



# Az őszi búza termesztetőségi feltételei az éghajlatváltozás függvényében

Doktori (PhD) értekezés

**Erdélyi Éva**

**Témavezető:**

*Dr. Harnos Zsolt, MHAS, egyetemi tanár*

*BCE, Kertészettudományi Kar, Matematika és Informatika Tanszék*

**Szakmai konzulens:**

*Dr. Ladányi Márta, PhD, egyetemi adjunktus*

*BCE, Kertészettudományi Kar, Matematika és Informatika Tanszék*

**Budapesti Corvinus Egyetem, Kertészettudományi Kar  
Matematika és Informatika Tanszék  
2008**

**A doktori iskola**

**megnevezése:**

Budapesti Corvinus Egyetem  
Tájépítészet és Döntéstámogató Rendszerek  
(4.6. Interdiszciplináris Agrártudományok)

**tudományága:**

4.1.Növénytermesztési és kertészeti tudományok

**vezetője:**

Harnos Zsolt, MHAS  
tanszékvezető egyetemi tanár  
Budapesti Corvinus Egyetem, Kertészettudományi Kar  
Matematika és Informatika Tanszék

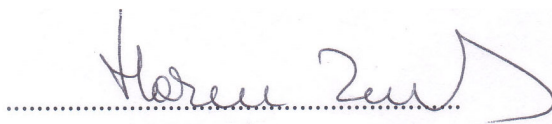
**Témavezető:**

Harnos Zsolt, MHAS  
tanszékvezető egyetemi tanár  
Budapesti Corvinus Egyetem, Kertészettudományi Kar  
Matematika és Informatika Tanszék

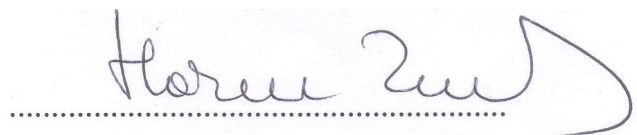
**Szakmai konzulens:**

Dr. Ladányi Márta, PhD, egyetemi adjunktus  
Budapesti Corvinus Egyetem, Kertészettudományi Kar  
Matematika és Informatika Tanszék

A jelölt a Budapesti Corvinus Egyetem Doktori Szabályzatában előírt valamennyi feltételnek eleget tett, az értekezés műhelyvitájában elhangzott észrevételeket és javaslatokat az értekezés átdolgozásakor figyelembe vette, ezért az értekezés nyilvános vitára bocsátható.



Az iskolavezető jóváhagyása



A témavezető jóváhagyása

**A Budapesti Corvinus Egyetem Élettudományi Területi Doktori Tanácsának 2008. október 7-i határozatában a nyilvános vita lefolytatására az alábbi bíráló Bizottságot jelölte ki:**

**BÍRÁLÓ BIZOTTSÁG:**

**Elnöke:**

**Fekete András, DSc**

**Tagjai:**

**Jolánkai Márton, DSc**

**Varga-Haszonits Zoltán, DSc**

**Birkás Márta, DSc**

**Lakner Zoltán, CSc**

**Opponensek:**

**Berzsenyi Zoltán, DSc**

**Fodor Nándor, PhD**

**Titkár:**

**Lakner Zoltán, CSc**

## TARTALOMJEGYZÉK

<b>1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS</b> .....	1
<b>2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS</b> .....	7
2.1. Az éghajlatváltozásról .....	7
2.2. Az éghajlatváltozás hatásvizsgálatai a mezőgazdaságban.....	11
2.3. Kockázatelemzés és termésbiztonság.....	20
2.4. A szántóföldi növénytermesztésben végzett, klímaváltozásra vonatkozó hatásvizsgálatokról .....	21
<b>3. ANYAG ÉS MÓDSZEREK</b> .....	25
3.1. Az őszi búza éghajlatigénye és fejlődési szakaszai.....	25
3.2. A felhasznált időjárási adatsorok.....	30
3.2.1. Az Országos Meteorológiai Szolgálat adatbázisa .....	30
3.2.2. Klímaszenáriók, időjárási szimulációs modellek .....	30
3.3. A felhasznált módszerek és szoftverek.....	34
3.3.1. Terméskockázat vizsgálata egy új sztochasztikus hatásossági módszerrel .....	34
3.3.2. Modellezés, a 4M szimulációs növénytermesztési modell.....	37
3.3.3. A KKT Klímakutatás adatbáziskezelő szoftver .....	41
3.3.4. A ROPstat programcsomag .....	44
3.4. A vizsgálat helyszínének klimatikus körülményei .....	44
<b>4. EREDMÉNYEK</b> .....	49
4.1. Az őszi búza terméskockázata Magyarország négy megyéjében.....	49
4.2. Az őszi búza klimatikus igényeinek vizsgálata.....	55
4.2.1. A vetés-kelés időszak .....	56
4.2.2. A szárbaindulás-kalászolás időszak .....	58
4.2.3. A kalászolás-viaszérés időszak.....	60
4.3. A csapadék nagyfokú változékonysága.....	64
4.4. A búza minősége .....	66
4.5. Modellezési esettanulmányok .....	68
4.5.1. Az őszi búza fenofázisainak alakulása .....	68
4.5.2. Alkalmazkodási stratégia keresése, a vetésidő hatása a terméshozamra.....	70
4.6. Az új eredmények rövid áttekintése .....	74
<b>5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK</b> .....	77
<b>ÖSSZEFOGLALÁS /SUMMARY</b> .....	85
<b>KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS</b> .....	87
<b>IRODALOMJEGYZÉK</b> .....	88

„A természet hatalmas, az ember kicsi. Az emberi élet jellege és színvonala mindig az ember és a természet viszonyától függött; attól, hogy mennyire volt képes megérteni az ember a természetet és erőit saját hasznára fordítani.

Minden faj fennmaradása azon múlik, milyen mértékben képes alkalmazkodni a környezetéhez.”

(Szent-Györgyi Albert, 1989)

## 1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS

„Csak az emberi értelem nagyszerű nekilendülése idején, az ókori Egyiptomban és a görög-római világban kezdtek itt-ott próbálkozni azzal, hogy megértsék a természetet. Erőfeszítéseiket az „ókor tudománya”-ként összegezzük. ... Ez a klasszikus tudomány az ember által ismert világgal foglalkozott, azzal, amelybe az ember beleszületett, amelyhez alkalmazkodni próbált, amelyben élt. ...

Új, kozmikus világban élünk, és az ember nem ehhez formálódott. Hogy fennmarad-e, az most attól függ, milyen gyorsan tud és milyen jól tud alkalmazkodni ... .” (Szent-Györgyi Albert, 1989.)

Ezeket a sorokat Szent-Györgyi Albert csaknem húsz évvel ezelőtt írta, mégis nagyon időszerű. Az ENSZ közgyűlése 2008-at „A Föld Bolygó Nemzetközi Év”-vé nyilvánította. Nyitórendezvényén, 2008. február 12-13-án, 65 ország részvételével elfogadták az ún. „Párizsi Nyilatkozat”-ot, melyben a fenntarthatóság megteremtését hangsúlyozva megjegyzik, hogy az éghajlattal, vízzel és egyéb természeti nyersanyagforrásokkal, energiával, egészséggel, talajokkal és óceánnal, a Föld mélyével, a természeti veszélyekkel és magával az élettel kapcsolatos ismeretek javarészt ismeretlenek a közvélemény számára, és a döntéshozók pedig gyakran nem veszik figyelembe. A nyilatkozatban kijelentik, hogy „Tegyük a Földet az emberiség jobb otthonává!” megteremtve a Föld bolygó iránti tiszteletet, mert gyermekeink, utódaink léte függ tőle. A magyarországi rendezvénysorozat témái között is szerepelnek a természeti veszélyforrások, az egészséges környezet fenntartása, az éghajlat jelenkori és múltbeli változásai. Ezzel összhangban az MTA Rendezvénytanács a Magyar Tudomány Ünnepe vezérgondolatául is ezt a témát választotta. A 2008. novemberben megrendezésre kerülő országos rendezvénysorozat mottója: „A tudomány az élhető Földért”.

Amióta létezik a Föld, éghajlata folyamatosan változik, néha gyorsabban, máskor lassabban (Láng I., 2006). Napjainkban egyre több szó esik a klímaváltozásról, a szélsőségessé váló időjárás hatásait pedig magunk is érezzük. Földünk története során az éghajlat is folyamatosan változott és szinte minden év, évszázad, évezred hozott valamilyen új éghajlati rekordot. Nagy jelentőségű e változások amplitúdójának és időskálájának becslése. Tudnunk kell, mikor juthat egy régió éghajlata olyan tartományba, mely már veszélyezteti a térség gazdaságát, őshonos mezőgazdaságát (Boksai, 2006). A mostani helyzet abban új, hogy az emberi tevékenység nemcsak a mikro- és makroklímát, hanem a globális klímát is befolyásolja (Láng I., 2006).

Az élehető Föld fenntartásához szükséges környezettudatos szemlélet kialakításában meghatározó szerepet játszik az éghajlatváltozással, annak következményeivel és a lehetséges alkalmazkodással kapcsolatos széleskörű ismeretek megszerzése és a tájékoztatás. Ehhez elengedhetetlenül szükséges a nemzetközi kutatási eredmények megismerésén túl hazai elemzések folytatása is, minden kapcsolódó témában.

Nemzetközi kutatócsoportok modellezési kísérletei már az 1970-1980-as években figyelmeztettek arra, hogy globális klímaváltozás valószínűsíthető. Ennek hatására meg is kezdődött a globális környezeti változások vizsgálata. A probléma jelentősége azóta egyre gyorsabban nő. Számos fenntartható fejlődéssel és klímával foglalkozó konferenciát tartottak a világ vezető személyeinek részvételével világszerte, például Rio de Janeiroban (1992), Kyotóban (1997) és Johannesburgban (2002), Buenos Airesben (2004), Balin (2007). Interdiszciplináris, együttműködésen alapuló kutatások folynak a természettel, környezeti változásokkal és hatásukkal kapcsolatban és kezelésük céljából. Az oxfordi egyetem szárnyai alatt folyó CLIVARA (Harrison, 1995, 2000) projektben 10 ország 16 intézménye, köztük a Budapesti Corvinus Egyetem, Matematika és Informatika Tanszéke is részt vett. Ennek keretében a jövőbeni változásokkal kapcsolatos stratégiák kidolgozásával foglalkoztak, egyik fő témájuk a klíma-energia-környezet volt. Vizsgálták továbbá a klímaváltozás - ezen belül főként a hőmérséklet és a CO<sub>2</sub> koncentráció növekedés - mezőgazdasági termelésre való hatását és élelmiszerminőségi kérdéseket is. Egy másik nemzetközi munkacsoport keretében a Budapesti Corvinus Egyetem, Matematika és Informatika Tanszék kutatócsoportja a Gödöllői Agrártudományi Egyetem kutatóival és a MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézet munkatársaival közösen vesznek részt a jövőre záródó ADAM-EuC Európai Unió projektben (2006-2009), melyet a nagy-britanniai klímaváltozási kutatóközpont, a Tyndall Centre koordinál. Munkánk során a kibocsátás csökkentésének és az alkalmazkodásnak a kérdéseivel, lehetséges stratégiájával foglalkozunk.

Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) – politikától független testület 4-6 évente nyilvános jelentést készít (a legutóbbit 2007-ben) az éghajlatváltozással kapcsolatos legfrissebb ismeretekről több ezer kutató munkájának figyelembevételével. Az utóbbi összefoglaló jelentések legfontosabb megállapításai alapján a globális trendek a következők (IPCC, 2007):

- A globális felszínhőmérséklet emelkedésének mértéke 0,56-0,92 °C volt az elmúlt 100 évben.
- A légkör kémiai összetétele megváltozott a légkörbe jutó szennyezőanyagok és az üvegházhatású gázok koncentrációjának növekedése miatt.
- Egyértelmű kapcsolat van az üvegházhatású gázok és a melegedés között.

- Az évszázad végére várható globális hőmérsékletnövekedés 1,1 – 6,4 °C.
- A század végére várható tengerszint-emelkedés 0,18-0,59 m.

Az idei béke Nobel-díjat az ENSZ Éghajlatváltozási Kormányközi Testülete (IPCC) és Al Gore, az Egyesült Államok volt alelnöke kapták a környezetvédelemben - a globális éghajlatváltozás megismerésével és a sürgős teendőkre való felhívással kapcsolatban - tett erőfeszítéseikért. A globális átlaghőmérséklet emelkedésének régióként a globális iránytól eltérő tendenciái lehetnek. A Kárpát-medencére a hőmérsékleti melegedés melegebb nyarat és enyhébb telet jelent, a csapadék éven belüli eloszlásának változásában nyári csökkenés és téli növekedés valószínűsíthető, továbbá az extrém csapadékesemények gyakoriságának növekedése várható, és a hőmérsékleti szélsőségek melegedő tendenciát mutatnak. Magyarországon Láng István akadémikus vezetésével 2003-ban indult a három éves VAHAVA-Projekt (VÁltozás-HAtás-VÁlaszadás), melynek munkájában több száz kutató vett részt. Elemezték az éghajlat változásának irányát és az egyes ágazatokra várható hatását. Megállapították, hogy további melegedésre és szárazosodásra kell felkészülni, a szélsőséges időjárási jelenségek gyakoribbá válása valószínűsíthető hazánkban is. A Projekt zárókonferenciáján kimondták, hogy a globális klímaváltozással, hazai hatásokkal és válaszokkal foglalkozó kutatómunkát az MTA és a KvVM közötti együttműködés keretében folytatni kell (Láng I., 2006).

2008-ban létrejött a VAHAVA Hálózat, melynek tevékenységét az MTA Kutatásszervezési Intézetének keretében megalakult „Klímavédelmi Kutatások Koordinációs Irodája” Harnos Zsolt akadémikus vezetésével szervezi. A cselekvés sürgősségét az is igazolja, hogy a kormány idén januári ülésén elfogadta a 2008-2025-re vonatkozó Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégiát. A hazai időjárási események alapján is egyre határozottabb a vélemény, hogy vita helyett felkészülni szükséges.

A mezőgazdaság különösen klímaérzékeny tevékenység. A növények fenológiai változása a klímaváltozás egyik fontos lokális és regionális indikátora (Meehl, 2005). Egy terület klímájának megváltozása és annak hatásai alapvetően érintik a növénytermesztést, ezáltal indirekt befolyásolnak számtalan természeti és társadalmi-gazdasági folyamatot. Ezért nagyon fontos a várható jelenségek megismerése, továbbá nagy jelentősége van a *Mit tudunk?*, *Mit nem tudunk?* és *Mit nem tudhatunk?* kérdések megválaszolásának. A növények valószínűsíthető reakciója a várható változásokra, a terméshozamok jövőbeni alakulásának becslése, fejlődési folyamatuk elemzése mind-mind egy láncszem a kutatás folyamatában, ami alkalmazkodó stratégiák kidolgozását segítheti elő a gazdálkodók és a döntéshozók számára egyaránt.



Hazánk jellemzője a hűvös, mérsékelt klíma, hosszú, meleg periódusokkal, melyre alapvető módosító hatásokat gyakorol az Atlanti-óceán mérséklő hatása, az uralkodó nyugati szelek, a medence jelleg szélsőségeket növelő hatása és a három európai klímazóna (atlanti, mediterrán, észak-keleti kontinentális) közelsége. A klímaváltozást kutató szakemberek úgy vélik, hogy a Kárpát-medence klímája a jövőben aszályosabbá válik, és a folyamatot az időjárási szélsőségek gyakoribbá válása kíséri. A klimatikus anomáliák honfoglalásunk óta gyakori vendégeink, különlegesen sokszor sújtott a mezőgazdaságra az aszály, amely jelentős termés kieséseket okozott. Az aszály 2000 után is jelen van növénytermesztésünkben: a 2003-as és 2007-es év országos méreteiben is különösen száraz volt. Kérdés azonban, hogy a megfigyelt változásokból mi tulajdonítható a természetes ingadozásnak és milyen mértékben okolható a megnövekedett üvegházhatásúgáz-kibocsátás. A vélemények nagyon elérések, sőt még mindig vannak olyan csoportok is, akik a klímaváltozást megkérdőjelezzik és nem fogadják el bizonyítottan. A modellek nagyon különböző mértékű változást valószínűsítene. Ez a nagyon eltérő tudományos munkákat összefoglaló IPCC (2001, 2007) jelentések megállapításaiból is látszik. Nem tudhatjuk pontosan, hogy mi lesz a jövőben, de ha a klíma valóban melegebbé és szárazabbá válik, gyakori szélsőségekkel, akkor a növénytermesztésre váró hatások megkérdőjelezzik a fenntarthatóságot és kevés kivétellel negatívak:

- a csapadékhiány fokozott termés kiesést okoz;
- az évenkénti termésingadozás nagyobb lesz;
- újabb kártevők, kórokozók, gyomok jelenhetnek meg.

Ezek a változások jelentős hatást gyakorolhatnak környezetünkre. A globális klímaváltozásnak komoly következményei várhatók a mezőgazdaságban is. Az időjárás jelentősen befolyásolja a növények, így a búza egyedfejlődését, szemtermés és biomassza mennyiségét is. A felmelegedési időszakokban gyorsul a növényfejlődés, s így rövidül a tényleges tenyészidő, miközben a hőmérsékletileg lehetséges vegetációs periódus hosszabbodik, miáltal a termesztett fajták, hibridek biztosabban beérnek, sőt, esetleg új, hosszabb tenyészidejű genotípusok köztermesztésbe vétele is felmerülhet (Varga-Haszonits et al., 2005). A felvetődő kérdések, problémák kiküszöbölésére való felkészüléshez nélkülözhetetlen annak megértése, hogy a termesztett növényekre hogyan és milyen mértékben hatnak közvetlenül és közvetve a változások, elősegítve ezzel többek között a növénynemesítők munkáját a megfelelő ellenálló képességű fajok és fajták kiválasztásában és nemesítésében. A hosszas és költséges kísérletek elkerülésére, az adatok feldolgozására és az adott helyekre a megfelelő növényfajták kiválasztásának elősegítésére, számítógépes növénynövekedési és produkciós szimulációs modelleket használnak (Harnos N., 2002). A

legtöbb növény növekedése nagyobb hőmérsékleten felgyorsul, feltéve, hogy elegendő tápanyag és víz áll rendelkezésre. Egy bizonyos határ után azonban a hőmérséklet fokozódása a növekedés csökkenéséhez vagy akár elhaláshoz is vezethet. Magyarországon a kukorica- és búzatermelés kockázata az 1950-től 1990-ig terjedő időszakban a döntéshozónak a kockázatvállalásra való hajlandóságának (*risk aversion*) mértékétől majdnem teljesen függetlenül emelkedett, egyes helyeken jelentősen, továbbá, a kockázatnövekedés üteme helyenként gyorsult is (Ladányi és Erdélyi, 2005 és Ladányi, 2006).

A növényi fejlődés során a fenofázisok időbeli előrejelzése iránti igényt a klímaváltozás várható hatásai tovább fokozzák. Várható

- a jelenleg kialakult gabonatermesztési körzetek határainak északabbra tolódása (Horváth, 2008),
- a determinált növekedésű növények - mint amilyenek a gabonafélék - rendelkezésére álló tenyészidőszak rövidülése (Olesen és Bindi, 2002) (Boksai és Erdélyi, 2007),
- a növényi fejlődés felgyorsulása, a szemtelítődés időszakának rövidülése és ezzel együtt a korábbi betakarítás (Fuhrer, 2003),
- a fenofázisok rövidülése.

A fenofázisok bekövetkeztének ismerete a kártevők, gyomok és növénybetegségek elleni védekezés szempontjából is rendkívül fontos (Fuhrer, 2003; Patterson et al., 1999). Kiemelt jelentőségű lehet a megfelelő vetésidő helyes megválasztása a klímaváltozás várható hatásaihoz való adaptáció során (Southworth et al., 2000 és Alexandrov et al., 2002). A növények fejlődésének alakulása az időjárási paramétereken kívül nagymértékben függ a fajtától is, de az optimális vetési időpont mellett más fenológiai paraméterek is változhatnak, mint például a virágzás optimális időpontja (Peiling et al., 2006), mely a termés hozamot is befolyásolhatja.

Munkánk során egyik legfontosabb hazai szántóföldi növényünket, az őszi búzát vizsgáltuk. A kutatás célja a klímahatások megismerése és a lehetséges további változások következtében várható hatások feltérképezése statisztikai összehasonlító vizsgálatok segítségével, valamint növénynövekedési modell alkalmazása a változások hatásának szimulálására. Az IPCC jelentések, az EU 7 keretprogram célkitűzései, valamint a hazai VAHAVA program zárójelentése alapján egyaránt időszerűnek és sürgetőnek tűnik az éghajlatváltozás növénytermesztésünkre gyakorolt hatásával kapcsolatos kérdések minél pontosabb megválaszolása. Emellett nem felejthetjük el azt sem, amire Bessenyei György már 1778-ban figyelmeztetett, azaz hogy a tudomány korszerű művelésének alapfeltétele a magyar nyelvű tudományosság megteremtése: „Jegyezd meg e nagy igasságot, hogy soha a földnek

golyobissán egy Nemzet sem tehetette addig magajévé a' böltsséget, mélységet, valameddig a' tudományokat, a maga Anya nyelvébe bé nem húzta. Minden Nemzet a maga nyelvén lett tudós, de idegenen sohasem.” Ezért a modellezési munka során a magyar kutatók eredményeit felhasználva és hazai viszonyokra adaptált Magyar Mezőgazdasági Modellezők Műhelyének 4M modellrendszerét használtuk.

Az előzőekből kiindulva tanulmányunk során a klímaváltozásra való felkészülési folyamatot kívántuk segíteni. Célkitűzéseink között szerepelt:

- annak vizsgálata, hogy a búza terméskockázata az 1951-90-es időszakban növekedett, illetve az 1990 utáni időszakban tovább növekedett-e, illetve hogy a kockázatnövekedés üteme hogyan változott az előző időszakhoz képest;
- statisztikai elemzések végzése az őszi búza klimatikus igényeire vonatkozóan, és a fejlődése szempontjából extrém jelenségek gyakoriságának vizsgálata múltbeli megfigyelések és a közeljövőre vonatkozó, nemzetközileg leginkább elfogadott különböző klímaváltozási scenáriók összehasonlításával;
- a 4M szimulációs modell használatával annak vizsgálata, hogy ugyanezen klímaváltozási scenáriók esetén milyen változások következhetnek be az őszi búza fejlődési szakaszainak hosszában. E célra elősegíteni a 4M növénynövekedési modell búzára történő alkalmazását is hazai körülmények között, és ez által lehetővé tenni a hazai klímaváltozással kapcsolatos további kutatások hatékony eszközeként történő alkalmazását;
- szimulációs kísérletek végzése az éghajlatváltozási scenáriókra a búza szemtermés mennyiségének alakulására;
- a klímaváltozáshoz való egy lehetséges alkalmazkodási mód megtalálásának érdekében összehasonlító vizsgálat végzése a búza szemtermésének alakulására különböző vetési időpontok esetén.

Eredményeinket olyan formában kívánjuk bemutatni, hogy azok közvetlen és közvetett alkalmazási lehetőségei körvonalazódjanak. A klímaváltozással együtt élve a magyar agrárkutatóknak és szakembereknek is jól működő leíró-előrejelző rendszereket kell alkotniuk. Elő kell készíteni a megváltozott körülményekre való optimális felkészülési és válaszadási stratégiákat. Meggyőződésünk, hogy Magyarországon is rendkívül nagy szükség van arra, hogy a különböző diszciplínákban kutató szakemberek intenzív összefogással megteremtsék a fenntartható mezőgazdaság jövőbeli új lehetőségeit. Munkánkkal az ilyen jellegű együttműködést is segíteni kívántuk.

## 2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

### 2.1. Az éghajlatváltozásról

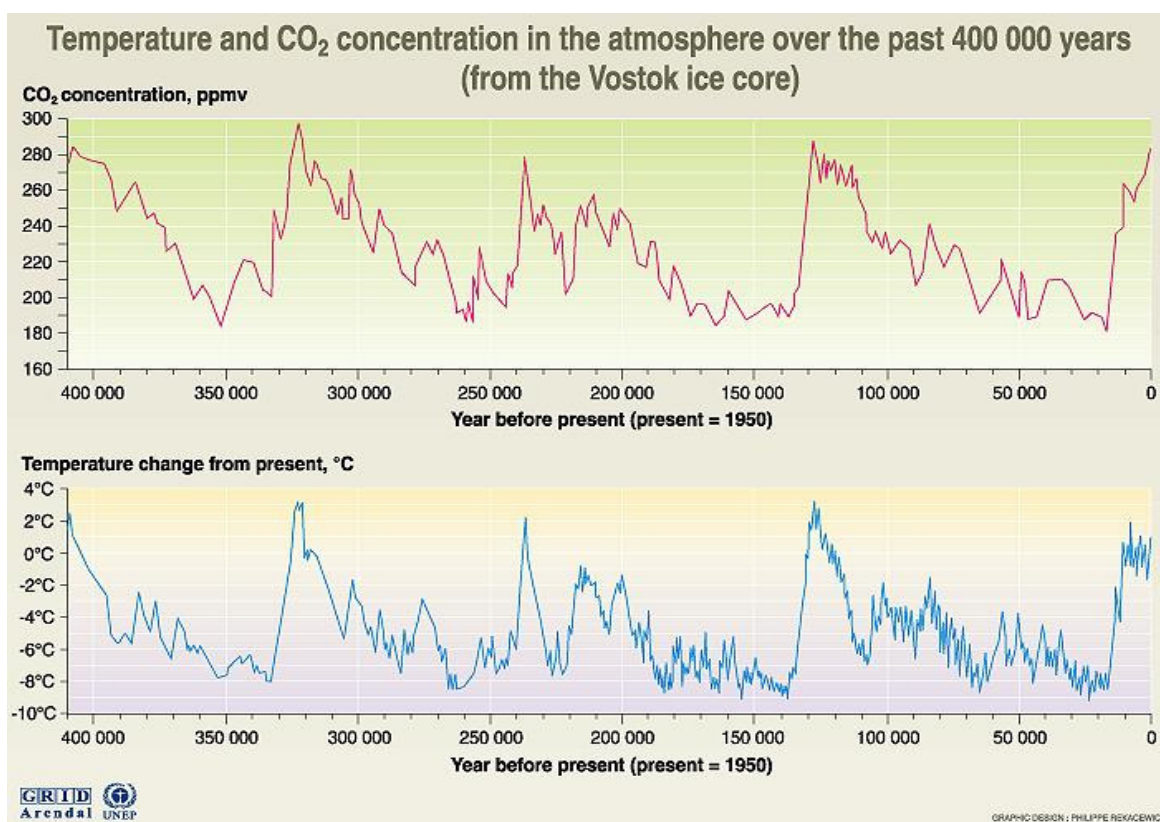
Még mindig ellentmondásos véleményeket hallunk arról, hogy van-e klímaváltozás, vagy csak egy természetes melegedési folyamatról beszélhetünk, ami a Föld történelme során már többször megismétlődött. Azonban, míg kezdetben egyensúly volt az éghajlatváltozás tényét megkérdőjelezők és elfogadók között, mára már a szkeptikusok aránya jelentősen csökkent. A klímaváltozás napjainkban fokozatosan kedvelt témává vált, kialakulását a tudományos körök, társadalmi mozgalmak, az üzleti-gazdasági szférák és lassan a politikusok is tényként kezelik. Az IPCC (2001) által elfogadott szóhasználatban az éghajlatváltozás bármilyen időtávú klímaváltozásra vonatkozik, függetlenül attól, hogy az természeti változékonyság vagy emberi tevékenység eredménye-e. Ez a fogalom valamelyest eltér az ENSZ Éghajlatváltozási Keretegyezményben (UNFCCC, 1992) szokásostól, ahol ez a szó olyan éghajlatváltozásra utal, amely közvetve vagy közvetlenül olyan emberi tevékenységhez kapcsolható, ami megváltoztatja a globális légkör összetételét, és ami hozzáadódik az éghajlat hasonló időszakokban megfigyelt természetes változékonyságához.

Hogy a változásnak mi az oka és mely tényezők milyen mértékű szerepet játszanak benne, az vizsgálatok és viták tárgyát képezi, de ma már a világ minden táján és nem csak a kutatók számára vitathatatlan, hogy Földünk éghajlata változik. Ez a folyamat – egyre gyakrabban tapasztaljuk - már meg is kezdődött, hiszen a globálhőmérséklet lassú, de folyamatos emelkedése mellett egyre gyakoribbá válnak az időjárási szélsőségek is, mint a túl magas vagy túl alacsony hőmérséklet, vagy a túl sok vagy túl kevés csapadék. Azok a tudósok, akik a dinamikus Földrendszert kutatják tudják, hogy az éghajlati rendszer komplex és állandó alkalmazkodási kényszernek van kitéve (GEO-FIFIKA, 2008). Most első alkalommal, egy faj, a Homo sapiens vált a Földrendszer és a klíma rendszer megváltoztatásának fő tényezőjévé. Az ember egyre tökéletesedik annak megfigyelésében és megértésében, hogy miként változtatjuk meg ezt a rendszert régióknak és társadalmaknak megfelelő méretekben. Ahhoz, hogy ezt hatékonyan tehesük, meg kell értenünk a természetes változékonyság és az emberi behatásoknak tulajdonítható (antropogén) változékonyság közötti különbséget is, mely azonban az idő múlásával egyre inkább elmosódik.

A Föld egyértelmű vészjeleket küld. A legfontosabbakat kiemelve: a légkörben emelkedik az üvegházhatású gázok aránya, magasabb a hőmérséklet, melegednek a tengerek, olvadnak a gleccserek, gyakoribbak az erdő és bozóttüzek, tartós aszályok és helyenként

özönvizek jelennek meg, hegyi patakok elapadnak, korábban tavaszodik és virágoznak a növények, változnak a rovarok, madarak és halak élőhelyei, melyek magasabb földrajzi szélességekre tolnak (Láng I., 2006). Tényként említve, az elmúlt másfél évszázad alatt a Föld felszínközeli léghőmérséklete 0,6-0,8 °C-kal emelkedett (Bartholy, 2004).

A változások globális vizsgálata az 1970-1980-as évek óta kiemelt szerepet tölt be a témára szakosodott kutatók körében (Láng I., 2006). A kilencvenes években már intenzíven foglalkoznak a klímaváltozás olyan nyilvánvaló velejárójával, mint a légkör széndioxid szintjének nagyfokú emelkedésével, illetőleg ennek következményeivel (Petit, J. R. et al., 2000). A széndioxid kibocsátás és koncentráció hatását a hőmérsékletre az 1. ábrán tüntetjük fel. A kilencvenes évek elején erről már gazdag összefoglalások is születtek (Barrow és Hulme, 1996).



*1. ábra: A hőmérséklet és az atmoszferikus CO<sub>2</sub> koncentráció alakulása az elmúlt 400.000 évben*

Magyarországon megfigyelhető éghajlati tendenciák közé tartozik a hőmérséklet növekedése és a csapadék mennyiségének csökkenése és időbeli eloszlásának a változása. Magyarország a klíma változására különösen érzékeny terület, hiszen a globálisnál nagyobb mértékű lokális változás tapasztalható és a medencére nehéz jósolni (Mika, 2002). A 2071-

2100-as időszakra vonatkozó két scenáriócsalád 24 mdelljének előrejelzését összesítő tanulmányban olvashatjuk, hogy Magyarországon a nyári hőmérsékletnövekedés mutatkozik a legnagyobb mértékűnek, azaz a 4 °C-ot is meghaladhatja, míg télen a legkisebb mértékű, 2,5 °C körüli átlagosan. Ugyanakkor a csapadékmennyiség csökkenése leginkább nyáron jellemző, akár 20% feletti is lehet, viszont ugyanennyivel nőhet a téli csapadék mennyisége (Bartholy et al., 2007). Az ilyen nagy változás kiszámíthatatlan következményekkel járhat. Mika János több alkalommal felhívta a figyelmet arra is, hogy míg a téli fagyok valószínűleg ritkábban fordulnak elő a jövőben, a tavaszi fagyok sajnos egyre gyakoribbak lesznek, ami a terméshozam becslésénél nagy változékonyságot eredményez és a jövő nehezen kiszámítható. A csökkenő csapadékmennyiség a hőmérsékletnövekedéssel párosulva aszályt okoz, mely szintén súlyos károkat eredményezhet a mezőgazdaságban.

Az éghajlat-előrejelzésre a legjobb módszernek a szimulációs modellek tűnnek. Ezek matematikai egyenleteket használnak a fizikai világ (az óceán-légkör-felszín közötti dinamikus visszacsatolás) leírásához. A modell által szolgáltatott eredmények kompromisszumot jelentenek a földi rendszerek megértése, a valóság matematikai leírhatóságának mértéke és a szükséges számításokat végrehajtó számítógépek teljesítménye között. Manapság több mint 25 globális klíma-szimulációs modellt használnak rendszeresen szerte a világon. Az ezekkel kapott előrejelzések gyakran kisebb-nagyobb mértékben eltérnek egymástól. E jelenség részben a fizikai elemek ésszerű módon történő integrálásának nehézségeit tükrözi, részben a rendszer számos elemének érzékenységét mutatja. Az utóbbi időkben olyan integrált rendszereket is kifejlesztettek, amelyek különféle - éghajlati, gazdasági, demográfiai, ipari kibocsátási, mezőgazdasági és természeti ökoszisztéma-modelleket egyesítenek. A jobb rendszerek lehetővé tesznek „visszacsatolási hurkokat” a különböző modulok között, így a rendszer egyik részében fellépő változásokat dinamikusan követni lehet a többi rendszer felé (GEO-FIFIKA, 2008). A modellek legnagyobb erénye az, hogy különböző források adatait tudják integrálni, és segíthetnek a Föld bolygó jobb megértésében. Azonban minél „jobb”, azaz nagyobb rendszerek leírására törekszik egy modell, annál nagyobb lehet a tévedés valószínűsége is. Mindent meg kell tennünk annak érdekében, hogy a modelleket a valósághoz igazítsuk, mivel ezeknek a rendszereknek a működtetésével járó haszon óriási lépést jelent a tervezési eljárások kidolgozásához és az emberi tevékenység fenntarthatóságához.

A kutatók által előrevetített globális felmelegedés lokális következményeit számos hazai vizsgálat is elemzi. Sokat vitatott kérdés, hogy milyen mértékű globális klímaváltozás várható, annak milyen regionális, ill. lokális megvalósulásai lehetnek, azoknak milyen hatásai várhatók a természeti környezetre és a gazdasági életre nézve. A légkör CO<sub>2</sub> koncentrációja

az ipari forradalom óta 35%-kal nőtt, a Föld felszínének átlaghőmérséklete az utóbbi fél évszázadban néhány tized °C-kal növekedett és a szélsőséges meteorológiai és hidrometeorológiai események gyakoribbá váltak. A gyorsuló változáshoz döntően hozzájárul az emberiség (Vital Signs, 2006 és IPCC, 2007). A jelenlegi, nem fenntartható termelési-fogyasztási rendszerre és annak megváltoztatására is az emberiség aggodalmára, továbbá tenni akarására van szükség. Az IPCC (2001) Harmadik Vizsgálati Jelentésében megfogalmazott legfontosabb következtetések az alábbiak:

- Az utolsó 50 évben megfigyelt melegek nagy része emberi tevékenység révén alakult ki.
- A 20. században az északi félteke felszíni hőmérséklete valószínűleg nagyobb mértékben emelkedett, mint az utóbbi ezer év bármely évszázadában.
- A Föld hőmérséklete 1860 óta 0,4-0,8 °C-kal emelkedett, az utolsó két évtized volt a legmelegebb az évszázad során.
- Az éghajlati modellek előrejelzései szerint a Föld hőmérséklete 1990 és 2100 között 1,4-5,8 °C-kal fog emelkedni úgy, hogy a legtöbb szárazföldi terület felmelegedése a globális átlagnál nagyobb lesz.
- A modellek előrejelzései szerint az extrém időjárási helyzetek száma növekedni fog, pl. hóhullámok, rendkívüli csapadékmennyiség, árvizek, aszály, tüzek, növényi kórokozók elszaporodása, a mérsékelt égövi talajok nedvességtartalmának nyári csökkenése, a trópusi ciklonok erősségének és a csapadék intenzitásának növekedése.
- A klímaváltozás néhány pozitív hatása mellett - melyek a megnövekedett mezőgazdasági termelékenység kis hőmérsékletemelkedés esetén és a fagykár csökkenése - a hatások legnagyobb része kedvezőtlen; különösen az extrém időjárási események megnövekedése befolyásolja kedvezőtlenül a legtöbb természetes rendszert és az emberek nagy részét.
- A társadalmi-gazdasági szektorok (pl. mezőgazdaság, erdészet, halászat), a szárazföldi és a vízi ökoszisztémák és az emberi egészség - amelyek létfontosságúak az emberi fejlődés és jólét szempontjából - mind érzékenyek a klímaváltozás nagyságára és ütemére, csakúgy, mint az extrém időjárási helyzetekre és a változékonyságra.

Minden IPCC előrejelzés azt mutatja, hogy a klímaváltozásra irányuló szabályozások nélkül a széndioxid légköri koncentrációja jelentősen emelkedni fog a következő évszázad során.

Az IPCC negyedik, 2007-es jelentése alapján is az éghajlatváltozás egyértelműen kimutatható napjainkban. Globális szintű cselekvési forgatókönyveket is megadnak (IPCC,

2007), legfontosabb megállapításairól a bevezetőben szóltunk. A NÉS (Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia, mely kezdeményezés legfontosabb célkitűzései között szerepel az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése, alkalmazkodóképességünk kialakítása, és a klímatudatosság erősítése a társadalomban) is e jelentésre hivatkozva írja, hogy a 20. század második felében végbement mintegy fél fokos melegedés nagy valószínűséggel az emberi tevékenység következménye, és gyakorlatilag kizárható, hogy természeti eredetű ingadozásról volna szó. A NÉS szerint tudományos konszenzus van arról, hogy az utolsó pillanatban vagyunk ahhoz, hogy a földi átlaghőmérséklet  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot meghaladó emelkedését elkerülhessük. A klíma változásával és változékonyságával kapcsolatos tudományos és gyakorlati kérdések világszerte előtérbe kerültek: elemzik az eredetét, az antropogén hatás mértékét és megfékezésének lehetőségeit. A globális felmelegedés helyi hatásait az Országos Meteorológiai Szolgálat kutatja hazánkban is. A klimatológusok eredményeit felhasználva az éghajlatváltozás kihívásainak kezelésére, a változásokra való felkészülésre irányuló nemzetközi és hazai együttműködésen alapuló kutatási tervek készülnek. Az eddigi ismeretek alapján feltételezhető, hogy Magyarországon hosszú távon fokozatos, minden évszakra kisebb-nagyobb mértékben jellemző felmelegedés és csapadékmennyiség-csökkenés, valamint a szélsőséges időjárási viszonyok gyakoriságának és intenzitásának növekedése várható.

## **2.2. Az éghajlatváltozás hatásvizsgálatai a mezőgazdaságban**

A klímaváltozás kérdését a múlt század hetvenes éveiben kezdték feszegetni. Ekkor még elsősorban a klímaváltozás tényét próbálták igazolni, azon belül is inkább csak a globális felmelegedést említették. A nyolcvanas-kilencvenes években a klímaváltozás elemzésének folyamányaként középpontba került a klímaszcenariók létrehozásának (Barrow és Hulme, 1996), illetve magának az időjárási modellezésnek a feladata. Ezzel egy időben megnyílt a lehetőség a klímaváltozás hatásainak vizsgálatára, elsősorban az arra legérzékenyebb területen, a mezőgazdaságban (Harrison et al., 1995, Semenov és Porter 1995). A nyolcvanas években már intenzíven foglalkoznak a klímaváltozás olyan nyilvánvaló velejárójával is, mint a légköri széndioxid szintjének nagyfokú emelkedésével, illetőleg ennek következményeivel. A kilencvenes évek elején erről már gazdag összefoglalások is születnek. Ugyanekkor felméri Európa agro-ökológiai potenciálját és kutatni kezdik a klímaváltozás genetikai hatásait. Szintén ugyanebben az időben kezdik hangoztatni, hogy a klímaváltozás nem csak egyenletes felmelegedés útján fog végbemenni, hanem – ahogy azóta ez egyre világosabban látszik is – magával hozza az extrémális események gyakoribb és súlyosabb megjelenését,



illetőleg átmenetileg helyi – vagy akár nagy régiókra is kiterjedő – lehűlést is eredményezhet (Barrow és Hulme, 1996, Harrison et al., 2000). A magyar mezőgazdaság agro-ökológiai potenciáljának felmérése a 80-as évek elején fejeződött be (Harnos Zs. és Györffy, 1979, Láng I. et al., 1983). Ezzel egyidőben és azóta a termés - időjárás kapcsolat elemzésével Magyarországon számos kutató foglalkozik.

A klímaváltozás közvetlenül vagy közvetve szinte az élet minden területét érinti. Nagyon különböző témájú vizsgálatok születtek és folynak, melyek iránt az érdeklődés robbanásszerűen nő. Alig van az emberi tevékenységnek olyan része, melyet közvetlenül vagy közvetve ne befolyásolnának az időjárási jelenségek, az éghajlat módosulása. Munkánkban a teljesség igénye nélkül említünk néhányat, melyek a témánkhoz szorosan kapcsolódnak. A változékonyság mértéke, a szélsőségek gyakorisága és a változás lehetséges irányainak vizsgálata mellett szükségessé válik az alkalmazkodás lehetőségeinek a keresése is. A káros hatások és a kockázat elemzése mellett felmerül az érzékenység és a sérülékenység vizsgálatának szükségessége. Az IPCC Harmadik Értékelő Jelentésében (2001) a sérülékenység az éghajlatváltozás káros hatásainak - beleértve az éghajlat változékonyságát és a szélsőségeket - azt a szintjét jelenti, amelyre egy rendszer már annyira érzékeny, hogy képtelen vele megbirkózni. A sérülékenység az éghajlatváltozás jellegének, nagyságának, mértékének és változékonyságának a függvénye, amelynek egy rendszer ki van téve, ami alkalmazkodóképességét próbára teszi. Az alkalmazkodóképesség jelentése pedig (IPCC, 2001) valamely rendszernek az a képessége, hogy az éghajlatváltozáshoz igazodjon annak érdekében, hogy mérsékelje a potenciális károkat, kezelje a következményeket, vagy kihasználja a lehetőségeket.

Világszerte és Európában is rengeteg tanulmány készült ebben a témában, az utóbbiak közül néhányat említünk, mivel a tapasztalat és levont következtetések több esetben hazánkban is megfontolandók. A hatásvizsgálatok általában megfigyelések és az általunk is használt, nemzetközileg elfogadott klímaváltozási scenáriók alapján születtek, a felhasznált módszertannak is vannak közös elemei. Napjainkban már nagyon elterjedt, hogy különböző típusú modelleket is használunk a környezet élő szervezetre való hatásának vizsgálatához. A rendszereket leíró matematikai modellek sokfélék és bonyolultak. A szimulációs módszerek megjelenése a mezőgazdaságban összefügg a rendszerelmélet térhódításával és a valóság mind pontosabb megismerésének szinte napról napra fokozódó igényével. Egy jól felépített modell alkalmazásával a folyamatok utólag rekonstruálhatók, ezáltal optimalizálásra is lehetőségünk nyílik. Vizsgálható sok egyéb adat mellett egy növény adott termőhelyen való termesztetősége, az érés időpontja és időbeli eloszlása, a várható terméshozam alakulása. A kutatók ilyen és más módszerekkel is végeztek és végeznek klímaváltozási hatásvizsgálatokat. Hoogenboom (2000) megfogalmazását átvéve vannak stratégiai (termesztés előtt alkalmazott),

taktikai (termesztés közben is, pl. alternatív agrotechnikai beavatkozások hatásvizsgálatára alkalmazott) és előrejelző (cselekvő tervek kidolgozására alkalmazott) modellek. A növények terméshozamának talajjal kapcsolatos törvényszerűségeit térképezi fel többek között Kovács (2003) és Kovács et al. (1995) modellező munkája. Kovács et al (1998) a CERES (Crop Estimation through Resource and Environment Synthesis) modell döntéstámogatásban való alkalmazási lehetőségeit vázolja.

A CERES-Wheat növénynövekedési modell Spanyolország hét legfontosabb búzatermő régiójában is validálást nyert (Iglesias et al., 2000). Változókat kerestek a szimulált terméshozam-ingadozás magyarázatára, melyek közül a tenyészidőszak alatti csapadékból és öntözésből nyert víz és a hőmérséklet a legjelentősebb. Többváltozós lineáris regressziót használtak az összefüggések feltárására, a hét agroklimatikus régiót pedig K-közép módszeres klaszteranalízissel határozták meg. Munkájuk során 329 meteorológiai állomás adatait és részletes termésadatokat is használtak. A talajnedvesség hasznosítására, hiányára és többletére végeztek klímaváltozással kapcsolatos elemzéseket Törökországban, ahol vizsgálták az evapotranspiráció szezonális változását megállapították (Komuscu et al., 1998), hogy fajtaváltás és korszerű, víztakarékos agrotechnika alkalmazásával kedvező lépések tehetők az alkalmazkodás terén. Harnos N. 2002-ben négy modell eredményét hasonlította össze őszi búzára vonatkozóan és kettőről megállapította (CERES és AFRC-WHEAT), hogy Magyarországon búzára megbízhatóbban alkalmazható, mint a másik kettő. Munkájában megjegyzi, hogy pontosabb eredményeket több adat segítségével kaphatunk. A CERES modellt Ausztriában és Bulgáriában is sikerrel alkalmazták búzára is a növény fejlődésének és terméshozamának vizsgálatára (Alexandrov et al., 2001).

Ghaffari et al. (2002) kutatásának is fontos eszközei az éghajlatváltozással kapcsolatos hatásvizsgálatokban a növényi növekedési modellek. Ők is a CERES-Wheat modellt használták búzára vonatkozó elemzéseik során. Vizsgálták különböző agrotechnikai beavatkozások hatását a hozamra hat különböző klímaváltozási scenárió esetén. A korlátozott hasznos víz mennyiségét elemezték különböző talajtípusokon. Kimutatták, hogy főleg a CO<sub>2</sub> szint növekedésének köszönhetően a fotoszintézis hatására a búza várható terméshozama is növekszik az Egyesült Királyságban. A vetési időpontok megválasztásával és különböző szintű nitrogénkezeléssel keresték az optimális alkalmazkodási stratégiát. Megállapították, hogy általában a korai vetés (szeptember 10.) eredményezi a legjobb, a késői vetés (november 10.) pedig a legrosszabb terméshozamot, továbbá hogy a CO<sub>2</sub> pozitív hatását segíti a nitrogénkezelés, egyben a komoly vízhiány negatív hatását is ellensúlyozva. A globális felmelegedés hatását az őszi vetésű gabonák esetében a jégeső okozta károkon keresztül is elemezték két területen az Egyesült Királyságban, amit terméshozam kieséssel

jellemeztek (McMaster, 1999). Megállapították, hogy az üvegházhatás következtében a jégesők okozta károk mérséklődésében reménykedhetünk, de nagy bizonytalansággal és a hatalmas mértékű változékonyság miatt további vizsgálatok szükségességét fogalmazzák meg.

Az IPCC Harmadik Helyzetértékelő Jelentésében is megjelenik, hogy az északi féltekén a vegetációs időszak körülbelül 1-4 nappal meghosszabbodott az elmúlt 40 év során; a növények, rovarok, állatok sarkok felé, azaz felfelé irányuló vándorlása zajlott le. Bulgáriában is vizsgálták a potenciális tenyészidőszak hosszabbodását és az ennek következményeként jelentkező hőmérsékleti küszöbértékek eltolódását, mint a hőmérsékletnövekedés velejáróit (Alexandrov, 1997). Vizsgálataikhoz a DSSAT (**D**ecision **S**upport **S**ystem for **A**grotechnology **T**ransfer) döntést támogató, szaktanácsadó rendszert használták, amelynek a Ceres-Wheat búzanövekedési és termelési szimulációs modell is része. Kimutatták, hogy különösen a kukorica, de az őszi búza hozama is várhatóan csökkenni fog a hőmérséklet növekedése és a csapadék mennyiségének csökkenése miatt. A sérülékenységre és az alkalmazkodási lehetőségek vizsgálatára is végeztek esettanulmányt a főbb mezőgazdasági növényekre. A vetési időpontok módosítása és a fajták változtatása, valamint alkalmazkodó agrotechnika megválasztása – olyanok, mint a műtrágya kijuttatásának időpontja és mennyisége, valamint az öntözés - is megfogalmazódik munkájukban mint lehetséges, a klímaváltozás káros következményeinek mértékét enyhítő hatás. Egy másik lehetséges válasz a melegedésre az, hogy Bulgáriában is törekedni kell a metán kibocsátásának csökkentésére írta Alexandrov, 1999-ben. Cseh kutatók is használták az általunk alkalmazott klímaváltozási scénáriókat. Elemzéseik során összehasonlítást végeztek a megfigyelt meteorológiai adatok, a BASE és több más, köztük a GFDL scénáriók inputként való megadásával (éghajlatváltozási scénáriók ld. Anyag és módszerek 3.2.1. alfejezete). A nyári melegedés és a csökkenő csapadékmennyiség veszélyes kombinációjára hívják fel a figyelmet (Kalvova et al., 1997). Dvorak (1997) ugyanezen klímaváltozási scénáriókkal végzett hidrológiai modellezési munkát és hívta fel a figyelmet a rendelkezésre álló édesvíz kevés és változó mennyiségére. Alkalmazkodó lehetőségként említi víztározók építését, a vízforrások védelmét és az ésszerűbb felhasználást. Finnországban is komoly gondot jelent a klímaváltozás az erdőszetben. A nedvesebb és melegebb időjárás a fákat azért veszélyezteti, mert a gyökereik kapaszkodását nehezíti a talajban. A talaj megfagyása nagyon fontos a késő őszi és korai tavasz közötti időszakban, amikor nagy szelek uralják az erdőt. Emiatt a fák a szélnek kevésbé tudnak ellenállni. Különböző mélységben vizsgálták a talajt és elemezték a fagyos időszakok várható hosszát is (melyre 20-30%-os csökkenés valószínűsíthető), valamint a viharos szelek előfordulási gyakoriságát (Peltola et al., 1999).

Az Egyesült Királyság öt legjelentősebb ökológiai körzetében az UKTR scenárió (éghajlatváltozási scenáriók ld. Anyag és módszerek 3.2.1. alfejezete) két időintervallumát (2031-2040 és 2066-2075) is használták hidrológiai vizsgálatokban, talajnedvesség vizsgálatra (Naden és Watts, 2001). Ők is sürgetik alkalmazkodási stratégiák kidolgozását a vízhiányra való felkészülésben, és kiemelik a földhasználat fontosságát. Az UKHI egyensúlyi és az UKTR tranziens scenáriókat hidrológiai modellezésben, Görögországban is használták (Mimikou, 1999), de jelentős eredményeket értek el az UKMO és a GFDL scenáriók alkalmazásával is a klímaváltozás hatásának vizsgálatában a kukorica fenológiájára és terméshozamra vonatkozóan is. Kapetanaki és Rosenzweig (1997) a CERES modellt és DSSAT döntéstámogató rendszert használták a szimulációs kísérleteikben, és arra a következtetésre jutottak, hogy minden általuk vizsgált területen a kukorica tenészedőszakának rövidülése várható, aminek következményeként a hozam csökkenhet. Az alkalmazkodási lehetőségek vizsgálatában megmutatták, hogy a klímaváltozás hatásának csökkentése korábbi vetéssel, illetve a különböző területeknek megfelelő rövid vagy hosszú szemtelítődésű új fajták alkalmazásával érhető el. Lengyelországban is használták a GFDL scenáriókat a klímaváltozással kapcsolatos kutatásokban és megmutatták, hogy a mezőgazdaságban számos hatásra lehet számítani, ami miatt komoly károk elkerülésére szükséges felkészülni: csapadék-hiány, a vetési és betakarítási időszakok elmozdulása. A vetésszerkezet és a terméshozam változása várható, tehát az alkalmazkodási lehetőségek kidolgozására nagy szükség van (Demidowitz et al., 2000). Románia öt tipikus régiójában végeztek vizsgálatot a legfontosabb szántóföldi növényekre. Megállapították, hogy a klímaváltozásnak a szemtermésre, szemfejlődésre, vízháztartásra lehet nagy hatása. Az elemzések legtöbbször őszi búzára és kukoricára összpontosított, az esettanulmányokat a CERES és DSSAT modellcsaládokkal végezték, kétszeres széndioxidszintre vonatkozó egyensúlyi scenárió és BASE scenárió inputtal. Ezek alapján kimutatták, hogy őszi búzára kedvezően hathat a hőmérsékletnövekedés és a CO<sub>2</sub> megkétszereződésének együttes hatása Románia déli részén (Cuculenau et al., 1999).

Stocks et al. (1998) a hőmérséklet és csapadék várható anomáliáit vetették össze az 1980-90-es megfigyelt időjárási adatsorokkal Oroszországra és Kanadára. Az orosz mezőgazdaság klímaváltozásra vonatkozó érzékenységét is elemezte Sirotenko et al. (1997) a talaj és atmoszféra kémiai összetétele alapján, melyek jelentősen befolyásolhatják a mezőgazdasági termelést. Gabonanövények produkcióját vizsgálták aszályos és párás körülmények között, elemzéseik során környezeti tényezőként a meteorológiai paraméterek mellett a CO<sub>2</sub> és O<sub>3</sub> koncentráció, illetve a talaj degradáció is fontos paraméterek voltak.

Nagy változékonyságot mutattak ki a hozammal összefüggésben, kiemelték a szociális és gazdasági következmények fontosságát is.

Magyarországon is hamar felismerték, hogy az éghajlat változásának és változékonyságának számos közvetlen és közvetett következménye lehet, melyek komoly környezeti problémákkal járnak. Összehasonlító és elemző esettanulmányok születettek különböző témákban. Munkánkban mezőgazdasággal kapcsolatos vizsgálatokat említünk. A számos elemzés közül azokat foglaljuk össze, melyek témánkhoz kapcsolódnak, illetve azt motiválták.

Az oxfordi egyetem koordinálásával folyó CLIVARA (Climate Change, Climatic Variability and Agriculture, 2000) projekt fontos mérföldköve a néhány tízéves mezőgazdaság és klímaváltozás témájú kutatásoknak. E projekt keretében Anglia, Finnország, Dánia és Spanyolország mellett Magyarországon is vizsgálták az éghajlatváltozás lehetséges következményeit. Célként fogalmazták meg, hogy az éghajlatváltozásra, a mezőgazdasági növények fejlődésére, növekedésére és hozamára vonatkozóan szükséges vizsgálni és megérteni a lehetséges antropogén hatásokat. Ehhez a modellezési munka és számos kísérlet elvégzése fogalmazódott meg, mint szükséges módszer. Harnos Zsolt vezetésével (1995, 1996) az extrémáliák előfordulását elemezték annak érdekében, hogy egy valószínűségi modellt alkossanak Magyarország jövőbeni időjárási körülményeinek hatásvizsgálatára a kukorica, valamint a búza terméshozamára vonatkozóan. Míg a projekt első időszakában a klímaváltozás lehetséges hatásainak vizsgálatával foglalkoztak, a másodikban már a „hogyan lehet a változásokra válaszolni, a károkat megelőzni és az új klimatikus körülményeket előnyünkre kihasználni...” típusú kérdésekre keresték a választ. A számos felvetődő kérdés megválaszolása részletes vizsgálatokat, rengeteg kutatómunkát és elemzést igényelt a várható hatásokra és a lehetséges alkalmazkodásra vonatkozóan. A vizsgálat során az 1951-90-es időszakra vonatkozóan klimatikus évtípusok előfordulási gyakoriságát vizsgálták. Megállapították, hogy az 1951-52-ben előfordult csapadékhiányos körülmények következményeként az átlagnál 50%-kal kevesebb hozam volt, valamint kimutatták, hogy a kevésbé kedvező klimatikus évtípusok többször fordulnak elő a vizsgált időszak végén. Az elemzéseket Debrecenre és Győrre leskálázott klímaváltozási scenáriók használatával végezték, klimatikus évtípusokat határoztak meg és azok előfordulási gyakorisága alapján elemezték a várható hatásokat. Vizsgálataikat az UKTR scenárió alkalmazásával végezték, eredményeik alapján elmondható, hogy a búza esetében száraz-meleg időszakokra kell számítani a jövőben (mert várhatóan ennek az évtípusnak az előfordulási gyakorisága nagyon megnő), ami 5-10%-os hozamcsökkenést valószínűsít. A projekt keretében a scenáriók alapján Debrecenre és Győrre további vizsgálatok is folytak a búzára és kukoricára vonatkozóan.

Évszakos és éves adatok alapján vizsgálták a hőmérséklet és csapadék változékonyságát, valamint annak hatását a két legfontosabb szántóföldi növényünk termés hozamára. A következtetéseket szakértői vélemények alapján az átlaggal összehasonlítva vonták le. A két növény specifikus extrém körülményeit is vizsgálták, olyanokat, mint például a szélsőségesen hideg és meleg napok, hosszú száraz periódusok, fagymentes időszakok hossza. Termésvesztés alapján számolt valószínűségek alapján statisztikai modellt alkottak az adott évtípusokra vonatkozó szakértői termésbecslések segítségével. Megállapították, hogy a csapadékcsökkenés termés csökkenéshez vezet, valamint mivel az UKTR scenárió további csapadékcsökkenést valószínűsít, további veszteségekre kell számítani. Kovács Géza (1998) egy valószínűségi modellt alkotott, melynek jelentősége abban rejlik, hogy a külföldi példák mind determinisztikus modell-alkalmazások.

A változás általános mikéntjének alapelveiben tehát többé-kevésbé egységesek az álláspontok. A részletekről való elképzelések, különös tekintettel a Föld egy-egy kisebb, speciális régiójára vonatkoztatva és a hely adottságaiból adódóan is igen eltérők lehetnek. A magyar agrárkutatókat és agrárszakembereket (a talajtan, a növénytan, a rovartan, a meteorológia és a mezőgazdaság területén dolgozó és együttműködő szakértőket, mérnököket, biológusokat, matematikusokat) is elsősorban ezek az apró részletek érdeklik a legközelebből. Nem csoda, hiszen a klímaváltozással együtt élve jól működő leíró és előrejelző rendszerek megalkotását és a megváltozott körülményekre való optimális felkészülési és alkalmazkodási stratégiák kidolgozását várják tőlük. Növényvédelmi szempontból a legfontosabb továbblépési lehetőséget a komplex agroökoszisztéma modellezés jelentheti, amely egy adott növény vizsgálata során a legfontosabb gyomok, kórokozók, kártevők és azok természetes ellenségeit is figyelembe vesznek, hiszen ezek kölcsönhatási hálózatot alkotnak. Ennek módszertana a Ladányi et al. (2003a, 2003b és 2003c és Ladányi, 2006) cikkekben és dolgozatban részletes kifejtésre került, utóbbiban nagyon részletes összefoglalót találunk a klasszikus ökológiai modellekről és a szimulációs - köztük a növényi növekedési modellekről - egyaránt.

Az agroökoszisztémák komplex vizsgálata a Budapesti Corvinus Egyetem, Matematika és Informatika Tanszékének kutatócsoportját is foglalkoztatta. Történtek kísérletek különböző megközelítésekre: a probléma átfogalmazása gráfelméleti feladatra a folyamatok ún. hatásgráfokkal történő nyomonkövetésével (Erdélyi, 2003a és 2003b, Erdélyi és Hufnagel, 2003), illetve a lehetőség vázolásán túl a felmerülő különböző kérdések átfogalmazására. Ismert gráfelméleti tételek alkalmazhatók ugyanis a közvetlen és közvetett hatások átláthatóságára és vizsgálatára (Erdélyi és Szabó, 2004, Erdélyi, 2005, Erdélyi, 2006a). Ezek a feladatok ismert algoritmusok végrehajtásával a számítógépek elterjedésével

rövid idő alatt elvégezhető. Az ilyen rendszerekben a termesztett fajnak kiemelt jelentősége van, ezért az anyag- és energiaforgalmi modelleket ezek köré építettük fel.

A kérdéskörrel kapcsolatos modellépítés is már régóta folyik (Kniesel, 1980, Hansen et al., 1990, Jordán, 2000), különböző táplálékhálózatok vizsgálatával Jordán és Molnár (1999), Jordán (2000) magyar kutatók is sikerrel foglalkoztak. A modellezés módszertanát, modellépítést és a meglévő modellek felhasználását Magyarországon is nagyon sok kutató használja. Az időjárás - növény modellezésének elvi, és különösen az őszi búzára vonatkozó gyakorlati kérdéseivel Varga-Haszonits Zoltán a nyolcvanas évektől kezdődően foglalkozik (Varga-Haszonits 1987a,b, 1992, 1995, Varga-Haszonits és Harnos Zs., 1988). CROP modell Magyarországon is készült már a kilencvenes években (Semenov et al. 1990), mely egy időjárás - generátort is magában foglal, ezért a későbbi, klímaváltozás hatását vizsgáló kutatások során önmagában is sok esetben és sokoldalúan alkalmazták.

A környezetvédelem és az optimális gazdálkodás összehangolása céljából a növény - időjárás - kártevő rendszert, mint komplex ökoszisztémát a Budapesti Corvinus Egyetem, Matematika és Informatika Tanszékének kutatócsoportja is vizsgálta. Ezzel összhangban egy egyszerűsített táplálékhálózatnak egy olyan szezonális populáció-dinamikai modelljét fejlesztettük ki, amelyben a teljes agro-ökoszisztémára gyakorolt külső hatásokat és a populációk közötti kölcsönhatásokat is vizsgálni tudjuk. Biomassza alapú modellünkben elsősorban az időjárás szezonális mintázatát, valamint a rendszerben rejlő biotikus kölcsönhatásokat kívántuk figyelembe venni. Az analitikus rendszer felírása napi léptékű determinisztikus differenciaegyenlet-rendszer segítségével történt (Ladányi, 2002b, Ladányi és Erdélyi, 2002, Horváth et al., 2002, Ladányi, 2003a, Ladányi és Erdélyi, 2004). Az említett modell kölcsönös input-outputjaként történő felhasználásához kísérlet történt a talajban történő víz- és tápanyagmozgás leírására (Erdélyi, 2002, Erdélyi 2003a, 2003b és 2003c) is. Egy másik modell segítségével vizsgálták (Ladányi, 2003b, Ladányi és Hufnagel, 2003a, Ladányi és Hufnagel, 2003b, Ószi et al., 2005) egy ökológiai rendszer egyes populációinak napi biomassza-mennyiségét. A napi időjárási adatok és a populációk fenológiai és más biológiai tulajdonságai alapján meghatározták a populációk napi egyedszámát az egyes fenofázisokban. A nemzetközileg leginkább elfogadott időjárási scenáriók alapján vizsgálták a klímaváltozásnak a rovarpopulációkra gyakorolt hatását is. Mivel a klímascenáriók leskálázott adatai csak korlátozott számú helyszínre állnak rendelkezésre Magyarországon, a hatásvizsgálatok ezekre a területekre koncentrálnak.

Horváth Levente kezdeményezésére és irányításával a Budapesti Corvinus Egyetem, Matematika és Informatika Tanszékének kutatócsoportja egy másfajta megközelítéssel a klimatikus földrajzi analógiák vizsgálatával is elkezdett foglalkozni (Horváth et al., 2006,

Horváth és Erdélyi, 2006, Horváth, 2007). E módszer lényege, hogy egy meghatározott terület jövőbeli éghajlatára vonatkozó scenáriók következményeiről úgy próbálunk információt szerezni, hogy megkeressük azon jelenlegi területeket melyeknek mai klímája a legjobban hasonlít a vizsgált terület adott scenárió szerinti jövőbeli klímájához és az ottani tapasztalatok elemzéséből indulunk ki. Az eredményeket a térinformatika eszközeivel, térképekkel szemléltethetjük (Gaál és Horváth, 2006, Horváth et al., 2007, Horváth és Gaál, 2006, Hufnagel et al., 2006). A módszer felhasználásával a jövőben hasonlóságot mutató régió mai mezőgazdasági tapasztalatait a változások bekövetkeztével hazánkban majd kamatoztatni tudjuk. Kimutatható, hogy Magyarország klímája – a klímascenáriók szerint – főbb vonalakban mediterrán jellegű lesz, azaz Európa dél-délkeleti területeinek mai klímájához fog hasonlítani. Ebből arra lehet következtetni, hogy az élelmiszer- és takarmányellátás szempontjából fontosabb gazdasági növények termesztési övezete jelentősen északra tolódik (Horváth, 2008). Harnos N. (2003) búzára végzett számításai is ezt mutatják, aki munkájában modellkísérleteket végzett és a várható termésveszteségre hívta fel a figyelmet. Megmutatta, hogy a szemtermés azonos fajták és agrotechnika alkalmazása mellett a nyugat-magyarországi csapadékosabb és a kelet-magyarországi szárazabb adottságú területen is csökken.

Azt már a 11. és 12. század végén, valamint a 14. század korai és késői időszakában, az ún. „középkori meleg időszak”-ban is megfigyelték az északi félgömbön, hogy a gabonatermelés északabbra tolódott, továbbá hamarabb lehetett szüretelni. Ebben az időszakban és az ezt követő ún. „kis jégkorszakban” sok esetben a hőmérsékleti eltérések nem voltak nagyobbak 0,2-1°C-nál az előző időszak átlagához képest, azaz nem voltak nagyobbak a 20. század korai időszakában észlelteknél. Nem csoda, hogy napjainkban a Duna-Tisza közötti Homokhátság elsivatagosodásának veszélyéről írnak a terület egyre nagyobb mértékű kiszáradása miatt. Az átlaghőmérsékletben bekövetkezett kismértékű változások jelentős hatása ellentmond azoknak a szkeptikusoknak, akik nem tulajdonítanak semmiféle jelentőséget a következő 50-100 évre valószínűsíthető 1-5°C-os változásnak. Számos nagy birodalom tűnt el a múltban eltérő körülmények között, ezek között azonban az éghajlat változása is szerepel. A szárazság okozta például más kultúrák mellett a közép amerikai maja kultúra összeomlását is (Szegő Iván Miklós, 2004), ahol a bukás okai között említik az egymással rivalizáló városállamok önpusztító harcai mellett az éghajlat változását, a termőföldek terméketlenné válását és a túlnépesedést.



### 2.3. Kockázatelemzés és termésbiztonság

A környezet és az időjárás bizonytalanságából adódó kockázat az, amely a hozam mennyiségét, minőségét, beruházási és termesztési költségeit, illetve az időbeosztást közvetlenül és jelentős mértékben meghatározza (Ladányi, 2006). A terméshozam kockázata az agrárgazdaság legnyilvánvalóbb kockázata. A kockázatelemzés a 20. századi kezdetek után a 70-es években kapott új lendületet, és kezdődött fejlődésének dinamikus időszaka. A kockázat fogalma több szempontból kezelhető, Dillon (1971) irodalmi áttekintése különös figyelmet fordít az agrártudományi alkalmazásokra, Barry (1984) is kiemelten foglalkozik az agrártudomány kockázatával. Ekkor a kockázatelemzést már komolyabb matematikai alapokra helyezi több kutató. Anderson et al. műve (1977) erre igen átfogó, agrártudományi alkalmazásokban bővelkedő példa, melyben a kockázatelemzés operációkutatási aspektusait is részletesen tárgyalja. Clement (1996) művében már a modern kockázatelemzés kerül leírásra, kitér az aktuális döntéstámogató szoftverek részletes bemutatására is. A hőmérséklet és csapadék változékonyságának relatív fontosságát mutatták meg Semenov és Porter (1995) az átlagos hőmérséklet és csapadék megváltozásához képest, mert sokkal nagyobb negatív hatással lehet a hozamra és a hozam biztonságára. Ahas et al. 2000-ben megállapítják, hogy Észtországban, az utóbbi 80 év megfigyelése alapján 8 nappal hamarabb tavaszodik, ez a tendencia az utóbbi 40 évben különösen felgyorsult, leginkább a 90-es évek óta. Bár régóta folynak vizsgálatok a terméshozamra vonatkozóan is, 2004-ben F. Chmielewski et al. még azt írják, hogy a kora tavaszi szakasz tolódik előre különösen, de nem mutatható ki változás a terméshozamban, bár ennek lehetőségét a későbbiekben nem zárják ki. Just (2003) is különös figyelmet fordít az agrárgazdaságban fellépő kockázat kezelésére. Hardaker et al. (2004a) könyve ma a legidősebb tanulmány az agrártudományban fellépő kockázat kezeléséről, páratlan irodalmi és szoftver áttekintéssel.

A termésbiztonsággal kapcsolatos kérdéskör a hazai kutatókat is foglalkoztatta. A magyar mezőgazdaság agro-ökológiai potenciáljának felmérése a 80-as évek elején fejeződött be (Harnos Zs. és Györffy, 1979, Láng I. et al., 1983). Munkájába számos hazai és külföldi munkatársát bevonva Harnos Zs. (1991) az alkalmazkodó mezőgazdaság lehetőségeit kutatja. Különös figyelmet szentel az aszályra Baráth et al. (1993) és Cselőtei és Harnos (1994). Ladányi és Erdélyi (2005) megmutatta, hogy a kukorica hozam kockázata figyelemreméltó mértékben növekedett. A hozam kismértékű hőmérsékletnövekedés esetén ugyan nő, de a további melegedés nagy veszteséggel járhat (Erdélyi et al., 2006). A kockázatvállaló kockázati averziójának függvényében elemeztük a terméskockázatot Magyarország több borvidékén is (Ladányi és Erdélyi, 2006, Ladányi et al., 2007a) és kimutattuk, hogy a

klímaváltozásnak pozitív hatása is lehet a borágazatban (Ladányi et al., 2007b). Különböző klímaszcenáriók elemzésekor azt is láttuk, hogy a hőmérséklet kismértékű változékonysága a hozam nagymértékű változását vonja maga után. Azoknál a növényeknél, melyeknek fejlődési szakaszai a hőösszegetől függnnek, a fenofázisok hossza csökkenhet (Erdélyi et al., 2008, Boksai és Erdélyi, 2007). Vizsgáltuk, hogy az éghajlatváltozás mennyiben befolyásolja az őszi búza hőmérséklet (Erdélyi, 2006) és csapadék-igényének teljesülését (Erdélyi és Horváth, 2006), elemeztük a búza terméskockázatát (Erdélyi, 2007). A termésbiztonságot erősen befolyásoló tényező lehet még a másodlagos, biomasszából nyert megújuló energia termelése a nagy változékonyság és bizonytalanság mellett. Ezzel foglalkoztunk néhány elemzésben (Erdélyi, 2007 és Erdélyi et al., 2008), és kerestük a megoldást a másodlagos biomassza felhasználásában (Boksai és Erdélyi, 2007a és 2007b).

A hőmérsékletnövekedés csapadékhiánnyal párosulva jelentős korlátozó tényezője lehet a mezőgazdaságnak. A klímaváltozással kapcsolatos hatásvizsgálatok fontosságát jelzi, hogy a nemzetközi szakirodalom 27 hőmérséklettel és csapadékkal megfogalmazott indexet definiált a változások jellemzésére (Climate Change Indices, 2007). Nem hagyhatjuk figyelmen kívül, hogy a klímaváltozással együtt jár az extrémális események gyakoriságának növekedése, ami önmagában is erős kihatással lesz a növényekre, számos szempontból (Richter és Semenov, 2004).

#### **2.4. A szántóföldi növénytermesztésben végzett, klímaváltozásra vonatkozó hatásvizsgálatokról**

Elképzelhető az is, hogy a klímaváltozás hatása a termesztett növényekre pozitív is lehet, mivel forráskorlátozás-mentes környezetben a felmelegedésnek köszönhetően a növények növekedése felgyorsul, a párolgás intenzívebb lesz. Ugyanakkor lehet negatív is, ha a talaj nedvességtartalma és eltartóképessége csökken, mert akkor a magas hőmérséklet és erős sugárzás stresszhatást válthat ki. A megnövekedett légköri széndioxid-koncentráció kifejezetten pozitív hatással lehet a produkcióra, bár egyre nagyobb számban találunk a szakirodalomban olyan elemzéseket, melyek szerint az aktív fotoszintézis nem a termés növekedésére, hanem egyéb növényi részek gyarapodására hat és emiatt a termés növekedésének vethet gátat. Kérdés csupán az, hogy mely faktorok milyen mértékben és intenzitással jelentkeznek majd, s ennek köszönhetően mi lesz a hatások eredője.

A klímaváltozás egyre aktuálisabb és sürgetőbb hazai, szántóföldi növénytermesztéssel kapcsolatos kérdéseivel egyre többen foglalkoznak, többek között Harnos Zs. et al. (1996), Kovács és Dunkel (1998), illetve Kovács (1998) és Tuba et al.

(1996) munkáiban is találkozunk a témával kapcsolatos eredményekkel. Őszi búzával kapcsolatos hazai vizsgálatokat végeztek továbbá Harnos N. et al. (2002b), a széndioxid-növekedés hatásait Bencze et al. (2000), Veisz et al. (1996), Harnos N. et al. (2002a), illetve Tuba et al. (1994) elemzik részletesen. Összefoglaló monográfiák készülnek növények klimatikus igényeinek meghatározására (Varga-Haszonits, 1987b, Varga-Haszonits, 1995, Varga-Haszonits, 1997), és a növények klimatikus igényeinek teljesülését elemzik a jövőbeli becsült meteorológiai adatokra (Varga-Haszonits, 2003, Boksai, 2006, Erdélyi et al., 2007a, Erdélyi 2007b) a klímaváltozás megértésének céljából is. Vizsgálatok születnek a vegetációs periódus alakulására (Varga-Haszonits et al., 2005) és a növények fejlődési szakaszaira vonatkozóan (Boksai, 2007, Erdélyi et al., 2007b).

Az utóbbi évtizedekben a különböző modellek megalkotása és felhasználása is egyre gyakoribbá vált. Ismertebb búza szimulációs modellek többek között az AFRC-WHEAT, a CERES-Wheat (mely része a DSSAT döntést támogató és szaktanácsadó rendszernek), illetve a SIRIUS, melyek összehasonlításáról készített tanulmányt Jamieson et al. (1998). Ezek a modellek részletes időjárási adatokat, talajjellemzőket, agrotechnikai leírást (fajta, vetésidő, műtrágyázás, öntözés, stb.) használnak inputként. Mindhárom említett modell a búza növekedésének és fejlődésének komplex modellje, mely leírja a búza fenológiai fejlődését, a szervesanyag termelését és a szervesanyag közötti szervesanyag megoszlást különböző környezeti paraméterek között, napi léptékben. A modellezés jelentőségét bizonyítva a modellalkotással párhuzamosan már a hatásvizsgálatok is elkezdődtek hazánkban is (Harnos N., 1996, Harnos Zs. et al., 1999, Harnos Zs., 2000). Sőt, vizsgálatok készültek a modellek összehasonlítására is (Harnos és Kovács, 1999), és megfogalmazódott az igény egy, a magyarországi viszonyokra leginkább alkalmazható modell megalkotására is. A szimulációs modellek elméleti és gyakorlati kérdéseit tárgyalja, szimulációs modelleket elemez, tesztel, illetve adaptál Harnos N. és Kovács (1999), Fodor és Kovács (2005), illetve Máthéné-Gáspár et al. (2005). Közben a **Magyar Mezőgazdasági Modellezők Műhelye** a CERES modell alapján megalkotja a kezdetektől alkotott névre hallgató, magyarországi viszonyokra adaptált, magyarországi talajadatokat tartalmazó, felhasználóbarát 4M modellt (Fodor et al., 2002, Fodor és Kovács, 2003).

Számos kísérletet végeztek modellekkel a klímaváltozás várható hatásainak elemzésére különböző klimatikus kondíciókon. Megállapították, hogy a búza, árpa, rozs, burgonya és kukorica termesztetősége 100-150 km-rel északra tolódik a hőmérséklet 1°C-os emelkedése esetén, és növekedhet a hozam is (Harnos N., 2002). A Ceres-Wheat és a Sirius modellekkel vizsgálták a forró nyár és nyári szárazság hatását búzára. A Ceres-Wheat érzékenyebbnek mutatta a búzát a szárazságra, a Sirius pedig a forróságra. Mindkét modell a

korai virágzási idejű növényeket részesítette előnyben, melyekre kevésbé negatívan hatottak a szimulált stresszek. Az eredmények azt mutatják, hogy Európa nagy részében a búza termése növekedhet a klímaváltozás hatásaként, aminek okozója az emelt légköri CO<sub>2</sub> koncentráció közvetlen hatása a nettó CO<sub>2</sub> asszimilációra és a vízfelhasználás hatékonyságának növekedésére, másrészt az északi területeken a fagymentes időszakok növekedése is. Növénynövekedési szimulációs modellek felhasználásával búzatermesztésre, a GCM klímaszcenáriók által leírt klímaváltozás hatásait magyar viszonyokra is próbálták előrevetíteni. Harnos N.(2002) a globális felmelegedés búzatermesztésre gyakorolt hatásának vizsgálatához a U.K. Hadley Centre HadCM2 egységes klímaváltozási modell alapján készült klímaváltozási szcenáriókat használta, és az eredményeket az 1961-1990-es megfigyelt időjárási adatsor felhasználásával futtatott eredményekhez hasonlította. A klímaváltozás hatását a búza érési időpontjának, a föld feletti száraztömeg és a termés átlagának és szórásának változásával vizsgálta. A CERES-Wheat, illetve az AFRC-WHEAT2 módosított változata, az AF2MOD modellekkel végzett szimulációk átlagosan 16 nappal korábbi érési időpontot jeleztek. A korábbi érés oka az átlagosan magasabb hőmérséklet, mely által a növény hamarabb éri el a kívánt hőösszeget. Harnos N. (2002) munkájában megállapította, hogy ezek a modellek jól használhatók a magyarországi búzatermesztés leírására, különösen Hajdú-Bihar megyében.

A Budapesti Corvinus Egyetem, Matematika és Informatika Tanszék kutatócsoportja főleg a kukorica és az őszi búza modellezésével foglalkozott (Erdélyi et al., 2007a és 2007b, Erdélyi et al., 2008a és 2008b, Erdélyi és Ferenczy 2008a és 2008b, Ferenczy et al, 2008, Erdélyi, 2008), melyhez a 4M CERES-en alapuló, Magyarország viszonyaira átdolgozott modellrendszert használták. A kukorica fenofázisainak vizsgálata (Boksai és Erdélyi, 2007) bulgár kutatók érdeklődését is felkeltette, emellett a búzával kapcsolatos modellezési munkából szerzett tapasztalatokat és eredményeket (Erdélyi 2007a és 2007b) és a 4M modell német változatát Ukrajnában is használni kívánják. Utóbbit az ADAM Projekt keretében tartott budapesti összejövetelen ismerhették meg (Erdélyi, 2007b). Számos hazai kutatás folyik a klímaváltozással kapcsolatban Magyarországon, az ezeket összefoglaló VAHAVA projekten belül és zárókonferenciáját követően is folytatódtak a klímaváltozással kapcsolatos legkülönbözőbb témájú vizsgálatok és elemzések, a **Környezet-Kockázat-Társadalom (KLIMAKKT)** program, az MTA KSZI Klímavédelmi Kutatások Koordinációs Iroda, az MTA-BCE kutatócsoport és számos más Intézet közreműködésével. A VAHAVA-Hálózat néven létrejött és megkezdte működését az éghajlatváltozással kapcsolatos kutatókat összefogó, egyre bővülő hálózat is. Nagy szükség van a 2008-ban, ellenszavazat nélkül és rekordgyorsasággal elfogadott Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia (NÉS) lépéseinek

mihamarabbi kidolgozására. Ehhez nyújthat segítséget a Vahava-Hálózat. Magyarországi esettanulmányokkal vesznek részt hazai kutatók, a klímaváltozással, alkalmazkodással és kibocsátás csökkentésével foglalkozó nemzetközi kutatási ADAM program (**A**daptation and **M**itigation) tevékenységében is.

### 3. ANYAG ÉS MÓDSZEREK

#### 3.1. Az őszi búza éghajlatigénye és fejlődési szakaszai

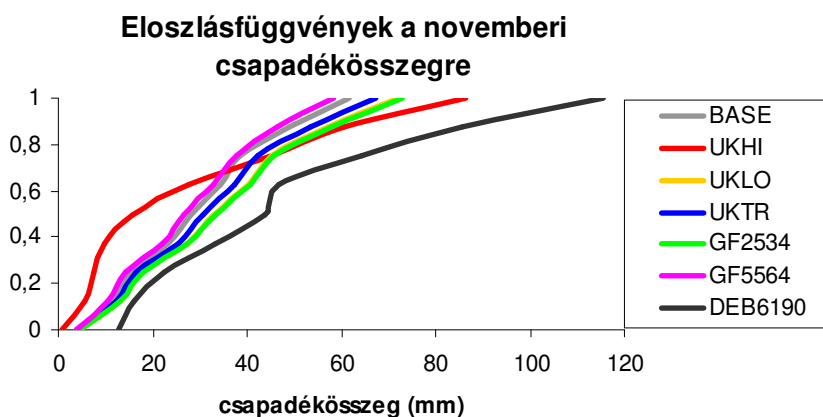
Az éghajlati tényezők jelentősége meghatározó a búza terméshozamában, a termésingadozásokat is rendszerint klimatikus tényező, főleg a csapadékhiány okozza. A csapadék mennyiségének és eloszlásának meghatározó szerepe van a terméshozamra és minőségére egyaránt. Búzatermesztésünk legnagyobb terméscsökkenő tényezője lehet a tartós csapadékhiány, amelyet csak korszerű agrotechnikai eljárásokkal mérsékelhetünk. Megfigyeltük, hogy a tenyészidőre számolt hőösszegek az évek során egyértelműen növekednek. A klímaváltozás nemcsak a napi átlaghőmérséklet emelkedésével járhat, az extrém hőmérséklet gyakoriságának növekedésével is, ami az egyes fejlődési szakaszokban bekövetkező meteorológiai körülmények megváltozása mellett fontos szerepet játszhat a növénytermesztésben. Mért meteorológiai változókból, tapasztalati megfigyelések és szakmai vélemények alapján olyan indikátorokat képezhetünk, melyek vélhetően döntően befolyásolják az egyes növények fejlődését. Az extrém értékekhez tartozó adatokat leválogatjuk és az ezekhez tartozó meteorológiai paramétereket vizsgáljuk annak kiderítésére, hogy mely meteorológiai paraméterek (akár napi értékek, akár időszakokra összesített értékek) befolyásolják egyes növények fejlődését. A természetben előforduló idősorok általában és hosszú távon trendet mutatnak. Középtávon a napi időjárási adatokban jól megfigyelhetők a szezonális trendek, melyektől való általában véletlenszerűnek tűnő (pl. az időjárás miatti) eltérések statisztikus módszerekkel elemezhetők, a növény fejlődésére, terméshozamára hatással lehetnek.

A növény klimatikus igényeinek alakulását vizsgáltuk a fejlődése szempontjából legfontosabb időszakokra. Összehasonlító elemzést végeztünk a múltbeli megfigyelések és a jövőre vonatkozó éghajlatváltozási szcenáriók becslései alapján. A kapott eredmények alapján a „ha ..., akkor ...” jellegű kérdések megválaszolására következtetéseket vonhatunk le. Megtudhatjuk, hogy elfogadva a klímaváltozási szcenáriók előrejelzéseit, hogyan változnak a bázisidőszakhoz képest a növény fejlődését befolyásoló legfontosabb paraméterek.

A csírázás már nagyon alacsony, 0°C hőmérsékleten megindulhat. Kezdeti fejlődésének a hosszú, enyhe őszi kedvez. A tél kritikus időszak a búza számára, mert hótakaró nélkül, különösen az érzékeny fajták, kifagyhatnak. A tavaszi időjárás akkor kedvező a növény számára, ha enyhe és csapadékos. A kezdeti fejlődést döntő mértékben meghatározza a talaj vetéskori vízkészlete és a vetés után lehullott csapadék mennyisége is (Barabás, 1987, Varga-Haszonits 1987c). A vetés befolyásolja az állománysűrűséget, a zavartalan

termésképződést is. A vetésidő meghatározza a termés mennyiségét, azonban a túl korai és a túl kései vetés egyaránt növeli a termesztés kockázatát (Gyárfás, 1922).

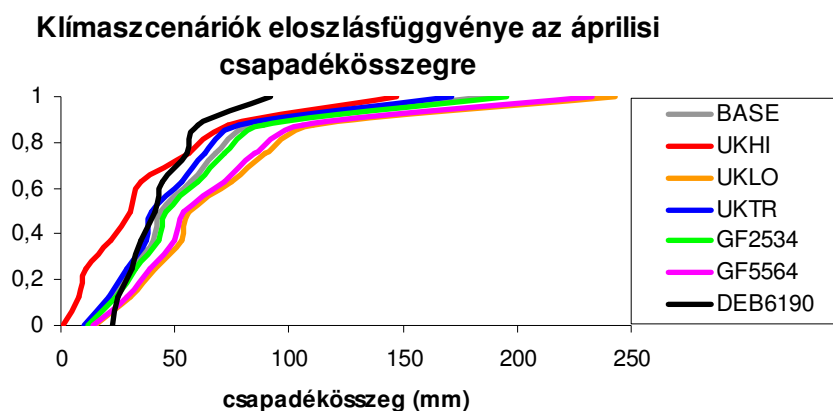
Az éghajlatváltozási scenáriók nem azonos időszakokra vonatkoznak (ld. 3.2.2. alfejezet), független évekre generáltak, a tranziens modellek sem alkotnak idősort, ezért az eredményeket az elsőfokú sztochasztikus dominancia-kritériumot (ld. 3.3.1. alfejezet) felhasználva, az eloszlásfüggvények segítségével mutatjuk be. E kritérium szerint a nagyság szerinti rendezés azt jelenti, hogy minél jobban balra helyezkedik el az adatokhoz tartozó eloszlásfüggvény egy másikhoz képest, annál kisebb értékek vannak az adatsorban. A novemberi csapadékösszegek eloszlásfüggvényeit elemezve (2. ábra) elmondhatjuk, hogy a csapadékmennyiség, illetve ezáltal hasznos víz alakulása a búza számára várhatóan csökken, de nem változik nagy mértékben a vetést követően. A klímascenáriókhoz tartozó eloszlásfüggvények mind balra helyezkednek el, bár nagyon közel a historikus értékek eloszlásfüggvényéhez képest.



2. ábra: Novemberi csapadékösszegek eloszlásfüggvényei Debrecenben, historikus (1961-90) és scenáriókkal előrejelzett adatokkal

A szélsőséges időjárás általában kedvezőtlen a búza fejlődésére és a terméshozamára. A rendkívül száraz őszi időjárás nem teszi lehetővé a megfelelő kelést, a kezdeti fejlődést, a növényállomány megerősödését és megfelelő áttelelését. Az elvetett szem, ha elegendő vizet vesz fel és megfelelő a hőmérséklet, elkezd a csírázást. A búza életében még két nagyon fontos időszakot is megkülönböztetünk. Az egyik a kelés, mert ekkor kezdődik meg a növény fotoszintézise, a másik a virágzás, ami meghatározza, mikortól következik be a szemnövekedés. A fajtaválasztás az agrotechnikában az egyik legfontosabb szempont, hogy akkor és olyan fajtát vessenek, aminek a legideálisabb időpontban kezdődik a szemfejlődése. szemtermés kifejlődésénél döntő jelentőségű a májusi és június eleji időjárás. Kedvező, ha ez

az időszak csapadékos és hűvös, mert ilyen időjárás hatására alakul ki nagy ezerszemtömeg. Az agro-ökológiai potenciál felmérésében (Harnos Zs. és Győrffy, 1979, Láng I. et al., 1983) is a növénytermesztők a búza esetén az áprilisi és májusi csapadékösszeget, valamint a májusi és júniusi hőösszegeket jelölték meg, mint a két legfontosabb meteorológiai paramétert, így először ezeket vizsgáljuk. A klímaszenáriók alapján azt mondhatjuk, hogy az áprilisi csapadékösszeg a drasztikus változást előrejelző egyensúlyi szenáriók kivételével várhatóan nem különbözik lényegesen a bázisidőszakétól (3. ábra), a májusi is csak kis mértékben (4. ábra), de nagy ingadozást tapasztalunk (1. és 2. táblázat). Megállapítható tehát, hogy várhatóan a csapadéknak nem a mennyisége, hanem nagyfokú ingadozása és kiszámíthatatlansága okoz majd gondot.



3. ábra: Áprilisi csapadékösszegek eloszlásfüggvényei Debrecenben, historikus (1961-90) és szenáriókkal előrejelzett adatok alapján

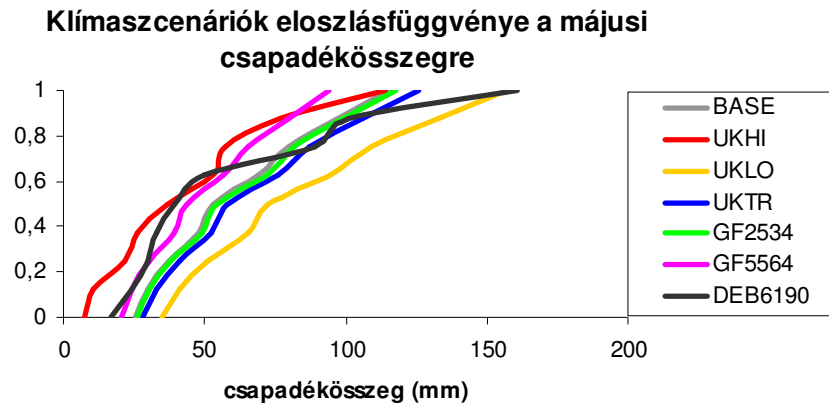
1. táblázat: Historikus (1961-90) és szenáriók által előrejelzett átlagos csapadékösszegek és változékonyságuk (szórás, CV) alakulása Debrecenre (mm), áprilisban

	<b>DEB6190</b>	<b>BASE</b>	<b>UKHI</b>	<b>UKLO</b>	<b>UKTR</b>	<b>GF2534</b>	<b>GF5564</b>
szórás	16,37	34,76	34,10	45,51	32,01	36,61	43,50
<b>átlag</b>	<b>42,33</b>	<b>51,93</b>	<b>36,87</b>	<b>67,92</b>	<b>47,84</b>	<b>54,69</b>	<b>64,85</b>
cv	0,39	0,67	0,92	0,67	0,67	0,67	0,67

2. táblázat: Historikus (1961-90) és szenáriók által előrejelzett átlagos csapadékösszege és változékonyságuk (szórás, CV) alakulása Debrecenre (mm), májusban

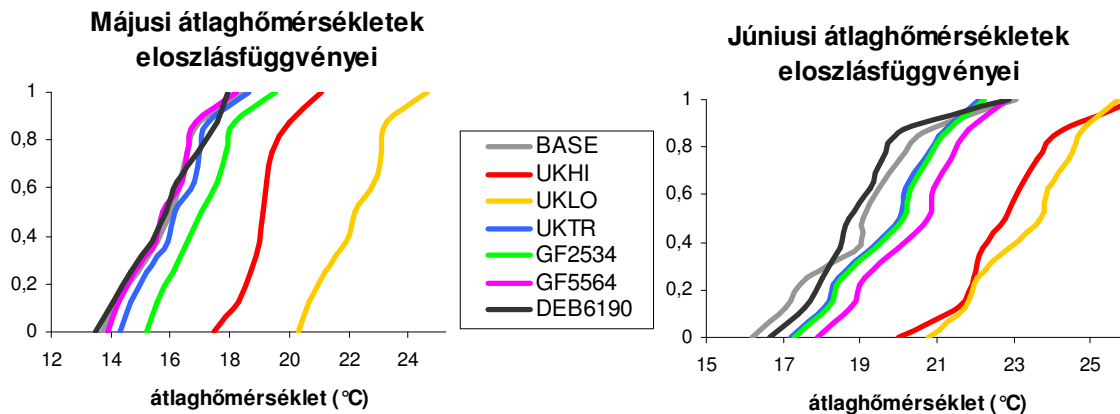
	<b>DEB6190</b>	<b>BASE</b>	<b>UKHI</b>	<b>UKLO</b>	<b>UKTR</b>	<b>GF2534</b>	<b>GF5564</b>
szórás	39,22	28,86	28,22	39,45	31,52	23,61	29,55
<b>átlag</b>	<b>56,18</b>	<b>59,02</b>	<b>41,90</b>	<b>80,60</b>	<b>64,49</b>	<b>48,29</b>	<b>60,41</b>
cv	0,70	0,49	0,67	0,49	0,49	0,49	0,49





4. ábra: Májusi csapadékösszegek eloszlásfüggvényei Debrecenben, historikus (1961-90) és szenáriókkal előrejelzett adatok alapján

A becsült klímaszenáriók alapján a klímaváltozás következtében a vizsgált időszakban a májusi és júniusi napi átlaghőmérséklet értékek jelentősen megnövekedhetnek, ez az eloszlásfüggvények ábráján (5. ábra) jól felismerhető, hiszen a historikus adatoké mindkét hónapra szinte az összes klímaszenárió eloszlásfüggvényéhez képest balra helyezkedik el. Mindkét hónapban várhatóan legalább 1°C-os növekedés várható, az egyensúlyi szenáriók esetén pedig még drasztikusabb melegezés valószínűsíthető.



5. ábra: Májusi és júniusi napi átlaghőmérsékletek eloszlásfüggvényei Debrecenben, historikus (1961-90) és szenáriókkal előrejelzett adatok alapján

A növény növekedése során különböző fejlődési szakaszokon megy keresztül. A genetikailag meghatározott sorrendet természetesen nem, de a szakaszok hosszát és bekövetkezésének időpontját lényegesen módosíthatják az időjárási körülmények. Mivel a

szakaszok lefolyásának döntő hatása van a terméshozamra, fontos, hogy az egész tenyészidő folyamán figyelemmel kísérjük és agrotechnikai kontrollal a lehetőségekhez mérten csökkentjük az időjárás kedvezőtlen hatását.

A kalászos gabonák fejlődése a szervképződésben és a külső megjelenési formában bekövetkező fenológiai változások megfigyelésével követhető. Az őszi búza fejlődésének folyamatát Varga-Haszonits (1987c) fenofázis-beosztása és a fejlődési szakaszok hőmérsékleti küszöbértékei, klimatikus igénye (Varga-Haszonits et al., 2000) alapján vizsgáljuk a klímaváltozási scenáriók Debrecenre leskálázott becslési értékei és a bázisidőszakuk (1961-90) historikus meteorológiai adatainak összehasonlításával. A következőkben röviden összefoglaljuk az őszi búza klimatikus igényeit a *vetés-keelés*, *szárbindulás-kalászás* és *kalászás-viaszérés* fejlődési szakaszokon keresztül végighaladva.

A búza általános jellegű igénye, hogy egy nedves növekedési időszakot egy száraz, meleg időszak kövessen. A búza vetésidőjét úgy választják meg, hogy a növények a téli fagyokig megerősödjenek, jól teleljenek és tavasszal gyorsan fejlődjenek. A búza optimális vetésidője október közepe. Az ország északabbra eső részein inkább október elején, a déli részeken pedig október közepe után vetik a búzát. Az enyhe, csapadékos tavasz a kedvező, mert a télen legyengült növények így gyorsan megerősödnek.

A szárbindulás-kalászás időszakban, mely kb. április első dekádjától május második dekádjáig tart, az őszi búza igen érzékeny a hőmérsékletre: egyfokos hőmérséklet-változásra ekkor néhány napos fáziseltolódással is reagálhat a növény. Az őszi búza gyors növekedése lényegében egybeesik ezzel a fejlődési szakasszal, ezért olyan érzékeny ilyenkor a növény a meteorológiai viszonyokra. A levélfelület kialakulása főként március végétől május elejéig történik. Ekkor játszódik le a növény magasságbeli növekedése is, mely a kalászással fejeződik be. Viszont ebben a fenofázisban a termésre inkább a hidrikus faktorok hatnak. Ezért főként a víz- és tápanyagellátást, azaz a csapadékviszonyok alakulását vizsgáljuk részletesebben. Alacsonyabb nedvességi értékek mellett nagyobb terméshozam várható, azaz a nedvesebb talaj és a növekvő napi evapotranspiráció a termésre csökkentőleg hat. A csapadékos meleg május a kedvező. Azonban a viharos májusi időjárás kedvezőtlen, mert a gyengébb szárú fajták megdőhetnek. A megdőlés különösen káros, ha korán (virágzáskor) következik be. A megdőlt növényállományt könnyebben fertőzik a gombabetegségek, a tápanyagok beépülése a szembe nem lesz megfelelő, jelentős terméskiesés és minőségromlás következhet be, a betakarítást is megnehezítheti és a betakarítási veszteség nagyon magas lehet.

A kalászoslás-viaszérés fejlődési szakaszban a termikus faktorokat képviselő hőmérséklet szerepe a legjelentősebb, az átlaghőmérséklet emelkedése a terméshozam csökkenését vonhatja maga után. A virágszerveknek a magas hőmérsékletre és a rossz vízellátásra bekövetkező részleges elhalása miatt a hozam jelentős mértékben csökkenhet. A zavartalan éréshez és a szemek kifejlődéséhez az az előnyös, ha a június nem túlzottan meleg.

### **3.2. A felhasznált időjárási adatsorok**

#### **3.2.1. Az Országos Meteorológiai Szolgálat adatbázisa**

A Meteorológiai Világszervezet ajánlása szerint általában 30 éves periódus adatai alapján célszerű éghajlati leírásokat készíteni. Az éghajlat jellemzéséhez ugyanis olyan időszakot kell választani, amely elegendően hosszú ahhoz, hogy az éghajlat változékonysága csak kismértékben jelenjen meg a klimatológiai jellemzőkben, viszont általános képet nyújtson a térségben előforduló éghajlati karakterisztikákról. Mivel Debrecen térsége a Tiszántúl, így hazánk egyik legjelentősebb termőterülete, továbbá Magyarország két legérzékenyebb régiójának egyikéhez tartozik (Bartholy, 2005), a dolgozatban a Debrecenre vonatkozó 1901-2000 éves százéves időjárási adatsor 1961-1990-es, 30 éves időszakára végeztünk statisztikai vizsgálatokat és szimulációs kísérletet. Ez az időszak szolgált összehasonlítási alapjául a felhasznált klímaváltozási scenárióknak is. A felhasznált időjárási paraméterek a középhőmérséklet [ $^{\circ}\text{C}$ ], a csapadékösszeg [mm] és a napsütéses órák száma [óra], mind napi adatok. A munkánkban felhasznált modell globálsugárzás értékekkel dolgozik. Itt jegyezzük meg, hogy a napsütéses órák globálsugárzássá történő átszámításának algoritmusát Dr. Huzsvai László (Debreceni Agrártudományi Egyetem) programozta be és bocsátotta rendelkezésünkre.

#### **3.2.2. Klímascenáriók, időjárási szimulációs modellek**

Az éghajlat várható jövőbeli alakulása éghajlatváltozási forgatókönyvek, illetve scenáriócsaládok és klímamodellek (scenáriók) segítségével adható meg. A forgatókönyv az éghajlat egy lehetséges jövőbeli állapotát írja le, vagy statisztikai paraméterek vagy szimulációs modellek segítségével (Varga-Haszonits, 2003). Az éghajlat modellezésével világszerte és Európában is számos meteorológiai intézet foglalkozik a klímaváltozási forgatókönyvek kidolgozásával, az IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, az ENSZ Éghajlatváltozási Kormányközi Testülete) által elfogadott és rögzített alapelvek

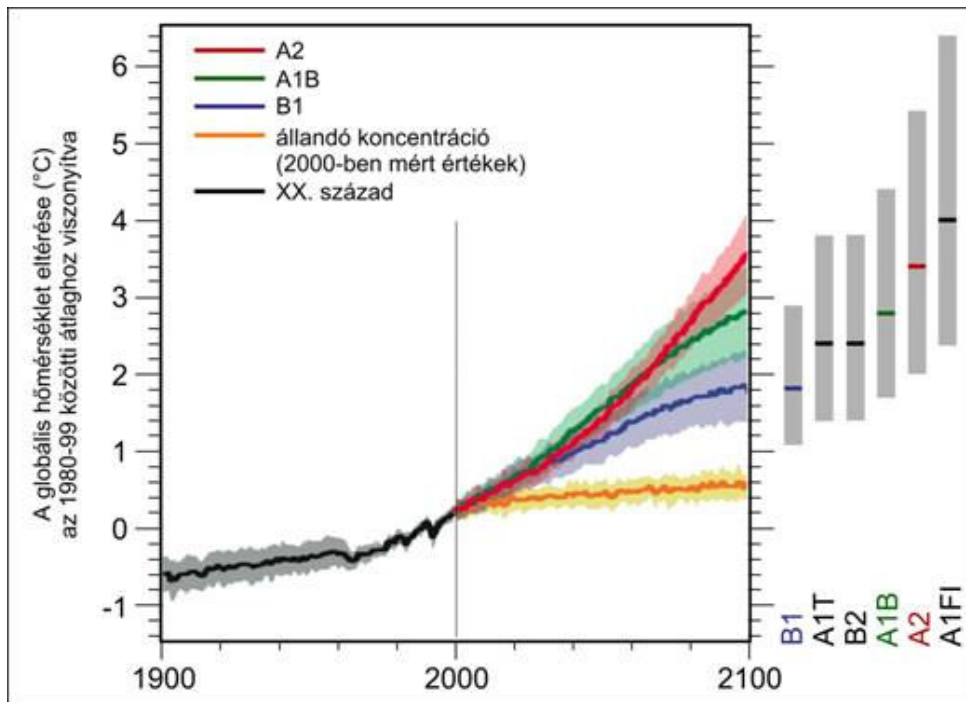
alapján. A klímaváltozási hatásvizsgálatok céljából generált scenáriók széleskörűen alkalmazott eszközei a globális cirkulációs modellek (Giorgi és Mearns, 1991), röviden GCM-ek, melyek a légkör, az óceán és a földfelszín fizikai folyamatait írják le. Jellemzően durva felbontásúak (250-600 km), ezért regionális alkalmazásuk előtt gondos leskálázásukra van szükség. Mivel az időjárás modellezésének mai eredményei még számos bizonytalanságot hordoznak magukban, és egymástól valamelyest különböző előrejelzések születnek. Elemzéseinkhez több klímamodell Debrecenre történt leskálázását használtuk.

A klímamodellek - melyek szerint a következő száz évre a várható időjárási paraméterek becsléseit az üvegházhatású gázok, illetve a szulfátok kibocsátásának függvényében generálják -futtatásának alapjait az IPCC alapelvei képezik. Az IPCC által is elfogadott klímamodellek eredményeit ma világszerte általánosan elfogadott alapelvként alkalmazzák a klímaváltozás hatásainak vizsgálatára. A szervezetet, melyben magyar kutatók is dolgoznak, 2008-ban Nobel díjjal jutalmazták Az IPCC által lefektetett alapelveknek megfelelően négy különböző forgatókönyvet, illetve scenáriócsaládot különböztetünk meg, melyek szempontjai a következők:

- a gazdasági fejlődés és népességnövekedés sebessége, valamint a környezetkímélő és energiahatékony gazdálkodás folytatásának mértéke,
- a megoldások globális szintű keresése, vagy a regionalitás hangsúlyossága és lokális szintű problémakezelés.

Az általunk használt ún. A2 forgatókönyv, illetve ahhoz tartozó modellek a folyamatosan növekvő népesség mellett divergens regionális gazdasági fejlődést feltételezve lassú és területileg nem egyenletes technológiai fejlődéssel írják le a jövőt, a helyi viszonyokat figyelembe véve (IPCC, 2001 és Bartholy, 2005). Munkánkhoz ezek közül választottunk néhány illusztratív példát. Arra is törekedtünk, hogy ne csak egy intézetre szorítkozzunk és arra, hogy a leggyakrabban használt, legfeljebb a század közepéig előre mutató scenáriókat használjuk. Munkánkban a Hadley Intézet (Anglia) és a Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL, USA) által készített GCM-eket alkalmaztuk a legújabb, 2070-2100-as évek távoli jövőjét körvonalazó forgatókönyvek helyett, a nagyobb érdeklődésre számító, közelebbi jövőre (IPCC, 2001). Vannak vélemények, melyek szerint nyugodtan gondolhatjuk, hogy amit ma a klimatológusok 50-100 évre előre jeleznek, azt annyi év múlva senki nem kéri rajtuk számon. A század végére történő becslések még nagyobb bizonytalanságot hordoznak. Maguk a forgatókönyvek által vázolt jövőkép különbözősége a hozzájuk tartozó klímascenáriókban is megmutatkozik, ami a klímascenáriók által mutatott várható globális hőmérsékletváltozásban is megfigyelhető (IPCC, 2001). A csapadék vonatkozásában pedig még nagyobb mértékű változékonyság valószínűsíthető és a szakemberek nagyon óvatosan

fogalmazznak. A különböző forgatókönyvek modelljei alapján globálisan átlagolt felszíni melegedésre kapott eredményeket vizsgálva (6. ábra) ez a bizonytalanság az egyes modellekben kapott változások plusz/mínusz egyszeres szórásának mértékéből is leolvasható és különösen nagy (2°C) a leginkább használt A2 scenáriócsaládnál.



6. ábra: A hőmérséklet valószínűsíthető alakulása különböző scenáriók esetén (IPCC, 2001)

A változás és változékonyság hazánkban és a Kárpát-medencében még ennél is jelentősebb lehet (Bartholy et al., 2008), tehát a jövő egyre távolabbi időszakát tekintve egyre bizonytalanabbak a klímamodellek eredményei számunkra. A bizonytalansági tényező a növénynövekedési modell alkalmazásánál is elgondolkodtató, hiszen ha egy modell egy adott időintervallumon jól működik, akkor egyáltalán nem biztos, hogy egy azon kívül eső másikon is, sőt az is elképzelhető, hogy a drasztikus változást valószínűsítő új scenáriók esetén a megbízhatósági tartományból ki is lép és alkalmazásuk előtt ezekre a körülményekre is tesztelni kell. Mindezek ellenére annak vizsgálatára egy modell mindenképp alkalmazható, hogy a folyamatok változásának irányát körvonalazzák. Ha mégis kíváncsiak vagyunk a távolabbi jövőre, akkor a többenél valamivel későbbi időszakra vonatkozó UKTR és GFDL5564 scenáriók eredményeit helyezzük előtérbe. Jó becslést adhatnak az alkalmazott UKHI és UKLO ún. egyensúlyi scenáriók is, melyek hasonlóan drasztikus változást helyeznek kilátásba, mint a 2070-2100-as időszakra vonatkozó ún. Prudence, scenáriókat összegyűjtő adatbázis (Diós et al., 2008), amelyek között 10°C feletti átlaghőmérséklet növekedést (Révész, 2008) is kilátásba helyező forgatókönyvek is vannak. Ez az adatbázis,

illetve ezek a távoli jövőre mutató scenáriók a vizsgálatok során még nem álltak rendelkezésünkre. Munkánkban klímascenárió alatt a klímamodellek konkrét futtatási eredményeit értjük.

A UK Met Office Hadley Centre által készített GCM-ek közül egyrészt a kétdimenziós légkör-modellt használtuk, mely rövidtávú (néhány tíz éves) előrejelzésre alkalmas, és nem köthető naptári évhez. Ennek alapján készültek először az UKLO, (1987) és UKHI (1990) ún. egyensúlyi klímascenáriók, melyek a földfelszín hőmérsékletét, a csapadékot, a talajnedvességet, a tengerszintet, a jégborított területek nagyságát és az óceáni jég térfogatát becsülik megkétszereződött légköri széndioxid-koncentráció mellett az egyensúly beállta után. A scenáriók csak a modellbeli felbontásban különböznek. (LO = alacsony, ill. durvább, HI = magasabb, ill. finomabb felbontás). Később ezeket tranziens scenáriókká fejlesztették tovább, úgy elkészült a háromdimenziós légkör-modell, melyből készült scenárió az úgynevezett UKTR (1992). Az UKTR fokozatosan növekvő széndioxid szint mellett vizsgálja a szintén fokozatosan változó klímát, a szimulált évek időrendben egymást követőnek tekinthetők. Pontosan ezért esett rá választásunk, mivel az őszi búzát kívántuk vizsgálni, ami vetéskorban termesztett növényünk. Az UKTR scenárió két időintervallumra is adott, az általunk használt scenárió a 2031-40-es időszakra generált, évenkénti 1%-os széndioxid szintű növekedést mutató scenárió.

A Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (USA) által készített, óceán-levegő modellek közül a GFDL2534 (a 2025-2034 közötti éveket jellemző) és GFDL5564 (a 2055-2064 közötti éveket jellemző) klímaadatbázisokat használtuk. Ezek nagy felbontású szimulációs modellek, a sarkokon lévő jégvastagság változásából indulnak ki, aminek hatásaként dolgozták ki előrejelzéseiket. A GFDL scenáriók figyelembe veszik az üvegházhatású gázok kibocsátásának mennyiségét, illetőleg a légköri széndioxid koncentrációjának mértékét. Az említett két scenárió a jellemzett időintervallumon kívül a felbontásban is különbözik egymástól (a későbbi finomabb felbontású). Kalibrálásukat hosszú idősorokon, 1990-ig vezették végig. Az előrejelzéseket a 21. századra adták meg azzal a feltevéssel, hogy évente 1%-kal növekszik a légköri széndioxid-koncentráció.

Vizsgálataink során az összehasonlításokat a fent leírt, általánosan elfogadott szimulációs klímascenáriókon kívül az ezek alapjául szolgáló, UKTR scenárióhoz tartozó, BASE nevű, az 1961-90-es éveknek megfelelő feltételekkel szimulált scenárió adataival végezzük. A klímascenáriók egy-egy 31 éves idősort tartalmaznak. Ezeknek a klímascenárióknak (IPCC, 1996) a referencia időszaka egységesen az 1961-1990-ig tartó 30 éves időintervallum, ezért az összehasonlításokhoz a Debrecenben ekkor mért ún. historikus meteorológiai adatokat használtuk. A felhasznált scenáriók adatainak a magyarországi

régiókra érvényes leskálázása a CLIVARA (CLImate Change, Climatic VARIability and Agriculture in Europe, 2000) project keretében készült.

### 3.3. A felhasznált módszerek és szoftverek

#### 3.3.1. Terméskockázat vizsgálata egy új sztochasztikus hatásossági módszerrel

A kockázatok között kiemelkedő jelentőséggel bír a hozam kockázata, mely az elmúlt évtizedek tapasztalata alapján feltehetően figyelemreméltó mértékben növekedett. Az okok vizsgálatát most időlegesen félretéve célunk az volt, hogy objektív módszertani eszközök segítségével igazoljuk az őszi búza termesztésének jelentős mértékű kockázatnövekedését Magyarország négy megyéjében az 1951-1990-es években, valamint az azt követő időszakban a tendencia folytatását 2005-ig, a döntéshozónak a kockázatvállalásra való hajlandóságának (*risk aversion*) (Anderson et al., 1977, Anderson és Hardaker, 2003) mértékétől függetlenül. Továbbá igazolni azt, hogy a kockázatnövekedés üteme a vizsgált időszakban gyorsult (Hardaker et al., 2004b). Ehhez egy új sztochasztikus hatásossági módszert alkalmaztunk (Hardaker et al., 2004a).

A rendelkezésünkre álló megyei terméseredmény-adatokat a Phyllips (1971) által kidolgozott módszerrel, MS Excel 2002 programmal tettük összehasonlíthatóvá. Szakértői becslések alapján a háromszög-eloszlás módszerével kiszámoltuk a termés szubjektív várható értékét és szórását ( $E_s$ ,  $D_s$ ). Az adatsorra illesztett regresszió  $\varepsilon_i$  reziduumaival és a regressziós tartomány jobboldali végpontjához tartozó  $f(x_{akt})$  regressziós függvényértékkel meghatároztuk az  $y_i^{korr} = f(x_{akt}) + \varepsilon_i$  ún. korrigált terméseredmény-értékeket. Ezután szakértők bevonásával súlyozhatók a kapott  $y_i^{korr}$  értékek a  $p_i$  súlyokkal, mégpedig oly módon, hogy becsüljük annak a valószínűségét, hogy az általunk vizsgált év milyen valószínűséggel fog körülményeiben megegyezni az  $i$  indexű évvel. (Nyilván  $\sum_i p_i = 1$ .) Szakértői becslés hiányában a módszer jól alkalmazható azonos nagyságú  $p_i$  súlyokkal, mi is ezzel a feltevessel dolgoztunk. Kiszámítottuk az  $E_t$  várható értéket és a  $D_t$  szórását, majd az  $y_i^{korr}$  korrigált adatokat, illetve a szubjektív várható értéket és szórását felhasználva meghatároztuk az aktualizált adatokat:  $Y_i = E_s + \frac{y_i^{korr} - E_t}{D_t} \cdot D_s$ . Nyilván  $E(Y_i) = E_s$  és  $D(Y_i) = D_s$ .

A hasznossági függvény (*utility function*) a döntési lehetőségek halmazából a valós számok halmazába képező monoton függvény, mely lényegében azt adja meg, hogy a döntéshozó számára az adott döntés milyen előnyökkel jár:  $U : A \rightarrow \mathbf{R}$ ,  $U : a_j \mapsto U(a_j)$ . A hasznossági függvény a pozitív lineáris transzformációra invariáns, mely tulajdonság biztosítja, hogy a hasznossági függvényt bármely intervallumon értelmezhetjük, a mértékegység választása nem befolyásolja a függvényértékek közti relációt, azaz a különféle mértékegység-választás útján számolt hasznossági függvény ugyanazt a legesszerűbb döntést indítványozza.

A döntést azonban nyilván nem csupán annak várható nyeresége, hanem a döntéshozónak a kockázatvállaláshoz fűződő személyes viszonya is befolyásolja. A kockázatvállaláshoz fűződő viszony segítségével magukhoz a döntésekhez tartozó objektív vagy szubjektív hasznossági értékeken túl a döntéshozó személyének szubjektivitásából adódó információt is felhasználva sokkal érzékenyebben tudjuk kifejezni a döntések közötti hasznossági relációt. Adott  $w$  tőkéhez tartozó ún. abszolút, és a ( $w$  tőke nagyságrendjétől is függő) relatív kockázati averzió függvényeket az alábbi módon értelmezzük:

$$r_a : \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R} \quad r_a : w \mapsto r_a(w) = -\frac{U^{(2)}(w)}{U^{(1)}(w)} \quad \text{és} \quad r_r : \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R} \quad r_r : w \mapsto r_r(w) = w r_a(w)$$

Ha a személyes kockázati averziót nincs módunkban megismerni, általánosan elterjedt hasznossági függvények közül választunk. Ezek közül a legerjedtebb a negatív exponenciális hasznossági függvény:  $U : w \mapsto U(w) = 1 - \exp(-cw)$ , melynek legfontosabb jellemzője hogy a hozzátartozó abszolút kockázati averzió nagysága állandó ( $r_a(w) = c$ ), míg a relatív kockázati averzió a rendelkezésre álló tőkétől lineárisan függ ( $r_r(w) = cw$ ).

Az  $a_j$  döntéshez tartozó  $CE_j$  (*certainty equivalent*) bizonyossági ellenérték alatt azt a legalacsonyabb értéket értjük, amennyiért a döntéshozó hajlandó nem meghozni egy jövedelmezőnek ígérkező döntését, azaz ennyi biztos jövedelem fejében az  $a_j$  döntésből származó jövedelemről lemond, illetve azt a legmagasabb értéket, amennyit hajlandó fizetni, ha az  $a_j$  döntésből származó veszteséget nem kell vállalnia. Röviden, ha a gazdálkodónak a bizonyossági ellenértéket kínálnánk fel, ő közömbös lenne, hogy elfogadja-e a kínált összeget, vagy vállalja-e a döntéssel járó kockázatot. (Világos, hogy  $\min_i(X_{ij}) < CE_j < \max_i(X_{ij})$ , ahol  $X_{ij}$  a döntéshozó (valamilyen módon definiált) nyeresége, ha ő az  $a_j$  mellett dönt, és a fennálló lehetséges események közül az  $i$ -edik következik be.)

A bizonyossági ellenérték (Clement, 1996, Meyer, 2001) nyilvánvalóan a gazdálkodó személyétől is függ. Az is világos, hogy nemcsak a személyétől, hanem a lehetséges



események (végső soron a következmények) valószínűségétől is, pontosabban attól a valószínűségi értéktől, amely a döntést hozó személy számára erre a legjobb becslésnek tűnik (szubjektív valószínűség). A legésszerűbb döntést a  $CE_{opt} = \max CE_j$  jelöli ki, mely az  $a_j$ -t indítványozza. A legésszerűbb döntést itt abban az értelemben használjuk, hogy annak a kockázatvállalás mértékéhez képest a legmagasabb a várható nyeresége, azaz a relatív kockázata minimális.

Egy hasznossági függvényen alapuló kritérium a sztochasztikus dominancia (Fishburn, 1964). Elsőfokú sztochasztikus dominanciáról beszélünk, ha  $a, b \in A$  lehetőségekhez tartozó eloszlásfüggvényekre fennáll, hogy  $F_a(x) \leq F_b(x)$  ( $x \in \mathbf{R}$ ). Ekkor  $a$  előnyösebb, mint  $b$ . Természetesen ezzel a kritériummal nem minden döntési lehetőség-pár között létesíthető rendezés. Ilyenkor szokás a másodfokú dominancia-kritériumot alkalmazni. Másodfokú sztochasztikus dominanciáról beszélünk, ha  $\int_{-\infty}^x F_a(t)dt \leq \int_{-\infty}^x F_b(t)dt$  ( $x \in \mathbf{R}$ ). Harmadfokú sztochasztikus dominanciával is találkozunk a szakirodalomban, de hatásossága felől komoly kétségek vetődnek fel (Anderson és Hardaker, 2003). A sztochasztikus dominancia-kritériumok egy egyszerű általánosítása, amikor az eloszlások olyan lineáris kombinációját keressük, amely előnyösebb valamely lehetőségnél, s ekkor ez utóbbi, kevésbé előnyös lehetőséget kiküszöbölhetjük a feladatból (Drynan, 1986). Az általánosított sztochasztikus dominancia-kritérium a fenti sztochasztikus dominancia-kritériumoknál erősebb módszer, mert a vizsgálat során figyelembe veszi a döntéshozó kockázati hajlandóságát, illetve a hasznossági függvényét is. Először rögzítjük az abszolút kockázati averziót nagy valószínűséggel tartalmazó intervallumot ( $I_r$ ), majd az  $r_a$  nagyságrendjének felhasználásával becsüljük a hasznossági függvényt. A kapott hasznossági függvényre alapozva keresünk első- illetve másodfokú sztochasztikus dominancia-relációt a lehetőségek között (Meyer, 1977).

A kockázati averziótól is függő kritérium a sztochasztikus hatásossági kritérium. A közelmúltban az általánosított sztochasztikus dominancia-módszert ötletesen egyszerűsítette Hardaker et al. (2004b). A hasznossági függvény Bernoulli-féle alapelvei alapján az  $r_a$  (abszolút) kockázati averziótól (is) függő  $U(x, r_a) = \int U(t, r_a) \cdot f(t)dt$  (negatív exponenciális) hasznossági függvényt feltételezve felírjuk a bizonyossági ellenértékre vonatkozó összefüggést:  $CE(x, r_a) = U^{-1}(x, r_a)$ . Először a szubjektív eloszlásfüggvény (diszkrét) értékei segítségével becsüljük az U-t:

$$U(x, r_a) = \sum_i (F_{i+1} - F_i) \frac{1 - (\exp(-r_a x_i) - \exp(-r_a x_{i+1}))}{r_a (x_{i+1} - x_i)} \quad (r_a \in I_r)$$

majd U inverzét:

$$CE = \frac{-\ln[1-U(x, r_a)]}{r_a}.$$

A  $CE$  értékeket az abszolút kockázati averzió függvényében ábrázolva a legmagasabban fekvő görbe jelöli ki a legkevésbé kockázatos lehetőséget. Amennyiben a görbék egymást keresztezik, úgy az optimális döntést a kockázati averzió nagyságától függően, az aktuális  $r_a$ -hoz tartozó magasabb  $CE$  értékű görbe-szakasz jelöli ki.

### 3.3.2. Modellezés, a 4M szimulációs növénytermesztési modell

Az időjárás befolyásolja a növények egyedfejlődését, szemtermés és biomassza mennyiségét is. Ha kvantitatív következtésekre akarunk jutni, akkor tudományosan megalapozott becslési módszerekre van szükségünk (Kovács és Fodor 2005). A modellek és modellezés fontos szerepet játszanak a tudományos megismerés folyamatában (Huzsvai et al., 1995), hiszen segítségükkel olyan kérdésekre kaphatunk választ, amelyeket egyébként csak drága, időigényes, esetleg kivitelezhetetlen kísérletek illetve megfigyelések árán lenne lehetséges. Természetesen a szimulációs vizsgálatok nem helyettesítik, csak kiegészítik a fitotronos és szántóföldi kísérleteket. A modellezéssel kapott eredmények alapján ötlet fogalmazódhat meg a kísérletek beállítására, mellyel időt, eszközt és költséget takaríthatunk meg. A kísérletek pedig nagyon fontosak a modellek beállításához, teszteléséhez, a folyamatok leírásának pontosításához. A modellek mint eszköz, és a modellezés mint módszertan fontos szerepet játszhatnak a tudományos megismerés folyamatában. A szimulációs kísérletek eredményei jól használhatók a klímaváltozás lehetséges hatásainak feltérképezésében, segíthetik a várható hatásokra való felkészülést, az alkalmazkodási stratégiák és kárcsökkentő akciótervek kidolgozását.

A modellezésnek Magyarországon is nagy hagyománya van. A Talajtani Társaság keretein belül 2001 januárjában Dr. Kovács Géza vezetésével megalakult a Rendszermodellezési Szakosztály, amely a Magyar Mezőgazdasági Modellezők Műhelyének ad otthont. Utóbbi egy magyar kutatók által fejlesztett növénytermesztési modell megalkotását tűzte ki céljául. Kiindulási alapként J.T. Ritchie professzor felajánlotta az általa kifejlesztett CERES (Crop Estimation through Resource and Environment Synthesis) modellt. A CERES DELPHI-ben készült változatát nevezték a 4M modell 0.0 verziójának. Később - a könnyebb fejleszthetőség, illetve bővíthetőség érdekében - megváltoztatták a CERES szerkezetét és a 7. ábrán látható, menürendszeres, felhasználóbarát kezelőfelületet terveztek hozzá (Fodor et al., 2002).



7. ábra: A 4M kezelőfelülete

Munkánkban a CERES modell alapján, magyarországi viszonyokra fejlesztett és talajtani adatokat is tartalmazó 4M (Magyar Mezőgazdasági Modellezők Műhelye kezdőbetűiről elnevezett, Fodor et al., 2002) szimulációs modellrendszert használtuk. Segítségével leírható a növények fejlődése, a levélfelület nagysága, a gyökerezési mélység a rétegenkénti gyökérsűrűséggel, a biomassa növekedése, a víz mozgása a talajban, az evapotranspiráció, a nitrogén alakulása és mozgása a talajban, a növény nitrogénfelvétele és eloszlása, stb. A modell napi léptékű inputtal számol, és az eredmények napi gyakorisággal kérdezhetők le. A dolgozatban a fenológiai fejlődés nyomonkövetésére és ezzel párhuzamosan a hozamok elemzésére alkalmaztuk a szimulációs módszert.

A CERES átalakításával született magyarul (is) kommunikáló, felhasználóbarát, és új modulokkal könnyen tovább bővíthető 4M szoftvercsomagba azóta is számos új modul illetve segédprogram került beépítésre. Nemzetközi és hazai vizsgálatok már bizonyították a modell hatékonyságát (Jamieson et al., 1998, Kovács és Fodor, 2005). Az MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézetben működő modellező csoport már tíz éve alkalmaz különböző növénytermesztési modelleket a kutatásban és az oktatásban, igaz eddig főleg kukorica növényre. Modellezési munkánk során tehát a 4M modellt használtuk, mert célkitűzéseink között szerepelt elősegíteni és elkezdni ennek a növénynövekedési modellnek búzára történő alkalmazását is hazánkban, és hazai körülmények között, továbbá ezáltal lehetővé tenni a hazai klímaváltozással kapcsolatos további kutatások hatékony eszközeként történő alkalmazását is. Nem utolsó szempont az, hogy ez a modell bárki számára elérhető, számunkra továbbá a fejlesztője, Fodor Nándor biztosította a folyamatos kommunikáció és tapasztalatcsere lehetőségét, valamint ezzel párhuzamosan észrevételeink és kéréseink alapján is folyamatosan fejlesztette és bővítette a 4M-et, csapatával technikai nehézségeinken is könnyített. Ezáltal a modell alkalmassá vált a megfelelő agrotechnikai beavatkozások

keresésére és tervezésére - a kukorica növényre való számos esettanulmány mellett – az őszi búzára történő hatásvizsgálatokra is. Egy jól működő modellt más területen, más feltételekkel, vagy más körülmények között sokszor lehetetlen alkalmazni, bár a modellek megfelelő kalibrálásával erre is számos példát ismerünk. A szűk keresztmetszetet az esetek nagy részében nem is a modell struktúrája jelenti, hanem a szükséges bemenő adatok típusának különbözősége, vagy elérhetősége. A szimulációs modellezés ez okból részben a kutatók „lokális” problémához rendelt feladata lett.

Modellezéssel egyértelműen megfogalmazott feltételek mellett határozott, sokszor nagyon hasznos következtetéseket lehet levonni. Az általunk használt 4M szimulációs modellrendszer, a talaj - növény - időjárás kapcsolatát írja le napi léptékben. Akár 100 éves időszak modellezésére is képes, vetésforgóval is. Az időjárás, talaj és agrotechnika fájlok, melyek a növényi adatokat is tárolják, projektekbe rendezhetők. A projektek ún. feladatokat tartalmaznak. Minden feladat egy időjárás egy talaj és egy agrotechnika fájlt foglal magába. A 4M magyarországi talajokra, időjárásra és a hazai fajokra, fajtákra számos adatot és paraméterbecslő eljárást ajánl fel, melyek segítségével eredményesen felhasználható a hazai kutatások során. Olyan új modulok illetve adatbázisok kerültek beépítésre, amelyeket magyar kutatók fejlesztettek illetve készítettek, és tartalmazzák a légkör-talaj-növény rendszer speciálisan magyar jellemzőit. A bemenő adatokat a modellezett rendszer felépítésnek megfelelően az alábbi módon csoportosították: időjárási adatok, növényi adatok (melyekhez fajparaméterek és fajtaparaméterek, egyes növénycsoportokhoz ökotípus-paraméterek is tartoznak, jelenleg 9 növényre), talaj adatok (a programhoz a Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézet adatbázisa van csatolva, mely 36 különböző helyről, 44 talajszelvény, a modell számára előkészített inputadatait tartalmazza) és agrotechnikai adatok (melyhez vetési, aratási, trágyázási ill. öntözési 'esemény' és a szimuláció időtartama adható meg). A modell az időjárási paraméterek helyett a klímaszenáriókban megadott meteorológiai adatokkal kiválóan alkalmas a klímaváltozás hatásvizsgálataira. Az agrotechnika fájlban lehetőségünk van a mű- és szervestrágyázás, valamint öntözés beállítására a szimulálás során. A modell az eredmények grafikus ábrázolására is lehetőséget kínál. A 4M program őszi búza fejlődését az 3. táblázatban látható több szakaszra bontja és beszámozza. Modellezési vizsgálatainkkor ezeket a fenofázisokat figyeltük meg.

A 4M programcsomag célja, hogy hatékony eszköz legyen a tudományos kutatásban, az oktatásban (Nagy et al., 1994) és a gyakorlati problémafeltárásban illetve problémamegoldásban. Célja, hogy olyan eszközt adjon a mezőgazdasági szakemberek kezébe, amely működő szimulációs modellbe foglalja a növénytermesztés folyamatait, azok ökológiai és technológiai feltételrendszerét, felhasználva az eddig elért természettudományi és

agrártudományi eredmények mind szélesebb körét, s ezzel átfogó módon segítse a döntés-előkészítést annak különböző szintjein.

3. táblázat: Az őszi búza fejlődési fázisai a 4M modellben (Kovács és Fodor, 2005)

<b>Fejlődési fázisok leírása</b>	<b>4M-féle beosztás</b>
Vetés előtti	0
Vetéstől csírázásig	1
Csírázástól kelésig	2
Keléstől a juvenilis fázis végéig	3
A juvenilis fázis végétől a tenyészőcsúcs megjelenéséig	4
A tenyészőcsúcs megjelenésétől a levélnövekedés végéig	5
A levélnövekedés végétől a tenyészőcsúcs növekedésének végéig	6
A tenyészőcsúcs növekedésének végétől az effektív szemtelítődés kezdetéig	7
A fiziológiai érés szakasza (napja)	8

A 4M fejlesztése során a debreceni kutatók közreműködésével továbbfejlesztették a modellt, mely most már gazdasági szempontok figyelembe vételével tápanyag-szolgáltató szaktanácsadásra is lehetőséget kínál. Így létrejött a 4M első működő döntéstámogatásban alkalmazott formája a 4M-ECO (Fodor et al., 2004, Sulyok et al, 2003). Munkánk során a 4M modellt klímaváltozási esettanulmányok végzésére használtuk az őszi búza fejlődésének nyomon követésére, valamint terméshozamának alakulására. A 4M szimuláció menetrendje: projekt definiálása (később megválasztása), a növény és fajta kiválasztása, talajtípus-választás, agrotechnika megválasztása, scenárió (időjárési adatok) beállítása, adott év (évek) beállítása, futtatás, eredmények mentése.

Hatásvizsgálatunk során időjárési inputként a Hadley Intézet által kifejlesztett és Debrecenre leskálázott UKTR3140 klímascenáriót használtuk. Mivel ez a scenárió az 1961-től 1990-ig tartó időszakot tekinti bázisidőszaknak, ezért az összehasonlító elemzést az 1961-1990-es időintervallum megfigyelt időjárési adataival végeztük. A klímascenáriók közül az UKTR scenáriót választottuk. A helyre jellemző réti csernozjom talaj paramétereit állítottuk be, búza-kukorica-búza-... vetésforgóval évenkénti váltásban az Mv-Irma és a Dekalb 471 fajtákkal. A hazánkban termesztett őszi búzával és kukoricával kapcsolatos általános tapasztalatokat vettük figyelembe, szokásos vetési és betakarítási időpontokat megjelölve.

Összehasonlító vizsgálatunk során nem vettük figyelembe a különböző búzafajták eltérő termesztési feltételeit és a fajtaváltást, a tápanyagtól eltekintve nem különböztettünk meg agrotechnikai beavatkozásokat és a lehetséges eltérő hatásait. Tradicionális agrotechnikát alkalmaztunk. Őszi búzára a műtrágyázást vetés előtt és tavasszal végeztük, kukoricára pedig ősszel és tavasszal vetés előtt. Egy szimuláció véghezvitele az előző beállításokon túl, a következő paramétereket (események időpontját) is igényli: szimuláció kezdete, kezdőfeltételek aktivizálása, vetés, csírázás (a modell beállított értéke), aratás (kényszeraratás), szimuláció vége. A vetési időpontot október 20-ra állítottuk be.

A vizsgálandó meteorológiai alap- és képzett adatsorok tehát Debrecen bázisidőszakra vonatkozó és eljövendő éghajlatát szimulálják. A scenárió 4 meteorológiai jellemzőt tartalmazott. A fenológia folyamatait figyeltük meg és a következtetéseket a futtatások eredményeinek összevetése alapján vontuk le. A fejlődési szakaszokat a 4M program beosztása szerint különböztettük meg és számoztuk be. Az elmentett eredményekből az MS Excel program segítségével ábrákat készítettünk, valamint a kapott eredményeket különböző statisztikai módszerek felhasználásával ki is értékelhettük (<http://ropstat.com>).

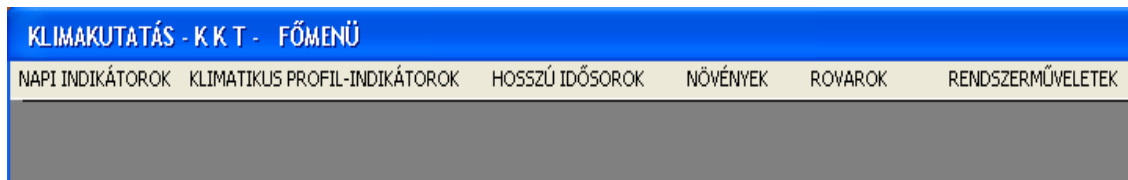
### **3.3.3. A KKT Klímakutatás adatbáziskezelő szoftver**

A KKT (Környezet Kockázat Társadalom) adatbázis és a hozzá kapcsolódó lekérdező programrendszer kiépítése (Szenteleki, 2007 és Szenteleki et al., 2007a és 2007b) elsősorban azért jött létre hogy a Budapesti Corvinus Egyetem Matematika és Informatika Tanszékén folyó – a klímaváltozás kockázati, gazdasági és társadalmi hatásaira irányuló - kutatások adatbázisainak összegyűjtését segítse elő és az elméleti vizsgálatokat támogassa. Ennek megfelelően folyamatos fejlesztéssel Szenteleki biztosította a munkánk során felmerülő számos igényhez igazodva az elemzések elvégzésének könnyítését. Az adatbázishoz kapcsolódó programrendszer lehetővé teszi a központi adatbázis áttekintését, az adatszűrés és leválogatás tetszőleges szempontok szerinti végrehajtását, illetve nagy futásidőt igénylő – vagy szokványos statisztikai eszközökkel el nem végezhető, ezért speciális programok írását feltételező – elemzések elvégzését. Az indítás után a 8. ábrán mellékelt bejelentkező képernyővel találkozunk. A program használata során keletkezett kutatási eredményeinket (adatszűrések, indikátorok, speciális lekérdezések eredményei) kinyomtathatjuk, illetve egy Access adatbázis létrehozásával tárolhatjuk is a további vizsgálatokhoz. A KKT programokat a felhasznált adattáblák szerkezete, illetve a lekérdezés típusa alapján az 9. ábrán látható menürendszer szerint van csoportosítva. A napi indikátorok menüpont alatt a napi

hőmérsékleti adatokból következtethető változások leszűrését, vizsgálatát biztosítja a programrendszer.



8. ábra: A KKT Program bejelentkező képernyője



9. ábra: A KKT Program főmenüje

Hosszú idősorok, elsősorban az átlagos havi (tényleges és scenárió idősorok) adatok elemzését teszik lehetővé, a rendelkezésre álló napi adatsorokat is tartalmazza. A növények menürendszer a búza, a kukorica, az árpa és a szőlő termőterület és termésátlag adatait biztosítja az idő, illetve az időjárás függvényében, mely adatok a KSH Mezőgazdasági Főosztályától származnak. A dolgozatban a napi indikátorok és a növények almenüket használtuk. A napi indikátorokhoz tartozó menüsor a napi adatsorok szűrésére és a napi meteorológiai statisztikák elkészítésére tartalmaz programot. A napi adatsorokat bármelyik kiválasztott meteorológiai paraméter mentén kiszűrhetjük, (sugárzás, minimum-, átlag- és maximum hőmérséklet, csapadék), de kialakíthatjuk az egyes paraméterekre vonatkozó „től – ig” határok tetszőleges kombinációját is az adatok szimultán leválogatása érdekében. A számítógép a napi adatokból összegzi az évenkénti napos órák számát. Bizonyos idősorok a napos órák helyett a napi sugárzási adatokat tartalmazzák. A KKKT program (Szenteleki et al., 2007) segítségével könnyen elemezhetjük a megfogalmazott, általános vagy növény-specifikus indikátorváltozókat, extrémindexeket. Szűrőket állíthatunk be az adatbázisban egy-egy növény élettani sajátosságait figyelembe véve a napi meteorológiai adatokat felhasználva más, összetett paraméterek vizsgálatára is a természetességi feltételek,

minőségi követelmények vizsgálatára vonatkozóan.

A PROGRAM a 27 hivatalos nemzetközi indikátor (Climate Change Indices, 2007) és két további index számolását is elvégzi a klimatikus anomáliák feltérképezésének érdekében. A napi meteorológiai statisztikák menüpont segítségével összeszámolhatjuk a meteorológiai paraméterekre felállított szűrőfeltételeknek megfelelő napok számát. A 10. ábra táblázatában azon debreceni adatsor látható, melyben a napi maximum hőmérséklet meghaladja a 25°C-ot. A peremfeltételek kombinált szabályozása további, finomabb lekérdezéseket is biztosít, például a kombinált szűrőfeltételekbe a csapadékviszonyok vizsgálatát is beépíthetjük.

Év	Napok száma
1977	72
1978	45
1979	76
1980	40
1981	64
1982	87
1983	91
1984	57
1985	72
1986	94
1987	74
1988	68
1989	62
1990	72
1991	73
1992	97
1993	92
1994	98
1995	90
1996	67
1997	86
1998	66
1999	91
2000	100

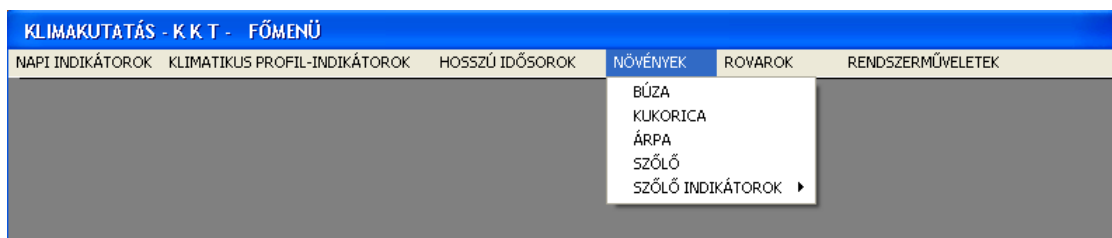
10. ábra: A Program napi meteorológiai statisztikák menüpontja

Elemzéseink során a csapadékatatok nagyfokú változékonysága miatt két klimatikus indexet, az R95-öt és az R99-et külön vizsgáljuk. R95-nek (R99-nek) nevezzük a bázisidőszakra (1961-90) a csapadékmennyiségek évenkénti rendezése alapján számolt 95%-os (99%-os) kvantilist, illetve ezt az értéket küszöbértéknek tekintve az e feletti csapadékos napok számát. Ugyanezekkel a küszöbindexekkel a scenáriókra is kiszámoltuk az ezeket meghaladó csapadékos napok gyakoriságait, valamint az ezeken a napokon lehullott csapadék összességét is (mm).

A növények almenüpontban a mezőgazdaságilag hasznosítható kultúrnövények - a KSH adattárban fellelhető leghosszabb termőterület illetve termésátlag - adatai találhatóak



meg 11. ábrán. A búza adatsorok megyénként 1922-től 2005-ig állnak rendelkezésre, melyeket a búza terméskockázatának vizsgálatához is felhasználtunk, de hiányoznak a háborús évekre vonatkozó termésátlag adatok.



11. ábra: A Program Növények almenüje

### 3.3.4. A ROPstat programcsomag

Az eredmények statisztikai kiértékelésére a ROPstat programcsomagot használtuk. A ROPstat egy új, felhasználóbarát statisztikai szoftver, mely klasszikus és modern statisztikai módszereket egyaránt tartalmaz, háttérében az algoritmusok az R statisztikai program (<http://www.r-project.org>) segítségével futnak. Készítői, Dr. Vargha András és Bánsági Péter arra törekedtek, hogy nem matematikus végzettségű felhasználók számára is elérhető legyen és segítséget nyújtson kutatási eredményeik kiértékeléséhez. További előnye, hogy a feltételek hiányában (pl. normalitás, szórások azonossága, ...) nem használható hagyományos módszerek helyett automatikusan más módszerek alkalmazására is lehetőséget kínál. Az összehasonlításokat a Ropstat Program segítségével, 95%-os szignifikancia szinten végeztük.

### 3.4. A vizsgálat helyszínének klimatikus körülményei

Az MTA és a KvVM 2003-ban indított VAHAVA (Változás-Hatás-Válaszadás) kutatási programjában részt vevő szakemberek Földünk vészjelzései és éghajlatunk hosszú távú történései alapján úgy vélik, hogy a Kárpát-medence klímája a jövőben aszályosabbá válik és a folyamatot az időjárási szélsőségek gyakoribbá válása kíséri. Hazánkra jellemző a hosszú meleg nyarú kontinentális éghajlat, amelyet délről a mediterrán éghajlat, nyugatról a tengeri éghajlat, keleti-északkeleti irányból pedig a rövid meleg nyarú kontinentális éghajlat fog közre; a medence jellegből adódóan gyakran előfordulnak szélsőséges meteorológiai események. A földrajzi szélességünk átlagához viszonyítva teleink mérsékeltébbek, nyaraink melegebbek, az évi csapadék kevesebb, valamint hogy viszonylag kis méretünk mellett az

országreszek között nagy különbségek vannak. Ez utóbbi magyarázatul szolgál arra is, hogy a hazai klímát miért nem elegendő egy-egy éghajlati elem átlagával jellemezni. Hitelesebb képet kapunk, ha a hosszabb időszakok szélsőértékeit is feltüntetjük.

A 20. század csapadékadataiból az országos átlag alapján megállapítható, hogy az ország nagyobb részét csapadékhiány sújtja. Amennyiben ezt összevetjük a Kárpát-medencére prognosztizált változásokkal, növénytermesztésünknek elsősorban a mérsékelt felmelegedésre és a nagyobb mértékű csapadékhiányra kell felkészülni, a változásokat ráadásul még a szélsőségek gyakoriságának növekedése is kísérni fogja. Az IPCC irányelve alapján a 2°C-os hőmérsékletemelkedés még kezelhető. Bartholy (2005) tanulmánya szerint Magyarországon ezt a határt már a következő évtizedekben elérhetjük (0,8-2,1 °C-os melegedés valószínűsíthető), és várhatóan az évszázad közepére ezt meg is haladjuk (2,3-4,1 °C-os melegedés valószínűsíthető). A klímamodellek egymáshoz képest valamelyest eltérő képet mutatnak, de mindegyik alkalmazott scenárió szerint elmondható, hogy a nyári és az őszi hőmérséklet várhatóan jobban emelkedik, mint a téli és tavaszi, a legnagyobb melegedés nyárra várható. A csapadék éves szinten várhatóan nem, vagy csak kis mértékben változik, viszont az éven belüli eloszlása jelentősen eltérhet az eddig megfigyelttől, azaz a téli időszakban enyhén növekszik és nyáron drasztikusan is csökkenhet. Ez a hőmérséklet növekedésével párosulva még nagyobb vízhiányhoz vezethet.

A terméskockázatra irányuló vizsgálatunkat az ország négy egymástól távol levő, időjárás szempontjából eltérő területén végeztük: Győr-Moson-Sopron megye nyugaton található, csapadékosabb terület, Bács-Kiskun, Fejér megye az ország középső részét jól jellemző terület, Hajdú-Bihar megye melegebb és szárazabb, a kelet-magyarországra jellemző fontos mezőgazdasági terület. Így a klímaváltozás hatását nyugat-kelet irányban közel azonos szélességi körön vizsgáltuk.

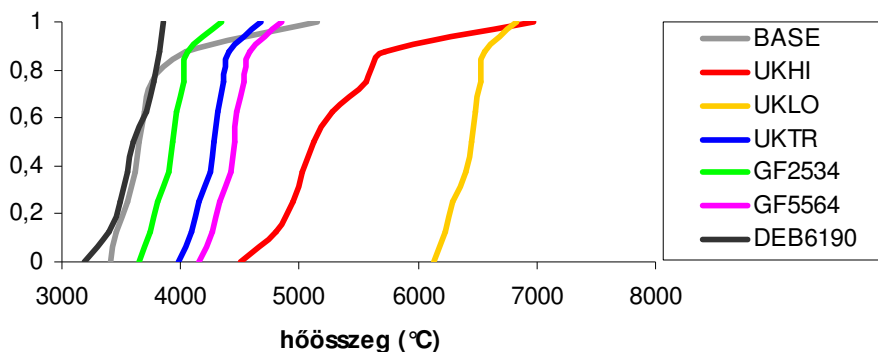
Az őszi búza fejlődésének a mérsékelt égöv felel meg a legjobban, ettől délre csak a kevesebbet termő tavaszi búzáknak termesztésének vannak meg a hőmérsékleti feltételei. Hazánk éghajlata az egész ország területén alkalmas, de nem egyformán kedvező a búzatermesztésre. A csapadékosabb Dunántúlon a kiegyenlítettebb éghajlat miatt általában kisebbek a termésingadozások, mint a szélsőségesebb éghajlatú Alföldön, de a hozam minőségére az Alföld éghajlata a kedvezőbb, mivel a szárazabb klíma kedvez a jobb minőségű termés kialakulásának.

Debrecen térsége a Tiszántúl egyik legjelentősebb termőterülete, ezért vizsgálatunkat mindvégig a Debrecenre leskálázott, különböző klímaszenáriókkal becsült értékek elemzésével, illetve azoknak a bázisidőszakban (1961-90) tapasztalt értékekkel való összehasonlításával végezzük. Munkánkban a hatások elemzését Debrecen példáján keresztül

mutatjuk be. Annak érdekében, hogy a változás trendjét esettanulmányaink helyszínére vázoljuk, először az éves hő-, majd a csapadékösszegek alakulását elemeztük ugyanitt. Debrecen klímájának jellemzését az elsőfokú sztochasztikus dominancia-kritérium alkalmazásával, azaz az adatsorokhoz tartozó eloszlásfüggvényekkel tesszük. Erre azért van szükség, mert az éghajlatváltozási scenáriók meteorológiai adatai független évekre generáltak, azaz nem alkotnak idősort.

Az éghajlati scenáriók 1961-1990-es referencia-időszakra vonatkozó historikus napi átlaghőmérséklet adatai alapján elmondható, hogy Debrecenben egymást váltják a napi átlaghőmérséklet növekedésével és csökkenésével jellemezhető időszakok, az éves hőösszegek az utóbbi években lassan növekvő tendenciát mutatnak. Mondhatjuk-e, hogy ez a növekedés a jövőben is folytatódik? Néhány év kivételével kisebb-nagyobb mértékben minden vizsgált klímascenárió növekedést prognosztizál, az eloszlásfüggvényeket a 12. ábrán láthatjuk mind a hét adatsorra. E kritérium szerint a nagyság szerinti rendezés azt jelenti, hogy minél jobban balra helyezkedik el az adatokhoz tartozó eloszlásfüggvény egy másikhoz képest, annál kisebb értékek vannak az adatsorban. Eszerint tehát a historikus adatok mindegyik klímascenárióhoz tartozó adatsor adatainál kisebbek, mert a hozzá tartozó eloszlásfüggvény az összes többitől balra helyezkedik el.

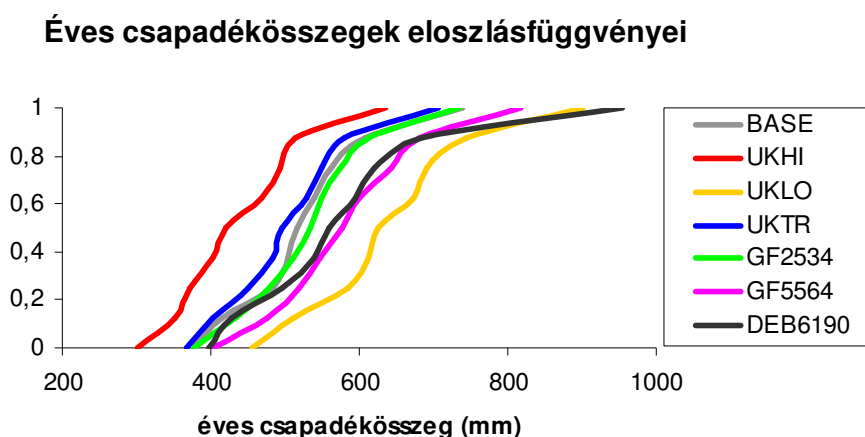
### Éves hőösszegek eloszlásfüggvényei



12. ábra: Éves hőösszegek eloszlásfüggvényei Debrecenben, historikus (1961-90) és scenáriókkal előrejelzett adatokkal (°C)

A növénytermesztés szempontjából másik legfontosabb paraméter a csapadék mennyisége és azon belül annak eloszlása. Az éves csapadékösszegek alakulása az elmúlt időszakban lassú csökkenést mutatnak, a scenáriókhoz tartozó eloszlásfüggvények alapján elmondható (13. ábra), hogy a becsült jövőbeni értékek valamivel kisebbnek mondhatók, kivéve az UKLO scenáriónál, ahol nagyobb. A GF5564 scenárió adatai a múltbeli

adatokhoz nagyon hasonló. Az ingadozás mértéke – az eloszlásfüggvények meredeksége alapján – jelentős marad.



13. ábra: Éves csapadékösszegek eloszlásfüggvényei Debrecenben, historikus (1961-90) és scenáriókkal előrejelzett adatokkal (mm)

Irodalmi adatok alapján az őszi búza éves hasznos víz igényéhez 500-600 mm csapadék, mint fő vízforrás szükséges. A csapadékmennyiségek átlagát hasonlítottuk össze a megfigyelt 30 éves historikus adatok és a klímascenáriók adatai alapján. A kapott értékeket az 4. táblázatban tüntetjük fel és azt láthatjuk, hogy az átlagok az UKHI scenárión kívül minden esetben kielégítik a növény igényét. A növény szempontjából azonban az éves csapadékösszegek helyett sokkal több információhoz juthatunk a növény fejlődési szakaszait külön-külön vizsgálva.

4. táblázat: Historikus (1961-90) és scenáriók által előrejelzett éves csapadékösszegek átlaga Debrecenre (mm)

DEB 61-90	BASE	UKHI	UKLO	UKTR	GF2534	GF5564
564,65	520,04	433,63	635,71	499,02	525,76	575,44

A továbbiakban az őszi búza terméseredményei alapján vizsgáljuk a terméskockázatot, majd a klimatikus igények teljesülését a növény fejlődése szempontjából legfontosabb időszakokban.



## 4. EREDMÉNYEK

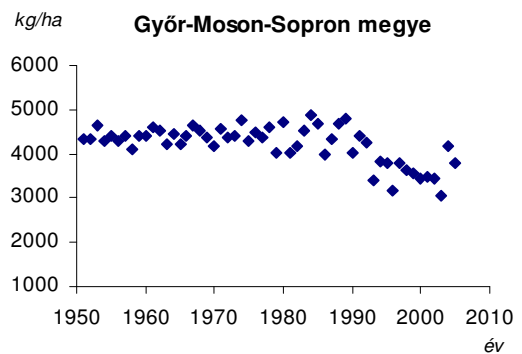
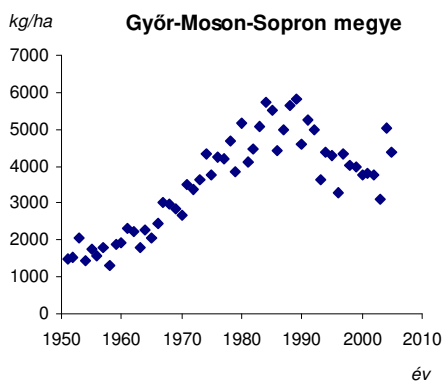
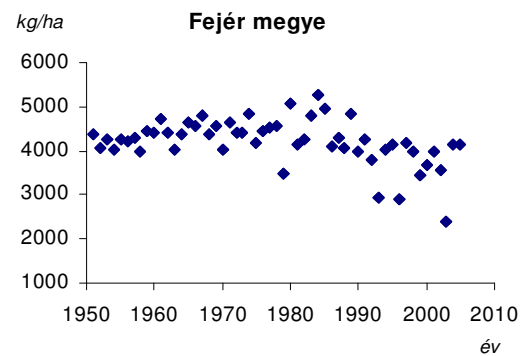
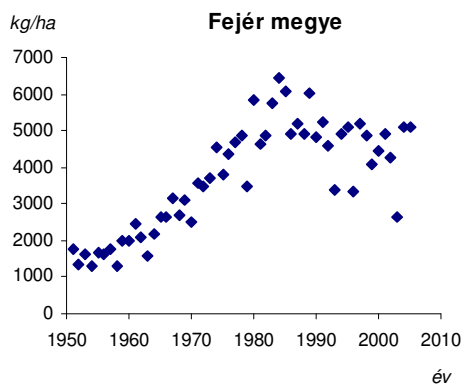
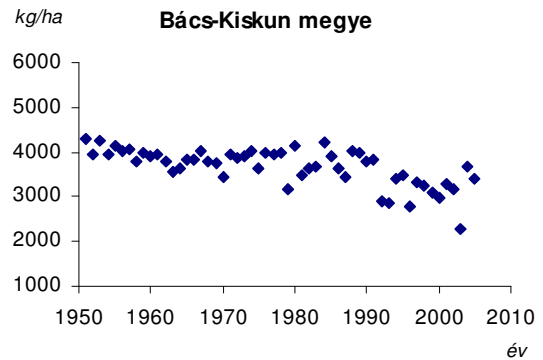
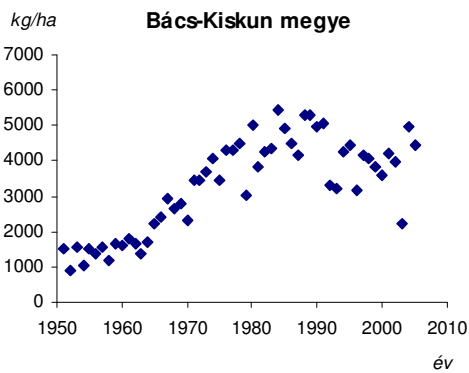
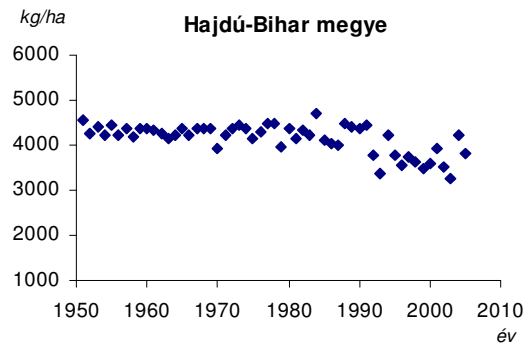
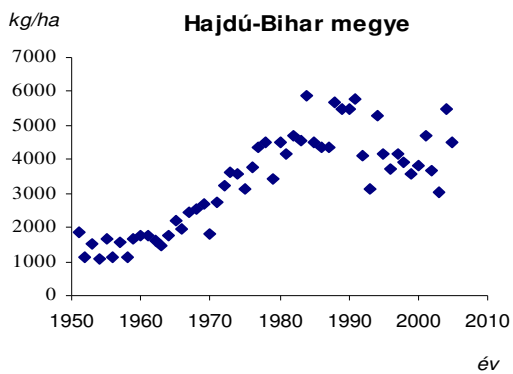
### 4.1. Az őszi búza terméskockázatának vizsgálata Magyarország négy megyéjében

Az agrárgazdaságban, ezen belül a szántóföldi növénytermesztésben számos olyan döntési feladattal szembesülünk, melyek során a gazdaságosság és fenntarthatóság mellett évről évre egyre nagyobb szerepet kap a döntéssel járó kockázat mértéke (Ladányi, 1995). A kockázatok között hazánkban különösen is kiemelkedő jelentőséggel bír a hozam kockázata (Drimba és Nagy, 2000, Ladányi, 2006), mely az elmúlt évtizedek tapasztalata alapján figyelemreméltó mértékben növekedett, üteme helyenként gyorsult is (Ladányi és Erdélyi, 2005). Az előzőek alapján, az éghajlatváltozási scenáriók elemzése során eddig azt tapasztaltuk, hogy a klimatikus viszonyok megváltozása valószínűsíthető, mely folyamat kismértékben meg is kezdődött. Vizsgáltuk, hogy az őszi búza terméseredményei mutatnak-e és ha igen, milyen változást az idő múlásával. Az okok vizsgálatát most időlegesen félretéve célunk az volt, hogy objektív módszertani eszközök segítségével igazoljuk, hogy a búza termesztésének kockázata az elmúlt évtizedekben a döntéshozónak a kockázatvállalásra való hajlandóságának (*risk aversion,  $r_a$* ) mértékétől majdnem teljesen függetlenül emelkedett, egyes helyeken jelentősen. Ennek vizsgálatához a rendelkezésünkre álló megyei terméseredmény-adatok közül Magyarország négy megyéjét választottuk ki (Hajdú-Bihar, Bács-Kiskun, Fejér és Győr-Moson-Sopron megye). Az adatokat a 10. ábrán láthatjuk és azt is, hogy a trendben a 70-es években egy logisztikus áthajlás van, a mezőgazdaságban akkor jellemző nagyfokú technológia váltás, hibridek bevezetése miatt, azaz az adatokban a növekedés üteme megváltozott. A későbbiekben a telítődési szakasz helyett a rendszerváltozás miatt a terméseredmények alakulása inkább egy negyedfokú függvényre alakul. Ekkor ugyanis a megváltozott gazdasági és társadalmi viszonyok hatására először csökkent a termelés hatékonysága, mivel a nagyüzemekből családi gazdálkodások lettek (földosztás), melyek tudás-, tapasztalat-, tőke-, gép-, eszközhányalal küzdöttek, terméskieséssel és nagyarányú szóródás-növekedéssel. Közben végig a rendszeres fajtaváltás is befolyásolta a terméseredményeket. A megfigyelt időszak végén újra növekednek az értékek, de ezzel együtt egyre nagyobb ingadozás is látható. Itt kell megjegyeznünk, hogy az adatok magyarázata formálisan és a mezőgazdaságban bekövetkezett fent említett változások ismeretében történik, hiszen a trendet nagyon nehéz az egész vizsgált időszakra egyértelműen meghatározni az adatok nagyfokú szóródása miatt, különösen a két utolsó évtizedben. A termésstabilitás vizsgálatokkal kapcsolatban azt is meg kell jegyeznünk, hogy az intenzív fajták bevezetésével viszonylag stabil éghajlati viszonyok mellett is fokozatosan növelhetők a

terméshozamok, azonban mivel az intenzív fajták klíma-érzékenysége nagyobb, az évről-évre történő ingadozásuk is nagyobb, vagyis a termesztés kockázata emiatt is növekszik.

A termésátlag növekedése az új vetőmagfajtákban rejlő produktivitás-változás illetve a folyamatosan fejlődő agrotechnikai lehetőségek miatt önmagában nem alkalmas az időjárás hatásainak jellemzésére. A trendtől való eltérés oka nagyrészt az időjárás, tehát az adatok elemzéséhez, illetve az összehasonlíthatósághoz először a trendhatások megtisztítására volt szükség. Az adatokat a Phyllips (1971) által kidolgozott módszerrel (ld 3. Anyag és módszerek című fejezet), az MS Excel 2002 programmal tettük összehasonlítvá. A terméseredmények alapján az ingadozás mértéke, így a kockázatonövekedés, az időjárási paraméterek hatása vizsgálhatóvá válik (14. ábra). Az adatok aktualizálása szubjektív várható érték segítségével történik, melynek megfelelően a hibatagok arányosan változnak, így az összehasonlítást nem zavarják. Ennek a robusztus módszernek a jelentősége abban rejlik, hogy lineáris transzformációkra invariáns

Először, a megyei termésadatok korlátozott elérhetősége miatt csak az 1951-90-ig tartó időszak tízéves periódusait vizsgáltuk (Ladányi, 2006), majd kiegészítettük az 1990-2005-ig tartó évek két szakaszra bontott, trendhatásoktól megtisztított periódusával. Így a kockázatra vonatkozóan pontosabb következtetésekre juthatunk. A 14. ábra jobboldali, összehasonlíthatóvá tett adatok grafikonjai szemléltetik a változások megyénkénti hatását a hozamokra. Ezeket a korrigált adatokat úgy is elképzelhetjük, hogy az eredeti adatokra illesztett megfelelő regressziós függvényt, mint egy zsinórt (melynek meredeksége a szubjektív várható értéktől függ), vízszintesre kifeszítjük, és a lenormált előjeles regressziós hibatagokat az egyenes pontjaihoz adjuk. Így az egyenes fölé, illetve alá szóródott pontokat már össze tudjuk hasonlítani, hiszen köztük megszüntettük az időeltolódás (1951-2005) okozta nagyságrendi eltéréseket. Mivel a korrigálás/aktualizálás lényege, hogy összehasonlíthatóvá tegyük az adatokat, ezért az ezen az ábrán megfigyelt növekvő mértékű szóródás már egyértelműen a termésbiztonság csökkenését, és ezzel együtt a termés kockázatának növekedését sejteti. Az aktualizált adatok alapján elmondható, hogy a búza termesztése során a hozam változékonysága, illetve a termésnövekedés mind a négy vizsgált megyében súlyos volt. Ez alapján a termés bizonytalansága tehát a búza termesztésében feltehetően növekedett. A továbbiakban a vizsgált időintervallumot felbontjuk és négyszer húsz éves, tíz évet egymásba csúszó szakaszokat vizsgálunk (1951-70, 1961-80, 1971-90, 1981-2000), valamint az ötödik húszéves szakaszt, ami a legutolsó néhány év hiánya miatt jobban belecsúszik az előtte lévőbe (1986-2005).

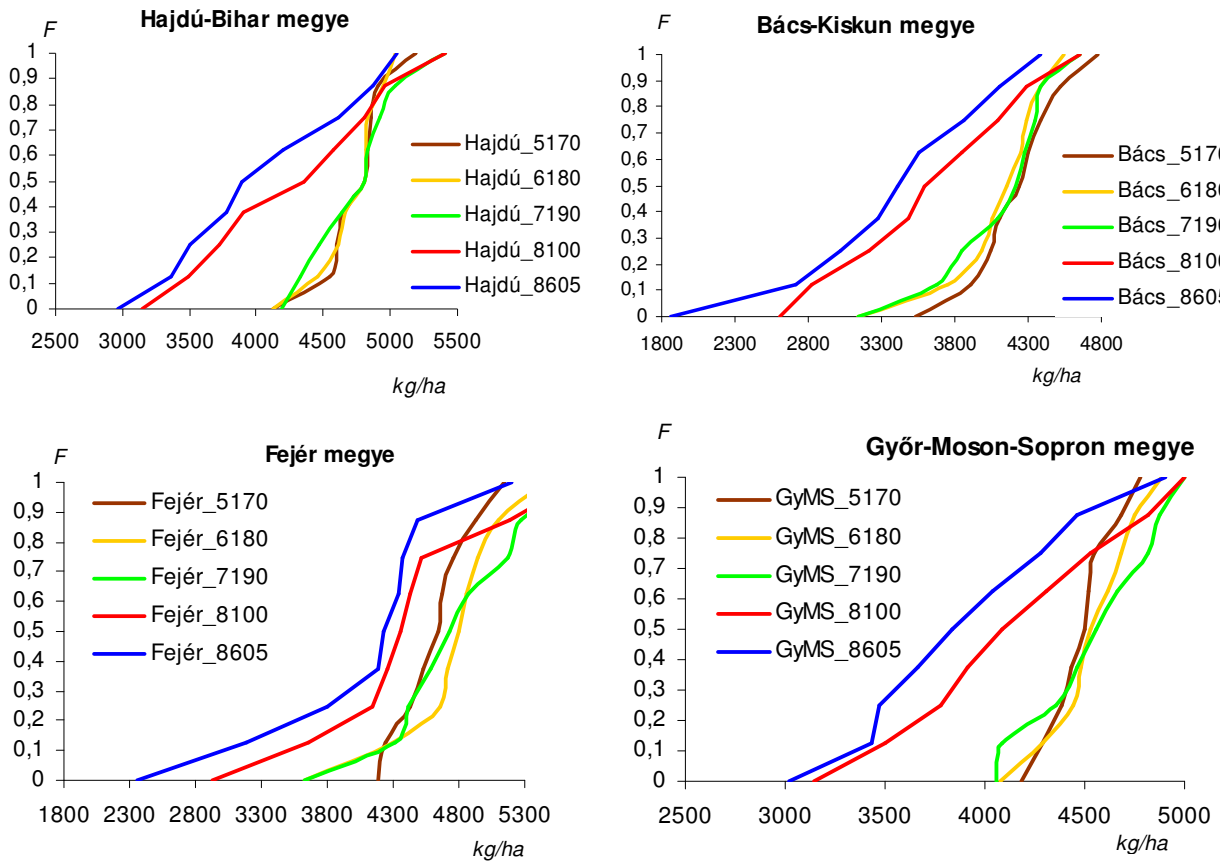


14. ábra: Búza termésadatok (balra) és az összehasonlíthatóvá tett adatok (jobbra) Magyarország négy megyéjére (kg/ha)

A 15. ábrán az aktualizált adatokból és szakértői becslések bevonásával készített szubjektív eloszlásfüggvényeket ábrázoltuk, négy megyére és a szakaszokra bontott vizsgált

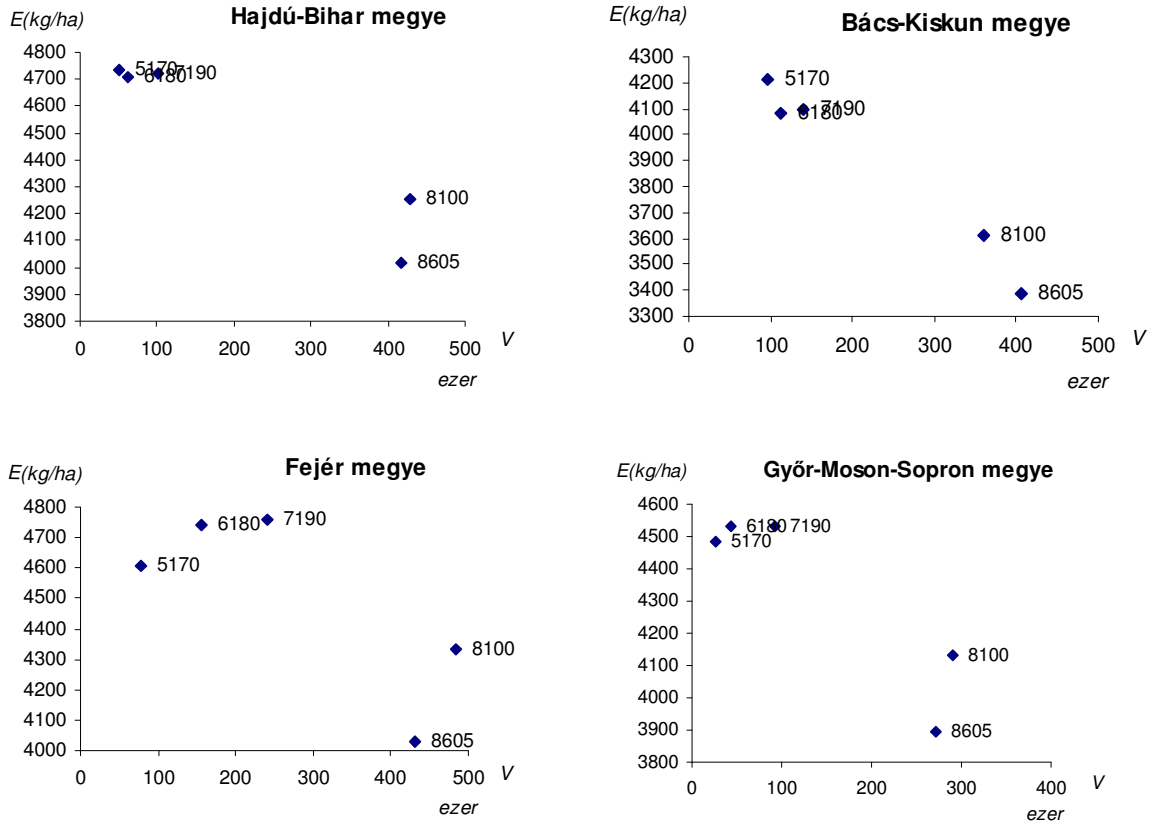


időintervallumok adataira. A búza termesztésénél az egyértelmű kockázatnövekedés mind a négy vizsgált megyében megfigyelhető (legkevésbé Fejér megyében), hiszen a szubjektív eloszlásfüggvények a két legutolsó időszakaszra mindig a többitől balra helyezkednek el. Teljes rendezés nem rajzolódik ki, mivel az eloszlásfüggvények metszik egymást.



15. ábra: Szubjektív eloszlásfüggvények a búza megyei aktualizált terméseredményeire

Ezután ábrázoltuk a várható értéket a variancia függvényében és az ún. E,V - hatásossági kritérium alapján (16. ábra) vizsgáltuk a terméskockázatot. Ezzel a módszerrel úgy létesíthető rendezés az időintervallumok adatai között, hogy minél jobban a bal felső sarokba kerül a hozzá tartozó pont, annál kisebb kockázat mondható el arra az időszakra (azaz ilyenkor minél nagyobb várható értékhez minél kisebb szórás, illetve szórásnégyzet tartozik). A 16. ábrán jól látható, hogy mind a négy vizsgált megye esetében elkülönül az első három időintervallumhoz tartozó érték a két utolsó időintervallumhoz tartozótól, bár a rendezés nem teljesen ugyanaz a három régebbitől elkülönült két közelebbi időszakra és a régebbiek között. A rendezés a későbbi időintervallumokra sem egyértelmű, azaz most sem tudunk teljes rendezést létesíteni az öt időszakasz között a terméseredmények alapján.

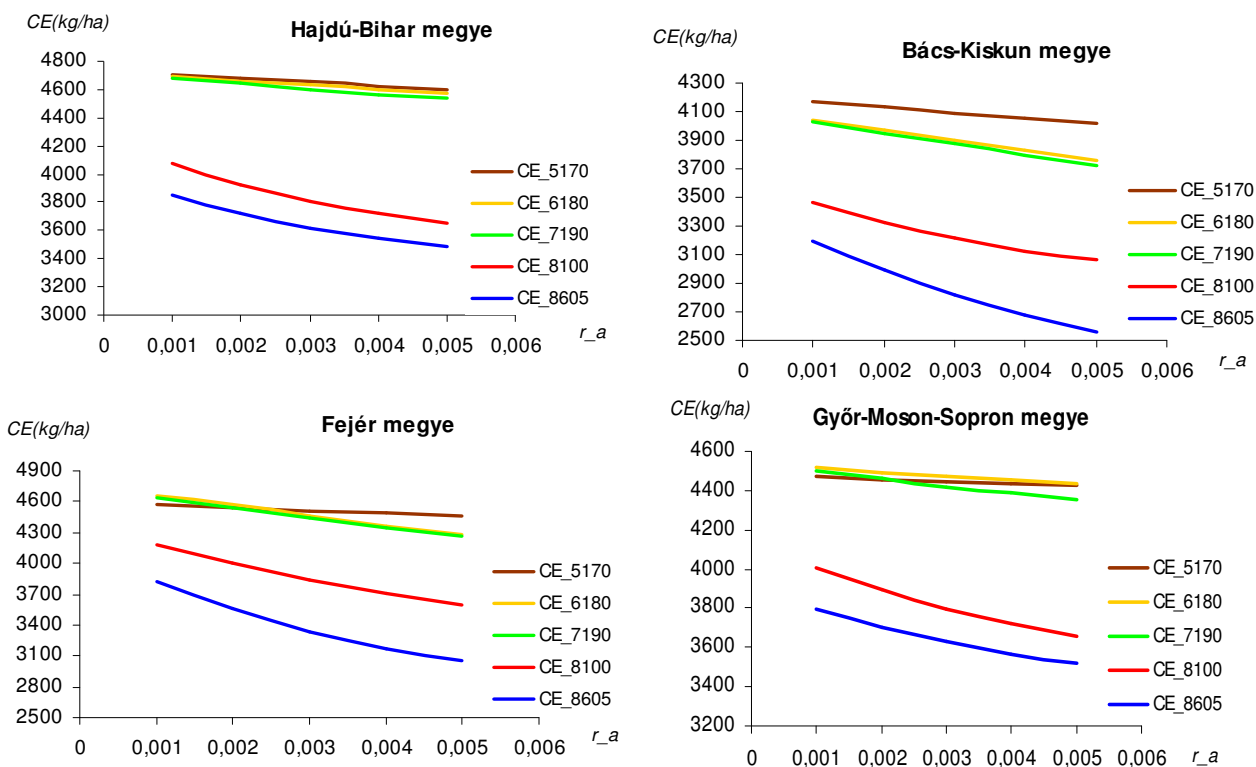


16. ábra: Az  $E, V$  – hatásosság szemléltetése Magyarország négy megyéjére, a vizsgált öt időintervallumra

Ha tehát sorrendet szeretnénk felállítani, akkor más módszerre van szükségünk, ezért a továbbiakban az általánosabb, sztochasztikus hatásossági kritériumot is használjuk. A döntést nyilván nem csupán annak várható nyeresége, hanem a döntéshozónak a kockázatvállaláshoz fűződő személyes viszonya is befolyásolja. A kockázatvállaláshoz fűződő viszony segítségével magukhoz a döntésekhez tartozó objektív vagy szubjektív hasznossági értékeken túl a döntéshozó személyének szubjektivitásából adódó információt is felhasználva sokkal érzékenyebben tudjuk kifejezni a döntések közötti hasznossági relációt (ld. 3. Anyag és módszerek című fejezet).

A következőkben a  $CE$  bizonyossági ellenértéket ábrázoljuk (17. ábra), mely már a kockázatvállaló személyétől, pontosabban a kockázatvállalási hajlandóságától függ. A legésszerűbb döntést itt abban az értelemben használjuk, hogy annak a kockázatvállalás mértékéhez képest a legmagasabb a várható nyeresége, azaz a relatív kockázata minimális. A  $CE$  értékeket az abszolút kockázati averzió függvényében ábrázolva a legmagasabban fekvő görbe jelöli ki a legkevésbé kockázatos lehetőséget. Amennyiben a görbék egymást keresztezik, úgy a legoptimálisabb döntést a kockázati averzió nagyságától függően, az

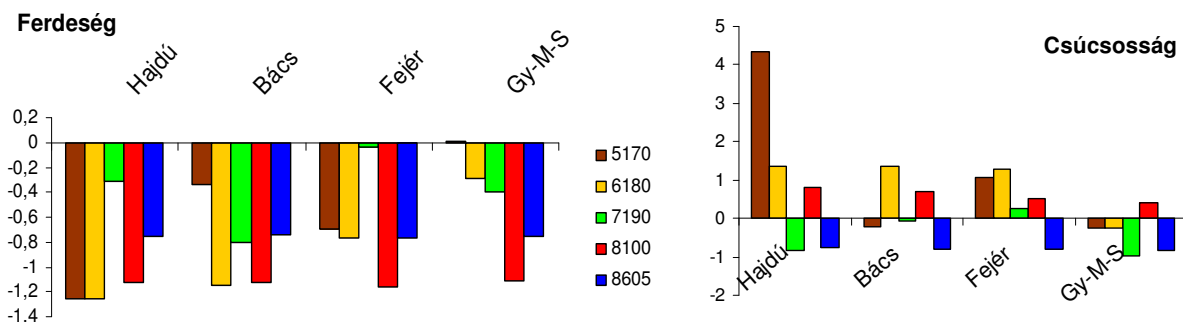
aktuális  $r_a$ -hoz tartozó magasabb CE értékű görbe-szakasz jelöli ki. Erre azonban nincs is szükség (Hajdú-Bihar és Bács-Kiskun megyében egyáltalán), hiszen a 17. ábrán látható, hogy minél későbbi időszakot tekintünk, annál jobban csúszik le a hozzá tartozó görbe, azaz annál nagyobb a kockázat mértéke.



17. ábra: A CE bizonyossági ellenérték ábrázolása a kockázatvállaló különböző  $r_a$  kockázati hajlandóságának (risk aversion) esetén

Mind a négy vizsgált megye esetében tehát azt kaptuk, hogy kockázat szempontjából az idő múlása egyre kedvezőtlenebb helyzetet teremtett. A 17. ábrán igen szemléletesen megfigyelhető, hogy a búzatermesztés kockázata mind a négy vizsgált megyében az 1951-70, az 1961-80, az 1971-90, az 1981-2000 és az 1986-2005-ös éveket összehasonlítva az  $r_a$  kockázati averzió nagyságától függetlenül, igen nagy mértékben növekedett (a későbbi görbe szigorúan a korábbi alatt fekszik). A kockázat mértéke fokozottabban megugrott, különösen nagyobb arányú  $r_a$  kockázati averzió esetén Bács-Kiskun és Fejér megyében. Felmerülhet, hogy ezt a nagyfokú kockáztnövekedést kizárólag az 1990-es évi óriási terméskiesés okozza, de ez csak esetleg és csak részben van így. Mivel a kockáztnövekedés mindenütt egyértelmű, ez az eredmény a termesztek és kutatók számára egyaránt súlyosan és objektívan figyelmeztető jelentőségű lehet.

Tekintsük át, hogy mit lehet mondani az aktualizált adatok ferdesége és csúcossága (18. ábra) alapján, illetve hogy alátámasztható-e más megközelítésből is a kockázat növekedése. A ferdeség és csúcosság abszolút értékben való növekedése hangsúlyozza, hogy a hozam veszteségének valószínűsége a többlethozam valószínűségét egyre jobban meghaladja.



18. ábra: Az aktualizált adatok ferdesége és csúcossága

Az előző fejezetben, a klimatikus igények átlagos változásának vizsgálatokor nem tapasztaltunk olyan mértékű drasztikus változást, mint a terméskockázat vizsgálatokor. A jelenség értelmezéséhez és a jövőre vonatkozó lehetséges tendenciák vizsgálatához elengedhetetlen a megfigyelt meteorológiai események részletes statisztikai vizsgálata. Tehát - az okokat keresve - a klimatikus igényeket a növény különböző, fejlődése során fontos szerepet játszó fenológiai szakaszainak vizsgálatával folytatjuk, azaz összehasonlítást végzünk a meteorológiai paraméterek múltbeli értékei és a klímaszcenáriókkal becsült, jövőre vonatkozó adataira vonatkozóan.

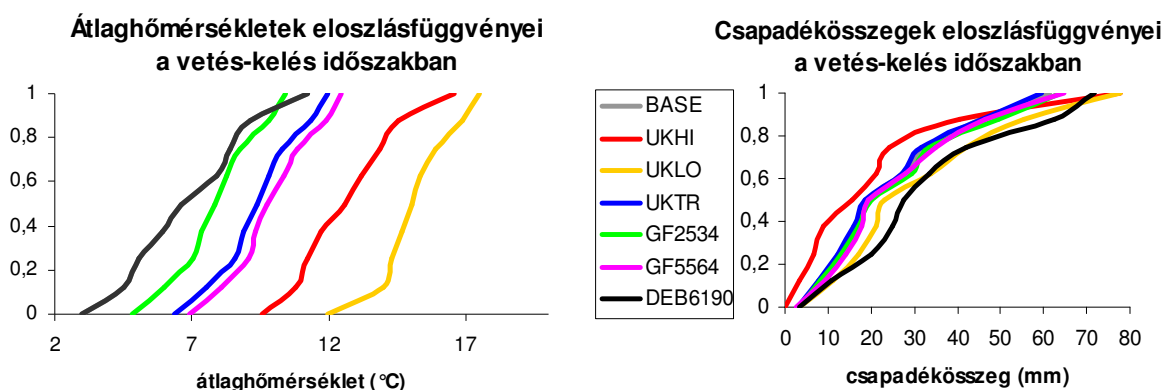
#### 4.2. Az őszi búza klimatikus igényeinek vizsgálata

A búza hőigénye a tenyészidő folyamán változik, a továbbiakban – végigkövetve a növény növekedését – a fejlődési szakaszokra is vizsgáljuk a meteorológiai paraméterekre vonatkozó feltételeket és azok teljesülését.

#### 4.2.1. A vetés-keles idoszak

Irodalmi forrasokbol merítve, az eddigi tapasztalatok alapján a vetés-keles idoszakban (október végétől november közepéig) a búza hozzátvetőlegesen 10-45 mm csapadékhoz jutott és 9-12,5 °C mellett fejlődött kedvezően.

A vetés-keles idoszakban a vizsgált jövőbeni idoszakasz előrejelzett napi átlaghőmérsékleteinek növekedése a historikus adatokéhoz képest nagyon jelentős, az 1961-90-es idoszak napi átlaghőmérséklet adatai gyakran alatta maradnak a kedvező értékeknek. A jövőben a követelmény teljesülése várható, sőt az egyensúlyi szenáriók esetében azt meg is haladja (19. ábra). A víz- és tápanyagigény teljesülni látszik, bár kis mértékű csapadékcsökkenéssel számolnunk kell ebben a fejlődési szakaszban. A bizonytalanság azonban a nagy szórások miatt igen jelentős. Az erre vonatkozó szórás és variációs koefficiens (CV) értékeket a 5. táblázatban tüntetjük fel.



19. ábra: Napi átlaghőmérsékletek és csapadékösszegek eloszlásfüggvényei Debrecenben a vetés-keles idoszakban, historikus (1961-90) és szenáriókkal előrejelzett adatok alapján

5. táblázat: Historikus (1961-90) és szenáriók által előrejelzett átlagos csapadékösszegek alakulása a vetés-keles idoszakban Debrecenre (mm), okt.20-nov.5.

vetés-keles fenofázis	DEB6190		BASE	UKHI	UKLO	UKTR	GF2534	GF5564
(okt.20-nov.5.):	20,17	szórás	16,44	20,05	21,23	15,71	16,82	17,78
<b>10-45 mm</b>	<b>31,32</b>	<b>átlag</b>	<b>23,65</b>	<b>19,68</b>	<b>30,14</b>	<b>22,7</b>	<b>24,3</b>	<b>25,12</b>
szükséglet	0,65	CV	0,69	1,02	0,7	0,69	0,69	0,71

Optimális körülmények között a vetéstől a kelésig 12-15 nap telik el, de szélsőséges viszonyok között tovább is eltarthat, esetleg rövidülhet. Ha a napi átlaghőmérséklet ebben az időszakban nem éri el a 7 °C-ot, akkor ennek a fejlődési szakasznak a hossza a 20 napot is meghaladja (6. táblázat), ha pedig 14 °C körül alakul, akkor akár 7 napra is rövidülhet (7. táblázat). A KKKT (Szenteleki, 2007) program segítségével megszámláltuk, hogy a különböző klímaváltozási scenáriókban hányszor fordul elő a vizsgált 15 nap alatt a két szélsőérték, és összehasonlítottuk a kapott napok számát, átlagát és a legnagyobb értékeket a klímaváltozási scenáriókra és a historikus adatokra. A scenáriók adatainál sokkal kevesebbszer fordulnak elő túl alacsony és sokkal többször a 14 °C-os és azt meghaladó értékek.

6. táblázat: A 7 °C és azt el nem érő napi átlaghőmérsékletek előfordulási gyakoriságai a historikus és a klímaváltozási scenáriók által előrejelzett adatokra Debrecenben, okt.20-nov.5.

	31 évből hány évben	napok száma		
		összesen	átlag	egy éven belüli max.
BASE	28	117	1.29	11
UKHI	8	26	0.84	5
UKLO	0	0	0	0
UKTR	17	46	1.48	9
GF2534	23	61	1.97	9
GF5564	15	42	1.35	8

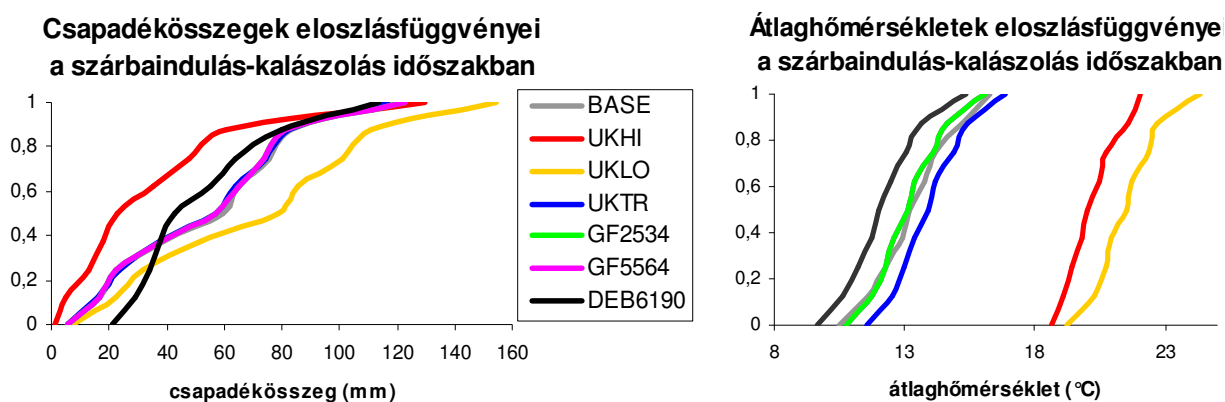
7. táblázat: A 14 °C és azt meghaladó napi átlaghőmérsékletek előfordulási gyakoriságai a historikus és a klímaváltozási scenáriók által előrejelzett adatokra Debrecenben, okt.20-nov.5.

	31 évből hány évben	napok száma		
		összesen	átlag	egy éven belüli max.
BASE	11	23	0.74	4
UKHI	31	256	8.26	15
UKLO	31	344	11.1	16
UKTR	23	72	2.32	8
GF2534	22	57	1.83	8
GF5564	30	141	4.55	10

#### 4.2.2. A szárbaindulás-kalászolás időszak

Ebben az időszakban irodalmi adatok alapján a napi átlaghőmérséklet általában 13-17 °C, a búza számára optimális hőmérséklet 20-25 °C és a 35 °C feletti hőmérsékletek már kedvezőtlenek. A klímaszenáriók előrejelzése szerint a vizsgált időszakban a napi átlaghőmérséklet az őszi búza szempontjából várhatóan kedvezően alakul a referencia-időszakhoz képest. A két egyensúlyi szenárió (UKHI, UKLO) az optimális napi átlaghőmérsékletet jósolja a szárbaindulás-kalászolás időszakban Debrecenben, a többi az eddigihez hasonlót, de valamivel kedvezőbbet, a kedvezőtlen meleg pedig egy esetben sem valószínűsíthető (20. ábra).

Ez az időszak kiszámíthatatlansága miatt kritikus lehet az őszi búzára nézve a jövőben, mert a csapadékmennyiségek értékei nagy ingadozást mutatnak. A szárbainduló búza azért is igényel zavartalan víz- és tápanyagellátást, mert e fázis végén termeli a legtöbb szárazanyagot (az összes szárazanyagnak közel felét). A kedvezőtlen vízellátás - abban az esetben, ha ősszel és télen kevés csapadék hullott, a tavasz száraz és meleg - zavarja a növény fejlődését. Kísérletek szerint, ha e fejlődési szakaszában a növényt jelentős csapadékhiány éri, a hozam a felére csökken. A vegetatív szervek kisebbek lesznek, csökken az asszimilációs tevékenység is, ami a kalászkák virágszerveinek fejletlenségét vonja maga után. Tehát ebben az időszakban a csapadékot minden szempontból egyenletesen igényelné a növény, aminek teljesülése sajnos a múltbeli megfigyelések vége felé sem teljesült és a jövőben – a klímaszenáriók előrejelzése szerint – is megkérdőjelezhető (8. táblázat).



20. ábra: Csapadékösszegek és a napi átlaghőmérséklet eloszlásfüggvényei a szárbaindulás-kalászolás időszakban, debreceni historikus (1961-90) és szenáriókkal előrejelzett adatok alapján

8. táblázat: *Historikus (1961-90) és scenáriók által előrejelzett átlagos csapadékösszegek alakulása a szárbaindulás-kalászolás időszakban Debrecenre (mm), ápr.10-máj.10.*

<b>szárbaindulás- kalászolás</b>	DEB6190		BASE	UKHI	UKLO	UKTR	GF2534	GF5564
ápr.10-máj.10.	20,17	szórás	31.67	31.01	2.12	31.19	30.99	38
<b>70-80mm</b>	<b>31,32</b>	<b>átlag</b>	<b>51.71</b>	<b>32.56</b>	<b>68.65</b>	<b>50.65</b>	<b>50.32</b>	<b>57.77</b>
csap.szükséglet	0,65	CV	0.61	0.95	0.61	0.62	0.62	0.66

A 20. ábrán az értékek nagy változékonysága miatt a csapadék-adatokhoz tartozó eloszlásfüggvények elég laposak. A klímaszenáriók előrejelzése nagyon hasonló, a BASE, az UKTR, GF2534, és GF5564 értékeihez tartozó eloszlásfüggvények szinte azonosan egyenlők.

A csapadékösszegek nagyfokú oszcillációja miatt felmerült a mozgóátlagos simításokkal történő vizsgálat is. Ez azonban nem tehető meg az adatok speciális szerkezete miatt. Az évek ugyanis, nem tekinthetők egymást követőnek a klímaváltozási scenáriók adatainál.

A szárbaindulás-kalászolás időszak hossza általában 20-49 nap között változik, de amennyiben az időszak napi átlaghőmérséklete 14 °C alatt van, ez a fejlődési szakasz 40 napnál is hosszabb lehet. A 20 °C -nál magasabb napi átlaghőmérsékletek mellett pedig akár 20 napnál is rövidebb lehet. A fázishossz a hőmérsékletre érzékeny, a küszöbértékekre táblázatot készítettünk (9. és 10. táblázat). A klímaszenáriók nagyon különböző előrejelzést adnak ezekre a küszöbértékekre.

9. táblázat: *A 14 °C és azt el nem érő napi átlaghőmérsékletek előfordulási gyakoriságai a historikus és a klímaváltozási scenáriók által előrejelzett adatokra Debrecenben, ápr.10-máj.10.*

	31 évből hány évben	napok száma		
		összesen	átlag	egy éven belüli max.
BASE	31	684	23.08	28
UKHI	2	3	0.1	2
UKLO	9	12	0.39	4
UKTR	31	599	19.32	25
GF2534	31	634	23.38	28
GF5564	31	463	14.94	23



10. táblázat: A 20°C és azt meghaladó napi átlaghőmérsékletek előfordulási gyakoriságai a historikus és a klímaváltozási scenáriók által előrejelzett adatokra Debrecenben, ápr.10-máj.10.

	31 évből hány évben	napok száma		
		összesen	átlag	egy éven belüli max.
BASE	17	55	1.77	8
UKHI	31	711	22.94	30
UKLO	31	918	28.1	31
UKTR	23	90	2.9	10
GF2534	21	375	12.1	28
GF5564	29	151	4.87	14

#### 4.2.3. A kalászás-viaszérés időszak

E fejlődési szakaszon belül egy másik, aránylag rövid ideig tartó kritikus időszak a kalászás és virágzás időszaka. A virágzás a kalászás után 5-6 nappal kezdődik és 2-4 napig tart. Ilyenkor kedvezőtlen a csapadékos időjárás, mert sok pollen megsemmisülhet. A virágzás optimális hőmérséklete 20-25 °C. Vizsgáltuk, hogy mennyire felelt meg ennek a múlt időjárása, valamint azt, hogy mi várható a jövőben (11. táblázat).

11. táblázat: A virágzás optimális napi átlaghőmérsékletének előfordulási gyakoriságai a historikus és a klímaváltozási scenáriók által előrejelzett adatokra Debrecenben, jún.1-11.

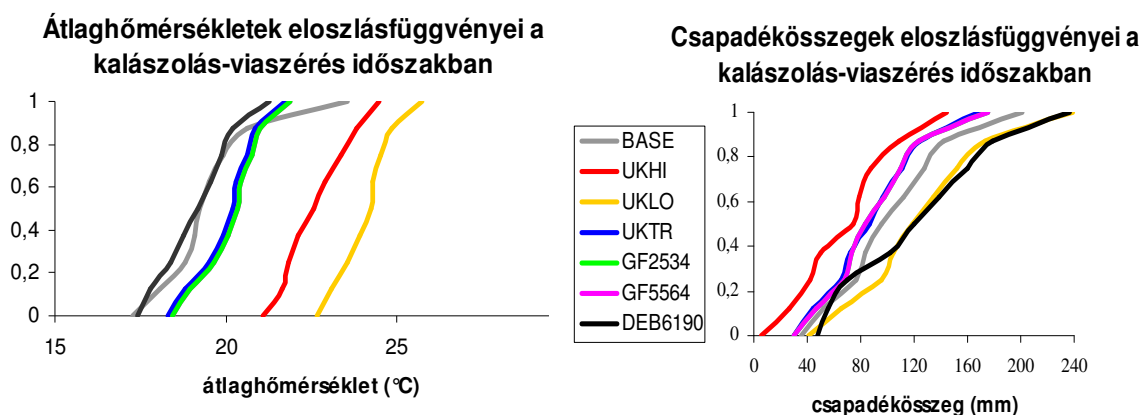
	31 évből hány évben	napok száma		
		összesen	átlag	egy éven belüli max.
BASE	11	37	1.19	10
UKHI	31	203	6.55	11
UKLO	31	219	7.06	11
UKTR	26	106	3.42	11
GF2534	26	105	3.39	11
GF5564	30	141	4.55	10

A referenciaidőszakot képviselő BASE scenárió megfigyelései alapján mondhatjuk, hogy ebben az időszakban teljesülnek a feltételek, az előrejelzések pedig még kedvezőbb körülményeket mutatnak a klímascenáriók mindegyikének esetében. Az eredmények alapján mondhatjuk, hogy ez az időszak kedvezően alakulhat a különböző változásokat feltételező scenáriók teljesülése esetén, kisebb-nagyobb mértékben, mindegyik scenárió esetében.

Az előrejelzések alapján sajnos azt mondhatjuk, hogy a júniusi napi átlaghőmérséklet további növekedést mutat minden klímascenárió alapján (5. ábra), viszont a szélsőségesen meleg, 30 °C feletti napi átlaghőmérséklet egyetlen vizsgált időjárási adatsor esetében sem volt tapasztalható. Virágzaskor a 10 °C alatti hőmérséklet is szélsőségesen rossz lehet, de a BASE scenárió egyetlen esetétől eltekintve az adatsorok egyikében sem találkozunk ilyen alacsony átlaghőmérséklettel a virágzás időszakában.

A kalászolás-viaszérés fejlődési szakaszban különösen káros az érés elején hirtelen beköszöntő nyári hőség, mert kényszerérést okozhat, aminek hatására lényegesen csökkenhet az ezerszemtömeg, romolhat a minőség. A teljes érés előtt beköszöntő nagy meleg és szárazság szemszorulást eredményezhet. Ebben az időszakban az 1961-90-es megfigyelések szerint és az irodalmi adatok alapján a búza 18-20,5 °C mellett fejlődik megfelelően.

Ellenőriztük, hogy teljesül-e ez a feltétel a jövőben is (21. ábra). A klímascenáriók magasabb napi átlaghőmérsékleteket prognosztizálnak, ami különösen csapadékhiánnyal, azaz szárazsággal párosulva nagyon kedvezőtlen lehet a növényre.



21. ábra: Napi átlaghőmérséklet és csapadékösszegek eloszlásfüggvényei a kalászolás-viaszérés időszakban, debreceni historikus (1961-90) és scenáriókkal előrejelzett adatok alapján

Azonban az érés és betakarítás idején károsan hat a hozamra a sok csapadék is. Elemezve a júliusi csapadékösszegeket azt tapasztaljuk, hogy az előrejelzett értékek az

UKHI-t kivéve minden klímaszenárió becslése szerint magasabbak, mint a historikus értékek (12. táblázat).

12. táblázat: *Historikus (1961-90) és szenáriók által előrejelzett júliusi átlagos csapadékösszegek alakulása Debrecenre (mm)*

DEB6190		BASE	UKHI	UKLO	UKTR	GF2534	GF5564
65,7	<b>átlag</b>	87.45	56.90	100.05	74.28	74.77	109.10
37,15	<b>szórás</b>	39.26	31.14	42.24	33.83	32.30	52.04
0,57	<b>CV</b>	0.45	0.55	0.42	0.46	0.43	0.48

Itt kell megemlítenünk, hogy a jellemzően csapadékhiányos július átlagos csapadékösszege ebben az időszakban magas, mert néhány évben a 100 mm-t is meghaladta. Ezért vizsgáljuk a szórás, illetve a változékonyság mértékét is, melyek elég nagyok. Ez alapján is elmondható, hogy az átlagértékek alapján csak óvatosan lehet következtetéseket levonni. A károk csökkentésének érdekében a betakarítás időpontjának megválasztásához a hozam és a körülmények fokozott megfigyelése, valamint optimalizálás válhat szükségessé. A termés minősége, a búza nedvességtartalma is nagymértékben függhet a jó időpont megválasztásától.

Vizsgáljuk meg a csapadék-igény teljesülését is az egész kalászolás-viaszérés időszakra nézve. Az őszi búza esetében ezt az értéket a tapasztalat szerint 75-160 mm-re becsülhetjük. Az előrejelzések kisebb, de még megfelelő mennyiségeket jeleznek (21. ábra, 13. táblázat).

13. táblázat: *Historikus (1961-90) és szenáriók által előrejelzett átlagos csapadékösszegek alakulása Debrecenre (mm) a kalászolás-viaszérés fejlődési szakaszra, az év 147-197. napján*

<b>kalászolás- viaszérés</b>	DEB6190		BASE	UKHI	UKLO	UKTR	GF2534	GF5564
(máj.27-júl.17.)	55,22	Szórás	42.46	36.87	49.25	36.65	36.32	50.66
<b>75-160 mm</b>	<b>119,76</b>	<b>Átlag</b>	<b>98.58</b>	<b>65.43</b>	<b>120.2</b>	<b>85.64</b>	<b>86.14</b>	<b>118.86</b>
csap.szükséglet	0,46	CV	0.43	0.56	0.41	0.43	0.42	0.43

A kalászos-viaszérés fejlődési szakasz (május vége, június eleje és július közepe között) időtartama általában 40-45 nap között változik, de 16 °C körüli napi átlaghőmérsékletek esetén 45 napnál hosszabb is lehet, 20 °C felett pedig 40 napnál rövidebb. A szélsőséges értékek előfordulási gyakoriságait is táblázatba foglaltuk (14. és 15. táblázat). A szélsőséges hőmérsékletek előrejelzett gyakoriságai a változások következtében várhatóan kisebb értékeket mutatnak, tehát a klímaváltozás kedvező körülményeket hozhat az őszi búzának e fejlődési szakaszában. Azonban az átlaghoz képest nagy kiugró maximumokat látunk mindenütt, ami óvatosságra int.

*14. táblázat: A 16°C és azt el nem érő napi átlaghőmérsékletek előfordulási gyakoriságai a historikus és a klímaváltozási scenáriók által előrejelzett adatokra Debrecenben, máj.27-júl.17.*

	31 évből hány évben	napok száma		
		összesen	átlag	egy éven belüli max.
BASE	31	234	7.55	20
UKHI	10	12	0.39	3
UKLO	5	8	0.26	3
UKTR	27	115	3.71	15
GF2534	26	115	3.718	15
GF5564	23	66	2.13	10

*15. táblázat: A 20°C és azt meghaladó napi átlaghőmérsékletek előfordulási gyakoriságai a historikus és a klímaváltozási scenáriók által előrejelzett adatokra Debrecenben, máj.27-júl.17.*

	31 évből hány évben	napok száma		
		összesen	átlag	egy éven belüli max.
BASE	31	55	1.77	8
UKHI	31	711	22.94	41
UKLO	31	1181	38.1	51
UKTR	31	90	2.9	10
GF2534	31	375	12.1	31
GF5564	31	151	4.87	14

#### 4.2.4. A csapadék nagyfokú változékonysága

A búza fejlődése során végig fontos szerepet játszik a csapadék. Az adatok alapján a csapadék változékonysága jelentősnek látszik. A nemzetközi szakirodalom 27 hőmérséklettel és csapadékkal megfogalmazott indexet definiált a változások jellemzésére (Climate Change Indices, 2007), melyek között szerepelnek az *R95 és R99 klimatikus indexek* is (ld 3.3.3. alfejezet). Ezen csapadékindexek alakulását vizsgáljuk a továbbiakban minden klímaszcenárió esetén.

A jelzett indexnek normál esetben az 5% (1%) körül kellene ingadoznia. A megjelenő anomáliák a csapadékeloszlás egyenetlenségeire hívják fel a figyelmet. A 16-19. táblázatban láthatók a munkánk során alkalmazott klímaszcenáriók 31 éve alapján kiszámított átlagos R95 (R99) értékek, a csapadékmennyiséget és a napok száma, mely utóbbinak normál esetben 5% (1%) körül kellene ingadoznia.

16. táblázat: Az R95 klimatikus index értékekre vonatkozó napok száma és jellemzői

<b>R95</b>	<b>átlag</b>	szórás	<b>CV</b>	<b>ferdeség</b>
BASE	<b>5,00</b>	2,37	0,47	0,68
UKHI	<b>5,06</b>	2,90	0,57	0,63
UKLO	<b>5,00</b>	2,03	0,41	0,46
UKTR	<b>4,97</b>	2,14	0,43	0,24
GF2534	<b>5,10</b>	2,17	0,42	0,58
GF5564	<b>4,94</b>	1,98	0,40	0,15

17. táblázat: Az R95 klimatikus index értékekre vonatkozó csapadékértékek és jellemzői (mm)

<b>R95</b>	<b>átlag</b>	szórás	<b>CV</b>	<b>ferdeség</b>
BASE	<b>118,71</b>	55,72	0,47	1,06
UKHI	<b>94,87</b>	58,24	0,61	1,33
UKLO	<b>143,32</b>	61,41	0,43	0,95
UKTR	<b>107,90</b>	47,69	0,44	0,94
GF2534	<b>111,52</b>	48,14	0,43	0,94
GF5564	<b>133,19</b>	61,81	0,46	0,92

18. táblázat: Az R99 klimatikus index értékekre vonatkozó napok száma és jellemzői

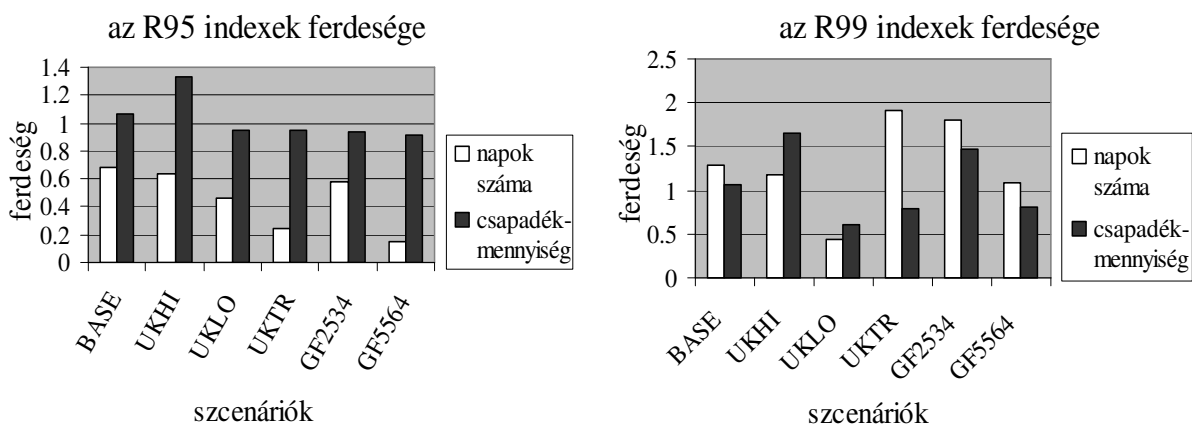
<b>R99</b>	<b>átlag</b>	szórás	<b>CV</b>	<b>ferdeség</b>
BASE	<b>0,97</b>	1,02	1,05	1,29
UKHI	<b>1,06</b>	1,41	1,33	1,17
UKLO	<b>0,94</b>	0,89	0,95	0,43
UKTR	<b>1,06</b>	1,34	1,26	1,92
GF2534	<b>0,94</b>	1,15	1,23	1,81
GF5564	<b>0,94</b>	0,96	1,03	1,09

19. táblázat: Az R99 klimatikus index értékekre vonatkozó csapadékértékek és jellemzői (mm)

<b>R99</b>	<b>átlag</b>	szórás	<b>CV</b>	<b>ferdeség</b>
BASE	<b>29,35</b>	28,64	0,98	1,07
UKHI	<b>25,90</b>	35,25	1,36	1,65
UKLO	<b>33,16</b>	32,25	0,97	0,61
UKTR	<b>26,35</b>	27,76	1,05	0,79
GF2534	<b>26,90</b>	30,51	1,13	1,48
GF5564	<b>36,26</b>	36,04	0,99	0,82

Az R95 értéke két scenárió esetén meghaladja az 5%-ot, a GF2534 esetében a legjelentősebben, kettőnél kisebb, a BASE-nél és az UKLO esetében éppen 5%. Az R99 három scenárió és a BASE esetén mutat csökkenést, kettőnél nem, egyiknél sem éppen 1%, mindenütt 0,6-es eltérés látható. Az R99 esetében rendkívül nagy szórást, így változékonyságot is (CV) tapasztalunk a csapadékértékeknél.

A nagy változékonyság miatt érdemes egy pillantást vetnünk a fenti indexek eloszlásának ferdeségére is. A ferdeség az eloszlás középpérték körüli aszimmetriájának mértékét jelzi, a kapott értékek pozitív irányba nyúló aszimmetrikus eloszlást jeleznek. Ez azt jelenti, hogy nagyobb valószínűséggel fordul elő nagy mennyiségű csapadék. A torzulás mértékét a 22. ábrán ábrázoltuk.



22. ábra: Az R95 és az R99 értékek, a hozzájuk tartozó napok számának és a hozzájuk tartozó csapadék mennyiségének ferdesége

#### 4.2.5. A búza minősége

A kalászkaszám kialakulásához (március második és április első felében) mérsékelt meleg időre van szükség, melynek optimális átlaghőmérséklete 15 °C. A 20. táblázat alapján vizsgáljuk, hogy mennyi a 14-16 °C napi átlaghőmérséklet előfordulási gyakorisága a különböző klímaváltozási scenáriók esetén, március közepétől április közepéig. A kapott értékek alapján mondhatjuk, hogy a klímaváltozás ebből a szempontból kedvezően hat a búzatermelésre, hiszen minden éghajlatváltozási scenárió több ilyen esetet jelez, mint a referencia időszakot jellemző BASE scenárió.

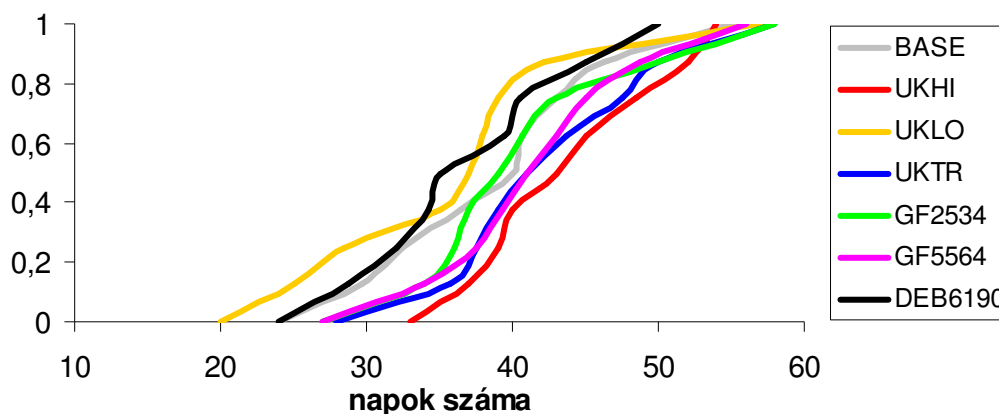
20. táblázat: A 14-16 °C napi átlaghőmérséklet előfordulási gyakorisága a historikus és a klímaváltozási scenáriók által előrejelzett adatokra Debrecenben, az év 75-105. napján

	31 évből hány évben	napok száma		
		összesen	átlag	egy éven belüli max.
BASE	18	40	1.29	5
UKHI	31	180	5.8	16
UKLO	30	153	4.94	11
UKTR	27	81	2.61	8
GF2534	19	48	1.55	6
GF5564	27	112	3.61	10

A vízben nem oldódó fehérje a sikér, melynek mennyisége és minősége határozza meg a búzafajták sütőipari minőségét. Kutatási eredmények bizonyítják, hogy a legjobb sütőipari minőségű búzát a legszárazabb évben takarították be, de azt is megmutatták, hogy a száraz érésbeli időjárás a sikérminőséget a csökkent enzimaktivitás miatt rontja. Ebből is látszik, hogy az éves csapadék mennyisége mellett az eloszlása milyen fontos.

Az enzimaktivitás optimális hőmérséklete az őszi búzánál 17-23 °C. Vizsgáltuk, hogy ez a kalászosok időszakon belül különböző klímaváltozási szcenáriókra, valamint a bázisidőszakokban hány napon teljesül (23. ábra, 21. táblázat).

**Eloszlásfüggvények a sikértartalom kialakulásához optimális hőmérséklet gyakoriságára**



23. ábra: A 17-23 °C napi átlaghőmérsékletű napok várható számának eloszlásfüggvényei, a historikus és a klímaváltozási szcenáriókkal előrejelzett adatok alapján Debrecenben, a kalászosok időszakában

21. táblázat: A 17-23°C napi átlaghőmérséklet átlagos előfordulási gyakorisága, szórása és variációs koefficiense (CV) a historikus és a klímaváltozási szcenáriók által előrejelzett adatokra Debrecenben, a kalászosok időszakában

	<b>DEB6190</b>	<b>BASE</b>	<b>UKHI</b>	<b>UKLO</b>	<b>UKTR</b>	<b>GF2534</b>	<b>GF5564</b>
<b>átlag</b>	<b>36</b>	<b>38,581</b>	<b>43</b>	<b>35</b>	<b>42,065</b>	<b>39,935</b>	<b>41,161</b>
szórás	6,799	7,758	6,092	8,568	7,099	7,229	6,827
<b>CV</b>	<b>0,187</b>	<b>0,201</b>	<b>0,140</b>	<b>0,244</b>	<b>0,169</b>	<b>0,181</b>	<b>0,166</b>

Az 23. ábrán látható, hogy az UKLO szcenárió kivételével mindegyik esetben nagyobb az enzimaktivitáshoz, illetve a jó minőséghez (sikértartalomhoz) optimális hőmérsékletű napok száma. Ebből a szempontból tehát a klímaváltozás kedvezően hathat a búzára. Ezt a 21. táblázat



adatai is alátámasztják. Az UKLO scenárió adatai mutatják a legnagyobb szórást, azaz változékonyságot erre a paraméterre.

Összességében elmondható, hogy a vizsgált indikátorok alapján a klímaváltozás hatására a búza minősége javulhat, ha a növény a fejlődése során az őt érzékenyen érintő extrém körülmények miatt nem sérül.

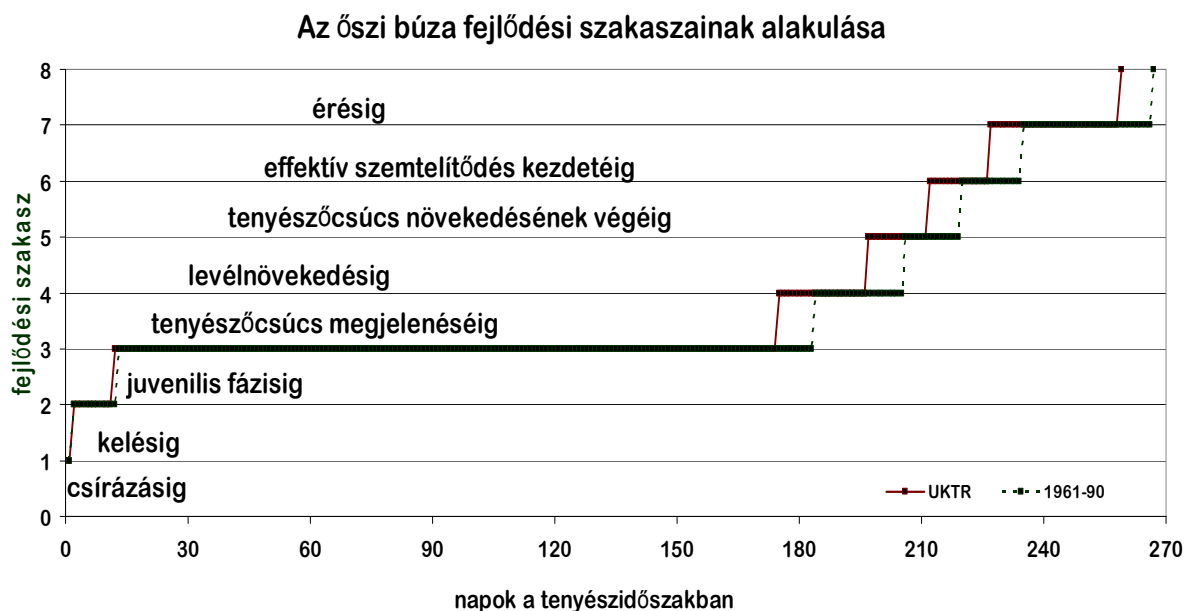
### **4.3. Modellezési esettanulmányok**

A fejezet elején elemeztük a terméskockázat időbeni változását, majd napi adatok alapján részletesen vizsgáltuk a növény klimatikus igényeinek teljesülését a különböző klímaváltozási scenáriók és a hozzá tartozó referencia időszak adatainak összehasonlításával. Ezzel párhuzamosan a növény fejlődési szakaszainak hosszára vonatkozó elemzést végeztük el, az ezekre hatással lévő extrém hőmérsékleti értékek bekövetkezésének gyakoriságait figyelembe véve. Kérdés, hogy az éghajlat változása, illetve változékonysága hat-e és ha igen, akkor hogyan a búzatermelésünkre. A kapott eredmények alapján indokoltnak tartottuk a megkezdett munka folytatását az őszi búza fejlődésének és terméshozamának vizsgálatára vonatkozóan. A jelenségek értelmezéséhez a közelmúltban történt változások megfigyelése mellett az alkalmazott éghajlatváltozási scenáriók adatait elfogadva elemezhetjük a növényi fejlődést. Ennek egyik lehetséges útja, ha annak megfelelő körülményeket teremtve kísérleteket végzünk, de manapság növénynövekedési modellek alkalmazásával szimulációs kísérletek végzésére is lehetőség nyílik.

#### **4.3.1. Az őszi búza fenofázisainak alakulására**

A globális klímaváltozásnak komoly következményei várhatók a mezőgazdaságban, a növénytermesztésre leginkább a hőmérséklet és a csapadékszint változás van kihatással. A következőkben a felmelegedés hatását vizsgáljuk az őszi búza fejlődési szakaszaira, azaz vizsgáljuk, hogy változatlan csapadék- és CO<sub>2</sub> viszonyok mellett különböző hőmérsékletváltozás hatására hogyan csökken a tenyészidő és a fejlődési szakaszok hossza.

Megállapíthatjuk, hogy a hőmérséklet emelkedés hatására az őszi búza fenológiai fázisai lerövidülnek, tehát a fázisok kezdeti időpontjai várhatóan előbbre tolódnak (24. ábra). A szimulációk alapján jelentős változást a tenyészidőszak első felében tapasztalunk, azaz az első néhány fázis lesz rövidebb az UKTR scenáriónál, ami a növény fejlődése során végig érezteti hatását.



24. ábra Az őszi búza fejlődésének nyomonkövetése a 4M modellel; a historikus (1961-90) és az UKTR klímaváltozási szcenárió adataival Debrecenre

22. táblázat A szimuláció eredménye a fenofázisok átlagos hosszára (nap), illetve átlagos kezdeti időpontjára, a historikus (1961-90) és az UKTR klímaváltozási szcenárió által előrejelzett adatokra Debrecenben

	1961-90	UKTR	1961-90	UKTR
fenofázis	hossz, átlag	hossz, átlag	kezdőnap, átlag	kezdőnap, átlag
1	1	1	1	1
2	16,79	14,07	2,00	2,00
3	160,36	156,67	21,20	16,07
4	24,57	22,53	178,73	172,73
5	13,29	13,53	203,20	195,27
6	14,21	14,33	216,53	208,80
7	32,21	32,13	230,73	223,13
össz./8	263,43	255,27	263,00	255,27

A 22. táblázatban összehasonlíthatjuk a fenofázisok átlagos hosszát, illetve kezdő napját a két meteorológiai adatsorra. A táblázat átlagos értékei nagyon kis szórással és variációs koefficienssel párosulnak, tehát a változékonyság mértéke, az eredmények bizonytalansága igen kicsinek mondható. Modellezéssel számszerűsíthetők azok a sejtések, melyek a növény klimatikus igényeinek elemzésekor körvonalazódtak.

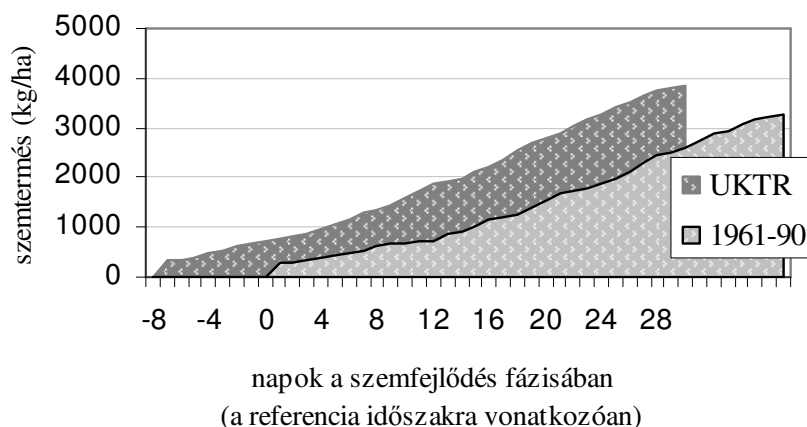
Az eredmények alapján elmondhatjuk, hogy a tényleges vegetációs időszak átlagosan nyolc nappal lesz rövidebb, és az aratás időpontja a jövőben várhatóan tízévente egy nappal hamarabb következik be, aminek tendenciáját már napjainkban is tapasztaljuk.

#### **4.3.2. Alkalmazkodási stratégia keresése, a vetésidő hatása a termés hozamra**

Az időjárás, mint minden növénynél, az őszi búzánál is döntően befolyásolja a hozamot. Hazánkban gyakori a hótakaró nélküli téli hideg, a száraz tavasz és a száraz nyár. A csapadék nem egyenletesen oszlik meg a tenyészidőszakban. Ennek ellenére Magyarországon az éghajlat a búza termesztésére mindenütt megfelelő, minek következtében alkalmas fajták és agrotechnika alkalmazásával viszonylag magas termésátlagok érhetőek el. Őszi búzára végzett esettanulmányunk során a klímaváltozási scenáriók alapján kimutattuk, hogy a hőmérséklet növekedése következtében a növény fenológiai fázisai várhatóan előbbre tolódnak, tehát az érés időpontja hamarabb várható. Ez azt jelenti, hogy a becslések szerint a megfigyelt időszakok összehasonlítása (1961-90 és 2031-40) és a felhasznált modell eredménye alapján átlagosan hét-nyolc nappal korábban aratható le a termés.

A klímascenáriók alapján elemezhető a klímaváltozás várható hatása a termés hozamra is. Modellezési eredményeinket a szemfejlődés alakulásával szemléltetjük a 25. ábrán az UKTR scenárió és a hozzá tartozó 1961-90-es referencia időszak szimulációs eredményeinek összehasonlításával. A modell alapján azt tapasztaljuk, hogy a klímaváltozás kedvezően hathat a szemtermésre, mivel a szemfejlődés és érés hamarabbi bekövetkezése mellett a termésmennyiség meredekebb növekedése rajzolódik ki.

### Az őszi búza szemfejlődésének alakulása



25. ábra: Az őszi búza szemfejlődésének alakulása, a historikus (1961-90) és az UKTR klímaváltozási scenárió által előrejelzett adatokra Debrecenben (kg/ha)

Megvizsgáltuk azt is, hogy a modell eredménye mennyire jól becsli a mért adatokat. Összevetjük a bázisidőszakra a Központi Statisztikai Hivatal (KSH) adatbázisából származó megyei átlagot és a modellezett értékeket. A 23. táblázat alapján elmondhatjuk, hogy a modell becslése valamivel alulbecsli a tapasztalt átlagot. A modell eredményei kisebb szórásúak. Az UKTR scenárióra kapott szimulációs eredmény alapján elmondható, hogy a szemtermésre kedvezően hathat az éghajlatváltozás, hiszen a modell a hozamra 18,35% növekedést becsült.

23. táblázat: Az őszi búza szemtermése; a KSH adatbázis Hajdú-Bihar megye mért adatai, valamint a modellezett értékek a historikus (1961-90) és az UKTR klímaváltozási scenárió által előrejelzett adatokra Debrecenben (kg/ha)

	szemtermés (kg/ha) KSH adatbázis			szemtermés (kg/ha) modellezett		
	átlag	szórás	CV	átlag	szórás	CV
<b>1961-90</b>	<b>3482</b>	1337,92	0,384	<b>3265,21</b>	510,62	0,156
<b>UKTR</b>	-	-	-	<b>3864,733</b>	825,712	0,214

Összevetve a bizonytalanságokat előrevetítő korábbi eredményeket fontosnak tartjuk a klímaváltozáshoz való alkalmazkodási stratégiák keresését a termésbiztonság, illetve a szemtermés javítására. A fejlődési szakaszok korábbra tolódása alapján kézenfekvő lehet

vizsgálni azt a kérdést, hogy vajon a vetési idő megváltoztatása a növény fejlődését és hozamát mennyire befolyásolja. A vetés az egyik legfontosabb agrotechnikai elem, amely a termés mennyiségét befolyásolja.

Vizsgáljuk először azt, hogy a vetési időpont megváltoztatása milyen hatással van az érés időpontjára. A szimulációs kísérletek helyszíne továbbra is Debrecen, a scenárió és fajta választása ugyanaz, mint a fenofázisok vizsgálatánál az előző alfejezetben. A futtatásokat az október 20-i alapbeállításra és azon kívül még négy vetési időpontra alkalmaztuk, mindig egy héttel előbbre hozva, illetve későbbre tolva a vetés napját. Eredményeink azt mutatják, hogy az érés időpontja hamarabb bekövetkezik (24. táblázat), a legjelentősebb eltolódás a két héttel korábbi vetésnél tapasztalható, ami a szemfejlődés hosszának rövidülésével is magyarázható (25. táblázat).

24. táblázat: Az érés becsült napja különböző vetési időpontok esetén, az UKTR klímaváltozási scenárió által előrejelzett adatokra Debrecenben (napsorszám a tenyészidőszakban)

	8. fenofázis (érés) kezdő napja				
vetési idő	2 héttel korábbi	1 héttel korábbi	október 20.	1 héttel későbbi	2 héttel későbbi
átlag	242,33	251,1	255,27	260,22	261,58
szórás	17,57	8,15	6,97	4,35	4,21
CV	0,073	0,033	0,028	0,017	0,016
különbség	13 nap	4 nap	-	5 nap	6 nap

25. táblázat: A szemfejlődés becsült hossza különböző vetési időpontok esetén, az UKTR klímaváltozási scenárió által előrejelzett adatokra Debrecenben (nap)

vetési idő	2 héttel korábbi	1 héttel korábbi	október 20.	1 héttel későbbi	2 héttel későbbi
szemfejlődés hossza	39	41	42	42	40

A szimulációs kísérlet során azt is tapasztaltuk, hogy a szemfejlődés hossza a különböző vetési időpontokra szignifikánsan eltér, a két héttel korábbi vetésnél a legrövidebb. Kérdés az,

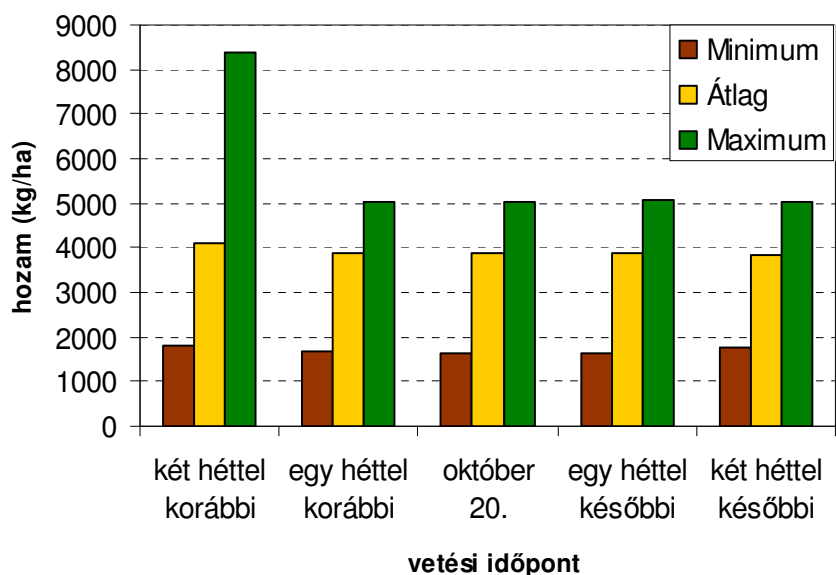
hogy a különböző vetési időpontok mennyire befolyásolhatják a növény szemtermésének mennyiségét, azaz hogy a vetés időpontjának előbbre vagy későbbre tolásával tompíthatjuk-e a klímaváltozás kedvezőtlen hatását, a szélsőséges éghajlati események befolyását.

26. táblázat: A szemtermés alakulása különböző vetési időpontok esetén, az UKTR klímaváltozási szcenárió által előrejelzett adatokra Debrecenben (kg/ha)

vetési idő	Szemtermés				
	2 héttel korábbi	1 héttel korábbi	október 20.	1 héttel későbbi	2 héttel későbbi
átlag	4086,9	3865,3	3864,7	3880,9	3844,9
szórás	1137,8	823,4	825,7	828,2	844,4
CV	0,278	0,213	0,214	0,213	0,22

Az őszi búza szemtermés (26. ábra) mennyiségére kapott értékek alapján elmondhatjuk, hogy a vizsgált vetési időpontok közül az október 20-ai alapbeállításhoz képest a két héttel korábbi kedvezőbb átlagot eredményez, de nagyobb ingadozással.

**Az őszi búza hozama különböző vetési időpontok esetén**



26. ábra Az őszi búza szemtermésének alakulás különböző vetési időpontok esetén, az UKTR klímaváltozási szcenárió által előrejelzett adatokra Debrecenben (kg/ha)

Mindent összevetve a 26. ábráról leolvasható, hogy az átlagos értékek valóban a két héttel korábbi vetésnél a legmagasabbak, ráadásul a vizsgált vetési időpontok közül ugyanezen vetési időpont esetén jelentkezik a legnagyobb maximális érték is a szemtermésre.

#### **4.4. Az új eredmények rövid áttekintése**

Munkánk során vizsgáltuk a már folyamatban lévő klímaváltozás hatását az őszi búza fejlődésére és hozamának alakulására vonatkozóan. Az esettanulmányokat Debrecenre leskálázott klímaváltozási scenáriók és bázisidőszakuk historikus adatainak összehasonlításával végeztük. Az alábbiakban röviden és tételesen összefoglaljuk az elért eredményeket:

- Négy megyének az 1951-2005 évekre vonatkozó, trendhatásoktól megtisztított őszi búza termésadatait felhasználva több hatásossági kritérium alapján megmutattuk, hogy a búza terméskockázata az elmúlt évtizedekben jelentősen növekedett.
- A vizsgált minőségi paraméterek alapján elmondhatjuk, hogy a klímaváltozás az őszi búzára kedvezően hat.
- Végigkövetve a növény fejlődési szakaszait megállapíthatjuk, hogy az őszi búza klimatikus igényei várhatóan a jövőben is teljesülnek, igaz a termésbiztonság ezzel együtt romlani fog.
- Modellezési esettanulmányunk alapján megállapítjuk, hogy a hőmérsékletnövekedés következtében a növény fenológiai fázisai várhatóan előbbre tolódnak, különösen a fejlődés korai szakaszában. Ennek következtében az érés időpontja átlagosan tízévente egy nappal korábban várható.
- A 4M növénynövekedési modellel becsült terméshozam a tényleges terméshozamot jól közelíti. A terméshozam jövőbeli alakulását vizsgálva arra következtetünk, hogy az alkalmazott scenárió esetében a hozam 18,35%-kal való növekedése várható a jövőben, de növekszik a hozamok szórása is.
- Alkalmazkodási stratégiát keresve szimulációs kísérlet alapján megállapítottuk, hogy a vetési idő előrehozása kínál lehetőséget a jövőben nagyobb termésmennyiségek elérésére, a két héttel korábbi vetés a terméshozam átlagosan 5,75%-os növekedését eredményezheti.

Mindent összevetve arra következtetünk, hogy a változások okozta bizonytalanság csökkentésének érdekében a modellezéssel jelentős lépések tehetők a cselekvési programok kidolgozásában a klímaváltozás okozta megváltozó körülmények kedvező hatásainak kihasználásának és a kedvezőtlen hatások tompításának érdekében.





## 5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Hosszú távú klíma előrejelzésekkel több nemzetközileg is elismert kutatóközpont is foglalkozik. Az ilyen előrejelzések historikus adatokra támaszkodva globális cirkulációs folyamatok leírásával, illetve az elkövetkező időszakot várhatóan jellemző gazdasági, társadalmi scenáriók modellezésével készülnek. A globális modellekből a klimatológusok regionális éghajlati scenáriókat készítenek. Ennek során térbeli és időbeli ún. „leskálázásokat” végeznek el, amelyek helyi hatásvizsgálatokkal egészülhetnek ki. A regionális klímamodellek iránt egyre jobban fokozódik az érdeklődés, hiszen a cselekvési programok, vagyis a válaszadás elemei, a megelőzés, az alkalmazkodás, a kárenyhítés, a helyreállítás elsősorban az adott régióra valószínűsíthető éghajlati változásokra építhető fel. Módszertani szempontból egy nagyon bonyolult rendszer vizsgálatáról van szó, amelynek pontos összefüggéseiről ma még csak feltételezések láttak napvilágot. A vizsgálatban meghatározó szerep jut azoknak a modelleknek, amelyek bizonyos feltételezések mellett leírják a jövőben várható lehetséges állapotokat, változásokat, és amelyek azután olyan konkrét területekre alkalmazhatók, mint például a mezőgazdaság érzékenysége, sérülékenysége és alkalmazkodó képessége. A hatékony termesztés szempontjából alapvető fontosságú megteremteni a biológiai, az ökológiai és agrotechnikai tényezők közötti összhangot. Ezekben az esetekben különböző lehetőségekkel próbálkoznak a kutatók:

- a környezet szimulálása, az ökológiai közösségekben lejátszódó folyamatok elemzése (kísérletek fitotronban, üvegházban, stb.);
- múltbeli analógiáik keresése, a jövőre becsült értékek és a historikus adatok alapján összehasonlító vizsgálatok végzése például a klimatikus igények teljesülésére;
- matematikai modellezés (szimuláció, kockázatelemzés stb.);
- szakértői értékelések, melyek mögött alapvetően statisztikai elemzések, tapasztalatok állnak.

Vizsgálataink a klímaváltozás hatását elemzik őszi búzára. Munkánk során a fent leírt lehetőségek közül az elsőt kivéve (amire nem volt lehetőségünk) minden megközelítést alkalmaztunk. Két intézet több klímaváltozási scenárióját és a hozzájuk tartozó referencia időszak (1960-90) historikus meteorológiai adatait használtuk fel.

Először az 1960-2005-ig tartó időszak termésadataiból indultunk ki és vizsgáltuk, hogy hogyan változott a terméskockázat. Egy új, sztochasztikus hatásossági módszerrel kimutattuk, hogy a kockázat növekedése a döntéshozó kockázatvállalásának mértékétől függetlenül

Magyarország mind a négy általunk vizsgált megyéjében az utóbbi két évtizedben jelentősen megnőtt. Ennek közvetlen és közvetett oka között jelentős szerepet játszhat a klíma változása, mivel az intenzív fajták klímaérzékenysége, így a terméshozamok ingadozása is nagyobb.

Mindez alátámasztja azt a nézetet, hogy az éghajlat „láthatóan” változik, aminek jeleivel szinte naponta találkozunk. Ma már elfogadhatatlan, hogy elutasítsuk a klímaváltozás tényét. Az éghajlatváltozást sokan azonosítják a globális felmelegedéssel, mert a scenáriók a hőmérséklet növekedését valószínűsítik. A becslött értékek átlagosan nem mutatnak nagy változást a közeljövőre (a század végére már igen), de eloszlásuk alakulása a mezőgazdaságban komoly következményekkel járhat. Az egyre gyakoribbá váló időjárási szélsőségek miatt pedig csak a bizonytalanságban lehetünk biztosak. Rengeteg kérdés vetődik fel a változás és annak hatásaival kapcsolatban, melyek megválaszolása részleteket összefogó multidiszciplináris nemzeti és nemzetközi munkát igényel, ami napjaink legnagyobb kihívása.

A természet naptára változik, ezzel együtt a növények fejlődési folyamata is. Egyre több tanulmány foglalkozik különböző ökoszisztémák növényeinek kapcsán a fejlődési szakaszok hosszának változásával, amely érzékeny és könnyen megfigyelhető indikátora a globális felmelegedésnek. A változó körülmények és hatásuk megértése összetett feladat. Egy ugyanolyan mértékű változásra másképp reagál a növény a különböző fejlődési szakaszokban. A hozamok változékonysága is jellemző lehet a csapadék kiszámíthatatlansága miatt, ami élelmezésbiztonsági kérdéseket is felvet. Ha azonban a hőmérsékletnövekedés hatására a növények fenofázisai lerövidülnek, akkor azzal együtt lerövidül az az időszak is, amikor a növénynek a vízigénye nagyobb. A növénytermesztésben világszerte az egyik legkorlátozóbb tényező a szárazság. Ha a jövőre valószínűsíthető csapadékmennyiségek átlagát tekintjük, akkor nem látunk szignifikáns különbséget az elmúlt időszakhoz képest, de tudomásul kell vennünk, hogy hosszabb-rövidebb ideig tartó szárazsággal, valamint ennek a hozamra gyakorolt negatív hatásával is számolni kell a jövőben. A szárazság minden fejlődési szakaszban mást jelent, mert a növény a különböző időszakokban máshogy érzékeny a vízhiányra. Magyarországon a késői vízhiány-stressz a leggyakoribb. Elemzéseink alapján elmondható, hogy a jelenség a jövőben „csak” intenzitásában változik, azaz nő a jelentősége. A szemtelítődéshez a növény a fotoszintézis hiányában a szárban lévő tartalékot használja fel. Láttunk példát 2000-ben Magyarországon arra is (Árendás et al., 2001), hogy a száraz őszi időszak után, csak késve, a csapadékos napok után csírázott ki a búza.

A terméshozam megnövekedett bizonytalanságának okait kutatva statisztikai elemzést végeztünk a növény klimatikus igényeinek teljesülésére. Megállapítottuk, hogy a csapadék évről évre egyre változókéonyabb eloszlást mutat. Novemberben várhatóan csökken a

csapadékmennyiség, s bár áprilisban nem változik jelentősen, májusban, illetve a szárbaindulás-kalászolás időszakában, mely folyamán a hidrikus faktorok hatnak leginkább, a csapadékellátottság kismértékű csökkenése mellett a rendkívül kiugró, gyakori kis és nagy extrémális értékek egyaránt gondot okozhatnak.

A hőmérséklet, mint a másik legfontosabb paraméter alakulását megvizsgálva elmondhatjuk, hogy kivétel nélkül minden fejlődési szakaszban minden klímaváltozási scenárió alapján növekedésre számíthatunk. Emellett az egyes szakaszokban a növény klimatikus igényeit tekintve azt tapasztaltuk, hogy az előrejelzett napi átlaghőmérsékletek az alsó küszöböt mindig elérik, miközben nagyon gyakran meghaladják a felső küszöböt. Ez alapján állíthatjuk, hogy a klímaváltozás hatására a növény fejlődése felgyorsul, a fenofázisok a jövőben nagy valószínűséggel hamarabb bekövetkeznek. Eredményünk összecseng több kutató megállapításával, mely szerint a vegetációs időszak hosszabbodása mellett a tenyészidőszak rövidülése valószínűsíthető, tehát a napjainkban évről évre egyre gyakrabban tapasztalt változás nem véletlen.

Az extrém magas hőmérséklet különösen káros a virágzást közvetlenül megelőző időszakban, mert a szemszám csökkenése komoly termés hozam-kieséshez vezethet. A klímaváltozási scenáriók alapján elmondhatjuk, hogy a virágzás feltételei a jövőben várhatóan kedvezően alakulnak. A legizgalmasabb kérdések még mindig a hozam mennyiségére vonatkoznak, azonban a válaszok továbbra is nagy bizonytalanságot hordoznak. A felmelegedés hatására a növények gyorsabban fejlődnek, így akár vízhiány mellett is nőhet a hozam, mert a megnövekedett széndioxid koncentráció miatt nagyobb mennyiségű széndioxid tud beépülni. Emellett a párolgás ütemének változása is ellensúlyozni tudja a szentelítődés szakaszának rövidülését és a potenciális evapotranspiráció negatív hatását. A tényezők együttes hatásának vizsgálata elengedhetetlen. Elképzelhető, hogy egyrészt a hőmérséklet növekedése miatt a növény fejlődése felgyorsul, aminek következtében a szentelítődés szakasza rövidülhet, ezáltal rövidebb ideig tart a szárazanyag felhalmozódás, tehát a termés hozam csökkenhet. Másrészt az is elképzelhető, hogy a megnövekedett széndioxid koncentráció miatt a növény széndioxid asszimilációja fokozódik, aminek következtében a potenciális termés hozam is növekedhet, ezáltal ellensúlyozva a rövidülő tenyészidő hatását. Ha ezen kívül még a hasznos víz mennyisége is korlátozott, akkor a potenciális evapotranspiráció növekedhet, a széndioxid hatására a vízfelhasználás javulhat így befolyásolva a termés hozamot is. Röviden elmondható, hogy sok a bizonytalanság és kis eltérések nagy változáshoz vezethetnek. Ilyen és hasonló számos kérdés vetődik fel a hatásvizsgálatok során. A virágzás korábbi bekövetkezését valószínűsíthetően a növekvő tavaszi minimumhőmérséklet okozza (Hu et al., 2005). A kora tavaszi meleg a virágzás

időpontjára néhány napos eltolódást jelenthet, de az is előfordulhat (Geleta et al., 2002), hogy nem tapasztalunk szignifikáns hatást, mivel a búza fejlődése lényegében a vernalizáció után kezdődik meg, amire nincs hatással a vetésidő.

Mit lehet tenni? A paraméterek hatását együttesen kell vizsgálni, a folyamatokat egészében célszerű elemezni. A becsült és a megfigyelt meteorológiai elemek statisztikai elemzése mellett más módszerek alkalmazása is szükségessé válik. A számítógépek elterjedésével erre kiválóan alkalmassá vált a modellezés, illetve a növénynövekedési modellek szimulációja. Segítségükkel virtuális kísérleteket végezhetünk a historikus és a modellezett meteorológiai adatokra, közben időt és költséget takaríthatunk meg. Némely valós kísérlet maga kivitelezhetetlen is lenne, ilyenek például a klímaváltozással kapcsolatos hatásvizsgálatok is. Tudományosan megalapozott becslési módszerek segítségével olyan kérdésekre kaphatunk választ, amelyeket egyébként csak drága, időigényes, esetleg kivitelezhetetlen kísérletek, illetve megfigyelések árán lenne lehetséges.

Nagyon fontos hangsúlyozni, hogy a klímaváltozás hatása pozitív és negatív egyaránt lehet, bár a közvélemény elsősorban csak a negatív hatásokról értesül. Pozitív hatásra láttunk példát a virágzás kedvező feltételei mellett a búza minőségének klimatikus igényeit vizsgálva. A hatás mértékét és minőségét az *érzékenység* és a *sérülékenység* szavakkal is jellemzik. Helyenként megjelenik a *rugalmasság* kifejezés is, amely a kedvezőtlen hatások természetes mérséklési, kivédési képessége a környezeti rendszerekben. Egy rendszer rugalmassági tulajdonságát kiegészítheti, illetve az érzékenységi és a sérülékenységi hatást befolyásolhatja az *adaptáció*, amely a növények alkalmazkodóképességén túl emberi beavatkozás függvénye is lehet. Az alkalmazkodási stratégiák kidolgozása az utóbbi néhány évben került a figyelem előterébe. Az elmúlt évtized szélsőséges időjárási eseményei felerősítették ennek szükségességét. A szimulációt legtöbbször terméshozam-becslő módszerként alkalmazzák, de többéves futtatások esetén a termés-előrejelzés mellett kockázatelemzésre is alkalmas lehet. A döntéstámogatás területén a felmerülő lehetőségek tesztelésére, illetve az időjárás hatásvizsgálatai során a becsült időjárási paraméterek többféle mintázatára alkalmazhatjuk. A fejlődési szakaszok hosszát befolyásoló küszöbértékek gyakoriságainak ismerete továbblépési lehetőséget nyújthat a kockázatelemzésben. Az előfordulási gyakoriságokat összegyűjtő táblázataink alapján súlyokat hozhatunk létre és ún. produkciós függvényt vezethetünk be a 3.3.1. alfejezetben alkalmazott egyenlő valószínűségek helyett, ezáltal megteremtve még pontosabb, növényre, illetve helyre specifikus terméskockázat-elemzés alapjait.

Bár a nemzetközi szakirodalomban számos növénynövekedési modell fellelhető, speciálisan búzára is, mivel ezek forráskódja többnyire nem elérhető, a felhasználó számára fekete dobozként működnek. Ha egyes modellekbe mégis „beleláthatunk”, akkor gyakran előfordul, hogy olyan input

adatokat igényelnek, amelyek nem állnak rendelkezésünkre, esetleg Magyarországon nem is jellemző az a paraméter. Számos esetben pedig a hozzáférhető növénynövekedési modellek a hazai körülményekhez nem vagy alig adaptálhatók. A Magyar Mezőgazdasági Modellezők Műhelye, nevének kezdőbetűiről elnevezve megalkotta és azóta is fejleszti a 4M modellt, mely felhasználóbarát felülettel rendelkezik. A magyarországi talajtani adatokat tartalmazza, a számos egyéb modul mellett pedig időjárás-generátora is van. A felhasználó a céljaitól és a rendelkezésére álló bemenő adatoktól függően választhat a folyamatokat leíró modulok közül. Az új modulok, illetve adatbázisok beépítésekor a fejlesztők törekedtek arra, hogy olyanok kerüljenek beépítésre, amelyeket magyar kutatók fejlesztettek, illetve készítettek, és amelyek tartalmazzák a légkör-talaj-növény rendszer speciálisan magyar jellemzőit. A 4M-Eco modell is egy beépített modul (Fodor, 2006), mely gazdasági szempontok és szakértői becslések alapján a gazdálkodókat segíti a tervezésben. A 4M-be becsülő eljárások is beépítésre kerültek, melyek segítségével egyes nehezen meghatározható bemenő adatok egyszerűbben kivitelezhető mérések eredményeinek felhasználásával megbecsülhetők, így a modell még szélesebb körben válik használhatóvá. Ez a modell az oktatási célokon túl számos kutatói igényt is ellát, illetve elláthat. Rengeteg gyakorlati kérdésre adhat választ, a klímaváltozáshoz való alkalmazkodásban problémamegoldásra és termésbecslésre is nagy segítségünkre lehet. Ezt a modellt a fejlesztője, Fodor Nándor számunkra is elérhetővé tette, sőt tapasztalataink és kéréseink alapján szívesen bővítette, javította. A folyamatos párbeszéd és tapasztalatcsere eredményeképpen a kukoricára vonatkozó korábbi rengeteg hatásvizsgálat mellett ma már egy új növényre, az őszi búzára is alkalmazni tudjuk. A továbbiakban az alkalmazások területét és az alkalmazók körét egyaránt bővíteni szándékozunk. Örömmel hallottuk, hogy más kutatók kérésére különböző széndioxid szintek beállítása is lehetővé válik a modellben, így klímaváltozási hatásvizsgálatokra még szélesebb körben alkalmazhatóvá válik. A modell könnyen kezelhető, adatigénye is a magyarországi viszonyokhoz adaptált, fejlesztése folyamatosan és rugalmasan (a felhasználók kéréseihez igazodva) történik, arra törekedve, hogy a gazdálkodó minden igényét is kielégítse.

Munkánk során a 4M modellt a növényi fejlődés klímaváltozás hatására történő változásainak nyomonkövetésére, valamint termésbecslésre használtuk. Megállapítottuk, hogy az éghajlatváltozásnak hozamot növelő hatása lehet, de nagyfokú bizonytalansággal a szélsőséges meteorológiai események miatt. Ugyanakkor az ARFC-Wheat modellel Harnos Noémi (2002) megmutatta, hogy a búza termésmennyisége a klímaváltozás hatására csökkenhet. Mindez rámutat arra, hogy további vizsgálatokra van szükség és a scenáriókkal, valamint a következtetésekkel

óvatosan kell bánni. A 4M modell széndioxid-szint beállítási lehetősége további szimulációs lehetőségeket kínál, reményt adva a terméshozamok várható növekedésének kimutatására.

Ezután a vetés időpontjának megváltoztatásával alkalmazkodási stratégiát kerestünk. Az alapbeállításhoz képest egy és két héttel korábbi és későbbi vetési időpontot állítottunk be és azt tapasztaltuk, hogy a két héttel korábbi vetés hat legjobban az érés időpontjának előbbre tolódására és az átlagos terméshozamra. A maximális termésátlag értékeket is ez a vetési időpont eredményezi. A futtatások során megfigyeltük a levélfelületi indexet is, mely a sugárzáselnyelés szempontjából kulcsfontosságú szerepet tölt be. Az öt vetési időpontra gyakorolt hatása között nem tapasztaltunk szignifikáns eltérést, de a vetés időpontja szerint a levélfelületi indexek csökkenő sorrendbe rendezhetők. Árendás et al. (2001) kísérletet végeztek különböző martonvásári őszi búza fajtákra, és összefüggést kerestek a vetésidő és hozam kapcsolatára. Az ő eredményeik szerint az extra késő vetés eredményezte a legkisebb hozamot, ami megfelel a mi tapasztalatainknak is. A terméshozamot a vetéssűrűség is befolyásolhatja.

A korai vetési időpontnak más előnye is van. Láng G. (1961, 1970) fontosnak tartja az őszi búza vetésének szempontjából hogy a növény még a tél beállta előtt meg tudjon erősödni. Az ősszel megerősödött búza tavasszal jobban fejlődik, és jobban hasznosítja a télen lehullott nedvességet. Láng Géza szerint az optimális vetésidő szeptember végétől október közepéig tart. Azt is hangsúlyozza, hogy a legjobb terméseredményt az optimális vetésidő betartásával lehet elérni. Mivel a növények fejlődésére, áttelelésére, a növény állománysűrűségének alakulására hatással van a vetés időpontja, ezért az optimális vetésidő megválasztása döntő jelentőségű lehet a megváltozó körülményekhez való alkalmazkodásban. Az agrotechnikai tényezők kölcsönhatásából következően Jolánkai et al. (1985) megállapították, hogy a nem optimális időpontban vetett búza fokozottabban ki van téve a kórtani veszélyeknek is. A korábbi vetésnek nem lebecsülendő előnye, hogy a szeptember végén, október elején uralkodó, rendszerint esőtlen időjárás kifogástalan munkakörülményt is lehetővé tesz a szántóföldön.

Visszaulva a természet naptárának megváltozására, érdekes lehet a vetés időpontját egy hőmérsékleti határérték eléréséhez igazítva beállítani, hogy a vernalizáció valóban a fejlődés kezdeti szakaszában történhessen. A fenológiai fázisok előbbre tolódására kapott szimulációs eredményeink alapján továbbá a klimatikus igények vizsgálata nem csak a historikus adatok alapján rögzített időszakokra végezhető el. Célszerű lehet a fejlődési szakaszok új időpontja alapján is elvégezni, ezáltal a bekövetkező hatások pontosabb körülírása is lehetővé válik. Ésszerű lehet a föld feletti szárazanyag tartalom mennyiségét, azaz a biomassa és szemtermés arányát is vizsgálni.

A modellezési eredmények alapján tehát mindenképpen ezerszemtömegben mérhetően magasabb meleg- és szárazságtűrőbb fajtákat kell bevezetni ahhoz, hogy a búzatermesztés kockázata ne növekedjen tovább. Kihívást jelent a nemesítők számára az optimális széndioxid felhasználásra képes fajták előállítás is.

Az itt leírt modellezési eredményekből levont következtetések bizonyos formában, a nemzetközi irodalomban is fellelhetőek, ezért a klímaváltozáshoz való felkészülésben érdemes azt is figyelembe venni, hogy Európa és a Föld más régióiban milyen adaptációs stratégiákat alkalmaznak. Horváth Levente földrajzi analógiák vizsgálatával kapott eredményeit figyelembe véve hasznosítani lehet a ránk váró klímával ma rendelkező régiók gazdálkodóinak tapasztalatait.

A legnagyobb variabilitást az agrotechnikai elemek között találjuk, ami egyúttal arra is felhívja a figyelmet, hogy a sokoldalú interaktív hatások miatt nagy szakértelemmel és odafigyeléssel szükséges az optimális egyensúlyt megteremteni. Abban az esetben, ha a talaj és az éghajlati adottságok, illetőleg a termesztéstechnológiai feltételek nem a lehető legjobbak, nem ajánlott a csúcsteljesítményre képes fajtákat választani. A fajták egyik jellegzetessége az alkalmazkodóképesség, amely lehetővé teszi, hogy a fajta akkor is jó teljesítményt nyújtson, ha minden igényét nem tudjuk maximálisan kielégíteni. A megfelelő alkalmazkodóképességű fajták termésbiztonsága is kedvezőbb, e fajták termesztésénél a termésingadozás kisebb mértékű. Ma az elsődleges feladat nem a hozam növelése, hanem a termésminőség, termésbiztonság javítása és a szélsőséges időjárási körülményeknek ellenálló fajták létrehozása. A termésbiztonságot megfelelő agrotechnikai beavatkozással is növelhetjük, erre végzett tartamkísérleteket trágyázás és vetésforgó alkalmazásával Berzsenyi Z., et al. (2000). A klímaváltozáshoz való alkalmazkodásban a különféle területen munkálkodó szakemberek fontos feladata az említetthez hasonló minél nagyobb számú kísérlet végzése, melyekkel megalapozható a szárazság- és melegtűrő fajták előállítása is. A vetési időpont alkalmas megváltoztatásával, víztakarékos agrotechnikával és optimális talajműveléssel nagyobb termés biztosítható, a termésbiztonságot növelhető, valamint vizsgálható a széndioxid minél jobb hasznosításának lehetősége is.

Magyarországon néhány száz szakértő foglalkozik az éghajlat alakulásával, változásával és változékonyságával, illetve annak kedvező vagy káros hatásaival és a szükséges válaszadás lehetőségeivel. A kutatói utánpótlás problémája azonban ma még nem megoldott. Szükséges lenne ezen változtatni. Ezt a célt szolgálhatja a 4M magyar nyelven (is) kommunikáló, felhasználóbarát szoftver, ha a komplex gondolkodás elősegítésére az oktatásba is bevonjuk, melyet napjainkban igen időszerűnek látunk. A BSc oktatással párhuzamosan a Budapesti Corvinus Egyetem, Matematika és Informatika Tanszék döntéstámogató- és szaktanácsadó rendszerek témájú



tárgyainak keretében nagy sikerrel bevezetésre került. A modell segítségével a növényi fejlődés folyamatai nagyon szemléletes módon bemutatásra kerülhetnek, a fejlődést befolyásoló paraméterek változásának a hatása könnyen és gyorsan bemutatható, az ismeretek megszerzése ezáltal maradandóvá válik. A mezőgazdasági termelésbe kikerülő fiatal szakemberek látóköre a modellezés adta lehetőségeket megismerve szélesedik, a döntéshozók új nemzedéke így nyitottabbá válhat az új lehetőségek, termesztési módszerek alkalmazására.

A hazai tudományos kutatás, a meteorológiai adatgyűjtés, az egyes ágazatok, köztük a mezőgazdaság tapasztalati adatai hatalmas szellemi tartalékot jelentenek, de sajnos kevés találkozási ponttal rendelkeznek. Összefogással, egymás munkájára építve és a feladatok közös megfogalmazásával és megvalósításával lehet kidolgozni és végrehajtani a jövőre vonatkozó intézkedési elképzeléseket, Eközben nem szabad megfeledkezni a kutatói utánpótlásról való gondoskodásról sem.

Eddig is születtek kárenyhítő intézkedések, de nagyobb méretű, megelőző jellegű akciókra is nagy szükség van. Erre nyújthat lehetőséget az MTA szervezésében 2009-ben induló Klímaváltozás és Biztonság Program, melynek előkészületei már ma is folynak, és amelynek keretein belül kívánjuk munkánkat folytatni. Ez a hároméves, országos jellegű, interdiszciplináris tudományos kutatási és innovációs program a Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia végrehajtásának elősegítésére és tudományos megalapozására szerveződik, együttműködve a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztériummal és más érintett tárcákkal, szakmai, valamint társadalmi szervezetekkel. Célja választ adni arra, hogy a klímaváltozás körülményei között hogyan teremthető meg hazánkban az emberek és más élőlények (növények, állatok), valamint a gazdaság védelme. A biztonság kockázata mérsékelhető megfelelő ismeretekkel, a bizonytalanság csökkentésével, és ezért olyan stratégiai jellegű, interdiszciplináris kutatások, újabb ismeretek szükségesek, amelyek az egész társadalom elbizonytalanodó jövőképét képesek javítani, biztonságérzetét erősíteni, tagjait pedig további aktív felkészülésre, cselekvésre ösztönözni.

## ÖSSZEFOGLALÁS

A globális klímaváltozásnak hazánkban is komoly következményei várhatók a mezőgazdaságban. A 21. század egyik legsürgetőbb feladata megérteni a változást és megtalálni az alkalmazkodási lehetőségeket. Munkánk során vizsgáltuk az elkezdődött folyamatok hatását az őszi búzára, és esettanulmányokat végeztünk.

Az elmúlt időszak termésadatai alapján egy új, általánosított sztochasztikus dominancia-módszert alkalmazva négy vizsgált megyében azt tapasztaltuk, hogy a változékonyság és ezzel együtt a kockázat növekedése a döntéshozó kockázatvállalási hajlandóságától függetlenül az utóbbi évtizedben jelentősen megnövekedett. Ezután - az okokat keresve - a növény klimatikus igényeit foglaltuk össze. A búza fejlődési szakaszainak megfelelően összehasonlítottuk néhány klímaváltozási scenárió (BASE, UKHI, UKLO, UKTR, GFDL2534, GFDL5564) és referencia időszakuk (1960-90) historikus meteorológiai adatait. A vizsgálat helyszíne Debrecen, hazánk egyik legjelentősebb mezőgazdasági központja volt. Megmutattuk, hogy a közeljövőben a hőmérsékleti értékek további növekedése valószínűsíthető a növény minden fejlődési szakaszában; a csapadékelátottság általában megfelelhet, bár rendkívül nagymértékű változékonyságával nagyon nagy bizonytalanságot hozhat magával. Célkitűzéseink között szerepelt a fejlődési szakaszok vizsgálata is, ezért egy speciális adatfeldolgozó szoftver, a Klíma KKT segítségével megmutattuk, hogy a fenofázisok hosszát meghatározó alsó hőmérsékleti határt mindig, a felsőt majdnem mindig meghaladja a scenáriók által előrejelzett napi átlaghőmérséklet értékek. A búza minőségét a klímaváltozás kedvezően befolyásolhatja.

A további vizsgálatokban szimulációs modellezést használtunk. A 4M, a CERES modellen alapuló és hazai viszonyokra fejlesztett modellrendszert alkalmazva kimutattuk, hogy a hőmérsékletnövekedés következtében a növény fenológiai fázisai várhatóan előbbre tolnak, az érés időpontja korábban várható, átlagosan tízévente egy nappal. Ezután arra kerestük a választ, hogy a vetés időpontjának megváltoztatásával tompíthatjuk-e a klímaváltozás kedvezőtlen hatását a hozamra vonatkozóan. Az október 20-i vetés mellett az egy és két héttel korábbi és későbbi időpontokra is futtattuk a modellt. Eredményeink azt mutatták, hogy a vetési időpontok eltolása a szemfejlődés hosszára és az érés időpontjára is hatással van. Az őszi búza szemtermés és biomassza mennyiségére kapott értékek alapján elmondhatjuk, hogy a két héttel korábbi vetés kedvezőbb átlagot eredményez, csökkentve a terméskockázatot.

A számítógépes növény-növekedési és produkciós szimulációs modellek jól használhatók a megváltozó körülmények lehetséges hatásainak feltérképezésére és az alkalmazkodási lehetőségek vizsgálatára. Ezáltal a klímaváltozáshoz való alkalmazkodásban, a felkészülésben a változások hasznosításában, sőt a károk enyhítésében is segítségünkre lehetnek.

## SUMMARY

It is evident that global warming is one of the most serious problems we face in the 21<sup>st</sup> century. Considering the possible changes we have to rise to the challenge in order to prepare for the future. We examined the effects of climate change on winter wheat, which is one of the most important plants in Hungary; we traced the possible changes of production risk, expected yield and phenology.

First, with a new stochastic dominance criterion, we have proved that the risk of winter wheat production in four Hungarian counties has increased independently to the risk aversion of the decision maker. In search of the reasons, we analyzed the temperature and precipitation needs of the plant in each phenological phase. We examined the frequencies of extreme temperature values during the growing season. Using the Klíma-KKT software we have showed that lower limits might be exceeded more rarely while upper limits more frequently due to climate change. For the comparison we used six of the most accepted climate scenarios (BASE, GFDL2535, GFDL5564, UKHI, UKLO, UKTR) and the historical meteorological data of their reference period 1960-1990. The location of our case studies was Debrecen, which is of big importance in Hungarian agricultural production. We have shown that increasing temperature is expected in every phase of the growing season; the scenarios predict very high variability of the amount and frequency of the precipitation. Our aim was to analyze the climate demands of the plant from both quantity and quality aspects, as well. We have shown that the quality of winter wheat might be better in the near future and that with appropriate adaptation strategy we can benefit from climate change.

Next we analysed how the yield and the length of the phenological phases of the plant are expected to change. Modelling is a useful tool for investigation of the future circumstances without having expensive and long experiments. The simulations were run by 4M model which is based on CERES model, adapted to Hungarian circumstances. It can be stated that, as a result of temperature increase, the starting points of the phenological phases are expected to shift to earlier dates, especially in the first period of growing. Harvesting is predicted to be a day per decade earlier in the future. We used the model for finding an adaptive strategy for increasing the yield with changing the sowing date. The simulations were run with the 20<sup>th</sup> of October and four other dates as sowing dates: one and two weeks earlier and one and two weeks later. For both biomass and grain mass quantity the simulation results are very promising in case of the two weeks earlier sowing date.

There is a wide scientific consensus that if these changes continue, significant damage to global ecosystems, food production and economies will ensue, so further interdisciplinary, collaborative research projects are very much needed all over the world. Our approach was intended to be a slice of a huge national project.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozom mindazoknak, akik a dolgozat elkészítését megelőző kutatómunkám során segítségemre voltak, akiktől szakmai segítséget kaptam, akik erkölcsileg támogattak.

Szeretném megköszönni témavezetőmnek, és tanszékünk vezetőjének, Dr. Harnos Zsolt akadémikus úrnak, hogy már a diplomám megszerzése előtt szárnyai alá vett, s azóta is figyelemmel kísérte és mindenben támogatta kutató- és oktatómunkámat, hogy türelmesen bízott bennem és hazai, valamint nemzetközi bemutatkozásom számos alkalommal lehetővé tette.

Köszönettel tartozom Varga-Haszonits Zoltánnak, hogy a rengeteg, témámhoz szorosan kapcsolódó irodalmat elérhetővé tette számomra, továbbá a személyes konzultációt és szakmai tanácsokat.

Köszönöm Fodor Nándornak a modellel kapcsolatos időt és energiát nem kímélő állandó útmutatást, tapasztalatcserét és fejlesztő munkát, valamint csapatának, köztük Máthéné Gáspár Gabriellának a fajtaparaméterek beállításában nyújtott segítségét, Békessy Jánosnak a technikai akadályok kiküszöbölését és nem utolsósorban Ferenczy Antal kollégámnak is, hogy a 4M alkalmazásában segítettek.

Köszönöm Berzsényi Zoltánnak szakmai támogatását, valamint Bencze Szilviának, Jolánkai Mártonnak, hogy a növénytermesztéssel kapcsolatos kérdéseimmel szintén megkereshettem őket; Tőkei Lászlónak, hogy megtanulhattam tőle az agrometeorológiai alapjait.

Köszönöm Tomcsányi Pali bácsinak a felejthetetlen órákat, melyeken a kutatómódszertan apró fortélyait elsajátíthattuk.

Köszönetem fejezem ki Huzsvai Lászlónak, hogy rendelkezésemre bocsátotta a napsütéses órák globálsugárzássá történő átszámításához írt programját, továbbá a növényi fejlődés modellezésével kapcsolatos ismeretek megszerzésében nyújtott segítségét.

Köszönettel tartozom a BCE, KETK Matematika és Informatika Tanszéken tevékenykedő kutatócsoport minden tagjának, hogy részletesen megbeszéltek velem munkám ezer apró lépését, ötleteket adtak, kritikával építettek és segítettek, Gaál Mártának a precizitását és hasznos megjegyzéseit, Szenteleki Károlynak, hogy a Klíma KKT program megírásakor kéréseinket figyelembe vette, így munkánkat segítette. Külön köszönöm szakmai konzulensemnek, Ladányi Mártának gondosságát, hogy személyes tapasztalatait megosztotta és kutatásom részleteit megbeszélte velem és ötletekkel segítette, továbbá a dolgozatot a rá jellemző alaposággal és igényességgel átolvasta, valamint Horváth Leventének azt, hogy a fokozatszerzési eljárás megindítása óta közösen és egymást biztatva haladhattunk a cél felé. Köszönettel tartozom a minden munkatársamnak, köztük Eröss Katalinnak, hogy odafigyeléssel segített és támogatott.

Köszönöm társszerzőimnek, akik kutatómunkám különböző szakaszaiban javaslataikkal és kritikai észrevételeikkel ötleteket adtak, meghallgattak, és hogy családi hangulatban dolgozhattunk együtt.

## IRODALOMJEGYZÉK:

- [1] Ahas, R., Jaagus, J., Aasa, A. (2000): The phenological calendar of Estonia and its correlation with mean air temperature, *Int J Biometeorol* 44:159–166.
- [2] Alexandrov, V., Eitzinger, J., Cajic, V., Oberforster, M. (2002): Potential impact of climate change on selected agricultural crops in north-eastern Austria. *Global Change Biology*. 8. 4. 372-389. p.
- [3] Alexandrov, V., Eitzinger, J., Oberforster, M. (2001): Adaptation of crop-weather models in Austria and Bulgaria, *Proceedings of the European Conference on Applied Meteorology (ECAM)*, Budapest, Hungary, 22. pp.
- [4] Alexandrov, Vesselin A. (1997): Vulnerability of Agronomic Systems in Bulgaria, *Climatic Change*, Vol. 36, No. 1-2, May - June, pp. 135-149.
- [5] Alexandrov, Vesselin. (1999): Vulnerability and adaptation of agronomic systems in Bulgaria, *Climate Research*, Vol. 12, No. 2-3, pp. 161-173.
- [6] Anderson, J. R. and Hardaker, J. B. (2003): Risk Aversion in Economic Decision Making: Pragmatic Guides for Consistent Choice by Natural Resource Managers. In: Wesseler, J., Weikard, H-p. and Weaver, R. (eds.) *Risk and Uncertainty in Environmental and Natural Resource Economics*,. Edward Elgar, Cheltenham, pp.171-188.
- [7] Anderson, J. R., Dillon, J. L. and Hardaker, J. B. (1977): *Agricultural Decision Analysis*. Iowa State University Press, Ames
- [8] Árendás T., Láng L., Bedő Z. (2001): Formaidőzítés - avagy a vetésidő hatása a martonvásári őszi búzák termésére., *Az MTA Mezőgazdasági Kutatóintézeteinek Közleményei Martonvásár*, 14 (2) : 14-15.
- [9] Barabás Z. (Szerk.) (1987): *A búzatermesztés kézikönyve*, Mezőgazdasági Kiadó, Budapest
- [10] Baráth Cs., Győrffy B., Harnos Zs. (1993): *Aszály 1983*, KÉE Matematika Tsz. Budapest
- [11] Barrow, E. M., Hulme, M. (1996): Constructions of scenarios of climate change and climatic variability: Development of climate change scenarios at a range of scales. In: Harrison, P. A., Butterfeild, R. E., Dowing, T. E. (szerk): *Climate change, Climatic Variability and Agriculture in Europa*, An Integrated Assessment Annual Report 1996, Oxford, Environmental Change Institut, University of Oxford, 13-18 p.
- [12] Barry, P. J. (1984): *Risk Management in Agriculture*, Iowa State University Press,

Ames

- [13] Bartholy J. (2004): [ww.origo.hu/mindentudasegyeteme/bartholy/20040913Bartholy1](http://ww.origo.hu/mindentudasegyeteme/bartholy/20040913Bartholy1)
- [14] Bartholy J. (2005): Globális éghajlatváltozás leskálázása a Kárpát-medence térségére, VII. Magyar Biometriai és Biomatematikai Konferencia, Budapest
- [15] Bartholy J., Pongrácz R., Szépszó G. (2008): A PRUDENCE projekt eredményei, A meteorológiai szélsőségek és várható alakulások a Kárpát-medencében, Az MTGA Elnökség Környezettudományi Bizottság, Éghajlatváltozási Albizottságának konferenciája, Budapest,
- [16] Bartholy, J., Pongrácz, R., Gelybó, Gy. (2007): Regional climate change expected in Hungary for 2071-2100, *Applied Ecology and Environmental Research* 5(1), pp 1-17.
- [17] Bencze Sz., Veisz O., Janda T., Bedő Z. (2000): Effects of elevated CO<sub>2</sub> level and N and P supplies on two winter wheat varieties in the early developmental stage, *Cereal Research Communication*, 28(1-2) pp. 123-130.
- [18] Berzsenyi Z., Gyórfy B., D.Q. Lap (2000): Effect of crop rotation and fertilisation on maize and wheat yields and yield stability in a long-term experiment, *European Journal of Agronomy* 13 (2-3) pp. 225-244.
- [19] Bessenyei Gy. (1778): *Magyarság, röpirat*, Bécs
- [20] Boksai D. (2006): Klímaváltozási szcenáriók értékelése a kukorica egyedfejlődésének szimulációs modellezése alapján, Budapesti Corvinus Egyetem, OTDK
- [21] Boksai D. (2007): A klímaváltozási hatása a kukorica fenológiai fázisaira, TDK Dolgozat, Budapesti Corvinus Egyetem, Matematika és Informatika Tanszék
- [22] Boksai, D., **Erdélyi, É.** (2007): The effects of climate change on the phenological phases of corn, Summer University on IT in Agriculture and rural Development, Debrecen, CD-ROM
- [23] Boksai, D., **Erdélyi, É.** (2007b): Importance and possibilities of maize production of Hungary in the future, ISIIR, Novi Sad In: *Environmental and social issues of the southeast panonian region: multidisciplinary approaches*, The Scientific World
- [24] Boksai, D., **Erdélyi, É.**(2007a): Analysing Climate Change Models for Corn Biomass with Respect to Biogas Production, EFITA Conference, Glasgow, CD-ROM
- [25] Chmielewski, F. M., Müller, A. and Bruns, E. (2004): Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961–2000, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 121, Issues 1-2, Pages 69-78.
- [26] Clement, R. T. (1996): *Making Hard Decisions: An Introduction to Decision Analysis*,

2nd edn. Duxbury Press, Belmont, California

- [27] Climate Change Indices (2007), Definitions of the 27 core indices, Available at: [http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/list\\_27\\_indices.html](http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/list_27_indices.html), last in 2007.
- [28] Cuculeanu, V., Adriana, M., and Simota, C. (1999): Climate change impact on agricultural crops and adaptation options in Romania, *Climate Research*, Vol. 12, No. 2-3, pp.153-160.
- [29] Cselótei L., Harnos Zs. (eds) (1994): Éghajlat, időjárás, aszály I., Az időjárás változékonysága és hidrológiai vonatkozásai, Budapest, AKAPRINT, 129 p.
- [30] Demidowicz, G., Deputat, T., Górski, T., Krasowicz, S. and J. Kus. (2000): Adaptation Scenarios of Agriculture in Poland to Future Climate Changes, *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 61, No. 1, pp. 133-144.
- [31] Dillon, J. L. (1971): An Expository Review of Bernoullian Decision Theory: Is Utility Futility?, *Review of Marketing and Agricultural Economics* 39, pp. 3-80.
- [32] Diós N., Ferenczy A., Hufnagel L., Szenteleki K.(2008): Klímaszenáriók összehasonlító értékelése kukorica ökoszisztéma szempontjából klimatikus profil-indikátorokkal, VIII. Magyar Biometriai és Biomatematikai Konferencia, Budapest
- [33] Drimba P., Nagy J. (2000): Kukoricahibridek termesztési arányának meghatározása a hozam kockázatának csökkentése érdekében, *Növénytermelés*, 49/1-2. pp. 89-94.
- [34] Drynan, R. G. (1986): A Note on Optimal Rules for Stochastic Efficiency Analysis. *Australian Journal of Agricultural Economics* 30, 53-62.
- [35] Dvorak, V., Hladny, J. and Kasperek, L. (1997): Climate Change Hydrology and Water Resources Impact and Adaptation for Selection River Basins in the Czech Republic, *Climatic Change*, Vol. 36, No. 1-2, May - June, pp. 93-106.
- [36] **Erdélyi É.** (2002): A növények által hasznosítható tápanyagmennyiség időbeli változásának modellezése, 6. Magyar Biometriai és Biomatematikai Konferencia, Budapest
- [37] **Erdélyi É.** (2003a): A víz- és tápanyagmozgás modellezése a talajban, „Lippay János – Ormos Imre – Vas Károly” Tudományos Ülésszak, Budapest, 34.o.
- [38] **Erdélyi É.** (2003b): Az agroökoszisztémák elemzésének új megközelítése, a gráfelmélet alkalmazása, „Lippay János – Ormos Imre – Vas Károly” Tudományos Ülésszak, Budapest, 32.o.
- [39] **Erdélyi É.** (2005): Kölcsönhatás-gráfok és kockázat a mezőgazdaságban, *VII. Magyar Biometriai és Biomatematikai Konferencia* 35-36. Budapest
- [40] **Erdélyi É.** (2007a): A klímaváltozás hatása az őszi búza fejlődési szakaszaira,

„Klima21” Füzetek 51. szám, pp. 57-71.

- [41] **Erdélyi É.** (2008): Az őszi búza érzékenysége a klímaváltozásra, VIII. Magyar Biometria és Biomatematika Konferencia, Budapest
- [42] **Erdélyi É., Ferenczy A.** (2008a): Modellezési esettanulmány az őszi búza termésmennyiségének várható alakulásáról különböző vetési időpontok esetén, VIII. Magyar Biometria és Biomatematika Konferencia, Budapest
- [43] **Erdélyi É., Ferenczy A., Boksai D.** (2008a): A klímaváltozás várható hatása a kukorica és a búza fenofázisainak alakulására „Klima21” Füzetek, 53. szám, pp. 115-130.
- [44] **Erdélyi É., Gaál M., Horváth L., Hufnagel L., Ladányi M., Révész A.**(2002): Szimuláció és monitoring az agrárökoszisztémák vizsgálatában I-IV., Agrárinformatikai Konferencia Debrecen, p. 296-343.
- [45] **Erdélyi, É.** (2003c): Graph theory applications in investigating the interaction-system of an agro-ecosystem, Erdei Ferenc II. Tudományos Konferencia, Kecskemét
- [46] **Erdélyi, É.** (2003d): Modeling the ionic nutrient content of soil, Erdei Ferenc II. Tudományos Konferencia, Kecskemét
- [47] **Erdélyi, É.** (2006a): Application of graph theory in investigating agroecosystems effected by extrem weather conditions, Applied Ecology and Environmental Research 4(2), p. 181-187.
- [48] **Erdélyi, É.** (2006b): Climate Change and Temperature Needs of Winter Wheat, Ecological problems of our days - from global to local scale, Keszthely, CD-ROM
- [49] **Erdélyi, É.** (2007b): Agriculture's role in climate protection: growing energy crops for renewable energy production, 11th International Eco-Conference, 7th Eco-Conference on Environmental protection of urban and suburban settlements, Novi Sad, Serbia, p. 263-269.
- [50] **Erdélyi, É.** (2007c): Crop Modelling in Climate Change Research, ADAM Workshop, Budapest
- [51] **Erdélyi, É.** (2007d): Uncertainty and risk in winter wheat production of Hungary, ISIIR 2007, Novi Sad, In: *Environmental and social issues of the southeast panonian region: multidisciplinary approaches*, The Scientific World
- [52] **Erdélyi, É. Szabó, Cs.** (2004): Primena teorije grafova kao mogućnost kontrolisanja agroekosistema (Applications of graph theory as a possibility of controlling agroecosystems) „III Međunarodna eko-konferencija – Zdrastveno bezbedna hrana”, Novi Sad, p. 431-434.
- [53] **Erdélyi, É., Boksai, D., Ferenczy, A.** (2008b): Assessment of climate change impacts



- on corn and wheat in Hungary, 12<sup>th</sup> International Eco-Conference, 5<sup>th</sup> Eco Conference on Safe Food, Novi Sad (Serbia), (in press)
- [54] **Erdélyi, É.**, Ferenczy, A., Boksai, D. (2007): Climate Change and Cereal Crops Growing in Hungary, EFITA Conference, Glasgow, CD-ROM
- [55] **Erdélyi, É.**, Horváth, L. (2006): Climate Change and Precipitation Needs of Winter Wheat, Summer University on Information Technology in Agriculture and Rural Development, Debrecen, p. 33-40.
- [56] **Erdélyi, É.**, Horváth, L., Boksai, D., Ferenczy, A. (2006): How climate change influences the field crop production II. – Yield variability of maize, ECO-Conference, Novi Sad, p. 7-12.
- [57] **Erdélyi, É.**, Hufnagel, L. (2003): A Graph Theory Analyses of an Agro-Ecosystem, 4<sup>th</sup> International Conference of PhD Students, Miskolc, p. 231-234.
- [58] **Erdélyi, É.**:(2003e): Nutrient-in-Soil Model as a Module of a Complex Agro-Ecosystem, 4<sup>th</sup> International Conference of PhD Students, Miskolc, p. 235-240.
- [59] Ferenczy, A., **Erdélyi, É.**, Boksai, D. (2008): A climate change case study for the prospective production of main crops in Hungary for different sowing dates, 50. Georgikon Napok, Keszthely (in press)
- [60] Fishburn, P. C. (1964): Decision and Value Theory. New York, Wiley
- [61] Fodor, N. (2006): 4M – Software for modelling and analysing Cropping Systems, Journal of Universal computer Science, 12 (9):1196-1207.
- [62] Fodor, N., Kovács, G. J. (2003): Sensitivity of 4M maize model to inaccuracy of weather and soil input data, Applied Ecology and Environmental Research, 1 (1-2) pp. 75-85.
- [63] Fodor, N., Kovács, G. J. (2005): Sensitivity of crop models to the inaccuracy of meteorological observations, Physics and Chemistry of the Earth. Special issue: *Agrometeorology*. Ed. Dunkel, Z. Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands. Vol 30/1-3 pp. 53-58.
- [64] Fodor, N., Máthéné-Gáspár, G., Pokovai, K., Kovács, G. J. (2002): 4M - software package for modelling cropping systems. European J. of Agr. Vol 18/3-4 pp. 389-393.
- [65] Fodor, N., Sulyok, D., Nagy, J. and Kovács, G. J. (2004): Economic modelling based on 4M, ESA, Kopenhága.
- [66] Fuhrer, J. (2003): Agroecosystem responses to combinations of elevated CO<sub>2</sub>, ozone,

- and global climate change. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 97. 1-3. 1-20. p.
- [67] Gaál, M., Horváth, L. (2006): Geographical analogies in climate change research, HAICTA, Greece
- [68] Geleta, B., Atak, M., Baenziger, P.S., Nelson, L.A., Baltenesperger, D.D., Eskridge, K.M., Shipman, M.J., Shelton, D.R. (2002): Seed-ing rate and genotype effect on agronomic performance and end-use quality of winter wheat. *Crop Sci.* 42, pp. 827–832.
- [69] GEO-FIFIKA füzetek (2008): Klímaváltozás – a „kő magnószalag, *Földtudományok a társadalomért*, foldev.hu/fuzet5.pdf, In: Niold, T. (Ed.) (2004): *Earth sciences for society*, Climate Change – the 'stone tape', Leiden
- [70] 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*, Vol. 55, No. 4, December, pp. 509-533.
- [71] Giorgi, F. and Mearns, L.O. (1991): Approaches to the simulation of regional climate change: a review. *Reviews og Geophysics*, 29, 191-216.
- [72] Gyárfás J. (1922): Magyar dry-farming. Sikeres gazdálkodás szárazságban, Pátria Irodalmi Vállalat és Nyomdai Rt., Budapest
- [73] Hansen, S., Jensen, H.E., Nielsen, N.E., Svedsen, H. (1990): DAISY- Soil Plant Atmosphere System Model, NPO-forskning fra Miljostyrelsen Nr. A10.
- [74] Hardaker, J. B., Huirne, R. B. M., Anderson, J. R., Lien, G. (2004a): Coping with Risk in Agriculture, CABI Publishing
- [75] Hardaker, J. B., Richardson J. W., Lien, G. and Schumann, K. D. (2004b): Stochastic Efficiency Analysis with Risk Aversion Bounds: a Simplified Approach, *Australian Journal of Agricultural Economics*
- [76] Harnos N. (2000): A klímaváltozás búzatermesztésre való várható hatásainak elemzése szimulációs modellel, *Növénytermelés*, 2000 (1-2) 41-55. p.
- [77] Harnos N. (2002): A klímaváltozás várható hatásai kalászos gabonafélék produkcióbiológiájára: kísérleti és modellezési megközelítés, Doktori értekezés, Szent István Egyetem, Gödöllő
- [78] Harnos N. (2003): A klímaváltozás hatásának szimulációs vizsgálata őszi búza produkciójára, "AGRO-21" Füzetek 31. szám, Budapest, 56-73.
- [79] Harnos Zs. (Szerk.) (1991): Az alkalmazkodó mezőgazdaság rendszere. (Módszertani kutatások) KÉE, Budapest.

- [80] Harnos, N., Bencze, Sz., Janda, T., Juhász, A., Veisz, O. (2002a): Interactions between elevated CO<sub>2</sub> and water stress in two winter wheat cultivars differing in drought resistance. *Cereal Research Communication*
- [81] Harnos, N., Kovács, G. J. (1999): Comparison of four winter wheat simulation models using long term regional yield data, In: Donatelli, M. et al. (eds): *Book of Proceedings: International Symposium, Modelling Cropping Systems*, Lleida, Catalonia, Spain, pp. 197-198.
- [82] Harnos, N., Tuba, Z., Szente, K. (2002b): Modelling net photosynthetic rate of winter wheat in elevated air CO<sub>2</sub> concentrations, *Photosynthetica*, 40 (2) pp. 293-300.
- [83] Harnos, Zs. (1995): Crop-specific climatic extremes for wheat and maize in Hungary, In *Climate Change and Agriculture in Europe*, Assessment of impacts and adaptation, Ed. Harrison, P. A., Butterfield, R. E. and Downing, T. E., University of Oxford
- [84] Harnos, Zs. (1996): Modelling crop response in Hungary. In: Harrison P. A., Butterfield R. E., Cowning T. E. (Eds): *Climate Change, Climatic Variability and Agriculture in Europe*, Annual Report, Environmental Change Unit, University of Oxford. pp. 179-189.
- [85] Harnos, Zs. Györffy, B. (1979): Estimation of crop yield potential as affected by agro-ecological conditions, VI. Conference on global Modelling of IIASA
- [86] Harnos, Zs., Bussay A., Harnos N., Ormai M., Szalay E. (1999): Modelling climate change impacts on wheat and potato in Hungary. In: Butterfield R. E., Lousdale K. G., Downing T. E. (Eds): *Climate Change, Climatic Variability and Agriculture in Europe*, An Integrated Assesment, Final report. pp. 249-260.
- [87] Harrison, P.A. (1995): Study aims and methods, In: Harrison, P.A., Butterfield, R. E. and Downing, T. A. (Eds.) *Climate Change, Climatic Variability and Agriculture in Europe: Assessment of Impacts and Adaptation*, Research Report No. 9, Environmental Change Unit, University of Oxford, UK, pp.1-12.
- [88] Harrison, P.A. , Butterfield, R.A., Downing, T.E. (2000): The CLIVARA projekt: Study aims and methods, In: Downing, T. E., Harrison, P. A., Butterfield, R. E. and Lonsdale, K. G. (Eds.): *Climate Change, Climatic Variability and Agriculture in Europe: An Integrated Assessment, Research Report No. 21*, Environmental Change Unit, University of Oxford, UK, pp.3-10.
- [89] Hoogenboom, G. (2000): Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its application. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103, 137-157.
- [90] Horváth L. (2007): Földrajzi analógia meghatározásának néhány módszere és

alkalmazási lehetősége KLIMA 21 Füzetek 54-62. p.

- [91] Horváth L. (2008): Földrajzi analógia alkalmazása klímaszcenáriók elemzésében és értékelésében, PhD értekezés, Budapesti Corvinus Egyetem, Matematika és Informatika Tanszék (in press)
- [92] Horváth L., Hufnagel L., Révész A., Gaál M., Ladányi M., **Erdélyi É.** (2002): Agroökoszisztémák modellezése, XLIV. Georgikon Napok - Stabilitás és Intézményrendszer az Agrárgazdaságban, Keszthely, pp. 45.
- [93] Horvath, L., **Erdélyi É.** (2006): How climate change influences the field crop production I. – Use of spatial analogy, ECO-Conference, Novi Sad, pp. 1-6.
- [94] Horváth, L., Gaál, M. (2006): Spatial analogies in service of climate change analysis 6th Annual Meeting of the EMS / 6th ECAC 4 - 8 September 2006, Ljubljana, Slovenia abstract cd-rom ISSN 1812-7053
- [95] Horváth, L., Gaál, M., **Erdélyi É.** (2006): The use of spatial analogy in climate change research, Summer University on Information Technology in Agriculture and Rural Development, Debrecen, pp. 48-54.
- [96] Horváth, L., Gaál, M., Solymosi, N.(2007): Use of spatial analogy to understand the effects of climate change, Environmental and Social Issues of the Southeast Pannonian Region, Multidisciplinary Approaches, The Scientific World
- [97] Hu, Q., Weiss, A., Feng, Baenziger, S. (2005): Earlier winter wheat heading dates and warmer spring in the U.S. Great Plains, Agricultural and Forest Meteorology 135, 284-290 p.
- [98] Hufnagel L., Ladányi M., Gaál M., Horváth L., **Erdélyi É.**(2006): Klíma és mezőgazdaság – módszertani kutatások a BCE Matematika és Informatika Tanszékén, „VAHAVA” projekt zárókonferenciája,  
[http://mit.uni-corvinus.hu/vahava/file/Novenytermesztes\\_3.pdf](http://mit.uni-corvinus.hu/vahava/file/Novenytermesztes_3.pdf)
- [99] Huzsvai L., Megyes A., Sulyok D., Ráthonyi T.(2002): Környezetkímélő technológiák, Debreceni Egyetem, Agrártudományi Centrum
- [100] Huzsvai, L., Pető, K., Kovács G. J. (1995): Szimulációs modell alkalmazása a növénytermesztési kutatásban. Tiszántúli Mezőgazdasági Tudományos Napok, Hódmezővásárhely, pp. 149-151.
- [101] Iglesias, A., Rosenzweig, C. and Pereira, D. (2000): Agricultural impacts of climate change in Spain: developing tools for a spatial analysis, Global Environmental Change, Vol. 10, No. 1, April 2000, p. 69-80.

- [102] IPCC (1996): *Climate Change: The Science of Climate Change*, (Eds. Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callander, B., Harris, N., Kattenberg, A. & Maskell, K.), Cambridge University Press, Cambridge
- [103] IPCC (2007): *The Fourth Assessment Report "Climate Change 2007"* Cambridge University Press 2008 ISBN-13:9780521705974
- [104] IPCC, 2001: *Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Warson, R.T. and the Core Writing Team, Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, 398 pp.
- [105] Jamieson P.D., Porter J.R., Goudriaan J., Ritchie J.T., van Keulen H., Stol W. (1998): A comparison of the models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat, Sirius, SUCROS2 and SWHEAT with measurements from wheat grown under drought, *Field Crops Research*, 55, 23-44. p.
- [106] Jolánkai M. (1986): *Az öntözés és a műtrágyázás hatása néhány búzafajta minőségére. In: Búzatermesztési kísérletek 1970-1980.* (Szerk.: Bajai J. - Koltay Á.), Akadémiai Kiadó, Budapest. p. 503-508.
- [107] Jordán, F. (2000): Seasonal changes in the positional importance of components in the trophic flow network of the Chesapeake Bay, *Journal of Marine Systems*
- [108] Jordán, F., Molnár, I. (1999): Reliable flows and preferred patterns in food webs, *Evol. Ecol. Res.* 1: 591-609.
- [109] Just, R. E. (2003): Risk Research in Agricultural Economics: Opportunities and Challenges for the next Twenty-Five Years, *Agricultural Systems* 75. pp. 123-159.
- [110] Kalvová, J. and Nemešová, I. (1997): Projections of Climate Change for the Czech Republic, *Climatic Change*, Vol. 36, No. 1-2, May - June, pp. 41-64.
- [111] Kapetanaki, G., and Rosenzweig, C. (1997): Impact of climate change on maize yield in central and northern Greece: A simulation study with CERES-Maize, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol. 1, pp. 251-271.
- [112] Kniesel, W.G. (ed) (1980): *CREAMS A Field Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*, USA Dept. of Agriculture, Conservation Research Report No. 26.
- [113] Komuscu, A. U., Erkan, A. and Oz, S. (1998): Possible Impacts of Climate Change on Soil Moisture Availability in the Southeast Anatolia Development Project Region (GAP): An Analysis from an Agricultural Drought Perspective, *Climatic Change*, Vol. 40, No. 3-4,

December, pp. 519-545.

- [114] Kovács G. J. and Dunkel Z. (1998): A klímaváltozás várható következményei Magyarországon szántóföldjein a következő félszázadban. Az éghajlatváltozás és következményei. Meteorológiai tudományos napok. '97 Budapest, OMSZ, pp. 181-194.
- [115] Kovács G. J., Fodor N. (2005): Szimulációs eljárások alkalmazása a tápanyaggazdálkodásban. In: Kovács Géza J. és Csathó Péter (Szerk.): *A magyar mezőgazdaság elemforgalma 1901 és 2003 között*, MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézet, Budapest, ISBN 963 219 372 5
- [116] Kovács, G. J. (1998): Estimation of the Effect of Global Warming on Yields and Environment of Arable Crops in Hungary. *Agrokémia és Talajtan* 47. (1-4.) pp.133-144.
- [117] Kovács, G. J. (2003): Modelling of adaptation processes of crops to water and nitrogen stress. *Physics and Chemistry of the Earth. Special issue: Agrometeorolog.*, Ed. Dunkel, Z. Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands. Vol 30/1-3. pp. 209-216.
- [118] Kovács, G. J., Németh, T., Ritchie, J. T. (1995): Testing Simulation Models for Assessment of Crop Production and Nitrate Leaching in Hungary. *Agricultural Systems*, 49 (4) pp. 385-397.
- [119] Kovács, G. J., Ritchie, J. T. and Németh, T. (1998): CERES models in Multiple Objective Decision Making Process, El-Swaify and Yakowitz D. S. (Eds) 1st Internat. Conf on MODSS for Land, Water and Environment. Man.: Concepts, Approaches and Appl. Honolulu. Lewis Publ. pp. 281-290.
- [120] Ladányi M, **Erdélyi** É.(2002): Kölcsönhatási hálózatok időbeli szimulációja, Agrárinformatikai Konferencia, Debrecen, p. 296-314.
- [121] Ladányi M. (1995): Növénytermesztési modellek, AGRO-21, Budapest, Hungary, Vol. 11, pp. 79-96.
- [122] Ladányi M. (2002b): Egy táplálékhálózat szezonális populációdinamikai modellje. VI. Magyar Biometriai és Biomatematikai Konferencia, pp. 43-44.
- [123] Ladányi M. (2006): Folyamatszempléleti alternatívák az agro-ökoszisztémák modellezésében, PhD értekezés, Budapesti Corvinus Egyetem, Matematika és Informatika Tanszék
- [124] Ladányi M., **Erdélyi** É. (2005): A kukoricatermesztés kockázatának vizsgálata egy új sztochasztikus hatásossági módszerrel (The increase of risk in maize production detected by a new stochastic efficiency method), Agrárinformatika 2005, Debrecen

- [125] Ladányi M., Hufnagel L. (2003b): Fenológiaiától függő egyedszám meghatározás, Lippay János – Ormos Imre – Vas Károly Tudományos Ülésszak összefoglalói, pp. 46-47.
- [126] Ladányi, M. (2003a): A seasonal model focused on the biotic interactions of food-web populations. In: Proc. IInd Erdei Ferenc Conf. Kecskemét, Hungary. pp. 311-315.
- [127] Ladányi, M. (2003b): Phenological simulation of food-web populations. In: Proc. IInd Erdei Ferenc Conf. Kecskemét, Hungary. pp. 316-320.
- [128] Ladányi, M. (2006): A review of the potential climate change impact on insect populations – general and agricultural aspects. Applied Ecology and Environmental Research
- [129] Ladányi, M. and Hufnagel, L. (2003a): A phenology model embedded in an ecosystem model for agroecological processes. In: Harnos, Zs. et al. (Eds): *Information technology for a better agri-food sector, environment and rural living*, EFITA 2003 Conference, Debrecen-Budapest, Hungary, pp. 876-881.
- [130] Ladányi, M. and Hufnagel, L. (2005): The effect of climate change on the population of sycamore lace bug (*Corythuca ciliata*, Say) based on a simulation model with phenological response. Applied Ecology and Environmental Research
- [131] Ladányi, M., Erdélyi, É. (2004): Istraživanje zemljište-biljka-klima-štetočine modela u znaku održive poljoprivrede (Examination of a soil-plant-weather-pest system in the light of sustainable agriculture), „III Međunarodna eko-konferencija – Zdrastveno bezbedna hrana”, Novi Sad, p. 413-418.
- [132] Ladányi, M., Erdélyi, É. (2006): Climate change and risk assessement in hungarian viticulture: a methodological approach, AVA3 Debrecen, International Conference on Agricultural Economics, Rural Development and Informatics, p. 253-261.
- [133] Ladányi, M., Erdélyi, É. (2007): A rewiew of risk methods in climate change impact research, ISIIR 2007, Novi Sad 2007. június 21-22. “Environmental and social issues of the southeast panonian region: multidisciplinary approaches, The Scientific World
- [134] Ladányi, M., Erdélyi, É. and Révész, A. (2003a): An ecosystem model to simulate agroecological processes. In: Harnos, Zs. et al. (eds): EFITA 2003 Conference, Debrecen-Budapest, Hungary. Information technology for a better agri-food sector, environment and rural living, pp. 739-746.
- [135] Ladányi, M., Erdélyi, É., Szenteleki, K. (2007b): The increase of Hungarian vine production due to climate change, EFITA Conference, Glasgow, CD-ROM

- [136] Ladányi, M., Gaál, M., Horváth, L., Hufnagel, L., Révész, A. and **Erdélyi, É.** (2003b): An agro-ecosystem simulation model for precision agriculture. In: Werner, A. and Jarfe, A. (Eds): *Programme book of the joint conference of ECPA-ECPLF*, Wageningen Academic Publishers, The Netherlands. pp. 469-470.
- [137] Ladányi, M., Horváth, L., Gaál, M. and Hufnagel, L. (2003c): An agro-ecological simulation model system. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2003 (1-2), pp. 47-74.
- [138] Ladányi, M., Szenteleki, K., **Erdélyi, É.** (2007a): The Risk of Hungarian Vine Production from Climate Change Aspect, OIV Budapest, CD-ROM
- [139] Láng G (1970): A növénytermesztés kézikönyve. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest
- [140] Láng G. (1961): Növénytermesztés. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest
- [141] Láng I. (2006): A Globális klímaváltozás: hazai hatások és válaszok – VAHAVA zárójelentés. BP, MTA
- [142] Láng I., Csete L., Harnos Zs. (Eds) (1983): A magyar mezőgazdaság agroökológiai potenciáljának a felmérése, Budapest, Mezőgazdasági Kiadó, 265 p.
- [143] Máthéné-Gáspár, G., Fodor, N., Pokovai, K., Kovács, G. J. (2005): Crop modelling as a tool to separate the influences of the soil and weather on crop yields. *Physics and Chemistry of the Earth. Special issue: Agrometeorology*. Ed. Dunkel, Z. Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands. Vol 30/1-3. pp. 165-170.
- [144] McMaster, H. J. (1999): The Potential Impact of Global Warming on Hail Losses to Winter Cereal Crops in New South Wales, *Climatic Change*, Vol. 43, No. 2, October, pp. 455-476.
- [145] Meehl, G.A. (2005): Global climate sensitivity, The 85th American Meteorological Society Annual Meeting, 16th Conference on Climate Variability and Change, San Diego, CA, 6.3
- [146] Meyer, J. (1977): Second Degree Stochastic Dominance with Respect to a Function. *International Economic Review*, 18, 477-487.
- [147] Meyer, J. (2001): Expected Utility as a Paradigm for Decision Making in Agriculture. In: Just and Pope (2001a) q.v. pp. 3-19.
- [148] Mika J. (2002): A globális klímaváltozásról, Egy meteorológus kutató szemszögéből, *Fizikai Szemle* 2002/9. 258.o.
- [149] Mimikou, M. A., Kanellopoulou, S. P. and Baltas, E. A. (1999): Human implication of changes in the hydrological regime due to climate change in Northern Greece, *Global*



- Environmental Change, Vol. 9, No. 2, July, pp. 139-156.
- [150] Naden, P. S. and Watts, C. D. (2001): Estimating Climate-Induced Change in Soil Moisture at the Landscape Scale: An Application to Five Areas of Ecological Interest in the U.K., *Climatic Change*, Vol. 49, No. 4, June, pp. 411-440.
- [151] Nagy, J., Huzsvai, L., Petó, K., Kovács, G. J. (1994): Validation of Crop Models Based on Field Experiments for Environmental Education. In: Modeling the fate of agrochemicals and fertilizers in the environment. Giupponi, C., and Morari, F. (eds) Proc. of the Int. Workshop of ESA, Venice, Italy, March. 3-5., 1994. pp. 409-419.
- [152] Olesen, J.E., Bindi, M. (2002): Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *Eur. J. Agron.* 16. 4. 239-262. pp.
- [153] Ószi, B., Ladányi, M. and Hufnagel, L. (2005): Population dynamics of the sycamore lace bug, *Corythucha ciliata* (Say) (heteroptera: tingidae) in Hungary, *Applied Ecology and Environmental Research*, 4(1), pp. 135-150.
- [154] Patterson, D.T., Westbrook, J.K., Joyce, R.J.V., Lingren, P.D., Rogasik J. (1999): Weeds, insects, and diseases. *Climatic Change*. 43. 4. 711-727. pp.
- [155] Peiling, L., Quiang, Y., Jiandong, L., Xuhui, L. (2006): Advance of tree-flowering dates in response to urban climate change, *Agricultural and Forest Meteorology* 138 pp. 120-131.
- [156] Peltola, H., Kellomäki, S. and Väisänen, H. (1999): Model Computations of the Impact of Climatic Change on the Windthrow Risk of Trees, *Climatic Change*, Vol. 41, No. 1, January, pp. 17-36.
- [157] Petit, J. R., Jounzel, J. et al. (2000): Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core in Antarctica, *Nature* 399 (3June), pp.429-436, 1999
- [158] Phyllips, J. B. (1971): Statistical Methods in Systems Analysis In: Dent, J. B. and Anderson, J. R. (Eds) *Systems Analysis in Agricultural Management*, Wiley, Sydney, pp. 34-52.
- [159] Révész A.(2008): A hőhullámok gyakoriságának vizsgálata, VIII. Magyar Biometria és Biomatematika Konferencia, Budapest
- [160] Richter, G. M. and Semenov, M. A. (2004): Modelling impacts of climate change on wheat yields in England and wales: assessing drought risks. *Agr. Syst.*
- [161] Semenov, M. A., Porter, J. R. (1995): Non-linearity in climate change impacts assessments. *Journal of Biogeography*, 22. pp. 597-600. p.

- [162] Semenov, M., Racskó, P. Szeidl, L.(1990): CROP: Decision Support System for Crop Production, Budapest
- [163] Sirotenko, O. D., Abashina, H. V., Pavlova, V. N. (1997): Sensitivity of the Russian Agriculture to Changes in Climate, CO<sub>2</sub> and Tropospheric Ozone Concentrations and Soil Fertility, Climatic Change, Vol. 36, No. 1-2, May - June, pp. 217-232.
- [164] Southworth J., Randolph, J.C., Habeck, M., Doering, O.C., Pfeifer, R.A., Rao, D.G., Johnston, J.J. (2000): Consequences of future climate change and changing climate variability on maize yields in the midwestern United States. Agriculture Ecosystems & Environment. 82. 1-3. 139-158. pp.
- [165] Stocks, B. J., Fosberg, M. A., Lynham, T. J., Mearns, L., Wotton, B. M. (1998): Climate Change and Forest Fire Potential in Russian and Canadian Boreal Forests, Climatic Change, Vol. 38, No. 1, January, pp. 1-13.
- [166] Sulyok, D., Szilágyi, R., Fodor, N. and Kovács, G. J. (2003): Economic modelling based on 4M model, EFITA, Debrecen
- [167] Szegő I. M. (2004): A maja kultúra hanyatlása, National Geographic Online, <http://209.85.135.104/search?q=cache:DJHHo5HhinwJ:www.geographic.hu/index.php/fotopalyazat/fotopalyazat/nyomtathato.php>
- [168] Szenteleki K., Ladányi M., **Erdélyi** É., Horváth L., Hufnagel L., Révész A. (2007): A KKT Klímakutatás adatbáziskezelő szoftver, XLIX. Georgikon Napok, Keszthely, p. 116.a
- [169] Szenteleki, K. (2007): A Környezet-Kockázat\_Társadalom (KLIMAKKT) klímakutatás adatbázis-kezelő rendszerei, „KLIMA-21” Füzetek, 51: 89-115. pp.
- [170] Szenteleki, K., Ladányi, M., **Erdélyi**, É., Horváth, L., Hufnagel, L., Solymosi, N., Révész, A. (2007b): Introducing the KKT Climate Research Database Management Software, EFITA Conference, Glasgow, CD-ROM
- [171] Szent-Györgyi A. (1989): Az örült majom, Magvető Kiadó, Budapest
- [172] Tuba, Z., Szente, K., Koch, J. (1994): Response of photosynthesis, stomatal conductance, water use efficiency and production to long-term elevated CO<sub>2</sub> in winter wheat, Journal of Plant Physiology, 144 (6), 669-678. pp.
- [173] Tuba, Z., Szente, K., Nagy, Z., Csintalan, Zs., Koch, J. (1996): Responses of CO<sub>2</sub> assimilation, transpiration and water use efficiency to long-term elevated CO<sub>2</sub> in perennial C<sub>3</sub> Xeric Loess Steppe Species. Journal of Plant Physiology, 148. pp. 356-361. pp.
- [174] United Nations Framework Convention on Climate Change (1992) (UNFCCC, Éghajlatváltozási Keretegyezmény), ENSZ Környezet és Fejlődés Konferencia, Rio de

Janeiro

- [175] Varga-Haszonits Z. (1987a): Az időjárás-növény modellek elvi-módszertani kérdései, Időjárás No. 2-3., OMSZ
- [176] Varga-Haszonits Z. (1987b): Meteorológiai Információk és alkalmazásaik. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest
- [177] Varga-Haszonits Z. (1987c): Agrometeorológiai információk és hasznosításuk, Mezőgazdasági Kiadó, Budapest
- [178] Varga-Haszonits Z. (1992): Komplex agroklimatológiai modell az őszibúza produktivitásának jellemzésére, Doktori értekezés, Mosonmagyaróvár.
- [179] Varga-Haszonits Z. (1995): Az éghajlati változékonyság és a gazdasági növények termesztése. AGRO-21 füzetek 11. , Budapest, pp. 46-78.
- [180] Varga-Haszonits Z. (2003): Az éghajlatváltozás mezőgazdasági hatásának elemzése, éghajlati scenáriók „Agro-21” Füzetek, 31. sz.
- [181] Varga-Haszonits Z., Varga Z., Lantos Zs., Enzsölné Gerencsér E. (2005): Az éghajlatingadozás hatása a vegetációs periódusra, Acta Agronomica Óváriensis, Vol. 47. No. 2., Mosonmagyaróvár
- [182] Varga-Haszonits, Z., Harnos, Zs. (1988): Proceedings of the Hungarian Meteorological Service HMS, Budapest
- [183] Vargha A.(2008), Ropstat statisztikai programcsomag, <http://ropstat.com>
- [184] Veisz, O., Harnos, N., Tischner, T. (1996): The effects of CO<sub>2</sub> levels on the development and yield of cereals, Aspects of Applied Biology 45, Implications of "Global Environmental Change" for crops in Europe, pp. 107-111.
- [185] Vital Signs 2006-2007 (2006): The trends that are shaping our future, Wordwatch Institute, Report, Washington DC
- [186] [www.mta.hu/fileadmin/2008/Kozgyules/12.\\_Klimavaltozas\\_es\\_biztonsag\\_program.doc](http://www.mta.hu/fileadmin/2008/Kozgyules/12._Klimavaltozas_es_biztonsag_program.doc)
- [187] [www.r-project.org](http://www.r-project.org)