

Egyetemi doktori (PhD) értekezés tézisei

**KUKORICAÁLLOMÁNYOK ENERGETIKAI ÉS PÁROLGÁSI
VISZONYAINAK VIZSGÁLATA**

Rácz Csaba

Témavezető: Prof. dr. Szász Gábor
az MTA doktora



DEBRECENI EGYETEM
Kerpely Kálmán Doktori Iskola

Debrecen

2014

1. A DOKTORI ÉRTEKEZÉS ELŐZMÉNYEI ÉS CÉLKITŰZÉSEI

A szántóföldi növénytermesztés szempontjából hazánk egyik legjobb termőképességű tája a Hajdúhát. Kontinentális jellegű, sokszor szélsőséges csapadékjárású klímája gyakran korlátozza a termés nagyságát a vízigényes kultúrák esetében. A vízhiányt bizonyos mértékig ellensúlyozza a terület igen jó vízszolgáltató képességű csernozjomtalaja, a termésbiztonság fenntartása azonban megköveteli az öntözéses gazdálkodás folytatását.

Az öntözés nagy ráfordításigénye csak racionális vízhasználat mellett térülhet meg, ezért a precíziós technológiák mellett az öntözési döntéstámogató rendszerek fejlesztésének is kiemelt jelentősége van. Az öntözővíz szükséglet meghatározásának egyik sarokpontja a párolgás fizikai hátterének minél részletesebb feltárása, valamint becslési módszereinek megismerése, rendszerezése és értékelése.

Vizsgálataink tesztnövényeként a kukoricát választottuk jelentős vízigénye és a körzet mezőgazdasági termelésében betöltött domináns szerepe miatt. Célul tűztük ki a növény állományklímájának folyamatos, részletes mérésekkel történő alapos feltérképezését, a benne zajló, s a párolgásban kulcsfontosságú fizikai folyamatok megismerését, jellemzését. Részben az állományi mérésekre, részben pedig a Debreceni Egyetem (DE-ATK) debrecen-kismacsi Agrometeorológiai Observatóriumának adatbázisára támaszkodva kívántuk tesztelni a párolgás becslő algoritmusait, módszereit. Mérési eredményeinket statisztikai vizsgálatok, érzékenységvizsgálatok, majd komparatív analízisek útján dolgoztuk fel.

Terveinkben a gyakorlati használhatóság érdekében komplex öntözési döntéstámogatási rendszerrel történő teszt eredményeként egyrészt a különböző párolgási modellek teljesítménye is értékelhető vált, másrészt a működési sajátosságok megismerése, a fejlesztési lehetőségek felderítése révén a modell-komplexum is teszt alanya volt.

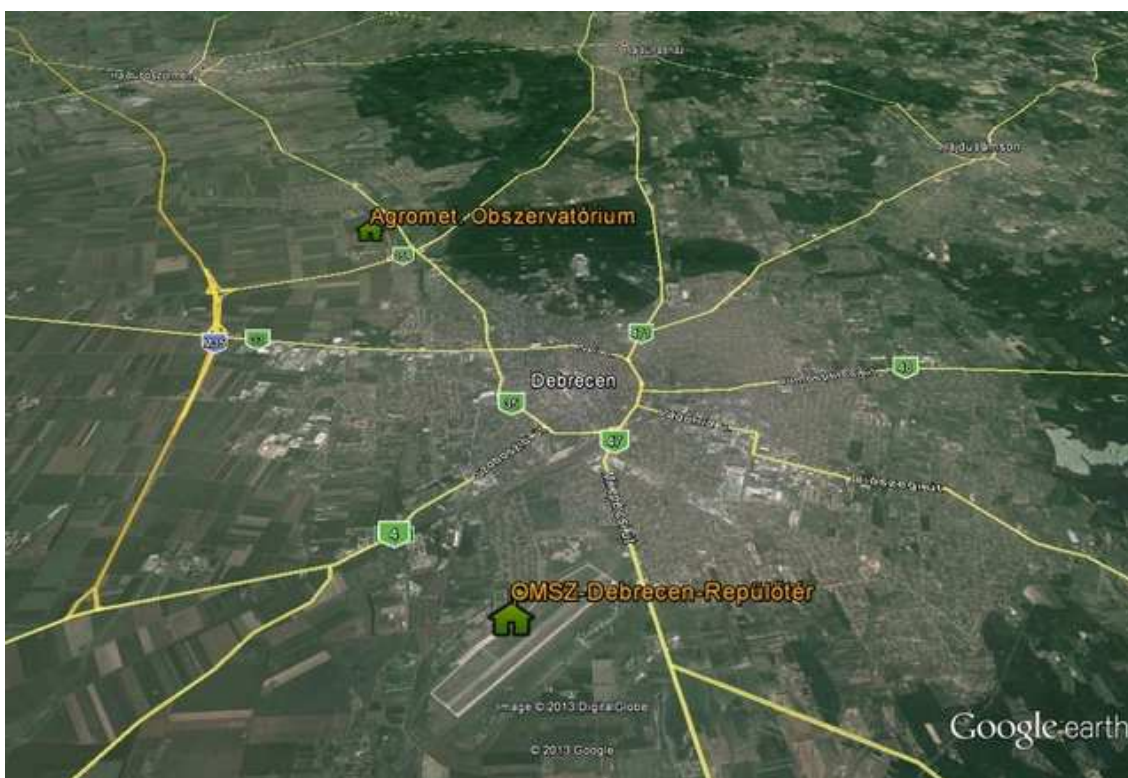
Kutatásaink főbb célkitűzései az alábbiak voltak:

- a kukorica mikroklímájával kapcsolatos ismeretanyag bővítése
- a kapcsolódó mérési feladatokhoz alacsony költségű, precíz mérőrendszer megalkotása
- a tényleges és potenciális párolgás becslő módszereinek összehasonlító értékelése
- komplex öntözési döntéstámogató rendszer működésének diagnosztikai tesztje

2. A KUTATÁS MÓDSZEREI

2.1. Klímaadatok, referenciamérések

Vizsgálataink során a potenciális párolgás becsléséhez nagy időbeli felbontású klímaadatokat két hajdúsági, kellően részletes mérési programmal rendelkező mérő- és megfigyelőállomás méréssorozata szolgáltatotta (**1. sz. ábra**). Az *Országos Meteorológiai Szolgálat Debrecen-repülőtéri* állomásának kutatási irányvonalunk szempontjából nagyon értékes kádpárolgás idősora indokolta az itt mért adatsor bevonását a vizsgálatokba. A *Debreceni Egyetem – Agrártudományi Központjának Agrometeorológiai Obszervatóriuma* egyben az OMSZ alapéghajlati mérőhálózatának kiemelt tagja. A két szervezet által 2008-ban indított közös mérési program (*Szász et al. 2011*) szolgáltatotta a vizsgálatokhoz szükséges klímaadatok legfontosabb részét.



1. ábra: A két klímaállomás elhelyezkedése (*Google Earth műhold-kompozit*)

A repülőtéri mérések közül a 2 m-es hőmérséklet, légnedvesség, a 10 m-es szél, valamint a globálisugárzás, csapadék és a kádpárolgás adatsorok 10 perces-1 napos felbontású adatsorait használtuk fel. Debrecen-Kismacs esetében az 1-2 m-es hőmérséklet és légnedvesség, 1-2-10 m-es szél, a teljes sugárzási mérleg és a csapadék adatsoraira volt szükség állományklíma méréseink referenciájaként.

2.2. Állományklíma mérések

A növényállományok tényleges párolgásának számszerű becslése, illetve a látens- és szenzibilis hőáramok értékeinek és változásainak jellemzése céljából szükséges volt a növényállományok légterének alapvető paramétereinek meghatározása. A talaj-növény-légkör rendszer hő és vízháztartásának részletes feltérképezésére több szintből nyertünk adatokat az állomány légteréből és a gyökértérből. A mérési pontot úgy választottuk meg, hogy a klíma- és állománymérések összehasonlíthatók legyenek. A mérésekre kiválasztott kukoricaállomány a Nemzeti Élelmiszer-biztonsági Hivatal Növénytermesztési és Kertészeti Igazgatóságának Növényfajtakísérleti Állomása kezelésében lévő területen helyezkedett el, az Agrometeorológiai Observatórium közvetlen közelében. A mérési pontokat az egyes kísérleti években az obszervatóriumtól 200-250 m távolságra jelöltük ki. A mérés 2010 és 2011 évek július-szeptember időszakában történt mindenekelőtt a kifejlett kukoricaállományokat jellemző paraméterek megismerése érdekében.

A kukoricaállományokban végzett mérési program három fő részből épült fel:

Talajnedvesség-mérések

A kísérleti helyszín talajának nedvességtartalmát gravimetriás módszerrel (Filep 1999) határoztuk meg 1 m-es mélységig, 10 cm-es rétegenként, átlagosan 8 naponként. A mintaterület 1 m mélységű talajszelvényének korábbi (2008-as) vizsgálatai alapján a következő vízkapacitási értékeket tekintettük érvényesnek:

Szántóföldi vízkapacitás (FC):	292 mm m ⁻¹
Holtvíz tartalom (HV):	126 mm m ⁻¹
Diszponibilis víztartalom (DV):	166 mm m ⁻¹

A 8 naponként vett rétegenkénti vízkészlet adatokat a FAO (Allen et al. 1998) módszere nyomán kidolgozott öntözési modell segítségével interpoláltuk napi adatsorrá.

Hőmérsékleti és nedvességi viszonyok mérése az állományban

A növényállomány légterének hőmérsékleti és nedvességi profilját a legoptimálisabb felbontásban mértük. A mérések a két kiválasztott tenyésztés, 2010 és 2011 júliusától kezdődtek meg, és folyamatos üzemben, 3 hónapos időtartamban zajlottak 1 perces lépésközzel. A mérőrendszert egy adott összefüggő növényállomány középső részén

rögzítettük a szegélyhatás minimalizálása érdekében. A keveredési úthossz bármely irányban minimum 25-30 m volt.

Növényfenológiai mérések, megfigyelések

A vizsgált időszakokban 10-12 naponta végeztünk fenológiai méréseket, megfigyeléseket. Az aktív levélfelületi index a LAI [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$] számításához az élő (zöld) levelek számát, hosszát, szélességét mértük, majd a Montgomery – képletet alkalmaztuk.

A növekedési függvény kiszámításához mértük a teljes növénymagasságot a maximális érték eléréséig. A növénymagasság adatok és a levélfelületi index napi adatsorrá történő interpolációjához aszimptotikus függvényekkel végeztünk nem-lineáris regressziót (*Berzsenyi 2000, Szász 1988*). A logisztikus függvény, a Gompertz-, valamint a Richards-függvény közül a növényfejlődési folyamatok minden egyes növekvő vagy csökkenő szakaszához legjobb illeszkedést adó, szükség esetén transzformált függvényváltozatokat választottuk ki.

2.3. A potenciális evapotranspiráció (referenciapárolgás) becslésének módszerei

A potenciális párolgás meghatározásának módszerei közül összesen 10-et választottunk ki összehasonlító statisztikai elemzés és érzékenységvizsgálat céljára. Az analízist két lépcsőben végeztük. Először a repülőtéri adatsort inputként használva teszteltük a módszerek mindegyikét, így lehetőség nyílt a kádpárolgási adatokra (a továbbiakban „A-kád”) épülő modellek bevonására is. A továbbiakban mindössze három modellre szűkítve folytattuk a vizsgálatokat a Debrecen-kismacsi adatsorokon. A vizsgált módszerek az alábbiak voltak:

Kádpárolgás-alapú módszerek:

Pereira modell: (*Pereira et al. 1995*) (Per)

FAO-56 modell: (*Allen et al. 1998*) (FAO56)

Empirikus, hőmérséklet-alapú módszerek:

Blaney–Criddle-m.: (*Blaney–Criddle 1950, Doorenbos–Pruitt 1977a, Burman–Pochop 1994*) (B&C)

Szász-módszer: (*Szász 1973*) (Szász)

Empirikus, sugárzás-alapú módszerek:

Makkink–FAO-24: (*Makkink, 1957, Doorenbos–Pruitt 1977b*) (Mak)

Priestley–Taylor modell: (*Priestley–Taylor 1972, McNaughton – Jarvis 1983*) (P&T)

Tömegáram-alapú módszerek:

WMO-1966: (WMO 1966) (WMO66)

Mahringer-modell: (Mahringer 1970) (Mah)

Kombinált módszerek:

Penman–Monteith–FAO-56 modell: (Allen et al. 1998) (PMF56)

Shuttleworth–Wallace modell: (Shuttleworth–Wallace 1985) (S&W)

2.4. A tényleges párolgás becslésének módszerei

A FAO vízforgalmi modellje – kettős növényállomány-koefficienssel

A talaj vízkészlet változásának modellezését a FAO által kidolgozott vízháztartási és növényi vízigény-becslő modell (Allen et al. 1998) összefüggéseire támaszkodva végeztük. A számítások napi időlépcsőben történtek. A modellezés alapösszefüggése:

$$ET_{c,adj} = (K_s \cdot K_{cb} + K_e) \cdot ET_0, \text{ ahol}$$

$ET_{c,adj}$: az állomány tényleges evapotranspirációja, K_{cb} : növényállományi-együttható, K_e : talajpárolgás-koefficiens, K_s : transpirációs-redukciós (stressz-) koefficiens

A tényleges párolgás becslése Bowen-arány módszerrel

A növényállomány által ténylegesen elpárologtatott vízmennyiség meghatározási módszerének alapja a terület energiaforgalmának számszerűsítése adott növényállomány energiaegyenlegével:

$$R_n = \lambda E + H + G \pm A, \text{ ahol}$$

R_n : az állomány felett mérhető sugárzási egyenleg, λE : a látens hőáram, H : a szenzibilis hőáram, G : a talajhőáram, A : az advekciós hatások összege

A látens- és szenzibilis hőáramok kiszámításához a Bowen-arány módszert használtuk (Bowen 1926). A Bowen-arány (β) két szint (esetünkben mindkét vizsgált időszakban $z_1=2,50$ és $z_2=3,00$ m) közötti hőmérsékleti- és párányomás gradiens hányadosaként értelmezhető. A vizsgálat során 1 perces átlagadatok alapján számítottuk a gradienseket és a β -t. A fals β -értékek kiszűrését követően órás időlépcsőre váltva a látens hőáramokat különítettük el, majd a víz párolgáshőjével osztva a tényleges evapotranspirációt ($ET_{c,BR}$) határoztuk meg.

3. AZ ÉRTEKEZÉS FŐBB MEGÁLLAPÍTÁSAI

3.1. Egyedi mikroklíma-mérőrendszer építése, fejlesztése

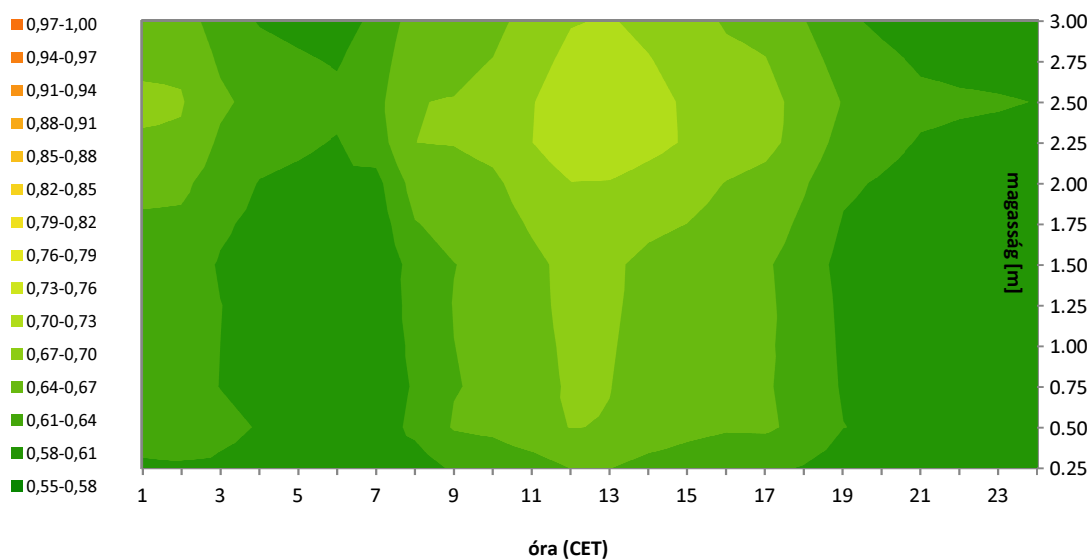
Egyedi mérőrendszert építettünk állományi mikroklíma mérések céljára, melyet automatizáltság, mobilitás és sokoldalú felhasználhatóság jellemez. A fejlesztésnek fontos részét képezte az adatgyűjtő egységek tesztje, normalizálása és teljes körű, helyi kalibrációja.

A mérőrendszert folyamatos mérésre terveztük és egy átlagos, 2-2,5 m magasságú kukoricaállományra és az afeletti térrészre méreteztük. Ehhez összesen 16 db árnyékolt *Volcraft DL-120 TH* típusú, mobil adatgyűjtő készüléket használtunk. Független, fém tartóállványon 3,0 m-es magasságig, 0,25 m-es lépésközzel egyszerre 12 mérőegységet állítottunk be. A kutatási célokhoz igazodva a szenzorok pontosságát kereszt-kalibrációval teszteltük, majd azokat normalizáltuk. A tesztek célja mindenekelőtt az adatgyűjtők összehasonlítása, a tényleges pontosság meghatározása, valamint a bázisállomás mérési programjával történő megfeleltetés volt. A mérőeszközöket az Observatórium megfelelő, hitelesített műszereihez kalibráltuk.

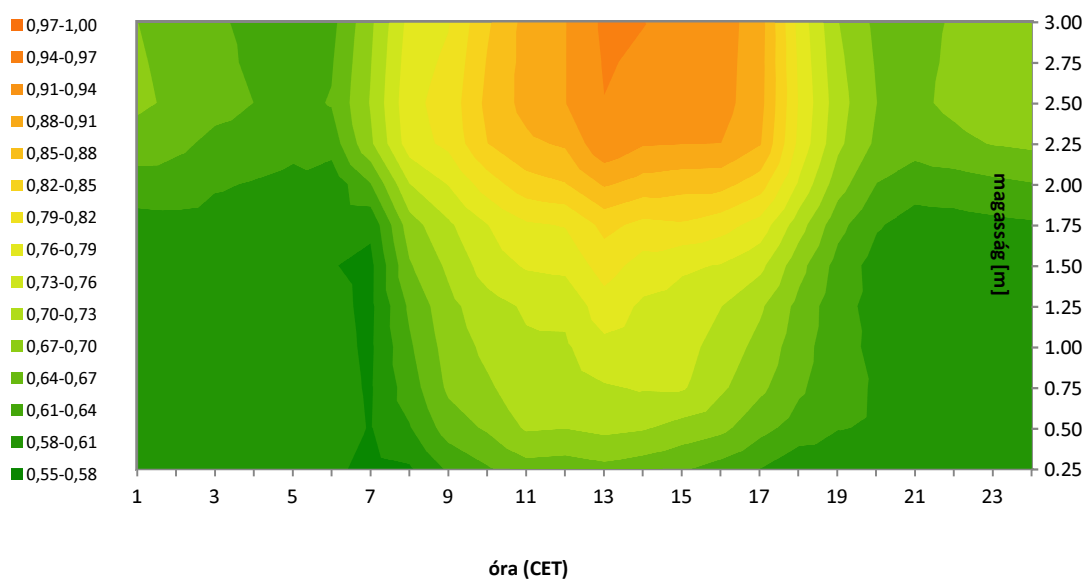
3.2. A kukoricaállományok mikroklímája és energetikai viszonyai – a tényleges párolgás meghatározása

Részletesen vizsgáltuk a *látens és szenzibilis hőenergia vertikális állományprofilját*, valamint napi menetét is a különböző párolgási karakterű időjárási epizódokban. A látens hő nagysága arányos a levegőben jelen lévő nedvességgel, a két mennyiség aránya és gradiense pedig az állománytér kiszáradásának mértékére utal.

Megállapítottuk, hogy a látens hő maximuma a nap folyamán 1-2 órával korábbi időpontban következik be a hőmérsékleti maximumnál. Mérsékelt párolgású ($ET_0=2,0-2,4$ mm) napon (2011.07.29, **2. sz. ábra**) a nappali órák visszafogott felmelegedésével párhuzamosan kismértékű relatív „kiszáradás” figyelhető meg (λE részarányának csökkenése a teljes energiaegyenlegen belül), mely maximuma idején közvetlenül az állományfelszín felett legerőteljesebb, s gyengülve lehatol a talajszintig.



2. ábra: Az állomány látens és szenzibilis hőviszonyai gyenge párolgású, szélcsendes napon (2011.07.29)



3. ábra: A látens és szenzibilis hő aránya intenzív párolgású, gyengén szeles napon (2011.07.14)

Az intenzív párolgású epizódra erőteljes besugárzás és nappali felmelegedés jellemző, mely esetenként advektív hatásokkal is párosul. A látens hő maximuma 2011.07.14-én ($ET_0=4,6-6,8$ mm), jelentősebb advekciótól mentes helyzetben (3. sz. ábra) egyértelműen a talajfelszín közelében volt, ami kiszáradási folyamatra utal az állománytérben. A $H/\lambda E$ arány meredek gradiense ugyancsak jól jellemezte az állomány kiszáradási folyamatát. A déli órákban a talaj közelében is 0,7 közelébe emelkedett az arány, az állomány felszíni határrétegén elérte a 0,9-et, ennél magasabban pedig az 1,0 értéket is megközelítette.

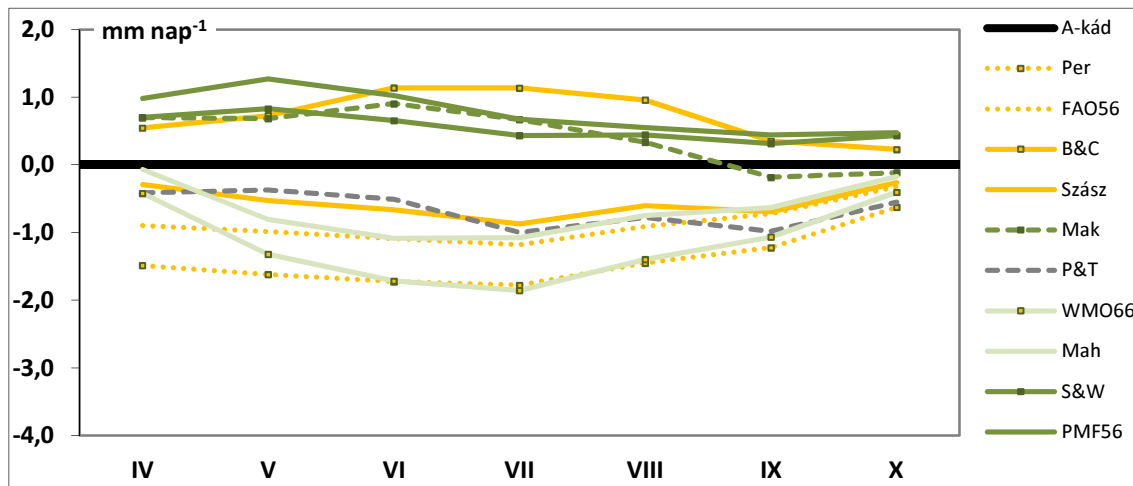
A látens hő – melynek nagysága végeredményben arányos az állomány tényleges párolgásával – elsődleges forrása a napsugárzás, szűkebb értelemben a sugárzási egyenleg (R_n) és a talajhőáram (G) különbsége. Vizsgáltuk a párolgásra fordítható energia (R_n-G) sugárzásmennyiség és a látens hő nagysága közötti összefüggést. Eredményeink igazolták, hogy a λE nagysága szoros, lineáris kapcsolatot mutat R_n-G -vel. A determinációs együtthatók alapján a vizsgálati periódus száraz időszakában az R_n-G energiamennyiség $\approx 98\%$ -ban, míg nedves, bő vízellátottságú epizódokban akár $\approx 99\%$ -ban is meghatározhatja a látens energia nagyságát az állományban. Ebből következően a párolgásnak legalább 98% -ban a sugárzási egyenleg és a talajhőáramok különbsége meghatározó, a fennmaradó cca. 2% reprezentálta az advekciós hatásokat.

A kukoricaállomány által *ténylegesen elpárologtatott víz mennyiségét* a Bowen-arány módszerrel modelleztük 2010 és 2011. július-szeptember időszakára. 2010-ben az átlagos β -érték $0,041$ volt, szórása azonban igen nagy, $0,118$, variációs koefficiense $288,8\%$. A 2011-es vizsgált időszakban jóval kiegyenlítettebben alakult, akkor $0,025$ -ös átlag mellett $0,041$ volt az értékek szórása, variációs koefficiense pedig $164,0\%$.

3.3. Párolgási modellek statisztikai vizsgálata, érzékenységvizsgálata, validálása

A referenciapárolgás numerikus becslésére szolgáló modellek közül 10 algoritmus komplex statisztikai vizsgálatát, érzékenységvizsgálatát végeztük el helyi adatsorokra támaszkodva. Az eredmények alapján, valamint öntözési döntéstámogató modell almodelljeként használva szelektáltuk a módszereket, közülük kiválasztottuk a helyi körülmények között legjobb eredményt adókat, és a helyi viszonyok között legjobban alkalmazhatókat.

A *repülőtéri adatsorokon* végzett analízisek alapján megállapítottuk, hogy az összegszerű értékelés nagyon érzékeny a modellek nyilvánvaló szisztematikus eredménybeli különbségeire (**4. sz. ábra**), egy tenyészidő alatt több száz mm eltérés is akumulálódhat.



4. ábra: A modellkimenetek átlagos eltérése a mért kádpárolgástól a kukorica tenyésztése alatt (2005-2010.)

Bizonyítottuk, hogy viszonylag stabil, ám közel sem állandó eltérések mutatkoztak modellek között, a kapcsolat a modell kimenetek között nem lineáris. A viszonyítási alaphoz képest a különbségek időbeli menete néhány modellenél szorosan korrelál a vizsgált vegetációs időszakok csapadékösszegeivel. Az algoritmusok többsége a késő tavaszi, nyári időszakban tér el jobban a káddal mért értékektől. Ősszel már jóval kisebb a különbség az eredményekben, s ez a párolgás alacsonyabb évszakos értékének következménye.

A Pearson-féle korrelációs együttható alapján a legszorosabb kapcsolat ennek megfelelően a kád evaporáció és a kád-alapú modellek között áll fenn, mivel ezeknél csupán a kádmérés „korrekciója” valósul meg. A leglazább kapcsolatot a tömegáram alapú algoritmusok eredményei mutatták a kádmérésekkel szemben, miközben a sugárzás-alapú módszerekkel is kevésbé szorosan korrelálnak. A kádpárolgáshoz képest legkisebb szisztematikus hibát a Makkink és a S&W modell mutatta. A PMF56 modellhez viszonyítva a B&C és a Makkink-modell értékei azonosnak tekinthetők, míg a S&W módszer mind szisztematikus hibáját, mind szórásmutatóit tekintve nagyon közeli eredményt ad az etalonhoz.

Összességében a Blaney-Cridde, Penman-Monteith-FAO-56, Shuttleworth-Wallace és a Makkink módszer adta a legnagyobb összegeket, a Pereira, FAO-56, WMO-1966 és a Mahringer modell pedig a legkisebbeket. A modellek kimeneteinek időszaki dinamikája alapján jellemző volt a tömegáram alapú modellek (WMO-1966, Mahringer) eltérő, rendkívül érzékeny viselkedése, valamint a Pereira, FAO-56, Szász, Makkink, Priestley-Taylor számottevő érzékenysége a csapadékösszegekre. A sugárzás alapú modellek többnyire kis szóródással magas átlagos ET_0 értékűek voltak, de a szél és légnedvesség állapotot meghatározókat nagy súllyal hordozók szórásintervalluma szélesnek bizonyult, még viszonylag alacsony ET_0 -

szinteken is. A modelleredmények közötti korrelációk alapján a kádpárolgás mérésekhez legjobban a Pereira és FAO-56, a Penman-Monteith-FAO-56-hoz a Shuttleworth-Wallace modell változatai igazodtak, a modellek legtöbbjével pedig a Szász és a Priestley-Taylor módszer korrelált szorosabban. Szisztematikus hiba tekintetében a kádpárolgáshoz legközelebb a Makkink és Shuttleworth-Wallace, a Penman-Monteith-hez pedig ugyancsak a Shuttleworth-Wallace, valamint a Blaney-Criddle és a Makkink-modell állt. Az érzékenységvizsgálatok során elkülönítettünk két fő csoportot; stabil és robusztus modellnek tekinthetjük a Szász, Makkink, Priestley-Taylor és Penman-Monteith-FAO-56, míg igen érzékeny módszernek a WMO-1966, Mahringer valamint Pereira modelleket.

Debrecen-Kismacs adatsorát inputként alkalmazva három modell közül a kombinált (Penman-Monteith-FAO-56) típusra magasabb értékek jellemzők, míg a Priestley-Taylor és a Szász-módszerre ennél jelentősen (átlagosan 20 illetve 30 %-kal) alacsonyabbak. A modellkimeneteket vizsgáltuk az alapvető statisztikai mutatók alapján is, a teljes adatsor napi értékeire vonatkoztatva. Megállapítottuk, hogy a legnagyobb szóródás a PMF56 modellt jellemzi, ennél fogva a szórás is e modellnél legnagyobb. Ugyanezek az értékek a Szász-módszernél legkisebbek, ebben az összehasonlításban tehát a három közül ez a modell a leginkább robusztus. A variációs koefficiens (CV) ezzel szemben a Szász módszernél legnagyobb, a P&T-nél pedig a legkisebb (**1. sz. táblázat**).

1. táblázat: Leíró statisztikai mutatók alakulása a vizsgált modellekre (2008-2011, V-X.)

<i>mm nap⁻¹</i>	PMF56	P&T	Szász
Max.	10,72	7,89	6,74
Min.	0,20	0,29	0,07
Átlag	4,50	3,54	3,19
R.	10,52	7,61	6,67
St.D.	2,10	1,63	1,50
CV	46,7	46,0	47,1
Var.	4,40	2,65	2,25

Max.: abszolút maximum, **Min.:** abszolút minimum, **Átlag:** középérték, **R.:** teljes szóródás intervalluma, **St.D.:** szórás, **CV(%):** variációs koefficiens, **Var.:** variancia, **n** (esetszám)=704

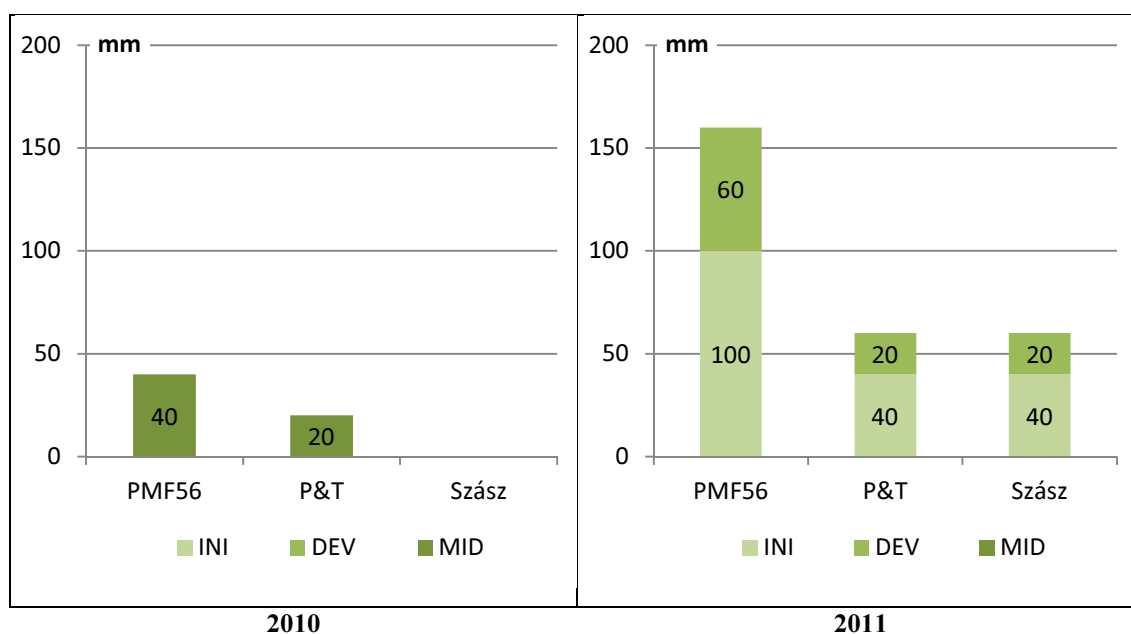
Érzékenység tekintetében, ugyancsak a kismacsi adatsor alapján, minden vizsgált légköri paraméter változtatására hasonlóan reagált a három modell. A kimenetekre a legnagyobb hatást a hőmérséklet, a légnedvesség és a globálsugárzás nagysága gyakorolta, míg a szélre kevésbé bizonyultak érzékenynek a vizsgált módszerek.

3.4. Párolgási adatok hasznosítása öntözési döntéstámogató rendszerben – a tényleges párolgás meghatározása, rendszer-diagnosztikai tesztek

A modell által referenciapárolgásból kalkulált tényleges állományi párolgást mért adatok alapján becsült, más módszertípussal számított tényleges párolgásértékekkel verifikáltuk több változatban. Vizsgálatainkban – gyakorlati vonatkozása miatt – az állománynak a modell által becsült tényleges párolgását ($ET_{c,FAO}$) értékeltük elsősorban.

A tényleges párolgási adatokat tekintve megállapítottuk, hogy a referenciapárolgás volumenéhez képest 2010-ben átlagosan rendre 90,3%, 92,7% és 98%, 2011-ben pedig 58,2%, 68,4% és 67,7 %-kal volt alacsonyabb, sorrendben a PMF56, P&T és a Szász módszert véve. A három ET_0 és $ET_{c,FAO}$ változat *átlagának* időbeli alakulása alapján elmondható, hogy a tényleges párolgás több ízben, különösen 2011-ben haladta meg a potenciális párolgást. A két párolgási paraméter kapcsolatának determinációs együtthatója rendre a P&T és a Szász-változatoknál mutat szorosabb összefüggést.

A gyakorlati alkalmazás szempontjából lényeges, hogy mekkora öntözővíz igénynek felelnek meg a párolgási algoritmusok kimenetei. A FAO vízforgalmi (öntözési) modell segítségével minimum 8, maximum napi 20 mm-es adagok kijuttathatóságát feltételezve becsültük a kismacsi terület kukoricaállományának öntözési igényét (**5. sz. ábra**).



5. ábra: A szimulált öntözővíz igény tenyészedi összege fejlődési szakaszonként

A 2010-es évjáratban felmerülő öntözési szükséglet 0-40 mm között változott, 0-2 alkalommal történt öntözés a vegetáció középszakaszában (MID-szakasz). 2011-ben ugyanez 60-160 mm-t tett ki, s már mindhárom modellnél jelentkezett öntözési szükséglet. A különbségek jelentősek, a P&T és Szász kevesebb, mint 40%-át jelezte a PMF56 által számolt igénynek. Mindhárom változatban közös, hogy csak a kezdeti (INI) és a fejlődési (DEV) szakaszban volt öntözési szükséglet, a július végi csapadéknak köszönhetően a közép (MID) szakaszban nem.

Modell verifikáció mért talajnedvesség értékekkel:

A tényleges evapotranspiráció és az öntözővíz szükséglet ellenőrzését gravimetriás talajnedvesség mérések adataira támaszkodva végeztük. Első szakaszban a mért, átlagosan 8 naponkénti talajnedvesség idősorokat napi léptékre interpoláltuk. Az interpolációra a FAO modellnek különböző párolgási almodelljeit alkalmaztuk, a teszt során vizsgáltuk a 8 napos időtávok alatt a modellezett talajnedvesség készletben kumulálódó többletet, vagy hiányt.

2010-ben a PMF56, 2011-ben pedig a Szász modellváltozat közelítette legjobban a mért talajnedvesség-adatpontjait. A hiba nagysága 20 (2010) és 13 (2011) esetszám mellett, nem tekinthető a további vizsgálatokat meghamisítóan nagyoknak. Az eredmények alapján a vizsgálatok további részében, mért napi talajnedvesség-idősorként 2010-re a PMF56, 2011-re pedig a Szász-modellváltozattal interpolált adatsorokat fogadtuk el és használtuk.

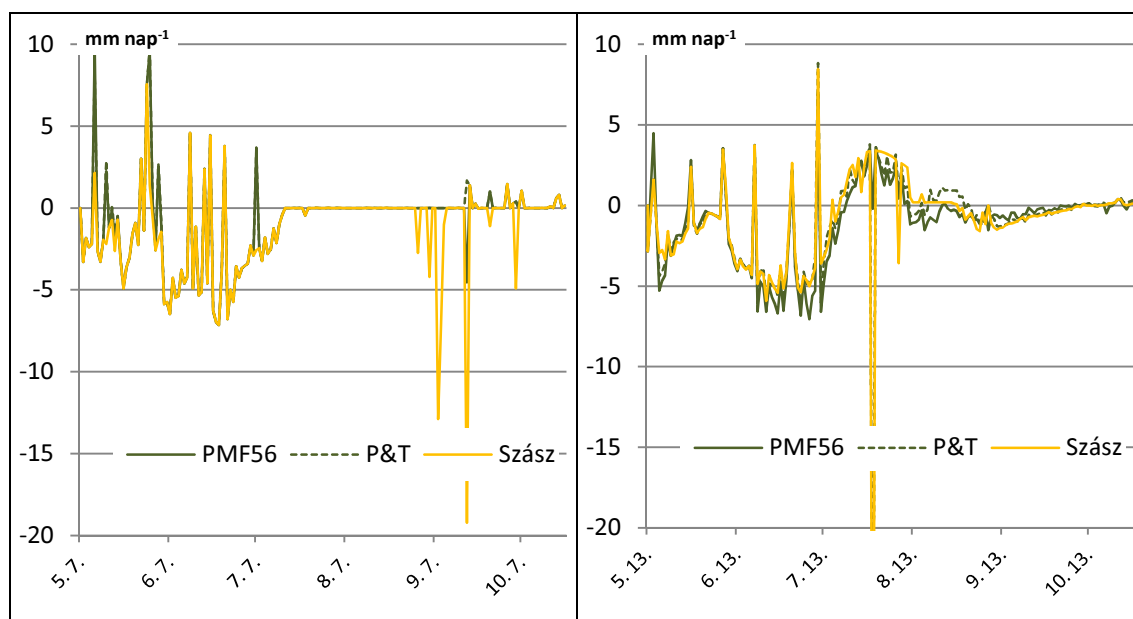
A 2010-es tenyészidőszakban két változat mutatott viszonylag kis eltérést a mért talajnedvességgel összehasonlítva. A kezdeti (INI) és a fejlődési (DEV) szakaszban ugyan mindhárom változat output adatai a mért értékhez képest kisebbek voltak, a MID szakasztól viszont a PMF56 és a P&T közel megegyezett azzal, míg a Szász-változat egyre jelentősebb mértékben tért el pozitív irányba. A fölülbecslés a tenyészidőszak utó- (LATE) szakaszának kezdetére elérte a 70 mm-t. A két előbbi modell nagyobb párolgás értéke ebben az időszakban hozzávetőleg egyenlő volt a mérhető vízkészlet veszteséggel, míg a Szász-változat kisebb párolgása fokozatosan pozitív irányba tolt el az egyenleg értékét. A 2011-es vegetáció kezdeti szakaszáig mindhárom modell ugyancsak negatív előjelű becslési hibával számolt. A tenyészidőszak további szakaszaira a modellváltozatok mind túlbecsülték a gyökérszóna diszponibilis vízkészletét.

A FAO öntözési döntéstámogató modell által részben vagy egészen hibásan generált bevétel- és veszteségszámításokat szívesen átvizeltük, meghatároztuk a leszivárgással (DP) és a kapilláris vízelvezéssel (CR) kapcsolatos hibákat.

Megállapítottuk, hogy ha a sekély gyökérszónában a DV értéke 0, a napi párolgás értékét *virtuális* kapilláris vízelvezésből fedezi a modell. Ez a CR 0-nak vétele miatt jelenik meg, és habár a modellben a fellépése irreális, a valós vízforgalom során természetes folyamatot takar. Mennyisége ugyanakkor minimális, vegetációs összegben mindössze 2,7-3,3 mm, mivel az evapotranspiráció ilyenkor gátolt. A csapadékos 2010-es évjáratban fordult elő, hogy a gyökérszóna telítődése után az aktuális P_i csapadék fennmaradó részét – vagy a napi párolgástól függően teljes mennyiségét – a modell a mélybe leszivárgó mennyiségként definiálta. 2011-ben kevés alkalomra volt jellemző ugyanez, többek között az intenzív csapadéku időszakot követő július 30-i felhőszerkezet (50 mm<) napján, s akkor sem minden modell esetében egyforma volumenben. *Virtuális vízelvezésre* kizárólag 2011-ben volt példa, amikor május 26. és június 6. között változattól függően 6-8 napon becsülte a modell 0 mm-re az akkor még sekély gyökérszóna felvehető vízmennyiségét.

A modellváltozatok által szimulált diszponibilis vízkészlet napi változásai során kalkulálható a gyökérszóna leszivárgásos (gravitációs) veszteségének (DP) és nem talajvíz eredetű (potenciálgradiens menti) kapilláris vízelvezésének (CR) összege, eredője (a továbbiakban – DP+CR). Összehasonlítottuk a csapadékból származó bevétel és a párolgás okozta veszteség összegét a mért DV napi változásával (ΔDV). Mindkét tényezőidőszak első harmadában (INI+DEV kezdeti szakasza), amíg a vizsgált szelvény mélysége viszonylag kicsi, jelentős nagyságúnak bizonyult a tényleges víztranszfer a mélyebb rétegek felől. Nagysága a gyökérmélység növekedésével egyre csökkent, összege 170 (2011)-185 (2010) mm-t tett ki. Napi mértéke akár az 5-7 mm-t is elérte, ami ugyanezen napok tényleges párolgásához viszonyítva 75-95 %-nak felel meg átlagosan.

A modellváltozatok vízkészleteire ugyancsak kiszámítottuk a nyereség- és veszteségtételek eredőjét ($-DP+CR$), majd összevetettük a mért talajnedvességgel számolt „kontrollal”. A két érték különbségét ($\Delta DP+CR$) mutatja be a **6. sz. ábra**.



6. ábra: A modellezett és a mért diszponibilis víz alapján számított Δ DPCR értékek eltérése (2010 és 2011)

A modellezett értékek a korábban bemutatott tapasztalatoknak megfelelően elsősorban az INI és a DEV szakaszban mutatnak nagyobb különbséget a mért adatsorral szemben. A modellváltozataink csupán egyfajta „virtuális vízemeléssel” számoltak, mely a CR nullának vételéből származott, a valós adatok alapján azonban határozottan kimutatható volt ez a tétel. Az ábrán a modell és a mért sor közötti különbség negatív előjellel jelent meg.

Modell verifikáció a Bowen-arány módszerrel számolt párolgás értékekkel:

A tényleges párolgás modellezett értékeit ($ET_{c,FAO}$) összevetettük a Bowen-arány módszerrel ($ET_{c,BR}$) becsült mindkét év július-augusztusi idősorára. 2010-ben az $ET_{c,FAO}$ változatok kisebb párolgást becsültek a kontrollnál, különösen a július végi-augusztus eleji szakaszban. Az értékek alapján a Szász módszer hibája volt a legnagyobb, míg a másik két változat jobban közelítette a kontrollt. 2011-ben hasonlóan nagymértékű szisztematikus eltérés nem volt jellemző, a modellezett párolgás értékek hasonlóak voltak a kontroll adatsorhoz, és többnyire a ± 1 mm-es tartományon belül mozogtak. A PMF56 viszont számos esetben (az eleve intenzívebb párolgású napokon) becsült magasan a többi változat és a Bowen-arány módszer fölé. Az alacsonyabb szórás miatt a P&T a teljes vizsgált időszakra számolt abszolút hibájának összege a legalacsonyabb, ugyanakkor a teljes időszak összegzett hibája – az előjeleket is figyelembe véve – a Szász esetében volt a legkisebb. Megállapítottuk, hogy 62 nap alatt a Szász-változat alig 2 mm-rel tért csak el a kontrolltól, míg a legkisebb szórású P&T hibája ennél jelentősen magasabb volt.

Összegezve a vizsgálat tapasztalatait a kísérleti időszak 2010-es hónapjaiban a P&T és a PMF56 változat tért el kevésbé a kontrollnak választott Bowen-arány módszerrel becsült ET_c adatsortól. A kontrollhoz nagyon hasonló szórású P&T azzal mindkét évben jó korrelációt mutatott, de a 2011-es évben a Szász csekély hibája nagyobb szórása ellenére is érvényre jutott. A PMF56 rendre a legmagasabb, a Szász a legalacsonyabb párolgás értékeket becsülte, miközben a P&T kisebb ingadozás mellett a két érték közötti eredményt adott. A 2011-es periódus eredményeit tekintve a P&T és a Szász-modellváltozatokat emeltük ki. E kettő közül a nagyobb szórása ellenére mutatott igen alacsony hibája alapján a Szász változat teljesítményét értékeltük a választott kontroll módszer által megerősítettnek.

A referenciapárolgás és az állomány párolgásának arányát kifejező növényállomány-koefficienseket a Bowen-arány módszerrel becsült ET_c értékekre is kiszámítottuk. A K_c állomány koefficiens a *tényleges párolgás* és a *referenciapárolgás* hányadosaként írható fel. A kettős-koefficiens módszerben értéke a K_{cb} (transpirációs) és K_e (evaporációs koefficiens összegével egyezik meg. A K_c -t alkotó két rész-koefficiens értékei alapján megállapítottuk, hogy az állomány transpirációját jellemző, a K_s hatását is magában hordozó K_{cb} szórása, variációs koefficiense általában is, de különösen 2011-ben igen magas. A jóval kisebb, mindössze 0,2 körüli nagyságrendet képviselő K_e ingadozása ettől minimálisan marad el, mivel az állományt jellemző paraméterek nagy hatást gyakoroltak a talaj felszínéről induló evaporációs folyamatokra. A Bowen-arány módszerrel meghatározott párolgás alapján számolt koefficienseket összevetettük a FAO modell által használt értékekkel..

4. ÚJ ÉS ÚJSZERŰ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Olyan mobil mérőrendszert terveztünk, amely lehetővé teszi az állományon belüli hőeloszlás, valamint a szenzibilis- és látens hőáramok részletes jellemzését gyenge és intenzív párolgású időjárási helyzetben. A mérőrendszer segítségével képzett adatbázisból a Bowen-arány módszerrel becsültük az állomány tényleges párolgását.

2. Összesen 10, a potenciális párolgást becsülő eljárás statisztikai elemzése és érzékenységvizsgálata alapján meghatároztuk azokat az eljárásokat, melyek a debreceni kádpárolgási adatokkal a legjobb összefüggést mutatták és kiválasztottuk azokat a modelleket, amelyek a legkevésbé voltak érzékenyek a bemenő paraméterek változására. Igazoltuk, hogy a modellkimenetekre a legnagyobb hatást a hőmérséklet, a légnedvesség és a globálsugárzás nagysága gyakorolta. Végeredményben egy összetett eljárást dolgoztunk ki a Hajdúhát területén eredményesen alkalmazható potenciális evapotranspirációt számító modellek kiválasztására.

3. A FAO öntözési döntéstámogatási algoritmus alapján 3 eljárással modelleztük a kukoricaállományok tényleges párolgását két különböző vízgazdálkodású év tenyészidőszakában. A modellek teljesítményét a kismacsi kukoricaállomány öntözővíz-szükségletének számszerűsítése alapján értékeltük 2010 és 2011 évre. A kapott eredményeket mért gravimetriás talajnedvesség mérések adataival verifikáltuk. A két eltérő vízgazdálkodású évben más-más modell alkalmazását találtuk megfelelőnek.

4. Meghatároztuk a kukoricaállományok teljes vízegyenlegét, számszerűsítettük a FAO öntözési döntéstámogató modell hibásan generált bevétel- és veszteségoldali tételeit, körvonalaztuk a leszivárgással és a kapilláris vízemeléssel kapcsolatos hibákat.

5. Összehasonlítottuk a tényleges párolgás modellezett értékeit a Bowen-arány módszerrel becsült tényleges párolgással. 2010-ben a Priestley-Taylor és Penman-Monteith-FAO-56 modellt, míg 2011 évben a Priestley-Taylor és Szász modellváltozatot találtuk elfogadhatónak.

6. Kiszámítottuk FAO modell által, valamint a Bowen-arány módszerrel becsült, a referencia- és a tényleges párolgás hányadosaként felírható növényi konstansokat, bemutattuk azok leíró statisztikáit és tenyészidőszakban történő változását.

5. AZ EREDMÉNYEK GYAKORLATI HASZNOSÍTHATÓSÁGA

- A kifejezetten állományklíma-mérésekre kialakított mérőrendszerrel nagy részletességgel mérhetők az állomány klímáparaméterei. A növényállományok klímájának leíró kutatása mellett azok tényleges párolgásának kiszámításához is megfelelő adatbázis nyerhető. A kalibrált adatgyűjtők együttese függőleges profilmérések mellett vízszintes, pl. szegélyhatás, oázishatás vizsgálatokra is alkalmas. A rendszer a kukorica mellett számos egyéb állománytípusra biztosít egyszerű és megbízható adatgyűjtési lehetőséget.
- Kukoricaállományban végzett méréseinket elsősorban a látens és szenzibilis hő gradienseinek jellemzése céljából végeztük. Az adatok alapján újabb megközelítéssel nyílt mód az állományok tényleges evapotranspirációjának kiszámítására. A számos egyéb módszer bizonytalanságát tekintetbe véve ez egyfelől referenciaként szolgál a modell validációs feladatok során, másrészt pedig kis inputigényű alternatívát is jelent a párolgás becslését igénylő modellrendszerek, kutatások számára.
- A potenciális párolgás becslő módszereinek széles körű, a Hajdúhát környezeti adottságai között végzett tesztjével háttér információt szolgáltatunk olyan alkalmazások számára, melyekben a párolgás inputként funkcionál. Ennek becslésére nagyszámú, változatos fizikai megközelítésű módszer áll rendelkezésre. A témával foglalkozó szakirodalom alapelveként tekinti, hogy a párolgás számítására szolgáló algoritmusok kiválasztásakor elsősorban a helyi tesztek eredményeire célszerű támaszkodni.
- Az öntözés döntéstámogató rendszerei közül a FAO vízforgalmi modelljét részletes szimulációs vizsgálat alá vontuk. A tesztek során egyrészt a párolgási becslési módszereinek további analízisét végeztük el, másfelől pedig a FAO-modell működését diagnosztikai szempontból is elemeztük, hibafaktorait értékeltük, számszerűsítettük. Kutatásunkkal hozzájárultunk a rendszer fejlesztéséhez, emellett az öntözési gyakorlat számára lényeges kérdésekre adtunk számszerű választ a párolgás nagysága és a tényleges öntözővíz-szükséglet összefüggéseinek vizsgálata révén.

6. A TÉZISFÜZETBEN HIVATKOZOTT IRODALOM

- Allen, R.G. – Pereira, L.S. – Raes, D. – Smith, M.:* 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage. Paper No. 56. FAO, Rome
- Berzsenyi Z.:* 2000. Növekedésanalízis a növénytermesztésben (Ph.D-jegyzet) VE-Georgikon-Mezőgazdaságtudományi Kar, Keszthely
- Blaney, H.F. – Criddle, W.D.:* 1950 Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. Soil conservation service technical paper 96. Soil conservation service. US. Department of Agriculture, Washington
- Bowen, I.S.:* 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Phys. Rev.* 27-779.p.
- Burman, R. – Pochop, L.O.:* 1994. Evaporation, evapotranspiration and climatic data. Developments in Atmospheric Science, 22. Elsevier, Amsterdam
- Doorenbos, J. – Pruitt, W.O.:* 1977a. Crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage. Paper No.24. (rev.) FAO, Rome
- Doorenbos, J. – Pruitt, W.O.:* 1977b. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO, UN, Irrigation and Drainage. Paper No.24. (2nd Ed.) FAO, Rome
- Filep Gy.:* 1999. Talajtani alapismeretek I. Általános talajtan. Egyetemi jegyzet. DATE-MTK
- Mahringer, W.:* 1970. Verdunstungsstudien am Neusiedler See. *Theoretical and Applied Climatology.* 18. (1): 1–20.p.
- Makkink, G.F.:* 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institution of Water Engineers and Scientists.* 11: 277–288.p.
- McNaughton, K.G. – Jarvis, P.G.:* 1983. Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation. [In: Water Deficits and Plant Growth. Szerk: Kozłowski, T.T. Vol. VII.]. Academic Press. 1-47.p.
- Pereira, A.R. – Villanova, N. – Pereira, A.S. – Baebieri, V.A.:* 1995. A model for the class-A pan coefficient. *Agricultural Water Management.* 76 : 75–82.p.
- Priestley, C.H.B. – Taylor, R.J.:* 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Monthly Weather Reviews.* 100: 81–92.p.

Shuttleworth, W.J. – Wallace, J.S.: 1985. Evaporation from sparse canopy: An energy combination theory. *Quarterly Journal of Met. Soc.* 111: 839–855.p.

Szász G. – Nagy Z. – Weidinger T.: 2011. Agrometeorológiai mérések Debrecenben, az alapéghajlati mérőhálózat kismacsi mérőállomása. Meteorológiai Tudományos Napok 2011., OMSZ, Budapest

Szász G.: 1973. A potenciális párolgás meghatározásának új módszere. *Hidrológiai Közlöny.* 435-442.p.

Szász G.: 1988. Általános és speciális agrometeorológia. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest

WMO: 1966. Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration. Technical Paper (CIMO-Rep.) No. 83. Genf

7. PUBLIKÁCIÓK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN

Tudományos közlemény idegen nyelvű, hazai, lektorált folyóiratban:

Rácz Cs. – Nagy J. – Dobos A.Cs.: 2013. Comparison of several methods for calculation of reference evapotranspiration. Acta Silvatica & Lignaria Hungarica. Vol. 9 (2013). 9-24.p.

Tudományos közlemény magyar nyelvű, lektorált folyóiratban:

Rácz Cs. – Szász G.: 2010. A harmat képződése kukoricaállományokban. Növénytermelés 59. 2. 65-84.p.

Rácz Cs. – Nagy J.: 2011. A víz- és tápanyagellátottság illetve -hasznosulás megítélésének kérdései kukorica terméseredmények vonatkozásában. Növénytermelés 60. 1. 94-117.p.

Rácz Cs. – Nagy J. – Dobos A.Cs.: 2014. Meteorológiai információk hasznosítása mezőgazdasági döntéstámogató rendszerekben. Légkör. In print.

Dobos A.Cs. – Rácz Cs. – Nagy J.: 2014. A referencia párolgás becslő módszereinek érzékenységvizsgálata. Agrártud. Közlemények. In print.

Idegen nyelvű lektorált konferencia kiadvány

Rácz Cs. – Dobos A.Cs. – Nagy J. – Dövényi-Nagy T. – Molnár K. – Bakos K.L.: 2014. Evaluation of the divergence between outputs of different evapotranspiration models. In: 13th ESA Congress. 22-29. August, 2014. Debrecen. In print.

Magyar nyelvű lektorált konferencia kiadvány:

Szász G. – Rácz Cs.: 2006. A csapadék évi ingása Magyarországon (1881-2000). [In: Tóth T. – Bíróné Kircsi A. (szerk.) Kedvező széllel Kunhegyestől Debrecenig. Tiszteletkötet Tar Károly 60. születésnapjára]. DE-TEK, Debrecen. 291-303.p.

Szász G. – Rácz Cs.: 2010. A harmonikus víz- és tápanyagellátás kutatása (1960-2010). [In: Pepó P. (szerk.) Termesztési tényezők a fenntartható növénytermesztésben. Jubileumi kiadvány Bocz Ernő 90. születésnapja alkalmából]. DE-AGTC-MÉK, Debrecen. 204-217.p.

