

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

A XXI. században várható hazai csapadék- és aszályviszonyok tendenciaelemzése különböző modellszimulációk alapján



DIPLOMAMUNKA

Készítette: Hollósi Brigitta

Meteorológus MSc
Éghajlatkutató szakirány

Témavezetők:

Dr. habil. Bartholy Judit
Dr. Pongrácz Rita
ELTE Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2012

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Szakirodalmi áttekintés	5
2.1. Az aszály fajtái	5
2.2. Az aszályt befolyásoló tényezők	7
2.3. A talaj szerepe	8
2.4. Aszályvizsgálatok múltja és jelene külföldön	10
2.5. Aszályvizsgálatok Magyarországon	12
2.6. Magyarország aszályossági zónái	13
2.7. Aszálygyakoriság hazánkban	14
3. Felhasznált adatok és módszerek	16
3.1. Az ALADIN modell	17
3.2. A PRECIS modell	17
3.3. A RegCM modell	18
3.2. Az aszály mérőszámai	19
4. Validáció	21
5. Eredmények: A csapadékviszonyok és az aszályhajlam vizsgálata a Kárpát-medence térségére.....	25
5.1. A standardizált csapadékanomália index	26
5.2. A Thornthwaite-féle agrometeorológiai index	31
5.3. A Ped-féle talajnedvességi index	36
5.4. A Foley-féle anomália index	41
6. Összefoglalás	46
Köszönetnyilvánítás	49
Irodalomjegyzék	50

1. Bevezetés

A Föld éghajlatának változása és ingadozása a múltban is előfordult. A globális éghajlatváltozás folyamatai régióként különböző mértékben gyakorolnak hatást az ökoszisztémákra, az ember egészségére, a mezőgazdaságra, a vízháztartásra és az energiagazdálkodásra egyaránt. A klímaváltozás kutatása során az egész Földre kiterjedően globális, illetve kisebb skálán finom horizontális felbontással rendelkező regionális klímamodelleket használnak. A modellek alkalmazása lehetőséget teremt a jövőben várható változások területi eloszlásának minél precízebb meghatározására. A hosszútávon megfigyelhető emelkedő hőmérsékleti átlagok és az ezzel párhuzamosan csökkenő csapadékmennyiség nagymértékben befolyásolhatja egy térség jellemzőit, így előnytelen esetben fokozhatja egy terület aszályosságát.

A Kárpát-medence természetföldrajzi adottságai kedvezőek, azonban kiemelt kockázati tényező az aszályhajlam, mely mindig is hozzátartozott a térség éghajlati jellemzőihez. Az éghajlatváltozás következményeit vizsgálva a jövőben várható szélsőségek meghatározása komoly nehézséget okoz a kutatást végző szakemberek számára, ugyanakkor e témakör kitüntetett figyelmet érdemel, hiszen a mezőgazdasági és ebből kifolyólag a gazdasági károk jelentős hányadát a meteorológiai extrémumok okozzák, veszélyeztetve a termelés stabilitását, jövedelmezőségét és minőségét egyaránt. Hazánk csapadék- és aszályviszonyainak minél jobb megismerése elengedhetetlen ahhoz, hogy az ellenük való küzdelem eredményes legyen, s az ilyen jellegű károk mérséklődéséhez vezessen.

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén és az Országos Meteorológiai Szolgálat Numerikus Modellező és Éghajlat-dinamikai Osztályán két-két (PRECIS és RegCM, valamint ALADIN és REMO) regionális klímamodelt adaptáltak a Kárpát-medence térségére, melyek segítségével becslést adhatunk a XXI. századra várható éghajlatváltozások tendenciáira (Bartholy et al., 2011). Első lépésként szükséges a különböző meteorológiai elemek – például a hőmérséklet vagy a csapadék – múltbeli és jövőbeli trendjeinek regionális skálán történő vizsgálata. A két fent említett elem tanulmányozása már korábban megtörtént (Krüzselyi et al., 2011; Torma et al., 2008), e dolgozatban bemutatott kutatások célja, hogy ezek egymáshoz viszonyított múltbeli és jövőbeli alakulását

elemezzük különféle aszályindexek (standardizált anomália index, Thornthwaite-féle agrometeorológiai index, Ped-féle aszályindex, illetve Foley-féle index) segítségével a Kárpát-medence területére. A vizsgálatba vont három – különböző globális éghajlati modell (ARPEGE, HadCM, ECHAM) által meghajtott – regionális modellszimulációk (ALADIN, PRECIS, RegCM) havi csapadékösszeg és havi átlaghőmérséklet idősorait az 1961–1990 referencia időszakra, valamint a 2021–2050 és a 2071–2100 jövőbeli célidőszakra vizsgáltuk. Az IPCC jelentésekben (2001, 2007) szereplő klímaváltozási elemzések négy fő emisszió szcenáriót használnak: A2, B2, A1, B1 (Nakicenovic és Swart, 2000). E forgatókönyvek alapvetően elkülönülnek például abból a szempontból, hogy a jövőben várható fejlődés globális vagy lokális skálán történik-e, illetve a fosszilis-bázisú vagy a nukleáris/megújuló energiaforrások felhasználása kerül-e előtérbe. Így a forgatókönyvekhez jól meghatározott társadalmi, környezeti, gazdasági tendenciák társulnak. A dolgozatban a „közepesnek” mondható A1B szcenárióra vonatkozó futtatásokat vizsgáltuk mindhárom modell esetén, mely az A1 fő kibocsátási forgatókönyv egyik alcsoportja. Az A1B forgatókönyv a fosszilis tüzelőanyagok és a nem fosszilis energiaforrások közötti egyensúlyt feltételezi, vagyis nem egy adott típusú energiaforrásra támaszkodik. A jövőben nagyon gyors gazdasági fejlődést, a hatékony technológiák rohamos elterjedését és a század közepi népességcsúcs bekövetkezése után az emberiség összlélekszámának csökkenését valószínűsíti. Az A1B szcenárió becslései szerint a CO₂ légköri koncentrációsintje 2050-re 532 ppm, míg 2100-ra 717 ppm lesz (Nakicenovic és Swart, 2000).

Jelen dolgozatban először megismerkedhetünk az aszály fajtáival, befolyásoló tényezőivel, a külföldi és hazai szakirodalommal, valamint magyarországi viszonylatban a veszélyeztetett területekkel. Ezután a 3. fejezetben röviden bemutatom az ALADIN, a PRECIS és RegCM regionális klímamodellt – melyek hőmérsékleti- és csapadékoutputjai szolgáltatták a vizsgálatához szükséges bemeneti adatokat –, valamint az aszály mértékének számszerűsítésére előállított mérőszámokat. Ezt követően vizsgálataink eredményeit elemezzük a Kárpát-medence térségére, végül pedig a dolgozathoz kapcsolódó kutatási eredményeket foglaljuk össze.

2. Szakirodalmi áttekintés

Az aszály meglehetősen összetett, többféle módon közelíthető természeti jelenség, melynek jellemzésére számtalan definíció született. Az egzakt meghatározás azonban rendkívül problematikus, hiszen számos tudományág foglalkozik az aszály tárgykörével, és mindegyik terület másként értelmezi. Tulajdonképpen minden aszálydefiníció az átlagnál kevesebb csapadéknak a vízgazdálkodásra, mezőgazdaságra gyakorolt hatásával kapcsolatos. Mezőgazdasági szemszögből nézve „az aszály egy adott szántóföldi, illetve erdőterületen levő növényállomány tartós és jelentős mértékű vízhiánya, ami nagymértékben behatárolja a növény életfolyamatait” (Pálfai, 2004). Egy általános, a Meteorológiai Világszervezet (WMO) által is jóváhagyott megfogalmazás szerint „az aszály az átlagos mértéket jelentősen és tartósan meghaladó vízhiány”. Azonban az ehhez hasonló általános meghatározások nem használhatók fel kutatási célra, vagyis szükséges az aszály valamilyen sajátos nézőpont szerinti definícióját létrehozni (Bussay et al., 1999).

Szintúgy nem kellően tisztázott a szárazság és az aszály közötti különbség. A szárazságon rövidebb vagy hosszabb ideig tartó csapadékmentes időjárás értendő. Az aszály kifejezés használatakor mindig hosszabb ideig tartó és jelentős mértékű szárazságról beszélünk (Varga-Haszonits, 1985). E megközelítés szerint az aszály a meteorológiai tényezőkre visszavezethető szárazság következményeként lép fel (Szász, 1988).

2.1. Az aszály fajtái

Az aszály következményeit alapul véve különféle kategóriákba sorolhatjuk az aszályhelyzeteket: meteorológiai, hidrológiai, mezőgazdasági és gazdasági aszály. Annak ellenére, hogy célravezető az aszály alosztályokba történő besorolása, gyakran a csoportok közötti határvonalak meghúzósa problémákba ütközik, hiszen alapjában véve a meteorológiai aszály következtében lép fel mind a mezőgazdasági, mind a hidrológiai aszály (Bussay et al., 1999).

Meteorológiai aszály

A meteorológiai aszály esetén a csapadék mennyisége hosszabb időn át kevesebb, mint a területre vonatkozó átlagérték, vagy annak előre meghatározott

százaléka. Az előre rögzített érték lehetővé teszi a különböző területeken és eltérő időpontokban fellépő aszályok összehasonlítását (Sadowski, 1984). Leggyakrabban a csapadék átlag alatti értékének feleltethető meg, azonban alkalmanként további meteorológiai állapothatározók (hőmérséklet, légnedvesség, stb.) kombinációjával azonosítják.

Mezőgazdasági aszály

Mezőgazdasági aszályon jobbra a növénytermesztést sújtó vízhiányt értjük. Akkor is mezőgazdasági aszály áll fenn, ha a talaj vízhiánya miatt a növények fejlődése, termésképződése lelassul. A súlyosságának mértéke többek között a következő tényezőktől függ: az aszály időtartamától és erősségétől, a talaj fizikai állapotától, a talajtakarótól, lejtőszögtől, öntözöttségtől, a csapadékhiány gyakoriságától, vegyi anyagok használatától. A mezőgazdasági aszály a meteorológiai aszály után, de a hidrológiai aszály előtt következik be (Urbán, 1993). Amennyiben a meteorológiai adatokon kívül növényi- és talajparamétereket is figyelembe veszünk, akkor bevezethető a talajaszály fogalma, mely akkor alakul ki, ha a növénytermesztés leginkább gátló tényezője a gyökérszóna talajrétegének vízhiánya (Bussay et al., 1999).

Hidrológiai aszály

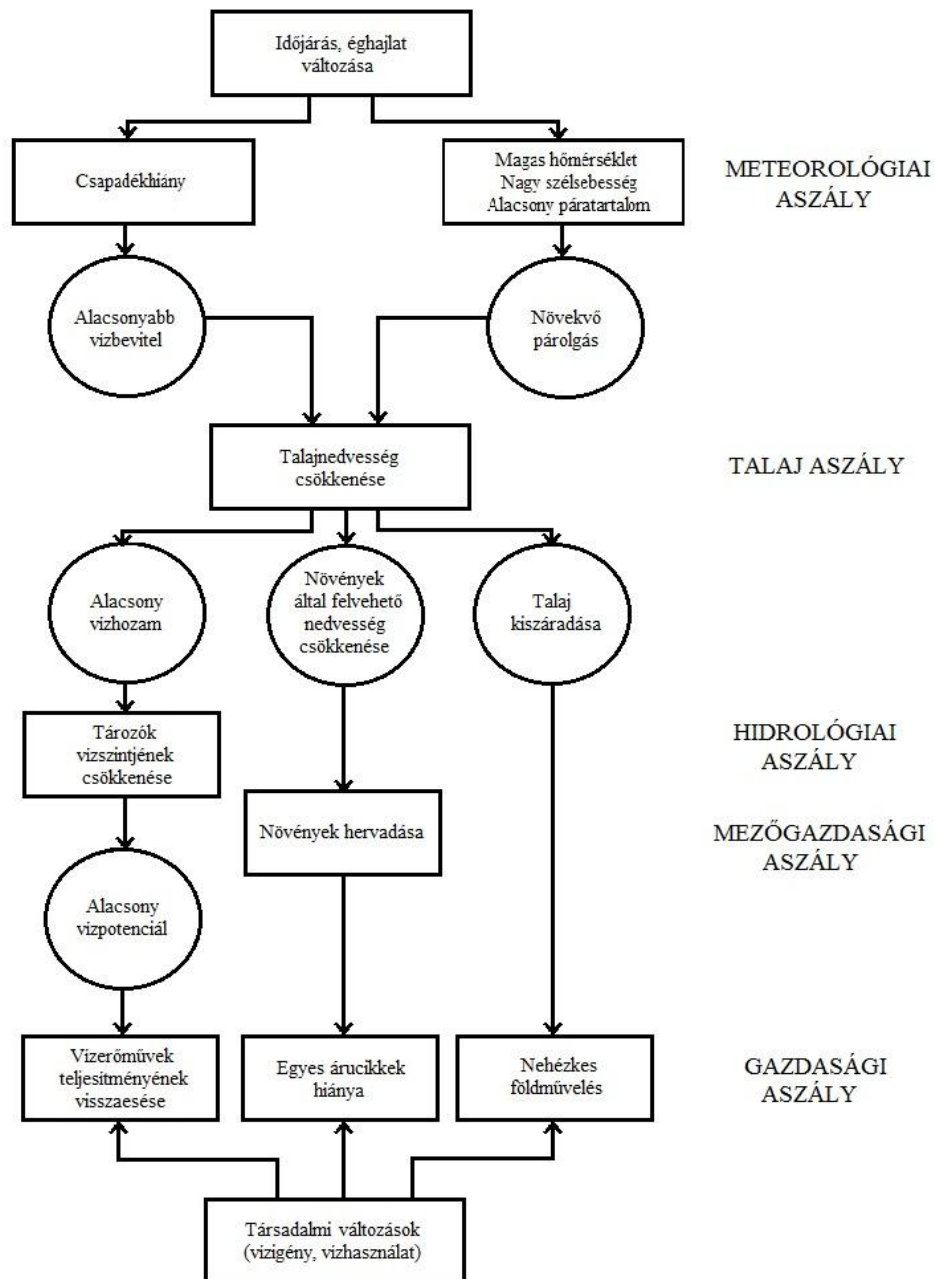
A WMO 1989-ben alkotott definíciója szerint hidrológiai aszálynak nevezzük a felszíni és a felszín alatti vízkészletek hosszantartó csapadékhiány miatti jelentős beszűkülését. Hatására a tavakban és víztározókban a vízállás, folyók esetén a vízhozam csökkenése figyelhető meg. A kisebb vízmennyiség befolyásolhatja a vízierőművek áramtermelését is. A jelenség számszerűsítése a hidrológiai ciklus mutatószámainak (hótakaró vastagsága, csapadékösszeg, lefolyás, potenciális párolgás) alkalmazásával is kivitelezhető (Bussay et al., 1999).

Gazdasági aszály

Gazdasági aszályon általában a vízhiány következtében felmerülő károk pénzben kifejezett értékét értjük. Ez csak egy becsült érték, mivel az aszály hatásait nem lehet mindenre kiterjedően felmérni és a károk számszerűsítése is nehézségekbe ütközik (Bussay et al., 1999).

2.2. Az aszályt befolyásoló tényezők

Az aszály kialakulásában voltaképpen meteorológiai tényezők játszanak szerepet. Legfőképpen a csapadékmennyiség és ennek időbeli eloszlása a meghatározó. A csapadék mellett fontos paraméter a levegő párologtató képessége, mely főként a hőmérséklettől, a napfénytartamtól és a szélesebségtől függ.



1. ábra. A különböző aszályfajták kialakulásának mechanizmusa (Faragó et al., 1988).

Gyakrabban alakul ki aszály olyan területeken, ahol a domborzati viszonyoknak köszönhetően lejtős terep a jellemző, hiszen ebben az esetben a

csapadék jelentős része lefolyik, nem szivárog be a talajba (Varga-Haszonits et al., 2005). A talaj típusa és vízgazdálkodási tulajdonságai is kiemelkedő fontosságú. Porózusabb, vastagabb termőréteg esetén a talaj több nedvességet tud befogadni, tárolni és a növény számára biztosítani (Pálfai, 2004). A természeti befolyásoló tényezők mellett nem megfelelő emberi tevékenység hatására is alakulhat ki aszály (pl.: földhasználat, talajművelés, vetésforgó rendje, tápanyagellátás, talajvíz túlzott kitermelése, folyószabályozás). Az aszály fajtáihoz kapcsolódó mechanizmusokat az 1. ábrán tekinthetjük át (Faragó et al., 1988).

2.3. A talaj szerepe

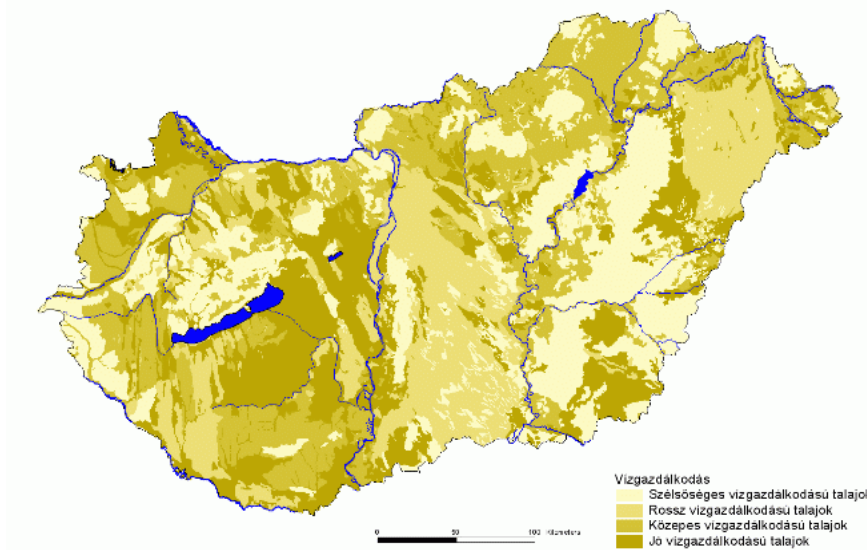
A változó csapadékvizonyok, a szélsőséges vízháztartás, a geográfiai jellemzők, a mezőgazdaság és a környezetvédelem szempontjából is kitüntetett jelentősége van a talaj vízraktározó képességének. A talaj vízháztartása meghatározza a talaj levegőgazdálkodását, a biológiai tevékenységet, a tápanyagforgalmat és a talajtakaró minőségét.

A talaj nedvességtartalma a fentről érkező csapadékból, valamint az alulról felemelkedő talajvízből származik, és párolgás hatására távozik el onnan (Kovács, 1978). A talajvíz helyzetét két fontos meteorológiai tényező – a csapadék és a párolgás befolyásolja. A természetes hatások mellett fontos megemlíteni, hogy a fejlődő technika és az egyre inkább növekvő igények okán az emberi tevékenység (vízkitermelés, öntözés, vegyi anyag használat, fakitermelés, terület-beépítettség) is fontos tényezőként lép fel (Liptai et al., 1985).

Magyarország térségében hidro-klimatológiai szempontból az év két részre különíthető el: az egyik időszakban több csapadék hullik, mint ami el tud párologni (nedves időszak, pozitív vízmérleg); a másik időszakban a levegő sokkal több nedvességet lenne képes befogadni párolgás útján, mint amennyi ténylegesen rendelkezésre áll a lehullott csapadék eredményeképpen (száraz időszak, negatív vízmérleg). Ennek megfelelően alakul a talaj vízháztartása is, vagyis nedves időszakban magas annak nedvességtartalma, száraz időszakban azonban jelentős mértékben lecsökken (Varga-Haszonits, 2005). A téli hónapokban az Alföldön a talaj közel 100%-ig telítődik, így ezután a talaj a vizet már nem képes megtartani, melynek következtében a talajvízszintig szivárog, növelve annak mennyiségét. Március környékén megindul a talajvíz fokozatos csökkenése, majd az őszi hónapokra eléri minimumát, mely átlagos időjárási helyzet esetén

35–40%-os nedvességtartalmat jelent. Szárazabb őszi időszakokban a nedvesség akár 10% alá is eshet (Dunay et al., 1993).

Felmérések alapján (Várallyay, 2008) elmondható, hogy Magyarország talajainak 43%-a kedvezőtlen, 26%-a közepes és 31%-a jó vízgazdálkodású (2. ábra). A kedvezőtlen vízháztartás okai közé tartoznak például a nagy homoktartalom, a szikesedés, a sekély termőrétteg és egyéb tényezők. A térképen látható, hogy Magyarország „rossz vízgazdálkodású” zónái egybeesnek az aszályosodás szempontjából fokozottan veszélyes területekkel.



2. ábra. Magyarország talajainak potenciális vízraktározó képessége
(Forrás: Várallyay, 2008)

Az utóbbi évtizedben a fogyatkozó csapadékmennyiség és a növekvő párolgás következtében a talaj felső 1 m-es rétegének relatív nedvességtartalma csökkenő tendenciát mutat (Nemes, 1993), azonban ez a jelenség már az 1970-es évek eleje óta megfigyelhető a Duna-Tisza közén, illetve az 1980-as évek eleje óta a Tiszántúlon is. A természetes ingadozás és az emberi tevékenységből származó hatás következményeként a Duna-Tisza közén a talajvíz legmagasabb és legalacsonyabb állása között 5–6 m különbség is előfordulhat. Süllyedő talajvízszint esetén a lefolyás erősen csökkenhet, a vízfelületek párolgása fokozatosan növekedhet, mely leginkább a tavaknál jelent problémát. A nagyobb folyóknál nem várható drasztikus változás, a Duna esetén (melynek legkisebb vízhozama is kb. 600 m³/s) a vízszint csökkenése során is bőven marad hasznosítható vízmennyiség, azonban gondot okozhat az ennek következtében kialakuló vízminőségromlás (Pálfai, 2007).

2.4. Aszályvizsgálatok múltja és jelene külföldön

Külföldön – elsősorban az Egyesült Államokban – közel száz évre visszamenően találunk olyan vizsgálatokat, melyek összefüggésbe hozhatók az aszály mértékének számszerűsítésével (Heim, 2002). A XX. század elején jobbra a száraz napok számával, valamint a csapadékösszeg bizonyos mértékű hiányával feleltették meg az aszály kialakulását (pl.: 15 egymást követő csapadékmentes nap; az átlagos csapadék 21 napon keresztül alacsonyabb, mint a normál érték 1/3-a (Henry, 1906), stb.). Hasonló kritériumokat alkalmaztak Nagy-Britanniában (15 egymást követő napon a csapadékmennyiség kevesebb, mint 0,25 mm), Indiában (a heti csapadékmennyiség a normál érték 50%-a, vagy az alatti), Oroszországban (a csapadékmennyiség nem haladja meg az 5 mm-t 10 egymást követő napon), Balin és Líbiában (az éves csapadék kevesebb, mint 180 mm) is, azonban ezen meghatározások többnyire csak az adott régió aszályviszonyainak leírására alkalmasak (Heim, 2002). Hamar felismerték, hogy az ehhez hasonló definíciók nem megfelelőek a mezőgazdasági aszály becslésére, hiszen az aszály egzakt leírásához és kialakulási feltételeinek leírásához az egész összetett éghajlati rendszer ismerete szükséges (Abbe, 1894). Az elmúlt száz évben az USA-ban leginkább használatos indexeket az 1. táblázatban foglaltuk össze Heim (2002) nyomán.

Külföldön széleskörűen alkalmazott a Palmer-féle aszály erősségi index (**P**almer **D**rought **S**everity **I**ndex – PDSI), valamint az utóbbi években egyre inkább elterjedt a standardizált csapadék index (**S**tandardized **P**recipitation **I**ndex – SPI) használata. Nemcsak az amerikai kontinensen, hanem Európában (Lloyd-Hughes és Saunders, 2002) és Afrikában (Ntale és Gan, 2003) is közkedvelt az aszálykutatók körében. A PDSI a vízháztartás egyes elemeinek a sokévi átlagtól vett módosulása alapján határozza meg a csapadék hiányát vagy többletét. Ez a módszer az aszálybecslés elfogadott, gyakori és sikeres módja, melyet világszerte alkalmaznak meteorológiai, valamint mezőgazdasági aszály meghatározására. Gyakori használata annak köszönhető, hogy az index hozzávetőleg invariáns a környezeti tényezőkkel szemben (Bussay et al., 1999).

Az SPI a PDSI-nél egyszerűbben alkalmazható mutatószám, mely rövidebb és hosszabb időszakok leírására egyaránt megfelelő. Erre vonatkozóan végeztek vizsgálatokat Bussay és munkatársai (1998), valamint Szalai és Szinell (2000)

néhány hazai állomásra, s Lloyd-Hughes és Saunders (2002) egész Európára kiterjedően. Az elemzések során arra a következtetésre jutottak, hogy az SPI alkalmas a legtöbb típusú aszály számszerűsítésére.

Index neve	Kapcsolódó hivatkozás	Elemzett változók	Alkalmazási terület
Munger index	Munger, 1916	Csapadékmennyiség	Erdőtűz kialakulásának valószínűsége
Kincer index	Kincer, 1919	Csapadékmennyiség	Aszály területi eloszlása
Marcovitch index	Marcovitch, 1930	Hőmérséklet, csapadékmennyiség	Bogarak klimatikus körülményeinek meghatározása
Blumenstock index	Blumenstock, 1942	Csapadékmennyiség	Rövididejű aszály
Megelőző csapadék index (Antecedent Precipitation Index)	McQuigg, 1954	Csapadékmennyiség	Aszály és árvíz előrejelzése
Nedvesség alkalmassági index (Moisture Adequacy Index)	McGuire és Palmer, 1957	Csapadékmennyiség, talajnedvesség	Mezőgazdasági aszály
Palmer-féle aszály erősségi index (Palmer Drought Severity Index)	Palmer, 1965	Felszíni vízmérleg elemei, hőmérséklet	Hidrológiai aszály időbeli és térbeli kiterjedése
Termésnedvességi index (Crop Moisture Index)	Palmer, 1968	Felszíni vízmérleg elemei, hőmérséklet	Mezőgazdasági aszály
Keetch-Byram-féle aszályindex (Keetch-Byram Drought Index)	Keetch és Byram, 1968	Csapadékmennyiség, talajnedvesség	Erdőtűz kialakulása
Felszíni vízellátottsági index (Surface Water Supply Index)	Wilhite és Glantz, 1985	Hótakaró, víztározók állapota, folyók vízhozama, csapadékmennyiség	Nyugati vízgyűjtők
Standardizált csapadékindex (Standardized Precipitation Index)	McKee et al., 1993	Csapadékmennyiség	Száraz-nedves területek elkülönítése, átlagos érték előfordulási valószínűsége
Növényállapot index (Vegetation Condition Index)	Kogan, 1995	Műholdadatok (látható és közeli infravörös tartomány)	Növényállapot felmérése
Aszályjelző rendszer (Drought Monitor)	Svoboda, 2000	Szárazsági indexek összevonása, kiegészítő mutatók	Univerzális

1. táblázat: A XX. században az Amerikai Egyesült Államokban alkalmazott legfontosabb aszályindexek kronológiai áttekintése (Heim, 2002)

2.5. Aszályvizsgálatok Magyarországon

Az aszály tárgykörével a hazai szakirodalom – jelentőségéhez képest – viszonylag keveset foglalkozott, melynek legfőbb oka az, hogy a mai napig nem alakult ki egységes vélemény arról, hogy Magyarországon mely index, illetve paraméter a legmegfelelőbb az aszály jellemzésére. Először az 1960-as években végeztek vizsgálatokat az aszály, valamint a vízhiány előfordulási valószínűségére vonatkozóan. Szesztay (1966) Debrecenre számította ki a nyári félévekre valószínűsíthető (a lehetséges párolgás és a csapadék különbségeként értelmezett) vízhiányt és adataiból megszerkesztette az 1871–1960 időszakra vonatkozó valószínűségi görbét, melyről leolvasható, hogy milyen bizonyossággal kell adott mértékű vízhiányra számítani (Pálfai, 2004). Hasonló vizsgálatot végzett Antal (1991), aki a vízhiányt Debrecen, Mosonmagyaróvár és Szombathely megfigyelő állomások adatai alapján elemezte.

Ezen vizsgálatokat követően már többnyire olyan elemzések születtek, melyekben meteorológiai adatokon kívül a talaj tulajdonságait is figyelembe vették. Elsőként az Országos Vízgazdálkodási Keretterv (Varga, 1984) mutatta be modellvizsgálatát, melynek keretén belül több tucat növénycsoportra, különböző termésszintekre elkülönítve a talajvíz mélységét is számba vették. A légköri hatásokat 23 állomás átlaghőmérsékleti- és csapadék-adatsoraival jellemezték (Pálfai, 2004). Néhány évvel később Varga-Haszonits (1989) a párologtató-képesség és a csapadék hányadosaként értelmezett ariditási indexet számolt 25 megfigyelői állomás adataiból az 1881–1980 közötti 100 éves időszakra. Az 1990-es évek első felében több említésre méltó tanulmány is született a szárazság kifejezésére. Dunay és Tölgyesi (1993) munkájában egy 43 éves tenyészidőszaki talajnedvesség adatsorra támaszkodva mutatja be hazánk 9 állomására az általuk három külön csoportba (kedvező vízellátású, aszályos és súlyosan aszályos) sorolt aszálygyakorisági értékeket. A következő évben Szász (1994) dolgozott ki különféle szárazsági indexeket, melynek átlagértékei alapján hazánk területére eloszlástérképet rajzolt. Munkája során meghatározta a szélsőségesen meleg és száraz hónapok százalékos gyakoriságát a nyári félév hónapjaiban.

Hidrológusok körében széleskörűen alkalmazták az 1990-es évek végén magyarországi éghajlati körülményekhez igazodva kialakított Pálfai-féle indexet,

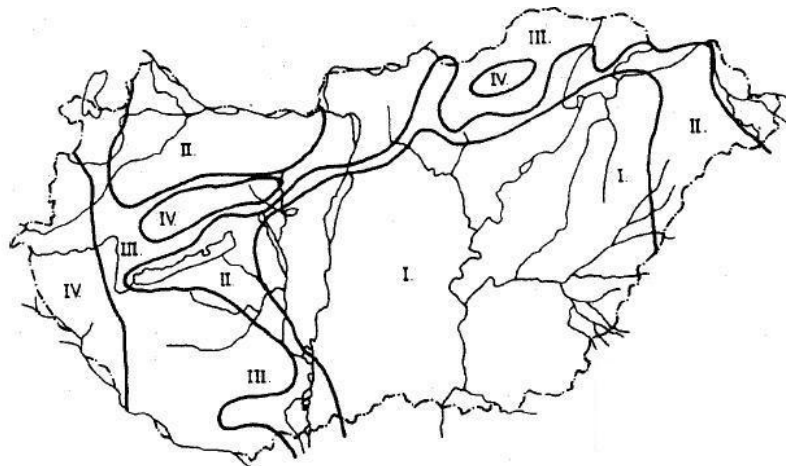
amely a hőmérséklet- és csapadékadatok mellett korrekciós faktorokat is tartalmaz (Pálfai et al., 1999). A Pálfai-féle index elsődleges formája 1987-ben került publikálásra, melynek keretén belül Pálfai (1987) az index 10%-os előfordulási valószínűségű értékeinek területi eloszlását, valamint hazánk területére képzett átlagok Gauss-függvény szerinti eloszlásgörbéjét határozta meg.

A nemzetközi irodalomban elterjedt Palmer-féle aszály erősségi index (Palmer, 1965) hazai meteorológiai és mezőgazdasági alkalmazására csak az utóbbi évtizedekben került sor, mivel gyakorlati célú használata némiképp nehézkes (Bussay, 1999).

2.6. Magyarország aszályossági zónái

Magyarországon az aszály területi eloszlása és erőssége évről-évre jelentős eltéréseket mutat, azonban hosszabb időszakot vizsgálva elkülöníthetők olyan zónák, melyeken belül ezen éghajlati-hidrológiai kockázati tényező számszerűsített értékei közel megegyeznek. Hazánk aszályossági és csapadékviszonyairól területi áttekintést nyújtanak a vízhiány, valamint a különböző aszálymutatók előfordulási valószínűségi értékeinek területi eloszlását bemutató térképek (Pálfai, 2004).

Az átlagos évi csapadékmennyiség jelentős térbeli változatosságot mutat az országon belül: az Alföld középső térségének 500 mm/év alatti értékétől kezdődően az Alpokalja 850 mm/év feletti értékéig. Ennek megfelelően készült el az 1980-as években az 5/1976. sz. OVH (Országos Vízügyi Hivatal) rendelkezés szerint az ország éghajlati, öntözési körzeteit szemléltető térkép, melyet a 3. ábrán mutatunk be.



3. ábra. Magyarország ariditási tényezői szerint kijelölt 4 körzete (Kereszturszky et al., 1998)

A térképen látható zónák számozása I.–IV. terjed, mely növekvő irányban az egyre csökkenő aszályosságot jelzi. Az I. zóna az aszályosság szempontjából leginkább veszélyeztetett területeket, a II. és III. zóna a közepesen, míg a IV. zóna a legkisebb kockázattal jellemezhető térségeket jelöli. Az ország északi, nyugati részei és a Dunántúl a legkevésbé aszályos zónába tartoznak. Magyarország legaszályosabb nagytája egyértelműen az Alföld, mely főként mezőgazdasági művelés alatt áll. Az Alföld Tisza-völgyi része kétszeresen is hátrányos térség, hiszen belvízi szempontból is meglehetősen veszélyeztetett területnek számít. Az I. zóna (nagyon erősen aszályos térség) az ország területének kb. a 40%-át teszi ki, és ez a mezőgazdasági terület arányát tekintve az összterület 75%-a, vagyis kb. 28 000 km² (Pálfai, 2004).

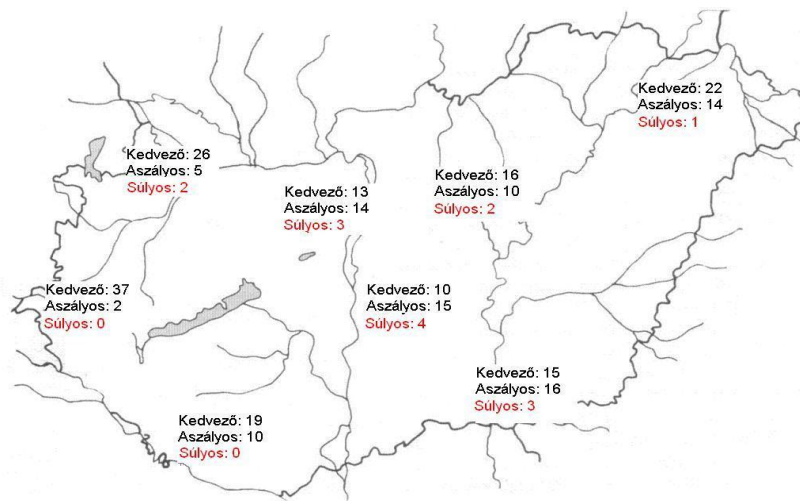
2.7. Aszálygyakoriság hazánkban

Az aszály kialakulásában kétséget kizáróan a legfontosabb szerepe a csapadéknak van, melyről tudjuk, hogy térben és időben is a legjelentősebb ingadozást mutató klimatológiai elem. Teljesen csapadékmentes időszakok és viszonylag rövid idő alatt lehulló nagy csapadékok egyaránt előfordulhatnak hazánkban. A csapadék időbeli eloszlására jellemző, hogy az Alföldön, s a Duna-Tisza közén az egyes évek csapadékösszegeiben két-háromszoros eltérés is előfordulhat, mely a tenyészidőszakok havi csapadékösszegeire vonatkozóan még ennél nagyobb is lehet (Bussay, 1999).

Az aszály időben hosszabb folyamat, melynek kezdete és vége nehezen meghatározható. Hazánkban legjellemzőbb időszaka a nyár, de előfordul, hogy a tavasz a legszárazabb. Az egymást követő évek aszályerőssége meglehetősen eltérő lehet. Ha a csapadékhiány már ősszel, illetve télen fellép, akkor lehetséges a tavaszi aszályra bekövetkezése (Pálfai, 2004). A legerősebb aszály akkor alakul ki, ha a csapadékhiányos ősz és tél után a tenyészidőszakban kevés a csapadék, a nyár folyamán nincs számottevő eső és ha nagy a hőség. A helyzetet súlyosbítja, ha a megelőző évek szárazsága miatt a talajvíz szintje mélyebben helyezkedik el (Pálfai, 2004).

Az aszály érintheti az ország csapadékosabb nyugati részét és a lényegesen szárazabb keleti felét egyaránt. Az aszály fellépését Dunay és Tölgyesi (1993) a talaj relatív nedvességének határértékéhez köti, vagyis amennyiben a talaj vízkészlete nem süllyed a szántóföld hasznos vízkapacitásának 40%-a alá, azt az

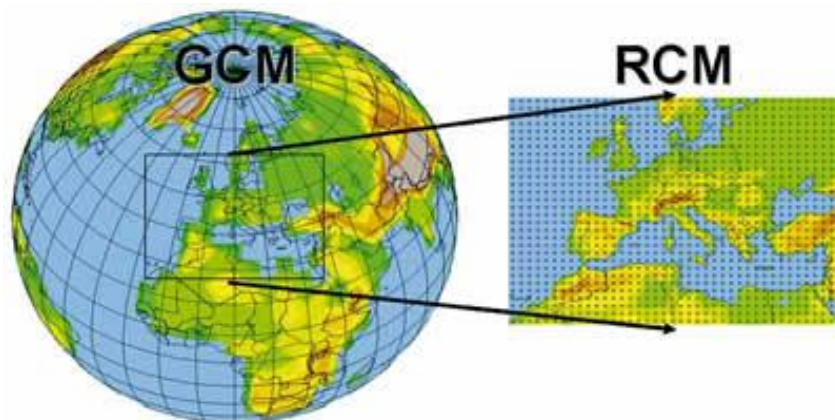
évet kedvező vízellátásúnak nevezik. Aszályosak azok az évek, melyekben 20% alá csökkent a talajnedvesség, de nem érte el a súlyos aszály fokozatát, melyet 10% alatti érték jellemez. A 4. ábrán az 1951 és 1992 közötti aszálygyakoriságok láthatók. A térképről leolvasható, hogy a vizsgált 42 év alapján hazánk nyugati részén az aszály rendkívül ritka jelenség. Az északnyugati országrészben a Kisalföld területén súlyos aszály csupán kétszer, míg aszály öt esetben fordult elő. Ezzel párhuzamosan a megfelelő vízellátású időszakok nagy számban (26 év) jelentkeztek. Hazánk keleti része felé haladva az aszály gyakorisága számottevően nő, így az Alföldön súlyos vízhiány átlagosan tízévente, míg aszályos év átlagosan megközelítőleg háromévente következik be.



4. ábra. Az aszályok gyakorisága hazánkban 1951 és 1992 között (Dunay és Tölgyesi, 1993)

3. Felhasznált adatok és módszerek

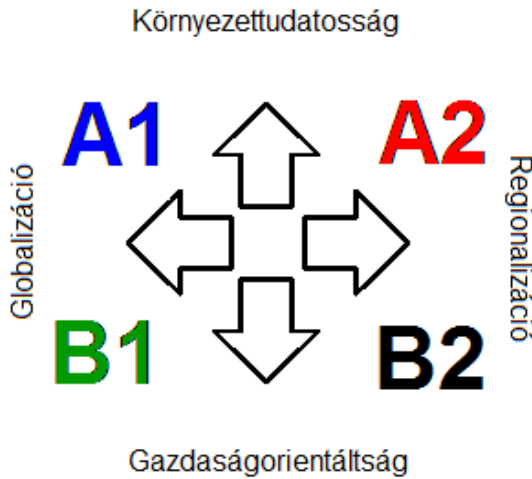
A Föld klímájának jelenlegi helyzetét, a múltban történt változásait, valamint jövőben várható alakulását globális klímamodellekkel szimulálhatjuk. Ezen modellek segítségével megállapítható, hogy milyen módon reagál az éghajlati rendszer a rá ható kényszerekre és azok változásaira. Az éghajlati modellek két fő típusát különböztethetjük meg: a globális légkör-óceán általános cirkulációs modelleket (AOGCM: Atmospheric-Ocean General Circulation Model), melyeknek horizontális felbontása 300 km körüli és a regionális klímamodelleket (RCM: Regional Climate Model), melyeknek felbontása akár 10–25 km is lehet. A globális modellek temérdek információt nyújtanak az éghajlatváltozással kapcsolatban, azonban durva térbeli felbontásuk miatt regionális skálán nem alkalmasak a klíma szimulálására. Éppen ezért szükség van finomabb felbontású, földrajzi sajátosságokat figyelembe vevő és a kisebb skálájú folyamatok parametrizációját megbízhatóan leíró regionális modellekre, melyekhez a globális modellszimulációk biztosítják a regionális modellekhez szükséges kezdeti- és peremfeltételeket. Az 5. ábrán a globális és a regionális éghajlati modellek rácsfelbontásbeli különbségét tüntettük fel.



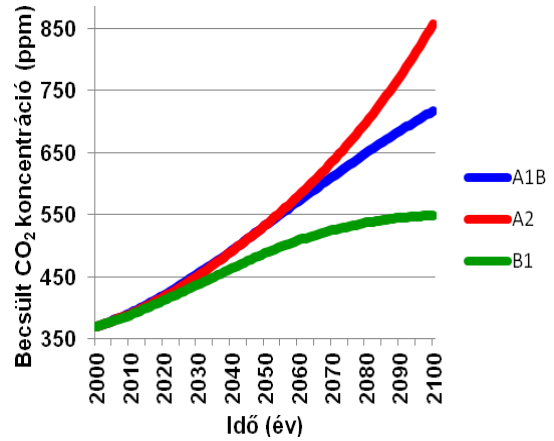
5. ábra. Globális és regionális éghajlati modellek rácsfelbontásbeli különbsége.
(Forrás:www.wmo.int)

Vizsgálataink során az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén adaptált PRECIS és RegCM regionális klímamodellek, valamint az Országos Meteorológiai Szolgálat Numerikus Modellező és Éghajlat-dinamikai Osztályán adaptált ALADIN regionális klímamodell XXI. századra vonatkozó szimulációit elemezzük az A1B szcenárióra vonatkozóan (Nakicenovic és Swart, 2000). Az IPCC különböző ún. SRES forgatókönyveihez jól definiált társadalmi,

környezeti, gazdasági, politikai és technológiai tendenciák kapcsolódnak (6. ábra). Az általunk vizsgált A1B scenárió esetén becsült légköri CO₂ koncentrációsíntet a 7. ábrán láthatjuk.



6. ábra. Az IPCC forgatókönyvrendszer vázlatos felépítése. (Forrás: www.ipcc.ch)



7. ábra. A CO₂ becsült koncentrációsíntje a XXI. században. (Forrás: www.ipcc.ch)

3.1. Az ALADIN modell

Az ALADIN–Climate (**A**ire **L**imitée **A**daptation **D**ynamique **D**éveloppement **I**nternational) meghajtó globális modelljét, az ARPEGE–Climat-ot az 1990-es évek elején fejlesztették ki a Météo France-nál, melyet az Országos Meteorológiai Szolgálatnál 2005-ben adaptáltak (Csima és Horányi, 2008). A modell eredetileg rövidtávú előrejelzésre készült, s az éghajlatváltozás vizsgálatára továbbfejlesztett verzióban a modell fizikai parametrizációs módszereit úgy módosították, hogy a hosszabb időskálán lejátszódó folyamatok legyenek meghatározóak. Az adaptált modell Közép-Európát lefedő 25 km-es rácson történő szimulációja csak a múlt (1961–2000), míg a finomabb felbontású, Kárpát-medencét reprezentáló területű, 10 km-es rácshálózaton történő futtatás az 1961–2100 időszakra áll rendelkezésre az A1B scenárió figyelembevételével (Szabó et al., 2011). A Kárpát-medencét reprezentáló 20482 db rácspontból 4535 pont található Magyarország területén.

3.2. A PRECIS modell

A PRECIS (**P**roviding **R**egional **C**limates for **I**mpacts **S**tudies) regionális klímamodellt a brit Hadley Központban fejlesztették ki az 1990-es évek végén, s a hazai futtatásokhoz a HadCM3 (Gordon et al., 2000) globális modell outputjai

szolgáltatták a kezdeti- és peremfeltételeket. A modell magában foglalja a légköri mozgásrendszerek dinamikai folyamatait, a talajhidrológiai folyamatokat, a sugárzási egyenleg komponenseit, a felhő- és csapadékképződést, valamint a kén körforgalmát (Jones et al., 2004). Peremfeltételként szükséges a potenciális hőmérséklet, a légkör nedvességtartalma, a felszíni légnyomás, valamint a horizontális szélesség-komponensek megadása. A modellbe iktatott felszínborítottsági tényező mérési eredmények adatsoraként szerepel, és a modellfuttatáshoz szükséges a vízfelszínnek hőmérsékleti és jégborítottsági időszora is. A 19 vertikális szintet alkalmazó PRECIS modell horizontális rácsfelbontásának beállítására kétféle lehetőség áll rendelkezésre: $0,44^\circ \times 0,44^\circ$ (mely kb. 50 km-es rácshálózatot jelent) vagy a $0,22^\circ \times 0,22^\circ$ rácshálózat (mely hozzávetőlegesen egy 25 km-es rácshálózat). Az ELTE Meteorológiai Tanszékén a PRECIS modellfuttatásokat a finomabb térbeli felbontással végezték (Bartholy et al., 2009a) az 1951–2100 időszakra az A1B kibocsátási forgatókönyv alapján, valamint a 2071–2100-as időszakra az A2 és B2 scenárióra vonatkozóan (Bartholy et al., 2009a, Pieczka et al., 2009). A Kárpát-medencét lefedő 1680 rácspontból 229 pont esik Magyarország területére.

3.3. A RegCM modell

A RegCM (**R**egional **C**limate **M**odel) regionális klímamodellt az egyesült államokbeli Légköri Kutatások Nemzeti Központjában (NCAR: **N**ational **C**enter for **A**tmospheric **R**esearch) fejlesztették ki az 1980-as évek végén (Giorgi, 1989; Dickinson et al., 1989), és szerte a világban használják az éghajlatváltozás elemzésére, valamint évszakos előrejelzések készítésére (Gao et al., 2007; Im et al., 2007). Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén a RegCM regionális klímamodell adaptálására a Kárpát-medence térségére a CECILIA (Central and Eastern Europe Climate Change Impact and Vulnerability Assessment) Európai Unió projekt keretében került sor (Torma et al., 2008; 2011).

A 10 km-es horizontális felbontású RegCM modell szimulációi során 18 vertikális szintet alkalmaztak és a futtatásokat az 1961–1990 referencia időintervallumon kívül két jövőbeli időszakra végezték el: a 2021–2050 és a 2071–2100 időszakokra (Torma, 2011). A szükséges kezdeti- és peremfeltételeket

a hamburgi ECHAM5 globális éghajlati modell (Roeckner et al., 2006) outputjai biztosították. Az adaptált modell a jövőre vonatkozóan az A1B scenáriót vette figyelembe. Az 5280 db Kárpát-medencét lefedő pont közül 977 pont található hazánk területén.

3.4. Az aszály mérőszámai

A tömérdek aszálydefinícióból adódóan az aszály mérőszámaira is sokféle javaslat született és a gyakorlatban is különféle mérőszámokat használnak (Dunkel, 2009; Faragó et al., 1988). A számszerűsítésre az egyik legegyszerűbb eszközként az aszályindexek használata terjedt el (Faragó et al., 1988), melynek segítségével leírható az aszály időbeli és térbeli kiterjedése, valamint a súlyossága is meghatározható. Egy másik módszertípus műholdas eljárást alkalmaz, melynek alapja, hogy a műholdak adatai alkalmasak a földfelszíni növénytakaró csökkenő fotoszintetizáló képességének azonosítására és mennyiségi meghatározására (Bussay et al., 1999).

Az aszályindexek elemzése lehetővé teszi, hogy különböző években és helyeken az aszályok mértékét összehasonlítsuk, valamint alkalmasak területi különbségek kimutatására, kölcsönhatás-vizsgálatra és előrejelzésre egyaránt. Használatuk kellő óvatosságot és körültekintést igényel, hiszen különböző klímájú területek közti összehasonlításhoz az anomáliák normalizálása elengedhetetlen. Az aszályindexek kiszámítása és térképre vitele után a mezőgazdasági, vízügyi és társadalmi hatások is nyomon követhetők. Az aszályindexek nagy része meteorológiai elemekből létrehozott számérték, melyek számítása általában egyszerű. A különféle aszályindexek – az aszály definíciójához és meghatározásához hasonlóan – egymáshoz viszonyítva nagy változatosságot mutathatnak (Bussay et al., 1999).

Faragó et al. (1988) csoportosítását figyelembe véve az egyes indexfajták jellemzését és néhány példát a 2. táblázatban foglalunk össze.

Indexfajta	Jellemzés	Példa
Csapadék indexek	<ul style="list-style-type: none"> – Alkalmas a száraz–nedves időszakok éghajlati elkülönítésére, változékonyság meghatározására – Egyszerűek – Kis adatigényűek – Nem mindig tükrözik megfelelően az aszályhelyzetet 	<ul style="list-style-type: none"> – Csapadékindex (Kane és Trivedi, 1986) – Relatív anomália index (Bunting et al., 1976) – Standardizált csapadékanomália index (Katz és Glantz, 1986) – Standardizált csapadékindex (Faragó et al., 1988) – Csapadék anomália index (Bhalme és Mooley, 1980)
Mérleg indexek	<ul style="list-style-type: none"> – Kifinomultabb, precízebb mutatószámok – A vízgyeenleg beveteli oldalán kívül a kiadási oldalt is figyelembe veszik 	<ul style="list-style-type: none"> – Lang-féle esőzési index (Lang et al., 1999) – De Martonne-féle ariditási index (De Martonne, 1926) – Thornthwaite-féle agrometeorológiai index (Kemp, 1990)
Talajnedvességi indexek	<ul style="list-style-type: none"> – Alkalmasak termés kiesés és vízhiány vizsgálatára, hidrológiai aszály becslésére – Összetettek – Rövidebb időszak leírására is megfelelőek 	<ul style="list-style-type: none"> – Ped-féle aszályindex (Bagrov, 1983) – Relatív talajnedvességi index (Nemes, 1993)
Rekurzív indexek	<ul style="list-style-type: none"> – Számításuk során a megelőző időszak adatait is felhasználják – Hosszabb időszakot jellemeznek 	<ul style="list-style-type: none"> – Foley-féle anomália index (Foley, 1957) – Palmer-féle aszály index (Palmer, 1965)

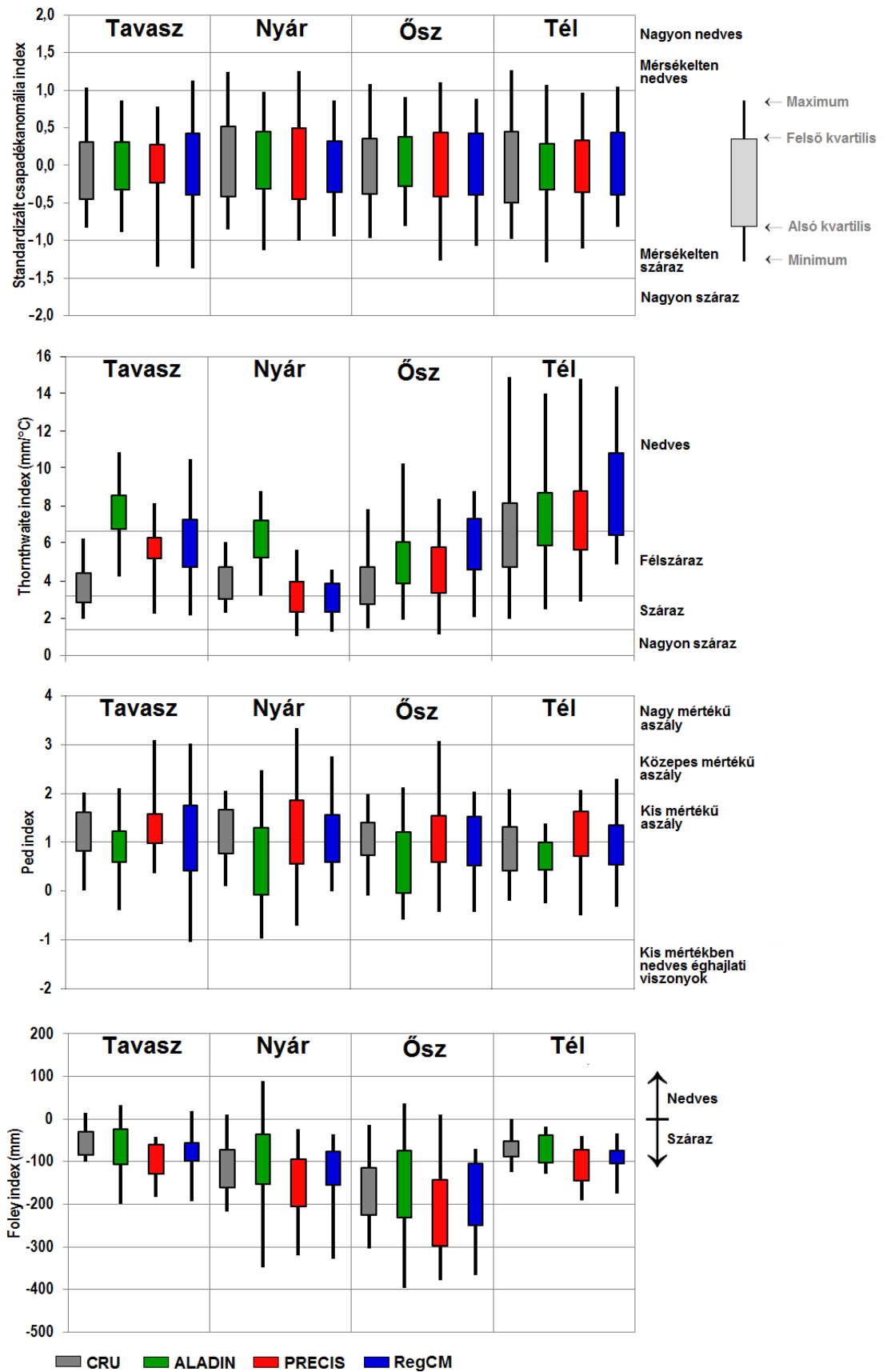
2. táblázat: Az aszályindexek osztályozása és jellemzése Faragó et al. (1988) nyomán.

E dolgozatban a megannyi mutatószám közül négyre végeztük el vizsgálatainkat. A kiválasztás során célunk az volt, hogy az elemzett indexek mind a négy indexcsoport-típust képviseljék. A következő fejezetekben becslést nyújtunk a XXI. században várható aszályhajlam-módosulásokról a standardizált csapadékanomália index, a Thornthwaite-féle agrometeorológiai index, a Ped-féle aszályindex, valamint a Foley-féle anomália index segítségével.

4. Validáció

A klímamodellek eredményeinek értelmezéséhez elengedhetetlen a modellek validációja, hiszen ha nem ismerjük, hogy a modellszimuláció milyen mértékben képes a jelenlegi, illetve közelmúltbeli éghajlatot rekonstruálni, a jövőre vonatkozóan helytelen következtetéseket vonhatunk le. Ugyanakkor nincs garancia arra, hogy a múltbeli időszakot megfelelően leíró modellek a jövőre vonatkozóan is helyes becsléseket adnak (Bartholy et al., 2011). Ennek ellenére a múlttra vonatkozó futtatások validációja a teljes elemzés lényeges részét alkotja, mivel a jövőre vonatkozóan – egyelőre – nincs lehetőség hasonló vizsgálatra. Ebből kifolyólag megvizsgáltuk, hogy a dolgozatban elemzésre kerülő három regionális klímamodell mekkora hibával képes becsülni az aszályindexek értékeit az 1961–1990 referencia időszakban. Az összehasonlítás alapját a Kelet-Angliai Egyetem Éghajlatkutató Osztályán (CRU, **C**limatic **R**esearch **U**nity) meteorológiai állomási mérések adatbázisából (Mitchell et al., 2003; New et al., 2000) összeállított referencia adatsor havi középhőmérsékleti (Jones és Moberg, 2003) és csapadékösszeg (New et al., 2002) mezője képezte.

A 8. ábrán a magyarországi rácspontok figyelembevételével számított átlagos évszakos indexértékeket és ezek változékonyságát ún. Box-Whisker plot-diagram (McGill et al., 1978) segítségével mutatjuk be. A modellenként eltérő színnel jelölt téglalapok alsó és felső határai a minta alsó és felső kvartiliseit (azaz a 25%, illetve 75% valószínűséggel előforduló országos átlagértékeit) jelölik, míg a dobozok alatt és felett elhelyezkedő vonalak a vizsgált időszak alatt előforduló minimális és maximális átlagértékeket mutatják. A diagramok alapján következtethetünk az adott modellszimuláció felhasználásával meghatározott indexértékek évek közti változékonyságára. A standardizált csapadékanómália index esetén a definícióból adódóan a modellek hibája nem mutatható ki (látható, hogy az index átlagértékei 0 értékűek), ezért ebben az esetben csak a modellek által szimulált változékonyságot vizsgálhatjuk, amikor is a legjelentősebb felülbecslés tavasszal a RegCM szimulációi alapján, nyáron és ősszel a PRECIS modell esetén, míg télen az ALADIN modellnél mutatkozik. A Thornthwaite indexnél már nagyobb különbségek figyelhetők meg. A CRU adatbázis alapján hazánkban az évszakok többnyire félszáraz, illetve száraz kategóriába sorolhatók.



8. ábra. A magyarországi rácspontok figyelembevételével számított átlagos évszakos indexértékek a CRU adatbázis, valamint az ALADIN, PRECIS és RegCM szimulációk alapján az 1961–1990 referencia időszakban.

Ettől jelentősebb eltérés télen észlelhető, amikor félszáraz vagy nedves éghajlati viszonyok jellemzők a térségben. A legnagyobb változékonyság is télen volt jellemző, melyet a modellszimulációk outputjaiból meghatározott indexértékek is jeleznek – ám összességében alulbecslik a mértékét. A nyár kivételével mindegyik évszakban mindhárom modell kisebb-nagyobb mértékben felülbecsli a referencia értékeket, legnagyobb mértékben tavasszal. Nyáron az ALADIN kivételével alulbecslés adódott.

A Ped index értékeinél relatíve nagyobb eltérés jelenik meg mindegyik évszakban, a modellek felül- és alulbecslése egyaránt megfigyelhető. A CRU-adatbázis állomási méréseken alapuló átlagértékei alapján hazánk éghajlatára minden évszakban nagyjából 50%-os arányban jellemző a kis mértékű aszály – a legnagyobb mértékben nyáron, míg a legkisebb mértékben télen. A modellszimulációk outputjaiból számított indexértékek nagy része is ebbe a kategóriába, vagy az aszály szempontjából neutrálisnak tekinthető (-1; +1) intervallumba esik. Elsősorban a PRECIS modell esetén jelennek meg ennél nagyobb, közepes mértékű aszályt jelző értékek (a tél kivételével). Az ALADIN-eredmények általában (főként nyáron és tavasszal) alulbecslik a CRU-adatbázis alapján meghatározott indexértékeket. A Foley-féle anomália index alapján hazánk száraz éghajlattal jellemezhető, s a modellszimulációk outputjaiból meghatározott évszakai indexértékek nagy része szintén negatív. Pozitív indexérték elsősorban az ALADIN-eredmények esetén jelenik meg – főként nyáron, melynek gyakorisága azonban nem éri el a 25%-ot. A PRECIS és a RegCM modellszimuláció mind a négy évszakban jellemzően alulbecsli az index értékét. A változékonyságot mindhárom modell felülbecsli a referencia adatbázishoz viszonyítva.

A kontroll-szimulációk és a CRU adatbázis felhasználásával kapott magyarországi rácspontokra vonatkozó átlagértékek különbségéből származó modellhibák számszerűsített értékeit a 3. táblázatban tüntettük fel. Ezen átlagértékek alapján is levonhatjuk azt a következtetést, hogy a Thornthwaite és a Ped index esetén az ALADIN, míg a Foley indexnél a PRECIS eredmények a legnagyobb hibával terheltek.

		ALADIN	PRECIS	RegCM
SAI	Tavaszi	-	-	-
	Nyári			
	Őszi			
	Téli			
Thorntwaite index (mm/°C)	Tavaszi	+4,15	+2,12	+2,31
	Nyári	+2,19	-0,73	-0,78
	Őszi	+1,39	+0,68	+2,07
	Téli	+1,04	+2,75	+1,99
Ped index	Tavaszi	-0,26	+0,23	-0,02
	Nyári	-0,55	-0,04	-0,12
	Őszi	-0,41	+0,05	-0,04
	Téli	-0,25	+0,09	+0,07
Foley index (mm)	Tavaszi	-10,42	-44,93	-23,50
	Nyári	-0,44	-43,44	-12,14
	Őszi	+10,99	-52,02	-16,92
	Téli	+0,05	-36,76	-19,36

3. táblázat. A kontroll-futások (1961–1990) évszakos átlagos hibái Magyarország területére a különböző aszályindexek esetén.

5. Eredmények: A csapadékviszonyok és az aszályhajlam vizsgálata a Kárpát-medence térségére

A vizsgálatba vont három regionális klímamodell kezdeti- és peremfeltételeit eltérő globális modellek szolgáltatják, s különbség mutatkozik a fizikai folyamatok leírására alkalmazott numerikus módszerekben és a parametrizációs eljárásokban egyaránt. A csapadékmennyiség megváltozásának várható iránya és mértéke sokkal nagyobb kihívás a kutatást végző szakemberek számára, mint a hőmérsékleti változások meghatározása, hiszen a modellek gyakran még előjelükben is különböző eredményeket mutatnak, vagyis a csapadék-előrejelzésekben sokkal nagyobb a bizonytalanság (Bartholy et al., 2011). A globális és regionális modell-szimulációkban Magyarország egy átmeneti övben fekszik: hazánktól északra csapadéknövekedés, míg délre csapadékcsökkenés valószínűsíthető a század végére (Christensen és Christensen, 2007).

A regionális éghajlatváltozás elemzésekor minden vizsgált index esetén az egyes évek közötti változékonyságot és az átlagos értékeket az előző fejezetben látottakhoz hasonlóan ún. Box-Whisker diagramokat mutatjuk be. A grafikonok jól szemléltetik a szimulációk alapján az indexértékek eloszlásában várható eltolódásokat. A várható változások területi eloszlását évszakonként külön-külön térképeken jelenítjük meg, melyek lehetővé teszik, hogy az éghajlati viszonyokban valószínűsíthető változások elemzésekor a Kárpát-medence térségén belül meghatározzuk a régiónkénti különbségeket a XXI. századra az A1B scenárióra vonatkozóan. A bemutatott térképeken a sárga és piros színek a várható aszályhajlam-növekedést, míg a zöld és kék árnyalatok az aszályhajlam várható csökkenését jelzik. Minél sötétebb egy-egy árnyalat, annál nagyobb a becsült változás mértéke. A térképek fölött a magyarországi rácspontokra leválasztott átlagértékeket jelöltük, míg alul azon hazai pontok arányát, ahol a várható változás a statisztikai Welch-próba (Dévényi és Gulyás, 1988) alapján 95%-os szinten szignifikáns.

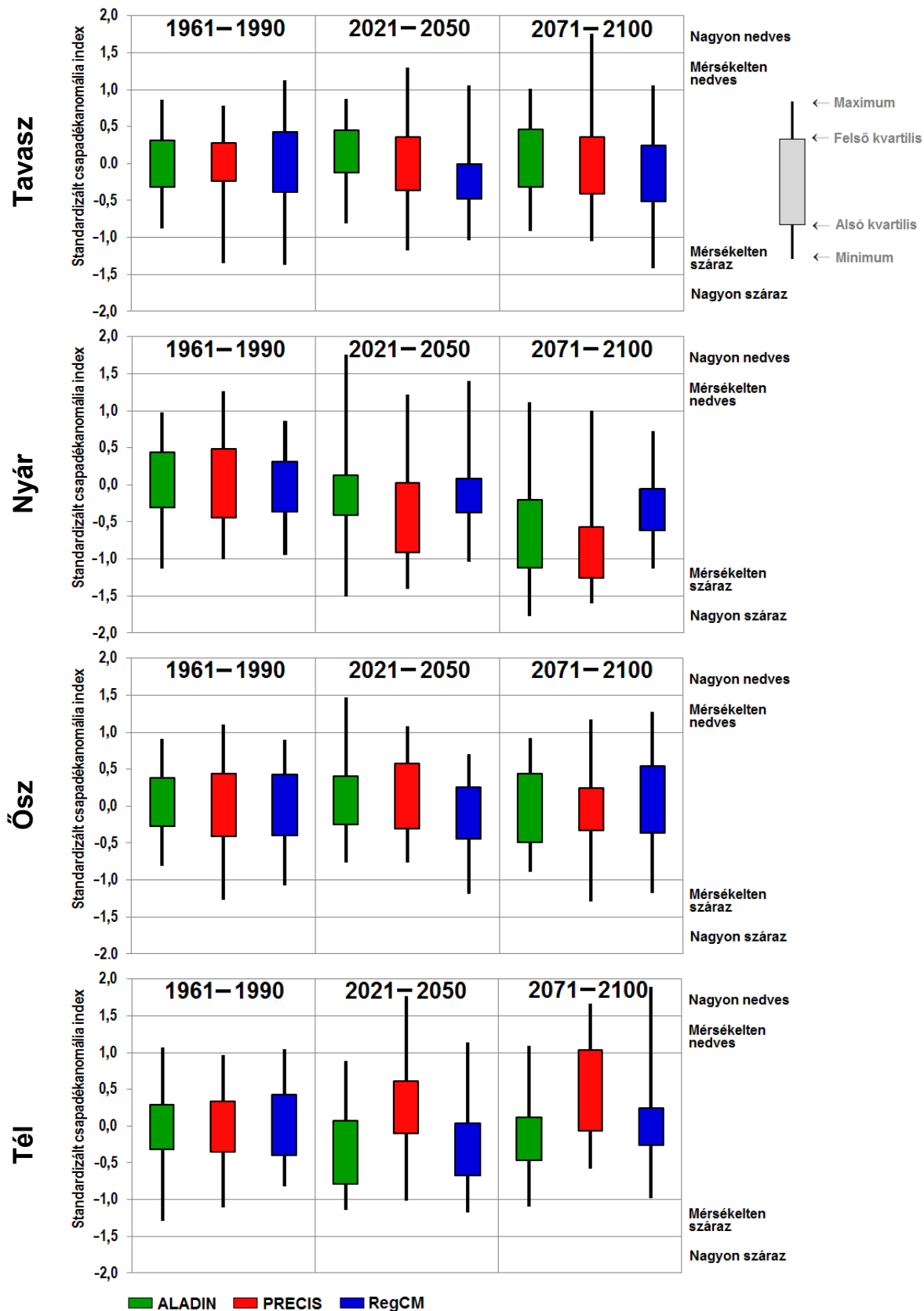
5.1. A standardizált csapadékanómia index

A standardizált csapadékindex (Katz és Glantz, 1986) számítása során a havi szimulált csapadékösszeg (P [mm]) és a referencia időszak csapadékátlagának ($m(P)$ [mm]) különbségét vettük, majd a vizsgált időszak szórásával ($d(P)$ [mm]) hányadost képeztünk:

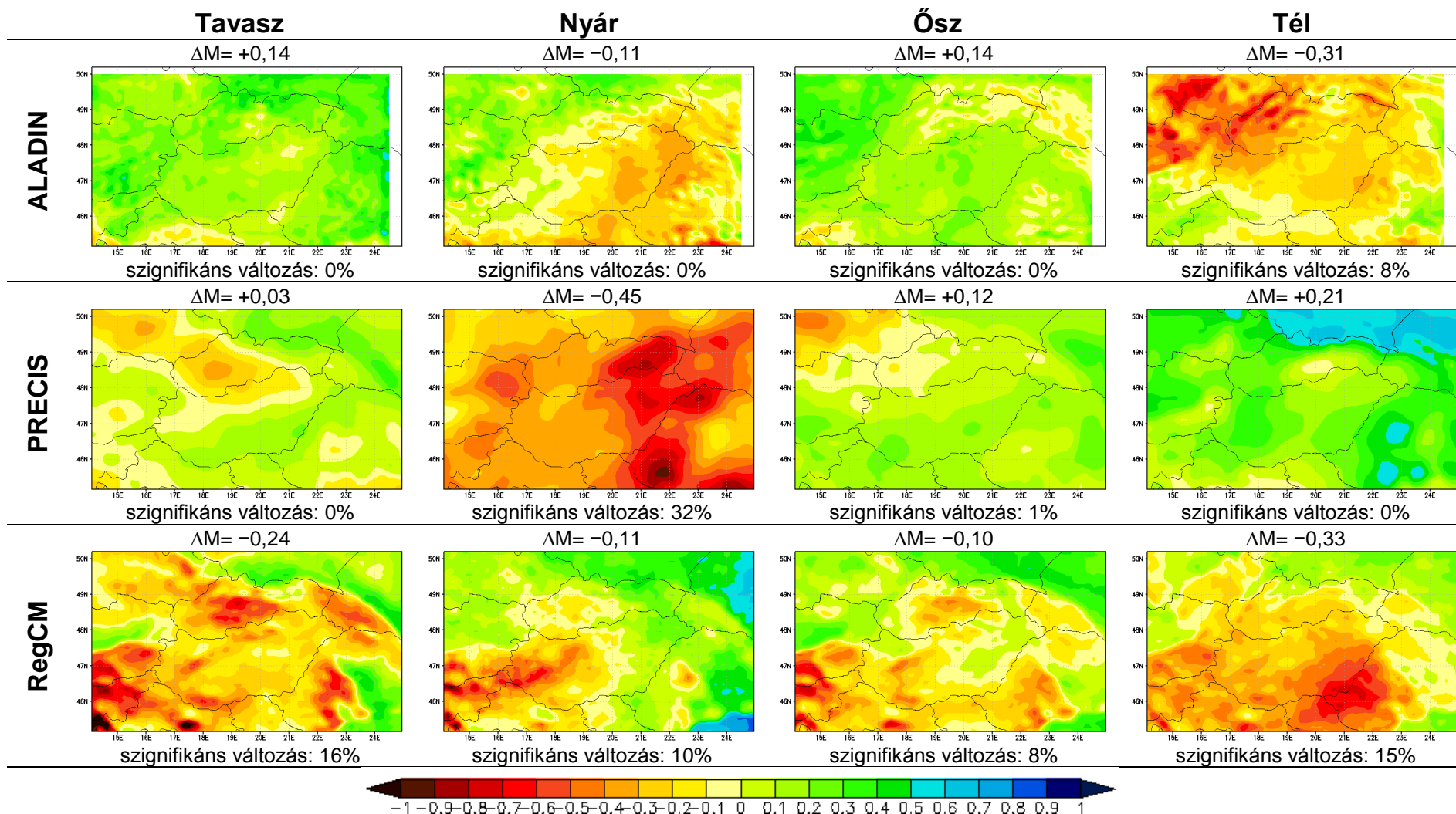
$$SAI = \frac{P - m(P)}{d(P)}$$

A 9. ábrán a SAI magyarországi rácspontok figyelembe vételével számított évszakos átlagértékek láthatók az ALADIN, PRECIS és RegCM szimulációkra vonatkozóan. A referencia időszakhoz viszonyítva eltérő trendeket figyelhetünk meg. Nyáron mindhárom modell szárazodást prognosztizál a XXI. század végéig, melynek üteme és mértéke a RegCM klímamodell szimulációi alapján a legkisebb, míg a PRECIS esetén a legnagyobb. Így hazánk az 1961–1990 időszakhoz viszonyítva az évszázad végére több nyári időszakban is mérsékelten száraz besorolásba kerülhet. Ugyanezen évszakban az ALADIN modell becslései jelzik a legnagyobb változékonyságot mindkét jövőbeli időszakra. Télen a referencia időszakhoz képest a PRECIS modell egyértelmű csapadéknövekedést prognosztizál, míg az ALADIN és RegCM a század közepéig csökkenő, majd ezután növekvő tendenciát mutatnak. Az átmeneti évszakokban is látható, hogy a változások időbeli menete korántsem egyenletes, vagyis a század során előfordulhat előjel-váltás a csapadéktrendben. Ilyen például ősszel a PRECIS regionális klímamodell, mely a 2021–2050 időszakban enyhe növekedést feltételez, ami a század végére kisebb mértékű csökkenéssé vált át. Másik példa lehet a RegCM-ből származtatott indexértékek trendje, mely éppen ezzel ellentétes. A szórásértékek megváltozása a korábbi időszakok esetén a PRECIS-nél, a távolabbi célidőszakban a RegCM-nél a legnagyobb mértékű.

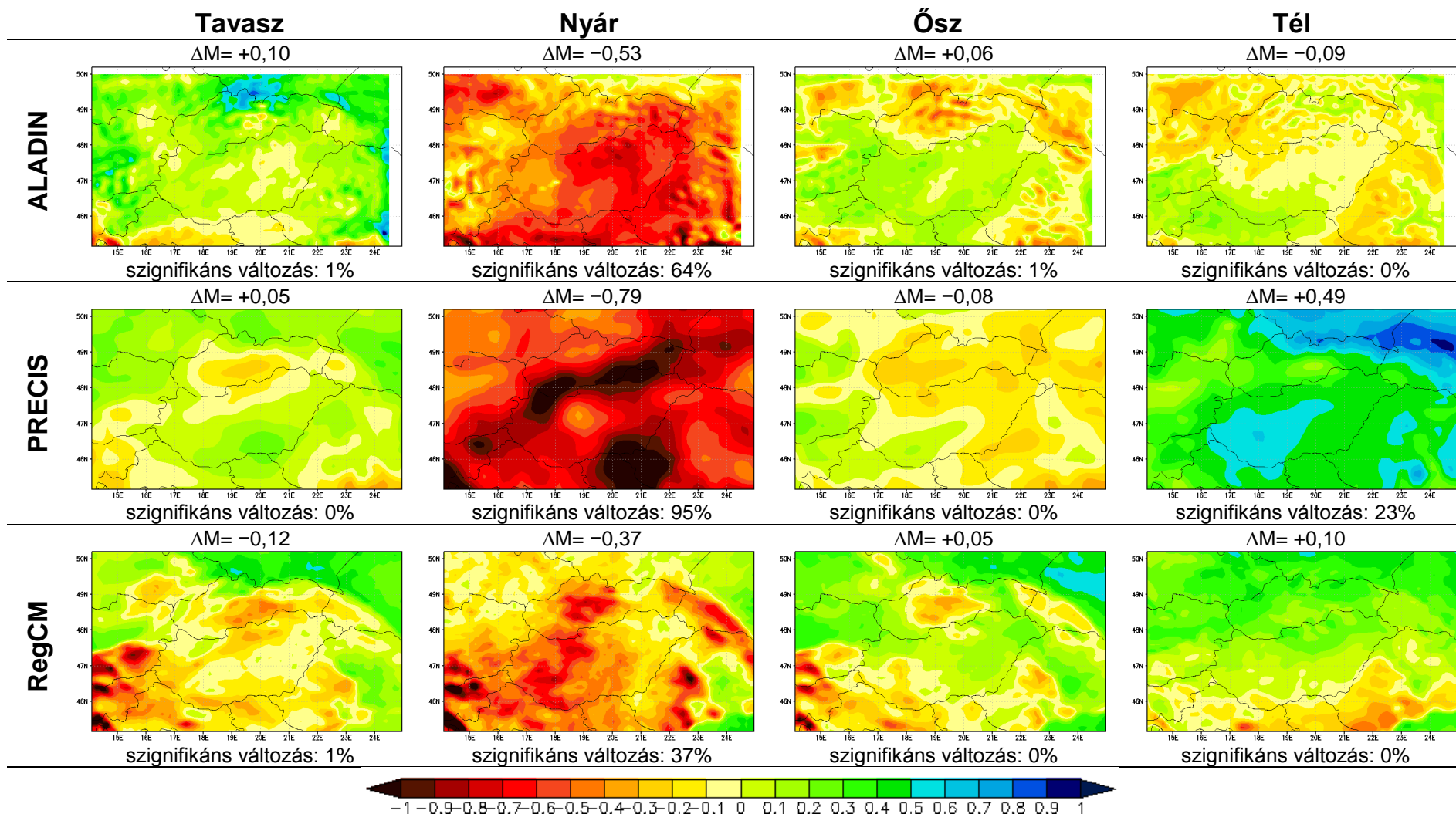
A 10. és 11. ábrán a standardizált csapadékanómia index referencia-időszakhoz viszonyított 2021–2050, illetve 2071–2100 időszakra várható évszakos változásait tüntettük fel a Kárpát-medence térségére. A térképekről leolvasható, hogy a módosulások az átmeneti évszakokban a legkisebb mértékűek és a változás előjele ezekben az évszakokban a legváltozatosabb, azonban ezek a Welch-próba alapján 95%-os szinten nem szignifikánsak.



9. ábra. A standardizált csapadékanómália index magyarországi rácspontok figyelembevételével számított évszakos átlagértékei az ALADIN, PRECIS és RegCM szimulációk alapján, referencia időszak: 1961–1990.



10. ábra. A standardizált csapadékanómia index 2021–2050-re várható évszakos változása a Kárpát-medence térségére az ALADIN, PRECIS és RegCM szimulációk alapján, referencia időszak: 1961–1990. A térképek fölött a magyarországi rácspontokra vonatkozó átlagos változás (ΔM) jelenik meg, a térképek alatt pedig a hazai rácspontok közül azoknak az aránya, ahol a várható változás 95%-os szinten statisztikailag szignifikáns.



11. ábra. A standardizált csapadékanómia index 2071–2100-re várható évszakos változása a Kárpát-medence térségére az ALADIN, PRECIS és RegCM szimulációk alapján, referencia időszak: 1961–1990. A térképek fölött a magyarországi rácspontokra vonatkozó átlagos változás (ΔM) jelenik meg, a térképek alatt pedig a hazai rácspontok közül azoknak az aránya, ahol a várható változás 95%-os szinten statisztikailag szignifikáns.

A három vizsgált modell megegyező előjelű átlagos változást csupán a nyári évszakra mutat. A korábbi célidőszakban ezekben a hónapokban az ALADIN és a RegCM modell egyaránt feltételez enyhe, nem szignifikáns csapadéknövekedést az ország különböző (rendre a nyugati és keleti) területein, azonban a század végére hazánk teljes területén szignifikáns csapadékcsökkenés lesz jellemző a vizsgált klímamodellek szimulációi alapján. A csapadékmennyiség csökkenése által érintett területekben is eltérés mutatkozik. Az ALADIN a keleti, a PRECIS az északi és déli, míg a RegCM a nyugati országrészben valószínűsíti a legnagyobb módosulást. Ezen különbség a három modell XXI. századra vonatkozó eltérő évszagos csapadékösszeg-szimulációiból ered (Bartholy et al., 2011). A két jövőbeli célidőszak között a legnagyobb értékbeli változás nyáron és télen mutatkozik. Télen a 2021–2050 időszakban az ALADIN és a RegCM modellek átlagosan 30%-ot meghaladó csapadékcsökkenést mutatnak, mely különbségek a század végére jelentősen enyhülnek. A RegCM modell szimulációiban a század végére már ellentétes irányú, 10%-os csapadéknövekedés mutatkozik, azonban ezek a századvégi változások nem szignifikánsak a korábbi időszakkal ellentétben, ahol a magyarországi rácspontok legalább 8%-án mutatkozott szignifikáns szárazodás. A PRECIS modell korábbi célidőszakra készült szimulációit tekintve a +20%-ot meghaladó téli csapadékváltozás a század végéig tovább emelkedik, megközelítve a +50%-kal nedvesebbé válást.

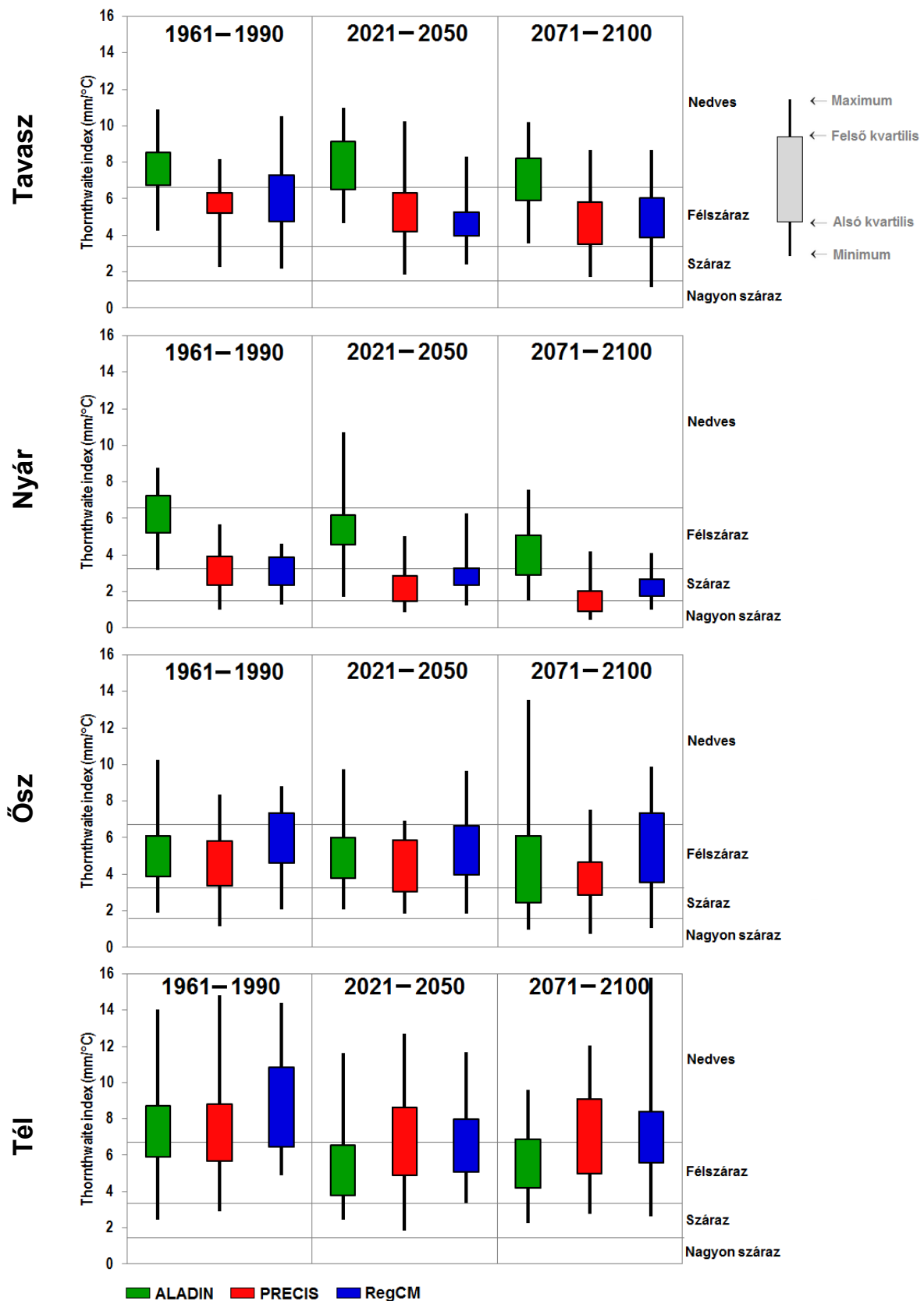
5.2. A Thornthwaite-féle agrometeorológiai index

A havi csapadékösszeg (P [mm]) és a havi átlaghőmérséklet (T [°C]) korrigált hányadosaként állítható elő a Thornthwaite-féle agrometeorológiai index (Kemp, 1990):

$$TAI = 1,65 \left(\frac{P}{T + 12,2} \right)^{\frac{10}{9}}$$

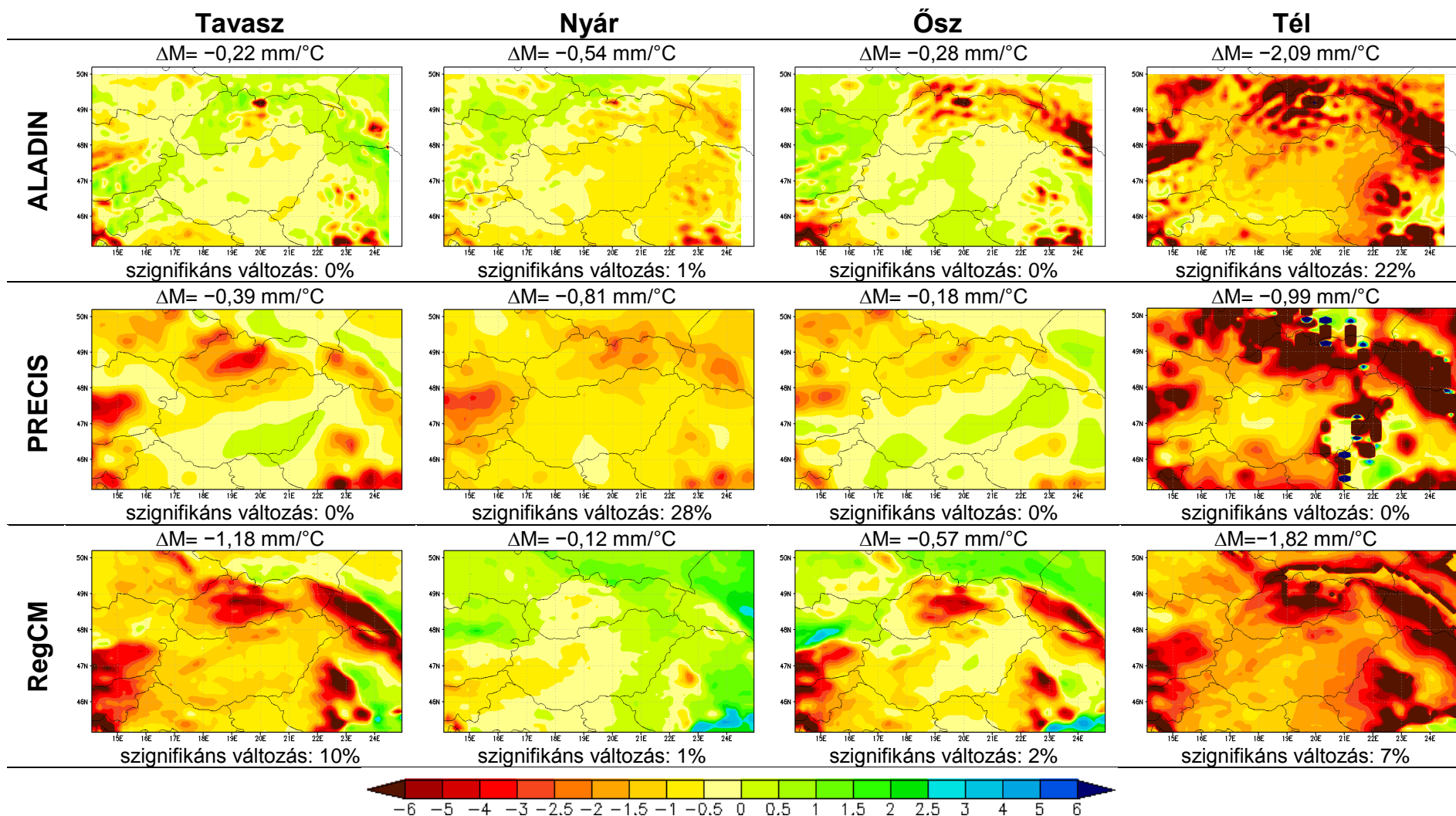
A definíció alapján minél kisebb az index értéke, annál erősebb a szárazság. Ebből adódik, hogy a negatív irányú változások az aszályhajlam erősödésére utalnak, míg a pozitívak a csapadékosabbá válást jelzik.

A 12. ábrán a Thornthwaite-féle index magyarországi rácspontokra számított évszakos átlagértékei láthatók mm/°C egységben a modellszimulációk alapján. A tavaszi és őszi hónapok elsősorban félszáraznak tekinthetők a Thornthwaite index szimulációkból számított értékek alapján, bár szélsőséges esetekben száraz tavaszok is előfordultak Magyarország térségében. A XXI. század végén azonban ennél szárazabb éghajlati viszonyok, vagyis minimális TAI értékek is előfordulhatnak az átmeneti évszakokban. Mindemellett fontos megjegyezni, hogy az index esetén a tavaszi hónapokban a legnagyobb a modellek szimulált adatsorának átlagos hibája a referencia időszakhoz viszonyítva, itt ugyanis mindhárom modell nagy felülbecslést mutatott. A diagramokról leolvasható, hogy nyáron mindhárom modell szárazodó tendenciát jelez a XXI. század folyamán, mely a PRECIS esetén a legnagyobb mértékű, így hazánk a Thornthwaite-féle index alapján a száraz, illetve nagyon száraz éghajlatú besorolásba kerülhet. Továbbá az is látható, hogy a mérőszám értékeiben bekövetkező változások időbeli menete nem egyenletes, hiszen például tavasszal, ősszel és télen a RegCM modell alapján a korábbi időszektnél először csökkenés mutatkozik a referencia időszakhoz viszonyítva, míg ezt követően a század végére enyhe növekedés jelenik meg. Hasonló jelenség figyelhető meg az ALADIN és PRECIS modelleknél télen. Az ALADIN regionális klímamodell a század végére ősszel a változékonyság nagymértékű növekedését, ezzel ellentétben télen a csökkenését valószínűsíti. Nagyságrendileg azonosan nagy a szórásértékekben bekövetkező változás a RegCM esetén ősszel és télen.

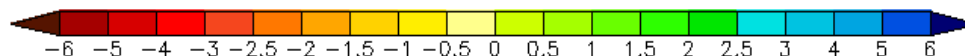
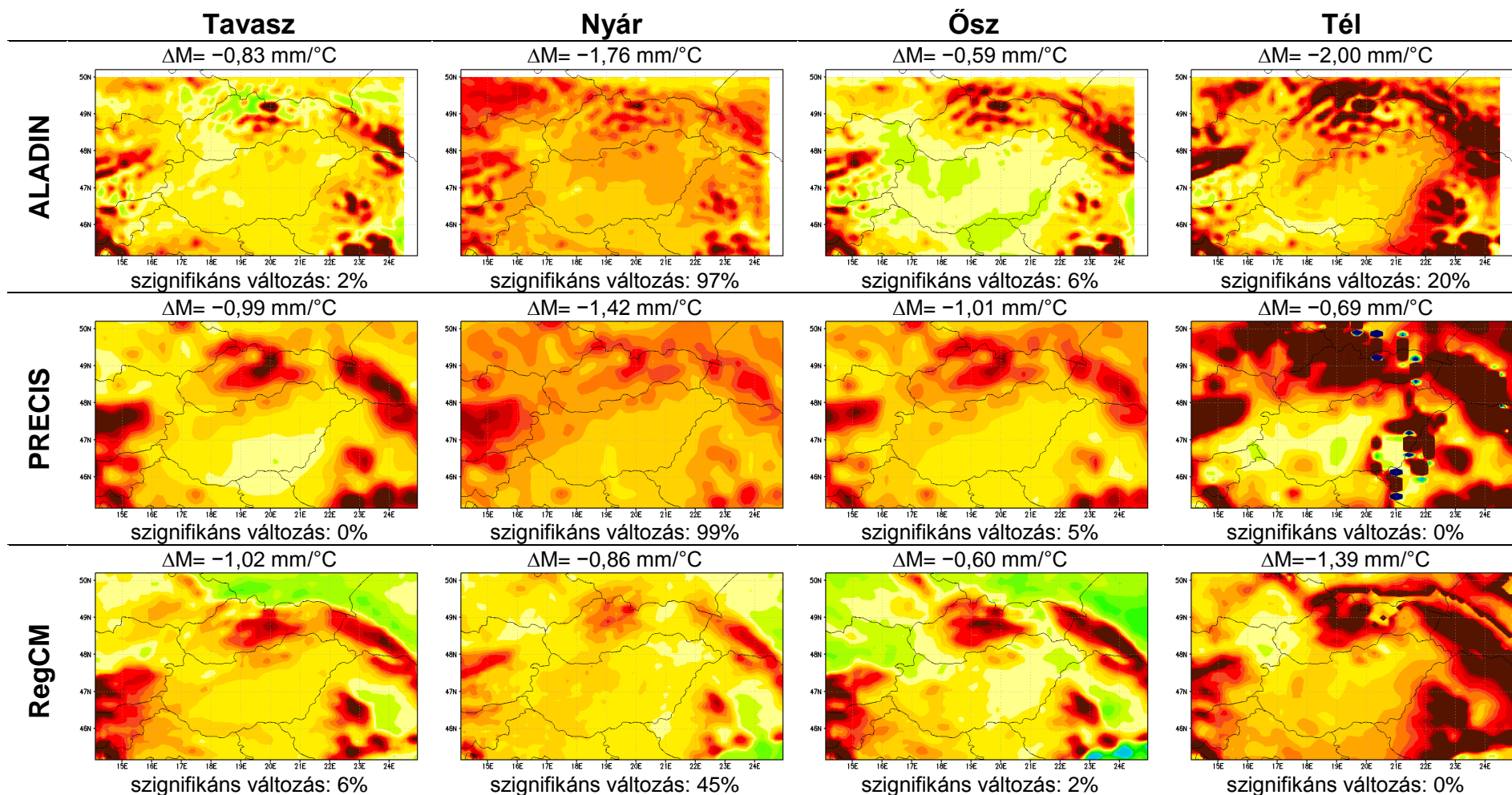


12. ábra. A Thornthwaite-féle index (mm/°C) magyarországi rácspontok figyelembevételével számított évszakos átlagértékei az ALADIN, PRECIS és RegCM szimulációk alapján, referencia időszak: 1961–1990.

A 13. és 14. ábrán a Thornthwaite-féle agrometeorológiai index 2021–2050-re, valamint 2071–2100-ra várható évszakos változása ($\text{mm}/^{\circ}\text{C}$) látható a Kárpát-medence térségére a vizsgált ALADIN, PRECIS és RegCM szimulációk alapján. A közelebbi időszak esetén az évszakos átlagértékek módosulásának irányát tekintve a térképeken is jól megfigyelhetők a területenként eltérő trendek mindhárom modellnél, azonban a magyarországi rácspontokra leválasztott évszakos átlagos változások minden esetben negatív értékűek. Az ALADIN és PRECIS modellek esetén tavasszal és ősszel, míg a RegCM-nél nyáron jelenik meg kisebb-nagyobb hazai területeket érintő nedvesedés, mindazonáltal ezek a változások nem szignifikánsak. A korábbi célidőszakban a térképeken megjelenő zöld árnyalatok a század végére lényegében mindenhol sárga színné módosulnak, mely az éghajlat szárazodását jelzi. Az indexértékek változása nyáron és télen a legnagyobb mértékű, azonban a 2021–2050 időszakhoz viszonyítva a század végére a Thornthwaite index változásában télen mindhárom modellnél enyhülés következik be. Nyáron a szárazodás az ALADIN és PRECIS modellek szimulációi alapján a hazai rácspontok több mint 97%-ában, a RegCM esetén a magyarországi pontok 45%-ában szignifikáns a Welch-próba alapján. Az aszályhajlam-növekedés szempontjából leginkább veszélyeztetett területté tavasszal összességében az északi, valamint a Dráva menti térség, nyáron az ALADIN modell esetén az ország északkeleti fele, míg a PRECIS és RegCM szimulációi alapján az északi és nyugati országrész válhat. Ősszel az északi és a nyugati területeken, illetve télen a keleti országrészben következhet be szárazodás.



13. ábra. A Thornthwaite index 2021–2050-re várható évszakos változása (mm/°C) a Kárpát-medence térségére az ALADIN, PRECIS és RegCM szimulációk alapján, referencia időszak: 1961–1990. A térképek fölött a magyarországi rácspontokra vonatkozó átlagos változás (ΔM) jelenik meg, a térképek alatt pedig a hazai rácspontok közül azoknak az aránya, ahol a várható változás 95%-os szinten statisztikailag szignifikáns.



14. ábra. A Thornthwaite index 2071–2100-ra várható évszakos változása (mm/°C) a Kárpát-medence térségére az ALADIN, PRECIS és RegCM szimulációk alapján, referencia időszak: 1961–1990. A térképek fölött a magyarországi rácspontokra vonatkozó átlagos változás (ΔM) jelenik meg, a térképek alatt pedig a hazai rácspontok közül azoknak az aránya, ahol a várható változás 95%-os szinten statisztikailag szignifikáns.

5.3. A Ped-féle talajnedvességi index

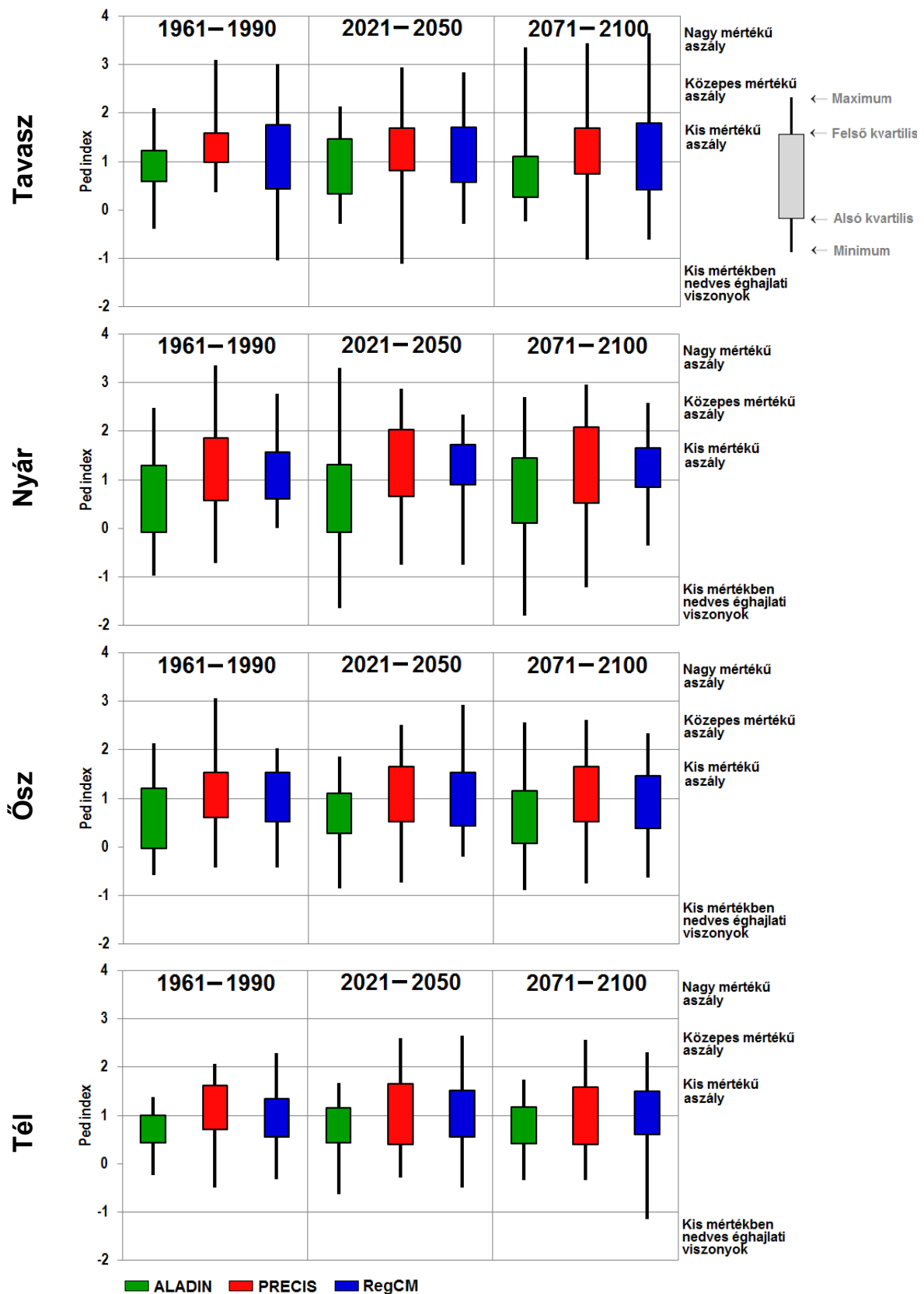
A Ped-féle talajnedvességi index az átlaghőmérséklet (T [°C]) és annak szórással ($d(T)$ [°C]) vett hányadosa, valamint az átlagos csapadékmennyiség (P [mm]) és annak szórással ($d(P)$ [mm]) vett hányadosa különbségeként állítható elő (Bagrov, 1983):

$$PNI = \frac{\Delta T}{d(T)} - \frac{\Delta P}{d(P)}$$

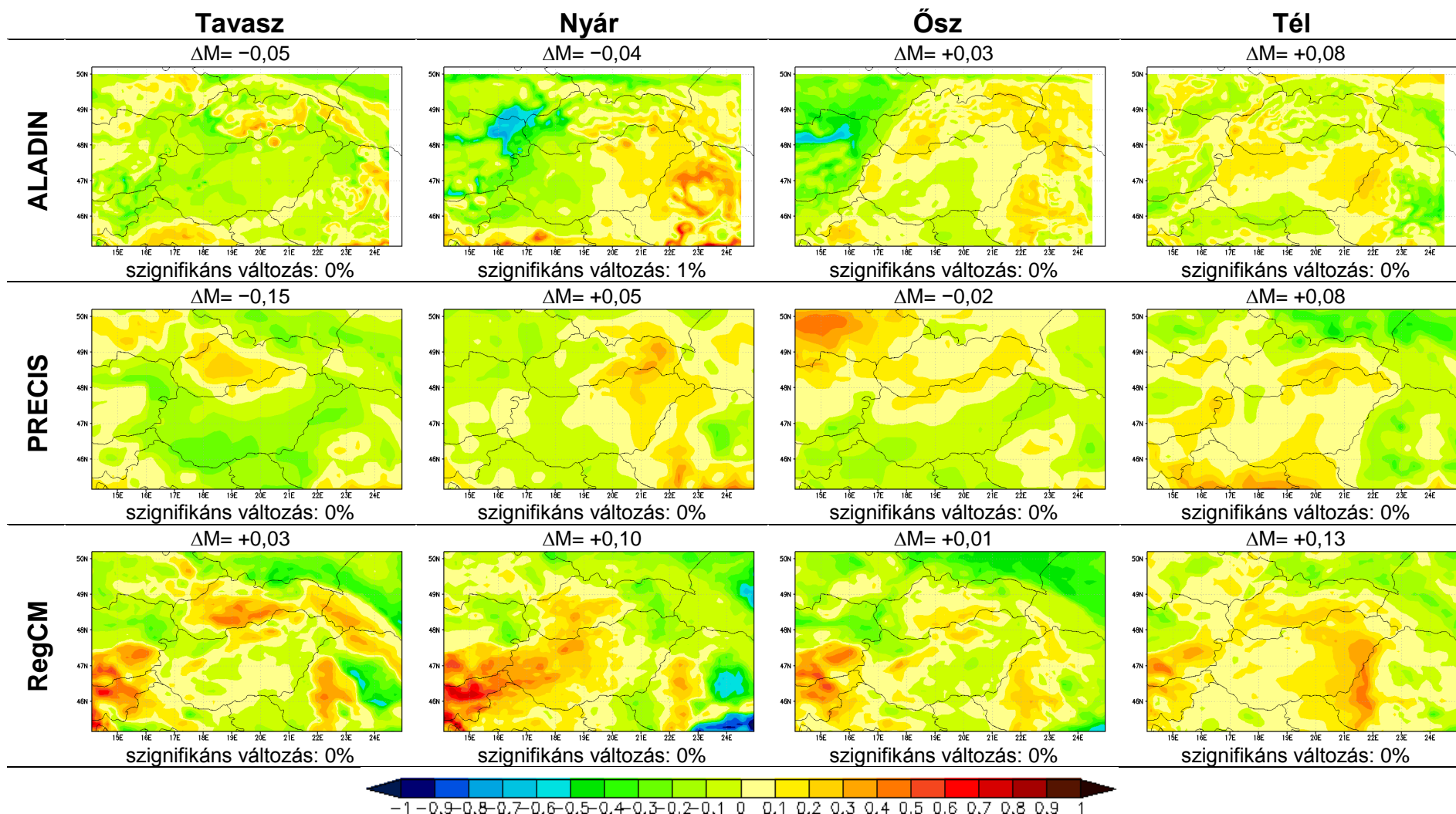
Az előző indexekkel ellentétben a Ped index 0-nál nagyobb, illetve kisebb értékei rendre száraz, illetve nedves éghajlati viszonyokat jellemeznek. A pozitív irányú változások az aszályosodásra utalnak, a negatív előjelű változások pedig az éghajlat csapadékosabbá válását jelzik.

A 15. ábrán a Ped-féle talajnedvességi index szimulált évszakos átlagértékeit és változékonyságát mutatjuk be a 2021–2050 és a 2071–2100 időszakra, valamint a referencia időszakra vonatkozóan. A magyarországi rácspontok alapján számított területi átlagok változását illusztráló Box-Whisker diagramon jól látható, hogy a Ped index értékei 1 körüliek, vagyis a „kis mértékű aszály” kategóriába sorolhatók. A mérőszám átlagos évszakos változásának mértéke többnyire ugyan nem haladja meg a 0,1 értéket, ám általánosságban véve az aszályhajlam erősödésének irányába mutatnak a várható módosulások. A legmagasabb értékeket az index nyáron veszi fel mindhárom vizsgálatba vont modell alapján. A század végére összességében a legnagyobb változékonyság tavasszal és nyáron valószínűsíthető (ekkor akár nagy mértékű aszály is előfordulhat szélsőséges esetekben), míg a legkevésbé változékonynak a tél ígérkezik. A modellek közül a legkisebb és legnagyobb változékonyságot (rendre télen és nyáron) egyaránt az ALADIN valószínűsíti.

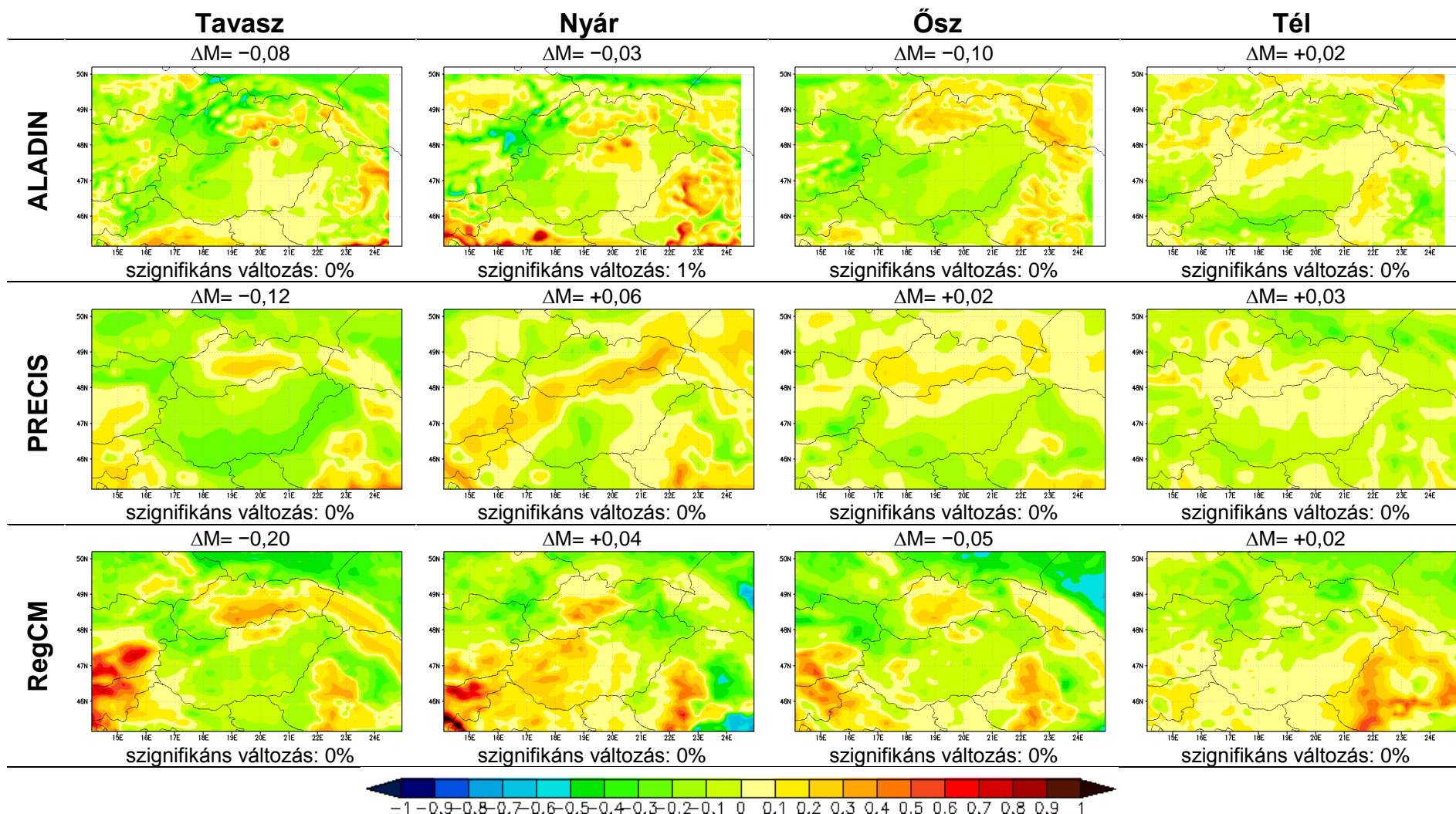
Ezt követően a Ped index 2021–2050-re, illetve 2071–2100-ra várható évszakos változásainak térbeli szerkezetét mutatjuk be a 16. és a 17. ábrán a Kárpát-medence térségére az ALADIN, PRECIS és RegCM szimulációk alapján. A térképeken látható, hogy a várható változások iránya a magyarországi rácspontok figyelembevételével jelentős bizonytalanságokat hordoz, melyet az is jelez, hogy a várható változások a rácspontok többségében 95%-os szinten statisztikailag nem szignifikánsak. Összességében tavasszal az index értékében csökkenés mutatkozik, míg télen mindhárom modell mindkét jövőbeli célidőszakban pozitív



15. ábra. A Ped index magyarországi rácspontok figyelembevételével számított évszakos átlagértékei az ALADIN, PRECIS és RegCM szimulációk alapján, referencia időszak: 1961–1990.



16. ábra. A Ped index 2021–2050-re várható évszakos változása a Kárpát-medence térségére az ALADIN, PRECIS és RegCM szimulációk alapján, referencia időszak: 1961–1990. A térképek fölött a magyarországi rácspontokra vonatkozó átlagos változás (ΔM) jelenik meg, a térképek alatt pedig a hazai rácspontok közül azoknak az aránya, ahol a várható változás 95%-os szinten statisztikailag szignifikáns.



17. ábra. A Ped index 2071–2100-ra várható évszakos változása a Kárpát-medence térségére az ALADIN, PRECIS és RegCM szimulációk alapján, referencia időszak: 1961–1990. A térképek fölött a magyarországi rácspontokra vonatkozó átlagos változás (ΔM) jelenik meg, a térképek alatt pedig a hazai rácspontok közül azoknak az aránya, ahol a várható változás 95%-os szinten statisztikailag szignifikáns.

irányú változást (kis mértékű aszályosodást) jelez, azonban ahogy a fentiekben már említettük, a módosulások egyike sem szignifikáns a Welch-próba alapján. 10%-ot meghaladó változást a PRECIS modellszimulációk mutatnak tavasszal a 2021–2050 és 2071–2100 időszakokban, míg az ALADIN modell ősszel és a RegCM tavasszal a távolabbi jövőre vonatkozóan. A Ped index értékeiben várható módosulás átlagosan az ALADIN modellnél a legkisebb mértékű. Tavasszal és ősszel az ország déli területein következhet be nedvesedés, míg nyáron az ALADIN és PRECIS szimulációk a keleti, a RegCM a nyugati térségben jelöli a legnagyobb szárazodást.

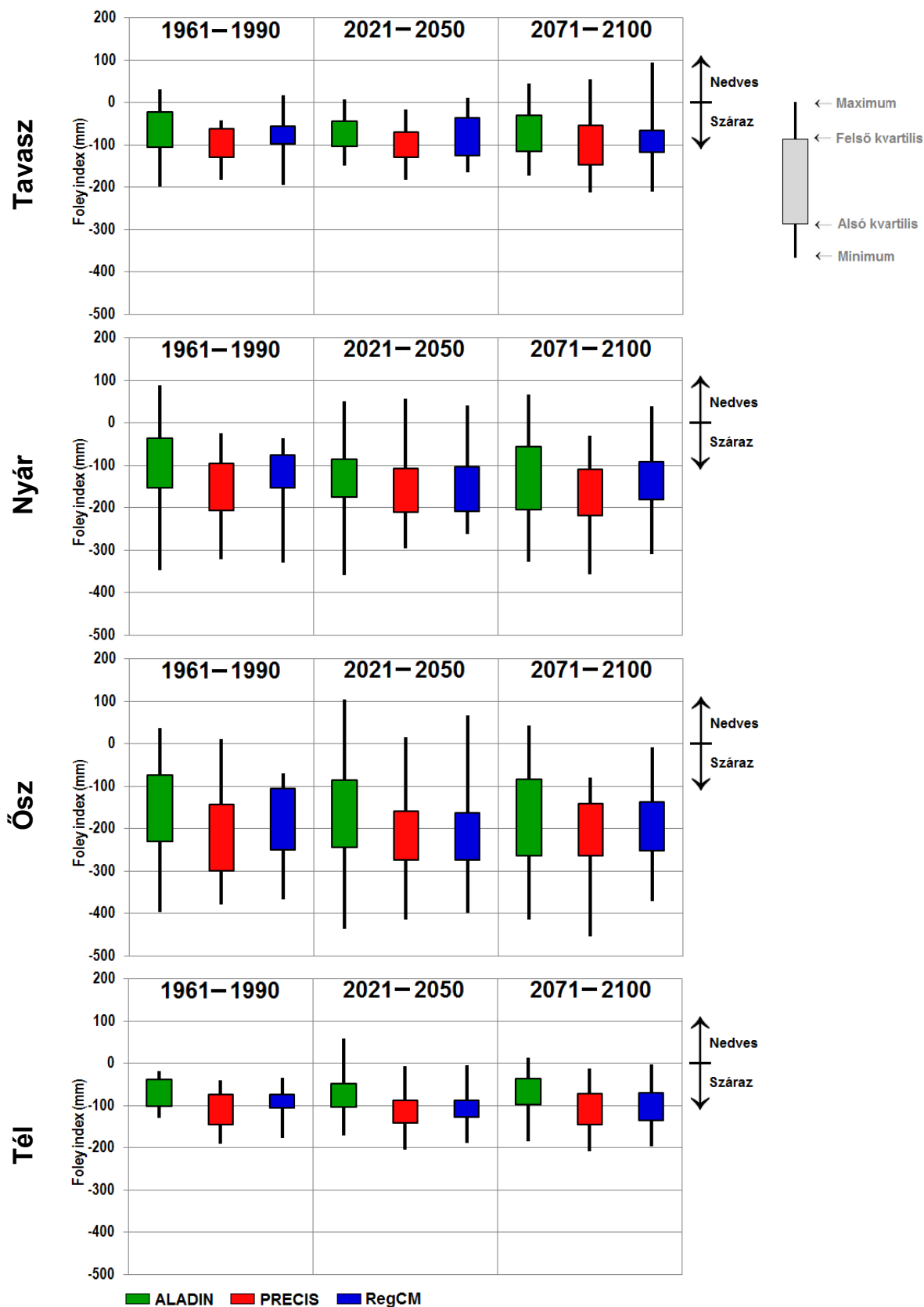
5.4. A Foley-féle anomália index

A dolgozatban a rekurzív indexek csoportjából a Foley-féle anomália indexre (Foley, 1957) végeztük el vizsgálatainkat, mely számítása során a vizsgált időszak csapadékösszegét, valamint a megelőző időszak csapadékösszeg átlagértékeit is figyelembe veszi:

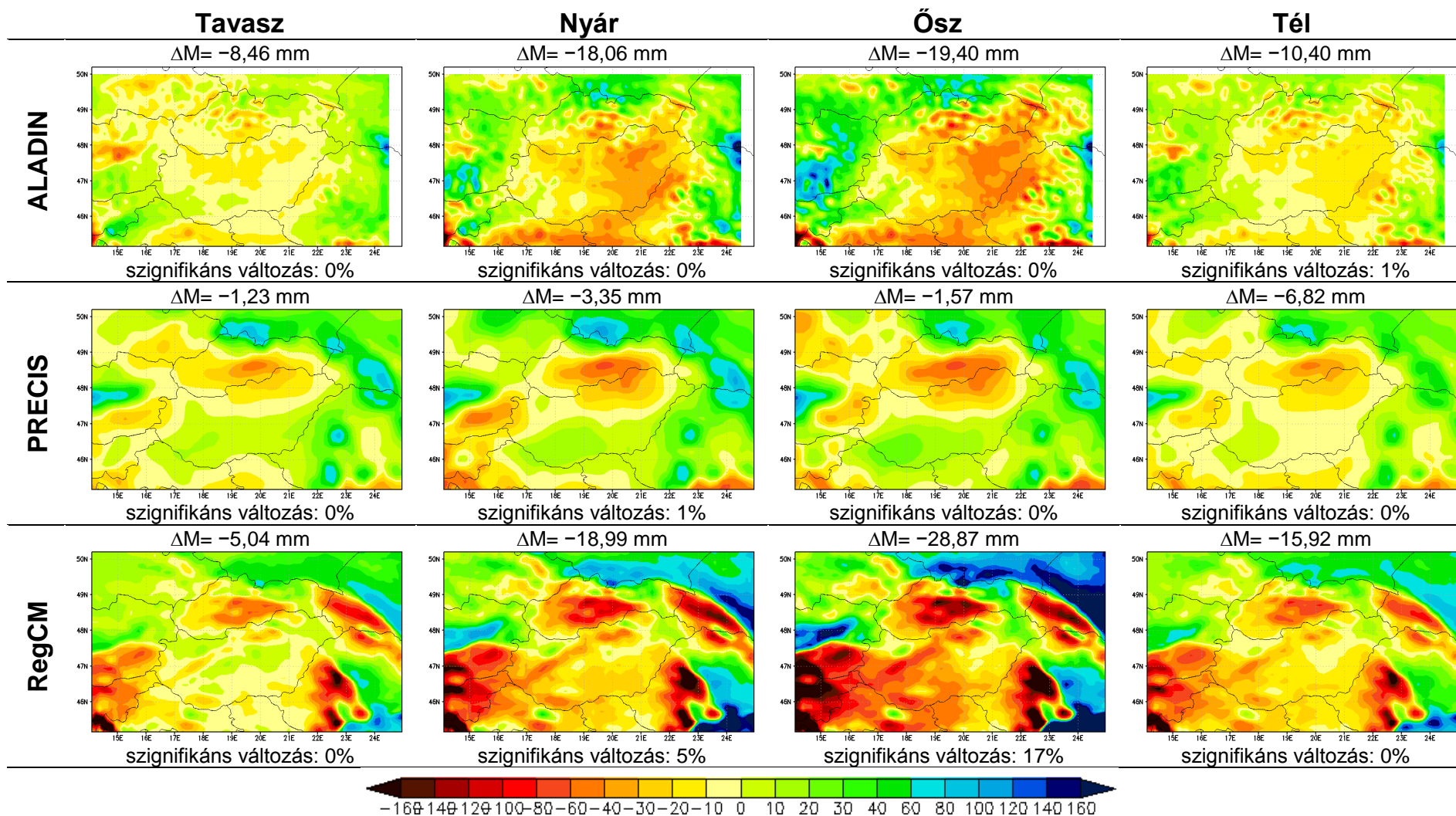
$$FAI_1 = \Delta P_1$$
$$FAI_k = FAI_{k-1} + \Delta P_k$$

A 18. ábrán az index magyarországi rácspontok figyelembevételével számított évszakos értékei láthatók az ALADIN, PRECIS és RegCM szimulációk alapján a referencia időszakhoz viszonyítva. A FAI definíciójából következően az átlagos értékekben az évszakok eltolódása megfigyelhető. Az ábráról leolvasható, hogy az index legalacsonyabb értékei ősszel jelennek meg, melyek a nyári szárazodásra utalnak, míg a legmagasabbak télen és tavasszal, melyből az őszi és tavaszi hónapokban bekövetkező változásokra következtethetünk. A Foley index legkisebb átlagos értékét a PRECIS regionális klímamodell adja a korábbi időszakra ősszel, míg a legnagyobbat az ALADIN jelzi a század végére tavasszal. Érdeemes figyelembe venni azonban, hogy a referencia időszakban az abszolút modellhibák a Foley index esetén a PRECIS-nél a legnagyobbak, míg a múltban a méréseken alapuló CRU adatbázis értékeit az ALADIN modell közelítette meg leginkább. Az előzőekben bemutatott indexekhez hasonlóan itt is megfigyelhető az index időbeli változásának korántsem egyenletes menete. Ez mutatkozik meg mindegyik évszakban az ALADIN modell esetén, míg a PRECIS és RegCM regionális klímamodellek szimulációjánál ősszel és télen. A referencia időszakhoz viszonyítva összességében mindhárom modell a magyarországi rácspontokra vonatkozóan a változékonyság növekedését prognosztizálja a XXI. században.

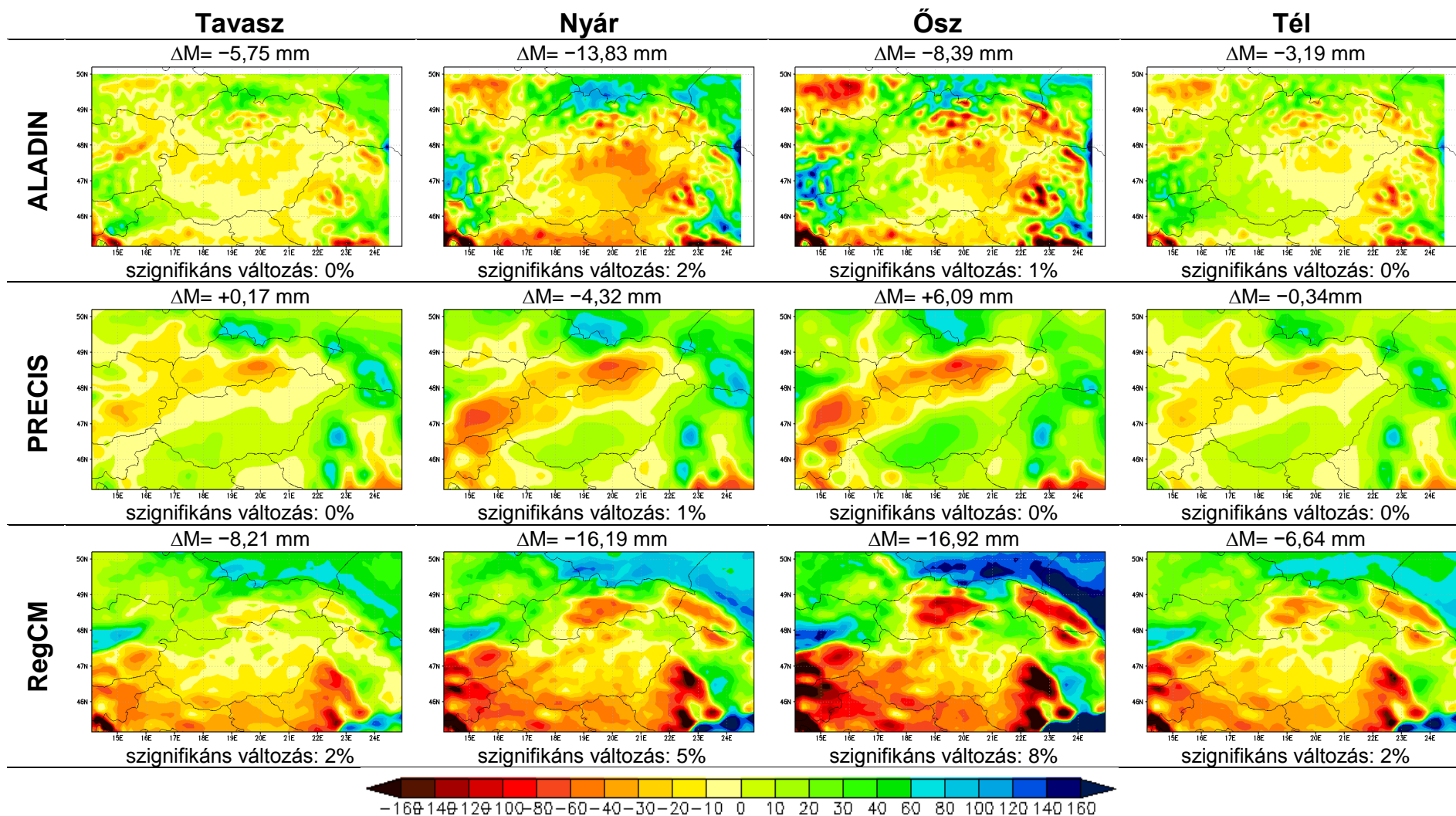
A 19. és a 20. ábrán a Foley-féle anomália index 2021–2050-re, illetve 2071–2100-ra várható, referencia időszakhoz viszonyított évszakos változását (mm) tüntettük fel a Kárpát-medence térségére az ALADIN, PRECIS és RegCM szimulációk alapján. A térképeket tekintve hazánkban a várható változások esetén legnagyobb mértékben csökkenés mutatkozik, ez alól csupán a PRECIS modell statisztikailag nem szignifikáns tavaszi és őszi értékei képeznek kivételt a század végén.



18. ábra. A Foley-féle anomália index (mm) magyarországi rácspontok figyelembevételével számított évszakos átlagértékei az ALADIN, PRECIS és RegCM szimulációk alapján, referencia időszak: 1961–1990.



19. ábra. A Folely index 2021–2050-re várható évszakos változása (mm) a Kárpát-medence térségére az ALADIN, PRECIS és RegCM szimulációk alapján, referencia időszak: 1961–1990. A térképek fölött a magyarországi rácspontokra vonatkozó átlagos változás (ΔM) jelenik meg, a térképek alatt pedig a hazai rácspontok közül azoknak az aránya, ahol a várható változás 95%-os szinten statisztikailag szignifikáns.



20. ábra. A Folely index 2071–2100-ra várható évszakos változása (mm) a Kárpát-medence térségére az ALADIN, PRECIS és RegCM szimulációk alapján, referencia időszak: 1961–1990. A térképek fölött a magyarországi rácspontokra vonatkozó átlagos változás (ΔM) jelenik meg, a térképek alatt pedig a hazai rácspontok közül azoknak az aránya, ahol a várható változás 95%-os szinten statisztikailag szignifikáns.

Az index értékeiben jövőben várható legnagyobb változások ősszel mutatkoznak, míg a legkisebb télen következhet be. A RegCM modell esetén a korábbi időszakra várható változások a magyarországi rácspontok 17%-ában, míg a század végén a 8%-ában szignifikánsak 95%-os szinten a Welch-próba alapján. A többi modellszimuláció esetén viszont alig találtunk olyan rácspontot, ahol statisztikailag szignifikáns lenne a jövőre prognosztizált változás. A két vizsgált célidőszak között a területi érintettségben nem mutatkozik számottevő különbség, eltérés inkább a változás mértékében jelenik meg. A PRECIS modell a 2021–2050, s a 2071–2100 időszakban egyaránt hazánk északi régióiban valószínűsíti a csapadékösszeg csökkenését, míg a déli országrészre nedvesedést prognosztizál. Ezzel ellentétben a RegCM északról dél felé növekvő gradienst mutat a század végére, míg az ALADIN a nyugat-kelet irányú megosztottságot jelez.

Összefoglalás

Munkánk céljával a XXI. században várható csapadék- és aszályviszonyok tendenciaelemzését tűztük ki a Kárpát-medence térségére, hiszen a mezőgazdasági károk legnagyobb hányadát a meteorológiai extrémumok okozzák. A Nemzeti Kutatási és Fejlesztési Program keretén belül két-két regionális klímamodell adaptációja valósult meg az Országos Meteorológiai Szolgálatnál és az ELTE Meteorológiai Tanszékén, melyek közül három (különböző globális éghajlati modell által meghajtott) regionális modell havi csapadékösszeg és átlaghőmérséklet szimulációiból különböző aszályindex-típusok segítségével végeztünk vizsgálatokat. A futtatások az 1961–1990 referencia időszakra, valamint a 2021–2050 és 2071–2100 célidőszakokra készültek az A1B scenárió figyelembevételével. A dolgozatban először áttekintettük az aszályval kapcsolatos fontosabb tudnivalókat, az aszály befolyásoló tényezőit, a nemzetközi és a hazai aszályvizsgálatok mérföldköveit, a magyarországi veszélyeztetett területeket, majd röviden bemutatásra kerültek az elemzéshez felhasznált ALADIN-Climate, PRECIS és RegCM regionális klímamodellek, valamint az aszály jellemzésére használatos indexek.

Vizsgálataink kezdetekor a modellek validálását végeztük el, vagyis az 1961–1990 időszakra vonatkozó különböző aszályindex-eredményeket egy megfigyelési adatbázishoz viszonyítottuk, s a hibákat számszerűsítettük. A klímamodellek jövőbeli eredményeinek bizonytalansága elsősorban az emberi tevékenység és az üvegházgázok koncentrációjának XXI. században várható változásának nem ismert alakulásából, az éghajlati rendszer saját belső változékonyságából, valamint a felhasznált numerikus modellek hibáiból tevődik össze. (Bartholy et al., 2011). Ennek ellenére a múltbeli futtatások validációja a teljes elemzés lényeges pontja, amely megadja, hogy milyen pontossággal képes az adott modellszimuláció az éghajlati viszonyokat rekonstruálni ismert időszakra.

A regionális éghajlatváltozás elemzésekor minden vizsgált indexre Box-Whisker diagramon mutattuk be a várható évszakos átlagot, valamint az egyes évek közötti várható változékonyságot. Ezen felül évszakonként a becsült változások területi eloszlását térképeken jelenítettük meg, melynek köszönhetően lehetővé vált a Kárpát-medence térségén belül az aszályosodás szempontjából potenciálisan érintett régiók behatárolása. A térképes megjelenítés mellett

feltüntettük a magyarországi rácspontokra leválasztott átlagértékeket, valamint azon hazai rácspontok arányát, ahol a várható változás 95%-os szinten szignifikáns a statisztikai Welch-próba alapján. Munkánk eredményeképpen az alábbi következtetésekre jutottunk:

- A három regionális klímamodell által szimulált várható hőmérsékleti és csapadékoutputok kisebb-nagyobb mértékben eltérő eredményeket mutatnak a jövőbeli célidőszakokra, melynek következtében az ezeket bemenő adatként felhasználó aszályindexek értékeiben is különbségek jelennek meg. Mindemellett az aszályindexek eltérő jellegéből és számítási módjából adódóan is számottevő különbségek mutatkoznak.
- Amennyiben a várható évszakos átlagos változásokat számszerűsítjük és a korlátos tartományú modellek validációja során kapott átlagos hibaértékekkel összevetjük, akkor látható, hogy az esetek egy részében az átlagos hibák felülmúlják a várható módosulás mértékét, melyből az következik, hogy a változások nem minden esetben az éghajlat módosulásából adódnak, hanem a modellek pontatlanságából, illetve bizonytalanságából is eredhetnek.
- A legtöbb index esetén megfigyelhető, hogy a változások időbeli menete nem egyenletes, azaz gyakran előfordul, hogy a korábbi időszak értékei eltérő trendet mutatnak a század végiekhez viszonyítva.
- A különböző aszályindexeknél mindenhol megfigyelhető a nyári aszályhajlam-növekedés, mely a SAI és TAI mutatószámoknál a hazai rácspontokban többnyire szignifikáns változásként jelenik meg a század végére.
- Összességében célszerű figyelembe venni, hogy két index esetén (TAI és PNI) a RegCM közelítette legjobban a referencia-adatbázisként szolgáló CRU adatsort, míg a legnagyobb hibával terheltnek az ALADIN bizonyult. A harmadik index (FAI) esetén ezzel ellentétben a múltban az ALADIN adta a leginkább helytálló értékeket, míg a PRECIS a legeltérőbbeket.
- A standardizált csapadékanómália index vizsgálata során a három modell megegyező irányú szignifikáns (szárazodó) változást csupán nyáron mutat, míg az átmeneti évszakokban a legenyhébbek a referencia időszakhoz

viszonyított változások a XXI. század folyamán. A csapadékösszeg módosulása által leginkább érintett területek az ALADIN, PRECIS és RegCM modellek esetén eltérőek, rendre főként keleti, egész országot érintő, illetve elsősorban nyugati térségeket veszélyeztető csökkenés prognosztizálható a nyári hónapokban. Télen ezzel ellentétben akár nagyobb mértékű csapadéknövekedésre is számíthatunk.

- A Thornthwaite-féle agrometeorológiai indexről elmondható, hogy a referencia időszakhoz viszonyítva az átlagos megváltozás már a 2021–2050 időszakban is negatív irányú mindhárom modell és mind a négy évszak esetén. A szimulációk alapján a leginkább változékony évszaknak a tavasz ígérkezik.
- A Ped-féle talajnedvességi index esetén voltak a legkevésbé szignifikánsak a várható változások a négy vizsgált index közül. Számításaink alapján az index eredményei összességében a korábbi célidőszakra nagyobb változást valószínűsítenek, mint a század végére, azonban a módosulás mértéke így is a „jelentéktelen aszályosodás” kategóriába sorolható. A mérőszám átlagos évszakai változásának mértéke ugyan nem haladja meg a 0,1 értéket, azonban általánosságban véve a várható módosulások az aszályhajlam erősödésének irányába mutatnak.
- A Foley-féle anomália index definíciójából adódóan az évszakra jellemző értékek eltolódása figyelhető meg. A magyarországi rácspontokra leválasztott adatok alapján a referencia időszakhoz viszonyítva összességében mindhárom modell a változékonyság növekedését prognosztizálja a XXI. században. A hasonlóan csak csapadékösszeg mezőt figyelembe vevő standardizált csapadékanomália indexhez viszonyítva a modellek esetén a csökkenés szempontjából leginkább érintett területek megegyeznek, mely főként az adott térségre megegyező csapadékösszeg-szimulációkból ered.

A jövőben várható aszálymódosulások kiváltó okainak meghatározására további vizsgálatok elvégzése szükséges. Ezen kívül fontos lenne meghatározni, hogy a Kárpát-medencére, illetve azon belül hazánk térségére mely aszályindexek a leginkább megbízhatóak, melyhez a kutatásba vont mutatószámok bővítése is célszerű.

Köszönetnyilvánítás

Elsősorban köszönettel tartozom témavezetőimnek, Dr. Pongrácz Ritának és Dr. Bartholy Juditnak, hogy munkámat folyamatosan figyelemmel kísérték és építő jellegű megjegyzéseikkel, hasznos tanácsaikkal fejlesztették a dolgozatot, valamint időt nem kímélve a felmerült problémákban gyors segítségemre voltak.

Köszönetemet szeretném kifejezni Törék Orsolyának, Pieczka Ildikónak és Breuer Hajnalkának a szükséges technikai ismeretek megszerzésében nyújtott segítségükért.

Továbbá köszönöm Krüzselyi Ilonának és Szépszó Gabriellának, az Országos Meteorológiai Szolgálat munkatársainak, valamint Pieczka Ildikónak és Torma Csabának, hogy a vizsgálatunkhoz szükséges modellszimulációs adatokat rendelkezésemre bocsátották.

Végül, de nem utolsó sorban hálával tartozom Páromnak, Szüleimnek és Barátaimnak kitartó támogatásukért, mellyel végigkísérték dolgozatom elkészülését.

Kutatásainkat támogatta a Nemzeti Fejlesztési Minisztérium, az MTA TKI Alkalmazkodás a klímaváltozáshoz című (2006/TKI/246) programja, az OTKA K-78125 számú pályázata, az EU VI. keretprogram CECILIA projektje (GOCE-037005), az SH/2/1 számú svájci-magyar közös kutatási program keretében megvalósuló Felső-Tisza árvízmegeelőzési rendszer fejlesztési projektje, valamint az Európai Unió és az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával az „Európai Léptékkal a Tudásért, ELTE-TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0003. A felsőoktatás minőségének javítása a kutatás-fejlesztés-innováció-oktatás fejlesztésén keresztül” pályázat.

Irodalomjegyzék

- Abbe, C. (1894): Drought. *Monthly Weather Review*, 22, 323–324.
- Antal E. (1991): Az éghajlatváltozás hatása a magyarországi aszályokra. *Acta Geographica Debrecina*, 28–29, 17–18.
- Bagrov, N. A. (1983): On the meteorological index of yields. *Meteor. Hidrol.*, 11, 92–99.
- Bartholy, J., Horányi, A., Krüzselyi, I., Pieczka, I., Pongrácz, R., Szabó, P., Szépszó, G., Torma, Cs. (2011): A várható éghajlatváltozás dinamikus modelleredmények alapján. In: *KLÍMAVÁLTOZÁS – 2011. Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére* (szerk.: Bartholy, J., Bozó, L., Haszpra, L.), 170–234.
- Bartholy, J., Pongrácz, R., Pieczka, I., Kardos, P., Hunyady, A. (2009a): Analysis of expected climate change in the Carpathian Basin using a dynamical climate model. *Lecture Notes in Computer Science*, 5434, 176–183.
- Bhalme, H. N., Mooley, D. A., Jadhav, S. K. (1983): Fluctuations in drought/flood are over India and relationships with the Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 111, 86–94.
- Blumenstock, G. (1942): Drought in the United States analyzed by means of the theory of probability. *USDA Tech. Bull.*, 819, 63p.
- Bunting, A. H., Dennett, M. D., Elston, J., Milford, J. R. (1976): Rainfall trends in the West African Sahel. *Q. J. Royal Meteorological Society*, 102, 59–64.
- Bussay, A., Szinell, C., Hayes, M., Svoboda, M. (1998): Monitoring drought in Hungary using the standardized precipitation index. *Annales Geophysicae*, Supplement 11–16, the Abstract Book of 23rd EGS General Assembly, C450, April 1998, Nice, France.
- Bussay, A., Szinell, Cs., Szentimrey, T. (1999): Az aszály magyarországi előfordulásainak vizsgálata és mérhetősége. *Éghajlati és agrometeorológiai tanulmányok* 7., Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 91p.
- Christensen, J. H., Christensen, O.B. (2007): A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Climatic Change*, 81, 7–30.
- Csima, G., Horányi, A. (2008): Validation of the ALADIN-Climate regional climate model at the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás*, 112, 3–4, 155–177.

- Dévényi, D., Gulyás, O. (1988): Matematikai statisztikai módszerek a meteorológiában. Tankönyvkiadó, Budapest, 443p.
- Dickinson, R. E., Giorgi, F., Bates, G. T (1989): A regional climate model for the western United States. *Climatic Change*, 15, 383–422.
- Dunay, S., Tölgyesi, L. (1993): Aszály – agrometeorológus szemmel. „Az 1992 évi aszály értékelése” c. kiadvány. Eds. Pálfai I., Vermes L., FM, MAE, MHT, Budapest, 17–24.
- Dunkel, Z. (2009): Brief surveying and discussing of drought indices used in agricultural meteorology. *Időjárás*, 113, 23–37.
- Faragó, T., Kozma, E., Nemes, Cs. (1988): Quantifying droughts in „Identifying and coping with extreme meteorological events.” Eds. Antal, E., Glantz, M., Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 62–111.
- Foley, J.C. (1957): Droughts in Australia: Review of Records from Earliest Years of Settlement to 1955. Australian Bureau of Meteorology, Bull. 43, 281p.
- Gao, X., Zhang, D., Chen, Z.X., Pal, J.S., Giorgi, F. (2007): Simulation of land use effects on climate in China by RegCM3. *Science in China, Series D - Earth Sciences*, 50, 620–628.
- Giorgi, F. (1989): Two-dimensional simulations of possible mesoscale effects of nuclear war fires. *J. Geophysical Research Letters*, 94, 1127–1144.
- Gordon, C., Cooper, C., Senior, C. A., Banks, H., Gregory, J. M., Johns, T. C., Mitchell, J. F. B., Wood, R. A. (2000): The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, 16, 147–168.
- Heim, R. R. (2002): A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *American Meteorological Society, Bull.* 83, 1149–1165.
- Henry, A. J. (1906): Climatology of the United States, Bulletin Q. U.S. Weather Bureau Bull. 361, Washington, DC, 51–58.
- Im, E. S., Kwon, W. T., Ahn, J. B., Giorgi, F. (2007): Multi-decadal scenario simulation over Korea using a RegCM one-way double-nested system. Part 1: Recent climate simulation (1971-2000). *Climate Dynamics*, 28, 759–780.
- IPCC (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by Solomon, S., Qin, D., Manning, M.,

- Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. L. Cambridge, UK, New York, NY, Cambridge University Press, 996p.
- Jones, P. D., Moberg, A. (2003): Hemispheric and Large-Scale Surface Air Temperature Variations: An Extensive Revision and an Update to 2001. *J Climate*, 16, 206–223.
- Jones, R. G., Noguera, M., Hassell, D. C., Hudson, D., Wilson, S. S., Jenkins, G. J., Mitchell, J. F. B. (2004): Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS. UK Met Office Hadley Centre, Exeter, 40p.
- Kane, R. P., Trivedi, N. B. (1986): Are droughts predictable? *Climate Change*, 8, 209–223.
- Katz, R. W., Glantz M. H. (1986): Anatomy of a rainfall index. *Monthly Weather Review*, 114, 764–777.
- Keetch, J. J., Byram, G. M. (1968): A drought index for forest fire control. USDA Forest Service Research Paper SE-38, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, NC, 33p.
- Kemp, D. (1990): Global environmental issues: a climatological approach. Routledge, London, New York, 241p.
- Kereszturszky, J., Pálfai, I., Szilárd, Gy., Thyll, Sz., Vermes, L. (1998): Mezőgazdasági vízhasznosítás. „Az oktatás és a gazdaság kapcsolatainak erősítése” – Phare program 94.5., 102p.
- Kincer, J. B. (1919): The seasonal distribution of precipitation and its frequency and intensity in the United States. *Monthly Weather Review*, 47, 624–631.
- Kogan, F. N. (1995): Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. *American Meteorological Society, Bull*, 76, 655–668.
- Kovács, Gy. (1978): A talajnedvesség zónájának hidrológiai vizsgálata. *Vízügyi Műszaki Gazdasági Tájékoztató*, 98, *Vízügyi Dokumentációs és Továbbképző Intézet*, Budapest, 344p.
- Krüzseli, I., Bartholy, J., Horányi, A., Pieczka, I., Pongrácz, R., Szabó, P., Szépszó, G., Torma, Cs. (2011): The future climate characteristics of the Carpathian Basin based on a regional climate model mini-ensemble. *Advances in Science and Research*, 6, 69–73.

- Lang, M., Ouardab, T. B. M. J., Bobee, B. (1999): Review: Towards operational guidelines for over-threshold modeling, *J. Hydrology*, 225, 103–117.
- Liptai, E., Sajgó, Zs., Szilágyi, G. (1985): A talajvízháztartás módosulásai változatos terület beépítésekor. *Hidrológiai Közlöny*, 5, 311–319.
- Lloyd-Hughes, B., Saunders, M. (2002): A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology* 22–13, 1571–1592.
- Marcovitch, S. (1930): The measure of droughtiness. *Monthly Weather Review*, 58, 113p.
- de Martonne, E. (1926): Une nouvelle fonction climatologique: L'Indece d'aridite. *La Meteorologie*, 2, 449–458.
- McGill, R., Turkey, J.W., Larsen, W.A. (1978): Variations of Box Plots. *The American Statistician*, 32, 12–16.
- McGuire, J. K., Palmer, W. C. (1957): The 1957 drought in the eastern United States. *Monthly Weather Review*, 85, 305–314.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J. (1993): The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints, Eighth Conf. on Applied Climatology, Anaheim, CA, American Meteorological Society, 179–184.
- McQuigg, J. (1954): A simple index of drought conditions. *Weatherwise*, 7, 64–67.
- Mitchell, T. D., Carter, T. R., Jones, P. D., Hulme, M., New, M. (2003): A comprehensive set of climate scenarios for Europe and the globe. Tyndall Centre Working Paper, 55p.
- Munger, T. T. (1916): Graphic method of representing and comparing drought intensities. *Monthly Weather Review*, 44, 642–643.
- Nakicenovic, N., Swart, R. (2000): Emissions Scenarios. A Special Reports of IPCC Working Group III, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 570p.
- Nemes, Cs. (1993): Éghajlati elemzés az 1992. évi szárazságról. In: Az 1992. évi aszály értékelése (szerk.: Pálfai, I. és Vermes, L.), Budapest, 104p.
- New, M., Hulme, M., Jones, P.D. (2000): Representing twentieth century space-time climate variability. Part 2: development of 1901–96 monthly grids of terrestrial surface climate. *J. of Climate* 13, 2217–2238.
- New, M., Lister, D., Hulme, M., Makin, I. (2002): A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Climate Research*, 21, 1–25.

- Ntale, H.K., Gan, T.W. (2003): Drought Indices and Their Application to East Africa. *International J. of Climatology*, 23, 1335–1357.
- Pálfai, I. (2004): *Belvizek és aszályok Magyarországon. Hidrológiai tanulmányok. Közlekedési dokumentációs Kft., Budapest. 492p.*
- Pálfai, I. (2007): Éghajlatváltozás és aszály. „Klíma-21” Füzetek, 49, 59–65.
- Palmer, W. C. (1965): *Meteorological Drought. Research Paper, US Weather Bureau, Washington, DC., 45, 58p.*
- Palmer, W. C. (1968): Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index. *Weatherwise*, 21, 156–161.
- Pieczka, I., Bartholy, J., Pongrácz, R., Hunyady, A. (2009): Climate change scenarios for Hungary based on numerical simulations with a dynamical climate model. *Lecture Notes in Computer Science*, 5910, 613–620.
- Roeckner, E., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kornblueh, L., Manzini, E., Schlese, U., Schulzweida, U. (2006): Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model. *J. of Climate*, 19, 3771–3791.
- Sadowski, M. J. (1984): Climatological premises of soil drought forecasting. *J. of Climate*, 4, 637–643.
- Svoboda, M. (2000): An introduction to the Drought Monitor. *Drought Network News*, 12, 15–20.
- Szabó, P, Horányi, A., Krüzselyi, I., Szépszó, G. (2011): Az Országos Meteorológiai Szolgálat regionális klímamodellezési tevékenysége: ALADIN-Climate és REMO. In: 36. Meteorológiai Tudományos Napok, beszámolókötet (szerk.: Lakatos, M.), 88–101.
- Szalai, S., Szinell, C. (2000): Comparison of two drought indices for drought monitoring in Hungary — a case study. In *Drought and Drought Mitigation in Europe*, 161–166.
- Szász, G. (1988): *Agrometeorológia. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest. 123–366.*
- Szász, G. (1994): Magyarország éghajlata és annak változékonysága. *Éghajlat, Időjárás, Aszály. I. Az időjárás változékonysága és hidrológiai vonatkozásai* (szerk.: Cselőtei, L., Harnos, Zs.). MTA Aszálybizottság, Budapest, 59–103.
- Szesztay, K. (1966): Az öntözési vízszükséglet meghatározásának néhány kérdése. *Hidrológiai Közlöny*, 46, 385–395.

- Torma, Cs. (2011): Átlagos és szélsőséges hőmérsékleti és csapadék viszonyok modellezése a Kárpát-medencére a XXI. századra a RegCM regionális klímamodell alkalmazásával. PhD értekezés, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, 125p.
- Torma, Cs., Bartholy, J., Pongrácz, R., Barcza, Z., Coppola, E., Giorgi, F. (2008): Adaptation and validation of the RegCM3 climate model for the Carpathian Basin. *Időjárás*, 112, 233–247.
- Urbán, L. (1993): Az aszály fogalma és jelentősége. *Beszámolók 1989.*, Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 113–135.
- Várallyay, Gy. (2008): A talaj szerepe a csapadék-szélsőségek kedvezőtlen hatásainak mérséklésében. *„Klíma-21” Füzetek*, 52, 57–71.
- Varga, M. (1984): Országos Vízgazdálkodási Keretterv. Országos Vízügyi Hivatal, Budapest.
- Varga-Haszonits, Z. (1985): Az 1983. Évi szárazság agrometeorológiai értékelése. *Növénytermesztés*, 34, 61–67.
- Varga-Haszonits, Z. (1989): A vegetációs periódus alatti vízellátottság mértékének éghajlati jellemzői. Aszály. „Az aszály és az öntözés mértékének, hatásának és befolyásoló tényezőinek összefüggései” című vitafórum előadásai. Eds. Hanyecz V., Öntözési Kutató Intézet, Szarvas, 28–41.
- Varga-Haszonits, Z., Varga, Z., Lantos, Zs., Gerencsér, E. (2005): Az 1951–2000 közötti időszak szélsőséges nedvességi értékeinek agroklimatológiai elemzése. *„Agro-21” Füzetek*, 46, 26–37.
- Wilhite, D. A., Glantz, M. H. (1985): Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10, 111–120.