag

ALADIN 7100 (korr.) = $k + CC\ 6190$, ahol k = ALADIN 7100 — ALADIN 6190 átlag

Az eredményeket a 16–18. táblázatokban és a 21–22. ábrákon szemléltetjük.

16. táblázat. A Balaton vízfelülete feletti légtér évi középhőmérséklet 30 éves területi átlagának havi, félévi és évi tény (1961–1990 időszakra) és becsült (2021–2050 és 2071–2100 időszakra) értékei (°C)

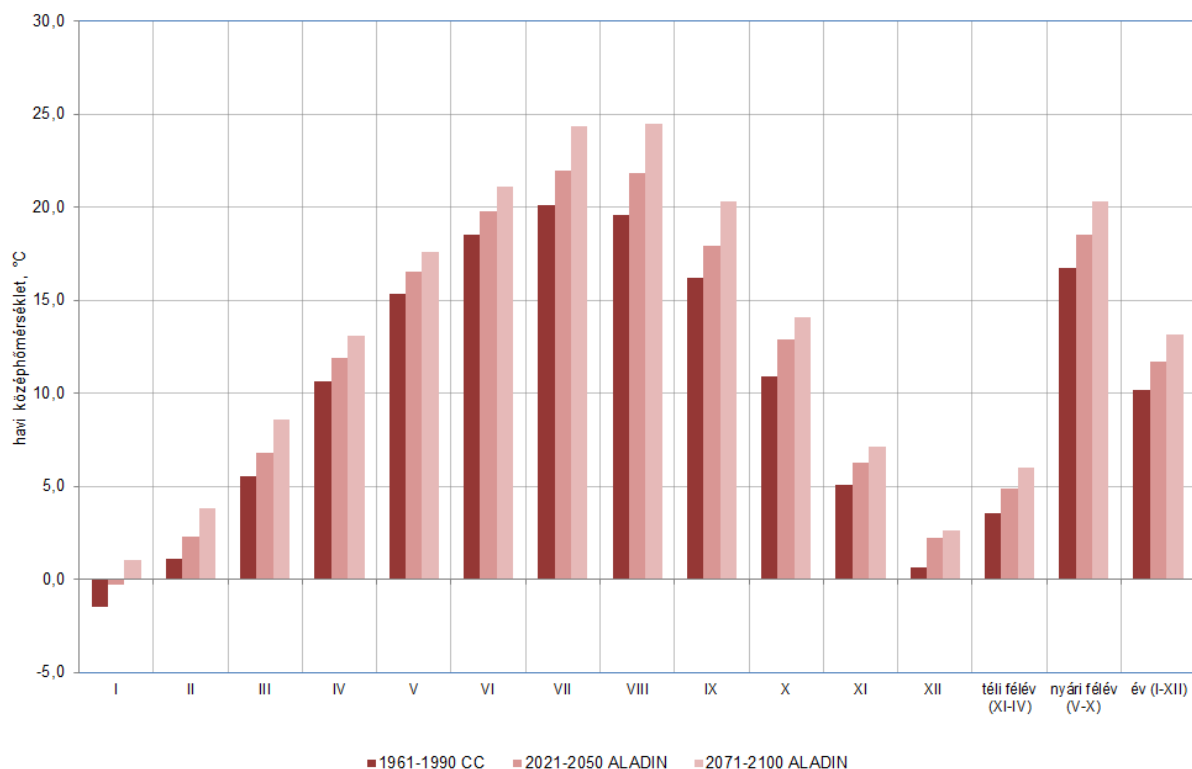
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Téli félév (XI-IV)	Nyári félév (V-X)	Év (I-XII)
1961–1990 CC	-1,5	1,1	5,6	10,6	15,3	18,5	20,1	19,6	16,2	10,9	5,1	0,7	3,5	16,8	10,2
2021–2050 ALADIN	-0,3	2,3	6,8	11,9	16,5	19,8	22,0	21,9	17,9	12,9	6,3	2,2	4,9	18,5	11,7
2071–2100 ALADIN	1,0	3,8	8,6	13,1	17,6	21,1	24,3	24,5	20,3	14,1	7,2	2,6	6,0	20,3	13,2

17. táblázat. A Balaton vízfelülete feletti légtér havi, félévi és évi középhőmérsékletének 30 éves területi átlaga (°C) és az attól való abszolút eltérések a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (°C)

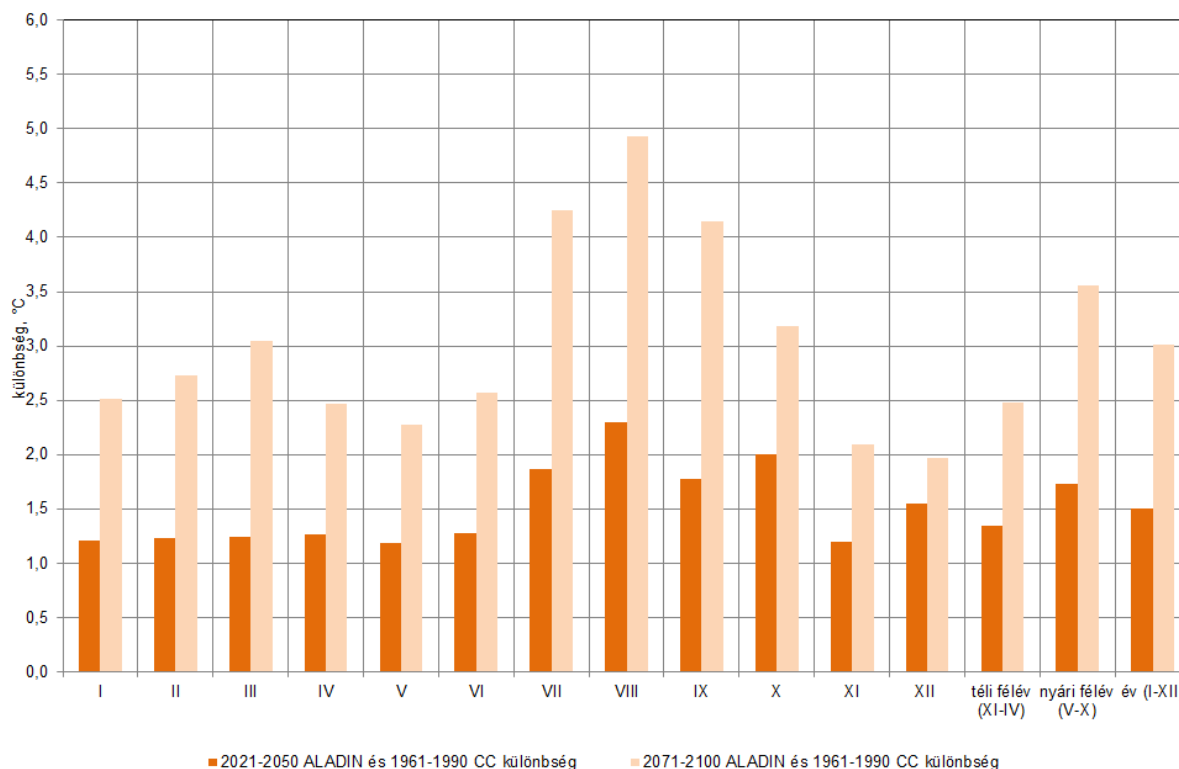
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Téli félév (XI-IV)	Nyári félév (V-X)	Év (I-XII)
1961–1990 CC	-1,5	1,1	5,6	10,6	15,3	18,5	20,1	19,6	16,2	10,9	5,1	0,7	3,5	16,8	10,2
2021–2050 ALADIN	1,2	1,2	1,2	1,3	1,2	1,3	1,9	2,3	1,8	2,0	1,2	1,6	1,3	1,7	1,5
2071–2100 ALADIN	2,5	2,7	3,0	2,5	2,3	2,6	4,3	4,9	4,1	3,2	2,1	2,0	2,5	3,6	3,0

18. táblázat. A Balaton vízfelülete feletti légtér évi középhőmérsékletének (°C) klímaablakonkénti statisztikai jellemzői

Időszak	Min	Átlag	Max	Szórás
1961–1990 CC	9,2	10,2	11,1	0,58
2021–2050 ALADIN	10,1	11,7	13,4	0,65
2071–2100 ALADIN	11,7	13,2	14,1	0,59



21. ábra. A Balaton feletti légtér évi középhőmérséklete 30 éves területi átlagának havi, félévi és évi tény (1961–1990 időszakra) és becsült (2021–2050 és 2071–2100 időszakra) értékei (°C)



22. ábra. A Balaton feletti légtér havi, félévi és évi középhőmérsékletének a referencia időszak átlagától való abszolút eltérései a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (°C)

A 2021–2050 klímaablakra vonatkozó adatokat áttekintve megállapítható, hogy a Balaton feletti légtér középhőmérsékletének alakulásában a referencia időszak átlagértékeihez viszonyítva félévi és évi időhorizonton számottevő mértékű (1 °C-t meghaladó) változás valószínűsíthető. A nagyobb mértékű melegedés (1,7 °C) a nyári félfévre becsülhető. A naptári éven belül a legerőteljesebb hőmérséklet-emelkedés július–október időszakra koncentrálódik. Megjegyezzük, hogy a vizsgált időszak hosszának rövidülése a modelleredmények növekvő bizonytalanságával jár együtt.

A 2071–2100 klímaablakra vonatkozó adatokat áttekintve megállapítható, hogy a Balaton-vízgyűjtő középhőmérsékletének alakulásában a referencia időszak átlagértékeihez viszonyítva félévi és évi időhorizonton számottevő mértékű (2 °C-t meghaladó) változás valószínűsíthető. A nagyobb mértékű melegedés (3,6 °C) a nyári félfévre becsülhető. A naptári éven belül a legerőteljesebb hőmérséklet-emelkedés márciusra és a július–október időszakra koncentrálódik. Megjegyezzük, hogy a vizsgált időszak hosszának rövidülése a modelleredmények növekvő bizonytalanságával jár együtt.

3.6.2. A Balaton vízfelülete feletti relatív nedvesség területi átlagainak számítása a klímaablakokra

Az OMSZ szakértőinek javaslata alapján — a szisztematikus modellhibák minimalizálása céljából — a 2021–2050 és a 2071–2100 időszakra vonatkozó relatív nedvesség adatokat az alábbi korrekcióval vettük figyelembe:

ALADIN 2150 (korr.) = $k + CC\ 6190$, ahol $k = \text{ALADIN 2150} - \text{ALADIN 6190}$ átlag

ALADIN 7100 (korr.) = $k + CC\ 6190$, ahol $k = \text{ALADIN 7100} - \text{ALADIN 6190}$ átlag

Az eredményeket a 19–22. táblázatokban és a 23–25. ábrákon szemléltetjük.

19. táblázat. A Balaton feletti légtér relatív nedvességtartalmának időszakos átlagértékei klímaablakonként (%)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Téli félév (XI-IV)	Nyári félév (V-X)	Év (I-XII)
1961–1990 CC	86,0	79,8	73,7	68,5	70,9	71,6	70,1	73,0	77,2	80,1	83,5	85,1	79,4	73,8	76,6
2021–2050 ALADIN	85,6	79,3	75,1	69,2	70,9	71,0	68,6	70,6	74,4	80,6	83,4	85,7	79,7	72,7	76,2
2071–2100 ALADIN	85,7	79,7	74,6	68,6	69,1	69,5	64,4	65,6	69,8	79,5	82,5	85,2	79,5	69,7	74,5

20. táblázat. A Balaton feletti légtér relatív nedvességtartalmának a jövőbeni klímaablakokra számított értékeinek abszolút eltérése a referencia időszak értékeitől (%)

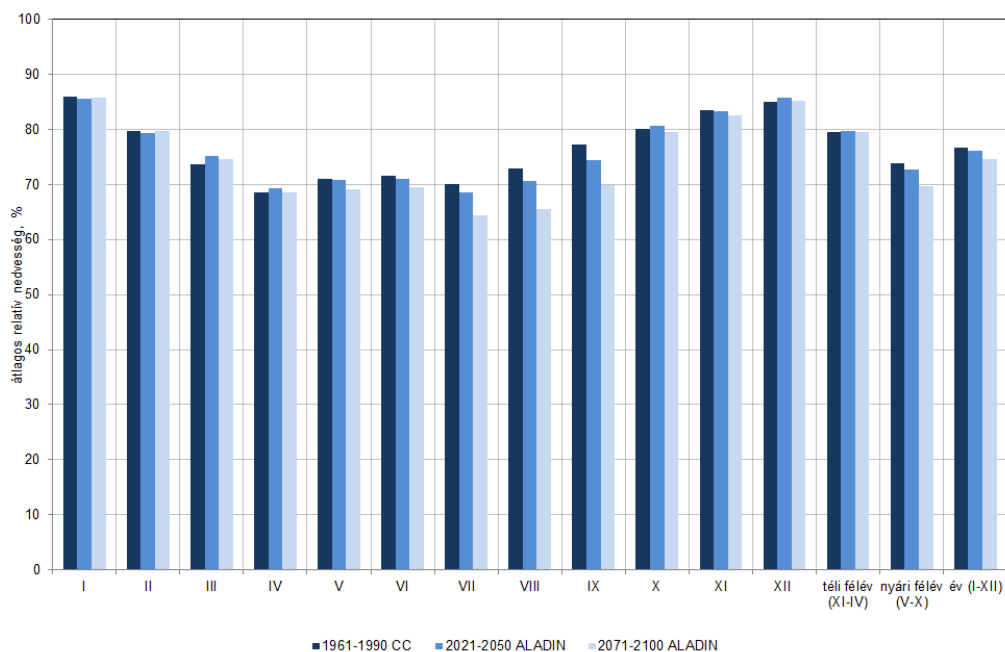
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Téli félév (XI-IV)	Nyári félév (V-X)	Év (I-XII)
1961–1990 CC	86,0	79,8	73,7	68,5	70,9	71,6	70,1	73,0	77,2	80,1	83,5	85,1	79,4	73,8	76,6
2021–2050 ALADIN	-0,4	-0,5	1,4	0,7	0,0	-0,7	-1,5	-2,3	-2,8	0,5	-0,2	0,6	0,2	-1,1	-0,4
2071–2100 ALADIN	-0,3	0,0	0,9	0,1	-1,8	-2,1	-5,7	-7,4	-7,3	-0,6	-1,0	0,1	0,0	-4,2	-2,1

21. táblázat. A Balaton feletti légtér relatív nedvességtartalmának a jövőbeni klímaablakokra számított értékeinek relatív eltérése a referencia időszak értékeitől (%)

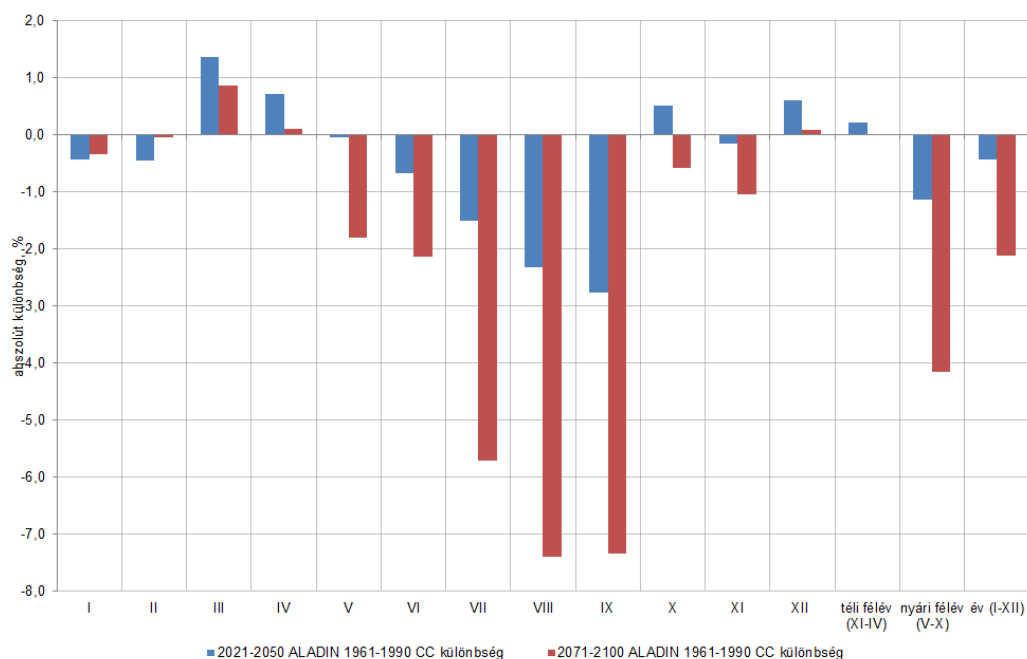
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Téli félév (XI-IV)	Nyári félév (V-X)	Év (I-XII)
1961–1990 CC	86,0	79,8	73,7	68,5	70,9	71,6	70,1	73,0	77,2	80,1	83,5	85,1	79,4	73,8	76,6
2021–2050 ALADIN	-0,5	-0,6	1,8	1,0	-0,1	-0,9	-2,1	-3,2	-3,6	0,6	-0,2	0,7	0,3	-1,5	-0,6
2071–2100 ALADIN	-0,4	0,0	1,2	0,2	-2,5	-3,0	-8,1	-10,1	-9,5	-0,7	-1,2	0,1	0,0	-5,6	-2,8

22. táblázat. A Balaton vízfelülete feletti légtér relatív nedvességének (%) klímaablakonkénti statisztikai jellemzői

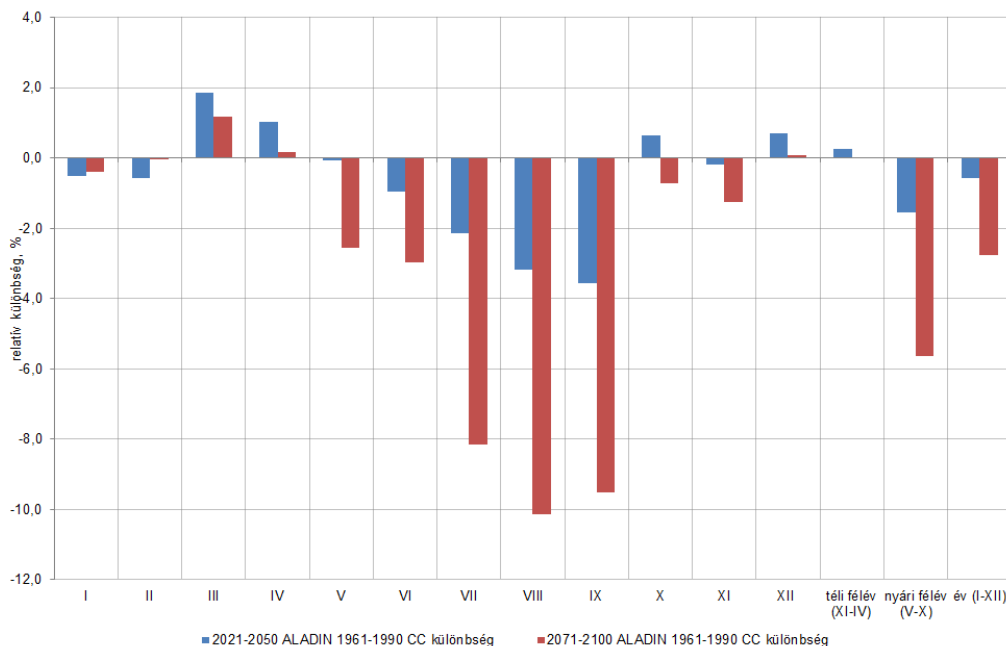
Időszak	Min	Átlag	Max	Szórás
1961–1990 CC	73,7	76,6	79,5	1,4
2021–2050 ALADIN	70,1	76,2	81,4	2,5
2071–2100 ALADIN	69,2	74,5	80,0	2,8



23. ábra. A Balaton feletti légtér relatív nedvessége 30 éves átlagának havi, félévi és évi tény (1961–1990 időszakra) és becsült (2021–2050 és 2071–2100 időszakra) értékei (%)



24. ábra. A Balaton feletti légtér havi, félévi és évi relatív nedvességének a referencia időszak átlagától való abszolút eltérései a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (%)



25. ábra. A Balaton feletti légtér havi, félévi és évi relatív nedvességének a referencia időszak átlagától való relatív eltérései a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (%)

A 2021–2050 klímaablakra vonatkozó adatokat áttekintve megállapítható, hogy a Balaton feletti légtér relatív nedvességtartalmának alakulásában a referencia időszak átlagértékeihez viszonyítva félévi és évi időhorizonton számottevő mértékű (5%-ot meghaladó) változás nem valószínűsíthető. A nagyobb mértékű relatív nedvességtartalom változás (csökkenés) a július–augusztus időszakban mutatkozik (21. táblázat, 25. ábra). Megjegyezzük, hogy a vizsgált időszak hosszának rövidülése a modelleredmények növekvő bizonytalanságával jár együtt.

A 2071–2100 klímaablakra vonatkozó adatokat áttekintve megállapítható, hogy a Balaton feletti légtér relatív nedvességtartalmának alakulásában a referencia időszak átlagértékeihez viszonyítva félévi és évi időhorizonton számottevő mértékű (5%-ot meghaladó) változás a nyári félévben valószínűsíthető. A nagyobb mértékű relatív nedvességtartalom változás (csökkenés) a július–szeptember időszakban mutatkozik (21. táblázat, 25. ábra). Megjegyezzük, hogy a vizsgált időszak hosszának rövidülése a modelleredmények növekvő bizonytalanságával jár együtt.

3.6.3. A Balaton vízfelülete feletti szélesebbesség területi átlagainak számítása a klímaablakokra

Az OMSZ szakértőinek javaslata alapján — a szisztematikus modellhibák minimalizálása céljából — a 2021–2050 és a 2071–2100 időszakra vonatkozó szélesebbesség adatokat az alábbi korrekcióval vettük figyelembe:

$$\text{ALADIN 2150 (korr.)} = (\text{CC 6190}) * k, \text{ ahol } k = (\text{ALADIN 2150}) / (\text{ALADIN 6190 átlag})$$

$$\text{ALADIN 7100 (korr.)} = (\text{CC 6190}) * k, \text{ ahol } k = (\text{ALADIN 7100}) / (\text{ALADIN 6190 átlag})$$

Az eredményeket a 23–26. táblázatokban és a 26–28. ábrákon szemléltetjük.

23. táblázat. A Balaton feletti légtér szélességének időszakos átlagértékei klímaablakonként (m/s)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Téli félév (XI-IV)	Nyári félév (V-X)	Év (I-XII)
1961–1990 CC	3,0	3,2	3,4	3,7	3,4	3,2	2,6	2,4	2,8	2,4	2,9	3,1	3,2	2,8	3,0
2021–2050 ALADIN	2,8	3,1	3,3	3,8	3,0	3,3	2,7	2,5	2,8	2,5	2,9	3,1	3,2	2,8	3,0
2071–2100 ALADIN	2,7	3,1	3,1	3,6	3,5	3,6	2,6	2,4	2,6	2,2	3,0	3,1	3,1	2,8	3,0

24. táblázat. A Balaton feletti légtér átlagos szélességének a jövőbeni klímaablakokra számított értékeinek abszolút eltérése a referencia időszak értékeitől (m/s)

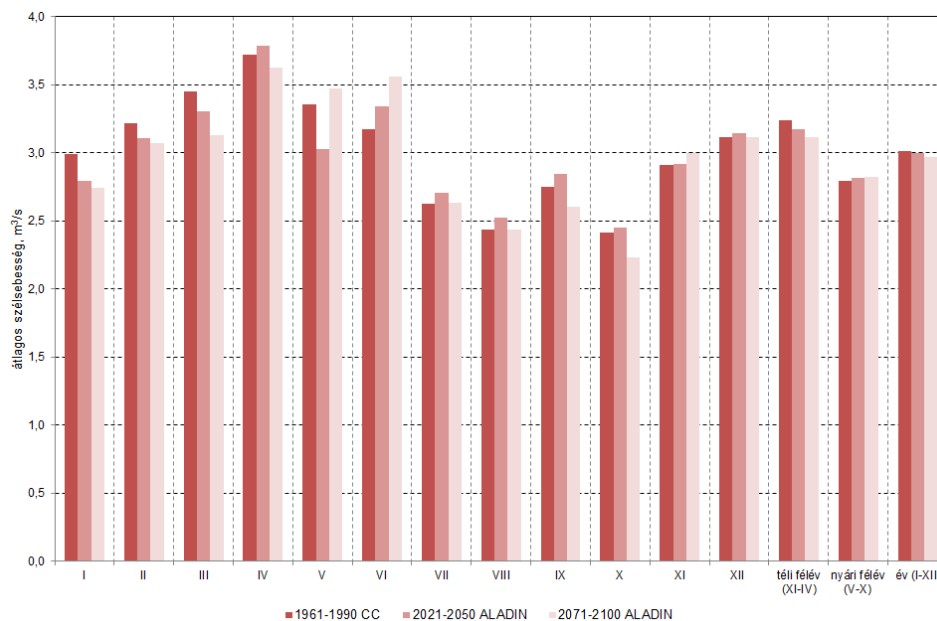
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Téli félév (XI-IV)	Nyári félév (V-X)	Év (I-XII)
1961–1990 CC	3,0	3,2	3,4	3,7	3,4	3,2	2,6	2,4	2,8	2,4	2,9	3,1	3,2	2,8	3,0
2021–2050 ALADIN	-0,2	-0,1	-0,1	0,1	-0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0
2071–2100 ALADIN	-0,3	-0,1	-0,3	-0,1	0,1	0,4	0,0	0,0	-0,1	-0,2	0,1	0,0	-0,1	0,0	0,0

25. táblázat. A Balaton feletti légtér átlagos szélességének a jövőbeni klímaablakokra számított értékeinek relatív eltérése a referencia időszak értékeitől (%)

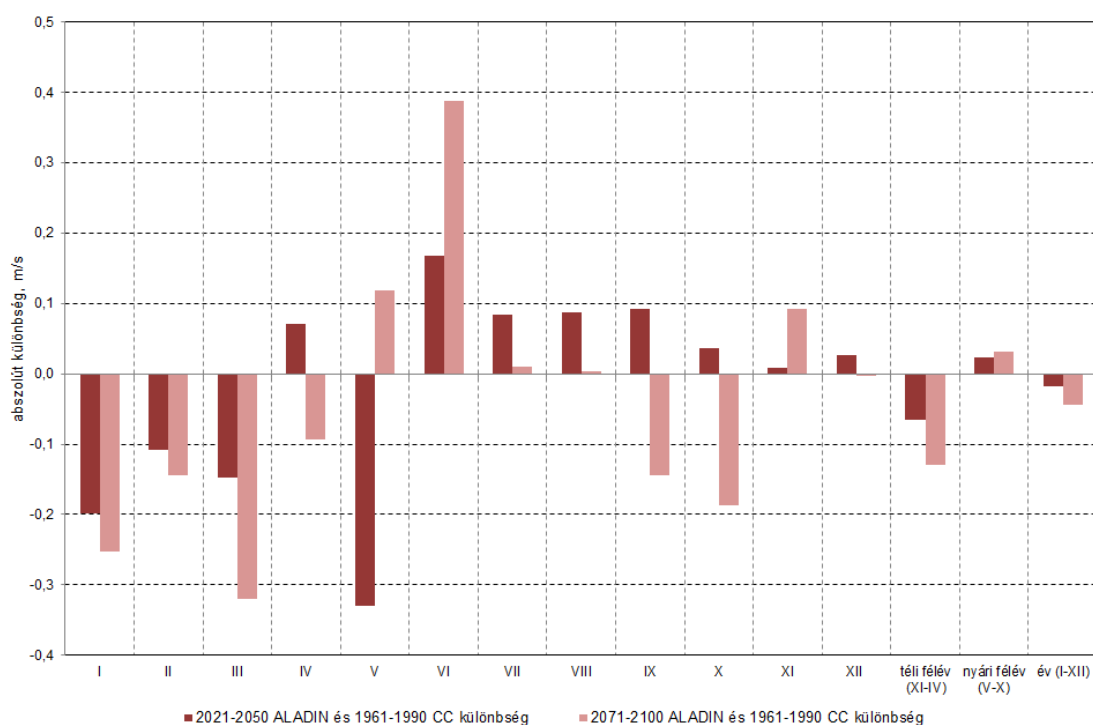
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Téli félév (XI-IV)	Nyári félév (V-X)	Év (I-XII)
1961–1990 CC	3,0	3,2	3,4	3,7	3,4	3,2	2,6	2,4	2,8	2,4	2,9	3,1	3,2	2,8	3,0
2021–2050 ALADIN	-6,6	-3,4	-4,3	1,9	-9,8	5,3	3,2	3,6	3,3	1,5	0,3	0,9	-2,0	0,8	-0,6
2071–2100 ALADIN	-8,5	-4,5	-9,3	-2,5	3,5	12,2	0,4	0,2	-5,2	-7,7	3,2	-0,1	-4,0	1,1	-1,5

26. táblázat. A Balaton vízfelülete feletti légtér szélességének (m/s) klímaablakonkénti statisztikai jellemzői

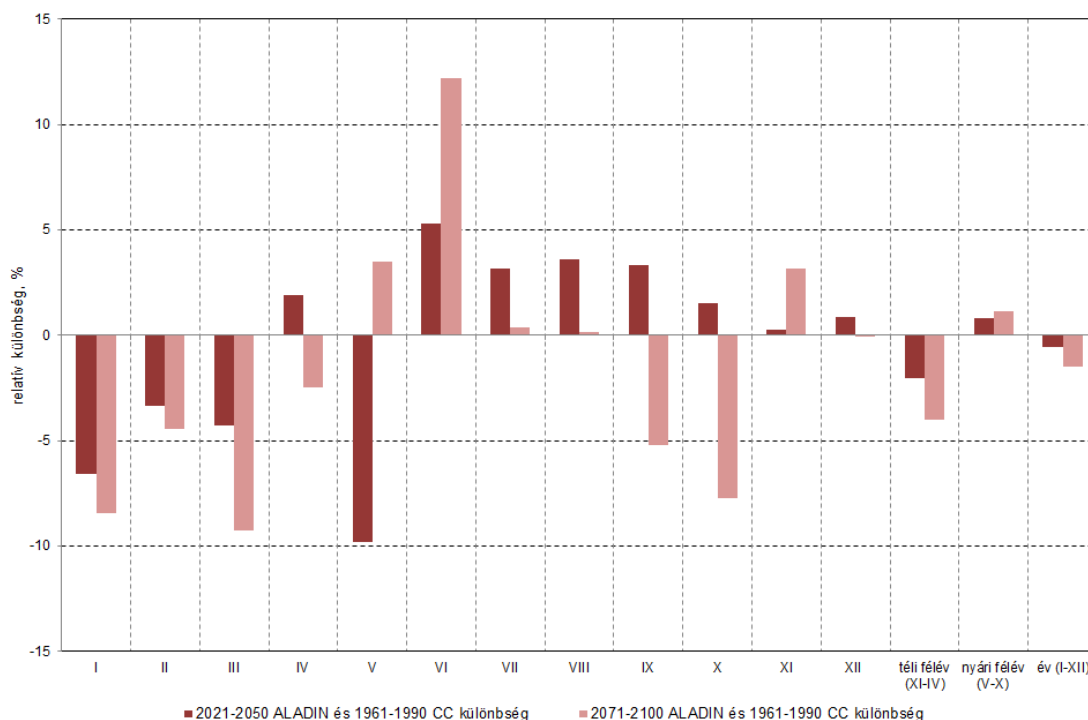
Időszak	Min	Átlag	Max	Szórás
1961–1990 CC	2,7	3,0	3,7	0,2
2021–2050 ALADIN	2,7	3,0	3,4	0,2
2071–2100 ALADIN	2,6	3,0	3,4	0,2



26. ábra. A Balaton feletti légtér átlagos szélességének havi, félévi és évi tény (1961–1990 időszakra) és becsült (2021–2050 és 2071–2100 időszakra) értékei (m/s)



27. ábra. A Balaton feletti légtér havi, félévi és évi átlagos szélességének a referencia időszak átlagától való abszolút eltérései a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (m/s)



28. ábra. A Balaton feletti légtér havi, félévi és évi átlagos szélességének a referencia időszak átlagától való relatív eltérései a jövőbeni klímaablakok (2021–2050 és 2071–2100) idején (%)

A 2021–2050 klímaablakra vonatkozó adatokat áttekintve megállapítható, hogy a Balaton feletti légtér átlagos szélességének alakulásában a referencia időszak átlagértékeihez viszonyítva félévi és évi időhorizonton számottevő mértékű (5%-ot meghaladó) változás nem valószínűsíthető. Havi szinten 5% feletti eltérés január, május és június hónapban mutatkozott (25. táblázat, 28. ábra). Megjegyezzük, hogy a vizsgált időszak hosszának rövidülése a modelleredmények növekvő bizonytalanságával jár együtt.

A 2071–2100 klímaablakra vonatkozó adatokat áttekintve megállapítható, hogy a Balaton feletti légtér átlagos szélességének alakulásában a referencia időszak átlagértékeihez viszonyítva félévi és évi időhorizonton számottevő mértékű (5%-ot meghaladó) változás nem valószínűsíthető. Havi szinten 5% feletti eltérés január, március, június, szeptember és október hónapban mutatkozott (25. táblázat, 28. ábra). Megjegyezzük, hogy a vizsgált időszak hosszának rövidülése a modelleredmények növekvő bizonytalanságával jár együtt.

3.6.4. A Balaton párolgásának számítása a klímaablakokra

A 3.6.1-3. alfejezetekben részletezett adatelőkészítést követően a 3.6. alfejezet elején bemutatott párolgászámító formula használatával a klímaablakok időszakaira számítottuk a Balaton párolgását. A formula teljes körű használatához a telítési hiány — telítési és a tényleges párányomás (E-e) különbség — „E” (telítési párányomás) tagját a léghőmérséklet ismeretében a Sprung-formula használatával, a különbség „e” (tényleges párányomás) tagját a telítési párányomás és a relatív nedvesség szorzataként határoztuk meg.

Az eredményeket a 27–30. táblázatokban és 29–31. ábrákon szemléltetjük.

27. táblázat. A Balaton párolgásának a klímaablakok havi, félévi és évi időszakaira számított átlagértékei (tómm)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Téli félév (XI-IV)	Nyári félév (V-X)	Év (I-XII)
1961–1990 CC	15	24	34	62	100	115	137	119	79	65	39	19	191	615	807
2021–2050 ALADIN	17	27	35	67	108	129	163	149	99	72	41	20	207	720	926
2071–2100 ALADIN	18	29	39	72	123	147	214	206	135	83	47	22	226	909	1137

28. táblázat. A Balaton párolgásának a jövőbeli klímaablakokra számított értékeinek abszolút eltérése a referencia időszak értékeitől (tómm)

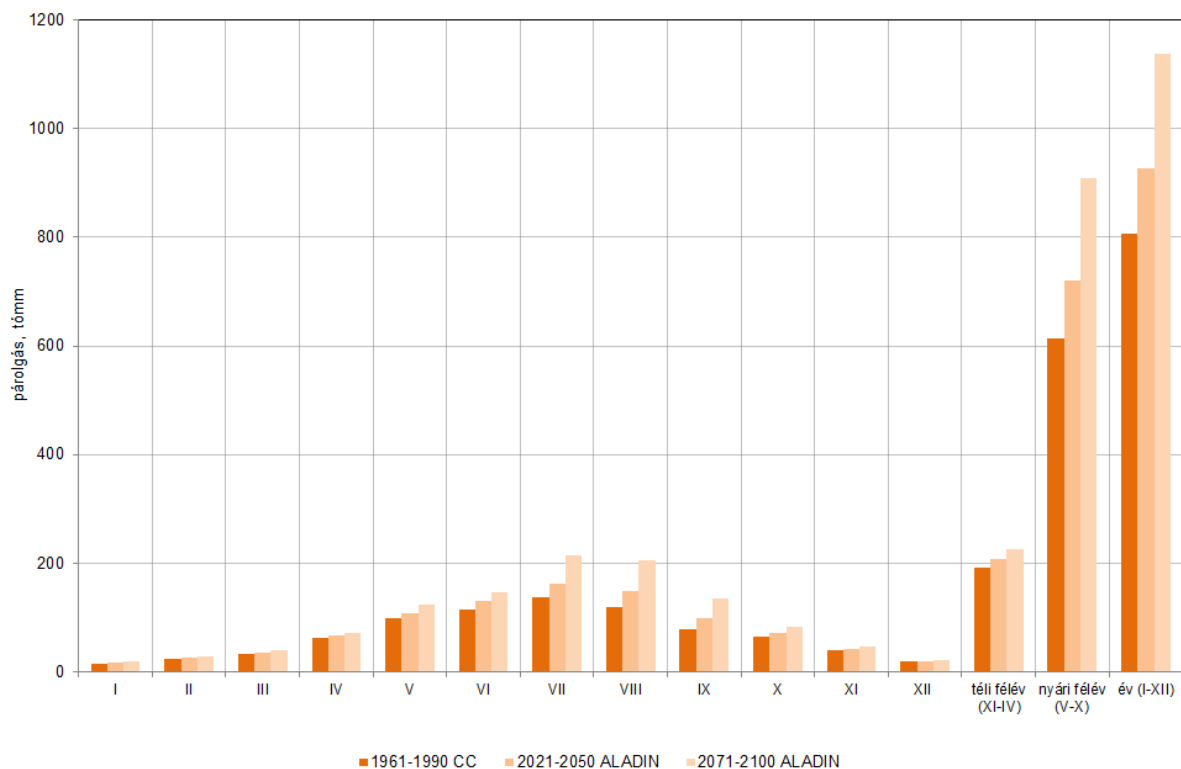
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Téli félév (XI-IV)	Nyári félév (V-X)	Év (I-XII)
1961–1990 CC	15	24	34	62	100	115	137	119	79	65	39	19	191	615	807
2021–2050 ALADIN	2	2	1	5	8	15	26	30	20	6	3	2	16	105	926
2071–2100 ALADIN	4	5	5	10	23	32	78	87	56	18	8	3	35	295	1137

29. táblázat. A Balaton párolgásának a jövőbeli klímaablakokra számított értékeinek relatív eltérése a referencia időszak értékeitől (%)

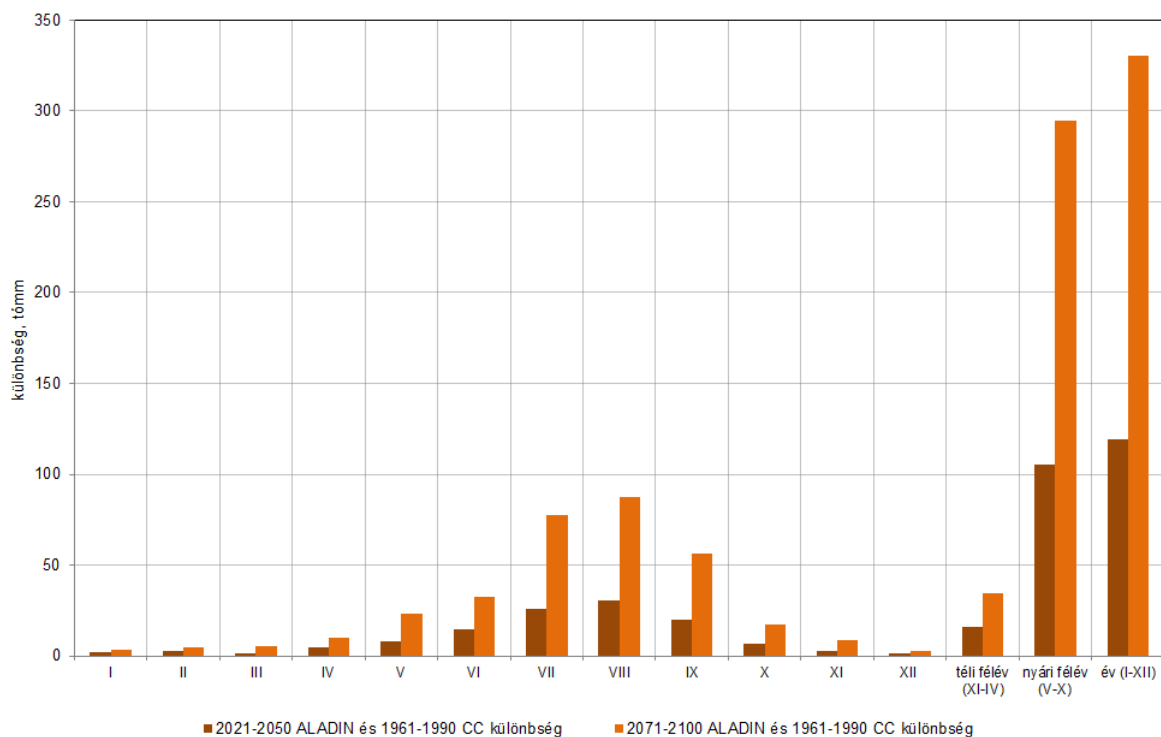
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Téli félév (XI-IV)	Nyári félév (V-X)	Év (I-XII)
1961–1990 CC	15	24	34	62	100	115	137	119	79	65	39	19	191	615	807
2021–2050 ALADIN	15	10	4	8	8	13	19	25	25	10	7	8	8	17	15
2071–2100 ALADIN	24	19	16	17	24	28	57	73	71	27	22	16	18	48	41

30. táblázat. A Balaton párolgásának klímaablakonkénti statisztikai jellemzői (tómm)

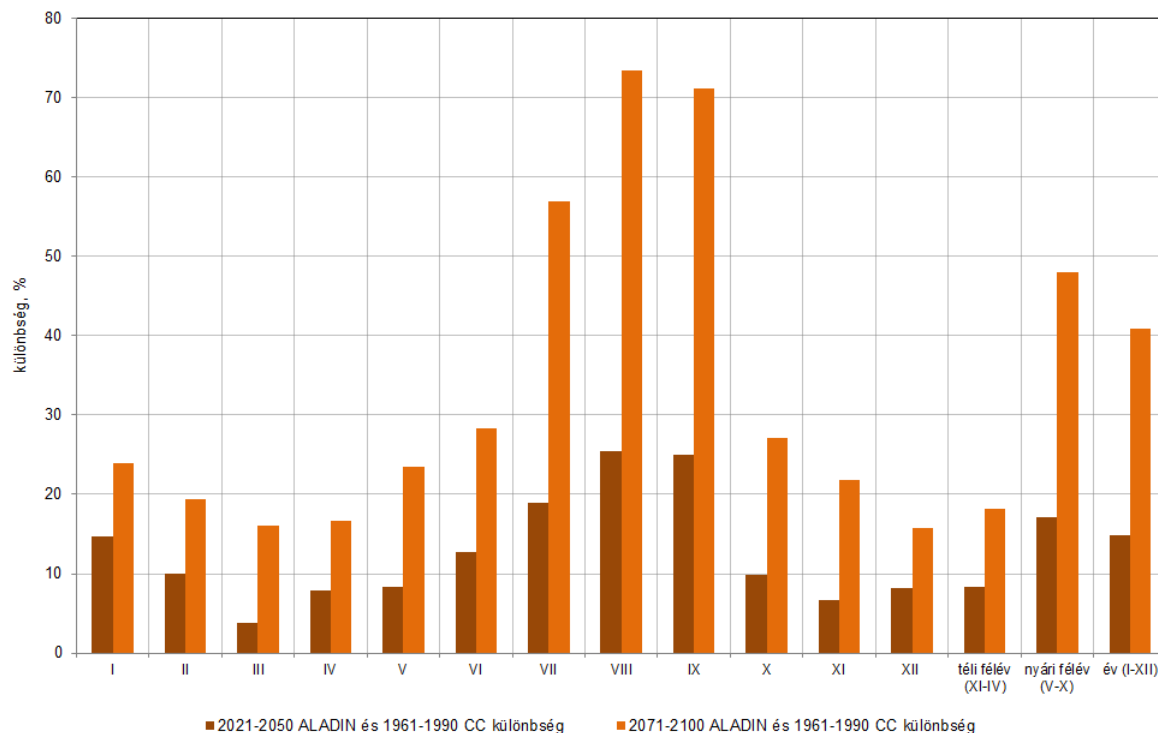
Időszak	Min	Átlag	Max	Szórás
1961–1990 CC	702	807	938	66,3
2021–2050 ALADIN	658	926	1364	151,4
2071–2100 ALADIN	740	1137	1472	179,1



29. ábra. A Balaton párolgásának a klímaablakok havi, félévi és évi időszakaira számított átlagértékei (tómm)



30. ábra. A Balaton párolgásának a jövőbeli klímaablakokra számított értékeinek abszolút eltérése a referencia időszak értékeitől (tómm)



31. ábra. A Balaton párolgásának a jövőbeli klímaablakokra számított értékeinek relatív eltérése a referencia időszak értékeitől (%)

A 2021–2050 klímaablakra vonatkozó adatokat áttekintve megállapítható, hogy a Balaton párolgásának alakulásában a referencia időszak átlagértékeihez viszonyítva félévi és évi időhorizonton számottevő mértékű (10%-ot meghaladó) változás valószínűsíthető. Havi szinten 15% feletti eltérés július–szeptember időszakban állapítható meg (29. táblázat, 31. ábra). Megjegyezzük, hogy a vizsgált időszak hosszának rövidülése a modelleredmények növekvő bizonytalanságával jár együtt.

A 2071–2100 klímaablakra vonatkozó adatokat áttekintve megállapítható, hogy a Balaton párolgásának alakulásában a referencia időszak átlagértékeihez viszonyítva nyári félévi és évi időhorizonton számottevő mértékű (40%-ot meghaladó növekedés!) változás valószínűsíthető. Havi szinten referencia időszakhoz képest a legnagyobb eltérések (57–73%!) a július–szeptember időszakban mutatkozott (29. táblázat, 31. ábra). Megjegyezzük, hogy a vizsgált időszak hosszának rövidülése a modelleredmények növekvő bizonytalanságával jár együtt.

A Balaton párolgásának becsült nagymértékű növekedése lényegében azzal magyarázható, hogy a melegedéssel a magasabb léghőmérséklethez magasabb telítési párányomás (E) érték tartozik, ugyanakkor a klímamodell mindkét jövőbeni klímaablakra (azon belül a nyári félévi időszakra) csökkenő relatív nedvességet valószínűsít. Ez együttesen az jelenti, hogy a levegő telítési hiányának — a telítési és a tényleges párányomás különbsége ($E-e$) — erőteljes növekedése valószínűsíthető. A telítési hiányt a Balaton párolgásának számítására alkalmazott empirikus formula tartalmazza, arra kiemelten érzékeny.

3.7. A Balaton évi természetes vízkészlet-változásának számítása a klímaablakokra

A Balaton vízháztartásban a természetes vízkészlet-változás azon vízháztartási tényezők algebrai összegét értjük, amik térbeli és időbeli alakulása csak természeti tényezők által meghatározott. Ezek: a tó felületére hulló csapadék, a tóhoz történő hozzáfolyás és a tó felületéről történő párolgás.

Jelen tanulmány 3.6.1-4. alfejezeteiben az 1961–1990 referencia időszakra és a két jövőbeni klímaablakra (2021–2050 és 2071–2100) meghatároztuk és értékeltük azokat a meteorológiai és hidrológia tényezőket, amikre szükség van a Balaton évi természetes vízkészlet-változásának jövőre vonatkozó becsléséhez.

Az elvégzett számítások eredményeit a 31. táblázatban mutatjuk be.

31. táblázat. A Balaton természeti tényezők által meghatározott vízháztartási tényezőinek és az ezekből származtatott természetes vízkészlet-változás becsült évi átlagértékei (tómm/év)

Időszak	Csapadék	Hozzáfolyás	Párolgás	Természetes vízkészlet-változás
1961–1990 CC	609	1001	807	803
2021–2050 ALADIN	631	725	926	430
2071–2100 ALADIN	602	224	1137	-311

Megjegyzés: 1 tómm ~ 600000 m³ vízmennyiségnek felel meg

Számításaink szerint a 30 éves klímaablakokon belül a negatív előjelű évi természetes vízkészlet-változással jellemezhető évek száma az alábbi képet adta:

- az 1961–1990 időszakban 7 év
- a 2021–2050 időszakban 9 év
- a 2071–2100 időszakban 19 év

Az ALADIN-Climate modell jövőbeni klímaablakokra vonatkozó becslései szerint a Balaton vízgyűjtő területén jelentős éghajlatváltozás következhet be a 2021–2050 és a 2071–2100 időszakban a viszonyítási időszakban (1961–1990) mért éghajlati adatokhoz képest. A legmarkánsabb és leghatározottabb változás a hőmérséklet becsült emelkedésben mutatkozik meg. A hőmérséklet emelkedése több többletenergiát szolgáltat a párolgás számára, aminek következtében a vízgyűjtő területen és a szabad vízfelületen egyaránt a párolgás növekedése valószínűsíthető. A vízgyűjtő területen a területi párolgás (az evaporáció és a transzspiráció együttes folyamata) növekedése valószínűsíthető, még akkor is, ha a párolgás számára hozzáférhető vízkészlet jellemzően korlátos. A növekvő területi párolgás miatt megváltozik a vízgyűjtő vízháztartási képe, ami a párolgásnövekedés következményeként jelentős lefolyáscsökkenést eredményez.

A lefolyáscsökkenés a Balaton a vízmérlegének bevételi oldalán hiányt okoz és a vízháztartás deficitességét erősíti.

A párolgás növekedése még erőteljesebben mutatkozik meg a korlátlan vízellátottságú szabad vízfelületen. A vízháztartási mérleg kiadási oldalának súlya nő, a vízmérleg alakulását a kiadási oldal határozza meg.

Összességében a Balaton vízháztartásában a bevételi oldal csökkenése és a kiadási oldal növekedése valószínűsíthető. Ez a kettős hatás a referencia időszak átlagos viszonyaihoz képest — különösen a második jövőbeli klímaablak időszakában (2071–2100) — alapvetően megváltoztatja a tó hidrológiai képét. A tó vízcseré-aktivitása jelentősen romlik, gyakrabban és tartósabban fordulnak elő lefolyástalan időszakok, sőt a 21. század utolsó évtizedeiben a Balaton gyakorlatilag lefolyástalan tóvá változhat.

Nem hagyható figyelmen kívül az a tény sem, hogy a tartósan deficités vízháztartási helyzet miatt a tó fokozatosan új hidrológiai egyensúlyi állapot felé mozdul el. Ez a vízszintcsökkenés mellett felületcsökkenést is jelent. Ennek a változásnak a következtében a vízmérlegelemek szélsőségei mérséklődhetnek, ugyanakkor a tó hasznosításával kapcsolatos igények fenntartható kielégítése napjainkban ismert tartalmában és formájában nem lesz lehetséges.

A természetes vízkészlet-változás jövőbeli alakulásának egyik kézenfekvő kérdése az, hogy a változás folyamatában mikorra becsülhető az előjelváltás bekövetkezésének ideje, azaz mikortól lehet számítani arra, hogy a tó vízforgalmában a természetes bevétel (csapadék+hozzáfolyás) elmarad a természetes kiadástól (párolgás). A kérdésről többször konzultáltunk a tanulmány készítésében közreműködő meteorológus szakértőkkel.

A konzultációk tartalma a következőkben foglalható össze.

Elméletileg lehetne olyan vizsgálatot végezni, hogy nem csak a 2021–2050 és a 2071–2100 időszakra készülne el a meteorológiai és az erre alapozott hidrológiai számítások, hanem a 30 éves időszak évenkénti vagy 5 évenkénti 2100-ig történő előremozgatásával. Ez megmutatna egyfajta időbeliséget is, de ennek a feltétele az, hogy a meteorológiai adatok a teljes időszakra — megszakítás nélkül — rendelkezésre álljanak.

Jelen tanulmány készítésekor az MFGI csak a figyelembe vett klímaablakok időtartamára rendelkezett meteorológiai adatokkal (a tanulmány elkészítéséhez ezeket használtuk fel).

A klímaablakok közötti időszakokra az OMSZ rendelkezik adatokkal, amiket térítés ellenében tud átadni további vizsgálatok és elemzések céljából.

Az éghajlat várható változásának becslése — ezen belül az egyes éghajlati elemek értékeinek becsült alakulása — hibákkal, bizonytalanságokkal terhelt, amik elkerülhetetlenül — a hidrológiai számítások módszertanában meglévő hibák, bizonytalanságok és általánosítások mellett — erősítik a hidrológiai számítási eredmények bizonytalanságát.

Jelen tanulmányban a Balaton vízháztartásának azon tényezőivel foglalkozunk, ami időbeli alakulását alapvetően a természeti tényezők határozzák meg. A teljes vízforgalom alakulásában — ami végeredményben összegzetten a vízállás változásában mutatkozik meg — a természeti tényezők szerepe mellett nem hagyható figyelmen kívül az antropogén hatás.

Ezen hatások közül a legfontosabbak a következők.

A Balaton alulról szabályozott tó, ami azt jelenti, hogy lefolyása a Sión keresztül szabályozottan történik. A vízszint-szabályozás elvei és gyakorlata a tó vízjárásához igazodik, ennek jövőbeli módosulásai nem ismertek. Napjainkban a medertározás növelésével (a vízszint-szabályozási sáv felső határának 5–10 cm-es emelésével) igyekeznek a negatív vízháztartási szélsőségek következtében kialakuló kisvizek szintjét emelni. Ez jó megoldás, ugyanakkor kérdés az, hogy ez a megoldás több évtizedes időtávlatban elegendőnek bizonyul-e a fenntartható tóhasználat igényeinek kielégítésre. Jelen tanulmány eredményei szerint erre a kérdésre a válasz egyértelműen nemleges.

A vízgyűjtő területen létező és a tavat közvetlenül érintő vízhasználatok (vízkivételek, vízbevezetések a vízrendszerben) is hatással vannak a vízforgalomra. Ugyancsak tekintettel kell lenni a vízgyűjtő területhasználatára, annak természetes és emberi hatásra történő változásaira (erdősültség, művelési ágak és módszerek változása, a lefolyás szabályozása, szabad vízfelületek kiterjedésének változása, stb.)

A felsorolt antropogén tényezők hosszú távú (6–8 évtizedre előretekintő) alakulását gyakorlatilag lehetetlen megbecsülni. Ez a tény további bizonytalansággal terheli a „vízügyi szektor” eredményeit, egyúttal azok felhasználásával kapcsolatban nagyfokú óvatosságra és a bizonytalanságok kiemelésére hívja fel a figyelmet.

4 A BALATON VÍZFORGALMÁBAN A VISZONYÍTÁSI IDŐSZAKHOZ (1961–1990) KÉPEST A 21. SZÁZADI KÉT KLÍMAABLAKBAN (2021–2050 ÉS 2071–2100) VÁRHATÓ VÁLTOZÁSOK ÖSSZEFOGLALÓ ÉRTÉKELÉSE ÉS ÖSSZEVETÉSE KORÁBBI HASONLÓ CÉLLAL KÉSZÜLT EREDMÉNYEIVEL

Hazai nagytavaink (Balaton, Velencei-tó, Fertő-tó, Tisza-tó) kivétel nélkül jellegzetes sekély tavak, átlagmélységük nem haladja meg az 5 m-t. A mérsékelt éghajlati öv sekély tavainak fontos jellemzője a környezeti (ezen belül az éghajlati) tényezők tér- és időbeli változásaira való nagyfokú mennyiségi és minőségi érzékenység.

A mennyiségi érzékenység a tó vízháztartásának (jellemző vízforgalmának) alakulásában, ennek következményeként vízszintjének, vízkészletének és vízfelületének változásában nyilvánul meg.

Jelen tanulmányban a Balaton vízháztartási viszonyainak — a vízforgalmat meghatározó természeti tényezők (a csapadék, a hozzáfolyás és a párolgás algebrai összegeként értelmezett természetes vízkészlet-változás) — becsült változásait az Országos Meteorológiai Szolgálat az 1961–1990 referencia időszakra és a 2021–2050, valamint a 2071–2100 közötti 30 éves klímaablakokra vonatkozó ALADIN-Climate modellfuttatási eredményeire alapozott és elvégzett hidrológiai számítások eredményei alapján számszerűsítettük. A természetes vízkészlet-változást és annak alakulását meghatározó vízháztartási tényezők a referencia időszak átlagához képest becsült változásait az alábbiakban foglaljuk össze.

A 2021–2050 klímaablakra vonatkozó adatokat áttekintve megállapítható, hogy a **tó vízfelületére hulló csapadék** becsült alakulásában a referencia időszak átlagértékeihez viszonyítva félévi és évi időhorizonton számottevő mértékű ($\pm 10\%$ -ot meghaladó) változás nem valószínűsíthető. Az egyes hónapokhoz tartozó relatív eltérések szerint áprilisban és a szeptember-november időszakban 10% -ot meghaladó növekedés, ugyanakkor januárban 32% -os, júliusban 11% -os csökkenés mutatkozik.

A 2071–2100 klímaablakra vonatkozó adatokat áttekintve megállapítható, hogy a tó vízgyűjtő területére hulló csapadék becsült alakulásában a referencia időszak átlagértékeihez viszonyítva évi időhorizonton számottevő mértékű ($\pm 10\%$ -ot meghaladó) változás nem valószínűsíthető. Az évi csapadékösszeg időbeli áttrendeződésére utal az az eredmény, hogy félévi időhorizonton a referencia időszak értékeihez képest nyáron 10% -ot meghaladó csökkenés, télen 10% -ot meghaladó növekedés mutatkozik. A nyári félévi becsült csapadékcsökkenés súlypontja a július-szeptember időszakra, a téli félévi csapadéknövekedés súlypontja pedig a november-december időszakra koncentrálódik.

A területi párolgás növekedésének következményeként — a jövőbeni klímaablakok időszakos átlagában a Balaton-vízgyűjtőn a csapadék-párolgás különbség (a lefolyás, a Balaton vízháztartásban a **hozzáfolyás**) erőteljes csökkenése becsülhető.

Számításaink szerint a 30 éves klímaablakokon belül a negatív előjelű évi csapadék-párolgás különbséggel jellemezhető évek száma az alábbi képet adta:

- az 1961–1990 időszakban 1 év
- a 2021–2050 időszakban 6 év
- a 2071–2100 időszakban 13 év

Azokban az években, amikor a vízgyűjtő területen a csapadék-párolgás különbség negatív előjelű, akkor is van lefolyás, de ez túlnyomó részben felszín alatti vízkészletekből származik. A csapadékosabb évjáratokban a vízgyűjtő területre érkező csapadék eleinte ezeket a hiányzó felszín alatti készleteket pótolja és csak ennek megtörténte után várható a felszíni lefolyás megjelenése. Tekintve, hogy a felszíni alatti vízkészletek vízforgalma és ennek részeként regenerálódása a felszíni vízkészletekhez képest lényegesen lassabban megy végbe, a felszín alatti készleteket érintő változások hatása — mint áthúzódó hatás — több egymást követő évre is kiterjedhet.

A 2021–2050 klímaablakra vonatkozó adatokat áttekintve megállapítható, hogy a Balaton párolgásának alakulásában a referencia időszak átlagértékeihez viszonyítva félévi és évi időhorizonton számottevő mértékű (10%-ot meghaladó) változás valószínűsíthető. Havi szinten 15% feletti eltérés július-szeptember időszakban állapítható meg.

A 2071–2100 klímaablakra vonatkozó adatokat áttekintve megállapítható, hogy a Balaton párolgásának alakulásában a referencia időszak átlagértékeihez viszonyítva nyári félévi és évi időhorizonton számottevő mértékű (40%-ot meghaladó!) változás valószínűsíthető. Havi szinten referencia időszakhoz képest a legnagyobb eltérések (57–73%!) a július–szeptember időszakban mutatkoztak. Megjegyezzük, hogy a vizsgált időszak hosszának rövidülése a modelleredmények növekvő bizonytalanságával jár együtt.

A Balaton párolgásának becsült nagymértékű növekedése lényegében azzal magyarázható, hogy a melegedéssel a magasabb léghőmérséklethez magasabb telítési párányomás (E) érték tartozik, ugyanakkor a klímamodell mindkét jövőbeni klímaablakra (azon belül a nyári félévi időszakra) csökkenő relatív nedvességet valószínűsít. Ez együttesen az jelenti, hogy a levegő telítési hiánya — a telítési és a tényleges párányomás különbsége ($E-e$) — erőteljesen fog növekedni. A telítési hiányt a Balaton párolgásának számítására alkalmazott empirikus formula tartalmazza, arra kiemelten érzékeny.

A természetes vízkészlet-változás becsült változását elemező számításaink szerint a 30 éves klímaablakokon belül a negatív előjelű évi természetes vízkészlet-változással jellemezhető évek száma az alábbi képet adta:

- az 1961–1990 időszakban 7 év
- a 2021–2050 időszakban 9 év
- a 2071–2100 időszakban 19 év

Az ALADIN-Climate modell jövőbeni klímaablakokra vonatkozó becslései szerint a Balaton vízgyűjtő területén jelentős éghajlatváltozás következhet be a 2021–2050 és a 2071–2100 időszakban a viszonyítási időszakban (1961–1990) mért éghajlati adatokhoz képest. A legmarkánsabb és leghatározottabb változás a hőmérséklet becsült emelkedésében mutatkozik meg. A hőmérséklet emelkedése többletenergiát szolgáltat a párolgás számára, aminek következtében a vízgyűjtő területen és a szabad vízfelületen egyaránt a párolgás növekedése következik be. A vízgyűjtő

területen a területi párolgás (az evaporáció és a transzspiráció együttes folyamata) növekedése valószínűsíthető, annak ellenére, hogy a párolgás számára hozzáférhető vízkészlet korlátozott. A növekvő területi párolgás miatt megváltozik a vízgyűjtő vízháztartási képe, ami a párolgásnövekedés következményeként jelentős lefolyáscsökkenést eredményez.

A lefolyáscsökkenés a Balaton vízmérlegének bevételi oldalán hiányt okoz és a vízháztartás deficitességét erősíti.

A párolgás növekedése még erőteljesebben mutatkozik meg a korlátlan vízellátottságú szabad vízfelületen. A vízháztartási mérleg kiadási oldalának súlya nő, a vízmérleg alakulását a kiadási oldal határozza meg.

Összességében a Balaton vízháztartásában a bevételi oldal csökkenése és a kiadási oldal növekedése valószínűsíthető. Ez a kettős hatás a referencia időszak átlagos viszonyaihoz képest — különösen a második jövőbeli klímaablak időszakában (2071–2100) — alapvetően megváltoztatja a tó hidrológiai képét. A tó vízcseré-aktivitása jelentősen romlik, gyakrabban és tartósabban fordulnak elő lefolyástalan időszakok, sőt a 21. század utolsó évtizedeiben a Balaton gyakorlatilag lefolyástalan tóvá változhat.

Nem hagyható figyelmen kívül az a tény sem, hogy a tartósan deficités vízháztartási helyzet miatt a tó vízforgalma fokozatosan egy új hidrológiai egyensúlyi állapot felé mozdul el. A várhatóan bekövetkező vízszint- és vízfelület-csökkenés következtében a vízmérlegelemek szélsőségei mérséklődhetnek, ugyanakkor a tó hasznosításával kapcsolatos sokirányú igények fenntartható kielégítése napjainkban ismert tartalmában és formájában nem lesz lehetséges.

A Balaton vízháztartásának a 21. századi klímaablakok időszakára vonatkozó vizsgálatával és becslésével a korábbiakban több szakértő is foglalkozott. A kutatási eredmények áttekintő összefoglalását jelen tanulmány 2.2. alfejezete tartalmazza.

A különböző éghajlati forgatókönyvekből kiinduló, eltérő módszerekkel készített vizsgálatok egyfajta értékelő összehasonlításra is lehetőséget adnak. A hatásvizsgálatok abban egyeznek, hogy a globális melegedés következtében a tó vízmérlege romlik (a deficités jelleg erősödik), a hatásvizsgálatok többsége az évi természetes vízkészlet-változás csökken. Jelentős eltérések vannak azonban a romlás mértékében, sőt vannak vizsgálatok, amelyek a közelebbi évtizedekben a vízmérleg akár javulásával is számolnak. Figyelemre méltó, hogy a csökkenés mértéke szorosan összefügg az éghajlat ariditásának növekedésével, amit kiválthat a csapadék csökkenése, a hőmérséklet emelkedése, és a kettő együttes jelentkezése.

Jelen tanulmányban közölt vizsgálati eredményekhez az EULAKES, 2012 projekt eredményei tekinthetők a legközelebb állónak.

5 JAVASLAT A TANULMÁNY FELHASZNÁLÁSRA

5.1. Javaslattétel a várható vízforgalmi változásokat leíró adatok felhasználhatóságára

A klímaváltozás vizsgálata éghajlati modellek segítségével lehetséges. Jelen tanulmányban az Országos Meteorológiai Szolgálatnál alkalmazott ALADIN-Climate eredményeit használtuk fel, rámutatva a lehetőségekre és korlátokra.

Klasszikus értelemben vett „hosszútávú előrejelezhetőség” az éghajlati modellekkel nem valósítható meg. A globális kapcsolt modellek az egész Föld cirkulációjára és éghajlatára lassú kényszerítő hatással bíró folyamatokat és kölcsönhatásokat képesek leírni, ezért segítségükkel az éghajlati rendszer viselkedésének aszimptotikus jellemzői határozhatók meg. Éghajlati időskálán a klíma modellek eredményeit, tehát mint statisztikai sokaságot kell tekintenünk, ahol nincs prognosztikai jelentősége annak, hogy adott előrejelzés melyik konkrét időpontra vonatkozik, s a modellek megbízhatóságát aszerint osztályozzuk, hogy egy kiválasztott időszak statisztikai jellemzőit milyen pontossággal képesek visszatükrözni.

A regionális (és globális) modelleredmények szükségszerűen kisebb-nagyobb hibával terheltek, amit figyelembe kell venni a jövőre vonatkozó projekciók kiértékelése során. Ezt megtehetjük úgy, hogy változásértékeket adunk meg: a jövőre vonatkozó modelleredményeket nem önmagukban, hanem a modellek saját referencia-időszakához viszonyítva értelmezzük, így a jövőre és a múltra vonatkozó szisztematikus modellhibák a különbségképzéssel részben eliminálják egymást; illetve a változásértékeket hozzáadjuk a referencia-időszakra a mérések alapján kiszámított értékekhez (relatív változás esetén pedig összeszorozzuk a mérési és a változási értéket).

Ahogy a múltbeli modelleredmények, úgy a jövőre vonatkozó adatok sem értelmezhetők az „éghajlatváltozás előrejelzett idősoraként”, csupán a meteorológiai változók egyik lehetséges realizációjaként. A harmincéves időszakokon belül az évenkénti adatok olyan statisztikai sokaságot alkotnak, melyek időben felcserélhetők. Ez azt jelenti, hogy egy tetszőleges éves adatsor az időszak bármelyik évének megfeleltethető.

Nem illeszthető trend az időszakon belüli adatsorra, s az adott évre vonatkozó adat nem tekinthető hosszútávú időjárás-előrejelzésnek. Arra is fel kell hívni a figyelmet, az éghajlati rendszer egy nem-lineárisan fejlődő rendszer, ezért egy adott időszak tendenciájából nem következtethetünk egy másik időszak jellemzőire.

Mindebből az a következtetés vonható le, hogy az egyes klímaablak időszakokon belüli időbeli változások elemzése nem releváns. Tényszerűen — meteorológiai és hidrológiai elemenként, valamint időhorizontonként — az egyes klímaablakokra számított átlagértékek összevetése és ennek értékelése szolgáltat képet a várható változásoknak elsősorban az irányáról és — sokkal óvatosabban értékelve — azok mértékéről.

5.2. Javaslattétel a várható célközönség meghatározására, valamint laikus és szakmai érdeklődőknek adandó információk körére, módjára, felhasználási feltételeire és korlátaira

Tekintettel a Balaton kiemelt fontosságú turisztikai, rekreációs és számos egyéb — a nemzetgazdaság más területeit is érintő — jelentőségére, valamint az elmúlt másfél évtizedben tapasztalt, a korábbinál gyakrabban és tartósabban előforduló vízháztartási szélsőségek tényére, nagyszámú, felkészültségében és fogadóképességében igen változatos célközönség érdeklődésére lehet számítani.

Szakmai oldalról elsősorban a vízügyi, a környezet- és természetvédelmi, valamint a vízminőségi és ökológiai szakterületek tekinthetők a téma és a tanulmány eredményei iránt legnagyobb eséllyel érdeklődőnek.

Szakmai célközönség számára az adandó információk körébe célszerű bevonni az elvégzett munka módszertanának ismertetését, a felhasznált adatok körét. Az eredmények ismertetésében a klímaablak időszakokra meghatározott meteorológiai és hidrológiai paraméterek közötti relatív eltérések bemutatására, jellemzésére és értékelésére célszerű a hangsúlyt helyezni. Fontos a módszertani hibák és az ebből is fakadó bizonytalanságok, valamint a tó vízforgalmát érintő emberi tevékenység hosszú távon nem felbecsülhető hatásának és a mindebből adódó — esetenként egymás hatását erősítő — bizonytalanság hangsúlyozása.

A tanulmány eredményeinek bemutatása szakmai folyóiratok (pl. Hidrológiai Közlöny, Időjárás, stb.) részére készített cikkek, illetve szakmai szervezetek (pl. Magyar Hidrológiai Társaság, Magyar Meteorológiai Társaság, Balatoni Fejlesztési Tanács, témával foglalkozó felsőoktatási intézmények és kutatóhelyek) által szervezett országos (társasági országos vándorgyűlések) és regionális szakmai rendezvényeken (előadóüléseken) tartandó előadások keretében történik

Fontosnak tartjuk, hogy az eredmények ismertetésére — mind szóban, mind írásban — a tanulmány készítésében részt vett meteorológus és hidrológus szakértők részvételével kerüljön sor. A szakmai rendezvényeken a hallgatóság részéről érkező kérdések, észrevételek, megjegyzések összegyűjtése és értékelése a munka „utóéletének” nagyon hangsúlyos része, hiszen ezek a reflexiók támpontul szolgálhatnak — lehetőség esetén — a későbbi folytatás megtervezéséhez, a célkitűzések megfogalmazásához.

A laikus célközönség köre igen széles lehet. Ebbe tartozhatnak a balatoni önkormányzatok, különböző civil szervezetek, egyéni érdeklődők.

Ezen célközönség tájékoztatása során a tanulmányban megfogalmazott eredmények, ezen belül elsősorban a klímaablakokra vonatkozó meteorológiai és hidrológiai átlagértékek különbségére és a változások irányára célszerű koncentrálni. Nagyon lényeges a több okból és forrásból összetevődő bizonytalanságok hangsúlyozása. Az elvégzett számítások részletes módszertani bemutatása és elemzése ezen célközönség számára nem releváns.

5.3. Javaslattétel az esetleges adathiányból fakadó problémák megoldására, módszertani fejlesztési lehetőségekre

Jelen tanulmány eredményeit értékelve megállapítható, hogy egyetlen — jelen esetben az ALADIN-Climate-modellszimuláció eredményeinek vizsgálatával nem tehetők megalapozott kijelentések az eredmények bizonytalanságáról. Nincs garancia arra, hogy a múltat jól leíró modellek a jövőre vonatkozóan hasonlóan sikeres éghajlati becsléseket adnak, ezért a validációnál kiszámított hibák és a jövőre becsült változások nem „vegyíthetők össze”.

A bizonytalanságok korrekt módon csak több modellkísérlet segítségével írhatók le. Két modell alkalmazása már jó kiindulási alapot nyújt a bizonytalanságok alapfokú számszerűsítésére. Ezért a jövőbeli változások értelmezéséhez mindenképpen szükséges legalább még egy alkalmasan megválasztott modellkísérlet eredményeinek vizsgálata.

A tanulmány keretében elvégzett számítások és azok eredményeinek értékelése során kiemelt fontosságú megállapítás volt, hogy a Balaton vízháztartásában a deficit időszakok számának és időtartamának növekedésre lehet számítani. Kézenfekvő kérdésként fogalmazódott meg az, hogy mikortól lehet számítani arra az állapotra, amikor a tó természetes vízbevétele (csapadék+hozzáfolyás) jellemzően és tartósan elmarad a tó természetes vízvesztésétől (párolgás).

Elméletileg lehetne olyan vizsgálatot végezni, hogy nem csak a 2021–2050 és a 2071–2100 időszakra készülne el a meteorológiai és az erre alapozott hidrológiai számítások, hanem a 30 éves időszak évenkénti vagy 5 évenkénti 2100-ig történő előremozgatásával. Ez megmutatna egyfajta időbeliséget is, de ennek a feltétele az, hogy a meteorológiai adatok a teljes időszakra — megszakítás nélkül — rendelkezésre álljanak.

Jelen tanulmány készítésekor az MFGI csak a figyelembe vett klímaablakok időtartamára rendelkezett meteorológiai adatokkal (a tanulmány elkészítéséhez ezeket használtuk fel).

A klímaablakok közötti időszakokra az OMSZ rendelkezik adatokkal, amiket térítés ellenében tud átadni további vizsgálatok és elemzések céljából.

6 IRODALOM

- ANTAL E., BARANYI S., KOZMÁNÉ TÓTH E. 1977: A Balaton hőháztartása és párolgása. — Hidrológiai Közlöny, 4.
- BRATÁN M. 1988: Az emberi tevékenység hatása a Balaton vízháztartására. — Hidrológiai Közlöny, 4.
- DÉVÉNYI D., GULYÁS O. 1988: Matematikai statisztikai módszerek a meteorológiában. — Tankönyvkiadó, Budapest
- IPCC 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change [SOLOMON, S, QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIES, M., AVERYT, H. B., TIGNOR, M., MILLER, H. L. (eds): Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 996 p.
- JACOB, D., HORANYI A. 2009: Climate Change and Variability: Impact on Central and Eastren Europe. — CLAVIER Newsletter, August 2009, issues 4-5-6.
- KONCSOS L. 2007: Az ARES 1.0 Árvízvédelmi döntéstámogató rendszer (CD-kiadás)
- KONCSOS L., HONTI M., SOMLYÓDY L. 2005: Balaton vízháztartásának statisztikai vizsgálata. — Vízügyi Közlemények, Balaton különszám. 125-144
- KOVÁCS A, CLEMENT A. 2009: Impacts of the climate change on runoff and diffuse phosphorus load to Lake Balaton (Hungary).— Water Sci Technol. 59/3, 417–423.
- KOVÁCS Á., SZILÁGYI J. 2010: A Balaton párolgásértékeinek várható jövőbeli változása. — Hidrológiai Közlöny 90/1, 15–18.
- KRAVINSZKAJA G., VARGA GY., PAPPNÉ URBÁN J. 2012: Figyelmeztető jelek a Balaton vízháztartásában.— A Magyar Hidrológiai Társaság XXIX. Országos Vándorgyűlése, Eger, 2011. július 6–7. CD-kiadvány ISBN 978-963-8172-29-7
- KUTICS K., MOLNÁR G., PINTÉR L., LEHMAN, A., CHATENOUX, B. 2007: Lake Balaton: Integrated Vulnerability Assessment, Early Warning and Adaptation Strategies (GEF/UNDP). Part 2. — Technical tools: indicators, vulnerability assessment, scenarios, integrated modelling. In Climate change: impact, adaptation and vulnerability on the European resource base Central and Eastern European Capacity Building and Awareness Raising Workshop on Vulnerability assessment and adaptation measures under UNFCCC and Kyoto Protocol Budapest, 19–20 November, 2007
- MAJOR P. 1974: Síkvidéki erdők hatásának vizsgálata a talajvízpárolgás és a tényleges beszivárgás folyamataira. — Hidrológiai Közlöny 54/6, 281–288.
- NOVÁKY B. 1985: A vízminőség éghajlati-hidrológiai érzékenysége a Balaton példáján (korreferátum). — In: Climate, water balance and water quality (Édesvízi sekély eutróf tavak vízügyi kérdései) holland–magyar szeminárium, Siófok, 1985. április 23–25.
- NOVÁKY B. 1993: Az éghajlati változások hidrológiai hatásai. — Kandidátusi értekezés, Budapest.
- NOVÁKY B. 2005: A Balaton vízpótlása és az éghajlat. — Vízügyi Közlemények, Balaton különszám. 105–124.
- NOVÁKY B., 2006: Impact of climate change on mean annual water balance of Lake Balaton. International Conference on Climate Change on Impacts and Responses in Central and Eastern European Countries. — LANG, I., FARAGÓ T., IVANYI Zs. (eds): International Conference Climate Change, 5–8, November 2005, Pécs, Hungary. Proceedings, 122–131. ISBN 963 508 519 2
- NOVÁKY B., SOMLYÓDY L., HONTI M. 2013: Éghajlatváltozás: intő jelek a Balaton viselkedésében. — Magyar Tudományos Akadémia, Multidiszciplináris Vízkonferencia, Budapest, 2013. május 16.
- OVH 1968: A Balaton vízgazdálkodása. Összeállította OVH Vízkészlet-gazdálkodási Központ. 29 p.

- PADISÁK J. (ed.) 2006: Climate and Lake Impacts in Europe (CLIME) EVK1-CT2002-00121. — Report on Testing of delivery and internal dynamics of P and N models in „Warm World” Model .
- REIMANN J., V. NAGY I. 1984: Hidrológiai statisztika. — Tankönyvkiadó, Budapest
- SOMLYÓDY L. 2005: A balatoni vízpótlás szükségessége: tenni vagy nem tenni. — Vízügyi Közlemények, Balaton különszám, 9–62.
- SZESZTAY K. 1959: Tavak és tározómedencék vízháztartási jelleggörbéi. — Földrajzi Értesítő, 2.
- VARGA B. 2011: A Balaton vízháztartásának elemzése különös tekintettel a párolgásszámítás és mérés módszertani és területi kérdéseire. — PhD-értekezés, Pannon Egyetem Georgikon Kar, Állat- és Agrártudományi Doktori Iskola.
- VARGA Gy., KRAVINSZKAJA, G. 2012: Hydrology Report and Climate Change Impact. — Kézirat.
- VIRÁG Á. 1997: A Balaton múltja és jelene. — Eger Nyomda Kft.
- VITUKI 1990: Az éghajlat változékonyság és feltételezett változásának hatása a hidrológiai erőforrásokra és a vízgazdálkodásra (OMSz,7613/1/1782, megbízó Faragó Tibor). (témafelelős: Nováky B.) Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Központ, Budapest, 1990. 75 p.

7 F Ü G G E L É K

ALADIN-Climate modellszimulációk eredményei

Összeállította:

Szépszó Gabriella, Csorvási Anett
Országos Meteorológiai Szolgálat

A klímaváltozás vizsgálata éghajlati modellek segítségével lehetséges, s Magyarországon négy regionális klímamodellt alkalmazunk a 21. században a térségünkben várható változások feltérképezésére. Ezek közül jelen esetben az Országos Meteorológiai Szolgálatnál alkalmazott ALADIN-Climate eredményeit mutatjuk be (1. táblázat). A modellel 10 km-es térbeli felbontású modellszimuláció készült egy a Kárpát-medencét lefedő területre (CSIMA, HORÁNYI 2008). A tartományon kívül eső folyamatok leírását (azaz az oldalsó határfeltételeket) az ARPEGE-Climate globális éghajlati modell adatai szolgáltatták. A jövőbeli emberi tevékenység hatásának figyelembevételére a szimulációk során egy közepes forgatókönyvet, az A1B SRES (Special Report on Emissions Scenarios; NAKICENOVIC et al. 2000) kibocsátási scenáriót alkalmazták. A továbbiakban elsőként a hőmérsékletre és a csapadékra vonatkozó modelleredmények mérésekkel való validációját ismertetjük az 1961–1990 időszakra, majd áttekintést adunk a 2021–2050-re és a 2071–2100-ra várható változásokról, referenciaként az 1961–1990 időszakot tekintve.

1. táblázat. Az ALADIN-Climate regionális klímamodellel készített szimuláció jellemzői

Regionális klímamodell	ALADIN-Climate
Modellverzió	4.5
Horizontális felbontás	10 km
Oldalsó határfeltételek	ARPEGE-Climate
Kibocsátási forgatókönyv	SRES A1B

Validáció

Múltbeli időszakokra alapvetően kétféle modellfuttatást végezhetünk. Az egyik esetben a regionális modell számára a meghajtó kezdeti- és peremfeltételeket valamilyen re-analízis adatbázis szolgáltatja, míg a másik kísérlet típusban a meghajtó mezőket csatolt légkör-óceán általános cirkulációs modellek adják. A re-analízis mezők felhasználásával készülő modellfuttatások azt mutatják meg, hogy maga a regionális klímamodell milyen pontosan tudja becsülni a térség jelenlegi klímáját, míg a globális klímamodell kísérletek eredményeivel futtatott szimulációk a globális és a regionális modell együttes hibáira világítanak rá. A Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszer keretében végzendő hatásvizsgálatokhoz az utóbbi kísérlet típusból származó regionális klímamodell-eredmények biztosítanak kiindulási adatokat, ezért ezek elemzését ismertetjük.

Alapvető különbség az időjárás-előrejelzések és az éghajlati szimulációk között, hogy míg az előbbi esetben megköveteljük, hogy a modell a lényeges időjárási eseményeket mind térben, mind időben a lehető legpontosabban tükrözze vissza, addig az éghajlati modellek esetében ez nem reális elvárás. Éghajlati skálán a korlátos tartományra vonatkozó előrejelzési feladat egy határérték-problémává alakul, s mivel a peremfeltételeket globális modellek előrejelzései biztosítják a regionális modell számára a teljes időtáv során, a tökéletes regionális eredményekhez perfekt globális szimulációkra lenne szükségünk. **Így a klasszikus értelemben vett „hosszútávú előrejelezhetőség” az éghajlati modellekkel nem valósítható meg (SZÉPSZÓ 2014).** A globális kapcsolt modellek az egész Föld cirkulációjára és éghajlatára lassú kényszerítő hatással bíró folyamatokat és kölcsönhatásokat képesek leírni, ezért segítségükkel **az éghajlati rendszer viselkedésének aszimptotikus jellemzői határozhatók meg.** Éghajlati időskálán a klímamodellek eredményeit tehát mint statisztikai sokaságot kell tekintenünk, ahol nincs prognosztikai jelentősége annak, hogy adott előrejelzés melyik konkrét időpontra vonatkozik, s a modellek megbízhatóságát aszerint osztályozzuk, hogy egy kiválasztott időszak statisztikai jellemzőit milyen pontossággal képesek visszatükrözni (SZÉPSZÓ 2014). A Meteorológiai Világszervezet ajánlását követve a modellek eredményeit általában 30 éves

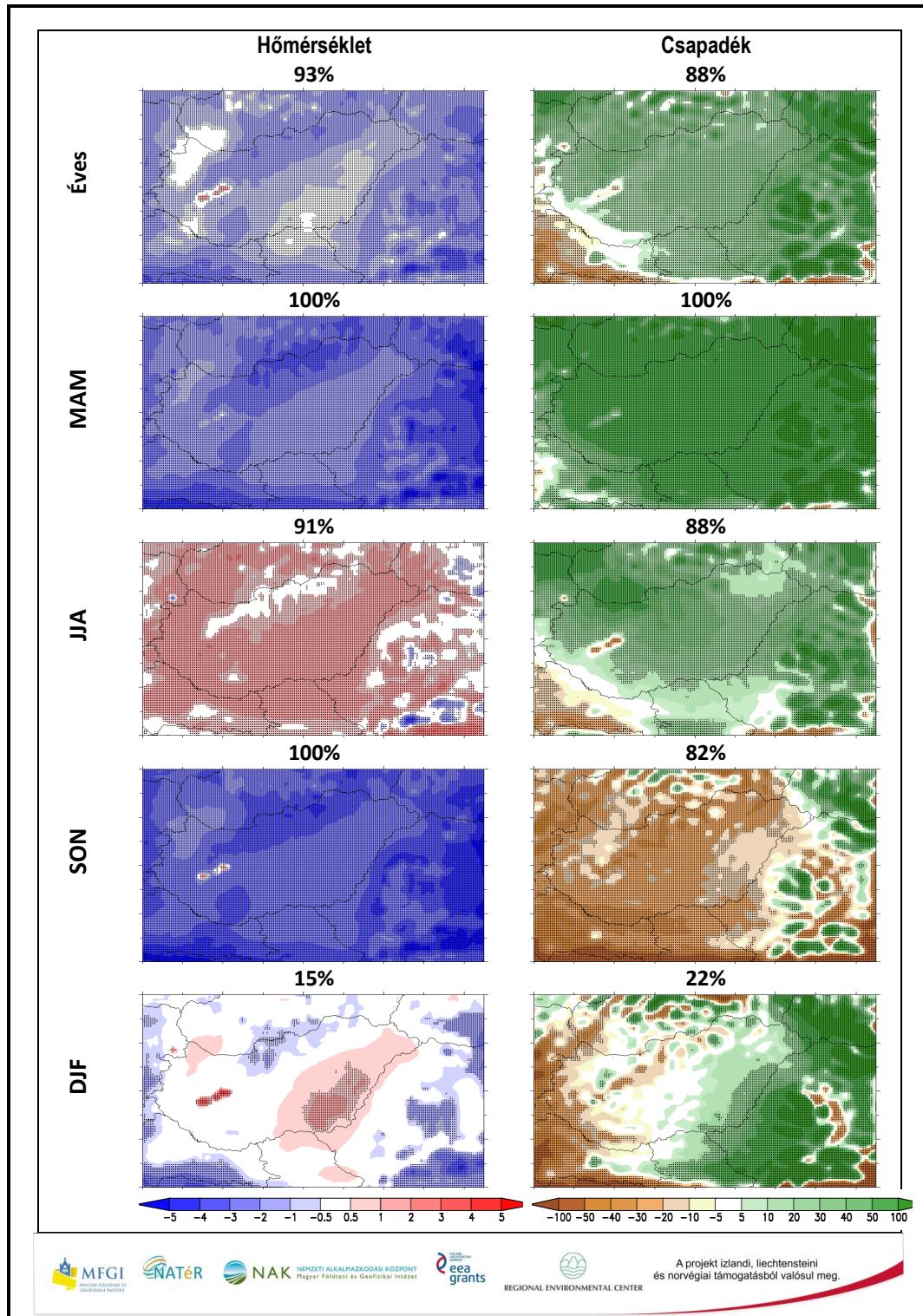
időszakokra vizsgáljuk, s az éghajlati szimulációk esetében ezekre az időszakokra számított éves vagy évszakos várható értéket, szórást, sűrűségfüggvényt és egyéb statisztikai jellemzőket vizsgálunk. A validációhoz a technikailag egyszerűbb összehasonlítás érdekében általában olyan mérési adatbázisokat alkalmazunk, melyeket a felszíni állomási adatsorok felhasználásával interpolációs eljárásokkal állítanak elő.

A jelen validáció során azt vizsgáljuk, hogy a klímamodell hazánk hőmérsékleti és csapadékra vonatkozó éghajlati sajátosságait mekkora hibával képes becsülni az 1961–1990 referencia-időszakban. Nem térünk ki az egyéb változók (pl. szélsőbesség, relatív nedvesség) kiértékelésére. A validáció során a 20 km-es felbontású CRU (Climatic Research Unit; MITCHELL et al. 2004) rácsponti megfigyelési adatbázissal vetettük össze a modelladatokat. A 2. táblázatban összegezzük a Magyarország területére eső rácspontok figyelembevételével képzett átlagos éves és évszakos hőmérsékleti hibák értékeit. Az átlagos hibák meghatározása mellett szignifikancia-vizsgálat segítségével számszerűsítettük, hogy a rácspontokban kapott átlagos hibaérték miként viszonyul a referencia időszak évszakos és éves hibaértékeinek szórásához. A modellszimulációk éves és évszakos átlagos hőmérsékleti és csapadékösszeg hibáinak térbeli eloszlását az 1. ábrán mutatjuk be. A térképeken pontozás jelöli azokat a rácspontokat, ahol a hiba szignifikáns, továbbá a térképek felett szereplő értékek megadják, hogy Magyarország területének mekkora hányadán szignifikáns a hiba. A magyarországi rácspontokra számított országos havi átlaghőmérséklet és csapadékösszeg értékek éves menetét a vizsgált modellszimuláció és a mért adatok alapján a 2. ábrán láthatjuk.

Az 1961–1990 közötti időszakra vonatkozó éves átlaghőmérséklet esetén az ALADIN kis mértékben alulbecsli a referencia értékeket (2. táblázat). A megfigyelésektől vett negatív eltérések az ország északi, északkeleti és délnyugati részén jellemzők és szignifikánsak (1. ábra), a Balaton térségében inkább némi túlbecslést láthatunk. Az átmeneti évszakokban 2 °C-ot meghaladó szignifikáns alulbecslés jellemző (különösen a magasabban fekvő északi tájakon), ennek mértéke áprilisban és októberben eléri 4 °C-ot (2. ábra). Nyáron és télen a hiba kisebb és országos átlagban ellentétes előjelű. Télen mindössze 0,1 °C az átlagos felülbecslés, az ország nagy részén nem is szignifikáns. Viszont a Balaton térségében kiugróan magas a hőmérséklet fölébecslése, ami a tavi mikroklíma egyszerűsített leírásából ered (pl. az ALADIN a Balaton vízhőmérsékletére az Adriai-tenger jellemző értékét tekinti). A hőmérséklet éves menetének vizsgálata arra utal, hogy az ALADIN eredményeiben a tavaszi melegedés jóval lassabban, az őszi lehűlés viszont jóval gyorsabban történik, mint a valóságban.

2. táblázat. Az átlagos éves és évszakos hőmérsékleti és csapadék (°C és mm/hónap) eltérés az ALADIN-Climate regionális klímamodell eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re

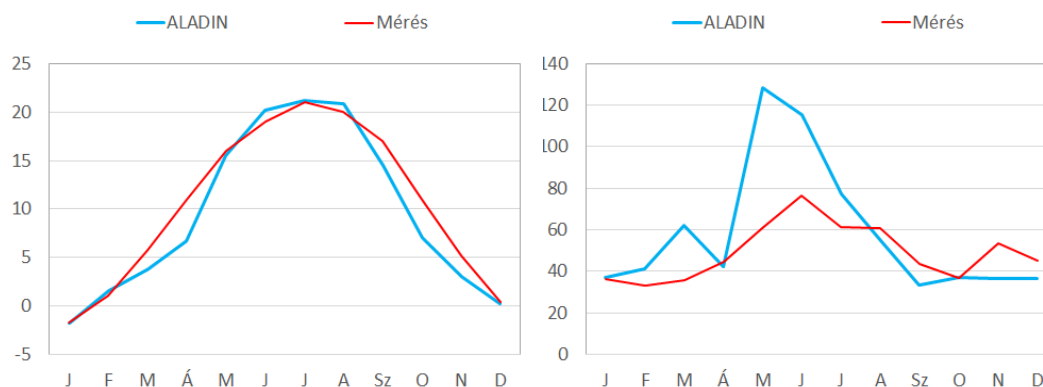
	Éves	Tavaszi	Nyár	Ősz	Tél
Hőmérséklet	–0,8	–2,0	1,1	–2,7	0,1
Csapadék	9	32	15	–10	1



1. ábra. Az átlagos éves és évszakos hőmérsékleti valamint csapadék eltérés (°C és %) az ALADIN-Climat-Hu regionális klímamodell eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. A térképek felett feltüntetett százaléktértek azon magyarországi rácspontok arányát mutatják, ahol a hiba 0,05 konfidenciaszinten szignifikáns

Az 1961–1990 közötti átlagos havi szimulált csapadékösszegek éves menetét tekintve elmondható, hogy az ALADIN többnyire nagyobb csapadékösszegeket ad, mint a megfigyelések (2. ábra). A megfigyelt évszakos menetet a modell jól követi, ugyanakkor jelentős mértékű a május–július havi összegek felülbecslése. A tavaszi és a nyári túlbecslés nemcsak az országos átlagban jelentkezik,

hanem az ország teljes területén (leszámítva a balatoni rácspontokat) és nagyrészt szignifikáns is (**1. ábra**). Ősszel alulbecslést figyelhetünk meg, melynek mértéke nem haladja meg a 30 %-ot. A téli átlagos csapadékösszegekre vonatkozó térkép az országon belüli rácspontok kb. 11-11 %-ában mutat szignifikáns alul-, illetve felülbecslést — előbbit a nyugati, utóbbit a keleti tájakon — országos átlagban egy kismértékű pozitív hibát eredményezve (**2. táblázat**).



2. ábra. A havi átlagos hőmérséklet (°C) és csapadékösszeg értékei az ALADIN-Climate regionális klímamodell eredményei, valamint a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis alapján 1961–1990-re

Az éghajlati modellek jövőre vonatkozó eredményeit annak ismeretében értelmezhetjük, hogy a modellek mennyire tudják reprodukálni a múltbeli klímát jellemző értékeket. Meg kell jegyeznünk, hogy bár a validáció fontos és kikerülhetetlen lépése az éghajlati modellezésnek, ugyanakkor nincs garancia arra, hogy a múltat jól leíró modellek a jövőre vonatkozóan hasonlóan sikeres éghajlati becsléseket adnak.

Projekciók

A regionális (és globális) modelleredmények szükségszerűen kisebb-nagyobb hibával terheltek, amit figyelembe kell venni a jövőre vonatkozó projekciók kiértékelése során. Ezt megtehetjük úgy, hogy **változásértékeket adunk meg: a jövőre vonatkozó modelleredményeket nem önmagukban, hanem a modellek saját referencia-időszakához viszonyítva értelmezzük, így a jövőre és a múltra vonatkozó szisztematikus modellhibák a különbségképzéssel részben eliminálják egymást; illetve a változásértékeket hozzáadjuk a referencia-időszakra a mérések alapján kiszámított értékekhez** (relatív változás esetén pedig összeszorozzuk a mérési és a változási értéket). Ekkor az ún. *delta-módszert* (HAWKINS et al. 2013) használjuk, aminek során feltételezzük, hogy a hibák az integrálás folyamán több évtized átlagában nem változnak lényegesen (ez nem feltétlenül van így). A modellhibák „eltüntetésére” sokan használnak különböző korrekciós eljárásokat (pl. PIECZKA 2012, KIS 2013), melyek a szisztematikus hiba egyszerű kivonásán vagy a modelleredményekből előálló sűrűségfüggvény mérési adatsorokhoz való illesztésén alapulnak. A korrekciós eljárás a múltbeli megfigyelési információk segítségével állapítja meg a jövőbeli adatsorokra is alkalmazandó korrekciót, így nem tudja figyelembe venni, ha például az éghajlatváltozás következményeként mind a modellben, mind a valóságban megváltozik a sűrűségfüggvény alakja, és ezzel együtt a modellhibák jellemzői (SZÉPSZÓ 2014).

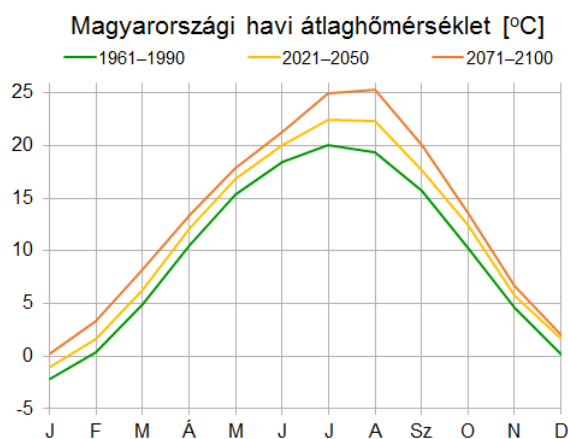
Ahogy a múltbeli modelleredmények, úgy **a jövőre vonatkozó adatok sem értelmezhetők az „éghajlatváltozás előrejelzett idősoraként”, csupán a meteorológiai változók egyik lehetséges realizációjaként. A harmincéves időszakokon belül az évenkénti adatok olyan statisztikai sokaságot alkotnak, melyek időben felcserélhetők.** Ez azt jelenti, hogy egy tetszőleges éves adatsor az időszak bármelyik évének megfeleltethető. [Egy adott éven belül ez természetesen nem tehető meg (azaz nem cserélhető fel például a januári adat a szeptemberivel), mert abban a dinamikai folyamatok

révén vissza kell tükröződnie a térség klimatológiájának.] Ennélfogva az adott időszakra vonatkozó adatsor ugyanúgy várható értékek, szórások, eloszlásfüggvények stb. segítségével vizsgálható, mint a múltira vonatkozó modelleredmények. **Nem illeszthető trend az időszakon belüli adatsorra, s az adott évre vonatkozó adat nem tekinthető hosszútávú időjárás-előrejelzésnek.** Arra is fel kell hívni a figyelmet, hogy **az éghajlati rendszer egy nem-lineárisan fejlődő rendszer, ezért egy adott időszak tendenciájából nem következtethetünk egy másik időszak jellemzőire.** Például a mérések alapján megfigyelt tendenciák nem extrapolálhatók a jövőre, és ugyanígy két jövőbeli időszak közé eső évtizedekre sem végezhető hasonló statisztikai illesztés; ezeknek az időszakoknak a viszonyait dinamikus modellszimulációk elvégzésével kell felderíteni. Jelen vizsgálatban tehát a delta-módszer alkalmazásával az ALADIN modell által jelzett változásokat közöljük 30 éves átlagok formájában, szignifikancia-teszttel elkülönítve a változási „jelet” az éghajlat természetes változékonyságától a projekciós eredményekben.

Az ALADIN regionális éghajlati modell egy átlagos ütemű légköri szén-dioxid koncentráció fejlődést feltételezve írja le a Kárpát-medence éghajlatának 21. században várható módosulását. A modelleredmények alapján a 21. században folytatódik az átlaghőmérséklet emelkedése a Kárpát-medencében, ahogy ez a 3. táblázat és a 3–4. ábra eredményein is látható. Ezek a változások minden időszak esetében statisztikailag szignifikánsak, így ezt a hőmérsékleti térképeken külön nem jelöltük.

3. táblázat. A magyarországi éves és évszakos átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate regionális klímamodell eredményei alapján

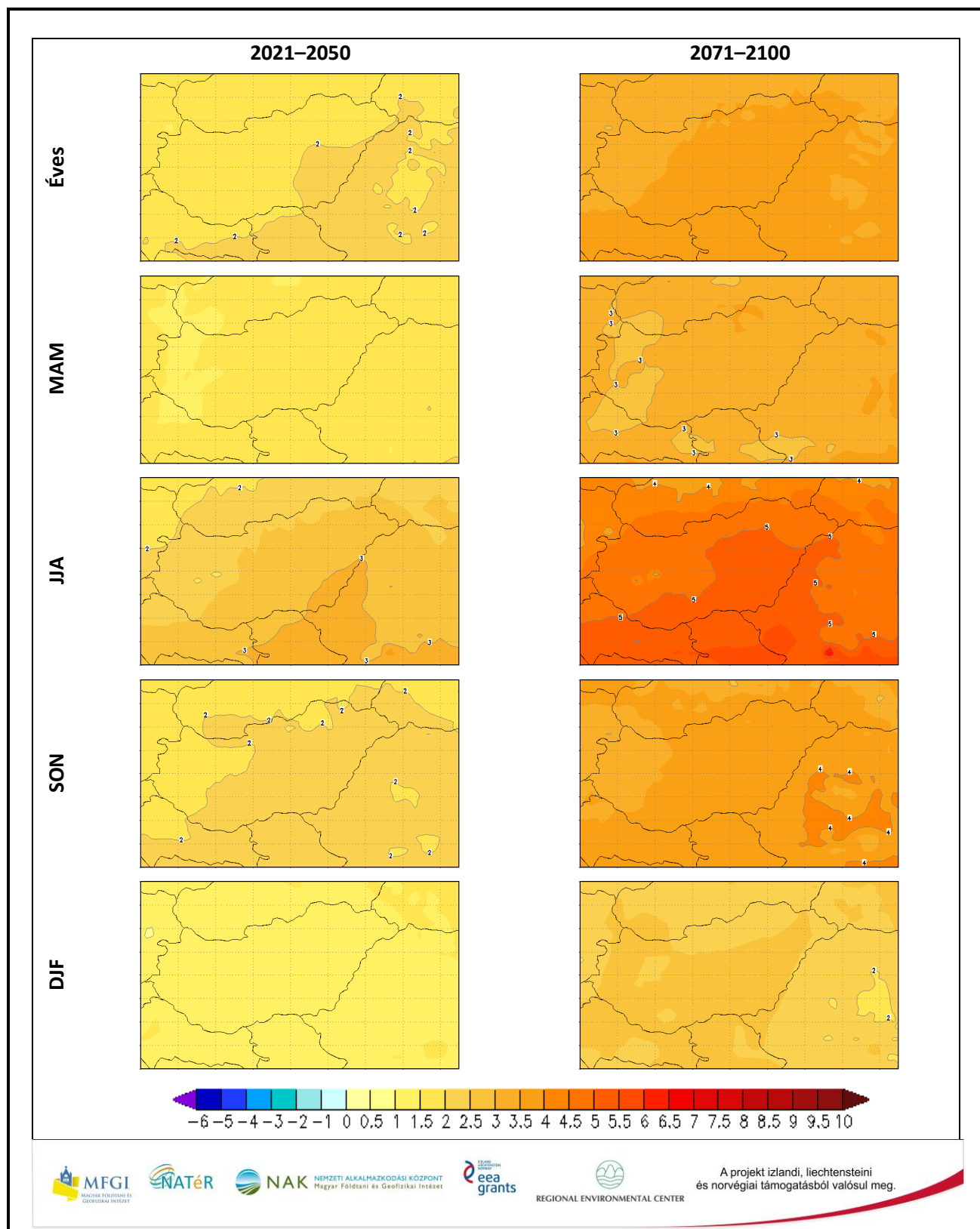
	Éves	Tavaszi	Nyár	Ősz	Tél
2021–2050	1,1	1,6	0,7	0,8	1,1
2071–2100	3,1	2,8	3,5	3,0	2,5



3. ábra. A magyarországi havi átlaghőmérséklet (°C) 1961–1990-re mérések alapján, valamint 2021–2050-re és 2071–2100-ra az ALADIN-Climate regionális klímamodell eredményeinek mérési adatokkal való kombinálása alapján

A hőmérséklet éves átlagban vett növekedése (4. ábra) 2021–2050-re nagyjából 1-2 °C és 2071–2100-ra a melegedés mértéke hazánkban mindenütt meghaladja a 3 °C-ot, de 5 °C-nál kisebb lesz. Azaz a hőmérséklet emelkedése — némileg gyorsuló ütemmel — folyamatosnak tekinthető a 21. század során. Nyáron számíthatunk a legnagyobb növekedésre az átlaghőmérséklet alakulásában mindkét jövőbeli időszakban, ez augusztusban az évszázad végén elérheti akár a 6 °C-ot is, ahogy az a 4. ábrán is látható. Tavasszal és télen az évszázad közepére az országban szinte mindenütt 1 °C-ot meghaladó, de 2 °C-nál nem magasabb, míg ősszel kissé nagyobb mértékű változások várhatóak, az évszázad végére pedig mindhárom évszakban hazánk teljes területén 3 és 4 °C közötti melegedés

valószínű. A változások országon belüli eloszlását tekintve keleten, illetve délen várható nagyobb mértékű hőmérsékletnövekedés.



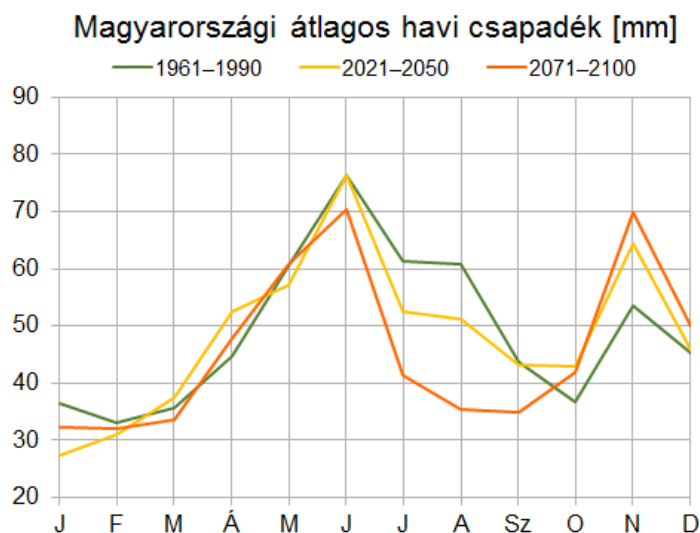
4. ábra. Az éves és évszakos átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate regionális klímamodell eredményei alapján

A Magyarországra várható csapadék mennyiségének megváltozása sokkal nehezebben elemezhető és értelmezhető, mint a hőmérsékleti változások. Ennek oka az, hogy a csapadék térben és időben nagyon változékony elem, aminek nemcsak az előrejelzése nehéz, de tendenciózus változásainak kimutatása is csak hosszú időszakokon lehetséges. Így a modellek által jelzett változások gyakran nem is szignifikánsak, ezért ezek interpretációjánál kellő óvatossággal kell eljárunk.

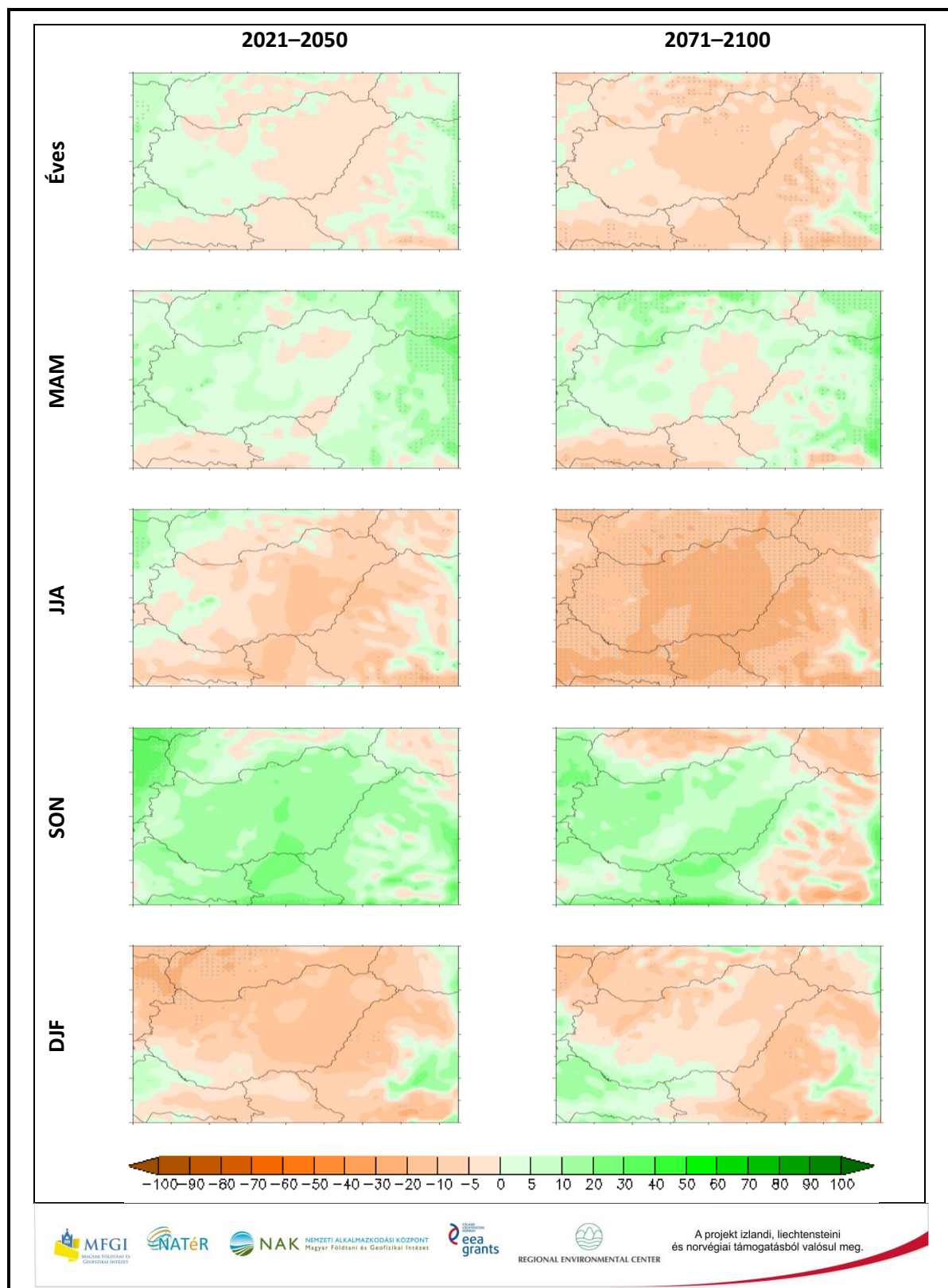
Ha megnézzük az éves csapadékösszeg relatív megváltozását (4. táblázat), akkor látható, hogy mindkét időszakon országos átlagban kismértékű (10% alatti) csökkenés valószínű. A változás a következő évtizedekben azonban területileg nem egységes: az ország nyugati felén növekedésre, a keleti tájakon pedig csökkenésre számíthatunk (6. ábra). Az évi csapadékmennyiség éven belüli eloszlása a referencia-időszakhoz képest módosul (5. ábra). Jelenleg a nyár a legcsapadékosabb évszakunk, a jövőben a nyári csapadék csökkenni fog, míg a valamelyest szárazabb október–december időszakban némi növekedésre számíthatunk. A 2021–2050 időszakban nyáron még előfordulhatnak az országban olyan területek, ahol átlagosan több csapadék hullhat, mint a múltban. Az évszázad végére azonban a nyári csapadékcsökkenés már az ország egész területére kiterjed és jelentős részén szignifikáns (országos átlagban –20 %). Ősszel és tavasszal összességében a jelenleginél több csapadékra számíthatunk (ez alól az ország keleti tájai jelentenek kivételt), télen pedig a nyárihoz hasonlóan csökkenésre.

4. táblázat. A magyarországi átlagos éves és évszakai csapadékösszeg változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate regionális klímamodell eredményei alapján

	Éves	Tavaszi	Nyár	Ősz	Tél
2021–2050	-7	-10	-5	3,8	-10
2071–2100	-5	-5	-20	4,6	-3,1



5. ábra. A magyarországi havi átlagos csapadékösszeg (mm) 1961–1990-re mérések alapján, valamint 2021–2050-re és 2071–2100-ra az ALADIN-Climate regionális klímamodell eredményeinek mérési adatokkal való kombinálása alapján



6. ábra. Az átlagos éves és évszakos csapadékösszeg változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate regionális klímamodell eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli azokat a rácpontokat, ahol a változás szignifikáns

Kitekintés

A meteorológiai előrejelzések többféle bizonytalanságot hordoznak, ami egyfelől a leírni kívánt folyamatok kaotikus jellemzőiből, másfelől az ezek szimulációjára használt modellek közelítő jellegéből (a kezdeti és határfeltételek meghatározásából, az alkalmazott numerikus és fizikai parametrizációs módszerekből, az emberi tevékenység hatásának leírásából) adódik. A projekciók interpretációja akkor tekinthető korrektnek, ha a beválásuk valószínűségéről is tartalmaznak információt. Ennek eszköze az ún. *ensemble technika*, amikor több, beállításában különböző szimulációt hajtunk végre, majd ezek eredményeit együttesen értékeljük ki. Az egyes kísérletek beállításait általában úgy választjuk meg, hogy mindegyik az éghajlati rendszer egyformán valószínű leírását adja, s az ily módon előálló ensemble lehetőséget ad az eredmények valószínűségi formában való közlésére. A felhasználó ekkor nem egyetlen, ún. *kategorikus előrejelzést* kap, hanem egy valószínűségi jellegű információt, aminek birtokában jóval megalapozottabb döntést tud hozni, mint egyetlen előrejelzés alapján (SZÉPSZÓ 2014).

Hogy az elvégzendő modellkísérletek során mely beállításokat érdemes változtatni, azt a vizsgálatok célja határozza meg. Ugyanis a bemutatott bizonytalansági típusok hozzájárulása a szimulációkat jellemző teljes bizonytalansághoz az időtáv és a földrajzi tartomány függvényében, valamint a különböző meteorológiai változókra eltérő mértékű (HAWKINS, SUTTON 2009, 2011). Az éghajlati projekciók esetében többnyire olyan szimulációkból állítják össze az ensemble rendszereket, melyeket különböző klímamodellekkel hajtottak végre több kibocsátási forgatókönyvet is alkalmazva a jövőbeli emberi tevékenység leírására.

Egyetlen — jelen esetben az ALADIN-Climate — **modellszimuláció eredményeinek vizsgálatával nem tehetők megalapozott kijelentések az eredmények bizonytalanságáról.** Ahogyan korábban említettük, nincs garancia arra, hogy a múltat jól leíró modellek a jövőre vonatkozóan hasonlóan sikeres éghajlati becsléseket adnak, ezért **a validációnál kiszámított hibák és a jövőre becsült változások nem „vegyíthetők össze”.** **A bizonytalanságok korrekt módon csak több modellkísérlet segítségével írhatók le.** Két modell alkalmazása már jó kiindulási alapot nyújt a bizonytalanságok alapfokú számszerűsítésére. Ezért a jövőbeli változások értelmezéséhez mindenképpen szükséges legalább még egy alkalmasan megválasztott modellkísérlet eredményeinek vizsgálata.

IRODALOM

- CSIMA, G., HORÁNYI, A. 2008: Validation of the ALADIN-Climate regional climate model at the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás* 112, 3–4, 155–177.
- HAWKINS, E., OSBORNE, T. M., HO, C. K., CHALLINOR, A. J. 2013: Calibration and bias correction of climate projections for crop modelling: An idealised case study over Europe. *Agricultural and Forest Meteorology* 170, 19–31.
- HAWKINS, E., SUTTON, R. 2009: The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bull. of Amer. Meteor. Soc.* 90, 1095–1107.
- HAWKINS, E., SUTTON, R. 2011: The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Climate Dynamics* 37, 407–418.
- KIS A. 2013: Csapadékindexek XXI. századra becsült trendjei Közép-Kelet-Európában korrigált csapadékmezők felhasználásával. XXXI. OTDK dolgozat. Budapest. 35 pp.
- MITCHELL, T. D., CARTER, T. R., JONES, PH. D., HULME, M., NEW, M. 2004: A comprehensive set of climate scenarios for Europe and the globe. Tyndall Centre Working Paper 55.
- NAKICENOVIC, N., ALCAMO, J., DAVIS, G., DE VRIES, B., FENHANN, J., GAFFIN, S., GREGORY, K., GRÜBLER, A., JUNG, T. Y., KRAM, T., LA ROVERE, E. L., MICHAELIS, L., MORI, S., MORI-TA, T., PEPPER, W., PITCHER, H., PRICE, L., RAIHI, K., ROEHL, A., ROGNER, H. H., SANKOVSKI, A., SCHLESINGER, M., SHUKLA, P., SMITH, S., SWART, R., VAN ROOIJEN, S., VICTOR, N., DADI, Z. 2000: IPCC special report on emissions scenarios. — Cambridge University Press, Cambridge.
- PIECZKA I. 2012: A Kárpát-medence térségére vonatkozó éghajlati scénáriók elemzése a PRECIS finom felbontású regionális klímamodell felhasználásával. — Doktori értekezés, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, 95 pp.
- SZÉPSZÓ G. 2014: A REMO regionális éghajlati modellen alapuló klímadinamikai vizsgálatok a Kárpát-medence éghajlatának jellemzésére. — Doktori értekezés, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földtudományi Doktori Iskola, Földrajz–Meteorológia Program.

A NATÉR projekt izlandi, liechtensteini és norvégiai támogatásból valósul meg.

A jelen szakmai munkaanyag Izland, Liechtenstein és Norvégia EGT-támogatásokon és a REC-en keresztül nyújtott anyagi hozzájárulásával valósult meg. A jelen dokumentum tartalmáért a Magyar Földtani és Geofizikai Intézet felelős.

További információk a támogatási programról:

www.nagis.hu

eea.rec.org

eeagrants.org

norvegalap.hu