



Kemény Gábor (szerk.)



Molnár András (szerk.)



Fogarasi József (szerk.)

A KLÍMAVÁLTOZÁS HATÁSÁNAK MODELLEZÉSE A FŐBB HAZAI GABONAFÉLÉK ESETÉBEN

Agrárgazdasági Kutató Intézet

A KLÍMAVÁLTOZÁS HATÁSÁNAK MODELLEZÉSE A FŐBB HAZAI GABONAFÉLÉK ESETÉBEN

Szerkesztette: Kemény Gábor
Molnár András
Fogarasi József

Szerzők: Bene Enikő
Keményné Horváth Zsuzsanna
Vári Enikő
Zubor-Nemes Anna

Domán Csaba
Lőrincz Katalin
Vígh Enikő Zita

Opponensek: Prof. Dr. Neményi Miklós, egyetemi tanár, az MTA rendes tagja,
Széchenyi István Egyetem
Dr. Fodor Nándor, tudományos főmunkatárs, osztályvezető,
MTA ATK Mezőgazdasági Intézet

Felelős kiadó: Kemény Gábor

Szerkesztőbizottság: Biró Szabolcs
Dublecz Károly
Felföldi János
Fertő Imre
Herdon Miklós
Illés B. Csaba
Kapronczai István
Káposzta József
Kemény Gábor
Kertész Róbert
Keszthelyi Szilárd

Lámfalusi Ibolya
Pető Károly
Potori Norbert
Rieger László
Stummer Ildikó
Szakály Zoltán
Szűcs István
Takács István
Tóth József
Tóth Tamás
Vágó Szabolcs

Kiadó:
Agrárgazdasági Kutató Intézet
H-1093 Budapest, Zsil utca 3–5.
Telefon: (+36 1) 217-1011
Fax: (+36 1) 217-4469
www.aki.gov.hu
aki@aki.gov.hu

DOI: <http://doi.org/10.7896/ak1901>
ISBN 978-963-491-605-5
ISSN 2061-8204 (Agrárgazdasági Könyvek sorozat)

Nyomda, kötetset: Prime Rate Kft.
© Agrárgazdasági Kutató Intézet

Minden jog fenntartva. A kiadvány bármely részének sokszorosítása, adatainak bármilyen formában (nyomtatva vagy elektronikusan) történő tárolása vagy továbbítása, továbbá bármilyen elven működő adatbázis-kezelő segítségével történő felhasználása csak a kiadó előzetes írásbeli engedélyével történhet.

Tartalomjegyzék

Vezetői összefoglaló	5
Problémafelvetés	5
Módszer	5
Eredmények	6
Bevezetés	9
A klímaváltozás jelene és jövője	11
Globális folyamatok	11
A klímaváltozás okai	11
Éghajlati tényezők alakulása 1900–2010 között	11
Éghajlati forgatókönyvek a 2010–2100 közötti időszakra	11
Várható klimatikus tendenciák és azok mezőgazdasági hatása	13
Európai folyamatok	14
Éghajlati tényezők alakulása 1900–2010 között	14
Éghajlati forgatókönyvek a 2010–2100 közötti időszakra	14
Várható klimatikus tendenciák és azok mezőgazdasági hatása	16
Magyarországi folyamatok	17
Éghajlati tényezők alakulása 1900–2010 között	17
Éghajlati forgatókönyvek 2010–2100 között	18
Várható klimatikus tendenciák és azok mezőgazdasági hatása	19
A klímaváltozás elleni küzdelem és alkalmazkodás	23
Világ és EU	23
Magyarország	26
A klímaváltozás hatása a búzára és a kukoricára	29
A klímaváltozás hatásai a búzatermelésben	30
A klímaváltozás hatásai a kukoricatermelésben	31
Adat és módszer	35
A 4M modell	35
A felhasznált adatok köre	37
Parcella- és üzemi szintű hozam- és inputfelhasználási adatok	37
Meteorológiai adatok	37
Talajadatok	39
A kalibrálás, validálás és az előrejelzés menete	40
Vetési idő modellezése – automatikus termelői adaptáció feltételezése	41
Előrejelzés és regionalizáció	42
Választható termelői adaptáció modellezése	42
Klímaszenáriók statisztikai elemzése	45
Bázisidőszaki adatok összevetése	45
A 2100-ig tartó időszak becsléseinek összevetése	51
Eredmények	61
Búza	61
Kalibrálás és validálás szántóföldi parcellaadatokon	61
Vetés dátumának modellezése	63
Hozamok modellezése	67

Kukorica	77
Kalibrálás és validálás parcellaadatokon	77
Vetés dátumának modellezése	78
Hozamok modellezése	83
Executive summary	93
Introduction	93
Methods and data	93
Results	94
Kivonat	97
Abstract	98
Mellékletek	99
Mellékletek jegyzéke	99
Hivatkozások jegyzéke	103

Vezetői összefoglaló

Problémafelvetés

A jelentős részben antropogén eredetű, a korábbinál gyorsabb és nagyobb mértékű klímaváltozás hatására a hazai mezőgazdasági termelés éghajlati körülményeinek kedvezőtlen alakulása figyelhető meg. Az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése, illetve azok negatív hatásaihoz történő alkalmazkodás hiányában, a globális és regionális klímaszcenáriók előrejelzése alapján (amelyek jelentős szórást mutatnak) a mezőgazdasági termelés környezeti feltételeinek további romlása várható. Mindez jól megalapozott felkészülést tesz szükségessé az agrárágazat szereplői részéről. Ehhez szükséges számszerűsíteni a lehetséges beavatkozások következményeit, azok költségekre és jövedelmezőségre gyakorolt hatását. Fontos kiemelni, hogy a folyamatos fejlődés ellenére a hosszú távú klíma-előrejelzések jelentős bizonytalansággal terheltek. Ezért különösen javasolt az „ensembles” megközelítés, amelynek lényege, hogy több lehetséges scenáriót együttesen vesz figyelembe.

A klímaváltozás lehetséges gazdasági következményeit vizsgáló, folyamatosan és gyorsan bővülő empirikus szakirodalomban globális és regionális klímamodellekkel, makrogazdasági és aggregált ágazati adatok felhasználásával értékelik a különböző éghajlatváltozási scenáriók hatásait a mezőgazdasági termelésre. A hatékony alkalmazkodás szempontjából kiemelkedően fontos, országosan reprezentatív, valós üzemi szintű (mikrogazdasági) agromenedzsment-adatokra alapozott hatásvizsgálatokból ezidáig keveset publikáltak, ezért ezen területen számos alkalmazkodási beavatkozás felátatlan. Jelen munkánkkal elsősorban ezt igyekszünk pótolni.

Módszer

Kutatásunkban a hazai mezőgazdasági termelési feltételekhez adaptált CERES-alapú 4M szimulációs növénytermesztési modellt használtuk. Első lépésben 2014–2016 közötti parcellaszintű tesztüzemi adatokkal kalibráltuk és validáltuk a 4M modellt. Erre azért van szükség, mert csak így biztosítható, hogy a modell a hazai valós termelési körülményekhez igazodóan szimulálja a növények növekedését. Ezt követően a 2001 és 2014 közötti referencia-időszakban a tesztüzemben legalább 5 évig részt vevő gazdaságok hozamait becsültük a 4M modellel. Az így kapott adatokkal, valamint a figyelembe vett klímaszcenáriókkal becsültük a 2021 és 2100 között várható őszi búza- és kukoricahozamokat.

A referencia-időszak időjárási adatait (globálsugárzás, maximum- és minimum-hőmérséklet, csapadékmennyiség) a MARS-Agri4Cast (*Monitoring Agriculture with Remote Sensing*, MARS) meteorológiai adatbázisából gyűjtöttük. A terméshozamok 2001–2014 referencia-időszakhoz viszonyított változását hat európai kutatóintézet (*Community Climate Changes Consortium for Ireland, Danish Meteorological Institute, The Royal Netherlands Meteorological Institute, Swiss Institute for Technology, Max-Planck-Institute for Meteorology, Swedish Meteorological and Hydrological Institute*) által kifejlesztett klímaszcenáriók felhasználásával modelleztük annak érdekében, hogy a modellbecslések nagy bizonytalanságát az eredmények átlagolásával csökkentjük. Az Agri4Cast-adatokhoz hasonlóan az egyes klímaszcenáriók esetében is napi klimatikus adatokat használtunk. A 4M modell a szimuláció során figyelembe veszi a légkör CO₂-koncentrációját is. A referencia-időszak szimulációi során az éves átlagos koncentrációval számoltunk, a 2021–2100 közötti időszakra vonatkozóan a jelenlegi gazdasági-társadalmi folyamatok alapján legvalószínűbbnek tűnő SRES kiegyenlített energiasztruktúrájú A1B scenáriót használtuk.

A búza- és kukoricahozamok modellezésekor (4M) részletes talajtani paraméterekkel számoltunk. A kalibrálás és validálás során használt parcellaszintű adatok esetében a gazdálkodóktól gyűjtött talajtextúra osztályokra vonatkozó adatokat használtuk. Az előrejelzéshez a talajadatokat az MTA ATK TAKI adatbázisából vettük ki az üzemek telephelyének földrajzi elhelyezkedését alapul véve.

Eredmények

- A klímaváltozás az általunk vizsgált klímamodellek szerint a világtágnál jelentősebb mértékben érintette és érinti majd Magyarországot: Az átlaghőmérséklet 1901–2016 között 1,10 °C-kal emelkedett Magyarországon, azonban az elmúlt 35 évben intenzívebbé vált az átlaghőmérséklet növekedése, 1981 és 2016 között elérte az 1,62 °C-ot. A nyári átlagos hőmérsékleti érték ennél is nagyobb mértékben, 1,97 °C-kal növekedett (Országos Meteorológiai Szolgálat, 2018). A nyári átlagos hőmérsékleti értékek ennél is nagyobb mértékben, 1,97 °C-kal növekedett. Ehhez képest a világtálag hőmérséklet-növekedése 0,94 °C-ot, Európáé 0,89-0,93 °C-ot ért el.
- A Magyarországra vonatkozó, 2100-ig tartó éghajlati becslések már hat regionális modell mellett is rendkívül vegyes képet mutatnak: a csapadék eloszlásában és a változás irányában jelentősen eltérnek a modellek, de általánosságban elmondható, hogy az alkalmazott szcenáriók további melegedést (amely a bázisévhez képest akár a 3,5-4 °C-ot is elérheti) és szárazodást jeleznek előre. Emellett jelentősen megnövekszik az extrém események gyakorisága (hőhullámok, forró napok, heves esőzések, zivatarok, aszály, villámárvizek, erősödő szelek stb.), amely érdemben átalakítja a magyar agroökológiai potenciált.
- A klímaváltozás őszi búzára és kukoricára gyakorolt hatásának vizsgálatához használt 4M biofizikai modell kezdetben a tényadatokhoz képest a búza esetében az alacsony hozamokat felül- és a magas hozamokat alulbecsülte, míg a kukoricánál a hozamokat felülbecsülte. Mindkét növény esetében a kalibrálás eredményeképpen sikerült csökkenteni a becslés torzításait, amit a validálás alátámaszt. Ezt követően a 4M modell alkalmassá vált a búza és kukorica esetében az éghajlatváltozás hatásainak figyelembevételére, illetve az alkalmazkodás hatásainak becslésére.
- Feltételezve, hogy a termelők folyamatosan alkalmazkodnak a változó időjáráshoz és keresik az optimális vetési és betakarítási időpontokat, az őszi búza esetében a klímaváltozás hatására 2050-ig több mint 9 nappal tolódik későbbre a vetés ideje, 2100-ra pedig átlagosan 12 napos késést becsül a modell a jelenlegi gyakorlathoz képest. Emellett a betakarítás ideje 9 nappal hamarabb következik be 2050-ig, becsléseink alapján pedig 2100-ra 17 nappal hamarabb indulhat meg a betakarítás, mint a jelenlegi viszonyok között.
- Ezen adaptáció mellett is a búzahozamok 2050-ig várhatóan 8 százalékkal, 2100-ig pedig 21 százalékkal csökkennek, de az eredmények jelentősen szórtak (2100-ra vonatkozóan 7 és 32 százalék közötti értékek várhatók).
- A búza esetében pótlólagos műtrágya (legalább 100 kg/hektár nitrogén-hatóanyag) kijuttatása – mint a klímaváltozáshoz való alkalmazkodási eszköz – nem állítja meg a kedvezőtlen klimatikus tényezők változásához kapcsolódó hozamcsökkenést, az alapszcenárió hozamcsökkenéséhez képest 1 százalékon belül marad az a hatás, amelyet a magasabb műtrágyaadagok váltanak ki a búzahozamokban.
- A búzatermelés esetében az öntözés és az ehhez kapcsolódó megnövelt műtrágyafelhasználás (120 kg/hektár) sem bizonyul hatásos alkalmazkodási stratégiának, 2100-ig mindössze 1 százalékponttal mérséklődik a hozamcsökkenés az öntözés hatására. A kalkulált többletvízigény is minimális – 15 mm –, ami jól jelzi, hogy a búza nem igényli az öntözéssel kijuttatható többletvízigényt.
- A kukorica esetében a klímaváltozás hatására 2050-ig több mint 9 nappal tolódik előre a vetés ideje, a 2100-as évekre pedig átlagosan 14 nappal korábban kerülhet sor a vetésre a jelenlegi gyakorlathoz képest. Emellett a betakarítás ideje 17 nappal hamarabb következik be 2050-ig, 2100-ra pedig 31 nappal hamarabb indulhat meg a betakarítás, mint napjainkban.
- Ezen adaptáció mellett a kukorica hozamai 2050-ig várhatóan 18 százalékkal, 2100-ig pedig 28 százalékkal csökkennek, de az eredmények bizonytalansága a klímaszcenáriók függvényében igen nagyra mondható (2100-ra vonatkozóan 10 százalékos hozamnövekedés és 64 százalékos hozamcsökkenés közötti értékek várhatók).
- A kukorica esetében pótlólagos műtrágya (legalább 90 kg/hektár nitrogén-hatóanyag) kijuttatása valamelyest csökkenti a klímaváltozás okozta hozamvesztést: a modelleredmények

szerint a pluszműtrágya hatására 2050-ig 15 százalékra, 2100-ig 25 százalékra mérséklődik a hozamveszteség.

- A kukorica esetében az öntözés és az ehhez kapcsolódó megnövelt műtrágyaadag (120 kg/hektár) drasztikusan javítja az adaptáció eredményét: 2050-ig akár még hozamnövekedés is elképzelhető (+10 százalék a jelenlegi színvonalhoz képest), 2100-ig pedig csak 7 százalékkal csökkennek a hozamok a pótlólagos víz kijuttatásával, ehhez azonban átlagosan 100-120 mm öntözővízre van szükség.
- Ebben az esetben igen jelentőssé válnak a regionális különbségek is: míg a Nyugat-Dunántúlon a jelenleg is magas (és magas műtrágyaadagokkal elért) hozamok 2100-ra 15-20 százalékkal csökkenhetnek, addig a Dél-Alföldön akár még nőhetnek is, figyelembe véve az itt felhasznált nagy mennyiségű öntözővíz és pótlólagos műtrágya hatását.
- Megállapítható, hogy a klímaváltozáshoz történő alkalmazkodás lehetősége növény-specifikus. Őszi búza esetében sem az intenzívebb tápanyag-kijuttatás, sem az öntözés nem alkalmas a negatív hatások csökkentésére. Ezzel szemben kukorica esetében különösen az öntözés alkalmazása a hozamcsökkenést jelentős mértékben csökkentheti. Az öntözéses gazdálkodás minél nagyobb arányú kiterjesztésének azonban jelentős gátat szabhat a hazai öntözővízkészlet elérhetősége (mennyisége, területi elhelyezkedése).
- Fontos azonban hangsúlyozni, hogy a tanulmányban bemutatott, adaptációval elérhető, hozamokban kifejezett pozitív hatás nem kerül kifejezésre költségek és többletbevétel tekintetében, ezért a bemutatott, a kukorica esetében naturáliaszinten sikeres adaptációs stratégia gazdasági rentabilitása pillanatnyilag nem értékelhető.

Bevezetés

Az emberi tevékenységek által okozott klímaváltozás tanulmányozása évszázados múltra tekint vissza. A szén-dioxid üvegházhatású gáz szerepét a klímaváltozásban Svante Arrhenius svéd kutató értékelte először 1896-ban, és megállapította, hogy a szén-dioxid légköri koncentrációjának felére csökkenése jégkorszakot, megduplázódása pedig 5-6 °C-os felmelegedést eredményez (Arrhenius, 1896). Az utóbbi forgatókönyv bekövetkezésének folyamatát igazolta Charney *et al.* (1979) jelentése, és még ebben az évben a Világ Meteorológiai Szervezete (*World Meteorological Organization*, WMO) által szervezett Klíma Világkonferencián hangsúlyozták az antropogén klímaváltozás kedvezőtlen hatásait az emberiségre. Kiemelték, hogy mindez már a huszadik század végén megfigyelhetővé válik, a huszonegyedik század közepe előtt pedig jelentős változásokra is fel kell készülnie az emberiségnek (WMO, 1979).

Az Éghajlat-változási Kormányközi Testület (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) 1990 óta ad ki értékelő jelentéseket, melyekben felhívják a tudományos közösség és a társadalom figyelmét az antropogén hatásra bekövetkező klímaváltozás lassításának szükségességére, illetve a klímaváltozás hatásainak kezelésére és alkalmazkodási stratégiák kidolgozására. Az IPCC megállapításai szerint a többnyire emberi tevékenységek miatt az elmúlt évszázad végére mért 1 °C-os átlaghőmérséklet (globálsugárzás) növekedés az 1880-as évekhez viszonyítva, a huszonegyedik század végére további 3,2-5,4 °C-kal növekedhet (IPCC, 2013, 2014a). Utóbbi bekövetkezésének megelőzése, illetve a múltban kibocsátott üvegházhatású gázok (ÜHG) okozta éghajlatváltozás negatív hatásainak csökkentése érdekében a gazdasági-társadalmi folyamatok, így a mezőgazdasági termelés alkalmazkodása globális és helyi szinten is elkerülhetetlen.

A kibocsátáscsökkentés és a klímaváltozáshoz történő alkalmazkodás fontosságát jól mutatja, hogy az üvegházhatású gázok kibocsátását korlátozó, az ENSZ keretein belül 2015-ben megkötött Párizsi Klímaegyezményt 195 ország írta alá. A hatálybalépéséhez szükséges a globális felmelegedésért felelős gázok kibocsátásának legalább 55 százalékat kitevő 55 ország ratifikációja, ami az EU és hat tagállamának 2016 októberében történő csatlakozásával teljesült. Az EU klímavédelmi erőfeszítéseit jól jelzi, hogy már 2005-ben elindította az üvegházhatású gázok kereskedelmi rendszerét, amelynek célja, hogy piaci eszközökkel is támogassa az ÜHG-kibocsátás csökkentését.

A klímaváltozás lehetséges hatásainak értékelésére többféle megközelítésben tettek kísérletet. A témával foglalkozó szakirodalom egyik részében – elsősorban globális szinten – úgynevezett integrált értékelési modellek alkalmazásával, aggregált hatásfüggvények becslésével vizsgálták az ÜHG-kibocsátás társadalmi költségeit. Ezt a megközelítést azonban a közelmúltban megkérdőjelezték az igen leegyszerűsített és véletlenszerűen kiválasztott gazdasági károkozási függvény miatt (Pindyck, 2013). A szakirodalom egy másik jelentős részében fizikai hatásvizsgálatokat végeznek és ezek gazdasági értékelésével mutatják be a klímaváltozás hatásait (*Metroeconomica*, 2004; Aaheim *et al.*, 2012; Bosello *et al.*, 2011; Ciscar *et al.*, 2011, 2012) országos vagy regionális szinten. Szintén gyakori megközelítés, amikor a hatásokat és a sérülékenységeket térképezik fel, de tartózkodnak ezek monetáris értékben történő kifejezésétől (ESPON Climate, 2013). Mindezek a kutatások jelzik, hogy mind országos, mind annál kisebb egységre nézve jelentős igény mutatkozik az értékelések iránt, mivel ez az a szint, ahol az éghajlatváltozás hatása jelentkezik, és ahol az alkalmazkodás ösztönzése sikeresen megtörténhet.

Jelen kutatás alapvető célja, hogy a regionális éghajlatváltozási scenáriók felhasználásával becslést készítsünk a főbb hazai gabonafélék várható hozamainak alakulására. Ezen felül megvizsgáljuk két lehetséges alkalmazkodási stratégia (szárazművelés agromenedzsment-optimalizálással, illetve öntözéses gazdálkodás) alkalmazásának várható hatásait országos szinten reprezentatív üzemi adatokra alapozott modellezéssel. A következő hipotéziseket vizsgáltuk:

- A hazai mezőgazdasági termelésben kulcsszerepet játszó búza és kukorica hozamai jelentős mértékben csökkennek a klímaváltozás hatására.
- A klímaváltozás okozta hozamcsökkenés üteme fokozatosan felerősödik ennek az évszázadnak a második felében, míg a század első felében a változás nem lesz jelentős.
- Már az évszázad közepére érdemben megváltozik az egyes növények esetében az optimális agrotechnológiai beavatkozások (vetés, tápanyag-kijuttatás, betakarítás) időzítése.
- Öntözéssel és optimális műtrágyázással kivédhetők a hozamra gyakorolt kedvezőtlen klimatikus hatások (megfelelő vetési és betakarítási időpontokat feltételezve).

Tanulmányunkban elsőként áttekintjük a globális klímaváltozás okait és főbb hatásait, kiemelve az Európára és Magyarországra vonatkozó elemeket. Röviden összefoglaljuk, hogy milyen hatásai lehetnek a klímaváltozásnak a mezőgazdaságra, valamint azt, hogy világ- és európai szinten milyen válaszok születtek a klímaváltozás elleni küzdelemre, illetve milyen stratégiai kutatások segítik a klímaváltozáshoz történő hazai alkalmazkodást.

Ezt követően áttekintjük tanulmányunk két szűkebb tárgya, az őszi búza és a kukorica klimatikus változásokra adott hozamválaszaival foglalkozó szakirodalmat, majd ismertetjük saját vizsgálatunk módszerét, valamint eredményeit.

A klímaváltozás jelene és jövője

Globális folyamatok

A klímaváltozás okai

Az éghajlatváltozás a világ minden részét érintő globális probléma. A globális felmelegedés üteme az emberi tevékenység hatására mindinkább gyorsul, aminek legfőbb oka az üvegházhatású gázok koncentrációjának növekedése (EC, 2016). A népesség- és gazdasági növekedés hatására az üvegházhatású gázok koncentrációja jelentős mértékben megnőtt, döntően az olaj és a fosszilis gázok elégetése során keletkező szén-dioxid és dinitrogén-oxid miatt, de emellett az erdőirtás, az állattenyésztés, a nitrogént tartalmazó műtrágyák használata, a fluortartalmú gázok szintén hozzájárultak az emelkedéshez. A szén-dioxid-kibocsátás 1970 és 2010 között közel 78 százalékkal járt hozzá a teljes üvegházgáz-kibocsátás növekedéséhez (IPCC, 2014b). Az agrárgazdasági értékláncok termeléséből a metán, a dinitrogén-oxid és a szén-dioxid tekinthetők a legfontosabb üvegházhatású gázoknak, amelyek elsősorban a haszonállatok tartása során termelődnek (Gerber *et al.*, 2013).

A felmelegedés gyorsabb lehet, mint ahogy azt az IPCC korábbi jelentéseiben jósolták (Stern, 2008). Ezt több azóta bekövetkezett és felgyorsuló természeti folyamat is alátámasztja. Például az északi, jelenleg fagyos tundrán hatalmas mennyiségű metán tárolódik a befagyott mocsarakban. Ha a felmelegedés hatására a tundra olvadni kezd, a megrekedt metán kiszabadul. Mivel a metán erőteljes üvegházhatású gáz, így tovább növeli a felmelegedést és a klímaváltozást a Föld légkörében (Tietenberg és Lewis, 2012).

Éghajlati tényezők alakulása 1900–2010 között

Az elmúlt száz évben közel 1 °C-kal nőtt a földfelszín átlaghőmérséklete, emellett azonban a csapadékvizonyok is megváltoztak. Globális szinten elmondható, hogy ugyan nem nőtt a csapadék éves mennyisége, de annak eloszlása mind térben, mind időben egyenetlenebbé vált. Az elmúlt évszázad során jelentősen megszaporodott nagy árvizek gyakoriságának látványos növekedése várható a 21. században (Takács-Sánta, 2005).

A legutóbbi három évtized mindegyike melegebb volt, mint bármelyik korábbi évtized a hőmérsékleti adatok feljegyzésének kezdete, 1850 óta. A szakértők szerint az iparosodás előtti időkhöz viszonyított 2 °C-os hőmérséklet-növekedés az a határérték, amely felett sokkal magasabb a kockázata, hogy bolygónkon veszélyes és potenciálisan katasztrofális környezeti változások következnek be (EC, 2016).

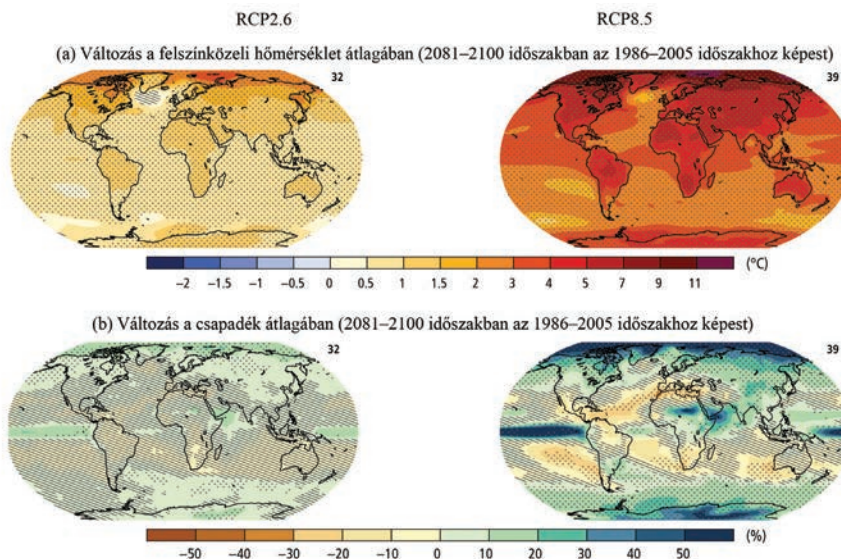
Éghajlati forgatókönyvek a 2010–2100 közötti időszakra

A hőmérséklet, a csapadék, a vízszint és az egyéb környezeti jellemzők jövőben várható alakulását a klimakutató intézetek az üvegházhatású gázok kibocsátásának különböző kibocsátási pályáit feltételező, úgynevezett klímaváltozási scenáriók formájában jelzik előre. Az Éghajlat-változási Kormányközi Testület (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) 2000-ben, 2007-ben és legutóbb 2014-ben publikálta megállapításait a klímaváltozást kiváltó okokról és a lehetséges következményekről (Farsang *et al.*, 2015). Míg a korábbi emisszióra vonatkozó forgatókönyvek (*Special Report on Emissions Scenarios*, SRES) a társadalmi és gazdasági folyamatokban történő változásokra (népesség- és gazdasági növekedés, technológiai fejlődés, energiaforrások aránya), illetve az antropogén eredetű üvegházgáz-kibocsátás vizsgálatára helyezték a hangsúlyt (IPCC, 2000), addig az RCP (*Representative Concentration Pathways*, *Koncentrációváltozás Reprezentatív Pályái*) forgatókönyvek figyelembe veszik a kibocsátáscsökkentési (adaptációs) törekvéseket (Moss *et al.*, 2010). Ezek is részletesen megadják az aeroszolrészecskék és az üvegházhatású gázok koncentrációjának

lehetséges jövőbeli értékeit (Sábitz *et al.*, 2015), és a 2100-ra várhatóan kialakuló, W/m^2 -ben (8,5; 6,0; 4,5; 2,6 W/m^2) kifejezett sugárzási kényszert (van Vuuren *et al.*, 2011, Szépszó *et al.*, 2016). Az alábbiakban bemutatjuk az RCP-forgatókönyveket, míg a számításainkban használt A1B- és a többi SRES-szenáriót a felhasznált adatok bemutatásakor tárgyaljuk:

- Az RCP8.5-forgatókönyv szerint az üvegházhatású gázok nagymértékű kibocsátásával kell számolni, ezek 8,5 W/m^2 sugárzási kényszert eredményeznek 2100-ra, amikor a szén-dioxid légköri koncentrációja meghaladja a 1370 ppm-et. A termőföld és legelő nagyságában is emelkedés várható, a sűrűn vetett szántóföldterületek az USA-ban, Európában és Délkelet-Ázsiában tovább növekednek, valamint a legelőterületek is bővülnek az Egyesült Államok nyugati részén, Euráziában, Dél-Afrikában és Ausztráliában. Az elsődleges erdő vélhetően az északi magas szélességeken és az Amazonas-medence egyes részein lesz a legkoncentráltabb, míg a másodlagos vegetáció gyakori lesz az Egyesült Államokban, Afrikában, Dél-Amerikában és Euráziában (1. ábra).
- Az RCP6.0-forgatókönyv alapján 6 W/m^2 sugárzási kényszernél stabilizálódás következik be 2100 után, amikor a szén-dioxid-szint várhatóan 850 ppm lesz. Ebben a Szenárióban a szántóterületek növekedését és a legelők területének csökkenését feltételezik. Utóbbi csökkenése az USA-ban, Afrikában, Euráziában és Ausztráliában várható.
- Az RCP4.5-szenárió szerint a stabilizálódás 4,5 W/m^2 sugárzási kényszernél következik be 2100 után, ami 650 ppm szén-dioxid-szintet feltételez. Ebben a Szenárióban mind a szántó-, mind a legelőterület nagyságában csökkenést valószínűsítünk, a másodlagos vegetáció területe pedig magas lesz az USA-ban, Afrikában és Euráziában.
- Az RCP2.6 egy intenzív mitigációs (csökkentés) Szenárió, melyben egy korai (2100 előtti) koncentrációcsúcs (2,6 W/m^2 , 490 ppm) elérése után kibocsátáscsökkentés következik be. A növekvő bioenergia-termelés eredményeként a szántóföldi földhasználat szintén növekedni fog, a legelőterület pedig viszonylag állandó marad. A területek nagysága hasonlóan alakul majd, mint az RCP4.5 esetén.

1. ábra: Az átlagos felszínközeli hőmérséklet változása (a) és az átlagos csapadékmennyiség változása (b) 2081–2100-ra vonatkozóan az 1986–2005-ös időszakhoz képest az RCP2.6- és az RCP8.5-forgatókönyv alapján



Várható klimatikus tendenciák és azok mezőgazdasági hatása

A klímaváltozás hatása főként a hőmérséklet, valamint a csapadék mennyiségének és eloszlásának változásában figyelhető meg. A globális átlagos felszínközeli hőmérséklet emelkedésével a meleg szélsőségek gyakoribbá válnak, a hideg szélsőségek pedig ritkábban jelentkeznek a legtöbb szárazföldi területen napi és évszakos léptékben. A hőhullámok egyre gyakrabban és hosszabb ideig jelentkeznek, de időnként a hideg szélsőségek továbbra is előfordulhatnak (IPCC, 2014b).

A csapadékmennyiségben bekövetkező változások nem lesznek egységesek. A magas földrajzi szélességeken és a Csendes-óceán egyenlítői területén az éves átlagos csapadékmennyiség várhatóan növekedni fog az RCP8.5-forгатatókönyv szerint. Számos közepes földrajzi szélességi övön és szubtrópusi száraz területen az átlagos csapadékmennyiség csökkenése valószínűsíthető, míg a közepes földrajzi szélességek csapadékos területein a csapadékmennyiség növekedése valószínű az RCP8.5-forгатatókönyv szerint. Nagyon valószínű, hogy a nagy csapadékkal járó események intenzívebbé és gyakoribbá válnak majd a közepes földrajzi szélességek jelentős részén és a csapadékos trópusi területeken. Az óceánok felmelegedése globális átlagban tovább folytatódik a 21. században, a legintenzívebben a trópusi és az északi félgömb szubtrópusi területeinek tengerfelszínén (IPCC, 2014a).

A megnövekedett hőmérséklet több párolgással és a légkör magasabb páramegtartó kapacitásával jár, mindemellett a szelek és viharok erősödése várható; amely hatások jelentősen átalakítják az egyes területeken tapasztalható csapadék átlagos mennyiségét, gyakoriságát és a csapadék formáját. A legcsapadékosabb évszak a 2071–2100-as időszakban a tél lesz, a nyár pedig a legszárazabb. Várhatóan kevesebb alkalommal, de olyankor intenzívebben hullik a csapadék, ami a hőmérséklet-emelkedés miatt a jelenleginél ritkábban jelentkezik hó formájában. Eközben a száraz területek még szárazabbá, a csapadékosak pedig még inkább csapadékosává válhatnak (Trenberth, 2011). A klímaváltozás hatására a sarki jégtakarók olvadása miatt emelkedik az óceánok és tengerek szintje, egyre gyakoribbá válnak a szélsőséges időjárási jelenségek.

A 21. század során a globális átlagos tengerszint emelkedése folytatódik, a 21. század végére az óceánok területének több mint 95 százalékán emelkedik majd a tengerszint. Az RCP2.6-forгатatókönyv szerint 2081–2100-ra 1985–2005-höz viszonyítva az emelkedés 0,26–0,55 m közé tehető, az RCP8.5-forгатatókönyv esetén pedig 0,45–0,85 m tengerszint-növekedéssel számolnak. A tengerszint emelkedése nem lesz egységes, a partvonalak mintegy 70 százalékát a globális átlagos változáshoz képest ± 20 százalékos eltéréssel fogja érinteni (IPCC, 2014b), ami hatással lesz a jelenlegi partközeli mezőgazdasági területekre.

A globális hőmérséklet 4 °C-os vagy annál nagyobb emelkedése a 20. század végi szinthez képest nagy élelmezésbiztonsági kockázatot jelent az egész világon. A jövőben várható magas hőmérséklet és légnedvesség veszélyeztetheti a mindennapos emberi tevékenységeket, beleértve az élelmiszer-termelést is. A vidéki területeken súlyos következményekkel kell számolni a hasznosítható vízkészlet és a vízzel való ellátottság, az élelmezésbiztonság, továbbá az infrastruktúra és a mezőgazdasági jövedelmek vonatkozásában, beleértve az élelmiszer és a nem élelmiszer célú növények termesztésére használt területek eltolódását szerte a világban (IPCC, 2014c).

A globális éghajlati változások sok növény- és állatfaj kipusztulásához vezethetnek, mások előfordulása jelentősen csökkenhet vagy területileg megváltozhat. Az élővilágra gyakorolt hatásokat sokkal nehezebb előre látni, mint az éghajlati hatásokat, ami igen megnehezíti ezen a területen a projekciók készítését (Bellard *et al.*, 2012).

A mezőgazdaságra különösen nagy hatással van az éghajlati viszonyok megváltozása, hiszen az ágazat teljesítményét a hőmérséklet és a csapadék alakulása döntően befolyásolja. A legnagyobb területi érintettségű szárazművelésű növénytermesztés különösen ki van téve az éghajlatváltozás okozta kedvezőtlen időjárási szélsőségeknek, mivel a termesztett növények termésmennyiségét

és minőségét, a felhasznált víz mennyiségét is közvetlenül befolyásolja a helyi klíma és a légköri szén-dioxid-koncentráció (Ciscar *et al.*, 2011). A sokféle régiót és terménytípust lefedő nagyszámú tanulmány átfogó elemzése azt mutatja, hogy az éghajlatváltozás inkább negatív, mint pozitív hatást gyakorol a terméshozamokra (IPCC 2014b). A trópusi és mérsékelt övi régiókban az éghajlatváltozás következtében a helyi hőmérséklet a 20. századihoz képest 2 °C-os vagy azt meghaladó növekedése negatívan befolyásolja a búza-, a rizs- és a kukoricatermesztést (IPCC, 2014c).

A csapadékeloszlás azon változása, melynek nyomán a téli csapadék válik túlnyomóvá és meghatározóvá, a jelenlegi vetésszerkezet és termesztéstechnológia mellett negatívan érintheti a mezőgazdaságot, aminek az eddig jellemző nyári-tavaszi csapadékmáximumok kedvezőbbek.

A csapadékhány nyomán bekövetkező szárazság és vízhiány jelentős negatív hatást gyakorol az adott térség mezőgazdaságára és az ott élő népesség életfeltételeit nagymértékben rontja. 2040-re számos közel-keleti, dél-amerikai és több európai ország is súlyos aszályal fog küzdeni (Farsang *et al.*, 2015). A megnövekedett és gyakran szélsőséges intenzitású csapadékmennyiség talajeróziót okozhat (Mullan *et al.*, 2012).

Európai folyamatok

Éghajlati tényezők alakulása 1900–2010 között

Az európai átlaghőmérséklet emelkedése az 1970-es évektől felgyorsult, ami az 1850–1900-as időszakhoz képest 0,89–0,93 °C-os emelkedést jelentett (EEA, 2018). A 2017-es év az eddigi legmelegebb hőmérsékletet mutatta, ami 1,0–1,1 °C-os emelkedést jelentett az iparosodás előtti időszakhoz viszonyítva. Az utóbbi három évtized (1986–2015) eredményei alapján az európai nyarak hőmérsékletének növekedése a legintenzívebb, ami eléri az 1,3 °C-ot. A magasabb átlaghőmérsékletet főleg 2003-ban, 2010-ben és 2015-ben extrém hőhullámok is kiegészítették (Luterbacher *et al.*, 2016), míg a forró napok száma 1960-tól kezdődően megduplázódott (EEA, 2018).

Az Európában megjelenő aszályok leginkább a Mediterrán területeken és a Kárpát-medence régiójában voltak megfigyelhetők, megjelenésük gyakorisága, súlyossága és időtartama az 1950–2012-es években fokozódott, míg a kontinens északi és keleti részén csökkenést tapasztaltak (Spinoni *et al.*, 2015).

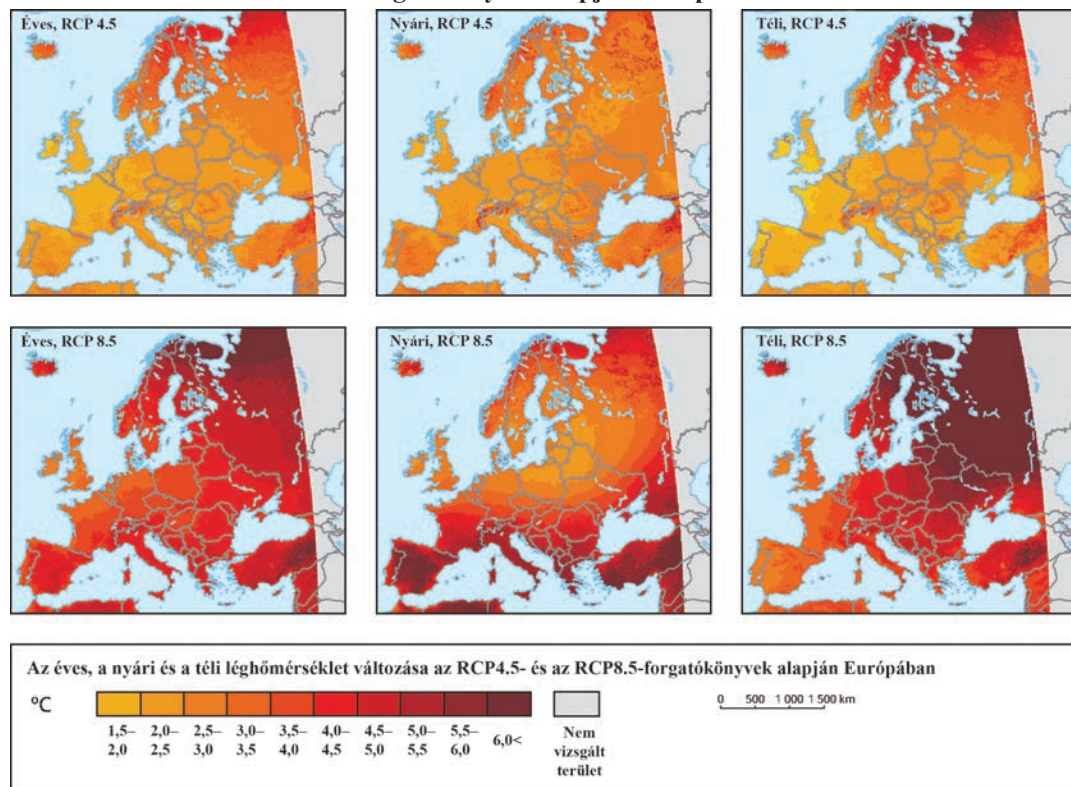
A rendelkezésre álló adatok rávilágítanak arra, hogy az európai árvizekért a hirtelen lezúduló nagymennyiségű csapadék és a megváltozott talajfelszíni feltételek egyaránt felelősek (Kundzewicz *et al.*, 2013). Európában az árvízkárokból származó veszteségek aránya az 1970-es évektől számottevő mértékben növekedett. Az európai országok 1980–2010 között 3563 árvízeseményt jegyeztek. 2010 májusában és júniusában összesen 321 árvízet jelentettek be, amelyek 27 országot, köztük a legtöbb közép-európai országot érintették (EEA, 2016).

Éghajlati forgatókönyvek a 2010–2100 közötti időszakra

A klímaváltozással foglalkozó tanulmányok többsége megállapítja, hogy Európát a világátlagnál nagyobb mértékben fogja érinteni a klímaváltozás, annak minden negatív következményével együtt. Így Ciscar *et al.* (2011) 2,3–3,1°C tartományba tehető globális hőmérséklet-emelkedéssel számol, Európára ugyanakkor ennél nagyobb mértékű emelkedést modellez. Becslései szerint Észak-Európában 2,5–3,9 °C közötti, míg Közép- (4,1 °C) és Dél-Európában (5,4 °C) ennél magasabb hőmérséklet-növekedés várható.

A 2071–2100-as időszakra becsült változásokat a 2. ábra szemlélteti, az éves (balra), a nyári (középen) és a téli (jobbra) felszíni léghőmérsékletre vonatkozóan az RCP4.5 (fent) és az RCP8.5 (lent) scenáriók alapján.

2. ábra: Az éves, a nyári és a téli léghőmérséklet változása a 2071–2100 közötti időszakra vonatkozóan az 1971–2000 közötti időszakhoz képest az RCP4.5- és az RCP8.5-forgatókönyvek alapján Európában



Forrás: Jacob *et al.*, 2014

Az IPCC által alkalmazott globális klímascenáriók használata mellett az európai kutatóintézetek további regionális klímamodelleket is kifejlesztettek annak érdekében, hogy pontosabb becsléseket adjanak a klímascenáriók regionális, Európán belüli hatásairól, ugyanis ezek segítségével a regionális részletek számszerűsítése sokkal közelebbi képet ad, szemben a globális klímamodellekkel, melyek elsősorban a földi rendszer kölcsönhatásainak makroszintű leírására alkalmasak (Szépszó, 2014).

E munkákat az Európai Bizottság 6. Keretprogramja támogatásával (Globális változások és az ökoszisztémák) megvalósított ENSEMBLES projekt fogta össze, ami egy európai közös modellező hálózat létrehozását célozta, amelyben nagy felbontású, globális és regionális modellek is helyet kapnak. A modelleredmények igen széles körben szóródnak, és akár jelentős mértékben eltérő regionális eredményre is vezetnek. Az egyes regionális modellek legfontosabb eredményeit az alábbiakban foglaljuk össze.

A dániai DMI-ARPEGE spektrális modellt eredetileg a Météo-France és a European Centre for Medium-range Weather Forecasts fejlesztette ki időjárás-előrejelzésre. Az ENSEMBLES programban determinisztikus havi és szezonális időszakok időjárás-projekcióinak készítésére alkalmazták. A DMI-HIRHAM5-ARPEGE erőteljes felmelegedést jelez előre, míg a csapadék esetében csak enyhe növekedést vetít előre. Ez a modell a többi szimulációhoz viszonyítva hidegebb és szárazabb átlagokat valószínűsít (Dosio *et al.*, 2012).

Svájcban az ETHZ-HadCM3Q globális modellből kiindulva fejlesztették ki a saját CLM (*Climate Local Model*) regionális klímamodelljüket. Az ezzel készített projekciókból megállapítható, hogy várhatóan kevesebb csapadékkal kell számolniuk, amely kiegészül a felszín alatti vizek jelentős süllyedésével. Az ETHZ-szimulációkból a HadCM3Q-modellezés eredményeképpen a legvalószínűbb környezeti változás az árvizek szaporodása lehet (Burg, 2007).

A hollandiai KNMIECHAM5 egy optimista, kisebb hidroklimatikus változásokat becslő modell, amely a korábbi verzió hibáit hivatott kezelni. Európa déli részén a konvektív csapadékot alul-, míg a napi csapadékösszegeket túlbecsüli (Szépszó és Horányi, 2008).

A németországi Max Planck Intézet által kifejlesztett ECHAM klímamodell az atmoszféra megfigyelésére szolgáló általános cirkulációs modell, amelyben a legnagyobb változás a korábbi verziókhoz képest a talajfelszíni folyamatok modellbe történő integrálása. A 2020–2050-re végzett szimulációk alapján Európa déli részén mérsékelt szárazodás fog bekövetkezni, az intenzívebb felmelegedés pedig december és január hónapokban várható. A tavaszi időszak felmelegedése kisebb mértékben tér el a megfigyelésektől (Szépszó és Horányi, 2008).

A svédországi klímamodell (SMHI) a BCM globális klímamodellen alapul, és az eredményei alapján a hőmérsékleti szélsőségek sokkal robusztusabbak az extrém csapadékkal szemben, míg a szélerősségből következő szélsőségek esetében kevésbé megbízhatónak bizonyult. A modell az IPCC SRES B2- és A2-szenáriókat veszi figyelembe, ez alapján pedig Európa északkeleti részén a téli hónapokban jelez előre hőmérséklet-emelkedést, amelyet intenzív lehűlés követ.

Összességében megállapítható, hogy az Európára váró környezeti változások esetében igen nagy a bizonytalanság, az irányok azonban minden esetben egyértelműek: egy kedvezőbb helyzetbe kerülő Észak-Európát és egy súlyos vagy mérsékelt nehézségekkel szembenézni kénytelen Dél-Európát vetítenek előre.

Várható klimatikus tendenciák és azok mezőgazdasági hatása

A klímaváltozás hatásai egyértelműen két régióra bontják Európát: Észak- és Dél-Európára. Míg Észak-Európában a klímaváltozásnak várhatóan lesznek pozitív következményei, addig Dél-Európában csak súlyos negatív hatások várhatók: egyre gyakrabban fordulnak elő hőhullámok, erdőtüzek és aszályos időszakok, a Földközi-tenger térsége egyre szárazabbá válik, ami tovább növeli az aszály és a bozóttüzek kialakulásának veszélyét. Észak-Európában ezzel szemben jelentősen nő a csapadék mennyisége, és akár rendszeressé is válhatnak a téli árvizek (EC, 2016).

A mezőgazdaság a klímaváltozás által egyik legközvetlenebbül érintett gazdasági szektor. A csapadéktöbblet várhatóan elsősorban Észak-Európában jelenthet nehézséget (IPCC, 2014b), míg a csapadékmennyiség stagnálása vagy csökkenése és a mezőgazdasági célra felhasználható víz ebből fakadó hiánya Európán belül a déli országokat, például Olaszországot és Spanyolországot érintheti. A mezőgazdasági felhasználásnak alkalmazkodnia kell a megváltozott környezeti és biológiai viszonyokhoz. Szélsőséges esetben, például a talajerózió vagy a sivatagosodás miatt egyes területeket teljesen ki kell vonni a mezőgazdasági felhasználásból (Farsang *et al.*, 2015).

Észak-Európa mezőgazdasági termelékenysége összességében növekedhet a hosszabb termesztési időny és a hosszabb fagymentes időszakok miatt. A magasabb hőmérséklet és a hosszabb termesztési időny új növények termesztését is lehetővé teheti. Dél-Európában azonban a rendkívüli hőség, valamint a csapadék és a rendelkezésre álló vízkészletek csökkenése várhatóan akadályozza a növények termelékenységét. A termés hozamok is változni fognak évről évre a szélsőséges időjárási események és növényvédelmi gondok miatt. A mediterrán térség egyes részein a nyári hónapokban bekövetkező rendkívüli hőség és vízhiány miatt előfordulhat, hogy néhány nyári növényt télen fognak termesztetni. Más területeken, például Nyugat-Franciaországban és

Délkelet-Európában szintén a terméshozam csökkenése várható a forró és száraz nyarak miatt (EEA, 2015b).

Projekciók szerint Európa legnagyobb részén megváltozik a talajnedvesség szintje 2021 és 2050 között, a mediterrán térségben jelentősen csökken, északkeleti részén viszont valamelyest növekedhet (EEA, 2015b). A búza és az árpa hozamai főként Kelet-Európában, valamint Észak- és Közép-Olaszországban fognak várhatóan csökkenni. A búza hektáronkénti hozama évente várhatóan 0,04-0,09 tonnával, az árpáé 0,03-0,05 tonnával csökken. A repcehozamok csökkenhetnek (0,03-0,05 tonna/hektár/év) az atlanti és néhány mediterrán régióban. Dánia az egyetlen ország, ahol emelkedés várható, azonban ez a növekedés a vizsgálatokban nem volt lineáris. A napraforgó hozama átlagosan évente 0,02-0,04 tonna/hektárral csökken Franciaország északnyugati részén, Észak-Olaszországban, Dél- és Közép-Európában, Spanyolországban, Görögországban, Németországban és Lengyelországban (Supit *et al.*, 2010).

A környezet minőségének alakulásában az emberi tevékenység fontos szerepet játszik, ezért szükség van a földhasználat-változással kapcsolatos forgatókönyv kidolgozására. Európában a legnagyobb földhasználó a mezőgazdaság és erdészet, amelyek a teljes földterület 45 és 36 százalékát teszik ki. Rounsevell *et al.* (2006) több földhasználati típust vizsgált (városi, szántó, legelő, bioenergia-növények, erdő és védett területek) 2020, 2050 és 2080-ig, és eredményeik szerint a jövőben a legszembetűnőbb változás a mezőgazdasági célú földhasználatban lesz. A jövőben csökken a mezőgazdasági földhasználat, miközben a mezőgazdasági termékek világkereskedelmében emelkedés várható. Ennek hátterében az áll, hogy növekedni fog a mezőgazdasági termelékenység és a bioüzemanyag-gyártás (Busch, 2006).

A mezőgazdaság jelentős mennyiségű vizet használ fel Európában, ami a teljes vízfelhasználás kb. 24 százalékát teszi ki, Dél-Európában ez az arány a 80 százalékot is elérheti. Az arid és szemi-arid területeken (Dél-Franciaország, Görögország, Olaszország, Portugália, Ciprus és Spanyolország) a víz korlátozott mennyiségben áll rendelkezésre, így elengedhetetlen a hatékony, víztakarékos öntözés (EEA, 2009).

A jövőbeni elszivatagosodás veszélye a Földközi-tenger térségében a legmagasabb. A hosszú ideig tartó aszályos időszakok következtében számolni kell az erdőtüzek növekedésével, nő a mezőgazdaság vízfelhasználása, a terméseredményekben jelentős csökkenés valószínűsíthető, a biodiverzitás csökkenésének kockázata is várhatóan növekszik (EEA, 2012).

Magyarországi folyamatok

Éghajlati tényezők alakulása 1900–2010 között

Az átlaghőmérséklet 1901–2016 között 1,10 °C-kal emelkedett Magyarországon, azonban az elmúlt 35 évben intenzívebbé vált az átlaghőmérséklet növekedése, 1981 és 2016 között elérte az 1,62 °C-ot. A nyári átlagos hőmérsékleti érték ennél is nagyobb mértékben, 1,97 °C-kal növekedett (Országos Meteorológiai Szolgálat, 2018).

A Pálfai-index változása alapján megnövekedett a közepes vagy annál súlyosabb aszályos időszakok száma, ami az ezredfordulótól egyre több problémát okoz a szántóföldi növénytermesztésben (Somlyódy *et al.*, 2010). Az utóbbi háromszáz év meteorológiai eseményeit figyelemmel kísérve a növénytermesztés közvetlenül érintett az aszályok alakulását és azok megnövekedett gyakoriságát vizsgálva. Az elmúlt évtizedek közül az 1983–2009-es évek tekinthetők a legaszályosabbnak, ebben az időszakban 30 százalékkal gyakrabban fordultak elő rendkívül súlyos aszályok (Pálfai, 2010). Az aszály mellett az árvizek is érinthetik a mezőgazdasági területek termelését; megközelítőleg 1,8 millió hektár terület van veszélyeztetett besorolás alatt, melynek 60 százaléka szántó. Ötéves gyakorisággal ez mintegy 150 ezer hektár elöntött területet jelenthet (Bozán *et al.*, 2015).

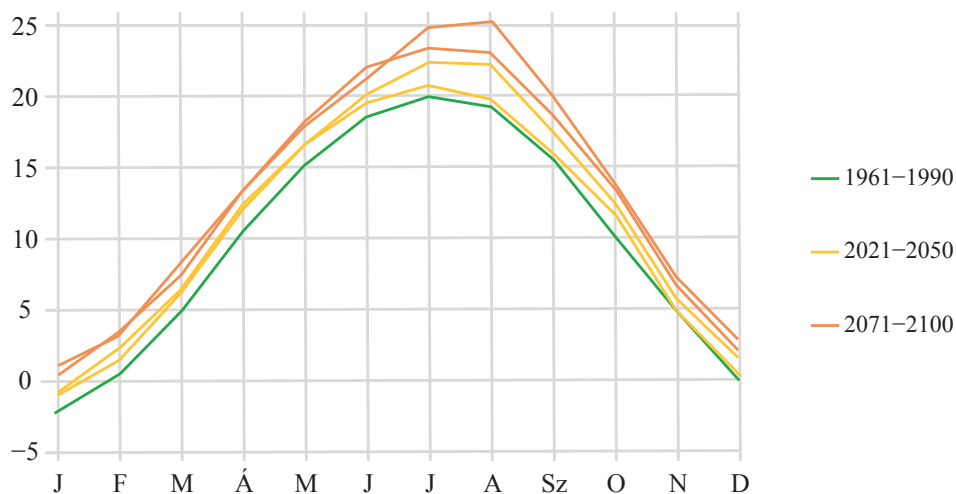
Hazánkban az 1900–2005 közötti időszakban egyre gyakrabban jelentkeztek szélsőséges árvizek, melyek gyakorisága 1970–1989 között mintegy kétszerese a teljes vizsgált időszakban tapasztaltaknak. A Duna és Tisza, a mellékfolyók és a kisvízfolyások árvizei egyaránt okoztak károkat a mezőgazdasági termelőknek az utóbbi évek során, melyek gyakorisága és volumene aggodalomra inthet. Az okok nem kizárólag meteorológiai jellegűek, ennek hátterében a területhasználásban bekövetkezett változások (erdőterületek csökkenése, burkolt felületek növelése), a meder levezető képességének romlása, valamint a meder és a műszaki létesítmények nem megfelelő állapota áll (Somlyódy *et al.*, 2010).

Országos szinten a tél végi és tavasz eleji, nagy területeken megjelenő belvizek szintén érintik a mezőgazdasági termelést, melyek nem csupán hidrológiai eredetűek, az okok jellemzően a belvizek rendszer állapotától és üzemeltetéséből erednek (Somlyódy *et al.*, 2010).

Éghajlati forgatókönyvek 2010–2100 között

A klímaváltozás magyarországi modellezésével foglalkozó hazai szakmai műhelyek a meteorológiai bizonytalanságok miatt – más európai kutatóintézetekhez hasonlóan – több modellel és azok eredményeivel adnak projekciókat. Ezek a REMO (Szépszó *et al.*, 2014; Németh *et al.*, 2009), az ALADIN (Szépszó *et al.*, 2015), a RegCM (Bartholy *et al.*, 2011; Szépszó *et al.*, 2015) és a PRECIS (Bartholy *et al.*, 2011) modellek leképezéséből születtek. A szimulációkat 10–25 km-es adatok alapján végezték, melyek eredményeképpen a napi maximum-hőmérsékletek előrejelzései modellenként akár 2,5 °C eltérést is mutathatnak.

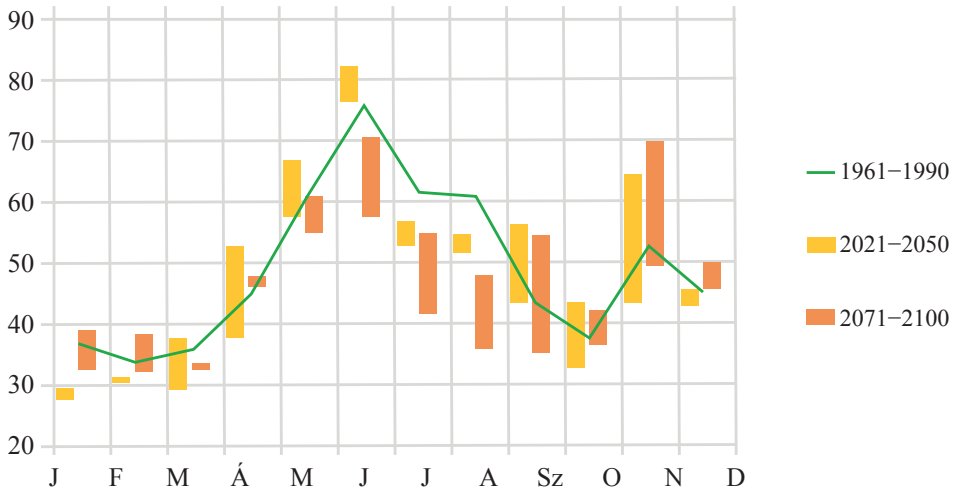
3. ábra: **Magyarországi havi átlaghőmérséklet ALADIN és RegCM modellfuttatások átlaga alapján, °C**



Forrás: Sábitz *et al.*, 2015

A csapadék eloszlásában és a változás irányában jelentősen eltérnek a modellek, így évszakonként eltérő irányú változásra számíthatunk, melyek előrejelzése nagyobb bizonytalansággal jellemezhető (Hoyk, 2015; Sábitz *et al.*, 2015). A hosszú idősoros tényadatok valamint az ALADIN- és RegCM-modellfuttatások alapján kapott előrejelzések eredményeit a 2021–2050 és 2071–2100 közötti időszakra a 3. és 4. ábra szemlélteti.

4. ábra: Magyarországi havi csapadékmennyiség az ALADIN- és RegCM-modellfuttatások átlaga alapján, mm



Forrás: Szépszó *et al.*, 2015

A klímaváltozás szempontjából a várható hőmérséklet és csapadék előrejelzése mellett jóval fontosabb kérdés az extrém események megjelenése (hőhullámok, forró napok, heves esőzések, zivatarok, aszály, villámárvizek, erősödő szelek stb.). A száraz nyarak várható alakulását vizsgálták Magyarországon 2100-ig az Országos Meteorológiai Szolgálat adatait felhasználva 50*50 km-es rácsfelbontásban az A1B, B1 és A2 klímaszenáriókra alpozva, az 1960–1990-es periódus értékeit alapul véve. A kutatók a RegCM futtatása során arra a következtetésre jutottak, hogy a száraz nyarak hőmérsékletének további emelkedése várható: a 2001–2050 közötti időszakban B1-forgatókönyv alapján 1 °C emelkedés várható, az A1B-forgatókönyvvel számolva 0,5 °C-os hőmérséklet-növekedés fog bekövetkezni, míg az A2-szenárió szerint a növekedés meghaladja az 1 °C-ot. A 2050–2100 közötti időszakra vonatkozó előrejelzések szerint az alkalmazott szenáriók további melegeledést és szárazodást jeleznek előre, amely a bázisévhez képest akár a 3,5 °C-ot is elérheti (Németh *et al.*, 2009).

Várható klimatikus tendenciák és azok mezőgazdasági hatása

A kontinentális éghajlatú területeken a hőmérséklet-növekedés, a kevesebb csapadék és az erősebb szelek sivatagosodáshoz vezethetnek. Az Amerikai Egyesült Államokban működő Országos Atmoszféra Kutató Központ (*National Center for Atmospheric Research*, NCAR) 2010-es projekciói hosszabb távon ennél erőteljesebb változásokat jósolnak, a század végére már Magyarország is a szárazságok által veszélyeztetett területekhez tartozik.

A klímaváltozás hatására gyakoribbá váló intenzívebb esőzések okozta folyóáradások a közép-európai folyók vízgyűjtő területein is erős talajerózióhoz vagy akár domborzati átalakuláshoz is vezethetnek (Starkel, 2005).

A klímamodellek projekcióinak közös megállapítása, hogy az éghajlatváltozás folytatódik, olyan események bekövetkezésével, mint a maximum- és minimum-hőmérsékleti átlagok növekedése, a nyári hónapok intenzívebb felmelegedése, a hőhullámos napok számának és gyakoriságának emelkedése, valamint a csapadékos és csapadék nélküli időszakok szélsőséges változása (arid és humid állapotokat előidézve). A tényadatokon alapuló múltbeli meteorológiai megfigyelések, valamint a modellprojekciók alapján 2–4 °C átlaghőmérséklet-növekedéssel, változó csapadékkal és extrém ese-

ményekkel számolhatunk, amelyek jelentős mértékben változtathatják meg a hazai agroökológiai feltételeket. A klímaváltozás hatására megjelenő szélsőségek közvetlenül befolyásolják a növény-termesztést. A klímaövek eltolódása egyes gazdasági növények hozamait negatívan érinti, míg más növények, mint a kukorica kismértékű melegedést képesek tolerálni vagy akár hozamnövekedést elérni (Erdélyi *et al.*, 2006).

A fenológiai fázisok eltolódása a virágzás és a termésérés fázisait negatívan befolyásolja (Terbe, 2015; Soltész *et al.*, 2011). A gyümölcsstermő növények virágzásának kezdeti időpontja és a klimatikus tényezők között szignifikáns kapcsolat mutatható ki (Lakatos *et al.*, 2011). Ha a virágzást megelőző 30 nap átlagos nappali és éjszakai hőmérsékletének különbsége eltér, korábbi virágzási időponttal számolhatunk, jellemzően már a 95–105. nap között. Az évszázad csapadék jellege szintén változásokat idéz elő a virágzáskezdet alakulásában, a vízhiány és -többlet egyaránt eltolja a virágzáskezdet bekövetkezésének időpontját. A legfontosabb hazai gabonák fenofázisának alakulását az MTA Talajtani Kutatóintézetben CERES-alapokon kifejlesztett 4M modellel vizsgálták (Fodor, 2002). Az 1960–1990 közötti modelladatokból megfigyelhető a vegetációs időszak jelentős változása a búza és a kukorica esetében, ami 8 nappal rövidült és így hamarabb van a betakarítás időpontja (Erdélyi *et al.*, 2007). 2050-re a vegetációs periódus akár 12-17 nappal is meghosszabbodhat, amely kedvező lehet a melegigényes fajok számára (Gaál, 2008). A fenológiai szakaszok szerkezeti átalakulása egyes növényeknél a megnövekedett szén-dioxid-szint függvényében is leírható, a megfigyelések alapján a C3 fotoszintézisű növények érzékenysége magasabb a C4 növényekkel¹ szemben (Anda és Dióssy, 2010).

A negatív hatások között a megporzási, termékenyülési és terméskötődési problémák is megjelennek. Magyarországon a terméskötődési problémák az egyes zöldség- és gyümölcsfajok esetében számottevőek, ami közvetlen kiváltója a meleget kevésbé tűrő zöldségfajok termésromlásának, ami a meglévő fajok termesztési területeinek eltolódását eredményezheti.

Az éghajlatváltozás hatására tápanyagfelvételi nehézségek, tápelemhiányok és kondícióromlás következhet be. Az Újfehértói Gyümölcsstermesztési Kutató és Szaktanácsadó Nonprofit Közhasznú Kft. 2002-es telepítésű bioalma-ültetvényben végzett vizsgálatában megállapították, hogy a 2008–2010-es időszak csapadékos időjárása rontotta a talaj tápanyag-szolgáltató képességét és a mobilis tápelemek kimosódását eredményezte (Nagy *et al.*, 2011). Hosszú idősoros vizsgálatokkal megállapították, hogy a fő gabonacsoportok a változó klíma mellett eltérő hozamokat produkálnak. Többváltozós lineáris regressziós modellezéssel kimutatták, hogy az aktuális csapadékelátottság dönti el a termésingadozások nagyságát, így a kukoricahozamok függősége a talaj tápanyag-szolgáltató képességétől nagyobb, mint a harmincéves éghajlati trendből következne (Makó *et al.*, 2009).

A termés fizikai érzékenysége a növényvédelmi költségek növekedését idézheti elő. A sugármérések adta eredmények alapján a termés fiziológiai és minőségi károsodása (napégés, húskenyység, cukortartalom, cukor/sav arány, vitamintartalom) az almaültetvényekben a megnövekedett globálsugárzás, a mikroklima- és a felszínhőmérséklet-változás eredményeképpen tapasztalható (Lakatos *et al.*, 2009). A minőségi károsodások legjellemzőbb megjelenési formája a napégés, mely kezdeti fázisban enyhe parásodást, elszíneződést és bőrszöveti sérülést eredményez (Racskó *et al.*, 2008).

A termésingadozások és termésbiztonsági kérdések esetében a hőmérsékleti átlagok megváltozása mellett az extrém események megjelenése tartósan is ronthatja a hozamok mennyiségét. A virágzaskor bekövetkező fagypont alatti hőmérsékletek okozta fagykár az adott év termésmennyiségének 100

¹ A C4-növények (sok egyszikű, különösen füvek és sások, de több mint 300 kétszikű faj, mezőgazdasági növények, mint a cukornád, a kukorica és a köles) erős fényen és magas hőmérsékleten gyorsabban fotoszintetizálnak és nagyobb biomasszát termelnek, mint a C3-növények. Utóbbi növényeknél fényen 2-3-szor nagyobb lehet a légzés, így a fotoszintézissel egyidejűleg folyó fénylégzéssel a C3-növények a megkötött szén-dioxiddal 1/4-ét, 1/3-át elvesztik. A normál sötétlégzés a citoszólban és a mitokondriumban megy végbe. A fotorespirációban a kloroplasztisz, a peroxiszómák és a mitokondriumok vesznek részt. A C4-növények éppen azért hatékonyabbak a C3-növényeknél, mert nincs bennük mérhető fotorespiráció.

százalékát is károsíthatja, ugyanakkor a kisebb mértékű fagyhatás eltolhatja a vegetatív-generatív fenofázisok egyensúlyát is, ennek következtében a következő ciklus hozama is érintett (Nagy *et al.*, 2009). A 4M modellvizsgálatokkal 2050-ig végzett előrejelzés során a klímaszcenáriók függvényében eltérő eredmények születtek: az ALADIN-Climate modell időjárási szcenáriója esetén a 2020–2050 közötti időszak átlagában a búzahozamok 5,5 tonnára emelkedtek, míg a kukoricahozamok 3,2 tonnára estek. A RACMO modell esetében a búzahozamok 2,8 tonnára, míg a kukoricahozamok 4 tonnára estek. A REMO modell esetében a búzahozamok 3,2 tonnára estek, míg a kukoricahozamok 6,6 tonnára emelkedtek. Mindhárom időjárási modell esetében eltérő hozameredmények jelentkeztek, vagyis a különböző időjárási feltételek alapvetően meghatározzák a várható hozamokat, ezért a búza és a kukorica esetében a jövőben jelentős hozameltérések adódhatnak attól függően, hogy az időjárási forgatókönyvek melyik verziója következik be (Kemény *et al.*, 2015; Fogarasi *et al.*, 2016).

A klímaváltozás elleni küzdelem és alkalmazkodás

Világ és EU

Az ENSZ Éghajlatváltozási Keretegyezményét (UNFCCC²) az 1992 júniusában Rio de Janeiroban tartott konferencián („Föld-csúcs”) fogadták el. A keretegyezmény lehetővé teszi, hogy az országok egymással együttműködve mérsékeljék a globális hőmérséklet-emelkedést és kezeljék az éghajlatváltozás kedvezőtlen hatásait. Ezen egyezmény kiegészítő jegyzőkönyve a kiotói jegyzőkönyv³, amelyet 1997. december 11-én az UNFCCC-tagállamok harmadik konferenciáján, Kiotóban fogadtak el és nyitottak meg ratifikálásra (UN, 1998). A katarai Dohában 2012-ben tartott konferencián (UNFCCC COP 18) megállapodtak abban, hogy a 2012-es év végén lejáró Kiotói jegyzőkönyv érvényét meghosszabbítják 2020-ig.

A keretegyezményben részt vevő 195 ország 2015-ben (UNFCCC COP 21) egyezett meg a Párizsi megállapodás szövegében. Ebben az aláíró államok vállalták, hogy 2100-ig a globális átlaghőmérséklet emelkedését 2 °C alatt tartják, egyúttal arra törekedve, hogy a hőmérséklet-emelkedés 1,5 °C-os mértékre korlátozódjon, felismerve, hogy ez jelentősen csökkentené az éghajlatváltozás kockázatait és hatásait. A Párizsi megállapodás végrehajtását és annak eredményeit 2023-tól kezdődően évente vizsgálják felül a megállapodásban részes felek konferenciáján (COP). Az egyezményben részt vevő fejlett országok vállalták, hogy pénzügyi forrásokkal támogatják a fejlődő országokat a kibocsátáscsökkentésben és az alkalmazkodásban, folytatva a keretegyezményben meghatározott kötelezettségeik teljesítését.

Az EU kibocsátáscsökkentési erőfeszítései eszközrendszerének kialakításában nyújt segítséget a 2000-ben indított Európai Éghajlatváltozási Program, amelynek fő feladata megfelelő stratégia kidolgozása a Kiotói jegyzőkönyv célkitűzéseinek eléréséhez. E program eredményeként vezették be 2005-ben az uniós emissziókereskedelmi rendszert. Az Európai Unió kibocsátáskereskedelmi rendszere (EU ETS) az éghajlatváltozás elleni küzdelem uniós szakpolitikájának alapvető pillére. E rendszer célja, hogy elősegítse az üvegházhatású gázok kibocsátásának költséghatékony, illetve gazdaságilag hatékony módon történő csökkentését. A rendszer az Európai Unió energiaügyi és éghajlatváltozási csomagjának egyik fő összetevője⁴, amely csomag három 2020-ig elérendő célja (ún. „20/20/20-as célok”):

- az üvegházhatású gázok kibocsátásának 20 százalékos csökkentése az 1990-es szinthez képest;
- a megújuló energiaforrásokból származó energiafogyasztás részesedésének 20 százalékra történő növelése;
- az energiahatékonyság 20 százalékos javulása az unióban.

Az EU ETS a világ legnagyobb fix összkvótás (*cap-and-trade*)⁵ kereskedési rendszere az üvegházhatású gázok (ÜHG) kibocsátása terén. A plafon maximalizálja a több mint 11 ezer energiaigényes uniós létesítmény kibocsátását.⁶ 2013 óta az EU ETS az uniós üvegházhatású gázkibocsátás kb. 50 százalékára terjed ki.⁷ Az EU ETS rendszere amellett, hogy kellően magas szén-dioxid-

² United Nations Framework Convention on Climate Change.

³ A Kiotói jegyzőkönyv hat üvegházhatást okozó gáz kibocsátása ellen lép fel: szén-dioxid (CO₂); metán (CH₄); nitrogén-oxid (N₂O); fluorozott szénhidrogének (HFC-k); perfluor-karbonok (PFC-k); kén-hexafluorid (SF₆).

⁴ COM(2008) 30 végleges, 2008.01.23., „2020-ra 20-20% – Az éghajlatváltozásból származó lehetőségek Európa számára”.

⁵ Az EU ETS rendszerét a 2003/87/EK irányelv hozta létre. A fix összkvótás kereskedési rendszer úgy működik, hogy a nagy kibocsátású ipari ágazatok összkibocsátására vonatkozóan felső határértéket, azaz plafont állapítanak meg. Ez a plafon folyamatosan csökken. E felső határértékben belül a vállalatok szükség szerint kereskedhetnek a kibocsátási egységekkel. Egy kibocsátási egység egy tonna széndioxiddal egyenértékű gáz kibocsátására jogosít fel. A kibocsátási egységek összege meghatározza az engedélyezett kibocsátások összegét, a kibocsátás tehát maximalizált. A kibocsátási egységek a létesítmények között kerülnek szétosztásra, és azokkal szabadon lehet kereskedni a piacon. A létesítményeknek minden évben át kell adniuk annyi kibocsátási egységet, amennyi megfelel az adott évben kibocsátott széndioxid egyenérték összegének. Az árat a piac határozza meg.

⁶ Az alábbi fő ágazatokat érinti: tüzeléstechnikai berendezések, cement-, klinker-, mészgyártás, ásványolajfinomítás, nyersvas- és acélművek. A szárazföldi közlekedés, a mezőgazdaság, illetve a szolgáltatás nem szerepel az érintett ágazatok között.

⁷ COM(2012) 652 végleges, 2012.11.14., „Az európai széndioxidpiac helyzete 2012-ben”.

kibocsátási ár révén behatárolja az összkibocsátást, a létesítményeket elvben a legköltséghatékonyabb kibocsátáscsökkentési intézkedések alkalmazására ösztönzi, továbbá előmozdítja az alacsony szén-dioxid-kibocsátású technológiákba való beruházásokat.

Az EU ETS működése kereskedési időszakok, illetve szakaszok szerint történik: az első két szakaszban (2005–2007; 2008–2012) a kibocsátási egységek felső határértékét tagállami szinten, a tagállamok által létrehozott és a Bizottság által értékelt nemzeti kiosztási tervek (NAP) szerint határozták meg. A harmadik szakaszra (2013–2020) bevezették a nemzeti kiosztási tervek új rendszerét. Az EU ETS keretébe tartozó létesítményekre vonatkozó kibocsátási plafonértékeket jelenleg már uniós szinten határozzák meg (ECA, 2015). A 2004 óta csatlakozott tagállamokra – a Kiotói jegyzőkönyv keretében – természetesen nem a közös, 8 százalékos uniós vállalás, hanem az általuk 1997-ben önállóan vállalt kibocsátáscsökkentési célok vonatkoznak.

A Bizottság 2014. január 22-én nyújtotta be a 2030-ig szóló éghajlat- és energiapolitikai keretről szóló közleményét, amely meghatározza az éghajlat- és energiapolitikai keretet a 2020–2030-as időszakra.⁸ A 2030-ig szóló keret új célokat és intézkedéseket tartalmaz, amelyek arra irányulnak, hogy az EU gazdasága és energiaellátási rendszere versenyképesebbé, biztonságosabbá és fenntarthatóbbá váljon. A keret célértékeket állapít meg az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésére és a megújuló energiaforrások fokozottabb igénybevételére, valamint új irányítási keretrendszerre és teljesítménymutatók alkalmazására tesz javaslatot.

A keretben az Európai Tanács jóváhagyta⁹ azt a kötelező célkitűzést, amely szerint 2030-ra az 1990-es szinthez képest legalább 40 százalékkal csökkenteni kell az üvegházhatást okozó gázok kibocsátását az unióban. Ennek érdekében a célkitűzést az EU egésze a lehető legköltséghatékonyabb módon fogja megvalósítani, oly módon, hogy a 2005-ös szinthez képest 2030-ra az uniós kibocsátáskereskedelmi rendszerbe tartozó ágazatok 43 százalékos, az azon kívüli ágazatok pedig 30 százalékos csökkentést fognak elérni. Az unió célkitűzése az, hogy 2030-ra a területén felhasznált energia legalább 27 százaléka megújuló energiaforrásokból származzon. A cél elérésének legfontosabb európai eszköze egy jól működő, megújított uniós kibocsátáskereskedelmi rendszer (ETS) és egy a piacot a Bizottság javaslata alapján stabilizáló eszköz lesz; a maximális megengedett kibocsátásokra vonatkozó felső határérték csökkentésének éves szorzója 1,74 százalékról 2,2 százalékra változik 2021-től kezdődően.

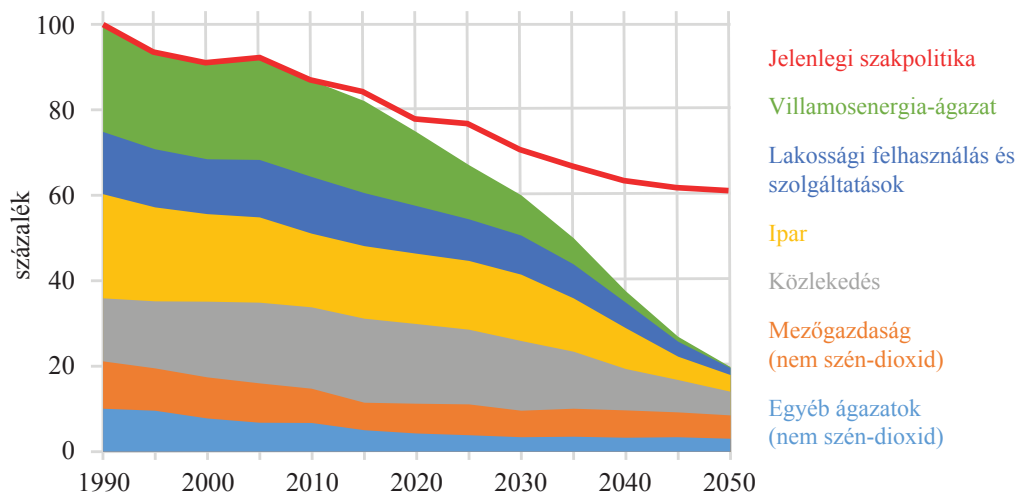
A 2050-ig szóló megvalósítási ütemterv¹⁰ alapján az alacsony szén-dioxid-kibocsátású, versenyképes gazdaság megvalósítása érdekében az EU-nak fel kell készülnie arra, hogy 2050-ig az 1990-es szintekhez képest 80 százalékkal csökkentse az unió kibocsátását. Az egyes forgatókönyvek áttekintéséből az derül ki, hogy a legnagyobb költséghatékonyaságot az a megoldás biztosítaná, ha az 1990-es szinthez képest 2030-ra 40 százalékos, 2040-re pedig 60 százalékos csökkenés valósulna meg. A forgatókönyvek 2020-ra 25 százalékos csökkenéssel számolnak (5. ábra).

⁸ COM(2014) 15 final/2, 28.01.2014, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, A policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030.

⁹ EUCO 169/14 2014.10.14., Európai Tanács (2014. október 23–24.) – Következtetések.

¹⁰ COM(2011) 112 végleges 2001.03.08. Az alacsony szén-dioxid-kibocsátású, versenyképes gazdaság 2050-ig történő megvalósításának ütemterve.

5. ábra: Az üvegházhatást okozó gázok kibocsátásának alakulása az EU-ban a 80 százalékos mérséklési cél irányába (1990 = 100%)



Forrás: Európai Bizottság

A Bizottság a kulcsfontosságú ágazatokban várható fejleményeket is megvizsgálta. Az elemzés számos különböző forgatókönyvet vázolt fel, amelyek a technológiai innováció tekintetében eltérő sebességgel, a fosszilis tüzelőanyagok esetében pedig eltérő árakkal számoltak. A különböző forgatókönyvek meglehetősen egységes eredményre jutottak a tekintetben, hogy 2030-ig és 2050-ig milyen mértékű csökkentésekre van szükség az egyes ágazatokban (1. táblázat).

1. táblázat: **Kibocsátáscsökkenés ágazatonként**

százalék

Az ÜHG-kibocsátás csökkenése az 1990-es szinthez képest	2005	2030	2050
Összesen	-7	-40 és -44 között	-79 és -82 között
Ágazatok			
Villamos energia (CO ₂)	-7	-54 és -68 között	-93 és -99 között
Ipar (CO ₂)	-20	-34 és -40 között	-83 és -87 között
Közlekedés (a légi közlekedésből származó CO ₂ -kibocsátást beleértve, a tengeri közlekedésből származót azonban nem)	+30	+20 és -9 között	-54 és -67 között
Lakossági fogyasztás és szolgáltatások (CO ₂)	-12	-37 és -53 között	-88 és -91 között
Mezőgazdaság (a CO ₂ -kibocsátástól eltérő kibocsátások)	-20	-36 és -37 között	-42 és -49 között
Egyéb, a CO ₂ -kibocsátástól eltérő kibocsátások	-30	-72 és -73 között	-70 és -78 között

Forrás: Európai Bizottság

A Bizottság elemzése alapján 2050-re a mezőgazdaságból származó, a szén-dioxid-kibocsátástól eltérő kibocsátások 42-49 százalékkal kerülhetnek az 1990-es szint alá. Az ágazatban már eddig is komoly csökkentést sikerült megvalósítani, és a következő két évtizedben további kibocsátásmérséklődés érhető el. A Föld népessége, ezáltal a mezőgazdasági termelés növekedése miatt 2030 után a mezőgazdaságból származó kibocsátások csökkenése lelassulhat. Fontos azonban

megjegyezni, hogy 2050-re a mezőgazdaság az EU összkibocsátásának várhatóan egyharmadát teszi ki, vagyis a részesedése a jelenlegihez képest háromszorosa lesz. Éghajlatpolitikai szempontból tehát az ágazat jelentősége nőni fog: ha nem sikerül megvalósítani az előre jelzett kibocsátáscsökkentést, akkor más ágazatoknak kell nagyobb csökkentést végrehajtaniuk, ez pedig jelentős költségeket vonhat maga után. Mivel a mezőgazdaság bizonyos mértékig szintén ki van téve a kibocsátásáthelyezés kockázatának, fontos, hogy a termelési és kereskedelmi minták változásai hosszú távon ne ássák alá a globális kibocsátáscsökkentést. Az alacsony üvegházhatású gázkibocsátású gazdaság megvalósításához jelentős és folyamatos beruházásokra van szükség: az elkövetkezendő 40 év során a köz- és magánberuházások a számítások szerint évente mintegy 270 milliárd EUR-val nőnek.

Magyarország

Magyarország a klímaváltozás elleni küzdelem jegyében csatlakozott a nemzetközi kezdeményezésekhez, így az ENSZ Éghajlatváltozási Keretegyezményét az 1995. évi LXXXII. törvény, a Kiotói jegyzőkönyvet pedig az 2007. évi IV. törvény hirdette ki. Emellett az EU- csatlakozás után Magyarország részesévé vált az Európai Unió kibocsátáskereskedelmi rendszerének (EU ETS).

Magyarország több nemzeti programot is indított, amelyek fő célja a klímaváltozás hatásainak elemzése, a globális klímaváltozás és annak meteorológiai, társadalmi és mezőgazdasági vonatkozásokban bekövetkező várható hatásainak modellezése volt. E projektek (VAHAVA, Agrárklíma, Klímahatás, NATÉR/Agratér) javaslatokat fogalmaztak meg és összegezték az előttünk álló feladatokat a közös nemzeti alkalmazkodási stratégia kialakításában.

A VAHAVA (Változás – Hatás – Válaszadás) projekt Láng István akadémikus koordinálásával a 2003–2006-os időszakban áttörést eredményezett a hazai klímaváltozással összefüggő kutatások terén (Jolánkai *et al.*, 2007). A program öt ajánlást fogalmazott meg (2. táblázat) a hazai alkalmazkodás elősegítése céljából (Harnos Zs., 2007).

2. táblázat: VAHAVA-ajánlások és politikai lépések

Ajánlások	Lépések
1. Klímapolitika kidolgozása	Klíma- és adaptációs forgatókönyvek NAK MFGI Nemzeti Alkalmazkodási Központ, Magyar Földtani és Geofizikai Intézet (http://nak.mfgi.hu/)
2. Nemzeti Éghajlat-változási Stratégia megalkotása	NÉS-2 – Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia ÉCsT – Éghajlatváltozási Cselekvési Terv NATÉR – Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszer TEREK – Természeti Erőforrás Kataszter VKI – Víz Keretirányelv Árvíz Irányelv Közlemény az aszályról
3. Kárenyhítő állami pénzalapok, biztosítási rendszerek fejlesztése	MKR – Komplex Mezőgazdasági Kockázatkezelési Rendszer EKOP-1.1.12-2012-2013-0001
4. Lakosság képzése, oktatás, adaptációs szaktanácsadás	„AGRO-21” Füzetek „KLÍMA-21” Füzetek
5. Időjárás- és éghajlatkutatás támogatása	VAHAVA Program folytatása a 2007–2011 közötti időszakban Agrárklíma projekt Klímahatás projekt Partnerség az Éghajlatért Szemléletformálási Terv

Forrás: VAHAVA-ajánlások alapján saját szerkesztés

A program folytatása a VAHAVA Hálózat keretében történt, és 2007–2011 között négy projektet támogattak (Harnos Zs., 2007): felkészülés a klímaváltozásra (KLIMAKKT), a klímaváltozás hatása

a biodiverzitásra, valamint a humán és állategészségügyre (MTA-BCE kutatócsoport), a klímaváltozások társadalmi vonatkozásai (MTA-KSZI-Klímavédelmi Kutatások Koordinációs Iroda) és EU-6 keretprogramban Adaptációs és Mitigációs Stratégiák (*Adaptation and Mitigation Strategies*, ADAM).

Az AGRÁRKLÍMA projekt egy komplex alap kutatás a klímaváltozási tendenciák agrárprodukcióna gyakorolt hatásának előrejelzésére a 2014–2018 közötti időszakban. A projekt fő célja egy döntéstámogatói szakértői rendszer (DTR) kiépítése (Czímber *et al.*, 2015). A DTR képes geostatistikai vizsgálatokra, növényfajonként vagy különféle csoportokban a környezeti paraméterek térbeli összefüggéseinek vizsgálatára, valamint a növényjellemzők térbeli előfordulásának feltérképezésére a változó klímamutatók függvényében. Ennek keretében megvalósuló részprogramok: országos döntéstámogatói rendszer létrehozása, az erdő- és vadgazdálkodás feltételeinek változása és alkalmazkodási technológiák, a természeti erőforrások, ökoszisztémák ökológiai szolgáltatásai fenntartásának kilátásai, a mezőgazdasági technológiák szerepe a klímaváltozásból eredő kihívások megoldásában.

Az AGRÁRKLÍMA projekt javaslatai – a megfogalmazott adaptációs folyamatok és intézkedések mentén – a fenntartható agroökológiai gazdálkodás végrehajtására hívja fel a figyelmet. A program a következő lépésekre épül (Neményi, 2015): szén-dioxid-semleges termesztési technológiák alkalmazása; tápanyag-utánpótlás és a növénytermesztés lépéseinek tervezése a környezetszennyező hatások kiküszöbölése mellett; a felszín alatti, valamint a felszíni vizek nitrifikációjának és eutrofizációjának elkerülése (az erózió által); a talaj- és levegőszennyezés megelőzése, valamint a természetes és az agrárökológiai rendszerek közötti gradiens fenntartása a termőhely potenciáljának kihasználása érdekében. Ennek eredményeképpen a DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*¹¹) modellt alkalmazták a regionális klímamodellekkel összhangban a növénytermesztés modellezésére.

A KLÍMAHATÁS elnevezésű (CLIMATE IMPACTS – *Complex assessment of climate change impacts - preparing international R&D projects in the University of West Hungary*), Neményi Miklós és Nyéki Anikó által vezetett projekt célja az EU célkitűzéseivel összhangban vizsgálni azokat az éghajlatváltozásból eredő hatásokat, melyek a természetes és a mezőgazdasági ökoszisztémákat érintik. A klímaváltozás hatásai a mezőgazdaságban című műhelyvita (2015. szeptember 24-én) alkalmával bemutatott kutatási eredmények a mezőgazdaságban bekövetkező változásokat vizsgálják (Gálos *et al.*, 2015). Fő célkitűzések a talajok sérülékenységeinek feltérképezése (Mátyás, 2015), a növénytermesztés hatékonysága kockázatkezelési lehetőségeinek elemzése (Neményi, 2015), érzékenységi vizsgálatok eredményeinek vizsgálata a kukoricatermelésben (Nyéki *et al.*, 2015), valamint a legelők állattartó képességének lehetőségei a változó klímahatások értékelése mellett (Szabó *et al.*, 2015).

A klímaváltozás agrárszektorra gyakorolt hatásainak vizsgálata keretében alapvető igényként jelenik meg a vízmérleg (talajnedvesség és párolgási érték) meghatározása, amelyet az AGRÁRKLÍMA projekt keretében Zala megyére vetítve vizsgáltak (Csáfordi és Gribovszki, 2015). A talajban bekövetkező kölcsönhatások értékelésekor, a talajerózió előrejelzésére az Általános Talajvesztési Egyenlet (*Universal Soil Loss Equation*, USLE) szolgál, melyet az AGRÁRKLÍMA projekt adatait felhasználva vizsgáltak. A talajhasználati minták technológiai szempontból való vizsgálata aktuális kérdés a talajművelési rendszerek adaptációs lehetőségeinek klímaváltozás indukálta vizsgálatokor.

A Klímahatás program keretében a mezőgazdasági termelés értékelésekor a szántóföldi művelésben alkalmazott technológiák kibocsátási jellemzőit vizsgálták életcikluselemzéssel (*Life Cycle Assessment*, LCA). Az abiotikus kimerülés, a globális klímaváltozási potenciál és a tengervíz ökotoxikus (*Marine Aquatic Ecotoxicity*) tényezői változóinak becslése komplex képet ad a kukorica és búza kibocsátási folyamatairól (Polgár és Pécsinger, 2015).

¹¹ Döntéstámogató rendszer az agrotechnológia átalakulása érdekében.

A klímaváltozás hatása a búzára és a kukoricára

A klímaváltozás hatásának modellezése már annak kezdetétől együtt járt a globális élelmezésben fontos szerepet betöltő növényekre vonatkozó potenciális hatások vizsgálatával, és alapvető igényként jelent meg a globális klímamodellek és az emissziós forgatókönyvek bizonytalanságának tisztázása (Tao *et al.*, 2008).

Ezen vizsgálatokhoz a korábban a hozambecslésekhez használt növényélettani modelleket használták fel a főbb kutatóintézetek. A növényélettani, vagy más néven biofizikai modellek az ökológiai tényezők felhasználásával adnak előrejelzést a termesztett növények növekedési folyamatai, a klimatikus feltételek, a talajadottságok, valamint a gazdálkodási gyakorlatok közötti összefüggésekre. E modellek kifejlesztése az 1970-es években kezdődött, alapvetően laboratóriumi és kísérleti parcellás körülmények között. Legismertebb változatai a CERES (Jones és Kiniry, 1986), a WOFOST (Diepen *et al.*, 1989), az EPIC (*Erosion Productivity Impact Calculator*, Williams, 1990), a DAISY (Abrahamsen és Hansen, 2000), a DSSAT (Jones *et al.*, 2003), a CROPSYST (*Cropping Systems Simulation Model*, Stöckle *et al.*, 2003; Donatelli *et al.*, 2012) és az APES (*Agricultural Production and Externalities Simulator*, Donatelli *et al.*, 2010), és ide tartozik a CERES alapján, de a magyar agrotechnikai és környezeti feltételekhez igazított, számos részterületen részletesebben kidolgozott 4M (Fodor *et al.*, 2002; Fodor, 2006). Annak ellenére, hogy rendkívül sokféle alkalmazás és modell került kifejlesztésre, különbözőségüket főként az egyes vizsgált részterületekre vonatkozó szélesebb vizsgálati fókusz, nagyobb bevitt adatmennyiség, illetve a többféle növény együttes kezelése adja, a modellek működési elvei – a növény növekedésének leképezése a napi szintű környezeti feltételek és emberi tevékenység nyomán – nem változtak.

E hozambecslő modellek bemeneti változóiként a klímaszcenáriók eredményeként előállt, 2050-ig, illetve 2100-ig futó meteorológiai becsléseket használták fel, azt vizsgálva, hogy a klimatikus viszonyok változása, a változó csapadék és hőmérséklet, a szén-dioxid-szint növekedése milyen hatást gyakorol az említett növényekre.

A tanulmány a továbbiakban az őszi búza és a kukorica esetében tekinti át a klímaváltozás hatásait vizsgáló, növényélettani modelleken alapuló főbb publikációkat.

A szakirodalmi feldolgozásban felhasznált összes biofizikai modell sajátossága, hogy az időjárási adatokon kívül rendkívül érzékeny a peremfeltételekre, vagyis kritikus a figyelembe vett talajtípus, az egyes agrotechnológiai elemek ideje, a felhasznált inputok mennyisége, valamint érzékeny a referencia-időszakban használt hozam- és inputanyag-mennyiségekre, illetve a vetési és betakarítási időpontokra. Ezért a növényélettani modell pontossága azon múlik, milyen mértékben sikerül pontos adatokkal feltölteni az adatrendszert.

Az elmúlt években publikált, különböző szakmai műhelyek modellfuttatásainak jellemzője, hogy vagy egy szűk területre – például kísérleti parcellára – vonatkoztatottan adnak meg részletes és pontos agrotechnológiai adatokat, ekkor azonban csökken vagy elvész a modell országos vagy regionális kiterjeszthetőségének lehetősége, hiszen egy kísérleti parcellán egészen más jellegű technológiával történik a termelés, mint a köztermesztésben.

A másik megoldási módot a modell inputadatigényének országos vagy regionális statisztikai adatokból való feltöltése jelenti. Ekkor ugyan bizonyos értelemben megvalósul az adatok regionális kiterjeszthetősége, azonban mivel egy megyei hozammal vagy átlagos nitrogénfelhasználással összekapcsolt terület nem jellemezhető jól megfelelő talajtani, illetve meteorológiai adatokkal azok jelentős heterogenitása, térbeli változékonysága miatt, így az eredmények akár igen jelentős mértékben torzulhatnak, ennek megfelelően egyes szakirodalmi eredményeket kellő óvatossággal, az inputadatok minőségére tekintettel kell kezelni.

Ezért vált gyakorlattá a több klímaszcenárió, illetve több növényélettani modell futtatásából származó adatok átlagolása, illetve fokozódott a törekvés a valós üzemi adatok felhasználására.

A klímaváltozás hatásai a búzatermelésben

A tavaszi vetésű növények sokkal érzékenyebbek az éghajlatváltozás káros hatásaira (pl. a szárazságra), mint az őszi vetésűek (Olesen *et al.*, 2011), ugyanakkor az éghajlatváltozás várhatóan befolyásolni fogja az őszi búza hozamát is. Emellett a klímaváltozás módosítani fogja a szántóföldi növények fenológiáját, amely a növekedési időszakok hosszabbodásában nyilvánul meg (Estrella *et al.*, 2007; Lobell és Field, 2007). Arról azonban bizonytalan információk állnak rendelkezésre, hogy ez terméshozam-növekedéshez vagy -csökkenéshez vezet-e.

Wilcox és Makowski (2014) 90 tanulmányból származó adatok alapján megállapította, hogy ha a középhőmérséklet-változás meghaladja a 2,3 °C-ot, vagy ha az átlagos csapadékmennyiség csökken, vagy ha a CO₂-koncentráció kevesebb mint 395 ppm, akkor a szimulált hozamváltozások több mint felénél hozamvesztés jelentkezik. Fodor *et al.* (2014) 30 százalékos búzatermés-csökkenést és a termésátlagok évek közötti nagyobb ingadozását prognosztizálták hazánk területére a 21. század végére

Alexandrov (1997) DSSAT modell segítségével kimutatta, hogy Bulgáriában az őszi búza hozama várhatóan csökkenni fog a hőmérséklet növekedése és a csapadék mennyiségének csökkenése miatt. A klímaváltozás káros következményeit a vetési időpontok módosításával és a fajták változtatásával, a műtrágya kijuttatásának helyes megválasztásával és mennyiségének módosításával, valamint az öntözés alkalmazásával lehetséges enyhíteni. Özdoğan (2011) a légköri CO₂-koncentráció és az éghajlatváltozás hatását vizsgálta az őszi búza hozamokra Észak-Törökországban a XXI. század végéig. A hozamok jelentős (5 és 35 százalékos) csökkenését tapasztalta az alkalmazott GCM-inputtól függően, ami a szemfejlődési fenofázis lerövidülésével hozható összefüggésbe. Challinor *et al.* (2014) becslése szerint a klímaváltozás – elsősorban a hőmérséklet-növekedés – hatására, adaptáció hiányában az őszi búza termésmennyisége mind a mérsékelt, mind a trópusi régiókban csökkenhet, míg a rendelkezésre álló alkalmazkodási lehetőségekkel akár 7-15 százalékos hozamnövekedés is elérhető. Az agrotechnikai tényezők közül gyakorlatilag valamennyi (vetésváltás, talajművelés, tápanyagellátás, vetés, növényvédelem, öntözés, betakarítás) külön-külön és együttesen, kölcsönhatásaikban is befolyásolják a növényi modell energia input/output arányát, hatékonyságát (Pepó, 2014).

Ezzel szemben Ghaffari *et al.* (2002) megállapította, hogy a CO₂-szint növekedésének hatására az őszi búza várható terméshozama növekedni fog az Egyesült Királyságban. A vetési időpontok és a különböző adagú N-műtrágyázás megválasztásával keresték az optimális alkalmazkodási stratégiát az eltérő klímaváltozási scenáriókra. A korai vetés (szeptember 10.) eredményezte a legjobb, a késői vetés (november 10.) pedig a legrosszabb terméshozamot, továbbá megállapították, hogy a CO₂ pozitív hatását fokozza az N-műtrágyázás, amellyel a vízhiány okozta káros hatások is mérsékelhetők. Mukhtar *et al.* (2017) öt növényi klímamoddellel (CropSyst, APSIM, DSSAT, STICS és EPIC) vizsgálta az őszi búza terméshozamának alakulását a 2000 és 2100 közötti időszakokra a csendes-óceáni térség északnyugati részén, az USA-ban. Megállapították, hogy mind a növényi biomassa, mind pedig a szemtermés mennyisége növekedni fog a jövőben, amely a növekvő CO₂-szinttel van összefüggésben. A légköri CO₂-koncentráció növekedése elsősorban a C3-as növények terméshozamát növeli és kisebb mértékben lesz pozitív hatással a C4-es növények termésére (Fuhrer, 2003; Kimball *et al.*, 2001), azonban a növekvő CO₂-hoz prognosztizált hozamra vonatkozó legfrissebb becslések szerényebbek, mint a korábbiak (Ainsworth és Long, 2005).

Sommer *et al.* (2013) előrejelzései alapján a klímaváltozás miatt bekövetkező hőmérséklet-emelkedés hatására lerövidül az őszi búza tenyészidőszaka, valamint nagyobb biomassa-akkumuláció és hozam várható Közép-Ázsiában. Dixit *et al.* (2018) is hasonló megállapításra jutott, az

őszi búza tenyészidőszakának lényeges lerövidülését és a közeljövőre (2010–2030) 5-12 százalékos, a 2040–2060 közötti időszakra 12-16 százalékos hozamnövekedést prognosztizált Jordániában. Harnos Zs. (2008) szerint ha a genetikai, illetve agrotechnikai fejlődés nem tudja kompenzálni a romló klimatikus feltételeket, akkor csökkenő hozamokkal kell számolni. A scenáriók által jelzett felmelegedés az egyes növények termesztési zónáját északabbra tolja, ami jelentős földhasználati módosulásokat válthat ki.

Erdélyi (2008) 4M modellel vizsgálta az őszi búza terméshozamának jövőbeli alakulását. A hozam 18,35 százalékkal való növekedése várható a jövőben, ugyanakkor növekszik a hozamok szórása is. Alkalmazkodási stratégiát keresve szimulációs kísérlet alapján megállapította, hogy a vetési idő előrehozása kínál lehetőséget a jövőben a nagyobb termés mennyiségek elérésére, a két héttel korábbi vetés a terméshozam átlagosan 5,75 százalékos növekedését eredményezheti. A hőmérséklet-növekedés következtében a növény fenológiai fázisai várhatóan előbbre tolnak, különösen a fejlődés korai szakaszában. Ennek következtében az érés időpontja átlagosan tízévente egy nappal korábban várható.

Dobor (2016), valamint Dobor *et al.* (2016) a FORESEE-adatbázisban szereplő 10 klímamodell-eredmény alapján futtatta a 4M modellt az 1986–2013 és a 2014–2100 közötti időszakokra búzára és kukoricára vonatkozóan. A 10 klímamodell alapján kapott eredmények átlagát tekintve a kukorica termés mennyiségének csökkenésére számíthatunk, melynek mértéke országos átlagban 0,15 tonna/hektár évtizedenként. A búza termésátlaga azonban várhatóan 0,07 tonna/hektárral növekszik évtizedenként. A modellek által adott szórás időbeli átlaga a jövőbeli időszakra nézve 1,7 tonna/hektár a kukorica esetén és 0,7 tonna/hektár a búza esetén. Őszi búzánál 2021–2050-re az ország délkeleti része kivételével növekedés, 2071–2100-ra pedig további termésátlag-növekedés várható, melynek mértéke nyugat felé haladva növekszik. Búzánál a vetési időpont várhatóan későbbre tolik, 9 ± 3 nappal a közeljövőben (2021–2050), míg 17 ± 6 nappal a távoli jövőben (2071–2100). Az őszi búza műtrágyázásának megváltoztatásakor meghatározóbb annak mennyiségi módosítása, mint a kijuttatási idő változtatása, azonban a mennyiség növelése is átlagban kevesebb mint 0,02 tonna/hektár növekményt okoz a megszokott műveléshez képest.

Korábbi tanulmányainkban (Kemény *et al.*, 2015, Fogarasi *et al.*, 2016) már vizsgáltuk a klímaváltozás búzahozamokra gyakorolt hatását 4M modell segítségével, három klímamodellt alkalmazva (ALADIN-CLIMATE, REMO, RACMO). A három klímamodell esetében eltérő hozameredmények jelentkeztek, két esetben csökkenést, egy esetben növekedést tapasztaltunk a 2020–2050 közötti időszakban.

A klímaváltozás hatásai a kukoricatermelésben

A kukoricahozamok változásának tekintetében a világon számos tanulmány született az elmúlt évtizedekben. A kutatások nagyobb része a nagy kukoricatermő területekre fókuszált (USA, Dél-Amerika, Kína és Afrika), azonban Európában is készültek elemzések. Magyarországon kevés tanulmány született arról, hogy a klímaváltozás milyen hatást gyakorolhat a jövőbeni (50-100 év múlva) a kukoricahozamok alakulására. Dióssy (2011) a kukorica termesztésének feltételrendszerében várhatóan bekövetkező éghajlati eredetű változásokat vizsgálta Keszthely térségében a 2071–2100 közötti időszakra. A Goudriaan-féle (1977) mikroklima-szimulációs modellezésre alapuló vizsgálatai kiterjedtek az állományon belüli léghőmérséklet, a vízgőznyomás, a csőszinti növényhőmérséklet, a sztomaellenállás és párologás, a szénasszimiláció, a respiráció, valamint az állomány energiafelhasználásának elemzésére. Kutatásával megerősítette, hogy a jövőben a növények számára rendelkezésre álló víz a szűk keresztmetszet, melynek kezelésére a gazdálkodóknak érdemes készülniük még akkor is, ha a csapadék változásának előrejelzése napjainkban még mindig meglehetősen bizonytalan.

A sztómaellenállás, a növény és az állományon belüli légtér hőmérsékletének változásaiból arra lehet következtetni, hogy a természetes vízellátás a klímaváltozás fokozódásával nem fogja fedezni a növényi vízigényt, így a kukorica gazdaságos termesztése érdekében a gazdáknak fel kell készülniük az öntözéses termesztésre, valamint a talaj vízkészleteinek megővését segítő agrotechnikai eljárások alkalmazására (Anda és Kocsis, 2012). Azonban kisebb hőmérséklet-növekedés esetén a növény még képes kompenzálni a kedvezőtlen körülményeket, nem szenved károsodást alacsonyabb vízellátottság mellett sem.

Nyéki (2016) értekezésében a kukorica növekedését, a környezetét és a termés kapcsolattrend-szerét (talaj-növény-légkör) tanulmányozta precíziós, helyspecifikus körülmények között a DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) Ceres-Maize modell segítségével öt év (2010, 2011, 2013, 2014, 2015) vonatkozásában. Félüzemi kísérletben 0,25 hektárra vetítve becsülte a kukoricahozamokat eltérő szezonális körülmények között. Az eltérések okát a talajfizikai jellemzők változásának függvényében elemezte 11 menedzsmenzónában. A szimulációs elemzések alapján megállapította, hogy néhány kezelési egységben kiugróan magas vagy alacsony értékek jelentkeztek. A menedzsmenzónák modellezése során megfigyelte, hogy az agyagtartalom függvényében csapadékosabb évben, illetve vegetációs időszakban (2010. és 2014. években) szisztematikusan felül, a 2011. és 2015. években (a kukorica számára negatív vízmérlegű évszázatokban) alábecsülte a hozamokat. Megállapította, hogy a klímaváltozás negatív hatását tápanyag-utánpótlással mérsékelni lehetne, azonban a megfelelő időpont és a technológiai feltételek meghatározása még további vizsgálatokat igényel.

Az éghajlatváltozás lehetséges hatásait a magyarországi mezőgazdasági szénmérleg és produktivitás függvényében Dobor (2016) és Dobor *et al.* (2016) vizsgálta a 4M szimulációs és a Biome-BGCMuSo biogeokémiai modellekkel a kukorica és az őszi búza esetében 2100-ig bezárólag. Mindkét modell a kukorica termésátlagainak csökkenését prognosztizálta, előbbi modell $1,31 \pm 0,89$ tonna/hektárt, az utóbbi $0,61 \pm 0,47$ tonna/hektárt. A szén-dioxid-szint növekedése mindkét modell esetében növelte a hozamokat. Megállapította, hogy a kukoricahozamokra az öntözés pozitívabb hatást gyakorol, mint a műtrágyázás. A kukorica vetési ideje számításai szerint a klímaváltozás nyomán 12 nappal indulhat korábban a jelen gyakorlathoz képest.

Durdu (2012) Nyugat-Törökországban a klímaváltozás hatására bekövetkező kukoricahozam-ingadozásokat szimulálta. Számításaihoz felhasználta az Ensemble modell előrejelzéseit, valamint a modellbe beépített aszályra és nedvességre vonatkozó indexeket is (SPI, PDSI, Orig-Z, SC-PDSI és SC-Z). A hozamok vizsgálatára négy termelési zónát különített el. Az aszályindexek alapján regressziós alapú terméshozammodelleket dolgozott ki. A különböző modellek 60 százaléknál magasabb arányban magyarázták a hozamváltozást. A nagyobb aszálykockázatú évek esetében a kukorica hozama a szimuláció szerint csökkent 0,014, illetve 2,1 tonna/hektárral az egyes termesztési régióknak megfelelően, ugyanakkor egy régióban 0,022 tonna/hektár növekedés jelentkezett.

Ceglar *et al.* (2013) egész Európára vonatkozólag feltérképezte, hogy a vízhiány és a kukorica-hozamkiesések hogyan oszlanak el térbelileg a jelenlegi állapotok és a várható éghajlati változások tükrében 2030-ig. A kukoricahozamokat és a vízigényeket a WOFOST (*World Food Studies*) modell segítségével szimulálták. A vizsgálatban kiemelt figyelmet kaptak az ENSEMBLE projekt jövőbeli előrejelzéseit, azon belül a meleg (HADLEY) és hideg (ECHAM5) körülményeket szimuláló modellek. A kutatásban vizsgálták, hogy az éghajlatváltozás okozta hozamkiesést lehet-e ellensúlyozni a jól megválasztott öntözési stratégiával. Három öntözési stratégiát különítettek el. Az eredmények azt mutatták, hogy a kukoricatermelés várhatóan Dél-Európában, valamint a Fekete-tenger körüli régiókban csökken a 2030-as évekre. A víz Közép- és Nyugat-Európában növelheti a hozamokat, azonban a dél-európai országokban kisebb jelentősége lehet. Ez azt jelzi, hogy az éghajlatváltozás miatti vízhiány növekedése emelheti a terméscsökkenés kockázatát Közép- és Nyugat-Európában, és valamivel kisebb mértékben, de Dél-Európában is.

Bassu *et al.* (2014) a klímaváltozás hatására bekövetkező kukoricahozam-ingadozásokat huszonhárom, mechanikus terményszimulációs modell segítségével elemezte négy helyszínen (Lusignan/Franciaország, Ames/USA, Rio Verde/Brazília és Morogoro/Tanzánia). A hőmérséklet-emelkedés erősen negatív hatással volt a hozamra, csökkentette azt. A szén-dioxid-szint növekedésének hatására a hozamok pozitív irányba (+7,5 százalék) változtak. A modell eredményei alapján a hőmérséklet változásának negatív hatása olyan nagyságrendben csökkenti a hozameredményeket, hogy azokat a szén-dioxid szintjének növekedése nem képes kompenzálni.

Rosegrant *et al.* (2014) az agrotechnológia szerepével foglalkozott, figyelembe véve a rendelkezésre álló természeti erőforrásokat is. Ebben a tanulmányban kitértek a klímaváltozás hatására bekövetkező kukoricahozam-változásra is. Számításaikhoz a korábban már említett DSSAT modellt használták 2050-re vonatkozólag. Megállapították, hogy a kukoricahozamok 9-18 százalékkal csökkenhetnek attól függően, hogy a terület öntözött-e vagy sem.

Vanuytrecht *et al.* (2015) több klímamodellt használt arra, hogy megbecsüljék az egyes növények, így a kukorica termelékenységét a század közepéig a flamand régióban. Az egyes modellek eltértek a becsült kukoricahozamok tekintetében annak függvényében, hogy a vetésterület hol helyezkedett el. Az ország belsejében a modellek 2-3 százalékos hozamcsökkenéssel számoltak, a part mentén azonban 5-9 százalékos hozamemelkedés jelentkezett. Ahol a gazdaságok tudnak alkalmazkodni a megváltozott körülményekhez, ott 16-17 százalékkal bővíthetnek a kukoricahozamok. Összességében megállapításaik szerint az évszázad közepéig tartó éghajlati változások várhatóan növelik a flamand régióban a terméshozam változékonyságát és a termelés nagyságát, különösen a klímaváltozáshoz alkalmazkodni képes gazdaságokban. Megállapították, hogy az átlagos növényi hozamok megemelkednek a megnövekedett szén-dioxid-kibocsátásra, amennyiben a betakarítást a magasabb hőmérséklethez igazítják. A megnövekedett termelés azonban a jövőben a hozamokra és a vízszükségletre is visszahathat.

Kim *et al.* (2016) a kukoricahozamok érzékenységét vizsgálta az USA délnyugati régióit érintő regionális éghajlatváltozásokra. Vizsgálatához a mezőgazdasági termelési rendszerek szimmetrikus modelljét (APSIM) használta, tesztelve különböző meteorológiai hatások, így a napi maximum- ($T_{\max}$) és minimum-hőmérséklet ($T_{\min}$), a csapadék és a sugárzás változását. Az adatok az észak-amerikai regionális reanalízis (NARR) adatkészletéből származtak. Az érzékenységi vizsgálatok azt mutatták, hogy a minimális és maximális hőmérsékleti értékek és a napsugárzás módosítására a potenciális kukoricatermés nemlineárisan változott. Az átlagos éves hozampotenciál változása (Y_p) maximális hőmérsékleti variációkra 1,79–3,00 tonna/hektár, minimális hőmérsékleti változatok értékeinél 2,84–5,11 tonna/hektár között alakult. A napsugárzás változásaira a hozamok csökkentek 3,02 tonna/hektárral. A hozamérzékenység a regionális éghajlati állapotok (SWUS) szerint területileg változott. A SWUS alapján például Dél-Kaliforniában és Arizonában a melegebb éghajlat a kukorica termelékenységére negatívan hatott (alacsonyabb $T_{\max}$ és magasabb $T_{\min}$ értékek voltak szükségesek a jobb eredményekhez). A hűvösebb régiókban, például Észak-Kaliforniában és Nevada térségében magasabb $T_{\max}$ és magasabb $T_{\min}$ értékek eredményeztek magasabb hozamokat. A napsugárzás fontos szerepet játszott a partmenti régiókban és a kaliforniai térségben is.

Oroszországnak, Ukrajnának és Kazahsztánnak egyre nagyobb a szerepe a globális gabona- és olajosmag-piacon (Grandjean, 2016). A hőmérséklet emelkedése azonban a termények hozamkockázatát növeli, amelyet az éghajlati előrejelzésekre épülő hozamszimulációval próbáltak feltérképezni. Két hőmérsékleti forgatókönyvet alkalmaztak a három fekete-tengeri államra. Az első, „mérsékelt” felmelegedési (+2,4 °C) forgatókönyv szerint a búza, a kukorica és a napraforgó termelése stabil maradhat. A második forgatókönyv szerinti szélsőséges felmelegedés (+4,3 °C) esetében a termelés 30-70 százalékkal visszaeshet 2065-re.

Zhao *et al.* (2017) szerint a globális hőmérséklet-növekedés hatást gyakorol a legnagyobb területen termesztett növények, így a kukorica termelésére is. A hőmérséklet hatását a kukorica terméseredményeire négyféle analitikai módszerrel (globális rácsalapú és helyi pontalapú modellek, statisztikai regressziók és kísérletek segítségével) vizsgálták. A különböző módszerek eredményei szerint a klímaváltozás következetesen negatív hatást gyakorolt a termés hozamra globális szinten. Szén-dioxid-trágyázás nélkül a termékenyülés, az adaptáció romlott, a növekvő átlaghőmérséklet pedig kukoricánál 7,4 százalékkal csökkentette a hozamokat.

Ortiz-Bobea (2017) az Egyesült Államok középnyugati régiójában vizsgálta a kukoricahozamok változását a hőmérséklet növekedése és a csapadékeloszlások függvényében statisztikai modellezéssel. A tényadatokkal összhangban a statisztikai modell is alátámasztotta, hogy a 30 °C-ot meghaladó hőmérséklet káros hatással van a hozamokra, azonban a precíziós agrotechnológia alkalmazása mérsékelheti a klímaváltozás hatásait.

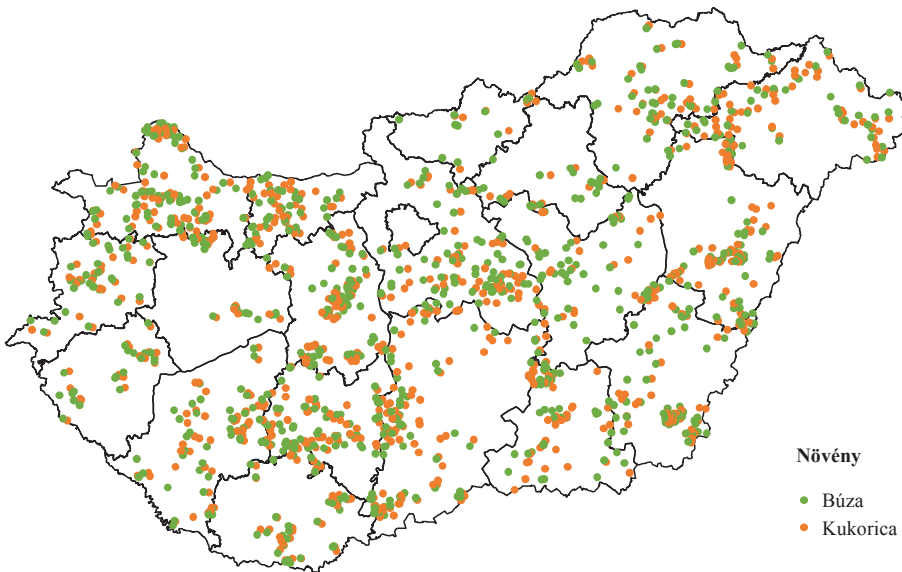
Adat és módszer

Kutatásunkban parcella- és üzemi (tesztüzemi rendszerből származó) szintű termelési input-output adatokat használtunk és a 4M szimulációs növényélettani modellel becsültük a különböző klímaszcenáriók és az alternatív agromenedzsment várható hatását a hozamok alakulására.

A biofizikai modellek közül azért esett a választásunk a 4M-re, mivel alapl működését tekintve a kutatói körökben legnépszerűbb amerikai modelles családhoz, a CERES-hez és az arra építkező modellekhez (CROPSYST, DSSAT, APES) tartozik, azonban a Magyar Tudományos Akadémia kutatói már számos olyan fejlesztést végeztek, amelyek figyelembe veszik a hazai klimatikus és talajtani viszonyokat. Szintén fontosnak tartottuk egy olyan modell alkalmazását, amelyet már eddig is széleskörűen használtak a hazai klímaváltozással kapcsolatos kutatásokban, azaz számos publikáció épült erre a modellre.

A 4M modellt először kalibráltuk és validáltuk parcellaszintű tesztüzemi adatok felhasználásával (6. ábra), majd az így kapott modellel előrejelzéseket végeztünk az őszi búza- és kukoricamodullal.

6. ábra: A vizsgálatba bevont tesztüzemek telephely szerinti elhelyezkedése



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

A 4M modell

A 4M napi léptékű determinisztikus modell (Fodor, 2006), amelynek működését (számításait) a légkör-talaj-növény rendszer számszerű jellemzői határozzák meg. A rendszer fizikai, kémiai és biológiai jellemzőinek (paramétereinek) megadásán túl a kezdő-, perem- és kényszerfeltételeket is szükséges rögzíteni a bemenő adatok között.

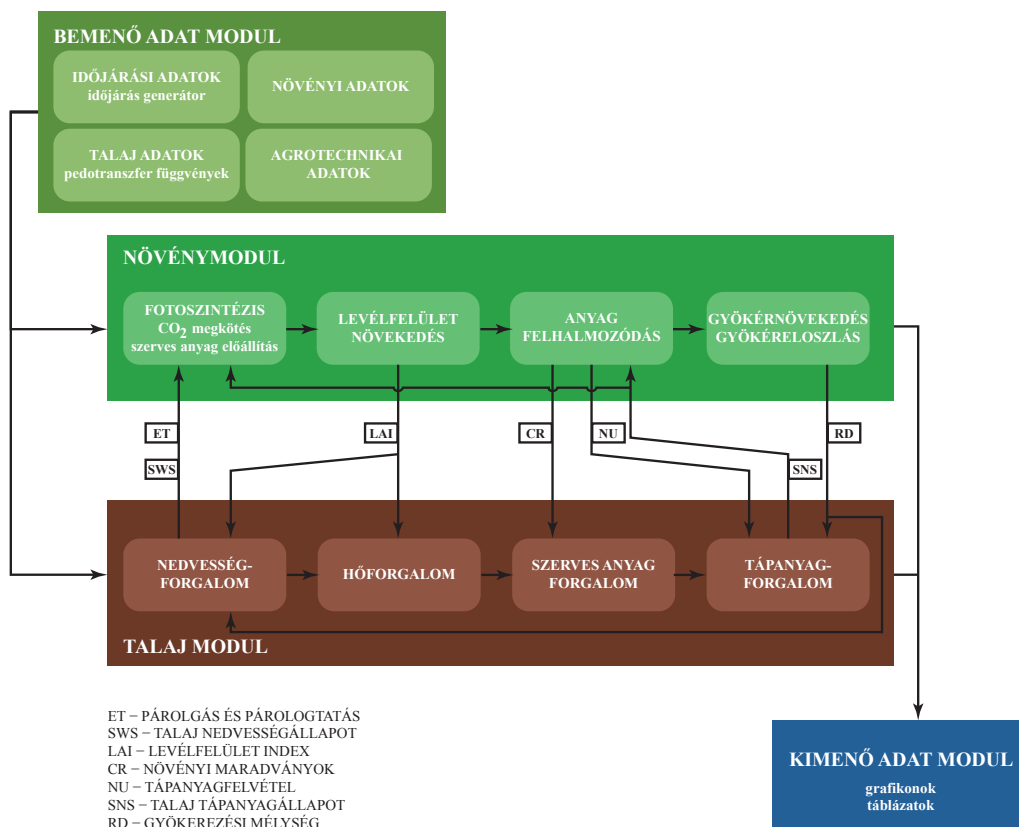
A paraméterek a modell függvényeit szabályozzák: ezen keresztül például a növények fejlődését, növekedését, a talaj hő-, nedvesség- és tápanyagforgalmát írják le. A kezdőfeltételek értékei a szimuláció kezdeti pillanatában mérhető változók, főképpen olyan talajtulajdonságok, mint a talaj nedvesség- és tápanyagtartalma. A peremfeltételek elsősorban meteorológiai adatokat jelentenek: napi sugárzás, hőmérséklet, illetve csapadék. Végül a kényszerfeltételek az emberi tevékenység számszerű kifejeződései a vetési, aratási, trágyázási, öntözési adatok formájában.

A 4M szimuláció futásának lényege, hogy a modell a bemenő adatok által meghatározott talaj-, meteorológiai és agrotechnikai feltételek mellett kiszámítja (szimulálja) a növény fejlődését és növekedését a vetéstől számítva a betakarításig. Napról napra kiszámítja, hogy a napsugárzásból a fotoszintézis útján mekkora tömegű termelt anyag keletkezik a növényben, ez az anyag miként oszlik szét az egyes szervek között, a levélbe jutó újonnan megtermelt anyag mennyivel növeli a levél felületét és végső soron kiszámítja a termelődő biomasszát, illetve hogy annak mekkora részét jelenti a szemtermés. A számított napi asszimiláció megosztásra kerül a növény fő részei (gyökér, szár, levél, termés) között.

Mindeközben a modell nyomon követi azt is, hogy a növény mennyi vizet, illetve tápanyagot vesz föl a talajból, ennek hatására hogyan szárad ki a talaj, illetve hogyan szegényedik el tápanyagban, és az esetlegesen az adott növény számára kritikus érték alá csökkenő nedvesség-, illetve tápanyagtartalom miként lassítja a növény növekedését, ezzel korlátozva a potenciális hozamot (stresszhelyzet).

A növényi fejlődés és növekedés mellett a modell a talaj nedvesség-, hő- és tápanyagforgalmát is szimulálja. A fenológiai fejlődés a hőmérséklettől függ, amelyet hőidő¹² formájában vesz figyelembe a modell. A fenofázisok hosszát ezek összege, a hőösszeg határozza meg. A fenológiai fázisok hosszát a felhasználó módosíthatja.

7. ábra: A 4M modell felépítése



Forrás: Fodor (2006)

¹² A hőidő a napi középhőmérséklet és a növénytől függő bázishőmérséklet különbsége. A bázishőmérséklet az a hőmérséklet, amely alatt a növény már nem fejlődik.

Röviden összefoglalva: a 4M modell alapvetően a csapadék és a hőmérséklet növényekre gyakorolt hatásának modellezésére alkalmas, tekintettel az egyéb környezeti – főként talaj- – adottságokra, valamint az emberi tevékenységre (7. ábra).

A felhasznált adatok köre

Vizsgálatunk során annak érdekében, hogy minél pontosabb eredményeket kaphassunk, az AKI parcellaszintű adatain végeztük el a modell kalibrálását és validálását egy olyan adatbázison, ahol a kísérleti parcellákra jellemző pontos inputfelhasználási adatok, időjárás adatok és az agrotechnológiai műveletek idejére vonatkozó adatok is rendelkezésre álltak. Ezáltal a modell a hazai köztermesztésben jellemző agrotechnológiai körülményekhez és azok hozameredményeihez tudott igazodni.

A modell bázisidőszakául szolgáló 2001–2014 közötti adatok esetében már nem állt rendelkezésre ilyen pontosságú adat, azonban a tesztüzemek térbeli elhelyezkedése, inputanyag-felhasználása, valamint az üzemekhez kapcsolható időjárás és talajtani adatok lehetőséget adtak arra, hogy a tesztüzemenkénti növényélettani modellfuttatások eredményeit országosan is ki lehessen terjeszteni és regionálisan valid eredményeket lehessen előállítani belőlük.

Parcella- és üzemi szintű hozam- és inputfelhasználási adatok

A 4M modell kalibrálását és validálását az AKI parcellaszintű adatgyűjtéséből származó adatokon végeztük a 2013/2014., 2014/2015. és 2015/2016. gazdasági évekre vonatkozóan. Figyelembe vettük a termelő által megadott talajtypust, a növényállomány sűrűségét, a vetés és betakarítás időpontját, a műtrágyázások időpontját és a kijuttatott szerves és szervetlen nitrogén-hatóanyag mennyiségét, illetve az öntözés időpontját és a kijuttatott vízmennyiséget. A kalibrálás és validálás során a modellezett hozamot és a ténylegesen elért termés hozamot vetettük össze.

Mivel a parcellaszintű adatok kizárólag 2014 és 2016 között érhetők el, így ezen adatokat csak kalibrálásra és validálásra alkalmaztuk. Az előrejelzéshez azonban hosszabb viszonyítási időszak szükséges, ezért a 2001–2014 közötti időszakot tekintjük referencia-időszaknak. A 2001 és 2014 között, valamint 2021 és 2100 között modellezett hozamokat az AKI tesztüzemi (FADN) adatgyűjtés ágazati részében szereplő nitrogén-hatóanyag-felhasználási adatokra alapoztuk. A modellezés során azokat az üzemeket vettük figyelembe, amelyek a 2001–2014-es időszak legalább 5 évében szerepeltek az adatbázisban. A vetés, betakarítás, műtrágyázás dátuma nem áll rendelkezésre, ezeket időjárás adatok alapján számítottuk a későbbiekben részletezett módszerrel.

Meteorológiai adatok

A 2001 és 2016 közötti időszakra vonatkozó időjárás¹³ adatokat a MARS-Agri4Cast (*Monitoring Agriculture with Remote Sensing*) meteorológiai adatbázisából nyertük. Az európai szintű adatgyűjtés 25×25 km-es rácsokra vonatkozó interpolált napi léptékű időjárás adatokat tartalmaz. A 4M modell inputjai között a globálsugárzás, a maximum- és minimum-hőmérséklet, valamint a csapadékmennyiség szerepelt.

A termés hozamok 2001–2014-es bázisidőszakhoz viszonyított változását hat klímaszcenárió szerint elemeztük (3. táblázat). Korábbi tanulmányainkkal (Kemény *et al.*, 2015; Fogarasi *et al.*, 2016) ellentétben tehát nem magyar, hanem nemzetközi klímaszcenáriókat vizsgáltunk, ezzel kívántuk biztosítani a nemzetközi szakirodalommal történő egyszerűbb összevethetőséget.

Az Agri4Cast adatokhoz hasonlóan az egyes klímaszcenáriók is napi adatokat tartalmaznak, inputként szintén a globálsugárzás, a minimum- és maximum-hőmérséklet, illetve a csapadékmennyiség szolgált.

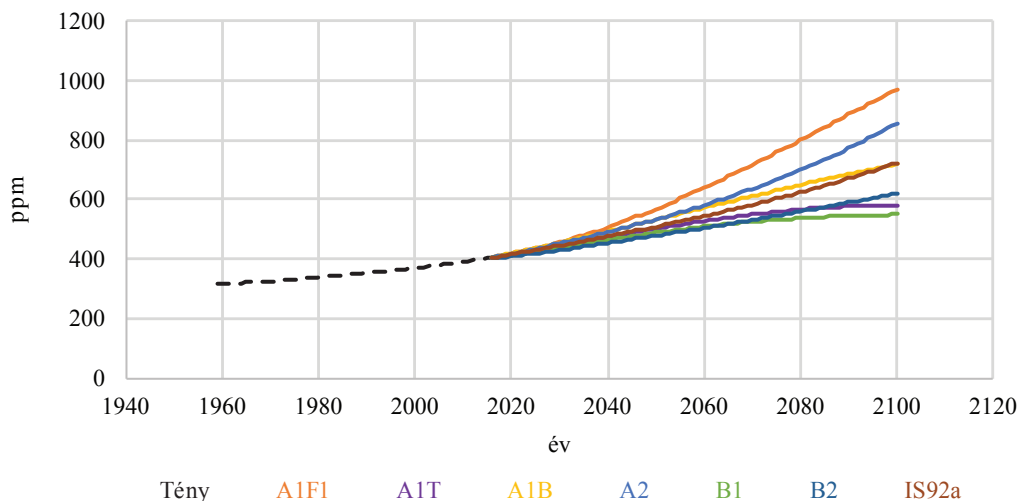
¹³ Időjárás alatt tényadatokat, klímaadatok alatt modellezett értékeket értünk.

3. táblázat: A modellezés során alkalmazott klímascenáriók

Modell	Ország	Intézet	Felbontás
C4I-HadCM3	Írország	Community Climate Changes Consortium for Ireland	25 × 25 km
DMI-APREGE	Dánia	Danish Meteorological Institute	25 × 25 km
KNMI-ECHAM5	Hollandia	The Royal Netherlands Meteorological Institute	25 × 25 km
ETHZ-HadCM3Q	Svájc	Swiss Institute for Technology	25 × 25 km
MPI-ECHAM5	Németország	Max-Planck-Institute for Meteorology	25 × 25 km
SMHI-BCM	Svédország	Swedish Meteorological and Hydrological Institute	25 × 25 km

Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán ENSEMBLES (<http://ensemblesrt3.dmi.dk/>) alapján

A 4M modell a szimuláció során figyelembe veszi a légkör CO₂-koncentrációját is. A 2001 és 2016 közötti szimulációk során az éves átlagos koncentrációval számoltunk, a 2021–2100-as időszakra vonatkozóan a legvalószínűbb, A1B-szenárió szerinti alakulásával számoltunk (8. ábra).

8. ábra: Különböző CO₂-koncentrációnak megfelelő forgatókönyvek

Forrás: Anda és Dióssy (2011)

Az egyes forgatókönyvek Anda és Dióssy (2011) alapján:

- A1F1: Gyors gazdasági növekedés a fejlődő világ gyorsuló felzárkózásával egy technológiailag elmaradó, fosszilis tüzelőanyagokon alapuló világban.
- A1T: Gyors növekedés a fejlődő világ gyorsuló felzárkózásával, de a tisztább technológiák (nem fosszilis energiahordozók) előretörésével.
- A1B: Gyors növekedés a fejlődő világ gyorsuló felzárkózásával, kiegyenlített energiastruktúra (fosszilis, nem fosszilis) mellett.
- A2: Heterogén világ. Lassú és differenciált gazdasági növekedés nagy népességnövekedés mellett.
- B1: Konvergencia, méltányos és fenntartható világ. Globális technológiai megoldások előretörése.

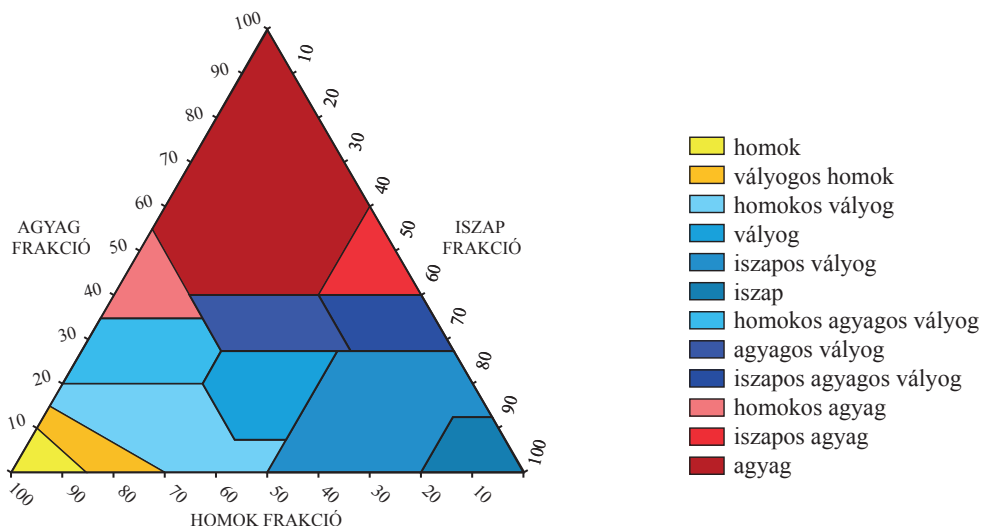
- B2: Változatos és fenntartható világ. A hangsúly a helyi technológiai megoldásokra helyeződik.
- IS92a: az IPCC Második Helyzetértékelő Jelentésében szereplő forgatókönyvcsalád egyik tagja.

Talajadatok

A 4M modell részletes talajtani paramétereket használ (1. melléklet). Ezen adatok egyrészt ebben a részletességben csak korlátozott területi felbontásban állnak rendelkezésre, másrészt egy-egy gazdálkodó is kisebb-nagyobb heterogenitású területeken gazdálkodik. A modellezés szempontjából a legpontosabb eredményt akkor kapnánk, ha a homogén talajtani, meteorológiai, művelési adottságú területek külön-külön kerülnének modellezésre. A gyakorlatban erre nincs lehetőség, ezért valamilyen közelítő megoldást kellett találnunk.

Az egyik lehetséges megközelítés, hogy a gazdálkodót megkérdezzük az általa megfelelő megbízhatósággal ismert, az érintett területre jellemző talajtani adottságról. Ennek egyik általunk is alkalmazott megközelítése az üzem egy-egy növénykultúra esetében legjellemzőbb (legnagyobb területarányú) textúraosztály megkérdezése. Az egyes textúraosztályok esetében jellemző (átlagos) 4M modell által használt paramétereket (2. melléklet) az MTA ATK TAKI minden lehetséges textúraosztályra kiszámolta (9. ábra). Ezt a megközelítést alkalmaztuk a parcellaszintű adatgyűjtés során, és ennek megfelelően a kalibrálás és validálás során is.

9. ábra: A 4M agrometeorológia modell talajadatbázisának kategóriarendszere



Forrás: Füleký (2011)

A másik lehetőség, hogy az MTA ATK TAKI által – esetünkben 5×5 km-es felbontású, több adatforrás felhasználásával a legkorszerűbb digitális talajtérképezési módszerrel készült – térben leképezett információit feleltetjük meg a gazdálkodó által használt területtel. A hosszú idősoros művelésre vonatkozó adatok a tesztüzemi rendszerben üzemi szinten állnak rendelkezésre, ezért ebben az esetben heterogén adottságú területeknél mindenképpen torzítást okoz a talajadat megadása, mivel sem a parcellákon, sem pedig az ágazatok, de még az üzem szintjén sem történik a tesztüzemi rendszerben ilyen adatfelvételezés. Ennélfogva a talajadatokat az MTA ATK TAKI adatbázisából vettük ki az üzemek telephelyének földrajzi elhelyezkedését alapul véve. Így előfordulhat, hogy a földrajzi elhelyezkedése alapján egy adott cellához tartozó telephelyet jellemző textúraosztály és az üzem által

használt területet jellemző textúraosztály akár számottevően is eltér. Mivel nem álltak rendelkezésre ennél pontosabb adatok, ezt a megközelítést alkalmaztuk a bázisidőszak és a 2100-ig tartó becslés elkészítése esetében is.

A kalibrálás, validálás és az előrejelzés menete

A kalibrálás és a validálás parcellaszintű adatokkal történt a termelő által megadott talajtípus és agromenedzsment mellett. A kalibrálás az üzemek 2/3-án, a validálás a minta fennmaradó 1/3-án történt (10. ábra). A kalibrálás során a 4M modell fotoszintézis modulját módosítottuk a potenciális függvény és a vízstresszfüggvény egy-egy paraméterét változtatva.

A potenciális függvény kifejezi, hogy a növény az aznapi előállítható szervesanyag-mennyiségből mennyit képes létrehozni:

$$p(a, b) = a \cdot SRAD \cdot (1 - e^{-b \cdot LAI})$$

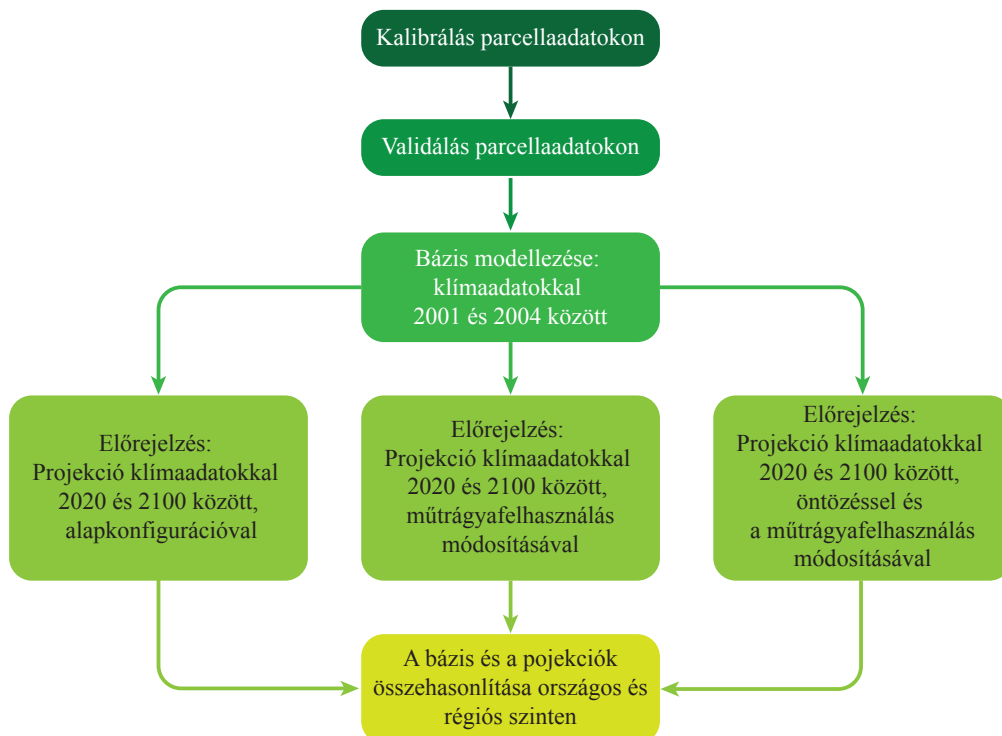
ahol $SRAD$ a sugárzást (MJ/m^2), LAI (*leaf area index*) a levélfelületi indexet jelöli. Az a fényhasznosítási paramétert módosítottuk a kalibrálás során.

A 4M modellben a növény vízérzékenységét az alábbi vízstresszfüggvény fejezi ki:

$$w(a, b, c) = a - b \cdot WDEF^c$$

ahol $WDEF$ (*water deficit*) a vízhiányt fejezi ki (mm). A vízstressz c paraméterének optimális értékét a 0,5–2 intervallumon belül kerestük.

10. ábra: A 4M modell futtatásának folyamata



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

A kalibrálás során a 4. táblázatban részletezett mutatók alakulását kísértük figyelemmel. A képletekben szereplő x_i a minta i elemének megfigyelt hozamát, $\hat{x}_i$ a modellezett hozamát jelöli $i = 1 \dots n$ esetén, $\bar{x}$ a megfigyelt hozamok átlaga.

4. táblázat: A kalibrálás során figyelembe vett mutatók

Mutató	Képlet	Célérték
Átlagos hiba (<i>BIAS</i>)	$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)$	Nulla körüli átlagos hiba esetén a modell nem becsül sem alul, sem felül.
Átlagos négyzetes hiba gyöke (<i>RMSE</i>)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2}$	A cél, hogy az átlagos négyzetes hiba gyöke minél alacsonyabb legyen.
variációs együtthatója (<i>CV(RMSE)</i>)	$CV(RMSE) = \frac{RMSE}{\bar{x}}$	A cél, hogy a <i>CV(RMSE)</i> értéke ne haladja meg a 30 százalékot.
Relatív hiba	$\delta_i = \frac{\hat{x}_i - x_i}{x_i}$	A cél a 20 százalék alatti eltéréssel rendelkező becslések számának maximalizálása.
A tényhozam és a modellezett hozam közötti lineáris regresszió α és β paramétere	$x_i = \alpha + \beta \hat{x}_i$	Az α nullához közeli, a β egyhez közeli értéke a cél.
Determinációs együttható (R^2)	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$	A cél, hogy a determinációs együttható minél közelebb legyen egyhez.

Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

A 4. táblázatban felsorolt mutatókat a termelőre és termőhelyre aggregált eredmények alapján számítottuk. Figyelembe véve, hogy a homoktalajon becsült hozamok jelentősen eltérnek a tényhozamoktól, ezeket a parcellákat kizártuk mind a kalibrálásból, mind a validálásból. A kalibrálást akkor tekintjük sikeresnek, ha a vizsgált mutatók értékei megfelelőek és a validálásból származó eredményekkel megfeleltethetők.

Vetési idő modellezése – automatikus termelői adaptáció feltételezése

A növényélettani modell tanulmánybeli futtatásának egyik sajátosságát a vetési és betakarítási idő automatikus, a modellezett időszakon áthúzódó, a klimatikus viszonyokhoz folyamatosan alkalmazkodó értékei adják meg. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy a modellbecslés feltételezi a mezőgazdasági termelők folyamatos alkalmazkodását az időjáráshoz – amint az a valóságban is megtörténik – minden egyes évben.

A legtöbb publikáció vagy nem számol ezen adatokkal, és fix dátumok szerinti becsléseket végez, amivel jóval nagyobb hozamcsökkenést modellez, mint ami az átlagos termelők alkalmazkodása nyomán megjelenik, vagy konkrét optimalizációs vizsgálatokat végez a legnagyobb hozamokhoz tartozó vetési és betakarítási időpontok azonosítása érdekében. Ez utóbbi megoldás nehézségét az adja, hogy a termelőnek nem áll módjában visszamenőlegesen, az időjárás alakulásának tudatában kiválasztani az ideális időpontokat, hanem csak előretekintő módon, bizonyos szabályok követése nyomán tud alkalmazkodni az addig bekövetkezett időjárási hatásokhoz. E módszer nyilvánvalóan gyakran vezet szuboptimális eredményekhez, azonban e módszer jóval közelebb áll a valóságos termelői alkalmazkodás módjához, mint a teljes éves időjárás tudatában hozott vetési és betakarítási dátumválasztás.

A kalibrálás a következőképpen történt: a kalibrálás során alkalmazott parcellaszintű adatoknál rendelkezésre állt a vetés dátuma. Ezzel szemben a 2001–2014 közötti referencia időszakra és a 2021–2100-as előrejelzett időszakra vonatkozóan nem érhető el ilyen adat. Ahhoz, hogy figyelembe tudjuk venni a klímaváltozáshoz kapcsolódó vetési időpont eltolódását, kialakítottunk egy szabály-rendszert, amivel az időjárás alapján határozzuk meg a vetés optimális dátumát.

Szakirodalmi adatok alapján a vetési szabályt a kukoricánál és a búzánál is hőmérsékleti érték-hez és a megfelelő hőmérsékletű időszak hosszához kötöttük (Nagy, 2006). Mindkét növény esetén négy-négy opciót különböztettünk meg, amelyek növényenként a „Vetés dátumának modellezése” alfejezetekben ismertettünk részletesen. A négy-négy lehetőséget a 2014–2016 közötti Agri4Cast-adatokon teszteltük, és az eredményeket összevetettük az ugyanerre az időszakra vonatkozó parcellaszintű vetési adatokkal. Különböző mutatók (átlag, minimum, maximum, szórás, 5. percentilis, 95. percentilis) összehasonlításával kiválasztottuk a négy lehetőség közül azt, amelyre a modellezett és a megfigyelt vetési idő a legközelebb került egymáshoz.

Előrejelzés és regionalizáció

Az előrejelzésben a referencia-időszak hozamától való százalékos eltéréssel számoltunk a hat klímaszcenárióra külön-külön, illetve együttesen is. A változásokat tízéves blokkokban követtük nyomon.

Emellett – mivel a növényélettani modell futtatása a bázisidőszaki tesztüzemi körre üzemenként történik meg – ezen modelleredmények kivetíthetővé váltak regionális szinten, bemutatva, hogy milyen eltérések jelentkezhetnek az egyes főbb hazai termőterületek között a klímaváltozás előrehaladása nyomán.

A 2021 és 2100 között kijuttatott nitrogén-hatóanyag mennyiségét a 2001–2014 közötti átlagosan felhasznált mennyiséggel definiáltuk. A műtrágyázás kukoricánál a vetéssel egy menetben történt, búzánál őszi és tavaszi műtrágyázással számoltunk. Az őszi műtrágyázás a vetés előtt 10 nappal esedékes, ekkor a teljes mennyiség 30 százaléka kerül a földbe. A fennmaradó 70 százalék kiszórása fenofázishoz kötött, az egyik felét a bokrosodás végére, a másik felét a szárba indulás befejezésére ütemeztük. A vetés dátumát a „Vetés dátumának modellezése” alfejezetekben tárgyaltak alapján határoztuk meg. A szimuláció során alkalmazott tőszám kukoricánál 6,5 tó/m², búzánál 550 tó/m².

Választható termelői adaptáció modellezése

A klímaváltozáshoz való adaptációs lehetőségek közül a megfelelő mennyiségű műtrágya-felhasználást, illetve az öntözés lehetőségét vizsgáltuk. A klímaváltozás következtében romló termelési környezeti feltételekhez a műtrágya-felhasználás (Nagy, 2017) és a vízpótlás széles körben elterjedt adaptációs stratégiák. Nagy (2017) kimutatta, hogy a nem műtrágyázott és a 120 kg N/hektár műtrágya alkalmazásával történő termesztés között megbízható különbség mutatkozott a kukoricatermesztésben, utóbbi esetben 4,02 tonna/hektáronkénti többlettermést értek el. A műtrágya-felhasználás növelésével együtt eltérő genotípusú növényfajtákkal elérhető adaptációs stratégiát (Széles és Ferencsik, 2018) nem áll módunkban alkalmazni kutatásunkban, mivel nem áll rendelkezésünkre üzemi bontásban ilyen adat.

A baseline előrejelzést a 2001–2014 közötti átlagosan kijuttatott nitrogén-hatóanyag mellett való-sítottuk meg. Ez bizonyos esetekben azt is jelentheti, hogy a gazdálkodó nem juttatja ki a növény optimális növekedéséhez szükséges nitrogénmennyiséget. Szakirodalmi (Nagy, 2006) és szakértői adatok alapján a kukorica átlagos hektáronkénti nitrogénigénye 90 kg, a búzáé 100 kg. Első adaptációs lehetőségként megvizsgáltuk a hozamok alakulását abban az esetben, ha a kijuttatott nitrogén-hatóanyag mennyiségének minimumát 90, illetve 100 kg-ban határoztuk meg (nagyobb referencia időszaki mennyiség esetén a múltbéli átlagos értékkel számoltunk). A tőszámok a baseline előrejelzésben szerepelt értékkel megegyezők, kukoricánál 6,5 tó/m², búzánál 550 tó/m².

Második adaptációs lehetőségként az öntözést vizsgáltuk. A kukorica fejlődését befolyásoló csapadékmennyiséget a vetés dátumától kezdődően 12 napos intervallumokban elemeztük. Amennyiben a lehullott csapadék nem érte el a 40 mm-t, öntözéssel pótoltuk a szükséges vízmennyiséget. Öntözéses kukoricatermesztésnél a tőszámot 8 tő/m²-re emeltük, a minimálisan kijuttatandó nitrogén-hatóanyag módosított értéke 120 kg/hektár. A búza öntözését fenofázishoz kötötten elemeztük. Ha a bokrosodás kezdetétől a szárba indulás végéig 30 mm-nél kevesebb csapadék esett, kiegészítettük a szükséges vízmennyiséggel. A szárba indulás végétől számított 15 napos intervallumra szintén a 30 mm-es vízigénnyel számoltunk, ennek hiányát öntözéssel pótoltuk. Az öntözött búza tőszámát nem változtattuk, a minimum-nitrogénszükségletet 120 kg/hektárra emeltük.

Klímaszenáriók statisztikai elemzése

A nemzetközi és hazai szakirodalomban, valamint az AKI-ban elvégzett, a klímaváltozással kapcsolatos korábbi kutatások (Kemény *et al.*, 2015; Fogarasi *et al.*, 2016) során is bebizonyosodott, hogy az egyes klímamodellek azonos szén-dioxid-kibocsátási szintre, illetve sugárzási kényszerre vonatkozó értékei között igen jelentős különbségek lehetnek. Ennek kezelésére vállalkozott az ENSEMBLE projekt is, mely több regionális és globális klímamodell eredményének együttes elemzését végezte el.

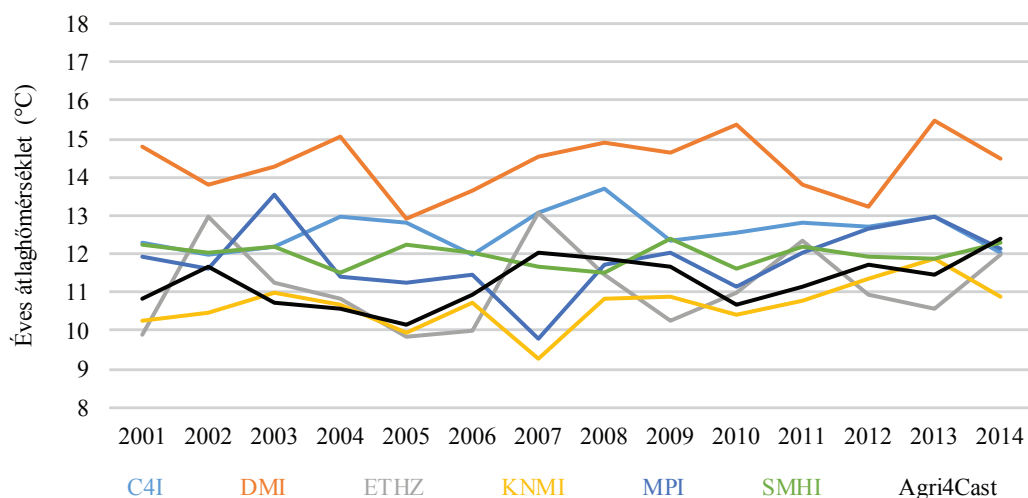
A modellezés során felhasznált hat klímaszenárió Magyarországra vonatkozó becslései pontosságának kimutatása érdekében a klímaszenáriók bázisidőszaki (2001–2014 közötti) eredményeit az általunk alkalmazott Agri4Cast bázisidőszakra vonatkozó értékeivel hasonlítottuk össze. Vizsgálataink során az évi középhőmérséklet, az éves csapadékösszeg, az évszakonkénti átlaghőmérséklet, az évszakonkénti átlagos csapadékmennyiség, az egy évre jutó hőszegnapok száma és az egy évre jutó fagyos napok száma alapján vetettük össze a klímaszenáriókat.

Emellett elvégeztük a bázisidőszaki időjárás és a klímaszenáriók 2100-ig tartó időjárási becsléseinek egybevetését is annak érdekében, hogy bemutassuk a klímaváltozás magyarországi időjárásra gyakorolt potenciális hatását.

Bázisidőszaki adatok összevetése

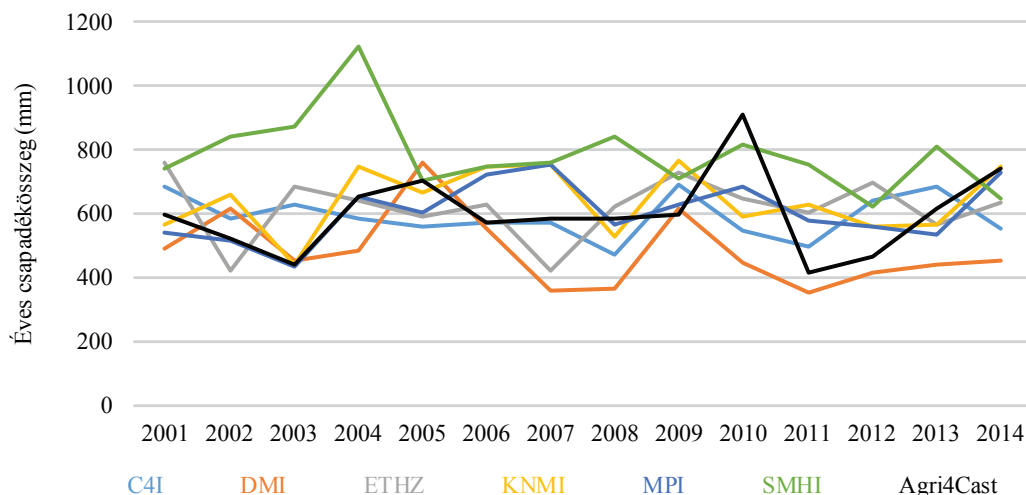
Az évi középhőmérséklet vizsgálata során a legkiegyensúlyozottabb eredményt a svéd SMHI klímamodell mutatta 2001 és 2014 között, ebben az esetben volt a legalacsonyabb az értékek szórása (11. ábra). A legmagasabb évi átlagos középhőmérséklet a dán DMI (14,4 °C), míg a legalacsonyabb a holland KNMI modell (10,7 °C) szerint volt. Az ír C4I- és a dán DMI-szenárió az évi középhőmérséklet csökkenését jelezte 2001-ről 2014-re (−0,2 °C, illetve −0,3 °C), míg a többi modellel együtt a mi eredményeink is a középhőmérséklet növekedését jelenítették meg. Az Agri4Cast adatbázis alapján 2001 és 2014 között 14,5 százalékkal, azaz évente átlagosan 1,1 százalékkal emelkedett az évi középhőmérséklet. Eredményeink a svájci ETZH értékeihez estek a legközelebb, amely szerint 20,9 százalékkal, azaz évente átlagosan 1,5 százalékkal nőtt az évi középhőmérséklet.

11. ábra: Évi középhőmérsékletek 2001 és 2014 között



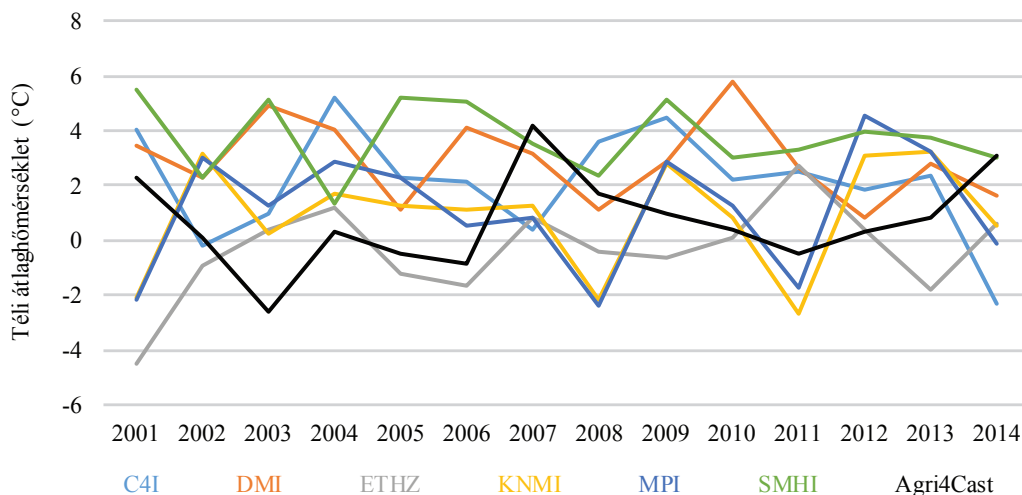
Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

12. ábra: Éves csapadékösszeg 2001 és 2014 között



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

13. ábra: Téli átlaghőmérséklet 2001 és 2014 között

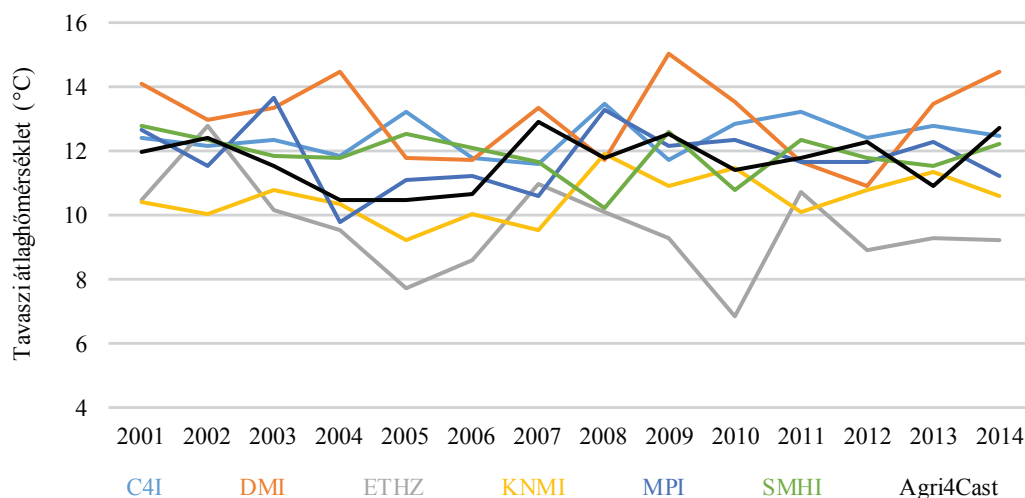


Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

A referencia-időszakban a vizsgált hat klímamodell esetén a DMI-szcenárió mutatta a legalacsonyabb éves csapadékösszeget 353,3 mm-rel, míg a legmagasabbat az SMHI 1119,8 mm-rel (12. ábra). Az általunk felhasznált Agri4Cast 417,1 mm-es minimumértéke a svájci ETHZ-szcenárió 420,1 mm-es értékéhez esett a legközelebb, míg a 908,3 mm-es maximuma a holland KNMI-klímaadatbázis 765,8 mm-es értékéhez. Az éves átlagos csapadékösszeg 590–617 mm-es érték-közben szóródott a C4I, az ETHZ, az MPI és a saját szcenáriónk alapján, illetve a C4I mutatta a legkisebb szóródást 68,1 mm-rel. A legmagasabb évi átlagos csapadékösszeget a svéd modell számításai jelentették 783,9 mm-rel, amely az időszak elejére dinamikus csapadéknövekedést, majd az időszak további éveire kiegyensúlyozott változást határozott meg. A csapadékösszeg időbeli alakulását tekintve 2001–2014 között a C4I-, az ETHZ- és az SMHI-adatbázis évi átlagos 3–11 mm-es csökkenést mutatott, míg a KNMI-, az MPI- és az Agri4Cast-szcenárió 10–15 mm évi átlagos növekedést.

A téli átlaghőmérséklet 2001–2014 között átlagosan $+0,7$ és $+2,9$ °C-os intervallumban szóródott az egyes modellek adatai alapján (13. ábra), csupán az ETHZ-adatbázis szerint volt fagypont alatti az átlagos hőmérséklet ($-0,4$ °C). Az Agri4Cast klímaadatbázisunk szerint a téli hónapokban átlagosan $0,7$ °C volt az átlag, ami a KNMI-adatbázis $0,9$ °C-os értékéhez esett a legközelebb. A téli átlaghőmérséklet 2001–2014 között a legnagyobb mértékben a C4I-adatbázis szerint csökkent, $6,4$ °C-kal, ami évi átlagos $0,5$ °C-os mérséklődést jelentett. A svájci ETHZ-adatbázis egy igen alacsony bázisértékből kiindulva 14 év alatt $5,1$ °C-os átlaghőmérséklet-emelkedést mutatott ki, ami évente átlagosan $0,4$ °C-os növekedést jelentett. Az általunk alkalmazott Agri4Cast-adatbázis a KNMI- és az MPI-adatbázishoz hasonlóan szintén az átlaghőmérséklet növekedését mutatta ($+0,8$ °C).

14. ábra: Tavaszi átlaghőmérséklet 2001 és 2014 között



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

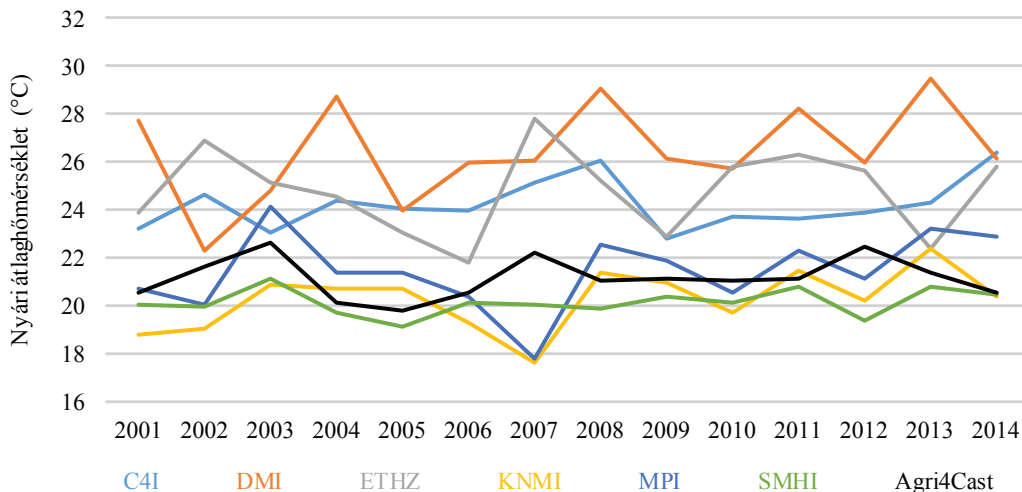
A tavaszi hónapokban az átlaghőmérséklet csökkenését mutatta az ETHZ ($-1,3$ °C), az MPI ($-1,4$ °C) és az SMHI ($-0,6$ °C) adatbázisa, míg növekedését a DMI ($+0,4$ °C), a KNMI ($+0,2$ °C) és az Agri4Cast modellünk ($+0,7$ °C). A tavaszi időszakban a legmagasabb átlaghőmérsékletet a dán DMI adatbázis mutatta $13,0$ °C-kal, amely $3,4$ °C-kal volt magasabb a legalacsonyabb átlagos hőmérsékletet modellező svájci adatbázistól. Az Agri4Cast adatbázisunk alapján a tavaszi hónapokban az átlaghőmérséklet $11,7$ °C volt, amelyhez az MPI ($11,8$ °C) és az SMHI ($11,9$ °C) értékei estek a legközelebb. Az ír C4I adatbázis szerint az átlaghőmérséklet közel megegyezett az időszak elején és a végén (14. ábra).

A nyári hónapokra az átlagos hőmérséklet emelkedését mutatták ki az adatbázisok a DMI kivételével, amely szerint $1,6$ °C-kal csökkent az átlaghőmérséklet, köszönhetően annak, hogy az adatbázis igen magas ($27,7$ °C-os) bázisról indult (15. ábra). A DMI-adatbázishoz hasonlóan a C4I és az ETHZ is 24 °C feletti átlaghőmérsékletet mutatott ki a 2001–2014 közötti időszakra, míg a KNMI, az MPI, az SMHI és az Agri4Cast $20,0$ – $21,5$ °C közötti átlaghőmérsékletet. Az eltérő átlagos értékek ellenére az egyes modellek azonosságát mutattak az alacsony szórások tekintetében, tehát az egyes adatbázisok önmagukban kiegyensúlyozott átlaghőmérséklet-változást mutattak.

Az egyes évszakokat összevetve megállapítható, hogy az őszi hónapok átlaghőmérsékletének változása tekintetében voltak a legegységesebbek az egyes klímaadatbázisok, mivel mindegyik növekedést mutatott ki (16. ábra). A nyári hónapokhoz hasonlóan itt is a DMI-adatbázis mutatta a legmagasabb átlaghőmérsékletet $15,1$ °C-kal, amely $4,6$ °C-kal volt magasabb, mint a leghidegebb

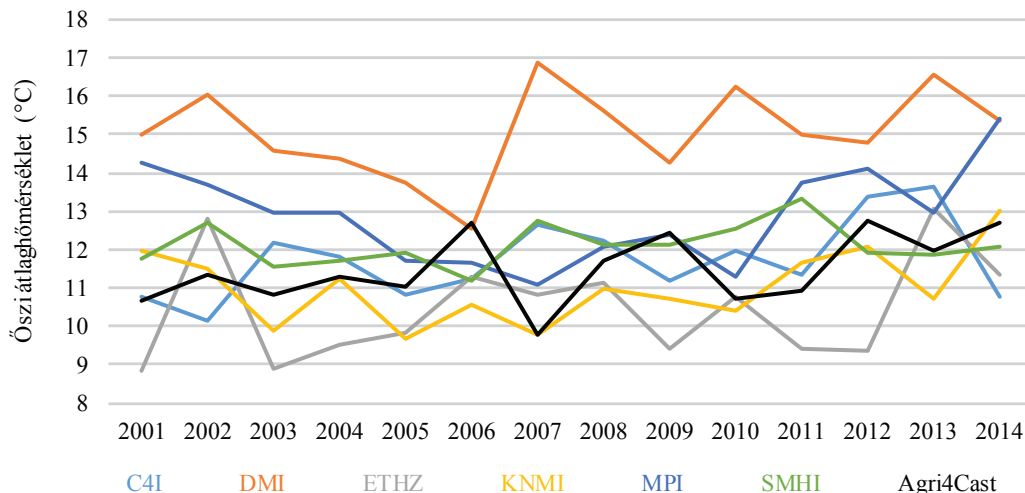
őszai időszakot jelző ETHZ-szcenárió. A svájci ETHZ és az általunk használt Agri4Cast adatbázis alapján meghatározott őszi átlaghőmérséklet emelkedett több mint 2 °C-kal, ami éves szinten átlagosan 0,2-0,2 °C-ot jelentett.

15. ábra: Nyári átlaghőmérséklet 2001 és 2014 között



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

16. ábra: Őszi átlaghőmérséklet 2001 és 2014 között

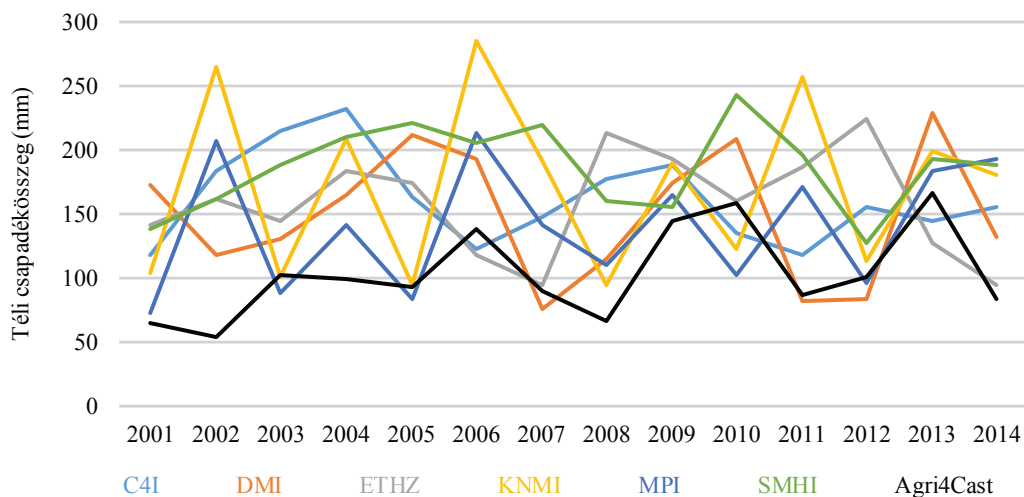


Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

A 2001–2014 közötti időszak téli hónapjaiban a csapadékösszeg csökkenését mutatta a DMI (–41,4 mm) 1,8 °C-os átlaghőmérséklet csökkenéssel, míg az ETHZ-adatbázis a 45,9 mm csapadéknövekedéshez 5,1 °C-os melegedést mutatott ki (17. ábra). A többi modell a csapadékösszeg emelkedését mutatta ebben az időszakban. Az Agri4Cast adatbázisunk alapján a csapadékösszeg növekedése 18,5 mm volt, ami évente átlagosan 1,4 mm-t jelentett. A legnagyobb emelkedést az MPI-klímaadatbázis mutatta 120,4 mm-rel, ami évente átlagosan közel 10 mm-t jelentett, a szcenárió

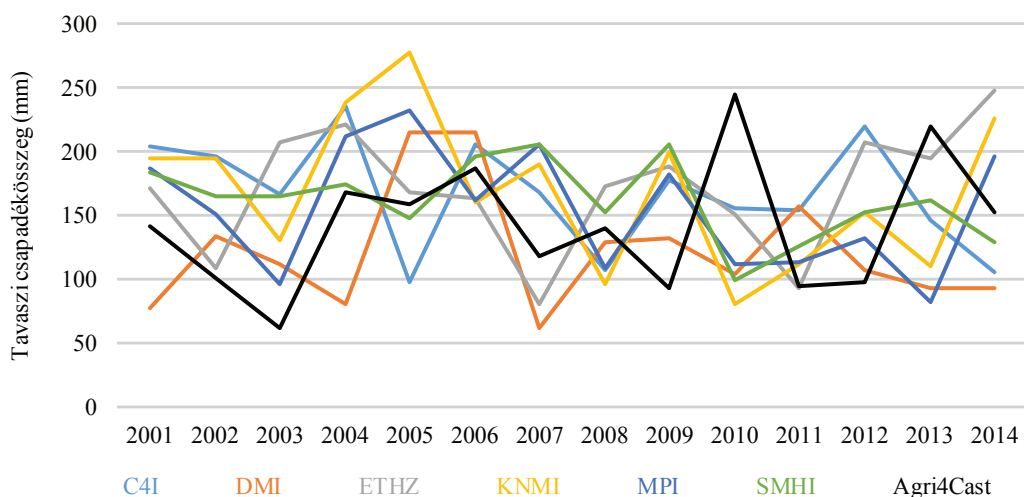
szintén a hőmérséklet emelkedését jelezte. A téli átlagos csapadékösszeg az SMHI-adatbázis alapján volt a legmagasabb 186,2 mm-rel, ami csupán 18,0 százalékos szórást mutatott az egyes éveket tekintve. A legalacsonyabb átlagos csapadékösszeget az Agri4Cast-adatbázisunk mutatta 103,2 mm-rel, amelyhez legközelebb az MPI-szcenárió 140,3 mm-es értéke esett. Igen magas értékeket mutatott a KNMI-adatbázis, három évben is 250 mm felett volt a téli csapadékösszeg, ennek megfelelően az egyes évek alapján a szórás közel 40 százalékos volt.

17. ábra: Téli csapadékösszeg 2001 és 2014 között



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

18. ábra: Tavaszi csapadékösszeg 2001 és 2014 között

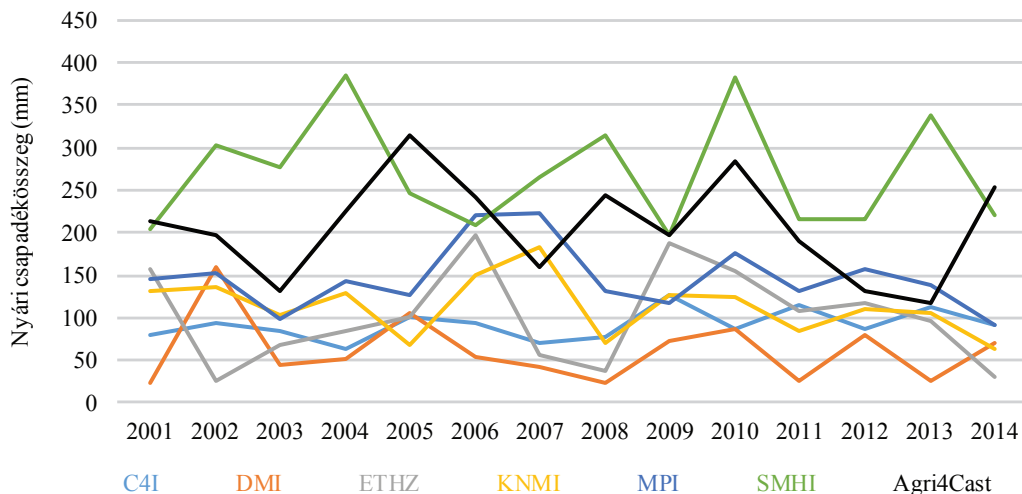


Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

Az Agri4Cast alapján készített számításunk szerint a tavaszi időszakokban az átlagos csapadékösszeg 141,2 mm volt (36,8 százalékos szórással), amelynél csak a DMI-adatbázis határozott meg alacsonyabb értéket (122,1 mm). A C4I-, az ETHZ-, a KNMI- és az SMHI-klímaadatbázis szerint az

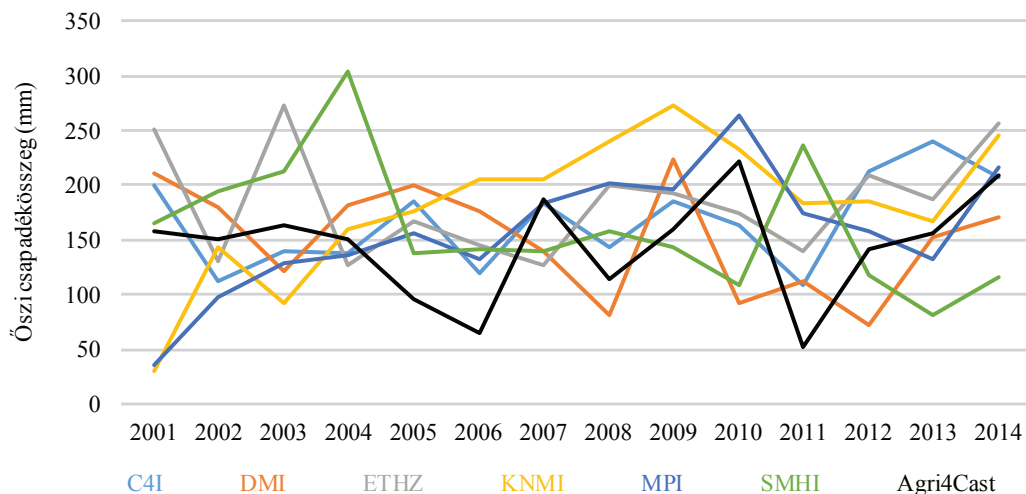
átlagos csapadékösszeg 2001–2014 között 160-170 mm között szóródott (18. ábra). A legnagyobb csapadékösszeg-növekedést az ETHZ határozta meg, 7,8 mm-rel nőtt a csapadék mennyisége, amely évente átlagosan 5,9 mm-t jelentett. Saját számításaink (+11,2 mm) az MPI-adatbázis 8,5 mm-es növekedéséhez álltak a legközelebb. Két adatbázis, a C4I és az SMHI is a csapadékösszeg csökkenését mutatta ki 98,9, illetve 54,8 mm-rel.

19. ábra: Nyári csapadékösszeg 2001 és 2014 között



Forrás: Készült az AKI Adatalemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

20. ábra: Őszi csapadékösszeg 2001 és 2014 között



Forrás: Készült az AKI Adatalemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

A nyári csapadékmennyiség nagyságát az egyes adatbázisok igen eltérő mértékben határozták meg 2001–2014 között. Négy modell is a csapadékösszeg emelkedését mutatta ki (C4I, DMI, SMHI, Agri4Cast), melyek közül a C4I a nyári hónapokra több mint 3 °C-os átlaghőmérséklet-emelkedést is modellezett. Ezzel szemben a DMI modell a hőmérséklet 1,6 °C-os csökkenését mutatta ki a nyári

hónapokra. A csapadék csökkenését jelezte az ETHZ, a KNMI és az MPI modell, melyek közül a svájci modell 128,0 mm-es csökkenése volt a legnagyobb, éves szinten átlagosan közel 10 mm-rel mérséklődött a csapadék mennyisége. A svájci szcenárió ráadásul 24,8°C-os átlaghőmérsékletet is modellezett erre az időszakra, amely az egyik legmagasabb érték volt (19. ábra).

A C4I-, a DMI-, az ETHZ-, a KNMI- és az MPI-adatbázisok esetében az őszi átlagos csapadékösszeg jóval meghaladta a nyári csapadékösszeget. Az SMHI-nál és az Agri4Cast-nál azonban az őszi csapadékösszeg 108,5, illetve 62,2 mm-rel múlta alul a nyári átlagos csapadékösszeget. Ennek egyik fő oka, hogy mindkét számítás tartalmazott olyan éveket, amikor a csapadékösszeg jóval meghaladta vagy alulmúlta a többi adatbázis számított értékét. A legmagasabb őszi átlagos csapadékösszeget az ETHZ-adatbázis határozta meg 184,3 mm-rel, illetve esetükben igen egyenletes volt az adatok szóródása a többi modellhez viszonyítva. Igen alacsony bázisról indult a KNMI-, illetve az MPI-klímaadatbázis, így 2001–2014 között 216,3, illetve 180,1 mm-es emelkedést mutattak ki. A DMI- és az SMHI-adatbázisok 40,4, illetve 50,5 mm-es csökkenést határoztak meg 14 év alatt, sőt a dán modell mutatta ki erre az időszakra a legmelegebb őszi időszakokat 15,1 °C-kal (20. ábra).

Összességében megállapítható, hogy a 6 klímaszcenárió viszonylag nagy szórás mellett ad becslést a közelmúlt hazai időjárásáról.

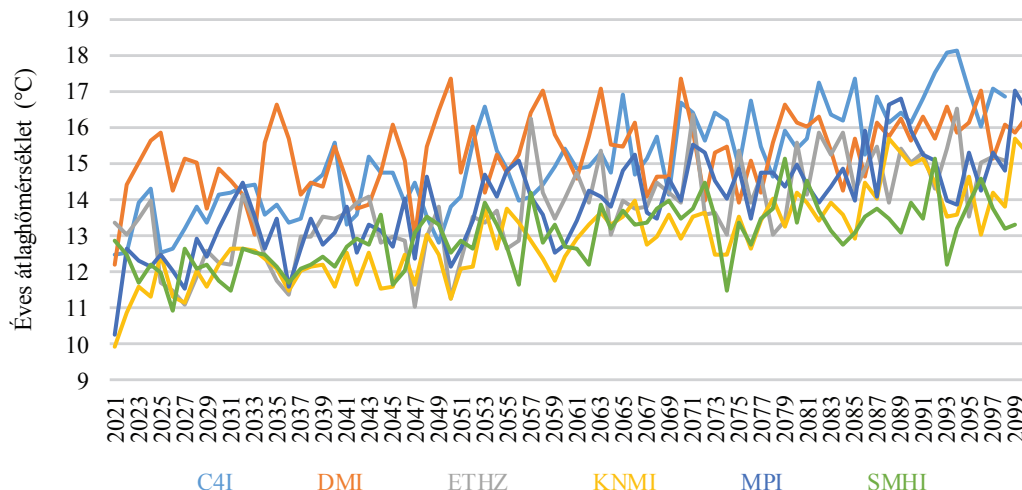
A 2100-ig tartó időszak becsléseinek összevetése

Az évi középhőmérséklet a 2020–2100 közötti időszakban a vizsgált hat modell projekciója szerint átlagosan 12,9–15,3 °C intervallumban szóródott (21. ábra). A legalacsonyabb átlagos középhőmérsékletet a holland KNMI-szcenárió mutatta (12,9 °C) 1,2 °C-os szórással, míg a legmagasabbat a dán DMI (15,3 °C) 1,1 °C-os szórással. A változás ütemét tekintve a C4I-, a KNMI- és az MPI-szcenárió évente átlagosan 0,1 °C-os középhőmérséklet-növekedést prognosztizál, míg a többi adatbázis kiegyenlített átlaghőmérséklet-alakulást vár. A projekciók alapján a 2020–2040 közötti időszakban a legmagasabb évi átlagos középhőmérsékletet a DMI-klímaadatbázis (14,6 °C) mutatja, amely 2035-re 16,6 °C-os évi középhőmérsékletet is prognosztizál. A legalacsonyabb átlagos értéket a KNMI-adatbázis várja 11,8 °C-kal. A hat modell közül a DMI, az ETHZ, a KNMI és az MPI évente átlagosan 0,1 °C-os középhőmérséklet-növekedést prognosztizál ebben az időszakban, az ír adatbázis 0,2 °C-os emelkedést, míg a svéd SMHI csak nagyon minimális változást vár. A következő 20 évben szintén a DMI várja a legmagasabb középhőmérsékletet (15,3 °C), míg a KNMI a legalacsonyabbat (12,4 °C). A C4I modell előrejelzése szerint a középhőmérséklet évente átlagosan, ha minimálisan is, de csökkenni fog, míg a többi modell továbbra is kismértékű növekedést vár. A C4I-szcenárió 15,5 °C-os prognózisa mellett szintén a DMI-adatbázis (15,3 °C) várja 2060–2080 között is a legnagyobb átlagos középhőmérsékletet, míg a KNMI (13,2 °C) továbbra is a legalacsonyabb értéket jelzi előre. A korábbi időszakokkal ellentétben a svájci ETHZ-adatbázis szerint – ha minimálisan is, de – 2060 után évente átlagosan 0,03 °C-kal fog csökkenni az átlagos középhőmérséklet, de ennek ellenére is közel 1 °C-kal melegebb lesz, mint 2040 és 2060 között. A többi szcenárió az előző 20 évre jelzett hőmérséklet-emelkedésnél egy kicsivel nagyobb növekedést jelez előre. A vizsgált időszak utolsó 20 évében már a C4I-klímaadatbázis prognosztizálja a legmagasabb átlagos középhőmérsékletet 16,7 °C-kal, míg a legalacsonyabb értéket az SMHI-szcenárió várja 13,6 °C-kal. A 2020–2100 közötti időszakban a maximális évi középhőmérséklet 18,1 °C, amelyet a C4I-klímaadatbázis prognosztizál 2093-ra és 2094-re, míg a legalacsonyabb hőmérsékletet a KNMI-adatbázis várja 10,0 °C-kal 2021-ben.

A vizsgált modellek közül a legnagyobb melegedést a C4I (+5,0 °C) és az MPI (+5,2 °C) prognosztizálta 2020 és 2100 között (21. ábra). Előrejelzésük szerint a várható csapadék mennyisége is emelkedni fog 11,8, illetve 62,1 mm-rel, ami évente átlagosan 0,2 mm, valamint 0,8 mm növekedést jelent. Csak a DMI-szcenárió jelzi előre az éves csapadékösszeg 116,0 mm-es csökkenését a teljes időszakra, amely évente átlagosan 1,4 mm-es mérséklődést jelent. A többi modell a csapadékösszeg

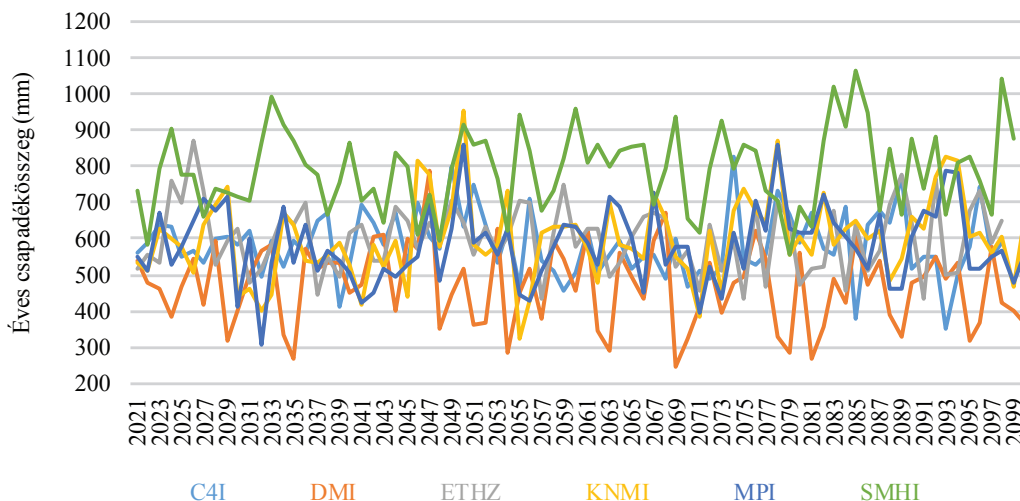
növekedését várja. A legcsapadékosabb időjárást az SMHI-adatbázis várja átlagosan 791,7 mm-rel, míg a legaszályosabbat a DMI 468,7 mm-rel, hozzátéve, hogy itt a legnagyobb a szórás értéke 23,5 százalékkal.

21. ábra: Évi középhőmérsékletek 2020 és 2100 között



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

22. ábra: Éves csapadékösszeg 2020 és 2100 között



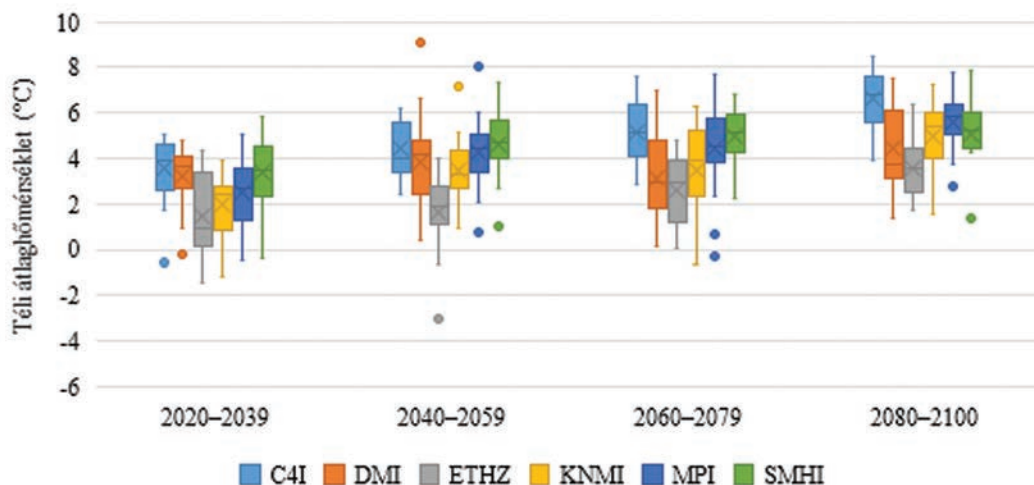
Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

Az egyes modellek igen eltérő időszakokra prognosztizálják a legcsapadékosabb és legaszályosabb időjárást (21. ábra). A KNMI-szenárió szerint a 2020-2040 közötti időszak lesz a legaszályosabb (átlagosan 559,5 mm), amelyhez a hat modell közül a legalacsonyabb évi középhőmérsékletet várja 11,8 °C-kal. A DMI-adatbázis – a legmelegebb középhőmérséklettel együtt – még ennél is kevesebb csapadékot jelez előre erre az időszakra (átlagosan 473,7 mm), de becslése szerint a 2080–2100 közötti időszakban lesz a legkevesebb csapadék, átlagosan 448,3 mm. Az MPI és az SMHI az

átlagos csapadékösszeg szerint a 2040–2060 közötti időszakot tekinti a legaszályosabbnak 555,6 mm-es és 767,4 mm-es átlagos értékkel. Ezzel szemben a C4I- és a svájci ETHZ-szenárió szerint 2060–2080 között várható a legkevesebb csapadék átlagosan 566,5 és 584,6 mm-rel. A legcsapadékosabb időszak a C4I-, a DMI- és az ETHZ-adatbázis alapján a 2040–2060 közötti időszak lesz, míg a KNMI, az MPI és az SMHI alapján a 2080–2100 közötti időszak.

A hat szenárió fokozatos átlaghőmérséklet-emelkedést prognosztizál 2100-ig a téli hónapokban, kivéve a DMI-adatbázist, amelynél a 2040–2059 közötti időintervallum 3,8 °C-os átlagos értéke a 2060–2079 közötti időszakra 0,7 °C-kal csökken. A legmelegebb téli időszakot a C4I-szenárió várja a 2080 utáni években átlagosan 6,6 °C-kal, a modell 2100-ig az MPI-adatbázissal együtt 3,1 °C-os átlaghőmérséklet-emelkedést vár. Ezzel szemben a leghidegebb téli időszakot a svájci ETHZ-adatbázis prognosztizálja, mivel a kezdeti 1,4 °C-os átlaghőmérséklet csupán 3,6 °C-ra emelkedik 2100-ig. Az egyes időszakokban a *box&whiskers* diagramok nem mutatnak egységes képet az átlaghőmérsékletek terjedelmében. Az első 20 évben 1,2 °C-os értékközben szóródnak az adatok, 2040–2059 között már megközelítőleg 5 °C az intervallum nagysága, majd 2100-ig 2 °C-ra csökken a tartomány értéke – az időbeli bizonytalanság hatására is. A fokozatos hőmérséklet-emelkedés eredményeként az utolsó 20 évben nem várható fagypont alatti átlaghőmérséklet a téli időszakokban, sőt az adatbázisok a téli időszakok több mint felében 3,5 °C-nál magasabb átlaghőmérsékleteket várnak (23. ábra).

23. ábra: Téli átlaghőmérséklet 2020 és 2100 között

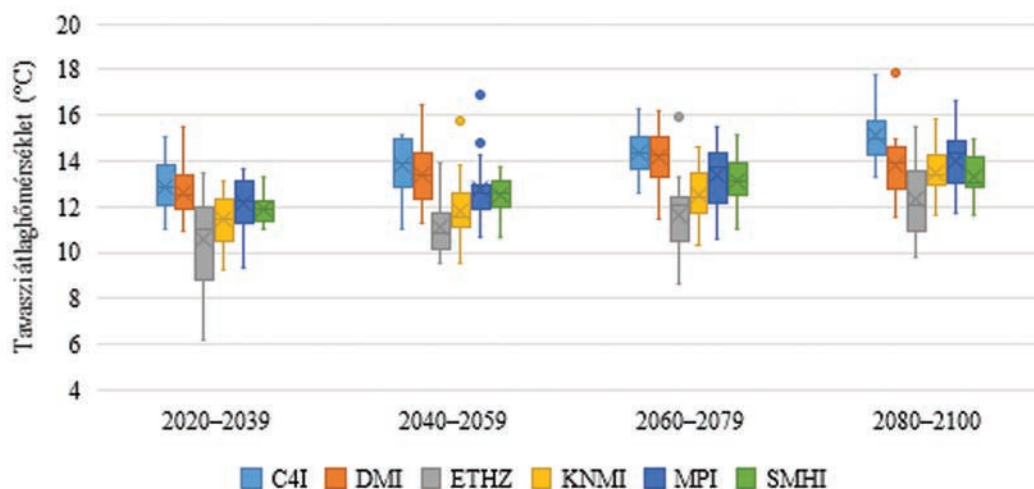


Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

Ugyanúgy, mint a téli hónapokban, a tavaszi időszakokban is fokozatos hőmérséklet-emelkedést prognosztizálnak a modellek. Egyetlen kivételt a DMI-adatbázis jelentett, amely szerint a 2080 utáni időszakban 0,3 °C-kal mérséklődni fog a tavaszi átlaghőmérséklet. A tavaszi hónapok hőmérsékletének növekedése mellett több csapadékkal is számolnak a modellek, a DMI-szenárió kivételével, amely szerint 35,5 mm-rel kevesebb csapadék várható 2100-ig (24. ábra). A 2020 utáni években a C4I, a DMI, az ETHZ és az SMHI modell szerint a leggyakoribb átlaghőmérséklet 11,0–12,7 °C között fog ingadozni, míg a KNMI és az MPI prognózisa szerint 10 °C alatti átlaghőmérséklet lesz a legtöbbször jellemző. A svájci modell szerint a 2020–2039 közötti időszak tavaszi hónapjaiban lesz a leghidegebb, ekkor 6,2 °C-os minimum-átlaghőmérséklettel is számolni lehet. A 2040–2059 közötti időtávban az ETHZ, a KNMI, az MPI és az SMHI modellek interkvartilis-terjedelme volt a legkisebb a *box&whiskers* ábrák alapján, azaz a várt átlaghőmérsékletek középső 50 százaléka egy igen szűk

értékközben szóródott. Ebben az időszakban is a C4I- és a DMI-adatbázisok várták a legmelegebb tavaszi időszakokat 13,8 és 13,4 °C-kal. A legcsapadékosabb tavaszi hónapokat 2060-ig az ír és a svájci modell várja. A svájci ETHZ modell a 2060–2079 közötti időszakban is a leghidegebb tavaszt prognosztizálta 11,7 °C-kal, sőt vár olyan tavaszi időszakokat is, ahol a minimum-átlaghőmérséklet a 10 °C-ot sem éri el. A vizsgált időszak utolsó negyedében az adatbázisok igen eltérő eredményeket produkáltak, a C4I továbbra is a legmelegebb tavaszt várja több mint 15 °C-kal, míg a DMI helyét az MPI vette át 14,0 °C-kal. A svájci modell még ekkor is vár olyan tavaszi hónapokat, amikor a minimum-átlaghőmérséklet nem haladja meg a 10 °C-ot, míg a többi modell esetében 11 °C felett várhatók a minimumértékek.

24. ábra: **Tavaszi átlaghőmérséklet 2020 és 2100 között**



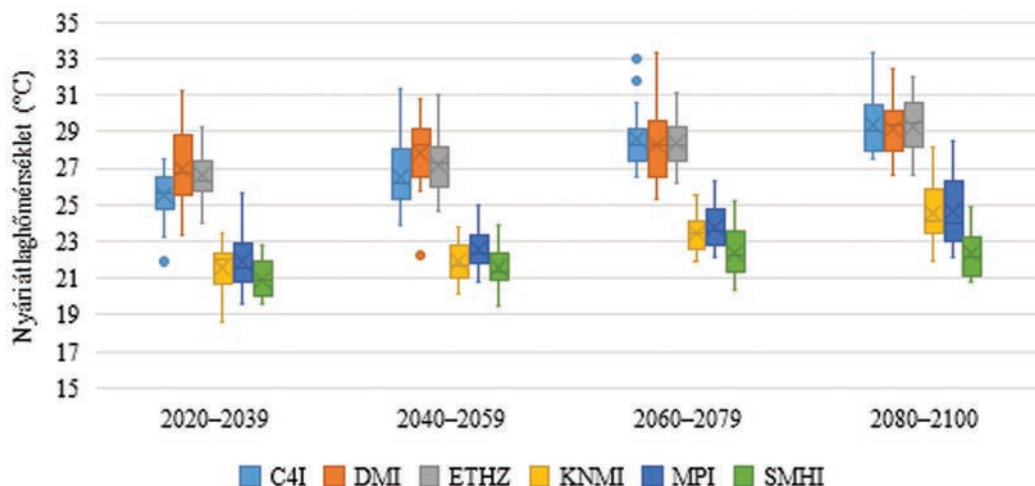
Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

A nyári átlaghőmérsékletek prognosztizálása során a vizsgált modellek két csoportba tartoztak (25. ábra). A C4I-, a DMI- és az ETHZ-szcenáriók jóval melegebb nyári időszakokat várnak, mint a KNMI-, az MPI- és az SMHI-adatbázisok. Az előbbi három modell a vizsgált időszak elejétől kezdve már 25 °C feletti átlaghőmérsékletet vár, amely 2100-ig fokozatos emelkedéssel megközelíti a 30 °C-ot. Ezzel szemben az utóbbi három klímaadatbázis az időszak elején még csak 21–22 °C körüli átlaghőmérsékletet jósol, amely 2100-ig sem éri el a 25 °C-ot. A 2020–2039 közötti időszakban a KNMI, az MPI és az SMHI modellek 20 °C alatti átlaghőmérsékletet is várnak, míg a DMI-szcenárió már 31,2 °C-os meleg nyarat is. A hőmérséklet emelkedése mellett a modellek a csapadékösszeg csökkenését jelzik előre, kivéve az SMHI modellt, amely csekély mértékű – 1,3 mm-es – növekedést vár, köszönhetően annak, hogy 2080 után 14,1 mm-es csapadékösszeg-emelkedést prognosztizál. A C4I-, a DMI- és az ETHZ-szcenáriók 2060-tól már 28 °C feletti átlaghőmérsékletet szimulál és a minimum-átlaghőmérsékletet egyik modell sem becsülte 25 °C alatt. A 2080-tól 2100-ig tartó szakaszban az SMHI-adatbázis várakozásai már jelentősebben elmaradtak a többi modell értékeitől, a 22,4 °C-os nyári átlaghőmérséklethez csupán alig 25 °C-os maximum-átlaghőmérsékletű nyári időszakok tartoznak.

A dán DMI-szcenárió várja a legmagasabb őszi átlaghőmérsékleteket a vizsgált időszak első felében 15,4 °C-kal, majd a 2080 utáni évekre az MPI modellel együtt már 16,2 °C-os őszi hónapokat prognosztizál. A svájci modell kivételével a hőmérséklet emelkedése mellett mindegyik modell a csapadékösszeg növekedését jósolja 2100-ig. A vizsgált időtáv első 20 évében a leghidegebb őszt az ETHZ-adatbázis becsülte 11,8 °C-kal, sőt ez a modell a legkiegyensúlyozottabb, mivel adatainak

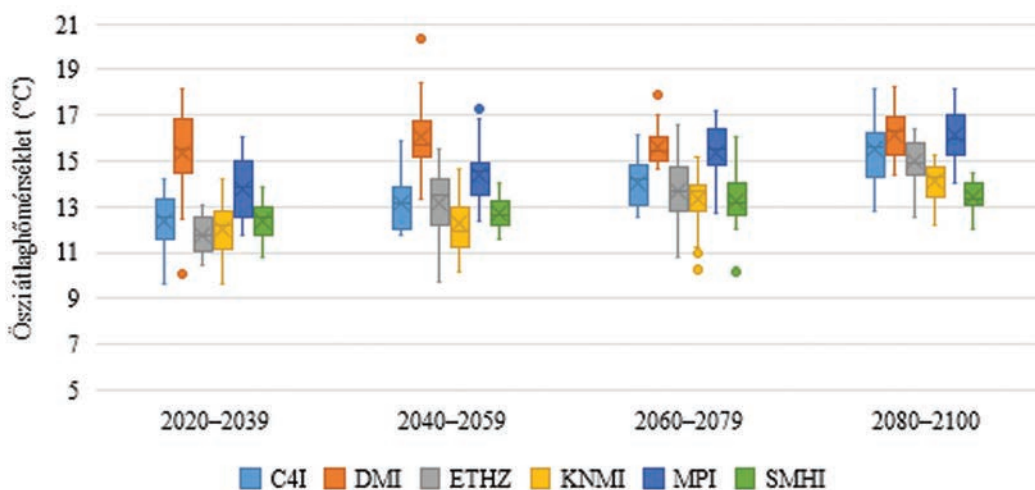
50 százaléka egy szűkebb tartományban szóródik. A 2040 utáni években a KNMI-adatbázis szerint lesz a leghidegebb ősz $12,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal, míg a legmelegebb időjárást a DMI-szcenárió prognosztizálja $16,0$, illetve $20,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os maximum-átlaghőmérséklettel. A hat modell 2060 utáni előrejelzése azonos-ságot mutat abban, hogy a minimum-hőmérsékletet $10,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ felett határozták meg, míg a maximum-hőmérsékletek $15,2\text{--}17,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ között ingadoznak. Ebben az időszakban a modellek már egységesebb képet mutattak, mint az időszak első felében. Az utolsó 20 évre vonatkozó előrejelzés terén az egységesség tovább erősödött, kivéve az SMHI esetében, mely továbbra is $14,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatti átlaghőmérsékletet prognosztizál az őszi hónapokra (26. ábra).

25. ábra: Nyári átlaghőmérséklet 2020 és 2100 között



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

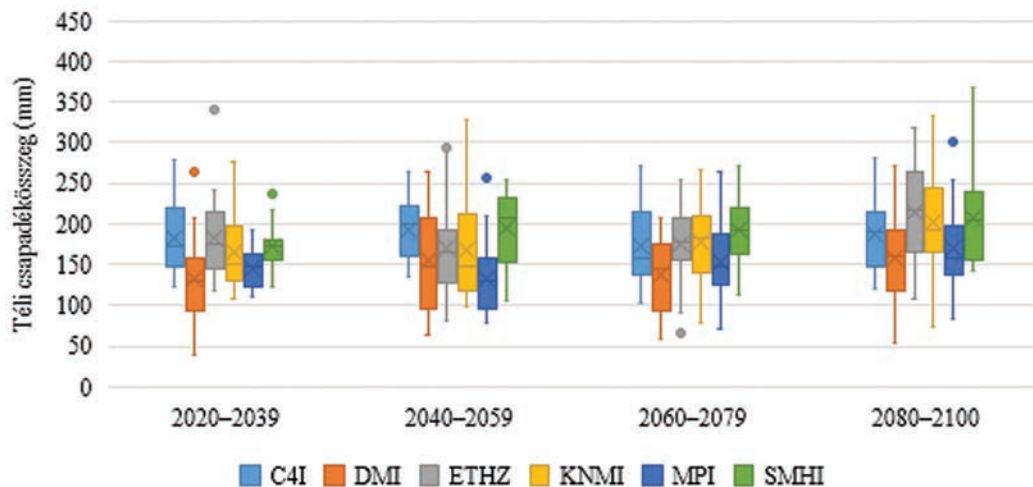
26. ábra: Őszi átlaghőmérséklet 2020 és 2100 között



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

A 2020 utáni években a C4I és az ETHZ modell átlagosan 180 mm feletti csapadékkal járó téli időszakokat becsül, míg a DMI és az MPI szerint a 150 mm-t sem fogja elérni az átlagos csapadék-összeg. Ebben az időszakban az MPI- és az SMHI-klímaadatbázisok mutatták a legkiegyensúlyozot-tabb csapadékeloszlást, mivel az interkvartilis-terjedelem értéke 82,0–115,0 mm között alakult. Mind a hat modell a hőmérséklet emelkedését prognosztizálta a 2040-et követő évekre, de ez a minimális melegedés nem minden esetben jár együtt a csapadékösszeg növekedésével. A DMI és az SMHI is 20 mm feletti átlagos csapadékösszeg-emelkedést vár, de a DMI modellnél előfordul csak 40 mm csapadékkal járó téli időszak is. Az ETHZ- és az MPI-adatbázisok szerint 12,1, illetve 11,4 mm-rel kevesebb csapadék várható. Ebben az időszakban az MPI és az SMHI modell is elvesztette korábbi feltűnő és kiegyensúlyozott eloszlását. A C4I és a DMI modell a 2060–2079 közötti időszakra közel 20 mm nagyságú csökkenést jelez előre a téli csapadékösszeg tekintetében, az SMHI pedig egy kis-mértékű mérséklődést (–2,1 mm), de még így is a legmagasabb csapadékösszeget modellezi erre az időszakra (191,7 mm). A 2080 utáni évekre mind a hat modell csapadékosabb teleket prognosztizál, 10–40 mm-es növekedést várnak az előző 20 évhez képest. A C4I és a DMI kivételével mindegyik 300 mm feletti maximum-csapadékösszegeket modellez (27. ábra).

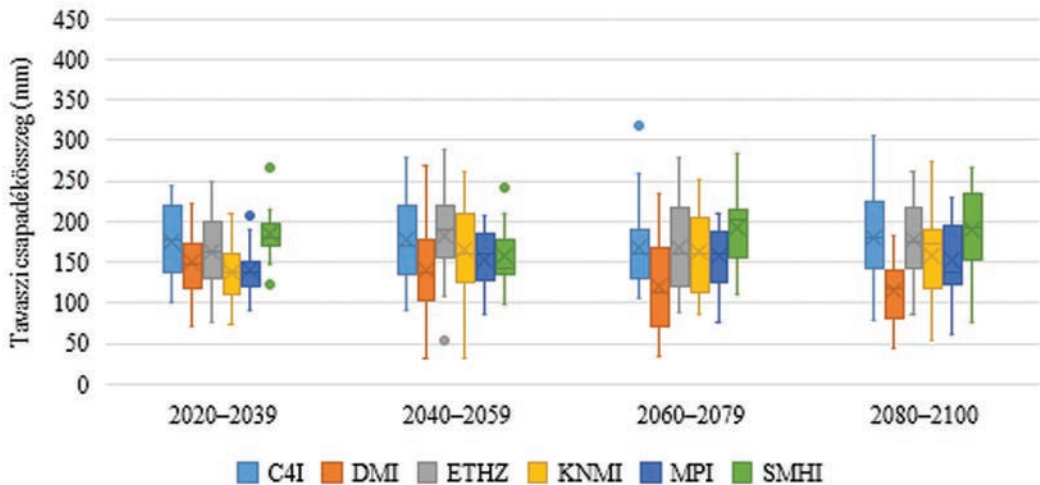
27. ábra: Téli csapadékösszeg 2020 és 2100 között



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

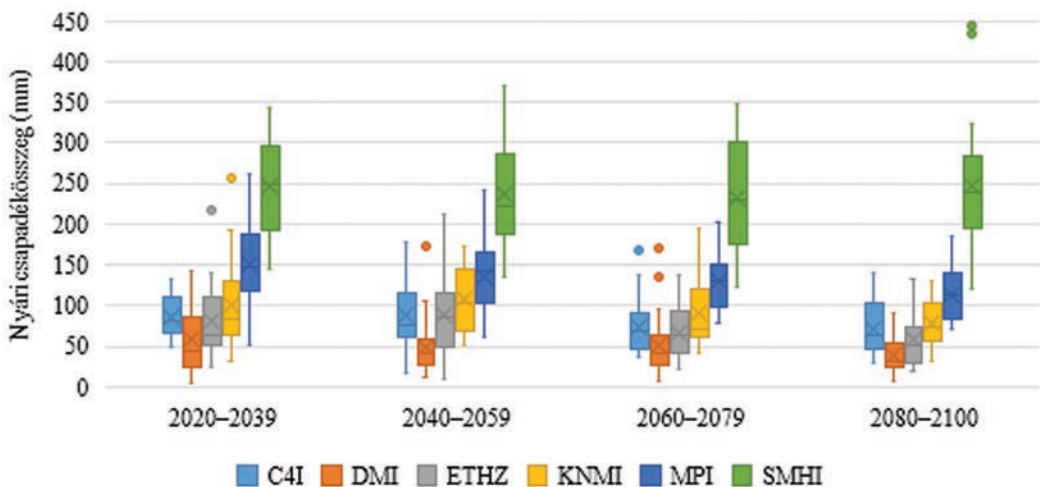
A tavaszi hónapok csapadékösszegének fokozatos csökkenését prognosztizálja a dán modell, a kezdeti, elég alacsony 150,4 mm-es érték az időszak végére 114,7 mm-re fog csökkenni. A DMI-szenárió prognózisa a csapadékösszeg mérséklődése mellett ráadásul 1,2 °C-os átlaghőmérséklet emelkedést is becsült 2100-ig a tavaszi időszakokban. A többi modell összességében a tavaszi átlagos csapadék-összeg emelkedését becsüli, amely némileg kompenzálja a várható átlaghőmérséklet-emelkedést. A 2020–2039 közötti időszakra a C4I és az SMHI modell becsülte a legcsapadékosabb időjárást 174,3, illetve 184,2 mm csapadékkal 12–13 °C-os átlaghőmérséklet mellett. A 2040 utáni tavaszi hónapokban a C4I mellett már a svájci modell prognózisa mutatja a legmagasabb csapadékösszeget 183,7 mm-rel és hűvös, 11,1 °C-os hőmérséklettel. Ebben az időszakban a DMI és a KNMI modell 32,0, illetve 33,0 mm-es minimum-csapadékösszeget is szimulált. Az előrejelzések alapján az MPI (+3,5 mm) és az SMHI (+35,3 mm) kivételével a csapadék csökkenése várható 2060 után, ráadásul a dán modell továbbra is tartja, hogy lesznek igen csapadékszegény tavaszok is (35,0 mm-es minimumértékeket jelez előre). A scenáriók 2080 után sem egységesek, ekkor a C4I 11,0 és az ETHZ 10,3 mm-es csapadéknövekedése mellett a többi adatbázis kismértékű csökkenést jelez előre (28. ábra).

28. ábra: Tavaszi csapadékösszeg 2020 és 2100 között



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

29. ábra: Nyári csapadékösszeg 2020 és 2100 között



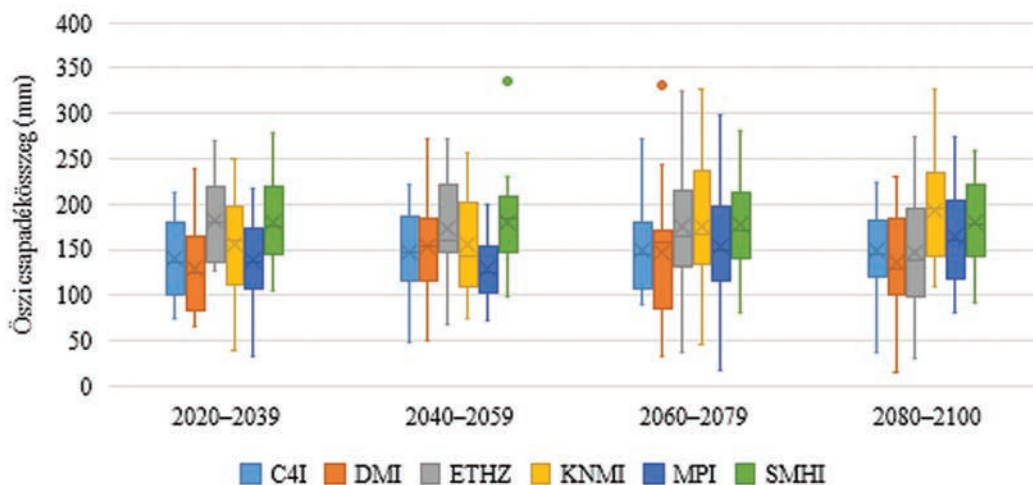
Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

A nyári csapadékösszeg előrejelzése terén a C4I, a DMI, az ETHZ és a KNMI modell 40–100 mm közötti csapadékokat vár, az MPI 110–150 mm közötti értéket, míg az SMHI 230–250 mm-t a 2020–2100 közötti nyári hónapokban. Az előbbi négy adatbázis igen meleg nyári hónapokat prognosztizál – közel 30 °C-os hőmérséklettel az időszak végére –, amelyhez fokozatosan csökkenő csapadékmennyiség tartozik majd. A 2020 utáni évekre a dán modell becsülte a legkevesebb csapadékokat, mely átlagosan 58,8 mm lesz a nyári hónapokban, sőt olyan időszak is várható, amikor a minimum-csapadékösszeg 6,0 mm lesz. Ezzel ellentétben a svéd modell 343 mm-es maximumot is becsült ebben az időszakban. A következő időszakra az SMHI- (–8,8 mm), a DMI- (–9,6 mm) és az MPI-adatbázis (–13,5 mm) is a csapadék csökkenését jelzi előre, de a svéd modell még így is igen csapadékos nyarat vár 370 mm-es maximummal. A másik három modell kismértékű növekedést jelez

előre. Az előrejelzések a 2060 utáni évekre a DMI kivételével a csapadék csökkenését becsülték, amely a 2080–2100 közötti években is folytatódni fog. Az utolsó időszakban a svéd modell jelenti a kivételt, mivel 14,1 mm-es csapadéknövekedést vár, ráadásul minimális hőmérséklet-visszaesést is prognosztizál a modell. Összességében a svéd modell kivételével a többi 5 scenárió 13–35 mm-es csapadékcsökkenéssel számol a következő évtizedek nyári hónapjaiban (29. ábra).

A viszonylag alacsony nyári csapadékösszeggel ellentétben öt modell is jóval magasabb csapadékokat becsült az őszi időszakokra (30. ábra). A svéd modell érvényessége lesz érdekes a jövőben, mivel csapadékszegényebb őszi hónapokat szimulált a nyári bőséges csapadékösszeg projekciójához képest. Az előző évszakokra vonatkozó előrejelzésekkel ellentétben az őszi hónapokra várt csapadékösszeg eloszlását mutató *box&whiskers* ábrák jóval egyenletesebb eloszlást mutatnak. A 2020–2039 közötti évekre a svájci és a svéd modell jelez előre jelentősebb csapadékokat (180,8 és 179,3 mm). A többi adatbázisban közelítőleg azonos átlagos csapadékösszeget közölnek, de a KNMI és az MPI 40,0 és 33,3 minimum-csapadékösszegeket is prognosztizál erre az időszakra. A két legalacsonyabb csapadékokat projektáló modell (C4I és DMI) a 2040 utáni évekre 7,0, illetve 23,8 mm-es növekedést jelez előre, míg a svájci, holland és német modell kismértékű csökkenést. Az utóbbi két modell 2060 után 20,5, illetve 24,7 mm-es emelkedést becsült, így az átlagos csapadékösszeg 176,1 mm-re, illetve 153,4 mm-re emelkedett. Ebben az időszakban a DMI-, az ETHZ-, a KNMI- és az MPI-klímaszcenárió is igen szélsőséges csapadékokat vár, az adatbázisok tartalmaznak 18,0 mm-es minimumértékeket és 331,0 mm-es maximumértékeket is. A dán modell 2080 után továbbra is a csapadék csökkenését becsülte, így az átlagos csapadékösszeg értéke 136,9 mm lesz, amely a legkisebb a hat modell tekintetében. A svájci modell egy közel 30 mm-es csökkenést jelez előre, így összességében 35,1 mm-rel kevesebb csapadékokat prognosztizál az őszi időszakokra. A dán KNMI- és a német MPI-szcenárió továbbra is a csapadék növekedését jelzi előre, ennek megfelelően összességében 35,6, illetve 27,4 mm-rel több csapadékokat prognosztizálnak 2100-ig.

30. ábra: **Őszi csapadékösszeg 2020 és 2100 között**



Forrás: Készült az AKI Adatalemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

Az egy évre jutó hőségnapok számának szóródása igen magas volt a 2001–2014 közötti időszakban, míg a svéd modell alig 5 hőségnapot határozott meg, addig a dán modell közel 70-et. Az Agri4Cast szerint 2001 és 2014 között átlagosan 71–81 hőségnap volt évente Magyarországon. A scenáriók szerint a 2020 utáni évtizedben mind a hat modellenél emelkedni fog a hőségnapok száma, a legnagyobb növekedést a DMI- és a KNMI-klímaadatbázis várja (+9, illetve +8 nap).

A 2030-as évekre az ír modell várja a hőségnapok drasztikus emelkedését (+17 nap), így az megközelítette a DMI 71 hőségnapos és az ETHZ 80 hőségnapos értékét, továbbá a KNMI és az MPI modell is jelentős bővülést jelez előre. Ennek megfelelően az átlagos hőségnapok számának növekedése várható 43-ról 50 napra. A 2040 utáni évek jelentős változást nem mutatnak, de az ezt követő évtizedekben igen nagy szórás figyelhető meg. A dán modell a 2050-es években a hőség napok emelkedését prognosztizálja (+11 nap), a 2060-as években pedig 8 napos csökkenését. A holland scenárió 16 napos, a német modell 9 napos emelkedést vár 2060 után, míg a 2070-es években a dán és a svéd modell prognózisa vár 10, illetve 11 napos növekedést. A holland KNMI-klímaadatbázis 2080 után további 12 napos növekedést jelez, de a várt hőségnapok száma várhatóan még így is jelentősen elmarad az ír, a dán és a svájci modellek közel 100 hőségnapos értékétől. Az előrejelzések szerint az előrejelzés során figyelembe vett évszázad utolsó két évtizedében csökkennek az időjárási ingadozások, minimális változások várhatók, kivéve a dán modellt, amely újabb 9 hőségnap-emelkedést jelez. Összességében a legkiegyenlítettebb előrejelzést az ír C4I- és a svájci ETHZ-szcenáriók mutatták, melyek szerint fokozatosan emelkedni fog a hőségnapok száma 2100-ig (5. táblázat).

5. táblázat: Az egy évre jutó hőségnapok ($T_{\max} \geq 30$) átlagos száma az adott időszakokban

	C4I	DMI	ETHZ	KNMI	MPI	SMHI	Átlag
2001–2014	46,36	66,64	67,21	15,21	25,62	4,63	37,61
2020–2029	53,10	75,50	74,40	23,70	21,50	11,25	43,24
2030–2039	69,90	70,90	80,10	33,40	34,30	13,43	50,34
2040–2049	67,10	74,20	80,70	28,50	32,00	13,14	49,27
2050–2059	72,50	85,50	86,30	28,60	36,10	10,00	53,17
2060–2069	80,50	77,50	86,60	44,30	45,20	15,00	58,18
2070–2079	89,20	87,90	91,90	41,90	47,50	26,11	64,09
2080–2089	90,60	86,80	96,80	53,90	54,90	19,00	67,00
2090–2100	95,22	95,64	97,11	52,45	54,27	18,44	68,86
Változás 2001–2014 és 2090–2100 között	205%	144%	144%	345%	212%	399%	183%

Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

A hőségnapok fokozatos emelkedésének megfelelően a fagyos napok száma fokozatosan csökkenni fog a következő évtizedekben. Míg a hat modell átlagos értéke alapján 2001-2014 között 38 fagyos nap volt (Agri4Cast adata 27,57 fagyos nap), addig az évszázad végére már csak átlagosan 28 ilyen nap várható. A 2020-as évekre a dán és a svéd modell a fagyos napok minimális növekedését várja, majd ezt követően egészen 2060-ig mind a hat modell az egy évre jutó fagyos napok fokozatos csökkenését prognosztizálja. A legnagyobb változást a svájci és a német modell várja, várakozásaik szerint a fagyos napok száma 2060-ig 32, illetve 35 nappal fog mérséklődni. A következő két évtizedben az előrejelzések ellentétes irányú változásokat várnak, melyek drasztikus mértékben nem lesznek hatással a fagyos napok számára. Ezt követően 2080-tól újabb jelentős visszaesést várnak a modellek, a svájci adatbázis 21 napos, a dán és a holland scenárió 14-14 napos csökkenést prognosztizál. A teljes időszakot alapul véve a fagyos napok számának legnagyobb csökkenését a svájci (–32 nap) és a német (–35 nap) modell jelzi (6. táblázat).

6. táblázat: **Az egy évre jutó fagyos napok ($T_{\min} \leq 0$) átlagos száma az adott időszakokban**

	C4I	DMI	ETHZ	KNMI	MPI	SMHI	Átlag
2001–2014	59,43	50,93	101,86	84,07	57,43	40,43	65,69
2020–2029	46,30	53,00	84,90	80,30	49,80	45,40	59,95
2030–2039	44,50	47,50	80,20	72,40	35,70	36,70	52,83
2040–2049	35,70	45,40	74,60	64,00	25,90	35,90	46,92
2050–2059	32,30	41,70	69,90	56,60	22,70	31,80	42,50
2060–2069	33,50	43,30	58,00	53,70	31,00	30,30	41,63
2070–2079	29,10	48,60	69,50	51,80	12,80	34,40	41,03
2080–2089	21,60	34,90	48,10	37,40	14,33	29,20	30,92
2090–2100	15,67	33,91	48,67	33,27	13,60	24,80	28,32
Változás 2001–2014 és 2090–2100 között	26%	67%	48%	40%	24%	61%	43%

Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

Eredmények

Az előző fejezetekben bemutatott hat klímascenárióval futtattuk a 4M modellt az összes bázis-időszakban szereplő tesztüzemre vonatkozóan 2020-tól 2100-ig, az egyes üzemekre jellemző inputfelhasználás, talajtani viszonyok és az üzemek lokalitását megadó telephely településsel megfelleltethető (település-központ alapján) meteorológiai adatsorok mellett. Az így előállt hatféle variációt az „ensembles” megközelítésnek megfelelően átlagoltuk, így kaptuk meg az alább részletezett, regionális bontásban is bemutatott eredményeket.

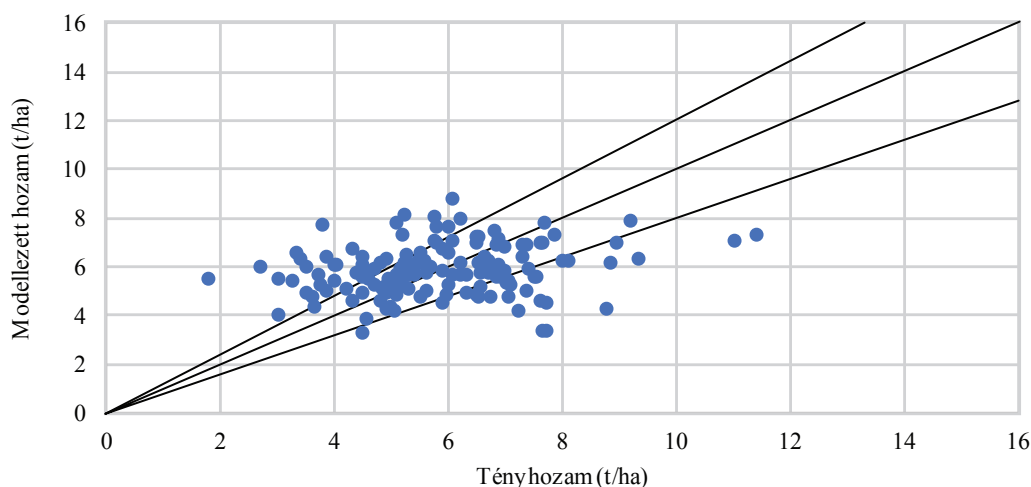
Az eredmények ismertetése során fontos visszautalni a felállított hipotéziseinkre:

- A klímaváltozásra visszavezethető, fokozatosan gyorsuló ütemű hozamcsökkenés 2100-ig.
- A vetés és a betakarítás optimális idejének fokozatos eltolódása.
- Hozamcsökkenés agrotechnikai beavatkozások útján – optimális műtrágyahasználattal, illetve öntözéssel – mérsékelhető.

Búza

Kalibrálás és validálás szántóföldi parcellaadatokon

31. ábra: A búza tényhozama és a becsült hozama a kiindulási paraméterekkel

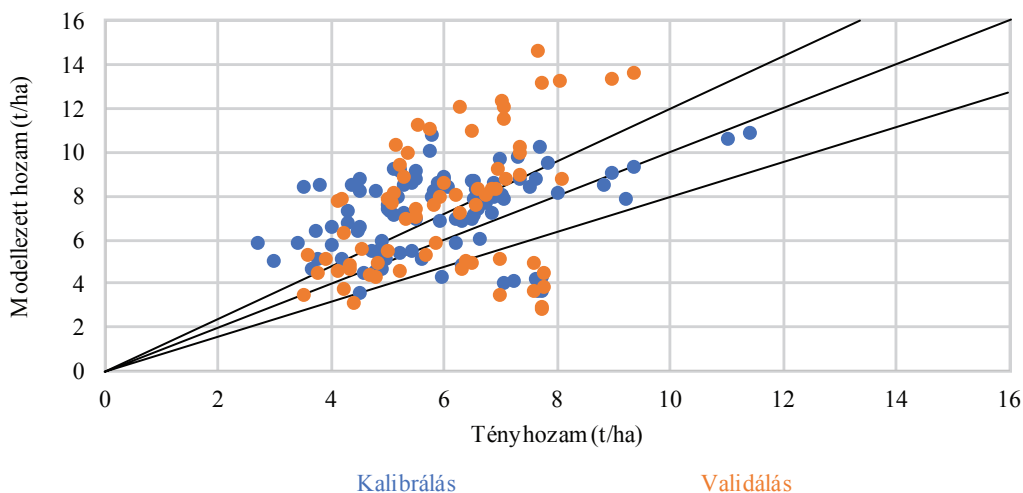


Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

A 4M modell őszi búzára elvégzett kalibrálása és validálása során a modellezett hozamot a ténylegesen elért terméshozammal vetettük össze. A kalibrálás során a vízstressz paramétere 1,0-ről 1,6-ra, a potenciális függvény paramétere 0,0014-ről 0,0016-ra nőtt. A kiinduló fázis meredeksége 0,15, azaz a modell mind az alacsony, mind a magas tényhozamokra 6 tonna/hektár körüli hozamot becsül, amit a 31. ábra is szemléltet. A kalibrálás eredményeképpen az alacsonyabb hozamokra a modellezett hozam is alacsonyabb, a magasabb hozamokra magasabb, de az átlagos hiba 1,34, azaz közel másfél tonna/hektárral felülbecsül a modell (32. ábra). A meredekség jelentősen javult, a hibamutatók értéke viszont romlott. Látható, hogy az R^2 értékek valamelyest javultak a kalibráció után (7. táblázat). A kalibrációnál főként a CV(RMSE) érték változásának van jelentősége. Amennyiben ez az érték 40 körüli vagy az alatti értéket vesz fel, akkor már nagy biztonsággal elfogadható, hogy a modell jól becsüli az országos hozamokat. Figyelembe véve, hogy az átlagos tényhozam 5,9 tonna/hektár, a felülbecslés átlagosan 22,5 százalék, ezzel a 22,5 százalékkal korrigáltuk a 4M által becsült

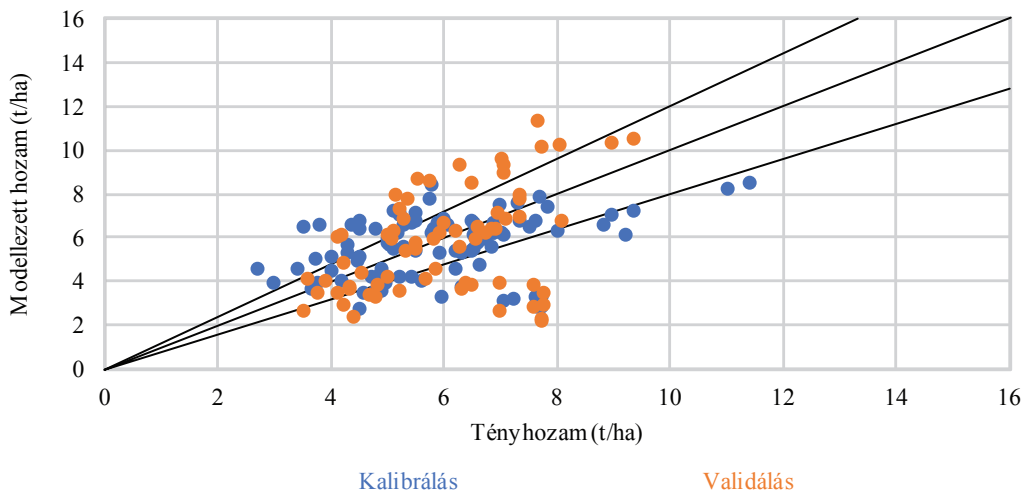
hozamokat. A korrekció eredményeképpen a hibamutatók értéke javult, az erős felülbecslés mérsékelt alulbecslésre módosult (33. ábra).

32. ábra: A búza tényhozama és a becsült hozam a kalibrált 4M modellel



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

33. ábra: A búza tényhozama és a korrigált modellezett hozam



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

7. táblázat: A kiinduló és a kalibrált állapothoz tartozó hibamutatók értékei

Verzió	Módosított értékek		Egyenlet			Hibamutatók			
	vízstressz (c eh.)	potenciális (a eh.)	meredekség	konstans	R ²	BIAS	RMSE	CV(RMSE)	relatív hiba max. 20%
Kiinduló	1,0	0,0014	0,15	5,01	0,05	-0,01	1,73	29,10	76,29
Kalibrálás	1,6	0,0016	0,40	4,88	0,13	1,34	2,35	39,54	37,11
Validálás	1,6	0,0016	0,96	1,70	0,19	1,47	2,61	43,23	26,09
Korrigált Kalibrálás	1,6	0,0016	0,31	3,78	0,13	-0,30	1,73	29,05	53,61
Korrigált Validálás	1,6	0,0016	0,74	1,32	0,19	-0,22	2,15	35,60	44,93

Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

Vetés dátumának modellezése

Vetési szabály kiválasztása

A korábban leírtaknak megfelelően úgy kívántuk modellezni a termelők klímaváltozáshoz történő, a vetés idejéhez kapcsolódó adaptációját, hogy olyan információk alapján válasszuk meg a vetés időpontját, amelyek a gazdák számára is rendelkezésre állnak. Ennek megfelelően az időjárási viszonyokat vettük figyelembe. A búza vetési dátumának szabályát négy lehetőség közül választottuk ki. Dobor *et al.* (2016) 7 nap 12 °C szabályát tekintettük kiindulópontnak, ami az őszi búza esetén legalább 7 napig tartó legfeljebb 12 °C-os napi középhőmérsékletet jelent. Emellett vizsgáltuk a 7 nap 10 °C, illetve 14 °C és az 5 nap 12 °C kombinációkat is.

8. táblázat: A modellezett és a parcellaszintű adatgyűjtésből származó vetési dátumok összehasonlítása

	Átlag	Medián	Szórás	Minimum	Maximum	5. percentilis	95.percentilis
7–12	295	299	10,54	277	321	277	302
5–12	290	288	9,55	275	300	275	300
7–10	308	303	9,78	297	332	298	324
7–14	290	288	10,55	273	302	277	302
Tény- adatok	289	286	11,99	261	330	274	313

Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

A 8. táblázatban a parcellaszintű adatgyűjtésből származó tényleges vetési dátumok és a négy különböző vetési szabályhoz kapcsolódó Agri4Cast-adatok alapján modellezett eredmények és összehasonlítása szerepel a 2014–2016 közötti időszakra vonatkozóan. Az átlag, a medián, a minimum, a maximum és a percentilis mutatóknál a nap sorszáma szerepel, azaz a parcellaadatok alapján 2014 és 2016 között átlagosan az év 289. napján (október 16-án) vetették a búzát.

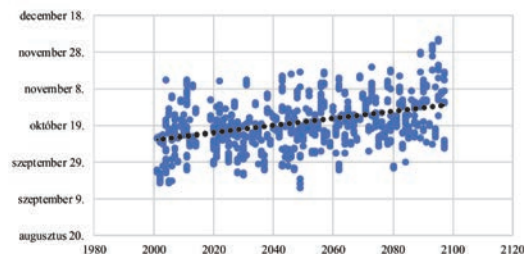
Az átlag, a medián és a minimumértékek szerint a 7-12 és a 7-10 szabály esetén késői a vetés a tényadatokhoz viszonyítva. Az 5-12 és a 7-14 kombinációknál az átlag és a medián megegyezik, de a minimum, maximum és a szórás szerint a 7 nap 14 °C szerint modellezett vetési dátumok közelebb állnak a tényadatokhoz, mint az 5 nap 12 °C. Az összes mutatót figyelembe véve a választásunk a 7-14 szabályra esett, ugyanis ez a szabály áll legközelebb a parcellaszintű adatgyűjtésben szereplő termelők jelenbeli gyakorlatához.

A modellezett vetési és biológiai érettségi dátumok klímaszcenárióként

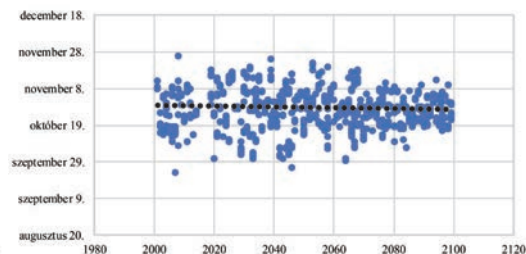
Modelleredményeink alapján az őszi búza vetési időpontja várhatóan későbbre tolódik (34–39. ábra). A legkésőbbi vetési időpontot a 2020–2100. évekre országos átlagban az MPI (német) klímamodell eredményezte, ez esetben október 15-ről október 31-re tolódik, míg a legkisebb változást a vetési paraméterek tekintetében az SMHI (svéd) modellel kaptuk. A Hollandiában (KNMI), Svájcban (ETHZ), Írországban (C4I), Németországban (MPI) és Svédországban (SMHI) kifejlesztett modellek 2020–2100 közötti időszakra vonatkozó előrejelzései szerint a vetési idők jóval nagyobb intervallumon belül változtak, mint a dán (DMI) modell esetében.

A hőmérséklet-növekedés következtében az őszi búza fenológiai fázisai várhatóan előbbre tolódnak, amellyel összefüggésben az érés is korábban fog bekövetkezni (40–45. ábra). A hat klímaszcenárió közül a német (MPI) modellnél a biológiai érettségi idők jóval nagyobb intervallumon belül változtak, mint a többi modell esetében.

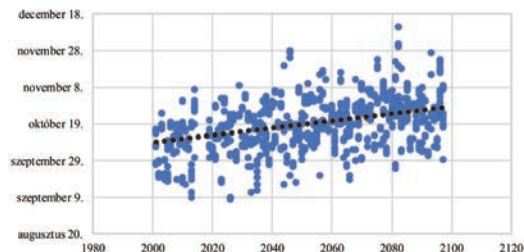
34. ábra: C4I vetési dátumok



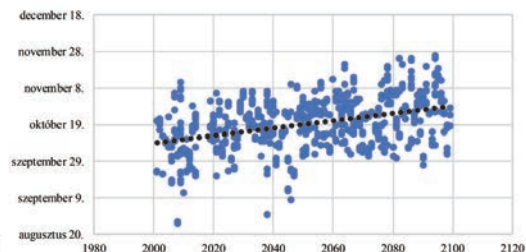
35. ábra: DMI vetési dátumok



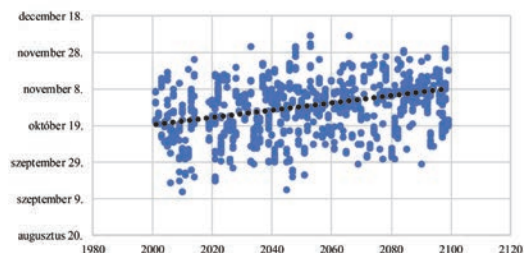
36. ábra: ETHZ vetési dátumok



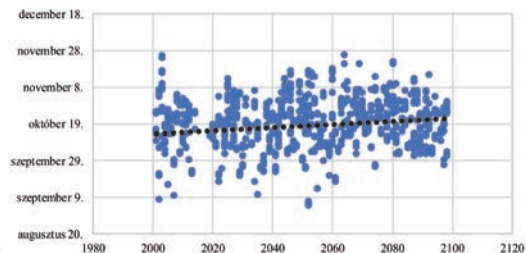
37. ábra: KNMI vetési dátumok



38. ábra: MPI vetési dátumok

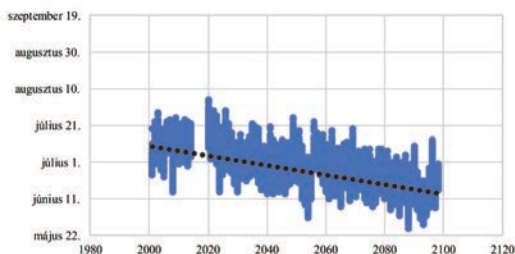


39. ábra: SMHI vetési dátumok

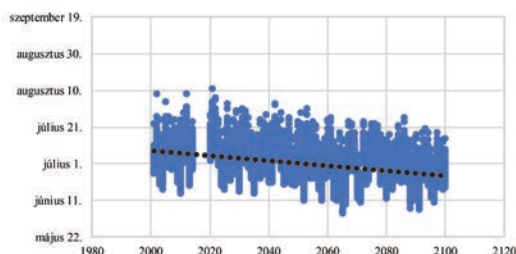


Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

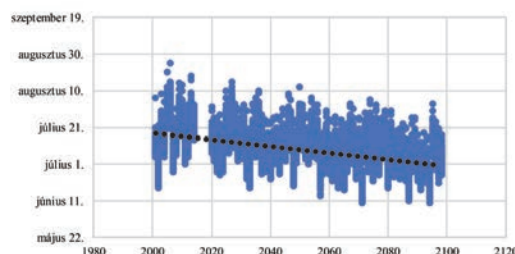
40. ábra: C4I biológiai érettségi dátumok



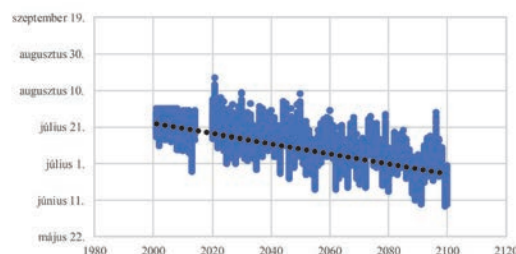
41. ábra: DMI biológiai érettségi dátumok



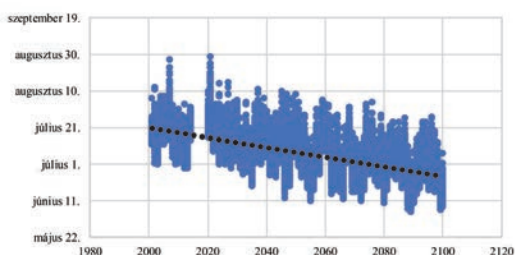
42. ábra: ETHZ biológiai érettségi dátumok



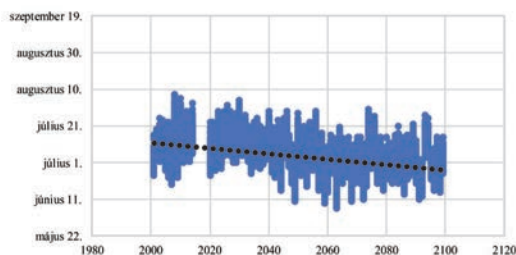
43. ábra: KNMI biológiai érettségi dátumok



44. ábra: MPI biológiai érettségi dátumok



45. ábra: SMHI biológiai érettségi dátumok



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

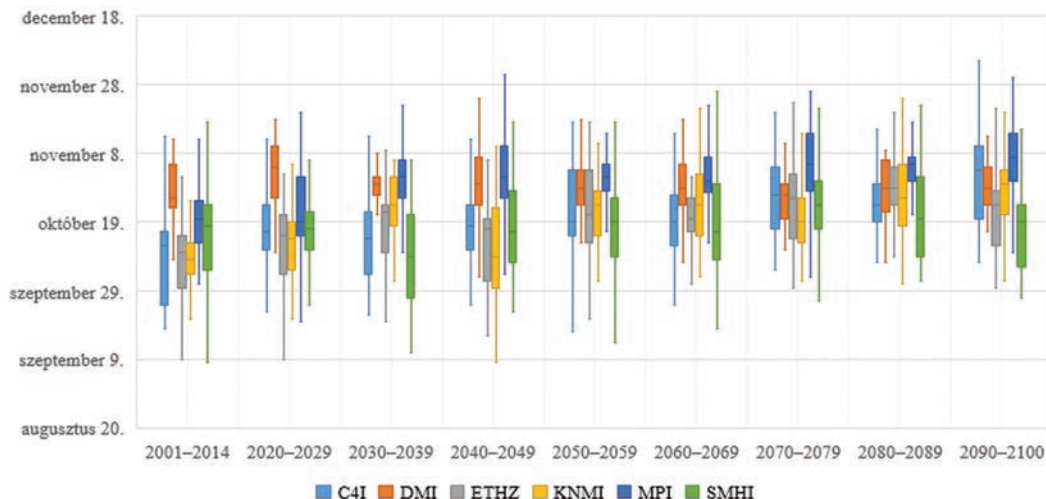
Az általunk modellezett vetési és biológiai érettségi dátumok igazodtak Demidowitz *et al.* (2000) eredményeihez, miszerint a klímaváltozás hatására Lengyelországban is a vetési és betakarítási időszakok elmozdulására kell számítani. Ezzel összefüggésben a vetésszerkezet és a termés hozam változása várható a jövőben.

Az egyes időjárási modellek vetési idő becslésénél évtizedes bontásban jelentősen szórtak az eredmények egymáshoz képest és önmagukon belül is (46. ábra). A legnagyobb változékonyság a vetési időpontokban a 2040–2049 közötti időszakban jelentkezett. A modelleket összehasonlítva megállapítható, hogy a legkisebb szórást a dán időjárási modell (DMI) adta az egyes évtizedeket nézve, azaz ez becsülte a legkiegyensúlyozottabban a vetési dátumokat.

Összességében elmondható, hogy 2100-ig több mint 12 nappal tolódik későbbre a vetés ideje, a 2050-es évekre pedig átlagosan 9 napos késést becsülnek a modellek.

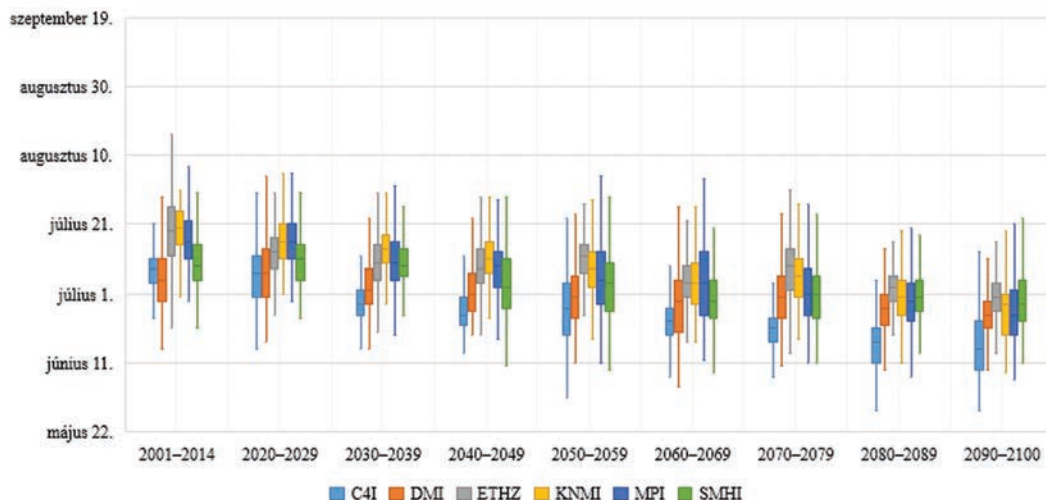
A leírt eredmények a változás nagyságrendjében és irányában is megfelelnek Dobor (2016) eredményeinek (17 ± 6 napos eltolódás a vetési időben), viszont ellentmondanak Erdélyi (2008) kutatásainak, ahol a búza vetési idejének előbbre hozása biztosíthatja az ideálisabb viszonyokat az őszi búzáknak.

46. ábra: A vetési dátumok összehasonlítása



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

47. ábra: A biológiai érettségi dátumok összehasonlítása



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

A biológiai érettségi dátumok tízévenkénti összehasonlításakor azt tapasztaltuk (47. ábra), hogy mind a hat klímascenárionál kisebb a boxplotok nagysága, mint a vetési dátumoknál, azaz kevésbé szór a biológiai érettségi dátumokra a becslés, mint a vetési időpontokra. Ha a 100 éves periódust egyben vizsgáljuk, akkor megfigyelhető a biológiai érettségi időpontok fokozatos előremozdulása, így az őszi búza betakarítási időszaka is várhatóan hamarabb fog bekövetkezni 2100-ban, mint napjainkban.

Az őszi búza betakarítására vonatkozó, 2001–2014 közötti biológiai érettségi dátumokat a hat klímaszcenárió átlagában megjelenő adatokkal összevetve megállapítható, hogy a 2090–2100. évek átlagában országosan 17 nappal hamarabb következik be az őszi búza érése, mint a jelenleg megszokott, de becsléseink alapján már a 2050-es évekre is átlagosan 9 nappal hamarabb indulhat meg a betakarítás, mint a jelenlegi viszonyok között.

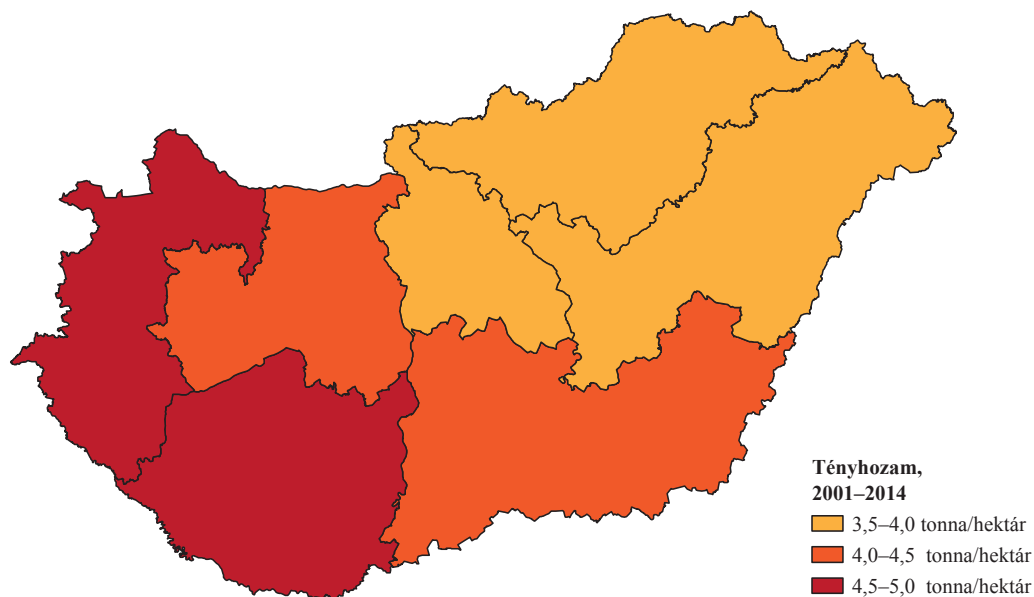
Ezen eredmények nagyságrendileg és irányukban is megfelelnek a szakirodalmi adatoknak (Erdélyi, 2008; Dobor, 2016), ahol szintén kb. 10 nappal korábbra tolódó betakarítási időpontok jelennek meg.

Összességében kijelenthetjük, hogy a modellfuttatások alapján úgy a vetés, mint a betakarítás időpontjában egyértelmű eltolódás következik be már 2050-re: a vetések későbbre tolódnak, a betakarítás ideje pedig előretolódik a gyorsabb érés következtében. Ezzel az őszi búza esetében igazolhatóvá válik tanulmányunk hipotézise, mely szerint ez a változás megtörténik, és már a 21. század közepére jelentős alkalmazkodási kényszer jelenik meg az agrotechnológiában.

Hozamok modellezése

Az őszi búza esetében a referencia-időszaki (2001–2014) országos átlag 4,25 tonna/hektárra tehető. Ezen belül régióként jelentős eltérések tapasztalhatók, a 48. ábra tanulsága szerint a 2001 és 2014 közötti időszakra vonatkozó ágazati adatok alapján számított átlaghozamok a Dél-Dunántúl, a Nyugat-Dunántúl és a Közép-Dunántúl esetében lényegesen meghaladják az észak-magyarországi, az észak-alföldi, közép-magyarországi átlaghozamokat. Amennyiben az átlaghozamokat évenkénti bontásban elemezzük, megállapítható, hogy országosan az őszi búza temésingadozása igen jelentős, ± 30 százalékra tehető. Ez egyrészt az időjárási szélsőségekkel, a bizonytalan időjárási feltételekkel magyarázható, másrészt pedig az őszi búza jó adaptációs képességét kihasználva olyan területeken is termesztik a növényt hazánkban, amelyek csak feltételesen alkalmasak a hatékony termesztés megvalósítására.

48. ábra: Ágazati adatok alapján számított átlaghozamok 2001 és 2014 között



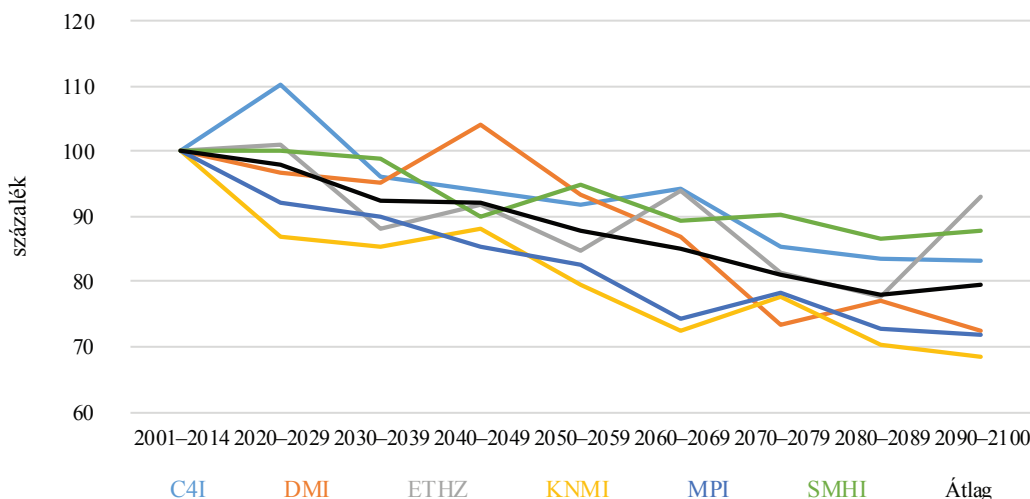
Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

A klímaváltozás hatására, adaptáció hiányában az őszi búza termésmennyiségének csökkenésére számíthatunk (Challinor *et al.*, 2014), így a káros következmények enyhítéséhez három agrotechnikai tényező (vetésidő, tápanyagellátás, öntözés) hatását vizsgáltuk.

A 49. ábrán az őszi búza hozamainak százalékos változását mutatja 2100-ig a 2001–2014 referencia-időszakhoz viszonyítva. Ebben az esetben az adaptációs lehetőségek közül csak a vetésidő optimalizálásával számoltunk. A 2001–2014 közötti időszak terméseredményeit tekintettük 100 százaléknak, és ehhez viszonyítottuk az őszi búza hozamában jelentkező eltérést tízévenkénti bontásban. A hat klímaszcenárió átlagában megállapítható, hogy a hozameredmények lineárisan csökkenő tendenciát mutatnak, 2100-ra a klímaszcenáriók átlagában 21 százalékos termés csökkenés prognosztizálható. Ez igazodik Fodor *et al.* (2014) eredményeihez is, mely szerint az őszi búzánál 30 százalékos termés csökkenés várható hazánk területére a 21. század végére. Hasonló eredményre jutott Alexandrov (1997) Bulgáriában és Özdoğan (2011) Észak-Törökországban. Ez ellentétben áll Dobor (2016) kutatási eredményeivel, amely termésátlag-növekedést jósol a búzára vonatkozóan. Úgy szintén ellenkezőek az eredmények Erdélyi (2008) kutatásával, akinek legfontosabb megállapítása az, hogy az őszi búza klimatikus igényei várhatóan a jövőben is teljesülnek, sőt a hozamok növekedése várható. A két szerző hozamnövekedési prognózisa egyértelműen eltérő alapokon nyugszik, mert Dobor a vetési időszak későbbre tolódását, míg Erdélyi korábbi vetési időket prognosztizál.

Korábbi, az ALADIN, a REMO és a RACMO modelleket használó kutatásaink (Kemény *et al.*, 2015; Fogarasi *et al.*, 2016) esetében nem egyértelműek az eredmények – a jelentős téli-tavaszi csapadéktöbbletet becslő modellnél (ALADIN) növekedés, míg az általános szárazodással kalkuláló másik két modellnél jelentős csökkenés várható a búzahozaamokban.

49. ábra: **A hozamok százalékos változása a 2001–2014-es referencia-időszakhoz viszonyítva (klímaadaptáció csak a vetési időpontokban)**



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

A mostani eredmények szerint, évtizedenkénti bontás alapján 2040–2049-ig egy mérsékelt hozamcsökkenéssel számolhatunk (klímaszcenáriók átlagában 8 százalék), míg 2050-től 2100-ig jóval erőteljesebben jelentkezik a klímaváltozás negatív hatása. A legnagyobb termés csökkenést 2100-ra a DMI (dán) és az MPI (német) klíma modell becsüli (28 százalékos csökkenés), míg jóval optimistább előrejelzést ad az ETHZ (svájci) modell (7 százalékos csökkenés). Az ETHZ klíma-

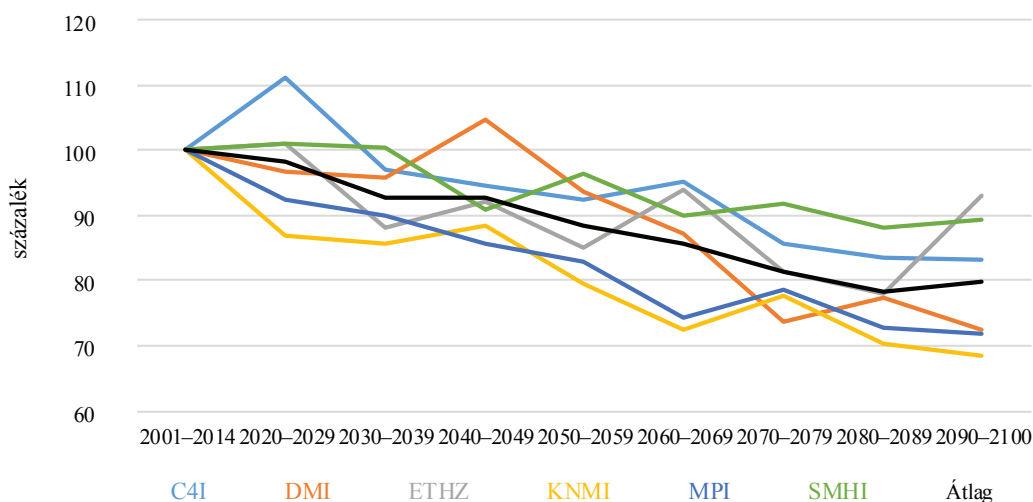
modell eredményeihez azonban megjegyzendő, hogy 2090-ig jóval pesszimistább előrejelzést adott (22 százalékos hozamcsökkenés).

Az eredmények alapján megállapíthatjuk, hogy a búza esetében első hipotézisünket (jelentős hozamcsökkenés a klímaváltozás hatására) egyértelműen igazoltak tekinthetjük, második hipotézisünket (mérsékelt változás 2050-ig) sem megerősíteni, sem cáfolni nem tudjuk, mivel a hozamok viszonylag egyenletesen csökkennek a növényélettani modell becslései alapján, így a 2050-es évekre már az évszázad végéig várható hozamcsökkenés közel fele realizálódik.

Adaptáció pótlólagos nitrogénbevitellel

Pepó (2002) szerint búzatermesztésünk legnagyobb kockázati elemét a rendkívül változékony, szélsőséges időjárás jelenti. A búza termésmennyiségét az extenzív termesztéstechnológiában a környezeti feltételek (évjárat 20 százalék, talaj 40 százalék, együttesen 60 százalék) döntő mértékben determinálják, de a környezeti tényezők termésre gyakorolt negatív hatását jelentősen mérsékelni lehet az intenzív agrotechnikával (Pepó, 2010). Éppen ezért következő adaptációs lehetőségként megvizsgáltuk a hozamok alakulását abban az esetben, ha a kijuttatott nitrogén-hatóanyag mennyiségének minimumát 100 kg-ban határoztuk meg hektáronként (50. ábra).

50. ábra: A hozamok százalékos változása a 2001–2014-es referencia-időszakhoz viszonyítva legalább 100 kg/hektár nitrogén-hatóanyag mellett



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

A hat klímaszcenárió átlagában megállapítható, hogy a hozamok a pótlólagos nitrogénbevitel mellett is jelentősen csökkentek, 2100-ra a klímaszcenáriók átlagában 20 százalékos termés-csökkenés prognosztizálható. Az évtizedenkénti bontás alapján 2040–2049-ig egy mérsékelt hozamcsökkenéssel számolhatunk (klímaszcenáriók átlagában 7 százalék), míg 2050-től 2100-ig jóval erőteljesebben jelentkezik a klímaváltozás negatív hatása. A legnagyobb termés-csökkenést 2100-ra az MPI (német) klímamodell becsüli, mérsékelt hozamcsökkenést 2100-ra ismét az ETHZ (svájci) modell mutatta, bár ebben az esetben is igaz, hogy ugyanezen modell 2090-re vonatkozó hozambecslése korántsem optimista. Az őszi búza trágyázásának (elsősorban N-ellátásának) legnagyobb problémáját egyrészt az jelenti, hogy az optimum intervalluma lényegesen szűkebb más növényekkel (pl. kukorica) összehasonlítva (tehát sokkal könnyebb alul- vagy túltrágyázni a növényt). A másik gondot az jelenti, hogy a trágyázás hatékonyságát számos ökológiai, genetikai és agrotechnikai tényező befolyásolja (Pepó, 2009). Mindezekkel összefüggésben

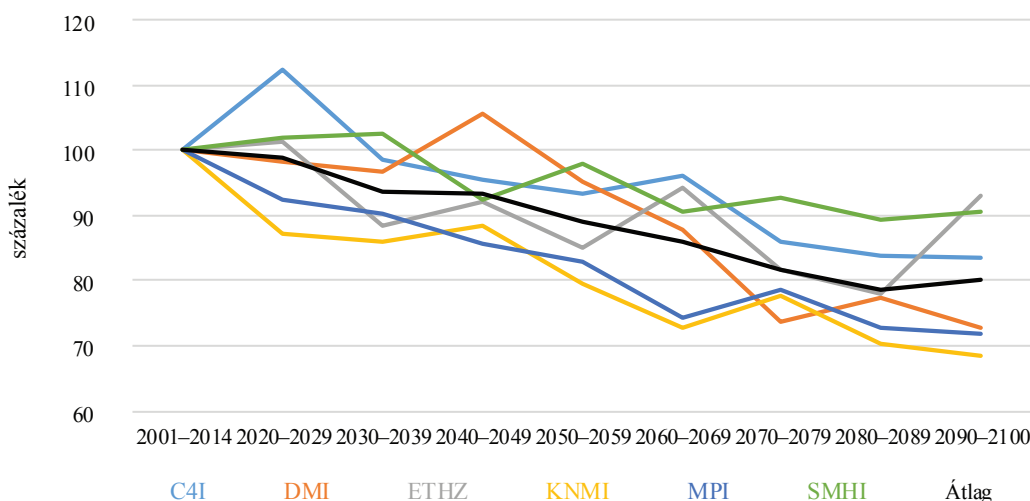
megállapítható, hogy csak a nitrogén-hatóanyag mennyiségének növelése nem biztosítja a hozamok emelkedését és a megfelelő klímaadaptációt az őszi búzánál.

Adaptáció öntözéssel

A búzatermesztés egyik fejlesztési lehetősége a megfelelő időben, megfelelő módon és szükséges mennyiségben végzett vízpótlás, ami azonban hazánk klimatikus viszonyai között jelenleg csak igen indokolt esetben szükséges. Előfordulhat azonban, hogy a klímaváltozással összefüggésben a közeljövőben (2050-ig) vagy esetleg a távoli jövőben (2100-ra) fontos és kiemelt agrotechnikai elemmé válik az őszi búza termesztésekor is az öntözés. Ennek okán a következő adaptációs lehetőségként megvizsgáltuk a hozamok alakulását abban az esetben, ha öntözést alkalmaztunk a korábban részletesen ismertetett leírás alapján, és az öntözéshez illeszkedően a kijuttatott nitrogén-hatóanyag mennyiségének minimumát is megnöveltük 100 kg-ról 120 kg-ra hektáronként. A hat klímaszcenárió alapján képzett átlag szerint a 120 kg/hektár műtrágyadózis és az öntözés hatására a hozamok 7 százalékkal csökkentek 2050-re, és 20 százalékos hozamcsökkenés jelentkezik 2100-ra. Amennyiben a klímamodelleket külön-külön elemezzük megállapítható, hogy a legpresszimistább jövőképet a hollandiai (KNMI) és a németországi (MPI) modell adta, amelyekkel a referencia-időszak hozamaihoz képest 32 és 28 százalékos csökkenés várható 2100-ra (51. ábra). A korábbi adaptációs változathoz (csak műtrágyázás) viszonyítva az öntözésnek nincs pozitív hatása az őszi búza jövőbeni terméseredményeire.

Tóthné Lőkös és Lőkös (2013) szerint az évjáráthatás 58 százalékbán magyarázza a megyeszintű búzatermésátlagok ingadozását, vagyis a klímatermőzők alakulásának meghatározó a szerepe. Ugyanakkor az eredményeinkből az látszik, hogy az őszi búza termesztése szempontjából a jövőben nem a víz hiánya lesz a kritikus időjárási elem, így a vízutánpótlással mint alkalmazkodási lehetőséggel nem tudtunk hozamnövekedést elérni. Korábbi tanulmányok megállapították, hogy a búza termesztetősége 100-150 km-rel északra tolódik a hőmérséklet 1 °C-os emelkedése esetén (Carter *et al.*, 1996), ami az őszi búza számára szükséges hideghatással (amikor a környezet hőmérséklete tartósan -1 és +1 °C körülre csökken) van összefüggésben.

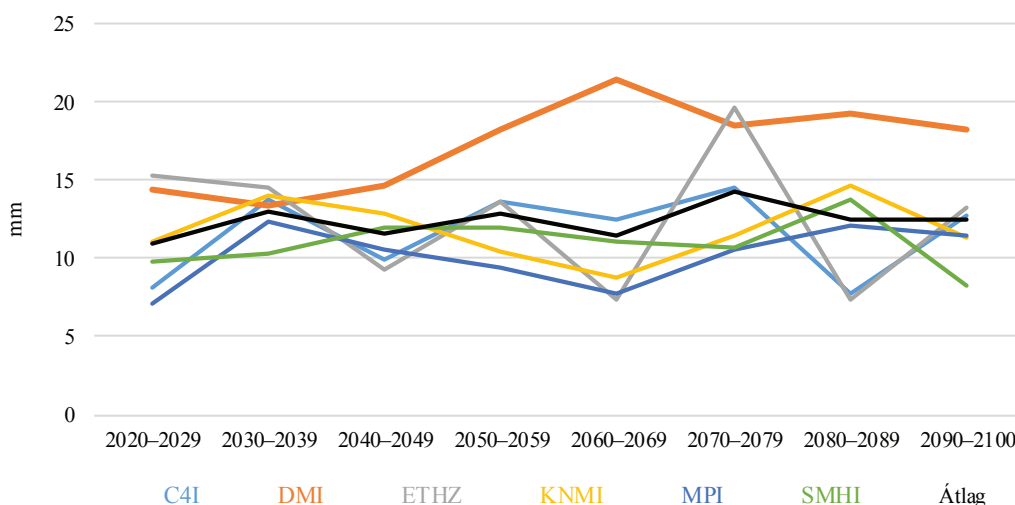
51. ábra: A hozamok százalékos változása a 2001–2014-es referencia-időszakhoz viszonyítva legalább 120 kg/hektár nitrogén-hatóanyag felhasználása és öntözés mellett



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

Amikor a modellek által jósolt csapadék mennyisége nem érte el az őszi búza számára szükséges mennyiséget (amelynek részletes leírása a módszertani fejezetben található), akkor az 52. ábrán feltüntetett vízmennyiségekkel mint kiegészítő öntözéssel kijuttatott vízádagokkal számoltunk. A klímaszcenáriók átlagában az átlagos kijuttatandó vízmennyiség 2050-re 11,5 mm, míg 2100-ra sem éri el a 13 mm-t. A klímamodelleket külön-külön vizsgálva az látszik, hogy a legnagyobb „szárazodást” a dán (DMI) modell becsüli, 2100-ra 18 mm víz pótlólagos kijuttatását prognosztizálja hektáronként, míg a svéd modell (SMHI) jóval kisebb vízkijuttatást becsül 2100-ra (8,3 mm). Összességében megállapítható, hogy őszi búzánál a kiegészítő öntözés csökkenő szerepét mutatja a legtöbb klímamodell, azaz klímaérzékenység szempontjából a vízhiányt lényegesen jobban tolerálja az őszi búza, mint a kukorica. Ez azzal magyarázható, hogy a kalászos gabonák általában kellő toleranciával vannak a vízellátottság okozta problémák iránt, bár nyilvánvalóan az egyes fajok, sőt azon belül az egyes fajták között is jelentős különbségek lehetnek (Tarnawa *et al.*, 2010).

52. ábra: A kijuttatott öntözővíz mennyisége, mm

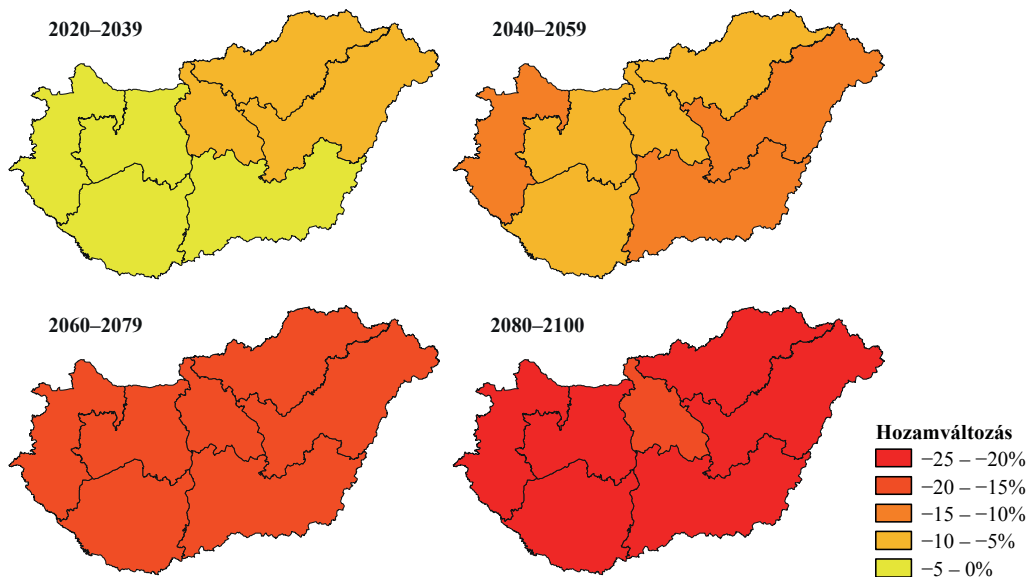


Forrás: Készült az AKI Adatalemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

Regionális elemzés

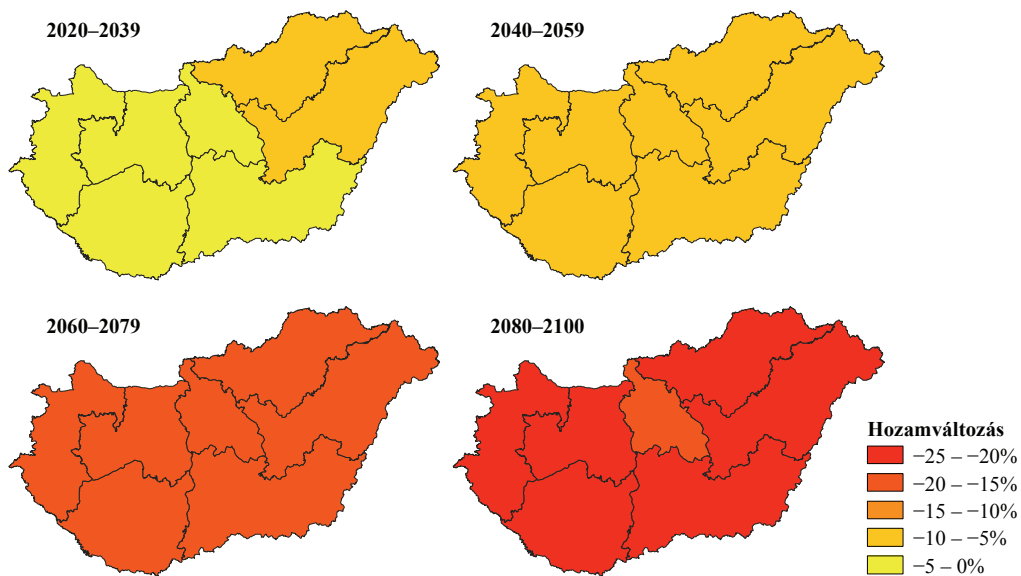
Az 53. ábrán bemutatott eredmények alapján megállapítható, hogy amennyiben csak a vetés időpontját optimalizáljuk, akkor minden régióban az őszi búza hozamainak csökkenése várható. Az előrejelzések szerint az első negyven évben mérsékelt csökkenés prognosztizálható, így Dél-Alföld, Dél-Dunántúl, Közép-Dunántúl és Nyugat-Dunántúl területére kevesebb mint 5 százalékos, míg Közép-Magyarország, Észak-Alföld, Észak-Magyarország területére 5–10 százalékos közötti hozamváltozás várható. Az idő előrehaladtával további hozamcsökkenés jósolható, amelynek mértéke a 2060–2079 közötti időszakra már minden régióban 15–20 százalékos. További csökkenés várható 2080–2100-ra az őszi búza terméseredményeiben, mértéke országosan 20–23 százalékos közé tehető. Harnos N. (2002) megállapításai is hasonlóak, az általa használt klímamodell szerint a 2050-es évekre előre vetített klimatikus körülmények rontani fogják a magyarországi búzatermesztés hatékonyságát, ami a jelenlegi terméshez képest akár 20 százalékos termésű csökkenést is jelenthet.

53. ábra: Régiókénti hozamváltozás a 2001–2014-es referencia-időszakhoz képest (klímaadaptáció csak a vetési időpontokban)



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

54. ábra: Régiókénti hozamváltozás a 2001–2014-es referencia-időszakhoz képest minimum 100 kg/hektár nitrogén-hatóanyaggal

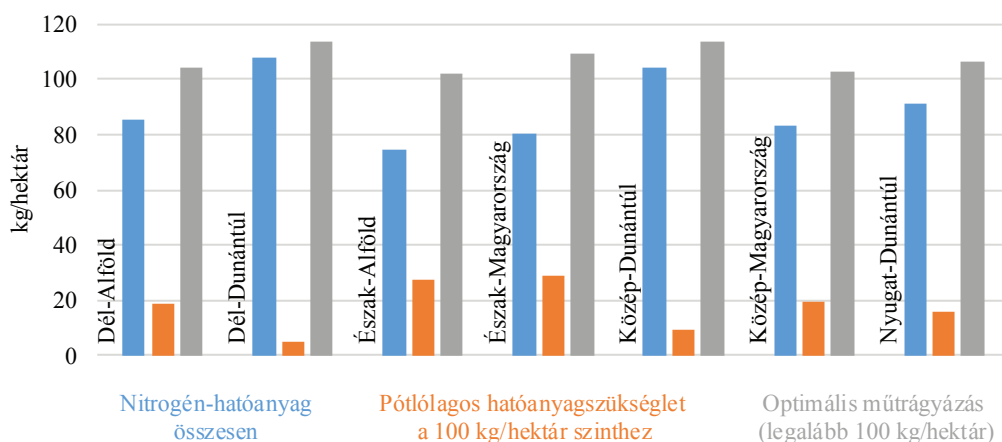


Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

Az 54. ábrán a régiónkénti hozamváltozást láthatjuk a műtrágyázás optimalizációja mellett (minimum 100 kg/hektár nitrogén-hatóanyag) a 2001–2014-es referencia-időszakhoz képest. Önmagában a nitrogén-hatóanyag kijuttatása a hozamok csökkenését nem tudta megakadályozni, és a csökkenés mértékét sem mérsékelte, eredményeink nagyon hasonlóan alakultak, mint az előző esetben. A hozamcsökkenés mértékét azért nem mérsékelte az optimalizált dózisu műtrágya használata, mert az általunk vizsgált referencia-időszakban is már közel hasonló mennyiségű nitrogén-hatóanyag mellett termesztették az őszi búzát.

Az 55. ábra a pótlólagosan kijuttatott nitrogén-hatóanyag mennyiségét mutatja be regionális bontásban. Az átlagérték (89 kg/hektár) azt a mennyiséget jelöli, amelyet a 2001–2014. évek közötti időszakban a hét régió átlagában juttattak ki a termelők. A legtöbb nitrogén-hatóanyagot Dél-Dunántúlon és Közép-Magyarországon alkalmaztak a termelők (108 és 105 kg/hektár), míg a legkevesebbet az Észak-Alföld régióban (74 kg/hektár). A pótlólagos nitrogénszükséglet pedig az általunk megállapított minimális, 100 kg/hektár nitrogén-hatóanyag eléréséhez szükséges mennyiséget mutatja. Az optimalizált dózisu műtrágyamennyiség és a referencia-időszakban használt műtrágya mennyisége között nem találtunk jelentős különbséget, régiótól függően 5-29 kg/hektár pótlólagosan kijuttatott nitrogén-hatóanyag volt indokolt.

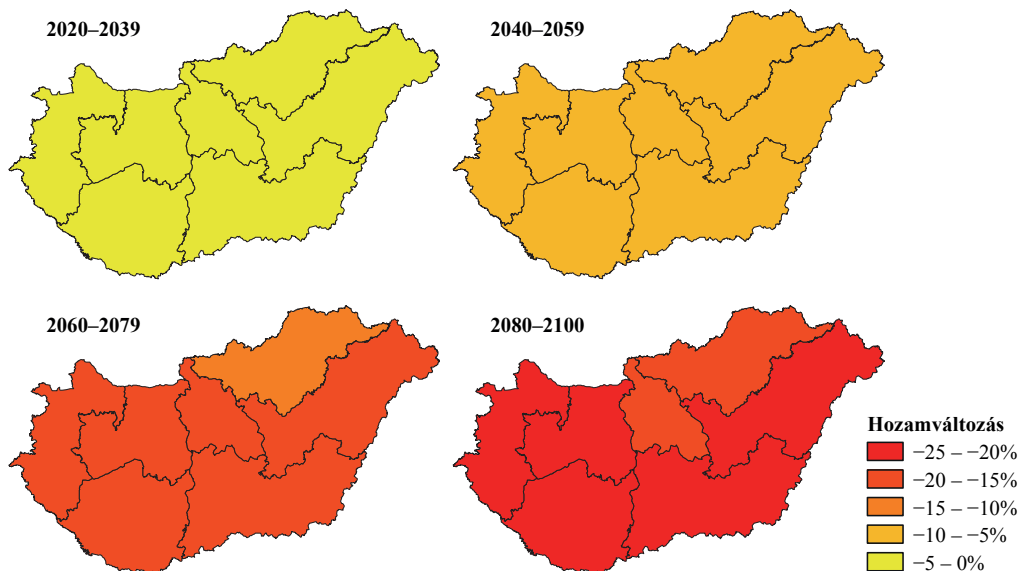
55. ábra: A pótlólagosan kijuttatott nitrogén-hatóanyag mennyisége



Forrás: Készült az AKI Adatalemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

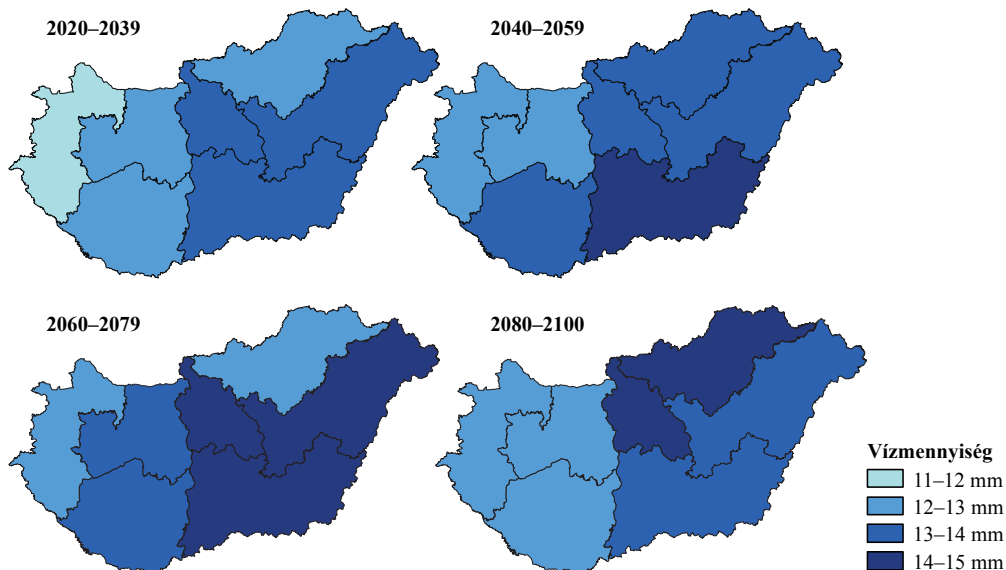
Megvizsgáltuk a régiónkénti hozamváltozást abban az esetben is, ha nemcsak a műtrágya mennyiségét növeljük, hanem pótlólagos öntözést is alkalmazunk őszi búzánál (56. ábra). A 2001–2014-es referencia-időszakhoz képest a 2020–2039-es időszakra minimális hozamcsökkenés prognosztizálható, a hét régióra ez –5 százalék alatt maradt. A következő húszéves periódusnál is megállapítható, hogy a régiók között lényeges különbséget nem tapasztalunk, azonban további hozamcsökkenéssel számolhatunk, amelynek mértéke –8-9 százalékra becsülhető. A 2060–2079-es időszakra a hozamváltozás elérheti a –15-17 százalékot is, azaz az idő előrehaladtával az adaptációs lehetőségek alkalmazásával (öntözés és optimális nitrogén-hatóanyag kijuttatása) sem mérsékelhető a hozamcsökkenés. A 2080–2100-as időszakra pedig országosan –19-27 százalékos csökkenés prognosztizálható az őszi búzánál.

56. ábra: Régiókénti hozamváltozás a 2001–2014-es referencia-időszakhoz képest pótlólagos öntözéssel és minimum 120 kg/hektár nitrogén-hatóanyaggal



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

57. ábra: Régiókénti kijuttatott öntözővíz (mm)



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

A következő térképeken azt ábrázoltuk, hogy öntözéssel mennyi vízmennyiséget kell kijuttatni az egyes régiókban a 2020–2100 közötti időszakban (57. ábra). Megállapítható, hogy jelentős különbségek nem figyelhetők meg e tekintetben a régiók között, a 2020–2039-es időszakban 11,8–13,4

mm között változott a pótlólagosan kijuttatott öntözővíz mennyisége hektáronként. További jelentős pótlólagos öntözés szükségessége a későbbi időszakokban sem jelentkezett az őszi búzánál, régióktól függően 2100-ra csak 12,0-14,2 mm vízkijuttatás indokolt hektáronként. Ez azzal magyarázható, hogy az általában szárazságtűrőbb kalászosok – és így az őszi búza – termesztéséhez is az átlagos csapadékelátottságú években Magyarországon elegendő víz áll rendelkezésre. A klímamodellek becslése alapján az őszi búza termesztése hazánkban a jövőben is döntő mértékben öntözés nélküli termesztésen alapul.

A modellfuttatások eredményeként megállapítható, hogy a búza esetében el kell vetnünk tanulmányunk 4. hipotézisét, annak mind az öntözésre, mind az optimális műtrágya-kijuttatásra vonatkozó részét, mivel sem a műtrágyaadagok növelése, sem az esetleges öntözővíz-utánpótlás nem növeli érdemben a hozamokat, illetve nem csökkenti jelentős mértékben a klímaváltozásból fakadó hozamvesztéséget. Ezen eredmények gyakorlatilag az összes magyarországi régióra érvényesek.

A búza hozamcsökkenésének lehetséges oka

A hozamcsökkenés mögötti ok(ok) magyarázata érdekében megvizsgáltuk a fenológiai szakaszok eltolódását, hosszának változását, valamint az azokhoz tartozó, a hozamra hatást gyakoroló legfontosabb paraméterek alakulását. Általánosan elmondható, hogy a fenofázisok rövidülése (9. és 10. táblázat), ami esetünkben a hőmérséklet emelkedésére vezethető vissza, kétszeresen is előnytelen a biomassza-termelés szempontjából:

1. kevesebb idő áll rendelkezésre az anyagtermelésre;
2. olyan időszakra tolódik előre a tenyészidőszak, illetve a szemtelítődési fázis, amikor kevesebb sugárzási energia érhető el a fotoszintézis számára.

A búza hozamának alakulásában meghatározó a bokrosodás időszaka. A hat klímascenárió átlagában elmondható, hogy az őszi búza levélfelületi indexe (LAI) várhatóan jelentősen csökken (10. táblázat), ami arra utal, hogy a bokrosodási időszakban a vegetatív növényi részek növekedése lelassul, gyengül, ami vélhetően azzal magyarázható, hogy a globálisugárzás átlagos összege a bokrosodási fázisban jelentősen csökken (11. táblázat és 58. ábra), a kevésbé sikeres bokrosodás eredménye pedig az alacsonyabb hozam. A búza hozamát öntözéssel sem lehet számottevően javítani, ami aláátmasztja a globálisugárzás hiányát.

9. táblázat: A búza vetésidejének és szemtelítődésének változása

Időszak	Vetés dátuma	Szemtelítődés kezdete	Szemtelítődés vége
2001–2014	október 4.	május 31.	július 12.
2020–2029	október 19.	május 31.	július 11.
2030–2039	október 21.	május 27.	július 7.
2040–2049	október 20.	május 25.	július 5.
2050–2059	október 24.	május 23.	július 3.
2060–2069	október 24.	május 20.	június 30.
2070–2079	október 26.	május 21.	június 30.
2080–2089	október 27.	május 17.	június 27.
2090–2100	október 27.	május 15.	június 25.

Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

10. táblázat: A búza egyes fenofázisainak változása

Időszak	Kelés hossza, nap	Bokrosodás hossza, nap	Szárba indulás hossza, nap	Kalászás hossza, nap	Virágzás hossza, nap	Szemte- lítődé- s hossza, nap	LAI	LAI- eltérés, %
2001–2014	4,66	134,84	59,61	23,43	5,85	41,99	1,98	100,00
2020–2029	4,80	130,49	59,15	23,19	5,90	41,76	1,92	95,96
2030–2039	4,84	124,25	60,47	22,92	5,94	40,76	1,76	87,30
2040–2049	4,56	121,57	61,41	23,56	5,85	40,81	1,68	84,43
2050–2059	4,58	117,40	59,47	23,40	5,87	41,65	1,59	78,41
2060–2069	4,71	113,27	59,80	24,03	5,97	41,28	1,33	65,64
2070–2079	4,72	115,60	57,82	23,02	5,70	40,55	1,30	65,41
2080–2089	4,67	107,74	59,29	24,12	5,98	40,47	1,11	55,00
2090–2100	4,66	103,79	61,34	24,09	5,95	40,98	1,10	54,37

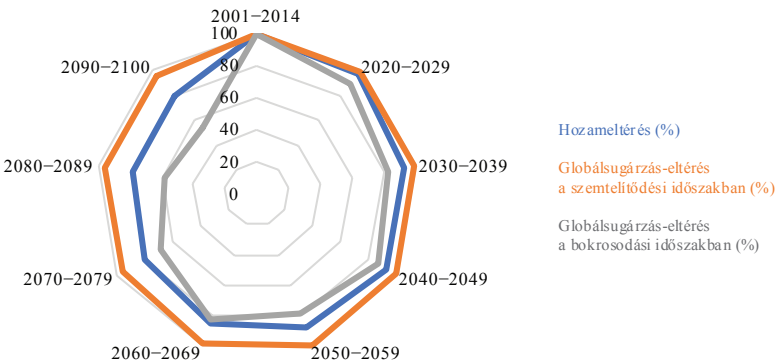
Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

11. táblázat: A globálsugárzás változása a szemtelítődés és a bokrosodás időszakában

Időszak	Hozam, t/ha	Hozam- eltérés, %	Globálsugárzás a szemtelítődési időszakban, MJ/m ²	Globálsugárzás- eltérés a szemte- lítődési időszak- ban, %	Globálsugárzás a bokrosodási időszakban, MJ/m ²	Globálsugárzás- eltérés a bokrosodási időszakban, %
2001–2014	7,81	100,00	935,26	100,00	721,13	100,00
2020–2029	7,64	97,81	932,00	99,78	632,21	89,36
2030–2039	7,25	92,28	925,78	99,12	591,27	82,74
2040–2049	7,20	92,25	929,53	99,46	633,72	87,26
2050–2059	6,90	87,80	928,24	99,19	560,85	78,29
2060–2069	6,63	85,18	914,14	97,88	618,12	83,16
2070–2079	6,37	81,05	894,16	95,90	491,52	68,83
2080–2089	6,13	77,99	891,45	95,47	420,90	58,42
2090–2100	6,17	79,40	895,27	96,07	385,81	53,34

Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

58. ábra: A hozamváltozás és a globálsugárzás változása a referencia-időszakhoz viszonyítva



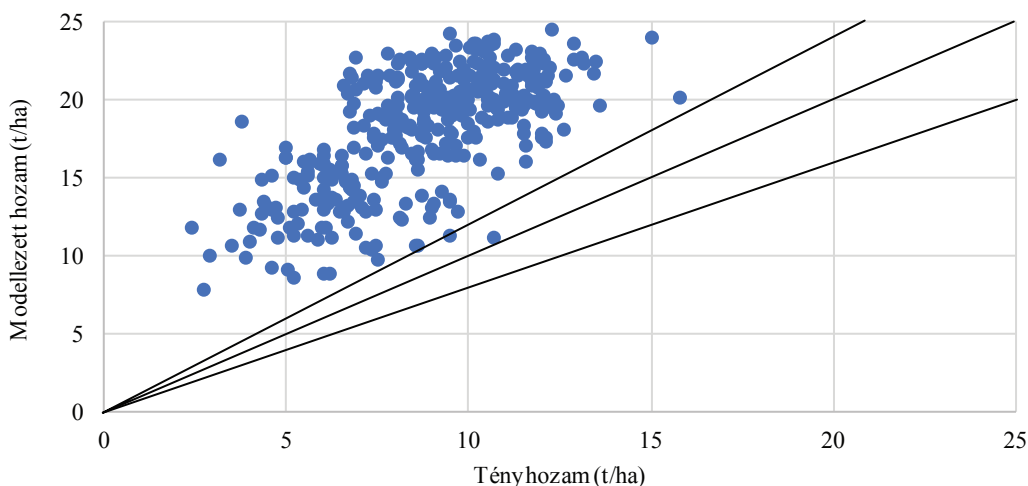
Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

Kukorica

Kalibrálás és validálás parcellaadatokon

A kukorica esetében a 4M modell kalibrálásának és validálásának elvégzése előtt a parcellaszintű adatgyűjtésben szereplő tényhozamok és a becült hozamok között regressziós egyenlet felállításával kerestük a kapcsolatot, vagyis az általunk kiválasztott modellváltozók figyelembevételével próbáltuk a két hozamértéket közelíteni egymáshoz. Az 59. ábrán megfigyelhető, hogy a referencia-időszaknak tekintett (2001–2014) tényhozam adatok és a modell által becült 2001–2014. és 2021–2100. évekre modellezett hozam adatok között jelentős eltérések adódtak, vagyis a pontthalmaz és az egyenesek által határolt terület nem esett egybe, vagyis a 4M modell a tényhozamokhoz képest felülbecsülte a várható hozamokat.

59. ábra: A tényhozam és a becült hozam a kiindulási paraméterekkel



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

Mivel a kapott modellbecslések nem voltak megbízhatóak, ezért a következő lépésben a vizsgálatba vont üzemek kétharmadán kalibrációt végeztünk, majd a maradék egyharmad gazdasággal validáltuk a hozameredményeket. A 12. táblázatban a kiindulási és a kalibrált állapothoz tartozó hibamutató-értékeket foglaltuk össze, figyelembe véve a talajtípust és az FADN-adatokból származtatható agromenedzsmentet is.

12. táblázat: A kiinduló és a kalibrált állapothoz tartozó hibamutatók értékei

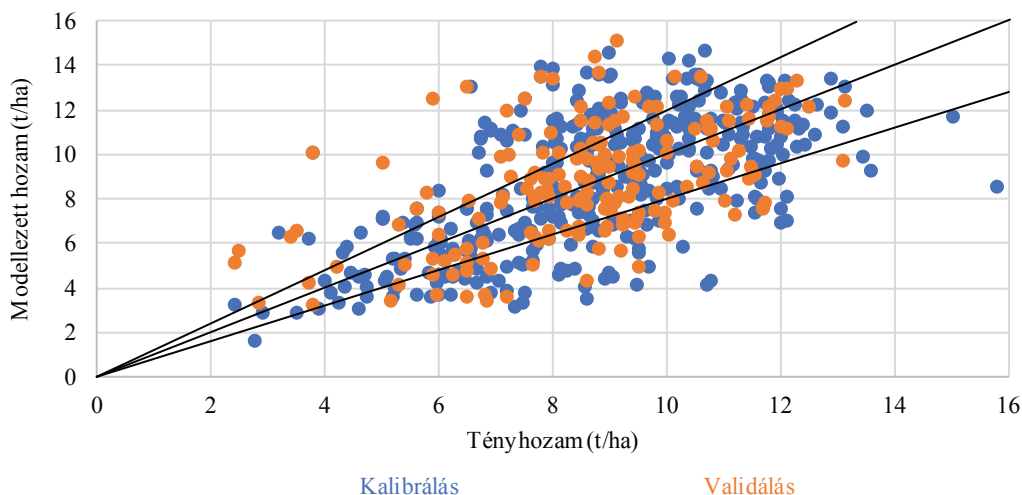
Verzió	Módosított értékek		Egyenlet			Hibamutatók			
	vízstressz (c eh.)	potenciális (a eh.)	meredekség	konstans	R ²	BIAS	RMSE	CV(RMSE)	relatív hiba max. 20%
Kiinduló	2,0	0,0026	1,05	8,94	0,44	9,39	9,79	111,71	0,27
Kalibrálás	1,4	0,0018	0,78	1,94	0,38	0,00	2,36	26,91	54,72
Validálás	1,4	0,0018	0,68	2,88	0,30	0,12	2,34	27,26	46,63

Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

A kalibrálás során a vízstressz paramétere 2,0-ról 1,4-re, a potenciális függvény paramétere 0,0026-ról 0,0018-ra csökkent. A lineáris regresszióban szereplő konstans jelentősen csökkent, bár a kívánt 1 értéket nem érte el, de az átlagos hiba (*BIAS*) 0, szemben a kiinduló 9,39 tonna/hektáros felülbecsléssel. A 20 százalékos intervallumon belül lévő becslések aránya a kiindulási 0,27 százalékról 54,72 százalékra nőtt. A meredekség és az R^2 értéke valamelyest romlott, de az RMSE és a CV(RMSE) hibamutatók értéke jelentősen javult. A validálás során a kalibráláshoz hasonló eredményekre jutottunk.

A 4M modell fotoszintézis-moduljának, a potenciális függvény és a vízstresszfüggvény egy-egy paraméterének változtatása után a modellezett hozamok jelentősen közeledtek a tényhozamok értékeihez, azaz zömében a három egyenes közötti tartományba kerültek (60. ábra).

60. ábra: A tényhozam és a becsült hozam a kalibrált 4M modellel



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

A validálás során a kalibráláshoz hasonló eredményekre jutottunk. Az elvégzett módosítások a módszertani szakirodalom által is megfelelő RMSE- és CV(RMSE)-értékekkel rendelkező modellhez vezettek.

Vetés dátumának modellezése

Vetési szabály kiválasztása

A kukorica vetési dátumának szabályát négy szakirodalmi adatokra illeszkedő lehetőség közül választottuk ki. A kukorica csírázásához szükséges talajhőmérséklet 10–12 °C közötti. Talajhőmérsékletre vonatkozó adatok nem állnak rendelkezésre, ezért a léghőmérséklet adatokra épülő szabályrendszert vizsgáltunk. Dobor *et al.* (2016) kutatását figyelembe véve kiindulópontnak tekintettük a 7 nap 12 °C feltételt, miszerint az optimális vetési dátum előtt legalább 7 napon keresztül a léghőmérséklet meghaladja a 12 °C-ot. Ha tartósan – 5-7 napon keresztül – meghaladja a napi középhőmérséklet a 10-12 °C-ot, akkor a talajhőmérséklet is a megfelelő tartományba kerül.

13. táblázat: **A modellezett és a parcellaszintű adatgyűjtésből származó vetési dátumok összehasonlítása**

	Átlag	Medián	Szórás	Minimum	Maximum	5. percentilis	95. percentilis
7–12	113	114	10,65	82	132	97	129
5–12	104	99	10,44	80	130	83	119
7–10	98	100	9,85	80	119	82	108
5–10	96	98	9,73	78	117	80	106
Tényadatok	108	107	8,98	79	149	94	124

Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

A 13. táblázatban a négy különböző vetési szabályhoz kapcsolódó Agri4Cast-adatok alapján modellezett eredmények és a parcellaszintű adatgyűjtésből származó tényleges vetési dátumok összehasonlítása szerepel a 2014–2016 közötti időszakra vonatkozóan. Az átlag, a medián, a minimum, a maximum és a percentilis mutatóknál a nap sorszáma szerepel, azaz a parcellaadatok alapján 2014 és 2016 között átlagosan az év 108. napján (április 18-án, szökőévben április 17-én) vetették a kukoricát. Az átlagot és az 5. és 95. percentiliseket tekintve a 7-10 és az 5-10 szabályoknál túlságosan korai a vetés. Ezzel szemben a 7-12 szabály késői vetést eredményez, az átlag és a medián is meghaladja a tényadatoknál mért értékeket, illetve a szórás ebben az esetben a legnagyobb. Az összes mutatót figyelembe véve a választásunk az 5-12 szabályra esett.

A modellezett vetési és biológiai érési dátumok klímaszcenáriónként

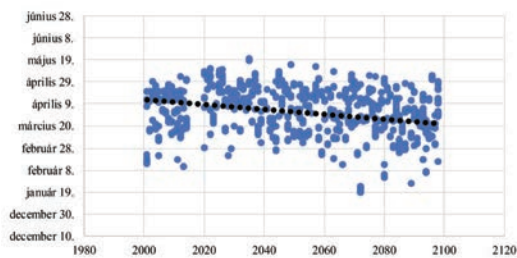
A 2001 és 2016 közötti időszakra vonatkozó időjárás adatokat a MARS-Agri4Cast meteorológiai adatbázisából nyertük, a termés hozamok 2001–2014-es bázisidőszakhoz viszonyított változását hat klímaszcenárió mellett elemeztük.

A 61–66. ábrákon megfigyelhető, hogy a tanulmányunkban használt hat klímaszcenárió függvényében a 4M modell által becsült vetési idők egyre korábbi időpontokra tolódtak a hagyományos április közepi, április végi vetési időhöz képest. Megállapítható az is, hogy a különböző időjárás modellek között kisebb-nagyobb eltérések adódtak a vetési időpontok esetében. A Hollandiában (KNMI-ECHAM5) és Svájcban (ETHZ-HadCM3Q) kifejlesztett modellek 2020–2100 közötti időszakra vonatkozó előrejelzései szerint a vetésidőpontok ugyan korábbi időpontokra ugrottak, de ezek léptéke kisebb mértékű volt, mint a másik négy klímaszcenárió esetében. A németországi (MPI-ECHAM5), a svédországi (SMHI-BCM), a dániai (DMI-APREGE) és az írországi időjárás modelleknél (C41-HadCM3) a vetési idők jóval nagyobb intervallumon belül változtak és látványosabban, kifejezettebben jelentkeztek a referencia-időszakhoz viszonyított korábbi vetési időpontok.

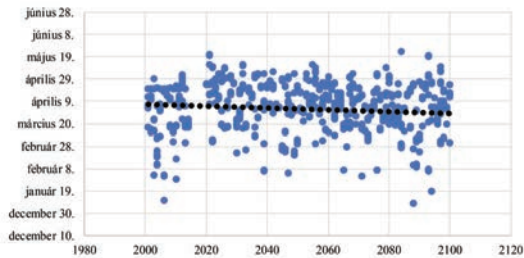
A 67–72. ábrákon az egyes klímaszcenáriók alapján becsült biológiai érési időpontokat mutatjuk be 2020–2100 között. A biológiai érési időpontok az időjárás tényezők változásával időben egyre előrébb estek a referencia-időszakhoz képest, továbbá az egyes klímaszcenáriók függvényében szembetűnő eltérések jelentkeztek. A hat klímaszcenárió közül a Dániában és a Svájcban kifejlesztett modelleknél volt a legkevésbé kifejezett a változás (–10–20 nap), ugyanakkor a másik négy klímaszcenárió esetében jóval egyértelműbben látható volt a biológiai érési időpontok korábbra tolódása a klimatikus viszonyok megváltozásának következtében.

A 61-72. ábrákon a vetési és a beérési idők esetében is a gyakorlattól eltérő szélsőértékek jelentkeztek. Ezekben az esetekben a klímaszcenáriók alapján várható szélsőséges időjárás feltételek okán vagy igen korán kellett volna vetni, vagy a növény nem tudott beérni.

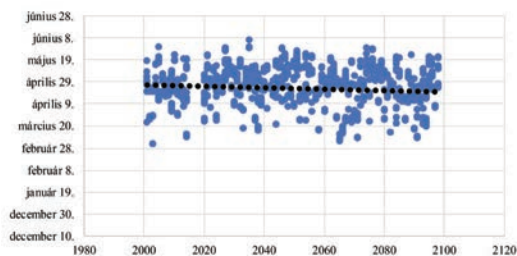
61. ábra: C4I vetési dátumok



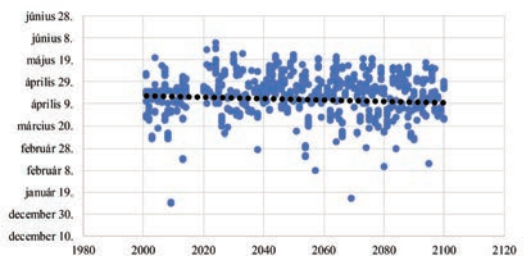
62. ábra: DMI vetési dátumok



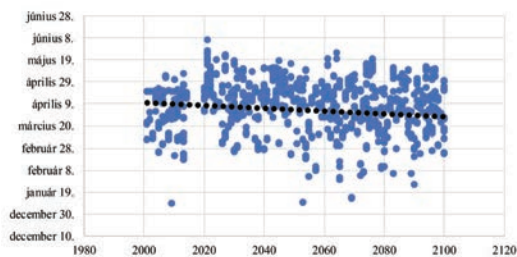
63. ábra: ETHZ vetési dátumok



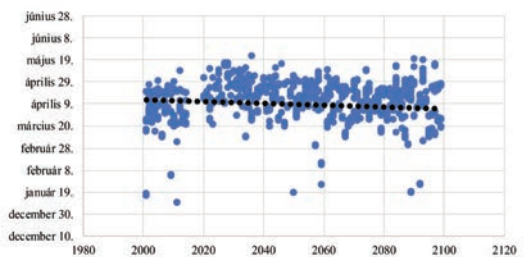
64. ábra: KNMI vetési dátumok



65. ábra: MPI vetési dátumok

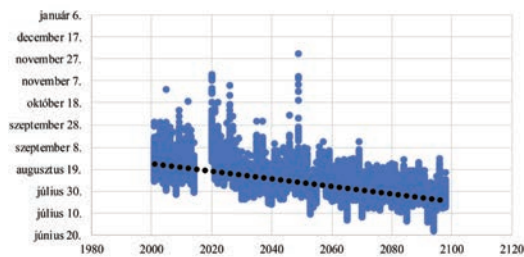


66. ábra: SMHI vetési dátumok

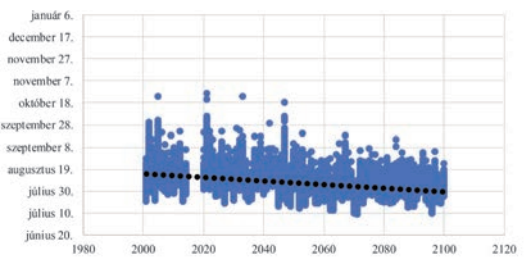


Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

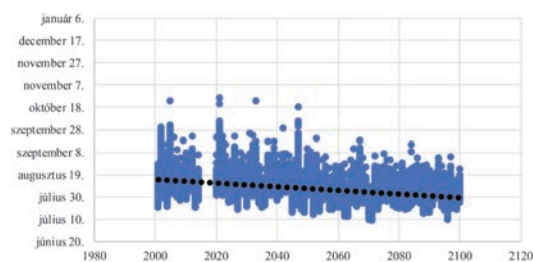
67. ábra: C4I biológiai érettségi dátumok



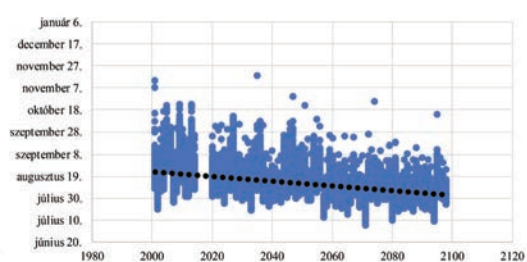
68. ábra: DMI biológiai érettségi dátumok



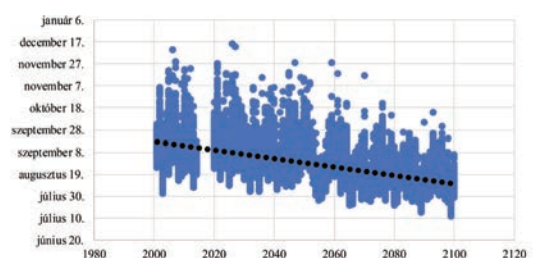
69. ábra: ETHZ biológiai érettségi dátumok



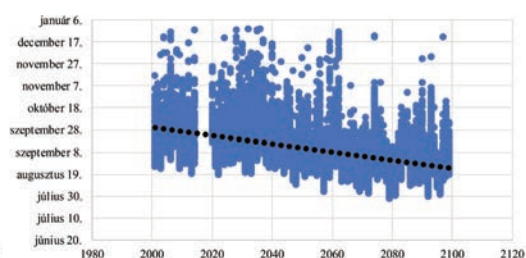
70. ábra: KNMI biológiai érettségi dátumok



71. ábra: MPI biológiai érettségi dátumok

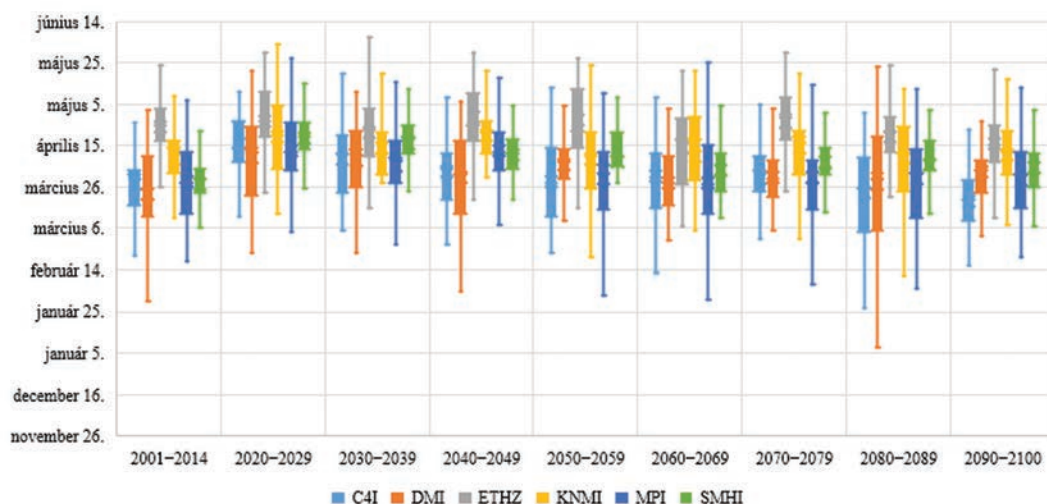


72. ábra: SMHI biológiai érettségi dátumok



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

73. ábra: A vetési dátumok összehasonlítása



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

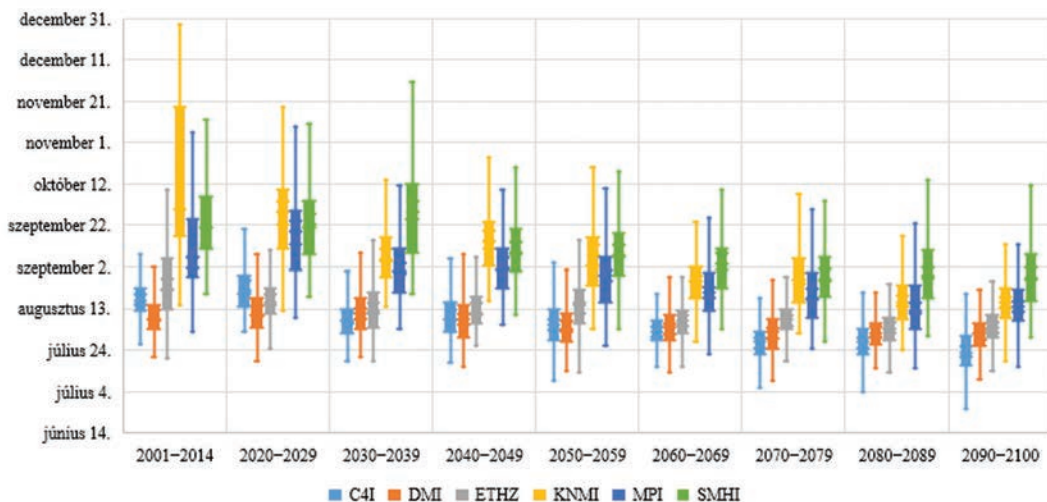
Az egyes időjárási modellek a vetés időpontjának becslésénél jelentősen szórtak egymáshoz képest és önmagukon belül is az egyes évtizedeket figyelembe véve. Számításaink szerint a különböző vetési időszakok között megfigyelhető legnagyobb terjedelem a 2080–2089 közötti időszakban jelentkezett. A modelleket összehasonlítva megállapítható, hogy az ír, a német és a dán időjárási előrejelzések szórása volt a legnagyobb, ezen belül is a DMI-APREGE klímaszcenáriója alapján

kijelölt vetési időpontok. A legkiegyensúlyozottabb becslést a Svájcban használt időjárás modell adta az egyes évtizedeket nézve (73. ábra).

Az adatokból megállapítható, hogy a jelenlegi időjárás viszonyokhoz képest 2100-ra átlagosan 5 nappal, míg a 2050-es évekhez képest 1 nappal tolódik előbbre a vetés ideje. Ezen eredmények kisebb változást mutatnak Dobor *et al.* (2016) eredményeivel összehasonlítva, ahol 2071-2100 viszonylatában átlagosan 17 nappal későbbi vetésidő mutatkozott.

Az első három évtizedben a biológiai érési időre vonatkozó terjedelmek és a szórások értéke is szélsőségesebben változott mind a hat klímaszcenárió esetében, azaz a boxplot ábrák nagysága, továbbá minimuma és maximuma jóval nagyobb intervallum között mozgott (74. ábra). Az egyes modelleket összehasonlítva megállapítható az is, hogy a hat klímaszcenárió alapján látványosan két biológiai érési időre vonatkozó csoport különíthető el. Az egyik csoportot az ír, a német és a svéd időjárás előrejelzések alkotják, ahol is a biológiai érési idők szórása nagyobb intervallumon belül változott, mint a másik csoportot alkotó (svájci, holland és dán) modelleké.

74. ábra: A biológiai érési dátumok összehasonlítása



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

Az első csoportnál a kukorica beérése inkább augusztus közepe és szeptember első fele között várható, míg a második csoportnál zömében július vége és augusztus első fele közötti beérési idők modellezhetők. Figyelemreméltó, hogy a hat klímaszcenárió alapján becsült beérési időpontok esetében egységesebb, kevésbé változatos képet kaptunk a jövőre vonatkozólag, mint a vetési időpontok vonatkozásában becsültek.

A modellfuttatások átlagában 2100-ig 26 nappal kerül korábbra a kukorica beérése, mint a referencia-időszakban, míg 2050-ig 14 napos korábbra tolódás figyelhető meg. Ezen eredmények alapján kijelenthető, hogy jelen tanulmányunk 3. hipotézise csak részben igazolható a kukoricánál. Míg a vetésidő esetében nem tapasztalható számottevő változás a beérés esetében már 2050-re jelentős változást mutatnak a modell eredmények. Ez szükségessé teszi a termelők alkalmazkodását a klímaváltozás kényszereihez.

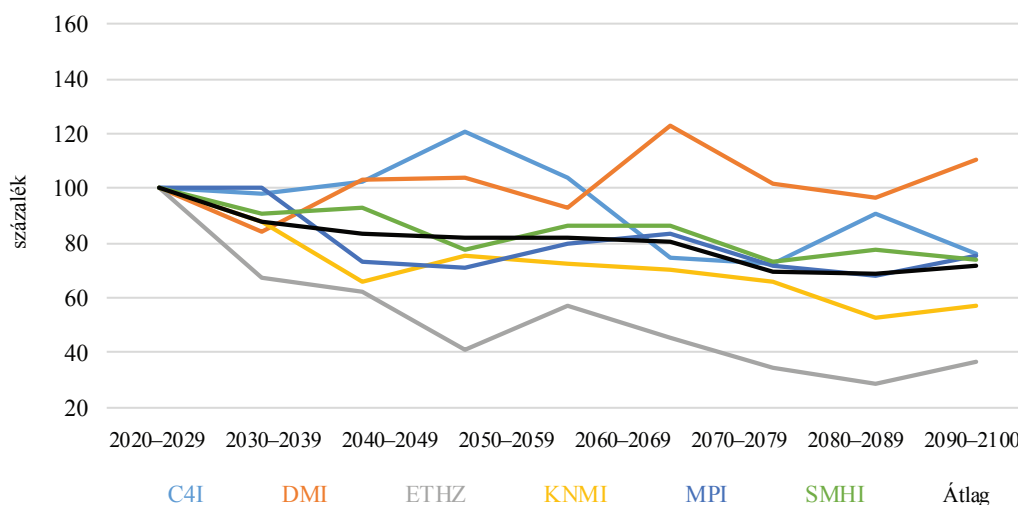
Hozamok modellezése

A 75-77. ábrákon a referencia-időszak hozamától való százalékos eltérést mutatjuk be a hat klímaszenárió esetében külön-külön és együttesen is tízéves periódusokban.

A 75. ábrán megfigyelhető, hogy a hat klímaszenárióból képzett átlag esetében a hozamok fokozatosan estek, azaz 2100-ra a referenciaértékhez képest akár 28 százalékos hozamcsökkenés is várható. Modellünkhöz hasonló eredményre jutott Nyéki (2016), aki szintén a fentebb említett hat klímodellt használta a kukorica hozamok jövőbeni becslésére.

Az általunk készített számítások alapján megállapítható, hogy a németországi és az írországi klímaszenáriók alapján végzett előrejelzések a hat klímaszenárióból képzett átlagértékekhez hasonló hozamcsökkenést jeleztek, ugyanakkor az ír (C4I-HadCM3) időjárásmodell szerint a 2030–2059. évek közötti időszakban 2–21 százalékos hozambővülés is elképzelhető. Nyéki szerint a svéd modell nem vagy viszonylag kismértékű, de csökkenő változást jelez, amelyet vizsgálataink is alátámasztanak, hiszen az átlaghoz és a többi modellhez képesti legkisebb eltéréssel valóban a svéd modell rendelkezett. Becslésünk szerint a svájci és a holland klímaszenárió értékei alapján felállított hozambecslés jóval pesszimistább képet fest, az előbbi 64 (Nyéki –60 százalék), az utóbbi 43 százalékos visszaesést vár 2100-ra. Az általunk elvégzett vizsgálatok szerint a hat klímaszenárió közül a dán modelladatokból kapott hozambecslés a legpozitívabb, vagyis a dán modell segítségével prognosztizált hozamok – az első évtizedet kivéve – minden esetben az átlagérték felett helyezkednek el.

75. ábra: **A hozamok százalékos változása a 2001–2014 referencia-időszakhoz viszonyítva (klímaadaptáció csak a vetési időpontokban)**



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

A várható kukorica hozamok alakulásával Európában is több tanulmány foglalkozott, melyek az általunk is prognosztizálthoz hasonló hozamcsökkenést jósolnak. A hozamok várható csökkenésének mértékében a becsült periódustól, a területi elhelyezkedéstől, a különböző alkalmazott agrotechnológiától függően adódtak eltérések a 4M modell által becsült és az egyes szerzők által használt modellek között. Így például Durdu (2012) szerint a kukorica hozamok 0,014, illetve 2,1 tonna/hektárral csökkenhetnek Törökországban. Grandjean (2016) szerint attól függően, hogy a hőmérséklet emelkedése milyen mértékű lesz, érdemben eltérhet a hozamok változása a Fekete-tengeri régióban. Azaz +2,4 °C-os átlagos hőmérséklet-emelkedés következtében a búza, a kukorica

és a napraforgó termelése stabil maradhat, azonban $+4,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os emelkedés esetén akár 30-70 százalékos hozamkiesés is valószínűsíthető.

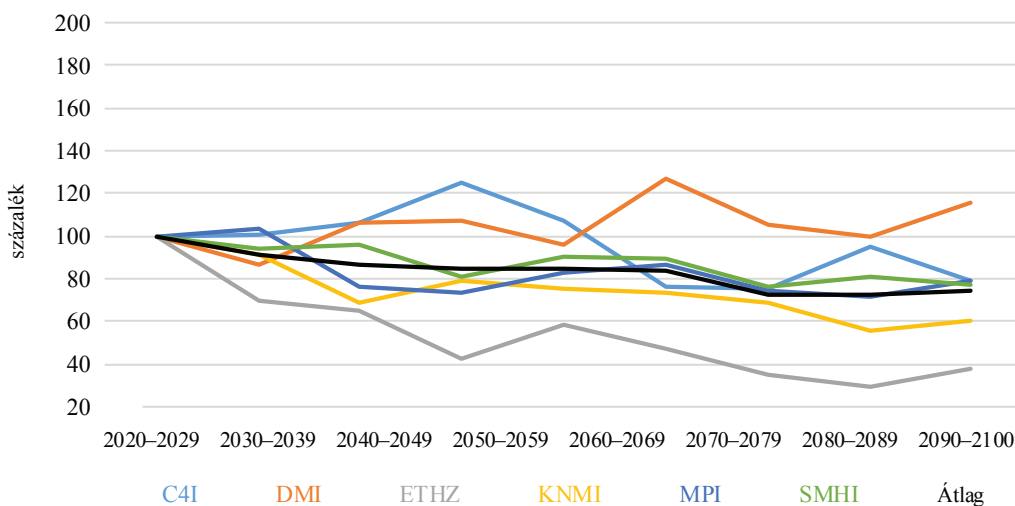
A modelleredmények alátámasztják Bassu *et al.* (2014) és Rosegrant *et al.* (2014) vizsgálatait, melyek szerint önmagában a szén-dioxid-trágyázás nem elegendő a kukorica hozamok növelésére, és a klimatikus viszonyok érdemben csökkentik a hozamokat. Ugyanezt erősítik Kemény *et al.* (2015) és Fogarasi *et al.* (2016) eredményei, amelyek esetében a 3 vizsgált klímascenárióból kettő esetében 30 százalék feletti hozamcsökkenést valószínűsítettek 2050-ig, bár egy scenárió esetében nőttek a hozamok.

A fenti eredmények alapján jól látható, hogy első hipotézisünket (jelentős hozamcsökkenés a klímaváltozás hatására) egyértelműen igazoltnak tekinthetjük a kukorica esetében is, második hipotézisünket (mérsékelt változás 2050-ig) pedig el kell vetnünk, mivel a becslések átlaga szerint már a 2030-as években 15 százalékos visszaesés várható, bár kétségtelen tény, hogy az egyes klímascenáriók igen jelentős szórása, sőt egyes scenáriók jelentős hozamnövekedést felmutató eredményei erősen bizonytalanná teszik megállapításunkat.

A továbbiakban a kukorica vonatkozásában is elvégeztük a klímaadaptáció két elemének, a fokozott nitrogénkijuttatásnak és az öntözésnek a vizsgálatát.

Adaptáció pótlólagos nitrogénbevitellel

76. ábra: A hozamok százalékos változása a 2001–2014-es referencia-időszakhoz viszonyítva legalább 90 kg/hektár nitrogén-hatóanyag mellett



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

A 76. ábrán az általunk becsült hozamok százalékos változása jelenik meg a 2001–2014. referenciaévek közötti időszakhoz képest, ahol is a klímaadaptáció legalább 90 kg/hektár nitrogén-hatóanyag kijuttatását jelentette. Az emelt nitrogénmennyiség ellenére a hat klímascenárió átlaga alapján 25 százalékos hozamcsökkenés becsülhető 2100-ra. A németországi, az írországi és a svédországi klímascenáriók alapján végzett előrejelzés szerint is az átlaghoz képesti hasonló nagyságrendű hozamcsökkenés jelentkezhetsz (21-23 százalék), ugyanakkor az ír időjárási modell szerint a 2030–2059. évek közötti időszakban 6-25 százalékos hozambővülés is bekövetkezhetsz. A svájci és a holland klímascenárió a hozamok jelentős esését jelezte (–40-63 százalék) 2100-ra, ugyanakkor a dán klímascenárió segítségével becsült várható hozamok nagysága, egyes évtizedeket kivéve 6-27

százalékkal is felülmúlhatja a referencia-időszak hozamait a jövőben. Mindezek ellenére megállapítható, hogy csak a nitrogén-hatóanyag mennyiségének növelése nem feltétlenül biztosítja a hozamok emelkedését és a megfelelő klímaadaptációt.

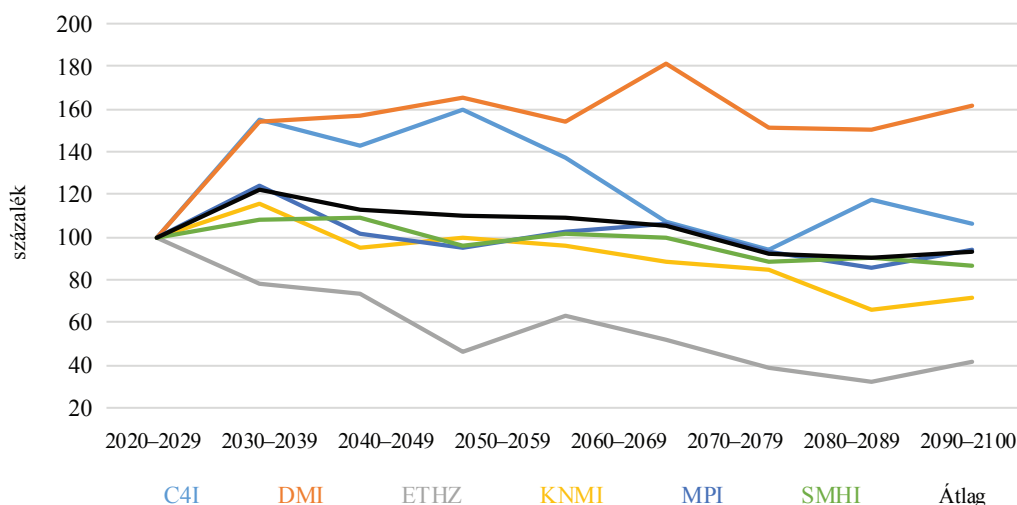
Ezen eredmények egybevágnak Dobor (2016) eredményeivel, amelyek alapján pusztán az ideális nitrogénműtrágya biztosítása nem elégséges a klímaváltozás okozta hozamcsökkenés ellensúlyozására.

Adaptáció öntözéssel

Az öntözés és az ennek megfelelően emelt nitrogéntrágyázás hatásait vizsgálva (77. ábra) látható, hogy a hat klímaszcenário alapján képzett átlag szerint a 120 kg/hektár nitrogénfelhasználás és az öntözés hatására a hozamok – a korábbi adaptációs forgatókönyvekhez képest minimális mértékben – 7 százalékkal csökkenhetnek 2100-ra. Ez a modelleredmény egyértelműen bizonyítja, hogy a klimatikus viszonyok változása alapvetően a kedvezőtlen mennyiségű és eloszlású csapadék miatt csökkentheti akár 20-30 százalékkal a hazai kukorica hozamokat. Ha a vízhiány problémáját sikerül megoldani, akkor a század közepéig jó eséllyel akár 20 százalékkal is emelkedhetnek a hozamok, köszönhetően a szén-dioxid-trágyázás jótékony hatásának. Ezt erősíti Dióssy (2011) véleménye is, aki szerint a növénynek a rendelkezésére álló vízmennyiség a jövő szűk keresztmetszete, éppen ezért a csapadék pótlására, amennyiben az kevesebb az optimálisnál, a gazdálkodóknak érdemes felkészülniük.

Eredményeink alátámasztják Ceglar *et al.* (2013) eredményeit, mely szerint a jelenlegi állapotok és a várható éghajlati változások tükrében 2030-ig az éghajlatváltozás miatti vízhiány növekedése emelheti a termés csökkenés kockázatát Közép- és Nyugat-Európában, mely öntözéssel kezelhető.

77. ábra: A hozamok százalékos változása a 2001–2014-es referencia-időszakhoz viszonyítva legalább 120 kg/hektár nitrogén-hatóanyag felhasználása és öntözés mellett



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

Megállapítható tehát, hogy a nagyobb kijuttatott nitrogén mennyisége öntözéssel párosítva növelte azon évek számát, amikor is a referenciaértékhez képest átlagosan 6-23 százalékos hozambővülés jelentkezett a 2020–2069. évek közötti időszakban. Figyelemreméltó, hogy a modellek között jelentős eltérések adódtak. Az ír és a dán modell esetében jelentős hozamemelkedés várható, ugyanakkor a svájci klímaszcenário alapján számolt hozamértékek jelentősen, 21-67 százalékkal eshetnek

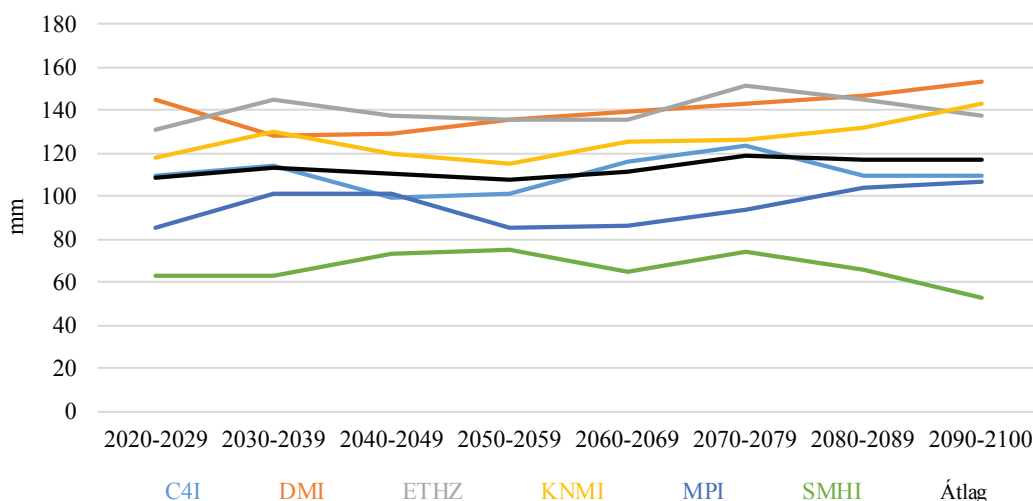
a megnövelt hatóanyag-tartalom és öntözés ellenére. A svájci modellhez és a hat modellből képzett átlaghoz hasonlóan, bár kisebb mértékben, de a német és a svéd előrejelzések is hasonló nagyságú és irányú csökkenést (–7 százalék) jeleznek 2100-ra.

Nyéki (2016) az öntözéssel mint klímaadaptációs eszközzel kapcsolatos vizsgálatai kutatásunkhoz hasonló eredményre vezettek. Modellezése során a 2013. évet tekintette bázisévnek, a becslésnél a 2013-as év meteorológiai viszonyait pótolta ki megfelelő csapadékkal, figyelembe véve az egyes területeken előforduló talajtípusokat is. Az általunk is használt klímaszcenáriók közül Nyékinél a svéd modell jósol olyan körülményeket a század végére, hogy precíziós, helyspecifikus öntözéssel a jelenlegi stabil kukoricatermés elérhető (4M modell: 7 százalék hozamcsökkenés). A dán és a holland modell már 25 százalékos hozamcsökkenést jelez, és csak homogén öntözéssel lehet moderálni a negatív légköri hatásokat, ami megegyezik az általunk becslésekkel. A svájci és a német modellek 30-50 százalékos csökkenést jeleztek, ami Nyéki szerint az öntözéssel sem kompenzálható – akár csak a 4M modell esetében becslült értékeknél.

Összességében megállapítható, hogy eredményeink alátámasztják Nyéki (2016), illetve Anda és Kocsis (2012) eredményeit, amelyek alapján – megfelelő nitrogéntápanyag és öntözés megléte mellett – a szén-dioxid-trágyázás hatására akár még növekedhetnek is a hozamok 2050-ig.

A 78. ábrán a modelleredmények szerinti, az adaptációhoz szükséges kiöntözött vízmennyiségek figyelhetők meg, amikor a lehullott csapadék mennyisége nem érte el a 40 mm-t, ezért kiegészítő öntözéssel számoltunk. Eredményeink szerint az átlagos kijuttatandó vízmennyiség az éghajlat változásával 100,2 mm-ről – kisebb ingadozásokkal – közel 120 mm-re növekedhet, párhuzamosan a klímaszcenáriók által becslült csapadékcsökkenéssel, illetve a hőmérséklet növekedéséből fakadó párolgásnövekedéssel. Az átlaghoz képest a svéd modell optimista a csapadék alakulásával kapcsolatban, jóval kisebb öntözési igényt becslve (53-75 mm), ezzel az öntözés kiegészítő szerepét feltételezve. A dán, a svájci és a holland klímaszcenáriók alapján kevésbé csapadékos évekre számíthatunk (azaz többet kell öntözni), vagyis a kijuttatandó vízmennyiség a 117-152 mm-t is elérheti. Az irországi és a németországi előrejelzések szerint a csapadékhiány következtében várhatóan 99-143 mm vízre lehet szükség a jövőben.

78. ábra: **Öntözés mennyisége (mm)**

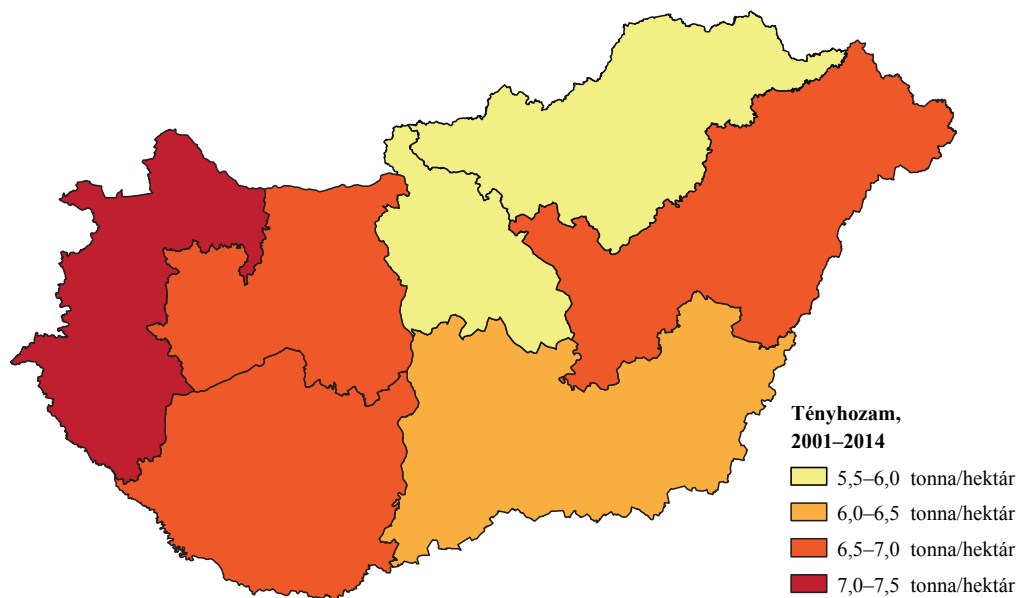


Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

Regionális elemzés

A 79. ábrán az ágazati adatok alapján számított átlaghozamokat mutatjuk be Magyarországra vonatkozóan a 2001–2014-es referencia-időszakban. A térképről leolvasható, hogy a legnagyobb kukorica hozamok a Nyugat-Dunántúlon fordultak elő (7-7,5 tonna/hektár), ezt követte a Közép- és Dél-Dunántúl, valamint az Észak-Alföld régió 6,5-7,0 tonna/hektárral. A Dél-Alföldön 6,0-6,5 tonna/hektár kukorica hozamok jelentkeztek a referencia-időszakban, Észak-Magyarországon volt a leggyengébb a kukoricatermés 5,5-6,0 tonna/hektár közötti hozamokkal.

79. ábra: Ágazati adatok alapján számított átlaghozamok 2001 és 2014 között

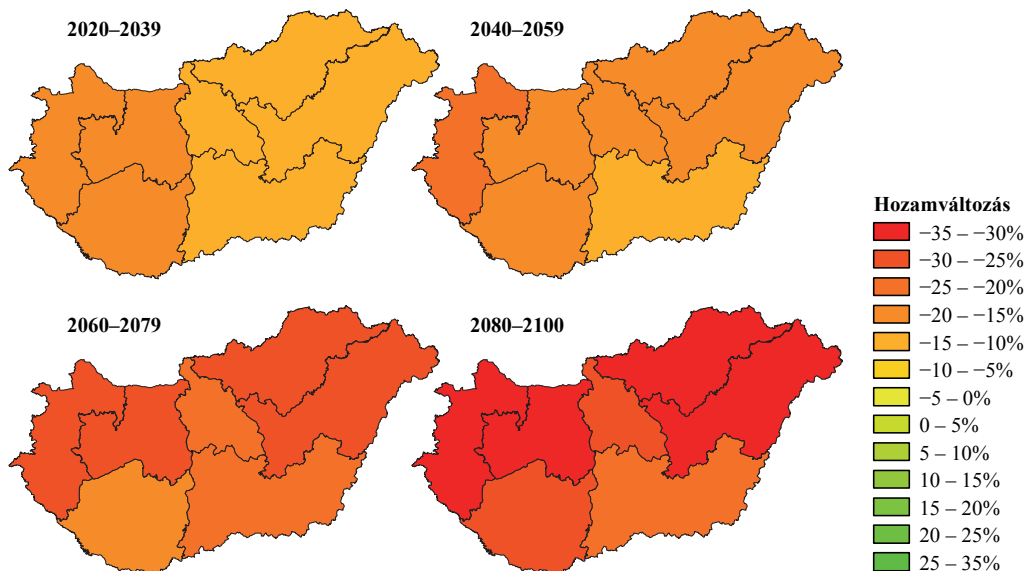


Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

Az alábbiakban a hat klímaszcenárióból számított 4M-modelleredményeket átlagoltuk, és a 2001–2014-es referencia-időszak hozamadataihoz képest vizsgáltuk a jövőbeni változásokat úgy, hogy első esetben csak a vetési időpontot változtattuk.

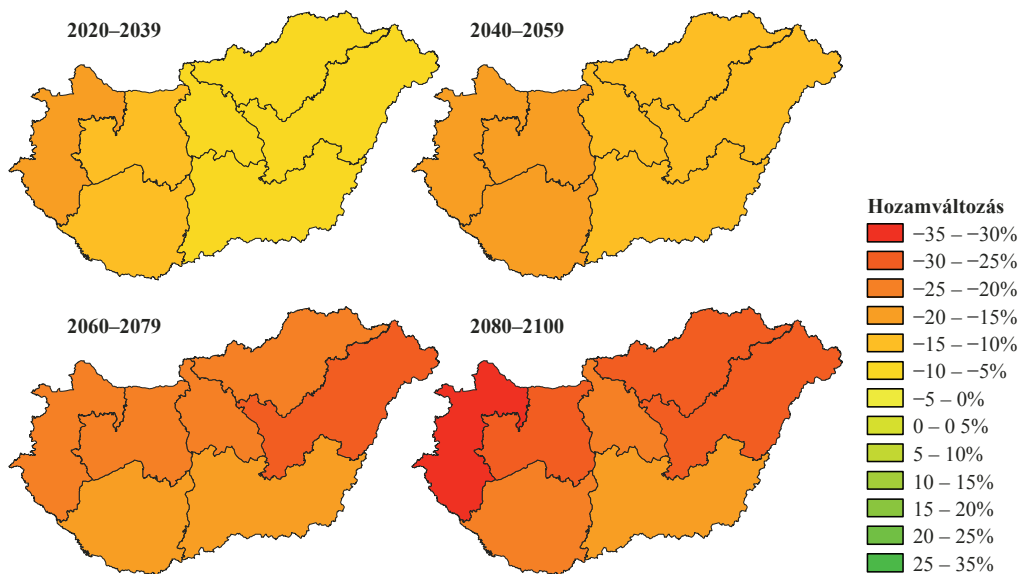
A 80. ábrán bemutatott eredmények alapján megállapítható, hogy amennyiben csak a vetés időpontját próbáljuk optimalizálni, abban az esetben minden régióban a hozamok csökkenése várható. Az első negyven évben a legnagyobb hozamcsökkenés a Dunántúlon következhet be (–15-20 százalék), az északibb fekvésű területeken mérsékeltebben eshetnek a hozamok (–12-17 százalék). Az idő előrehaladtával a modellezni kívánt közel 100 éves időszak második felében a hozamcsökkenés megkétszereződhet (–19-34 százalék) az előző periódushoz képest, azonban regionálisan az Észak-Magyarországon fekvő területek, továbbá a Nyugat- és Közép-Dunántúl területein a kukorica hozamok erőteljesebben apadhatnak (–31-34 százalék) a többi régióhoz képest (–24-30 százalék).

80. ábra: **Régiónkénti hozamváltozás a 2001–2014-es referencia-időszakhoz viszonyítva (klímaadaptáció csak a vetési időpontokban)**



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

81. ábra: **Régiónkénti hozamváltozás a 2001–2014-es referencia-időszakhoz képest minimum 90 kg/hektár nitrogén-hatóanyaggal**



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

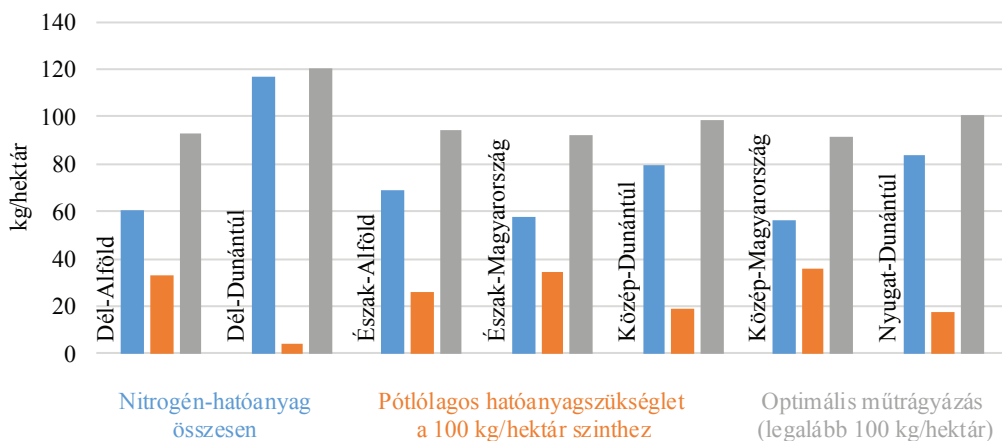
A 81. ábrán a regionálisan várható hozamalakulást mutatjuk be úgy, hogy minimálisan 90 kg/hektár nitrogén-hatóanyag kijuttatása történt. Jól látható, hogy önmagában a nitrogén-hatóanyag

kijuttatása a hozamok csökkenését nem tudta megakadályozni, ugyanakkor a csökkenés mértékét mérsékelte.

Összességében a négy húszéves ciklust tekintve látható, hogy vizsgálataink alapján minden régióban hozamcsökkenés számszerűsíthető 2100-ra. Az első két húszéves ciklust nézve a Dunántúlon várható a legnagyobb kiesés (–13-18 százalék). A várakozások szerint a legkevesbé Dél-Alföldön, valamint Közép-Magyarországon csökkenhetnek a hozamok (–7-13 százalék). A távolabbi két ciklusban minden régióban további visszaesésre lehet számítani a korábbiakhoz képest, a legnagyobb mértékű hozamcsökkenésre az Észak-Magyarország, az Észak-Alföld (–24-30 százalék), valamint a Nyugat-Dunántúl (–23-31 százalék) régióban számíthatnak.

A 82. ábrán a pótlólagosan kijuttatott nitrogén-hatóanyag mennyiségét mutatjuk be regionális bontásban. Az átlagérték (75,98 kg/hektár) azt a mennyiséget jelöli, amelyet a 2001–2014. évek közötti időszakban átlagosan juttattak ki a termelők, azonban ez nem jelenti azt, hogy minden régióban az optimális mennyiségű nitrogént adták a növény fejlődéséhez. Az ábrán tehát az átlag mellett megjelenik a pótlólagos nitrogénszükséglet (átlag/pótlólagos: 23,22 kg/hektár) az optimális 90 kg/hektár értékhez, illetve egy másik oszlop is, ami az átlagos és a pótlólagosan kijuttatott nitrogén-hatóanyag mennyiségének összegét mutatja. Megállapítható, hogy optimális műtrágyázás egyedül a Dél-Dunántúl régióban valósult meg (116,65 kg/hektár), a többi régióban 90 kg/hektár alatt ingadozott a kijuttatott hatóanyag mennyisége. A legrosszabb helyzet a közép- és észak-magyarországi, továbbá a dél-alföldi területeken volt, ahol is 32-35 kg/hektár pótlólagos hatóanyag kijuttatása lenne szükséges az optimális fejlődés eléréséhez.

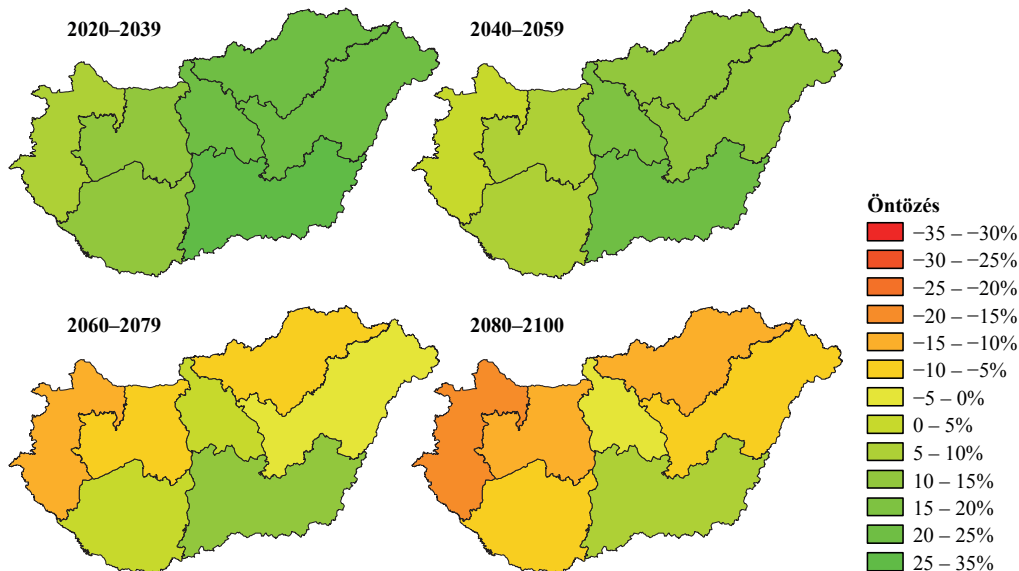
82. ábra: A pótlólagosan kijuttatott nitrogén-hatóanyag



Forrás: Készült az AKI Adatelemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

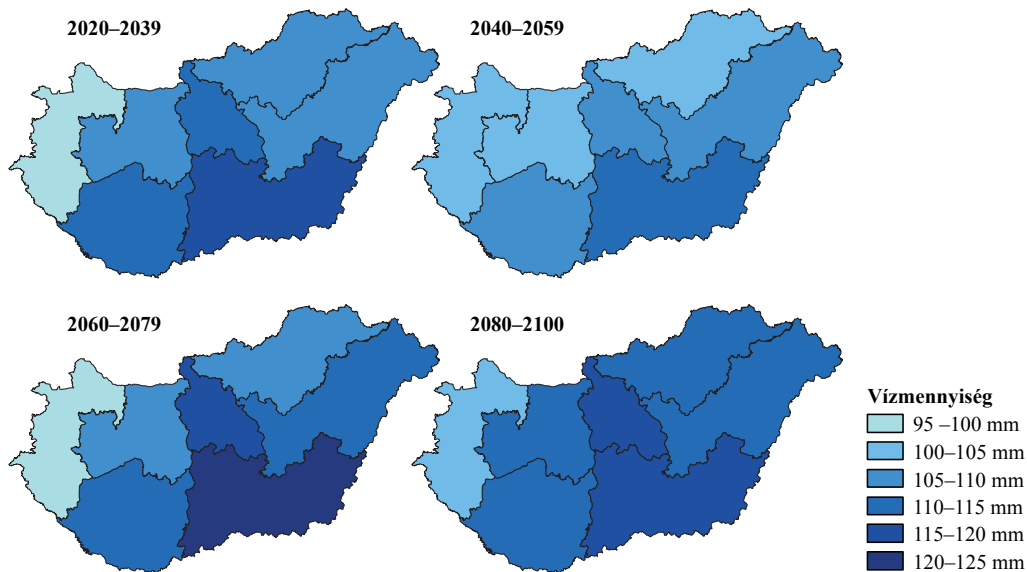
A 83. ábrán megfigyelhető, hogy önmagában a nitrogén-hatóanyag kijuttatása a hozamok csökkenését nem képes megakadályozni, azonban öntözéssel párosítva a hozamok növekedése modellezhető. Számításaink szerint az első két periódusban a többletnitrogén, illetve öntözés egyértelműen emelte a hozamokat minden régióban, a legnagyobb növekedés a Közép- és az Észak-Magyarország régiókban, valamint az Alföld egész területén következett be a modell eredményei alapján (+12-31 százalék). A Dunántúlon 1-14 százalékos hozamemelkedéssel lehet számolni a 2020–2059 közötti időszakban. Az ezt követő ciklusokban hozamcsökkenés várható – kivéve Dél-Alföldön –, így a dunántúli régiókban akár 20 százalékos visszaesés is jelentkezhet.

83. ábra: Régiókénti hozamváltozás a 2001–2014-es referencia-időszakhoz képest pótlólagos öntözéssel és minimum 120 kg/hektár nitrogén-hatóanyaggal



Forrás: Készült az AKI Adatalemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

84. ábra: Régiókénti kijuttatott öntözővíz (mm)



Forrás: Készült az AKI Adatalemzési és Térinformatikai Kutatások Osztályán

Az optimális kijuttatandó vízmennyiségek alapján megállapítható (84. ábra), hogy a Dél-Alföld régióban minden egymást követő húszéves periódusban szárazabb, nagyobb evapotranszpirációt okozó időjárásra számíthatnak a hat klímascenárióból képzett átlagérték alapján, azaz amennyiben

a csapadék nem éri el a szükséges szintet, akkor 110-125 mm vízmennyiség pótlása válhat szükségessé. Így 100 mm-t meghaladó pótlólagos öntözésre a Nyugat-Dunántúl kivételével minden régióban szükség lesz a termés hozamok csökkenésének megakadályozása érdekében.

Összességében megállapítható, hogy a klímaváltozás negatív hatását tápanyag-utánpótlással és öntözéssel mérsékelni lehet. A legoptimálisabb esetben (120 kg/hektár vagy annál több nitrogén-hatóanyag kijuttatásával, továbbá öntözéssel) a hozamok a klímaváltozás ellenére növelhetők, de legrosszabb esetben szinten tarthatók a kukorica esetében a következő közel 80-90 évben. Megállapítható továbbá, hogy az adaptációk sikeressége régióként jelentősen eltér, amely jelentős részben a természetföldrajzi adottságokkal van összefüggésben.

Megállapítható, hogy a kukorica esetében igazolható tanulmányunk 4. hipotézise (adaptációval csökkenthetők a klímaváltozás negatív hatásai), legalábbis az a része, amely az öntözésre vonatkozott. Az is megállapítható ugyanis, hogy önmagában az optimális műtrágya-kijuttatás nem növeli érdemben a hozamokat, illetve nem csökkenti jelentős mértékben a klímaváltozásból fakadó hozam-veszteséget. Az öntözés és az ehhez alkalmazkodó műtrágya-kijuttatás azonban az évszázad első felében akár növelheti is a hozamokat, azok csak az évszázad második felében csökkennek minimálisan a mai szintjük alá. Ezen eredmények gyakorlatilag az összes magyarországi régióra érvényesek, és olyan nagy vízigényt támasztanak a jelenlegi öntözőrendszerekkel szemben, amely komoly kihívást jelent majd a vízügyi ellátórendszer számára.

Executive summary

Introduction

Hungarian agriculture faces unfavourable agro-climatic trends, in terms of frequency and magnitude of negative impacts. Based on the forecasts of global and regional climate scenarios (which show significant variations) and in the absence of reductions in greenhouse gas emissions and the lack of adaptation to their negative effects, further deterioration of the environmental conditions of agricultural production is expected. This requires well-grounded preparation from stakeholders in the agricultural sector. To achieve this, it is necessary to quantify the consequences of possible interventions, their impacts on yields, costs and profitability. It is important to stress that despite continuous improvements, there is considerable uncertainty surrounding long-term climate predictions. Therefore the ‘ensembles’ approach is particularly recommended, which jointly takes into account several possible scenarios.

The effects of different climate change scenarios on agricultural production are assessed continuously in the rapidly-expanding empirical literature using global and regional climate models, including macroeconomic and aggregated sector data. So far, only a few publications based on farm-level (microeconomic) and nationally-representative agricultural management data have been published, which would be crucial for the purposes of efficient adaptation. For these reasons, several adaptation interventions remain undiscovered and/or their detailed assessment is needed. We are attempting to fill this gap.

Methods and data

In our research we used the CERES-based 4M crop simulation model adapted to Hungarian agricultural production conditions. We began by calibrating and validating the 4M model with Farm Accountancy Data Network (FADN) data at farm level, including matched classified soil information. This step is crucial for ensuring that the model simulates the growth of plants by taking into account the actual Hungarian agro-technical and environmental conditions. Then we estimated the farm-level yields (of those farms which have been participating in the FADN system for at least five years) in the reference period from 2001 to 2014 using the 4M model. Based on these data and taking into account climate scenarios, we estimated the expected yields of winter wheat and maize between 2021 and 2100.

The weather data of the reference period (global radiation, maximum-minimum temperatures, precipitation) were collected from the meteorological database of MARS-Agri4Cast (*Monitoring Agriculture with Remote Sensing*, MARS). Changes in yields compared to the reference period 2001-2014 were modelled using daily climatic data for climate scenarios developed by six research institutes (*Community Climate Changes Consortium for Ireland, Danish Meteorological Institute, The Royal Netherlands Meteorological Institute, Swiss Institute for Technology, Max-Planck-Institute for Meteorology, Swedish Meteorological and Hydrological Institute*) in order to reduce the uncertainty of model-estimates by averaging results (the so called ‘ensembles’ approach). The 4M model also takes into account the atmospheric carbon dioxide concentration. During the simulations of the reference period we calculated with the average annual concentration, while for the period 2021-2100 we used the SRES A1B scenario (having balanced energy structure) which can be considered as a neutral, ‘most likely’ scenario based on the current socio-economic processes.

Detailed soil parameters were taken into account for modelling wheat and maize yields (4M). Soil texture classes collected from farmers were used for field-level data during the calibration and validation of the model. The soil data were collected from the database of the Institute for Soil Sciences and Agricultural Chemistry, Centre for Agricultural Research of the Hungarian Academy of Sciences, based on the geographical location of the farm/plant.

Results

- Hungary has to face more severe impacts of climate change than the global average according to the regional climate models we have analysed. Average temperature has risen by 1.1°C between 1901 and 2016, but the rate of increase has risen over the last 35 years, reaching 1.62°C between 1981 and 2016. However, the average global temperature increase was 0.94°C, and in Europe 0.89-0.93°C, for the same period.
- Considering six regional climate models, parameter estimates for Hungary up to 2100 show very mixed results. The models are significantly different in the distribution of precipitation and in the direction of the change but, in general, the applied scenarios indicate additional warming (which can reach 3.5-4.0°C compared to the base year) and drying. Furthermore, the frequency of extreme weather events (heatwaves, hot days, heavy rains, severe thunderstorms, drought, sudden flood, strong winds) may increase significantly, substantially transforming the Hungarian agro-ecological potential.
- Initially, for winter wheat the 4M crop model overestimated the low yield and underestimated the high yield, while for maize the model underestimated the yields. For both crops, the distortion of the estimation was successfully reduced due to the calibration, which was supported by the validation. As a result, the 4M model became capable of estimating the effects of climate change and adaptation.
- Assuming that farmers are continuously adapting to changing climatic conditions and looking for optimal sowing and harvesting times, by 2050 the average sowing date of winter wheat will be delayed by more than 9 days and by 2100 the model estimates an average 12 days' delay compared to current practice. Moreover, by 2050, harvesting will occur 9 days earlier according to our estimates and by 2100 it will start 17 days sooner compared to current practice.
- Despite the above-mentioned minor adaptation, winter wheat yields are expected to decrease by 8 percent by 2050 and by 21 percent by 2100. Moreover, the results show significant standard deviation (for 2100 7-32 percent are expected).
- The first possible adaptation strategy for winter wheat we considered was switching to more intensive production by application of additional fertiliser (at least 100kg/ha of nitrogen [expressed in active substance]). We found that this practice cannot stop the yield reduction associated with adverse climatic changes. The effects of higher fertiliser doses on winter wheat yields remains within 1 percent compared to the baseline scenario.
- For winter wheat production, irrigation combined with increased (adjusted for optimal growth, with autumn and spring application) fertiliser dose (120 kg/ha) also proved to be an ineffective adaptation strategy. Until 2100, the decline in yields will decrease by only 1 percentage point due to irrigation. This is not surprising, since the calculated water demand is also minimal, 15 mm, which indicates that winter wheat does not require additional water (irrigation).
- For maize, by 2050 the average optimal sowing date will be more than 9 days earlier, and by the 2100s it will occur on average 14 days earlier compared to the current practice due to climate change. Furthermore, by 2050 harvest will take place 17 days earlier, and by 2100 it will start 31 days earlier than now.
- With the sowing and harvest date adjustments, maize yields are expected to fall by 18 percent until 2050 and by 28 percent until 2100. But the uncertainty of the results is even higher compared to winter wheat. Depending on the regional climate scenario, by 2100 the yield projections vary between a 10 percent increase and a 64 percent decrease.
- Contrary to the results for winter wheat, the use of more intensive practice (applying higher minimum nitrogen) reduces maize yield loss caused by climate change. According to model results, yield loss will be reduced to 15 percent until 2050 and to 25 percent until 2100.
- For maize, the application of optimal irrigation and nitrogen dose (120 kg/hectare) can significantly improve the result of adaptation. Until 2050, even yield growth can be expected (+10 percent compared to the current level), until 2100 yields will decrease by only 7 percent on

average when irrigation and adjusted nitrogen use is applied. On average, this requires 100-120 mm irrigation.

- In this case, regional differences become very significant. While in Western Transdanubia the already high yields (achieved with the application of high levels of fertiliser) can be reduced by 15-20 percent by 2100, in the South Great Plain they may even increase with the application of significant irrigation.
- It can be concluded that climate change-related yield loss and the related adaptation opportunities are crop specific. For winter wheat, neither more intensive nitrogen management nor irrigation can compensate for the negative rainfall conditions. For maize, irrigation can be an effective adaptation measure. However, this can be significantly hampered by the lack of availability of irrigation water – increased demand for other purposes (residential, industrial, ecological) – and the mismatching of geographical location.
- It is important to emphasise that the positive effects achieved by adaptation options presented in this study and expressed in terms of yield are not expressed in terms of costs and additional income. The economic feasibility of the successful adaptation strategy for maize needs to be further assessed in the future.

Kivonat

A klímaváltozás hatásának modellezése a főbb hazai gabonafélék esetében

Kemény Gábor (szerk.), Molnár András (szerk.) és Fogarasi József (szerk.)

Az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése, illetve azok negatív hatásaihoz történő alkalmazkodás hiányában, a globális és regionális klímaszcenáriók előrejelzése alapján (amelyek jelentős szórást mutatnak) a mezőgazdasági termelés környezeti feltételeinek további romlása várható. Mindez jól megalapozott felkészülést tesz szükségessé az agrárágazat szereplői részéről. Ehhez szükséges számszerűsíteni a lehetséges beavatkozások következményeit, azok hozamokra, költségekre és jövedelmezőségre gyakorolt hatását. Jelen kutatás a hatékony alkalmazkodás szempontjából kiemelkedően fontos, országosan reprezentatív, valós üzemi szintű (mikrogazdasági) agromenedzsment adatokra alapozott szimulációs hatásvizsgálatot dokumentál. Több regionális klíma-modell szimulációs eredményének figyelembevétele alapján – azok bizonytalansága mellett – a jelenlegi agrotechnika alkalmazása mellett a búza hozamának kisebb, míg a kukorica hozamának nagyobb mértékű csökkenése várható. A szimulációk eredménye szintén rámutat az egyes beavatkozások időpontjának változására, a tenyészidőszak eltolódására. Az őszbúza esetében, az általunk vizsgált alkalmazkodási lehetőségek (intenzívebb tápanyaggazdálkodás, öntözés) átlagosan nem tudták kompenzálni a klímaváltozás negatív hatását. Ugyanakkor a kukorica esetében az öntözés és az ehhez kapcsolódó megnövelt műtrágya felhasználás számottevően javítja az adaptáció eredményét: 2050-ig akár még hozamnövekedés is elképzelhető (+10 százalék a jelenlegi színvonalhoz képest), 2100-ig pedig csak 7 százalékkal csökkennek a hozamok a pótlólagos víz kijuttatásával (szemben az adaptáció nélkül várható 28%-os csökkenéssel). Fontos azonban hangsúlyozni, hogy a kukorica esetében adaptációval várhatóan elérhető, hozamokban kifejezett pozitív hatás nem került kifejezésre költségek és többletbevétel tekintetében. Ennek hiányában az adaptációs stratégiák gazdasági életképessége pillanatnyilag nem értékelhető.

Abstract

Modelling the impact of climate change for the key cereal crops in Hungary

KEMÉNY, Gábor (ed.), MOLNÁR, András (ed.) and FOGARASI, József (ed.)

Based on the forecasts of global and regional climate scenarios (which show significant variations) and in the absence of reductions in greenhouse gas emissions and the lack of adaptation to their negative effects, further deterioration of the environmental conditions of agricultural production is expected. This requires a well-grounded preparation from stakeholders in the agricultural sector. To achieve this, it is necessary to quantify the consequences of possible interventions, their impacts on yields, costs and profitability. This research documents possible adaptation strategies – using farm-level (FADN) and nationally-representative agricultural management data for crop simulation impact assessment. Based on the crop simulation results using multiple regional climate models – accounting for their uncertainty – a minor decrease in winter wheat and a substantial decline in maize yields is projected. Simulation results also indicate the importance of changing schedule of agro-management activities, the shifting of growing season. For winter wheat, the applied adaptation measures (more intensive nutrient management and irrigation) on average could not compensate for the negative impacts of changing climate conditions. However, for maize the application of irrigation and increasing nitrogen can significantly improve attainable future yields: by 2050 on average even a minor (10 percent) yield increase is possible relative to current figures, and only 7 percent decrease by 2100 (compared to 28 percent decrease relative to baseline). It should be emphasised that the yield gains achieved by adaptation are not confronted with their economics (costs, income). Future research should study the economic feasibility of these adaptation measures.

Mellékletek

Mellékletek jegyzéke

1. melléklet: A 4M modell adatigénye	100
2. melléklet: A 4M modell által használt talajattribútumok.....	101

1. melléklet: **A 4M modell adatigénye**

Talaj:

Talaj (minimális változat):

- Fizikai féleség (Arany-féle kötöttség)

Talaj (maximális változat):

- albedo
- termékeny réteg vastagsága
- térfogattömeg
- humusztartalom
- homok/iszap/agyag frakció aránya
- maximális vízkapacitás
- szabadföldi vízkapacitás
- hervadásponti nedvességtartalom
- hidraulikus vízvezető képesség
- kezdeti nedvességtartalom

Meteorológia (napi adatok):

- csapadék (mm),
- max. és min. hőmérséklet (°C) és ha van
- globálsugárzás (MJ/m²) vagy
- napsütéses órák száma

Növény:

- Termesztett növény (a növény megadása: faj- és ha lehetséges, a fajta megnevezése, pl. kukorica esetén FAO-szám vagy azzal analóg definíció, pl. középérésű)

Agrotechnika:

- vetés ideje, vetési sűrűség (tőszám)
- műtrágyázás ideje, kijuttatott NPK-hatóanyagok dózisa
- szerves trágyázás ideje, mennyisége
- öntözés ideje, a kijuttatott dózis

2. melléklet: A 4M modell által használt talajattribútumok

SOIL ID: CI Loam

LOCATION, latitude (deg): 47.2

LOCATION, longitude (deg): 19.5

TEXTURE: clay loam - clay loam

SOIL SURFACE DATA:

ALBEDO: 0.15

1st STAGE EVAPORATION LIMIT (mm): 6

RUNOFF CURVE NUMBER (0-100): 64

MAX POND DEPTH (mm): 0

MIN WATER CONTENT (cm³/cm³): 0.01

FERTILE ZONE DEPTH (cm): 170

PROFILE MATERIALS DATA:

HORIZON NR: 1 2

HORIZON ID: A BC

BULK DENSITY (g/cm³): 1,46 1,46

ROOT HOSPITABILITY (0-1): 1 1

MAX WATER CAPACITY (cm³/cm³): 0,505 0,505FIELD CAPACITY (cm³/cm³): 0,405 0,405WILTING POINT (cm³/cm³): 0,220 0,220

DRAINAGE FACTOR (0-1): 0,255 0,255

SATURATED CONDUCTIVITY (cm/d): 20 20

Kr(Se) FUNCTION PARAMETER: 1,05 1,05

PROFILE STRUCTURE & INITIAL CONDITION DATA:

DEPTH (cm): 2 7 20 50 80 110 140 170 200

MATERIAL: 1 1 1 1 2 2 2 2 2

ORGANIC MATTER

CONTENT (%): 3,05 3,05 3,05 2,29 1,53 1,22 0,77 0,31 0,08

ORGANIC RESIDUE (kg/ha): 50 200 500 200 100 50 1 1 1

NITRATE CONTENT (ppm): 12,0 12,0 12,0 12,0 2,0 2,0 2,0 2,0 2,0

AMMONIUM CONTENT (ppm): 12,0 12,0 12,0 12,0 2,0 2,0 2,0 2,0 2,0

AL-P2O5 CONTENT (ppm): 100 100 100 100 10 10 10 10 10

AL-K2O CONTENT (ppm): 150 150 150 150 10 10 10 10 10

pH (): 7,0 7,0 7,0 7,0 7,0 7,0 7,0 7,0 7,0

NITROGEN BALANCE DATA:

MINERALIZATION RATE: 0,00025

Hivatkozások jegyzéke

1. Abrahamsen, P. and Hansen, S. (2000): Daisy: an open soil-crop-atmosphere system model. *Environmental Modelling & Software* 15, 313–330. <http://code.google.com/p/daisy-model/wiki/About>
2. Ainsworth E.A. és Long S.P. (2005): What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist* 165, 351–372.
3. Alexandrov, V.A. (1997): Vulnerability of Agronomic Systems in Bulgaria. *Climatic Change* 36, 1-2. 135–149.
5. Anda, A. and Dióssy, L. (2010): Simulation in maize-water relations: a case study for continental climate (Hungary). *Ecohydrology* 3, 487–496.
6. Anda A., Burucs Z. és Kocsis T. (2011): Globális környezeti problémák és néhány társadalmi hatásuk. Kempelen Farkas Hallgatói Információs Központ. http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0032_fenntarthato_fejlodes/adatok.html
7. Anda, A. és Kocsis T. (2012): Microclimate simulation of climate change impacts in a maize canopy. *Időjárás - Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service* 116 (2), 109–122.
8. Aaheim, A., Amundsen, H., Dokken, T. and Wei, T. (2012): Impacts and adaptation to climate change in European economies. *Global Environ Change* 22 (4), 959–968.
9. Arrhenius, S. (1896): On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philosophical Magazine and Journal of Science Ser 5* (41), 237–276.
10. Bartholy J., Bozó L. és Haszpra L. (2011): Klímaváltozás – 2011. Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére. Magyar Tudományos Akadémia és az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszéke, Budapest, 281 p.
11. Bassu, S., Brisson, N., Durand, J.L., Boote, K., Lizaso, J., Jones, J.W., Rosenzweig, C., Ruarne, A.C., Adam, M., Baron, C., Basso, B., Biernath, C., Boogaard, H., Conijn, S., Corbeels, M., Deryng, D., De Sanctis, G., Gayler, S., Grassini, P., Hatfield, J., Hoek, S., Izaurralde, C., Jongschaap, R., Kamanian, A.R., Kersebaum, C., Kim, S.-H., Kumar, N.S., Makowski, D., Müller, C., Nendel, C., Priesack, E., Pravia, M.V., Sau, F., Shcherbak, I., Tao, F., Teixeira, E., Timlin, D. and Waha, K. (2014): How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors? *Global Change Biology*, 20 (7), 2301–2320. <https://doi.org/10.1111/gcb.12520>
12. Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W. and Courchamp, F. (2012): Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters* 15 (4), 365–377. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x/pdf>
13. Bosello, F., Eboli, F., Parrado, R., Nunes, P.A.L.D., Ding, H. and Rosa, R. (2011): The economic assessment of changes in ecosystem services: an application of the CGE methodology. *Economi'a Agraria y Recursos Naturales* 11 (1), 161–190.
14. Bozán Cs., Körösparti J., Andrási G., Túri N., Kun Á., Valentinyi K. 2015. Kedvezőtlen vízgazdálkodási állapotú mezőgazdaságilag művelt területek nagy felbontású belvíz-veszélyeztetettségi térképezése Magyarország síkvidéki területein (Alföld, Kisalföld, szórvány területek). Megbízó: VIZITERV Environ Kft. 70 p + térkép mellékletek.

15. Burg, V. (2007): Climate change affecting the Okavango Delta. Institute of Environmental Engineering (IfU), Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH Zurich).
16. Busch, G. (2006): Future European agricultural landscapes – what can we learn from existing quantitative land use scenario studies? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114, 121–140.
17. Carter, T.R., Saarikko, R.A., Niemi, K.J. and Carter, T.R. (1996): Assessing the risks and uncertainties of regional crop potential under a changing climate in Finland. Global climate change and agriculture in the North. Proceedings of an international symposium, Helsinki, Finland, 16-17 *Agricultural and Food Science in Finland*. 5.3. 329–350.
18. Ceglar, A., Chukaliev, O. and Duveiller, G. and Niemeyer, S. (2013): The impact of climate change on grain maize production over Europe - adaptation with different irrigation strategies. Conference Paper, American Geophysical Union, Fall Meeting 2013, https://www.researchgate.net/publication/261561831_Water_requirements_for_maize_production_in_Europe_under_changing_climate_conditions [2017.11.14.].
19. Challinor, A.J., Watson, J., Lobell, D.B., Howden, S.M., Smith, D.R. and Chhetri, N. (2014): A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change* 4, 287–291.
20. Ciscar, H.C., Iglesias, A., Feyen, L., Szabó, L., Van Regemorter, D., Amelung, B., Nicholls, R., Watkiss, P., Christensen, O.B., Dankers, R., Garrote, L., Goodess, C.M., Hunt, A., Moreno, A., Richards, J. and Soria, A. (2011): Physical and economic consequences of climate change in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108 (7), 2678–2683. <https://doi.org/10.1073/pnas.1011612108>.
21. Ciscar, J-C., Szabo, L., van Regemorter, D. and Soria, A. (2012): The integration of PESETA sectoraleconomic impacts into the GEM-E3 Europe model: methodology and results. *Climate Change* 112 (1), 127–142.
22. Czimmer K. és Illés G. (2015): A DTR működése. NYME, Agrárklíma projekt.
23. Csáfordi P. és Gribovszki Z. (2015): A talajerózió előrejelzése a klímaváltozás tükrében. NYME EMK GEVI, A10/3, Complex assessment of climate change impacts - preparing international R&D EU projects in the University of West Hungary (SROP-4.2.2.D-15/1/KONV-2015-0023).
24. Demidowicz, G., Deputat, T., Górski, T., Krasowicz, S. and Kus, J. (2000): Adaptation scenarios of agriculture in Poland to future climate changes. *Environmental Monitoring and Assessment* 61 (1), 133–144.
25. Dióssy L. (2011): Az éghajlatváltozás hatásának szimulációja kukoricán. Doktori (PhD-) értekezés (Pannon Egyetem Állat- és Agárakörnyezet-tudományi Doktori Iskola). 1–122.
26. Dixit, P.N., Telleria, R., Khatib, A.N.A. and Allouzi, S.F. (2018): Decadal analysis of impact of future climate on wheat production in dry Mediterranean environment: A case of Jordan. *Science of The Total Environment* 610–611, 1 January 2018. 219–233.
27. Dobor L. (2016): Az éghajlatváltozás lehetséges hatásai a mezőgazdasági szénmérlegre és produktivitásra Magyarországon. Doktori (PhD-) értekezés (Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék). 1–142.
28. Dobor L., Barczaa Z., Hlásny T., Árendás T., Spitkó T. és Fodor N. (2016): Crop planting date matters: Estimation methods and effect on future yields. *Agricultural and Forest Meteorology* 223, 103–115.

29. Donatelli, M., Russell, G., Rizzoli, A., Acutis, M., Adam, M., Athanasiadis, I., Balderacchi, M., Bechini, L., Belhouchette, H., Bellocchi, G., Bergez, J.-E., Botta, M., Braudeau, E., Bregaglio, S., Carlini, L., Casellas, E., Celette, F., Ceotto, E., Charron-Moirez, M., Confalonieri, R., Corbeels, M., Criscuolo, L., Cruz, P., Guardo, A., Ditto, D., Dupraz, C., Duru, M., Fiorani, D., Gentile, A., Ewert, F., Gary, C., Habyarimana, E., Jouany, C., Kansou, K., Knapen, R., Filippi, G., Leffelaar, P., Manici, L., Martin, G., Martin, P., Meuter, E., Mugueta, N., Mulia, R., Noordwijk, M., Oomen, R., Rosenmund, A., Rossi, V., Salinari, F., Serrano, A., Sorce, A., Vincent, G., Theau, J.-P., Thron, O., Trevisan, M., Trevisiol, P., Evert, F., Wallach, D., Wery, J. and Zerourou, A. (2010): A component-based framework for simulating agricultural production and externalities. In Brouwer, F.M. and Ittersum, M.K. (eds.), Springer, Environmental and Agricultural Modelling. Chapter 4, 63–108.
30. Donatelli, M., Duveiller, G., Fumagalli, D., Srivastava, A., Zucchini, A., Angileri, V., Fasbender, D., Loudjani, P., Kay, S., Juskevicius, V., Toth, T., Hastrup, P., M'barek, R., Espinosa, M., Ciaian, P. and Niemeyer, S. (2012): Assessing Agriculture Vulnerabilities for the design of Effective Measures for Adaption to Climate Change (AVEMAC Project).
31. Dosio, A., Paruolo, P. and Rojas, R. (2012): Bias correction of the ENSEMBLES high resolution climate change projections for use by impact models: Analysis of the climate change signal. *Journal of Geophysical Research* 117 (D17).
32. Durdu, Ö.F. (2012): Evaluation of climate change effects on future corn (*Zea mays* L.) yield in western Turkey. *International Journal of climatology*, Research Article, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.3435/full>
33. EC (2016): Causes of climate change. http://ec.europa.eu/clima/change/causes/index_en.htm
34. EEA (2009): Water Resources Across Europe – Confronting Water Scarcity and Drought. European Environment Agency (EEA), Publications Office of the European Union, Luxembourg, Luxembourg, 55 p.
35. EEA (2012): Climate Change, Impacts and Vulnerability in Europe 2012, an Indicator-Based Report. EEA Report No. 12/2012, European Environment Agency (EEA), Copenhagen, Denmark, 304 p.
36. EEA (2015b): EEA SIGNALS 2015: Living in a changing climate. European Environment Agency (EEA), Copenhagen, Denmark. 37 p.
37. EEA (2016): Floodplain management: reducing flood risks and restoring healthy ecosystems. <https://www.eea.europa.eu/highlights/floodplain-management-reducing-flood-risks>.
38. EEA (2018): Global and European temperature, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/global-and-european-temperature-8/assessment>
39. ESPON Climate (2013): Climate change and territorial effects on regions and local economies. Final report, ESPON and IRPUD. Dortmund: TU Dortmund.
40. Erdélyi É. (2008): Az őszi búza termesztetőségi feltételei az éghajlatváltozás függvényében. Doktori (PhD-) értekezés (Budapesti Corvinus Egyetem, Kertészettudományi Kar, Matematika és Informatika Tanszék).
41. Erdélyi É. (2007): A klímaváltozás hatása az őszi búza fejlődési szakaszaira. „KLÍMA-21” Füzetek 51, 57–71.
42. Erdélyi, É., Horváth, L., Boksai, D. and Ferenczy, A. (2006): How climate change influences the field crop production. II. Yield.

43. Estrella, N., Sparks, T.H. and Menzel, A. (2007): Trends and temperature response in the phenology of crops in Germany. *Global Change Biology* 13, 1737–1747.
44. European Court of Auditors (ECA) (2015): The integrity and implementation of the EU ETS. Special Report. Luxembourg, 74 p.
45. Farsang B., Limbek Zs., Türei G., Tóth I.J. és Verba Z. (2015): A klímaváltozás várható gazdasági hatásai Magyarországon 2020-2040. Budapest: MKIK Gazdaság- és Vállalkozáskutató Intézet, 52 p.
46. Fodor, N., Pásztor, L. and Németh, T. (2014): Coupling the 4M crop model with national geo-databases for assessing the effects of climate change on agro-ecological characteristics of Hungary. *International Journal of Digital Earth* 7, 391–410.
47. Fodor, N., Máthéné-Gáspár G., Pokovai, K. and Kovács, G. (2002): 4M software package for modeling crop system. *European J. of Agr.* 18/3-4, 389–393.
48. Fodor, N. (2006): 4M – Software for Modelling and Analysing Cropping Systems. *Journal of Universal Computer Science* 12 (9): 1196–1207.
49. Fogarasi, J., Kemény, G., Molnár, A., Keményné, H.Zs., Zubor-Nemes, A. and Kiss, A. (2016): Modelling climate effects on Hungarian winter wheat and maize yields. *Studies in Agricultural Economics* 118 (2), 85–90.
50. Fuhrer, J. (2003): Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 97, 1–20.
51. Fülek, Gy. (szerk.) (2011). Talajvédelem, talajtan. Pannon Egyetem, Veszprém, p. 277.
52. Gaál, M. (2008): Expected changes in climatic conditions of main crops. „KLÍMA-21” Füzetek 55, 28–35. (English Special Edition).
53. Gálos, B., Gulyás, K., Horváth, A. and Bidló, A. (2015): Long-term climate tendencies for adaptive forest management – a case study of the Keszthely-Mountains. Complex assessment of climate change impacts - preparing international R&D EU projects in the University of West Hungary (SR0P-4.2.2.D-15/1/KONV-2015-0023).
54. Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A. and Tempio, G. (2013): Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) <http://www.fao.org/3/i3437e.pdf>
55. Ghaffari, A., Cook, H.F. and Lee, H.C. (2002): Climate Change and Winter Wheat Management: A Modelling Scenario for South-Eastern England. *Climatic Change* 55 (4), 509–533.
56. Grandjean, A. (2016): Impacts possibles du changement climatique sur l'évolution des productions végétales en Russie, Ukraine et Kazakhstan à l'horizon 2065, Ministère de l'agriculture de l'agroalimentaire et de la forêt, Analyse, 1–4.
57. Goudriaan, J. (1977) Crop Micrometeorology: A Simulation Study. Simulation Monograph. PUDOC, Wageningen
58. Harnos N. (2002): A klímaváltozás várható hatásai kalászos gabonafélék produkcióbíológijára: kísérleti és modellezési megközelítés. Doktori (PhD-) értekezés (Szent István Egyetem, Gödöllő).
59. Harnos Zs. (2008): OTKA-42583 kutatási zárójelentés.

60. Harnos, Zs. (2007): Klímaváltozással összefüggő hazai kutatások: VAHAVA folytatása. „KLÍMA-21” Füzetek 49, 3–16.
61. Hoyk Edit (2015): A magyarországi klímamodellek, Publikon Kiadó
62. IPCC (2000): Emissions Scenarios. Nakicenovic, N. and Swart, R. (eds.), Cambridge: Cambridge University Press, 570 p.
63. IPCC (2007): Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J. and Hanson, C.E. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 p.
64. IPCC (2013): Climate change 2013: the physical science basis. Working Group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Oxford: Oxford University Press.
65. IPCC (2014a): Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability, working group II contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Oxford: Oxford University Press.
66. IPCC (2014b): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 151 p.
67. IPCC (2014c): Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., von Stechow, C., Zwickel, T. and Minx, J.C. (szerk.). Cambridge: Cambridge University Press.
68. Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B. et al. (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg Environ Change* (2014) 14: 563. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
69. Jolánkai M., Láng I. és Csete L. (2007): A globális klímaváltozás - hazai hatások és válaszok. A VAHAVA jelentés. Szaktudás Kiadó Ház Rt., Budapest
70. Jones, C.A. and Kiniry, J.R. (1986): CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development. Texas A&M University Press, College Station, Texas.
71. Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J. and Ritchie, J.T. (2003): The DSSAT cropping system model. *Europ. J. Agronomy* 18, 235–265.
72. Kemény, G., Fogarasi, J., Molnár, A., Zubor-Nemes, A. and Kiss, A. (2015): Climate Impacts on Cereal Yields: A Hungarian Case, Complex assessment of climate change impacts - preparing international R&D EU projects in the University of of West Hungary
73. Kim, S.H., Myoung, B., Stack, D.H., Kim, J. and Kafatos, M. C. (2016): Sensitivity of maize yield potential to regional climate in the Southwestern U.S. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 59 (6), 1745–1757. <https://doi.org/10.13031/trans.59.11584>
74. Kimball, B.A., Morris, C.F., Pinter, P.J., Wall, g. W., Hunsaker, D., J.-Adamsen, F.J. (2001): Elevated CO₂, drought and soil nitrogen effects on wheat grain quality. *New Phytologist* 150, 295–303.

75. Kundzewicz, Z.W., Pińskwar, I. and Brakenridge, G.R. (2013): Large floods in Europe, 1985–2009. *Hydrological Sciences Journal* 58 (1), 1–7. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.745082>
76. Lakatos L., Gonda I., Soltész M., Szabó Z., Zhong-Fu, S. és Nyéki J. (2009): A nyári metszés hatása a sugárzásviszonyokra almaültetvényekben. „KLÍMA-21” Füzetek 58, 52–57.
77. Lakatos, L., Gonda, I., Zhong-Fu, S., Soltész, M., Szabó, Z., Dussi, M. and Nyéki, J. (2011): The role of meteorological variables of blossoming and ripening within the tendency of qualitative indexes of sour cherry. *International Journal of Horticultural Science*.
78. Lobell, D.B. and Field, C.B. (2007): Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters* 2, 014002
79. Luterbacher, J., Werner, J.P., Smerdon, J.E., Fernández-Donado, L., González-Rouco, F.J., Barriopedro, D., Ljungqvist, F.C., Büntgen, U., Zorita, E., Wagner, S., Esper, J., McCarroll, D., Toreti, A., Frank, D., Jungclaus, J.H., Barriendos, M., Bertolin, C., Bothe, O., Brázdil, R., Camuffo, D., Dobrovolný, P., Gagen, M., García-Bustamante, E., Ge, Q., Gómez-Navarro, J.J., Guiot, J., Hao, Z., Hegerl, G.C., Holmgren, K., Klimenko, V.V., Martín-Chivelet, J., Pfister, C., Roberts, N., Schindler, A., Schurer, A., Solomina, O., von Gunten, L., Wahl, E., Wanner, H., Wetter, O., Xoplaki, E., Yuan, N., Zanchettin, D., Zhang, H. and Zerefos, C. (2016): European Summer Temperatures since Roman Times. *Environmental Research Letters* 11, 024001, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/2/024001>
80. Makó A., Máté F., Szász G., Tóth G., Sisák I. és Hernádi H. (2009): A talajok klímaérzékenysége vizsgálat a kukorica termésreakciói alapján. „KLÍMA-21” Füzetek 56, 18–35.
90. Mátyás, Cs. (2015): The impact of climate change on effectiveness of plant production technologies and its possible mitigation - A review of the research activity of Institute of Biosystems Engineering (UWH), Complex assessment of climate change impacts - preparing international R&D EU projects in the University of West Hungary (SROP-4.2.2.D-15/1/KONV-2015-0023).
100. *Metroeconomica* (2004): Costing the impacts of climate change in the UK: overview of guidelines. UKCIP technical report. Oxford: UKCIP.
101. Moss, R.H., Edmonds, J., Hibbard, K., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M. and Kram, T. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756.
102. Mukhtar, A., Stöckle, O.C., Roger, N. and Stewart, H. (2017): Ensembles modeling approach to study climate change impacts on wheat. 19th EGU General Assembly, EGU2017, proceedings from the conference held 23-28 April, 2017 in Vienna, Austria., 340 p.
103. Mullan, D., Favis-Mortlock, D. and Fealy, R. (2012): Addressing key limitations associated with modelling soil erosion under the impacts of future climate change. *Agricultural and Forest Meteorology* 156, 18–30.
104. Nagy, J. (2006): Maize production. Budapest: Akadémiai Kiadó, 391 p.
105. Nagy J. (2017): Klímaváltozás és a műtrágyázás hatása a kukorica termelésére debreceni tartamkísérletekben. *Növénytermelés* 66 (3), 11–32.
106. Nagy P., Szabó T., Soltész M., Nyéki J. és Szabó Z. (2011): A csapadékos időjárás hatása az almaültetvény tápanyagfelvételére és -ellátottságára. „KLÍMA-21” Füzetek 64, 22–26.

107. Nagy P., Szabó Z., Nyéki J. és Soltész M. (2009): Tavaszi fagyhatás indukálta rendszertelen természhozás és tápanyag-felvételi anomália integrált almaültetvényben. „KLÍMA-21” Füzetek 58, 58–64.
108. Neményi, M. (2015): The impact of climate change on effectiveness of plant production technologies and its possible mitigation - A review of the research activity of Institute of Biosystems Engineering (UWH), Complex assessment of climate change impacts - preparing international R&D EU projects in the University of West Hungary (SROP-4.2.2. D-15/1/KONV-2015-0023).
109. Németh, Zs.I., Pozsgai-Harsányi, M., Gálos, B. and Albert, L. (2009): Stress sensitivity of correlation between POD and PPO activities in plants. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* 5, 27–45.
110. Nyéki A. (2016): A precíziós növénytermesztés és a fenntartható mezőgazdasági kapcsolata. Doktori (PhD-) értekezés (Wittmann Antal Növény-, Állat és Élelmiszer-tudományi Multidiszciplináris Doktori Iskola, Mosonmagyaróvár). 1–179.
111. Nyéki, A., Milics, G., Kovács, A.J. and Neményi, M. (2015): Basic elements of sensitivity analysis of climate change impact with partial regard to precision maize production. Complex assessment of climate change impacts - preparing international R&D EU projects in the University of West Hungary (SROP-4.2.2.D-15/1/KONV-2015-0023).
112. Olesen, J.E., Trnka, M., Kersebaum, K.C., Skjelvåg, A.O., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rossi, F., Kozyra, J. and Micale, F. (2011): Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy* 34, 96–112.
113. Ortiz-Bobea, A. (2017): U.S. Maize Yield Growth and Countervailing Climate Change Impacts. In Lipper, L., McCarthy, N., Zilberman, D., Asfaw, S. and Branca, G. U(eds.): *Climate Smart Agriculture. Building Resilience to Climate Change*. Springer, FAO, 161-171. pp. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61194-5_8
114. Özdoğan, M. (2011): Modeling the impacts of climate change on wheat yields in Northwestern Turkey. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 141 (1–2), 1–12.
115. Pálfi I. (2010): Az aszályok gyakorisága a Kárpát-medencében az utóbbi háromszáz évben. „KLÍMA-21” Füzetek 59, 42–45.
116. Pepó P. (2002): A hazai őszi búzatermesztés helyzete és fejlesztési lehetőségei. *Gyakorlati Agroforum* 13 (9), 2–5.
117. Pepó P. (2009): Az elővetemény és a tápanyagok hatása az őszi búza termésére. *Agroforum* 20 (9), 14–16.
118. Pepó P. (2010): A magyar búzatermesztés agronómiai értékelése. *Növénytermelés* 59 (2), 85–100.
119. Pepó P. (2014): A növényi modellek szerepe a növénytermesztés versenyképességének a növelésében. *Debreceni Szemle* 2014/4, 311–320.
120. Pindyck, R.S. (2013): Climate change policy: what do the models tell us? *Journal of Economic Literature* 51 (3), 860–872.
121. Polgár, A. and Pécsinger, J. (2015): Eco-balancing of Forestry and Field Plant Production Technologies in Environmental Life-Cycle Thinking. Complex assessment of climate change impacts - preparing international R&D EU projects in the University of West Hungary (SROP-4.2.2.D-15/1/KONV-2015-0023).

122. Racskó J., Lakatos L., Nyéki J., Soltész M. és Szabó Z. (2008): Almafajták gyümölcsseinek napégés érzékenysége eltérő növekedési erélyű alanyokon. „KLÍMA-21” Füzetek 58, 13–36.
123. Rosegrant, M.W., Koo, J., Cenacchi, N., Ringler, C., Robertson, R., Fisher, M., Cox, C., Garrett, K., Perez, N.D. and Sabbagh, P. (2014): Food security in a world of natural resource scarcity: the role of agricultural technologies. IFPRI (International Food Policy Research Institute), Washington, USA, 1–251.
124. Rosenzweig, C., Jones, J.W., Hatfield, J.L., Ruane, A.C., Boote, K.J., Thorburn, P., Antle, J.M., Nelson, G.C., Porter, C., Janssen, S., Asseng, S., Basso, B., Ewert, F., Wallach, D., Baigorria, G. and Winter, J.M. (2013): The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): Protocols and pilot studies. *Agricultural and Forest Meteorology* 170, 166–182.
125. Rounsevell, M., Reginster, I., Araujo, M.B., Carter, T.R., Ewert, F., House, J.I., Kankaanpää, S., Leemans, R., Metzger, M., Schmidt, C., Smith, P. and Tuck, G. (2006): A coherent set of future land use change scenarios for Europe. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114 (1), 57–68.
126. Ruane, A.C., Hudson, N.I., Asseng, S., Camarrano, D., Ewert, F., Martre, P., Boote, K.J., Thorburn, P.J., Aggarwal, P.K., Angulo, C., Basso, B., Bertuzzi, P., Biernath, C., Brisson, N., Challinor, A.J., Doltra, J., Gayler, S., Goldberg, R., Grant, R.F., Heng, L., Hooker, J., Hunt, L.A., Ingwersen, J., Izaurralde, R.C., Kersebaum, K.C., Kumar, S.N., Müller, C., Nendel, C., O’Leary, G., Olesen, J.E., Osborne, T.M., Palosuo, T., Priesack, E., Ripoche, D., Rötter, R.P., Semenov, M.A., Shcherbak, I., Steduto, P., Stöckle, C.O., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Travasso, M., Waha, K., Wallach, D., White, J.W. and Wolf, J. (2016): Multi-wheat model ensemble responses to inter annual climate variability. *Environmental Modelling & Software* 81, 86–101.
127. Sábitz J., Szépszó G., Zsebeházi G., Szabó P., Illy T., Bartholy J., Pieczka I. és Pongrácz R. (2015): A klímamodellekből levezethető indikátorok alkalmazási lehetőségei. In Szépszó G. (szerk.): NATÉR EEA-C11-1 beszámoló. 111 p.
128. Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J. and Barbosa, P. (2015): European drought climatologies and trends based on a multi-indicator approach. *Global and Planetary Change* 127, 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.01.012>.
129. Soltész M., Nyéki J. és Lévai P. (2011): Aszály és szárazodás elleni küzdelem a kertészeti termesztésben. „KLÍMA-21” Füzetek 64, 5–11.
130. Somlyódy L., Novák B. és Simonffy Z. (2010): Éghajlatváltozás, szélsőségek és vízgazdálkodás. „KLÍMA-21” Füzetek 61, 15–32.
131. Sommer, R., Glazirina, M., Yuldashev, T., Otarov, A., Ibraeva, M., Martynova, L., Bekenov, M., Kholov, B., Ibragimov, N., Kobilov, R., Karaev, S., Sultonov, M., Khasanova, F., Esanbekov, M., Mavlyanov, D., Isaev, S., Abdurahimov, S., Ikramov, R., Shezdyukova, L. and de Pauw, E. (2013): Impact of climate change on wheat productivity in Central Asia. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 178, 78–99.
132. Starkel, L. (2005): Anthropogenic soil erosion since the Neolithic time in Poland. *Zeitschrift für Geomorphologie (suppl.)* 139, 189–201.
133. Stern, N. (2008): The Economics of Climate Change. *American Economic Review* 98, 1–37.
134. Stöckle, C.O., Donatelli, M. & Nelson, R. (2003): Cropsyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18, 289–307.

135. Supit, I., van Diepen, C.A., de Wit, A.J.W., Kabat, P., Baruth, B. and Ludwig, F. (2010): Recent changes in the climatic yield potential of various crops in Europe. *Agricultural Systems* 103, 683–694.
136. Szabó F., Anda A., Tempfli K. és Bene Sz. (2017): A csapadékmennyiség és az átlaghőmérséklet hatása lápi legelőn tartott húsmarha állomány néhány anyai értékmérő tulajdonságára. *Állattenyésztés és Takarmányozás* 66 (4), 383–397.
137. Szabó, F., Tasi, J., Tempfli, K., Gulyás, L., Bajnok, M. and Halász, A. (2015): The effect of climatic change on management and animal carrying capacity of grasslands. Complex assessment of climate change impacts - preparing international R&D EU projects in the University of West Hungary (SROP-4.2.2.D-15/1/KONV-2015-0023).
138. Széles A. és Ferencsik S. (2018): A klimatikus tényezők és a műtrágyázás hatása eltérő genotípusú kukorica hibridek termésére és jövedelmére. *Növénytermelés* 67 (1), 49–68.
139. Szépszó, G. and Horányi, A. (2008): Transient simulation of the REMO regional climate model and its evaluation over Hungary. *Időjárás* 112 (3–4), 203–231.
140. Szépszó G., Imke Lingemann, Bastian Klein, Kovács M. (2014): Impact of climate change on hydrological conditions of Rhine and Upper Danube rivers based on the results of regional climate and hydrological models., *NATURAL HAZARDS* 72: (1) pp. 241-262
141. Szépszó G., Krüzselyi I., Illy T., Sábitz J., (2015): Az ALADIN-Climate regionális klímamodell integrálási tartományának megválasztására vonatkozó érzékenységvizsgálat. RCMTÉR (EEA-C13-10) projekt beszámoló, 2015. április, 19 p.
142. Szépszó G., Illy T. és Sábitz J. (2016): Éghajlati projekció az ALADIN modellel. A sugárzási kényszer változásán alapuló új éghajlati scénáriók a Kárpát-medence térségére. EEA-C13-10. Budapest: OMSZ.
143. Takács-Sánta A. (szerk.) (2005): Éghajlatváltozás a világban és Magyarországon. Budapest: Alinea Kiadó - Védegylet. http://www.vedegylet.hu/globfesz2/anyag/%C9ghajlat_web.pdf
144. Tao, F., Hayashi, Y., Zhang, Z., Sakamoto, T. and Yokozawa, M. (2008): Global warming, rice production, and water use in China: Developing a probabilistic assessment. *Agricultural and Forest Meteorology* 148, 94–110.
145. Tarnawa, Á., Klupács, H., Sallai, A., Szalay, K., Kassai, M.K., Nyárai, H.F. and Jolánkai, M. (2010): Study on the impact of main climatic factors of crop production in a mathematical model. In Celková, A. (ed.): Transport of water, chemicals and energy in the soil-plant-atmosphere system. Institute of Hydrology, Bratislava, 566–571.
146. Terbe I. (2015): Termesztéchnológiai lehetőségek és megoldások a zöldségtermesztésben a klímaváltozás hatásainak ellensúlyozására. *Agrárágazat* XVI, 36–38.
147. Tietenberg, T. and Lewis, L. (2012): *Environmental & Natural Resource Economics*. New Jersey: Pearson Education. <http://s1.downloadmienphi.net/file/downloadfile7/200/1375238.pdf>
148. Tóthné Lőkös K. és ifj. Lőkös L. (2013): A hazai őszi búza termőterületek klímaérzékenységének megye szintű vizsgálata. *Növénytermelés* 62 (2), 89–109.
149. Trenberth, K.E. (2011): Changes in precipitation with climate change. *Climate Research* 47, 123–138.
150. UN (1998): Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change. United Nations, <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>

151. van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J. and Rose, S.K. (2011): The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109, 5–31.
152. Vanuytrecht, E., Raes, D. and Willems, P. (2015): Regional and global climate projections increase mid-century yield variability and crop productivity in Belgium. *Regional Environmental Change* 16, 659–672. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0773-6>
153. Wang, S., McGrath, R., Semmler, T., Sweeney, C. and Nolan, P. (2006): The impact of the climat change on discharge of Suir River Catchment (Ireland) under different climate scenarios. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 6, 387–395.
154. Wilcox, J. and Makowskia, D. (2014): A meta-analysis of the predicted effects of climate change on wheat yields using simulation studies. *Field Crops Research* 156, 180–190.
155. Williams, J. (1990): EPIC - Erosion Productivity Impact Calculator: 2. User Manual. USDA Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, United States.
156. WMO (1979): Declaration of the world climate conference. World Meteorological Organization, Geneva
157. van Diepen, C.A., Wolf, J., van Keulen, H., Rappoldt, C. (1989): WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management* 5 (1), 16–24. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1989.tb00755.x>
158. Zhao, C., B. Liu, S. Piao, X. Wang, D.B. Lobell, Y. Huang, M. Huang, Y. Yao, S. Bassu, P. Ciais, J.-L. Durand, J. Elliott, F. Ewert, I.A. Janssens, T. Li, E. Lin, Q. Liu, P. Martre, C. Müller, S. Peng, J. Peñuelas, A.C. Ruane, D. Wallach, T. Wang, D. Wu, Z. Liu, Y. Zhu, Z. Zhu, and S. Asseng, 2017: Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 114, no. 35, 9326–9331, doi:10.1073/pnas.1701762114

