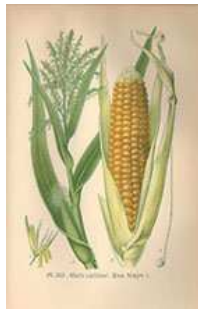


**Budapesti Corvinus Egyetem
Kertészettudományi Kar
Budapest**

A klímaváltozás hatása a kukorica fenológiai fázisaira

Boksai Daniella



Témavezető : Erdélyi Éva, egyetemi adjunktus, Ferenczy Antal, egyetemi adjunktus
Budapesti Corvinus Egyetem, Kertészettudományi Kar,
Matematika és Informatika Tanszék

Tanszéki bíráló

Külső bíráló

Budapest, 2007.

Látta
Tanszékvezető

.....
Témavezető

.....
Témavezető

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés és célkitűzés.....	2
1.1. Előzmények.....	2
1.2. Bevezetés.....	2
1.3. Célkitűzés.....	3
2. Irodalmi áttekintés.....	4
2. 1. Klímaváltozás.....	4
2. 2. Szimulációs modellezés.....	6
2. 3. A kukorica klimatikus igényei.....	7
2. 4. Szimulációs modellek a kukoricatermesztésben.....	10
3. Anyagok és módszerek.....	10
3. 1. A felhasznált adatbázisok.....	10
3.1.1. Az Országos Meteorológiai szolgálat adatsora.....	10
3.1.2. Klímaváltozási scenáriók adatsorai.....	11
3. 2. A 4M 3.1 modell bemutatása.....	13
3. 2. 1. A modell kísérletben használt beállításai.....	19
3. 3. A ROPstat programcsomag bemutatása.....	23
4. Eredmények.....	27
4.1. A kukorica fenológiai fázisainak alakulása különböző időjárási adatsorok esetén...27	
4.2 Az eredmények statisztikai kiértékelése a ROPstat program segítségével31	
5. Tézisek.....	37
6. Megvitatás.....	37
7. Összefoglaló.....	41
8. Summary.....	41
9. Köszönetnyilvánítás.....	42
10. Irodalomjegyzék.....	43

1. Bevezetés és Célkitűzés

1.1. Előzmények

A TDK dolgozat a Summer University on Information Technology in Agriculture and Rural Development konferencia kiadványban megjelent, The effects of climate change on the phenological phases of corn, (CD kiadvány, Debrecen, 2007, 1-4. oldal a tartalomjegyzékben a kilencedik) angol nyelvű referált cikk kutatási háttéranyaga alapján és kibővítésével készült, a TDK követelményeinek megfelelően átszerkesztve. Az ott megjelent anyag azonos című előadás alapján készült és a kukorica fenofázisainak alakulását a klímaszenáriók összehasonlításával elemzi. Azóta a vizsgálatokat a klímaszenáriók referencia időszakával, azaz 1960-90-es évek valós adataival is kibővítettük, tehát a szimulációs kísérletek alapján végzett statisztikai elemzések a múltbeli adatok és a klímaváltozási szenáriók összehasonlítására is kiterjednek. Ez a dolgozat a szimulációs kísérlet eredményeit a múltbeli adatokra és a klímaszenáriókra is bemutatja, összehasonlítja azokat és részletesen leírja, magyarázza a használt módszereket és szoftvereket is.

1.2. Bevezetés

Napjaink izgalmas, és egyben sokat vitatott kérdése, hogy milyen mértékű globális klímaváltozás várható, és annak milyen regionális megvalósulásai lehetnek. Kérdés, hogy a klímaváltozásnak milyen hatása van a természeti környezetre és a gazdasági életre. Ha kvantitatív következtésekre akarunk jutni, akkor tudományosan megalapozott becslési módszerekre van szükségünk (Kovács, Fodor 2005).

Az éghajlat esetleges jövőbeni megváltozásának becslése napjaink egyik legsürgetőbb tudományos feladata. Az éghajlatváltozás tanulmányozásához megbízható mérési adatsorokra van szükség. Elengedhetetlen az éghajlati adatbázis folyamatos fejlesztése, a hosszú hőmérsékleti, csapadék és egyéb éghajlati idősorok statisztikai elemzése.

Éghajlatunk lehetséges jövőbeni alakulását klímamodellekkel szimulálják. A kutatók által előre vetített globális felmelegedés lokális következményeit számos hazai vizsgálat is elemzi.

A XXI. század első felére a Kárpát-medencében, így Magyarországon is, az átlagoshoz képes jelentősebb felmelegedés várható; az évi csapadékmennyiség csökkenésére, valamint az

aszályhajlam növekedésére számíthatunk (Bussay et. al, 1999). Ezek a változások jelentős hatást gyakorolhatnak környezetünkre, így mezőgazdaságunkra is.

A legkézenfekvőbb előrejelzési módszer a klíma jövőbeni alakulására az, ha kivetítjük a közelmúlt változási tendenciáit a közeljövőre (Nánási 2005).

Ma a hosszú évek monitoring munkájának köszönhetően kiterjedt adatbázisok állnak rendelkezésünkre, melyekkel számos probléma megoldása könnyebbé válhat.

Ahhoz, hogy ezekből a hatalmas méretű, összefüggő adatbázisokból eredményeket, következtetéseket vonhassunk le, elengedhetetlenül szükséges volt a számítástechnika ugrásszerű fejlődése. Az elmúlt évtizedekben számos speciális felhasználói program és statisztikai módszer született az elemzések elvégzésére.

1.3. Célkitűzés

A globális klímaváltozásnak komoly következményei várhatók a mezőgazdaságban is. Az időjárás jelentősen befolyásolja a növények, így a kukorica egyedfejlődését, szemtermés- és biomassa mennyiségét is.

Munkánkkal a Budapesti Corvinus Egyetem Kertészettudományi Karának Matematika és Informatika Tanszékén folyó klímaváltozással kapcsolatos modellezési kutatáshoz kapcsolódtunk, amely Harnos Zsolt akadémikus vezetésével fontos szerepet játszik a hazai (VAHAVA és Klíma KKT) és a nemzetközi (ADAM-EuC) projektekben.

Dolgozatom célja az éghajlatváltozás hatásának vizsgálata a kukorica fenológiai fázisainak hosszára és a fázisok kezdő napjának időpontjára.

A vizsgálat legfontosabb céljai:

- szimulációs kísérletek végzése múltbeli valós adatokra és különböző klímaváltozási scenáriók esetére a kukorica fejlődésének nyomon követésére, az eredmények összehasonlítása a növény fejlődési szakaszainak kezdeti időpontjára és hosszára nézve.

2. Irodalmi áttekintés

2.1 Klímaváltozás

Amióta létezik a Föld, éghajlata folyamatosan változik, néha gyorsabban, máskor lassabban (Láng, 2006).

A XIX. század közepétől folyamatosan és egyre intenzívebben jelentkező környezeti problémák közös vonása, hogy valamennyi emberi tevékenység következtében jött létre (Mészáros, 2001). A jelenségek által érintett területek sajnálatosan egyre növekednek. A földi környezetre károsan ható folyamatoknál már most olyan a változás mértéke, hogy akár egy emberélet alatt is bárki érzékelheti hatását. Alig van az emberi tevékenységnek olyan része, melyet közvetlenül vagy közvetve ne befolyásolnának az időjárási jelenségek, az éghajlat módosulása. 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.

Az esetlegesen bekövetkező változások veszélye abban rejlik, hogy a földi légkör olyan hőmérsékleti tartományba léphet, melyben ősidők óta nem volt (Nánási, 2005). A mostani helyzet abban új, hogy az emberi tevékenység nemcsak a mikro- és makroklímát, hanem a globális klímát is befolyásolja (Láng, 2006).

A Föld egyértelmű vészjeleket küld. Kiemeljük a legfontosabbakat: 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, mert magasabb földrajzi szélességekre tolnak (Gaál és Horváth, 2006). Tényként említve, az elmúlt másfél évszázad alatt a Föld felszínközeli léghőmérséklete 0,6-0,8 °C-szal emelkedett (Bartholy, 2004).

Magyarország éghajlatát az óceáni, a mediterrán és a kontinentális klíma együttesen határozzák meg. Ezek a Kárpát-medence domborzati hatásaival együtt változékony éghajlatot eredményeznek (Harnos N., 2003).

Az éves csapadékmennyiség a XX. században jelentősen csökkent, elsősorban tavasszal, amikor az évszakos csapadékösszeg a század elejinek mintegy 75 százaléka. A nyári csapadékmennyiség összege lényegében nem változott az elmúlt száz évben. Régebben is

voltak száraz nyarak, azonban a fokozatosan növekvő nyári hőmérséklet miatt az újabb száraz időszakok káros hatása jóval nagyobb. Az őszi és téli csapadékcsökkenés kb. 12-14%-os.

Az eddigi ismeretek alapján feltételezhető, hogy Magyarországon hosszú távon fokozatos felmelegedés és csapadékmennyiség csökkenés, valamint a szélsőséges időjárási viszonyok gyakoriságának és intenzitásának növekedése várható (Láng, 2006).

Hazánkban az éghajlatváltozás szempontjából legérzékenyebb területek az Alföld, valamint a Balaton Sió vízgyűjtője (Bartholy et al., 2004). A szerzők szerint az Alföldön a csapadék gyakorisága várhatóan csökken, a hőmérséklet esetén az évszakos felmelegedés mértéke 0,1-0,5 °C közötti, ennél nagyobb hőmérsékletváltozást csak ősszel várhatunk, összességében az évi hőmérsékletemelkedés várható mértéke 0,7 °C.

A klíma változásaival és ezzel kapcsolatos jövőbeni hatásokkal már néhány évtizede világszerte nagyszámú külföldi közlemény jelenik meg. A változások globális vizsgálata az 1970-1980-as évek óta kiemelt szerepet tölt be a témára szakosodott szakemberek körében (Láng, 2006). A nyolcvanas években már intenzíven foglalkoznak a klímaváltozás olyan nyilvánvaló velejárójával, mint a légköri széndioxid szintjének nagyfokú emelkedésével, illetőleg ennek következményeivel. A kilencvenes évek elején erről már gazdag összefoglalások is születnek (Barrow, 1996). A probléma jelentőségét bizonyítja, hogy az utóbbi időben klímaváltozás témájával foglalkozó események egyre gyakrabban szerveződnek: 1992-ben Rio de Janeiro-ban, 1997-ben Kiotóban, majd 2002-ben Johannesburgban tárgyalták szakemberek és kutatók bevonásával a szükséges teendőket. Idén februárban megjelent az IPCC újabb jelentése, júliusban pedig az ún. Zöld könyv, melynek bemutatása és sajtótájékoztatója éppen Karunkon történt. Azóta a Zöld könyv megvitatására az iránytű négy irányának megfelelően regionális konzultációkat is tartott az Európai Unió (októberben Budapesten is). A klímaváltozáshoz való alkalmazkodás és csökkentési stratégiák, akciótervek kidolgozása folyamatosan zajlik, tervezik egy ún. Fehér könyv kiadását is.

2.2 A szimulációs modellezés

Míg a huszadik század kiemelkedő elméleti fizikusait minden természettudós ismeri, addig az elméleti ökológia megalapozóiról csak kevesen hallottak. Többségük (pl. Sir Ronald Ross, William R. Thompson, Vito Volterra) valamilyen konkrét gyakorlati probléma megoldásához alkalmaztak matematikai modelleket. Az általános elméleti kérdésekre koncentráló Alfred J. Lotka inkább kivételnek számított. Ronald Ross, foglalkozására nézve orvos, a maláriafertőzés biológiai ökológiai hátterét felfedő kutatásait 1902-ben Nobel-díjjal jutalmazták.

Vito Volterra a matematikai fizika neves professzora volt. Mint igazi fizikus a probléma lehető legegyszerűbb matematikai modelljét vizsgálta: egyetlen ragadozó és egyetlen zsákmány faj denzitásának változását egy kétváltozós közönséges differenciálegyenletrendszerrel írta le. Lotka az élőlények energiáramlásának leírásával foglalkozott (Ladányi, 2006).

A többi természettudományhoz hasonlóan a matematika szerepe az ökológiában a mintázatok mögött húzódó mechanizmusok felderítése. A rendszereket leíró matematikai modellek sokfélék és bonyolultak. A modellezés egyik legfontosabb erénye, hogy a modellek alapján egyértelműen megfogalmazott feltételek mellett határozott, sokszor nagyon éles következtetéseket lehet megfogalmazni.

Összefoglalva: a természettudományok a matematika nyelvén íródnak, az ökológia ebből a szempontból sem kivétel. A folyamatok modellezése sajnos gyakran nehézségekbe ütközik: az ökológiai rendszerek rendkívül összetettek, a matematikai módszerek folyamatosan fejlesztés alatt állnak, a kísérleti és terepi adatgyűjtés sem problémamentes. A szimulációs módszerek megjelenése a mezőgazdaságban nemcsak a rendszerelmélet térhódításával függ össze, hanem a valóság mind pontosabb megismerésének szinte napról napra fokozódó igényével. Nagy rugalmasságukkal ezek a módszerek új távlatokat nyitnak meg az agrárgazdasági kutatásokban és a különböző szintű mezőgazdasági döntések jobb megalapozására irányuló törekvések kielégítésében (Rajkai et al, 1995). Tehát a mezőgazdaság véletlen hatásokkal átszótt, biológiai alapokon nyugvó, dinamikus jellegű termelő folyamata igen kedvező terep a szimuláció alkalmazása számára.

A szimulációs modellek lehetővé teszik a mezőgazdasági ökológiai rendszerek elemzését, a várható tendenciák előrejelzését és a hatalmas mennyiségű tudásanyag összefogását (Csáki, 1976). Segítségükkel jól leírhatók a paraméterek, használatukkal lehetőség nyílik a

gyakorlatban nehezen vizsgálható körülmények (például a klímaváltozás) elemzésére is (Harnos N., 2003).

2.3 A kukorica klimatikus igényei

A kukorica származását tekintve tropikus növény, ennek megfelelően először a trópusi és szubtrópusi területeken terjedt el. A termesztés, majd az állandó szelekció hatására azonban jelenlegi termesztési körzete nagyon kiterjedt, és a legnagyobb termést nem a származási helyének tekinthető trópusokon adja, hanem mérsékelt égövi körülmények között, ahol intenzíven művelik. A kukorica termesztési határa Európában az 50. szélességi fokig terjed. A kukorica termésmennyiségét leginkább befolyásoló tényezők a hőmérséklet és a csapadék (Menyhért, 1979), Varga-Haszonits (1987) ide sorolja a globálsugárzást is. Kedvező, ha a napi középhőmérséklet már április 15. előtt tartósan meghaladja a 10°C-ot és ez alá csak október 20. után csökken (Menyhért, 1979). Áprilisban a gyors kelés feltétele a magas átlaghőmérséklet, míg júliusban illetve augusztusban a termékenyülés és terméskötés. Májusban a kevésbé meleg idő a gyors, egyenletes vegetatív fejlődést segíti (Menyhért, 1979). Balázs (1989) szerint a mag keléséhez szükséges minimum hőmérséklet 10°C, az optimális fejlődéshez 22-25°C a megfelelő, de 35°C felett már károsodás léphet fel. Ezzel szemben Varga-Haszonits (1974) vélekedése a következő: a csírázáshoz 8-14°C közötti érték tekinthető jónak, degradáció viszont csak 40°C felett tapasztalható. Az átlagos hőmérsékleti értékek a vegetáció alatt befolyásolják a szár – gyökér arányt. Általában a szár- gyökér arány a fejlődési optimumig javul a szár javára, azaz az optimumhoz közeli hőmérsékleti értékeknél azonos gyökértömeg mellett lényegesen több zöldtömeget nyerünk. A gyökértömeg 30°C felett már nem képes a föld feletti részeket elég vízzel ellátni, így az életfolyamatok megakadnak. Ha azonban a nedvességellátás jó és a levegő relatív nedvességtartalma magas, akkor a kukorica még 35°C felett is kielégítően fejlődhet. Általában azonban a mi klímánk mellett az a jellemző, hogy a nagy meleg viszonylag alacsony légnedvességgel jár együtt, ami igen megnöveli a párolgást, a fagymentes napok száma meghaladja a 140 napot. A kukoricát ott lehet eredményesen termesztani ahol a nyári átlaghőmérséklet 21-26°C között van (Menyhért, 1979). Nem hagyható figyelmen kívül az éjszakai hőmérséklet sem, Láng (1976) szerint a legjobb, ha nem süllyed 14-15°C alá, míg Menyhért úgy véli elég, ha meghaladja a 9°C-ot. A kukorica kedveli a magas párákat.

A kukorica a legtöbb vizet a virágzás kezdete előtti egy és virágzás utáni három héten belül igényli (Balázs, 1989), míg Varga-Haszonits (1977) szerint virágzás előtt 10-14 nappal. Júliusban vízigénye fokozódik (5 mm/nap), majd szeptemberig fokozatosan csökken (2 mm/nap). Ezzel szemben Ángyán (1987) szerint a nedvességigény szeptember végéig nő. Ha egyszer van lehetőségünk az állomány öntözésére, azt mindenképpen a virágzás időszakában tegyük (Balázs, 1989). A kukorica számára optimális éghajlaton 800 - 1000 mm az évi csapadék mennyisége. Jó vízgazdálkodású talajban az időjárás okozta kockázat csökken. (Láng, 1976)

A kukorica rövidnappalos, fényigényes növény (Balázs, 1989). A hosszú nappalok megnyújtják a vegetációs időt, több lesz a levél és méretben nagyobb a növény. Májusban alacsonyabb, júniusban, júliusban és augusztusban magas napfényigényű. Befolyásolhatja a fényintenzitás a vegetációs időszak hosszát is. Ha a fényintenzitás 30-40%-kal csökken, akkor az éréshez szükséges idő 5-6 nappal megnyúlik. A szél is nagyon fontos tényező lehet, hiszen a forró szél hiányos megtermékenyülést okozhat (Menyhért, 1979).

Talaj szempontjából, a mélyrétegű, közép kötött, vályog, humuszos, jó szellőzésű talaj az optimális (Láng, 1976). Balázs (1989) szerint a kedvező talaj PH érték 5.5-6.8 közé esik, míg Menyhért (1973) úgy véli 6.3-7.0 PH az optimális. A kukorica neutrális vagy enyhén savanyú talajt kíván. A növény tápanyagigénye nagy, de kisebb mikroelem hiány terméskiesést nem okoz (Balázs, 1989). A kukorica érzékeny a szikes talajokra, termesztése ezért csak szelídebb szikeken ajánlatos. Nagyon érzékeny a talaj légellátottságára, ezért pangóvízes területen hamar kipusztul. Nem szereti a hideg talajokat. Nagyon sekély (kavics- vagy kőpadon kialakult talajok) termőrétegű területeken termése igen erősen függ az időjárástól. A talaj hőmérséklete a vegetációs idő alatt egyik meghatározója lehet a kukorica kielégítő fejlődésének. A talajhőmérséklet emelkedésével fokozódik a gyökér fejlődése és növekedési intenzitása.

Varga-Haszonits (1974) szerint a kukorica legfontosabb fenofázisai, ezek hossza, bekövetkezési ideje, valamint az adott fázisokban a növény hőmérséklet-, víz- és globálsugárzás igényei a következők:

Vetés - kelés időszaka, április 15. - május 1. (Kelés: május első és második dekádja.)

A fázis hossza 10-15 nap, csapadékigénye 13-25 mm. 10°C hőmérsékletnövekedés/ csökkenés 1-2 napos fázistartam növekedést / csökkenést okoz.

Kelés - címerhányás időszaka, mely Ángyán szerint (1989) a legfontosabb periódusnak tekinthető. (A május elején kikelt kukorica július első, második dekádjában hoz címert.)

A fázis hossza 60-70 nap, a globálsugárzás optimális értéke 30 kcal/ cm². A növény 18-22°C hőmérsékletet igényel és 100-160 mm vizet.

Címerhányás - nővirág megjelenése (Július első v. második dekádjában bekövetkező címerhányás után pár nappal megjelennek a nővirágok.)

A fázis hossza 3-10 nap, a globálsugárzás optimális. értéke 2-4 kcal/ cm². Ezen életszakaszában a kukorica 19-23°C-ot és 15 mm-nél kevesebb csapadékot igényel.

Nővirág megjelenése - érés időszaka (A nővirágoknak általában július második dekádja táján történő megjelenése után az érés szeptember közepe és október eleje között várható.)

55-75 nap a fázis hossza, a globálsugárzás 25-30 kcal/cm² között optimális, a 17-21°C átlaghőmérséklet és a 70-120 mm csapadék a kedvező.

A vegetációs időszak hossza Ángyán (1987) szerint 180-200 nap, míg Láng (1976) úgy véli, korai érésű fajtáknál 125-130 nap, illetve Európában legalább 140 nap (Menyhért 1979).

A fázisstartam alakulásával számszerű kapcsolatot mutat a hőmérséklet és a globálsugárzás. 1°C hőmérsékletemelkedés a fázist átlagosan 2,2 nappal rövidíti meg. A globálsugárzás összegének növekedése pedig 2 nappal növeli a fázishosszt.

Menyhért Debrecen a 2-es kukorica termesztő körzetbe sorolta. A terület klímadottságok szempontjából gyengének mondható, a klímaelemek átlagos relatív szórása 22%. Ezek közül a legszeszélyesebb a csapadék eloszlása (júliustól szeptemberig több mint 60%-os relatív szórással). A legjobb és a leggyengébb körzet klímadottságaiban 38%-os eltérés mutatkozik. Ennél nagyobb terméskülönbség klimatikus alapon nem magyarázható.

Az évjárat hatás szempontjából Debrecen közepes adottságúnak tekinthető. A rekordévek gyakorisága 25%-nál több, a gyenge évek gyakorisága 40%-nál kevesebb. Három-négy gyenge, négy közepes, két- három jó év váltja egymást. Öt- hat évente hideg, borús, csapadékos az időjárás, ami nem kedvez a kukoricának.

Összességében, figyelembe véve a klíma, valamint az évjáráthatást is, Debrecen kukorica termesztés szempontjából közepes adottságú terület.

2.4 Szimulációs modellek a kukoricatermesztésben

A klímaváltozás lehetséges hatásait vizsgálva Brown és Rosenberg (1999) megmutatták, hogy a kukoricatermesztésre a kísérleti körülményeknek erős befolyásuk van. Három féle scenárióval futtatva a CERES modellt (GISS, UKTR, BMRC) a kukorica számára a GISS paraméterei bizonyultak a legjobbnak (a termésmennyiség 19%-al nőtt), míg a másik két scenárió esetén jelentősen (40%-kal) csökkent a termésmennyiség. Ha szélfogó fasorral védik a kukoricát 4,1 tonna/Ha nő a termésmennyiség, a CERES modell szerint. Ibricki (1998) kutatásai során kimutatta, hogy a terméshozam és a levelek nitrogén tartalma növekedett a hűgysav formájában adagolt 200 kg, 250 kg, 300 kg illetve 350 kg nitrogén hatására, míg a gyökérhosszúsága nem változott. A COMP8 modell által jósolt nitrogén felvétel alacsonyabb volt, mint a valós.

A kukorica szárazanyag tartalmára vonatkozó kísérletben, vetés után 20 hét elteltével rohamosan csökken a növényi N tartalom (Overman, 2004).

2040-2069-es éveket szimulálva több napsütés esetén, 2,6-7,5 tonna/ha (40%-115%) nőtt a termés mennyiség. A CO₂ közvetlen atmoszferikus hatását figyelmen kívül hagyták a kísérlet során és megállapították, hogy a magas energiájú és fehérjetartalmú szántóföldi növények a meleg klímát jól viselik (Bootsma, 2005).

3. Anyagok és módszerek

3.1. A felhasznált adatbázisok

3.1.1. Az Országos Meteorológiai szolgálat adatsora

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 karakterisztikákban, és egy általános képet nyújtson a térségben előforduló éghajlati jellemzőkről. A dolgozatban a Debrecenre vonatkozó 1901-2000 éves százéves időjárás adatok 1960-1990-es 31 éves időszakára modelleztünk, mert ez az időszak szolgál alapjául a felhasznált klímaváltozási scenárióknak. Az meteorológiai észleléseket Magyarországon közép-európai idő (CET = Central European Time) szerint végezik, mert ez az időszámítás független a tavaszi és őszi óráátállításoktól.

Télen megegyezik a Magyarországon használt helyi idővel (HLT = Hungarian Local Time), de nyáron az órák előreállítása miatt a helyi idő 1 órával több.

A felhasznált időjárási paraméterek:

- középhőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]

1901-től 1965-ig a magyarországi állomáshálózatban a napi háromszori észlelés volt jellemző, 07, 14, 21 órakor közép-európai idő (CET) szerint.

- csapadékösszeg [mm]

A csapadékmennyiség meghatározása a reggeli észleléskor (07 CET) történt a teljes időszakban. Ebből következik, hogy az aktuális napra vonatkozó csapadékösszeg az aktuális nap 07 órájától a következő nap 07 órájáig tartó 24 órás periódusban hullott

- napfényösszeg [óra]

A napfénytartam meghatározása a mérések kezdete óta nem változott. Az esti órákban levett napfény regisztrátumot óránkénti bontásban kiértékelik, az óras adatok összege az aktuális napra vonatkozó napfényösszeg. A modell a globálsugárzás értékeivel dolgozik, az átszámítást Dr. Huzsvai László algoritmusának segítségével végeztük.

3.1.2. Klímaváltozási scenáriók adatsorai

Az időjárás modellezésével világszerte és Európában is számos meteorológiai intézet foglalkozik a klímaváltozást is ábrázoló előrejelzés céljával. Az általános cirkulációs modellek (General Circulation Models, GCM) a légkör, az óceán és a földfelszín fizikai folyamatait írják le numerikusan, ma már többnyire három dimenzióban. A Föld klímájára nézve előrejelezni képesek a növekvő üvegházhatás következményeit. A GCM-ek jellemzően durva felbontásúak (250-600 km), ennek köszönhetően jó néhány fizikai folyamat modellezésére alkalmatlanok (pl. a felhők, hegyek szerepe), s regionális alkalmazásuk előtt gondos leskalázásukra van szükség. Minél jobb egy leskalázási módszer, annál jobb regionális éghajlati előrejelzést ad. Az így nyert eredmények magasan jobbak a rácsnégyzetekre közvetlenül vagy interpolációval megadott GCM adatoknál. Ilyen jellegű vizsgálatokat hazánkban többen is végeztek (Bartholy és Matyasovszky, 1998; Mika, 2002; Varga-Haszonits, 2003). Mivel az időjárás modellezésének mai eredményei még számos bizonytalanságot hordoznak magukban és egymástól különböző előrejelzések születnek, elemzéseinkhez több globális cirkulációs modell (GCM) Debrecenre történt leskalázását használtuk.

Az IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) az üvegházhatású gázok, illetve a szulfátok kibocsátásának függvényében kidolgozta a következő száz évre a várható időjárási paraméterek értékeit. Az általuk működtetett központon (*Data Distribution Centre, DDC*) keresztül az adatokat hozzáférhetővé tették. Az IPCC eredményeit ma világszerte általánosan elfogadott alapelvként alkalmazzák és a szervezetet - melynek munkájában magyar kutatók is részt vesznek - idén Nobel díjjal jutalmazták.

Munkánkban a Hadley Intézet (Anglia) és a Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL, USA) által készített GCM-eket alkalmazzuk (IPCC, 2005)

A Hadley Intézet által készített GCM-eket használtuk:

- Légkör-modell egyrétegű óceáni és egyszerű földfelszíni modellel összekapcsolva, mely még csak kétdimenziós, síkmodell. Ez a modell rövidtávú (néhány tíz éves) előrejelzésre alkalmas, és nem köthető naptári évhez. Ez alapján készültek az UKLO, (1987) és UKHI (1990) ún. egyensúlyi klímaszenáriók, 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 szenáriók csak a modellbeli felbontásban különböznek. (LO=alacsony, durvább, HI=magasabb, finomabb felbontás).
- Légkör-modell 3D óceáni és 2D földfelszíni modellel összekapcsolva. A belőle készült szenárió az úgynevezett UKTR (1992), mely a korábbi modelleknek egy ún. tranziens továbbfejlesztése, azaz fokozatosan növekvő CO₂ mellett vizsgálja a szintén fokozatosan változó klímát. Ez a modell már hosszútávú (több száz éves) előrejelzésre is alkalmas és naptári évhez is köthető.

A Hadley Intézet által készített modellek is egységesen azt az általánosan elfogadott tendenciát feltételezik, mely szerint az elkövetkező évszázadban a széndioxid-kibocsátás hatására a légköri széndioxid-koncentráció megkétszereződik (Ladányi, 2006).

A GFDL által készített GCM-ek közül a GFDL2535 és GFDL5564-et használtuk, melyek nagy felbontású szimulációs modellek, a sarkokon lévő jégvastagság változásából indulnak ki és ezek hatásaként dolgozták ki előrejelzéseiket, figyelembe véve az üvegházhatású gázok kibocsátásának mennyiségét, illetőleg a légköri széndioxid-koncentráció mértékét. Az említett két szenárió csak felbontásban különbözik egymástól (a későbbi finomabb felbontású). Kalibrálásukat hosszú idősorokon, 1990-ig vezették végig. Az előrejelzéseket a XXI. századra

adták meg azzal a feltevessel, hogy évente 1%-kal növekszik a légköri széndioxid-koncentráció (Varga–Haszonits, 2003). A klímaszcenáriók egy-egy 31 éves idősort tartalmaznak, referencia időszakuk egységesen az 1960-1990-ig tartó 31 éves időintervallum. A klímaváltozással kapcsolatos tudományos eredmények az ún. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) jelentésekben kerülnek összesítésre. Ezen programban Magyarország is részt vesz.

3.2. Modellezés, a 4M 3.1 modell bemutatása

A modellek mindig is fontos szerepet játszottak a tudományos megismerés folyamatában (Huzsvai et al, 1995). A szimulációs növénytermesztési modellek közvetlen célja az, hogy az igen bonyolult légkör-talaj-növény rendszer folyamatait, beleértve az emberi tevékenységet is, matematikai eszközökkel leírják, és számítógép segítségével szimulálják. A végső cél azonban az, hogy ezen modellek felhasználásával olyan kérdésekre kapjunk választ, amelyeket egyébként csak drága, időigényes esetleg kivitelezhetetlen kísérletek illetve megfigyelések segítségével kaphatnánk meg.

A szimulációs növénytermesztési modellek különböző függvényekkel, differenciálegyenletekkel, illetve ezekből felépülő algoritmusokkal (*modulokkal*) írják le a légkör-talaj-növény rendszer folyamatait (Erdélyi, 2003). Ezen modulok egy része a 'modellezett' növény fejlődését és növekedését, más részük a talajban történő vízmozgást, megint más részük pedig a rendszer többi folyamatait (*pl. transzspiráció, fotoszintézis, stb.*), írják le. A számítástechnika fejlődése csak az 1970-es években tette lehetővé, hogy a kutatók az addig felhalmozott természettudományos ismereteket számítógépes algoritmusokban megfogalmazva elkészítsék az első szimulációs modelleket. Azóta már számos szimulációs modellt alkalmaztak különféle oktatási és kutatási projekteknél. Magyarországon ezen modellek használata kevésbé elterjedt és az agrár-felsőoktatásban egyelőre „hiánycikknek” számítanak.

A Talajtani Kutatóintézetben működő modellező csoport már tíz éve alkalmaz különböző növénytermesztési modelleket a kutatásban és az oktatásban. Ezek a szoftverek angolul kommunikálnak, ezért csak az angolul tudók számára használhatók. A modellek természetesen magukon viselik fejlesztőik gondolkodásmódjának és programozás-technikájának nyomait, ezért többnyire csak nehezen módosíthatók vagy fejleszthetők.

2001 januárjában a Talajtani Társaság keretein belül Dr. Kovács Géza vezetésével megalakult a Rendszermodellezési Szakosztály, amely otthont ad a Magyar Mezőgazdasági Modellezők Műhelyének (4M). Utóbbi egy magyar kutatók által fejlesztett növénytermesztési modell megalkotását tűzte ki céljául. Kiindulási alapként J.T. Ritchie professzor felajánlotta az általa kifejlesztett CERES modellt. Nemzetközi és hazai vizsgálatok már bizonyították ezen modell hatékonyságát (Kovács et al., 1995), másrészt, a modell forráskódja is elérhető volt. A modell FORTRAN nyelvű eljárásait kisebb szintaktikai változtatásokkal átírták DELPHI nyelvre. Később - a könnyebb fejleszthetőség, illetve bővíthetőség érdekében - megváltoztatták a CERES szerkezetét és felhasználóbarát kezelőfelületet terveztek hozzá. A CERES DELPHI-ben készült változatát nevezték a 4M modell 0.0 verziójának.

A 4M modell magyarul (is) kommunikál, felhasználóbarát, és új modulokkal könnyen bővíthető. Fejlesztésekor a modellező műhely három cél elérésére törekszik:

A 4M moduláris, azaz egyetlen nagy és rugalmatlan modell helyett itt a folyamatok modulokban vannak megfogalmazva. A modellezett rendszer egyes részfolyamataira a program több modult kínál föl, melyek közül a felhasználó, a céljaitól és a rendelkezésére álló bemenő adatoktól függően, választhat. Ugyanazon folyamatra tetszőleges számú, a világ szakirodalmi alapján készített önálló modul készíthető és készült is. A modulok bizonyos korlátokon belül szabadon kombinálhatók össze (építhetők egybe) egy teljes modullá.

Olyan becslőeljárások kerülnek beépítésre a 4M-be, melyek segítségével nehezen meghatározható bemenő adatok - egyszerűbben kivitelezhető mérések eredményeinek felhasználásával - megbecsülhetők, így a modell még szélesebb körben válik használhatóvá. Az eddigi rendszermodelleket szinte csak 'modellező szakemberek' tudták elindítani, mert bemenő adatszükségletük kielégítésére speciális ismeretekre és igen sok adatra volt szükség. 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.

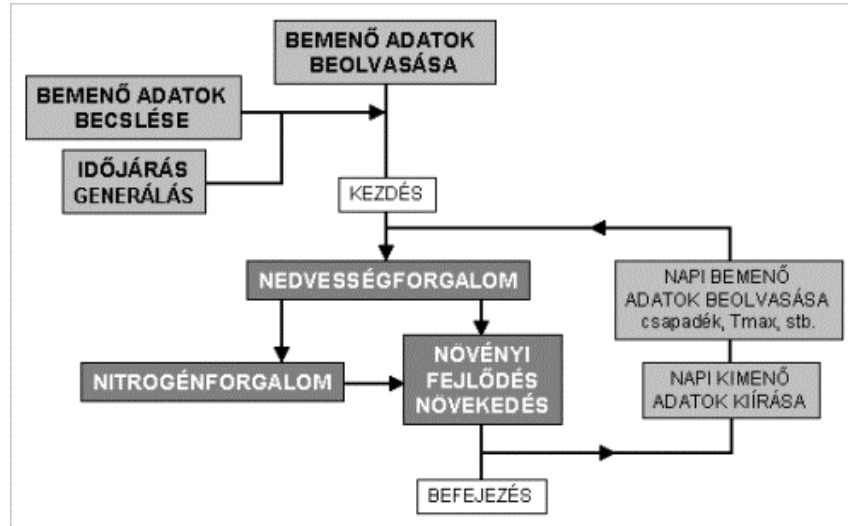
Olyan új modulok illetve adatbázisok kerülnek beépítésre, amelyeket magyar kutatók fejlesztettek illetve készítettek, és amelyek (hacsak implicit módon is de) tartalmazzák a légkör-talaj-növény rendszer speciálisan magyar jellemzőit.

A CERES átalakításával született 4M szoftvercsomagba azóta számos új modul illetve segédprogram került beépítésre. A programhoz csatolták, a TAKI adatbázisából 44

talajszelvény, a modell számára előkészített inputadatait. A modell egy grafikus felületen keresztül összekapcsolásra került a SOTER adatbázissal is.

A 4M programcsomag célja, hogy hatékony eszköz legyen a tudományos kutatásban, az oktatásban 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.

A 4M felhasználóbarát (magyar és angol) kezelőfelülettel rendelkezik. Az adatokat ASCII fájlokban tárolja, de a nagymennyiségű időjárás adatokat Excel-ből is képes importálni. Egyszerű időjárás generátorral is rendelkezik. Lehetővé teszi a mű- és szerveztrágyázás, valamint az öntözés hatásának modellezését. Akár 100 éves időszak modellezésére is képes (vetésforgóval is). A modell az eredmények grafikus ábrázolására is lehetőséget kínál. Egyszerre 5 futás két különböző kimenő adatát képes megjeleníteni. A modell működése az alábbi vázlatos ábrával szemléltethető (1. ábra).



1. ábra: A 4M modell vázlatos működése (Forrás: Kovács és Fodor, 2005)

Elvileg bárki, aki a MS Windows környezetben otthonosan mozog, könnyedén tudja kezelni a 4M modellt is. A modell kezelését az alábbi főbb lépésekre bonthatjuk:

- I. Bemenő/Kimenő adatok megadása
- II. A modell beállításaink megválasztása

- III. A modell futtatása
- IV. A kimenő adatok elemzése/vizsgálata
- V. Ökonómiai elemzések

A program különböző részei (*ablakai*) a főmenün keresztül érhetők el (2. ábra):



2. ábra: A 4M induló ablaka

Bemenő/Kimenő adatok megadása

A bemenő adatokat a modellezett rendszer felépítésnek megfelelően az alábbi módon csoportosították:

1. Időjárási adatok
2. Növényi adatok
3. Talaj adatok
4. Agrotechnikai adatok

A bemenő adatokat tartalmazó fájlok Projekteké állíthatók össze. Az időjárás, talaj és agrotechnika fájlok (ezek tárolják a növényi adatokat is) projektekbe rendezhetők. A projektek ún. feladatokat tartalmaznak. Minden feladat egy időjárás, egy talaj és egy agrotechnika fájlt foglal magába, melyek elmenthetők.

A modell által készített outputfájlokba tárolásra kerülő változókat a Kimenő adatok ablakban adhatjuk meg.

A Kimenő adatok ablakban azon rendszerváltozók nevei adhatók meg (jelölhetők ki), amelyek mindenkori értékeit a kimeneti fájlokba szeretnénk kiírni (3. ábra). Megadható

továbbá, hogy kimeneti fájlba milyen időközönként kerüljenek kiírásra a kijelölt változók értékei.



3. ábra: A kimenő adatok ablaka a 4M-ben

Időjárási adatok

Meglévő, adott területre vonatkozó időjárás-fájlokat megnyitni a Terület feliratnál történő választással lehet. Az adott területre vonatkozó éves adatsorok a terület nevét viselő könyvtárban tárolódnak, az évszámnak megfelelő fájl névvel ellátva. A terület megválasztása után az évjáratot az Év feliratnál választhatjuk ki. A Helyi jellemzők, Alapadatok illetve Adatok+ feliratú fülekre kattintva a beolvasott fájl adatait megtekinthetjük, esetleg meg is változtathatjuk. Az új terület menüpont választásával új időjárás-fájlt is megnyithatunk, amelyen belül új éveket adhatunk meg. Az új terület nevének megadása után a Helyi jellemzőket töltjük ki (pl. a földrajzi szélesség és hosszúság adatokat) és a helyről rövid leírást is adhatunk egy üres téglalapban. Az új évszám megadása után az adatokat elmentjük.

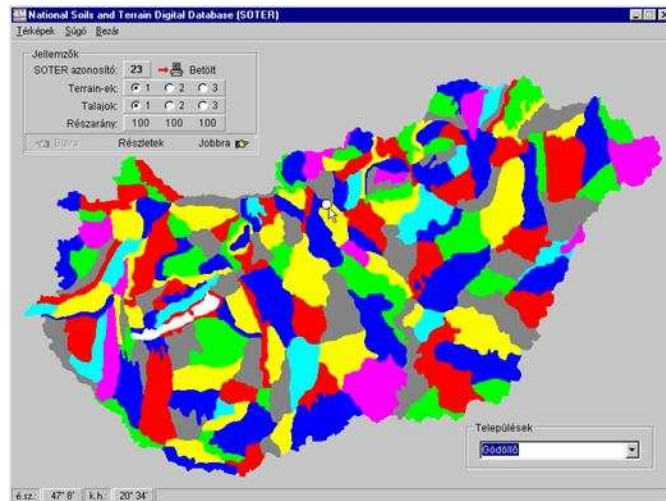
Növényi adatok

A 4M jelenleg 9 növény fejlődésének és növekedésének szimulációjára képes: árpa, búza, cirok, köles és kukorica illetve szárazbab, borsó, szója és paradicsom, melyekhez fajparaméterek és fajtaparaméterek, egyes növénycsoportokhoz ökotípus-paraméterek is tartoznak. Új fajtát és új ökotípust is megadhatunk.

Talajadatok

A talajszelvényt jellemző paramétereket két csoportba sorolták: Szelvényre vonatkozó adatok és Szintekre vonatkozó adatok, melyeket a Talaj felirat mellett található legördülő menüből

történő választással olvashatunk be egy adatbázisból, de új talajszelvény megadására is lehetőségünk van. A programhoz a Talajtani Kutatóintézet adatbázisa van csatolva, mely 36 különböző helyről, 44 talajszelvény, a modell számára előkészített inputadatait tartalmazza. Ha olyan talajjal szeretnénk a modellt használni, amely nem szerepel az adatbázisban, a SOTER adatbázis kezelőfelületének segítségével (4. ábra) megkereshetjük azt a talajtípust, amely leginkább hasonlít az általunk keresett talajra.



4. ábra: A SOTER adatbázis kezelőfelülete a 4M-ben

Az 1:500.000-es HunSOTER (Soils and Terrain Digital Database) adatbázis, Magyarország területét, 173 elkülönülő egységre osztja, amelyeket talajtani szempontból 40 reprezentatív szelvénnel (összesen 155 szint) jellemez.

Agrotechnikai adatok

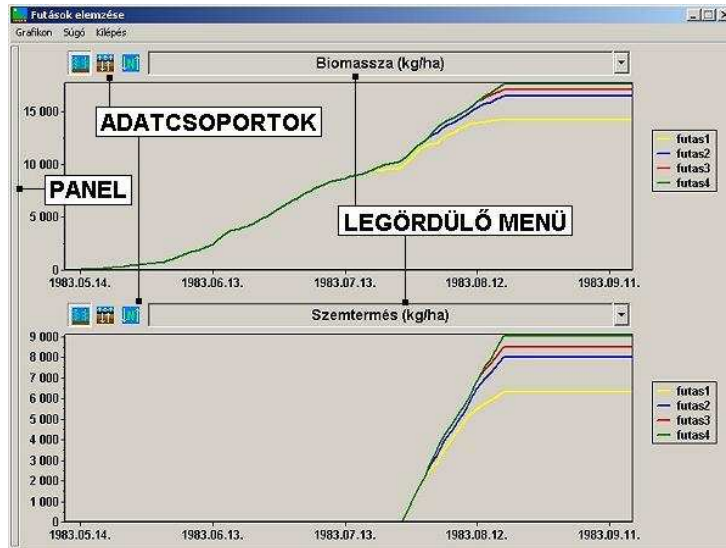
Az adatokat választhatjuk a már meglévők közül, vagy új agrotechnika fájl szerkesztését is megkezdhetjük, melyhez vetési, aratási, trágyázási ill. öntözési 'esemény' és a szimuláció időtartama adható meg.

A modell futtatása

A modellt a Főmenü vagy a Felbukkanó menü Futtat menüpontjának választásával lehet futtatni. A 4M automatikusan ad egy nevet a futásnak, amit szabadon megváltoztathatunk. Az összefoglaló - a futás végén jelölőnégyzet bekapcsolásával - a futás végén a legfontosabb eredmények táblázatos formában megjelennek.

A kimenő adatok elemzése/vizsgálata

A grafikus segédprogram az Eredmények|Futások elemzése menüpont választásával hívható meg. Ez az eszköz egyszerre 5 futás két különböző kimenő adatát képes megjeleníteni (5. ábra).



5. ábra: Grafikus segédprogram a 4M-ben

A grafikus modul képes a nedvesség-, NO_3^- -, NH_4^- -tartalom valamint a gyökérsűrűség (egy időben közülük legfeljebb kettőt) talajszelvénybeli eloszlásának ábrázolására egy futás esetén.

3.2.1 A modell kísérletben használt beállításai

Debrecen térsége a Tiszántúl, így hazánk egyik legjelentősebb termőterülete, ezért választottuk kísérletünk helyszínéül (6. ábra). Esettanulmányunkhoz összehasonlítási alapként a klímaszenáriók referencia időszakát, az 1960-90-es időszak Debrecenben mért időjárási paramétereit, a jövő szimulálásához pedig a különböző klímaszenáriók Debrecenre leskálázott adatait használtuk időjárási inputként.. A városok éghajlata –nagyságuktól

függően- eltér tágabb környezetük klímájától. A debreceni megfigyelési idősor elemzésekor jelentős városhatástól nem kell tartani.

Szélesség [°]	45.5
Hosszúság [°]	21.5
Tengerszint feletti magasság [m]	150

6. ábra: Debrecen helyi jellemzői

Vizsgálataink során tehát a mért időjárási adatok és 5 scenárió kukoricatermesztésre gyakorolt hatását hasonlítottuk össze. Minden idősor 31 évvel szerepelt és 4 meteorológiai jellemzőt tartalmazott: globálsugárzás (MJ/m²), maximum- és minimum hőmérséklet (°C), a csapadék naponta mért értékei (mm).

Napjainkban Magyarországon a legnagyobb területen termesztett kukorica fajta a Dekalb 471, ennek a fajtának a specifikus jellemzőit használtuk fel (7. ábra).

Hőösszegszükséglet: keléstől a juvenilis fázis végéig [°C*d]	215.0
Nappalhossz-érzékenység (0-1)	0.500
Hőösszegszükséglet: nővirágzástól az érésig [°C*d]	785.0
Potenciális szemszám egy csövön	800.0
Potenciális szemtelítődési sebesség [mg/d]	7.90
Filokron intervallum [°C*d]	38.90
Legnagyobb levél felülete (opt. körülmények között) [cm ²]	600

7. ábra: A Dekalb 471 kukorica fajta specifikus jellemzői

A terméseredményre nagy hatást gyakorol az adott talaj típusa is. Debrecen esetében jellegzetes a réti csernozjom talaj (8. ábra, 9. ábra). (Stefanovits Pál: Magyarország jellemző talajai)

Albedo [0-1]	0.15
Párolgási határérték [mm]	4.0
Lefolyásigörbe-paraméter [0-100]	70
Jellemző talajvízmélység [m]	8
Max. tócsamélység [mm]	0
Összrepedéshossz [cm/m ²]	0
Max. repedésmélység [cm]	0
Repedéseloszlás-paraméter [0-100]	0

Makrópórusáramlás faktor [0-1]	0
Mineralizációs faktor [0-1]	1
Növekedésgátló faktor [0-1]	1
Foszfor elérhetőségi index [0-1]	0.5

8.ábra A réti csernozjom talaj szelvényeire vonatkozó adatok

	1. szint	2. szint	3. szint	4. szint
Jel	Asz	A	B	BC
Vastagság [cm]	26	12	40	102
Térfogattömeg [g/cm ³]	1.32	1.36	1.33	1.38
Szerves anyag [%]	4.98	4.00	3.33	0.00
Gyökér faktor [cm ³ /cm ³]	0.958	0.800	0.650	0.088
Maximális vízkapacitás [cm ³ /cm ³]	0.487	0.487	0.465	0.479
Szabadföldi vízkapacitás [cm ³ /cm ³]	0.441	0.441	0.390	0.414
Holtvíz tartalom [cm ³ /cm ³]	0.210	0.210	0.232	0.213
Drénhányad [0-1]	0.35	0.35	0.35	0.35
Hidraulikus vezetőképesség(1) [cm/d]	5.039	3.462	2.929	1.584

9.ábra: A réti csernozjom talaj szintjeire vonatkozó adatok

Módszerek

Egy szimuláció véghezvitele az előző beállításokon túl, a következő paramétereket is igényli (1. táblázat).

Funkció	Dátum
szimuláció kezdete, kezdőfeltételek aktivizálása, vetés	április 15.
csírázás (a modell beállított értéke)	április 16.
aratás (kényszeraratás)	nov. 1.
szimuláció vége	nov. 2.

1.táblázat: A szimuláció beállításai

A 4M 3.1 szimuláció menetrendje: Projekt megválasztása, növény és fajta kiválasztása, talajválasztás, agrotechnika megválasztása, scenárió beállítás, adott év beállítása, futtatás, eredmények mentése. Az elmentett eredményekből az MS Excel program segítségével ábrákat

készítettünk, valamint a kapott eredményeket különböző statisztikai módszerek felhasználásával ki is értékeltük.

3. 3. A ROPstat programcsomag bemutatása

A ROPstat egy új, felhasználóbarát statisztikai szoftver, mely klasszikus és modern statisztikai módszereket egyaránt tartalmaz. Készítői, Dr. Vargha András és Bánsági Péter arra törekedtek, hogy nem matematikus végzettségű felhasználók számára is elérhető legyen és segítséget nyújtson kutatási eredményeik kiértékeléséhez.

Független minták egyszempontos összehasonlítása

Intervallum-skálájúnak beállított változókra a program az elméleti szórások, átlagok és trimmelt átlagok egyenlőségét vizsgálja (ez utóbbit csak akkor, ha a trimmelési százalék 0-nál nagyobb).

A populációsórások összehasonlítására a ROPstat a Levene-próbát (annak is a robusztus, Welch-féle változatát) hajtja végre, amely a normalitás megsértésére nézve kevésbé érzékeny, mint a hagyományos eljárások.

Az elméleti átlagok (várható értékek) összehasonlítására a ROPstat kétféle eljárástípust alkalmaz. Először egy hagyományos eljárást, mely érzékeny a szórások különbözőségére. Ez két csoport esetén a kétmintás t -próba, több csoport esetén pedig az egyszempontos varianciaanalízis (VA) független mintás eljárás. Ezen elemzés eredményét (különösen számottevően eltérő elemszámok esetén) csak akkor tekinthetjük érvényesnek, ha a szórások nem különböznek túlságosan nagy mértékben egymástól.

Kettőnél több csoport esetén a program kiszámítja a korrelációs hányadost (nemlineáris korrelációs együtthatót) is, mely azt méri, hogy a függő változó milyen mértékben függ a csoportosító változótól. E mutató négyzete a nemlineáris determinációs együttható, mely azt jelzi, hogy a csoportosító változó a függő változó varianciájának hányad részét magyarázza meg.

A hagyományos eljárás mellett az elméleti átlagok összehasonlítására a ROPstat olyan robusztus módszereket is alkalmaz, amelyek érvényességét nem csökkenti jelentősen az elméleti szórások esetleges különbözősége. Két csoport esetén az alkalmazott eljárás a Welch-féle d -próba, több csoport esetén pedig a Welch-, a James-, és a Brown-Forsythe-féle robusztus VA. Ezek közül 20-nál kisebb minták esetén a Welch-, nagyobb minták esetén pedig a James-próba tűnik a legmegfelelőbbnek. A Brown-Forsythe-féle eljárás csak legfeljebb mérsékelt különböző szórások esetén megbízható.

Ha kettőnél több csoport összehasonlítása esetén az elméleti átlagok azonosságának hipotézise elvethető, a program páronként összehasonlítja az összes mintaátlagot. Ez szignifikánsan különböző szórások esetén (Levene-próba eredménye) a Games-Howell-féle módszerrel, egyébként pedig a Tukey-Kramer módszerrel történik.

Ha a normalitás erősen sérül amiatt, hogy az adatmintában a többi közül nagyon kilógó extrém adatok is vannak, célszerű a minták szélsőséges elemeit trimmeléssel „levágni” (röviden: trimmelni) a mintákról. Ezt 0-tól különböző trimmelési százalék beállításával tehetjük meg. Ilyenkor a program kettőnél több csoport összehasonlítása esetén trimmelt VA-t, két csoport összehasonlítása esetén pedig trimmelt kétmintás t -próbát (Yuen-próba) is végrehajt.

Ha kovariáns változót jelölünk ki, ennek hatását a program kovarianciaanalízissel szűri ki. Ezen elemzés feltételezi, hogy a kovariáns és a függő változó között ugyanolyan lineáris kapcsolat van a különböző mintákban. Ennek részleges ellenőrzésére e két változó közti korrelációt a program csoportonként kiszámítja és összehasonlítja.

Ha az összehasonlítandó csoportok száma kettő és a kiválasztott függő változók száma legalább kettő, akkor a program – automatikusan – közös tömör táblázatban foglalja össze az összehasonlítások eredményeit. A feltüntetett adatok változónként: a két csoport átlaga és szórása, az átlagok standardizált különbsége (a Cohen-féle hatásmértékkel kifejezve), az elméleti szórások egyenlőségét tesztelő Levene-próba p -értéke, a kétmintás t -próba eredménye, szabadságfoka és p -értéke, valamint a Welch-féle d -próba eredménye, szabadságfoka és p -értéke.

Ordinális skálájúnak beállított változók esetén a program az elméleti rangszórások megegyezését és a sztochasztikus homogenitást teszteli. Populációk összehasonlítása esetén egy-egy populáció sztochasztikus dominanciája (az ún. sztochasztikus kezelési hatás) annak a valószínűségét jelzi, hogy egy random megfigyelés ebből a populációból (X_j) nagyobb lesz, mint egy random megfigyelés a populációk egyesítéséből (X), plusz az egyenlőség valószínűségének a fele, $P_j = P(X_j > X) + 0,5 \cdot P(X_j = X)$.

A sztochasztikus homogenitás egyik definíciója: $P_1 = P_2 = P_3 = \dots = 0,50$. Egy-egy P_j érték szignifikanciája azt jelenti, hogy a $H_j: P_j = 0,5$ hipotézis elvethető. A sztochasztikus homogenitás egyébként ekvivalens az elméleti rangátlagok egyenlőségével és köznapi szavakkal azt jelenti, hogy bármelyik populáció esetén egy innen véletlenszerűen kiválasztott adat ugyanolyan valószínűséggel nagyobb a többi populáció egyesítéséből kiválasztott

véletlen adatnál, mint kisebb. E populációk egyesítése történhet a mintaelemszámokkal arányos súlyokkal, vagy azonos súlyokkal. Ez utóbbit akkor célszerű alkalmazni, ha a mintaelemszámok aránya nem felel meg a csoportok összpapulációbeli valódi arányainak.

A sztochasztikus homogenitást hagyományosan a Mann-Whitney-próba (két minta), illetve a Kruskal-Wallis-próba (kettőnél több minta) segítségével lehet tesztelni, amelyek a kétmintás t -próba, illetve az egyszempontos VA rangszámokon elvégzett megfelelői. Szignifikánsan különböző szórások esetén azonban e hipotézis vizsgálatára a Fligner-Policello-próba és a Brunner-Munzel-próba (két minta), illetve a korrigált rang Welch-próba, és a Kulle-féle aszimptotikusan egzakt próbák (kettőnél több minta) a legmegfelelőbbek.

A program a Kruskal-Wallis-próba H mennyiségének szignifikanciáját a χ^2 -eloszlással értékeli ki, a Mann-Whitney-próba U mennyiségének szignifikanciáját kisebb minták esetén egy egzakt eljárással, nagy minták esetén pedig a normális eloszlással való közelítés segítségével állapítja meg.

Ha kettőnél több minta összehasonlítása esetén a sztochasztikus homogenitás hipotézise elvethető, a program a Brunner-Munzel-próbával páronként összehasonlítja az összes csoportot, az elsőfajú hiba megnövekedése, vagyis az alfa-infláció elkerülésére minden esetben kiszámítva a Bonferroni-féle korrigált p -értéket is.

A szignifikancia mértékétől függetlenül a program minden ordinális skálájú változó esetén csoportonként becslést ad a sztochasztikus dominancia nagyságára, s ezeknek a 0,5-től való eltérését is teszteli.

Ha a csoportosító változónak csak két érvényes csoportja van, akkor a program kiszámítja az $A(1, 2) = P(X_1 > X_2) + 0,5 \cdot P(X_1 = X_2)$ valószínűségi fölény mutatónak, valamint a $P(\text{Csop1} > \text{Csop2})$, $P(\text{Csop1} < \text{Csop2})$ valószínűségeknek a pontbecslését, illetve $A(1, 2)$ -re 95%-os intervallumbecslést is készít.

Ha a feladatablakban kérjük az eloszlások részletes összehasonlítását, akkor a program a függő változó értékskálájának maximum 10 pontjában (ún. binarizáló osztópontban) összehasonlítja az empirikus eloszlásokat, azt tesztelve, hogy az osztópont alatti értékek aránya szignifikánsan eltér-e a különböző csoportokban. Ennek tesztelése a khi-négyzet-próba, illetve a Fisher-egzakt-próba segítségével történik. Ezen összehasonlítások p -értékeit összevetve megállapítható, hogy a csoportok az értékskála milyen dichotomizálásával különböznek egymástól a legélesebben. Az alfa-infláció elkerülésére a program Bonferroni-féle korrigált p -értékeket számol ki.

Ha az összehasonlítandó csoportok száma kettő és a kiválasztott függő változók száma legalább kettő, akkor a program – külön kérés nélkül – közös tömör táblázatban foglalja össze az összehasonlítások eredményeit. A feltüntetett adatok változónként: a két csoport rangátlaga, a valószínűségi fölény $A(1, 2)$ mutatója, az elméleti rangszórások egyenlőségét tesztelő Levene-próba p -értéke, a Mann-Whitney-próba p -értéke, a Fligner-Policello-próba eredménye, szabadságfoka és p -értéke, valamint a Brunner-Munzel-próba eredménye, szabadságfoka és p -értéke.

Nominális skálájúnak beállított változók esetében a program elkészíti a csoportosító változó (G) és a függő változó (X) csoportjai által meghatározott kétdimenziós gyakorisági táblázatot és χ^2 -próbával (kis elemszámok esetén Fisher-egzakt-próbával) teszteli, hogy X függ-e G -től. Szignifikáns eredmény esetén a program elkészíti a táblázat sorösszegei szerint képezett százalékos gyakoriságok táblázatát is.

4. Eredmények

A vizsgálandó meteorológiai alap- és képzett adatsorok Debrecen mostani és eljövendő éghajlatát szimulálják. Minden scenárió 31 évvel szerepelt és 4 meteorológiai jellemzőt tartalmazott. A vizsgálat helyszíne Debrecen, a vizsgálandó növény a kukorica, a Dekalb 471-et és specifikus jellemzőit választottuk, mint vizsgálandó fajtát, a választott talaj típusa a helyszínek megfelelően réti csernozjom. A scenáriókat a 31 futás alapján számolt átlagok alapján hasonítottuk össze. A napok sorszáma a naptári napot jelenti.

A fejlődési szakaszokat a 4M program beosztása szerint különböztettük meg és számoztuk be (2. táblázat).

Fejlődési fázisok leírása	4M-féle beosztás
Vetés előtti	0
Vetéstől csírázásig	1
Csírázástól kelésig	2
Keléstől a juvenilis fázis végéig	3
A juvenilis fázis végétől címerinicializációig	4
Címerinicializációtól a levélnövekedés végéig és nővirágzásig	5
Nővirágzástól az effektív szemtelítődés kezdetéig	6
Az effektív szemtelítődés szakasza	7
A fiziológiai érés szakasza	8

2. táblázat: A kukorica fejlődési fázisai a 4M (Kovács és Fodor, 2005) modellben

4.1. A kukorica fenológiai fázisainak alakulása különböző időjárási adatsorok esetén

A továbbiakban csökkent/növekedett szó esetén, azokat az eltéréseket vesszük figyelembe, ahol az eltérés 95%-os valószínűségi szinten szignifikáns.

Az első fenofázis (vetéstől a csírázásig) minden esetben a 106-ik napon kezdődik, a modell beállítása szerint ez egy napig tart, így az első fázist értelemszerűen nem vizsgáltuk.

2. fenofázis (csírázástól kelésig) kezdő napja

A OMSZ adatsora esetében a fenofázis a 123-ik napon kezdődik el. A GFDL5564 esetén a 118. napon, míg az UKHI-nál a 112-edik, az UKLO-nál 111-edik, az UKTR esetén pedig a 119- edik nap a második fenofázis első napja. Tehát a 2. fenofázis kezdő napja minden scenárió esetében jelentősen előbbre tolódott.

2. fenofázis (csírázástól kelésig) hossza

Az OMSZ adatsora alapján a második fenofázis hossza 18 nap. A GFDL2534 esetén 16 nap, a GFDL5564-nél 13 nap, míg az UKHI-nál 7, az UKLO-nál 6 nap, az UKTR esetén pedig 14 nap a második fenofázis hossza. Tehát a második fenofázis hossza is csökkent. Ezek alapján várható, hogy a többi fejlődési szakasz kezdeti időpontjánál a 2. fenofázisnak jelentős szerepe lesz.

3. fenofázis (keléstől juvenilis fázis végéig) kezdő napja

A OMSZ adatsora esetében ez a fenofázis a 145. napon kezdődik el. A GFDL5564 esetén a 140. napon, míg az UKHI-nál a 128.-edik, az UKLO-nál 126.-edik nap a harmadik fenofázis első napja. Tehát a 3. fenofázis kezdő napja is előbbre tolódott.

3.fenofázis (Keléstől juvenilis fázis végéig) hossza

Az OMSZ adatsora alapján a harmadik fenofázis hossza 22 nap. Míg az UKHI-nál 16 nap, az UKLO-nál pedig 15 nap. Tehát a harmadik fenofázis hossza csökkent.

Bár a többi scenáriónal nem rövidül a harmadik fenofázis hossza, de a második fenofázis rövidülésének hatására még mindig várhatóan hamarabb kezdődik majd el a negyedik fenofázis, mint a múltban tapasztalható.

4. fenofázis (a juvenilis fázis végétől címerinicializációig) kezdő napja

A OMSZ adatsora alapján ez a fejlődési szakasz a 153. napon kezdődik el. A GFDL5564 esetén a 146. napon, míg az UKHI-nál a 134-edik, az UKLO-nál pedig a 132-edik nap a negyedik fenofázis első napja. Tehát megállapíthatjuk, hogy a 4. fenofázis kezdete is hamarabb várható.

4. fenofázis (a juvenilis fázis végétől címerinicializációig) hossza

Az OMSZ adatsora alapján a negyedik fenofázis hossza 8 nap. Míg a GFDL2534 esetén 7 nap, a GFDL 5564, az UKHI, UKLO és az UKTR esetén 6 nap. Tehát a negyedik fenofázis hossza is csökkent.

5. fenofázis (címerinicializációtól a levélnövekedés végéig és nővirágzásig) kezdő napja

A OMSZ adatsora alapján ez a fenofázis a 196. napon kezdődik el. A GFDL5564 esetén a 186. napon, míg az UKHI-nál a 171.-edik, az UKLO-nál 167.-edik nap az ötödik fejlődési szakasz első napja. Tehát az 5. fenofázis kezdő napja előbbre tolódott.

5. fenofázis (Címerinicializációtól a levélnövekedés végéig és nővirágzásig) hossza

Az OMSZ adatsora alapján az ötödik fenofázis hossza 43 nap. A GFDL5564 esetén 40 nap, míg az UKHI-nál 37 nap, az UKLO-nál pedig 35 nap. Tehát a hatodik fejlődési szakasz hamarabbi kezdete ezen scenáriók esetében nemcsak az előző fázisok rövidülésével lesz magyarázható.

6. fenofázis (nővirágzástól az effektív szemtelítődés kezdetéig) kezdő napja

A múltbeli időjárás adatsor esetén ez a fenofázis a 210. napon kezdődik el. A GFDL5564 esetén a 198. napon, míg az UKHI-nál a 182.-edik, az UKLO-nál 178.-adik nap, az UKTR esetén pedig a 203. nap a hatodik fenofázis első napja. Tehát az 6. fenofázis kezdő napja is majdnem minden scenárió esetén előbbre tolódott.

6. fenofázis (Nővirágzástól az effektív szemtelítődés kezdetéig) hossza

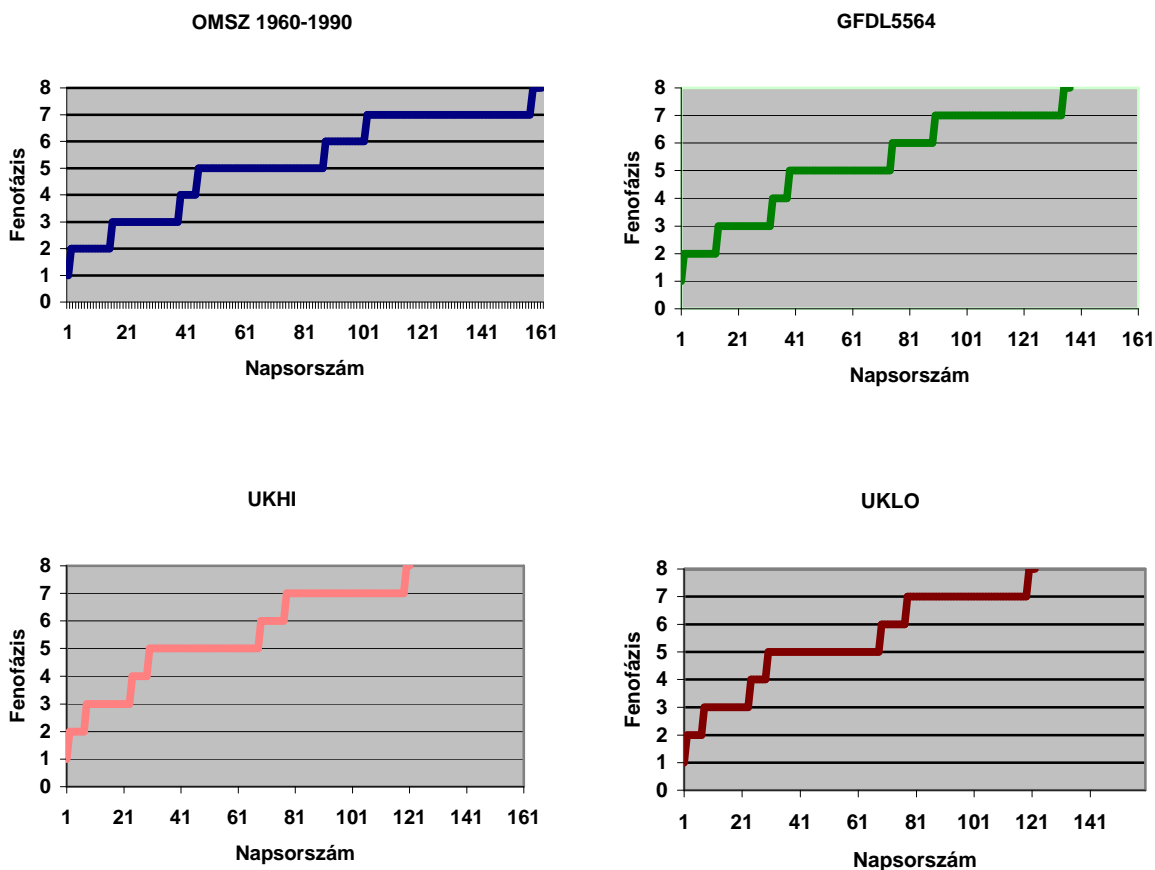
A múltbeli időjárás adatsorra futtatva a modellt azt láthatjuk, hogy a hatodik fenofázis hossza 13 nap. Az UKHI-nál és UKLO-nál két nappal rövidebb, azaz csökkent a 6. fenofázis hossza.

7. fenofázis (Az effektív szemtelítődés szakasza) kezdő napja

A múltbeli időjárás adatsor esetében ez a fenofázis a 264. napon kezdődik el. A GFDL5564 esetén a 240. napon, míg az UKHI-nál a 214-edik, az UKLO-nál 211-edik nap a hetedik fenofázis első napja. Tehát a 7. fenofázis kezdő napja – egyes esetekben nagyon jelentősen - előbbre tolódott.

7. fenofázis (Az effektív szemtelítődés szakasza) hossza

A múltbeli időjárási adatsor esetén a hetedik fenofázis hossza 54 nap. Az UKHI és UKLO szcenáriók a többinél itt is sokkal szélsőségesebb eredményt mutatnak, azaz 32 és 33 napot.



10-13 ábra: A kukorica fejlődési szakaszainak alakulása a 4M modell alapján, a múltbeli időjárási paraméterek és a GFDL5564, UKHI, UKLO klímaszcenáriókra vonatkozó meteorológiai paraméterek hatásának összehasonlítása

(Az ábrán a napok sorszáma a vegetációs időszakra vonatkozik, azaz a napok sorszámánál 106-tal kevesebb, mivel a szimuláció 106-ik napról indul.)

8. fenofázis (a fiziológiai érés szakasza) napja

A 8. fenofázis hossza egy napnak van definiálva, hiszen ez az érés napja. A referencia időszak időjárási adataira futtatva a modellt ez az időpont a 265-ik napra esik. A GFDL5564 esetén a 241-ik napra, míg az UKHI-nál a 215-ra, az UKLO-nál 212-edik napra, az UKTR esetén pedig a 203-ik napra esik az érés időpontja a 4M-mel való szimulációs kísérlet alapján.

Összességében elmondható, hogy a hőmérsékletemelkedés hatására a kukorica fenológiai fázisainak rövidülése valószínűsíthető, így a fázisok kezdeti időpontja, valamint az érés is hamarabbra várható a klímaváltozási scenáriók előrejelzése szerint. Az előző négy ábrán (10-13. ábra) a múltbeli adatokra és a szignifikánsan leginkább különböző klímaváltozási scenáriókra kapott eredményt grafikusan is szemléltetjük.

4.2. Az eredmények statisztikai kiértékelése a ROPstat program segítségével

Független minták egyszempontos összehasonlítása

Minden fejlődési szakasz esetében először a csoportonkénti alapstatisztikák értékeit tüntetjük fel. Ezek megmutatják az adott fenológiai fázisra vonatkozó átlag, szórás, valamint a minimum és a maximum értékeket minden vizsgált meteorológiai adatsor esetében. Ezt követi az átlagok Games-Howell-féle páronkénti összehasonlítása, melynek során páronként hasonlítjuk össze a scenáriókat., kivéve a 6. fenofázis hosszának, a 7. fenofázis kezdeti időpontjának, valamint a 8. fejlődési szakasz vizsgálatának esetében, ahol a kiértékelés alapján az elméleti szórások egyezése feltételezhető és az átlagok Tukey-Kramer-féle páronkénti összehasonlítását végezzük el a statisztikai program segítségével (ilyenkor a szabadsági fok 210). Minden esetben a két illetve három csillaggal jelölt két scenárió tekintjük egymástól különbözőnek. Ezeket az eredményeket a továbbiakban fenológiai fázisonként a hossza és a kezdő napra is bemutatjuk.

Jelölések:

T_{ij}: az i-edik és j-edik indexű időjárás adatok összehasonlítására vonatkozó érték

+: $p < 0,10$ * : $p < 0,05$ **: $p < 0,01$ ***: $p < 0,001$

Az első fenofázis (vetéstől a csírázásig) minden esetben egységesen a 106-ik napon kezdődik, a modell beállítása szerint ez egy napig tart, így az első fázist itt sem vizsgáltuk.

2. fenofázis (csírázástól kelésig) hosszának vizsgálata

Index eredet	Esetek	Átlag	Szórás	Minimum	Maximum
1. OMSZ	31	18,23	5,005	9	27
2. Gfdl2534	31	15,81	3,754	9	24
3. Gfdl5564	31	12,71	2,710	8	20
4. Ukhi	31	6,645	0,915	5	8
5. Uklo	31	6,419	0,923	5	9
6. Ukrt3140	31	13,97	3,281	8	22

(az elméleti szórások különbözhetnek, zárójelben a szabadsági fokok):

T_{12(7; 56)}= 3,04 T_{13(7; 46)}= 7,63** T_{14(7; 32)}= 17,92**

T_{15(7; 32)}= 18,27** T_{16(7; 52)}= 5,60**

2. fenofázis (csírázástól kelésig) kezdő napjának vizsgálata

Index eredet	Esetek	Átlag	Szórás	Minimum	Maximum
1. OMSZ	31	123,23	5,005	114	132
2. Gfdl2534	31	120,81	3,754	114	129
3. Gfdl5564	31	117,71	2,710	113	125
4. Ukhi	31	111,65	0,915	110	113
5. Uklo	31	111,42	0,923	110	114
6. Ukrt3140	31	118,97	3,281	113	127

(az elméleti szórások különbözhetnek, zárójelben a szabadsági fokok):

T12(7; 56)= 3,04 T13(7; 46)= 7,63** T14(7; 32)= 17,92**

T15(7; 32)= 18,27** T16(7; 52)= 5,60**

3.fenofázis (keléstől a juvenilis fázis végéig) hosszának vizsgálata

Index eredet	Esetek	Átlag	Szórás	Minimum	Maximum
1. OMSZ	31	22,39	4,248	17	30
2. Gfdl2534	31	24,32	3,350	16	31
3. Gfdl5564	31	22,42	3,031	15	28
4. Ukhi	31	16,45	2,142	13	22
5. Uklo	31	14,65	2,090	11	19
6. Ukrt3140	31	24,19	3,468	15	30

(az elméleti szórások különbözhetnek, zárójelben a szabadsági fokok):

T12(7; 57)= 2,82 T13(7; 54)= 0,05 T14(7; 44)= 9,82**

T15(7; 44)= 12,88** T16(7; 58)= 2,59

3. fenofázis (keléstől a juvenilis fázis végéig) kezdő napjának vizsgálata

Index eredet	Esetek	Átlag	Szórás	Minimum	Maximum
1. OMSZ	31	145,61	5,892	136	159
2. Gfdl2534	31	145,13	4,951	134	156
3. Gfdl5564	31	140,13	4,280	131	150
4. Ukhi	31	128,10	2,574	123	134
5. Uklo	31	126,06	2,462	122	131
6. Ukrt3140	31	143,16	4,967	132	155

(az elméleti szórások különbözhetnek, zárójelben a szabadsági fokok):

T12(7; 58)= 0,50 T13(7; 55)= 5,93** T14(7; 41)= 21,45**

T15(7; 40)= 24,11** T16(7; 58)= 2,51

4. fenofázis (a juvenilis fázis végétől a címerinicializációig) hosszának vizsgálata

Index eredet	Esetek	Átlag	Szórás	Minimum	Maximum
1. OMSZ	31	7,710	0,461	7	8
2. Gfdl2534	31	6,548	0,675	4	7
3. Gfdl5564	31	6,290	0,461	6	7
4. Ukhi	31	6,000	0	6	6
5. Uklo	31	6,000	0	6	6
6. Ukrt3140	31	6,452	0,506	6	7

(az elméleti szórások különbözhetnek, zárójelben a szabadsági fokok):

T12(7; 53)= 11,18** T13(7; 60)= 17,13** T14(7; 60)= 21,08**

T15(7; 60)= 21,08** T16(7; 59)= 14,47**

4. fenofázis (a juvenilis fázis végétől a címerinicializációig) kezdő napjának vizsgálata

Index eredet	Esetek	Átlag	Szórás	Minimum	Maximum
1. OMSZ	31	153,32	6,204	143	167
2. Gfdl2534	31	151,68	5,350	140	163
3. Gfdl5564	31	146,42	4,653	137	157
4. Ukhi	31	134,10	2,574	129	140
5. Uklo	31	132,06	2,462	128	137
6. Ukrt3140	31	149,61	5,389	138	162

(az elméleti szórások különbözhetnek, zárójelben a szabadsági fokok):

T12(7; 59)= 1,58 T13(7; 56)= 7,01** T14(7; 40)= 22,54**

T15(7; 39)= 25,08** T16(7; 59)= 3,55

5. fenofázis (címerinicializációtól a levélnövekedés végéig és nővirágzásig) hosszának vizsgálata

Index eredet	Esetek	Átlag	Szórás	Minimum	Maximum
1. OMSZ	31	43,06	4,049	37	52
2. Gfdl2534	31	39,68	3,682	32	47
3. Gfdl5564	31	39,61	3,283	34	45
4. Ukhi	31	36,94	2,351	33	43
5. Uklo	31	35,19	2,868	30	43
6. Ukrt3140	31	40,39	3,792	33	48

(az elméleti szórások különbözhetnek, zárójelben a szabadsági fokok):

T12(7; 59)= 4,87* T13(7; 58)= 5,21** T14(7; 48)= 10,31**

T15(7; 54)= 12,49** T16(7; 60)= 3,80

5. fenofázis (címerinicializációtól a levélnövekedés végéig és nővirágzásig) kezdő napjának vizsgálata

Index eredet	Esetek	Átlag	Szórás	Minimum	Maximum
1. OMSZ	31	196,39	8,102	181	215
2. Gfdl2534	31	191,35	6,080	177	204
3. Gfdl5564	31	186,03	4,916	175	196
4. Ukhi	31	171,03	2,456	166	177
5. Uklo	31	167,26	3,724	158	176
6. Ukrt3140	31	190,00	6,072	176	204

(az elméleti szórások különbözhetnek, zárójelben a szabadsági fokok):

T12(7; 56)= 3,91 T13(7; 49)= 8,60** T14(7; 35)= 23,58**

T15(7; 42)= 25,72** T16(7; 56)= 4,97*

6. fenofázis (nővirágzástól az effektív szemtelítődés kezdetéig) hosszának vizsgálata

Index eredet	Esetek	Átlag	Szórás	Minimum	Maximum
1. OMSZ	31	13,35	1,889	10	16
2. Gfdl2534	31	12,35	1,473	10	15
3. Gfdl5564	31	12,06	1,389	10	15
4. Ukhi	31	11,32	1,558	9	15
5. Uklo	31	10,77	1,334	9	14
6. Ukrt3140	31	12,65	1,355	10	15

:

T12= 3,56 T13= 4,60* T14= 7,24** T15= 9,20** T16= 2,53

6. fenofázis (nővirágzástól az effektív szemtelítődés kezdetéig) kezdő napjának vizsgálata

Index eredet	Esetek	Átlag	Szórás	Minimum	Maximum
1. OMSZ	31	209,74	8,246	194	229
2. Gfdl2534	31	203,71	5,751	192	216
3. Gfdl5564	31	198,10	4,657	189	208
4. Ukhi	31	182,35	3,241	176	190
5. Uklo	31	178,03	3,920	168	188
6. Ukrt3140	31	202,65	5,583	191	216

(az elméleti szórások különbözhetnek, zárójelben a szabadsági fokok):

T12(7; 54)= 4,72* T13(7; 47)= 9,68** T14(7; 39)= 24,34**

T15(7; 43)= 27,35** T16(7; 53)= 5,61**

7. fenofázis (az effektív szemtelítődés szakasza) hosszának vizsgálata

Index eredet	Esetek	Átlag	Szórás	Minimum	Maximum
1. OMSZ	31	53,97	8,035	40	77
2. Gfdl2534	31	42,10	13,93	4	58
3. Gfdl5564	31	41,94	8,394	1	52
4. Ukhi	31	31,61	11,99	5	42
5. Uklo	31	32,77	1,783	29	36
6. Ukrt3140	31	42,58	7,667	8	53

(az elméleti szórások különbözhetnek, zárójelben a szabadsági fokok)

T12(7; 48)= 5,81** T13(7; 60)= 8,15** T14(7; 52)= 12,19**

T15(7; 33)= 20,27** T16(7; 60)= 8,07**

7. fenofázis (Az effektív szemtelítődés szakasza) kezdő napjának vizsgálata

Index eredet	Esetek	Átlag	Szórás	Minimum	Maximum
1. OMSZ	31	263,71	14,9	234	297
2. Gfdl2534	31	245,81	16,56	207	274
3. Gfdl5564	31	240,03	10,44	196	255
4. Ukhi	31	213,97	12,95	181	227
5. Uklo	31	210,81	3,487	204	220
6. Ukrt3140	31	254,90	15,42	206	242

T12= 4,20* T13= 5,55** T14= 11,66** T15= 12,40** T16= 2,06

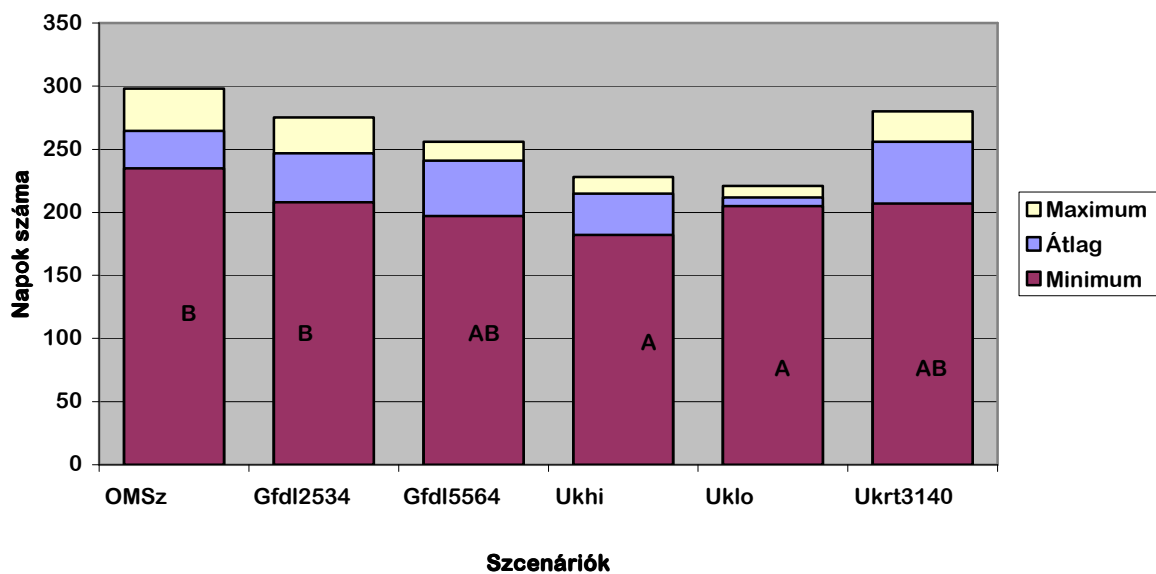
8. fenofázis (a fiziológiai érés szakasza) napjának vizsgálata

Index eredet	Esetek	Átlag	Szórás	Minimum	Maximum
1. OMSZ	31	264,65	14,78	235	298
2. Gfdl2534	31	246,81	16,56	208	275
3. Gfdl5564	31	241,03	10,44	197	256
4. Ukhi	31	214,97	12,95	182	228
5. Uklo	31	211,81	3,487	205	221
6. Ukrt3140	31	255,90	17,16	207	280

T12= 4,18+ T13= 5,54** T14= 11,65** T15= 12,40** T16= 2,05

A fenti eredményeket elemezve és összefoglalva elmondhatjuk, hogy a Gfdl5564, az Ukhi és Uklo klímaszcenáriók minden esetben (kivéve csak a 3. és 6. fenofázis hosszát) szignifikáns (**) eltérést mutatnak a múltbeli adatokhoz (OMSZ) képest. Az Uktr3140 időjárási paramétereinek hatása pedig még több esetben is eltérést mutatott az OMSZ-os paraméterek hatásától: a 2. fenofázis hosszára és kezdeti napjának időpontjára, a 6. fenofázis kezdeti időpontjára, valamint a 4. és 7. fenofázisok hosszára vonatkozóan, de ott minden scenárió esetén szignifikáns eltérést tapasztalunk. A különböző időjárási adatsorok meteorológiai paramétereikhez tartozó hatások eltérése még jobban látható, ha az eredményeket grafikusán ábrázoljuk a legfontosabb, 8. fenofázisra, azaz az érés időpontjára. Az eltérések a 31 éves futássorozat alapján kapott minimumok és maximumok feltüntetésével még jobban láthatók (14. ábra).

A 8. fenofázis, az érés napja



14.ábra A 8. fenofázis kezdő napja, a különböző scenáriók esetén

(A-val jelöljük, a hasonlóan kicsi, AB-vel a hasonlóan közepes, B-vel a hasonlóan nagy értékeket)

Az átlagok és szórások alapján elmondható, hogy megbízható eredményeket kaptunk, hiszen a szimuláció eredményeinek variációs koefficienseit (a szórás százalékos aránya az átlaghoz viszonyítva. Méréskor ez nem más, mint a relatív hiba. Dimenzió nélküli szám, bármely adathalmaz variációs koefficiense összehasonlíthat.) számolva és összehasonlítva a múltbeli adatokra és a klímaváltozási scenáriókra, azok szinte minden esetben csökkentek, azaz a változékonyság mértéke kicsi.

Fázisok	OMSZ	GFDL2534	Gfdl5564	Ukhi	Uklo	Uktr
2. fenofázis hossza	0,275	0,24	0,213	0,138	0,144	0,235
2.fázis első nap	0,0406	0,0315	0,023	0,0082	0,0083	0,0276
3. fenofázis hossza	0,19	0,139	0,135	0,13	0,143	0,143
3.fenofázis első nap	0,0405	0,0347	0,0305	0,0201	0,0195	0,0347
4. fenofázis hossza	0,0598	0,0739	0,0734	0	0	0,0784
4.fenofázis első nap	0,0405	0,0358	0,0318	0,0192	0,0186	0,036
5. fenofázis hossza	0,094	0,0933	0,0829	0,0637	0,0815	0,0939
5.fenofázis első nap	0,0413	0,032	0,0264	0,0144	0,0223	0,032
6. fenofázis hossza	0,141	0,119	0,115	0,138	0,124	0,107
6.fenofázis első nap	0,0393	0,0282	0,0235	0,0178	0,022	0,209
7. fenofázis hossza	0,149	0,335	0,2	0,379	0,0544	0,210
7.fenofázis első nap	0,0566	0,0684	0,0435	0,0605	0,0165	0,211
8.fenofázis első nap	0,0558	0,0681	0,0433	0,0602	0,0165	0,212

3.táblázat: Variációs koefficiens az adott fenológiai fázisokban, a vizsgált időjárási adatsorok esetén

5. Tézisek

1. Minden fenológiai fázis hossza csökkent minden scenárió esetén.
2. Minden fenológiai fázis kezdő napja előbbre tolódott minden scenárió esetén.
3. A múltbeli időjárási adatsor esetén a hetedik fenofázis hossza 54 nap. Az UKHI és UKLO scenáriók sokkal szélsőségesebb eredményt mutatnak, azaz 32 és 33 napot.
4. Az 1°C-os hőmérsékletemelkedés megrövidíti a kukorica minden fenológiai fázisát.
5. UKHI-nál és UKLO-nál a hatodik fenofázis hossza két nappal rövidebb, mint az OMSZ adatsorához tartozó, a hatodik fenofázisra vonatkozó vizsgálat esetén.
6. Az Ukhi és Uklo scenárióknál nagyon megrövidül a harmadik fenofázis hossza, a többi klímascenárióknál nem annyira jelentősen, viszont a második fenofázis rövidülése annyira jelentős, hogy hatása végig húzódik és erősíti a többi fejlődési szakasz hamarabbi bekövetkezését.
7. A hőmérsékletemelkedés hatására a kukorica fenológiai fázisainak rövidülése valószínűsíthető, így a fázisok kezdeti időpontja, valamint az érés is hamarabbra várható a klímaváltozási scenáriók előrejelzése szerint.

6. Megvitatás

A kultúrnövények sokkal szembetűnőbben reagálnak a környezeti tényezőkre, mint a vadontermő növények, mert az utóbbiak számukra kedvező termőhelyen élnek, a kultúrnövények pedig sokszor olyan termőhelyre kerülnek, amely nem minden tekintetben felel meg igényeiknek.

Klimatikus adottságaink kedvezőek a növénytermesztésre, bár az időjárási- elsősorban a csapadékok eloszlásában jelentkező szélsőségek és ingadozások veszélyeztetik a termés biztonságát. A víz káros többlete vagy hiánya az ország területének nagyobb részén 60%-os valószínűséggel a növénytermesztés korlátozó, azaz a termést csökkentő, a minőséget rontó, termesztési költséget növelő tényezőként jelenik meg.

A növények élete szempontjából nem egyforma súlyú minden meteorológiai elem. Növényélettani szempontból ki kell emelni a víz és a hőmérséklet jelentőségét, amelyek minden növényre jellemző életfeltételnek számítanak (Nyiri, 1993). A Tenyészidő hosszának változását vizsgálva Varga-Haszonits kutató csoportja összefüggést talált a hőmérséklet növekedés és a tenyészidőszak hossza között.

Brown és Rosenberg (1999) a klímaváltozás lehetséges hatásait vizsgálva a kukoricatermesztésre, GISS, UKTR és BMRC scenáriókat alkalmazva megállapították, hogy a kukorica számára a GISS paraméterei bizonyultak a legjobbnak. (A termés mennyiség 19%-kal nőtt.) Míg az UKTR és a BMRC esetén 40%-al csökkent a termés mennyiség.

Az UKTR eredményei párhuzamot mutatnak az ezen dolgozat alapjául szolgáló kísérlet tapasztalataival, miszerint az UKTR hatására nem történik termés ill. biomassa mennyiség növekedés.

A klíma változékonysága, tehát a hosszabb időintervallumokban megnyilvánuló klímastabilitás hiánya (és annak mértéke) meghatározó jelentőségű valamennyi földi ökoszisztéma állapota és állapotváltozásai szempontjából. A klíma változékonyságának mértéke (klímparaméterek alakulásának együttes varianciája) önmagában is jelentős heterogenitást mutat úgy térben (regionálisan), mint időben (vizsgálati időablakok szerint). A változékonyság mértéke és annak tér- és időbeli mintázata, ugyanakkor jelentős mértékben skálafüggő attribútum mindkét vonatkozásban. További módszertani problémát jelent az a tény, hogy nemcsak a hatótényező (esetünkben a klíma változékonysága), hanem a különböző természetes és ember által befolyásolt ökoszisztémák (mint a hatást fogadó rendszerek), szintén alapvető heterogenitást mutatnak a hatással szembeni érzékenységük szempontjából. Az érzékenység ebben az összefüggésben az egységnyi hatás-mennyiségre eső állapotváltozással és annak dinamikájával jellemezhető. Az ökoszisztémák, mint szabályozási folyamatokra képes rendszerek, ráadásul nem egyszerűen passzív „elszenvedői” a hatásoknak, hanem azokra különböző mértékű és jellegű alkalmazkodással reagálnak. Ember által befolyásolt ökoszisztémák esetén ez az alkalmazkodás a humán tevékenység és a beavatkozások optimalizálását igényelné, amelynek ma még jelentős módszertani hiányosságai vannak.

Mindezek a viszonyok, úgy a klimatikus hatásuk, mint az ökoszisztémák reakciói illetve az emberi tevékenység szempontjából alapvető és meghatározó szerepet játszanak az ökoszisztémák fenntarthatóságában és az ezzel szemben megnyilvánuló kockázatokra. A kockázat fogalma ez esetben a különböző lehetséges állapotváltozások mértékével és azok bekövetkezési valószínűségeivel (illetve múltbeli relatív gyakoriságaikkal) jellemezhető.

További kutatási irányként szóba jöhet, a kukorica és kártevői kapcsolatának vizsgálata. Elképzelhető továbbá különböző művelési módok vagy agrotechnikai módszerek bevonása a kísérletbe, illetve más paraméterekkel rendelkező scenáriók hatásának tesztelése a biomassa

és szemtermés mennyiségére. Egyéb fejlesztési lehetőség még a kukorica élettani tulajdonságainak megfigyelése (vízhiány stressz stb.) klímaváltozás esetén, valamint különféle öntözési eljárások tükrében.

Az eddigi eredmények birtokában a legfontosabb továbblépési lehetőséget a modell továbbfejlesztése jelenti. Ennek jelenleg három fő iránya látszik kibontakozni:

1. A kukorica növény egyedszintű modellezéséről célszerű lenne áttérni az állományszintű modellezésre, ami azt is jelentené, hogy a makroklímára vonatkozó klímaszcenáriók és a növény igényei közé egy mezo- illetve mikroklíma modult is be kellene iktatni. Ugyanebbe a kérdéskörbe tartozik a tisztán időbeli szimulációról a tér-időbeli szimulációra való áttérés is, ami már a térbeli inhomogenitásokat (pl. talaj és tápanyag térképek, domborzat stb.) is inputként tudná kezelni, ezzel biztosabb alapot nyújthatna a precíziós kukoricatermesztés tervezéséhez is. Erre vonatkozóan már vannak kezdeti lépéseink.
2. Növényvédelmi szempontból a legfontosabb továbblépési lehetőséget a komplex agroökoszisztéma modellezés jelenti, amely a kukoricán kívül a legfontosabb gyomok, kórokozók, kártevők és azok természetes ellenségeit is figyelembe veszi, kölcsönhatási hálózat formájában. Ennek módszertana Ladányi dolgozatában (2006) részletes kifejtésre került.
3. Végül, de nem utolsósorban alapvető továbblépési irányt jelentene, ha a jelenlegi tisztán determinisztikus folyamatszémleletről áttérnénk a sztochasztikus szimulációra, amely megalapozhatná egy egzakt kockázatelemzés lehetőségét is.

Ebben a kutatómunkában azonban nemcsak a modell fejlesztési lehetőségei jelenthetnek továbblépést, hanem a szcenáriókra vonatkozó input adatok is. Jelenleg a GCM-ekből statisztikai úton nyert direkt leskálázások adatsorait használják világszerte (és így mi is). Nyilvánvalóan sokkal megbízhatóbb eredményekhez jutnánk, ha e helyett a GCM-ekbe beágyazott Regionális Klímamodellek outputjait használnánk a modell inputjaiként. Minőségileg új helyzet áll majd elő a modellezésben, ha a jelenlegi egy-egy pontra (városi mérőállomásra) leskálázott szcenáriók helyett, maguk a klímaadatok is térképi formában kerülnének feldolgozásra. Ennek jelenleg legrealisabbnak tűnő megvalósítása a diszkrét térfelosztásban (raszteres térképállományok) keresendő. Így Debrecen és Győrön kívül – több városra is lennének klímaszcenáriók, ezáltal a klímaváltozás hatásai hazánk egyéb régióira is vizsgálhatók lennének a közeljövőre nézve.

Egy egészen új kutatási irányt jelenhetne, ha mindezen fejlesztések megvalósítása, már egy indirekt ordinációs módszertanon alapuló stabil állapotúrendszer keretében valósulhatna meg, amely a jelenleginél sokkal árnyaltabb formában tenné lehetővé a modell tesztelését, kalibrálását, validálását, valamint a szimulációval és monitoringgal nyert adatsorok együttes kezelését is (Hufnagel és Gaál, 2005).

7. Összefoglaló

A globális klímaváltozásnak komoly következményei várhatóak a mezőgazdaságban. A kukoricatermesztésre leginkább a hőmérséklet és a csapadékszint változás van hatással. Célunk az éghajlatváltozás hatásának vizsgálata a kukorica adott fenológiai fázisainak hosszára és a fázisok kezdő napjának időpontjára öt különböző időjárási scenárió (GFDL2534, GFDL5564, UKHI, UKLO és UKTR3140) illetve referencia időszakuk, az 1960-1990-ig tartó 31 éves időintervallum (OMSZ adatai) figyelembe vételével. Szimulációs kísérletünket a 4M modellel végeztük, melynek helyszíne Debrecen volt, mert jelentős szerepe van a magyarországi kukoricatermesztésben. Összességében elmondható, hogy a hőmérsékletemelkedés hatására a kukorica fenológiai fázisai lerövidültek és a fenológiai fázisok kezdeti időpontjai előbbre tolódtak.

8. Summary

Global climate change has a major influence on agriculture. The phenological phases of corn are largely affected by temperature and precipitation changes. Our aim was to study the effect of five of the most acceptable, different weather scenarios (GFDL2534, GFDL5564, UKHI, UKLO and UKTR3140) comparing with the real data of their reference period 1960-1990, containing the daily radiation, temperature and precipitation for 31 years. The location of our experiment was the Debrecen region, which is of big importance in Hungary's maize production. While living under changing climate conditions, one of our most urgent tasks is to define the optimal preparation and response strategies to the conditions in change. This time we wanted to see what can we expect, how the length and the starting dates of phenological phases of maize change in the case of different scenarios. The simulations were run by the 4M crop model which is based on the CERES model and developed by the Hungarian Agricultural Model Designer Group and adapted to Hungarian circumstances. In summary, it can be said that phenological phases of maize shortened and happened earlier as a result of temperature increase. Studies for different circumstances in agriculture are needed in order to help us prepare for the future.

9. Köszönetnyilvánítás

Köszönöm Erdélyi Éva (egyetemi adjunktus), témavezetőmnek, hogy mindenben támogatott s minden lehetséges módon segítette a munkámat.

Köszönöm Dr. Ferenczy Antalnak (PhD egyetemi adjunktus), konzulensemnek, hogy részt vállalt a modellezéssel kapcsolatos feladatokban.

Köszönöm Dr. Harnos Zsoltnak MHAS, Széchenyi díjas egyetemi tanárnak, aki rendelkezésemre bocsátotta a nemzetközi klímaszcenáriók Debrecenre leskálázott napi adatait.

Köszönöm a Budapesti Corvinus Egyetem Matematika és Informatika tanszék munkatársainak, hogy észrevételeikkel hozzájárultak a dolgozatomhoz.

Köszönöm Dr. Huzsvai László egyetemi docensnek (Debreceni Egyetem), hogy a napsütéses órákat globálsugárzásra átszámoló programját rendelkezésünkre bocsátotta.

Köszönöm Dr. Szabó Csaba, DSc, habil. mestertanárnak, hogy a Tudományos Diákköri Konferenciákon szerzett tapasztalatait velünk megosztotta, hasznos tanácsaival támogatott.

Munkámat az OTKA T042583 és a NKFP 6-00079/2005 projekt támogatta, a BCE, Matematika és Informatika Tanszéken keresztül.

10. Irodalomjegyzék

- [1] Ángyán, J. (szerk.) (1987) Agróökológia modellek a kukoricatermesztésben. Az agroökológiai körzetek és a területi fejlesztés. Budapest, Közgazdasági és Jogi Könyvkiadó.
- [2] Balázs, S. (1989) Zöldségtermesztők kézikönyve, Mezőgazdasági Könyvkiadó
- [3] 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, cClimatic Variability and Agriculture in Europa. An Integratid Assessment. Annual Report 1996. Oxford: Environmental Changa Institut, University of Oxford. 13-18 p
- [4] Bartholy J., Matyasovszky I., (1998): A Kárpát-medence hőmérsékleti és csapadék viszonyainak alakulása a globális éghajlatváltozások tükrében. - Meteorológiai Tudományos Napok 97, Az éghajlatváltozás és következményei (Szerkesztette: Dunkel Z.), Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 117-125pp.
- [5] Bootsma,-A; Gameda,-S; McKenney,-D-W (2005) : Potential impacts of climate change on corn, soybeans and barley yields in Atlantic Canada. Canadian-Journal-of-Soil-Science. 85(2): 345-357
- [6] Brown, R.A., Rosenberg, N.J. (1999): Impacts on climate change potential production of corn, sorghum, soybean, and winter wheat in the conterminous United States for application to the PNNL Global Change assessment model. Report to the Electric Power Research Institute under project PNNL 20305 and agreement# WO2141-22 (formerly RP3341-02).
- [7] Bussay, A., Szinell, Cs., Szentimrey, T. (1999): Az aszály magyarországi előfordulásainak vizsgálata és mérhetősége. 6-66pp. In: Szalay S. – Dunay, S (szerk.): Éghajlati és Agrometeorológiai Tanulmányok. O. M. SZ., Budapest.
- [8] Csáki Cs. (1976) Szimuláció alkalmazása a mezőgazdaságban, 5. oldal

- [9] É. Erdélyi (2003): Nutrient-in-Soil Model as a Module of a Complex Agro-Ecosystem, 4th International Conference of PhD Students, Miskolc, p. 235-240.
- [10] Gaál, M., Horváth, L. 2006. Geographical analogies in climate change research, HAICTA, Greece , pp. 840-846.
- [11] Harnos, N. (2003): A Klímaváltozás hatásának szimulációs vizsgálata őszi búza termelésére. - „Agro-21” füzetek, Az agrárgazdaság jövőképe. 31. szám: 56-72 oldal
- [12] Hufnagel, L., Gaál, M. (2005): Seasonal dynamic pattern analysis in service of Climate Change Research – Applied Ecology and Environmental Research 3(1): 79-132.
- [13] Huzsvai, L., Pető, K., Kovács G. J. (1995) Szimulációs modell alkalmazása a növénytermesztési kutatásban. Tiszántúli Mezőgazdasági Tudományos Napok, Hódmezővásárhely. 149-151
- [18] Ibrikci,-H; Ulger,-A-C; Cakir,-B; Buyuk,-G; Guzel,-N (1998): Modeling approach to nitrogen uptake by field-grown corn. Journal-of-Plant-Nutrition. 21(9): 1943-1954
- [19] IPCC: Climate Change 1995: The Science of Climate Change, (Eds. Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callander, B., Harris, N., Kattenberg, A. & Maskell, K.), 1996. Cambridge University Press, Cambridge
- [20] Kovács G. J., Fodor N. (2005): A klímaváltozás tápanyagforgalomra gyakorolt hatásának becslése. A magyar mezőgazdaság elemforgalma 1901 és 2003 között. 221-234 oldal
- [21] Láng, I. (2006): A Globális klímaváltozás:hazai hatások és válaszok – VAHAVA zárójelentés. Budapest, MTA
- [22] Láng, G., dr. (1976): Szántóföldi növénytermesztés. Mezőgazdasági Könyvkiadó Vállalat

- [23] Ladányi, M. (2006): Folyamatszempléletű alternatívák az agroökológiai modellezésben. PHD értekezés kézirat BCE, Matematika és Informatika Tanszék
- [24] Mészáros, E. (2001): Éghajlatváltozás: természetes vagy emberi hatások. Magyar Tudomány, 11: 1315-1319 pp.
- [25] Menyhért, Z. (1979): Kukoricáról a termelőknek, Mezőgazdasági Kiadó, Budapest
- [26] Mika, J. (2002): A globális Klímaváltozásról: Egy meteorológus kutató szemszögéből. Fizikai szemle, 52: 258-268 pp.
- [29] Nánási Irén (szerk.) (2005) Humánökológia, Medicina könyvkiadó Rt. Budapest
- [30] Nyiri L. (1993) Földműveléstan, Mezőgazda Kiadó, Budapest
- [31] Overman,-A-R; Scholtz,-R-V,-III (2004) : Model analysis for growth response of corn. Journal-of-Plant-Nutrition.; 27(5): 885-906
- [32] Stefanovits P. (1963) Magyarország talajai, 2. átdolgozott kiadás. Akadémiai Kiadó Bp. 442 p.
- [33] Varga-Haszonits Zoltán (1977): Agrometeorológia, Mezőgazdasági Kiadó, Budapest
- [34] Varga-Haszonits, Z., Botos, L. (szerk.) (1974): Agroklimatológia és növénytermesztés. Budapest, MÉM, OMSZ
- [35] Varga-Haszonits, Z. (1987): Agrometeorológiai információk és hasznosításuk. Budapest, Mezőgazdasági Kiadó
- [36] Varga-Haszonits, Z. (2003): Az éghajlatváltozás mezőgazdasági hatásának elemzése, éghajlati scénáriók, „Agro-21” Füzetek, 31. sz.

elektronikus források:

Bartholy,J.(2004): www.origo.hu/mindentudasegyeteme/bartholy/20040913Bartholy1

<http://met.hu/pages/climate/de/Navig/Index2.htm>

<http://ropstat.com>