

PANNON EGYETEM
GEORGIKON KAR
Meteorológia és Vízgazdálkodás Tanszék

ÁLLAT- ÉS AGRÁRKÖRNYEZET-TUDOMÁNYI
DOKTORI ISKOLA
Környezet- tudományok Tudományág

Iskolavezető:
Dr. habil. Anda Angéla
az MTA doktora

Konzulens:
Dr. habil. Anda Angéla
az MTA doktora

AZ ÉGHAJLATVÁLTOZÁS HATÁSÁNAK SZIMULÁCIÓJA KUKORICÁN

Készítette:
DIÓSSY LÁSZLÓ

KESZTHELY

2011

AZ ÉGHAJLAT VÁLTOZÁS HATÁSÁNAK SZIMULÁCIÓJA KUKORICÁN

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében

Írta:

Dióssy László

Készült a Pannon Egyetem Állat- és Agrárkörnyezet-tudományi Doktori Iskolája keretében

Konzulens: Dr habil. Anda Angéla

Elfogadásra javaslom igen / nem

.....
(aláírás)

A jelölt a doktori szigorlaton % - ot ért el.

Keszthely,

.....
a Szigorlati Bizottság elnöke

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom:

Bíráló neve: igen / nem

.....
(aláírás)

Bíráló neve: igen / nem

.....
(aláírás)

*Bíráló neve: igen / nem

.....
(aláírás)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján % - ot ért el.

Keszthely,

.....
a Bíráló Bizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése

.....
az EDHT elnöke

Megjegyzés: * esetleges

TARTALOMJEGYZÉK

KIVONAT	5
ABSTRACT	6
ABSTRAKTE	7
1. BEVEZETÉS	8
1.1. A vizsgálat célkitűzése.....	8
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	9
2.1. A globális klímaváltozás	9
2.2. Az éghajlatváltozás hazánkban.....	15
2.3. A klímaváltozás hatásai a növénytermesztésre	20
2.3.1. A klímaváltozás növénytermesztési vonatkozásai	20
2.3.2. A klímaváltozás hatásai a hazai növénytermesztésre.....	23
2.3.3. A klímaváltozás hatásai a hazai kukoricatermesztésre	24
2.4. Az agrometeorológiai modellezés.....	32
3. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	35
3.1. A modellezéshez használt adatok forrása, a helyszín.....	35
3.2. A Goudriaan-féle szimulációs modell (CMSM).....	37
3.3. A modellezés során felhasznált outputok számítása	42
3.4. A modell bemenő adatigénye.....	45
3.5. A modell verifikálása	50
3.6. Az alkalmazott scenáriók.....	52
4. EREDMÉNYEK.....	56
4.1. A Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia (NÉS)	56
4.2. A bemutatásra választott növénymagasság, a cső szintjének szimulációs eredményei	60
4.3. Az állományon belüli léghőmérséklet alakulása.....	61
4.4. A cső-színti növényhőmérséklet alakulása	69
4.5. Az állományon belüli légnedvesség.....	72
4.6. A sztóma ellenállás és a párolgás	75
4.7. A napi párolgásösszeg és a havi vízfogyasztás kukoricában átlagos júliusi körülmények feltételezése esetén.....	82
4.8. A szén asszimiláció folyamatában bekövetkező változások.....	84
4.8.1. A légzés intenzitás változása	84
4.8.2. A szén-asszimiláció alakulása a nappali órákban	87

4.9. Az állomány energia felhasználásának alakulása: a szenzibilis és a latens hő változásai	90
4.9.1. <i>A szenzibilis hőfluxus alakulása</i>	<i>91</i>
4.9.2. <i>A latens hő alakulása forgatókönyvenként</i>	<i>95</i>
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS TÉZISEK.....	98
6. CONCLUSIONS AND THESES	103
7. ÖSSZEFOGLALÁS	108
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	112
8. IRODALOMJEGYZÉK.....	113

KIVONAT

A globális klímaváltozáshoz történő alkalmazkodás nagy kihívást jelent, de még nem rendelkezünk elég ismerettel annak globális és lokális hatásairól.

Vizsgálatainkban a kukorica termesztésének feltételrendszerében történő változásokat elemeztük 2071-2100 közötti időszakra és Keszthelyre vonatkozóan.

A keszthelyi Agrometeorológiai Kutatóállomáson több évtizede folyó mikroklíma megfigyeléseket és meglévő növényi adatokat felhasználva mikrometeorológiai szimulációs modellezés segítségével határoztuk meg a globális felmelegedés hazánkra leskálázott értékei alapján a növényi tulajdonságok módosulását.

A jövőképek kialakításánál a megduplázott CO₂ koncentráció mellett az alkalmazott scenáriók az eltérő mértékű felmelegedés mellett a csapadékelátásban különböztek egymástól.

Megállapítottuk, hogy az alapfuttatáshoz képest az állományon belüli léghőmérséklet szignifikánsan melegedett. A felmelegedés növeli a növényhőmérsékletet, de nem akkora mértékben, mint ahogy a külső léghőmérséklet növekszik.

A szenzibilis és latens hő arányai átlagos júliust feltételezve nem változtak.

A megemelt CO₂ koncentráció a sztóma réseket szűkítette, de 6°C feletti havi átlagos nyári melegedésnél pozitív hatás megjelenésével nem célszerű számolni.

Vizsgálataink során tett lokális megállapításaink segítséget nyújthatnak a helybeli gazdálkodóknak a várható negatív változásokra való felkészülésben.

ABSTRACT

SIMULATION OF THE IMPACTS OF GLOBAL CLIMATE CHANGE IN MAIZE

The adaptation to global climate change is a big challenge but we do not have enough information on its global and local effects as yet.

Our analyses dealt with the changes occurring in the conditions of maize production in Keszthely between the period of 2071-2100.

Changes in plant characteristics have been determined on the basis of the values of global warming applied to Hungarian conditions, with the help of micrometeorological simulation modelling, by using the microclimate observations and existing plant data of several decades performed by the Agrometeorological Research Station of Keszthely.

At the elaboration of the scenarios, the applied ones differed from each other at the doubled CO₂ concentration, in the degree of warming-up and in the quantity of precipitation.

It was found that the canopy inside air temperature has significantly risen compared to the basic run. Warming-up increases the plant temperature, but not to the same extent as the external air temperature rises.

Assuming an average July, the ratio of sensible and latent heat did not change.

The raised CO₂ concentration narrowed the stoma openings, but it is not expedient to calculate with the emergence of positive effects in the case of a monthly average summer warming-up of above 6 °C.

The findings of our analyses could provide help for the local farmers in the preparation in defending against the adverse effects of the expected changes.

ABSTRAKTE

SIMULATION DER AUSWIRKUNGEN DER KLIMAÄNDERUNG BEI MAIS

Die Anpassung zur globalen Klimaänderung bedeutet eine große Herausforderung, aber wir verfügen noch nicht über ausreichende Kenntnisse, ihre globalen und lokalen Wirkungen betreffend.

In unseren Prüfungen analysierten wir die im Bedingungssystem des Maisanbaues erfolgenden Änderungen im Zeitraum von 2071 bis 2100 in Keszthely.

Aufgrund der Verwendung der – an der Agrometeorologischen Forschungsstation zu Keszthely seit mehreren Jahrzehnten laufenden – Beobachtungen des Mikroklimas und den zur Verfügung stehenden pflanzlichen Daten bestimmten wir mit Hilfe des mikrometeorologischen Simulationsmodellierens die Veränderungen der pflanzlichen Eigenschaften aufgrund der auf unser Land abgebildeten Werte der globalen Erwärmung.

Bei der Gestaltung des Zukunftsbildes wiechen die angewandten Szenarios neben verdoppelter CO₂ - Konzentration, neben der verschiedenen Erwärmung auch an der Niederschlagsversorgung ab.

Wir stellten fest, dass die Lufttemperatur im Bestand, gemessen zu den Vergleichsbasisdaten, sich signifikant erhöhte. Die Erwärmung erhöht die Pflanzentemperatur, aber nicht in solchem Maß, wie sich die Außenlufttemperatur erhöht.

Angenommen in einem durchschnittlichen Juli ändert sich das Verhältnis der sensiblen und der latenten Wärme nicht.

Die erhöhte CO₂ - Konzentration engte die Stomata ein, aber mit einer durchschnittlichen monatlichen Erwärmung im Sommer über 6 °C ist nicht sachgemäß, zu rechnen.

Unsere während der Analysen festgestellten Grundaussagen können den örtlichen Landwirten bei den Vorbereitungen auf die Abschwächung der Wirkungen der erwartenden negativen Änderungen helfen.

1. BEVEZETÉS

A globális klímaváltozás napjainkban az emberiség egyik legnagyobb kihívása. A klímaváltozás tényét – és azon belül is az emberi tevékenység szerepét – a megfigyelések és kutatások egyre inkább alátámasztják. A klímaváltozás ma kettős kihívást jelent. Egyrészt az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésével lehet megelőzni azok súlyos következményeit, másrészt pedig a társadalomnak a hatásukhoz kell alkalmazkodniuk. Magyarország középtávú klímapolitikája a VAHAVA (Változás – Hatás – Válaszadás) tudományos kutatásra alapozva került kidolgozásra, melynek szakmai előkészítőjeként nagy hangsúlyt fektettünk arra, hogy a Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia (NÉS) az éghajlatváltozás következményeihez való alkalmazkodás lehetőségeit alaposan számba vegye az agrártermelés – mezőgazdálkodás területén is.

A középtávra szóló feladatok meghatározása mellett azonban a tudományos kutatásnak rendkívüli szerepe van abban, hogy a globális felmelegedés negatív hatásainak ellensúlyozására, valamint a szükséges és lehetséges alkalmazkodásra való felkészüléshez a gazdálkodók számára segítséget nyújtson úgy, hogy az alkalmazkodási eljárásoknak a helyi körülményekhez szükséges igazodniuk (Láng 2006).

A klímaváltozás regionális scenáriói, a jól felhasználható szimulációs modell, a rendelkezésre álló keszthelyi növényi és meteorológiai adatok felhasználásával elvégzett kutatás segítségével a század végére is levonhatók irányadó következtetések.

1.1. A vizsgálat célkitűzése

Vizsgálataink célja Keszthelyen a kukorica termesztésének feltételrendszerében várható változások bemutatása a 2071 és 2100 közötti időszakra vonatkozóan, az éghajlati változások tükrében.

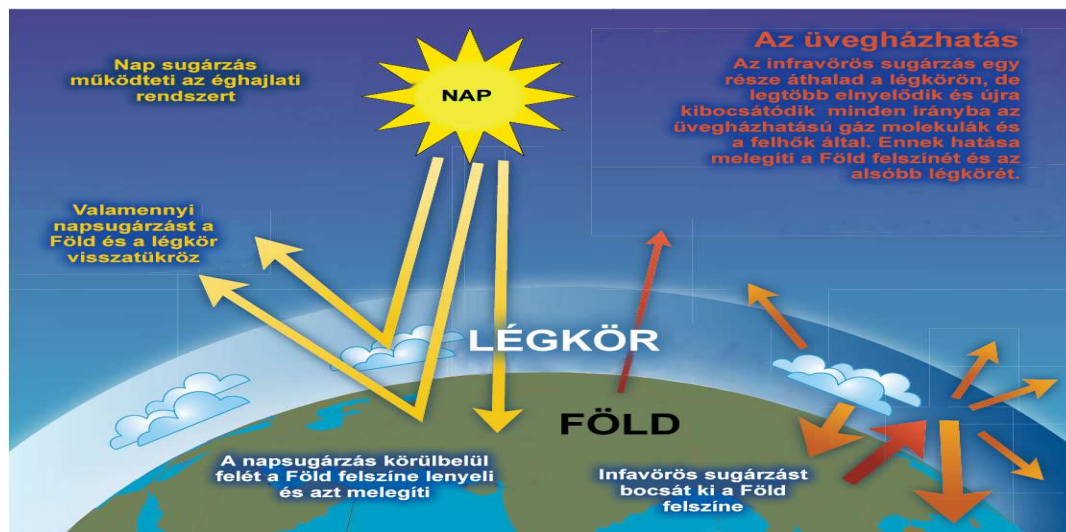
Mikrometeorológiai szimulációs vizsgálattal kívántuk meghatározni, hogy a klímaváltozás következtében fellépő CO₂ koncentrációváltozás, a felmelegedés, a csapadékelátás különbözősége milyen hatással van a kukorica növényélettani folyamataira.

Célunk az volt, hogy lokális szintű információkat nyújtsunk annak érdekében, hogy a várható negatív hatások elhárítására való felkészülést időben meg lehessen kezdeni.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. A globális klímaváltozás

A Föld hőmérsékletét a Napból érkező és a Föld felszínéről a világűrbe távozó sugárzási energia egyensúlya határozza meg. A légkörben egyes gázok a Napból érkező rövid hullámhosszú sugárzást akadálytalanul átengedik, de a földfelszín felől érkező hosszúhullámú sugárzást elnyelik. Ettől az alsó légkör felmelegszik, s ezek is hősugarakat bocsátanak ki magukból, vagyis ez által a talaj közelében tartják az energiát. A jelenséget az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra Az üvegházhatás egyszerűsített folyamata (IPCC 2007)

Az üvegházhatás természetes folyamat, e nélkül a földi átlaghőmérséklet 33°C-kal lenne alacsonyabb. Ha a Föld légkörében nem lenne vízgőz, szén-dioxid (CO₂), metán (CH₄) és más olyan gázok, amelyek a hosszúhullámú sugárzás jelentős részét nem engedik eltávozni, akkor a Föld felszín közeli léghőmérséklete -18 °C körül alakulna. A legjelentősebb természetes üvegházhatású gázok a vízgőz (H₂O), a szén-dioxid, a metán, és a dinitrogén-oxid (N₂O).

A legnagyobb mértékben a vízgőz járul hozzá az üvegházhatáshoz, de a légköri tartózkodási ideje csupán mintegy 10 nap. Mennyiségét leginkább a természetes folyamatok és a légkör hőmérséklete határozza meg.

Ezzel szemben a másik három gáz viszonylag hosszú ideig (10-200 év) tartózkodik a légkörben, be- és kikerülési arányukat és így légköri koncentrációjukat elsősorban az emberi tevékenységek határozzák meg.

Az üvegházhatású gázok lényeges tulajdonsága, hogy hosszú légköri tartózkodási idejük miatt a forrásoktól nagy távolságra sodródva, egyenletesen elkeverednek az egész Földön. E tulajdonságuk egyben azt is jelenti, hogy az üvegházhatás erősödése csak a Föld valamennyi szennyező forrására kiterjedő korlátozással mérsékelhető (Mika 1997).

Az ipari forradalom óta az emberiség fosszilis tüzelőanyag-felhasználása és az egyre intenzívebb mezőgazdasági termelés növelte az összes, légkörben hosszú ideig tartózkodó üvegházhatású gázok kibocsátását. Az egyes ipari tevékenységek természetes üvegházhatású gázok mellett mesterséges üvegház-hatású gázokat is kibocsátanak, ilyenek például a fluorozott szénhidrogének (HFC-134), a perfluor-karbonok (HFC-23) és a kén-hexafluorid (SF₆). Minden üvegházhatású gáz különböző mértékben járul hozzá a globális felmelegedéshez sugárzási tulajdonságától, molekuláris tömegétől és légköri tartózkodási idejétől függően. Az üvegházhatású gázok légköri tartózkodási idejét, illetve üvegházhatásának mértékét az 1. táblázat mutatja be.

1. táblázat Az üvegházhatású gázok légtérben való tartózkodási ideje, légköri felmelegítő képessége (GWP) , (IPCC 2007)

Üvegházhatású gáz	Tartózkodási idő (év)	GWP* különböző időskálán		
		20 éves	100 éves	500 éves
CO ₂	változó	1	1	1
CH ₄	10,8	67	23	6,9
N ₂ O	114	291	298	153
HFC-134a	14	3830	1430	435
HFC-23	270	12000	14800	12200
SF ₆	3200	16300	22800	32600

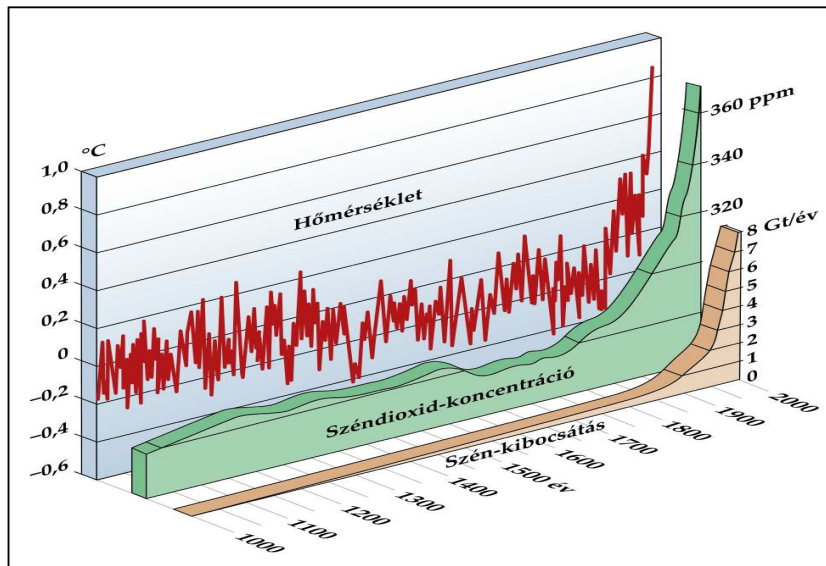
*Global warming potential

Az emberi tevékenység más módon is hatással van az éghajlatra. Az energiatermelés, az ipar és a közlekedés egyaránt forrásai a légkörben lebegő kisebb-nagyobb úgynevezett aeroszol részecskéknél, melyek a Nap sugárzásának egy részét visszaverik vagy elnyelik, azaz gyengítik a felszínre érkező napsugárzást, ezáltal csökkentik az üvegházhatású gázok által okozott felmelegedést (Mika 1997). Ezekről a részecskékről a bejövő napsugárzás egy része visszaverődik a világűr felé, s így hűtő hatást fejthetnek ki. Befolyásuk fontos lehet az erősen szennyezett területeken, de az üvegházhatású gázokkal ellentétben nem halmozódnak fel a légkörben, mert vagy a gravitáció, illetve a leszálló légáramlatok hatására száraz ülepedéssel, vagy csapadék útján nedves ülepedéssel néhány hét alatt kikerülnek onnan. Továbbá az olyan emberi tevékenységek, amelyek megváltoztatják egy adott terület felszínét, szintén befolyásolják a sugárzási egyenleget, mivel a különböző típusú felszínek eltérő mértékben verik vissza a bejövő napsugárzást. Ilyen tevékenységek például a mezőgazdaság és az erdőirtás.

Az antarktiszi és grönlandi jégből vett minták alapján korszerű vizsgálati módszerekkel történt az utóbbi 160 ezer év jellemző CO₂ koncentrációinak meghatározása (Mészáros 1999). A jégfuratokból vett levegőmintákból megállapítható, hogy az ipari forradalom előtt a CO₂ légköri koncentrációja milliomodrész mértékegységben kifejezve nem haladta meg a 300 ppm¹-et; azonban ez a koncentráció 2006-ban azonban már elérte a 381 ppm értéket, vagyis az utóbbi 650 ezer év legmagasabb koncentrációját. A vizsgálatok kimutatták azt is, hogy az ipari forradalom óta a metán mennyisége a légkörben megduplázódott, a dinitrogén-oxidé pedig 20 százalékkal nőtt. A jelenkor éghajlatváltozásának vizsgálatakor rendkívül fontos szem előtt tartani, hogy nemcsak az elmúlt száz év alatt bekövetkezett, illetve a 2100-ra előre jelzett globális felmelegedés mértéke ad okot aggodalomra, hanem az a tény is, hogy a több Celsius fokos változás a hőmérsékletben néhány évszázad alatt következik be. Ez azt jelenti, hogy körülbelül 50-szer, 100-szor gyorsabban, mint a földtörténeti korok során. Légkörünk CO₂ tartalma jelenleg évente átlagosan 0,3%-kal emelkedik, az évszázad második felében valószínűleg eléri az ipari forradalom kezdete (1750) előtti érték kétszeresét. Ez a növekedés sokszorosan nagyobb a bolygónk eddigi történetében természetes okokból bekövetkezett CO₂ változások üteménél (Szesztay és Szabó 1992).

A hőmérséklet, a CO₂ koncentráció és a CO₂ kibocsátás elmúlt 1000 évre vonatkozó változásaiból kiderül, hogy mindhárom érték az elmúlt 100 évben gyors ütemben emelkedett (2. ábra).

¹ ppm: part per million



2.ábra A hőmérséklet, a CO₂ koncentráció és a CO₂ kibocsátás alakulása az elmúlt 1000 évben (IPCC 2007)

A hőmérsékleti feljegyzések azt jelzik, hogy a Föld felszín közeli léghőmérséklete világátlagban 0,7°C-ot melegedett a múlt század kezdetétől. A tíz legmelegebb év – az 1861-es feljegyzések óta -1990 után következett be. A valaha mért legmelegebb év 1998 volt.

Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change) 2007-ben közzétett negyedik értékelő jelentése szerint a Föld északi féltekéjének hóval fedett területe 10 százalékkal csökkent az 1960-as évek óta, ráadásul a világ nagy részén a gleccserek jelentősen visszahúzódtak. Az arktikus tengeri jég 40 százalékkal vékonyodott az elmúlt évtizedekben, és 1950 óta pedig késő nyáron 15 százalékkal csökkent a kiterjedése. A legutóbbi becslések szerint csak az elmúlt évtizedben 8 százalékkal csökkent a tengeri jég területe. A tengeri jég olvadása nem emeli ugyan a tengerszintet, de a jégpáncél eltűnése megkönnyíti a kontinentális jég óceánba való áramlását, hozzájárulva a tengerszint emelkedéséhez és a földfelszínsugárzás visszaverő képességének módosításához.

Amíg a jégfelszín a ráeső sugárzás körülbelül 90 százalékát visszaveri, addig az óceán vize a ráeső sugárzás alig több mint 10 százalékát.

A globális felmelegedés regionálisan eltérő mértékben jelentkezett. Nagyobb hőmérsékletemelkedés következett be a szárazföldek felett, még nagyobb az északi félteke magasabb szélességein (északi irányban). Az Arktiszon a hőmérséklet a globális átlaghoz

képest kétszer gyorsabban nőtt az 1970-es évek közepe óta, de az alaskai átlaghőmérséklet is nagyon gyorsan melegeedett az elmúlt két évtizedben, ami drámai hatással volt a környezetre, a növényekre, állatokra és emberi társadalmakra.

A tengerszint évente 1-2 millimétert emelkedett a 20. században, elsősorban az óceánok hőtágulása és a gleccserek olvadása következtében jelenleg az emelkedés már eléri az évi 4-6 mm-t. Számos növény- és állatfaj húzódott északabbra, a pólusok felé az elmúlt évtizedekben. A növények virágzása, a vándormadarak megérkezése, néhány madár költési időszakának kezdete és a rovarok felbukkanása korábban következik be az északi félteke közepes és magas szélességi köreinek nagy részén. Sok helyen a rovarok és kártevők már sokkal könnyebben áttelelnek.

Európa-szerte is jó néhány drámai áradásról lehetett hallani az elmúlt évtizedben. Valószínűleg az évezred legmelegebb nyara volt 2003, amely több mint 35 ezer ember halálát okozta Európában. Hazánkban 2007-ben volt az addig mért és rögzített leghosszabb és legmelegebb időszak a legszélsőségesebb nyáron, mikor is három hőhullám érintette az országot. A többlethalálozás körülbelül 730 esetben felelt meg (*Páldy és Bobvos 2008*).

Az IPCC (2007) negyedik értékelő jelentése minden korábbinál határozottabban állítja, hogy az emberi tevékenység felelős az egyre gyorsuló globális felmelegedésért.

A klíma kutatás fő áramlata és a klíma szkeptikusok között az utóbbi időben Magyarországon is felerősödött és nagy visszhangot kapott vita szól arról, hogy pontosan mi és hogyan okozza globális felmelegedést. *Miskolczi (2007 és 2010)* szerint a Föld légköre sokkal átlátszóbb a hősugárzás számára, mint ahogyan eddig számolták és 1948-2008 között állandó volt a légkör optikai mélysége, vagyis nem változott az üvegházhatású gázok miatt (minél kevesebb hősugárzást nyel el egy anyag réteg, optikai mélysége annál kisebb).

Robert van Dorland tételes cáfolata *Haszpra és Weidinger (2010)* mellett *Henk A. R. de Bruin (2010)* mutatott rá a Miskolczi féle elmélet tarthatatlan és megalapozatlan voltára.

Mivel a Miskolczi féle elméletet a tudomány széles berkei nem fogadták be, nem ismerték el, kutatásainkban az IPCC jelentéseire és megállapításaira támaszkodunk, valamint azokat fogadjuk el hivatkozási alapként.

Az IPCC által meghatározott különböző kibocsátási forgatókönyvek mindegyike szerint a globális átlaghőmérséklet emelkedése várható a 21. században. A legnagyobb változást előrejelző 2007-es forgatókönyv szerint a földi átlaghőmérséklet 2100-ban akár 6,4°C-kal is magasabb lehet az 1980–1999 közötti időszak átlaghőmérsékleténél. Ugyanehhez az időszakhoz képest 2100-ra a világtengerek szintje is emelkedni fog 0,2-0,6 méterrel pusztán a

felmelegedés hatására bekövetkező óceáni víz hőtágulása miatt. Az emberi tevékenység által előidézett felmelegedés és ennek hatására a világtenger szintjének emelkedése a 21. század során még akkor is folytatódik, ha az üvegházhatású gázok kibocsátását sikerül szinten tartani.

Jelenleg a bioszféra globális léptékben több szén-dioxidot vesz fel, mint amennyit kibocsát. Az emberi tevékenység által kibocsátott szén-dioxid egy részét is felveszi, így fékezve a légköri szén-dioxid szint növekedését, az üvegházhatás erősödését, a globális éghajlatváltozást. Elméleti megfontolások és laboratóriumi kísérletek azonban azt jelzik, hogy az éghajlat melegedésével a bioszféra nettó szén-dioxid felvétele mérséklődni fog, majd nettó forrássá válhat, ami felgyorsíthatja a globális éghajlatváltozást. *Haszpra* (2008) mérései természetes körülmények között igazolták a jelenséget.

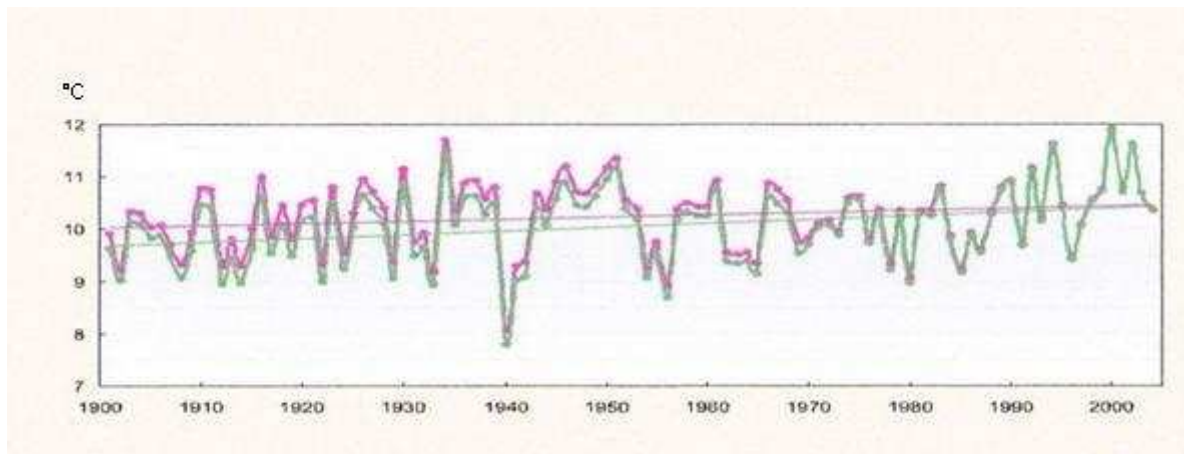
A globális hőmérséklet emelkedésével a hirtelen és vélhetően megfordíthatatlan változások gyakorisága megnövekszik, és ezek súlyos következményekkel járhatnak. Ilyen változás lehet pl: - a grönlandi és a nyugat-antarktiszi jégtakarók elolvadása;

- csökkenhet az Észak-atlanti áramlás erőssége, amely 2–3°C-os hűtő hatást gyakorol az európai régióban;
- a jelenleg még fagyott északi mocsarak kibocsátókká válhatnak azzal, hogy az olvadás hatására az eddig fagyott földből metán szabadul fel.

A klímaváltozás a nemcsak szélsőséges időjárási események gyakoribbá válása mellett - közvetett hatásként - társadalmi konfliktusokkal is jár. A klímaváltozás hatásai különösen a világnak azon régióit sújthatják a leginkább, ahol az érintett országok irányítási és problémamegoldási kapacitása már jelenleg is gyenge. Ez viszont növeli annak valószínűségét, hogy erőszakos konfliktusok jönnek létre. A klímaváltozás érezhető gazdasági költséget fog jelenteni különösen a fejlődő országoknak: a mezőgazdasági termelés visszaesése, szélsőséges időjárási jelenségek és az ebből fakadó migráció nehezítik a gazdasági fejlődést. A klímaváltozás kiélezi az erőforrás-hiányt, s ez elvándorláshoz vezethet a kedvezőbb természeti adottságokkal rendelkező régiók irányába.

2. 2. Az éghajlatváltozás hazánkban

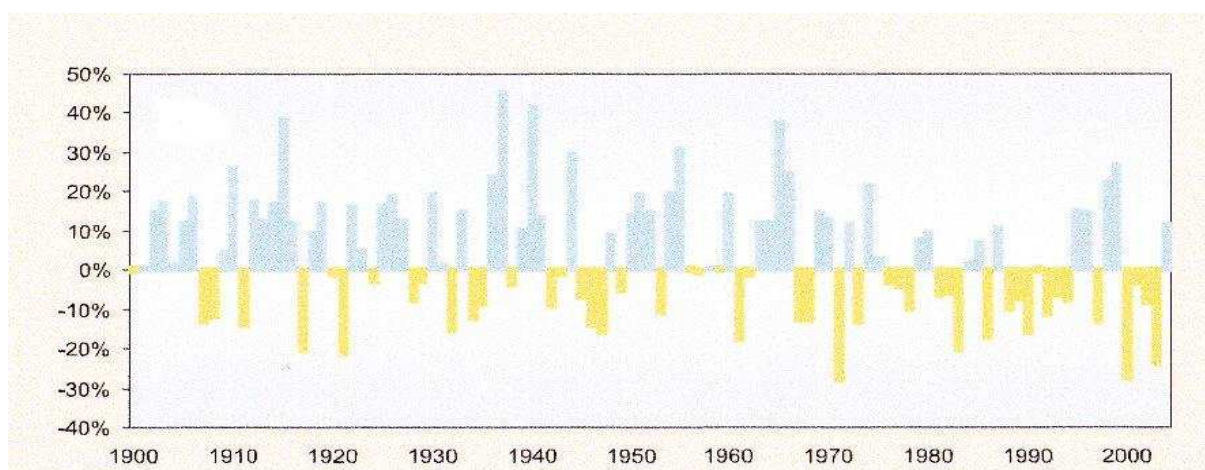
Az éves középhőmérsékletek sorozata a XX. század elejétől tendenciájában jól követi a globális hőmérséklet alakulását. Az 1901 – 2004 közötti időszakban a melegedés mintegy 0,76 °C – ot tesz ki (3. ábra)



3. ábra Magyarország évi középhőmérsékletének alakulása 1901 - 2004 között, °C

Megjegyzés: lila: eredeti adatsor, zöld: homogenizált adatok (Szalai et al. 2005)

A csapadékosabb évek jellemzőbben a múlt század első felében léptek fel, így a csapadék csökkenése az 1901-2004 között elérte a 11%-ot (4. ábra).

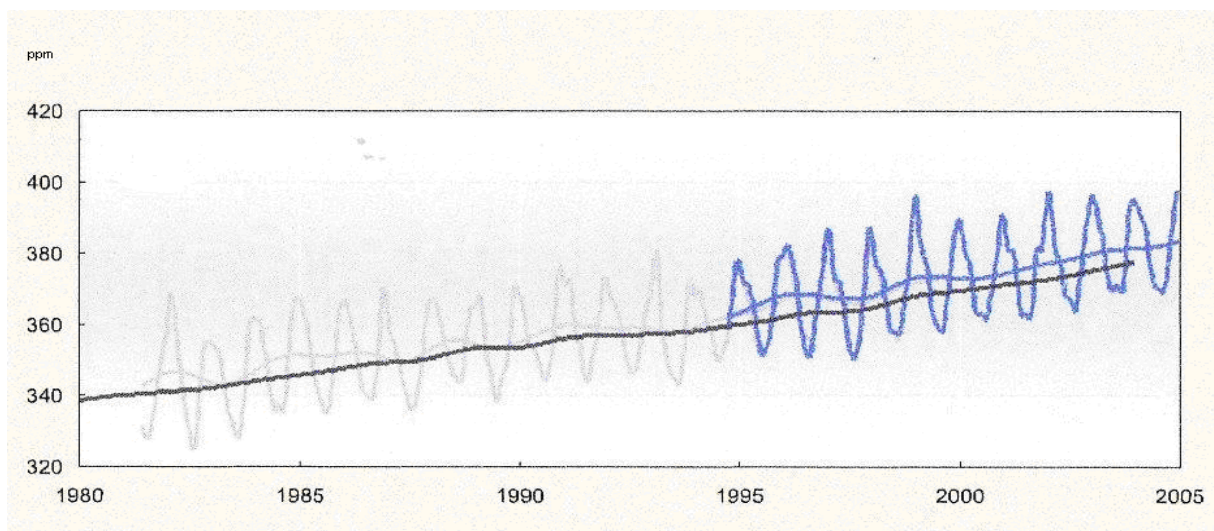


4. ábra Az éves csapadékösszegek országos átlagainak anomáliái (Szalai et al. 2005)

A légkör szén-dioxid tartalmának növekedése az egyik legjelentősebb tényező az üvegházhatás erősödésében. Koncentrációja 2005-ben világviszonylatban meghaladta a 375 ppm-et, ami magasabb, mint az elmúlt 20 millió évben bármikor volt. A hazai háttérszennyező állomáson a múlt század 80-as évek elejétől mérik a CO₂ tartalmat, az azóta eltelt időszakban éves mennyisége több mint 10 % - kal emelkedett, 2005-ben meghaladta a 380 ppm mennyiséget Magyarországon is (5. ábra).

A hazai szén-dioxid koncentráció tendenciája valamivel a globális háttér-koncentráció értéke felett halad.

A hazai mérések és a földrajzi szélességünkre vonatkozó globális háttér-koncentráció átlagos különbsége 4,2 ppm. A koncentráció növekedési üteme az 1980-as évek elején még csak 1,4 ppm volt évente, míg a legutóbbi öt évre már elérte a 2,1 ppm-et. A hegyhátsági mérések szerint 2008-ban a hazai CO₂ koncentráció megközelítette a 390 ppm-et (Haszpra 2008).



5. ábra A légköri széndioxid koncentráció alakulása Magyarországon, ppm

Megjegyzés: a világos rész K-pusztai, a sötét szín Hegyhátsál; a vastag görbék a trend értékeket jelentik, a fekete vonal a globális háttér-koncentráció trendje

(Szalai et al. 2005)

A hazánkra előjelzett változások a természetes ökoszisztémákat, az erdőállományokat, a mezőgazdaságot, a vízgazdálkodást és az emberi egészséget egyaránt érintik.

Az Európai Unió PRUDENCE (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects) programja által nyílt lehetőség arra,

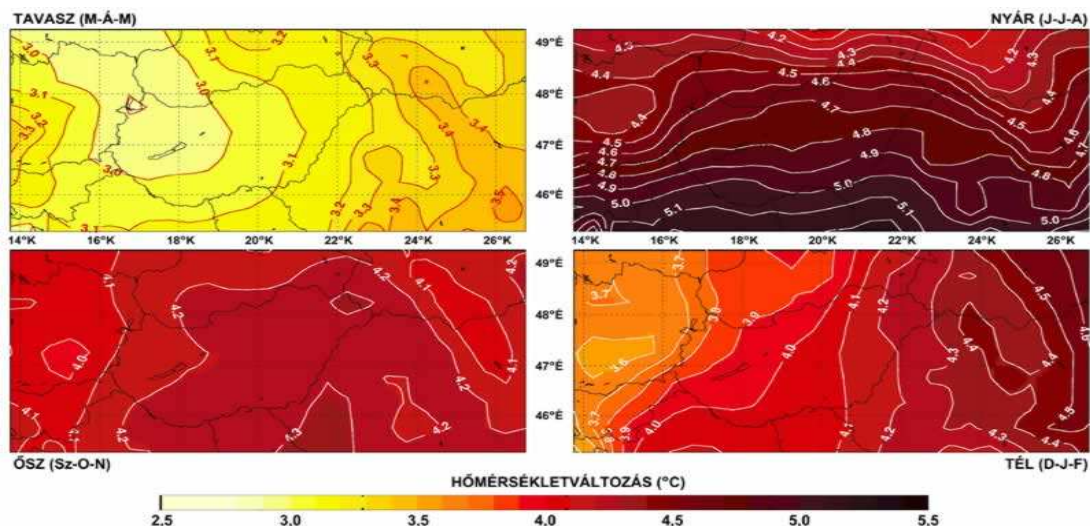
hogy Magyarország térségére a hőmérséklet és a csapadék várható alakulását részletesebben becsülni lehessen a 2071-2100 időszakra (a viszonyítási időszak: az 1961–1990 között eltelt harminc év). A modellek számításaiban bizonytalansági tényező is van, de segítségével lehetőség nyílt integrált vizsgálatok elvégzésére Magyarországra, illetve az egész Kárpát-medence térségére vonatkozóan. A szimulációk alapján kapott eredményeket a 2. táblázat szemlélteti.

2. táblázat 1°C fokos átlagos globális felmelegedéshez tartozó éghajlatváltozás
Magyarországon (PRUDENCE 2005)

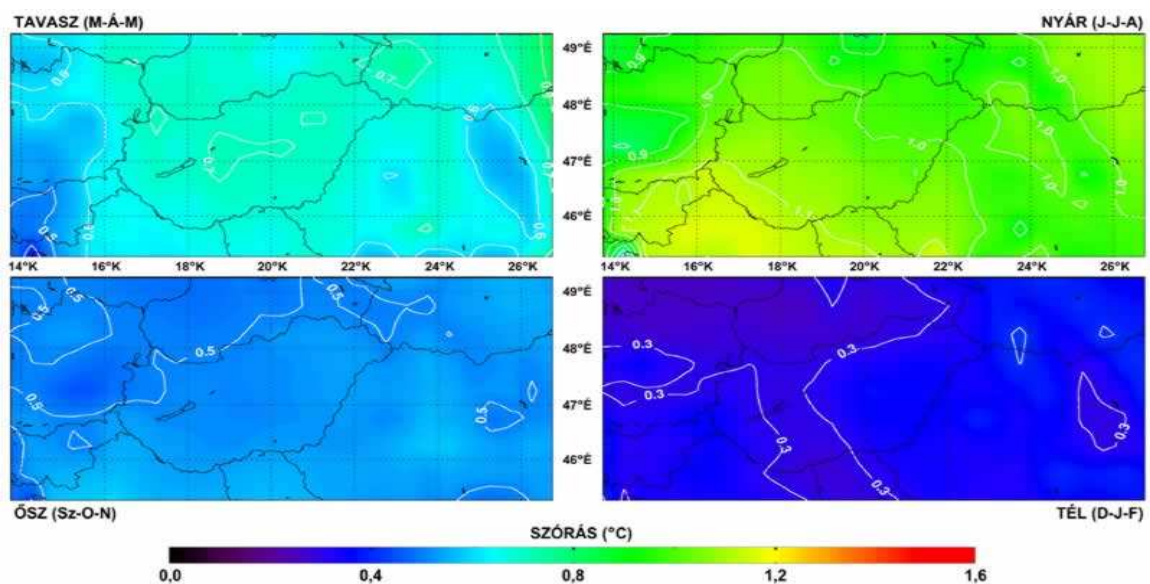
Hőmérséklet (°C)	Éves	Tél	Tavaszi	Nyár	Ősz
Átlag	1,4	1,3	1,1	1,7	1,5
Szórás	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3
Mediánérték	1,3	1,3	1,1	1,6	1,5
Csapadék (%)	Éves	Tél	Tavaszi	Nyár	Ősz
Átlag	-0,3	9,0	0,9	-8,2	-1,9
Szórás	2,2	3,7	3,7	5,3	2,1
Mediánérték	0,2	9,2	0,4	-7,5	-2,4

A táblázatokban szereplő értékek 1°C fokos átlagos globális változáshoz tartozó felmelegedés adatokat tükröznek, s azt mutatják, hogy a globális szinten 1°C fokos felmelegedés esetén Magyarországon milyen változások várhatóak évszakonként a hőmérséklet, illetve a csapadék alakulásában.

Az 1°C globális felmelegedést kísérő magyarországi csapadékmennyiség éves összege gyakorlatilag változatlan, ugyanolyan valószínűséggel lehet némi növekmény, illetve csökkenés. Ugyanakkor a csapadék mennyiségének időbeli eloszlása nagy különbségeket mutat. Nyáron érdemi csökkenés, míg télen hasonló mértékű növekedés várható az előrejelzés szerint. Az átmeneti évszakokban a különböző modellek által adott becslések nem ennyire egyértelműek, egyes modellek csökkenést, mások növekedést mutatnak Magyarországi térségére. Az évszaki hőmérsékletváltozást és szórását a 6. illetve 7. ábra szemlélteti.



6. ábra - Évszakos hőmérsékletváltozás (°C) a Kárpát-medence térségére a PRUDENCE projektben alkalmazott európai regionális (50 km-es rácsfelbontású) éghajlati modell eredményei alapján a 2071–2100 időszakra (PRUDENCE 2005)

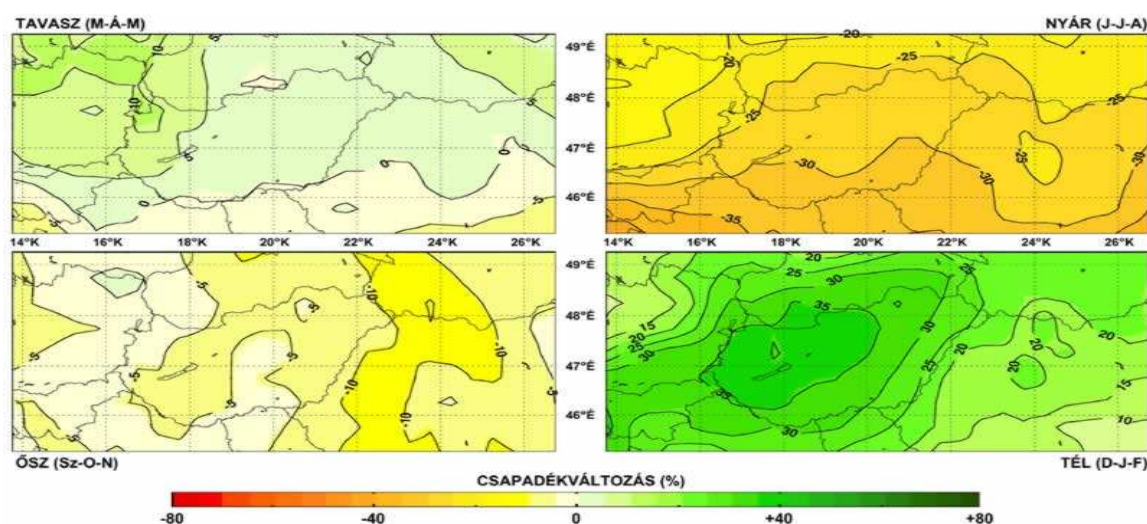


7. ábra - Az évszakos hőmérsékletváltozások szórása (°C) a Kárpát-medence térségére a PRUDENCE projektben alkalmazott európai regionális (50 km-es rácsfelbontású) éghajlati modell eredményei alapján a 2071–2100 időszakra (PRUDENCE 2005)

Minden évszakra tehát egyértelmű melegedés várható, ennek mértéke nyáron a legnagyobb (4-5°C), tavasszal a legkisebb (3-3,5°C). A hőmérséklet emelkedésének mértéke nyáron északról dél felé, míg télen és tavasszal nyugatról kelet felé haladva növekszik.

A modellek szerint a legnagyobb szórás nyáron (0,9-1,1°C), míg legkisebb szórás télen (0,3°C) figyelhető meg, azaz a nyári előrejelzés bizonytalansága lényegesen nagyobb, mint a télié (7. ábra).

Az esőzések, havazások változásának várható tendenciája nem minden évszakban azonos előjelű. Annyi azonban biztosnak tűnik, hogy mind nyáron, mind télen a csapadék mennyiségében bekövetkező változás mértéke meghaladhatja akár a 30-35%-ot. Nyáron északról dél felé haladva a várható csapadékcsökkenés mértéke nő. A téli csapadéknövekedés mértéke az ország északnyugati felében a legjelentősebb (8. ábra).



8. ábra - Évszakos csapadékváltozás (%) a Kárpát-medence térségére a PRUDENCE projektben alkalmazott európai regionális (50 km-es rácsfelbontású) éghajlati modellek eredményei alapján a 2071–2100 időszakra (PRUDENCE 2005)

A modellek alapján megállapítható, hogy a csapadék intenzitása átlagosan nőni fog. A záporok és egyéb „nagycsapadékos jelenségek” száma várhatóan emelkedik, míg a „kis csapadékkal járó jelenségek” ritkábbak lesznek. A záporok ugyanakkor gyakoribbá válnak, ami miatt nő a hirtelen árhullámok kockázata. A program elemzői azzal számolnak, hogy a magyarországi folyók évtizedeken belül nyaranta akár a jelenleg szokásos szint felére apadhatnak. A talajvíz szintje megfelelő utánpótlás híján süllyedni fog, főként a völgyekben és az alacsonyabb területeken, például az Alföldön.

A RegCM (Regional Climate Model) 25 km-es horizontális rácsfelbontású szimulációinak A1B szcenárió vizsgálatakor, 2021-2050-es időszakra (az 1961-1990-es referencia időszakhoz viszonyítva) Bartholy et al. (2010) szerint hazánkban éves átlagban 1,1°C a várható melegedés mértéke, mely mintegy 7%-os csapadékcsökkenéssel jár bár a csapadék igen jelentős eltérést mutat a PRUDENCE távolabbi időszakra vonatkozó becsléséhez képest. Míg a PRUDENCE európai uniós projekt 22 modellszimulációja a század végére egybehangzóan a nyári csapadékcsökkenés (-8.2%) mellett a téli csapadék növekedését (+9%) valószínűsíti,

addig *Bartholy et al.* (2010) szerint tavasszal és télen várható jelentős csapadékcsökkenés (3 táblázat).

3. táblázat. A hőmérséklet és a csapadék átlagos éves és évszakai változásainak tendenciái a 2021-2050 közötti időszakokra a RegCM eredményei alapján (A1B scenárió, referencia időszak:1961-1990), (*Bartholy et al.* 2010)

2021-2050	Éves	Tavaszi	Nyári	Ősz	Tél
Hőmérséklet (°C)	1,1	1,6	0,7	0,8	1,1
Csapadék (%)	-6,7	-9,6	-2,1	-3,8	-9,5

2100-ra *Pongrácz et al.* (2006) a kritikus nyári időszakra a csapadék mennyiségének mintegy 10%-os csökkenését vetíti előre azzal, hogy az éves átlaghőmérséklet meghaladja a mostanit.

Bartholy és Pongrácz (2008) hangsúlyozzák, hogy az elvégzett modellbecslések nem pótolják a PRUDENCE keretében alkalmazott dinamikus modellekhez hasonló, ám a XXI. század egészére kiterjedő finom felbontású (akár 10 km-es) regionális klímaváltozási elemzést, mely több globális éghajlati scenárió-t vesz figyelembe, és számos meteorológiai paramétert tartalmaz. Amíg ezekből részletes elemzések készülnek az eddigi meglévő eredmények tendencia jellegű információkat nyújthatnak.

2.3. A klímaváltozás hatásai a növénytermesztésre

2.3.1. A klímaváltozás növénytermesztési vonatkozásai

A klímaváltozás egyik legsúlyosabb következménnyel a világ élelmiszerellátását érintheti. Az élelmiszertermelésben a gabonaféléknek meghatározó szerepe van, ezért felhívó az IPCC második jelentésében szereplő megállapítás, mely szerint a gabonafélék hozama még a legnagyobb erőfeszítések ellenére is globálisan csökkenni fog (*IPCC* 1996), (4. táblázat).

4. táblázat.

A gabonafélék termelésének százalékos változása különböző GCM egyensúlyi scenáriók esetén (IPCC 1996)

	Klímahatás			+a CO ₂ fenológiai hatása			+ adaptáció 1. szint			+ adaptáció 2. szint		
	GISS	GFDL	UKMO	GISS	GFDL	UKMO	GISS	GFDL	UKMO	GISS	GFDL	UKMO
Fejlett országok	-4	-10	-22	+12	+6	-4	+15	+8	+4	+12	+3	+2
Fejlődő országok	-16	-13	-17	-11	-8	-12	-12	-8	-13	-7	-6	-7
Föld összesen	-11	-13	-19	-2	-4	-8	0	-2	-6	+3	0	-3

A kiinduló értéket a jelenlegi klimatikus viszonyokra becsült értékek jelentik. Az első esetben csak a klímahatást vették figyelembe a modellszámításoknál, a másodikban a klíma mellett a CO₂ koncentrációt is.

Az adaptációs 1. szintnél a fajtaváltás és a vetésidő változtatása, míg a 2. szintnél a fajváltás, a műtrágya felhasználás, az öntözött terület növelése és a vetésidő változtatása is befolyásolta a várható hozamokat.

Megállapítható, hogy a gabonafélék termelése csökkenni fog, de a genetikai, agrotechnikai fejlesztések nagy befolyással lehetnek a hozamok alakulására. A legtöbb növény növekedése magasabb hőmérsékleten felgyorsul, ha elegendő tápanyag és víz áll rendelkezésre. Egy bizonyos határ után ez azonban a növekedési ütem csökkenéséhez, vagy akár a növény elpusztulásához vezethet (*Cannel et al.* 1989).

A hőmérséklet emelkedése együtt jár az evapotranszpiráció intenzitásának emelkedésével, így a növény egyre gyorsabban veszíti el a nedvességet, ugyanakkor a párologtatás a talaj gyorsabb kiszáradását is okozza. A növények egyik legfontosabb építőanyaga a szén, amit a fotoszintézis során kizárólag a levegőből a CO₂ asszimilációjával vesznek fel. A fotoszintézis sebessége nagymértékben függ a levegő CO₂ koncentrációjától, ami folyamatosan emelkedik.

Az ún. CO₂ trágyázás sem tudja azonban globális szinten teljesen ellensúlyozni a felmelegedés hatását, a globális hozamokat csak nagyon jelentős genetikai, agrotechnikai fejlődéssel lehet néhány % - os (-3; +3) intervallumon belül tartani (*Harnos* 2005).

Az International Food Policy Research Institut (IFPRI) klímaváltozásról és a mezőgazdasági adaptáció költségeiről szóló kutatásai a „CO₂ fertilization” hatás figyelembevételével is a legfontosabb haszonnövények, beleértve a kukoricát is, igen jelentős hozamcsökkenését és árnnövekedését vetítik előre még a fejlett országokban is (*IFPRI* 2009).

A fejlődő országokban mintegy 7,1-7,3 milliárd USD befektetésre lenne szükség a klímaváltozás kedvezőtlen hatásainak ellentételezésére a mezőgazdasági kutatásban, a vidéki úthálózat fejlesztésben és az öntözésben.

A biotechnológiai kutatásokra szánt költségvetési források igen jelentős mértékben járulhatnak hozzá – többek közt – a klímaváltozáshoz való alkalmazkodás elősegítéséhez (*Popp* 2010).

2.3.2. A klímaváltozás hatásai a hazai növénytermesztésre

Az éghajlat jövőbeni valószínű módosulása új kihívást jelent a természeti környezet és az ettől függő ágazatok, elsősorban a növénytermesztés számára. Az éghajlati hatáselemzés nélkülözhetetlen előfeltétele ezzel kapcsolatban, hogy prognózissal, de legalább éghajlati forgatókönyvekkel (szcenáriókkal) rendelkezünk a globális klímaváltozás regionális sajátosságainak valószínűsíthető alakulásáról.

A Kárpát-medence ugyanis a nedves óceáni, a száraz kontinentális és a nyáron száraz, télen nedves mediterrán éghajlati régiók határán helyezkedik el.

E határzónában pedig az éghajlati övek kismértékű eltolódása is oda vezethet, hogy a Kárpát-medence „átcsúszik” a három hatás valamelyikének egyértelmű uralma alá (Mika 1997).

Változás várható a növények vegetációs periódusának hosszúságában, amely a termeszthetőség határvonalainak északabbra tolódását idézheti elő. A búza, az árpa, a rozs, a burgonya és a kukorica termeszthetősége 100-150 kilométerrel északabbra tolódhat el az északi féltekén a hőmérséklet 1°C-os emelkedése esetében hozamnövekedés mellett (Carter et al. 1996).

Mika (2002) a modellszámítások alapján a hőmérséklet és csapadék várható hazai változásait kalkulálta a globális változások függvényében (5. táblázat).

5. táblázat. A hőmérséklet és a csapadék hazánkban várható változása adott globális felmelegedés esetén (Mika 2002)

Globális változás	+ 0,5 °C	+ 1 °C	+ 2 °C	+ 4 °C
Helyi változás				
Hőmérséklet (°C)	+1,0 °C	+ 1,3 °C	+ 2 °C	+ 4 °C
Nyár/nyári félév				
Hőmérséklet (°C)	+ 0,8 °C	+ 1,7 °C	+ 3 °C	+ 6 °C
Tél/téli félév				
Csapadék évi összege	- 40 mm	- 66 mm	Bizonytalan	+ 40-400 mm

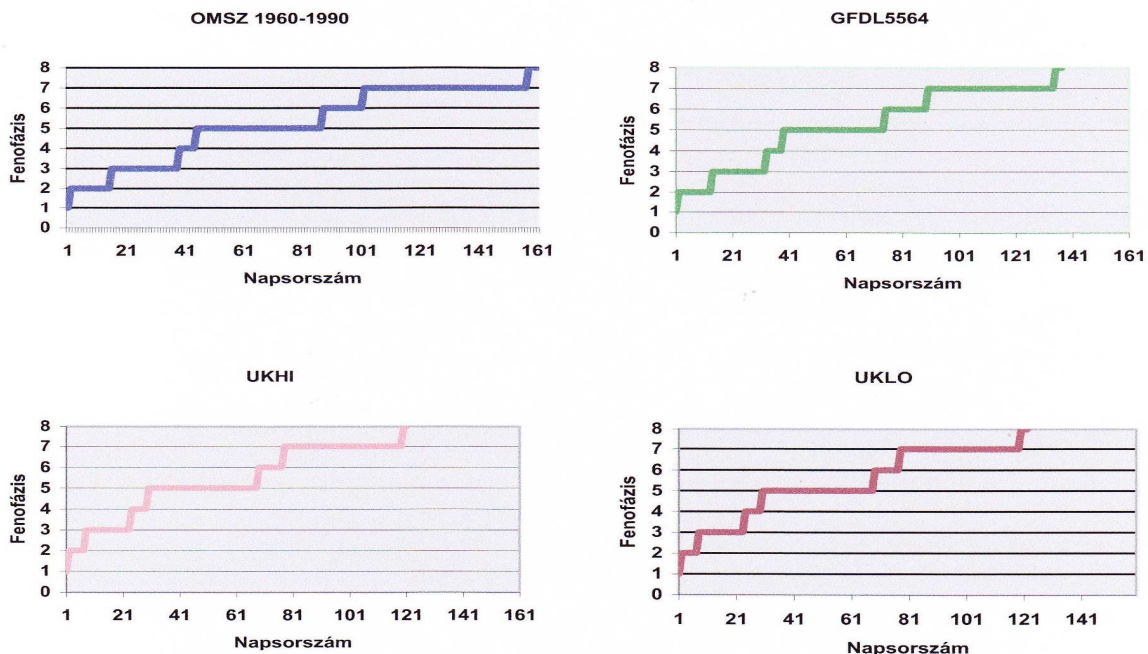
A XXI. század későbbi évtizedeiben várható nagyobb mértékű éghajlati változásokhoz vezető kibocsátási feltételek megváltoztatásához elengedhetetlen a mihamarabbi cselekvés, az alkalmazkodási stratégiák kidolgozása, értékelése (Bartholy *et al.* 2010).

A napjainkban és a közeljövőben felerősödő aszályosodás, szárazodás megelőzése érdekében időben meghozott döntések hozzájárulhatnak a hazai víz- és élelmiszer-ellátás biztosításához, hiszen ez adja a lakosság létbiztonságának alapját (Németh 2010).

2.3.3. A klímaváltozás hatásai a hazai kukoricatermesztésre

A kukorica termesztési körzete nagyon kiterjedt, a legnagyobb hozamot mérsékelt égövi körülmények között intenzív műveléssel adja. A kukorica fajlagos hozamát leginkább befolyásoló tényezők a hőmérséklet, a csapadék és a globálsugárzás (Menyhért 1979, Varga-Haszonits 1987).

Boksai (2007) az éghajlatváltozás hatását vizsgálta a kukorica adott fenológiai fázisainak hosszára és a fázisok kezdő napjának időpontjára öt különböző időjárási scenárió (GFDL 2534, GFDL 5564, UKHI, UKLO és UKTR 3140), illetve referencia időszak, az 1960 – 1990-ig tartó 30 éves időintervallum (Országos Meteorológiai Szolgálat: OMSZ adatai) figyelembe vételével. A 4M modellel Debrecenben végzett szimulációs kísérletének eredménye szerint a hőmérséklet emelkedés hatására a kukorica fenológiai fázisai lerövidültek és a fenológiai fázisok kezdeti időpontjai előbbre tolódtak (9-12. ábra)



9-12.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 (Boksai 2007)

Az éghajlatváltozáshoz alkalmazkodó növénytermesztés egyik fontos eleme a vetés idő, mert az indulás befolyásolja az egész tenyészidő alatt a növények növekedését és fejlődését, végső soron a mennyiség és minőség alakulását.

Kovács és Fodor (2005) vizsgálataikhoz az angol HADCM és a német ECHAM globális cirkulációs modell adatainak Bartholy és munkatársai által történt magyarországi leskálázását vették alapul. A 4M növényfejlődési és produkciós modellt használták, melynek paramétereit tartamkísérletes adatokon és múltbeli időjárási és megyei termesztési adatokon állították be. Ezek alapján nyújtottak növényfejlődési, produkciós és tápanyagforgalmi előrejelzéseket a változó klimatikus prognózisok szakszerű felhasználásával. Az 1980-1989-ig tartó időszakot vették alapul, és ezek alapján futtatták a modellt, az eredményeket 2091-től 2100 között írták ki.

2100-ra a kukorica termése mintegy 0,5 tonna/hektáros csökkenést mutat. Ha növekvő CO₂ koncentráció hatását leválasztják – ez lehetséges a szimulációs technikáknál – akkor még erőteljesebb termés-csökkenéssel kell számolni. Igazolták, hogy a melegedés miatt jelentősen lerövidülnek a fenofázisok.

Hasonlóan a terméshez a nitrogén felvételben is csökkenésre lehetne számítani, ha csak a hőmérséklet és a csapadék várható változásait vennénk figyelembe, a szén-dioxid pozitív hatása a számítások szerint azonban meghaladja a többi negatív tényező hatását.

Nagy és Sárvári (2005) szerint a vetésidővel kapcsolatos eddigi nézetünket felül kell vizsgálni. Az optimálisnak tartott vetésidő – április 10-május 2 – módosítható és ez a szakasz 8-10 nappal korábbra hozható.

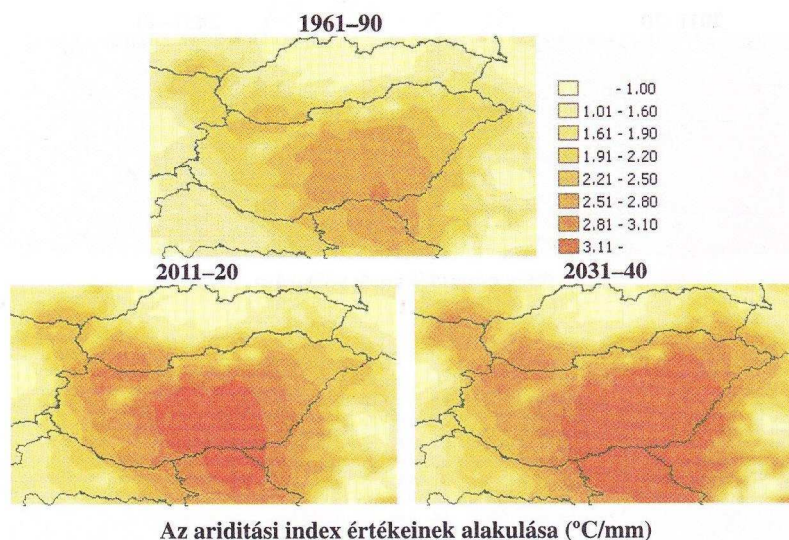
Pap et al. (2009) 15 év kis- és nagyparcellás kísérletei alapján arról számolt be, hogy a korai vetéseknél nagyobb és biztosabb terméssel lehet számolni. A klímaváltozás azt igényli, hogy adott termőhelyre kidolgozott, rugalmas technológiával készüljünk fel, és szükség van a különböző termőhelyeken tartamkísérletek indítására, hogy a hatásokat minél gyorsabban és jobban ki tudjuk védeni.

Gaál (2007) szerint – aki a Hadley Centre HadCM3 modelljével futtatott B2 scenárió alapján vizsgálta a kukoricatermelés klimatikus feltételeinek változását Magyarországon a 2011-2020, illetve 2031-2040-es időszakban - a hőmérsékleti szempontból lehetséges vegetációs periódus meghosszabbodása és a hőmérsékletösszegek növekedése alapján a közeljövőben 2-3 FAO csoporttal hosszabb tenyészidejű fajták termelése válik lehetségessé, viszont a csapadék mennyisége egyértelműen a termelés korlátozó tényezője.

Az Ángyán féle ariditási index (AI) az április – szeptemberi vegetációs időszak effektív hőmérsékletösszege, valamint az évi összes csapadék hányadosaként számolható. Az index használatát Ángyán (1987) abban az esetben javasolja, ha az effektív hőmérsékletösszeg 1250 – 1750°C értéktartományon belüli, a csapadék pedig 500-720 mm közötti. Gaál (2007) az AI értékeléséhez a következő csoportokat határozta meg:

- | | |
|---------------------------------|-------------------|
| • Igen gyenge adottságú terület | 1,01 – 1,60 °C/mm |
| • Közepes adottságú terület | 1,61 – 1,90 °C/mm |
| • Jó adottságú terület | 1,91 – 2,20 °C/mm |
| • Nagyon jó adottságú terület | 2,21 – 2,50 °C/mm |
| • Nagyon jó, de érdemes öntözni | 2,51 – 2,80 °C/mm |
| • Jó, de érdemes öntözni | 2,81 – 3,10 °C/mm |
| • Csak öntözéssel termeszthető | 3,11 ≤ °C/mm |

Az ariditási index az egész vegetációs időszakot (április-szeptember) tekintve ad átfogó képet a hőmérsékletösszegek és a csapadékmennyiség arányáról. A klímaszcenáriók alapján a hőmérsékletösszeg/csapadék arány egyre kedvezőtlenebb helyzetet teremt a kukorica termesztése számára (13. ábra).



13. ábra Az ariditási index értékeinek alakulása (°C/mm),(Gaál 2007)

Már 2011-2020-as időszakban is nagy területen jelennek meg az öntözés igényére utaló értékek. Az ország 26%-án a kukorica csak öntözéssel lenne termeszthető, s várhatóan a 2031-2040-es időszakban ennek mértéke 42 % -ra nő (6. táblázat).

6. táblázat. Az ariditási index értékeinek megfelelő területek aránya Magyarországon (%)

Gaál (2007)

		1961-90	2011-20	2031-40
Igen gyenge adottságú terület	1,01-1,60	4	0	0
Közepes adottságú terület	1,61-1,90	13	2	0
Jó adottságú terület	1,91-2,20	27	8	4
Nagyon jó adottságú terület	2,21-2,50	23	18	10
Nagyon jó, de érdemes öntözni	2,51-2,80	31	22	22
Jó, de érdemes öntözni	2,81-3,10	2	24	23
Csak öntözéssel termeszthető	3,11 ≤	0	26	42

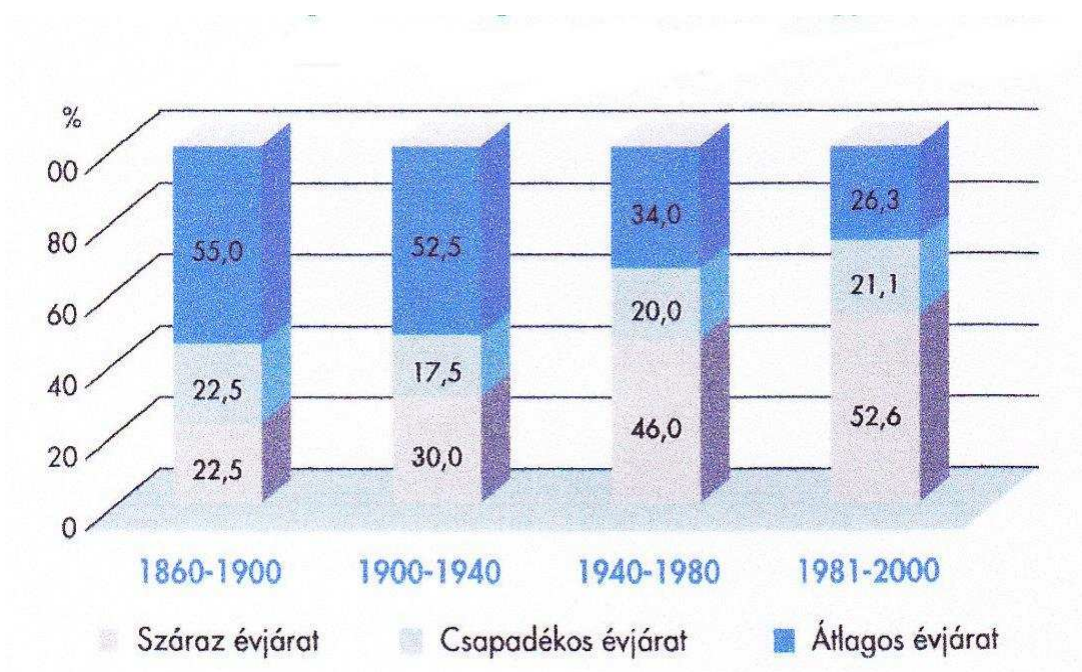
Az A2-es – környezeti és termeszthetőségi szempontból kedvezőtlenebb – éghajlati scenárió esetén távolabbi időszakra (2075-ig) kiterjesztve a vizsgálatot, hazánkban csak öntözéssel lenne folytatható kukoricatermesztés. A $3,11 \leq AI$ területek aránya 2060-ban 85 %, 2075-ben 96 % (Gaál 2008).

Természetesen a növénytermesztés eredményességét számos más tényező - talajadottságok, domborzat, fajta és igen nagymértékben az agrotechnika – is befolyásolja, illetve a rendkívül drámai előrejelzés hatásait ellensúlyozhatja. Az eredmények alapján a következő

évtizedekben fajta, illetve agrotechnikai váltásra lesz szükség, ugyanis a század második felében olyan nagymértékű klimatikus változások várhatók, melyek megkérdőjelezhetik a kukorica termeszthetőségét. Jolánkai (2008) szerint négy olyan növénytermesztési tényező jelölhető meg, amely technológiai szempontból alkalmas lehet a klímaváltozás hatásainak ellensúlyozására. A termesztett fajták vízhasznosító képességében jelentősek a különbségek. Ez a kukorica esetében nem annyira az egyes hibridek között, mint inkább azok tenyésztő csoportjai között mutatkozik meg. Lényeges tényező a tápanyagellátás. Optimális N-szinteken a kukorica egyedei jobban viselik el a csapadéokban megmutatkozó évjárat ingadozásokat. Fontos a növényvédelem, ezen belül a gyomszabályozás szerepe. Negyedik tényezőként általánosságban a termesztési körülmények kultúrallapotát szükséges kiemelni (megfelelő talajművelés, optimális vetés, teljes érésben történő betakarítás).

Birkás és Jolánkai (2008) klíma tartamkísérleteik alapján és Bartholy et al. (2008) előrejelzéseit figyelembe véve a klímakár csökkentés érdekében olyan talajművelési eljárásokra hívja fel a figyelmet, mely elősegíti a talajok szerves anyagának és szerkezetének védelmét, a talajok vízbefogadó, tároló és vízmegtartó képességének javítását.

Napjainkban minden második évben nagy valószínűséggel számíthatunk aszályra, melynek súlyossága, mértéke változó (14. ábra).



14. ábra Hidrometeorológiai szélsőségek előfordulásának gyakorisága (Szász-féle szárazsági index alapján) (Pepó 2005)

A kukorica a szakszerű öntözést meghálálja. A vízellátás, az öntözés - különösen szélsőséges évjáratokban - a trágyázásnál sokkal jelentősebb hatású agrotechnikai elem kedvező talajadottságok mellett (Pepó 2005). Aszályos évjáratban 4-6 t/ha terméstöbbletet eredményezett az öntözés (7. táblázat)

7. táblázat. Öntözés és vetésváltás hatása a kukorica termésére (Debrecen, csernozjom talaj, 1986-2003), (Pepó 2005)

	Termelés (kg/ha)		
	Aszályos	Átlagos	Csapadékos
	évjárat	évjárat	évjárat
Monokultúra			
Nem öntözött	5800	9400	12500
Öntözött	11200	10700	12500
Bikultúra			
Nem öntözött	8700	11100	11700
Öntözött	12100	11900	12100
Trikultúra			
Nem öntözött	7200	10200	12800
Öntözött	11500	11200	13300

Vad és Pepó (2009) tartamkísérletben vizsgálták eltérő típusú évjáratokban a kukorica termésmennyiségét és termésbiztonságát különböző agrotechnikai modellek esetén. Az évjárat vízellátottsága a termésmaximumot és a trágyázási terméstöbbletet egyaránt meghatározta. Száraz évjáratban a termésmaximum 4300-8000 kg ha⁻¹, a trágyázási terméstöbblet 1300-1600 kg ha⁻¹, átlagos évjáratban 9400-11900 kg ha⁻¹, illetve 2400-3500 kg ha⁻¹, kedvező évjáratban pedig 13800-14100 kg ha⁻¹, illetve 1700-4700 kg ha⁻¹ volt.

Kísérleti eredmények bizonyították, hogy az időjárási stresszhatásokat megfelelő agrotechnikával (vetésváltás, trágyázás, öntözés) mérsékelni lehet, de teljesen megszüntetni lehetetlen (Pepó 2009).

Az öntözés szerepe rendkívüli mértékben felértékelődik a jövőben. A 4,5 millió hektáros szántóterületből maximálisan 300000 ha terület rendelkezik vízjogi engedéllyel, ebből ténylegesen csupán 120000 ha műszaki berendezésekkel és műtárgyakkal ellátott területet öntöznek, a meglévő kapacitások 60 % - a aszályos évben sincs kihasználva. Középtávú célként 300.000 – 500.000 ha tényleges öntözését kellene megoldani. Kapronczai (2009) szerint ehhez négy területen szükséges lépni:

- Az agrártámogatási rendszer hatékonyabban segítse az öntözésfejlesztést és üzemeltetést. Ehhez célzott beruházási támogatások, tározókhöz ingyenes állami terület biztosítása, öntözési társulások kiemelt támogatása, vízdíj mérséklése vagy elengedése szükséges.
- Az öntözés technikai fejlesztését kell megvalósítani uniós programok részeként. Esővíz elvezetését kell megoldani, víztározókat kell építeni, az öntözőcsatornákat karban kell tartani.
- A tudományos műhelyekben még rendelkezésre álló öntözéssel kapcsolatos szellemi potenciált megőrizni és fejleszteni kell.
- Az öntözési, halászati és turisztikai program támogatásának komplex kezelésére kell sort keríteni.

Az utóbbi 100 év csapadék eloszlása alapján hazánkban 17 évet tekinthetünk kedvezőnek, 32 évet csapadékosnak, 23 évet száraznak és 28 évet igen száraznak. Az Alföld csapadékszegény vidékein komoly károkat okoz az aszály. A tenyész időszak csapadék viszonyait figyelembe véve megállapítható, hogy a növények vegetációs vízigényét az eső önmagában nem tudja kielégíteni.

A termelés kockázata rendkívül növekszik. A szélsőséges klimatikus viszonyok közepette a vízelosztási rendszerek fejlesztése épp olyan fontos, mint a víztakarékos gazdálkodási gyakorlatra történő áttérés.

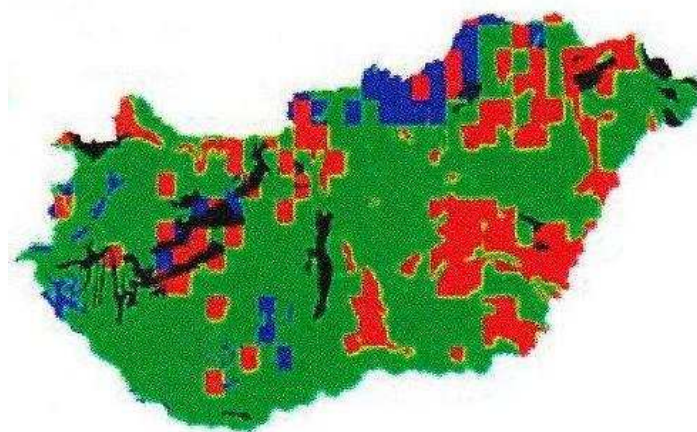
Az Európai Mezőgazdasági Vidékfejlesztési Alapból az öntözés, a melioráció és a területi vízgazdálkodás mezőgazdasági üzemi és közösségi létesítményeinek fejlesztéséhez nyújtandó támogatási lehetőség hazai szabályozása, valamint az Európai Bizottság 2007. november 20-án közzétett közleményének fő elvei között jelzett „vízgazdálkodás integrálása a Közös Agrárpolitika (KAP) eszköztárába” új lehetőségeket nyitott meg a hazai öntözéses gazdálkodás megújításában (Gráf 2008).

A célként megfogalmazott évi 10.000 ha új terület öntözéses gazdálkodásba történő bevonása azonban rendkívül kevésnek látszik, figyelembe véve az aggasztó előrejelzéseket, melyek a gyakoribbá váló aszályos időszakokat vetítik előre.

Annak ellenére, hogy a csapadék várható csökkenése miatt az öntözési lehetőségek kiterjesztésére lenne szükség, a mezőgazdasági vízfelhasználás növelésének korlátot szabhat az is, hogy a magasabb hőmérséklet és urbanizáció következtében növekszik a lakossági és ipari felhasználás, ami esetenként drágíthatja a mezőgazdasági vízfelhasználást.

Szinay (2010) arra hívja fel a figyelmet - a VAHAVA kutatás eredményeinek felhasználásával - hogy az eddigi öntözéscentrikus és vízelvezetés elvű megoldásokról a csapadékgazdálkodásra és ökológiai öntözésre való váltás a cél. Ezt a talajnedvesség és a talaj vízháztartásának szabályozásával lehet elérni; a talajnedvesség mennyiségi, minőségi és energetikai szabályozásával. Arra is figyelmeztet, hogy talajaink értékét a táperő helyett egyre inkább a talajban rendelkezésre álló és a drénviszonyokkal előállítható vízkészlet, talajtározás (vízretenció) határozza meg. Magyarországon a klímaváltozásra, benne a növekvő gyakoriságú szélsőséges időjárási és vízháztartási helyzetekre történő felkészülés egyik kulcskérdése a talaj vízháztartásának szabályozása (Várallyay és Farkas 2008).

Fodor és Pásztor (2010) a 4M modell segítségével-mely szimulációs rendszerbe foglalja a növénytermesztés folyamatait, azok ökológiai feltételrendszerét vizsgálta a Magyarországra meghatározott terméspotenciálértékek alakulását 2100-ra. Megállapításuk szerint a klímaváltozás hatására bizonyos területeken elképzelhető a kukorica átlagos termésének növekedése, de országos átlagban a terméseredmények kismértékű csökkenése várható (15. ábra).



15. ábra Magyarországon 100 év múlva várható kukorica terméshozamok térbeli eloszlása. A zöld szín a jelenlegi országos átlag (4500-6500 kg/ha) körüli értékeket jelöli, a piros az átlag alatti, a kék az átlag fölötti hozamú területeket mutatja be.

(Fodor és Pásztor 2010.)

A nyári időszak várható szárazodása és melegedése tehető felelőssé a termés kiesésért, amely növekvő vízhiány stresszt okoz a növényeknek. Ezt a negatív hatást várhatóan még a növekvő CO₂ koncentráció fotoszintézisre gyakorolt kedvező hatása sem tudja ellensúlyozni. Különösen fontossá válik a megfelelő fajta kiválasztása, várhatóan előtérbe kerülnek a

szárazság tűrő fajták, külön kihívást intézve a növénynemesítőknek. Meg kell azonban vizsgálni az öntözés lehetőségét gazdaságossági és környezetvédelmi szempontból is, hiszen a tavaszi vetésű növények várható termés kiesése elsősorban a szárazabb nyári időszaknak köszönhető.

2.4. Az agrometeorológiai modellezés

A legtöbb természeti valamint mezőgazdasági folyamat és jelenség túlságosan összetett ahhoz, hogy egyszerűen vizsgálható, leírható és működésében, fejlődésében és változásában elemezhető legyen. Az elemző ember az összetett rendszereket, – az ok lényeges jellemzőit megtartó, egyszerűbb helyettesítőkkel ellátva- modellekkel cseréli fel. A modellel az eredeti objektum működése meghatározott, de a valóságnál egyszerűbb, átláthatóbb feltételek között tanulmányozható. A modell tehát a bonyolult valóságos rendszer elméletileg és szemléletileg meghatározott leképezése (*Huzsvai et al. 2005*).

Minden modell egy szakmai szükséglet és egy matematikai lehetőség találkozási pontján jöhet létre (*Juhász és Nagy 1993*).

Az agrometeorológiai vizsgálatok során a növény – időjárás rendszer átfogó leírásakor nélkülözhetetlen a talaj hatásának figyelembe vétele is, így a növény – talaj időjárás modellel van lehetőségünk a növény fejlődésének előrejelzésére. A megoldandó feladatokban vagy az időjárás, vagy a növény nem tanulmányozható eredeti alakjában. Az adott fejlettségű növényállomány hatásának vizsgálata stacionárius modellekkel végezhető el, a másik eset, amikor a növény eredeti alakjában áll rendelkezésre, de az időjárás nem tanulmányozható eredeti formájában. A klímakamrás vizsgálatok során tetszőleges időjárási helyzetet állíthatunk elő. A fitotronban rendszerint három meteorológiai elem, a sugárzás, a hőmérséklet és a légnedvesség menetét szokták modellezni, azonban a Nap által leadott megvilágítás helyettesítése és a szél hiánya miatt a valósághoz képest csorbát szenved a növény – időjárás vizsgálata (*Dunkel in Szász és Tőkei 1997*).

A gondolati modellek valamilyen módon matematikai modellek, a megvalósításuk számítógéppel történik. A matematikai modell minden esetben számítási utasítások egymás után történő elvégzését, adott esetben bonyolult függvények összekapcsolódását, vagy összetett egyenletrendszerek egymás utáni, véges sok lépésben történő megoldását jelenti (*Anda és Dunkel 2000*).

Az agrometeorológiai gyakorlatban a gondolati növény – talaj – időjárás modellek egyik nagy csoportját a termésbecslő modellek alkotják, melyek a várható termés (biológiai, gazdasági)

becsléséhez nyújtanak segítséget aképpen, hogy valamilyen a vizsgált növényre jellemző mennyiséget vagy csak meteorológiai vagy részben meteorológiai elemek, mint független változók felhasználásával előre jelzik.

A másik nagy csoportot a transzfermodellek alkotják. A növényállományokra alkalmazott transzfermodellek a mikroklíma szimulációs modellek. A növényállomány fejlődését elsősorban a fotoszintetizáló rész körül uralkodó időjárási tényezők határozzák meg. Az, hogy ezen a szinten milyen körülmények uralkodnak, magán a növényállományon is múlik. A növényállomány, mint a felszíni határréteg része nem csak a mikrokörülményeket befolyásolja, hanem meghatározó szerepet játszik a Föld általános légkörzésében is. Így mind mikro-, mind makro megfontolásból meg kell határoznunk az állományban és az állomány felett lezajló átviteli folyamatokat a talajtól a szabad, a felszíntől már nem befolyásolt légrétegig (Anda és Dunkel 2000).

A növényállomány által leginkább befolyásolt meteorológiai elemek, amelyek zavartalan körülmények között mért értéke az állomány felett, vagy azon belül változik:

- a sugárzás és a megvilágítottság
- a szélesebbesség
- a CO₂ koncentráció
- a hőmérséklet
- a légnedvesség
- a talajra lejutó csapadék

Az átviteli folyamatok vizsgálatakor a növényállományban lezajló energia, tömeg és szélesebbesség momentumátadási folyamatokat kívánjuk megadni a szabad légkör és a növényállománnyal borított felszín között.

A modell légköri határfeltételei:

- a léghőmérséklet
- a gőznyomás
- a szélesebbesség
- a felszínre eső sugárzás komponensei
- a direkt sugárzás, rövid – és hosszúhullámú rész
- a diffúz sugárzás, rövid – és hosszúhullámú rész
- a csapadék

A felszínt borító állományt morfológiailag két csoportra osztjuk:

- a fák és bokrok
- a fűfélék és más lombhullatók (*Anda és Dunkel 2000*)

A szimulációs modellek alapja a növény vízháztartásának, a levelek fényelnyelésének és hasznosításának, a szárazanyag előállításának, valamint ez utóbbi szervenkénti megoszlásának számszerű meghatározása (*Kocsis 2008*).

A CERES növénytermesztési szimulációs modell – melynek kezdeményezője Ritchie J. T. volt 1972-ben az USA-ban – a determinisztikus modellek csoportjába tartoznak. Modellezik a növények fejlődését, az asszimilációt, az asszimiláták szervek közti eloszlását, a levélfelületet, a gyökerezési mélységet és gyökérsűrűséget rétegenként, a biomassza növekedését, a víz mozgását a talajban, az evapotranszpirációt, a nitrogén átalakulását és mozgását a talajban, a növények nitrogéneloszlását, stb. A modell napi léptékben számol, az időjárási adatigénye is ennek megfelelően napi léptékű, és az eredmények is napi gyakorisággal kérdezhetők le. A szimuláció során a CERES modell a választott növényfaj egyetlen, idealizált, a populációra jellemző átlagos egyedét és környezetét képezi le (*Huzsvai et al. 2004*).

A Magyar Mezőgazdasági Modellezők Műhelye (4M) kiindulási alapként felhasználva a CERES modellt és átírva annak FORTRAN nyelvű eljárásait DELPHI nyelvre, felhasználóbarát kezelőfelületet létrehozva új növénytermesztési modellt alkotott. A 4M moduláris, azaz egyetlen nagy és rugalmatlan modell helyett a folyamatokat modulokban fogalmazza meg. A modell a magyarországi talajokra, időjárásra és a hazai fajokra, fajtákra számos adatot és paraméterbecslő eljárást ajánl fel, melyek segítségével eredményesen felhasználható a hazai kutatások során. A CERES átalakításával született 4M programcsomagba számos új modul illetve segédprogram került beépítésre. A programhoz csatolták a TAKI adatbázisából 44 talajszelvény a modell számára előkészített input adatait. A 4M programcsomag működő szimulációs modellbe foglalja a növénytermesztés folyamatait, azok ökológiai és technológiai feltételrendszerét (*Boksai 2007*).

Az általunk alkalmazott *Goudriaan* (1977) féle szimulációs modell és annak javított változata *Goudriaan és Van Laar* (1994) az állományra jutó sugárzási energia megoszlását, annak különböző energiaigényes folyamatokban történő felhasználását követi nyomon (*Anda és Lőke 2003*).

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1. A modellezéshez használt adatok forrása, a helyszín

A modell bemenő adatai és paraméterei a Pannon Egyetem Keszthelyi Georgikon Karának tanyakereshti területén lévő Agrometeorológiai Kutatóállomásról (46°44'N; 17°14'E; 114,2 m tengerszint feletti magasság) származnak. Az állomást 1971-ben alapították, melynek egyik célkitűzése a helyi Agráregyetem kutatással foglalkozó szakembereinek meteorológiai adatokkal való kiszolgálása volt. Emellett az állomás felügyeletileg az Országos Meteorológiai Szolgálatához tartozva egyéb vizsgálatok helyszínéül is szolgált és szolgál, melyek közül a különböző párolgásmérések szerepe kiemelt.

Bár a megfigyelésbe vont növények köre az állomás működése alatt változott, a kukorica volt az egyetlen növény, mely folyamatosan jelen volt az állomás kísérleti parcelláján. A 0,7 ha-os tenyészkertben mindig termesztettek rövid tenyészidejű kukorica hibridet is (FAO szám: 300-399). Az elmúlt több mint egy évtizedben a Norma² volt ez a hibrid, melyet a Martonvásári Gabonakutató Intézet javaslatára vontak termesztésbe. A modell futtatásánál minden scenáriónál korai érésű fajtára vonatkozó adatokat vettünk figyelembe. A kukorica ápolását a helyi egyetem szakembereinek bevonásával, a környékre jellemző termesztéstechnológiával végezték törekedve arra, hogy az egyes évek beavatkozásai lényegesen ne különbözzenek egymástól (Anda 2001, Anda és Bakos 1996).

Az inputként használt kukorica levélterület alakulását hetenként levélszintenkénti méréssel rögzítették a kutatóállomás dolgozói LI 3000A típusú automatikus planiméterrel, vagy kézi mérőszalaggal, ami után a Montgomery képlettel határozták meg a levélterületet 10-12 állandó mintanövény adatai alapján. Az eljárás módszertani elemzését, a fellépő hiba valószínű értékét – mivel az adat a modell növényre vonatkozó inputját képezte – korábbi helyben végzett verifikálásokat tartalmazó irodalom alapján (Anda 1986, Anda és Tóbiás 1999) mi is ellenőriztük. A Montgomery képlet alkalmazására akkor került sor, amikor az állomás automatikus planimétere tönkrement (1990-es évek eleje), s pénzhiány miatt néhány évig régebbi eljáráshoz kellett visszanyúlni. A levelek szélességének feljegyzése, a növénymagasság meghatározása a fenti adatgyűjtéssel egy időben történt.

² A Norma SC kiemelkedő termőképességű és termésstabilitású, korai érésű, generatív jellegű hibrid. Széles tőszám optimummal rendelkezik (60-80 ezer tő ha⁻¹). A nemesítők szerint alacsony és magas nitrogén ellátottság mellett egyaránt biztonságosan termesztendő. Éréscsoportjának a legszárazságtűrőbb fajtája, igen jó az alkalmazkodóképessége.

Az adott scenárióhoz tartozó bemenő növényi adatok esetében az időjárási inputhoz hasonlóan az analógia elvét alkalmaztuk. Tekintettel a fajtákban bekövetkező el nem kerülhető fajtaváltás jelenségére, a bemenő növényi adatoknál a szimulálni kívánt időjárással analóg évjáratot – azon belül is átlagjúliust – kerestünk, melynek kukoricára és talajnedvességre vonatkozó adatai megegyeztek, vagy közel azonosak voltak a szimulálni kívánt évjárat értékeivel.

A modell eredményét teljesen kifejlett címerrel rendelkező növényre ismertetjük, mely állapot Keszthelyen júliusban már biztosan bekövetkezik. A modell három rétege közül a középső, cső szintit választottuk szemléltetésre, mely egyben a legintenzívebb életfolyamatok helye (lásd később a modell leírását).

A kísérleti terület uralkodó talajtípusa a Ramann-féle barna erdőtalaj. A bemenő talajra vonatkozó paraméterek megválasztása ennek megfelelően történt. A talajnedvességet az állomáson a tenyészidőszakban 10 naponta gravimetriásan 1 m mélységig 10 cm-enkénti rétegekből vett mintákból számolja az állomás, mely értékeket vízpotenciálban kifejezve fogadja a modell. Korábbi megfigyelések szerint a kukorica esetében a holtvíz tartalom értéke -14 bar vízpotenciálnál van (Anda 2001).

Az input meteorológiai elemek a helyben OMSZ megfigyelési állomáshálózatának is részét képező Eppley pyranométerrel felszerelt automata klímaállomásról származnak. Az állomás a növényi mintavétel helyszínét képező kísérleti tábla mellé lett telepítve. A kezdetben MILOS típusú, majd hamarosan QLC-50 típusú automata állomások működése 1996-ban indult. A korábbi években hagyományos megfigyelési rendszer működött megfelelő észlelő személyzettel. 2006 óta ismét MILOS típusú automata működik Keszthelyen.

A modell futtatások eredményeinek értékeléséhez párosított t-próbát alkalmaztunk, melyet a STATA 5,0 (1996) programcsomag verziója alapján végeztünk. Az eljárás a kétmintás t-próbát egymintásra vezeti vissza, melyre azért van szükség, mert a modell futtatásainál ismétlési lehetőségre, s ezzel szórásszámításra nincs lehetőség. A próba a minta átlagát egy elvárt átlaghoz hasonlítja. A null-hipotézis szerint: ha a különbségek átlaga egyenlő 0-val, akkor a két minta statisztikailag egyezik. Ha a különbségek átlaga 0-tól eltérő, akkor a két minta szignifikánsan különbözik. Az eljárás során a szignifikancia szintet 5%-ban rögzítettük.

3.2. A Goudriaan-féle szimulációs modell (CMSM)

A növény elválaszthatatlanul kötődik környezetéhez, ezért életfolyamatainak megértése és magyarázata speciális mikroklimájának, az állományklímának ismerete és működésének bemutatása nélkül nem lehetséges. Ez vezethette Goudriaant (1977) és hollandiai kollégáinak munkacsoportját (Chen 1984, Goudriaan és van Laar 1994) a megismerést szolgáló mikroklima szimulációs modell megalkotásához, amely az állományklíma mellett a növényi életfolyamatokat is számszerűsítve kezeli.

Az állományokban a környezet hatására bekövetkező speciális növényi válaszreakciók megértéséhez az alapot az anyag- és energiaáramok (fluxusok) követése biztosíthatja. Az anyagáramok közül a fotoszintézisben betöltött szerepe miatt a CO₂ gáz fluxusa kiemelkedő fontosságú. A másik fotoszintézis alapanyagnak, a víznek éghajlati viszonyainkra jellemző szűkössége ad különösen jelentős szerepet. A párologtatásban felhasznált víz a növény hőmérséklet szabályozásán keresztül valamennyi életfolyamat intenzitására hatással van. A két tényezőcsoportot (anyag és energiaáram) csak a szemléltetés szintjén lehet szétválasztani, a valóságban mindig együtt vannak jelen, pl. a fotoszintézisben a sugárzási energia megkötése eredményezi a növény szárazanyag produkcióját, vagy a párologtatáshoz szükséges energiát a napsugárzás szolgáltatja.

A modell működésének elmélete: az állomány által megkötött sugárzási energia (Anda és Lőke (2003), Goudriaan (1977), Goudriaan és van Laar (1994) felosztása az energiaigényes folyamatok között. A Goudriaan féle (1977) mikroklima szimulációs modell, a CMSM (Crop Microclimate Simulation Model) az állomány és a felette lévő légkör között lejátszódó anyag- és energia kicserélődés folyamatait elemzi, s a növényzetre jutó sugárzási energia különböző energiaigényes folyamatokra történő megoszlását és felhasználását számszerűsíti. Az állományra jutó energia egy része visszaverődik, a másik behatol az állományba, s a harmadik legkisebb részét kötik meg a fotoszintézis folyamatában a növények.

Az általunk is használt modell kiindulási alapja az energiaátalakulás és az anyagtranszport az állomány és a fölötte lévő levegőréteg között, melyben a légkör tulajdonságai, mint vezérlő változók irányítják annak lefolyását. Az energia egy részét az állomány visszatartja/tárolja, amit a modell rétegenkénti bontásban vesz figyelembe. Az állomány fejlődési szintjétől függően több-kevesebb homogén rétegre bontható, amelyen belül horizontálisan a vizsgált tulajdonság azonossága érvényesül. Vizsgálatunkban a kukoricát 3 rétegre bontottuk: talajhoz közeli, középső vagy cső szinti és felső rétegekre. Az elemzett vertikális profil, illetve réteg szimulált mutatóit az adott növényréteg közepére számoljuk. A réteg homogenitásának

feltételezésével az érték az egész rétegben azonos, s függőleges irányú áramokkal számolni nem szükséges.

Első lépésként a kiindulási állapot képező állomány által megkötött energia megoszlását és annak meghatározását részletezzük. Az elemzés az életfolyamatok közül a fotoszintézis és éjszakai légzés intenzitásra, valamint a transzspirációra terjedt ki, ezért azok bemutatása előtt a kiinduló energia forrásként szereplő állomány által megkötött sugárzási energiát határozzuk meg. A vizsgált életfolyamatok számításánál figyelembe vett sugárzási spektrum szegmens eltérő. A fotoszintézis (F) esetében a látható tartomány (FAR: fotoszintetikusán aktív sugárzási tartomány), a transzspirációnál a teljes nettó sugárzás figyelembe vétele szükséges.

A sugárzás sorsa erősen függ az állomány szerkezetétől, felépítésétől, ezért annak közelítését a korábbi publikációkban szokásos két meghatározó állomány-állapotra, nyitott és zárt állományokra elkülönítve szükséges elvégezni. Nyitott állomány esetében az eljárás egyszerűbb, mert az állomány önárnyékolásával számolni nem szükséges. Mindkét közelítésnél a sugárzás állományba történő behatolását a *Monsi-Saeki* (1953) féle sugárzás gyengülést (S_o) meghatározó egyenlet adja:

$$S = S_o^{-kLAI} \quad (1)$$

ahol S : állomány vagy réteg tetejére érkező globálisugárzás intenzitása

k : extinkciós koefficiens

LAI : levélfelület index az adott rétegben.

Nyitott állományok sugárzás megkötése (levélfelület-index, $LAI \leq 0,2$)

Diffúz sugárzásnál – teljesen borult égbolt – a sugárzási mező izotróp, s a levél által megkötött sugárzás a levélállás függvénye. A FAR –ból megkötött sugárzás, az R_v tehát:

$$R_v = (1 - \sigma_v) S_{d,o} \quad (2)$$

ahol $S_{d,o}$: sugárzás fluxusa borult időben

σ_v : szórási koefficiens (0,3).

(Teljesen analóg módon kapjuk az infravörös (IR) tartományra vonatkozó megkötött sugárzás mennyiségét is.)

A direkt sugárzásból abszorbeált sugárzás mennyiségének meghatározásakor a diffúz sugárzásnál leírtak szerint járunk el, csak az $S_{d,o}$ -t helyettesíteni kell $S_{d,c}$ -vel, a direkt sugárzás fluxusával, mely esetben a levelek sugárzás által érintett felülete a levél szárral bezárt szögének és a napmagasságnak a függvénye. A levélhányadot kifejező arányt, melyet a sugárzás szinuszos görbéje határol be a $0,1x$ és $0,1x(t-1)$ értékek között, a $Z(\beta,t)$ értékkel közelítjük. A β , egy a levél állásától, hajlásszögétől függő index, melynek értéke 1-9 között változik. A t 10 kategóriát különít el a napsugarak eltérő beesési szöge alapján. Végül a Z függvény az egyes Z_c kategóriákat összegzi az alábbiak szerint:

$$Z(\beta,t) = Z_c(\beta,t) - Z_c(\beta,t-1) \quad (3)$$

ahol a Z_c a kilenc levél állásszög-kategória mindegyikére egyenként meghatározott súlytényező:

$$Z_c(\beta,t) = \sum_{\lambda=1}^9 F(\lambda) S(\beta, \lambda, t) \quad (4)$$

s az $S(\beta, \lambda, t)$: az összes λ hajlásszögű levél aránya.

Az abszorbeált FAR az adott t -index szerint kapható:

$$R_{v,d} = (0,1t - 0,05)(1 - \sigma_v) S_p \quad (5)$$

ahol S_p : a beeső direkt sugárzás intenzitása a sugárzásra merőleges felszínen.

Hasonlóan nyerhető az abszorbeált direkt sugárzás mennyisége az IR tartományra is. Az abszorbeált összes sugárzás (direkt és diffúz) ismeretében levél-kategóriánként (t), majd összegezve a transzspiráció – és a fotoszintézis is – számolható.

Záródott állományok sugárzás megkötése ($LAI \geq 0,2$)

Az állomány j -ik rétegének egységnyi levélfelülete, L_s által megkötött diffúz sugárzás mennyisége az alábbi egyenlettel közelíthető:

$$R_{v,o} = (1 - \rho_{dfv}) S_{d,o} [\exp\{-K_{dfv}(j-1)L_s\} - \exp\{-K_{dfv}jL_s\}] / L_s \quad (6)$$

ahol ρ_{dfv} : a diffúz sugárzás reflexiós koefficiense (FAR-ra)

K_{dfv} : a diffúz sugárzás extinkciós koefficiense (FAR-ra)

L_s : a j-ik réteg levélfelülete.

Derült idő diffúz sugárzásának meghatározására is a fenti egyenlet használható egy kiegészítő taggal ellátva, amely a napos levelek által szórt sugárzás mennyiségét tartalmazza.

Több, az eredeti leírásban részletezett egyszerűsítés után az egységnyi felület által megkötött átlagos sugárzás:

$$\bar{R}_{v,d} = S_b(1 - \sigma_v)sk_b \quad (7)$$

ahol s : a napos levelek aránya

k_b : a direkt sugárzás extinkciós koefficiense.

A differenciát az $R_{v,d}$ és $\bar{R}_{v,d}$ között a napfényes levelek által okozott szórás adja. Az 5-ös egyenlet által leírt abszorbeált FAR szolgál alapjául mind a transzspiráció, mind a fotoszintézis számításának

A közelítésünkben a sugárzás abszorpciót külön egyenletek tartalmazták borult és direkt sugárzással jellemezhető időjárásokra. A köztes helyzetekre az asszimiláció meghatározására az alábbi kifejezés használható:

$$\bar{F} = fF_{ov} + (1 - f)F_{cl} \quad (8)$$

ahol f : a borultság mértéke

F_{ov} : nettó asszimiláció borult égboltnál

F_{cl} : nettó asszimiláció derült égboltnál.

S végül a napos (F_{sh}) és árnyékos (F_{sd}) levél-hányad nettó fotoszintézisei az alábbiak szerint alakulnak:

$$F_{sh} = L_m(1 - s)F(R_s) \quad (9)$$

$$F_{su} = sL_m \sum_{t=1}^{10} Z(\beta, t) F(R_s + R_{v,d}) \quad (10)$$

ahol R_s : az árnyékos levelek által megkötött FAR

$R_{v,d}$: adott réteg átlagos, és a többi rétegből jövő diffúz sugárzása

L_m : maximált zöldfelület ($L \geq 3,0$).

Vizsgálatainkban a teljesen kifejtett kukoricánál a másodikként bemutatott, záródott állományra vonatkozó sugárzás megkötéssel számolt a modell.

A növények, s köztük a kukorica vízellátottsága közvetlenül befolyásolja valamennyi életfolyamatának intenzitását, a transzspirációt és a fotoszintézis intenzitását is. A modell a vízvesztést, a transzspirációt az állomány relatív víztartalma, sztóma ellenállásának szélső értékei és a talajellenállások alapján számolja (Anda és Lőke 2003). Mindhárom összetevőt elméleti úton határozza meg a modell.

Az állomány relatív víztartalma a tényleges és a maximális víztartalom ($LA \times 2,510^{-3} \text{ kgm}^{-2}$) hányadosa. A maximális víztartalom meghatározási alapjaként a 3 mm átlagvastagságú kukorica levél tulajdonságait vette figyelembe a modell alkotója. A tényleges vagy aktuális víztartalom a kukorica vízfelvételének és vízleadásának különbsége, ill. ennek integrálja. A víztelített, turgeszcensz állapotú levél 0,975 víztartalmú.

A transzspiráció-sztóma ellenállás között fennálló kapcsolatnak köszönhetően a sztóma ellenállás a modell alapvető visszacsatolási mechanizmusát képezi. A másik visszacsatolás a növény vízfelvétele, a sztóma ellenállással analóg, az állomány mindenkor, vagy relatív víztartalmától függ. Alacsony relatív víztartalomnál a gyökéren keresztüli vízfelvétel fokozódik. A talaj szántóföldi vízkapacitásánál (telített állapot) a vízpotenciált - 0,1 bar-nak tételezte fel a modell alkotója. A vízfelvétellel szembeni talajellenállás a talajhőmérséklet függvénye, relatív egységben kifejezve (legmagasabb víz-vezetőképesség 40°C-os talajhőmérsékletre lett „beállítva”). A talaj hűlése és túlmelegedése (40°C fölötti értékek) a vízvezető képességet exponenciálisan csökkenti.

A vízszállítást a növény relatív víztartalma határozza meg. A transzspirációs áram fenntartásáért a gyökérellenállás állandóan 0-tól eltérő értéke felel.

3.3. A modellezés során felhasznált outputok számítása

A modell a mikroklíma jellemzők rétegenkénti alakulását és néhány növényélettani tulajdonságot számol. Az élettani jellemzők többségénél (fotoszintézis intenzitás, transzspirációs víz) és a sugárzási energia felhasználásánál – szenzibilis- és latens hőáramok – vertikális profil előállítására a modellben nincs lehetőség.

Az állomány adott rétege által elnyelt sugárzási energia (S_i) más energia fajtákká alakul (szenzibilis hő: H és latens hő: λE). A két hőáram együttesen adja az entalpiát (En_i). Ennek alapján az energiafelhasználás kiinduló állapotát a két alábbi egyenlet tartalmazza:

$$S_i = En_i \quad (11) \quad \text{és}$$

$$En_i = H_i + \lambda E_i \quad (12)$$

A szenzibilis és a latens hő terjedésének nagyságát és irányát intenzív mennyiségek (léghőmérséklet és vízgőznyomás) gradiensei vezérlik. Szél jelenlétében turbulens átvitel, hiányakor molekuláris diffúzió a jellemző hőátadási forma. A növények és a levegő hőtárolását, valamint a fotoszintézisben megkötött energiát az alacsony mértékre való tekintettel a modell elhanyagolja a legalsó, talajközeli réteg kivételével, ahol ugyanezt a talaj hőtárolásával nem tehetjük meg (*Chen* 1984). (Ennek figyelembe vétele a talajhőmérséklet szintenkénti megadásával történik a modell futtatás kezdeti órájában.)

Az adott növényi réteg energia bevétele vagy kiadása a réteg forrásainak és nyelőinek intenzitásaival arányos. A tulajdonság átvitelét gátló tényezőt, a veszteségeket ellenállás jellegű mutatóval vesszük figyelembe (*Goudriaan* 1977). A hőenergia átadásakor fellépő veszteséget $r_{aH,i}$ -vel, a vízgőzárammal szembenit $r_{aw,i}$ -vel, s a turbulens átvitelt korlátozót R_i -vel jelöltük a további egyenletekben. A vizsgálatba vont homogén rétegek számát az állomány sajátosságai, a megfigyelés célja, valamint a vizsgálni kívánt elem egyaránt befolyásolják (*Goudriaan* 1977). Az állomány i -edik rétegében a szenzibilis hőfluxus:

$$H_i = \rho c_p \frac{T_{ci} - T_{ai}}{r_{aHi}} \quad (13)$$

ahol $T_{ci}-T_{ai}$: növény- és léghőmérsékleti differencia ($^{\circ}\text{C}$)

ρ : a levegő sűrűsége (kg m^{-3})

c_p : a levegő állandó nyomáson vett fajhője ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$).

A latens hőfluxus ugyanebben a rétegben:

$$\lambda E_i = \rho c_p \{q^*(T_{ci} - q)\} / [\gamma(r_{awi} + r_{ci})] \quad (14)$$

ahol $q^*(T_{ci}) - q$: adott levélhőmérséklethez tartozó telítési- és a tényleges vízgőz koncentráció különbsége (hPa)

$$H_i = \rho c_p \frac{T_{ci} - T_{ai}}{R_i} \quad (15)$$

r_{ci} és r_{awi} : az állományra és a vízre vonatkozó aerodinamikai ellenállás (s m^{-1})

γ : pszichrometrikus konstans [hPa K^{-1}]

λ : a víz halmazállapot változásához szükséges energia [J g^{-1}].

Az egyes rétegek közti energiaáramlást az R_i turbulensellenállás alapján kaphatjuk (Hunkár 1990):

A latens hőáram pedig:

Az adott i -ik rétegben mindkét kategóriájú energia-forrás a kezdő talajszinttől felfelé haladva megjelenő összes réteg forrásainak együttesét (összegét) jelenti.

$$\lambda E_i = \frac{\rho c_p}{\gamma} \{q^*(T_{ci} - q)\} / R_i \quad (16)$$

A leggyakrabban idézett mikroklíma jellemzőt, a léghőmérsékletet adott i -rétegre ($T_{a,i}$) a modell az alábbi egyenlet alapján határozza meg:

$$T_{a,i} = T_{a,i-1} + H_i R_i / \rho C_p \quad (17)$$

A növényhőmérséklet ($T_{l,i-1}$) közelítése a léghőmérsékletéhez hasonlóan:

$$T_{L,i} = T_{a,i} + (H_i - H_{i-1}) r_{H,i} / \rho c_p \quad (18)$$

A másik sokat citált mikroklíma elem az állomány légnedvesség tartalmát kifejező vízgőznyomás [hPa], az i -ik rétegre, e_i :

$$e_i = e_{i-1} + \lambda E_i R_i (\rho C_p / \gamma) \quad (19)$$

A fotoszintézis intenzitás és a vízgőz transzspiráción keresztül növényből történő eltávozása egyaránt a sztómák nyitottsági foka által szabályozott, így a szimuláció során is együtt

kezelendők. Ha mind a fotoszintézis, mind a párologtatás mint anyagáramok a sztómákon keresztül zajlanak, akkor az ellenállásuk arányának meg kell egyeznie a diffúziójuk arányával. Kukoricánál empirikus megfigyelések szerint a nettó fotoszintézis és a sztóma vezetőképesség (a sztóma ellenállás reciproka) között lineáris kapcsolat áll fenn, a sztóma alatti üreg konstans CO₂ koncentrációjánál. Ez az összefüggés volt az alapja a levél sztóma ellenállás számításának, mert a nettó szén-asszimiláció a megkötött rövidhullámú sugárzásból származtatható (Goudriaan 1977). A fotoszintézis fény-telítődési pontját meghaladva (200 J m⁻² s⁻¹) a sztóma ellenállás minimumára csökken (Stringer et al. 1977). Van Laar et al. (1977) szerint a nettó szén-asszimilációt (F) empirikus úton az alábbi egyenlet adja:

$$F = (F_m - F_d) [1 / \exp(R_v \varepsilon / F_m)] + F_d \quad (20)$$

ahol F_m : a nettó asszimiláció maximuma

F_d : a sötét respiráció

R_v : a megkötött rövidhullámú sugárzás (LAI-re vetítve)

ε : az F- R_v görbe meredeksége alacsony fény intenzitásnál, vagy hatékonyságnál (kukoricánál - $17.2 \cdot 10^{-9}$ kg J⁻¹).

A modell készítői néhány egyszerűsítést is alkalmaztak. A fotoszintézis maximumának meghatározásakor a levelek kora és a külső CO₂ koncentráció átlagait vették alapul. A levélhőmérséklet változásának tendenciáját megfeleltették a léghőmérséklet változási irányainak. A sötétlégzést konstansnak tekintve a maximális fotoszintézist -0.1-nek vették. Végül a sztóma ellenállás egyenletéhez szükséges alap az alábbiak szerint alakult:

$$F = \frac{1.83 \cdot 10^{-6} (C_e - C_r)}{1.66 r_s + 1.32 r_{b,h}} \quad (21)$$

majd ebből kifejezve a tényleges levél ellenállás (r_s):

$$r_s = \frac{1.83 \cdot 10^{-6} (C_e - C_r)}{1.66 F} - 0.795 \quad (22)$$

ahol $r_{b,h}$: hő átadással szemben fellépő ellenállás [s m⁻¹]

1.66 diffuzivitások aránya (CO₂ és H₂O)

$1.83 \cdot 10^{-6}$ váltószám a CO₂ koncentráció kg CO₂ m⁻³ -re történő átalakításához ppm-ből, 20°C-on

C_e : belső CO₂ koncentráció [ppm]

C_r : szabályozó CO₂ koncentráció [ppm]

1.32 CO₂-ra vonatkozó határréteg ellenállás számításához szükséges érték

0.783 empirikus konstans Goudriaan (1977) szerint.

A modell által számolt valamennyi outputot a következő táblázat foglalja össze (8. táblázat).

8. táblázat A Goudriaan féle szimulációs modell által számolt jellemzők
az érzékelhető hő fluxusa az állomány fölött [$\text{J/m}^2/\text{s}$]
az érzékelhető hő forrása [$\text{J/m}^2/\text{s}$]
az érzékelhető hő veszteségének napi összege [J/m^2]
a harmat mennyiségének napi összege [$\text{mm H}_2\text{O}$]
a latens hő fluxusa az állomány fölött [$\text{J/m}^2/\text{s}$]
a latens hő forrása [$\text{J/m}^2/\text{s}$]
a latens hő veszteségének napi összege [J/m^2]
párányomás-profil mbar]
fotoszintézis ráta [$\text{kg CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$]
a CO_2 -asszimiláció napi összege [$\text{kg CO}_2/\text{m}^2$]
az entalpia fluxusa az állomány fölött [$\text{J/m}^2/\text{s}$]
az entalpia-fluxus forrása [$\text{J/m}^2/\text{s}$]
a telítési hő fluxusa az állomány fölött [$\text{J/m}^2/\text{s}$]
a telítési hő forrása [$\text{J/m}^2/\text{s}$]
sztóma ellenállás profilja [s/m]
léghőmérsékleti profil [$^{\circ}\text{C}$]
levél (növény) hőmérsékleti profil [$^{\circ}\text{C}$]
talajhőmérsékleti profil [$^{\circ}\text{C}$]
szélprofil az állományban [m/s]
a párolgás napi összege [mm/m^2]

3.4. A modell bemenő adatigénye

A modell futtatásához input adatokra és paraméterekre van szükség. Bemenő adatként meteorológiai elemeket, növényre vonatkozó jellemzőket és bizonyos talaj tulajdonságokat szükséges alkalmaznunk. A növényi jellemzők közül a levélfelület-index (LAI), a levelek sűrűsége szintenként (esetünkben 3 szintre) és a levelek maximális szélessége szükségesek.

A talaj esetében a talajnedvesség vízpotenciálban kifejezve, a talajhőmérséklet függőleges eloszlása jelenti az input adatokat. A modell paraméterei a növényfajra és a talajtípusra meghatározott sajátosságok.

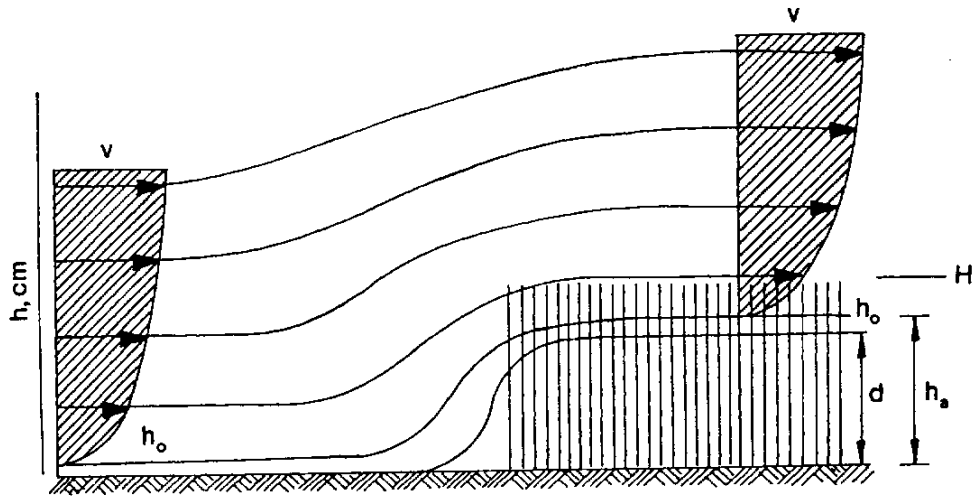
A modell bemenő paramétereinek főbb csoportjai *Páll et al.* (1998) és *Goudriaan* (1977) után:

- a tér- és időbeliséget meghatározó adatok (rétegek száma a talajban és állományban, numerikus kalendárium szerinti nap sorszám, stb.),
- meteorológiai adatok (referencia szintre meghatározott léghőmérséklet, sugárzás, párányomás, szélsébség),
- növényállományra vonatkozó függvények és paraméterek (magasság, levélméretek, vízpoteiál, CO₂ koncentráció, stb.),
- talajra vonatkozó jellemzők (hővezető képesség, hőfluxus, stb.).

A meteorológiai elemek esetében többször az alkalmazás gátjaként jelentkezik a referencia szintre meghatározott értékek felhasználásának szükségessége. A közelítés általunk alkalmazott eljárásait meteorológiai elemenként ismertetjük. Kiindulásként szolgál, hogy a modell légköri területe statikus, vagyis az állomány feletti és azon belüli részek egyensúlyban vannak egymással. Ebből adódik, hogy az állomány feletti referencia szintű meteorológiai elemek egyben a modell vezérlő változói. A talaj a modell dinamikus részét képezi a közeg magas hőtárolása és viszonylag lassú hővezetése miatt.

A kísérleti parcella mellett elhelyezett műszerrel mért globálsugárzásnál nincs szükség adat transzformációra. A Keszthelyen standard körülmények között (talajfelszín felett 5 m-en) mért értékek változatlanul felhasználhatók referencia szintű bemenő adatokként is.

A léghőmérséklet és légnedvesség referencia szintre történő átszámításához a korábbi ismert eljárást alkalmaztuk (*Monteith* 1973, *Oke* 1987). A referencia szintet a modell futtatások során a növény fejlettségétől függően minden szimulációnál külön kell beállítani (15. ábra).



15. ábra Az állomány felépítésének hatása a referencia szint elhelyezkedésére (Szász és Tőkei 1997). H: növénymagasság, d: 0 pont áthelyeződés, h_o : érdességi paraméter, h_s : kiszorítási rétegvastagság.

Az eljárás lényege, hogy az adott fejlettségű állományhoz megtaláljuk azt a szintet, amelyre a standard körülmények között végzett mérések adaptálhatók. Ez a szint a modell referencia szintje, ismert növénymagasságnál és növényfajnál meghatározható. A több rendelkezésre álló empirikus közelítésből a Monteith (1973) féle eljárást használtuk (lásd. 1. ábra):

$$h_o = 0,1H \quad (23)$$

$$d = 0,63H \quad (24)$$

ahol h_o : érdességi paraméter

d: kiszorítási rétegvastagság

H: növénymagasság.

Az ábra alapján a kukorica kiszorítási rétegvastagsága (h_s) a két fent számított érték összege:

$$h_s = h_o + d \quad (25)$$

A kiszorítási réteg vastagsága és a meteorológiai elem – hőmérséklet és légnedvesség – mérési helyének magassága együttesen adja az állomány referencia szintjét (h_{ref}). A két nevezett meteorológiai elem mérése standard körülmények között fűvel bevetett talaj felszíne felett 2 m-en hőmérőházban elhelyezett kombinált szenzorral történt:

$$h_{ref} = h_s + 2 \quad [m] \quad (26)$$

A szélsébséghez alapadatként a keszthelyi meteorológiai állomás $z=10$ m-en elhelyezett szélmérője szolgált. A referenciaszintre meghatározott szélsébséghez (u_{ref}) a logaritmikus szélprofil ismerete mellett a fent meghatározott növényi jellemzők (z , d , h_o) is szükségesek. Első lépésben az ún. súrlódási szélsébség meghatározása szükséges (u^*):

$$u = \left(\frac{u^*}{k} \right) \ln \left(\frac{z-d}{h_o} \right) \quad (27)$$

ahol u : 10 m-en mért szélesség

k : Kármán konstans (0,41).

Ennek ismeretében a referencia szintre számolt szélesség (u_{ref}):

$$u_{ref} = \left(\frac{u^*}{k} \right) \ln \left(\frac{h_{ref} - d}{h_o} \right) \quad (28)$$

A talaj hőforgalmának számításánál a felszín hőforgalma adja a kiinduló állapotot, melyhez a bemenő adatokat, a felső 50 cm-es réteg szintenkénti talajhőmérsékletét indítási adatként meg kell adnunk.

A növényre jellemző adatokból szükséges az állomány LAI-e, a levelek 3 vizsgált szinti sűrűsége, valamint a maximális levél szélesség ismerete. Az állomány struktúrájának megadásával (szintenkénti levélzet megoszlás) a modell a különböző környezeti feltételekhez való növényi adaptáció figyelembe vételét teszi lehetővé. A korábbi megfigyelések alapján módosítottuk a levélzet rétegenkénti mennyiség változását (*Anda és Lőke* 2005). Vízhány a talajhoz közeli levelek leszáradását okozza először.

A külső CO₂ koncentrációt *Haszpra* (2007) hazai háttér értéke alapján választottuk. Az alapfuttatási scenárió időpontjában Keszthelyen is volt CO₂ mérés átmeneti jelleggel, s a helyi bemenő adatok meghatározásánál e koncentrációkat is figyelembe vettük (*Dunkel* 1982). A külső légtér CO₂ gáz koncentrációjának részletes bemutatása a modell scenárióinál történik. A belső – intercelluláris járatok – CO₂ gázkoncentrációja *van de Geijn és Goudriaan* (1996) alapján a külső koncentráció harmada. A modell bemenő adatigényét *Páll et al.* (1998) elemzésére építettük (9. táblázat).

9. táblázat Goudriaan szimulációs modelljének bemenő adatigénye Páll et al. (1998) szerint

1. a referenciaszintre vonatkozó meteorológiai adatok, mint vezérlő változók

párhanyomás a referenciamagasságban [mbar]

globálsugárzás [$\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$]

lég hőmérséklet a referenciamagasságban [$^{\circ}\text{C}$]

szélsebesség a referenciamagasságban [m/s]

2. a növényállományra vonatkozó jellemzők - paraméterek és függvények

a levelek átlagos sűrűdési együtthatója [-]

a gyökér maximális vízszállító képessége [-]

adott hőmérsékleten maximális CO_2 -asszimilációs ráta [$\text{kg CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$]

turbulens intenzitás az állományban [-]

az állomány levélfelületi indexe [m^2/m^2]

belső CO_2 -koncentráció [ppm]

a levél kutikula-ellenállása [s/m]

a xylem ellenállása a vízárammal szemben [$\text{bar m}^2 \text{ s}/\text{m}^3$]

a levelek átlagos szélessége [m]

az állomány vízpotenciálja [bar]

az állomány magassága [m]

3. a talajra vonatkozó termikus tulajdonságok és a talaj állapothatározói

hőfluxus sűrűség a talajfelszínen [$\text{J}/\text{m}^2/\text{s}$]

a talaj hővezető-képessége [$\text{J}/\text{m}/\text{s}$]

a talaj térfogatoshőkapacitása [$\text{J}/\text{m}^3/\text{K}$]

4. a tér- és időbeliséget meghatározó adatok

az év napjainak sorszáma január 1-től számítva [-]

időlépték [óra]

a talajrétegek száma [-]

földrajzi szélesség [-]

helyi idő [óra]

a rétegek száma az állományban [-]

referencia magasság [m]

a talajrétegek vastagsága [m]

3.5. A modell verifikálása

A fizikai modell alkalmazhatóságának vizsgálata korábban a helybeli Agrometeorológiai Kutatóállomáson megtörtént. Az ellenőrzés eljárását és eredmény táblázatait a megjelent publikációkból emeltük ki *Anda és Lőke* (2003) és *Anda et al.* (2001, 2002) szerint.

A modell ellenőrzésének alapja a mért (M) és a szimulált (S) értékek statisztikai azonossága, vagyis a szimulált értékek origón átmenő egyenesre illeszkedése ($y=x$). Ez a feltétel akkor teljesülhet, ha a szimulált és a mért értékekre illesztett egyenesek együtthatói szignifikánsan ($P=5\%$ -on) nem térnek el egymástól (*Wilmott* 1982).

Az RMSD-t (root mean square error) a szimuláció helyességének megállapítására kiválóan alkalmas statisztikai mutató *Castrignato et al.* (1997), melynek számítása az alábbi egyenlettel lehetséges:

$$RMSD = \left\{ \left[\sum (M - S)^2 \right] / n \right\}^{0.5} \quad (29)$$

ahol n: az adatpárok (mért és szimulált) száma.

Három növényi jellemzőnél a regressziós egyenesek tengelymetszete nem különbözött szignifikánsan a nullától 5%-os szinten, így origón átmenő regressziós egyenesek illeszthetőek voltak. A regressziós együtthatók meredeksége sem különbözött szignifikánsan egytől ($P=5\%$), amint az a 95%-os konfidencia intervallumain látszik, ezért a mért és a szimulált értékek azonosak (10. táblázat).

10. táblázat A szimuláció statisztikai értékelésének eredmény táblázata *Anda és Lőke* (2003) szerint. [F: a fotoszintézis intenzitása, r_s : sztóma ellenállás, T_c : növényhőmérséklet]

	F [$\text{mol}^{-6}\text{CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$] [s/cm]	r_s [°C]	T_c
RMSD	2,311	0,906	1,051
Regressziós együttható	0,987	0,795	1,017
A populációs regressziós együttható 95%-os konfidencia intervalluma	[0,957; 1,0184]	[0,503; 1,086]	[0,991; 1,043]
Determinációs együttható (R^2)	0,993	0,831	0,999
A regressziós együttható standard hibája	0,015	0,126	0,011
A reziduumok (hibák) szórása	2,128	1,059	0,980

A két mikroklíma elemre, a léghőmérsékletre és a vízgőznyomásra vonatkozó verifikálás eredményeit *Anda és Lőke* (2005) elemzése alapján szemléltetjük, ahol két vízellátási szinten történt az elemek szimulációs eredményének verifikálása (11. táblázat).

11. táblázat A léghőmérséklet és a légnedvesség verifikálásának statisztikai eredmény táblázata *Anda és Lőke* (2005) alapján. A T_a a léghőmérsékletet, az R_h a relatív légnedvességet jelöli. Mindkét mikroklíma elem állományon belülre vonatkoztatott érték.

	Nem öntözött		Öntözött kezelés	
	T_a	R_h	T_a	R_h
RMSD	0,474	3,055	0,931	2,780
Regressziós együttható	0,997	1,003	1,013	0,961
A populációs regressziós együttható 95%-os konfidencia intervalluma	[0.968;1.026]	[0.939;1.066]	[0.967;1.059]	[0.919;1.003]
Determinációs együttható R^2	0,999	0,998	0,999	0,999
A regressziós együttható standard hibája	0,010	0,023	0,016	0,015
A reziduumok (hibák) szórása	0,525	3,408	0,966	1,913

A léghőmérséklet szimulációjának pontossága 1°C-on belüli, a relatív légnedvességé 10% alatti volt. A mikroklíma jellemzőiből a léghőmérséklet és a légnedvesség szimuláció Keszthelyre vonatkozó értékeinek ellenőrzése méréssel történő összehasonlítása olvasható még *Anda et al.* (2001), (2002) publikációjában. A hiba a légnedvesség esetében 8-9% körüli volt, mely az elem meghatározásának közismerten magas hiba %-át tekintve jónak mondható. A léghőmérséklet közelítése ennél is pontosabb, melyről napi átlagra vonatkozó konkrét %-ot azért nem közöltek a szerzők, mert más volt az eltérés iránya délelőtt és délután, így azok a fenti mutatóban kiegyenlítették egymást. Ez az a napi átlagos hiba % azonban a valóságot elfedné.

A korábbi szimulációs mutatók ellenőrzését célzó eljárások eredménye megnyugtatóan zárult, így a modell ismételt alkalmazásakor – tekintettel arra, hogy a verifikálás és a jelenlegi alkalmazás helyszíne azonos – a korábbi elemzések eredményeit elfogadva azokat nem ismételtük meg.

3.6. Az alkalmazott szcenáriók

A különböző jövőképek összehasonlításának időjárási alapját, a kontroll kezelést (első szcenárió) az IPCC 2007-es jelentésében közzétett forgatókönyvekhez hasonlóan az 1961-90-es évek átlagai képezték, melyeket az Országos Meteorológiai Szolgálat hálózatához tartozó Keszthelyi Obszervatórium gyűjtötte. Az adatokat négy fő észlelési terminusra rögzítették, így a modell óránkénti bontású input adatigényét kielégíteni ezen adatok nem tudták. Az óránkénti napi változás előállításához az éghajlati elemek periodikus változásának ismerete alapján *Péczely* (1976) szerint van lehetőség, amihez a szükséges bemenő adatok (napi maximum és minimum értékek) egy része a fő észlelések dokumentumaiban rendelkezésre álltak. Továbbá szükség volt a Keszthelyre jellemző napi változás tendenciájának pontos ismeretére az elmúlt évtized óránkénti mérési eredményei alapján. Erre lehetőség volt, ugyanis az 1996-ban a Keszthelyre telepített automata klímaállomás 10 másodpercenkénti adatok 20 perces átlagaiból számolja az óraátlagokat. A maximum és minimum értékek, azok bekövetkezési időpontjai, a keszthelyi elmúlt évtized tényleges változás-tendenciája (a hullám fázisszöge³), valamint a meteorológiai elemek napi alakulását leíró görbe-alak (pl. hőmérséklet szinuszos változás, relatív légnedvesség koszinusz görbe alakja) ismerete alapján *Péczely* (1976) szerint közzétett eljárással előállítottuk az 1961-90-es klímanormálok óránkénti értékeit júliusra, ami a modellenél egy „átlagos” időjárás megjeleníthetőségét eredményezte. A kontroll futtatásnál a bemenő CO₂ koncentráció meghatározásához felhasználtuk az 1980-as években helyben végzett CO₂ gázkoncentráció mérések eredményeit, valamint a K-pusztai és Hegyhátsáli háttér koncentráció értékeit (*Dunkel* 1982, *Haszpra* 2007). Végül az alapfuttatás CO₂ koncentrációját 340 ppm-ben határoztuk meg. *Haszpra* (2007) 1981-re a hazai értéket ugyanis 343 ppm-ben rögzítette.

A második szcenárió a közelmúlt változásait hivatott megjeleníteni az 1997-2006-os évtized adatai alapján. Keszthelyen a nyár az utolsó klímanormál szerint 0,6°C-al szignifikánsan magasabb léghőmérsékletű, mint az 1901-2000 adatsor júliusainak havi átlaga (*Anda* 2006a, *Kocsis* 2008). A csapadék július havi összege bár statisztikailag nem igazolhatóan, de mintegy 10-15%-al csökkent Keszthelyen (*Kocsis és Anda* 2005, *Kocsis és Anda* 2006b, *Kocsis* 2008). Ebben az időszakban a meteorológiai inputok a modell által igényelt formában, a referencia

³ A meteorológiai elem változását leíró szinusz (léghőmérséklet) vagy koszinusz görbe (relatív légnedvesség) kiindulási időpontra (t=0) meghatározott szöge. A szög a görbe maximumot és minimumot elérő időpontjaira is számítható. A léghőmérséklet Keszthelyre meghatározott napi változást leíró szinusz görbéjének egyenlete:
 $y = 20,40 + 5,70 * \sin(360^\circ / 24 * t + 200^\circ)$

szintre történő átalakításhoz rendelkezésre álltak. A külső CO₂ koncentrációt *Haszpra* (2007) háttérszennyezés adatai alapján 380 ppm-re becsültük. A szerző hazai háttérként 2006 júniusára 389 ppm-et állapított meg.

A harmadik scenárió a külső CO₂ koncentráció emelésének hatásait hivatott Keszthelyre számszerűen megjeleníteni, ezért az aktuális CO₂ gáz koncentrációt dupláztuk meg (760 ppm).

A további jövőképekben a jelenlegi külső CO₂ szint megduplázása mellett (760 ppm) a léghőmérséklet értékeit az alapfuttatáshoz képest (1961-90) fokozatosan emeltük, s vele együtt a csapadékokat is módosítottuk. A negyedik elképzelés az IPCC 2007-es Helyzetértékelő Jelentésének B2 forgatókönyve alapján *Bartholy et al.* (2007) által hazánkra leskálázott és térképesen megjelenített meteorológiai elemeinek Keszthelyre vonatkozó nyári értékeit tartalmazta 2071-2100-as időszakra előre jelezve. Ebben az elképzelésben a nyári középhőmérséklet Keszthelyen 3,8°C-al emelkedni fog a csapadék mintegy 15%-os csökkenése mellett. Az ötödik scenárió az A2 IPCC-SRES (2000) forgatókönyv szerinti, fentebb leírt módon hazánkra leskálázott nyári adatait használta, a korábbinál erőteljesebb felmelegedéssel kalkulálva (+4,8°C). Ehhez a hőmérséklet növekedéshez 25%-os csapadék csökkenés társul. Említést érdemel, hogy a csapadék változás szórása mindkét forgatókönyvnél meglehetősen magas ($\pm 15\%$!), így erős bizonytalanságot sejtet a csapadék prognózisában. A hatodik forgatókönyvnél a léghőmérséklet átlagát 6,0°C-al emeltük, a csapadék 25%-os csökkentése mellett. A 6°C-os emelés az IPCC Negyedik Helyzetértékelő Jelentésében (2007) a felső, évi átlagban 6,4°C-os határértékhez közeli.

A két utolsó elképzelésben a felmelegedés mértékét magasabbnak, de tekintettel a júliusi fokozott felmelegedésre és hőmérsékleti változékonyságra mégsem végletesen magasnak, +9°C-nak választottuk. A csapadékviszonyok előrejelzésének bizonytalanságát ismerve a 9°C-os felmelegedéshez kétféle csapadékelátást társítottunk. Ebből a hetedik forgatókönyv alig tételez fel csapadékmódosulást (-10%-os változás), a nyolcadik elképzelés ennél jelentősebb szárazodással számol (30%-os csapadék csökkenés). E két utolsó scenárió összehasonlítása a későbbiekben arra is lehetőséget adott, hogy az eltérő csapadékelátás növényre gyakorolt hatását számszerűen megjelenítsük. Ez a csapadékviszonyok előrejelzésének bizonytalansága miatt különösen fontos lehet a változásokra való felkészülés folyamatában (12. táblázat).

12. táblázat Valamennyi forgatókönyv dolgozatban alkalmazott jelölései a t-próbánál és eredménytáblázatainál használt rövidítésekkel. A negyedik forgatókönyvtől lefelé haladva valamennyi scenárió megkétszerezett CO₂ koncentrációt tartalmaz.

Alkalmazott forgatókönyv	Szenárió száma	Szenárió jelölése az ábrák feliratozásánál	Szenárió jelölése a statisztikai eredmény táblázatban
1961-90-es évek átlagos júliusi adatok	1.	1961-90	A.
1997-2006 átlagos adatai	2.	1997-2006	B.
Kétszeres CO ₂ koncentráció	3.	1961-90 2xCO ₂	C.
B2 SRES scen. hazai leskálázott értékei <i>Bartholy et al. (2007)</i>	4.	1961-90 +3,8°C	D.
A2 SRES scen. hazai leskálázott értékei <i>Bartholy et al. (2007)</i>	5.	1961-90 +4,8°C	E.
6°C léghőmérséklet emelés, 25% csapadék csökkenés	6.	1961-90 +6,0°C	F.
9°C léghőmérséklet emelés, 10% csapadék csökkenés	7.	1961-90 +9°C/1	G.
9°C léghőmérséklet emelés, 30% csapadék csökkenés	8.	1961-90 +9°C/2	H.

Az IPCC Negyedik Helyzetértékelő Jelentése (2007) az eddigi legutolsó, tudományos világban széles körben elfogadott, releváns információkat nyújtó, az üvegház hatású gázok Kibocsájtási Forgatókönyvek Speciális jelentéseit (SRES) az előrejelzések elkészítéséhez alkalmazó dokumentum, mely kellő alapot nyújt a hazai meteorológiai elemek leskálázásához.

Az általunk felhasznált globális kiterjedésű forgatókönyvek közül kettő darab, az A2 és B2 SRES scenárió *Bartholy et al.* (2007) által 16 illetve 8 modell futtatás alapján a Kárpát medence térségében 4,5-4,9 °C és 3,8-4,2 °C nyári hőmérsékletváltozást vetített előre, mely Keszthelyen 4,8 °C-nak és 3,8 °C-nak felel meg 2071-2100 között.

Az A1FI forgatókönyv esetleges figyelembe vétele és leskálázása – mely gyors növekedéssel és a fejlődő világ gyorsuló felzárkóztatásával számol egy technológiában elmaradó, fosszilis tüzelőanyag-világban – nyilván még magasabb léghőmérséklet változást vetített volna előre.

Tekintettel arra, hogy az IPCC legutóbbi jelentésében a globális felmelegedés várhatóan 1,1-től 6,4 °C közé tehető 2071-2100 között és *Mika* (2007) szerint ennek hazai megfelelőjéhez – a Kárpát medence hazai érzékenysége miatt – 1,4-szeres szorzót kell alkalmazni, használtuk tudatosan kutató munkánkban a 6,4 °C határértékhez közeli 6 °C-os léghőmérséklet emelést, illetve a felső határ 1,4-szeres szorzatát. Az alkalmazott +9 °C nem évi középhőmérséklet emelkedés. Míg más a témával kapcsolatos kutatások kisebb mértékű változással számolnak és teljes éves időjárási menetek hatásait közelítik, így *Kovács és Fodor* (2005), addig mi modellezésünkben a július hónapot választottuk célidőszakként, melynél a 9°C – os növekedés havi átlagban értendő. Tettük ezt azért is, mert az elmúlt években az extrém helyzetek száma – a hőhullámokkal együtt – érzékelhetően megemelkedett.

Az IPCC Harmadik Helyzetértékelő Jelentése (2001) a légköri szén-dioxid koncentrációt 540 és 970 ppm közé becsüli a hat reprezentatív SRES kibocsájtási forgatókönyv alapján.

Ezt támasztja alá a *PRUDENCE* (2005) jelentése, mely szerint a pesszimistább A2 scenárió esetén 2100-ra várhatóan 850 ppm szén-dioxid koncentrációval, míg az optimistább B2-es scenárió esetén 600 ppm-mel számolhatunk.

Ennek figyelembe vételével kettőztük meg a kutatásunk és kísérleteink időszakában jellemző hazai 380 ppm-et.

Az általunk alkalmazott forgatókönyvek egyrészt tartalmazzák a 2071 és 2100 között várható léghőmérséklet változás és szén-dioxid koncentrációnövekedés tudományos, szakmai szférában akceptált értékeit, másrészt olyan peremfeltételeket választottunk a léghőmérséklet változás maximalizálásával, melynek lehetséges bekövetkezése – egy nem extrém csapadék csökkenéssel párosulva – a legnagyobb erőfeszítésre sarkallja a gazdákat az alkalmazkodás vonatkozásában.

4. EREDMÉNYEK

4.1. A Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia (NÉS)

Széles körű és régóta fennálló egyetértés mutatkozik abban, hogy a klímaváltozás elleni védekezés leghatékonyabb módja az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése. Ezért a nemzetközi erőfeszítések elsősorban az erre vonatkozó egyezmények megkötésére irányultak.

A klímaváltozási probléma kezdeteitől fogva világos, de nem jelent elégséges megoldást a leendő klímaváltozás megelőzése, ha a folyamat megkezdődik, alkalmazkodni is kell ahhoz. Hiszen a még meg sem született kibocsátás-csökkentési célkitűzések nincsenek hatással a klíma jelenlegi és közeljövőbeli állapotára. Az eddig bekövetkezett, emberi eredetű környezeti változások, mint bolygónk felszínének megváltoztatása az erdőirtás, a nagyüzemi mezőgazdasági gazdálkodás, az iparosítás és a nagyvárosok terjeszkedése következtében már önmagában is jelentős hatást gyakoroltak a sugárzási egyensúlyra.

Mindezek a tényezők összeadódva az ipari forradalom kezdete óta a légkör összetételének váltoásaival máris érzékelhető módosulásokat indítottak be a globális és a regionális időjárásban. A felmelegedés, a csapadékrendben megfigyelhető változások, az időjárási szélsőségek számának és jellegének megváltozása, a klímaövek lehetséges eltolódása mind hatással lesz az adott térségek társadalmára, gazdaságára, mezőgazdaságára.

Ennek korai felismerése tükröződik az 1988-as ENSZ Éghajlatváltozási Keretegyezményének (UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change) számos cikkelyében, melyek utalnak az adaptáció fontosságára. Ezek kötelezettségeket írnak elő az egyes tagországok számára az alkalmazkodást megkönnyítő programok megindítására. A fejlett államokat arra is felszólítja, hogy nyújtsanak anyagi támogatást a fejlődő országok számára az adaptáció megvalósítása érdekében. Az IPCC létrejötté szerkezetében is tükrözi az adaptáció fontosságát, amennyiben a 2. munkacsoport (Working Group 2, WG2) 2007-es jelentésének címe: „Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability” (Klímaváltozás hatásai, alkalmazkodás és sérülékenység).

Mindezek ellenére nemzetközi téren az adaptáció kérdésköre háttérbe szorult a kibocsátás csökkenéshez képest egészen 2007 nyaráig, amikor is az Európai Bizottság elindította Zöld Könyvét, „Adapting to climate change in Europe – options for EU actions” (Alkalmazkodni Európában a klímaváltozáshoz - változatok a cselekvésre az Eu-ban) címmel. Magyarország az elsők között lépett, ugyanis a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium

finanszírozásában a Magyar Tudományos Akadémia már 2003-ban kutatást indított: „Globális klímaváltozás – hazai hatások és válaszok” címen.

Ez a munka a kibocsátás csökkentési lehetőségek vizsgálata mellett a klímaváltozás hazai hatásaira és az azokra adandó megelőzési, védekezési, adaptációs és kárelhárítási jellegű válaszok feltárására összpontosított. A munka 2006-ban ért véget egy Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia országgyűlési elfogadására irányuló javaslattal (Láng et al. 2007).

A Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia (NÉS) elkészítését az ENSZ Éghajlatváltozási Keretegyezménye és annak Kiotói Jegyzőkönyve végrehajtási keretrendszeréről szóló 2007. évi LX. törvény 3. §-ának rendelkezése írja elő. A nemzetközi kötelezettségvállalásokkal összhangban, első alkalommal a 2008–2025 időszakra kell kidolgozni az éghajlatváltozási stratégiát. A NÉS célkitűzéseit – a kétévenként kidolgozásra kerülő – Nemzeti Éghajlatváltozási Programok fogják megvalósítani. A NÉS illeszkedik a Kormány által az 1054/2007. (VII.9.) Korm. határozatban elfogadott Nemzeti Fenntartható Fejlődési Stratégiához is.

A NÉS-t a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium Klíma és Energiaosztálya készítette elő, melyet társadalmi vitára bocsátás után, 2008. március 17-én a Magyar Köztársaság Országgyűlése ellenszavazat és tartózkodás nélkül fogadott el (Dióssy 2008).

A NÉS lényegi elemei

A Stratégia időhorizontja 2008-2025; Magyarország középtávú klímapolitikájának az alábbi három fő cselekvési irányát jelöli ki:

- az uniós és nemzetközi követelményeknek megfelelően intézkedéseket irányoz elő az éghajlatváltozást kiváltó gázok kibocsátásának csökkentése és növekedésének megelőzése érdekében. Az üvegházhatású gázok kibocsátásának mérséklését az összes energiafelhasználás csökkentésével együtt kell megvalósítani, úgy, hogy a termelés és fogyasztás szerkezete a kevésbé anyag- és energia-igényes irányba mozduljon el.
- tartalmazza a már elkerülhetetlen éghajlatváltozás kedvezőtlen ökológiai és társadalmi-gazdasági hatásai elleni védekezésnek, az éghajlatváltozás következményeihez való alkalmazkodóképesség javításának legfontosabb elemeit; valamint
- célul tűzi ki az éghajlatváltozás társadalmi tudatosítását és a klímatudatosság erősítését.

A NÉS alapelvei

- Fenntarthatóság elve: a stratégia intézkedései figyelembe veszik a jövő nemzedékek életfeltételeit, igényeik kielégítésének feltételeit.
- Rendszerszemlélet: a stratégia az éghajlatváltozást a környezeti változást okozó hajtóerők, terhelések, állapot, hatás és válaszok dinamikus rendszerében értelmezi.
- Elővigyázatosság elve: a stratégia az éghajlatváltozás hatásait, emberi, természeti és társadalmi-gazdasági veszteségek realitása esetén, megfelelő óvintézkedések bevezetésével számol akkor is, ha tudományosan még nem bizonyított az egyértelmű ok-okozati összefüggés vagy a várható veszteség mértéke.
- Közös, de megkülönböztetett felelősség elve: az éghajlatváltozás globális természete valamennyi ország legszélesebb együttműködését teszi szükségessé és igényli azok részvételét a hatékony és megfelelő nemzetközi cselekvésben lehetőségeiknek, valamint a társadalmi és gazdasági feltételeiknek megfelelően.
- Szolidaritás elve: az egyes ember és a társadalom lényegük szerint és tevékeny módon egymásra vannak utalva, így a kölcsönös kötelezettségvállalás és egymás megsegítésének szerepét hangsúlyozza.
- Megelőzés elve: általános érvényű, egyértelműen bizonyított elv, hogy a veszteségekkel fenyegető változások megelőzésének költsége akár több nagyságrenddel is kisebb, mint a bekövetkezett kár helyreállításának várható ráfordításai.
- Decentralizáció, regionalizmus elve: a klímaváltozáshoz kapcsolódó intézkedések megvalósításának, a munka- és hatáskör megosztásának a szubszidiaritás elvén kell alapulnia.
- Környezeti igazságosság elve: korra, nemre, etnikumra és társadalmi-gazdasági helyzetre való tekintet nélkül biztosítani indokolt az egyenlő hozzáférés jogát a környezeti közjavakhoz és az egészséges környezethez, a környezeti károk terheit és felszámolásának költségeit pedig méltányos módon kell elosztani az érintettek között.
- Környezeti áterhelések kiküszöbölése: csak olyan intézkedések elfogadhatók, amelyek nem okoznak összemérhető környezeti terheket más környezeti és természeti rendszerekben és térségekben.
- Lényeges és figyelemre méltó az integráció elve, ugyanis a környezet megóvása minden ágazati politika szerves részét alkotja. Ennek megfelelően az éghajlatváltozási stratégia szempontjait és iránymutatásait célszerű beépíteni

valamennyi hazai kormányzati stratégiába, tervbe és programba, amelyek tevékenységei a klímaváltozással közvetlenül vagy közvetve összefüggésben állnak. Az integráció elve számos további kötelezettséget állít fel:

- a klímapolitikát be kell építeni a fejlesztéspolitikába;
- a klímaváltozás és a hatásai elleni küzdelmet és védekezést a kohéziós politika magjává, szervező erejévé kell tenni;
- a megelőzési és alkalmazkodási intézkedéseket szervesen integrálni kell a már létező és a most készülő jogalkotási tevékenységbe, fejlesztési projektekbe, közösségi finanszírozású operatív programokba és akciótervekbe;
- a már zajló fejlesztéseknek el kell végezni a klímaérzékenységi vizsgálatát (a fejlesztés legyen összhangban a kibocsátás-csökkentés és az alkalmazkodás szempontjaival);
- a klímakutatásokat integrálni kell az egyéb tudományos vizsgálatokba és kutatásokba;
- be kell vonni a társadalmat és az üzleti szférát a klímapolitika alakításába;
- új társadalmi, gazdasági, technológiai és fejlesztési irányokat kell keresni;
- a klímapolitikát érintő fejlesztések megvalósításánál érvényesíteni kell a decentralizáció és a területiség elvét.

A NÉS prioritásai

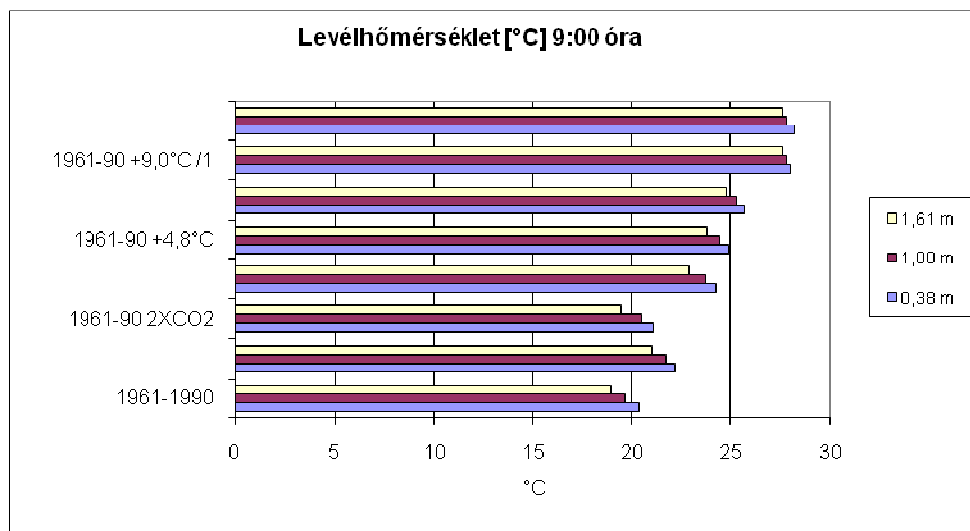
- A nemzetközi kötelezettségek maradéktalan teljesítése;
- Az éghajlatváltozás hajtóerői elleni küzdelem (ide értve nem csupán a technológiai, hanem a társadalmi, szokás- és értékrendbeli hajtóerőket is, melyek ellen szemléletformálással és a fenntarthatóság szellemiségének erősítésével lehet eredményesen fellépni);
- Az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése;
- Alkalmazkodás a klímaváltozáshoz.

A nemzetközi kibocsátás-csökkentési vállalások teljesítésének rendszere hazánkban nem tér el jelentősen más államok hasonló erőfeszítéseitől. Relatív újszerűsége miatt inkább az alkalmazkodással kapcsolatos teendők kerülnek az érdeklődés homlokterébe. Az átalunk készített esettanulmány a Magyarországon fontos szántóföldi növény, a kukorica termesztésének feltételrendszerében beálló változásokat mutatja be szimulációs modell vizsgálattal, a várható éghajlati változások (magasabb légköri széndioxid-tartalom, magasabb hőmérséklet, változó, szélsőséges csapadék-ellátottság) függvényében.

4.2. A bemutatásra választott növénymagasság, a cső szintjének szimulációs eredményei

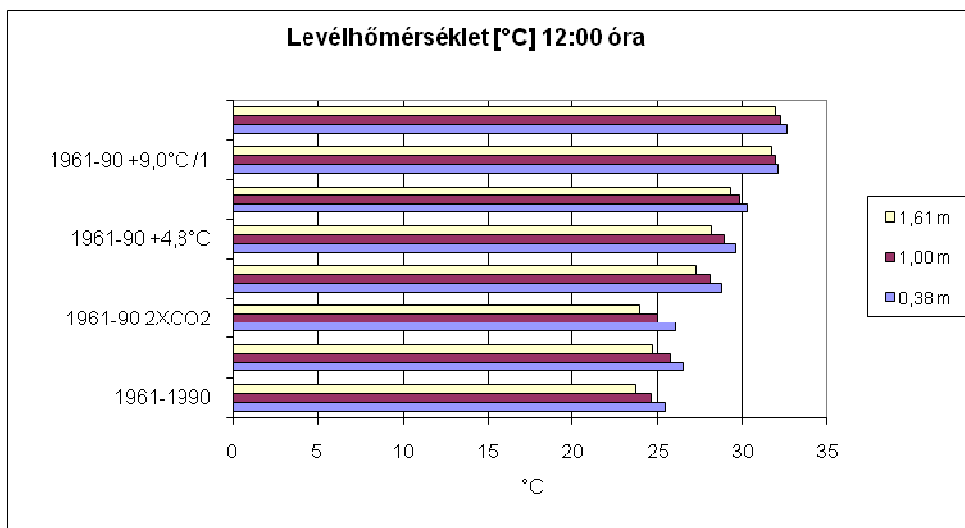
A hibridünk cső-magassága a talaj felszínétől sok év átlagában 1 m-re helyezkedett el, mely évjáráttól lényegesen nem függött. Egy-egy szárazabb évben, amikor a növények átlagmagassága mintegy 10-20 cm-rel csökkent, a csövek is valamivel alacsonyabban helyezkedtek el, bár az eltérés a növénymagassághoz hasonlóan legfeljebb 10-15 cm-re tehető. A 30 éves megfigyelési adatsor alapján az 1 m-es talajfelszín feletti cső-magasság azért kedvező, mert ez a távolság egyben a modell egyik szimulációs eredményt megadó helyszíne is egyben.

Az egyes outputok egyenkénti elemzése előtt a növényhőmérsékletre vonatkozó eredményeket a modell különböző szimulációs helyeire kezelésenként 2 napállásra, alacsony és magas beesési szögnél külön-külön szemléltetjük (16. ábra).



16.ábra A növényhőmérséklet alakulása alacsony napállásnál a talajtól 0,38 m-re, 1 m-re és 1,61 m-re, mely a felső levélemeletek megjelenési helye

Az ábra alapján megállapítható, hogy az egyes szintek értékeinek eltérései a magasságtól függően azonos tendenciát követnek. A növényhőmérséklet Szenáriótól függetlenül a talajhoz legközelebbi szinten a legmagasabb (kék színű oszlopok), melyet a cső szintje követ, majd a legalacsonyabb hőmérsékletet a legfelső levélemeleteken találjuk. A tendencia magas napállásnál sem változik, csupán a növényhőmérséklet abszolút értékei emelkednek a reggeli órákban mért értékekhez képest (17. ábra).



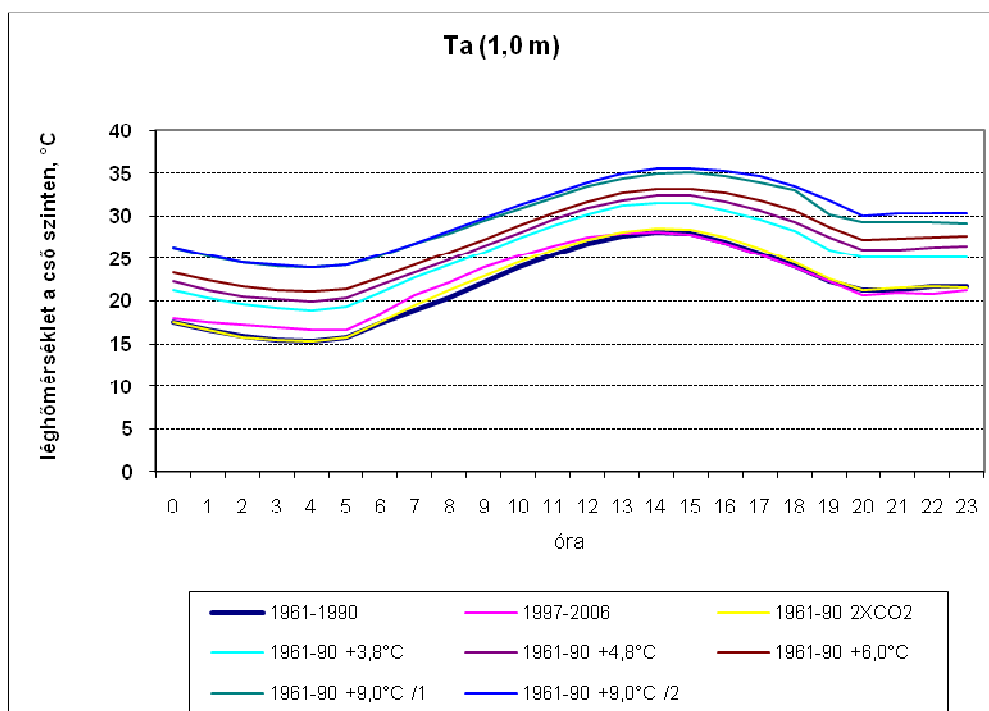
17.ábra A növényhőmérséklet forgatókönyvenkénti alakulása magas napállásnál 3 szinten: a talajtól 0,38 m-re, 1 m-re és 1,61 m-re.

Tendencia jelleggel az eltérő szintekre vonatkozó értékek alacsonyabb növényhőmérsékleteknél (hűvösebb időjárás szimuláció) napállástól függetlenül kifejezőbbek voltak. A továbbiakban eredményeinket a cső szintjére, a talajfelszíntől 1 m magasságra mutatjuk be mindazon elemeknél, ahol a változás a további szintek bemutatását külön nem igényli.

4.3. Az állományon belüli léghőmérséklet alakulása

A kukorica esetében a hőmérsékletekre (növény- és léghőmérséklet) vonatkozó megfigyelések azért nagy jelentőségűek, mert annak ellenére, hogy a C₄-es növények kevésbé érzékenyek a környezet változásaira C₃-as társaiknál, a globális felmelegedésre adott sugárzási- és hőmérsékleti válaszreakcióik szignifikánsnak mutatkoztak (Mera et al. 2006).

Az eredmények szemléltetésére szolgáló legintenzívebb életfolyamatok színhelyén, a cső szintjében a megemelt külső léghőmérséklet növelte az állományon belüli légtér hőmérsékletét. Az állomány melegedésében lényeges eltérés napmagasságtól függően nem volt tapasztalható, bár a melegebb forgatókönyveknél a maximum hőmérséklet kialakulásának időpontja tendencia jelleggel egy-egy órával 14 órától 15 órára tevődött át (18. ábra).



18. ábra Az állományon belüli léghőmérséklet alakulása a kukorica cső szintjében egy átlagos júliusi napon, Keszthelyen

Keszthelyen a vizsgált közelmúlt 10 éve alatt a globális felmelegedés nem volt hatástalan az állományon belüli léghőmérséklet alakulására. Az összehasonlítás során számos kutatásban alapként szolgáló 1961-90-es klíma-normálhoz képest a külső léghőmérséklet növekedését követte a cső szinti hőmérséklet emelkedés, melynek mértéke egy átlagos júliusi napon az 1961-90-es évek átlagához képest szignifikánsan 0,6°C volt (13. táblázat).

13. táblázat A cső szinti léghőmérséklet napi átlagainak eltérésére vonatkozó statisztikai elemzések alapadatai. Az átlag a modell által számított napi átlagot jelenti. **Vastag betűvel a t-próba azon p értékeit emeltük ki, amelyek legalább 5%-os szinten szignifikáns eltérést jelentenek.** A hasonlításba vont pároknál **az alapként használt scenáriót vastag és dőlt betűvel jelöltük** egy-egy sorkihagyással elválasztva az összehasonlításba vont pár(jai)tól

Szenárió-párok	átlag [°C]	t-próba számított p értéke	standard hiba
A=alap	21,66667		
B	22,24167	0,0025	0,1691036
C	21,96667	0,0001	0,0625543
D	25,34583	0,0000	0,0380595
E	26,28333	0,0000	0,0597903
F	27,27083	0,0000	0,0963988
G	29,48333	0,0000	0,1475238
H	29,95833	0,0000	0,1490205
G=alap	29,48333		
H	29,95833	0,0000	0,0856031
D=alap	25,34583		
E	26,28333	0,0000	0,0398423
F=alap	27,27083		
G	29,48333	0,0000	0,0925313
H	29,95833	0,0000	0,0568855

Az alapfuttatás (1961-90) inputjaiból egyetlen bemenő paraméternek, a külső CO₂ koncentrációnak a megkétszerezése az állományon belüli léghőmérsékletet a cső szintjében 0,3°C-kal szignifikánsan növelte, jelezve a magasabb CO₂ koncentráció sztomák mozgására kifejtett pórusok záródását serkentő hatását. A sztoma nyílások zárásának fokozása a párolgást (és ezzel együtt a CO₂ felvételt is) mérsékli, s az energia akár más energiafelhasználó folyamatoknál, így többek között a szenzibilis hő egyik alkotójaként többletként jelentkezhet. *Fulco* és *Asseng* (2006) szerint a CO₂ szintjének 50%-os emelése a sztomákra gyakorolt hatás eredményeként 2°C-os felmelegedés és a csapadék 15%-os csökkenésének a hatását képes kompenzálni. A szerzők arra is felhívták a figyelmet, hogy a

hatás nem lineáris, így pl. 100%-os CO₂ szint emelés 4°C-os felmelegedés hatásainak kompenzálására már nem alkalmas.

Az első és a harmadik scenárió és a két IPCC származtatású futtatás eredményeinek összehasonlítása arra enged következtetni, hogy a melegedés és a CO₂ koncentráció megkétszerezésének összekapcsolása együttesen, egymás hatását mintegy „kioltva” mérsékeltebb állományon belüli léghőmérséklet változást indukál. Ez egyezik *Prasad et al.* (2006) korábbi tapasztalataival.

Mind az A2, mind a B2 forgatókönyv hazánkra leskálázott változást szimuláló forgatókönyveinél az állományon belüli melegedés mértéke nem érte el a felmelegedés során alkalmazott külső léghőmérséklet növelésének a szintjét, ami arra enged következtetni, hogy az állomány jelenléte a felmelegedést némiképp kompenzálhatja. A kompenzáció mértéke mindkét forgatókönyvnél azonos volt (0,2°C). A külső környezeti kényszerre adott állományon belüli léghőmérséklet változás mértéke mindkét IPCC vonatkozású scenárió esetében (A2 és B2) hasonló tendenciájú volt, de nagyságát tekintve egymástól szignifikánsan különbözve követte a felmelegedésben szimulált hőmérsékletváltozást. Ez azt jelenti, hogy a felmelegedés abszolút értékei a két állományban eltérőek voltak, csupán a kontrollhoz képesti változás mértéke volt azonos. Az A2 scenárió esetében a felmelegedés mértéke az állományon belül meghaladta a B2 értékét.

A globális felmelegedést jobban, de nem végletesen felerősített két utolsó scenáriónál az állomány cső szinti léghőmérsékletet kompenzáló hatása megmaradt, viszont erősen függött a nedvesség ellátottságtól. A csapadék kisebb csökkenését feltételezve (-10%) az állomány jelenléte a 9°C-os külső felmelegedést 1,2°C-kal volt képes mérsékelni.

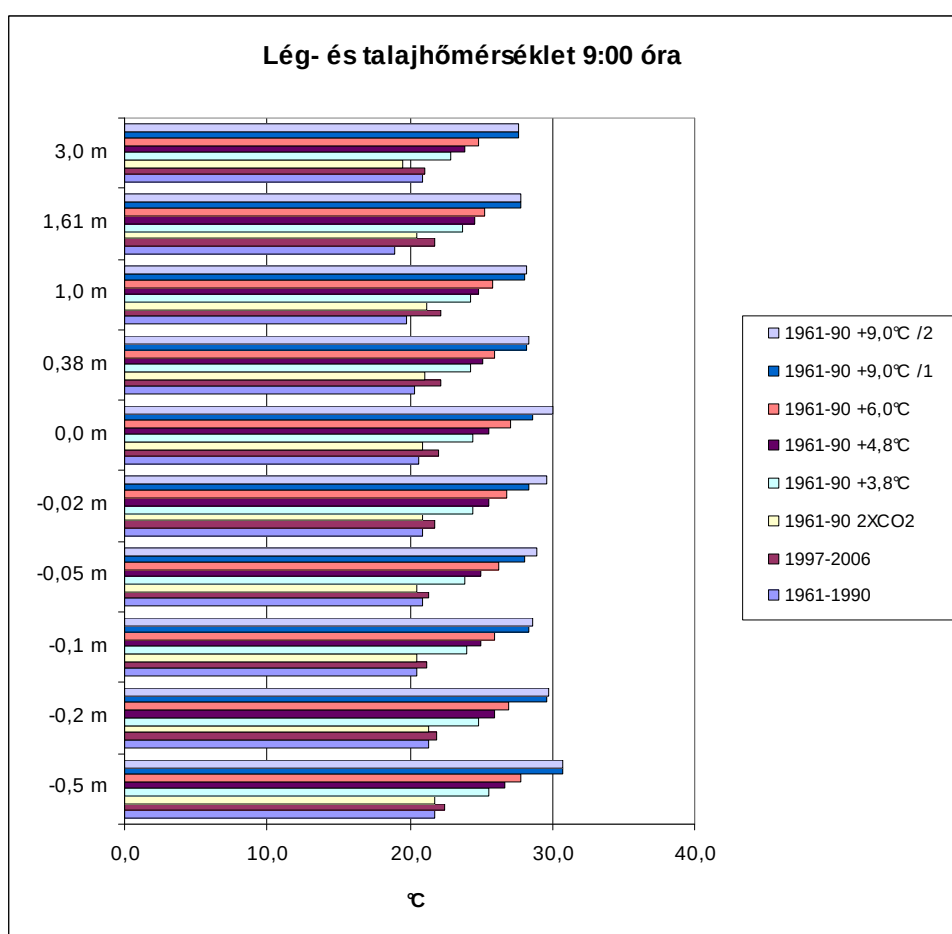
Ez valószínűleg a nagyobb zöldfelület jelenlét fokozottabb árnyékoló hatásának köszönhető, mely a jobb vízellátás eredményeképpen alakulhat ki. Amennyiben a fent említett mértékű melegedést a csapadék jelentősebb csökkenésével (-30%) kapcsoljuk össze, s vele együtt kisebb árnyékoló zöldfelület jelenlétet is feltételezve elemezzük, a kompenzáló hatás rögtön a kb. felére, 0,7°C-ra mérséklődik.

Az állományon belüli léghőmérséklet napi változás statisztikai értékelésének alapadatait az 13. táblázatban foglaltuk össze. Az alapfuttatáshoz képest valamennyi forgatókönyv napi átlagában tapasztalt felmelegedés magas valószínűségi szinten szignifikáns eltérést jelent. Igazoltnak tekinthető a CO₂ szint megduplázása esetén az állomány levegő hőmérsékletének emelkedése.

Ehhez hasonlóan a két utolsó scenárió léghőmérsékletében a csapadék ellátottság módosítása is szignifikáns állományon belüli felmelegedés eltérést okoz. Valódi változást jelent az állományon belüli léghőmérsékletben a 6°C-os melegedéshez képest mindkét 9°C-os léghőmérséklet emelést tartalmazó futtatás válasza is.

A modell eredeti célja az állomány mikroklimájának szimulációja, melyből a léghőmérséklet az egyik leggyakrabban tanulmányozott meteorológiai elem. A modell a hőmérséklet szimulációját részletesebben végzi, mint a többi növényélettani mutatóét, mivel több szintre történik a változó meghatározása.

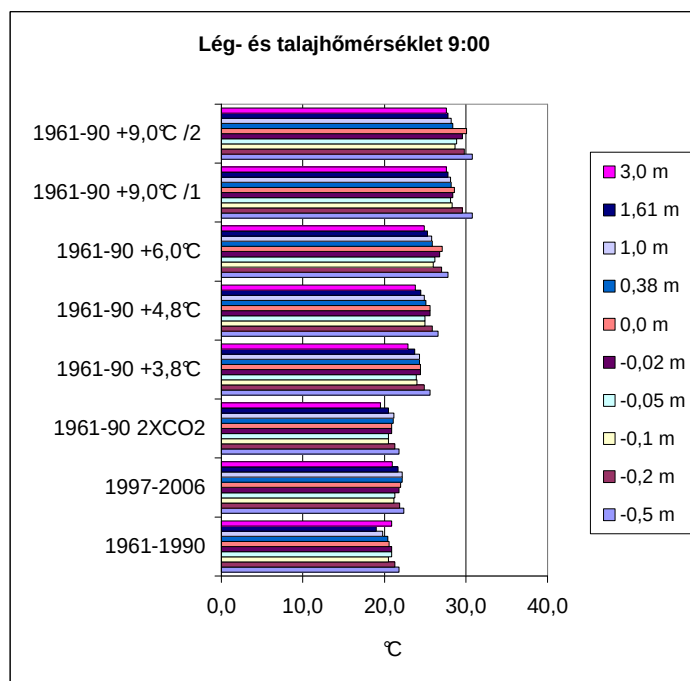
A léghőmérséklet esetében az elem előállítása a talaj felszínétől 3 m-es magasságig tart, s vele együtt történik a talajhőmérséklet 50 cm-es mélységig való számítása is (19. ábra).



19. ábra A léghőmérséklet és a talajhőmérséklet vertikális profiljai alacsony napállásnál (9 órakor) Keszthelyen. A talajhőmérséklet szimulációs helyeit negatív előjellel láttuk el; 0 cm jelenti a talaj felszínét

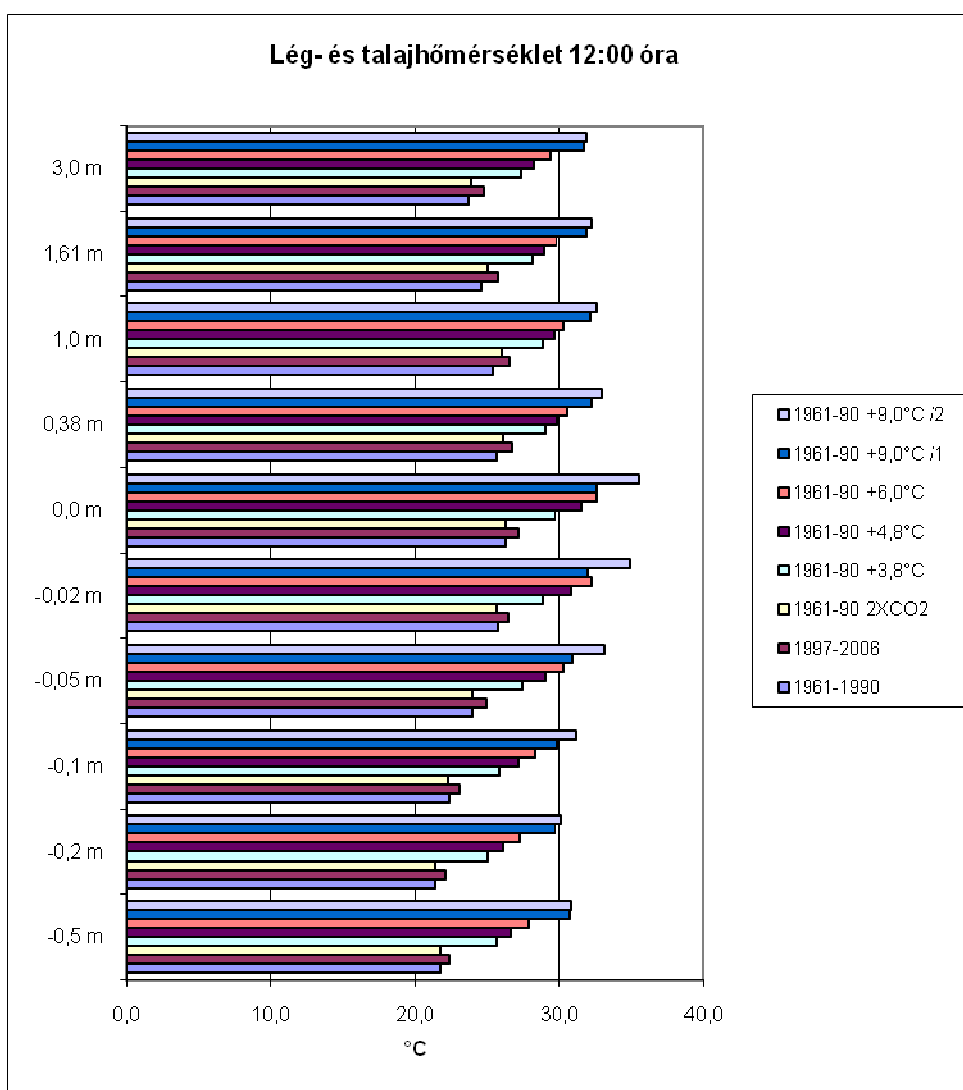
A talajhőmérséklet negatív előjellel szerepelő szintjei (2, 5, 10, 20 és 50 cm) megfelelnek a standard meteorológiai megfigyeléseknél alkalmazott talajhőmérséklet mérési helyeinek.

Reggel 9 órakor a mélyebb rétegek némiképp magasabb talajhőmérséklete minden forgatókönyvnél jól követhető. Az 1,80 m magas növényállomány feletti 3 m-es légréteg hőmérséklete minden kezelés felett hűvösebb, mint az állomány 1,6 m-es szintjére számolt érték. A kontrollhoz képest kizárólag a CO₂ koncentráció megduplázásában részesített szcenárió kivételével a léghőmérséklet a talajhoz legközelebbi rétegben egy kissé melegebb, s felfelé haladva némiképp csökken. A csupán megkétszerezett CO₂ szintnél az állomány cső- és az a feletti szintjében a léghőmérséklet a legalsó szinthez képest néhány tized fokkal emelkedett, s csak az állomány magasság feletti 3 m-es szint esetében csökkent, ahol viszont a leghűvösebb állomány feletti léghőmérsékletet alakította ki. Az energia szétosztásában az energia nagyobb része maradt az állományban, s kevesebb adódhatott át az állomány feletti légtérbe. Más csoportosításban is állítottunk elő vertikális profilokat, ahol az egyes szcenáriók alkotnak egy-egy kategóriát a függőleges tengelyen (20. ábra). Ebben az esetben a forgatókönyvekhez tartozó hőmérsékletalakulást egyenként, a talaj 50 cm-es mélységétől felfelé haladva 3 m-ig szemléltetjük. A talajfelszín feletti 3 m-es szint 1,20 m-el van magasabban, mint az állomány legfelső pontja. A szcenáriók felsorolása növekvő felmelegedést megjelenítő sorrendben történt. Ezt a grafikon oszlopainak hosszúság alakulása hűen visszatükrözi, s ahogy haladunk felfelé az egyre nagyobb felmelegedést szimuláló forgatókönyvekkel, úgy alakul ki délelőttre az egyre melegebb talajú és levegőjű növényállomány.



20. ábra Hőmérsékleti profilok a talaj 50 cm-es mélységétől a talajfelszín feletti 3 m-es magasságig alacsony napállásnál

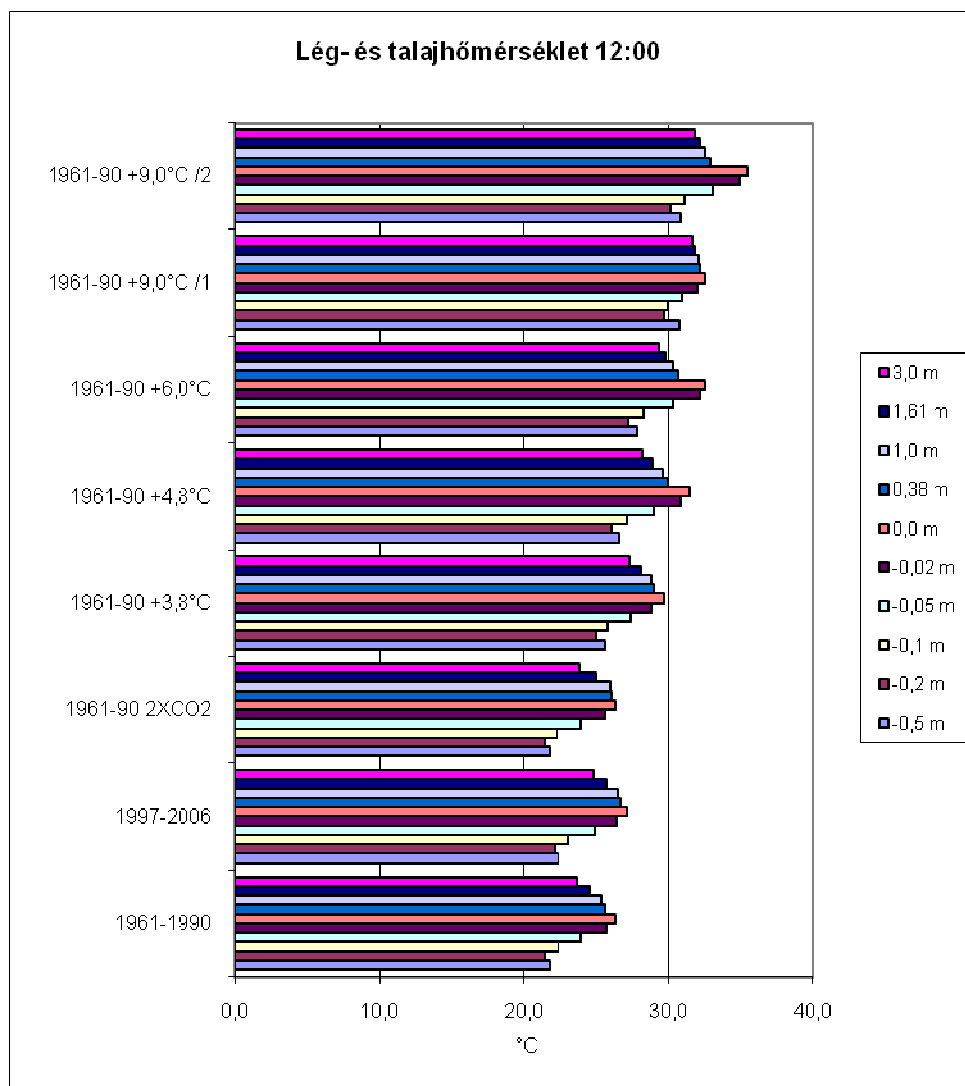
Magas napállásnál a különböző szintek közötti hőmérséklet eltérések mind a talajban, mind a levegőben növekszenek (21. ábra). Az erőteljes besugárzás eredményeképpen a felszínhez közeli talajrétegek hőmérséklete a mélyebb réteghez képest erőteljesebben emelkedik. A legmelegebb szintet a talaj felszíne képviseli. 4,8°C-ot meghaladó felmelegedés szimulációnál már a 2 cm-es réteg talajhőmérséklete is legalább eléri, vagy meghaladja a 30°C-ot. Nem szabad elfeledkezni arról, hogy a bemutatott talajhőmérséklet állományon belüli érték, amely a növények árnyékoló hatására alakul, ezért különösen magasnak tekinthető.



21. ábra A léghőmérséklet és a talajhőmérséklet vertikális profiljai magas napállásnál (12 órakor) Keszthelyen. A talajhőmérséklet szimulációs helyeit negatív előjellel láttuk el; 0 cm jelenti a talaj felszínét

A scénáriónként egybegyűjtött talaj- és léghőmérséklet vertikális profiljaiból kiderül, hogy az alacsony beesési szögnél bemutatott scénáriónkénti talaj- és léghőmérséklet eltérésekhez

hasonlóan, a különböző felmelegedési szintet megjelenítő forgatókönyvek állományainak melegebb illetve hűvösebb volta jól nyomon követhető. A csupán megkétszerezett CO₂ koncentrációjú kezelés többi scenárióhoz viszonyított hűvösebb volta itt is említést érdemel (22. ábra).



22. ábra Hőmérsékleti profilok a talaj 50 cm-es mélységétől a talajfelszín feletti 3 m-es magasságig, magas napállásnál

A délre vonatkozó szimulációkban megemelkedett a 30°C-ot elérő és meghaladó futtatások száma. 9°C-os felmelegedés prognózist megjelenítő kezelésnél az egész állomány talajfelszín alatt és felett egyaránt melegebb, mint 30°C.

Az eltérő forgatókönyvek az állományon belüli léghőmérséklet külső hőmérséklet növelésével arányos mértékű emelkedését prognosztizálják. Ez Lobell és Field (2007) vizsgálatai szerint

több eltérő élettani csoportba sorolható növényfaj, s köztük a C₄-es kukorica életfolyamatait is várhatóan negatív irányba befolyásolja.

4.4. A cső-színti növényhőmérséklet alakulása

A növényhőmérséklet szerepe az élettani folyamatokban kiemelkedő, mivel a biokémiai reakciók sebességét a pillanatnyi léghőmérséklet határozza meg. A hatást az optimum-görbe növényfajonként, fajtánként, fejlődési fázistól függően eltérő értékekkel, de azonos görbe-alakkal tartalmazza. A növények életében a növényhőmérséklet és a léghőmérséklet csak a magyarázat szintjén választható szét, mivel ezen elemek egymást meghatározó, egymástól nem független értékek. A növény hőmérséklete, szemben például a magasabb rendű élőlények testhőmérsékletével, a külső környezeti léghőmérséklet által szabályozott oly módon, hogy a növény párologtatásával mindaddig hűti magát, amíg felszínhőmérséklete a léghőmérséklet közelébe, vagy az alá nem kerül (Anda 2006). Stressz-helyzet, pl. vízhiány okozhatja a növényhőmérséklet léghőmérsékletet meghaladó értékét, mely minden esetben az életfolyamatokban káros hatást fejt ki. A Van't Hoff törvény szerint az egyes életfolyamatok intenzitása az életfolyamat megindulásától annak legmagasabb szintjéig (bázis- és az optimum hőmérséklet között) a léghőmérséklet 10°C-os emelkedésével megkétszereződik, vagy megháromszorozódik attól függően, hogy melyik életfolyamatról van szó (Anda és Dunkel 2000; Anda és Kocsis 2006). A növényi szárazanyag-előállítást a két alapvető életfolyamat, a fotoszintézis és a légzés közti különbség határozza meg. A léghőmérséklet emelkedésekor egy bizonyos szintig nő a fotoszintézis intenzitása – az optimum hőmérsékletig –, viszont a légzés intenzitása ugyanebben a léghőmérsékleti tartományban a fotoszintézisénél meredekebben emelkedik, s ezért a két életfolyamat különbségeként előálló szárazanyag produktum növekedése magasabb külső hőmérsékletnél mérsékeltebb.

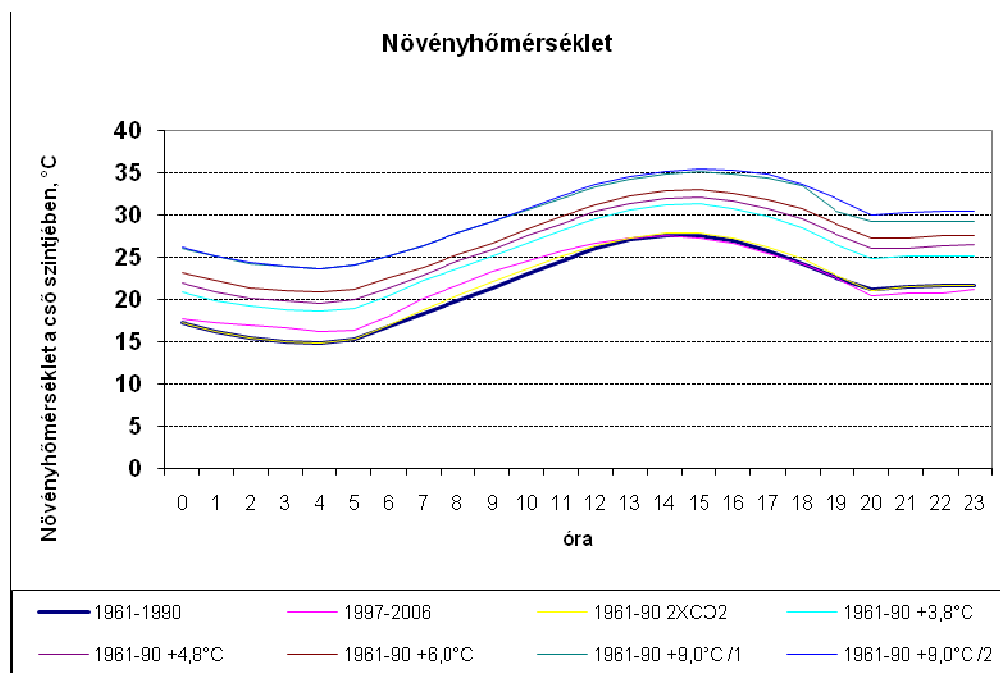
Az eredményeink a növényhőmérsékletre és a cső szintű léghőmérsékletre vonatkozóan is összecsengtek Anda és Lőke (2006) kukoricára vonatkozó korábbi közleményével, melyben a két hőmérsékleti érték egymáshoz nagyon hasonló változásairól számolt be. A cső szinten mért növényhőmérséklet a CO₂ koncentráció megkétszerezésénél mérsékeltén változott, napi átlagban 0,2°C-os napszaktól független szignifikáns növekedést mutatott (14. táblázat). Ez a megemelt szén-dioxid gázkoncentráció sztómát szűkítő, s párologtatást mérséklő hatásával van kapcsolatban, mely a növényhűtés elmaradása miatt a növény csekély mértékű melegedését okozza.

14. táblázat A cső szinti növényhőmérséklet napi átlagainak eltérésére vonatkozó statisztikai elemzések alapadatai. Az átlag a modell által számított napi átlagot jelenti. **Vastag betűvel a t-próba azon p értékeit emeltük ki, amelyek legalább 5%-os szinten szignifikáns eltérést jelentenek.** Az összehasonlításba vont pároknál *az alapként használt szcenáriót vastag és dőlt betűvel* jelöltük egy-egy sorkihagyással elválasztva az összehasonlításba vont pár(jai)tól

Szcenárió-párok	átlag [°C]	t-próba számított p értéke	standard hiba
A=alap	21,32500		
B	21,89583	0,0059	0,1881912
C	21,55833	0,0000	0,0516632
D	25,05417	0,0000	0,0373387
E	26,00417	0,0000	0,0503536
F	27,05000	0,0000	0,0828063
G	29,42500	0,0000	0,1290995
H	29,79167	0,0000	0,1270723
G=alap	29,42500		
H	29,79167	0,0000	0,1270723
D=alap	25,05417		
E	26,00417	0,0000	0,0324149
F=alap	27,05000		
G	29,42500	0,0000	0,0836768
H	29,79167	0,0000	0,0473641

Az elmúlt évtized cső szinti növényhőmérséklete a léghőmérséklethez hasonlóan napi átlagban szignifikánsan 0,6°C-al emelkedett, de ez az alapfuttatáshoz (1961-90) viszonyított eltérés – az állományon belüli cső szinti léghőmérséklettel szemben – már jellegzetes napi változékonyságot mutatott (23. ábra). Az éjszaka második felétől egészen magas napállásig a közelmúlt növényhőmérséklet emelkedése óraátlagban jelentős, 1-1,5°C között alakult. A

legmagasabb napállású időszakban kisebb mértékben, késő délután erőteljesebben a két scenárió hőmérséklete közti eltérés iránya ellenkezőjére fordult, s mértéke $-0,2$ - $-0,7^{\circ}\text{C}$ között stabilizálódott. Az eltérő napállású időszakok értékeinek együttes kezelése eredményezte végül növényhőmérséklet a $0,6^{\circ}\text{C}$ -os napi átlagos emelkedését. Ilyen napszakos változékonyságot a többi scenárió 1960-90-es alapfuttatás értékkel történő összehasonlításánál nem tapasztaltunk. A többi scenáriónál mért 1961-90-es futtatáshoz hasonlított eltérések nagysága napszaktól függetlenül állandónak bizonyult.



23. ábra A cső szintjére szimulált növényhőmérséklet alakulása egy átlagos júliusi napon

Az A2 és B2 forgatókönyvek hazai leskálázása esetére meghatározott növényhőmérséklet emelkedés nem érte el a futtatáshoz szimulált külső felmelegedés értékét, vagyis az állomáyon belüli léghőmérséklethez hasonlóan itt is tetten érhető az állomány növényhőmérsékletet kompenzáló hatása. A kompenzáció mértéke alacsonyabb szimulált felmelegedésnél csekélyebb, mindössze néhány tized $^{\circ}\text{C}$. Az A2 változatnál jelentkezett az a lélektani határ, melyet meghaladó felmelegedést (6°C -tól felfelé) szimulálva a növényhőmérséklet kompenzációja ugyan még működött, de elmaradt az állomáyon belüli léghőmérsékletnél tapasztalt mértéktől. Az állomány jelenlétének külső léghőmérséklet növeléshez viszonyított belső növényhőmérséklet emelkedést mérséklő hatása még a két utolsó forgatókönyvnél is jelentkezett, mégpedig vízellátástól függően. A jobb csapadék

ellátású scenáriónál 0,9°C, a szárazabb kezelésnél ennek már csak kb. a fele, 0,5°C volt. Az állomány növényhőmérsékleti kompenzációja azonban nem érte el az állományon belül mért cső szinti léghőmérséklet kompenzációját. A léghőmérséklethez viszonyított fokozottabb növényhőmérséklet emelkedés a növény stressz-állapotának növekedésére utal (Anda 2001).

Az elmúlt évtizedre vonatkozó, duplájára emelt CO₂ koncentrációt tartalmazó harmadik scenárió kivételével az összes többi futtatásnál változott a legmagasabb növényhőmérséklet kialakulásának időpontja, ugyanis a korábbi 14 órától 15 órára tevődött át. Ez önmagában sem kedvező tendencia, mert a magasabb növényhőmérsékletű időszak tartama 1 órával meghosszabbodott. A délutáni órákban a növényhőmérséklet normál körülmények között is gyakrabban haladja meg a növény számára kedvező hőmérsékleti tartományt, így annak hosszabbodása az optimálisnál magasabb hőmérséklet megjelenési idejét növeli negatív hatást gyakorolva a hozamokra.

A cső szintjére számolt növényhőmérséklet eltérő forgatókönyvek szerinti értékei az alapfuttatástól, a két IPCC scenárió egymástól, valamint a 6°C-os felmelegedéshez képesti mindkét 9°C-os hőmérséklet emelésű kezelés növényhőmérsékletei bár csekély mértékben, de legalább 5%-os szinten szignifikáns eltérést jeleztek (14. táblázat). A Keszthelyre végzett szimulációs elemzés alapján megállapítható, hogy a felmelegedés növeli a növényhőmérsékletet, de nem a külső léghőmérséklet növekedésének mértékében. Az állomány jelenléte a növényhőmérséklet növekedését részben kompenzálta, még meglehetősen erős felmelegedés szimulációnál is. A kompenzáció mértéke a vízellátottság függvénye is volt. A jobb vízellátás nagyobb zöldfelület képzéssel és ezzel erőteljesebb árnyékoló hatással jár együtt, mely a növényhőmérséklet alakulását is befolyásolta (Dióssy 2008).

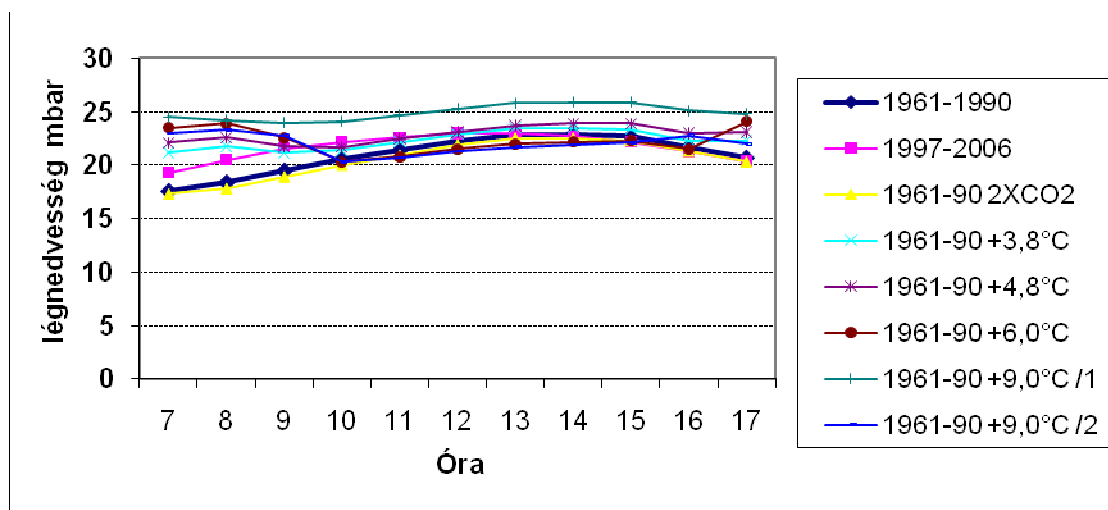
Prasad *et al.* (2006) növényhőmérsékletre vonatkozó megfigyeléseiben megállapította, hogy az emelkedő növényhőmérséklet negatív hatása különösen a reprodukív folyamatoknál jelentkezik, aminek korábban kevesebb figyelmet szenteltek a kutatók. A jelenség alaposabb áttekintését a globális felmelegedés indokolhatja.

4.5. Az állományon belüli légnedvesség

Az állomány nedvességtartalmának forrását az advektív úton szállított nedvességen túl a különböző típusú párolgások jelentik. A párolgás érkezik a talaj felől bármely élettelen felszínről evaporációként, vagy a növényről, mint élő közegről transzspirációként. A két párolgásfajta jelenlétét, azok arányát a mindenkori időjárási helyzet alapvetően determinálja.

Általában a csapadékhullást követő távolabbi napokban, valamint napsütésben – nappali órákban – feltételezhető a transzspiráció dominanciája (24. ábra).

Szimulációs eredményeinket a nappali órákra mutatjuk be, amikor a transzspiráció állomány nedvességet emelő hatása a valóságban ténylegesen jelentkezik (24. ábra).



24. ábra A kukoricacső szintjére szimulált légnedvesség tartalom nappali órákban transzspiráció hatására bekövetkező változása Keszthelyen, egy átlagos júliusi napon

A különböző scenáriók közül a megemelt CO₂ koncentrációjú futtatás eredményezett mindössze pár százalékkal szárazabb levegőjű állományt. Mindez a CO₂ gáz nagyobb koncentrációjának a sztómák nyitottságát, ezzel együtt a transzspiráció intenzitását mérséklő hatásával áll kapcsolatban, ami a nedvesség egyik – a nappali órákban döntő – forrásának csökkenését jelzi. Az eltérés csekély mértékű, de statisztikailag igazolható (15. táblázat). Az összes többi futtatásban az állományon belüli légnedvesség tartalom a kontrollhoz képest szerény mértékben, de növekedett.

15.táblázat A cső szinti légnedvesség tartalom napi átlagainak eltérésére vonatkozó statisztikai elemzések alapadatai. Az átlag a modell által számított napi átlagot jelenti. **Vastag betűvel a t-próba azon p értékeit emeltük ki, amelyek legalább 5%-os szinten szignifikáns eltérést jelentenek.** Az összehasonlításba vont pároknál *az alapként használt szcenáriót vastag és dőlt betűvel jelöltük* egy-egy sorkihagyással elválasztva az összehasonlításba vont pár(jai)tól

Szcenárió-párok	átlag [hPa]	t-próba számított p értéke	standard hiba
A=alap	20,97273		
B	21,70909	0,0405	0,3131288
C	20,51818	0,0000	0,0312282
D	22,33636	0,0025	0,3401264
E	22,85455	0,0009	0,4024512
F	22,24545	0,1442	0,8034121
G	24,93636	0,0000	0,3913317
H	21,99091	0,1978	0,7381571
G=alap	24,93636		
H	21,99091	0,0000	0,3800390
D=alap	22,33636		
E	22,85455	0,0001	0,0772460
F=alap	22,24545		
G	24,93636	0,0001	0,4475092
H	21,99091	0,3128	0,2394553

Az A2 és a B2 elképzeléseket tartalmazó futtatások átlagos légnedvesség értékei akár egymáshoz, akár a kontrollhoz hasonlítva 10% alatti légnedvesség eltérést eredményeztek (5%-os szinten szignifikáns eltérések). Az A2 szcenárió 1°C-al magasabbra emelt léghőmérséklete a növény párologtatását 2,0 %-kal nagyobb mértékben emelte, mint a B2 futtatás paraméterei, ami a nappali órákban 8,6%-os szignifikáns légnedvességet növelő

hatással bírt. Az A2 scenárió eltérése is szignifikáns növekedést jelentett az alapfuttatás értékéhez képest.

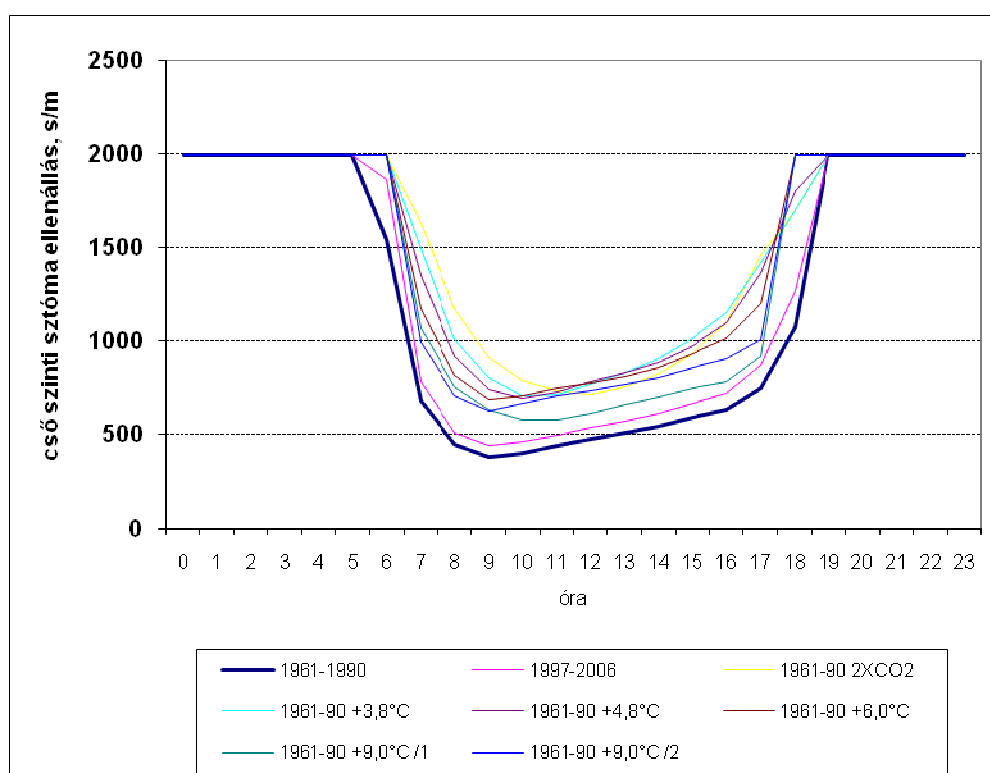
A 9°C-os felmelegedést a csapadék 10%-os csökkenésével párosított futtatásnál emelkedett legjobban (17,3%) a cső szinti légnedvesség tartalma. Amikor a magasabb léghőmérséklet mellett 30%-al csökkentettük a csapadékot, a légnedvesség mindössze 4,7%-os, nem szignifikáns növekedést mutatott. A megemelt léghőmérséklet a növényeket fokozottabb párologtatásra serkenti, amelyhez ha van elegendő nedvességforrás a talajban, akkor az a levegőben mérhető nedvességtartalom növekedésben realizálódik. Keszthelyen a futtatások alapján valamennyi scenárióban volt még annyi talajnedvesség tartalék, amennyi a belső állományi légtér nedvességtartalmát a kontrollként kezelt 1961-91-es futtatáshoz viszonyítva megemelte, a változás viszont nem mindegyik futtatásnál bizonyult statisztikailag igazolhatónak. A két utolsó kezelésben, a H-val jelölt 30%-al csökkentett csapadék forgatókönyv és a G jelű 10%-al csökkentett csapadék eset közti légnedvesség változás is szignifikánsnak bizonyult.

4.6. A sztóma ellenállás és a párolgás

A sztóma a növények felszínén található nyílás, melyen a CO₂ bediffundál, a vízgőz pedig elhagyja a növényt. A pórus nyitottsági foka határozza meg a fotoszintézis egyik alapanyagának a CO₂-nak a bejutását, s ugyanakkor a párolgás során a vízgőz eltávozását is. Különösen száraz termőhelyeken nem közömbös a sztóma nyitottsági foka, mivel annak növekedése a transzspiráció intenzitását fokozza (Anda és Burucs 1997). Az ember által befolyásolt növénytermesztés során a termesztő számára akkor számít „eredményesnek” a növény hozama, ha a CO₂ bejutása a fotoszintézis helyére maximális a vízgőz minimális vesztesége mellett. A helyes egyensúly kialakítása a gazdaságos növénytermesztés egyik kulcstényezője (Anda és Lőke 2006).

A sztómák működését a környezet és biológia törvények határozzák meg. A kukorica esetében a sztómák alacsony napállásnál nyitnak reggel és késő délután alacsony napállásnál záródnak. Éjjel a kukorica sztómái zárva maradnak. Egy adott pillanatban a környezeti tényezők, a vízellátottság, a sugárzás intenzitása, a levegő nedvességtartalma, a szélviszonyok együttesen határozzák meg a nyílások méretét (Anda 1989). A légkör külső tényezői közül a légtér CO₂ koncentrációjának hatása is fontos szempont. A globális felmelegedés hatásáról szóló elemzések térhódítása előtt jóval kevesebb publikáció foglalkozott a kérdéskörrel, mint napjainkban (Jackson et al. 1994, van de Geijn és Goudriaan 1996).

A Goudriaan modell a záródott sztóma ellenállását 1995 s m^{-1} -nek kalkulálja, mely Keszthelyen a holtvíz tartalom elérésekor (-14 bar talajvíz potenciál), vagy napnyugta idején jelentkezik (Páll *et al.* 1989, Anda 2001). Ennél magasabb érték csak kivételes esetben száraz periódusban borult napon, vagy esetleg derült égboltnál közvetlenül napnyugta előtti percekben, csak az alsó, földhöz közeli levélszinteken volt mérhető Keszthelyen (Anda *et al.* 1997; 2007). Derült napon a néhány percnyi időtartamra jellemző érték teljes óra-átlagként való alkalmazása nem közelítené a valós, teljes növényre vonatkozó átlagos ellenállás értékét. A kontrollként használt 1961-90-es évek mutatójához viszonyítva minden forgatókönyv szerint szignifikánsan emelkedett a napi átlagos sztóma ellenállás (25. ábra).



25. ábra A sztóma ellenállás napi változásai az eltérő modell-futtatásokban. A sztóma záródása a modell szerint 1995 s/m -nél várható.

1997 és 2006 között júliusban már 14,6%-kal szignifikánsan nőtt az átlagos sztóma ellenállás értéke valószínűleg a magasabb hőmérséklet és a kisebb júliusi csapadék eredményeként (16. táblázat).

16. táblázat A cső szinti sztóma ellenállás napi átlagainak eltérésére vonatkozó statisztikai elemzések alapadatai. Az átlag a modell által számított napi átlagot jelenti. **Vastag betűvel a t-próba azon p értékeit emeltük ki, amelyek legalább 5%-os szinten szignifikáns eltérést jelentenek.** Az összehasonlításba vont pároknál *az alapként használt szcenáriót vastag és dőlt betűvel jelöltük* egy-egy sorkihagyással elválasztva az összehasonlításba vont pár(jai)tól

Szcenárió-párok	átlag [s/m]	t-próba számított p értéke	standard hiba
A=alap	651,3077		
B	753,8462	0,0004	20,82978
C	1133,538	0,0000	60,52581
D	1117,308	0,0000	45,67022
E	1089,000	0,0000	40,96502
F	1056,154	0,0000	47,08678
G	925,7692	0,0008	61,28921
H	983,6923	0,0000	51,56121
G=alap	925,7692		
H	983,6923	0,0135	20,03345
D=alap	1117,308		
E	1089,000	0,1081	16,30376
F=alap	1056,1540		
G	925,7692	0,0001	23,46124
H	983,6923	0,0009	16,61966

Önmagában a megkétszerezett külső CO₂ gáz koncentráció napi átlagban a sztóma-rések nyílását kb. a felére szűkíti (47,9%). Ez a hatás alacsony napállásnál, elsősorban reggel még ennél is nagyobb, 60%-ot meghaladó mértékű. A környezeti tényezők a növény közelében együttesen vannak jelen, így hatásaik is integrálódnak. Erre jó példa a B2 szcenárió és a CO₂ koncentrációt megduplázó futtatás eredményeinek összehasonlítása, azok egymáshoz való közeledése.

A két IPCC forgatókönyv futtatásában a sztóma ellenállásának értékei statisztikailag nem tértek el egymástól, napi átlagban a kizárólag CO₂ koncentrációt megkétszerező szcenárió ellenállásától sem. Ez arra enged következtetni, hogy a megemelt CO₂ szint sztómát szűkítő

hatása akár más környezeti tényező módosításával (pl. vízellátás változás) is előállítható. Az A2 scenárió napi átlagos sztóma ellenállásának (43,47%) B2-nél néhány %-kal mérsékeltebb növekedése ismét felhívja a figyelmet a növény és környezet közötti összetett kapcsolatra.

Látszólag ellentmondás van az A2 scenárió B2-nél mérsékeltebb ellenállása között, de csak addig, amíg a LAI index értékeit is tekintetbe nem vesszük. A növényi tulajdonságoknál az adott időjáráshoz a növény jellemzőiből is a megfelelő múltbeli analógiák alapján választottunk inputokat. Az A2 scenárióhoz a B2-nél több mint 10%-kal alacsonyabb LAI tartozik, mely a párologtató felület csökkenését eredményezi, s egyben az ellenállást is módosítja, mégpedig kevésbé emelve azt, mint amit a környezeti tényezők változása sugallna.

Ez a folyamat felfogható akár a növény szűk környezeti feltételekhez való adaptációjának is, ami a valóságban létezik.

Ennek tükrében kevésbé meglepő a magasabb felmelegedést (6°C feletti) szimuláló kezelések ellenállás növekedésének az alapfuttatáshoz és az A2 és B2 scenáriókhoz viszonyított „elmaradása”, vagyis a vártnál mérsékeltebb csökkenése. Az átlagosnál melegebb július – még változatlan csapadék esetében is – a korábbi megfigyelések szerint alacsonyabb levélfelület képzéssel jár együtt. A kukorica növekedési depresszióját az esetleges vízhiány még tovább fokozhatja. (A forgatókönyvek eredményeit, a napi átlagos sztóma ellenállás alakulását, az alkalmazott párologtató zöldfelület nagyságának alapfuttatáshoz képesti csökkenését és az egységnyi LAI-re jutó sztóma ellenállás értékeit a 17. táblázat) foglalja össze.

17. táblázat A különböző scenáriók napi átlagos sztóma ellenállása (r_s), az átlagos júliusi zöldfelület eltérése az alapfuttatástól (LAI %) és az egységnyi levélfelületre vetített átlagos számolt sztóma ellenállás ($r_{s/LAI}$)

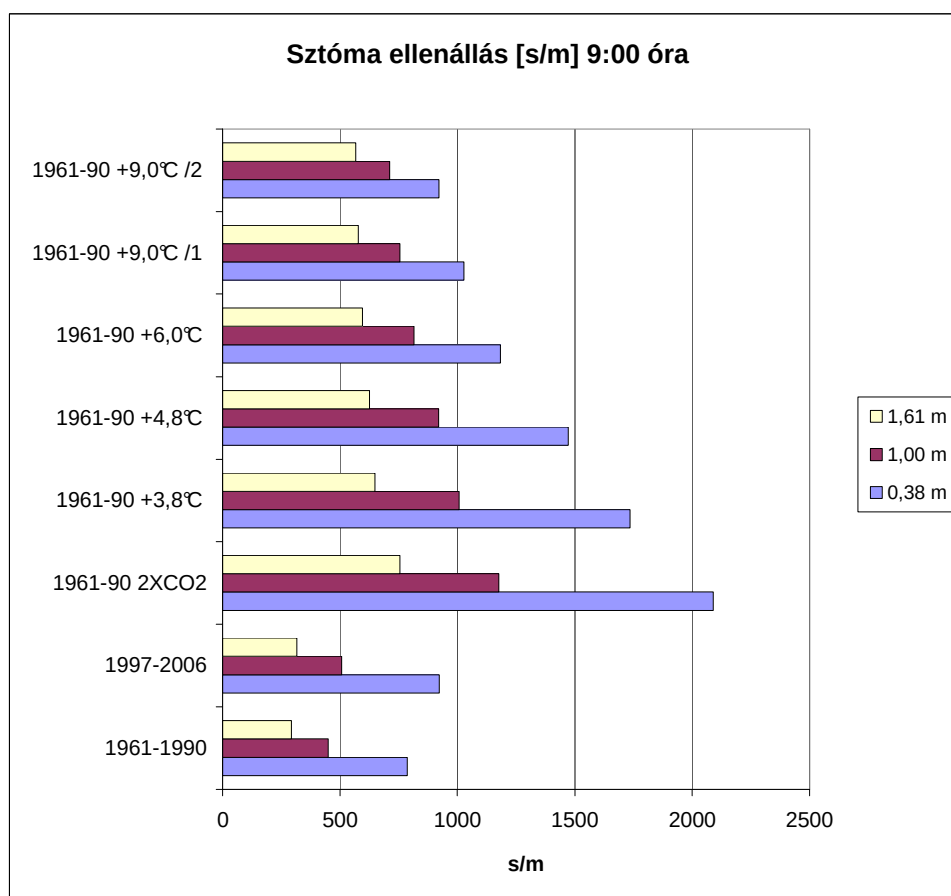
Szenárió	1961-1990	1997-2006	Alap 2xCO ₂	B2	A2	+6°C	+9°C/1	+9°C/2
r_s [s m ⁻¹]	651,3	753,8	1061,3	1043,7	1013,1	976,7	835,8	898,6
r_s eltérés [%]		14,6	47,9	46,3	43,5	40	24,8	31,9
LAI eltérés [%]		Nem változott	nem változott	-10,7	-21,4	-35,7	-46,4	-53,6
$r_{s/LAI}$ [s m ⁻¹]	232,6	269,2	379,1	417,5	460,5	542,6	557,2	691,2

A kukorica környezeti változások együttesére adott komplex válaszát a táblázat utolsó sora szemlélteti, ahol a növény habitusában és a környezeti tényezőkben bekövetkezett módosulásokra nyújtott komplex sztóma-reakciót láthatjuk. Az állomány egységnyi levélfelületére vonatkoztatott legalacsonyabb sztóma ellenállású kezelés az alapfuttatás volt. Az 1997-2006-ig terjedő időszakban ez az érték több mint 30 s/m-el emelkedett. Ez a levélfelület indexet változatlanak véve egyértelműen a melegedésnek és a csapadék csökkenésnek tudható be. A CO₂ koncentráció megkétszerezése a vizsgálat helyszínén minden egyéb külső tényező „állandósága” mellett 47,9%-os egységnyi levélfelületre vonatkoztatott sztóma ellenállás emelkedéssel jár. Erőteljes felmelegedés a csapadék jelentősebb csökkenése mellett a legszélsőségesebb (utolsó) forgatókönyv szerint az egységnyi zöldfelületre vetített sztóma ellenállást akár meg is duplázhhatja.

A két magas felmelegedést szimuláló kezelésnél mérsékeltebben, a többi esetben erőteljesebb tendenciaként tapasztalható az alacsony napállásnál fellépő ellenállás módosulás. Magas napállásnál az eltérő forgatókönyvek szerinti sztóma ellenállás értékek egymáshoz és az alapfuttatáshoz is közelebb esnek. Nagyobb sztóma ellenállás eltérésekkel a reggeli órákban találkoztunk.

A szimulációban alkalmazott forgatókönyvek alapján végzett egyes modellfuttatásokban nemcsak az ellenállás nagysága, hanem a sztómák nyitvatartási ideje is módosult. Júliusban Keszthelyen átlagos időjárást feltételezve a kukorica sztómái reggel 6 órakor nyitnak, ennek mérését korábban a jelenlévő harmat gyakran megakadályozta. Ez a 6 órai nyitódás csak az első két futtatásnál, az 1961-90-es időszakra és a közelmúlt évtizedére végzett szimulációknál jelentkezett. Az összes többi scenáriónál egy órával későbbre tolódott a pórusok aktivizálódásának kezdete. A napnyugta idején bekövetkező sztóma inaktiválódás ideje csak a 9°C-os léghőmérséklet emelést tartalmazó két utolsó futtatásnál csúszott el egy órával korábbi időpontra. A magas felmelegedést tartalmazó scenáriónál a sztómák már este 18 órakor bezáródtak, míg az összes többi kezelésnél 19 órakor (25. ábra). A sztóma nyitásának időpontjában bekövetkező változás a magas léghőmérséklet és a csökkentett vízellátás eredménye lehet, a sztómák nyitva tartásának fő meghatározójaként számon tartott sugárzás intenzitás szerepe jelen esetben nem valószínűsíthető.

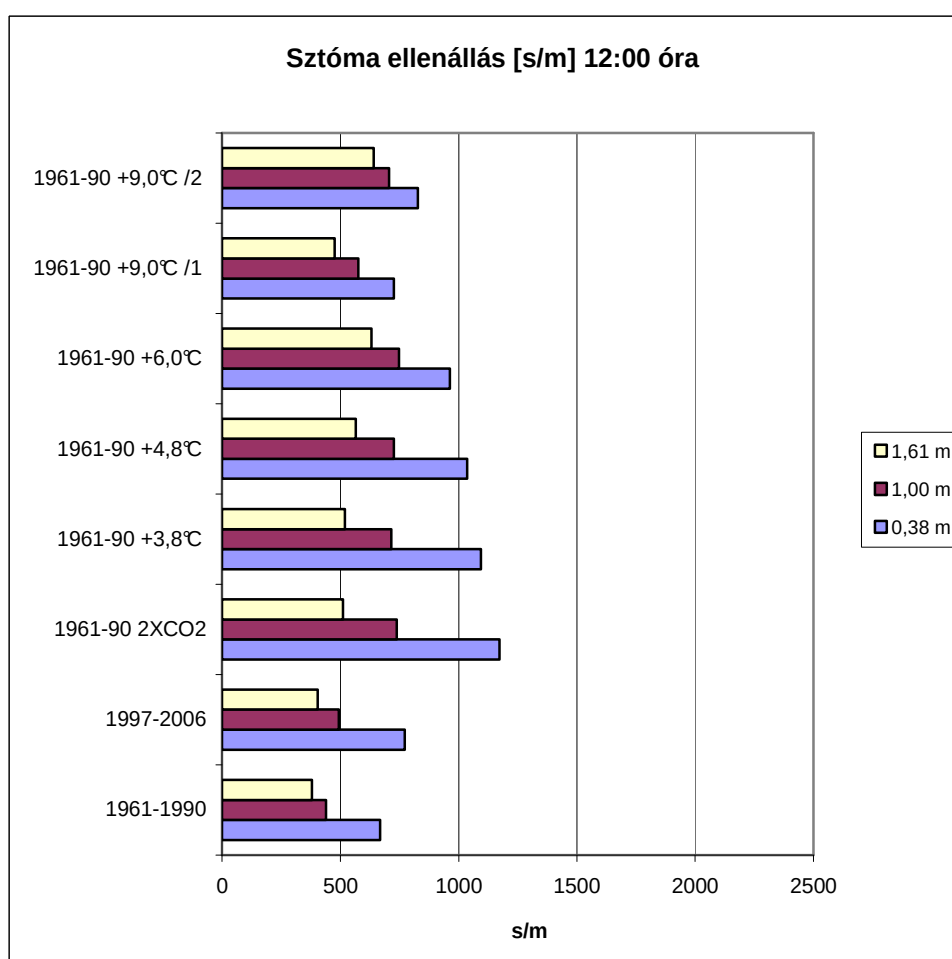
A sztóma ellenállás értékeinek délelőtti órákban tapasztalt jelentősebb kezelésenkénti eltérései miatt a különböző szimulációs szintek sztóma ellenállás bemutatása is szükséges (26. ábra).



26. ábra A sztóma ellenállás eltérő szintekre szimulált értékei forgatókönyvenként alacsony napállás idejére

A földhöz közeli, árnyékban lévő levelek ellenállása a növényhőmérséklet magasabb értékeihez hasonlóan a legmagasabb. A magas növényhőmérséklet a magas ellenállással kapcsolatba hozható kevésbé intenzív transzspiráció, illetve növényhűtés eredménye.

Az állomány közepén az ellenállás értékei csökkennek a talajfelszíni értékekhez viszonyítva. A legmagasabb levélemeleteken a legalacsonyabb az ellenállás, a legintenzívebb párologtatás és a legalacsonyabb növényhőmérsékletnek köszönhetően. A sztóma ellenállás növénymagasságtól függő változásának tendenciája nem módosult magas napállás idejére sem (27. ábra).



27. ábra A sztóma ellenállás eltérő szintekre szimulált értékei forgatókönyvenként magas napállás idejére

Az egyes szintek ellenállás alakulásának tendenciája változatlan, csupán az ellenállás abszolút értékei változtak lényegesen. A magas sugárzás intenzitás dél körül jelentős energia hozamú, mely többlet energiától való „megszabadulás” csak nyitottabb sztómáknál lehetséges. Ez okozta a délelőtti óráknál alacsonyabb ellenállások megjelenését.

4.7. A napi párolgásösszeg és a havi vízfogyasztás kukoricában átlagos júliusi körülmények feltételezése esetén

Sem a napi, sem a teljes hónapra számolt átlagos transzspirációs vízvesztés az elmúlt évtizedben nem változott (18. táblázat). Ez valószínűleg a nagyobb légköri CO₂ koncentrációnak és a tendencia jelleggel fellépő júliusi csapadék csökkenés együttes következménye lehet. Ha a légkör CO₂ koncentrációját az 1961-90-es időszakra jellemző szinthez képest megduplázzuk, a sztómák szűkülése miatt a párologtatás csökkenése napi átlagban mintegy 0,5 mm, azaz 14,3%. (Ez egész júliusra vonatkoztatva havi összegben 15 mm-es transzspirációs víz mennyiség csökkenést jelent.)

18. táblázat A növények napi átlagos és havi összes vízvesztése Keszthelyen július hónapban. Az utolsó sorban a szénakkumuláció egységnyi felhasznált vízre eső vízfelhasználási hatékonysága található.

Szenárió [mm]	1961- 90	1997- 2006	Alap 2xCO ₂	A2	B2	+6 °C	+9°C/1 C/2	+9° C/2
Napi átlagos transzspiráció [mm]	3,599	3,602	3,1	3,604	3,571	3,742	4,868	4,127
Változás a napi átlagban [%]		0,1	-14,3	0,1	-0,8	3,9	29,9	13,7
Havi összes transzspiráció [mm]	111,6	111,7	96,7	111,7	110,7	116	150,9	127,9
Szénasszimi- láció [kg CO ₂ m ⁻²]	0,043	0,047	0,065	0,056	0,051	0,043	0,043	0,033
Vízfelhaszná- lási hatékonyság [g CO ₂ mm ⁻¹ víz]	11,95	13,04	20,97	15,54	14,28	11,49	8,83	8,0

A vizsgált scenáriók közül transzspiráció növekedés a 6°C-ot meghaladó felmelegedés szimulációknál lépett fel, bár az idézett 6°C-os hőmérséklet növelése mellett végzett kezelés csak néhány % - os változást mutatott az 1961-90-es évek átlagához képest. A vízvesztés fokozódása a 9°C-os léghőmérséklet növekedést feltételező forgatókönyveknél jelentősebb, ha ehhez van elegendő hozzáférhető talajvíz, vagyis a csapadék mérsékelt (-10%-os) csökkentése mellett (29,9%). A talajnedvesség 30%-os csökkentésénél a párologtatás fokozódása ennél jóval kisebb, csupán 13,7%, mivel ebben az esetben a vízhiány valószínűleg már komoly korlátozó tényezőt jelentett. A modellfuttatásokhoz használt scenárióknál erőteljes mértékben nem csökkentettük a csapadékot a hazai forgatókönyvek bizonytalan előrejelzéseire való tekintettel (Kocsis *et al.* 2008). A korábbi szimulációs vizsgálatai szerint Keszthelyen, az átlagos júliusi csapadék mennyiség felére csökkentése a délutáni órákban átmenetileg teljes sztóma záródást okoz.

A vizsgált scenáriók közül a vízfelhasználás hatékonysága és a CO₂-felhalmozás felhasznált egységnyi vízre eső részaránya javult a 6 °C alatti felmelegedéssel számoló szimulációk esetében. A legnagyobb vízfelhasználás-hatékonysági javulás a megemelt CO₂-koncentrációjú scenáriónál volt megfigyelhető, ahol az összes külső tényező változatlan maradt (54,8%). Az utolsó két scenáriónál (szélsőségesen meleg napok) a vízfelhasználási hatékonyság csökkenése 30 és 39,6% között volt.

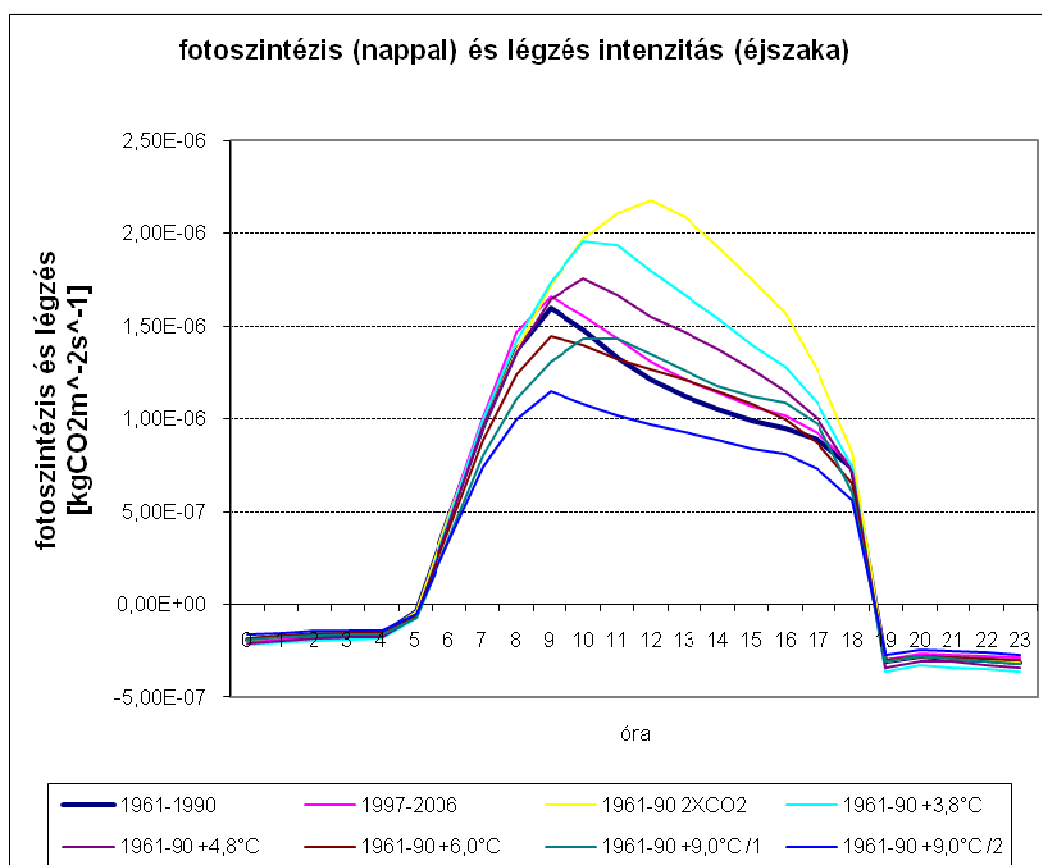
A számolt napi és havi transzspiráció értékek lehetőséget biztosítanak jövőbeni elképzelések körvonalazására. A fenti eredmények szerint viszonylag magasabb mértékű felmelegedésnél (6°C) a megemelkedett külső légköri CO₂ koncentráció részben kompenzál. Ez azonban csak akkor működhet, ha a csapadék nem módosul jelentősen. A csapadék drasztikus visszaesése az eredményeket azonnal felülírhatja, ugyanis a vízhiány kedvezőtlen hatása a növény valamennyi életfolyamatára depresszívén hat. A két utolsó scenárió transzspirációs változásai igazolják jól a felmelegedés és vízellátás között fennálló elválaszthatatlan kapcsolatot. A 2050-2100-ra prognosztizált felmelegedés napjainkra már csaknem elfogadott prognózissá vált. Sajnos meglehetősen bizonytalan a várható csapadéokra vonatkozó előrejelzés. Ezek ismeretében az látszik járható útnak, ha a melegedéssel együtt felkészülünk a csapadék változására. A közeljövőben indokolt felkészülnünk a kontinentális övezetben, így Magyarországon is a kukorica öntözésének kiterjesztésére (Anda és Dióssy 2010). Ez a hazai öntözési lehetőségek és feltételek újragondolása mellett egyéb agrotechnikai eljárások pl. fajtahasználat, talajművelés választás stb. megfontolt áttekintését is jelenti. Anwar *et al.* (2007) szerint megfelelő agrotechnikával a globális felmelegedés miatt várható 20%-os

hozamcsökkenés kompenzálását érdemes célul kitűzni azoknak, akik a század közepén növénytermesztéssel kívánnak foglalkozni.

4.8. A szén asszimiláció folyamatában bekövetkező változások

4.8.1. A légzés intenzitás változása

A szimulációs modell a légzésben bekövetkező eltérések vizsgálatát csak az éjszakai órák CO₂ felszabadulásában végbemenő változások alapján teszi lehetővé. Ezek az értékek a nappali órák szén megkötéséhez képest csekélyek, de a növény szén-forgalmához szervesen hozzátartoznak, ezért ismertetésük a szárazanyag képződés elemzéséhez szükséges (28. ábra).



28. ábra A fotoszintézis intenzitás (napkeltétől napnyugtáig) és a légzés intenzitás (éjszakai órák) kezelésenkénti alakulása egy átlagos júliusi napra, Keszthelyre végzett szimulációk alapján

A fotoszintézishez képest abszolút értékben alacsonyabb légzés intenzitás értékek forgatókönyvenkénti alakulása alig válnak el egymástól. Bár a légzésbeli változások csekélyek, de az alapfuttatáshoz viszonyított százalékos különbségek bemutatathatók.

Az elmúlt évtizedben a légzés gyakorlatilag változatlan volt ugyanúgy, mint a CO₂ megduplázásánál. Szignifikánsan nagyobb légzés intenzitással a B2 (15,8%) és az A2 (9,4%) scenárióknál, valamint a 9°C-al magasabb léghőmérséklet, és erőteljes csapadék csökkentése (13,5%) esetében találkozhatunk.

Statisztikailag igazolható, hogy 14,3%-os eltérés van az IPCC scenárió két forgatókönyvének hazai leskálázása alapján végzett szimulációi között, a melegebb A2 kezelés fokozottabb légzés intenzitása javára (19. táblázat).

A légzésben éjszaka felszabaduló CO₂ gáz mennyiségét is figyelembe véve a „veszteség” a szárazanyag termelést döntő mértékben nem befolyásolhatja. Ez a megállapítás csak az éjszaka lejátszódó légzésváltozásokra igaz, a nappali órák értékeinek alakulására a modell outputjai következtetni nem engednek.

19. táblázat A cső szinti légzés intenzitás napi átlagainak eltérésére vonatkozó statisztikai elemzések alapadatai. Az átlag a modell által számított napi átlagot jelenti. **Vastag betűvel a t-próba azon p értékeit emeltük ki, amelyek legalább 5%-os szinten szignifikáns eltérést jelentenek.** Az összehasonlításba vont pároknál az alapként használt *szcenárió*t **vastag és dőlt betűvel jelöltük** egy-egy sorkihagyással elválasztva az összehasonlításba vont pár(jai)tól

Szcenário-párok	átlag [kgCO ₂ /m ² /s]	t-próba számított p értéke	standard hiba
<i>A=alap</i>	-2,18e-07		
B	-2,17e-07	-0,153157	5,82e-09
C	-2,17e-07	-0,829000	1,87e-10
D	-2,55e-07	0,000000	3,24e-09
E	-2,39e-07	0,000000	1,78e-09
F	-2,13e-07	0,068800	2,23e-09
G	-2,21e-07	0,180300	2,62e-09
H	-1,90e-07	0,000300	4,94e-09
<i>G=alap</i>	-2,21e-07		
H	-1,90e-07	0,000000	3,65e-09
<i>D=alap</i>	-2,55e-07		
E	-2,21e-09	0,000000	2,21e-09
<i>F=alap</i>	-2,13e-07		
G	-2,21e-07	0,000400	1,58e-09
H	-1,90e-07	0,000000	2,87e-09

4.8.2. A szén-asszimiláció alakulása a nappali órákban

A közelmúltban Keszthelyen a magasabb léghőmérséklet, s a némiképp megemelkedett légköri CO₂ koncentráció a kukorica fotoszintézis intenzitását 6%-al szignifikánsan emelte (20. táblázat). Ebben a forgatókönyvben az évtized tendencia jellegű mérsékelt csapadék csökkenése is benne foglaltatik. A 6%-os növekedés szerint a külső környezeti tényezők változása eddig pozitívan befolyásolta a helyben termesztett kukorica produktivitási mutatóját, a fotoszintézis intenzitást. Önmagában a CO₂ gáz koncentráció megduplázása, valamennyi környezeti és növényi jellemző 1961-90-es szinthez képesti változatlansága esetén 35,1%-os produktumnövekedést okoz (5%-os szinten szignifikáns).

A külső tényezők és a LAI már eddig bekövetkezett változásainak analógiáit is figyelembe véve mindkét IPCC scenárió helybeli leskálázásának eredményei szerint a fotoszintézis intenzitásának növekedése statisztikailag igazolható, még ha a CO₂ gáz koncentrációjának növeléséhez képest kisebb mértékben is. Ez az érték a B2 forgatókönyvnél 24%, az A2-nél mérsékeltebb, 14,5%.

A fotoszintézis intenzitásának csökkenése a 6°C-ot meghaladó felmelegedést szimuláló scenárióknál következett be. A csökkenés mértéke akkor haladja meg a néhány %-ot, ha a felmelegedéshez jelentősebb nedvességelvonás is társul, nevezetesen a 9°C-os felmelegedésnél, ahol a csapadék csökkentése 30%-ot tett ki (5%-on szignifikáns az eltérés). Az utolsó forgatókönyv szerinti változások esetére a szimulációs modell a fotoszintézis intenzitás visszaesését 24,5%-ra becsülte.

A két IPCC forgatókönyv szerint végzett fotoszintézis intenzitás modellezés eredményei statisztikailag különböztek egymástól. A B2-es scenárió 9,8%-al magasabb produktumot vetít előre, mint az A2 scenárió. A csapadék fokozottabb csökkentése statisztikailag igazolható 23,7%-os produkció csökkenést okozott a 9°C-al emelt hőmérséklet esetében.

20. táblázat A cső szinti fotoszintézis intenzitás napi átlagainak eltérésére vonatkozó statisztikai elemzések alapadatai. Az átlag a modell által számított napi átlagot jelenti. **Vastag betűvel a t-próba azon p értékeit emeltük ki, amelyek legalább 5%-os szinten szignifikáns eltérést jelentenek.** Az összehasonlításba vont pároknál az **alapként használt szcenáriót vastag és dőlt betűvel jelöltük** egy-egy sorkihagyással elválasztva az összehasonlításba vont pár(jai)tól

Szcenárió-párok	átlag [kgCO ₂ /m ² /s]	t-próba számított p értéke	standard hiba
A=alap	1,09e-06		
B	1,16e-06	0,0000	9,05e-09
C	1,55e-06	0,0010	1,08e-07
D	1,39e-06	0,0007	6,59e-08
E	1,26e-06	0,0022	4,38e-08
F	1,07e-06	0,4900	2,42e-08
G	1,08e-06	0,8123	4,50e-08
H	8,51e-07	0,0000	3,02e-08
G=alap	1,08e-06		
H	8,51e-07	0,0001	3,70e-08
D=alap	1,39e-06		
E	1,26e-06	0,0001	2,33e-08
F=alap			
G	1,08e-06	0,7961	2,39e-08
H	8,51e-07	0,0000	2,38e-08

A teljes napi átlagos CO₂ megkötés, a fotoszintézis és a légzés különbsége egységnyi levélfelületre vetítve a modell számításai szerint a 21. táblázatban került összefoglalásra. Ugyanitt mutatjuk be a különböző állományok egységnyi talajfelületének szénmegkötési képességét is. Sokan elhanyagolják a növények vizsgálatának különböző „szintjeit”, pedig az egyedi levél sajátosságai alapján nem mindig helyes a teljes állományra vonatkoztatott tulajdonság átvitel. Ezt az alábbi saját vizsgálataink is megerősíteni látszanak. Korábban Mihailovic és Eitzinger (2007) hívta fel a figyelmet a különböző növényi vizsgálati szinteken mért eredmények eltérő interpretációjának fontosságára.

21. táblázat A szén-asszimiláció napi összegei az eltérő scenáriók alapján egységnyi levél- és talajfelületre vonatkoztatva

[kgCO₂ m⁻² július⁻¹]	1961-90	1997- 2006	Alap 2xCO₂	B2	A2	+6°C	+9°C/1	+9°C/2
Levélfelület								
[1 m ² -re]	1,35	1,45	2,02	1,73	1,56	1,32	1,32	1,03
%-os változás		7,14	39,76	24,68	14,43	-2,25	-2,25	-26,89
Talajfelület								
[1 m ² -re]	3,78	4,05	5,66	4,34	3,44	2,38	1,98	1,34
%-os változás		6,90	39,83	13,79	-9,42	-45,45	-62,50	-95,31

A közelmúltban a kukoricában mintegy 7%-al emelkedett mind az egységnyi zöldfelület, mind az egységnyi talajra jutó CO₂ megkötő képesség. A magasabb CO₂ koncentráció csaknem 40%-al fokozta a növény (és az adott talajterület feletti állomány) CO₂ asszimilációját. A B2 futtatásban is vizsgált mindkét szén-megkötési mutató a kontroll forgatókönyvhöz képest növekedést mutatott; a zöld leveleké fokozottabban, 24,7%-al, az egységnyi talajra jutó érték ennél már alacsonyabb szinten, 13,8%-al nőtt.

Az A2 scenáriónál az asszimiláció változása már csak a levélzet esetében volt pozitív, s ez is mintegy 10%-al alacsonyabb (14,4%), mint a B2 scenáriónál meghatározott érték. Az egységnyi talajra jutó július havi átlagos szénmegkötés állomány szinten esetenként levélzettől eltérő irányú és mértékű alakulását jól jellemzi az A2 elképzelésnél fellépő 1961-90-es évek júliusainak átlagához viszonyított 9,4%-os depresszió. A 6°C-ot meghaladó felmelegedést szimuláló forgatókönyveinkben mind a levélzet, mind a teljes állomány szénasszimilációja csökkent a kontroll futtatáshoz képest. A levelek asszimilációjában fellépő depresszió különösen a fokozottabb vízhiánnyal társított 9°C-os melegedést bemutató forgatókönyvnél jelentkezett.

Figyelemre méltó az állományokra (egységnyi talajfelületre) meghatározott szénmegkötésben fellépő, levélzetet felülmúló igen erőteljes csökkenés, mely már a 6°C-os havi átlagos felmelegedést szimuláló kezelésnél is csaknem 50%, s a 9°C-os felmelegedést tartalmazó futtatásoknál 10%-os csapadék elvonásnál 62,5%, s 30%-os vízhiány alkalmazásakor már 95,3%. Saját vizsgálataink igazolták Prasad et al. (2006) korábbi megállapítását, mely szerint a megemelt CO₂ gáz koncentráció fotoszintézis intenzitást növelő hatása a kísérőként fellépő

melegebb növény- és léghőmérséklet miatt realizálódni nem tud, ezáltal a globális felmelegedés egyik előidézőjéhez, a magasabb CO₂ koncentrációhoz kötött pozitív hatás megjelenésével 6°C feletti havi átlagos nyári melegedésnél számolni nem célszerű Dióssy (2008).

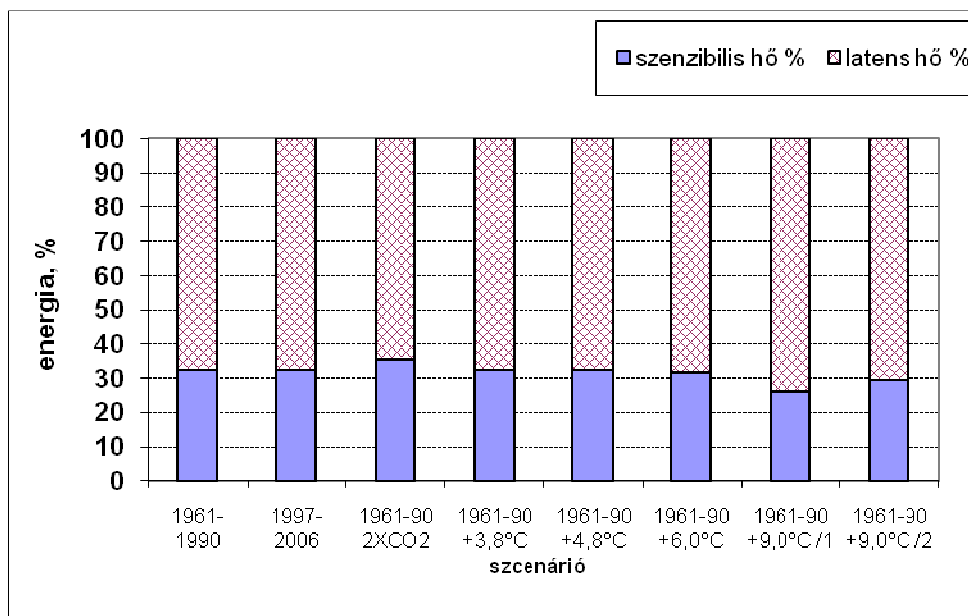
4.9. Az állomány energia felhasználásának alakulása: a szenzibilis és a latens hő változásai

A növényállományok a sugárzás egy részének visszaverése és áteresztése után az adott növényrétegben maradó energiát különböző energiaigényes folyamatokban használják fel. A legnagyobb fogyasztó folyamat a párologtatás, melyhez szükséges energia összefoglaló neve latens hő. Ez az energiamennyiség nem korlátozott vízellátásnál az összes energia mintegy 2/3-át teheti ki. Ennél csekélyebb, közel 1/3-os részarányú a különböző melegítési folyamatokban felhasznált energia, a szenzibilis hő. A melegítés során forrásként nem csak a levegő, hanem a növény és a talaj is fellép, s egyáltalán nem csekély felhasználóként. Az állomány által megkötött leggyakrabban citált energia csak töredéke, a teljes energiamennyiségnek; mindössze 1-2% az, amely a szén-asszimiláció folyamatában szárazanyagként megjelenik. Az energiafelhasználás folyamatában az egyes részfolyamatokat a bennük felhasznált energia mennyisége alapján nem célszerű rangsorolni.

A teljes folyamatra vonatkoztatott energetikai változások csak a részfolyamatokon keresztül tekinthetők át. Az alkalmazott modell az energia sorsának követése alapján számolja a növény mikroklímájának elemeit, élettani folyamatainak alakulását. Ez a közelítés a korábbi, modellezés előtti statikusabb szemléletekhez képest előrelépésnek tekintendő.

A kontrollként használt 1961-90-es évek júliusainak átlagában Keszthelyen a szenzibilis és a latens hő aránya 32:68% volt, tehát nem tér el lényegesen a hazai éghajlati körülményekre sok év átlagában megállapított 30:70%-tól.

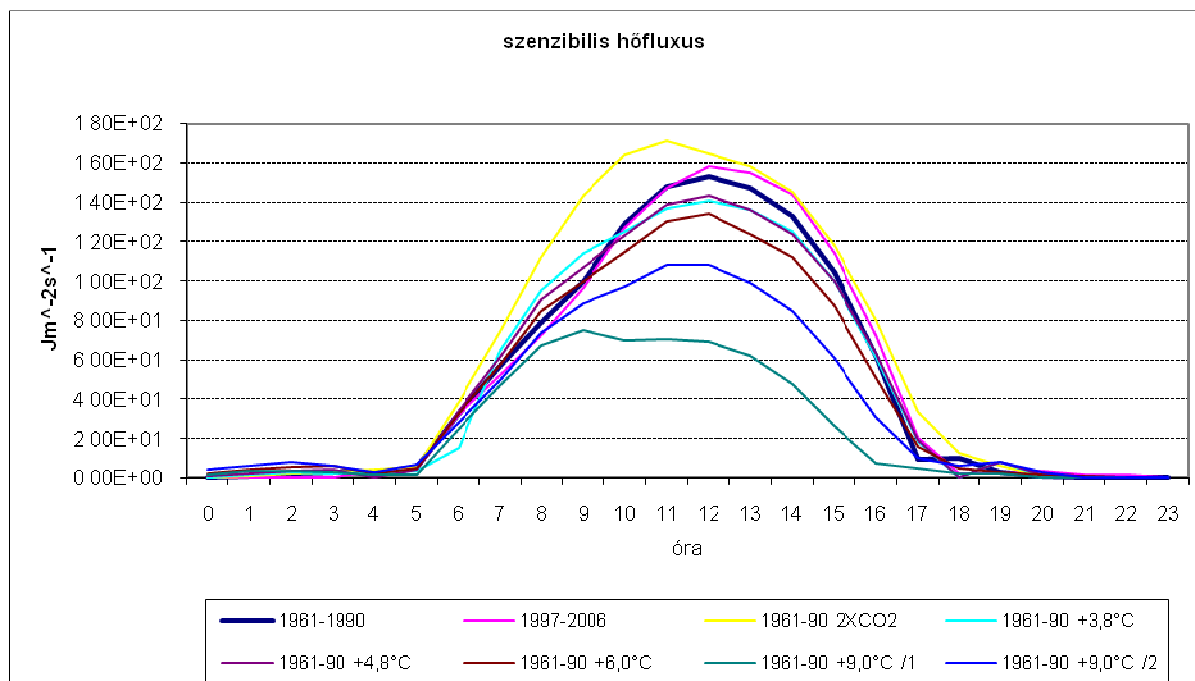
A korábbi megállapítástól eltérő jelentős arány eltolódást a többi, kontrollon kívüli forgatókönyv esetében sem tapasztaltunk (29. ábra), mely igazolja a globális felmelegedés kukoricára helyben folytatott elemzések megállapításait. A megelőző vizsgálatok, melyek scenáriói mind a felmelegedés, mind a csapadékmegvonás mértékében a jelen megfigyelésétől eltértek, szignifikáns arány elmozdulást a szenzibilis és a latens hő között nem igazoltak (Anda és Kocsis 2007).



29. ábra A szenzibilis és a latens hő arányai forgatókönyvenként július hónapban, kukorica állományban. A fotoszintézisben megkötött energiát –tekintettel annak csekély mértékére, a vizsgálat ezen szakaszában nem vettük figyelembe

4.9.1. A szenzibilis hőfluxus alakulása

1997 és 2006 között az érzékelhető hő napi átlagban csupán 3,4%-kal, azaz nem szignifikánsan emelkedett az 1961-90-es évek értékéhez képest (30. ábra). A változás a nap folyamán nem volt azonos irányú. Délelőtt a közeli 10 év szenzibilis hőmennyisége elmaradt a kontroll futtatás értékéhez képest, majd délben előjelet váltott az eltérés, s a délután folyamán már 8,7%-al meghaladta az 1961-90-es normál szenzibilis hőmennyiség mértékét. A folyamat megértéséhez a többi környezeti tényező eredményeit is szükséges áttekinteni. Meglepő, hogy az 1997-2006-os futtatás délelőtti alacsonyabb szenzibilis hőmennyisége alacsonyabb növény- és léghőmérséklettel társult. A valószínű okot a légnedvesség tartalom alakulásában kereshetjük, amely az elmúlt évtizedben statisztikailag igazolhatóan meghaladta a korábbi 30 éves júliusok átlagát.



30. ábra A szenzibilis hő napi változásai Keszthelyre meghatározott forgatókönyvek esetében

A reggeli órák növekvő légnedvessége – a kisebb sztóma ellenállással társítható magasabb transzspirációs vízvesztés, vagy a talaj magasabb evaporációja miatt – a levegő telítettségi hiányát, a párologtatás mozgató erejét csökkenthette. A légnedvesség értékei dél körül a két futtatásban már közelítettek egymáshoz, így a növény környezeti tényezőkre adott válaszreakciója is módosult, s ezzel a szenzibilis hőre vonatkozó eltérés iránya ellenkezőjére fordult. A teljes nap átlagában a magas napállás és az azt követő időszak dominanciája miatt, a közelmúlt évtizedének magasabb szenzibilis hő mennyisége érvényesült, mely mindössze csak pár százalékos, de mégis többlet szenzibilis hőt eredményezett a korábbi 30 év érzékelhető hőmennyiségéhez képest.

A kétszeres CO₂ koncentráció a szenzibilis hő mennyiségét napi átlagban szignifikánsan 19,6%-al növelte (22. táblázat). Ez összhangban van a sztóma növekvő ellenállásával, s a csökkenő párologtatással, illetve annak következményeivel. A szenzibilis hőmennyiség növekedése délelőtt sokkal intenzívebb volt (30,9%), ami egybeesett a nap többi időszakában fokozottabban megemelkedett sztóma ellenállással is. A kétszeres CO₂ koncentrációt tartalmazó scenárió esetén 1 órával korábbra tevődött át a szenzibilis hő maximum értékének megjelenési ideje.

A további futtatásokban, az extrém meleg 9°C-os felmelegedést alkalmazó két forgatókönyvön kívül, a kétszeres CO₂ koncentrációnál leírt tendencia uralkodott, a délelőtti órákban az alapfuttatásnál magasabb, s magas napállást követően délután a kontrollnál alacsonyabb szenzibilis hőmennyiségek jelentek meg. A napi átlagoknál az időben hosszabb déli és délutáni értékek dominanciája érvényesült.

Az A2 és a B2 futtatások szenzibilis hőmennyisége napi átlagban nem tért el lényegesen sem egymástól, sem az alapfuttatás értékétől. A módosulás az A2 forgatókönyvnél volt egy kissé magasabb, de az is mindössze -1,3%-nyi nem szignifikáns eltérést jelentett. Mindkét forgatókönyvnél az eltérés negatív előjele napi átlagban a kontrollnál egy kissé alacsonyabb szenzibilis hő felhasználására utal.

Ahogy emelkedett a forgatókönyvek szerinti felmelegedés szimuláció, úgy csökkent a különböző scenáriók szenzibilis hőmennyiségeinek kontroll futtatáshoz hasonlított értéke. A 6°C-os melegedést szimuláló kezelésnél napi átlagban a szenzibilis hő csökkenése 10,3% (5%-os szinten szignifikáns), mely arra utal, hogy a növényhűtéshez szükséges víz ennél a felmelegedésnél már több energiát igényelt, mint amennyi az 1961-90-es évek júliusában a megfelelő növényhőmérséklet beállításához szükséges volt. S az is fontos, hogy volt elegendő többlet víz, melyet a növény el is tudott párologtatni (ha nincs elegendő vízutánpótlás a növény számára, az energia a szenzibilis hő arányát emeli). Ezt a gondolatot erősíti a 9°C-os léghőmérséklet emelésnél a két eltérő vízellátás futtatásából adódó szenzibilis hő alakulás statisztikailag is igazolt eltérése. A 10%-os csapadék csökkenést bemutató forgatókönyvnél az alapfuttatáshoz képesti szenzibilis hő mennyiség az összes elképzelésből a legjelentősebben, 68,1%-al esett vissza, szemben a fokozottabb, 30%-os nedvesség elvonásnál tapasztalt kontrollhoz képesti 32,7%-os érzékelhető hő csökkenéssel.

Mindkét kezelésnél nagyon magas a növények párologásra-növényhűtésre fordítani kívánt energia igénye (9°C-os felmelegedés feltétel!), mely már akkora víz-igényt képvisel, hogy annak kielégítését az állomány az alapfuttatáshoz történő hasonlításban részben a szenzibilis hő rovására képes csak megvalósítani.

A csekélyebb vízmegvonású kezelésben több a növény számára rendelkezésre álló vízmennyiség. A párologás rendkívül magas energiaigényű, – víz magas fajhője - mely energiaszükségletet az alapfuttatáshoz képesti összehasonlításban az extrém meleg scenáriókban a kukorica csak nagyon magas energia-befektetéssel képes realizálni.

Az utolsó forgatókönyv feltételei, az extrém léghőmérséklet az alapfuttatásnál jóval erőteljesebb transzspirációt tételez fel, melyhez a többlet energia forrása részben a kontroll futtatásban szenzibilis hőként elhasznált energia-hányad. Az utolsó scenárióban a

vízmegvonás mértékét 30%-ra emeltük, mely a növény vízigényét adott környezeti feltételeknél fedezni már nem volt képes. Ennek következtében az energia egy része a magasabb vízellátású futtatáshoz képest latens hőként nem tudott megjelenni, hanem a szenzibilis hő mennyiségét fokozta, felére csökkentve ezzel a kontroll szcenárióhoz képesti energia felhasználás visszaesését. Az alapfuttatásra vetített csökkent szenzibilis hőmennyiség a 30%-os csapadék megvonású kezelésben azt jelenti, hogy még e nehezebb környezeti feltételeknél is volt Keszthelyen némi tartalék, mellyel a növény a zordabb feltételekhez alkalmazkodni képes.

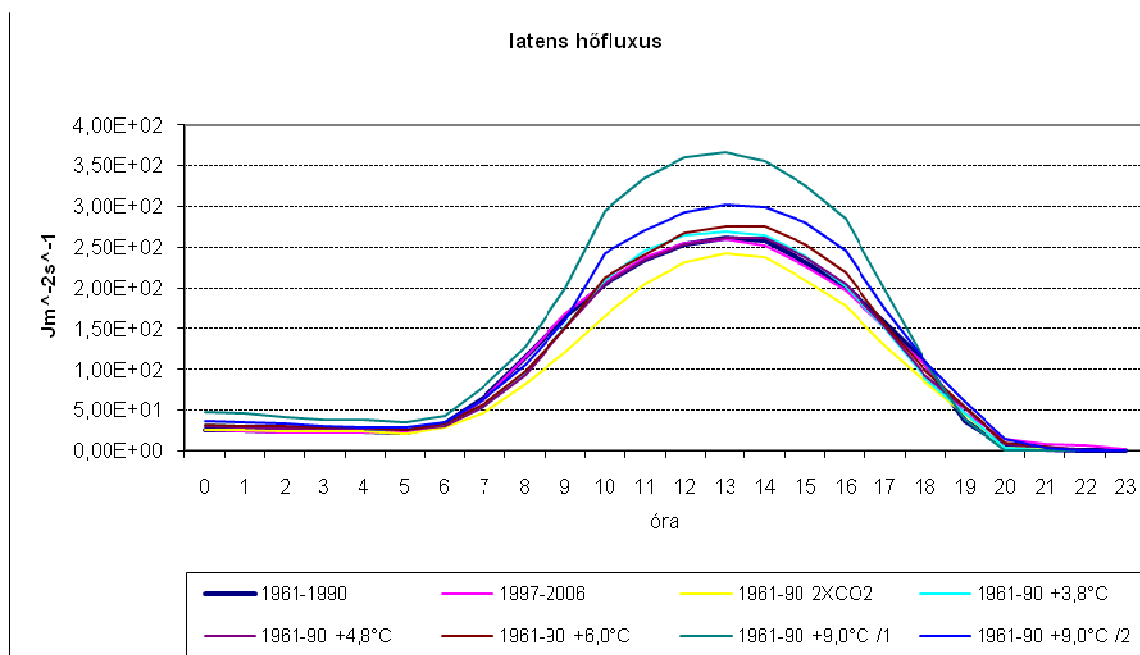
22. táblázat A cső szinti szenzibilis hőfluxus napi átlagainak eltérésére vonatkozó statisztikai elemzések alapadatai. Az átlag a modell által számított napi átlagot jelenti. **Vastag betűvel a t-próba azon p értékeit emeltük ki, amelyek legalább 5%-os szinten szignifikáns eltérést jelentenek.** Az összehasonlításba vont pároknál az alapként használt szcenáriót **vastag és dőlt betűvel jelöltük** egy-egy sorkihagyással elválasztva az összehasonlításba vont pár(jai)tól

Szcenárió-párok	átlag [J/m ² /s]	t-próba számított p értéke	standard hiba
<i>A=alap</i>	49,29015		
B	50,51945	0,2761	1,1017730
C	59,95961	0,0005	2,6430330
D	48,15260	0,4971	1,6486450
E	48,57698	0,5738	1,2496990
F	44,98854	0,0306	1,8672020
G	24,54849	0,0016	6,9167890
H	37,14208	0,0060	4,0090910
<i>G=alap</i>	24,54849		
H	37,14208	0,0003	2,9480730
<i>D=alap</i>	59,95961		
E	48,57698	0,6525	0,9301889
<i>F=alap</i>	44,98854		
G	24,54849	0,0006	5,1574990
H	37,14208	0,0022	2,2786830

4.9.2. A latens hő alakulása forgatókönyvenként

A párolgás energiaigénye rendkívül magas. A transzspiráció az a növényélettani folyamat, mely során a növény az elpárologtatott víz hűtő hatásának köszönhetően hőmérsékletét az élettani folyamatok számára kedvező szintre állítja be (Anda és Burucs 1997). A folyamat csak akkor tud zavartalanul végbemenni, ha a hűtéshez rendelkezésre áll elegendő víz. Magyarország éghajlatában a vízmennyiség tűnik a növény növekedését, fejlődését gátló legkritikusabb tényezőnek, a vízhiánnyal a globális felmelegedés hazai hatásainak elemzésekor nagy valószínűséggel szembesülnünk kell (Anda 2004).

A modell futtatásakor a latens hő napi átlaga az alapfuttatáshoz képest statisztikailag értékelhetően nem változott sem az elmúlt évtizedben, sem az A2 és a B2 forgatókönyvek hazai adaptációjánál (31. ábra és 23. táblázat).



31. ábra A latens hőfluxus napi változásának alakulása Keszthelyen, eltérő forgatókönyvek szerint

23. táblázat A cső szinti latens hőfluxus napi átlagainak eltérésére vonatkozó statisztikai elemzések alapadatai. Az átlag a modell által számított napi átlagot jelenti. **Vastag betűvel a t-próba azon p értékeit emeltük ki, amelyek legalább 5%-os szinten szignifikáns eltérést jelentenek.** Az összehasonlításba vont pároknál *az alapként használt scenáriót vastag és dőlt betűvel jelöltük* egy-egy sorkihagyással elválasztva az összehasonlításba vont pár(jai)tól

Szenárió-párok	átlag [J/m ² /s]	t-próba számított p értéke	standard hiba
A=alap	103,53060		
B	103,95120	0,6390	0,8850612
C	89,82617	0,0002	3,0963540
D	104,02900	0,7802	1,7651840
E	102,97960	0,7433	1,6622940
F	107,82330	0,0397	1,9681270
G	140,32580	0,0002	8,3310100
H	118,99820	0,0003	3,6667770
G=alap	140,32580		
H	118,99820	0,0006	5,3721120
D=alap	89,82617		
E	102,97960	0,2452	0,8799960
F=alap	107,82330		
G	140,32580	0,0002	7,4265620
H	118,99820	0,0001	2,2922700

Az 1961-90-es évekhez viszonyított 14,2%-os szignifikáns csökkenést a CO₂ szint megduplázásakor tapasztaltunk. Ez az érték egyben a globális felmelegedés növények vízháztartására kifejtett párologtatást mérsékelő hatásának energetikai alapokra helyezett számszerű megjelenítése (Dióssy és Anda 2008). Ez Keszthelyen a pozitív „hozadéka” a globális változást előidéző CO₂ koncentráció növekedésének, mely a kukorica sztómáit szűkíti. Nem szabad megfeledkezni arról, hogy a fenti hatás kizárólag a CO₂ koncentráció megkétszereződésekor, s minden egyéb környezeti tényező változatlansága mellett jelentkezne, mely tudjuk, nem reális feltételezés. A változások teljes körét a többi scenárió tartalmazza.

A 6°C-ot meghaladó mértékű felmelegedés valamennyi forgatókönyvnél statisztikailag igazolhatóan növelte az alapfuttatáshoz viszonyított latens hő arányát. Ez a mérsékeltebb 6°C-os léghőmérséklet növelésénél még csak 4,1%-os növekedést jelentett. A legnagyobb eltérést a 9°C-os, csekélyebb vízmegvonású scenáriónál tapasztaltuk, 30,2%-os növekedéssel. Ennél a kezelésnél elegendő víz áll rendelkezésre, amit a kukorica el tud párologtatni, mellyel a latens energiafelhasználás mértéke 1/3-al meghaladja az 1961-90-es évekre számolt párolgási energia felhasználást. A csapadék 30%-os csökkentésénél a szűkösebb vízellátás mérsékeltebb lehetőséget biztosított, s itt az alapfuttatáshoz viszonyított energia felhasználás 13,9%-al haladta meg a kontroll értékét. A latens hő csökkenésének oka egyértelműen a korlátozottabb vízellátás volt. Nem szabad megfeledkezni arról, hogy transzspiráció kisebb intenzitása nem teszi lehetővé az optimális növényhőmérséklet kialakítását, ennek eredménye a biokémiai folyamatok sérülése, illetve a megtermelt szárazanyag mennyiségének depressziója. A két eltérő vízellátásnál végzett szimulációk latens hő arányai 5%-os szinten igazolhatóan különböztek egymástól.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS TÉZISEK

A klímaváltozás elleni védekezés leghatékonyabb módja az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése, de ha a folyamat megkezdődött, akkor alkalmazkodni is kell hozzá. Az adaptáció kérdésköre azonban eddig háttérbe szorult a mitigációhoz képest. A Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia (NÉS) kidolgozásában arra helyeztük tevékenységünk során a hangsúlyt, hogy Magyarország középtávú klímapolitikájában a fő cselekvési irányok között az alkalmazkodásra kiemelt figyelmet fordítsunk.

A NÉS az agrártermelés és mezőgazdálkodás, valamint a vízgazdálkodás területén lehetséges alkalmazkodási módszereket is számba veszi a klímaváltozás kutatási eredményeinek figyelembe vételével. Annak érdekében, hogy a globális felmelegedés negatív hatásainak ellensúlyozására és a szükséges és lehetséges alkalmazkodás megvalósítására való felkészüléshez a gazdálkodók számára hosszú távon is információt és segítséget nyújthassunk, kutatásunkban az egyik legfontosabb hazai haszonnövénynek, a kukoricával foglalkoztunk. A kukorica termesztésének feltételrendszerében várható változásokat mutatjuk be 2071-2100-ra vonatkozó időszakra egy olyan szimulációs vizsgálat eredményeképpen, mely a várható éghajlati módosulások (magasabb CO₂ szint; magasabb hőmérséklet; változó, szélsőséges csapadék-ellátottság) hatásaival számol.

A klímaváltozás folyamatáról, a kockázati tényezők várható alakulásáról még nagyon kevés ismerettel rendelkezünk. A kockázatmérséklés leghatékonyabb eszköze az új ismeretek megszerzése. A számtalan globális szintű ismeretanyag mellett az egyik legfontosabb kutatási feladatunk a klímaváltozás helyi hatásainak vizsgálata.

Az elmúlt évtizedek során jelentős fejlődésnek indult a speciális mikroklima az állományklíma kutatása, melynek eredményeképpen teret hódítottak a fizikai folyamatokat szimuláló elméleti modellek a korábban uralkodó empirikus módszerek mellett. A modell egy létező rendszer (pl. egy növény vagy állomány) egyszerűsített mása, mely képes követni a jóval összetettebb valós rendszer viselkedését. A modell arra is lehetőséget biztosít, hogy a rendszer elemeit egyenként, vagy akár együttesen vizsgálja, a kiválasztott tulajdonságo(ka)t valóságos rendszerbe ágyazva komplexen kövesse. Az általunk alkalmazott modell a Goudriaan (1977) féle CMSM (Crop Microclimate Simulation Model) újabb verziójának Goudriaan és van Laar (1994) PC-n futtatható változata volt. A modell fizikai modell, ezért alkalmazásához adaptációra nem volt szükség.

A növényi életfolyamatokban a globális felmelegedésnek, ill. annak egyik előidézőjének a légköri CO₂ szint megemelkedésének hatásait napjainkban is számos hazai és külföldi irodalom tárgyalja (*Mihailovic és Eitzinger 2007, Mera et al. 2006, Anda és Kocsis 2007* stb.). A megduplázott CO₂ koncentrációt tartalmazó scenáriók különböző szinteken (globálistól a lokálisig) és növényfajonként eltérő időszakokra próbálnak jövőképet felvázolni a várható, esetenként akár pozitív változásokról. A szakirodalom a CO₂ szint megkétszereződésén kétféle értéket, és ennek megfelelően kétféle várható bekövetkezési időpontot ért. A standard értelmezés szerint a kétszeres CO₂-koncentráció 560 ppm-et, azaz az ipari forradalmat megelőző időszak 280 ppm-ének dupláját érti. Ennek bekövetkezését 2050-2060 közé várják a nemzetközi kibocsátás-csökkentési egyezmények a technológiai-energetikai innovációk, illetve a világgazdasági növekedés függvényeként. Egy másik lehetséges értelmezés a ma érvényes légköri szint (~380 ppm) kétszeresét, 760 ppm-et tekinti célfüggvények; ennek várható bekövetkezési idejét a különféle forgatókönyvek 2100 környékére, vagy az utánra teszik (*IPCC 2007*). Scenárióinkban mi az utóbbi elképzelést alkalmaztuk. A kizárólag CO₂ koncentráció emelést tartalmazó scenárióval a globális felmelegedés helyi jellegű pozitív hatását kívántuk számszerűen meghatározni.

A jövőképek a várható hőmérsékletet annak bizonytalansága miatt eltérő határértékekkel közelítik. Az IPCC legutóbbi jelentésében a globális felmelegedés várhatóan 1,1-6,4°C közötti 2071-2100-ra. Ennek hazai megfelelőjéhez *Mika (2007)* szerint 1,4-es szorzót kell alkalmazni, mely a Kárpát-medence fokozottabb időjárás érzékenységre utal. Feldolgozásunkban az extrém időjárási helyzetek gyakoribbá válását nem hagytuk figyelmen kívül; az IPCC előrejelzésének legnagyobb értékét (6,4°C), valamint a Kárpát-medence fokozott érzékenységét (1,4-szeres szorzó) felhasználva fogalmaztunk meg egy-egy helyi scenáriót. A csapadék előrejelzések esetében az egyes GCM futtatások eredményei igen eltérőek, esetenként még a változás előjele sem azonos. A csapadék prognózisokban rejlő hőmérsékletet meghaladó bizonytalanság miatt vizsgálatunkban a hangsúlyt a léghőmérséklet változásainak elemzésére helyeztük, de nem a csapadékváltozás figyelmen kívül hagyásával. Az általunk alkalmazott scenáriók a hazai térségre legvalószínűbbnek tartott csapadék előrejelzéseket tartalmazzák.

A disszertáció célja a globális felmelegedés hazánkra leskálázott értékei alapján várható növényi tulajdonság módosulás(ok) meghatározása volt. A modell energetikai alapokon nyugszik, mely újszerű közelítést tett lehetővé a növényélettani folyamatok elemzésében. Amennyiben változik az állomány energia felhasználása, az hatással van minden életfolyamatára is (*Mera et al. 2006*). Teszt növényként azért a C₄-es csoportba tartozó külső

környezeti tényezőkre kevésbé érzékeny kukoricát választottuk, mert ha ennél a növénynél bármiféle módosulás jelentkezne, akkor a C₃-oknál ennél jelentősebb változás várható. Vizsgálatunk nyolc scenárió alapján kiterjedt az állományon belüli léghőmérséklet, vízgőznyomás, a növényhőmérséklet, a sztóma ellenállás, napi-párolgás, a szén asszimiláció, respiráció, valamint az állomány energia felhasználásának alakulás elemzésére.

A modell bemenő adatai és paraméterei a keszthelyi Agrometeorológiai Kutatóállomásról (46°44'N; 17°14'E; 114,2 m tengerszint feletti magasság) származnak. Az input meteorológiai elemeket a helybeli Eppley pyranométerrel felszerelt automata klímaállomás szolgáltatta. Az adott scenárióhoz tartozó bemenő növényi adatok esetében az időjárási inputokhoz hasonlóan az analógia elvét alkalmaztuk. A bemenő növényi adatoknál a szimulálni kívánt időjárással analóg évjáratot, és abból is átlagjúliust kerestünk, melynek kukoricára és talajnedvességre vonatkozó adatai megegyeztek, vagy közel azonosak voltak a szimulálni kívánt évjárat értékeivel. Ehhez az állomáson mintegy három évtizeden át gyűjtött középkorai érésű kukoricára vonatkozó adatsor állt rendelkezésünkre. A nyolc scenárióból egyik az 1961-90 közötti kontroll alapfuttatást mutatta be, egy a közelmúlt változásait, egy pedig a megduplázott CO₂ koncentráció hatását elemezte. A maradék öt scenárió a kétszeres CO₂ koncentráció mellett eltérő mértékű felmelegedést tartalmazott az alábbiak szerint: +3,8, +4,8, +6,0, és kettő db +9,0°C-os forgatókönyvek, mely utóbbi kettő csak a csapadékelátásban különbözött egymástól. Az egyik mérsékeltebb, a másik erőteljesebb szárazodást feltételezett.

Az éghajlatváltozás hatásának szimulációja során kutatómunkánkban a kukoricanövény egy átlagos júliusi napon belüli változásaival foglalkoztunk. Célunk az volt, hogy megállapítsuk a kukoricának a környezeti változások együttesére adott válaszát. A napi felbontású modellfuttatások az állományon belüli léghőmérséklet, a cső szinti növényhőmérséklet, a sztóma ellenállás, a szén asszimiláció, a szenzibilis és látens hő alakulására vonatkozóan tudtunk a napi változásokról releváns információkat nyújtani.

A vizsgálatok és kísérletek hosszabb időszakra vonatkozó kiterjesztése esetén a *Berzsenyi Z* (2000 és 2002) által folytatott növekedésanalízis funkcionális módszerének alkalmazása látszik olyan követhető tudományos eljárásnak, mely a környezeti tényezők hatását széles körűen képes vizsgálni a növény növekedésének és fejlődésének teljes időszakában.

A modell futtatások eredményeinek értékeléséhez párosított t-próbát alkalmaztunk, melyet a STATA 5,0 (1996) programcsomag alapján végeztünk. Az eljárás a kétmintás t-próbát egymintásra vezeti vissza, melyre azért van szükség, mert a modell futtatásainál ismétlési lehetőségre, s ezzel szórásszámításra nincs lehetőség. A próba a minta átlagát egy elvárt

átlaghoz hasonlítja. A null-hipotézis szerint, ha a különbségek átlaga egyenlő 0-val, akkor a két minta statisztikailag egyezik. Ha a különbségek átlaga 0-tól eltérő, akkor a két minta szignifikánsan különbözik. Az eljárás során a szignifikancia szintet 5%-ban rögzítettük.

1. Az alapfuttatáshoz képest mindegyik forgatókönyvnél az állományon belüli léghőmérséklet magas valószínűségi szinten szignifikánsan melegedett. Az elmúlt évtizedben ennek mértéke az 1961-90-es évekhez képest $0,6^{\circ}\text{C}$. Az állomány melegedése a külső hőmérsékletnöveléssel arányosan változott. A különböző futtatások állományon belüli léghőmérsékletének összehasonlítása alapján megállapítható, hogy önmagában sem a léghőmérséklet, sem a CO_2 koncentráció megváltoztatása nem vezet a várt eredményre, mivel ezek a tényezők egymás hatását felerősíthetik, vagy kiolthatják. A szimulációs modellezés azért jelent megfelelő eszközt a megismerés folyamatában, mert a növényt és környezetét együttesen kezeli. A hőmérséklethez hasonló lehet a csapadék hatása, melynek megfelelően az extrém meleg scenáriók állományon belüli léghőmérsékletében a csapadék ellátottság eltérése szignifikáns felmelegedésbeli különbséget okozott. Figyelmet érdemel az állományon belüli léghőmérsékletben a 6°C -os felmelegedéshez képest mindkét 9°C -os léghőmérséklet növelést tartalmazó futtatás szignifikánsan eltérő válasza. A növényállomány jelenléte azonban a felmelegedést valószínűleg az állomány árnyékoló hatásának köszönhetően a cső szintjében mérsékelte. Nem szabad figyelmen kívül hagyni azt a tényt, hogy az állomány kompenzáló hatása függ az állomány felépítésétől, amelyet viszont a nedvesség ellátottság determinál.

2. A cső szintjére számolt növényhőmérséklet eltérő forgatókönyvek szerinti értékei az alapfuttatástól, a két IPCC scenárió egymástól, valamint a 6°C -os felmelegedéshez képesti mindkét 9°C -os hőmérséklet emelésű kezelés növényhőmérsékletei bár csekély mértékben, de legalább 5%-os szinten szignifikánsan eltértek egymástól. A Keszthelyre végzett szimulációs elemzés alapján megállapítható, hogy a felmelegedés növeli a növényhőmérsékletet, de nem akkora mértékben, mint ahogy a külső léghőmérséklet növekszik; az állomány kompenzációja még magas léghőmérséklet emelésnél is működött, bár mértéke erősen vízellátás függő volt. A kukorica optimális növényhőmérséklete $23\text{-}24^{\circ}\text{C}$ körüli, mely értéket helybeli mérések szerint július dél körüli óráiban Keszthelyen már napjainkban is többször meghaladta az aktuális állományhőmérséklet. A globális felmelegedés helyi hatásai elleni védekezés egyetlen lehetősége a növények számára a hűtő közeg, a kiegészítő vízellátás biztosítása lehet, mely feltételezi az öntözés korábbi gyakorlatának átgondolását.

3. A két legnagyobb energia felhasználás, a szenzibilis és a latens hő arányai kukoricában átlagos júliust feltételezve nagymértékben nem változtak. Ennek ellenére mégsem szabad lebecsülni a néhány % -os módosulást sem, hiszen a fotoszintézis folyamatában éppen ekkora a teljes energiamegkötés értéke. A két energiafelhasználás egymástól nem független, s különösen a vízellátás hatása elsődleges szerepű. Ezt igazolhatja a két 9°C-os hőmérséklet emelésű futtatás szenzibilis hőjének összehasonlítása, mely szerint a kisebb nedvesség elvonás (-10% csapadék) erőteljesebb szenzibilis hő csökkenést vont maga után, mint a fokozottabb nedvesség elvonású kezelés. A 30%-ra emelt vízmegvonás a növény vízigényét adott környezeti feltételeknél fedezni már kevésbé volt képes, így a forgatókönyvben szimulált többlet energia egy része latens hőként nem tudott megjelenni, hanem a szenzibilis hő mennyiségét emelte. Az alapfuttatáshoz hasonlított csökkent szenzibilis hőmennyiség a 30%-os csapadék megvonású kezelésben azt jelenti, hogy még e nehezebb környezeti feltételeknél is volt Keszthelyen némi nedvesség-tartalék, mellyel a növény a zordabb feltételekhez alkalmazkodni próbált. Nem biztos, hogy ez a lehetőség az ország bármely pontján rendelkezésre áll.

4. A globális felmelegedés egyik előidézője, a megemelt CO₂ koncentráció önmagában a sztóma réseket 14,3%-kal szűkítette, mely a globális felmelegedés növény párologtatására gyakorolt hatásának számszerűsített értéke Keszthelyre. Ez pozitív hatás, mert ennyivel csökkenhet a növény transzspirációja az évek többségében szűkölködő vízellátású júliusok folyamán.

5. Saját vizsgálataink szerint a megemelt CO₂ gáz koncentráció fotoszintézis intenzitást növelő hatása a kísérőként fellépő melegebb növény- és léghőmérséklet miatt realizálódni nem minden esetben tud, ezáltal a globális felmelegedés egyik előidézőjéhez, a magasabb CO₂ koncentrációhoz kötött pozitív hatás megjelenésével Keszthelyen 6°C feletti havi átlagos nyári melegedésnél számolni nem célszerű. Ez alatt viszont igen, ami pl. a közelmúlt szén asszimilációjának 6-7%-os emelkedésében is megmutatkozott. Az asszimiláció értéke eltérő attól függően, hogy levélfelületre, vagy egységnyi talajfelületre számoljuk azt. A talajfelületre végzett közelítések jóval erőteljesebb fotoszintézis intenzitás csökkenést mutatnak, mivel ebben a zöldfelület nagyságának felmelegedés miatti csökkenése hatványozottabban jelentkezik. Ami visszafogja az asszimiláló zöldfelület csökkenését, az a termés kiesést is mérsékli. Feltételezésünk szerint a víz tűnik a jövő szűk keresztmetszetének, mely hiányára a

gazdálkodóknak fel kell készülniük még akkor is, ha a csapadék változás előrejelzése napjainkban meglehetősen bizonytalan.

6. A transzspiráció növekedés a 6°C-ot meghaladó felmelegedés szimulációknál lépett fel, de a kukorica vízvesztésének fokozódása a 9°C-os léghőmérséklet növekedést feltételező forgatókönyvek közül is ott igazán magas, ahol van elegendő hozzáférhető víz a talajban, vagyis a mérsékelt (-10 %-os) csapadék megvonású kezelésnél. Megállapítottuk, hogy a megemelkedett külső légköri CO₂ koncentráció némiképp kompenzál, de csak akkor, ha a csapadék jelentősen nem módosul.

6. CONCLUSIONS AND THESES

The most efficient protection against climate change is to reduce greenhouse gas emissions, but if the process has already started, we should also adapt to it. However, the topic of adaptation has been overshadowed by mitigation so far. During the elaboration of the National Climate Strategy (NCS) the stress was laid on paying significant attention to adaptation among the main action fields in the middle-term climate policy of Hungary.

The NCS also reviews the possible adaptation methods in the fields of agriculture and water management, by taking into account the research outcomes of climate change. In order to provide information for the farmers to compensate for the adverse effects of global warming as well as to prepare for the implementation of the necessary and possible adaptation, our research dealt with maize, one of the most important cultivated plants in Hungary. Changes expected in the conditions of maize production are provided for the period of 2071-2100 through a simulation model calculating the effects of the expected climate change events (higher CO₂ level; higher temperature; changing and extreme precipitation supply).

There is very little knowledge on the climate change process and the expected development of the risk factors. The most efficient tool for reducing the risk is to get new information. Besides the abundant knowledge at global level, one of our most important research tasks was to examine the local effects of climate change.

During the past decades research of special microclimate and canopy climate showed significant development. This resulted in theoretical models simulating physical processes and gained ground beside the former prevailing empirical approaches. Our model, a simplified version of an existing system (e.g. a plant or canopy), is able to emulate the behaviour of a

more complex real system. The model also provides an opportunity to examine the elements of the system individually or as a whole, and to follow the selected characteristic(s) embedded in a real system, in a complex way. The model applied by us was the PC-executable version of the newer edition *Goudriaan and van Laar* (1994) of the CMSM (Crop Microclimate Simulation Model) by *Goudriaan* (1977). This is a physical model, therefore its application required no adaptation.

Nowadays a lot of Hungarian and foreign studies have been elaborated on the impacts on the vegetal vital processes caused by global warming, as well as one of its source, the increasing level of the atmospheric CO₂ concentration (*Mihailovic and Eitzinger* 2007, *Mera et al.* 2006, *Anda and Kocsis* 2007, etc.). Scenarios with doubled CO₂ concentration try to give a picture on the expected (even positive) changes at different levels (from global to local) and try to outline an expected result for different time periods for different plants, sometimes even positive changes. The technical literature interprets doubling of CO₂ concentration as two different values and therefore two different expected occurrences. According to the standard interpretation the double CO₂ concentration is 560 ppm, namely double of the 280 ppm, the value of the period before the industrial revolution. Its realisation is expected between 2050 and 2060 as a function of the international emission reduction agreements, the innovations in technology and energetics as well as the world economy's growth. Another interpretation considers 760 ppm, double the figure of the current atmospheric level (~380 ppm) as target function; the different scenarios take its expected occurrence time to about 2100 or later (*IPCC*, 2007). In our scenario the latter concept was applied. With the scenario doubling only the CO₂ concentration we wanted to quantify the local positive effects of global warming.

The expected temperature due to its uncertainty viewed in two different ways. Global warming is expected to increase between 1.1 and 6.4 °C to 2071-2100 in the latest IPCC report. According to *Mika* (2007) a multiplying factor of 1.4 should be applied for the Hungarian version; it refers to the higher weather sensitivity of the Carpathian basin. In our study the higher frequency of the extreme weather phenomena was also taken into account; by using the highest value of the IPCC forecast (6.4 °C) as well as the increased sensitivity of the Carpathian basin (multiplying factor: 1.4), resulting in two local scenarios, respectively. In the case of precipitation forecasts the results of the individual GCM runs were very different, in some cases even the signs of the changes differed. Due to the uncertainty exceeding the temperatures in the precipitation forecasts, we laid stress on analysing the changes in air temperature without ignoring the changes in precipitation. The applied scenarios contained the most probable precipitation forecasts for Hungary.

The aim of the thesis was to determine the effect of the change(s) in plant characteristics on the basis of the values of global warming relevant to Hungary. The model is based on energetics providing a new approach in the analysis of the plant vital processes. If the energy consumption of the canopy changes, it will affect all plant vital processes (*Mera et al.* 2006). For a test plant, we selected maize belonging to the C₄ group as being less sensitive to external environmental factors since if this plant got any modifications then the plants belonging to the C₃ group are expected to go through more serious changes. Based on eight scenarios, our analysis ranged over canopy inside air temperature, plant temperature, stomatal resistance-evaporation, carbon assimilation as well as development of the energy consumption of the canopy.

Input data and parameters derived from the Agrometeorological Research Station of Keszthely (46°44'N; 17°14'E; 114.2 m above sea level). Input meteorological elements were provided by the local automatic climate station equipped by Eppley pyranometer. Similarly to the meteorological inputs, we used the principle of analogy in the case of the input plant data of the given scenario. At the input plant data we chose a year - and within it a month, an average July - being analogous with the weather to be simulated, where the data on maize and soil moisture were the same or almost the same as the values of the year to be simulated. For this we had about a 30-year data series for medium early maturing maize. Out of the eight scenarios one showed the control basic run of the period between 1961 and 1990, one examined the changes of the recent past, another one analysed the impacts of the double CO₂ concentration. The remaining five scenarios contained different degrees of warming-up beside the double CO₂ concentration as follows: scenarios with +3.8, +4.8, +6.0, and two with +9.0° C; the latter two differed only in the quantity of precipitation. One of them assumed a more moderate, while the other one a more vigorous drying. For evaluating the results of the model runs we used a matched t-test that was performed by STATA 5.0 (1996) statistical program package. This process reduces the two-sample t-test to a one-sample test, in order to eliminate the possibility of repetition of the model runs (or standard deviation calculation). The test compares the mean value of the sample to an expected one value. According to the zero hypothesis if the mean value of the differences is 0 then the two samples are statistically the same. If the mean value of the differences does not equal to 0, then the two samples are significantly different. The significance level was set at 5% in the process.

1. The canopy inside- air temperature of each scenario has significantly warmed at high probability level compared to the basic run. In the past decade its degree was 0.6 °C compared

to the 1960-1990 period. Warming-up of the canopy changed proportionally to the increase of external temperature. Comparison of the canopy inside air temperature of the different runs shows that the change of either the air temperature or the CO₂ concentration in itself could not result in an appropriate outcome since these factors may strengthen or suppress each other's effects. The impact of precipitation can be similar to it; in accordance with this, the different precipitation supplies of the extreme hot scenarios caused significant difference in the canopy inside air temperatures. This needs to be handled with caution because of the significantly different reactions regarding the canopy inside air temperature of both runs containing an air temperature increase of 9 °C compared to a warming-up of 6 °C. The presence of a plant canopy, however, mitigated the degree of warming-up at corn-cob level, likely owing to the shadowing effect of the canopy. We should not ignore the fact that the compensating effect of the canopy depends on the canopy structure which is determined by the humidity supply.

2. Values of the corn-cob level plant temperature calculated by different scenarios compared to the values of the basic run; the two IPCC scenarios compared to each other as well as the plant temperatures of both treatments with increased plant temperatures of 9 °C compared to the scenario with warming up of 6 °C – these all represented a slight difference but differed from each other by 5% at least. On the basis of the simulation analysis related to Keszthely, it can be established that warming-up increases plant temperature, but not to the same extent as the external air temperature rises; the compensating effect of the canopy worked even in the case of a serious temperature increase, though the degree thereof was also strongly dependent on water supply. The optimum plant temperature of maize is about 23-24 °C, and according to local measurements performed around noon in Keszthely in July, the actual canopy temperature has also exceeded this value several times recently. The only chance of protection against the local effects of global warming is to provide a cooling medium, the additional water supply for the plants; this requires the re-consideration of the former irrigation practice.

3. The ratio of the two largest energy consumption, sensible and latent heat did not change significantly in maize, assuming an average July. Still, the change of several percents should not be underestimated, since the value of the entire energy assimilation is the same during the photosynthesis. The two types of energy use are not independent from each other, and especially the impacts of water supply have a primary role. It can be justified by the comparison of the sensible heat of the two runs with a temperature rise of 9 °C; it shows that the reduced drying (-10% precipitation) implied a stronger decrease of sensible heat than the

treatment with more drying did. The decrease of water supply was able to cover the water demand of plants to a lesser extent with given environmental conditions, therefore a certain part of the surplus energy (higher air temperature) simulated in the scenario could not appear as latent heat but it increased the amount of sensible heat. The reduced amount of sensible heat compared to the basic run in the treatment with a precipitation decrease of 30% means that even under these harder environmental conditions there was some humidity reserve in Keszthely, and the plant tried to accommodate to the harder conditions. It is uncertain whether this option is available elsewhere in the country.

4. One of the causes of global warming, the raised CO₂ concentration itself narrowed the stomatal openings by 14.3%; it is the quantified value of the impact of global warming on plant evaporation, referring to Keszthely. This is a positive impact since plant transpiration would decrease in the majority of the years by this figure during July when water is scarce.

5. Our own investigations confirmed the former statement of *Prasad et al.* (2006) that says the impact of the increased CO₂ gas concentration, which enhances the intensity of photosynthesis cannot always be realised due to the accompanying warmer plant and air temperature. Therefore it is not expedient to calculate with the emergence of a monthly average summer warming-up of above 6 °C in Keszthely; this positive effect is associated to one of the sources of global warming, the higher CO₂ concentration. But it is worth calculating below this value; it was proven e.g. by the increase of 6-7% in carbon assimilation in the recent past. The assimilation values are different, depending on their calculation to the leaf area or to the soil surface unit. Iterations to soil surface show a much more significant decrease in the intensity of photosynthesis, since in this approach the decrease of green surface due to warming-up develops much more intensively. This fact mitigates the decrease in the assimilating green surface and would also reduce crop failure. In our opinion, water seems to be the bottleneck of the future; farmers have to prepare to face the lack of water, even if nowadays the forecast of precipitation changes is rather uncertain.

6. Transpiration increase emerged in the case of simulations with warming up of over 6 °C, but out of the scenarios with an air temperature increase of 9 °C, the intensity of water loss of maize is really high in the case of that scenario where there is enough available groundwater, namely in the case of the treatment with moderate (-10%) precipitation decrease. It was found

that the increased external atmospheric CO₂ concentration slightly compensates, but only if precipitation does not have any significant changes.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A XXI. század egyik nagy kihívása a globális klímaváltozáshoz történő alkalmazkodás. Az alkalmazkodásra való felkészülés gyakorlati megalapozásához jelentős segítséget nyújthat a tudományos kutatás, mely hosszú távra adhat információt a vélhetően bekövetkező változásokról.

Vizsgálataink célja Keszthelyen a kukorica termesztésének feltételrendszerében várható éghajlati eredetű változások bemutatása a 2071-2100 közötti időszakra.

Az általunk alkalmazott *Goudriann* (1977) féle mikroklíma szimulációs modell az állományklíma mellett a növényi életfolyamatokat is számszerűsítve kezeli, az állomány, valamint a felette lévő légkör között lejátszódó anyag- és energia kicserélődés folyamatait alapul véve. A modell bemenő adatai és paraméterei a keszthelyi Agrometeorológiai Kutatóállomásról származnak. A bemenő növényi adatoknál a szimulálni kívánt időjárással analóg évjáratot és abból is átlagjúliust kerestünk, melynek kukoricára és talajnedvességre vonatkozó adatai megegyeztek, vagy közel azonosak voltak a szimulálni kívánt évjárat értékeivel. Ehhez az állomáson mintegy három évtizeden át gyűjtött középkorai érésű kukoricára vonatkozó adatsor állt rendelkezésünkre. A terület uralkodó talajtípusa a Ramann-féle barna erdőtalaj.

A modell futtatások eredményeinek értékeléséhez párosított t-próbát alkalmaztunk, melyet a STATA 5.0 (1996) programcsomag alapján végeztünk. Az eljárás a kétmintás t-próbát egymintásra vezeti vissza. Az eljárás során a szignifikancia szintet 5%-ban rögzítettük.

A különböző jövőképek összehasonlításának időjárási alapját az *IPCC* 2007-es jelentésében közzétett forgatókönyvek alapjához hasonlóan az 1961-90-es évek átlagai képezték. Megjelenítettük a közelmúlt változásait is az 1997-2006-os évtized adatainak felhasználásával. A további scenáriók esetében megkétszerezve a CO₂ gáz koncentrációját, növeltük a kontroll futtatáshoz képest a léghőmérséklet értékeit, melyet különböző mértékű csapadékcsökkentéssel párosítottunk.

Munkánkban felhasználtuk az *IPCC* (2007) Negyedik Helyzetjelentését és a Globális Cirkulációs Modellek hazai leskálázott eredményeit *Bartholy et al.* (2007) munkái alapján.

Vizsgálataink – a különböző általunk felvázolt hét scenáriónak megfelelően – kiterjedtek az állományon belüli léghőmérséklet, a vízgőznyomás, a cső szinti növényhőmérséklet, a sztóma ellenállás és párolgás, a szén asszimiláció, a respiráció, valamint az állomány energia felhasználásának elemzésére.

Az alapfuttatáshoz képest minden forgatókönyv esetén, az állományon belüli léghőmérséklet szignifikánsan melegedett. A globális felmelegedés problémájának világméretű térhódításával az állományon belüli léghőmérséklet és várható változásainak előrejelzése a növények életfolyamataival foglalkozó kutatásoknál várhatóan ismételten előtérbe kerül. A Keszthelyre végzett szimulációs elemzés azt mutatta, hogy a felmelegedés növeli a növényhőmérsékletet, de nem akkora mértékben, mint ahogy a külső léghőmérséklet növekszik. Ez az állományon belül fellépő kompenzáló hatást igazolja, de nem szabad megfeledkeznünk arról, hogy akkor viszont több energiának kell átadódnia az állomány feletti légtérnek. A kompenzáció mértéke alacsonyabb szimulált felmelegedésnél csekélyebb, mindössze néhány tized °C. Magasabb felmelegedést szimulálva az állomány növényhőmérsékleti kompenzációja azonban nem érte el az állomány feletti légtérre szimulált léghőmérséklet emelkedés mértékét.

A szenzibilis és latens hő arányaiban – átlagos júliust feltételezve – nagyobb eltérést nem tapasztaltunk, de a kismértékű, pár százalékos módosulás is következtetésekre nyújt lehetőséget, különösen akkor, ha a vízellátást is figyelembe vesszük. A kétszeres CO₂ koncentráció a szenzibilis hő mennyiségét napi átlagban szignifikánsan 19,6%-al növelte. Ez összhangban van a sztóma növekvő ellenállásával, s a csökkenő párologtatással, illetve annak következményeivel. Ahogyan emelkedett a forgatókönyvek szerinti felmelegedés szimuláció, úgy csökkent a különböző scenáriók szenzibilis hőmennyiségeinek kontroll futtatáshoz hasonlított értéke. A legmagasabb léghőmérsékletet szimuláló kezeléseknél az alacsonyabb, 10%-os csapadékcsökkenést bemutató forgatókönyvnél esett vissza legjelentősebben (68,1%) a szenzibilis hő mennyiség, mert itt volt több a növény számára rendelkezésre álló vízmennyiség, és igen magas a növények párolgásra – hűtésre fordítani kívánt energiaigénye. Az alapfuttatásra vetített csökkent szenzibilis hőmennyiség a 30%-os csapadék megvonású kezelésben azt jelenti, hogy még e nehezebb környezeti feltételeknél is volt Keszthelyen némi tartalék, mellyel a növény a zordabb feltételekhez alkalmazkodni képes. A latens hő esetében az 1961-90-es évekhez viszonyított 14,2%-os szignifikáns csökkenést a CO₂ szint megduplázásakor tapasztaltunk. Ez az érték egyben a globális felmelegedés növények vízháztartására kifejtett párologtatást mérsékelő hatásának energetikai alapokra helyezett számszerű megjelenítése.

A globális felmelegedés egyik előidézője – a megemelkedett CO₂ koncentráció – a sztóma réseket 14,3%-kal szűkítette, mely a növény transzspirációjának csökkentésével pozitív hatást idéz elő.

A sztómák működése környezeti és biológiai törvények által meghatározott. Az általunk kontrollként használt 1961-90-es évek mutatójához képest minden forgatókönyv szerinti elképzelésben szignifikánsan emelkedett a napi átlagos sztóma ellenállás. Már a közelmúlt júliusában 14,6%-kal szignifikánsan nőtt az átlagos sztóma ellenállás, mely a magasabb léghőmérséklet és a csökkenő tendenciájú júliusi csapadék eredménye lehetett. Önmagában a megkétszerezett külső CO₂ gáz koncentráció napi átlagban a sztóma rések nyílását kb. a felére szűkíti, mely hatás alacsony napállásnál, főképpen reggel még a 60%-ot is meghaladja.

A vizsgált scenáriók közül transzspiráció növekedés a 6°C-ot meghaladó felmelegedés szimulációknál lépett fel, bár az idézett 6°C-os hőmérsékletemelésselű kezelés csak néhány %-os változást mutatott az 1961-90-es évek átlagához képest. A vízvesztés fokozódása a 9°C-os léghőmérséklet növekedést feltételező forgatókönyveknél jelentősebb, s ott is annál a scenáriónál igazán magas, ahol ehhez van elegendő hozzáférhető talajvíz.

A közelmúltban Keszthelyen a magasabb léghőmérséklet, s a némiképp megemelkedett légköri CO₂ koncentráció a kukorica fotoszintézis intenzitását 6%-kal szignifikánsan emelte. Ebben a forgatókönyvben az évtized tendencia jellegű mérsékelt csapadék csökkenése is benne foglaltatik. A 6%-os növekedés szerint a külső környezeti tényezők változása eddig pozitívan befolyásolta a helyben termesztett kukorica produktivitási mutatóját, a fotoszintézis intenzitást.

Önmagában a megemelt CO₂ koncentráció, változatlan környezeti (időjárási) feltételeknél közel 40%-kal fokozná az állomány CO₂ asszimilációját. A megemelt CO₂ gáz koncentráció fotoszintézis intenzitást növelő hatásával Keszthelyen 6°C feletti havi átlagos júliusi melegedésnél viszont már semmiképpen nem célszerű számolni. Egységnyi talajfelületre számolva már a SRES scenáriók esetén sem várható pozitív változás a fotoszintézis intenzitásában. Figyelemre méltó az állományokra (egységnyi talajfelületre) meghatározott szén megkötésben fellépő, levélzetet felülmúló igen erőteljes csökkenés, mely már a 6°C-os havi átlagos felmelegedést szimuláló kezelésnél is csaknem 50%, s a 9°C-os felmelegedést tartalmazó futtatásoknál 10%-os csapadék elvonásnál 62,5%, s 30%-os vízhiány alkalmazásakor már 95,3%.

Összekötve a növény vízháztartását és szénasszimilációját, magasabb felmelegedésnél (+6°C) a megemelkedett külső légköri CO₂ koncentráció némiképp kompenzál. Ez azonban csak

akkor működhet, ha a csapadék jelentősen nem módosul. A csapadék drasztikus visszaesése a fenti eredményeket azonnal felülírhatja, s a vízhiány kedvezőtlen hatása a növény valamennyi életfolyamatára depresszíven hat.

Az ember által befolyásolt növénytermesztés a termeszto számára akkor „eredményes”, ha a CO₂ bejutása a fotoszintézis helyére maximális, s mindez minimális vízgőzvesztéssel társul. A két gáz forgalmában a helyes egyensúly a megfelelő sztóma ellenállás különösen száraz termőhelyen a gazdaságos növénytermesztés egyik kulcs tényezője.

Kutatásaink megerősítették *Gaál* (2008), *Pepó* (2005), *Várallyai és Farkas* (2008) valamint mások megállapításait, mely szerint a növény rendelkezésére álló vízmennyiség tűnik a jövő szűk keresztmetszetének, melynek hiányára a gazdálkodóknak érdemes készülniük még akkor is, ha a csapadék változás előrejelzése napjainkban még mindig meglehetősen bizonytalan. A védekezés egyik meghatározó lehetősége a növények számára a hűtő közeg, a kiegészítő vízellátás biztosítása, mely feltételezi az öntözés eddigi gyakorlatának átgondolását. A vázolt jövőképek a gazdálkodók számára is betekintést nyújthatnak az időjárás (globális felmelegedés) és a növények adta válaszreakció kérdésében. A lokális szintű információk konkrét segítséget nyújthatnak a helybeli gazdálkodóknak a várható változások negatív hatásainak elhárítására való felkészülésben.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretném köszönetemet kifejezni mindazoknak, akik segítségemre voltak a PhD disszertációm elkészítésében és szakmai tanácsaikkal segítették kutató munkámat.

Külön köszönettel tartozom konzulensemnek, Dr. habil. Anda Angélának, az MTA doktorának, tanszékvezető egyetemi tanárnak a kutatás és a disszertáció készítése kapcsán nyújtott segítségéért, iránymutatásáért és értékes észrevételeiért.

Köszönöm opponenseimnek, hogy rendkívüli szakértelmükkel, tudásukkal hatalmas segítséget adtak kutatómunkám eredményeinek közreadásához.

Nagyban segítette értekezésem elkészítését mindazon ismeret, melyet dr. Kocsis Tímeától tanultam.

Köszönöm Soós Gábor technikusnak, dr. Weingartner Lillának és Andrási Katinkának a disszertáció elkészítéséhez nyújtott segítséget.

Végezetül köszönöm családom türelmét, segítő támogatását és a sok lemondást, ami nélkül ez a dolgozat nem készülhetett volna el.

8. IRODALOMJEGYZÉK

Anda A. - Bakos P. /1996/: Fajtaösszehasonlító vizsgálatok optimális és csak természetes vízellátottság esetén. Öntözéses gazdálkodás 1: 9-15.

Anda A. - Burucs Z. /1997/: A növény és víz kapcsolata a talaj-növény-légkör rendszerben. MKM támogatásával megjelent szakkönyv. PATE GMK Nyomda, Keszthely. p: 141.

Anda A. - Dióssy L. /2010/: Simulation in maize-water relations: a case study for continental climate (Hungary). Ecohydrology 3,487-496

Anda A. - Dunkel Z. /2000/: Agrometeorológia. Egyetemi jegyzet. VE GMK Nyomdája, Keszthely, p: 127.

Anda A. - Horváth F. - Boldizsár A. - Erdei L. /2007/: A case study on the relationship between radiation intensity and stomatal conductivity in fragmented reedbeds. Időjárás Vol. 111. No.4: 251-261.

Anda A. - Kocsis T. /2006/: Szemelvények meteorológiából és éghajlatlanból alapszakos (BSc) hallgatók számára. Kari jegyzet, PE GMK, Keszthely p: 134.

Anda A. - Lőke Zs. - Burucs, Z. /2001/: Öntözött és természetes csapadékelátású kukorica mikroklímája. Növénytermelés. 50, 2-3: 249-260.

Anda A. - Lőke Zs. /2003/: A kukorica párolgását meghatározó tényezők, a sztóma ellenállás, a növényhőmérséklet, valamint a fotoszintézis intenzitás számítása szimulációs modellel. Növénytermelés, Tom 52. No.3-4: 351-363.

Anda A. - Lőke Zs. /2003/: A kukorica párolgását meghatározó tényezők, a sztóma ellenállás, a növényhőmérséklet, valamint a fotoszintézis intenzitás számítása szimulációs modellel. Növénytermelés, Tom 52. No.:3-4:351-363.

Anda A. - Lőke Zs. /2005/: Microclimate simulation in maize with two watering levels. Időjárás 109. 1: 21-39.

Anda A. - Lőke Zs. /2006/: A növény-légkör rendszer kölcsönhatásai kétszeres CO₂ koncentrációnál. Növénytermelés 55. 3-4: 189-201.

Anda A. - Lőke Zs. - Sz. Kirkovits M. /2002/: Kukorica néhány vízháztartási jellemzőjének szimulációja. J. of Central European Agriculture, Vol. 3. No.2: 95-103.

Anda A. - Páll J. - Lőke Zs. /1997/: Measurement of mean stomatal resistance in maize. Időjárás Vol. 101 No.4 p: 275-288.

Anda A. - Tóbiás F. /1999/: Egyedi kukoricelevél területének meghatározására szolgáló eljárások és műszerek összehasonlító vizsgálata. Növénytermelés Tom. 48. No.1: 55-67.

Anda A. /1986/: Kukorica levélfelületének meghatározására alkalmas módszerek összehasonlítása. Növénytermelés 35: 99 -108.

Anda A. /1989/: A sztóma ellenállás kapcsolata néhány környezeti tényezővel és alkalmazása a transzspiráció számítására. Növénytermelés 4:289-297.

Anda A. /1990/: A kukorica levélfelületét mérő módszerek összehasonlítása. OMSZ Beszámolókötet az 1986-ban végzett kutatásokról. Budapest, p: 58-65.

Anda A. /2001/: Az állományklímát befolyásoló néhány eljárás mikrometeorológiai elemzése. Akadémiai Doktori Értekezés

Anda A. /2004/: A globális felmelegedés és a mezőgazdaság. Természet Világa 135. évf. 2004. II. Különszám p: 65-70.

Anda A. /2006/: Modeling maize response to climate modification in Hungary. Commun. Biometry Crop Sci. 1 (2), 90-98.

Ángyán J. /1987/: Agroökológiai hatások a kukoricatermesztésben. Az agroökológiai körzetek és a területi fejlesztés. Közgazdasági és Jogi Könyvkiadó. Budapest.

Anwar M. R. - O'Leary, G. - McNeil D. - Hossain H. - Nelson, R. /2007/: Climate change impact on rainfed wheat in south-eastern Australia. Field Crops Research 104 (1-3), 139-147.

Bartholy J. - Pongrácz R. - Gelybó Gy. /2007/: Regional climate change in Hungary for 2071-2100. Applied Ecology and Environment Research 5, 1-17

Bartholy J. - Pongrácz R. - Szépszó G. /2008/: A PRUDENCE projekt eredményei. Előadás, Budapest, 05.20.

Bartholy J. - Pongrácz R. - Torma Cs. /2010/: A Kárpát-medencében 2021-2050-re várható regionális éghajlatváltozás RegCM-szimulációk alapján. Klíma-21 Füzetek 60.:3-13

Bartholy J. - Pongrácz R. /2008/: Regionális éghajlatváltozás elemzése a Kárpát-medence térségére. Klímaváltozás: környezet – kockázat- társadalom, Kutatási eredmények. Szaktudás Kiadó Ház, Budapest

Berzsenyi Z. /2000/: Növekedésanalízis a növénytermesztésben. Egyetemi jegyzet PhD hallgatóknak. Veszprémi Egyetem Georgikon Mezőgazdaságtudományi Kar Keszthely

Berzsenyi Z. /2002/: A növekedésanalízis funkcionális módszere. Növénytermelés, 51. 4. 449-467

Birkás M – Jolánkai M. (2008) A növénytermesztés és a klímaváltozás összefüggései. Összefoglaló megállapítások, következtetések, javaslatok. Klímaváltozás: környezet – kockázat - társadalom, Kutatási eredmények. Szaktudás Kiadó Ház, Budapest 131-150

Boksai D. /2007/: A klímaváltozás hatása a kukorica fenológiai fázisaira. BCE Kertészettudományi Kar, Tudományos Diákköri Konferencia

Cannel, M. G. R. – Grace, J. R. – Booth, A. /1989/: Possible impacts of climate warming on trees and forests in the United Kingdom: A Review. *Forestry* 62: 337-404 pp.

Carter T. R. – Saarikko, R. A. - Niemi, K. J. /1996/: Assessing the risks and uncertainties of regional crop potential under a changing climate in Finland. *Global climate change and agriculture in the North. Proceedings of an international symposium, Helsinki, Finland, 16-17 November 1995. Agricultural – and – Food – Science – in – Finland, 1996,5:3, 329-350 pp.*

Castrignano A. - Di Bari V. - Stelluti M. /1997/: Evapotranspiration predictions of CERES-Sorghum model in Southern Italy. *Eur. J. of Agron.* 6, 265-274.

Chen J. /1984/: Mathematical analysis and simulation of crop micrometeorology. Ph.D. Thesis Wageningen University

Dióssy L. - Anda A. /2008/: Energy-based approach of local influence of global climate change in maize stands. *Cereal Research Communications* 36. 4: 591-600. Impact factor: 1.190.

Dióssy L. - Anda A. /2009/: Consequences of climate change on some maize characteristics in Hungary. *Időjárás (Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service)* Vol.113.No.1-2 :145-156

Dióssy L. /2008/: Simulation of local plant temperature in maize at Keszthely as a result of global climate modification. *Georgikon for Agriculture (Multidisciplinary Journal in Agricultural Sciences)* Vol. 11. No. 1: 19

Dióssy L. /2008/: The Hungarian national climate change strategy: its principles, assignments, and a special case study on maize production. *Environment, Development and Sustainability* Volume 11, Number 6. /December 2009, 1135-1114

Dióssy L. /2008/: The influence of global climate change on air and soil temperatures in maize canopy. *Időjárás (Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service)* Vol. 112. No. 2: 125-139.

Dunkel Z. /1982/: Szén-dioxid vertikális eloszlása kukoricaállomány. *OMSZ Beszámolókötet* Budapest p: 82-97.

Erdélyi É. – Ferenczy A. – Boksai D. /2008/: A klímaváltozás várható hatása a kukorica és a búza fenofázisainak alakulására. *Klíma-21 Füzetek* 53.: 115-130

Fodor N. - Pásztor L. /2010/ The agro-ecological potential of Hungary and its prospective development due to climate change. *Applied Ecology and Environmental Research* 2010, 8: 177-190

Fulco L. - Asseng S. /2006/: Climate change impacts on wheat production in a Mediterranean environment in Western Australia. *Agricultural Systems* 90, 159-179

Gaál M. /2007/: A kukoricatermelés klimatikus feltételeinek várható változása a B2 scenárió alapján. *Klíma-21 Füzetek* 51.: 48-56.

Gaál M. /2008/: A növénytermesztés klimatikus feltételeinek valószínűsíthető változásai. In: Harnos Zs. – Csete L.: Klímaváltozás: környezet – kockázat – társadalom, Kutatási eredmények. Szaktudás Kiadó Ház, Budapest 303-308

Goudriaan J. - van Laar H. H. /1994/: Modelling potential crop growth processes. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp 58-67.

Goudriaan J. /1977/: Crop micrometeorology: a simulation study. Simulation monographs, Pudoc, Wageningen. p:249

Goudriaan, J. - van Laar H. H. /1994/: Modelling Potential Crop Growth Processes. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht-Boston-London. p:238.

Gráf J. /2008/: Az öntözés az előttünk álló évtizedben (előadás). A Marosvíz öntözési napján rendezvény. Mezőhegyes, 2008.november 13

Harnos Zs. – Csete L. /2008/: Klímaváltozás: környezet – kockázat – társadalom, Kutatási eredmények. Szaktudás Kiadó Ház, Budapest 9-14

Harnos Zs. – Gaál M. – Hufnagel L. /2008/: Klíma-változásról mindenkinek. Budapesti Corvinus Egyetem Kertészettudományi Kar, Matematika és Informatika Tanszék, Budapest 107-112

Harnos Zs. /2005/: A klímaváltozás növénytermelési hatásai. Agro-21 Füzetek 38.: 38-58.

Harnos Zs. /2007/: A klímaváltozással összefüggő hazai kutatások: a VAHAVA folytatása. Klíma-21 Füzetek 49.: 3-15.

Haszpra L. – Weidinger T. /2010/: Emlékeztető a Meteorológiai Tudományos Bizottság 2010. október 13-i üléséről, OMSZ Budapest 2010

Haszpra L. /2007/: A légköri CO₂ mérések negyedszázada Magyarországon /1981-2001/. Légkör 52. 1:4-7.

Haszpra L. /2008/: A bioszféra szerepe a légkör széndioxid tartalmának alakulásában. OTKA (T042941) kutatási téma zárójelentése. 1-5.

Henk A. R. de Bruin /2010/: Comments on „ Greenhouse effect in semi-transparent planetary atmospheres” by Ferenc M. Miskolczi IDŐJÁRÁS Vol. 114, No. 4, October-December 2010, pp. 319-324

Hunkár M. /1990/: Kukoricaállomány mikroklímájának szimulációja. Időjárás, 94: 221-229.

Huzsvai L. - Rajkai K. - Szász G. /2004/: Az agroökológia modellezéstechnológiája. Debreceni Egyetem Agrártudományi Centrum 11-13

International Food Policy Research Institute /IFPRI/, /2009/: Climate change: Impact on Agriculture and Costs of Adaptation, Food Policy Report <http://www.ifpri.org/pressroom>

IPCC /1996/: Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge

IPCC /2000/: Special Report on Emission Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge-NewYork; www.ipcc.ch

IPCC /2007/: Summary for Policymakers. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor HL, Miller G (Eds) Climate Change (2007) The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, Available online: www.ipcc.ch

Jackson R. B. - Sala O. E. - Field C. B. - Mooney, H. A. /1994/: CO₂ alters water use, carbon gain, and yield for dominant species in a natural grassland. *Oecologia* 98, 257-262

Jolánkai M. /2008/: A klímaváltozás kedvezőtlen hatásait ellensúlyozó megoldások a szántóföldi növénytermelésben. In: Harnos Zs. – Csete L.: Klímaváltozás: környezet – kockázat – társadalom, Kutatási eredmények. Szaktudás Kiadó Ház, Budapest 153-164

Jones H. G. /1983/: Plants and Microclimate. Cambridge University Press, Cambridge.

Juhász-Nagy P. /1993/: Az eltűnő sokféleség. Scientia Kiadó. Budapest

Kapronczai I. /2009/: Agrártámogatások és a klímaváltozás (előadás). Aszály és szárazodás Magyarországon konferencia, Kecskemét 2009. október 7.

Kocsis T. - Anda A. - Bem J. /2009/: Modelling temperatures in maize as a consequence of global climate change in Hungary Conf. Proc. on 9th Int. Sym. on Interdisciplinary Reg. Res.: Environ, Health and Humanity Issues in the down Danubian Region (Ed: Mihailovic, D.; Miloradov, M.V.), June 21-22, 2007 Univ. Novi Sad, Novi Sad, SERBIA p: 223-232. ISBN: 978-981-283-439-3.

Kocsis T. - Anda A. /2005/: Az éves csapadék-mennyiség változásának tendenciái Keszthelyen, 130 év mérése alapján. *Légekör* 50. évf. 2: 16-20.

Kocsis T. - Anda A. /2006a/: Keszthely léghőmérséklete a XX. században. *Légekör* 51. évf. 1: 21-24.

Kocsis T. - Anda A. /2006b/: A csapadék alakulása a keszthelyi hosszú idősoros meteorológiai megfigyelések alapján. *J. of Central Eur. Agric. Vol. 7. No 4*: 699-708.

Kocsis T. /2008/: Az éghajlatváltozás detektálása és hatásainak modellezése. PhD. Értekezés, Keszthely

Kovács G. J. – Fodor N. /2005/: A klímaváltozás tápanyagforgalomra gyakorolt hatásának becslése In Kovács G. – Csathó P. /szerk/: A magyar mezőgazdaság elemforgalma 1901 és 2003 között: MTA Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézet 221-234

Láng I. – Csete L. – Jolánkai M. – /szerk/, /2007/: A globális klímaváltozás: hazai hatások és válaszok. A VAHAVA jelentés. Szaktudás Kiadó Ház, Budapest

Láng I. /2006/: Éghajlat és időjárás: változás – hatás – válaszadás. AGRO-21 Füzetek. Budapest.

Long S. P. - Answorth E. A. - Leakey A. D. B. - Donald J. N. - Ort, R. /2006/: Food for thought: Lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. Science 30, 1918-1921

Menyhért Z. /1979/: Kukoricáról a termelőknek, Mezőgazdasági Kiadó, Budapest

Mera R. J. - Niyogi D. - Buol G. S. - Wilkerson G. G. - Semazzi F. H. M. /2006/: Potential individual versus simultaneous climate change effects on soybean (C3) and maize (C4) crops: An agrotechnology model based study. Global and Planetary Change 54, 163-182

Mészáros E. /1999/: Éghajlatváltozás és Földünk jövője. TermészetBúvár 1999/2.: 10-12

Mihailovic D. T. - Eitzinger J. /2007/: Modelling temperatures of crop environment Ecological Modelling, 2007, Volume 202, Issues 3-4: 465-475.

Mika J. /1997/: Klímaváltozás: hazai sajátosságok, ökológiai követelmények. In: Szász G. – Tőkei L. (szerk) Meteorológia. Mezőgazda Kiadó Budapest, 1997.

Mika J. /2002/: A globális klímaváltozásról. Fizikai Szemle 2002/9: 258-268.

Mika J. /2007/: Regionális éghajlati forgatókönyvek előkészítése statisztikus módszerekkel. Akadémiai Doktori Értekezés, Budapest

Mika J. /1997/: Klímaváltozás: hazai sajátosságok, ökológiai követelmények. In: Szász G.-Tőkei L. /szerk/: Meteorológia. Második Kiadás. Mezőgazda Kiadó, Budapest 208-216

Miskolczi F. /2010/: The stable stationary value of the Earth's global average atmospheric planck-weighted greenhouse-gas optical thickness. Energy & Environment special issue: Paradigms in climate research, vol. 21 No. 4 2010. august

Miskolczi F. M. /2007/: Greenhouse effect in semi-transparent planetary atmospheres. Időjárás – Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service, Vol. 111. No. 1. 2007

Monsi M. - Saeki T. /1953/: Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. Jap. J. Bot. 14: 22-52.

Monteith J. L. /1973/: Principles of Environmental Physics. Edward Arnold, London

Nagy J. – Sárvári M. /2005/: Kukorica In Antal J. (szerk.): Növénytermesztés 1. Mezőgazda Kiadó, Budapest

Németh T. /2010/: Tájékoztató az MTA Környezettudományi Elnöki Bizottságának tevékenységéről. Magyar Tudomány 2010.08., 910-912

Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia /NÉS/, (2008): <http://klima.kvvm.hu/index.php?id:14>

Nováky B. /2007/: Az ENSZ Éghajlat-változási Kormányközi Testületének jelentése az éghajlatváltozás várható következményeiről. Klíma-21 Füzetek 50.: 6-11.

Oke T. R. /1987/: Boundary Layer Climates. 2nd Edition by Routledge in 2006, New York London. Methuen and CO LTD A halsted Press Book John Wiley and Sons. New York. 4-370.

Pachauri, R. K. – Reisinger, A. /2008)/: Climate Change 2007, Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2008.

Pap J. - Pap V. - Gergely I. /2009/: Az éghajlatváltozáshoz alkalmazkodó növénytermesztés egyik fontos eleme a vetésidő. Georgikon Napok 2009

Páldy A. – Bobvos J. (2008): A 2007 évi magyarországi hóhullámok halálozásra gyakorolt hatásai. Klíma-21 Füzetek 52.: 3-15

Páll J. - Anda A. - Hunkár M. /1998/: Különböző vízellátottságú kukoricaállományok mikroklímájának szimulációja. Acta Geographica Debrecina Tom. XXXIV. p: 41-60.

Péczely Gy. /1976/: Éghajlattan. OMSZ Hiv. kiadványa, Budapest p: 172.

Pepó P. (2005) A kukoricatermesztés fejlesztési lehetőségei. Sikeres gazdálkodás változó környezetben. Dekalb kiadvány.
[http:// www.agronaplo.hu/files/file/Sikeres%20gazdalkodás.pdf](http://www.agronaplo.hu/files/file/Sikeres%20gazdalkodas.pdf)

Pepó P. /2009/: A kukorica (*Zea mays* L.) termése és növénydőlése száraz és csapadékos évjáratban csernozjom talajon. Növénytermelés. 58. 3. 53-66

Pieczka, I. – Bartholy, J. – Pongrácz, R. – Hunyady, A. (2010): Climate Change Scenarios for Hungary Based on Numerical Simulations with a Dynamical Climate Model in Proceedings of LSSC 2009, (Eds.: Lirkov, I., Margenov, S., and Wasniewski, I.). Lecture Notes in Computer Science 5910. Springer, Berlin Heidelberg New York., 613-620

Popp J. /2010/: A GM növények gazdasági hatásai az Európai Unióban II. Zöld biotechnológia 6. évf., 2010/9

Prasad P. V. V. - Boote K. J. - Allen L. H. Jr. /2006/: Adverse high temperature effects on pollen viability, seed-set, seed yield and harvest index of grain-sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] are more severe at elevated carbon dioxide due to higher tissue temperatures. Agricultural and Forest Meteorology 139, 237-251

PRUDENCE (2005): Final Report, <http://prudence.dmi.dk>

STATA 5.0 /1996/: Stata Corporation LP Texas, USA. Available online: www.stata.com

Stieger C. J. - Goudriaan J. - Bottemanne F. A. - Birnie J. - Lengkeek J. G. - Simba L. /1977/: Experimental evaluation of a crop microclimate simulation model for Indian corn (*Zea mays*). Agric. Met. 18, 163-186.

Szalai S. - Konkolyiné Bihari Z.- Lakatos M.- Szentirmay T. /2005/: Magyarország éghajlatának néhány jellemzője 1901-től napjainkig, OMSZ kiadvány

Szász G. - Tőkei L. /1997/: Meteorológia mezőgazdáknak, kertészeknek, erdészeknek. Mezőgazda Kiadó, Budapest.

Szesztay K. - Szász G./1992/: Bolygónk véges türelme. Akadémiai Kiadó, Budapest 135

Szinay M. /2010/: Klímaváltozás és többcélú hidromelioráció. Klíma – 21 Füzetek 60.:66-73

Vad A. – Pepó P. /2009/: Agrotechnikai tényezők hatása a kukorica termésére és termésbiztonságára. V. Növénytermesztési Tudományos Nap. Növénytermesztés: Gazdálkodás-Klimaváltozás-Társadalom, Keszthely, 2009. november 19. (Szerk.:Harcza M.). Akadémiai kiadó, p. 267, 245-248. ISBN: 9789630588041

Van de Geijn S. C. - Goudriaan J. /1996/: The effects of elevated CO₂ and temperature change on transpiration and crop water use. In: Bazzaz F, Sombroek W (Eds) Global Climate Change and Agricultural Production, FAO and John Wiley & Sons, New York, pp 101-122

Van de Geijn S. C. - Goudriaan J. /1996/: The effects of elevated CO₂ and temperature change on transpiration and crop water use. In: Bazzaz F.- Sombroek W. (Eds) Global Climate Change and Agricultural Production, FAO and John Wiley & Sons, New York, p: 101-122.

Van Laar H. H. - Kremer D. - De Vit C.T. /1977/: Maize. In Crop Photosynthesis: Methods and Compilation of Data Obtained with a Mobile Field Equipment. Agric. Res. 865. Pudoc, Wageningen 12-22.

Várallyay Gy. - Farkas Cs. /2008/: A klímaváltozás várható hatásai Magyarország talajaira. Klímaváltozás: környezet – kockázat – társadalom, Kutatási eredmények. Szaktudás Kiadó Ház, Budapest

Varga-Haszonits Z. – Varga Z. /2004/: Az éghajlati változékonyság és a természetes periódusok. Agro-21 Füzetek 37.:23-32

Varga-Haszonits, Z. - Botos, L. /szerk./, /1974/: Agroklimatológia és növénytermesztés. Budapest, MÉM, OMSZ

Wilmott C. J. /1982/: Some comments on the evaluation of model performance. Bull. Am. Meteorol. Soc. 1309-1313.

AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN MEGJELENT TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

Idegen nyelvű lektorált folyóiratban megjelent cikkek

Dióssy L. / 2008/: The influence of global climate change on air and soil temperatures in maize canopy. Időjárás Vol. 112. No. 2: 125-139.

Dióssy L. /2008/: Simulation of local plant temperature in maize at Keszthely as a result of global climate modification. Georgikon for Agriculture (Multidisciplinary Journal in Agricultural Sciences) Vol. 11. No. 1: 19

Dióssy L. - Anda A. /2009/: Consequences of climate change on some maize characteristics in Hungary. Időjárás Vol.113. No.1-2 :145-156. Impact factor: 0,189

Anda A. – **Dióssy L.** /2010/: Simulation in maize-water relations: a case study for continental climate (Hungary). Ecohydrology 3, 487-496. Impact factor: 1,789

Dióssy L. - Anda A. /2008/: Energy-based approach of local influence of global climate change in maize stands. Cereal Research Communications 36. 4: 591-600. Impact factor: 1.190

Dióssy L. /2009/: The Hungarian national climate change strategy: its principles, assignments and a special case study on maize production. Environment, Development and Sustainability. 11:1135-1144 .

Magyar nyelvű előadások

Dióssy L. /2007/: A Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia küldetése – megelőzés és alkalmazkodás. „Agrárgazdaság a vidékért, a környezetért, az életminőségért” XLIX. Georgikon Napok, Keszthely, 2007. szeptember 20. Az előadás összefoglaló kötetben jelent meg. (ISBN: 978-963-9639-20-1)

Dióssy L. /2007/: Éghajlatváltozás és az emberi egészség. Környezeti Ártalmak és a Légzőrendszer. A Magyar Tüdőgyógyász Társaság Környezetvédelmi Szekciójának XVII. Országos Konferenciája Hévíz, 2007. október 17-18. Az előadás teljes terjedelemben DVD-n jelent meg (ISBN: 978-963-87327-1-2).

Dióssy L. - Anda A. /2008/: A szenzibilis és a latens hő alakulása a kukoricaállományban. IV. Magyar Földrajzi Konferencia, Debrecen, 2008. november 14-15. Az előadás összefoglaló kötetben jelent meg. (ISBN: 978-963-06-6004-4)

Dióssy L. /2008/: A globális felmelegedés hatása a növények életére. Magyar Meteorológiai Társaság. 2008. november 25.

Dióssy L. /2007/: A Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia. II. Növényorvos Nap, Budapest, 2007. november 14.

Dióssy L. /2008/: Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia. Magyarország Üzleti Tanács a Fenntartható Fejlődésért. Budapest, 2008. április 3.

Dióssy L. /2008/: Felkészülés a klímaváltozásra. Nyitóelőadás a veszprémi Klímanap alkalmából. Pannon Egyetem Veszprém, 2008. május 19.

Dióssy L. /2009/: Klímavédelem és önkormányzatok. Klímavédelem és Területfejlesztés Nemzetközi Konferencia. Keszthely 2009. június 5.

Idegen nyelvű előadások

Dióssy L.-Anda A. /2008/: Consequences of climate change on maize production in Hungary. Symposium on Climate Change and Variability – Agromet. Monitoring and Coping Strategies for Agriculture held in Norway, 3-6 June, 2008. Focus Bioforsk I. Vol. 3. No. 8: 65.

Dióssy L. /2007/: Climate Change and Global Warming ,Opening session lecture. PRES'07 8th International Conference on Chemical and Process Engineering, 10th Conference on Process Integration,Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction held in Italy , Ischia, 24-27 June , (CD ICheaP-8)

Dióssy L. /2008/: Opening speech of the Conference on Center for Climate Change and Sustainable Energy Policy, CEU Budapest, 21 April, 2008.

Idegen nyelvű poszterek

Dióssy L. - Anda A. /2008/: Simulation of stomatal resistance modifications as a result of global warming. 16th International Poster Day (CD ISBN 978-80-89139-16-3)

Anda A. - Dióssy L. /2009/: Simulated crop-water relations in maize. (poster) ESRIN, Frascati, Italy, 18-20 November, 2009