

**DEBRECENI EGYETEM**  
Mezőgazdaság-, Élelmiszertudományi és Környezetgazdálkodási Kar

**KERPELY KÁLMÁN NÖVÉNYTERMESZTÉSI, KERTÉSZETI ÉS  
REGIONÁLIS TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA**

**Doktori iskola vezető:**

Prof. dr. Nagy János  
az MTA doktora

**Témavezető:**

Prof. dr. Szász Gábor  
az MTA doktora

**KUKORICAÁLLOMÁNYOK ENERGETIKAI ÉS PÁROLGÁSI  
VISZONYAINAK VIZSGÁLATA**

Készítette:  
**Rácz Csaba**  
doktorjelölt

Debrecen  
2014.

# KUKORICAÁLLOMÁNYOK ENERGETIKAI ÉS PÁROLGÁSI VISZONYAINAK VIZSGÁLATA

Értekezés a doktori (Ph.D.) fokozat megszerzése érdekében  
**Agrártudományok** tudományterületén  
**Növénytermesztés és kertészet** tudományágban

Írta: Rácz Csaba okleveles agrármérnök

Készült a **Debreceni Egyetem** Kerpely Kálmán Doktori Iskola  
Növénytermesztési, Kertészeti tudományok programja keretében

Témavezető: Prof. dr. Szász Gábor, az MTA doktora

A doktori szigorlati bizottság:

	név	tud. fokozat
elnök:	Rátonyi Tamás	PhD
tagok:	Burai Péter	PhD
	Bíróné Kircsi Andrea	PhD

A doktori szigorlat időpontja: 2013. 04. 15.

Az értekezés bírálói:

név	tud. fokozat	aláírás
.....	.....	.....
.....	.....	.....

A bírálóbizottság:

	név	tud. fokozat	aláírás
elnök:	.....	.....	.....
tagok:	.....	.....	.....
	.....	.....	.....
titkár:	.....	.....	.....

Az értekezés védésének időpontja: 2014. ....

## TARTALOMJEGYZÉK

<b>1. BEVEZETÉS</b> .....	<b>2</b>
<b>2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1. A mikroklíma meghatározása, vizsgálatának jelentősége</b> .....	<b>5</b>
2.1.1. Állományklíma kutatások.....	5
2.1.2. A kukorica morfológiája, fejlődése, az állományklímát befolyásoló tényezők.....	7
2.1.3. Klímaparaméterek a kukoricaállományban .....	9
<b>2.2. A párolgással kapcsolatos kutatások</b> .....	<b>15</b>
2.2.1. A párolgás fogalmainak értelmezése .....	16
2.2.2. A potenciális párolgás meghatározásának módszerei.....	17
2.2.3. A tényleges párolgás meghatározásának módszerei.....	21
2.2.4. A párolgási modellek értékelése.....	24
2.2.5. A kukorica vízforgalma, az öntözési igény becslése .....	25
<b>3. ANYAG ÉS MÓDSZER</b> .....	<b>28</b>
<b>3.1. Klímaadatok, referenciamérések gyp fölött</b> .....	<b>28</b>
3.1.1. A mérések helyszíne .....	28
3.1.2. A mért paraméterek, a mérések módja .....	29
<b>3.2. Állományklíma mérések</b> .....	<b>30</b>
3.2.1. A mérések helyszíne, tartama .....	30
3.2.2. A mért paraméterek .....	33
3.2.3. Mérés módszertan.....	33
3.2.4. Az állomány termesztéstechnológiai jellemzése .....	39
<b>3.3. A potenciális evapotranspiráció (referenciapárolgás) becslésének módszerei</b> .....	<b>39</b>
3.3.1. Kádpárolgás-alapú módszerek.....	39
3.3.2. Hőmérséklet-alapú módszerek.....	40
3.3.3. Sugárzás-alapú módszerek.....	40
3.3.4. Tömegáram-alapú módszerek.....	40
3.3.5. Kombinált módszerek.....	41
<b>3.4. A tényleges párolgás becslésének módszerei</b> .....	<b>41</b>
3.4.1. A FAO vízforgalmi modellje – kettős növényállomány-koefficienssel .....	41
3.4.2. A tényleges párolgás becslése Bowen-arány módszerrel .....	45
<b>3.5. A modellek statisztikai értékelése</b> .....	<b>47</b>
<b>4. EREDMÉNYEK</b> .....	<b>49</b>
<b>4.3. Kukoricaállományok mikroklímája</b> .....	<b>49</b>
4.3.1. A kukorica állományklímáját kialakító tényezők .....	49
4.3.1.1. Az állomány fenológiai jellemzése.....	49
4.3.1.2. A talaj vízkészlet-eloszlásának vizsgálata .....	51
4.3.1.3. A sugárzás és a légköri paraméterek szerepe, profilja az állományban.....	52

4.3.2.	Látens és szenzibilis hőáramok a kukoricaállományban .....	56
<b>4.4.</b>	<b>A tényleges párolgás becslése az állomány hő- és nedvességáramai alapján .....</b>	<b>63</b>
4.4.1.	A Bowen-arány ( $\beta$ ) értékeinek elemzése .....	63
4.4.2.	A tényleges párolgás ( $ET_{c,BR}$ ) értékeinek elemzése .....	65
<b>4.5.</b>	<b>A tényleges párolgás becslése a referenciapárolgás útján.....</b>	<b>67</b>
4.5.1.	A potenciális párolgás modellek összehasonlító elemzése és érzékenységvizsgálata.	67
4.5.1.1.	Analízis az OMSZ repülőteri méréssorozatok alapján .....	67
4.5.1.2.	Analízis a kismacsi adatsorok alapján .....	78
4.5.2.	A tényleges párolgás becslése a referenciapárolgásból modellezési eljárással .....	82
<b>4.6.</b>	<b>A tényleges párolgás értékek alkalmazási irányai, verifikációja, modell tesztek</b>	<b>87</b>
4.6.1.	A talaj vízkészletének változása a FAO modell és a mért adatok alapján – modell verifikációs kísérlet.....	87
4.6.2.	A modellezett talajvízforgalom vizsgálata .....	92
4.6.3.	A modellezett és a látens hőáramok alapján számított párolgás összehasonlítása – modell verifikációs kísérlet.....	94
4.6.4.	A referenciapárolgás ( $ET_c$ ) és tényleges ( $ET_{c,BR}$ ) párolgás viszonya – a $K_c$ értékek validálása.....	98
<b>5.</b>	<b>KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK .....</b>	<b>102</b>
<b>6.</b>	<b>ÚJ ÉS ÚJSZERŰ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....</b>	<b>103</b>
<b>7.</b>	<b>ÖSSZEFOGLALÁS.....</b>	<b>104</b>
<b>8.</b>	<b>SUMMARY.....</b>	<b>110</b>
<b>9.</b>	<b>SZAKIRODALOM JEGYZÉK .....</b>	<b>116</b>
<b>10.</b>	<b>AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN MEGJELENT SAJÁT TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK .....</b>	<b>131</b>
<b>FÜGGELÉK</b>	<b>.....</b>	<b>132</b>



## AZ ÉRTEKEZÉSBEN SZEREPLŐ JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Jelölés	A változó megnevezése	Mértékegység
<b>A</b>	a légköri advekciós hatások eredője	$W m^{-2}$
<b>a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub></b>	a (3.14) egyenlet dimenzió nélküli paraméterei	-
<b>a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub></b>	a (3.19) egyenlet dimenzió nélküli paraméterei	-
<b>B</b>	a légköri labilitás és specifikus nedvesség mértékét kifejező empirikus tényező	-
<b>c<sub>0</sub>, c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>, c<sub>3</sub>, c<sub>4</sub>, c<sub>5</sub></b>	a (3.21) egyenlet koefficiensei	-
<b>C<sub>c</sub></b>	lombozat-súlyfaktor	-
<b>C<sub>i</sub></b>	tapasztalati szorzótényező	-
<b>c<sub>p</sub></b>	a levegő állandó nyomáson vett fajlagos hőkapacitása	$kJ kg^{-1} K^{-1}$
<b>CR<sub>i</sub></b>	a kapilláris vízemelés nagysága	mm
<b>Cs</b>	a csapadék időszaki összege	$mm nap^{-1}$
<b>C<sub>s</sub></b>	talaj-súlyfaktor	-
<b>d</b>	a nullpont-eltolódási szint magassága	m
<b>D</b>	telítési hiány	kPa
<b>d</b>	a talajszelvény vastagsága	cm
<b>D<sub>e,i</sub></b>	a kumulatív vízfogyás a talaj felső rétegében bármely i-edik nap végén	mm
<b>D<sub>e,i-1</sub></b>	a vízfogyás kumulatív értéke az i-ediket megelőző nap végén	mm
<b>DP<sub>e,i</sub></b>	leszivárgási veszteség a FC <sub>e</sub> -t meghaladó víztartalom esetén	mm
<b>DP<sub>i</sub></b>	leszivárgási veszteség a FC <sub>e</sub> -t meghaladó víztartalom esetén	mm
<b>D<sub>r</sub></b>	a vízfogyasztás kumulatív értéke a gyökerezési mélységben	mm
<b>D<sub>r,i-1</sub></b>	a gyökérzóna vízkészlet-fogyása az i-edik nap végén	mm
<b>DV</b>	a talaj diszponibilis víztartalma	$mm m^{-1}$
<b>E</b>	evaporáció	$mm nap^{-1}$
<b>e<sub>a</sub></b>	tényleges párányomás (3.26)	kPa
	(2.11, 3.24, 3.25)	hPa
<b>e<sub>a,0.5m</sub></b>	a párányomás 0,5 m-es magassági szinten	hPa
<b>e<sub>a,1</sub>, e<sub>a,2</sub></b>	a párányomás az adott magassági szinteken (2.17)	hPa
<b>e<sub>a,2m</sub></b>	a párányomás 2 m-es magassági szinten	hPa
<b>E<sub>f</sub></b>	az elfolyás és a hozzáfolyás eredője	$mm nap^{-1}$
<b>E<sub>i</sub></b>	evaporáció nagysága az i-edik napon	mm
<b>E<sub>kád</sub></b>	A-káddal mért párolgás	$mm nap^{-1}$
<b>e<sub>s</sub></b>	telítési párányomás (3.26)	kPa
	(2.11, 3.24, 3.25)	hPa
<b>ET<sub>0</sub></b>	referenciapárolgás	$mm nap^{-1}$
<b>ET<sub>c</sub></b>	tényleges párolgás	$mm nap^{-1}$
<b>ET<sub>c,adj</sub></b>	az állomány tényleges evapotranspirációja	$mm nap^{-1}$

$ET_{c,adj,i}$	az állomány evapotranspirációja az i-edik napon	mm
$ET_p$	evapotranspiráció	mm nap <sup>-1</sup>
$F$	keveredési úthossz a referencia felszín felett	m
$F_{LAD}$	a függőleges levélfelület-sűrűség	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>
$FC$	a talaj szántóföldi vízkapacitása	mm m <sup>-1</sup>
$f_c$	a növényzet által fedett felszín hányad	-
$FC_e$	szántóföldi vízkapacitás az evaporatív rétegre	mm
$FC_r$	szántóföldi vízkapacitás a gyökértér talajszelvényében	mm
$f_{ew}$	párolgásnak és nedvesedésnek kitett felszín hányad	-
$f_i$	I-től függő tényező	-
$f_t$	turbulencia paraméter	-
$f_w$	a csapadék vagy öntözés által nedvesített talajfelszín hányada	-
$G$	talajhőáram (3.22)	MJ m <sup>-2</sup> nap <sup>-1</sup>
	(3.52)	W m <sup>-2</sup>
	a talajhőáram víz-egyenértéke (3.26)	mm nap <sup>-1</sup>
$h$	az állomány felszínének magassága	m
$H$	szenzibilis hő	W m <sup>-2</sup>
$h_0, h_1, h_2$	adott magassági szintek (2.15)	m
$h_a$	az aktuális növénymagasság	m
$HV$	a talaj holtvíz tartalma	mm m <sup>-1</sup>
$I$	hőindex (Thorntwaite)	-
$i$	a teljes vegetációs időn belüli napszám	-
$I_i$	a kijuttatott öntözővíz mennyisége az i-edik napon	mm
$k$	a Kármán-féle együttható, értéke: 0,41	-
$K_1$	tapasztalati szorzótényező	-
$K_2$	tapasztalati szorzótényező	-
$k_a$	a növényi levelekre jellemző alakú tényező	-
$K_c$	növényi koefficiens	-
$K_{c,max}$	a párolgás felső határértékéhez tartozó növényi koefficiens	-
$K_{cb}$	növényállományi-együttható (transzspirációra)	-
$K_{cb,next}$	a következő vegetációs szakasz kezdőértéke	-
$K_{cb,prev}$	a megelőző szakasz végső $K_{cb}$ értéke	-
$K_e$	talajpárolgás-koefficiens (evaporációra)	-
$K_h$	a hő diffúziós együtthatója	-
$K_{kád}$	kád-koefficiens	-
$K_r$	redukciós koefficiens (kumulatív vízfogyás-függő)	-
$K_s$	transzspirációs-redukciós (stressz-) koefficiens	-
$K_v$	a vízgőz diffúziós együtthatója	-
$K_{ve}$	a kapilláris vízemelés	mm nap <sup>-1</sup>
$k_\alpha$	a kukorica lombozatának kioltási együtthatója (Brown és Covey 1966: 0,53)	-
$k_\beta$	a kukorica lombozatának kioltási együtthatója (Allen et al. 1964: 0,7)	-

<b>LA</b>	levélterület		$m^2 db^{-1}$
<b>LAI</b>	levélfelületi index		$m^2 m^{-2}$
<b>LAI<sub>max</sub></b>	az állomány legnagyobb levélfelületű zónája		-
<b>L<sub>l</sub></b>	levélhossz		m
<b>L<sub>stage</sub></b>	az aktuális vegetációs szakasz hossza		nap
<b>m<sub>d</sub></b>	a száraz talajminta tömege		g
<b>m<sub>w</sub></b>	a nedves talajminta tömege		g
<b>(n/N)</b>	relatív napfénytartam		-
<b>n</b>	a növekedési időszak középső napja		-
<b>NDVI</b>	területi vegetációs aktivitási index		-
<b>p</b>	vízkészlet hasznosítási hányad		%
<b>P<sub>a</sub></b>	a közepes légköri nyomás, értéke: 101,325		kPa
<b>P<sub>eff</sub></b>	az effektív csapadékmennyiség		mm
<b>P<sub>i</sub></b>	a mért csapadék az i-edik napon		mm
<b>PPD</b>	állománysűrűség		db tó m <sup>-2</sup>
<b>q</b>	a levegő specifikus nedvessége		g kg <sup>-1</sup>
<b>q<sub>1</sub>, q<sub>2</sub></b>	a levegő specifikus nedvessége adott magassági szinteken (2.15)		g kg <sup>-1</sup>
<b>R<sub>a</sub></b>	az extraterresztriális sugárzás vízegyenértéke		mm nap <sup>-1</sup>
<b>r<sub>a</sub></b>	aerodinamikai ellenállás		s m <sup>-1</sup>
<b>RAW</b>	ténylegesen elérhető vízmennyiség a gyökértérben		mm
<b>r<sub>c</sub></b>	a lombozat ellenállása		s m <sup>-1</sup>
<b>REW</b>	a ténylegesen elpárologni képes vízmennyiség az „evaporatív”, felső talajrétegben		mm
<b>R<sub>g</sub></b>	globálisugárzás napi összege	(2.12)	cal cm <sup>-2</sup> nap <sup>-1</sup>
		(3.19)	cal m <sup>-2</sup> nap <sup>-1</sup>
<b>RH</b>	napi átlagos relatív nedvesség		%
<b>RH<sub>min</sub></b>	a relatív nedvesség napi minimuma		%
<b>R<sub>n</sub></b>	nettó sugárzás	(3.22)	MJ m <sup>-2</sup> nap <sup>-1</sup>
		(3.52)	W m <sup>-2</sup>
	a nettó sugárzás víz-egyenértéke	(3.26)	mm nap <sup>-1</sup>
<b>R<sub>n,h</sub></b>	az állomány felszínén ( <i>h</i> ) mért sugárzási egyenleg		W m <sup>-2</sup>
<b>R<sub>n,z</sub></b>	a <i>z</i> magasságban mért sugárzási egyenleg		W m <sup>-2</sup>
<b>RO<sub>i</sub></b>	az elfolyás mértéke az i-edik napon		mm
<b>Sz</b>	a vizsgált rétegből történő leszivárgás		mm nap <sup>-1</sup>
<b>T<sub>r</sub></b>	transzspiráció		mm nap <sup>-1</sup>
<b>T</b>	a napi középhőmérséklet 2 m magasságban		°C
<b>t</b>	időpontok jelölése		-
<b>TAW</b>	teljes elérhető vízmennyiség a Z <sub>r</sub> mélységű talajszelvényre		mm
<b>T<sub>eff</sub></b>	effektív havi középhőmérséklet		°C
<b>T<sub>eq</sub></b>	ekvivalens hőmérséklet		°C
<b>TEW</b>	a teljes elpárologtatható vízkészlet az „evaporatív”, felső talajrétegben		mm
<b>T<sub>ew,i</sub></b>	transzspiráció a növények által fedett terület hányadon kívülről		mm

$T_{\max}$	napi maximumhőmérséklet	$^{\circ}\text{C}$
$T_{\min}$	napi minimumhőmérséklet	$^{\circ}\text{C}$
$T_v$	virtuális hőmérséklet	$^{\circ}\text{C}$
$u$	napi közepes szélesség (10 m-en mérve)	$\text{m s}^{-1}$
$u(z)$	a z magasságban mérhető szélesség	$\text{m s}^{-1}$
$u_*$	a súrlódási sebesség	$\text{m s}^{-1}$
$u_1, u_2$	a szélesség adott magassági szinteken (2.15, 2.17)	$\text{m s}^{-1}$
$u_{2m}$	a napi átlagos szélesség 2 m magasságban	$\text{km nap}^{-1}$
$u_{2d}$	a nappali órák átlagos szélessége 2 m magasságban	$\text{m s}^{-1}$
$w_l$	levél szélesség	$\text{m}$
$W_{m\%}$	a talajnedvesség tömegszázalékban megadva	$\%$
$W_{mm}$	a talajnedvesség mm-ben kifejezve	$\text{mm}$
$WP$	hervadásponyi víztartalom (növény-specifikus holtvíz)	$\text{mm}$
$WP_r$	hervadásponyi víztartalom a gyökértér talajszelvényében	$\text{mm}$
$Y_0$	a növénymagasság minimális értéke	$\text{cm}$
$Y_1$	a növekedési időszak középső napján mért (számított) növénymagasság	$\text{cm}$
$Y_2$	a növénymagasság maximális értéke	$\text{cm}$
$z$	a vonatkoztatási szint magassága az állományban	$\text{m}$
$z_0$	az érdességi magasság	$\text{m}$
$Z_e$	felső (evaporációs) talajréteg mélysége, értéke: 0,10	$\text{m}$
$Z_r$	gyökérzet átlagos lehatolási mélysége	$\text{m}$
$\alpha$	Priestley-Taylor koefficiens	-
$\alpha_a$	a levegő hőtágulási együtthatója	$1/273 \text{ K}^{-1}$
$\beta$	Bowen-arány	-
$\gamma$	pszichrometrikus konstans	$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$
$\Delta$	a telítési párányomás görbéjének $1 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ -ra eső változása	$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$
$\Delta e_a$	a párányomás gradiense	$\text{kPa}$
$\Delta T$	a hőmérséklet gradiense	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta z$	a mérési szintek különbsége (2.21)	$\text{m}$
$\varepsilon$	a levegő és a víz molekulatömegének aránya, ért:0,622	$\text{kPa}$
$\lambda$	a víz párolgáshője (3.19)	$\text{cal m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$
	(3.22, 3.27)	$\text{MJ kg}^{-1}$
	(3.54)	$\text{kJ kg}^{-1}$
$\lambda E$	látens hő	$\text{W m}^{-2}$
$\rho$	a levegő sűrűsége	$\text{kg m}^{-3}$
$\rho_b$	a talajra jellemző térfogattömeg	$\text{g cm}^{-3}$
$\sum L_{\text{prev}}$	a vegetációs idő adott napig eltelt hossza	$\text{nap}$

## A referencia- és tényleges párolgás vizsgált módszerei

Jelölés	A változó megnevezése	Mértékegység
<b>A-kád</b>	kádpárolgás „A”-típusú káddal mérve	mm nap <sup>-1</sup>
<b>Per</b>	Pereira-módszer	mm nap <sup>-1</sup>
<b>FAO56</b>	FAO-56-modell	mm nap <sup>-1</sup>
<b>B&amp;C</b>	Blaney–Criddle-modell	mm nap <sup>-1</sup>
<b>Szász</b>	Szász-módszer	mm nap <sup>-1</sup>
<b>Mak</b>	Makkink–FAO-24-modell	mm nap <sup>-1</sup>
<b>P&amp;T</b>	Priestley–Taylor-modell	mm nap <sup>-1</sup>
<b>WMO66</b>	WMO-1966-módszer	mm nap <sup>-1</sup>
<b>Mah</b>	Mahringer-modell	mm nap <sup>-1</sup>
<b>S&amp;W</b>	Shuttleworth–Wallace-modell	mm nap <sup>-1</sup>
<b>PMF56</b>	Penman–Monteith–FAO-56-modell	mm nap <sup>-1</sup>
<b>ET<sub>c, BR</sub></b>	az állomány tényleges párolgása a Bowen-arány módszer alapján számolva	mm nap <sup>-1</sup>
<b>ET<sub>c, FAO</sub></b>	az állomány FAO-modell által becsült tényleges párolgása	mm nap <sup>-1</sup>

## Az alkalmazott statisztikai mutatókhoz kapcsolódó jelölések

Jelölés	A változó megnevezése	Mértékegység
<b>n</b>	az adatsor elemszáma	db
<b><math>x_i</math></b>	a viszonyított adatsor i-edik tagja	-
<b><math>y_i</math></b>	a viszonyítási alap adatsor i-edik tagja	-
<b><math>\bar{x}</math></b>	a viszonyított adatsor számtani közepe	-
<b><math>\bar{y}</math></b>	a viszonyítási alap számtani közepe	-
<b>St.D</b>	az adatsor szórása	-
<b>CV</b>	variációs koefficiens	%
<b>Max</b>	abszolút maximum	-
<b>Min</b>	abszolút minimum	-
<b>R</b>	teljes szóródás intervalluma	-
<b>Var</b>	variancia	-

## 1. BEVEZETÉS

Szűkebb környezetünk, térségünk, egyben Magyarország egyik legjobb agroökológiai adottságú termőtája a Hajdúság. Löss alapkőzeten képződött csernozjom talaja optimális alapot biztosít meghatározó mezőgazdasági ágazata, a szántóföldi növénytermesztés számára. A viszonylag mély talajvízű löszhátság éghajlati adottságai már nem ennyire kedvezőek: kontinentális, de többirányú klímahatás alatt formálódó éghajlatára jellemző a szélsőséges ingadozás. Éves csapadékösszege legtöbbször kielégíti a mezőgazdaság igényeit, de csapadékjárása egyenlőtlen, gyakori a szárazság, melyet sok esetben követ akár káros mértékű vízbőség. A terület magas termés potenciálját jó vízgazdálkodású talaja nagyfokú puffer képességének is köszönheti, mely képes kiegyenlíteni az éghajlati szélsőségek hatásait. Öntözés nélkül azonban az optimális, kiegyenlített magas termésszint nem tartható fenn biztonságosan. Különösen igaz ez a jövőbe tekintve, amennyiben elfogadjuk a globális klímaváltozással összefüggő legkézenfekvőbb prognózist, az időjárási szélsőségek gyakoriságának és amplitúdójának növekedését.

Az öntözés azonban nagy ráfordításigénnyel terheli meg a növénytermesztési tevékenységet, annak gazdaságos folytatása okszerű vízhasználatot feltételez. Mind erősebben jelentkezik tehát az igény a precíziós technológiák iránt, melyeknek részét képezi az automatizált rendszerekre szabott korszerű öntözési döntéstámogatás. Ezek fejlesztése tudományos háttér munkán alapszik, hiszen alapvető fontosságú az állományok vízforgalmával kapcsolatos tényezők mélyreható ismerete. A vízháztartási egyenlet meghatározásának egyik kritikus pontja a párolgás nagyságának becslése. A párolgás mint fizikai folyamat igen egyszerű, agrometeorológiai szempontból viszont annál összetettebb jelenség, mely kihívás elé állítja a mérés technikával és a becslő algoritmusok fejlesztésével foglalkozó kutatókat egyaránt. Természeténél fogva a párolgás csak nehezen kivitelezhető megfelelő pontossággal, így modellezése is több bizonytalansági faktoralal terhelt. Szükséges a párolgás fizikai hátterének, a látens hőfluxusok, transzportfolyamatok minél részletesebb, változatosabb megközelítésből történő feltárása, valamint meghatározási módszereinek, algoritmusainak megismerése, rendszerezése, értékelése és fejlesztése.

Vizsgálatainkhoz teszt növényként a kukoricát választottuk. A növény a hajdúhát termőkörzet egyik legfontosabb szántóföldi kultúrája, melynek termesztése hazai

viszonyok között igen nagy hatékonysággal folytatható. Ugyanakkor vízigénye jelentős, melyet nem minden évjáratban képes fedezni a természetes vízellátottság. A kukorica öntözésének fejlesztése így fontos célként fogalmazható meg, melynek része az alapkutatói feladatok megoldása; a párolgási viszonyok feltárása, az állományok mikroklimatikus terében lezajló folyamatok számszerűsítése is.

Munkánk egyik alapvető célja a kukorica állományklímájának bemutatása volt, melynek alapjaként részletes, szisztematikus és precíz mikroklima méréseket valósítottunk meg. A mérések helyszínéül a hajdúháti kistájon működő, debrecen-kismacsi Agrometeorológiai Observatórium közelében termesztett kukoricaállományokat választottuk ki. Így állománybeli méréseinket bőséges állományon kívüli háttéradatbázissal egészíthettük ki a párolgással kapcsolatos kutatás további fázisaihoz.

Az állományklíma pontos mérése speciális mérőrendszer kialakítását igényelte, mellyel szemben kritériumként jelöltük meg az automatizálhatóságot, mobilitást, alacsony kialakítási és üzemeltetési költségeket, a precizitást és a sokoldalú használat lehetőségét. A rendszerrel elsődlegesen függőleges profilméréseket kívántunk megvalósítani, az eredmények értékelésekor pedig időszakos átlagértékek képzése helyett az időjárási epizódok egyenkénti elemzésére helyeztük a hangsúlyt. A kukoricaállományra adott körülmények között jellemző szenzibilis és látens hő gradienseinek leírásával végső soron az állomány tényleges párolgását is becsültük.

További céljaink között szerepelt minél több olyan numerikus becslő eljárás vizsgálata, melyek a későbbiekben potenciálisan szubmodelljét képezhetik egy kifejlesztendő öntözési döntéstámogatási rendszernek. Az Agrometeorológiai Observatórium és a Debrecen-Repülőtéren elhelyezkedő OMSZ meteorológiai állomás adatsorai e célra kitűnő lehetőséget nyújtottak. A vizsgálandó algoritmusokat többféle modelltypusból választottuk ki, melyek fizikai szemléletük, megközelítésük tekintetében is különbözőek. Az analízis még teljesebbé tétele érdekében a párolgásmérő káddal mért adatsort, és az erre épülő módszereket is bevontuk a vizsgálatokba.

A párolgás becslő metódusainak – alkalmazott agrometeorológiai célú – tesztjét a FAO által létrehozott öntözővízigény-moddellel terveztük folytatni. Vizsgálataink egyrészt a különböző párolgási inputok által okozott kimenetbeli változások számszerűsítésére, másrészt a modell működési sajátosságaira, fejlesztési, pontosítási lehetőségeinek felkutatására irányultak. A modell referenciájaként az állományban mért

talajvízkészleten alapuló vízháztartási egyenleget alkalmaztuk, mellyel a modell napi léptékű adatsora összevethető. További összehasonlítási alapot képezett a modell által számolt tényleges párolgás adatsorral szemben az állományi klímamérések alapján, Bowen-arány módszerrel kalkulált tényleges párolgás adatsorunk. Ezáltal többféle verifikációs lehetőséget, nagyobb kísérleti mozgásteret kívántunk vizsgálataink számára biztosítani.

*A vizsgálatok legfontosabb célkitűzései az alábbiak voltak:*

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



## 2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

### 2.1. A mikroklíma meghatározása, vizsgálatának jelentősége

Az éghajlathoz, a makroklímához viszonyítva a mikroklíma fogalma alatt legtöbb esetben annak „térbeli leskálázását”, kisebb, mozaikszerű térbeli egységek éghajlatát értjük. Más megfogalmazásban a mikroklíma egy-egy horizontálisan cca. 1000, vertikálisan legfeljebb néhány méterre kiterjeszhető talaj közeli légtér meteorológiai paramétereinek és azok változásainak összessége. A makroklímával ellentétben ugyanakkor jóval kisebb szerepet kap az idő mint dimenzió, mivel a mikrometeorológia és a mikroklíma kifejezés a magyar szóhasználatban sok esetben összemosódik. A különbség ugyanakkor jelentős: míg a mikroklíma általában a kisebb terek meteorológiai szemszögű tanulmányozásával foglalkozik, a mikrometeorológia az ott zajló folyamatok matematikai és fizikai összefüggéseinek leírására helyezi a hangsúlyt (Czelnai és Szepesiné 1986, Szász 1988, Goudriaan 1997, Anda 2001).

Az állományklíma a mikroklíma speciális szegmense, a vizsgált térrész meteorológiai eseményrendszerének alakulását jelentősen befolyásolja a részét képező növényi tömeg, mely kölcsönhatásban van a jelenlévő légköri és talajtényezőkkel. A növényzettől mentes területek mikroklímájával szemben a növényállományok architektúrája és levélfelülete aktív felszínként domináns tényezővé válik az adott térben zajló folyamatok kialakításában. Összességében a talajfelszín és a légköri elemek hatásainak kitett, zárt állományokban a makroklímától merőben eltérő, térben nem általánosítható, egyedi mikroklíma jön létre (Jones 1992).

#### 2.1.1. Állományklíma kutatások

A talaj-növény-légkör rendszer állapotának jellemző fizikai megjelenési formája az állomány mikroklímája. A három fő alrendszer között lezajló kölcsönhatások a mikroklimatikus paraméterek mérése révén számszerűsíthetők. A mérési programok lehetővé teszik az anyag- és energiatranszport folyamatok bonyolult rendszerének, térbeli és időbeli változásainak feltérképezését is, egyesítve a deduktív (Geiger 1927) és az induktív mikroklíma-megközelítés eredményeit. Az állományban lezajló nedvességáramlást, a párolgást indikáló vízgőz és energia gradiensek meghatározásához

azonban mindenképpen az egyes paraméterek igen pontos mérésére, megfigyelésére van szükség.

A mikroklimatikus terek beható és szisztematikus tanulmányozása Geiger megfigyeléseivel kezdődött, és a XX. század derekára nemzetközi, valamint hazai kutatások egyik meghatározó területévé vált. Többek között Bowen, Monin, Obuhov, Priestley, Taylor, Richardson, Penman és Monteith elsősorban a mikrometeorológiai folyamatok törvényszerűségeinek felismerése révén alapozták meg a későbbi kutatási eredményeket. A későbbiekben a kimondottan a növényállományok mikroklímájával kapcsolatos szakirodalom is bővült. Rosenberg (1974) Ross (1975), Monteith (1976), Oke (1978), Rosenberg et al. (1983) és Jones (1983, 1992) a növényállományokban általánosan felismerhető kölcsönhatások, radiatív és aerodinamikai jelenségek leírása révén szerzett elévülhetetlen érdemeket a területen.

Magyarországon az agrometeorológiai szakirodalom első nagy alakjai, Száva-Kováts és Berényi (1948), Aujeszki et al. (1951), Berényi (1958, 1967), illetve Bacsó (1967) általános állományklímával kapcsolatos kutatásainak eredményeiként születtek a tudományterület számára ma is alpműként szolgáló alkotások.

Speciálisan a szántóföldi kultúrák állományklímájával foglalkozott Berényi (1945, 1948), Szász (1956, 1974), Anda (1998) és Gombos (2008). A kertészeti növények állományklímájának feldolgozásában számos egyéb szerző mellett Berényi (1958), Justyák (1989), Tőkei et al. (1996), Lakatos et al. (2011) is részt vállalt, s a kutatások száma napjainkban is dinamikusán gyarapszik ezen a területen. Az erdők klimatikus viszonyainak feltérképezését már Geiger (1961) is művelte, és számos további tudományos munka született, születik napjainkban is a témában (Wagner 1964, Gay és Knoerr 1970, Kiese 1972, Justyák 1981, stb.). Az erdőklíma szakirodalma összességében talán a legbővebb valamennyi állománytípust egybevetve, és általánosan is a mikroklíma kutatásának számos sarokköve köthető az erdészeti állományklimatológiához.

A kukorica állományklímájának sajátosságait Berényi (1945), Brown és Covey (1966), Szász (1974, 1988, 1997), Anda (1998) részletes tanulmányban ismertette. A szántóföldi kultúrák közül a kukorica állományklímája az egyik legkarakteresebb, lévén az állománytér vertikálisan is kiterjedt, benne a különböző transzport folyamatok jellegzetesebb felépülésük miatt pontosan meghatározhatók, ennél fogva különösen alkalmas klímamérések végzésére.

### **2.1.2. A kukorica morfológiája, fejlődése, az állományklímát befolyásoló tényezők**

A kukorica hajtásrendszere egy domináns főhajtásból mint növekedési tengelyből, valamint többnyire fejletlen mellék (oldal-) hajtásokból, illetve a 8-40 db nódusból eredő levelekből épül fel. A plagiofil, közelítőleg átellenes állású levelek száma a hazánkban termesztett fajták esetében általában 9-12. A növény magassága tág határok között változik, a takarmánykukorica hibridek 180-300 cm-es magasságot érnek el. Ebből a növekedési időszak végén kifejlődő címer, azaz hímvirágzat mintegy 20-40 cm-t tesz ki (*Hanway 1966, Nagy 2007*).

A levélzet tömege, a levélfelületi index (LAI, mely egységnyi tenyészterületre eső levélfelület nagyságát jelenti) ugyancsak tág határok között változik, a növény teljes fejlettségénél maximum 1,5-4,5 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup> közötti. A zöld levélfelület, másként a fotoszintetikusan aktív levélfelület indexe ennél 5-20 %-kal alacsonyabb lehet (*Daughtry et al. 1992*). A levélfelület nagysága elsősorban a genetikai alapok, illetve a tápanyag- és vízellátottság függvénye. A LAI megállapításának több módszere ismeretes, a levélszélesség és -hossz alapján történő számításoktól (*Montgomery 1911*) a planimetriás, gravimetriás és a távérzékelt információkon alapuló módszerekig. Ugyanakkor a számos módszer pontosságbeli különbözőségei (*Stewart és Dwyer 1999, Anda 1986*) mellett a LAI definíciója is változó: esetenként a figyelembe vett levéloldalak száma eltérhet, illetve távérzékelt adatoknál a szár, vagy egyéb növényi részek beszámítása-levonása is eltérésekhez vezet ugyanazon fogalmon belül (*Weiss et al. 2004, Jonckheere et al. 2004, Ross 1981*).

A transzspirációval potenciálisan a légtérbe jutó víz mennyiségét a gyökerezési mélység limitálja. A növény földalatti szerveinek vizsgálata, azok fejlettségének, funkcionalitásának ismerete ezért nagy jelentőségű az állományklíma modellezés szempontjából.

A kukorica bojtos gyökérzete jól fejlett, a tenyészidőszak során nagy volumenű vízforgalom bonyolítására alkalmas. A szár föld feletti részének alsó részéből eredő harmat- vagy támasztógyökerek kis mértékben járulnak hozzá a víz- és tápanyagfelvételhez, azt zömében a sűrű, oldalirányban akár 70-180 cm távolságba eljutó mellék- és koronagyökerek végzik. Ezek legnagyobb tömege a felső 25-30 cm-es, művelt rétegben helyezkedik el, azonban kisebb részük 3-4 méter mélyre is lehatolhat (*Bocz és Nagy 1978, Tavčar és Lieber 1939*). Nagy (2004) szerint a kukorica teljes vízfelvételenek cca. 62-81 %-a a felső 60 cm-es rétegből származik, egyetértésben

azzal, hogy a gyökértömeg függőleges mentén közelítőleg logaritmikus trendet követ a legtöbb növénynél (Gerwitz és Page 1974). A 90 cm-nél mélyebb rétegből a teljes vízmennyiség legfeljebb 11 %-a származik, 120 cm-nél mélyebbről pedig nincs számottevő vízfelvétel. Fizikai és kémiai vizsgálatokra alapozva számos szerző hasonló következtetésre jutott (Aina és Fapohunda 1986, Jarvis 1989, Novák 1994, Liedgens és Richner 2001, Amato és Ritchie 2002, Taboada és Alvarez 2008, Gao et al. 2010, Mendez-Millan et al. 2012, Xia et al. 2013): normál évjáratokban a vízfelvétel a legfeljebb 1 m mély szelvényre korlátozódik, s csak kimondottan száraz időszakokban válik számottevővé az ennél mélyebbről történő vízfelvétel, akkor azonban akár 3-4 m mélyről is származhat az elpárologtatott víz.

A kukorica egyéves, tavaszi vetésű növény, bázishőmérséklete 10 °C körüli, vetése április második felére - május elejére esik. Tenyészidejének hossza változatos, hasznosítási típus, érési csoport szerint 80 illetve 300 nap közötti. A hazánkban termesztett szemeskukorica hibridekre általában 110-150 napos tenyészidő jellemző.

A fenológiai szakaszok meghatározásában eltérő felosztási rendszerek alakultak ki. Bocz (1992) szerint a növekedés fázisai: csírázás, kelés, 3-4 leveles állapot, szárba indulás, 6-7 leveles állapot, címerhányás, nővirágzás, csöképződés, tejes érés, viaszérés, biológiai érés. A növényi vízgazdálkodással kapcsolatos kutatásokban (Allen et al. 1998) ennél kevesebb szakaszt definiálnak, a FAO rendszerében szinte minden termesztett növényre univerzálisan a kezdeti-, vagy alap- (INI), fejlődési-, vagy vegetatív- (DEV), közép-, vagy virágzási- (MID), valamint utószakaszt vagy termésképzési és -érési szakaszt (LATE) különítik el.

Mándy (1958) szerint a genetikai determináltság mellett a növekedési ütemre a vegetációs időszak időjárása a meghatározó. Magyarországon a hőmérsékleti feltételek általában optimálisak a növény számára a tenyészidőszak legnagyobb részében, csupán egyes szélsőséges periódusokban jelentkezik hőstressz. Ennek negatív irányú változata a vetés-kelés időszakában fordul elő, a bázishőmérséklet alatt hűlést, 0 °C alatt pedig fagykárt okozva (Varga-Haszonits 1987), ugyanakkor ennek kártétele statisztikai adatok szerint viszonylag kicsi (Varga-Haszonits 1981). Az optimálisnál magasabb hőmérséklet jelentkezhet bármelyik fenofázisban, azonban Heyne és Laude (1940) vizsgálatai szerint e stresszhatást a korai szakaszban jobban tolerálja a növény. A virágzás idején a termékenyülés szenvedhet kárt extrém magas hőmérsékleti viszonyok

mellett, illetve relatív vízhiánnyal, légszárazsággal párosulva a vegetációban bármikor előfordulhat a fejlődés zavara, leállása (*Varga-Haszonits és Varga 1999, Menyhért 1979*). A nedvességi tényezők azonban összességében sokkal inkább számítanak limitáló tényezőnek a kukorica fejlődése szempontjából. Évjáráttól függően változó mértékű a kukorica vízigénye, Bocz (1988) 420-440 mm-ben határozta meg, de nagy különbség adódhat az egyes hibridek vízigénye között. Debreczeni és Debreczeniné (1983) szerint a vízhiány a fejlődés sebességét növeli, korai szeneszenciát idéz elő, míg a víztöbblet elnyújtja a vegetatív fejlődést. A Hajdúság térségében a kukorica klimatikus vízhiánya (a potenciális vízfogyasztás és a természetes csapadék különbsége) a sokéves átlag alapján 300 mm körüli, elsősorban a negatív vízstressz a károsító tényező (*Nagy 2007, Szász 1987, Szász 1997b*). A kukorica termésmenésének és a mikroklíma befolyásolásának egyik leghatékonyabb agrotechnikai eszköze a vízpótlás, a különböző technológiai alapokon nyugvó öntözés (*Varga-Haszonits 1987, Anda 2001*).

### **2.1.3. Klímaparaméterek a kukoricaállományban**

Az állományklímát kialakító hatások eredetük szerint az alábbiak szerint csoportosíthatók (*Szász 1988*):

- meteorológiai tényezők
- termőhelyi tényezők
- biológiai tényezők
- agrotechnikai tényezők

Más megközelítésben a növényállomány mindenkori fizikai állapota a fentiek kölcsönhatásából származtatható három fő tényező függvénye:

- az aktív felszínek hatékonysága
- a növényállomány szerkezete
- a turbulens légmozgás mértéke.

Fiatal állományokban elsősorban a talajfelszín funkcionál aktív felszínként. A napsugárzás elnyelése, hosszuhullámú kisugárzása, valamint a víz transzportfolyamatainak egyenlege adja az állományban jelenlévő szenzibilis és látens hőenergia meghatározó részét (más része advektív hatások útján jut a rendszerbe). Az állomány fejlődésével a levélfelület fokozatosan átveszi a talajfelszín szerepét.

A növényállomány szerkezete az állománysűrűség, sorirány, agrotechnika, a fajta levélzet architektúrája, valamint az állomány korának és egészségi állapotának

függvénye. A légmozgás mértékét alapvetően az állományon kívüli szélviszonyok határozzák meg, de nagy hatást gyakorol az állományszerkezet is.

A szoláris besugárzás, a hőmérsékleti viszonyok, valamint a nedvességi viszonyok függőleges eloszlása alapján a növényállományok légterének jellege mikroklimatológiai szempontból három alaptípusba sorolható (Szász 1997a):

- fiatal és nyílt növényállományok (A-típus)
- közepesen zárt állományok (B-típus)
- zárt, nagy levélfelületű állományok (C-típus)

Kifejlett állapotában (MID szakasz), mely egyben a növény leginkább klímaérzékeny életszakasza is, a kukoricaállomány a B mikroklíma-típusba tartozik. Viszonylag nagy levéltömege következtében a talajfelszín sugárzás elnyelő szerepe háttérbe szorul, a levélfelület az állományi klímaparaméterek eloszlásának fő szabályozójává, „akciócentrumává” is válik.

*Sugárzási viszonyok az állományban:*

A Naptól érkező sugárzó energia eloszlását az állományban a levélfelület függőleges eloszlása szabja meg elsődlegesen, de az elnyelődés mértékét a napmagasság is jelentősen befolyásolja. Az elnyelés mértéke és a levélfelület nagysága közötti összefüggés Beer-törvényén alapszik, becslésére több modell került kidolgozásra:

*(Az egyenletekben szereplő jelölésekhez tartozó magyarázatok az értekezés elején található jegyzékben található.)*

Brown és Covey (1966):

$$R_{n,z} = R_{n,h} \cdot e^{-k_\alpha \int_z^h F_{LAD} \cdot dz} \quad (2.1)$$

Impens és Lemeur (1969):

$$R_{n,z} / R_{n,h} = e^{(-K_1 \cdot z + K_2 \cdot z^2)} \quad (2.2)$$

Ross (1981):

$$R_{n,z} = R_{n,h} \cdot e^{(-0,622 \cdot z \pm 0,0533 \cdot z^2)} \quad (2.3)$$

A kukoricaállományok LAI-sűrűségére (LAD) vonatkozó tanulmányok hasonló módon írják le a paraméter függőleges eloszlását, de a maximális LAI érték relatív magassági szintjének meghatározásában eltérőek. Míg Vazin (2012) az állománymagasság 40%-ában, Milthorpe és Moorby (1969, 1974) valamint Aylor (2005) hozzávetőleg 50-75% közötti magasságban állapítja meg.

Allen és Lemon (1972), valamint Impens et al. (1970) szerint a sugárzási egyenleg függőleges eloszlása az állományban hasonló a globálsugárzás eloszlásához. Napi menetét tekintve a nettó sugárzás ugyancsak a globálsugárzáshoz hasonló, felhőzettől függően általában a legmagasabb napállás idején maximális, éjjel pedig gyengén negatív értékkel éri el minimumát (Brown és Covey 1966).

A talaj felszínére – kifejlett kukoricaállományban – a teljes sugárzó energiamennyiségnek 15-20%-a jut le, nagyobb része a lombozaton szóródik, visszaverődik, illetve látens és szenzibilis hővé alakul, valamint fedezi a fotoszintézis energiaszükségletét (Szász 1997a). A sugárzás kioltásának mértékét azonban befolyásolja az állomány fejlettsége és vízellátottsága is, a víz- (illetve sok esetben a tápanyag-) hiányos állapot a sugárzáshasznosulás gyengülése révén vezet terméskieséshez. Tesztnövények leveleinek víztartamát vizsgálva Jones (1992) a 60 és 89 %-os nedvességi szint között reflektivitásban 25-35 %-os eltérést talált. A nagyobb víztartalmú, illetve fiatalabb levelek sugárzáselnyelő képessége a legtöbb esetben nagyobbak bizonyult.

#### *Szélviszonyok az állományban:*

A légmozgás hatása meghatározó az állomány mikroklimatikus viszonyaira, de az állomány maga is hat az ott kialakuló szélviszonyokra. A növényzet sík felszínhez viszonyított nagyobb aerodinamikai ellenállása nem csupán a növényállományban, de annak környezetében is csökkenti a szél sebességét. A szél egyúttal a kicserélődési folyamatok egyik legfontosabb meghatározó tényezője, az állománytér magasabb légnedvességét csökkenti, szén-dioxid koncentrációját növeli. Ezzel élettani szempontból kulcsszerepet tölt be: a fotoszintézist serkenti a CO<sub>2</sub>-koncentráció

emelésével (Szász 1997a), és a párolgást is fokozza az állománytér szárítása révén (Szlovák 1979).

Az állomány aerodinamikai ellenállása következtében a felszín felett a szélesség a magassággal csökken, nyírófeszültség lép fel. A szélesség-gradienssel párhuzamosan az egyéb légköri paraméterekben is gradiens épül fel, végső soron kialakul a talajmenti határréteg. A határréteg transzfer-réteg is, a kicserélődési folyamatok intenzitása a szél erősségének és turbulens jellegének függvénye (Huzsvai et al. 2005).

Növényállományokban az aerodinamikai rétegződés, a függőleges szélprofil meghatározása mérstechnikai szempontból számos hibával terhelt. Az anyag- és energiakicserélődés nagyságának megállapítása azonban jó közelítéssel megoldható becslő formulák alkalmazásával is. Az aerodinamikai rétegződés leírása a Prandtl-egyenlettel az alábbiak szerinti:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left( \frac{z-d}{z_0} \right) \quad (2.4)$$

Az egyenlet ugyan a szélesség és a magasság közötti logaritmikus összefüggés viszonylag pontos számítására ad lehetőséget, a nullpont eltolódási szint és az érdességi magasság meghatározása már bizonytalan. Mindkét paraméter a szélesség függvénye, azokra közelítő értékek, becslő módszerek állnak rendelkezésre (Grace 1977). Viszonylag sűrű állományokra, köztük a kukoricára Campbell (1977) a  $d=0,64 \cdot h$ , illetve  $z_0=0,13 \cdot h$  összefüggéseket javasolja, ahol  $h$  a növényállomány magasságát jelöli. A két magassági paraméter összege a kiszorítási-, más néven az aerodinamikailag aktív réteg, melynek felső határa az állomány felső részében helyezkedik el. Robinson (1962), Thom (1971) és Monteith (1973) szintén közelítő összefüggést ad meg  $d$  értékére.

A Prandtl-összefüggés nagy pontossággal csak neutrális légrétegzettségi helyzetben alkalmazható. A légmozgás turbulens jellege nem csupán a sebességtől függ, hanem a légköri labilitás, azaz a konvektív folyamatok erősségétől is. Mindkettő fokozza a turbulens kicserélődés nagyságát, növeli az állományi anyag- és hőtranszfer folyamatok intenzitását. Deacon (1953) a labilitás nagysága szerint tipizálta a függőleges szélprofil módosulásait. A labilitást a Richardson-számmal jellemezve annak negatív értékei mellett labilis, meredek szélprofil, pozitív értékek esetén, erősen stabil légrétegződés



esetén ellaposodó profil alakul ki. Businger (1975) a kukoricaállományra érvényes állományi szélprofilot mutat be, hangsúlyozva, hogy az állománysűrűség és a levélfelület architektúrájának erős befolyása miatt az állományon belüli transzfer folyamatok és a szélesebb eloszlás meghatározása bonyolultabb az állomány fölötti térrészre vonatkozó számításoknál.

Mivel az állományok kétdimenziós, vízszintes kiterjedése véges, a felszínnel párhuzamos irányú transzportfolyamatok miatt a mikroklíma mérési vizsgálatainak során a területei heterogenitásból fakadó hibával is számolni kell. Az ún. keveredési úthossz nagyságának növekedésével növekszik az állomány szél felőli oldalán a határreteg magassága. Jones (1992) általánosságban a keveredési úthossz 1 %-aként határozza meg a megfelelő pontosságú mikrometeorológiai mérésekhez választott mérési magasság maximumát. Jelentős eltérések adódnak azonban ennek értékében szélcsendes és erősen szeles napokat összehasonlítva.

A kukoricaállományok aerodinamikai ellenállása arányos a levélfelületi indexszel, annak függőleges metszete pedig a levélfelület-sűrűséggel. A kifejlett állomány alsó szintjén, a talajfelszín közvetlen közelében, átlagos szélviszonyok között már nullára csökken a szélesebb, annak ellenére, hogy – aktív levélfelület hiányában – a kioltás mértéke is minimális (Uchijama és Wright 1964). Fejlődésben lévő, még nem teljesen záródott állományoknál meghatározó a sorirány, illetve az uralkodó szélirány által bezárt szög. A soriránnyal párhuzamos szél mélyebbre hatol az állományban, nagyobb mértékben csökkenti a légnedvességet is, fokozva a tényleges párolgás mértékét. A hajdúhátai termőtáj esetében az uralkodó szélirány északias, Bíróné Kircsi (2008) ezen felül még a délies irányt kapcsolja a legnagyobb szélerősséggel járó időjárási események előfordulásához.

#### *A látens és szenzibilis hő eloszlása az állományban*

A kukoricaállományban kialakuló aktív felszín sugárzáselnyelő képessége szorosan összefügg az állománytér hőtartalmának eloszlásbeli sajátosságaival. A témában végzett kutatások eredményei szerint a nappali órákban a legnagyobb LAI-val rendelkező állományszinten, illetve a talajfelszín közelében mérhető a legmagasabb hőmérséklet. Átlagos értéke magasabb, mint az állomány környezetében hasonló szinteken mért hőmérséklet. Minél nagyobb a sugárzási egyenleg, a különbség annál határozottabban jelenik meg. Az éjszakai órákban a hosszuhullámú kisugárzás hatása nem ennyire nyilvánvaló, a két felület hőmérséklete alig tér el az állomány többi részének

hőmérsékletétől, elsősorban az állományfelszín mutatja a legalacsonyabb értékeket. Ennek magyarázata az állomány belső terére jellemző – a Stefan-Boltzmann törvényből következő – intenzív hosszúhullámú energiaforgalom (Rose 1966). A levélfelület szerepét a sugárzó energia hőtranszformációjában a levél és a megfelelő szintek léghőmérsékleti adatainak összevetése alapján igazolta Brown és Covey (1964) valamint von Hoynigen-Huene (1976). Megállapították továbbá, hogy a szenzibilis hőáramok napi maximuma a déli órákban, a nettó sugárzás maximumával azonos időintervallumban következik be. A talaj közeli szinteken viszont a nap egésze folyamán negatív előjellel jellemezhető fluxus ér el szélsőértéket.

A szenzibilis hő (H) eloszlásának további befolyásoló tényezője a sorirány. Szász (1997a) igazolta a kifejlett kukoricaállományok maximális levélfelületű szintjének nappali hőtöbbletét. Kutatásai bizonyították, hogy a fiatal kultúrák talajszintjén a legerősebb besugárzás idején, É-D-i sorirány mellett a hőmérséklet akár 4-5 °C-kal is meghaladja a K-Ny-i sorirányú állományban mérhető értékeket a talaj árnyékolatlansága miatt.

Adott állományban a légtér teljes energiamennyiségének elenyésző része az érezhető, közvetlenül mérhető szenzibilis hő. Hasonlóan nagy hőenergia mennyiség tározódik a levegőben jelen lévő vízgőz párolgáshőjének formájában, látens hőként. A levegő látens hőtartalmának ( $\lambda E$ , vagy LE) forrása elsődlegesen a napsugárzás, más megközelítésben a talajhőáram okozta veszteséggel csökkentett sugárzási egyenleg ( $R_n - G$ ) bizonyos hányada fordítódik a párolgás energiaigényének fedezésére. Az állomány energiamérlege az advektív hatásoktól eltekintve az alábbiak szerint alakul:

$$R_n = \lambda E + H + G \quad (2.5)$$

A transzspiráció és a megkötött sugárzási energia arányát Brown és Covey (1964) a napszaktól és az állományszinttől függően változónak határozta meg. A déli órákban az állomány felső részében mintegy 27-34, az alsó 50 cm-es rétegben pedig 55-75 %-ban fordítódott párolgásra. A reggeli és a délutáni órákban a középszintekig emelkedett a transzspiráció szempontjából magasabb hatásfokú tartomány. Anyoji et al. (2007) hasonló vizsgálatai szerint bőséges nedvesség esetén a rendelkezésre álló energia ( $R_n - G$ ) 99 %-a, száraz napokon pedig 97 %-a fordítódott a látens hőáramok

energiaigényének fedezésére. Az említett két mennyiség összefüggése a Bowen (1926) által bevezetett ún. Bowen-arány ( $\beta$ ) segítségével írható fel, mely szerint:

$$\frac{R_n - G}{\lambda E} = 1 + \beta \quad (2.6)$$

A víz párolgásának egyik feltétele a megfelelő nagyságú, a párolgás fizikai folyamatához szükséges energiamennyiség, másrészt pedig az elpárologtatható víz megléte. Ez származhat közvetlenül a talajból vagy a növényből, ahonnan a sztómákon keresztül juthat a légterbe. A kukoricaállomány légnedvességi profilját így szintén az aktív, párologtatni képes felszínnek térbeli struktúrája, helyeződése szabja meg. Bottemanne et al. (1977) és Szász (1988) részletes mérésekkel támasztotta alá, hogy a kukoricaállományok nedvességben leggazdagabb régiója a talajfelszín fölötti néhány deciméteres, valamint a legnagyobb levélfelületű térrésze, azaz az intenzív evaporáció és transzspiráció zónája. A szabályszerűség elsősorban a nappali órákban jelenik meg karakteresen, éjjelre a különbségek jelentősen csökkennek, miközben a teljes állományprofilra számított napi nettó látens és szenzibilis hőáram egyaránt erősen pozitív, azaz felfelé irányuló (Briggs et al. 2002). Jellegzetes továbbá, hogy az állományban mérhető légnedvesség gyakorlatilag folyamatosan meghaladja a környezetében mérhető értékeket.

## 2.2. A párolgással kapcsolatos kutatások

A talaj-növény-klíma rendszer vízegyenlegének alapvető elemeként a vízigénnyel, öntözési igénnyel kapcsolatos modellezésben nélkülözhetetlen a párolgás (evapotranspiráció) mértékének ismerete. A meteorológia alapvető légköri, illetve környezeti paramétereiből származtatott mennyiségként írja le, de részben biofizikai folyamatok eredménye, így alapvető ökológiai mutatószám is. Alkalmazási területe széles, az agrometeorológia és –klimatológia tudományterületein belül számos viszonyszám, index alapja (Szász 1988), ismerete azonban ökológiai vonatkozású kutatásokban is elengedhetetlen. Fontos mutató lehet ökoszisztémák biomassza- és energetikai potenciáljának, a növénytermesztés potenciális termelékenységének becslésében (Lieth 1975), a tájértékelésben, növényfajok elterjedésének, termőterületeinek agroökológiai szemléletű meghatározásában (pl. FAO-Agroecological Zoning - projekt - FAO (1996)), valamint e zónák esetleges eltolódásának

vizsgálatában, tágabb értelemben a klímaváltozás hatásainak leíró modellezésében (Antal 2000). A mezőgazdaság produktivitásának, fejlődésének vizsgálata során viszonyszámok (pl. WUE – vízhasznosulási együttható) alapja (Pretty 2006), továbbá agrotechnikai összefüggésben a növényállományok evapotranspirációjának minél pontosabb ismerete, különösen precíziós agronómiai alkalmazások inputjaként értékes információt jelent. A fogalomhoz kapcsolódó legfontosabb probléma, hogy természetes viszonyok között pontosan nem mérhető, pusztán becsülhető mennyiség.

### 2.2.1. A párolgás fogalmainak értelmezése

Az evapotranspiráció (ET) fizikai értelemben a víz- és talajfelszín párolgása (evaporáció, E) és a növényzet által elpárologtatott vízmennyiség (transzspiráció,  $T_r$ ) összege:

$$ET = E + T_r \quad (2.7)$$

Az evapotranspiráció számos meteorológiai paraméter, így a felszínre érkező sugárzási energia, a szélesebbesség, a levegő vízgőztelítettsége (illetve telítési hiánya) és hőmérséklete, a párolgó felület hőmérséklete és a mikroadvekciós hatások függvénye. A gyakorlatban mértékét alapvetően meghatározza és korlátozza az aktuálisan rendelkezésre álló, elpárologtatható vízmennyiség mellett a növényzet és a talaj több paramétere is. Ez alapján definiálható két megkülönböztetett értéke, a *potenciális* ( $ET_0$ ) és a *tényleges evapotranspiráció* ( $ET_c$ ) (Szász 1988). Mindkét paraméter használata egyaránt elterjedt, azonban a potenciális párolgás gyakrabban szerepel környezeti tényezőként különböző kutatásokban.

Definíció szerint a potenciális párolgás alacsony növésű, vízellátottságban hiányt nem szenvedő növényállomány által elpárologtatott vízmennyiséget jelent. A meghatározást Penman használta először az 1940-es években, de több ízben is szükséges volt pontosítani, hiszen a hipotetikus, alacsony növényállomány rendkívül tág fogalom. Az esetek nagy részében többé-kevésbé homogén gyepfelületet értünk alatta, de egyrészt a gyepek összetétele, habitusának sokfélesége, másfelől a szakirodalomban gyakran előforduló egyéb kultúrák, pl. lucerna bevonása is csökkenti az eredmények összehasonlíthatóságát. A probléma feloldására került bevezetésre a *referenciapárolgás* ( $ET_0$ ) fogalma, mely nemzetközileg elfogadott normák szerinti összehasonlíthatóságot biztosít a párolgás meghatározására (Irmak és Haman 2011). A referenciapárolgás –

megállapodás szerint – idealizált, 0,12 m magasságú, 70 s m<sup>-1</sup> felületi ellenállású, 0,23 albedójú növényállomány párolgása, mely elméletben a legközelebb áll a zárt, egyenletes magasságúra nyírt, vízhiányt nem szenvedő, és aktívan növekedő gyepfelület evapotranspirációjához. (Allen et al. 1998).

A tényleges párolgás egyaránt kifejezhető a potenciális és a referenciapárolgás mennyiségéből is, így azonban az adott állományra jellemző ún. növényi koefficiens sok esetben más és más értéket vesz fel. A tényleges párolgás kiszámításának egyenlete:

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c \cdot K_s \quad (2.8)$$

A  $K_s$  stressz-koefficiens értéke vízstressz hiányában 1.

Az evapotranspiráció bármely meghatározása kapcsán újabb kérdést vet fel a térbeli és időbeli kiterjeszhetőség, az egyes léptékek közötti átjárhatóság. Az igen nagyszámú és egymástól sok tekintetben különböző becslő, illetve mérési módszerek eredményei kidolgozásuk helye és vonatkoztatási időintervalluma szerint felbontásban és pontosságban nagy eltéréseket mutathatnak. Számottevő különbség adódik a klimatológiai (regionális) szemléletű eljárások, valamint a kis területre és időegységre vonatkoztatott mikrometeorológiai szemléletű megoldások között (Dunkel 2000). Adott területre és időintervallum szerint a párolgás becslésére használt módszer kiválasztásának főbb szempontjai az alábbiak:

- a módszer által behatárolt időbeli és térbeli lépték,
- az alkalmazás helyszínének klímátípusa,
- a vegetáció típusa,
- a módszer bemenő adatigénye, mérési módszereknél beruházásigénye.

Összegezve, a számos eljárás közül a felbontás függvényében, a helyben kalibrált és verifikált becslő módszer kiválasztása indokolt (Lu et al. 2005).

### **2.2.2. A potenciális párolgás meghatározásának módszerei**

A potenciális párolgás meghatározására mérési és numerikus becslő módszerek egyaránt rendelkezésre állnak, sőt, ezek egymásra épülő megoldásaival is találkozhatunk.

Fizikai megközelítésük alapján a modellek több csoportba sorolhatók. Ezek közül a legnagyobb múltra visszatekintő, egyben legtöbb eljárást magába foglaló típus az

*empirikus*, tapasztalati összefüggésekre támaszkodó módszerek. Az empirikus módszerek lehetnek hőmérséklet-, vagy sugárzás-alapúak, illetve kombinatív eljárások, mely utóbbiak a tudományos konszenzus szerint általában a legpontosabbnak tekinthetők.

*Hőmérséklet-alapú módszerek:*

Thorntwaite (1948) módszere klimatológiai szemléletű, input és output időléptéke havi felbontású. Ebből következően jobbra nagyobb területegységek párolgásának számítására alkalmazták:

$$ET_0 = 1,6 \cdot \left( 10 \frac{T_{eff}}{I} \right)^{f_i} \quad (2.9)$$

Hargreaves 1975-ben kidolgozott módszere (Hargreaves és Samani 1982) a klimatikus tényezők számos kombinációja, valamint a párolgás összefüggésének regressziós vizsgálataira épül. Vizsgálatai eredményeként a hőmérséklet és a sugárzás szerepét a párolgás nagyságának kialakításában 94%-ban állapította meg:

$$ET_0 = C_i (T + 17,78) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} \cdot R_a \quad (2.10)$$

Blaney és Criddle (1950) szintén széles körben elterjedt modellje ugyancsak hőmérséklet-alapú módszer. Különösen kis mennyiségű és kevésbé nagy időbeli felbontású bemenő adatállomány, valamint klimatikus léptékű számítások esetén javasolt alkalmazása (ld. Anyag és módszer c. fejezet).

Szász (1973) módszere helyi viszonyok között került kifejlesztésre, a Debrecen-kismacsi Agrometeorológiai Obszervatórium mérési programjára alapozva. A hőmérséklet mellett a légnedvesség, szélesebb és a mikroadvékciós tag szerepel a modellben, a számítás napi időléptékű (ld. Anyag és módszer c. fejezet).

Antal (1968a, b) modellje szintén hazai kísérletek eredményei alapján készült. A hőmérséklet és a telítési hiány, valamint a párolgás nagyságának összefüggésén alapuló számítás segítségével napi  $ET_0$  adatok állíthatók elő:

$$ET_0 = 0,74(e_s - e_a)^{0,7} (1 + \alpha_a \cdot T)^{4,8} \quad (2.11)$$

*Sugárzás-alapú módszerek:*

Priestley és Taylor (1972) egyenlete vízfelületek párolgásának számítására szolgált eredetileg. A kombinált típusba tartozó Penman-Monteith-egyenlethez képest egyszerűsítésként az aerodinamikus tag helyett tapasztalati úton meghatározott szorzótényező szerepel. (ld. Anyag és módszer c. fejezet)

Makkink (1957) és Turc (1961) módszere alapjaiban hasonló a Priestley-Taylor egyenlethez, havi, vagy annál hosszabb időszakok párolgásának meghatározására szolgálnak. Turc módszere ugyanakkor – bár hátrányaként említhető, hogy a légnedvességet nem veszi figyelembe – akár napi léptékű számítások végzésére is alkalmas:

$$ET_0 = (R_g + 50) \cdot \frac{0,013T}{T + 15} \quad (2.12)$$

*Kombinált módszerek:*

Penman (1948) modellje a mai napig számos egyéb becselő modell kiindulási alapja. A módszer a légköri energia- és vízgőztranszport komponenseit egyaránt számba vevő legelső kísérlet volt, alapelve, hogy a szenzibilis és a látens hőtranszport intenzitását ugyanazon tényezők határozzák meg:

$$\lambda E = \frac{(\Delta \cdot (R_n - G) + 73,64 \cdot \rho \gamma \cdot (1 + 0,54u) \cdot D)}{\Delta + \gamma} \quad (2.13)$$

Penman és Monteith (Monteith 1965) egyenlete az első továbbfejlesztett változata Penman módszerének. Már többféle növénytakaró, eltérő levélfelületű és magasságú kultúrák párolgásának megállapítására is alkalmas, mivel az állomány aerodinamikai tulajdonságait közvetlenül is hordozó tagot is tartalmaz. Számos további modellváltozat fejlődött ki az alapegyenletre alapozva, többek között a McNaughton-Black módszer (McNaughton-Black 1973), Doorenbos és Pruitt (1977) FAO-24 modellje, a Shuttleworth-Wallace (Shuttleworth és Wallace 1985), valamint a FAO által fejlesztett

Penman-Monteith FAO-56 (Allen et al. 1998) modell. A felsoroltak közül az anyag és módszer c. fejezetben közöljük a Penman-Monteith FAO-56 és a Shuttleworth-Wallace modellek formuláit.

*Tömegáram-alapú módszerek:*

Jellemzően havi felbontású modellek, melyek eredetileg vízfelszínnek párolgásának megállapítására készültek. Közös tulajdonságuk, hogy a légnedvességet leíró tagon kívül a szélesség jelenik meg nagy súllyal az egyenletekben. Legfontosabbnak tekinthető a Meyer (1915), Sverdrup (1946), Mahringer (1970), valamint a WMO (1966) által kidolgozott modell, közülük utóbbi kettőt ismertetjük az Anyag és módszer c. fejezetben.

*A potenciális párolgás meghatározása mérőeszközzel (Rosenberg 1974, Baros et al. 2006)*

A felszínről párolgással távozó vízmennyiség meghatározására, mérésére eltérő típusú mérőszeköz áll rendelkezésre:

*Párolgásmérő kádak:*

A mérés elve, hogy vízzel telt, szabadba helyezett és ismert felületű edény vízszintváltozásaiból következtetünk az elpárolgott víz mennyiségére, majd korrekciókat követően mm-ben kifejezve kapjuk meg az evapotranspirációt. A nemzetközi szabvány szerint a meteorológiai mérőállomásokon jelenleg az „A”-típusú, 0,25 m mélységű és 1,14 m<sup>2</sup> vízfelszínű kádat alkalmazzák.

A kádmérésekre több algoritmus is épül. Ezek mindegyike az „A”-kád mért értéke és egy empirikus tényező szorzatából áll:

$$ET_0 = E_{kád} \cdot K_{kád} \quad (2.14)$$

A koefficiens szerzőnként eltérő módon épül fel, és általában legfeljebb egy-két meteorológiai paraméterrel (szél, valamint légnedvesség) számol. Kád-alapú modellekre példa Pereira et al. (1995) és Allen et al. (1998) FAO-56 modellje (ld. Anyag és módszer c. fejezet). Az említetteken kívül gyakran alkalmazott még Snyder, Allen és Pruitt, Orang valamint Cuenca módszere (Tabari et al. 2011).



#### *Evaporiméterek:*

A talaj párolgásának mérésére szolgálnak. Előnyük, hogy viszonylag kis tömegű talajmintát igényelnek, de épp emiatt kevésbé alkalmasak a természetes körülmények között lezajló párolgás szimulációjára. Napjainkban ritkán alkalmazzák az eszköztípust, így az ide tartozó Popov-féle evaporimétert is.

#### *Evapotranspirométerek (liziméterek):*

A liziméterek a növényzettel fedett, nagy tömegű talajmonolitok evapotranspirációs vízvesztésének mérésére alkalmas eszközök. Több változatuk különíthető el mérési elvük, valamint a víz pótlásának technikai megoldása alapján, de mindre egyaránt jellemző, hogy csak korlátlan párolgás esetére értelmezhetőek eredményeik. Ismertek térfogati-, ezen belül átfolyó vizes, kompenzációs és speciális átfolyó vizes; valamint súlyliziméterek, melyek működhetnek mechanikus, elektronikus, illetve hidraulikus elven. A liziméterek előnye a valós növényállományokban jellemző körülmények viszonylag jó közelítése. Ugyanakkor beruházásigényesek, valamint a természetes növénytermesztési terek vízmérlegének igen változatos, mozaikos természete miatt eredményeik csak bizonyos fokú hiba mellett extrapolálhatók.

### **2.2.3. A tényleges párolgás meghatározásának módszerei**

A potenciális párolgáshoz hasonlóan a tényleges evapotranspiráció megállapítása céljára is számos módszer használatos, illetve léteznek kísérletek közvetett mérőrendszerek, ún. evapotronok kialakítására. A mérési eljárások közös alapja az elektronikus, multiparaméteres adatgyűjtés, majd ezekből a vízháztartási egyenleg ismeretlen tagjának, a tényleges párolgásnak a kiszámítása.

#### *Aerodinamikus módszerek:*

Thorntwaite és Holzman (1939) módszere, amint az aerodinamikus eljárások általában, két megkülönböztetett állományszinten mért légköri paraméterek alapján felírható gradiensekkel tekinti arányosnak a vízgőz kicserélődés intenzitását. A légkör egyensúlyi helyzetét (labilitás) figyelembevéve, és feltételezve, hogy a kicserélődési együttható minden egyes légköri tulajdonságra a mozgásmennyiség átviteli sebességével egyezik meg, a tényleges evapotranspiráció kiszámítási módja:

$$ET_a = \frac{0,16\rho(u_2 - u_1)(q_2 - q_1)}{\ln\left(\frac{h_2 + h_0}{h_1 + h_0}\right)^2} \quad (2.15)$$

Konsztantyinov (1963) módszere teljesen hasonló elvekre épül, megkülönböztetett mérési szintjei 0,5, valamint 2 m-es magasságban helyezkedtek el. Feltételezve, hogy a szélsébség növekedtével annak turbulens jellege is fokozódik, a párányomást és ennek gradiense a párolgás optimális aerodinamikai feltételei mellett a tényleges evapotranspirációval arányosnak véve, bármely felületre érvényes nagy időbeli felbontású (mm h<sup>-1</sup>) eredményhez jutott:

$$ET_a = 1,67B(e_{a,0.5m} - e_{a,2m}) \quad (2.16)$$

Monyin és Obuhov (1954) módszerében egy összetett turbulenciaparamétert is alkalmazott, mely a párolgás nagy pontosságú becslésére adott lehetőséget:

$$ET_a = 1,251 \cdot f^2 \frac{(e_{a,1} - e_{a,2})(u_2 - u_1)}{T_v \left[ \ln \frac{h_2}{h_1} \right]^2} \quad (2.17)$$

*Energiaegyenlegre épülő módszerek:*

Bármely felszín feletti légtérben a sugárzási egyenleg által meghatározott energiaegyenleg felbontható a légkörnek átadott szenzibilis hőenergia, a talaj által felhasznált energia, valamint a párolgás folyamatának látens hője összegeként. Bowen (Tanner et al. 1960; Perez et al. 1999):

megközelítési elve szerint ekkor a szenzibilis és látens hő aránya az alábbiak szerint írható fel:

$$\frac{H}{\lambda E} = \beta = \frac{\rho c_p}{\rho L} \cdot \frac{K_h}{K_v} \cdot \frac{dT/dH}{dq/dh} \quad (2.18)$$

K<sub>h</sub>, valamint K<sub>v</sub> hő- és vízgőz diffúziós együtthatókat a számítás során egyenlőnek feltételezzük.

Az egyenlet egyszerűsítésével a  $\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta q}$  (2.19), majd a  $\lambda E = \frac{R_n - G}{1 + \beta}$  (2.20)

összefüggéshez jutunk.  $\beta$  értéke ez alapján a különböző szinteken mért hőmérséklet és párányomás ismeretében kiszámítható Dyer (1974) nyomán:

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T / \Delta z}{\Delta e_a / \Delta z} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e_a} \quad (2.21)$$

A 2.20. sz. egyenlet alapján a párolgás ( $\lambda E$ ) nagyságát kapjuk meg.

*Vízháztartási (klimatológiai megközelítésű) módszerek:*

Elvük a vízháztartási egyenleg megoldása, abból a párolgás kifejezése a többi paraméter ismeretében. A vízháztartás alapegyenlete (Szász 1997b):

$$ET_c = Cs \pm E_f + K_{ve} + Sz \quad (2.22)$$

Az egyenlet tagjainak pontos mérése a csapadéktól eltekintve nehézkes, illetve a mozaikos termőhelyi viszonyok miatt bizonytalan az egyébként pontos mért adatok kiterjeszhetősége. E probléma még a talajnedvesség folyamatos, részletes monitorozása mellett is fennáll. A talajnedvességadatok felhasználása ezzel együtt is több vízháztartási elven működő módszernek képezi alapját.

Dunay et al. [1969. In: Varga-Haszonits 1977] a hazai gyakorlatban is gyakran alkalmazott módszert tett közzé. Az igen kis inputigényű modell a korábban elterjedt, ma már ritkábban használt kádas párolgásmérések pótlására is szolgált:

$$ET_a = \frac{1 - RH}{2 - RH} \cdot T \quad (2.23)$$

*Biofizikai megközelítés (Szász 1997b):*

A tényleges párolgás e típusú vizsgálata a talaj-növény-légkör vízforgalmi rendszerére Ohm-törvényét tekinti érvényesnek, az ún. „egyenáramú analógia elmélete” szerint írja

le. A rendszer alrendszerain átmenő vízmennyiség szempontjából minden részmechanizmus egy-egy ellenállásnak felel meg, melyek szintén felbonthatók részmechanizmusokra és az azokhoz tartozó ellenállásokra. Az elpárologtatható vízmennyiség az ellenállások alapján számítható, de a módszer ezek igen pontos ismeretét, mérését feltételezi (*Rijtema 1965*).

#### **2.2.4. A párolgási modellek értékelése**

Az eltérő fizikai megközelítés és az ezeken belül kifejlődött számos módszer, változat összehasonlítása bonyolult feladat, mivel a modellteljesítmény és -érékenység több helyi tényező függvénye. Egyidejű, azonos körülmények között történő tesztek kivitelezésére viszont általában csak korlátozott lehetőség van. Ugyanakkor a célok által megkívánt időbeli és térbeli felbontású, a klíma- és vegetációtípusra, adott növényállományra legalkalmasabb modell kiválasztása kritikus tényező. Az egyes algoritmusok kimeneti értékei között gyakran több száz mm-es különbség is adódhat tenyészidőszakonként, ami a felhasználás szempontjából is túlzottan nagy hibafaktort jelent (*Federer et al. 1996*).

A szakirodalom humid klimatikus viszonyok között a világszerte egyik leggyakrabban alkalmazott Penman-Monteith-FAO-56 modellt tartja legpontosabbnak a potenciális párolgás becslésére (*Jensen et al. 1990, Sumner és Jacobs 2005, Yoder et al. 2005, McMahon et al. 2012*).

Hasonlóan megbízhatónak találja a Penman-módszerből származtatott algoritmusokat, így a Shuttleworth-Wallace modellt és valamennyi kombinált eljárást Zhou (*2011*). Magyarozatként a fizikai alapokat illetően e módszertípus robosztus jellegét említi. Ugyancsak humid klímájú területekre (illetve hasonló karakterű időszakokra) több szerző is (*Lu et al. 2005, Adeboye et al. 2009*) a Priestley-Taylor módszert emeli ki, rámutatva annak a hőmérséklet- és sugárzás-alapú módszerek között kiemelkedő modellteljesítményére. Yates és Strzepek (*1994*) illetve Tabari et al. (*2011*) ezzel szemben megállapítja, hogy a Priestley-Taylor módszer általában fölülbecsli, a kád-alapú módszerek pedig alulbecslik a potenciális párolgás mértékét. Utóbbi szerző 31 modellt összehasonlító tanulmányában a Blaney-Criddle modellt külön is kiemeli a hőmérséklet-alapú eljárások közül.

Arid, valamint átmeneti klímátípusokon Er-Raki et al. (*2010*) szerint a sugárzás alapú modellek pontossága nem kielégítő, azonban helyi viszonyok között kalibrálva jobb teljesítményt is nyújthatnak, mint a hőmérséklet-alapúak, vagy akár a kombinált

modellek (Bois et al. 2005, Schneider et al. 2007). Általánosságban a száraz éghajlati viszonyok között végzett kísérletekben Rao – Rajput (1992) a Penman-Monteith FAO-56 modell és a sugárzás-alapú módszerek felülbecslését, míg a kád-alapúak alulbecslését állapította meg. A kád-koefficiensre épülő eljárások esetleges hibáira (pl. az állatok által fogyasztott vízmennyiség vagy az oázis effektus okozta pontatlanságok) Tanner (1968) és Lim et al. (2011) is felhívja a figyelmet.

A természetes felszínek feletti látens hőfluxusok meghatározásának standard technikája a Bowen-arány (BREB) módszer, melyet Gavilán és Berengena (2007) megállapítása szerint még az átmeneti klímátípusok változatos légköri feltételei mellett is viszonylag pontos eljárás. A módszer pontosságát a  $\beta$ -érték tipikusan nagy szórásintervalluma, illetve e probléma kezelésének hatékonysága határozza meg. Spittlehouse és Black (1980) összehasonlító elemzésében az ún. eddy-korreláció-, a sztóma-diffúziós ellenállás-, illetve a vízegyenleg-módszerekkel szemben alátámasztotta a Bowen-arány módszer használhatóságát növényállományokban, különösen erdőklíma vizsgálatok esetében. Hangsúlyozza azonban a mérések hibájának minimalizálását, valamint a  $\beta$ -érték precíz hibaanalízisének és szelekciójának fontosságát. Perez et al. (1999) ugyancsak rávilágít, hogy a mérőszensorok felbontási korlátai eredményezte hiba olykor az eredmények megbízhatóságát veszélyezteti, viszont az elvetendő hibás (éjjeli, ill. csapadékeseményhez köthető) adatmennyiség nagy aránya ellenére a módszer összességében jól használható a tényleges párolgás numerikus becslésére. Szintén Perez et al. (2008) dolgozott ki egy, a Bowen-arány módszert klimatológiai és biofizikai módszerekkel ötvözött eljárást. A modell fél-arid viszonyok között ugyan a szenzibilis hőáram nagyságát fölülbecsülte, a látens hőáramok esetében pedig kissé a mért értékek alá becsült, azonban a Penman-Monteith FAO-56 modellnél így is kisebb hibát eredményezett, bizonyítva ezzel a kombinatív eljárások létjogosultságát a gyakorlatban.

#### **2.2.5. A kukorica vízforgalma, az öntözési igény becslése**

A kukorica a jelentős vízigényű termesztett növényeink közé tartozik. Annak ellenére, hogy a gabonafélék közül a teljes szárazanyag termelést tekintve az egyik legnagyobb termőképességű faj, valamint vízhasznosító képessége is kiemelkedő, a hajdúhátai termőhelyi viszonyok között terméspotenciálját gyakran korlátozza vízhiány. A ténylegesen felhasznált víz mennyiségét nagyban befolyásolja a tápanyagellátottság, valamint egyéb, kór- és kártani, agrotechnikai, stb. tényezők. A vízellátottság szintjét tehát az éghajlati hatások csak részben határozzák meg (Pepó 2005). A vízellátottság

zavarait sok esetben nem a tenyészidő csapadékösszege, hanem a csapadék kedvezőtlen eloszlása okozza. Átlagos viszonyok között, statisztikai adatok alapján a legtöbb gazdasági növény vízigénye biztosított a térségben, azokban az évjáratokban azonban, amikor a tényleges párolgás értéke közel van a statisztikai minimumhoz, a párolgás vízigénye rendre nem teljesül (*Varga-Haszonits et al. 2008*).

Szász és Percze (1966) tanulmánya szerint a Hajdúhát körzetében az évek mintegy 24-44 %-ában a nyári félév 6 hónapjából legalább 3 az átlagnál szárazabb volt már az 1901-50-es időszakban is. Szász (1998) a kukorica vízhasznosulási tényezőjét a térségre  $68 \text{ mm t}^{-1}$ , illetve  $14,7 \text{ kg mm}^{-1}$ -ben állapította meg az 1960-79-es időszakra vonatkozóan, melyet a genetikai előrehaladás fokozatosan csökkentett (*Szász, 1968*). A kukorica evapotranspirációját és dinamikai vízigényét vizsgálta többek között Frank és Hank (1949), Denmead és Shaw (1959), Antal (1966), Petrasovits (1974), Kanemasu és Rosenthal (1976), Shaw (1976), Ritchie és Johnson (1990), valamint Suyker és Verma (2009). Eredményeik igazolták, hogy a kukorica víz-, s ezzel öntözési igénye elsősorban a címerhányás és csöskézés, másodsorban pedig a szárba indulás idején jelentkezik határozottan. A napi vízfogyasztás mértéke átlagosan 6,1 mm öntözetlen viszonyok mellett, míg korlátlan vízelátottságnál 7,6 mm-re tehető ugyanez az átlagérték a virágzás idején. A tenyészidőszak kumulált vízigénye Doorenbos és Kassam (1979) szerint általában 500-800 mm, Kozmáné et al. (1995) szerint pedig Magyarországon 350-500 mm között változik. A globális értékeket szembeállítva hazai összeggel, a magyarországi vízhasznosulási adatok igen jónak mondhatók. Ugyanakkor az átlagos évi 300 mm-es klimatikus vízhiány indokolja az öntözés szükségességét, amelyet fokoz a klímaingadozások nehezen előrejelezhető, de várhatóan erősödő trendje (*Antal 2000, Ligetvári 2008*).

Magyarországon a kukoricának  $11-13 \text{ t ha}^{-1}$  termésszint mellett  $140-160 \text{ mm ha}^{-1}$  öntövízigénye van, mely a tenyészidőben legfeljebb a 06.20-08.10 intervallumra terjed ki átlagos évjáratokban. Egy-egy alkalommal 40-60 mm vizet juttatnak ki, átlagosan 3-4 fordulóból álló öntözési rendszerben (*Késmárki 2003*). Gazdasági szempontból Kádár (1966) kifejezetten javasolhatónak tartja az öntözést olyan kedvező agronómiai adottságú területeken, mint a Hajdúhát. A jövedelmezőbb, eredményesebb öntözéses gazdálkodás előnyei mellett azonban ráirányítja a figyelmet a magasabb ráfordításokra, a nagyobb információellátottsági- és szakismereti igényekre is (*Cselőtei, 1967*).

Mind gyakrabban fogalmazódott meg az igény olyan információs rendszerek megalkotására, melyek az öntözés racionalizálása révén mérséklék az öntözéssel járó

növekvő kiadásokat. Az öntözés döntéstámogatásához mindenekelőtt a vízigény minél pontosabb becslésére volt szükség. A XX. század második felétől kezdve számos ilyen modell, illetve modellrendszer került kidolgozásra. A terület legeredményesebb kutatása a FAO-hoz, ezen belül többek között Allen, Doorenbos, Kassam, Pereira, Pruitt és Raes nevéhez kötődik. Öntözési modelljeik a párolgás becslésén alapulnak, de nem feltétlenül kalkulálják a teljes vízegyenleget, s annak minden tagját. Közöttük megtalálhatók az alkalmi használatra szánt kis inputigényű algoritmusok, valamint a több szubmodellből álló komplex döntéstámogató rendszerek is, mint a CROPWAT (FAO 1992) és az AQUACROP (Steduto et al. 2009). Az öntözővízigény modellezésére készült további modellek pl. a SWAP (Van Dam et al. 1997), SWATRE (Wesseling és van de Broek 1983), AGRIMET (Palmer 2005), illetve az Agroaqua (Huzsvai et al. 2011).

Az említett modellek többsége valamely potenciális vagy tényleges evapotranspirációt becslő modell kimenetére támaszkodik, a rá épülő párolgási modult pedig a növény fajára, fajtájára, hasznosítási típusára és fenológiai szakaszára jellemző növényi koefficienssel ( $K_c$ ) paraméterezik. A továbbiakban a kapott párolgási értékkel napi léptékben szimulálható az állomány vízegyenlege, melyből kalkulálható a szükséges öntözővíz, s a kijuttatás időzítése is. A növényi koefficiens meghatározása a potenciális és a növényre jellemző tényleges párolgás arányba állítása útján történik. Részletes adatbázist közöl erre vonatkozóan Allen et al (1998), de Magyarországon is folytak kutatások ez irányban (Antal és Posza 1983). A kukorica növényi koefficeinse tág határok között változik, általában 0,15-1,2 közötti a fenofázistól függően, de számos tényező befolyásolja értékét. A  $K_c$ -érték több részkoefficiensre bontásával lehetőség nyílik e tényezők közül minél többnek (pl. vízstressz, evaporáció és transpiráció elkülönítése, a fenofázisok, stb.) a lehető legpontosabb közelítésére, a számítási algoritmusba történő bevonására.

### 3. ANYAG ÉS MÓDSZER

#### 3.1. Klímaadatok, referenciamérések gyep fölött

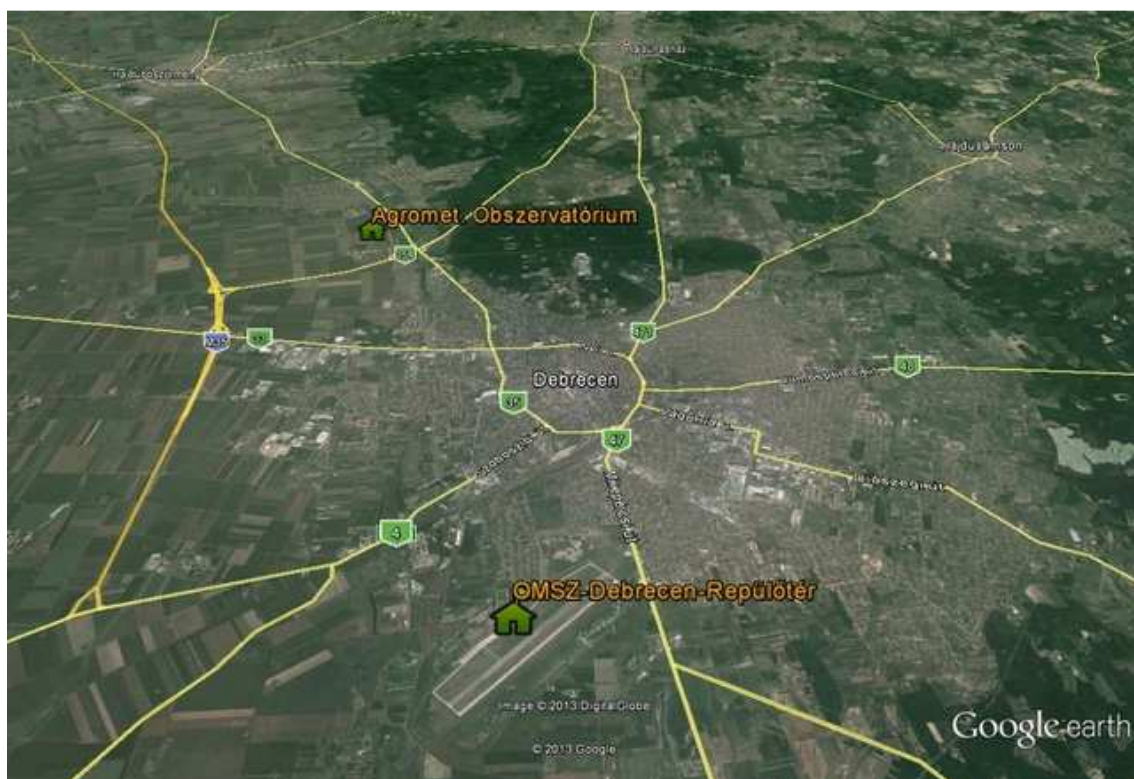
Vizsgálatainkhoz, elsősorban a potenciális párolgás becsléséhez nagy időbeli felbontású klímaadatokra volt szükség, melyeket két közeli, kiváló műszerezettségű mérő- és megfigyelőállomás méréssorozata szolgáltatott.

##### 3.1.1. A mérések helyszíne

*OMSZ – mérőállomás, Debrecen – repülőtér*

Az Országos Meteorológiai Szolgálat debreceni állomásának kutatási irányvonalunk szempontjából nagyon értékes kádpárolgás idősora indokolta az itt mért adatsor bevonását a vizsgálatokba. Az állomás Debrecen külterületén helyezkedik el, a városhatártól 1 km-re, délre. Talaja réti csernozjom, növényzete gyep, területe sík, jórészt beépítetlen, tereptárgyaktól mentes. Koordinátái: É 47,490°, K 21,611°, tengerszint feletti magassága 105 m (3.1. sz. ábra).

Az állomás adatsorából a 2005-2010-es időszak április-októberi periódusainak adatait használtuk fel.



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



## DE-ATK Agrometeorológiai Obszervatórium

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) szolgáltatta a vizsgálatokhoz szükséges klímaadatok legfontosabb részét. Az Obszervatórium a város külterületén (Debrecen-Kismacs) helyezkedik el, annak határától 2 km-re, északnyugatra. Koordinátái: É 47,577°, K 21,582°, tengerszint feletti magassága 125 m (3.1. sz. ábra). Területe a repülőtéri állomáshoz hasonlóan nyílt, de felszíne kevésbé sík, a közvetlen környezetéből néhány m-rel kiemelkedik. Növényzete rövidre nyírt gyeppel, de a környező területek szántóföldi művelés alatt állnak.

Az adatokat a potenciális evapotranspiráció becslésére a 2008-2011-es időszakban, a május-október periódus kiértékelésére használtuk fel.

### 3.1.2. A mért paraméterek, a mérések módja

A potenciális evapotranspiráció, a referenciapárolgás modellek inputjaként az 3.1. sz. táblázat paraméterei szolgálták az OMSZ-Debrecen-repülőtér állomás mérési programjából.

3.1. táblázat: A Debrecen-repülőtér állomáson mért meteorológiai paraméterek főbb mérés technikai jellemzői

Paraméter	Műszerszint	Mérőeszköz típusa	Lépésköz	Pontosság	Felbontás
hőmérséklet	2 m	Vaisala HMP-35	10 perc	±0,2 °C	0,1 °C
relatív légnedvesség	2 m	Vaisala HMP-35	10 perc	±2 %	0,1 %
szélsebesség	10 m	Vaisala WAA-151	10 perc	±0,5 m s <sup>-1</sup>	0,1 m s <sup>-1</sup>
globálsugárzás	2 m	K&Z CMP-11	1 óra	±1 %	0,1 W m <sup>-2</sup>
csapadék	1 m	Hellmann-csapadékmérő	1 nap	±2 %	0,1 mm
kádpárolgás	0 m	A-típusú kád	1 nap	±2,5 %	0,1 mm

A potenciális párolgás modelljeinek második, szűkebb körű vizsgálatához és az állományklíma vizsgálatokhoz a DE-ATK Agrometeorológiai Obszervatórium méréssorozatát használtuk fel (3.2. sz. táblázat).

**3.2. táblázat: A DE-ATK Agrometeorológiai Observatóriumban mért meteorológiai paraméterek főbb mérés technikai jellemzői**

Paraméter	Műszerszint	Mérőeszköz típusa	Lépésköz	Pontosság	Felbontás
hőmérséklet	1-2 m	Pt100-1/10	10 perc	$\pm 0,1$ °C	0,1 °C
relatív légnedvesség	1-2 m	Vaisala HMP-155	10 perc	$\pm 1-1,7$ %	0,1 %
szélsebesség	1-2-10 m	Vaisala WAA-151	10 perc	$\pm 0,5$ m s <sup>-1</sup>	0,1 m s <sup>-1</sup>
sugárzási egyenleg					
<i>globálsugárzás</i>	2 m	K&Z CMP-11	1 óra	$\pm 1$ %	0,1 W m <sup>-2</sup>
<i>reflex sugárzás</i>	2 m	K&Z CMP-6	1 óra	$\pm 2,5$ %	0,1 W m <sup>-2</sup>
<i>légköri h.h. visszasugárzás</i>	2 m	K&Z CGR-4	1 óra	$\pm 2,5$ %	0,1 W m <sup>-2</sup>
<i>talaj h.hull. kisugárzása</i>	2 m	K&Z CGR-3	1 óra	$\pm 2,5$ %	0,1 W m <sup>-2</sup>
csapadék	1 m	PG-200	1 nap	$\pm 2$ % mm	0,1 mm

### 3.2. 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 térbeli és időbeli feltérképezése azonban nagyon részletes és pontos mérést követel meg. Ehhez a lehető legtöbb szinten, a lehető leggyakoribb mintavételezéssel nyertünk adatokat az állomány légteréből és a gyökértérből.

#### 3.2.1. A mérések helyszíne, tartama

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 éveken az obszervatóriumtól 200-250 m távolságra jelöltük ki.

A mérés 2010 és 2011 évek július-szeptember időszakában történt, célunk mindenekelőtt a kifejlett kukoricaállományokat jellemző paraméterek pontos megismerése volt.

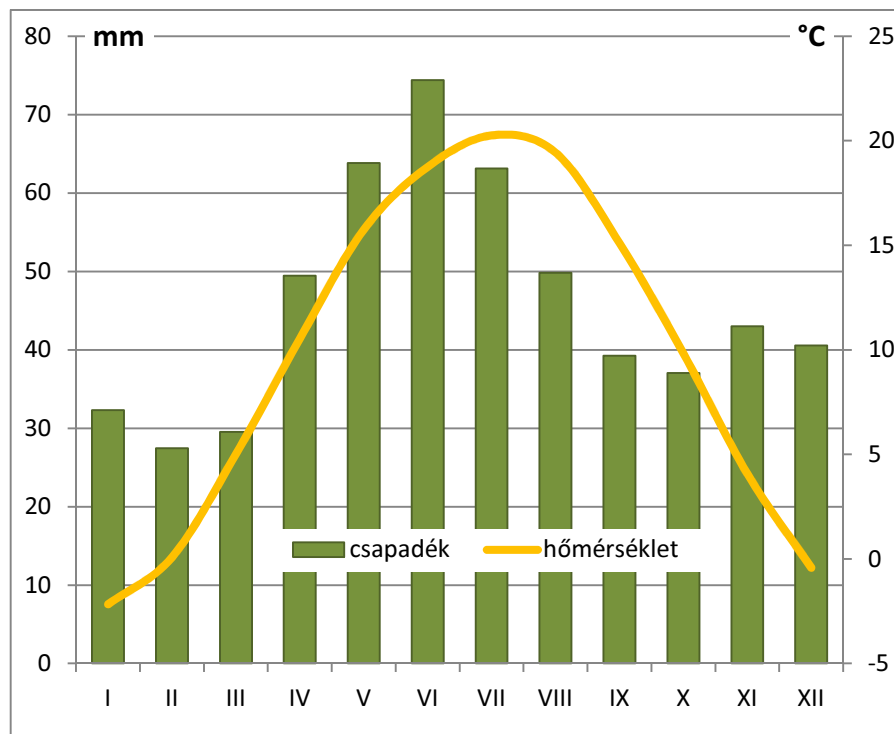
A mintaterület jellemzése:

a) *A mintaterület körzetének éghajlata:*

A Hajdúhát részeként a területre kontinentális éghajlat jellemző, a Köppen-féle osztályzás szerint *Dfb* besorolással. Az évi középhőmérséklet 10,1 °C az 1971-2000-es időszakra vonatkoztatva. A legmelegebb hónap középhőmérséklete nem éri el a 22 °C-ot, de átlagosan 5-6 hónapban 10 °C feletti. A leghidegebb hónap átlaghőmérséklete 0 °C alatti.

A csapadék eloszlása a sokéves átlagok alapján egyenletes, az év minden hónapjának átlagos csapadékösszege eléri a 30 mm-t. A havi csapadékösszegek jellegzetes képet mutatnak februári minimummal, júniusi maximummal, valamint novemberi másodlagos maximummal. Az évi átlagos összeg 550 mm körüli, de nagy szórás jellemzi. A minimális összeg 1971-2000 között 399, a maximális 777 mm volt, de épp a 2010-es kísérleti évben ezt jócskán meghaladó, 955 mm-es összeget mértünk. A havi összegek ugyanezen időszakban 0 és 176 mm között szóródtak. A csapadék és a hőmérséklet 30 éves átlagának alakulását a **3.2. sz. ábra** mutatja be.

A sugárzási mérleg legalacsonyabb havi értéke januárban áll be -30 W m<sup>-2</sup> körüli értékkel, a legmagasabb júliusban, 140 W m<sup>-2</sup>-rel.



**3.2. ábra: A csapadék és a hőmérséklet átlagos évi menete (Debrecen-Kismacs, 1971-2000.)**

b) *A mintaterület időjárásának főbb jellemzői a mikroklíma-mérések ideje alatt*

A 2010-es év vizsgált időszaka rendkívül csapadékos volt, egyenletes eloszlással. Mindvégig az átlagosnál magasabb légnedvességi értékek voltak jellemzők, július hónapban kiegyenlítően magas, míg augusztusban erősebben ingadozó hőmérsékletekkel. Szeptembert hűvös, csapadékos idő jellemezte.

A 2011-es vizsgált időszak csapadéka egyenlőtlenül oszlott meg a három hónap között, míg július extrém magas, augusztus átlag körüli, szeptemberben pedig extrém alacsony csapadékú volt. Hőmérsékleti szempontból viszont e három hónap volt a kiegyenlítettebb, szemben 2010 hasonló időszakával.

A sugárzási egyenleg havi átlagos értéke 2010 júliusában és 2011 augusztusában közelítette meg az átlagot, a többi hónapban az alatt alakult. A 10 m-es szélesség havi átlaga mindvégig a sokéves középértéknek megfelelően alakult (**3.3. sz. táblázat**).

**3.3. táblázat: A főbb időjárási paraméterek havi átlagának, ill. összegének alakulása a klímanormálhoz (1971-2000.) viszonyítva**

m.e.	30 éves átlag					2010					2011				
	T	RH	u	Rn	Cs	T	RH	u	Rn	Cs	T	RH	u	Rn	Cs
	°C	%	m s <sup>-1</sup>	W m <sup>-2</sup>	mm	°C	%	m s <sup>-1</sup>	W m <sup>-2</sup>	mm	°C	%	m s <sup>-1</sup>	W m <sup>-2</sup>	mm
V	15.9	69.3	3.0	138.2	51.1	16.0	84.3	2.9	98.5	148.0	16.2	62.5	3.1	132.7	46.6
VI	18.9	71.2	2.7	146.7	66.7	19.1	80.1	3.6	134.8	85.8	20.3	64.6	3.2	142.2	28.4
VII	20.5	69.6	2.6	143.2	83.7	21.7	82.6	2.6	139.1	91.7	20.3	76.1	2.2	120.2	219.7
VIII	19.6	72.6	2.4	120.3	57.3	20.6	82.6	2.3	122.3	100.3	21.3	68.1	2.0	133.2	39.9
IX	15.1	76.7	2.3	90.5	54.7	14.3	90.5	2.2	61.1	112.7	18.5	65.9	2.4	86.4	4.6

**T:** 2 m-es középhőmérséklet, **RH:** 2 m-es relatív nedvesség, **u:** 10 m-es szélesség, **Rn:** teljes sugárzási egyenleg, **Cs:** csapadékösszeg

c) *Talaja:*

A kísérleti helyszín talajának genetikai fő típusa csernozjom, melyet a korábbi években mészlepedékes csernozjomként tartottak nyilván, mára azonban a mintákból CaCO<sub>3</sub> csak nyomokban mutatható ki. A genetikai típuson belül a terület talaja a mély humuszrétegű (~100 cm) változatba tartozik, talajképző közete lösz. A művelt réteg a fizikai talajféleség tekintetében homokos vályog. A 2010-ben végzett talajvizsgálati eredmények alapján a Arany-féle kötöttségi száma 35,6, összes só tartalma 0,0116 %, pH-ja (KCl) 6,3, (H<sub>2</sub>O) 7,38, humusztartalma 2,03% volt. A makroelemek mennyisége a következőképpen alakult: P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: 238,7 ppm, K<sub>2</sub>O: 263,3 ppm, összes N: 0,118 %.

A talajvíz mélysége a területen 9-10 m közötti, ennek hatása a gyökértér vízegyenlegére elhanyagolható.

### 3.2.2. A mért paraméterek

A vizsgált kukoricaállományokban végzett mérési program három fő részből épült fel:

- talajnedvesség-mérések
- hőmérsékleti és nedvességi viszonyok mérése az állományban
- növényfenológiai mérések, megfigyelések.

### 3.2.3. Mérésmódszertan

#### *Talajnedvesség mérések*

A kísérleti helyszín talajának nedvességtartalmát gravimetriás módszerrel (Filep 1999) határoztuk meg, átlagosan 8 naponként. A talajszelvényt hasonló vizsgálatokkal megegyezően (Varga 2001) 100 cm-es mélységig, az alapkőzet szintjéig vizsgáltuk 10 cm-es rétegenként. Szintenként és ismétlésenként 1 db 80-90 cm<sup>3</sup> térfogatú mintát emeltünk ki a 10 cm átmérőjű kézi fúróval kitermelt, hozzávetőleg 780-790 cm<sup>3</sup> talajból. A mintákat mérlegelés után körülbelül 90-110 °C-on súlyállandóságig (nedvességtartalomtól függően általában 15-25 perces időtartamban) szárítottuk mikrohullámú eszközzel, légkeverés mellett, majd azonnali visszamérés következett. A mérés eredményeiből a nedvességtartalom tömegszázalékos megállapítása a 3.1. sz. egyenlet szerinti:

$$W_{m\%} = \frac{m_w - m_d}{m_d} \cdot 100 \quad (3.1)$$

A talajszelvény nedvességkészletének megállapításához a kapott adatokat mm-re számítottuk át:

$$W_{mm} = \frac{W_{m\%} \cdot \rho_b}{10} \cdot d \quad (3.2)$$

A talajmintákhoz a tenyésztési folyamán 1,05-1,44 g cm<sup>-3</sup> között folyamatosan növekvő térfogattömeg értékek tartoztak.

A mintaterület 1 m mélységű talajszelvényére korábbi (2008) vizsgálatok alapján a következő vízkapacitási értékeket tekintettük érvényesnek:

Szántóföldi vízkapacitás (FC):	292 mm m <sup>-1</sup>
Holtvíz tartalom (HV):	126 mm m <sup>-1</sup>
Diszponibilis víztartalom (DV):	166 mm m <sup>-1</sup>

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

#### *Hőmérséklet és légnedvesség mérések*

A növényállomány légterének hőmérsékleti és nedvességi profilját nagy részletességgel mértük. A mérőrendszert folyamatos mérésre terveztük és egy átlagos, 2-2,5 m magasságú kukoricaállományra és az afeletti térrészre méreteztük. Ehhez összesen 16 db árnyékolt *Voltcraft DL-120 TH* típusú, mobil adatgyűjtő készüléket használtunk. Függőleges, fém tartóállványzaton 3,0 m-es magasságig, 0,25 m-es lépésközzel egyszerre 12 mérőegységet állítottunk be (**3.4. sz. ábra**).

##### *a) Az adatgyűjtők kalibrációja:*

A mérések során az adatgyűjtőket egyenként folyamatosan ugyanazon magassági szinten üzemeltettük mindkét vizsgált időszakban. A szenzorral egybeépített adatgyűjtő modul a gyártói információk szerint a **3.4. sz. táblázatban** közölt műszaki adatokkal jellemezhető:

**3.4. táblázat: A Voltcraft DL-120 TH adatgyűjtők névleges mérés technikai jellemzői**

<b>Paraméter</b>	<b>Felbontás</b>	<b>Pontosság</b>	<b>Mérési tartomány</b>
hőmérséklet	0,1 °C	± 1°C (0-40 °C között)	-40 - +70 °C
relatív légnedvesség	0,1 %	± 3 % (40-100 % között)	0-100 %

A kutatási célokhoz igazodva a szenzorok pontosságát kereszt-kalibrációval teszteltük. A tesztek célja mindenekelőtt az adatgyűjtők összehasonlítása, a tényleges pontosság meghatározása, valamint a bázisállomás mérési programjával történő megfeleltetés volt. Összesen 7 diagnosztikai méréssorozatot végeztünk +1,7 és +32,4 °C között, 130 000 adatpontot meghaladó mintaszámmal. Eredményeink alapján a 16 eszköz adatai közötti eltérés elsősorban szisztematikus, adatgyűjtőnként állandó volt. Az egyedi hiba értéke -0,6 – +0,5 °C és -1,2 – +1,1 %, szórása mindössze 0,04-0,18 °C illetve 0,06-0,21 % között változott. Az eltéréseknek az adott paraméter értékintervallumától való függése a kísérlet szempontjából lényeges +15 – +32 °C közötti tartományban állandónak bizonyult mind a hőmérséklet, mind pedig a relatív páratartalom tekintetében. Az eszközök két-két adatsorát egyetlen konstans értékkel normalizáltuk a standard eszközhöz. Etalonként a 2,00 m-es szinten működő, 8-as számmal jelölt adatgyűjtőt

választottuk, az ettől való közepes eltérések, azaz a korrekciós tényezők adatgyűjtőnként változtak (3.5. sz. táblázat).

3.5. táblázat: Az egyes adatgyűjtőkhöz rendelt egyedi korrekciós konstansok

	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>T</b>	0,07	-0,13	-0,34	0,04	0,09	0,17	0,14	0,03	-0,14	0,19	-0,02	-0,22	-0,12	0,39	-0,21
<b>RH</b>	0,48	0,60	0,16	-0,24	0,38	0,71	0,49	-0,85	-0,88	0,42	0,04	-0,13	-1,21	-1,15	-0,74

**T: hőmérséklet (°C)**

**RH: relatív légnedvesség (%)**

Az Obszervatórium 2 m magasságban elhelyezett hőmérséklet és légnedvesség mérő műszereihez történő kalibrációt a kiemelt, 8-as sorszámú adatgyűjtőnkkel végeztük el. Adatgyűjtőink hibája ebben az összehasonlításban már nem tekinthető szisztematikusnak, ugyanakkor mértéke is elmarad a két műszertípus értéke, költsége alapján várhatótól. Tekintve, hogy a két szóban forgó adatsort együttesen számítási feladatokra nem, csupán szemléltetési céllal alkalmaztuk, az átlagosan +0,31 °C és -1,74 %-nak adódott hibát elfogadhatónak találtuk. Ez esetben is elvégeztük azonban a korrekciót, a bemutatott adatállományokat az ezek értéktartományának megfelelő, jellemző hiba nagyságával arányos korrekciós konstansokkal normalizáltuk.

Az adatgyűjtők meglepően nagy pontossága mellett fény derült azonban azok egy kevésbé előnyös tulajdonságára is. A telítettséget közelítő légnedvességi állapot (csapadékesemény vagy páráság) esetén tipikusan és jelentősen megnő az obszervatóriumi, hitelesített műszerhez képest mérhető eltérés negatív irányban. A 4-6 %-ot kitevő hiba azonban felhasználási céljainkat tekintve nem jelentős, mivel az általunk becsülni kívánt tényleges párolgás értéke épp a hasonló időjárási helyzetekben minimális, ebből következően a fellépő hiba elhanyagolható.



3.3. ábra: Az adatgyűjtők árnyékolása

*b) Árnyékolás*

A mérések pontosságának biztosítása megköveteli a sugárzással szembeni védelmet, árnyékolást (*Fuchs-Tanner 1960, WMO 2006*). Állományklíma méréseink esetében az állománytér különböző pontjain elhelyezett egyes szenzorok sok esetben merőben eltérő környezetben foglalnak helyet, elsősorban a levélfelület-sűrűség alakulásának és a véletlenszerű levélállásnak a függvényében. Az árnyékolók e véletlenszerű hatások kiszűrésében is szerepet játszanak, ezzel is támogatva a minél jobb összehasonlíthatóságot.

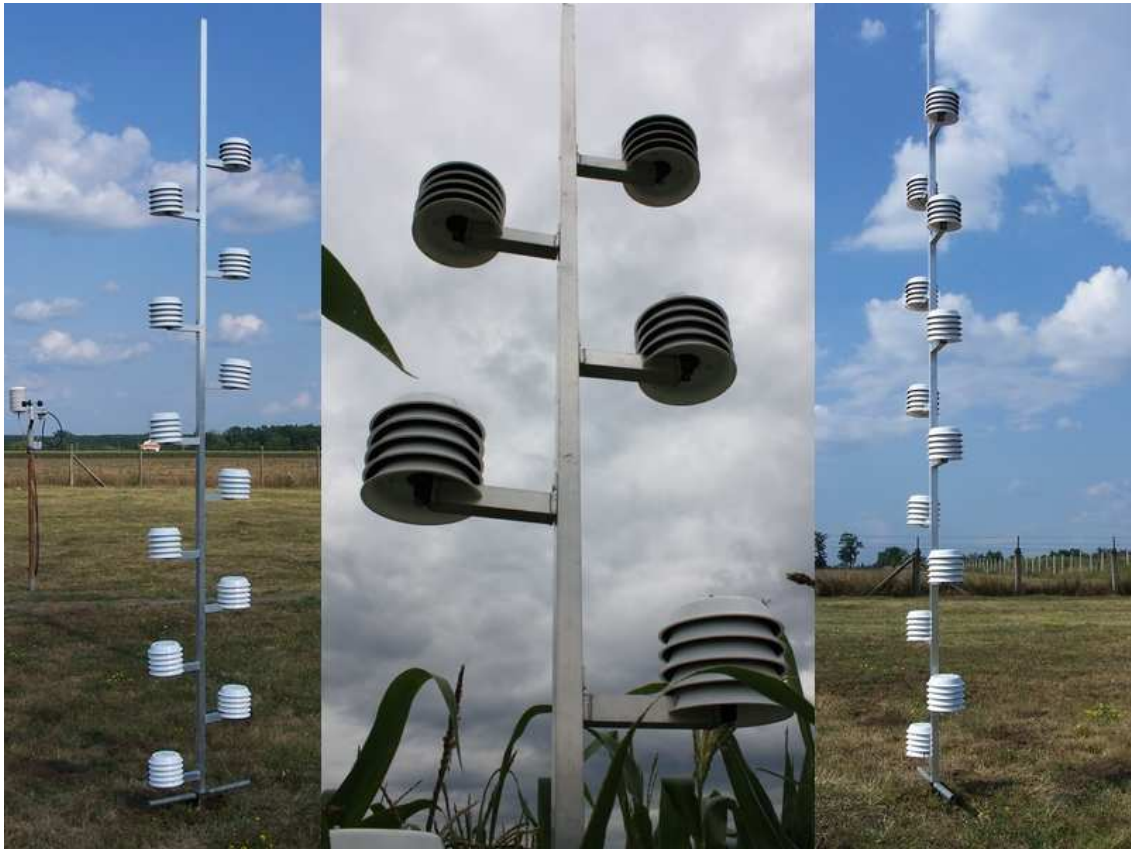
Az adatgyűjtők védelmére 5 db fehér színű, vastag falú polipropilén tányérból álló árnyékolókat készítettünk (**3.3. sz. ábra**). A 16 cm átmérőjű árnyékolók minden lamellájának alsó felülete, a legalsó tányér kivételével fekete fedőfestést kapott. Az adatgyűjtők az árnyékolók tengelyében kialakított furatban foglaltak helyet úgy, hogy a szenzor körül elegendő szabad légtér maradjon. Az árnyékolóból és a kombinált adatgyűjtő-szenzor együttesből álló mérőegységek tömege átlagosan 320 g volt. A könnyített kivittel a nagy tömeg okozta hőtehetetlenséget, és az ezzel járó pontosságcsökkenést minimalizáltuk.

*c) Elhelyezés az állományban*

A mérések a két kiválasztott tenyészév, 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.



3.4. ábra: Az állományi mikroklima mérésekre épített mérőrendszer

A rendszer pontos elhelyezését a **Függelék F.1 – F.2. sz. ábrái** mutatják be, míg maga a mérőrendszer – részben még állományon kívül felállítva – a **3.4. sz. ábrán** látható.

#### *Növényállományi mérések, megfigyelések*

##### *a) A levélfelületi index (LAI) meghatározása:*

A vizsgált időszakokban 10-12 naponta végeztünk fenológiai méréseket, megfigyeléseket. Az aktív levélfelületi index méréséhez mintavételként 5-5 növény adatait vettük fel. Feljegyzésre került az élő (zöld) levelek száma, hossza, szélessége, majd ezekből az adatokból a LAI [ $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$ ] kiszámítása a Montgomery – képletet alkalmaztuk:

$$\text{LAI} = \text{LA} \cdot k_a \cdot \text{PPD}, \quad (3.3)$$

melyben:

$$\text{LA} = L \cdot w \quad (3.4)$$

b) A növénymagasság ( $h$ ) mérése, növekedési függvény

A levélfelületi mintavételezések alkalmával mértük a teljes növénymagasságot is a maximális érték eléréséig. A párolgási folyamatokban a hím virágzat (címer) szerepe nem jelentős, az állományfelszín aerodinamikája szempontjából viszont számottevő, ezért számításainkat a teljes magasságra végeztük.

A növénymagasság adatok és a levélfelületi index napi adatsorra 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 függvényváltozatot választottuk ki. A két tenyészév növekedési görbéjének elkészítéséhez a logisztikus függvény bizonyult legmegfelelőbbnek. A LAI tenyészidei változását leíró görbékhez növekvő fázisban szintén a logisztikus-, míg a csökkenő fázisokban a Gompertz függvénnyel kapott  $y$ -értékek mutatták a legjobb illeszkedést a mért adatpontokkal.

A logisztikus függvény:

$$Y' = \frac{a}{1 + e^{b - cx}} \quad (3.5)$$

A Gompertz-függvény:

$$Y' = a \cdot e^{-be^{-cx}} \quad (3.6)$$

(3.5) és (3.6) egyenlet paraméterei:

$$a = \frac{2Y_0 \cdot Y_1 Y_2 - Y_1^2 \cdot (Y_0 + Y_2)}{Y_0 Y_2 - Y_1^2} \quad (3.7)$$

$$b = \ln \frac{a - Y_0}{Y_0} \quad (3.8)$$

$$c = \frac{1}{n} \ln \frac{Y_0(k - Y_1)}{Y_1(k - Y_0)} \quad (3.9)$$

(A LAI és állománymagasság tenyészidei menetét és a mért értékeket a **4.1. sz. ábra** mutatja be a vizsgált időszakokra vonatkozóan, az Eredmények c. fejezetben.)

### 3.2.4. Az állomány termesztéstechnológiai jellemzése

2010-ben a területen mezoparcellás (parcellánként 2,8m x 45,2m = 126,56 m<sup>2</sup>) kukorica kísérlet került beállításra 0,7 m sortávolsággal és 0,21 m tőtávolsággal vetve, mely 66700 tő ha<sup>-1</sup>-nak felel meg. A kísérletben FAO 300-400-as éréscsoportú, kódolt számú kukorica hibridek szerepeltek. A vetés ideje 04.29, míg az 50 %-os kelés napja 05.07-e volt. A hibridek 50%-os nővirágzása a 07.12-16. közötti időszakra esett.

2011-ben a területen egységesen FAO 360-as éréscsoportba tartozó hibridkukoricát termesztettek, 70000 tő ha<sup>-1</sup> állománysűrűséggel. A vetés 05.02-án történt, a kelés ideje 05.13-a volt. Az 50 %-os nővirágzás 07.06-13. közötti szakaszra volt tehető.

A terület kukoricaállományai egyik kísérleti évben sem részesültek öntözésben; a 2010-es év csapadékos jellege miatt erre nem volt szükség, a 2011-ben termesztett üzemi kukorica termesztéstechnológiája pedig eleve nem tartalmaz öntözést a Fajtakísérleti Állomás gyakorlatában.

### 3.3. A potenciális evapotranspiráció (referenciapárolgás) becslésének módszerei

A potenciális párolgás meghatározásának módszerei közül összesen 10-et választottunk ki összehasonlító elemzés és érzékenységvizsgálat céljára. A kiválasztás legfontosabb szempontja volt, hogy a gyakorlatban leginkább elterjedt elv, megközelítés legalább két-két módszere szerepeljen a vizsgálatban. 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 adatokra építve. A következőkben felsoroljuk a vizsgált módszerek alapösszefüggéseit, azok fizikai elve szerint csoportosítva.

#### 3.3.1. Kádpárolgás-alapú módszerek

- Pereira modell: (Pereira et al. 1995)

$$ET_0 = E_{pan} \cdot K_1 \quad (3.10)$$

$$K_1 = \frac{0.85(\Delta + \gamma)}{[\Delta + \gamma(1 + 0.33u_{2m})]} \quad (3.11)$$

## Empirikus módszerek:

### 3.3.2. Hőmérséklet-alapú módszerek

- Blaney–Criddle-modell: (*Blaney–Criddle 1950, Doorenbos–Pruitt 1977a, Burman–Pochop 1994*):

$$ET_0 = a_1 + b_1 [p(0.46 \cdot T + 8.13)] \quad (3.14)$$

$$a_1 = 0.0043 RH_{\min} - (n/N) - 1.41 \quad (3.15)$$

$$b_1 = 0.82 - 0.0041 RH_{\min} + 1.07(n/N) + 0.066 u_{2d} - 0.006 RH_{\min} (n/N) - 0.0006 RH_{\min} u_{2d} \quad (3.16)$$

- Szász-módszer: (*Szász 1973*)

$$ET_0 = 0.00536 \cdot (T + 21)^2 \cdot (1 - RH)^{\frac{2}{3}} \cdot f(u) \quad (3.17)$$

$$f(u) = 0.0519 \cdot u_{2m} + 0.905 \quad (3.18)$$

### 3.3.3. Sugárzás-alapú módszerek

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

$$ET_0 = a_2 + b_2 \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \frac{R_g}{\lambda} \quad (3.19)$$

$$a_2 = -0.3 \quad (3.20)$$

$$b_2 = c_0 + c_1 RH + c_2 u_{2d} + c_3 RH u_{2d} + c_4 RH^2 + c_5 u_{2d} \quad (3.21)$$

- Priestley–Taylor modell: (*Priestley–Taylor 1972, McNaughton – Jarvis 1983*)

$$ET_0 = \frac{\alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G)}{\lambda} \quad (3.22)$$

$$\alpha = 1 + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{r_c}{r_a} \quad (3.23)$$

### 3.3.4. Tömegáram-alapú módszerek

- WMO-1966: (*WMO 1966*)

$$ET_0 = (0.1298 + 0.0934 u_{2m}) \cdot (e_s - e_a) \quad (3.24)$$

- Mahringer-modell: (Mahringer 1970)

$$ET_0 = 0.1572 \cdot \sqrt{3.6u_{2m}} \cdot (e_s - e_a) \quad (3.25)$$

### 3.3.5. Kombinált módszerek

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

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_{2m} (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_{2m})} \quad (3.26)$$

- Shuttleworth–Wallace modell: (Shuttleworth–Wallace 1985)

$$ET_0 = \frac{C_c \cdot T_r + C_s \cdot E}{\lambda} \quad (3.27)$$

## 3.4. A tényleges párolgás becslésének módszerei

A növényállomány által ténylegesen elpárologtatott vízmennyiség becslésére számos megközelítés létezik, melyek közül a legegyszerűbb, leggyakorlatiasabb megoldásokat részesítettük előnyben. Ugyanakkor legalább két megközelítés összehasonlítását, tesztjét is célul tűztük ki, ezért erre egy vízháztartási egyenleg-alapú, illetve egy energiaháztartáson alapuló módszert választottunk.

### 3.4.1. A FAO vízforgalmi modellje – kettős növényállomány-koefficienssel

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

A modellezés alapösszefüggése a növényállomány tényleges evapotranspirációjának megállapítását célozza:

$$ET_{c\ adj} = (K_s \cdot K_{cb} + K_e) \cdot ET_0 \quad (3.28)$$

- a) A növényi párolgási együttható számítása:

A modell a növény vegetációs időszakát 4 szakaszra bontja. Az egyes szakaszok tipikus hosszát és az azokra jellemző növényállományi együtthatókat a **3.7. sz. táblázat** mutatja

be az általunk vizsgált FAO-300-360 érési csoportba tartozó kukorica hibridekre vonatkozóan:

**3.6. táblázat: A FAO ajánlás szerinti tenyészidő és állományi koeficiens értékek**

	Kezdeti (INI)	Fejlődési (DEV)	Közép (MID)	Utó (LATE)	Teljes vegetációs idő
Hossz (nap)	30	40	50	50	170
$K_{cb}$	0,15	-	0,95	0,15	-

**INI:** keléstől az intenzív növekedés megindulásáig; **DEV:** az intenzív növekedés szakasza a virágzás kezdetéig; **MID:** virágzástól az öregedés kezdetéig; **LATE:** az öregedés kezdetétől a betakarításig

A megadott koeficiens értékek az egyes szakaszok leírására, az értékeket interpolálni szükséges. Bármely  $i$ -edik nap  $K_{cb}$  értékének meghatározásának módja:

$$K_{cbi} = K_{cb\ prev} + \left[ \frac{i - \sum(L_{prev})}{L_{stage}} \right] \cdot (K_{cb\ next} - K_{cb\ prev}) \quad (3.29)$$

b) A talajpárolgás-koeficiens számítása:

$$K_e = MIN \left[ K_r \cdot (K_{c\ max} - K_{cb}); (f_{ew} \cdot K_{c\ max}) \right] \quad (3.30)$$

$$K_{c, \max} = MAX \left[ 1,2 + (0,04 \cdot \{u - 2\} - 0,004 \cdot \{RH_{\min} - 45\}) \cdot \left( \frac{h_a}{3} \right)^{0,3}; K_{cb} + 0,05 \right] \quad (3.31)$$

$$K_r = MAX \left[ HA \left( D_{e,i-1} < REW; 1; \frac{TEW - D_{e,i-1}}{TEW - REW} \right); 0 \right] \quad (3.32)$$

$$f_{ew} = MIN(1 - f_c; f_w) \quad (3.33)$$

A csapadék és a modellben feltételezett esőztető öntözési mód esetében  $f_w$  értéke 1.

$$f_c = MAX \left[ \left( \frac{K_{cb} - K_{c\ min}}{K_{c\ max} - K_{c\ min}} \right)^{(1+0,5 \cdot h_0)}; 0,01 \right] \quad (3.34)$$

A tesztállomány kelése napján  $K_{c \min} = K_{cb \text{ ini}}$ .

c) A talajvízkészletek napi értékeinek számítása:

$$TEW = (FC_e - 0,5 \cdot WP_e) \cdot Z_e \quad (3.35)$$

A felső (evaporációs) talajréteg mélysége ( $Z_e$ ) értéke 0,10m.

Mért talajnedvességi adatok hiányában, megfelelő téli/tavaszi talajvíz-feltöltődés esetén, ha a vízkészlet a szántóföldi vízkapacitást közelíti,  $D_{e,i-1} = TEW$ .

A kísérleti terület talajának evaporatív rétegre jellemző vízkészlet adatok a következők:

- REW=12,5 mm
- TEW=25 mm

A talajrétegből fogott vízmennyiség kiszámításának alapegyenlete:

$$D_{e,i} = D_{e,i-1} - (P_i - RO_i) - \frac{I_i}{f_w} + \frac{E_i}{f_{ew}} + T_{ew,i} + DP_{e,i}, \quad (3.36)$$

melyben:

$$P_{eff} = 0, \text{ ha } P_i \leq 0,2 \cdot ET_0, \text{ egyébként } P_{eff} = P_i \quad (3.37)$$

$$E_i = K_e \cdot ET_0 \quad (3.38)$$

$DP_{e,i}$  a leszivárgási veszteség a  $FC_e$  -t meghaladó víztartalom esetén. Értékének meghatározásakor eltértünk az eredeti modelltől és általánosan 0-nak vettük, a  $D_{e,i} = 0$  esetére  $DP_{e,i} = I + P_{eff,i} - ET_{c,adj}$  összefüggéssel számoltunk.

A transzspirációs-redukciós koefficiens számítása:

A vízstressz okozta csökkent vízfelvétel hatását a vízforgalomra a modell a  $K_s$  szorzó bevezetésével oldja meg:

$$D_r \leq RAW \text{ esetén } K_s = 1, \quad (3.39)$$

egyébként :

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} \quad [-]$$

$$TAW = (FC_r - WP_r) \cdot Z_r \quad (3.40)$$

Mért gyökerezési mélység adatok hiányában a  $Z_r$  maximális értékét a kukoricaállományra 1,00 m-nek vettük.

$$RAW = p \cdot TAW \quad (3.41)$$

„p” tényező adott napra történő kiszámítása ( $p_i$ ):

$$p_i = p + 0,04 \cdot (5 - ET_c) \quad (3.42)$$

Értéke növényfajonként és hasznosítási irányonként rögzített, a vizsgált kukoricaállományokra 55,0%-os értéket feltételeztünk.

Minden  $i$ -edik nap  $D_r$ -értékének meghatározása:

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P_i - RO_i) - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (3.43)$$

A  $CR_i$  kapilláris vízemelés nagyságát a modell eredendően 0-nak veszi.

Az állomány tényleges párolgása bármely  $i$ -edik napra:

$$ET_{c,adj,i} = HA[D_r \leq RAW; K_c \cdot ET_0; (K_s \cdot K_{cb} + K_e) \cdot ET_0] \quad (3.44)$$

$K_s$  stresszoefficiens tényészidei kezdő értéke a modellben mindig 1.

A  $DP_i$  a leszivárgási veszteséget reprezentálja a  $FC_e$  -t meghaladó víztartalom esetén. Értékét az evaporatív rétegnél leírtak szerint itt is 0-nak vettük, a  $D_{r,i}=0$  esetére pedig a



$$DP_i = I_i + P_{\text{eff},i} - ET_{c,\text{adj}} \quad (3.45)$$

összefüggéssel számoltunk.

Az adott  $i$ -edik nap öntözővíz igényét ( $I_i$ ) a modellben a  $D_{r,i}$ -RAW összefüggés fejezi ki. A ténylegesen kijuttatott vízmennyiséget gyakorlati szempontok figyelembevételével állapítottuk meg, a következő feltételek szerint:

- a legkisebb kiadható mennyiség 8 mm, ezért

$$\text{ha } D_{r,i}\text{-RAW} < 8, \text{ akkor } I_i = 0, \text{ illetve} \quad (3.50)$$

$$\text{ha } D_{r,i}\text{-RAW} \geq 8, \text{ akkor } I_i = D_{r,i}\text{-RAW} \quad (3.51)$$

- az öntözési mód esőztető rendszerű, öntözési stratégiája átlagos
- maximális kiadható vízádag egy napra vonatkoztatva: 20 mm.

A két kísérleti évben a modellt március hónaptól futtattuk, hogy a vetés napjára minél jobban közelítse a modell a valós talajvízkészletet. A kora tavaszi időpontban a felső 0,2 m-es réteg vízkészlete az esetek igen nagy számában – így a két modellezett tenyészévben is – gyakorlatilag elérte a szántóföldi vízkapacitást. A  $D_e$  és  $D_r$  értékét így 0-nak vettük, azaz szántóföldi vízkapacitásig telített talajállapotot feltételeztünk.

### 3.4.2. A tényleges párolgás becslése Bowen-arány módszerrel

A növényállomány által ténylegesen elpárologtatott vízmennyiség meghatározási módszerének alapja a terület energiaforgalmának számszerűsítése. Adott növényállomány energiaegyenlege általánosan a következőképpen írható fel:

$$R_n = \lambda E + H + G \pm A \quad (3.52)$$

A fluxusok közül  $R_n$  megállapodás szerint a talaj irányában pozitív,  $G$  a talajfelszíntől lefelé mutató irányban ugyancsak pozitív előjelű. Ezzel szemben  $\lambda E$  és  $H$  a talajfelszíntől felfelé irányuló áramok esetén vesz fel pozitív előjelet.

Az egyenlet felírásához szükséges sugárzási egyenleget az Agrometeorológiai Observatóriumban mért négykomponensű teljes sugárzási mérleg adatsor szolgáltatta.

A látens- és szenzibilis hőáramot közvetlenül az állomány feletti hőmérséklet és légnedvesség méréseinkből számítottuk, míg a talajhőáramot empirikus összefüggések alapján becsültük.

A látens- és szenzibilis hőáramok kiszámításához a Bowen-arány-módszert használtuk. A Bowen-arány – amennyiben a szenzibilis és látens hőáramokra egyaránt azonos turbulens diffúziós együtthatót feltételezünk – két szint (esetünkben mindkét vizsgált időszakban  $z_1=2,50$  és  $z_2=3,00$  m) közötti hőmérsékleti- és párányomás gradiens hányadosaként értelmezhető.

$$\beta = \gamma \cdot \frac{\partial T \cdot \partial z^{-1}}{\partial e \cdot \partial z^{-1}} = \gamma \cdot \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (3.53)$$

A pszichrometrikus konstans ( $\gamma$ ) számítása:

$$\gamma = \frac{c_p \cdot P_a}{\varepsilon \cdot \lambda} \quad (3.54)$$

A Bowen-arány felírása a fentiekből következően az alábbi módon is történhet (*Tanner et al. 1960; Perez et al. 1999*):

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} \quad (3.55)$$

Az energiamérleg alapján a látens és a szenzibilis hő számításának formulája a következőképpen alakul:

$$\lambda E = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (3.56)$$

$$H = \frac{\beta}{1 + \beta} \cdot (R_n - G) \quad (3.57)$$

A talajhőáram mérésére az állományban nem került sor, de meghatározható a sugárzási egyenleg, valamint az állomány levélfelületi indexének, vagy az NDVI-nek ismeretében (*Kustas-Daughtry 1990*).

$$G = (0,325 - 0,0208 \cdot NDVI) \cdot R_n \quad (3.58)$$

Az NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) területi vegetációs aktivitást mérő indexszám. A mért LAI értékeket erre számoltuk át hasonló talajadottságú mérések alapján (*Gitelson 2004*).

$$NDVI = 0,2328 \cdot \ln(LAI + 0,8513) \quad (3.59)$$

A vizsgálat során 1 perces átlagadatokat alapján számítottuk a hőmérsékleti gradienseket és a Bowen-arányt. Ezt követően óras időlépcsőre váltva a szenzibilis hőáramokat különítettük el, majd a víz párolgáshőjével osztva a tényleges evapotranspirációt ( $ET_{c,BR}$ ) határoztuk meg.

A Bowen-arány jellegéből fakadóan jelentős hibafaktorról terhelte (*Perez et al. 1999*), így az 1 perces számítások folyamán szelekciós eljárást iktattunk be. A gradiensek előjelváltásaihoz kötődő kiugró értékeket az alábbi feltétel nem teljesülése esetén elvetettük:

$$-1 \leq \beta \leq 1 \quad (3.60)$$

A kieső adatok száma a vizsgált hónapokra vonatkoztatva mindössze 0,61% volt.

### 3.5. A modellek statisztikai értékelése

A statisztikai értékeléshez használt főbb mutatók kiszámítási módja az alábbi volt:

RMSE (Root Mean Square Error): Hibaszórás

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.61)$$

MBE (Mean Bias Error): Szisztematikus hiba

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \quad (3.62)$$

MAE (Mean Absolute Error): Átlagos abszolút hiba

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (3.63)$$

PE (Percentage Error): Abszolút százalékos hiba (%)

$$PE = \sum_{i=1}^n \frac{|\bar{x} - \bar{y}|}{\bar{y}} \cdot 100 \quad (3.64)$$

r: Pearson-féle korrelációs együttható

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.65)$$

CV: Variációs koefficiens (%)

$$CV = \frac{St.D(x)}{\bar{x}} \cdot 100, \quad (3.66)$$

## 4. EREDMÉNYEK

### 4.3. Kukoricaállományok mikroklímája

Vizsgálataink egyik legfontosabb célkitűzése volt a növényállományok belsejében uralkodó klimatikus viszonyok részletes feltérképezése, jellemzése. Az egyes meteorológiai paraméterek értékei jellegzetes eloszlást mutatnak az állománytérben, annak mikroklímája nagyon szorosan kapcsolódik a kukoricanövény morfológiájának, fenológiai állapotának, így az állomány architektúrájának alakulásához. Elsősorban a vízforgalomban lényeges szerepet játszó folyamatokra, összefüggésekre helyeztük a hangsúlyt, ezen belül is a kifejtett kukoricaállományok mikroklímáját tanulmányoztuk részletesen.

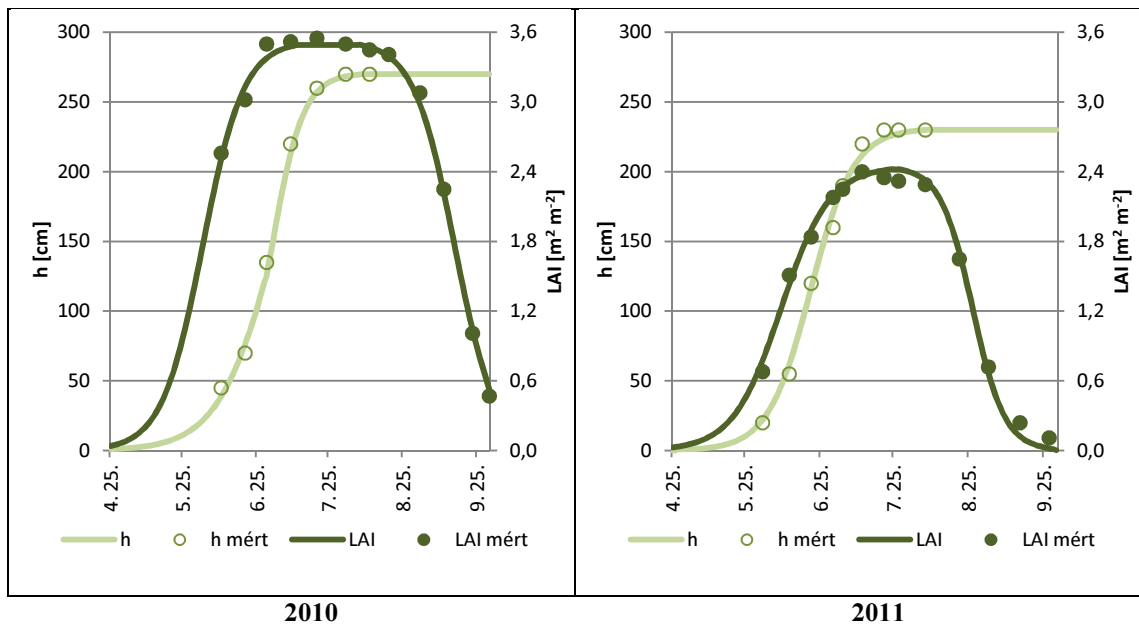
A vegetációs időszak klímára legérzékenyebb időszaka a kukorica szempontjából a virágzást közvetlenül megelőző és az azt követő néhány hét, a szentelítődéssel bezárólag. Az állomány ekkorra eléri legnagyobb magasságát és levélfelület-nagyságát, az öregedés beindulásáig véglegesnek tekinthető szerkezetét.

#### 4.3.1. A kukorica állományklímáját kialakító tényezők

##### 4.3.1.1. Az állomány fenológiai jellemzése

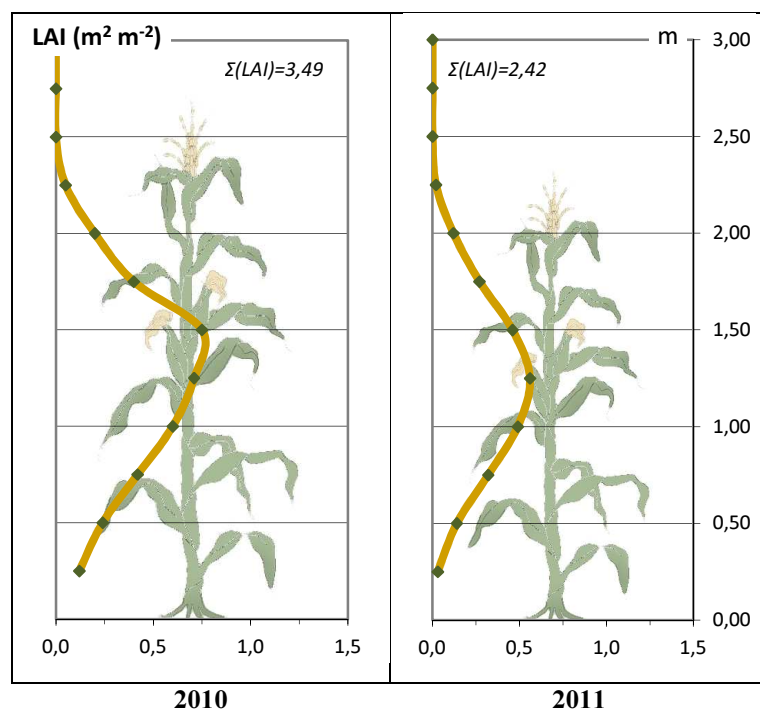
A két vizsgálati évben a vegetatív fejlődés (DEV) időszakának kezdetétől mértük a növénymagasságot és a fotoszintetikusan aktív (zöld) levélfelületi indexet (**4.1. sz. ábra**). A két állomány esetében megegyezett az érési csoport, az alkalmazott termesztéstechnológia és a termőterület elhelyezkedése is, az évjárat azonban nagyban különbözött.

A 2010-es növénymagasság és levélfelületi index nagymértékben meghaladta a 2011-es tenyészidő értékeit. A 2010-es évben egyrészt nagyobb zöldtömeget mértünk, másrészt a vegetációs időszak is hosszabb volt. Ez a folyamatos és bőséges nedvesség eredménye, szemben a 2011-es, jóval változatosabb évjáratával, amikor a kukorica szeptember végére nem rendelkezett élő lomboszáttal. Különösen a tenyészidő vége bizonyult száraznak, de június hónap is csapadékszegény volt. Jelentős, hosszabb vízstressz jelei azonban ekkor sem voltak tapasztalhatók, az állomány vízellátottsága kielégítő volt.



4.1. ábra: A növénymagasság (h) és a fotoszintetikusan aktív levélfelületi index (LAI) a vizsgált tenyészedzőszakokban

A meteorológiai paraméterek és az állományszerkezet közötti összefüggések vizsgálatához meghatároztuk az állománytér egyes levélszintjeinek fotoszintetikusan aktív LAI értékeit (4.2. sz. ábra).

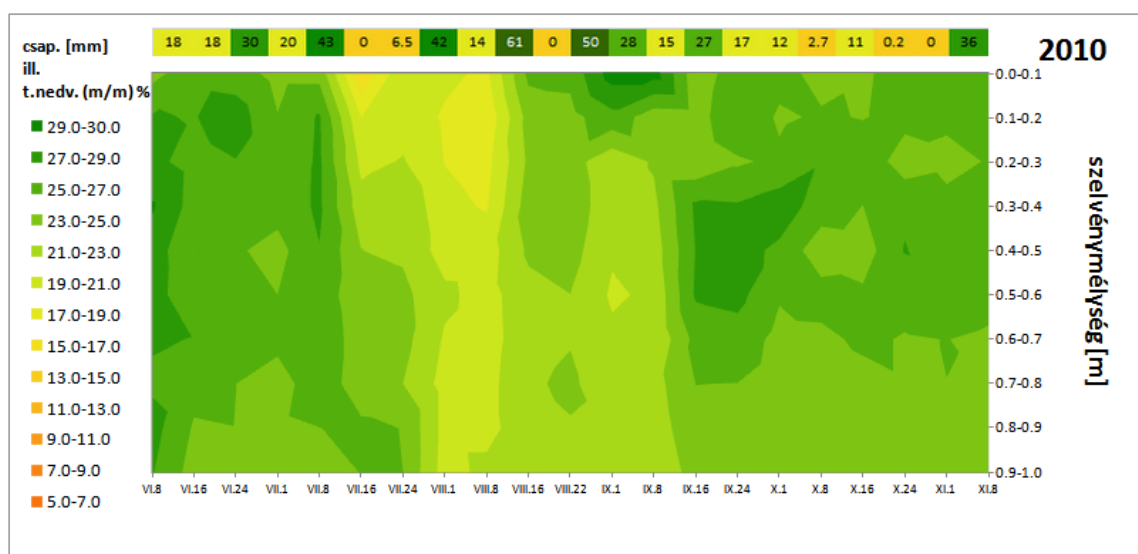


4.2. ábra: A fotoszintetikusan aktív levélfelület (LAI) maximális értékei az állomány egyes szintjein

A két különböző vegetációs évjáratban az állományok LAI-profilja hasonló jellegű, a 2010-es állomány bár magasabb volt, a levélfelület maximuma kevésbé elnyújtott, és körülbelül 0,25 m-rel magasabban is helyezkedik el, mint 2011-ben.

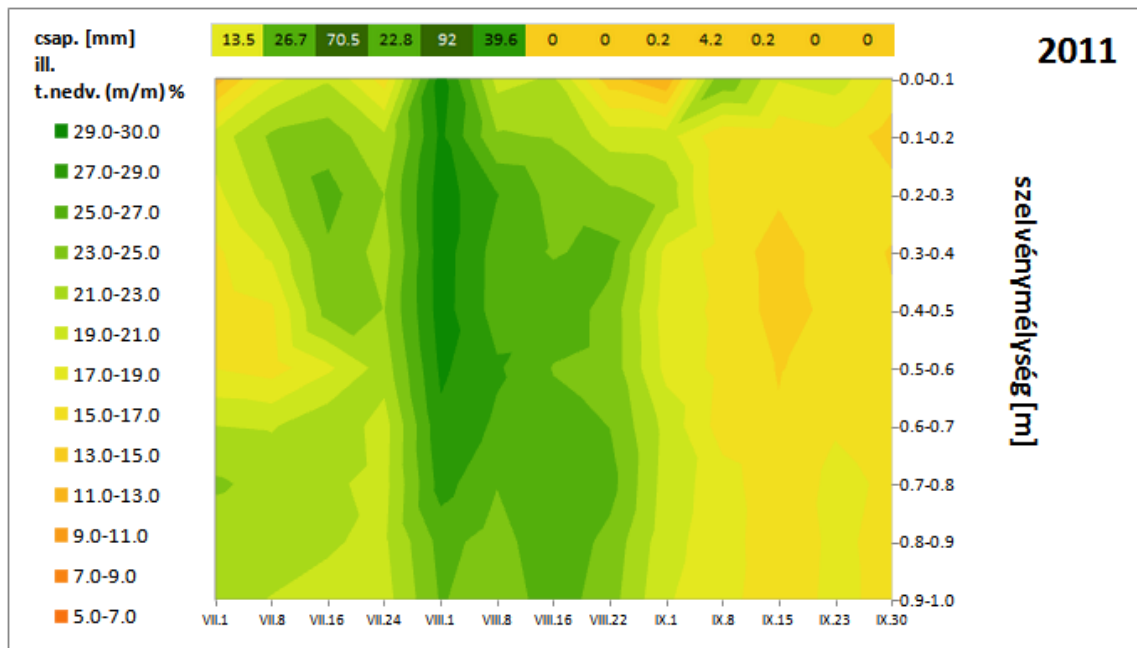
#### 4.3.1.2. A talaj vízkészlet-eloszlásának vizsgálata

A talajnedvesség alakulását az állomány termőhelyén 1 m mélységig vizsgáltuk, 2010-ben a június-november, 2011-ben a július-szeptember időszakban. A 4.3 és a 4.4. sz. ábra a 8 naponként, tömegszázalékban mért értékeket mutatja be a szelvényben, valamint feltüntettük a mérést megelőző 8 nap csapadékösszegét is.



4.3. ábra: A talajnedvesség eloszlása az állomány 1 m-es talajszelvényében (2010)

A 2010-es adatok tanúsága alapján a vizsgált időszak folyamán egyenletesen a szántóföldi vízkapacitást ( $\approx 22-24$  m/m%) közelítő talajállapot volt jellemző csaknem minden rétegben. A legkisebb értéket július hónapban mértük (17 m/m%). A nedvességtartalom 2011-ben esetenként a holtvízhez ( $\approx 9-12$  m/m%) közeli 10 m/m%-ot is megközelítette, és különösen a tenyészidő végére száradt ki jelentősen az 1 m-es szelvény. Július hónap kiugróan nagy csapadékösszege viszont az előzőleg jelentősen kiszáradt talajszelvény mély beázási folyamatának jellegzetes és szemléletes példája.



4.4. ábra: A talajnedvesség eloszlása az állomány 1 m-es talajszelvényében (2011)

A nagyobb csapadékeseményeket vagy egyenletesen nedves időszakokat követően ugyancsak jellegzetes a kiszáradás folyamatának leképeződése a nedvességi eloszlásban. A legintenzívebb vízkészlet fogyás a felszín mellett több esetben is valamely mélyebb réteghez köthető. 2010-ben ez a „száraz réteg” 20-50 cm-es mélységre tehető, míg 2011-ben 30-60 cm-re. Ez a réteg jellemezhető a legnagyobb gyökérsűrűséggel, a legintenzívebb vízfelvétellel. 2010-ben figyelhető meg, hogy akár 40-60 mm-es 8 napos csapadékösszegek a legnagyobb párolgású időszakban legfeljebb e rétegig képesek erős beázást okozni. Az intenzív párolgás megszűntével már fele ekkora összegek is mély szelvénybeázással járnak. A vertikális nedvességeloszlás alapján elsősorban 2011-ben terjedhetett az aktív vízfelvétel régiója 1 m-ig, vagy mélyebbre a sekély rétegek erőteljes kiszáradása miatt.

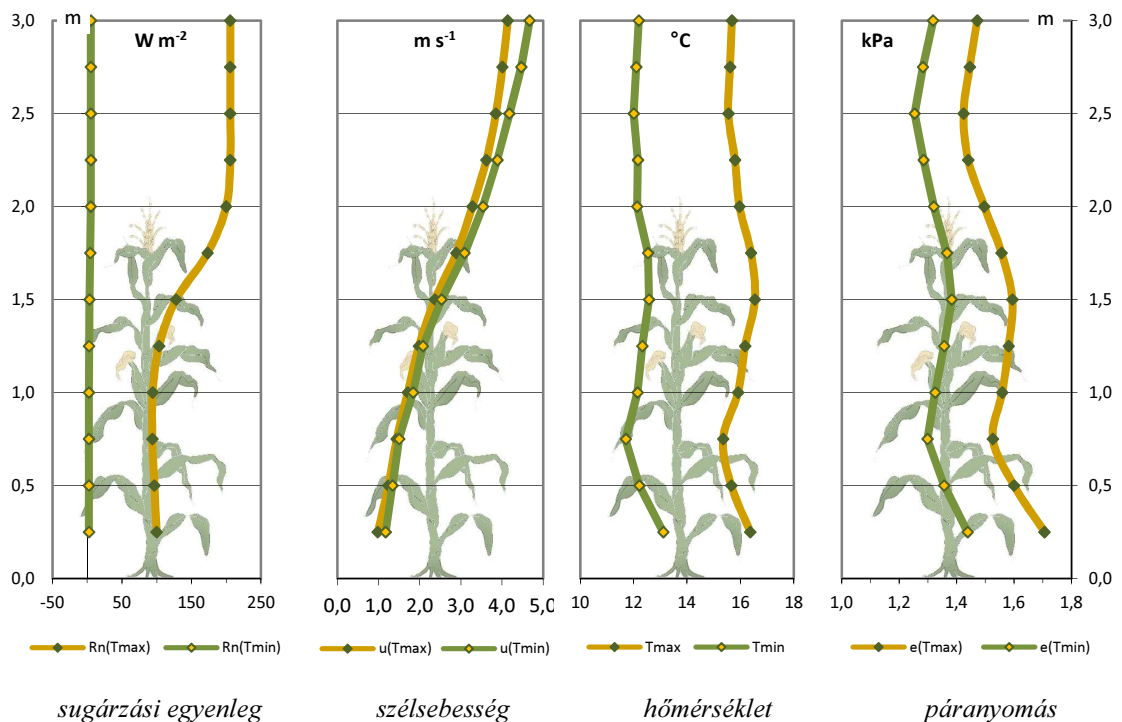
#### 4.3.1.3. A sugárzás és a légköri paraméterek szerepe, profilja az állományban

Az állománytér levegőjének fizikai tulajdonságait, a különböző energiaformák eloszlását – az állomány architektúráján keresztül – elsősorban a sugárzási- valamint a szélviszonyok határozzák meg. A hőmérséklet, a nedvességtartalom, az ezekből származtatott szenzibilis és látens hő nagysága, vertikális gradiense e két hatástól függ leginkább.

A meteorológiai paraméterek alakulását az állomány belsejében és kevéssel annak elsődleges határreége felett vizsgáltuk nagy térbeli és időbeli felbontásban.



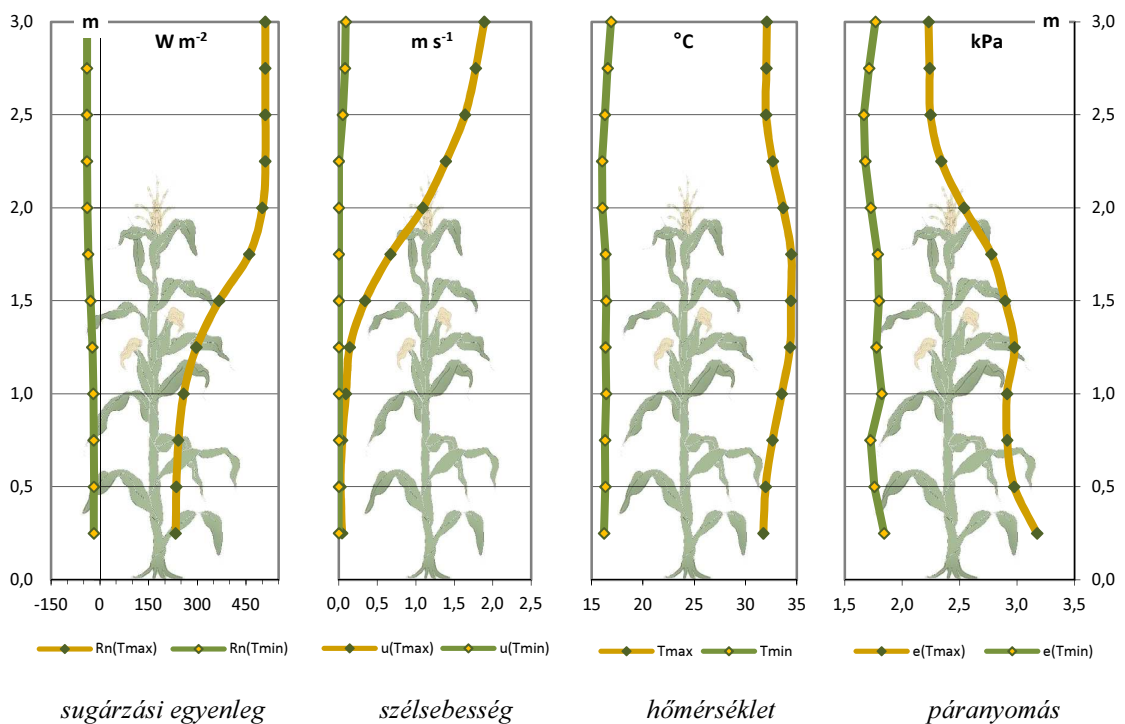
Célkitűzésünk elsődlegesen az állományban lejátszódó energia- és vízgőzáramlás kutatása volt. A folyamatok intenzitása viszont az időjárás alakulásától függően eltért az egyes periódusokban. A párolgás vegetációs időre vonatkozó összege a nagy változékonyságot mutató napi értékekből tevődik össze, melyek átlagos értékek alapján történő bemutatása elfedné a lezajló fizikai folyamatok szempontjából lényeges részleteket. Az eredmények interpretációja során elvetettük az időszakos átlagok képzését, helyette a jellegzetes időjárási epizódokra érvényes gyenge, vagy erős párolgású mintaszcenáriókat értékeltük (4.5 és 4.6. sz. ábra).



**4.5. ábra: Meteorológiai paraméterek függőleges profilja kukoricaállományban (2010.07.07.: gyenge párolgású eset, órás átlagok a napi min.- és max. hőmérséklet idejére)**

A mikroklima függőleges alakulását meghatározó szél és a sugárzási egyenleg (nettó sugárzás) állományprofiljának mérése nehezen kivitelezhető és számos hibával terhelt. A sugárzási egyenleget az Agrometeorológiai Obszervatóriumban 2 m-en mért érték és a LAI alapján a kioltási összefüggéssel, a szelet pedig szintén az obszervatóriumi 1-2-4-10 m-es adatokból, és a LAI-profilból becsültük Brown és Covey (1966) alapján. A függőleges LAI-eloszlásnak megfelelően, átlagosan 1,2-1,7 m magasságban húzódik a kukoricaállomány legnagyobb levélfelületű zónája (LAI<sub>max</sub>). Ennek szerepe egyfelől a felülről érkező rövidhullámú sugárzás és a hosszuhullámú légköri visszasugárzás kioltásában, illetve a talajról induló hosszuhullámú sugárzás felfogásában van. Másrészt

a szélesség is az esetek többségében e szintben redukálódik  $0 \text{ m s}^{-1}$  közelébe. Az állomány záródását követően átveszi az „aktív felület” szerepét a talajtól, az állományteret elérő rövidhullámú sugárzás nagyobb részt itt nyelődik el és alakul – a fotoszintézis energiaigényének fedezése mellett – jelentős mennyiségű hőenergiává. Méréseink szerint mind a nagy, mind pedig a kis párolgású, advektív hatásoktól mentes napokon az 1,25-1,75 m-es szint közötti tér ( $LAI_{\max}$ ) a legmelegebb a nappali órákban. Másodlagos maximum a talajfelszínen alakul ki, elsősorban a még kevésbé zárt állomány esetében, illetve amennyiben a felfelé irányuló (negatív) talajhőáram magas érték, pl. hűvös, csapadékos, vagy szeles napokon. Az állománytér többi része, valamint az állomány feletti térrész egyaránt alacsonyabb hőmérsékletű. A hőmérséklet gradiense intenzív besugárzás és gyenge átkeverés esetén elérheti az  $5-7 \text{ }^\circ\text{C}$ -ot is. A hőmérséklet napi minimuma idején (illetve az éjszakai órákban) ez rendszerint  $1-2 \text{ }^\circ\text{C}$ -ra tehető, és ugyancsak a legnagyobb levélfelületű térrész hőmérséklete a legmagasabb az állományban.



**4.6. ábra: Meteorológiai paraméterek függőleges profilja kukoricaállományban (2011.07.14.: intenzív párolgású eset, órás átlagok a napi min.- és max. hőmérséklet idejére)**

Vizsgáltuk a levegő nedvességtartalmának alakulását a párányomás függvényében. Eloszlása, profilja a hőmérsékletéhez igen hasonlóan alakul. A  $LAI_{\max}$  közelében, vagy súlypontjával kissé alatta a párányomásnak is lokális maximuma alakul ki, a

közvetlenül a talaj feletti térrész párányomása azonban ennél is magasabb érték. Az elsődleges maximumot a talaj felett 0,2-0,3 m magasságig, a másodlagos csúcsot pedig a legnagyobb levélfelület terében mértük. A maximumok szintjének elhelyezkedését az állományban döntően az intenzívebb transzspirációs, illetve evaporációs felületek alakítják, emellett kimutatható volt az összefüggés a hőmérséklettel is. Az állomány felszínéhez közeledve napszaktól függetlenül gyorsan csökken a párányomás értéke, kis és nagy párolgású napokon egyaránt. A csökkenés mértéke az állomány aerodinamikai rétegzettségével függ össze, arányosságot mutat a szélesség növekedésével (Uchijama és Wright 1964, Huzsvai et al. 2005). A nullpont eltolódási szint ( $d$ ) és az érdeességi magasság ( $z_0$ ) összegeként meghatározható kizorítási réteg (példáinkban 2010.07.07:  $\approx 1,7$  m; 2011.07.14:  $\approx 1,9$  m) felső határán már rendre alacsonyabb párányomás mérhető, mint bárhol a teljes állománytérben.

Párhuzamosan vizsgáltuk a kukoricaállományban és gyepfelszín felett mért értékek eltéréseit. Az obszervatóriumi mérési programnak megfelelően az 1 és 2 m-es szintek adatait értékeltük a napi minimum és maximumhőmérséklet idejére vonatkozóan (4.1. sz. táblázat).

4.1. táblázat: Meteorológiai paraméterek alakulása kukoricaállomány és gyep adott magassági szintjein

2010.07.07		Kukorica			Gyep		
$h$	$t$ (CET)	$T$ (°C)	$e_a$ (hPa)	$T_{eq}$ (°C)	$T$ (°C)	$e_a$ (hPa)	$T_{eq}$ (°C)
1,0 m	$T_{max}$ (15:00)	15.9	15.6	39.18	15.8	15.5	38.93
	$T_{min}$ (8:00)	12.3	13.5	32.45	12.3	14.2	33.49
2,0 m	$T_{max}$ (15:00)	16.0	15.0	38.39	15.8	15.0	38.19
	$T_{min}$ (8:00)	12.1	13.3	31.95	12.2	14.0	33.10
<i>idő jellege:</i>		<i>borult, csapadékos; élénk szél</i>					
2011.07.14		Kukorica			Gyep		
$h$	$t$	$T$ (°C)	$e_a$ (hPa)	$T_{eq}$ (°C)	$T$ (°C)	$e_a$ (hPa)	$T_{eq}$ (°C)
1,0 m	$T_{max}$ (15:00)	33.5	29.5	77.53	32.5	20.5	63.10
	$T_{min}$ (4:00)	17.1	18.2	44.26	16.6	18	43.47
2,0 m	$T_{max}$ (15:00)	33.6	25.5	71.66	32.4	19.8	61.95
	$T_{min}$ (4:00)	16.0	17.3	41.82	16.8	17.9	43.52
<i>idő jellege:</i>		<i>napos, száraz, meleg; gyenge szél</i>					

$h$ : magasság,  $t$ : időpont,  $T$ : hőmérséklet,  $e_a$ : párányomás,  $T_{eq}$ : ekvivalens hőmérséklet

A hőmérséklet napi dinamikájára jellemző, hogy minimális párolgás esetén a nap egészében a kukoricaállományban voltak magasabb értékek. Intenzív párolgású

napokon a hőmérséklet minimuma idején, a magasabb szinteken már kis mértékben az állomány volt hűvösebb.

A párányomás a hűvös, nedves napon közel azonos volt az állományban és környezetében, míg hajnalban az állomány levegőjének párányomása alacsonyabb. Intenzív párolgás esetében, a  $T_{\min}$  idején hasonló helyzet érvényesült, a napi csúcshőmérséklet idejére azonban az állomány levegője számottevően nedvesebbnek bizonyult a gyepléte feletti légtérnél.

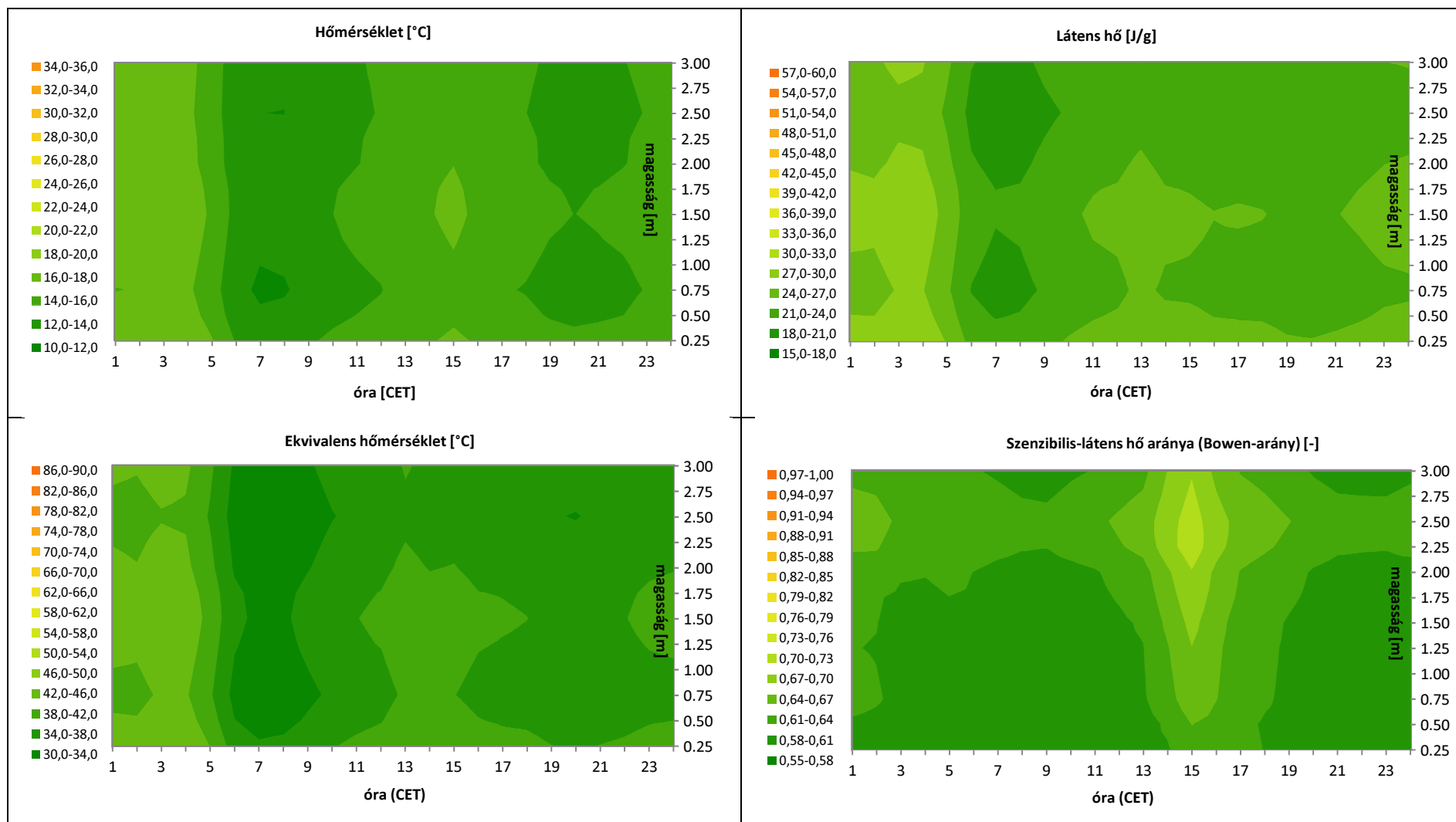
Az ekvivalens hőmérséklet alakulása a párányomásával teljesen megegyezett a gyenge párolgású epizód során, és a gyepfelszín felett mértük a magasabb értékeket. Az intenzív párolgású napot szintén a párányomásnál leírt eloszlás jellemezte, de csak a 2 m-es szinten fordult elő, hogy az állományban mért  $T_{\text{eq}}$  kissé alacsonyabb volt  $T_{\min}$  idején, mint a gyepléte felett.

#### **4.3.2. Látens és szenzibilis hőáramok a kukoricaállományban**

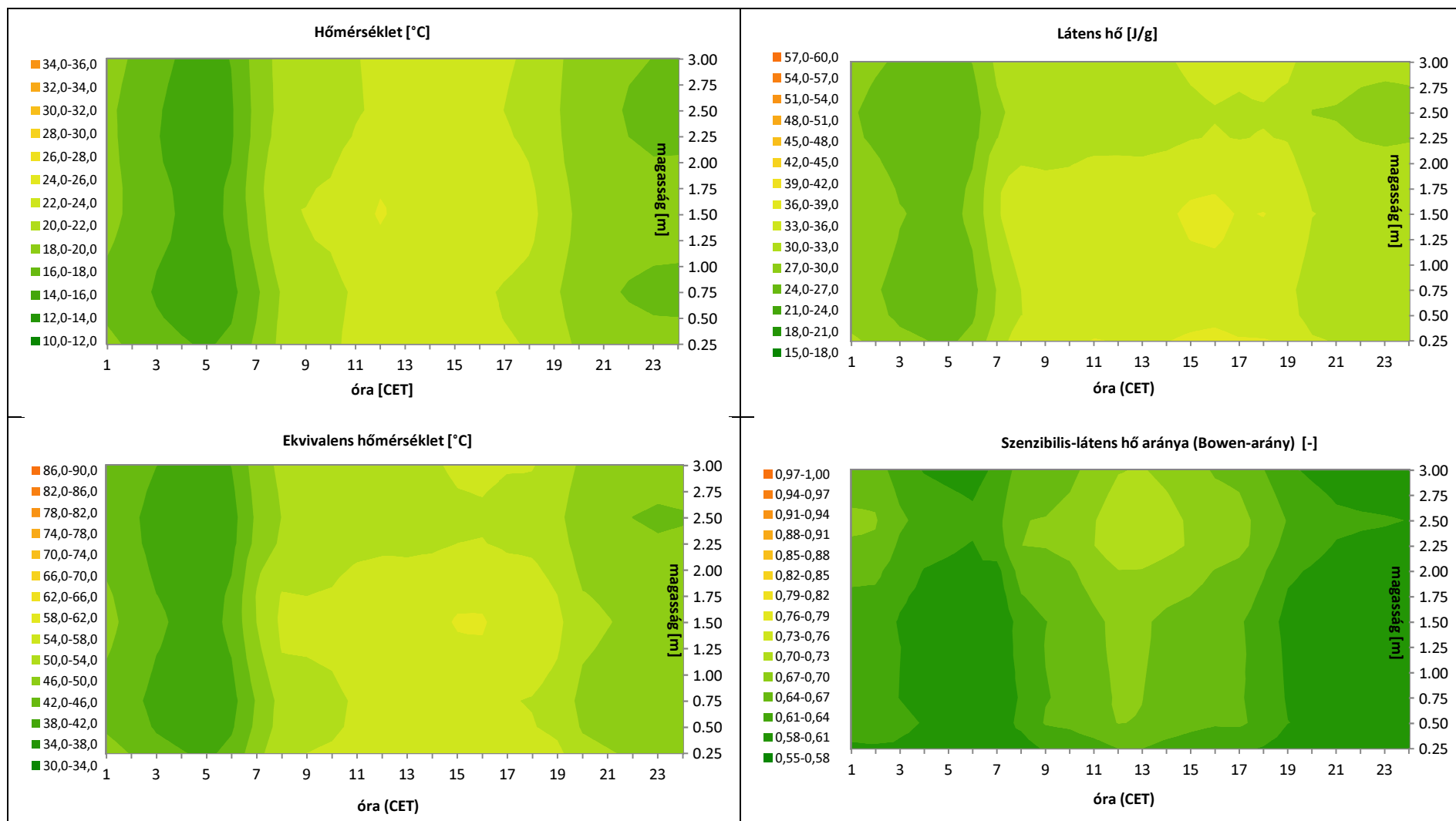
A kukoricaállomány légterében és az elsődleges határreteg közelében zajló nedvességtranszfer a hő- és energia eloszlás számszerűsítésével szemléletesen írható le. A vertikális profilok mellett vizsgáltuk a két energiamennyiség napi menetét különböző párolgási karakterű időjárási epizódokban.

Az állomány légterében mindenkor jelen lévő energiamennyiség két fő részből épül fel. Szenzibilis, „érzékelhető” hőként ( $H$ ) jelenik meg a számértékben a hőmérséklet ( $T$ ) által is jó közelítéssel definiált energia. Ennél valamivel nagyobb mennyiségű energiát képvisel a levegőben jelen lévő, a vízgőz párolgáshője által meghatározott látens hőmennyiség ( $\lambda E$ ): a zárt, jól fejlett állomány terében a szenzibilis hő - látens hő aránya ( $H/\lambda E$ ) általában 0,6-0,8 között alakul, időjárási feltételektől függően. Az állománytérben lévő teljes energia nagysága az ekvivalens hőmérséklettel illetve az entalpiával jellemezhető, mely a látens és szenzibilis hő összegével egyezik meg.

Gyenge párolgású időjárási epizódra a 2010.07.07 (**4.7. sz. ábra**) és 2011.07.29 (**4.8. sz. ábra**), intenzív párolgású napokra pedig 2010.07.17 (**4.9. sz. ábra**) valamint 2011.07.14 (**4.10. sz. ábra**) adatsorait mutatjuk be az állomány függőleges metszetét ábrázoló izopléta-diagramokon.



4.7. ábra: Az állomány látens és szenzibilis hőviszonyai gyenge párolgású, mérsékelt napon (2010.07.07)

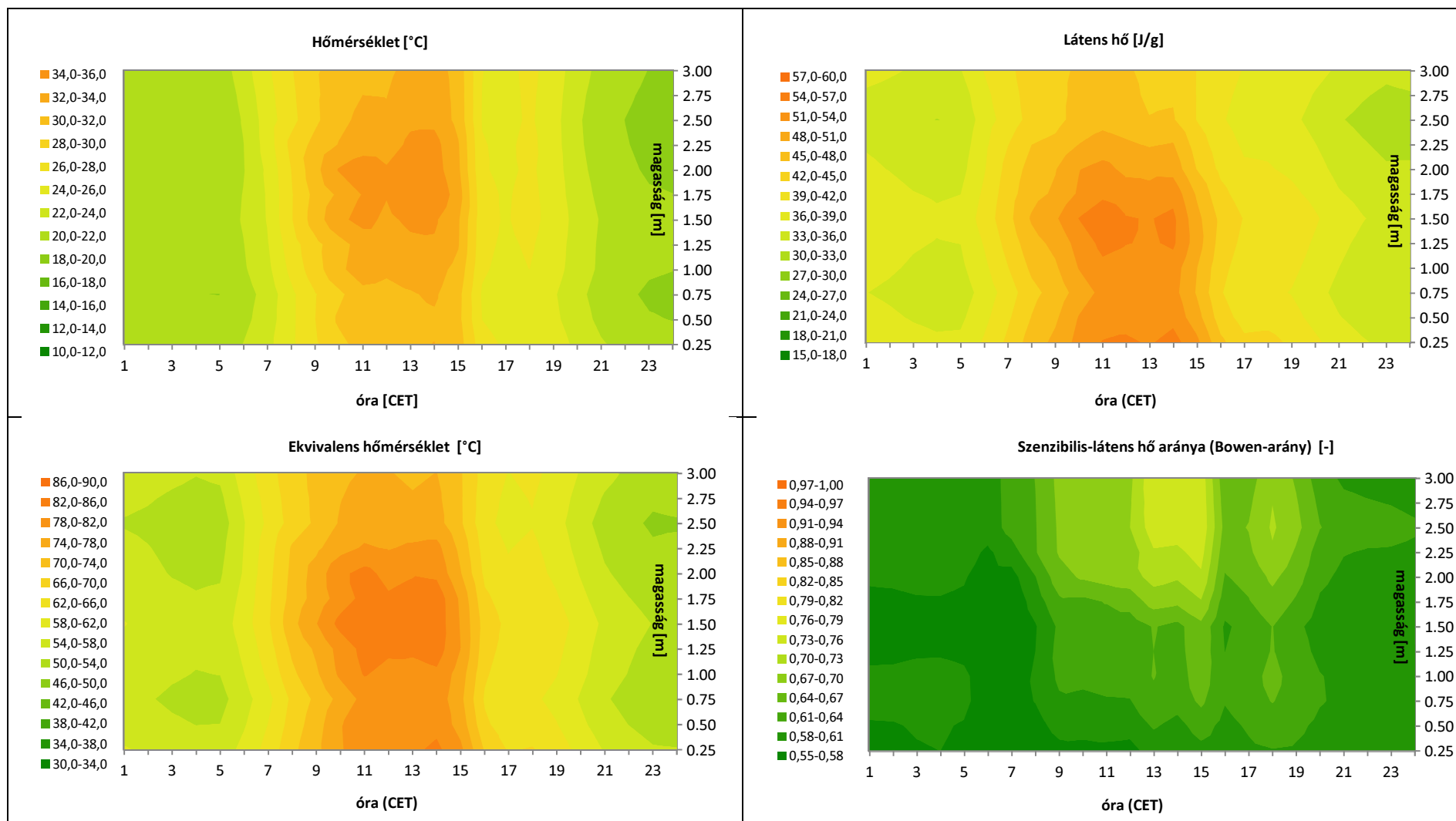


4.8. ábra: Az állomány látens és szenibilis hőviszonyai gyenge párolgású, szélcsendes napon (2011.07.29)

A kukoricaállomány kifejlett, záródott, de még nem öregedő (MID) fenológiai szakaszában, vízstressz nélkül kizárólag borult, hűvös, illetve csapadékos időjárás esetén mérhető nullához közelítő napi párolgás. Hűvös, szeles, csapadékos, alacsony hőingású napon (2010.07.07) a potenciális párolgás – módszertől függően – mindössze 0,9-1,6 mm volt. A szenzibilis és a látens hő maximuma az 1,5 m-es szinten, valamint a talaj közvetlen közelében alakult ki. Megállapítottuk, hogy a látens hő maximuma a nap folyamán 1-2 órával korábbi időpontban következik be a hőmérsékleti maximumnál. A hasonló időjárású napokon határozottan megjelenik az advekciónak hatása, mely nyomon követhető a kora hajnali óráktól kezdődő erőteljes lehülési folyamat során. A nappali órák gyenge felmelegedése ellenére a szenzibilis és a látens hő aránya alapján relatív „kiszáradás” figyelhető meg, ( $\lambda E$  részarányának csökkenése a teljes energiaegyenlegen belül), mely a hőmérséklet maximumának idején közvetlenül az állományfelszín felett legerőteljesebb, s gyengülve lehatol a talajszintig. A legszárazabb ponton 0,7 körüli  $H/\lambda E$  arányt határoztunk meg. A vizsgálatba bevont 2010.07.29-i napon hasonlóan alakultak a környezeti paraméterek ( $ET_0=2,0-2,4$  mm), de a gyenge advekciónak mellett karakteresebben jelent meg a napi hőingás, illetve a kiszáradás megegyező mértékű volt, miközben jóval hosszabb ideig érvényesült az állományban.

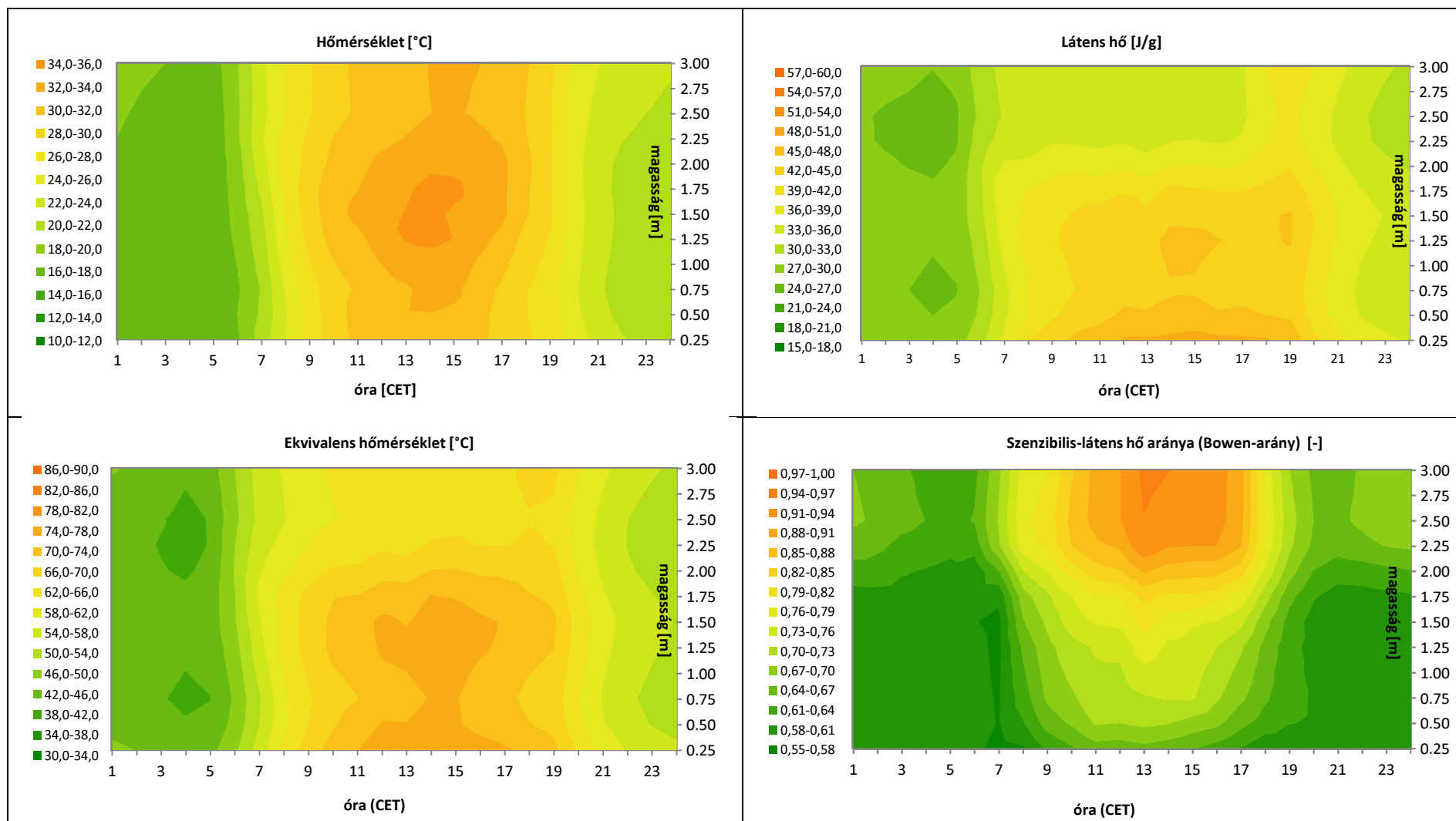
Az intenzív párolgású epizódokra – szintén vízstressz nélküli helyzetekből kiindulva, amint a fent közölt talajnedvesség profilok erre utaltak – általában az erőteljes besugárzás és nappali felmelegedés jellemző, mely esetenként erős advekciónak hatásokkal, erős széllel párosul. A példaként bemutatott két nap, 2010.07.17 ( $ET_0=4,8-5,2$  mm) és 2011.07.14 ( $ET_0=4,6-6,8$  mm) közül előbbin mérsékelt szél volt mérhető és csapadék is előfordult, utóbbi gyakorlatilag mentes volt az erősebb advekciónakól.

A szenzibilis hő eloszlása hasonló volt a két napon, a maximum a  $LAI_{max}$  közelében alakult ki: 2010-ben súlypontjával 1,75 m, 2011-ben pedig 1,5 m magasságban. A látens hő elsődleges maximuma azonban a 2010-es példában a  $LAI_{max}$  környékén, kissé az alatt fejlődött ki, s vertikális metszete a szokásos „kulcslyuk” mintázatot vette fel. A maximum 2011.07.14-én egyértelműen a talajfelszín közelében volt, ami jóval erősebb kiszáradásra utal az állománytérben. A 2010-es példánkban tehát az erősebb átkeverés ellenére sem épült le a magasabb állomány szintek nedvességtöbblete, sőt, dominált a talajhoz közeli régiókkal szemben. Ennek magyarázata az azévi állomány jóval nagyobb  $LAI$ -ja, zártabb architektúrája volt. A  $H/\lambda E$  arány gradiense és értéktartománya jelentősen eltért, de mindkét esetben megbízhatóan jellemezte az állomány kiszáradási folyamatát.



4.9. ábra: Az állomány látens és szenzibilis hőviszonyai intenzív párolgású, mérsékeltén szeles, az esti órákban zivataros napon (2010.07.17)

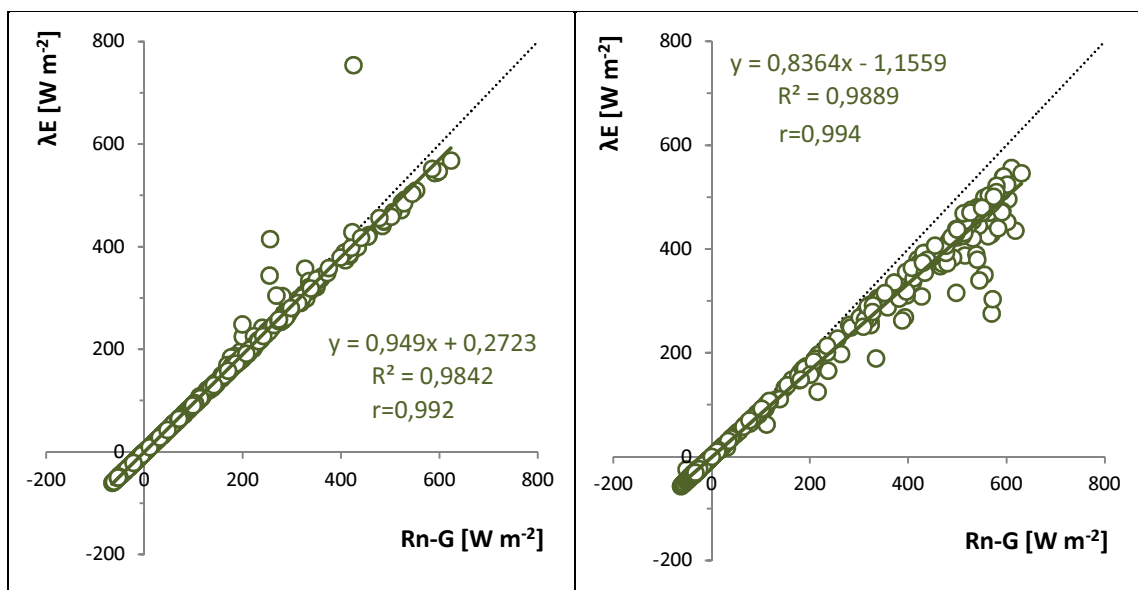




4.10. ábra: Az állomány látens és szenzibilis hőviszonyai intenzív párolgású, gyengén szeles napon (2011.07.14)

2010.07.17-én mindössze az 1,75 m-es szintig jelent meg a látens energia részarányának csökkenése a függőleges profilban, fölötte is csak 0,75 körüli értékek voltak jellemzők. 2011.07.14-én a talaj közelében is 0,7 közelébe emelkedett az arány, az állomány felszíni határretegén 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. Nyilvánvalóan szerepet játszanak a különböző előjelű advekción folyamatok is az adott térben ténylegesen mérhető összes hő, valamint ennek áramai meghatározásában. Ez azonban nehezen mérhető, valamint számítása is rendkívül összetett, sok esetben nagy hibával terhelt. A párolgásra fordítható energia eredet szerinti összetételét ezért aerodinamikai számítások helyett az  $R_n$ - $G$  sugárzásmennyiség és a látens hő nagyságának összevetése útján vizsgáltuk meg.



„nedves” epizód (n=676) „száraz” epizód (n=584)  
**4.11. ábra: A látens hő ( $\lambda E$ ) és a rendelkezésre álló energia ( $R_n$ - $G$ ) összefüggése (2010 és 2011, VII-VIII., órás adatok)**

A talajnedvesség és csapadékadatok alapján elkülönítettünk csapadékos és a csapadékeseményeket röviddel követő „nedves”, valamint hosszabb kiszáradási folyamatot követő, száraz talajfelszínnel jellemezhető „száraz” epizódokat. Ez a megkülönböztetés a talajfelszín nedvességi állapotára korlátozódott, mivel valódi vízhiány, vízstressz által korlátozott párolgású helyzet nem, vagy csak igen rövid ideig állt fenn a vizsgált időszakban.

Megállapítottuk, hogy a  $\lambda E$  nagysága szoros, lineáris kapcsolatot mutat  $R_n-G$ -vel (**4.11. sz. ábra**), de az összefüggés rendre negatív irányba tér el, azaz ritkán fordítódik az összes rendelkezésre álló energia a párolgási folyamatok fedezésére. Nedves helyzetekben a rendelkezésre álló és a felhasznált energia közötti differencia kisebb, az ilyen esetben gyakoribb advekiós hatások miatt esetenként többlet jelentkezik az  $R_n-G$  mennyiség által meghatározott állapothoz képest. Száraz helyzetben az advekió jobbára éppen az ellenkező irányban fejt ki hatását, csökken a jelen lévő nedvesség, látens hő mennyisége a „rendszerben”.

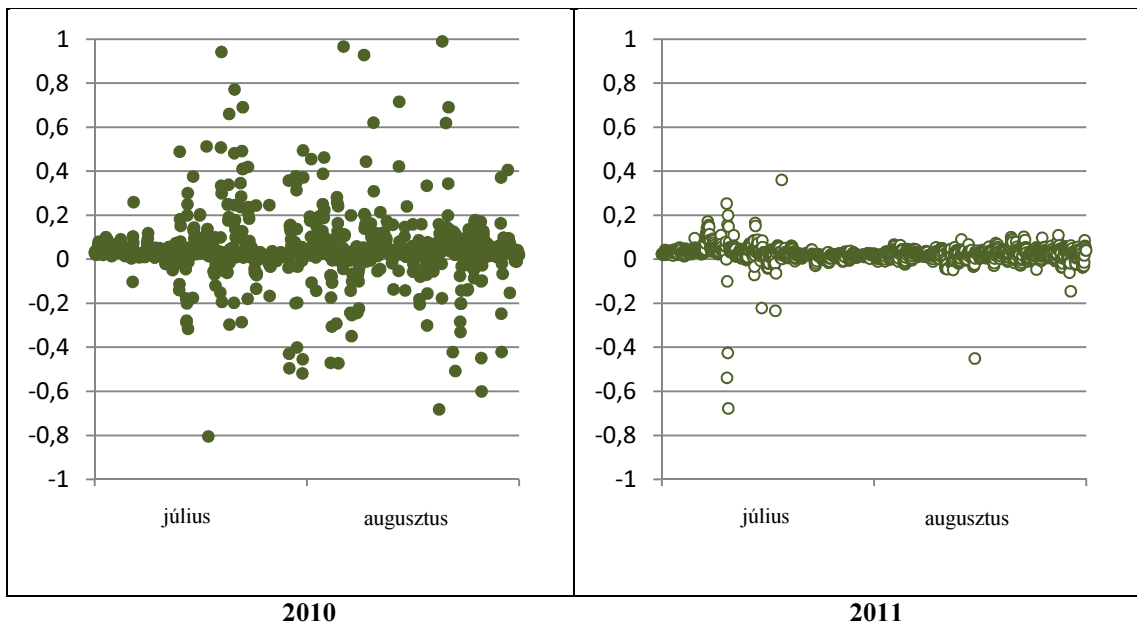
Eredményeink igazolták, hogy a determinációs együtthatók alapján a vizsgálati periódus nedves, bő vízellátottságú időszakokban az  $R_n-G$  energiamennyiség  $\approx 98\%$ -ban, míg száraz epizódokban akár  $\approx 99\%$ -ban is meghatározhatja a látens energia nagyságát az állományban. Ebből következően a párolgásnak legalább  $98\%$ -ban a sugárzási egyenleg és a talajhőáramok különbsége meghatározó, a fennmaradó cca.  $2\%$  reprezentálta az advekiós hatásokat.

#### **4.4. A tényleges párolgás becslése az állomány hő- és nedvességáramai alapján**

A kukoricaállomány által elpárologtatott víz mennyiségét az állománytér nedvesség-gradiense mentén kialakuló látens hőáramok alapján modelleztük 2010 és 2011. július-szeptember időszakra, további elemzés céljára.

##### **4.4.1. A Bowen-arány ( $\beta$ ) értékeinek elemzése**

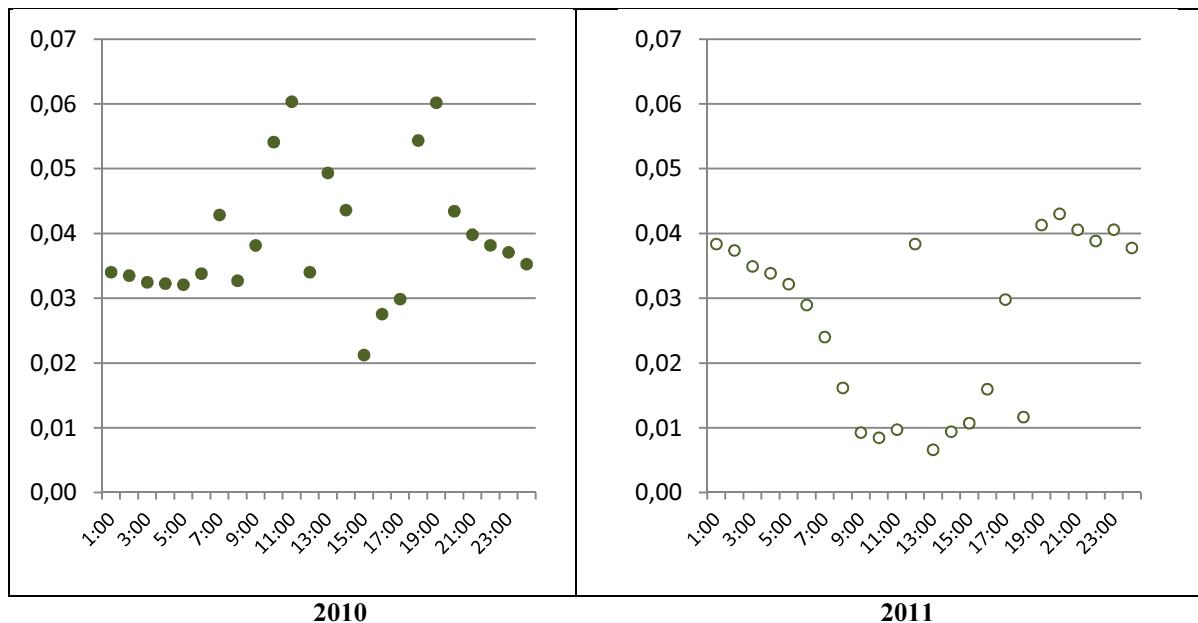
Először a látens hőáramok nagyságát számítottuk ki a Bowen-arány 1 perces időléptékű adatai alapján. A gradiens-előjelváltásokkal együtt járó fals  $\beta$ -értékek kiszűrése után a Bowen-arány órás átlagértékeinek eloszlásában jelentős különbség volt a két évben (**4.12. sz. ábra**). 2010-ben az átlagos  $\beta$ -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  $164,0\%$ .



4.12. ábra: A Bowen-arány értékeinek alakulása a vizsgált időszakokban

2010 nyarának változékonyabb időjárása sokkal inkább bővelkedett gradiens előjelváltással járó eseményekben. A nappali órák nagyobb fokú labilitása, az eredendően nagyobb légnedvesség miatt átlagosan is nagyobb amplitúdójú fluxus változások magyarázzák a 2010-es  $\beta$ -adatsor nagyobb változékonyágát. A 2011-es nyár kevesebb, de határozottabb gradiensváltással járt, melyek közül a legkiugróbb  $\beta$ -értékkel jellemezhetőket az adatszűrés során elimináltuk. A tisztított adatsor így jóval kiegyenlítettebbé vált, mint a 2010-es év hasonló időszakáé.

Vizsgálataink szerint a  $\beta$ -adatsor változékonyágát befolyásolta, hogy az állomány magassága a két év során eltért. A teljes magasság maximuma 2010-ben 2,70 m, 2011-ben 2,30 m volt, míg a Bowen-arány mérési szintjeit 2,50 és 3,00 m-re állítottuk be mindkét időszakban. Továbbá a mérési szintek megválasztásakor mérvadó  $z_0$  érdességi magasság a teljes állománymagasság szintje alatt helyezkedik el és a hímvirágzat e fölé emelkedik. Ennek hatása a párolgás nagysága szempontjából elhanyagolható, de jelentős hatása van az állomány feletti tér aerodinamikájára. Magasabb kukoricaállomány esetében, a vizsgált időszak második részében a gradiensek értékét befolyásolta a virágzat behatolása a  $z_1$ - $z_2$  mérési szint közötti tartományba.



4.13. ábra: A Bowen-arány napi átlagos menete a vizsgált időszakokban

Kutatásunkban vizsgáltuk a  $\beta$  jellemző napi menetét (4.13. sz. ábra). Nagyobb fluktuációkkal jellemezhető a 2010-es időszak: a reggeli és esti mindennapos gradiens-előjelváltás idején kívül napközben is gyakran mutat nagyobb ingadozásokat az érték. Annak ellenére, hogy 2011-ben is jelentkezik napközbeni kiugró érték, a Bowen-arány napi dinamikája jellegzetes. A magas esetszám ( $n=88694$  illetve  $88771$ ) a paraméter nagy szórásához képest tapasztalataink szerint még tovább növelendő és az adatszűrés pontossága, kritériumrendszere is javítható, fejleszthető lenne. Ilyen módon pontosabb párolgásbecslés válhatna lehetővé egy, a „zajtól” még hatékonyabban szűrt  $\beta$  adatsor alapján.

#### 4.4.2. A tényleges párolgás ( $ET_{c,BR}$ ) értékeinek elemzése

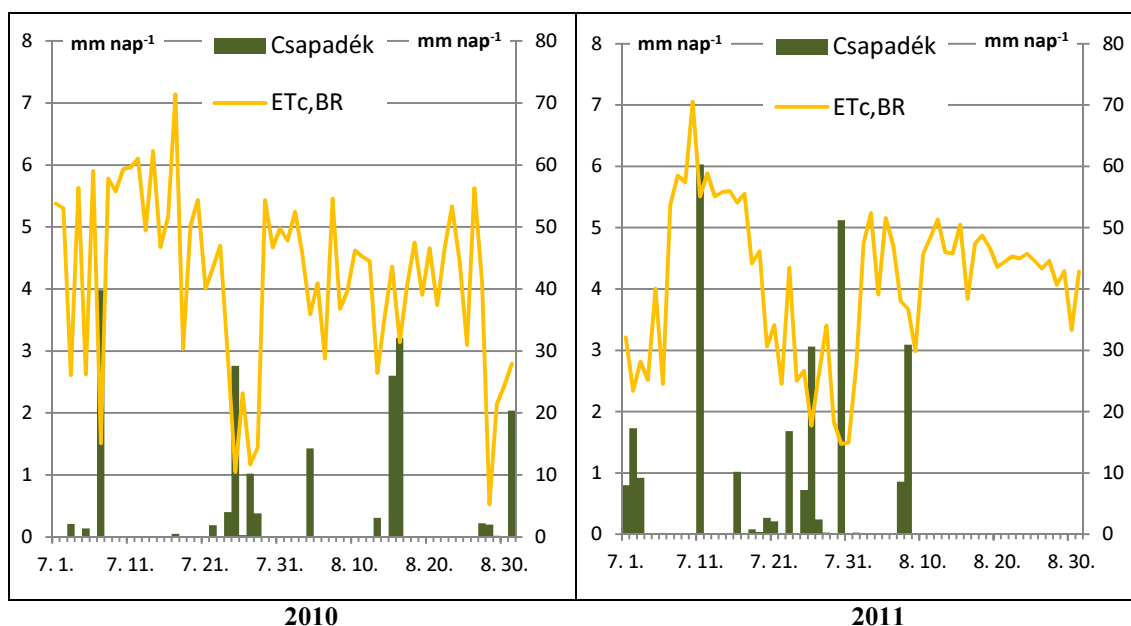
A Bowen-arány módszerrel becsült  $ET_{c,BR}$  értékeket alapvető leíró statisztikai mutatók alapján elemeztük (4.2. sz. táblázat). A vízellátottság tekintetében eltérő karakterű évszakok két-két nyári hónapjának tényleges napi párolgása között átlagérték alapján mindössze 0,2 mm különbség adódik, mely a teljes időszakra 14,1 mm, a nagyobb értékekkel a 2011-es időszakban. A látens hőáramok intenzitásának nagyobb fluktuációihoz hasonlóan a számított párolgás a 2010-es évben ingadozott nagyobb mértékben.

4.2. táblázat: A tényleges párolgás ( $ET_{c, BR}$ ) statisztikai mutatói (július-augusztus)

<i>(mm nap<sup>-1</sup>, illetve %)</i>	2010	2011
<b>Maximum</b>	7,14	7,05
<b>Minimum</b>	0,45	0,80
<b>Középérték</b>	3,53	3,69
<b>Szórás</b>	1,65	1,24
<b>Variációs koefficiens</b>	46,8	33,7
<b>Szóródás terjedelme</b>	6,68	6,26
<b>Variancia</b>	2,74	1,54
<b>Összeg</b>	325,06	339,17

2010 két vizsgált hónapjának csapadékösszege 192,0 mm, 2011 hasonló időszaké 259,6 mm volt. Összességében azonban előbbi időszakot teljes hosszában jó vízellátottság, míg a 2011-es, évjáratot egyenlőtlen csapadékeloszlás jellemezte, a tenyészidő második felében egyre szűkösebb vízellátottsággal.

A napi tényleges párolgás menete és csapadékeloszlása (4.14. sz. ábra) a vizsgált két év ugyanazon időszakában eltérően alakult. A vegetáció utószakaszában (augusztus második felétől) a párolgás intenzitása jelentősen csökkent. Ugyancsak kifejeződik a csapadékos epizódok párolgás mérséklő hatása, amely a módszer becslési eredményeiben a hőmérséklet és a légnedvesség gradiensek csökkenése, valamint az alacsonyabb sugárzási egyenleg révén jut érvényre.



4.14. ábra: A tényleges párolgás ( $ET_{c, BR}$ ) és a csapadékviszonyok alakulása a vizsgált időszakban

## 4.5. A tényleges párolgás becslése a referenciapárolgás útján

### 4.5.1.A potenciális párolgás modellek összehasonlító elemzése és érzékenységvizsgálata

A modellek összehasonlító elemzése során először leíró analízist végeztünk. 6 évben vizsgáltuk az egyes algoritmusok eredményeit: a IV-X. havi és az egyhavi összegeket, illetve ezek átlagos eltéréseit a repülőtér mérési programjának kádpárolgás összegeihez viszonyítottuk. Leíró mutatókon keresztül a teljes, napi léptékű idősor alapján statisztikai kiértékelésnek vetettük alá a módszereket, elvégeztük a modellek egymáshoz képest tapasztalt „hibáinak” keresztanalízisét, valamint a korrelációanalízist. Végül érzékenységvizsgálatra került sor néhány fő légköri állapothatározó vonatkozásában.

#### 4.5.1.1. Analízis az OMSZ repülőtéri méréssorozatok alapján

##### a) Általános, leíró statisztikai elemzés

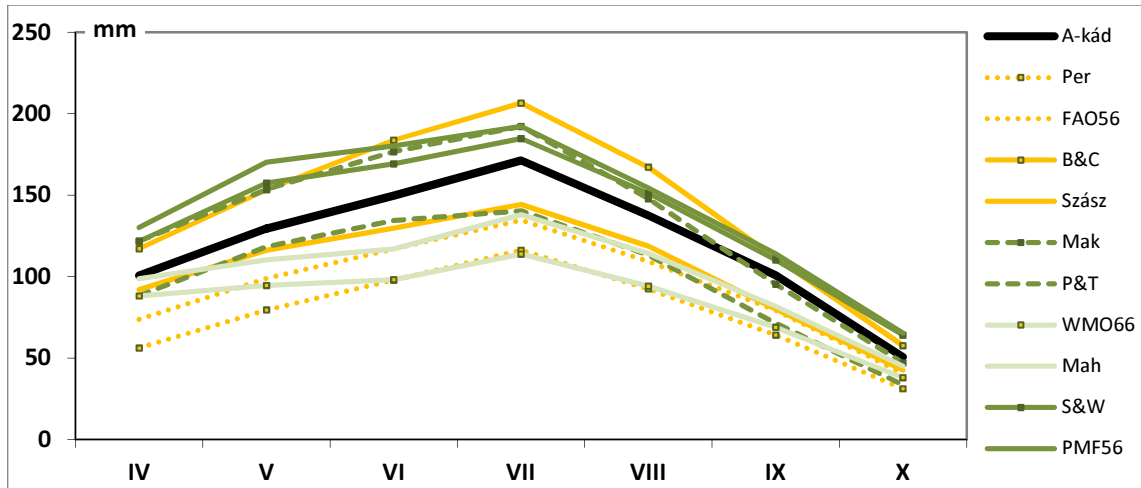
A vizsgált éveken (2005-2010) belül az áprilistól októberig tartó időszakot vettük figyelembe. A kukorica vegetációs időszaka szempontjából kevésbé releváns időszakot tudatosan mellőztük a vizsgálat során, habár az  $ET_0$  összege esetenként ekkor is jelentékeny lehet. Ez a lépés önmagában is pontosságnövelő tényező a légköri állapothatározók időbeli heterogenitásának csökkenése révén. Másrészt olyan hibafaktorokat is kizártunk az elemzésből, mint a nehezen modellezhető hótakaró okozta sugárzási egyenleg-anomáliák.

4.3. táblázat: A potenciális párolgás IV-X havi összegei

<i>mm</i>	A-kád	Per	FAO56	B&C	Szász	Mak	P&T	WMO66	Mah	S&W	PMF56
2005	649	425	517	914	692	861	663	481	582	864	925
2006	751	493	597	951	708	893	674	520	628	895	948
2007	1015	644	771	1126	797	1046	746	755	885	1113	1148
2008	803	512	628	971	708	923	710	557	657	922	979
2009	1091	690	830	1153	789	1041	737	799	937	1164	1183
2010	751	477	595	877	648	844	683	446	527	799	868

Az egyes modellek eredményei között bizonyos években jelentős eltéréseket tapasztaltunk (4.3. sz. táblázat). Ez a nagyfokú divergencia azonban nem a modellek, számítások hibás voltából, hanem a módszerek elvi különbözőségéből adódik. Az egy típusba tartozó modellek jobbra hasonló értékeket is eredményeznek. A relatíve hosszú

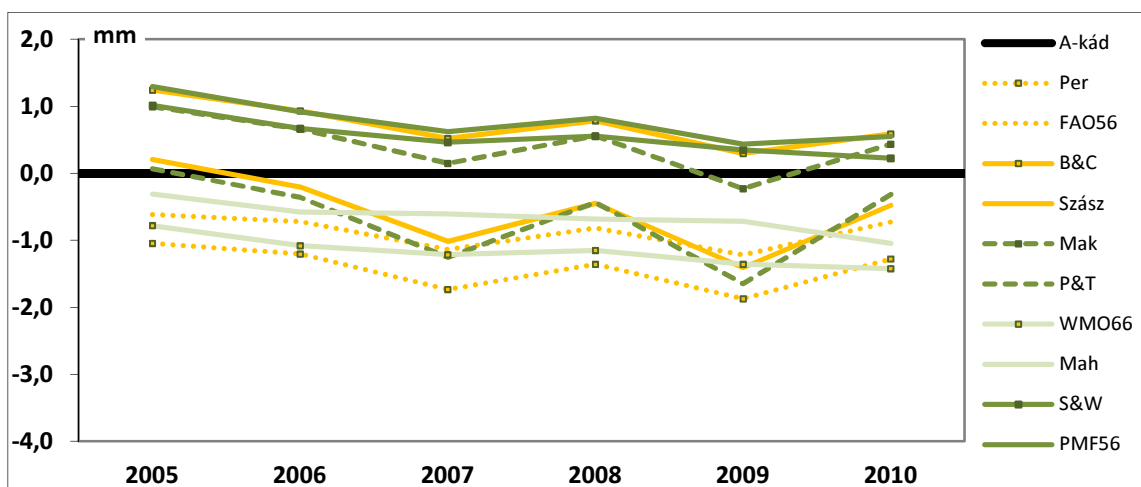
időszakok napi összegei kumulálódása miatt kisebb szisztematikus különbség is tetemes eltérést okozhat már havi szinten. Ugyanakkor a vizsgálat szempontjából kimondottan hasznos, hogy az eltérő modellek, modelltípusok közötti különbségek határozottak, ennek révén a statisztikai vizsgálatok eredményei is egyértelműbbek (4.15. sz. ábra).



4.15. ábra: A referenciapárolgás dinamikája a vegetációs időben (2005-2010.)

Megállapítható, hogy különösen a legintenzívebb párolgás időszakában nagy a modellek közötti eltérés. Ugyanazon elvre épülő modellek görbéi emellett sok esetben hasonló tartományban és egymással szinte párhuzamosan futnak. A modellek kalibrációs lehetőségei szempontjából ez a „rendezettség” kedvező.

A modelloutputok eltéréseinek vizsgálata során ábráztuk a mért A-kád adatokkal szembeni eltérések időszaki átlagos értékeit, hogy megállapíthassuk a vegetációs időbeli, illetve a vizsgált 6 év alatti menetét, dinamikáját, más szóval a modellek teljesítményét (4.16. sz. ábra).

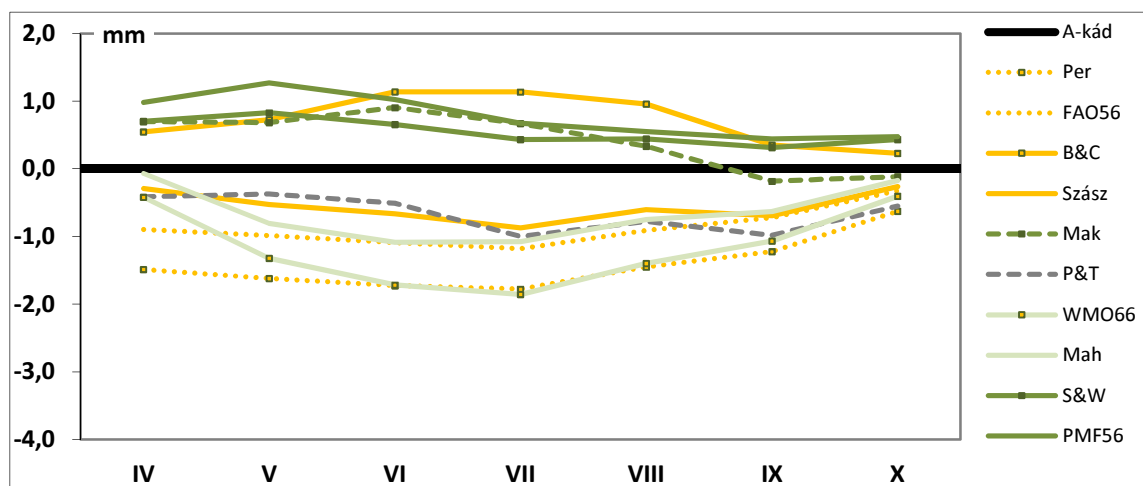


4.16. ábra: A modellkimenetek napi átlagos eltérése a mért adatoktól a vizsgált években (IV-X.)



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 modellnél szorosán korrelál a vizsgált vegetációs időszakok csapadékösszegeivel. 2005-ben 473, 2006-ban 438, 2007-ben 369, 2008-ban 396, 2009-ben 256, míg 2010-ben 571 mm csapadék hullott az április-október intervallumban. A korrelációs együttható ( $r$ ) értéke a Per-modellnél 0,79, a FAO56-nál 0,82, a Szász-módszernél 0,72, a Makkink-modellnél 0,69, a P&T-nál pedig 0,82, ami jelzi e modelleknek a kád párolgásánál is nagyobb érzékenységet az elpárologtatható vízmennyiség nagyságára, szemben a többivel, ahol a kapcsolat jóval gyengébbnek bizonyult.

A fentihez hasonló vizsgálatot végeztünk havi viszonylatban is (4.17. sz. ábra), hogy detektálhassuk az eltérések éven belüli menetének sajátosságait.



4.17. ábra: A modellkimenetek napi átlagos eltérése a mért kádpárolgástól a tenyészidő folyamán (2005-2010.)

Ebből az összehasonlításból kitűnik, hogy 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. Bár a hőmérsékletek tavasszal még alacsonyabbak is lehetnek a kora őszinél, a légnedvesség őszi növekedése számottevően korlátozza a párolgást. A különbségbeli szóródás jellegzetes évi menete tehát statisztikai törvényszerűség.

Az eredmények analízisét még kiegészítettük néhány alapvető statisztikai mutatóval, melyeket már a tagolatlan idősorra számítottunk ki (4.4. sz. táblázat). A kiválasztott

modellek eredendően különböznek típusuk alapján, végső soron a párolgásnak mint jelenségnek a fizikai megközelítésében.

**4.4. táblázat: A napi párolgás leíró statisztikai mutatóinak alakulása (2005-2010)**

<i>mm nap<sup>-1</sup></i>	A-kád	Per	FAO56	B&C	Szász	Mak	P&T	WMO66	Mah	S&W	PMF56
<b>Max.</b>	12,10	7,67	8,18	11,79	6,49	9,70	7,17	16,05	17,30	14,76	12,85
<b>Min.</b>	0,00	0,00	0,00	0,33	0,21	-0,05	0,24	0,04	0,05	0,15	0,23
<b>Átlag</b>	3,94	2,52	3,07	4,67	3,38	4,37	3,28	2,77	3,28	4,48	4,71
<b>R.</b>	12,10	7,67	8,18	11,46	6,28	9,75	6,93	16,00	17,25	14,61	12,62
<b>St.D.</b>	2,18	1,41	1,61	2,32	1,51	2,31	1,55	1,82	2,04	2,22	2,22
<b>CV(%)</b>	55,3	56,0	52,6	49,8	44,5	53,0	47,3	65,8	62,2	49,5	47,0
<b>Var.</b>	4,75	2,00	2,60	5,40	2,27	5,35	2,41	3,32	4,18	4,92	4,91

**Max.:** abszolút maximum, **Min.:** abszolút minimum, **Átlag:** középérték, **R.:** teljes szóródás intervalluma, **St.D.:** szórás, **CV(%):** variációs koefficiens, **Var.:** variancia, n=1284

A modellek átlagos kimeneti értékei kimutathatóan különböznek az egyes modelltípusok átlaghoz képesti szórásában, variációs koefficiensében is, az átlagosan legnagyobb ET<sub>0</sub>-t becsülő és a legnagyobb eredménybeli szóródást adó modellek köre nem esik egybe. A tömegáram-alapú két modell kimenetei igen nagy változékonyságot mutatnak annak ellenére, hogy a legnagyobb átlagos ET<sub>0</sub> értékeket a kombinált, illetve az empirikus modellek adják. Mégis épp az utóbbi csoportokra volt jellemző a legkisebb CV érték.

Statisztikai jellegű vizsgálatainkhoz szervesen hozzátartozik még a modellek kapcsolatának, egymáshoz képesti „hibáinak” számszerűsítése. A Pearson-féle korrelációs együttható értékeit ugyancsak modellenként számítottuk ki (**4.5. sz. táblázat**), azaz a típusokat nem vontuk össze egymással, hogy az ebből származó torzító hatást kiküszöböljük.

**4.5. táblázat: A Pearson-féle korreláció keresztanalízisének eredménytáblázata**

	A-kád	Per	FAO56	B&C	Szász	Mak	P&T	WMO66	Mah	S&W	PMF56
A-kád	1,00	0,97	0,99	0,83	0,78	0,81	0,80	0,81	0,82	0,87	0,86
Per	0,97	1,00	0,99	0,87	0,83	0,84	0,81	0,75	0,79	0,85	0,84
FAO56	0,99	0,99	1,00	0,84	0,80	0,82	0,81	0,76	0,79	0,84	0,84
B&C	0,83	0,87	0,84	1,00	0,95	0,96	0,92	0,81	0,85	0,93	0,94
Szász	0,78	0,83	0,80	0,95	1,00	0,97	0,95	0,72	0,77	0,89	0,91
Mak	0,81	0,84	0,82	0,96	0,97	1,00	0,97	0,75	0,80	0,92	0,95
P&T	0,80	0,81	0,81	0,92	0,95	0,97	1,00	0,70	0,73	0,88	0,92
WMO66	0,81	0,75	0,76	0,81	0,72	0,75	0,70	1,00	0,99	0,93	0,90
Mah	0,82	0,79	0,79	0,85	0,77	0,80	0,73	0,99	1,00	0,95	0,91
S&W	0,87	0,85	0,84	0,93	0,89	0,92	0,88	0,93	0,95	1,00	0,99
PMF56	0,86	0,84	0,84	0,94	0,91	0,95	0,92	0,90	0,91	0,99	1,00

(n=1284)

Ezt a vizsgálatot valójában az eddigiek megerősítéseképpen végeztük el, hiszen a modelljeink fentebb tárgyalt jellegzetességeinek tükrében várható volt, hogy a „rokon”

becslő eljárások között magas korrelációs együtthatókat kapunk. A legszorosabb korreláció 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 eredményeinél mutattuk ki, s különösen a sugárzás-alapú módszerekkel korrelálnak kevésbé szorosan. Ennek oka egyrészt, hogy ezek képezik a másik olyan kategóriát, amely leginkább eltérő eredményt ad a vizsgált modellek többségéhez képest. Más szempöngből viszont természetesnek mondható a két modelltípus különbözöské, hiszen részben más a bemeneti értékként használt légköri paraméterek köre is. Átfedés a Makkink- és a tömegáram-alapú módszerek között van, itt szorosabban is alakul a kapcsolat.

**4.6. táblázat: A hibaszörás (RMSE) keresztanalízisének eredménytáblázata**

	A-kád	Per	FAO56	B&C	Szász	Mak	P&T	WMO66	Mah	S&W	PMF56
A-kád	-	0,34	0,20	1,31	0,94	1,36	0,94	1,06	1,16	1,11	1,14
Per	0,53	-	0,24	1,14	0,84	1,27	0,90	1,20	1,24	1,18	1,19
FAO56	0,28	0,21	-	1,27	0,91	1,33	0,91	1,18	1,26	1,19	1,20
B&C	1,23	0,69	0,88	-	0,45	0,65	0,61	1,08	1,06	0,80	0,77
Szász	1,36	0,79	0,97	0,69	-	0,57	0,50	1,26	1,30	1,01	0,90
Mak	1,28	0,77	0,93	0,66	0,37	-	0,37	1,20	1,24	0,86	0,70
P&T	1,31	0,82	0,95	0,92	0,49	0,55	-	1,30	1,40	1,05	0,88
WMO66	1,27	0,93	1,05	1,38	1,04	1,52	1,11	-	0,28	0,79	0,98
Mah	1,23	0,86	1,00	1,21	0,96	1,40	1,06	0,25	-	0,68	0,90
S&W	1,09	0,75	0,87	0,84	0,68	0,89	0,74	0,65	0,62	-	0,32
PMF56	1,12	0,76	0,88	0,81	0,61	0,73	0,62	0,81	0,83	0,32	-

(n=1284)

A modellteljesítmény értékeléséhez meghatároztuk a hibaszörás (RMSE) értékeit (**4.6. sz. táblázat**), mely mutató kifejezi a modellnek a viszonyítási alaphoz képest mutatott „hibáját”. Esetünkben, mivel nem klasszikus előrejelzési feladatról van szó, nincs kikötött ún. „megfigyelt érték”, mert a mért adatsor is teszt alanya, a kádmérés mellé minden modellt beillesztettünk viszonyítási alapként is. A modellek változó alappal történő összehasonlításakor utóbbinak a szörásával is összevetettük a kapott hibaértékeket, annak érdekében, hogy kimutatásunk objektívebb legyen. (A szörás értékei megtalálhatók a **4.4. sz. táblázat** St.D.-sorában.) A hibaértékek alapján három fő irányvonalat határoztunk meg a viszonyítási alap kiválasztásában. Elsöként a mért A-kád-adatsorra támaszkodtunk, másodsorban a gyakorlatban legelterjedtebb PMF56-ot választottuk. A harmadik megközelítés szerint azt a modellt tekintettük etalonnak, amely jelen vizsgálatban a lehető legtöbb más modellhez képest a legkisebb hibát mutatja. Az

elv helyessége természetesen vitatható, hiszen az elsősorban technikai és reprezentativitási szempontok szerint összeválogatott 10 modellhez való jó igazodásból még nem következik a jó modelteljesítmény, ha a cél a referenciapárolgás valós értékének minél biztosabb becslése. RMSE értékeik alapján első irányelvünk (A-kád) szerint a Per és a FAO56; második (PMF56) szerint a S&W; harmadik szerint pedig a Szász és P&T-modell emelhető ki. Az átlagos PE (százalékos hiba) alapján hasonló következtetést vontunk le.

4.7. táblázat: A reziduumokra számított statisztikai mutatók A-kád (a) és PMF56 (b) alapján

<i>mm nap<sup>-1</sup></i>	Per	FAO56	B&C	Szász	Mak	P&T	WMO66	Mah	S&W	PMF56
<b>Max.</b>	0,00	0,00	5,21	3,44	4,91	3,20	4,68	5,20	6,44	6,21
<b>Min.</b>	-5,76	-4,00	-6,01	-7,76	-6,60	-7,39	-6,37	-6,16	-4,56	-4,33
<b>Átlag</b>	-1,42	-0,87	0,73	-0,56	0,43	-0,66	-1,17	-0,66	0,54	0,77
<b>St.D.</b>	0,88	0,61	1,34	1,38	1,40	1,33	1,27	1,26	1,14	1,17
<b>Var.</b>	0,77	0,38	1,79	1,89	1,95	1,76	1,62	1,58	1,30	1,37
<b>R.</b>	5,8	4,0	11,2	11,2	11,5	10,6	11,0	11,4	11,0	10,5

a)

<i>mm nap<sup>-1</sup></i>	A-kád	Per	FAO56	B&C	Szász	Mak	P&T	WMO66	Mah	S&W
<b>Max.</b>	4,33	2,07	2,88	3,20	0,24	1,24	0,35	3,19	4,45	1,91
<b>Min.</b>	-6,21	-8,96	-8,30	-3,90	-7,52	-4,35	-7,16	-4,42	-3,77	-2,27
<b>Átlag</b>	-0,77	-2,19	-1,65	-0,05	-1,33	-0,35	-1,43	-1,94	-1,43	-0,23
<b>St.D.</b>	1,17	1,28	1,23	0,81	1,04	0,73	1,00	1,00	0,90	0,32
<b>Var.</b>	1,37	1,63	1,51	0,66	1,08	0,54	1,01	1,00	0,80	0,10
<b>R.</b>	10,5	11,0	11,2	7,1	7,8	5,6	7,5	7,6	8,2	4,2

b)

**Max.:** abszolút maximum, **Min.:** abszolút minimum, **Átlag (MBE):** középérték, (azaz szisztematikus hiba), **St.D.:** szórás, **Var.:** variancia, **R.:** teljes szóródás intervalluma, n=1284

Az 4.7. a és b táblázatban közölt mutatókat már kifejezetten az előzőleg vázolt összehasonlítás alapján számítottuk, de csak a kád (a) és a PMF56 modell (b) értékeihez számított eltérések alapján. A kádpárolgáshoz képest legkisebb szisztematikus hibát a Makkink és a S&W modell módosított sugárzási egyenleg változata mutatta. Itt a nagy szórással és varianciával jellemezhető eltérő előjelű eltérések oltották ki egymást. Azaz a kimeneti értékek végösszegeit a mért adatsorral összevetve, így adhattak e modellek relatíve kicsi eltérést a kevésbé szoros korreláció ellenére is.

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. Ennek valódi oka azonban a két módszer elvi alapjainak azonossága.

## b) Érzékenységvizsgálat

Ahhoz, hogy egy adott  $ET_0$  modell valódi teljesítményét, megbízhatóságát értékelhessük, fontos vizsgálni az egyes bemenő paraméterek változtatására adott reakcióját, más szóval az egyes inputok változásaira való érzékenységet. Mivel a légköri állapothatározók túlnyomóan egymással is kapcsolatban állnak, nehéz feladat különválasztani a modellválaszokat, azaz a kimenetben felismerhető különbségek okát. Az érzékenységvizsgálatok számszerűsített választ adnak arra, hogy mely modellnél mely légköri paraméter meghatározott nagyságú és irányú változása hány %-os eltérést okoz a kimenetben, illetve mekkora bizonytalansági szinten.

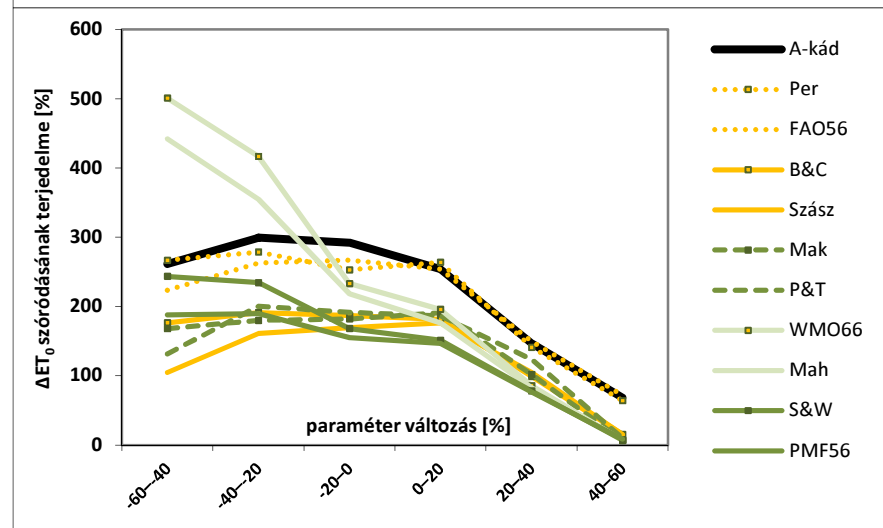
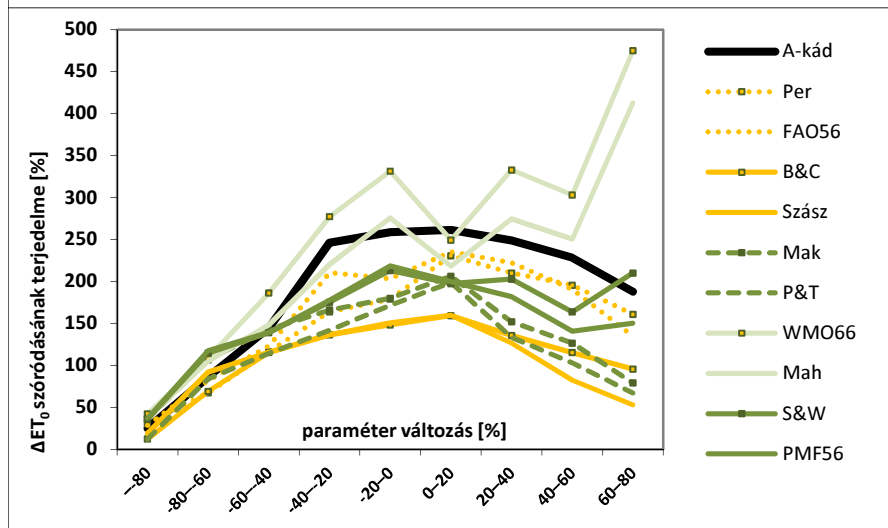
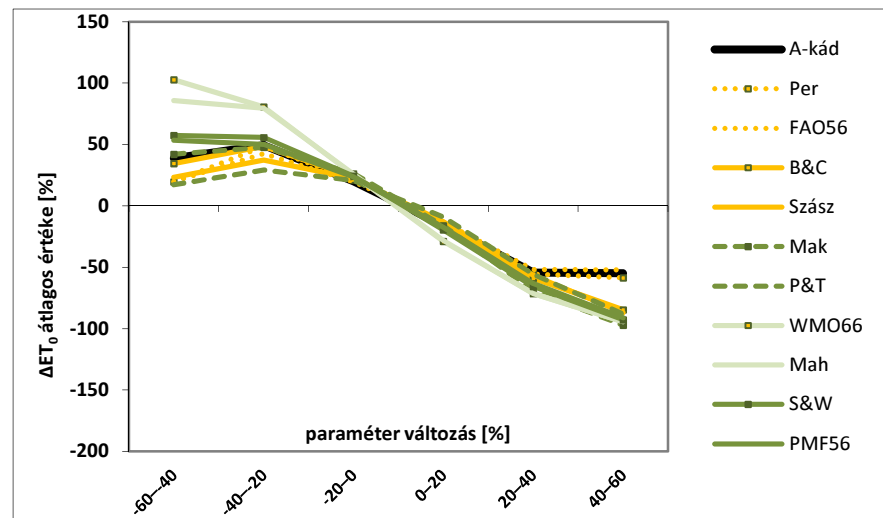
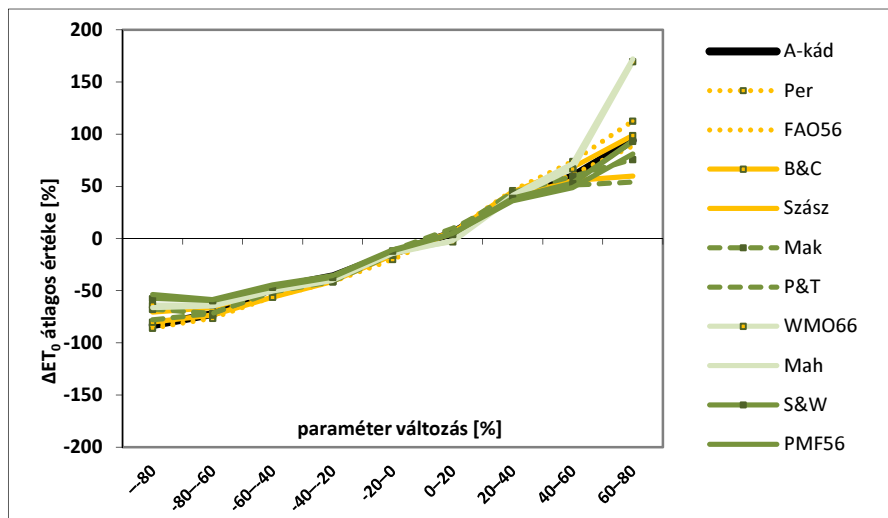
Kiválasztottunk 4 független változóként funkcionáló meteorológiai paramétert: a 2m-en mért hőmérsékletet (T), a relatív nedvességet (RH), a globál napsugárzást ( $R_g$ ), és a 10 m-en mért szélesebséget (u). A modellek kimeneteinek idősoraival együtt ezek adatsorából is számtani átlagot képeztünk, majd minden napi adatpárhoz kiszámoltuk az ettől való eltérést ( $\Delta$ ). A lehető legjobb összehasonlíthatóság érdekében (*Yates-Strzepek, 1994*) minden paraméter és a kimenetek  $\Delta ET_0$ -értékeit is átszámítottuk %-os változásra. Az input változásainak értéktartományokra bontásával aggregáltuk és ábráztuk mind a kimeneti értékek vizsgálati időszakra számolt átlagát, mind pedig ennek szóródási terjedelmét (R).

A **4.18. sz. ábrán** a hőmérséklet hatását mutatjuk be a modellekre és magára a mért A-kád adatsorra vonatkozóan. Hozzávetőleg a -60-+40 %-os tartományban mozog együtt az összes modell  $\Delta ET_0$ -jelleggörbéje, ez alatt és fölött válik láthatóvá a közöttük lévő széttartás, miközben elmondható, hogy a be- és a kimeneti adatok változásai közötti összefüggés csaknem lineáris. A változások szóródása a legtöbb modellnél jellegzetes ívet követ, a bemenő paraméter átlaghoz képest vett minél negatívabb értékeinél minimális, majd az átlag körül tetőzve újra csökken, de a modellek közötti nagyobb differenciákkal. A tömegáram-alapú algoritmusok eltérő viselkedése azonban itt is megmutatkozik, ezeknél mindvégig nő az outputváltozás szóródásának intervalluma. Figyelemre méltó a két hőmérséklet-alapú empirikus modell és a P&T mindvégig legkisebb változékonysága, ezeknél a módszereknél tűnik legstabilabbnak a hőmérsékletváltozásra adott modellválasz. Következtetésünk a hasonló komparatív elemzőmunkák eredményeivel összhangban van.

A **4.19. sz. ábrán** a relatív nedvesség vonatkozásában végzett érzékenységvizsgálataink eredményét látjuk. A görbék lefutása a RH értékszámainak alakulása miatt fordított, a vizsgálat eredménye mégis a hőmérsékletéhez igen hasonlóan alakult. A hasonlóságok oka, hogy a relatív nedvesség a hőmérsékletnek is függvénye, azaz a két paraméter eleve kapcsolatban áll. A légnedvesség változásának és a kimenetek változásának kapcsolata viszont különbözik, logisztikus függvénnyel jellemezhető, melyben közel lineáris szakaszt is elkülöníthetünk. További eltérés, hogy a paraméter értékének 20 %-os csökkenésétől már jelentkezik a modellek széttartása, illetve hogy a kimenetek szóródási terjedelme a Szász, valamint a S&W, Makkink és a PMF-56 modell esetében a legkisebb. A tömegáram-alapú modellek eltérően viselkedtek, szóródásuk terjedelme - 20 %-os légnedvesség differenciánál és ez alatt mindvégig 200 % feletti.

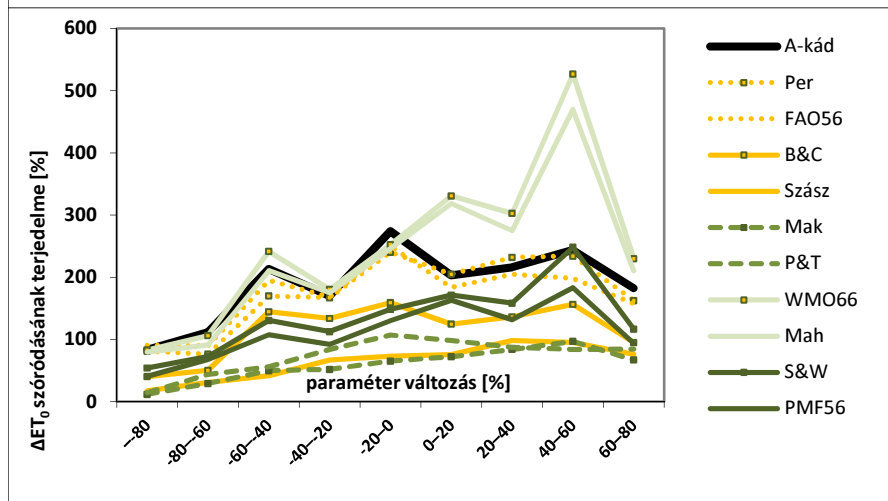
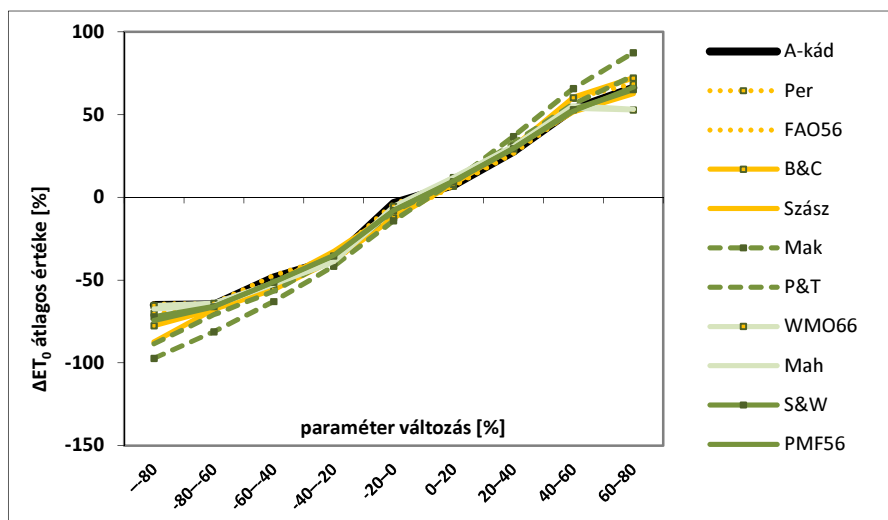
A globálsugárzás nagyságának növekedésével lineáris módon emelkedik a modellek által becsült  $ET_0$  értéke (**4.20. sz. ábra**). A négy állapothatározó közül itt állapítható meg a legegyszerűbben és a modellekre nézve legáltalánosabban az összefüggés. A szokásos divergencia csupán a  $\pm 80$  %-os szintek környékétől definiálható. Szóródás szempontjából újra elkülönül a két tömegáramon alapuló modell, míg a legnagyobb stabilitás a Makkink, Szász és a P&T modellekre jellemző. Mért sugárzási adatok alkalmazásának előnyeit más források (*Lu et al. 2005*) is megerősítik. A szóródás mértéke természetesen a negatív extrémum közelében a legkisebb, majd az átlag körül tetőzik és nagy bizonytalanság mellett csökken újra a modellek többségénél.

A többi állapothatározótól eltérő módon a szélnél (**4.21. sz. ábra**) átmenetileg sem látunk lineáris összefüggést a paraméter és a kimenet változásának dinamikája között, itt logaritmus jellegű kapcsolat mutatkozik. Szélcsendes és átlagos szélességű ( $\approx 0,5-2,8$  m/s) napokon a modellek meglehetősen szorosan korreláló eredményeket adnak. Az átlaghoz viszonyított, hozzávetőleg -50 %-os szélesség környékén minden modellenél meredeken emelkedik a számított párolgás nagysága, majd ennek átlagos értékét elérve 5 modellenél is egészen a +120 %-os paraméterváltozásig szinten marad, számottevően nem nő. Ezek a modellek (Szász, P&T, B&C, Makkink, Pereira) a szél további változására tehát gyakorlatilag érzéketlennek mondhatók, szemben a tömegáram-alapúakkal. A változás szóródását tekintve a Pereira-modell kivételével ugyanezek mondhatók egyúttal a legstabilabbnak is, tovább erősítve ezek stabil, „robosztus” jellemvonását.



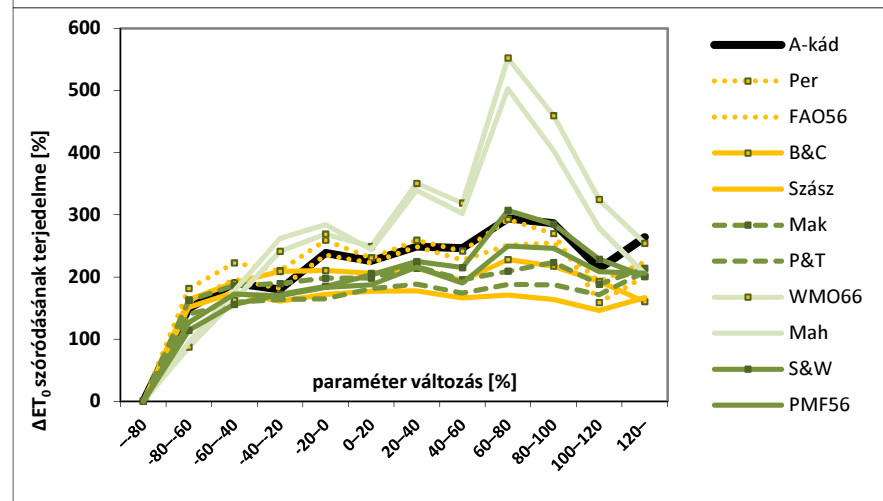
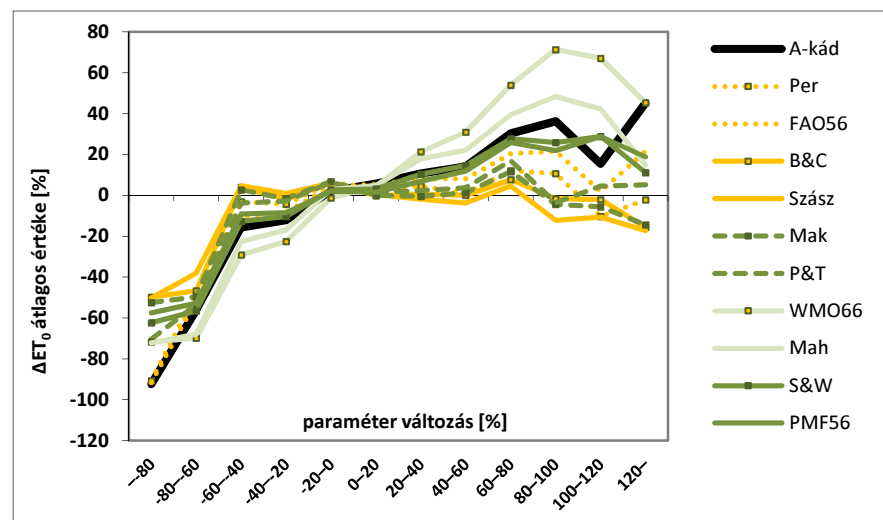
Az ábrán 0%-os paraméterváltozás 17.1 °C-nak felel meg (min: 1.3, max: 30.4°C).  
**4.18. ábra: A hőmérséklet változásának hatása a modellek kimeneti értékeire**

Az ábrán 0%-os paramétervált. 67,9 % RH-nak felel meg (min: 30,7, max: 99,0 %).  
**4.19. ábra: A relatív nedvesség változásának hatása a modellek kimeneti értékeire**



Az ábrán 0%-os paraméterváltozás  $17,1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ -nak felel meg (min:  $1,0$ , max:  $30,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ ).

4.20. ábra: A globálsugárzás változásának hatása a modellek kimeneti értékeire



Az ábrán 0%-os paramétervált.  $2,8 \text{ m s}^{-1}$ -nek felel meg (min:  $0,0$ , max:  $9,3 \text{ m s}^{-1}$ )

4.21. ábra: A szélesség változásának hatása a modellek kimeneti értékeire



### c) Összegzés, a modellek szelekciója

Különböző időszakokra vetített összegek alapján megállapítottuk, hogy az összegszerű értékelés nagyon érzékeny a modellek akár kisebb szisztematikus eredménybeli különbségeire is, egy tenyészidő alatt több száz mm eltérés is lehet. A Blaney-Criddle, Penman-Monteith-FAO-56, Shuttleworth-Wallace és a Makkink módszer adta a legnagyobb összeget, 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 állapothatározókat 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.

A további vizsgálatokból elimináltuk a tömegáram-alapú módszereket, egyrészt a tanulmányozott modellek között szélsőértéknek számító alacsony napi  $ET_0$  eredményeikhez társuló nagy ingadozásaik – „túlérzékenységük” – miatt. Ugyancsak el kellett vetnünk a kádmérésre alapuló módszereket, mert Debrecen-Kismacs mérőállomáson nem áll rendelkezésre ilyen adatsor a kísérleti éveinkre vonatkozóan. A kombinált módszerek közül a Shuttleworth-Wallace több lehetőséget ad ugyan a pontosságnövelésére, de jóval nagyobb inputigénye és a számítása is komplikáltabb, mint a Penman-Monteith-FAO-56 esetében. Emiatt utóbbi megtartása mellett döntöttünk, tekintettel arra, hogy mindvégig törekedtünk vizsgálatainkban az egyszerű gyakorlati hasznosíthatóság szempontjainak figyelembevételére. Az empirikus módszerek két csoportjából a Szász, illetve a Priestley-Taylor modellt tartottuk meg a statisztikai analízisek eredményei alapján.

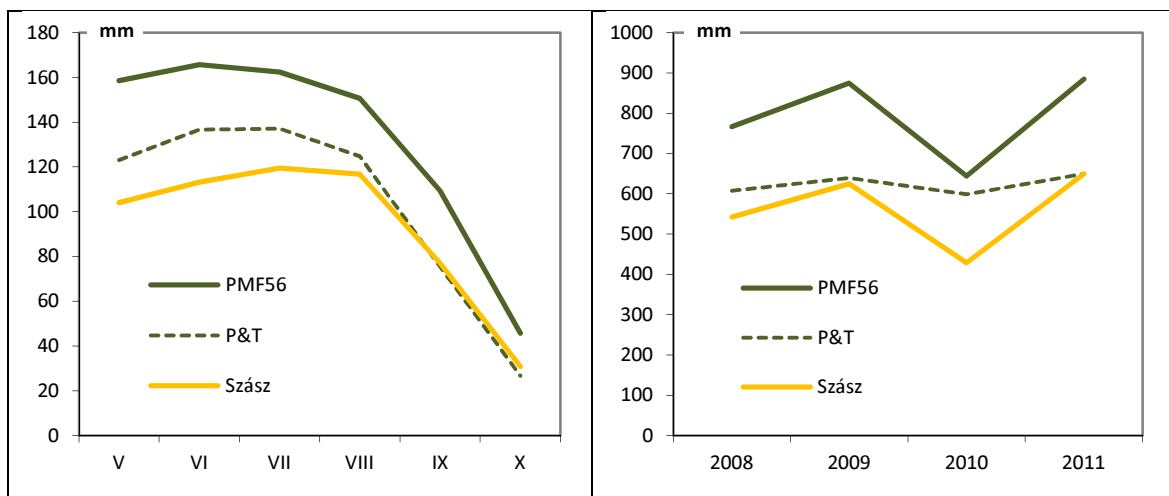
A potenciális párolgás modell-vizsgálatok második, termőhelyi szakaszát a Penman-Monteith-FAO-56, a Priestley-Taylor, valamint a Szász-féle módszer (a kádmérésekkel a legjobb korrelációt mutató 3 algoritmus) elemzésére szűkítettük.

#### 4.5.1.2. Analízis a kismacsi adatsorok alapján

A kiválasztott három modell újabb vizsgálata során már nagyobb hangsúlyt fektettünk a gyakorlati alkalmazásokban történő tesztelésre, így a statisztikai- és érzékenységvizsgálatot kevésbé részletesen tárgyaljuk.

##### a) Általános, leíró statisztikai elemzés

A becsült potenciális párolgás időszaki összegeit tekintve következtetéseink hasonlóak a korábbi vizsgálatok eredményeihez. A 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.



4.22. ábra: A potenciális párolgás havi és évi összegei a vizsgált modellek alapján

Az értékek időbeli menetében a korábbi vizsgálatokhoz hasonlóan tavaszi-nyári „széttartás” figyelhető meg. A 2010-es csapadékos évjárat V-X. szakasza mutatott alacsonyabb összeget, szemben a 2009-es és 2011-es jobbára száraz tenyészidőszakokkal (4.22. sz. ábra).

A modellkimeneteket vizsgáltuk az alapvető statisztikai mutatók alapján is, a teljes adatsor napi értékeire vonatkoztatva. Megállapítottuk, hogy a legnagyobb szóródás a PMF-56 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 (**4.8. sz. táblázat**).

**4.8. táblázat: Néhány leíró statisztikai mutató alakulása a vizsgált időszakra (2008-2011, V-X.)**

<i>mm nap<sup>-1</sup></i>	<b>PMF56</b>	<b>P&amp;T</b>	<b>Szász</b>
<b>Max.</b>	10,72	7,89	6,74
<b>Min.</b>	0,20	0,29	0,07
<b>Átlag</b>	4,50	3,54	3,19
<b>R.</b>	10,52	7,61	6,67
<b>St.D.</b>	2,10	1,63	1,50
<b>CV</b>	46,7	46,0	47,1
<b>Var.</b>	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=704

Az egyes módszerek eredményeinek értéktartománya közötti összefüggést először a Pearson-féle korrelációs együttható elemzésével vizsgáltuk. A három modell esetében a legszorosabb egyezést a PMF56 és a Szász között találtuk, a leggyengébbet pedig utóbbi, valamint a P&T között (**4.9. sz. táblázat**).

**4.9. táblázat: A Pearson-féle korreláció keresztanalízisének eredménytáblázata (2008-2011, V-X.)**

	<b>PMF56</b>	<b>P&amp;T</b>	<b>Szász</b>
<b>PMF56</b>	1,00	0,92	0,94
<b>P&amp;T</b>	0,92	1,00	0,88
<b>Szász</b>	0,94	0,88	1,00

(n=704)

A három kimeneti adatsor közötti kapcsolat jellemzésére kiszámítottuk a reziduumok négyzetátlagából vont gyököt, az RMSE-mutatót. A **4.10. sz. táblázatban** közölt értékekre szerint legkisebb a „hibaszórás” értéke a Szász és a PMF-56 modellek között, legnagyobb pedig a P&T és a PMF56 között.

**4.10. táblázat: a RMSE keresztanalízisének eredménytáblázata (2008-2011, V-X.)**

	<b>PMF56</b>	<b>P&amp;T</b>	<b>Szász</b>
<b>PMF56</b>	-	0,62	0,51
<b>P&amp;T</b>	0,80	-	0,71
<b>Szász</b>	0,71	0,78	-

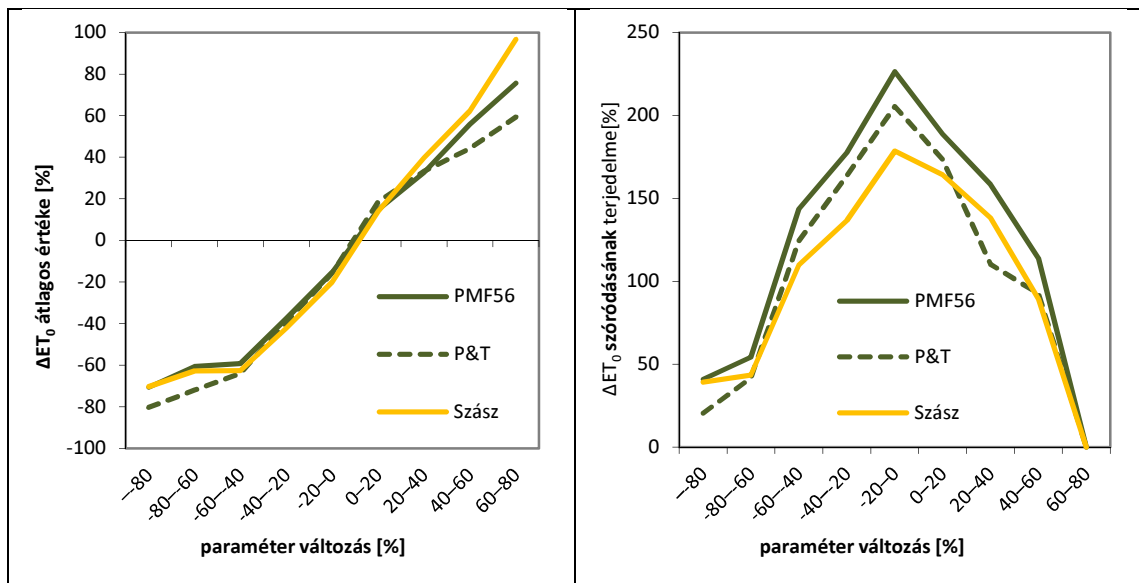
(n=704)

#### b) Érzékenységvizsgálat

A modellek egyes meteorológiai tényezők változásaival szemben mutatott érzékenységét az előzőekkel teljesen analóg módon végeztük, ugyanazon változók

bevonásával. A három módszer viselkedése hasonlóan bizonyult a különböző értéktartományokban.

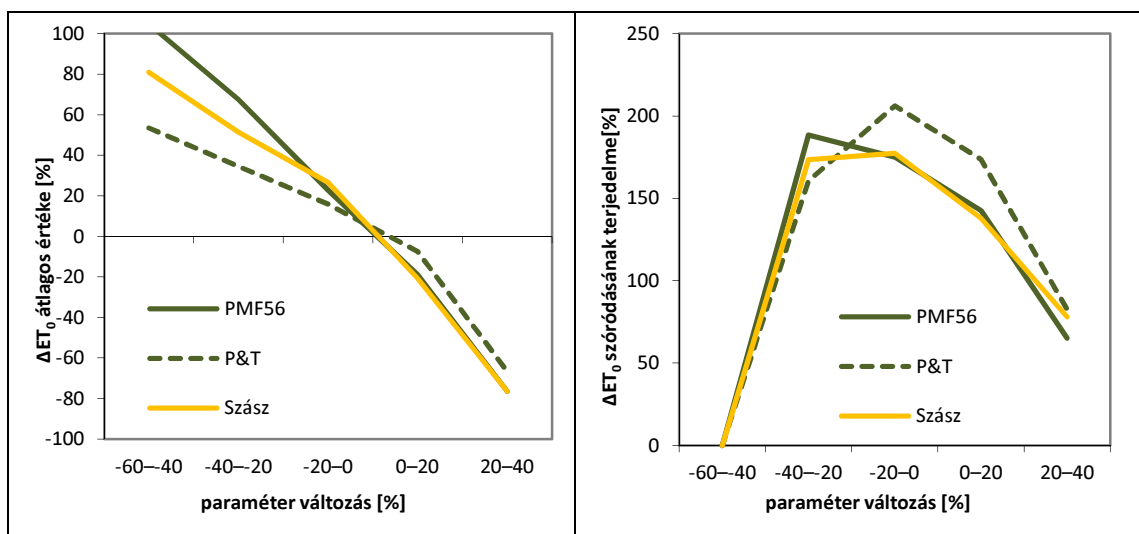
Elsőként a hőmérséklet változására adott modellválaszt vizsgáltuk (4.23. sz. ábra). A bal oldali diagramon látható, hogy a három modell teljesen hasonló kimenet-változásbeli reakciót mutatott, s mindegyiknél csaknem lineáris kapcsolat állt fenn a be- és a kimenetek változásai között.



Az ábrán 0%-os paraméterváltozás 17,7 °C-nak felel meg (min: 2,0, max: 28,6 °C)

4.23. ábra: A hőmérséklet változásának hatása a modellek kimeneti értékeire

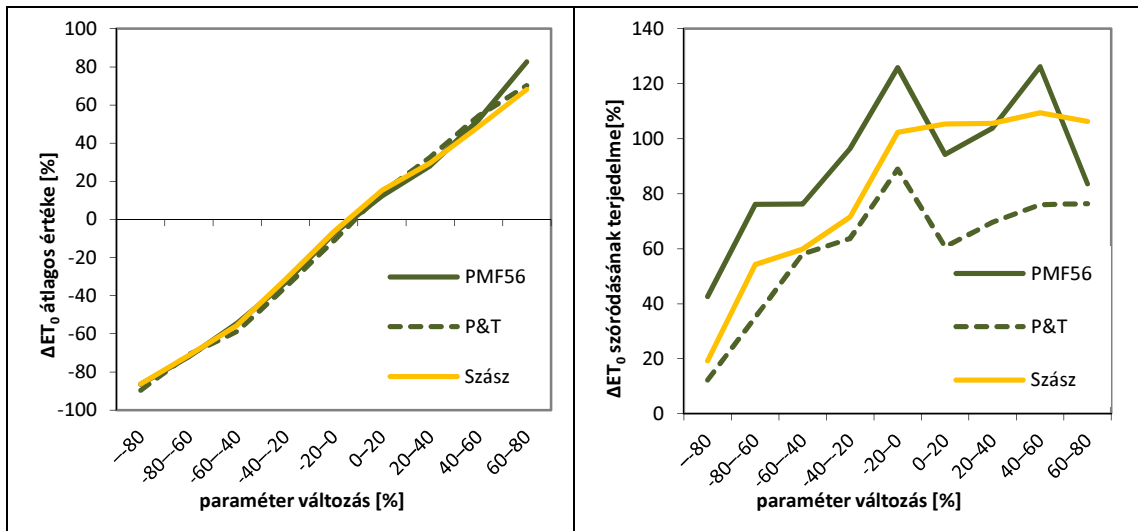
A jobb oldalon ábrázolt szóródási intervallumváltozás jellegzetes, az átlaghoz közeli tartományban maximális, a szélsőértékek irányában,  $\pm 60$  % alatt illetve fölötti paraméterváltozásnál pedig minimuma van.



Az ábrán 0%-os paraméterváltozás 75,4 % RH-nak felel meg (min: 41,4, max: 99,9 % RH)

4.24. ábra: A légnedvesség változásának hatása a modellek kimeneti értékeire

A relatív légnedvességgel (4.24. sz. ábra) végzett hasonló vizsgálat során a hőmérsékletével megegyező eredményt kaptunk. E légköri tényező esetében is hasonló volt a modellek érzékenysége, de a minimumhoz (41,4 % RH) közeli értéktartományban határozottabbá vált a modellkimenetek közötti eltérés. Ezt valószínűleg az abban a tartományban egyre csökkenő esetszám magyarázza, ugyanezen okból 0 %-hoz közeli a szóródási terjedelem is a legalacsonyabb előfordult légnedvesség esetén.

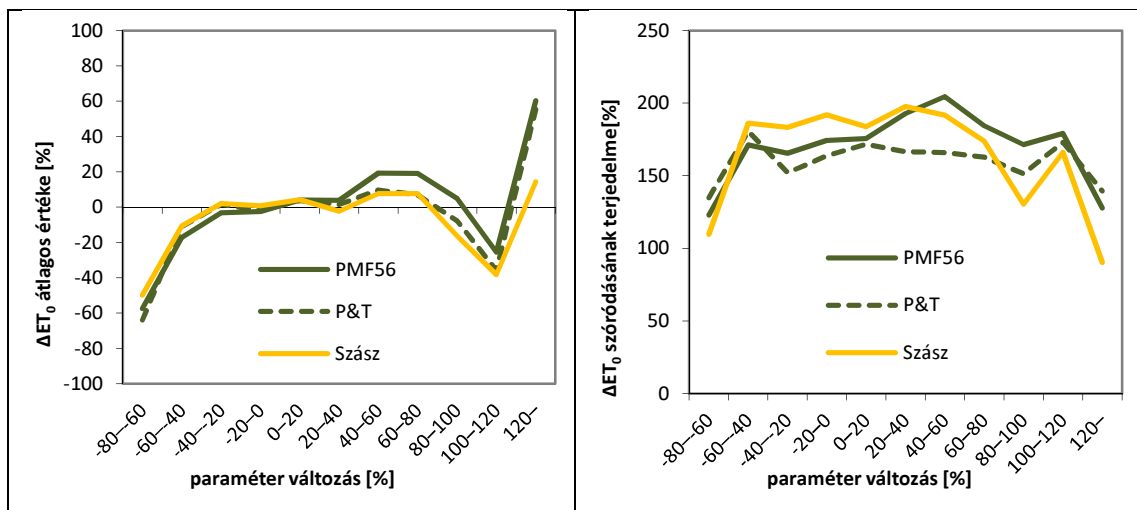


Az ábrán 0%-os paraméterváltozás  $18,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ -nak felel meg (min:  $1,5$ , max:  $37,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ nap}^{-1}$ )

**4.25. ábra: A globálsugárzás változásának hatása a modellek kimeneti értékeire**

A kimenetváltozásban minimális a különbség és egyértelműen lineáris összefüggés áll fenn a paraméter és a kimenetváltozás között sugárzási viszonyok hatásának vizsgálatokor (4.25. sz. ábra). A kimenet szóródása viszont tágabb határok között változik a három modellnél, s a sugárzás növekedésével csaknem végig növekszik. E tekintetben az előző két paramétertől különböző dinamikájú a változás, de itt sem lehet megkülönböztetni olyan modellt, amely a másik kettőnél általánosan és jelentősen kisebb szóródást mutatna kimeneteiben.

A szélsébség növekedésének hatására az átlaghoz ( $2,7 \text{ m s}^{-1}$ ) képest mért -40 és +100 %-os tartományban alig változik az átlagos  $\Delta ET_0$ . Ebben az intervallumban az erősebb szél sem okoz az átlaghoz képest számottevően intenzívebb párolgást a vizsgált három modell szerint. Mivel a változás szóródása is hozzávetőleg szinten marad ebben a tartományban, megállapítottuk, hogy a szélre nézve a három modell egyike sem kifejezetten érzékeny. Gyenge ( $<1,5 \text{ m s}^{-1}$ ), vagy erős ( $5 \text{ m s}^{-1}$ ) átlagszél mellett azonban már számottevő a párolgás csökkenése és növekedése (4.26. sz. ábra).



*Az ábrán 0%-os paraméterváltozás  $2,7 \text{ m s}^{-1}$ -nak felel meg (min:  $0,8$ , max:  $9,9 \text{ m s}^{-1}$ )*

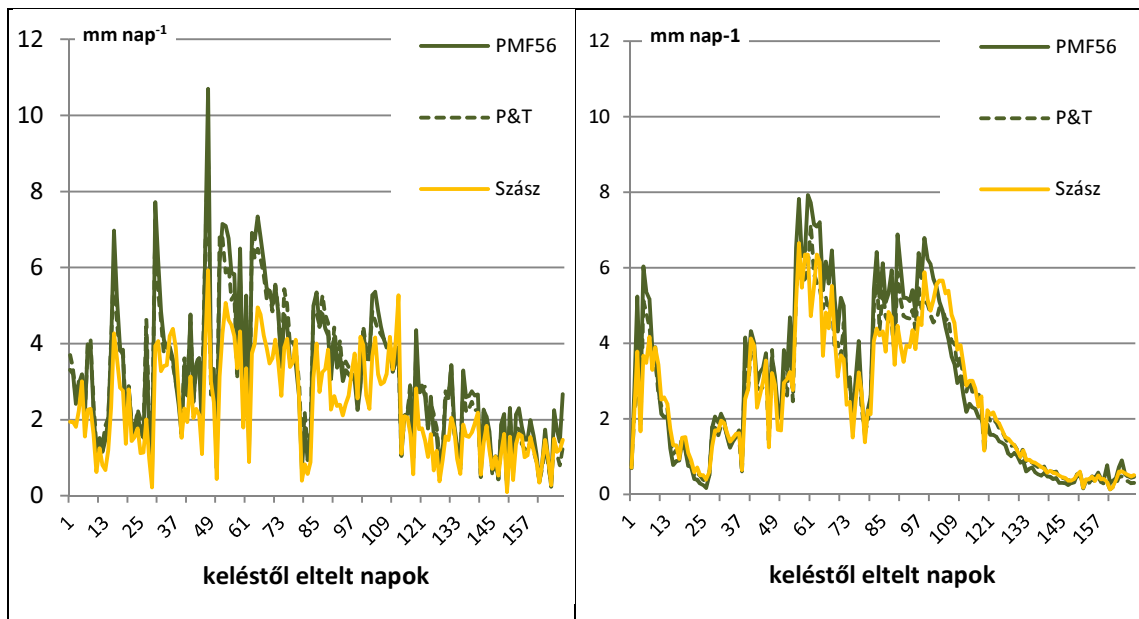
**4.26. ábra: A szélesség változásának hatása a modellek kimeneti értékeire**

A statisztikai analízis folytatásaképpen a modelleket már a gyakorlati alkalmazás számára is kézzelfoghatóbb teszteknek vetettük alá. A potenciális párolgás adatsorokat kukorica tesztállományok tényleges párolgásának becslését, a későbbiekben pedig teljes vízforgalmának szimulációját célzó modell inputjaként használtuk, összehasonlítva a Bowen-arány módszerrel becsült értékekkel.

#### **4.5.2. A tényleges párolgás becslése a referenciapárolgásból modellezési eljárással**

A kukoricaállomány tényleges párolgását a három tesztelt módszerrel, a továbbiakban referenciapárolgásként értelmezett  $ET_0$  adatokból kiindulva modelleztük a FAO vízforgalmi modellje segítségével. A FAO által kidolgozott vízforgalmi modell rögzített talaj-, állomány- léghő- és agrotechnológiai jellemzőkkel paraméterezett, s napi léptékben becsli a vízforgalom egyes tagjait. Eredménye alapesetben az állomány öntözővíz-szükséglete, öntözési rendje egy adott tenyészidőszakban. Vizsgálatainkban – gyakorlati vonatkozása miatt – a modell kimenete is lényeges, első lépésben azonban az állománynak a modell által becsült tényleges párolgását ( $ET_{c,FAO}$ ) elemeztük.

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.

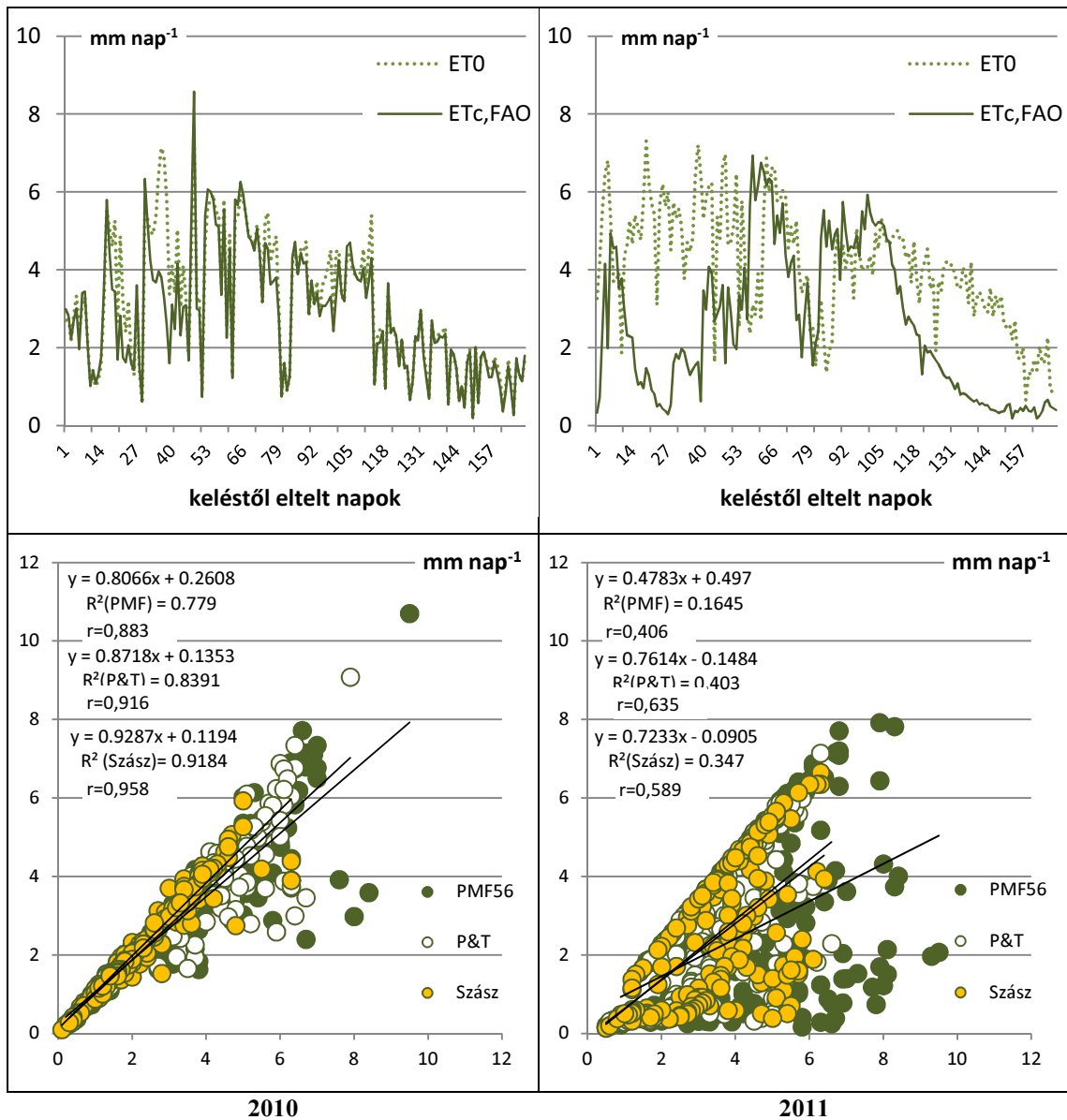


4.27. ábra: A tényleges párolgás menete a kukorica tenyészidőszakában (2010 és 2011)

A tényleges párolgás tenyészidei menetét vizsgálva (4.27. sz. ábra) megállapítottuk, hogy a 2010-es évben magasabb szinten fut mindhárom változat, ugyanakkor jóval nagyobb ingadozás is jellemzi ezt az évjáratot. A kedvező vízellátottság folyamatosan biztosította a korlátlan párolgást. Ebben csak a hűvösebb, csapadékos napokon volt tapasztalható visszaesés. 2011-ben nagyobb gyakorisággal következett be átmeneti vízhiány, különösen a tenyészidőszak első és utolsó harmadában. A köztes időszakban (július vége-augusztus eleje) a csapadék következtében a vízellátottság nem volt korlátja a párolgásnak, így a modell ebben a szakaszban becsülte a legmagasabb tényleges párolgási értékeket.

A párolgási viszonyokra jellemző, hogy a potenciális és tényleges párolgás milyen nagyságrendi összefüggésben áll egymással. Amennyiben a vízellátottság kedvező, a tényleges párolgás értéke közelíti a potenciális párolgást. A 4.28. sz. ábrán (fent) a három  $ET_0$  és  $ET_{c, FAO}$  változat *átlagának* időbeli alakulását, és a változatok korrelációját (lent) mutatjuk be. Az időskála mentén vizsgálva a két paraméter menetét, a tényleges párolgás több ízben, különösen 2011-ben haladta meg a referenciapárolgást. Magyarázata, hogy  $ET_0$  referenciapárolgás csak a referenciaként szolgáló gyep borította területre értelmezhető potenciális párolgásként. Ha a vizsgált állomány levélfelületi indexe meghaladja a referencia gyepét, tényleges párolgása is meghaladhatja a referenciapárolgást, ám az ugyanazon állományra értelmezett potenciális párolgást soha.

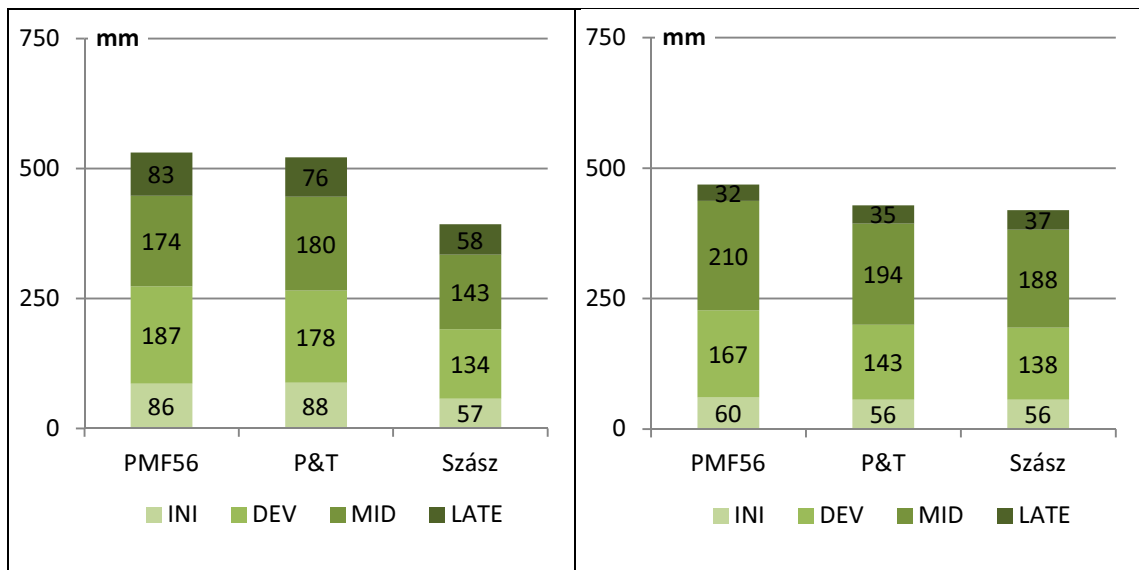
A két párolgási paraméter kapcsolatának determinációs együtthatója rendre a P&T és a Szász-változatoknál mutat szorosabb összefüggést.



4.28. ábra: A tényleges és a referenciapárolgás alakulása a tenyészidőszakban

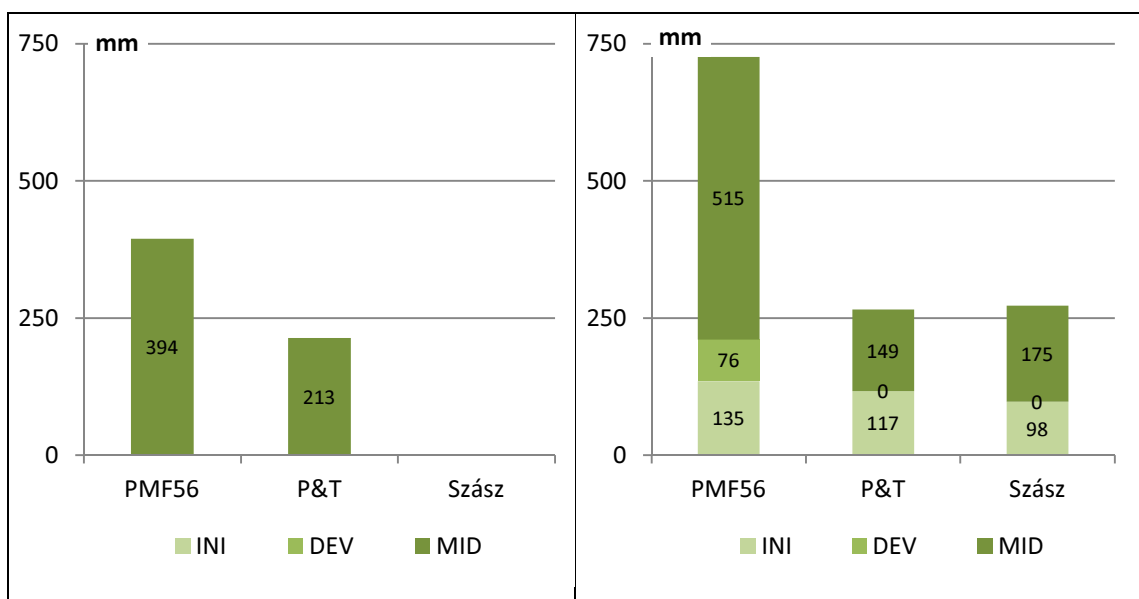
A tényleges párolgás vegetációs időre vonatkoztatott összege a vízgyenleg negatív tagja az állomány vízforgalmában. A 4.29. sz. ábrán a tenyészidő főbb szakaszai alapján bontva láthatók a három változat összegzett értékei a két évjáratban.





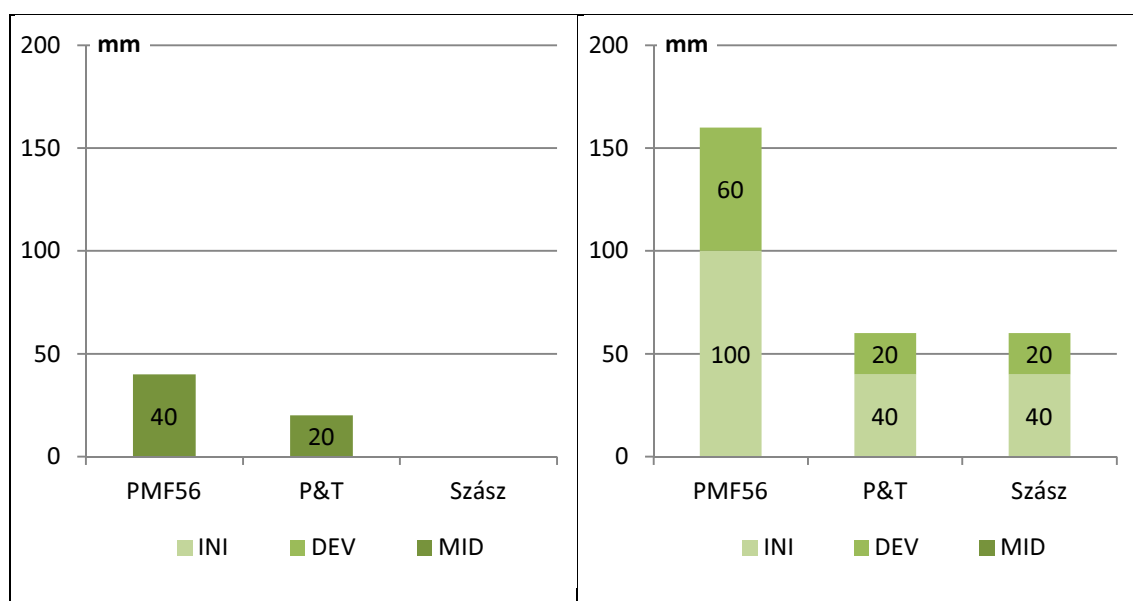
4.29. ábra: A tényleges párolgás tenyészidei összege fejlődési szakaszonként (2010 és 2011)

Az összegek jól reprezentálják a három párolgási modell közötti különbségeket, miközben a két eltérő karakterű évjárat szerinti összevetésben is megfigyelhető eltérés. A 2010-es extrém csapadékos évben a vizsgált kukoricaállomány tenyészidejének csapadékösszege 537,8 mm volt. Ekkor a PMF56 és a P&T modell által becsült tényleges párolgás egyaránt jóval magasabb értéket mutatott, mint a Szász modellé. A szárazabb, s a tenyészidő végére kifejezetten szárazzá váló 2011-es tenyészidőszak csapadékösszege 351,0 mm volt, az előző évnek mintegy 65,3 %-a. Ebben az évben csökkent a különbség a változatok tényleges párolgás értékei között, illetve szorosabb korreláció a P&T és a Szász modell között volt, s a PMF56 tért el jobban ezektől.



4.30. ábra: A kumulált öntözővíz igény tenyészidei összege fejlődési szakaszonként (2010 és 2011)

A gyakorlati alkalmazás szempontjából lényeges, hogy mekkora öntözővíz igénynek felelnek meg a párolgási algoritmusok kimenetei. A kumulált napi öntözővíz igénnyel számolva – azaz amennyiben a modell csupán megfogalmazza a szükséges öntözővíz mennyiséget, kijuttatással nem számol – tekintélyes különbségek adódnak a három változat között (**4.30. sz. ábra**). A PMF56 és a Szász-modell között még a csapadékos 2010-es évben is közel 400 mm „virtuális” vízigény-különbség van, utóbbi egyáltalán nem generál öntözővíz igényt a vegetációs idő egyik szakaszára sem. 2011-ben a különbségek mérséklődnek, eloszlásuk pedig a párolgási értékekhez hasonló. Ebben az összevetésben nem vettünk figyelembe öntözésszervezési-technológiai szempontokat, csupán összegeztük a modell által jelzett napi szükségletek nagyságát. Az utószakaszra (LATE) számolt igényt azonban nem összegeztük, mivel akkor (többnyire augusztus második felétől a betakarításig) a gyakorlatban sem jellemző öntözővíz kijuttatása szemes árukukoricában.



**4.31. ábra: A szimulált öntözővíz igény tenyészedei összege fejlődési szakaszonként (2010 és 2011)**

A **4.31. sz. ábrán** közölt értékeket tényleges öntözési tevékenységre alapoztuk: legalább napi 8 mm vízszükséglet jelentett tényleges öntözési igényt, de legfeljebb napi 20 mm-es adagok kijuttatása volt lehetséges. A feltételek teljesülésével a modell a vízadag kijuttatását feltételezve számolta tovább az állomány vízegyenlegét. A 2010-es évjáratban felmerülő öntözési szükséglet 0-40 mm között változott, 0-2 alkalommal történt öntözés a vegetáció középszakaszában (MID-szakasz). 2011-ben 60-160 mm-re

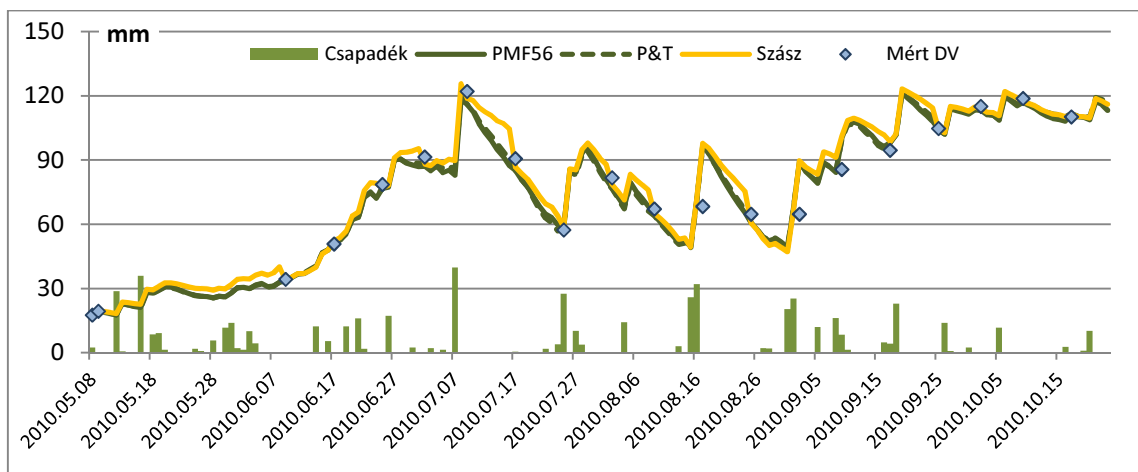
nőtt, s már mindhárom modellnél jelentkezett öntözési szükséglet. A különbségek jelentősek, a P&T és Szász kevesebb, mint 40%-át jelezte a PMF56 által számolt igénynek. Mindhárom változatban közös, hogy csak a kezdeti (INI) és a fejlődési (DEV) szakaszban volt öntözési szükséglet, a július végi csapadéknak köszönhetően a közép (MID) szakaszban nem.

#### 4.6. A tényleges párolgás értékek alkalmazási irányai, verifikációja, modell tesztek

##### 4.6.1. A talaj vízkészletének változása a FAO modell és a mért adatok alapján – modell verifikációs kísérlet

A tényleges evapotranspiráció és az öntözővíz szükséglet ellenőrzését gravimetriás talajnedvesség mérések adataira támaszkodva végeztük.

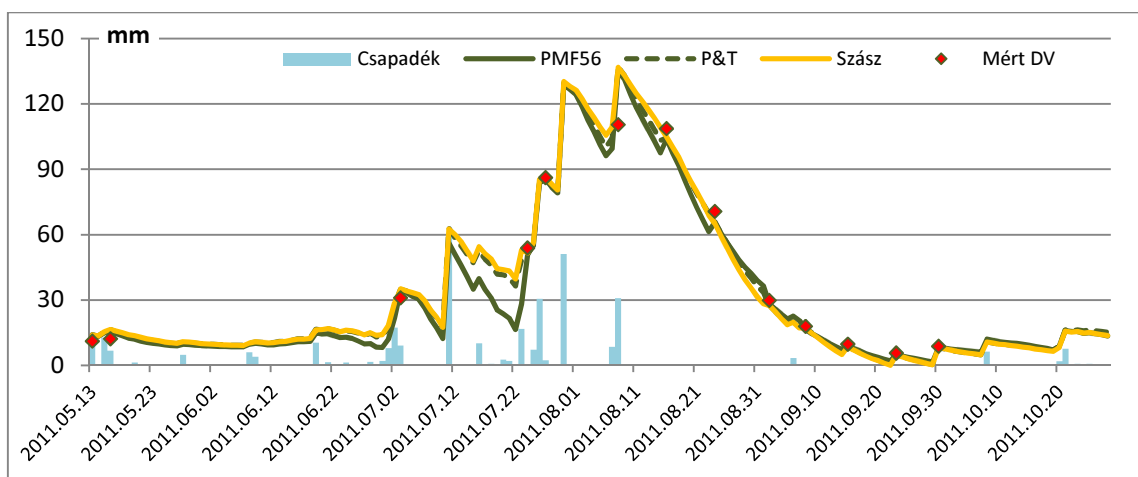
Első szakaszban a mért, átlagosan 8 naponkénti talajnedvesség idősorokat napi léptékre interpoláltuk. Ehhez nem regressziós módszert választottunk, mivel a csapadék és a napi párolgás mértéke időben folyamatosan változó érték. Az interpolációra célszerűen a FAO modellnek különböző párolgási almodelljeit alkalmaztuk, melyek 8 napos időközönként „visszacsatolásként” kezelték a mért adatpontokat. Az előzetes teszt során vizsgáltuk a 8 napos időtávok alatt a modellezett talajnedvesség készletben kumulálódó többletet, vagy hiányt.



4.32. ábra: A három modellváltozat rendelkezésre álló vízkészlet (DV) szimulációja (2010.)

Kísérletünk során hamar nyilvánvalóvá vált, hogy a modell ilyen célra történő felhasználása nem ad kellő információt az adott modellváltozat párolgás becslésének jóságáról. Ezen a ponton ugyanis számunkra az a változat volt eredményesnek tekinthető, amelyik a mért értékekkel a lehető legkonzisztensebb adatsort állította elő.

Ez úgy is megvalósulhat adott modellnél, ha az a párolgást ugyan pontatlanul becsli, de mégis legjobban megközelíti a talajszelvény *összes vízbevételének és veszteségének arányát, nagyságát*. A bevételi tételek ugyanis a csapadék (öntözés) mellett származhatnak a mélyebb rétegekből való kapilláris emelésből (CR) is, míg a veszteség az evapotranspiráción kívül a mélyebb rétegekbe történő leszivárgásból (DP), amennyiben az el- és odafolyás tételeket elvetjük. A **4.32. sz. ábrán** a 2010-es, a **4.33. sz. ábrán** pedig a 2011-es tenyészidő modellfuttatási kísérleteinek eredményét mutatjuk be. Az értékek a diszponibilis víztartalomra vonatkoznak a mindenkori  $Z_r$ -mélységű gyökértérben.



**4.33. ábra: A három modellváltozat diszponibilis vízkészlet (DV) szimulációja (2011.)**

A mért értékektől való eltérést az ábrán modellezett görbék csapadéktól független, hirtelen értékváltozása mutatja. Nagyságát az átlagos abszolút hiba (MAE) mutatóval írtuk le (**4.11. sz. táblázat**).

**4.11. sz. táblázat: Az átlagos abszolút hiba értékei (mm) a talaj DV szimulációjára**

	PMF56	P&T	Szász
<b>2010</b>	2,69	2,79	2,77
<b>2011</b>	8,48	8,34	8,03

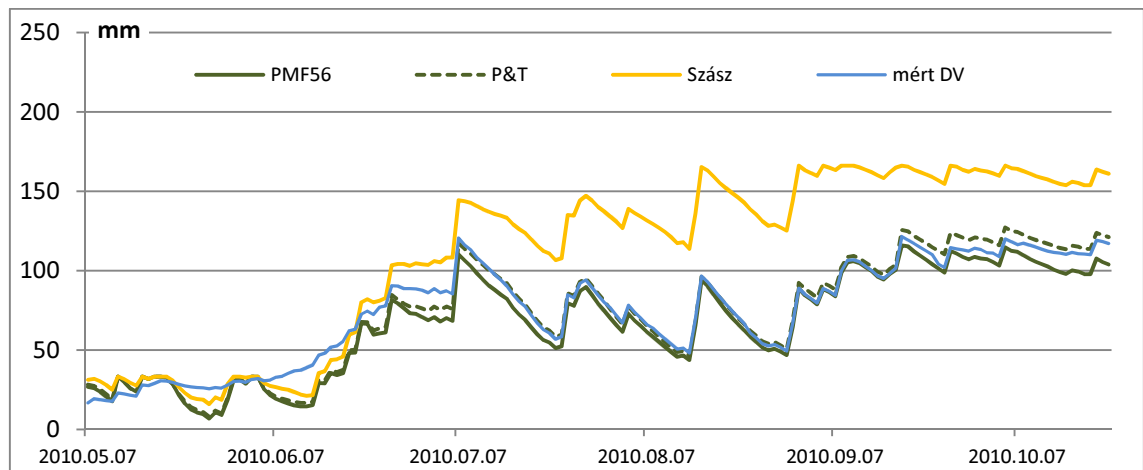
n=20 (2010)

n=13 (2011)

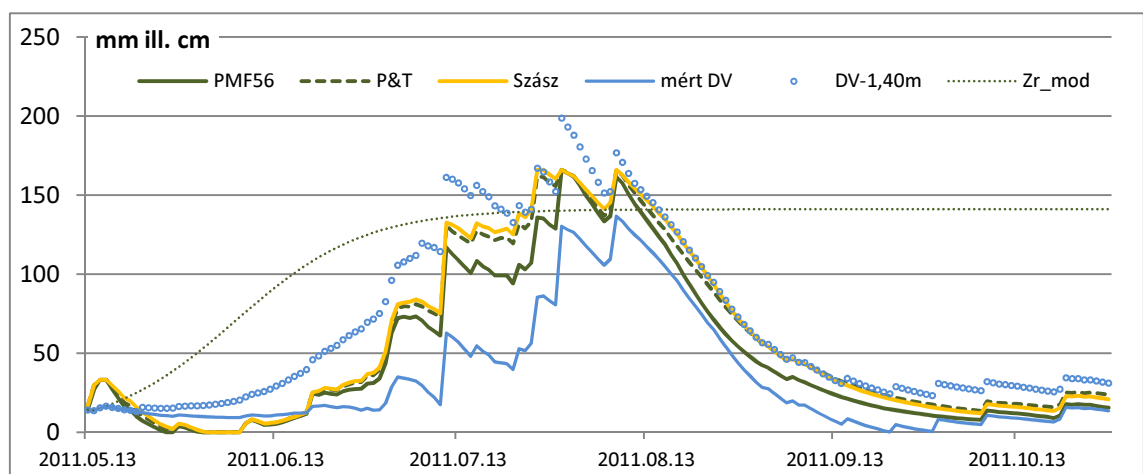
2010-ben a PMF56, 2011-ben pedig a Szász modellváltozat közelítette legjobban a mért talajnedvesség-adatpontjait. A hiba nagysága a megadott esetszámok mellett, az ábrák tanúsága szerint sem tekinthető a további vizsgálatokat meghamisítóan nagyoknak. Az eredmények alapján tehát a vizsgálatok további részében, mért napi talajnedvesség-

idősorként 2010-re a PMF56, 2011-re pedig a Szász-modellváltozattal interpolált adatsorokat fogadtuk el és használtuk.

A vízkészlet idősorokat ezt követően összehasonlítottuk a modellváltozatok mért érték nélküli futásaival annak érdekében, hogy tesztelhető legyen ezek „önálló” teljesítménye is. A 4.34. ábrán láthatók ezen modellfutások eredményei a két vizsgált évjáratra.



2010



*DV-1,40m: az 1,4 m-es szelvényre becsült disponiblis víztartalom, Zr\_mod: logisztikus trendfüggvénnyel generált napi érték*

2011

**4.34. ábra: A gyökérzóna hasznos vízkészletének (DV) szimulációja a mért, interpolált adatsorhoz viszonyítva**

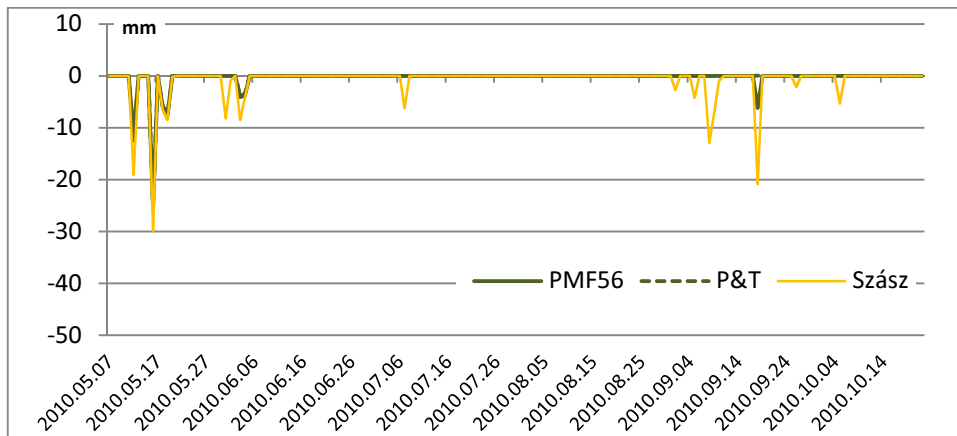
A 2010-es tenyészidőszakban két változat mutatott viszonylag kis eltérést a mért talajnedvességgel összehasonlítva. A kezdeti (INI) és a fejlődési (DEV) szakaszban ugyan mindhárom változat output adatai a mért érték hez képest kisebbek voltak, a MID szakasztól viszont a PMF56 és a P&T közel megegyezett 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 toltja el az egyenleg értékét.

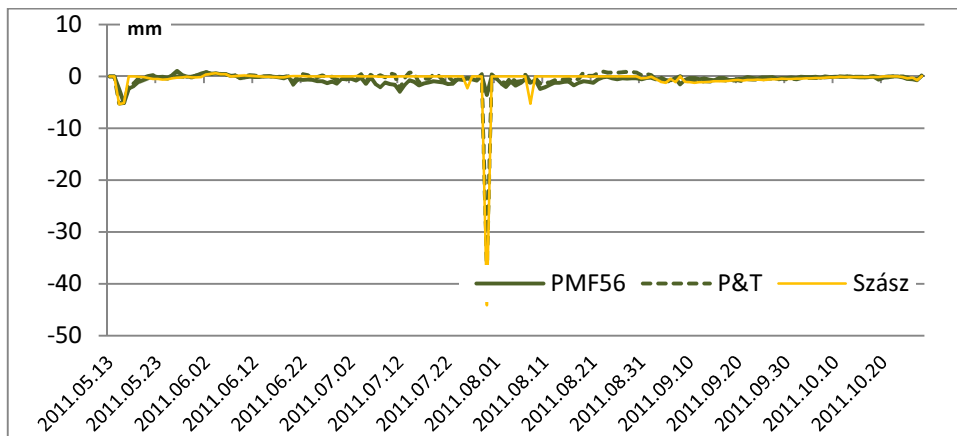
A 2011-es vegetáció kezdeti szakaszáig mindhárom modell ugyancsak negatív előjelű becslési hibával számolt. Ennek oka, hogy a szakaszra jellemző igen kis rétegvastagságú (cca. 0,2 m) gyökértérre a modell viszonylag pontatlanul becsli a vízforgalmi folyamatokat. Mivel a kapilláris vízemeléssel a modell nem számol, mélyleszivárgással pedig csak a szántóföldi vízkapacitás felett előforduló csapadék alkalmával, e pufferként funkcionáló tényezők nélkül a valóshoz viszonyítva nagyobb vízvesztés lép fel a modellben. A tenyészidőszak további szakaszaira ez a jelenség nem jellemző, mivel a gyorsan növekvő rétegvastagság és vízfelvevő kapacitás már hatékony pufferként működik. Ennek megfelelően 2011-ben további alábecslést nem mutatott egyik változat sem, sőt, esetenként nagy különbségekkel mind túlbecsülték a gyökérszóna diszponibilis vízkészletét. Még a fentebbi összehasonlító vizsgálatokban a többi modellhez képest rendre szignifikánsan nagyobb párolgást becsülő PMF56 változat is magasabb nedvességtartalmat becsül a valósnál.

Az anomália – feltételezésünk szerint – a gyökérszóna mélységének helytelen megadásából ered, azaz 2011-ben az 1 m-es vizsgált talajszelvény mellett a kukorica ennél jóval mélyebbről is vehetett fel vizet. A kiindulási állapot mérés kori tapasztalatunk jelentette, mely szerint a kísérleti terület talajának már a humuszos réteg alsó részében is (0,7 m alatt) közel állandó volt a 10-10 cm-es szelvények víztartalma adott mérési időpontban. Ebből kiindulva viszonylag kis hibalehetőséggel kivitelezhetőnek találtuk az 1 m-es szelvény kiterjesztését a 80-90 és a 90-100 cm-es réteg nedvességadatai alapján. A kukorica évi maximális gyökerezési mélységét szakirodalmi adatok alapján 1,0 helyett 1,40 m-nek vettük. Ez volt az a *legkisebb mélység*, ahol a modellezett talajnedvesség-változataink már tartós vízhiány fellépése nélkül valósak voltak, azaz nagymértékű vízstressz nem léphetett fel. E tény azért volt lényeges és döntő szempont, mert helyi méréseink során a 2010-eshez hasonlóan ebben az évben sem tapasztaltunk erre utaló jeleket a MID szakasz végéig. Ezt követően az állománymagassághoz hasonlóan logisztikus trendfüggvénnyel napi értékeket generáltunk ( $Z_{r,mod}$ ). Végül a talajnedvesség készletet ezekhez hozzárendelve kaptuk az extrapolált szelvény napi DV adatsorát (**4.34. b ábra**). A 2011-es évre az 1,4 m-es szelvény nedvességadataival folytattuk a vizsgálatokat.

A modell által részben vagy egészen hibásan generált bevétel- és veszteségoldali tételeket számszerűsítettük, elemeztük (**4.35. a és b ábra**). A vizsgálataink során megállapítottuk, hogy a mért talajnedvességgel számoló változatokban a kapilláris vízeléssel független bevételi tényező is jelentkezik az INI és DEV vegetációs szakaszokban. Ez a többlet egyrészt a napról-napra mélyebbé váló gyökértér nedvességkészletének növekedéséből származik. Másrészt, ha a sekély gyökérszintben a DV értéke 0, a napi párolgás értékét *virtuális* kapilláris vízeléssel fedezi a modell. Ez a kapilláris vízelés (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, s ez a tényező – a stressz-koefficiens ( $K_s$ ) révén – a modell eleve számol.



a)



b)

**4.35. ábra: A három modellváltozat vízforgalmának elméleti vízvesztés és -nyereség tételei a két vizsgált időszakban**

Különösen a csapadékos 2010-es évjáratban fordult elő gyakran, 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 csapadékú időszakot követő július 30-i felhőszakadás (50 mm<) napján, s akkor sem minden modell esetében egyforma volumenben.

Virtuális vízemelésre 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. Ez azonban csak az eredeti, 1,0 m-es maximális mélységű  $Z_r$ -rel számolva jelentkezett, a gyorsabb növekedést feltételező 1,40 m-re növelt változatban nem.

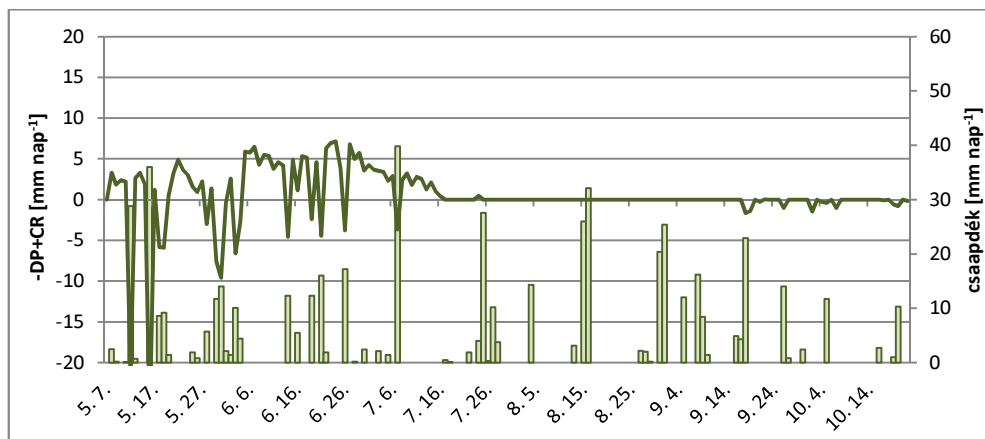
#### 4.6.2. A modellezett talajvízforgalom vizsgálata

A modellváltozatok által szimulált diszponibilis vízkészlet napi változásai során kalkulálható a gyökérszóna leszivárgásos (gravitációs) veszteségének (DP) és nem talajvíz eredetű (potenciálgradiens menti) kapilláris vízemelésének (CR) összege, eredője (a továbbiakban  $-DP+CR$ ). Összehasonlítottuk a csapadékból származó bevétel és a párolgás okozta veszteség összegét a mért DV napi változásával ( $\Delta DV$ ). Elsőként a mért DV-idősorra végeztük el a számítást, a korábbi eredményeknek megfelelően 2010-re a PMF56-interpolált 1,0 m mély szelvényt, 2011-re pedig a Szász-interpolált 1,4 m mélységű szelvényt véve.

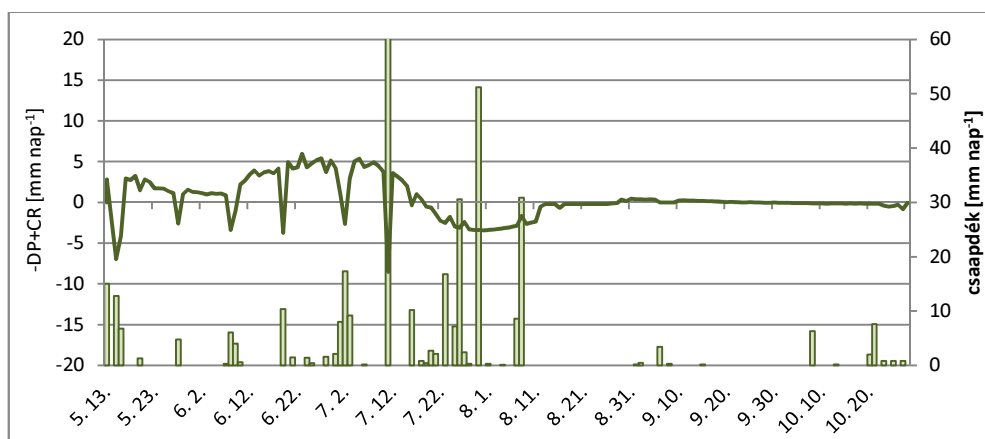
A mért DV adatsorokból az interpoláció során adódó néhány mm-nyi, a talajnedvesség mérésének napjaira eső illesztési hibát erre a vizsgálatra a jobb áttekinthetőség kedvéért kiiktattuk. A csupán a hibás értékek eliminációjával a tényleges  $-DP+CR$  nagyságát nem befolyásoltuk. A **4.36. sz. ábrán** mutatjuk be a  $-DP+CR$  alakulásának reakcióját a csapadékmennyiségre a két teljes tenyészidőszakra vonatkozóan. A gyökérszóna modellezett vízforgalmi tételeivel számoltunk, a  $-DP+CR$  mennyiségében megjelent az INI és a DEV szakaszok növekvő rétegvastagságának hatása is, mely a CR-t (bevételi oldal) növeli az egyenlegben. Ezt a mennyiséget szintén levontuk, hiszen fizikai értelemben más eredetű jelenségről van szó.

Mindkét tenyészidőszak 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.





2010

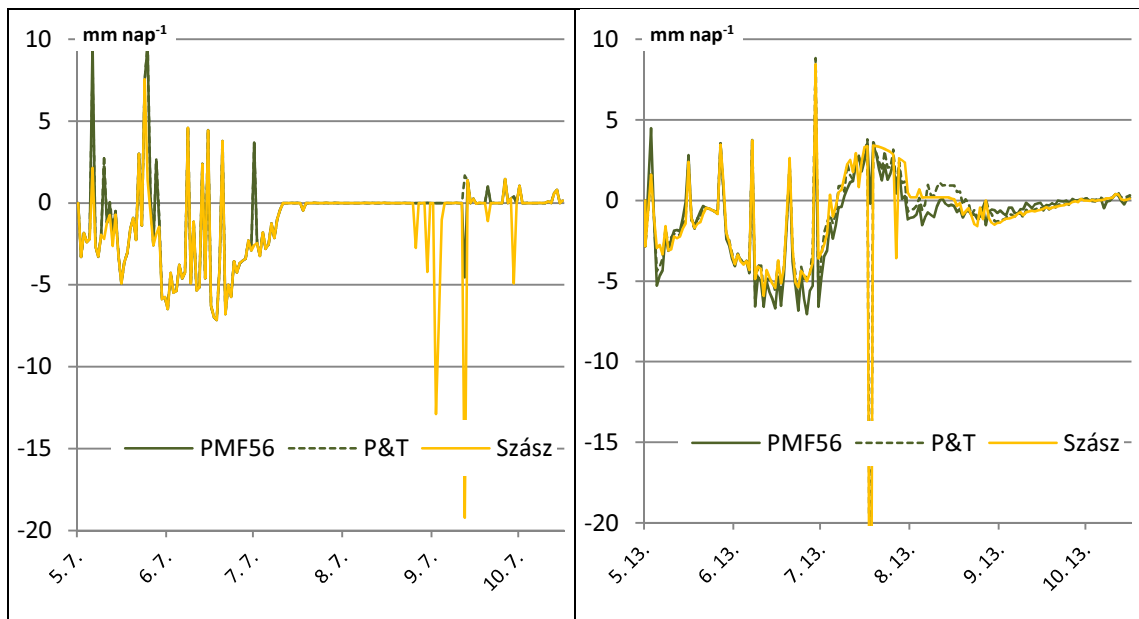


2011

4.36. ábra: A gyökérszóna vízelelésének és leszivárgásának nagysága ( $-DP+CR$ ) a DV-re vonatkozóan, valamint a csapadék alakulása a két tenyészedőszakban

A tenyészedő további szakaszaiban a vízelelés minimális mindkét évben, s a mélyleszivárgás időbeni alakulása is hasonló eloszlást mutat. A vízegyenleg e negatív tagja szintén akkor ér el nagyobb volumet, amíg a szelvény sekély. A 2010-es év szeptemberi nagy csapadékösszegei azonban kiváltottak kisebb mértékű leszivárgást. Mivel addigra a tényleges párolgás drasztikusan lecsökkent, így a gyakorlatilag szántóföldi vízkapacitásig telt talajszelvény nem tartotta meg ezen csapadékösszegek teljes vízmennyiségét.

A modellváltozatok vízkészleteire ugyancsak kiszámítottuk a  $-DP+CR$  tag nagyságát, majd összevetettük a mért talajnedvességgel számolt „kontrollal”. A két érték különbségét mutatja be a 4.37. sz. ábra.

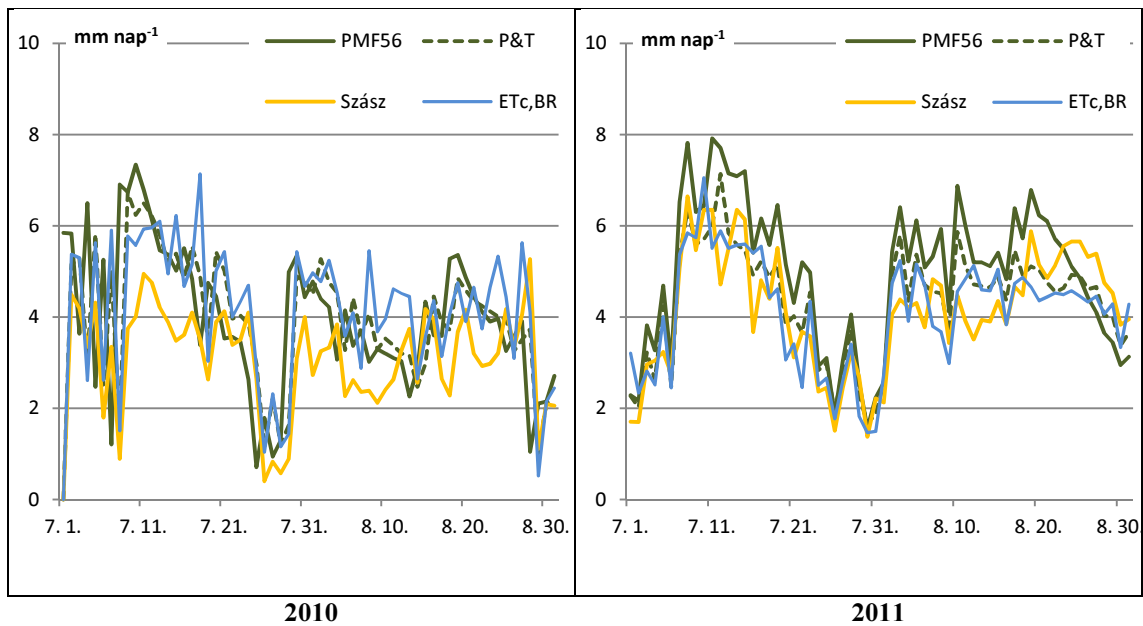


**4.37. ábra: A modellezett és a mért diszponibilis víz alapján számított  $\Delta DPCR$  értékek eltérése (2010 és 2011)**

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 CR”-rel 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. A mélyleszivárgásban helyenként igen nagy eltérések is kialakultak, elsősorban a modellezett sorokban megjelenő nagy értékek miatt (lefelé irányuló kiugrások), melyek a mért adatsorban általában jóval kisebbek számértéküket tekintve. Az ellenkező irányú kiugró különbségértékek nagyságrendje többnyire kisebb, 10 mm alatti.

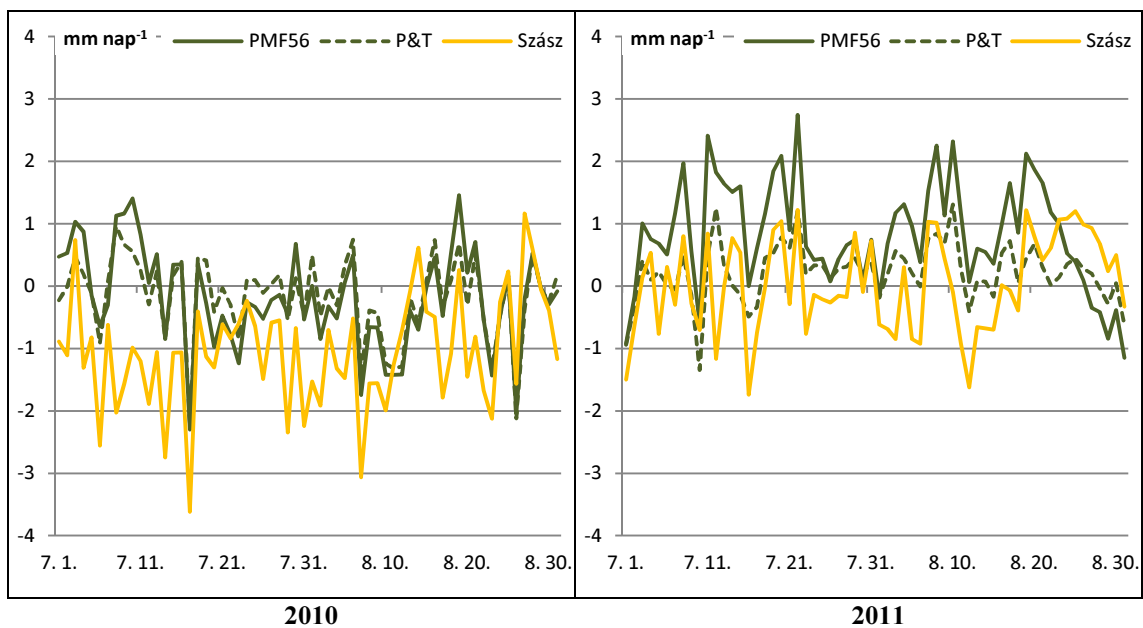
#### **4.6.3.A modellezett és a látens hőáramok alapján számított párolgás összehasonlítása – modell verifikációs kísérlet**

A tényleges párolgás modellezett értékeit ( $ET_{c,FAO}$ ) összevetettük a Bowen-arány módszerrel ( $ET_{c,BR}$ ) becsült mindkét év július-augusztusi idősorára (**4.38. sz. ábra**). A modellváltozatok becslésének jóságára összehasonlító vizsgálatok alapján következtettünk. Tökéletes egyezésre egyik változattal kapcsolatban sem számítottunk, egyebek mellett a két módszercsoport teljesen különböző fizikai megközelítéséből adódóan. Egyértelmű nagyságrendbeli és dinamikai összefüggések meglétére viszont igen, mely alapján a viszonylag nagy különbségű eredményt adó három  $ET_{c,FAO}$  változat közül egy kiemelhető az adott körülmények között.



4.38. ábra: A FAO modellváltozatok és a Bowen-arány módszer által becsült  $ET_c$  alakulása

Viszonylag jó értékbeli egyezés mellett a két hónap hosszúságú (így  $n=62$ ) sorok dinamikája is hasonló. Egyes időszakokban azonban jelentősen megnő a négy becsült párolgás közötti különbség.



4.39. ábra: A FAO modellváltozatok becslése és a  $ET_{c, BR}$  különbségének alakulása

A három modellváltozatnak az  $ET_{c, BR}$ -hez mint kontrollhoz viszonyított különbségeit ábrázoltuk a 4.39. sz. ábrán. 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  $\pm 1$  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.

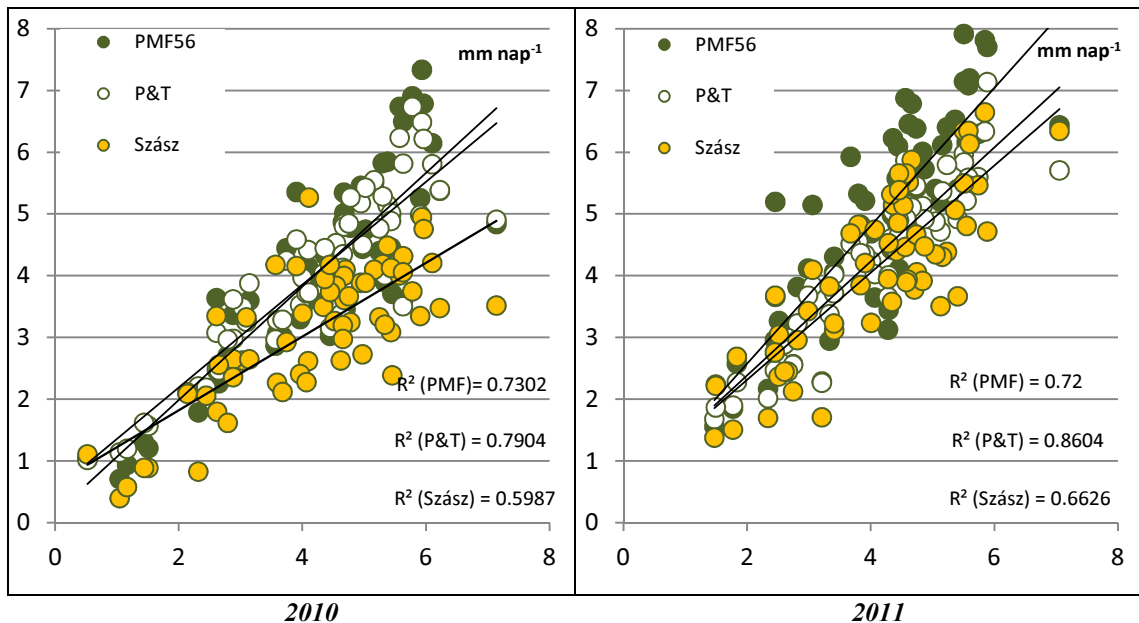
A kontrollra számolt reziduumokra kiszámítottuk a fontosabb statisztikai mutatókat (4.12. sz. táblázat). A szisztematikus hiba (MBE) alapján a 2010-es évjáratban mindhárom modell az  $ET_{c,BR}$ -nél kisebbre becsülte a párolgást. A P&T-változat és a PMF56 jóval kisebb eltérést mutatott a Szász módszernél, ahol átlagosan 1 mm volt a hiba. A véletlen hiba a P&T esetében volt legkisebb, ennek szóródási terjedelme is szűkebb, mint a másik két változaté. A kisebb szórásmutatók révén tehát a P&T állt közelebb ebben az időszakban a kontroll adatsorhoz, amellet, hogy a teljes periódusra vetített hibaösszeg alig tért el a PMF56-változatától.

4.12. sz. táblázat: A  $ET_{c,FAO}$  modellváltozatok és az  $ET_{c,BR}$  sorok különbségeire számított leíró statisztikai mutatók

<i>mm nap<sup>-1</sup></i>	2010			2011		
	PMF56	P&T	Szász	PMF56	P&T	Szász
<b>Abszolút maximum</b>	1,45	0,96	1,17	2,74	1,31	1,22
<b>Abszolút minimum</b>	-2,30	-2,23	-3,62	-1,15	-1,34	-1,74
<b>Középérték (MBE)</b>	-0,19	-0,17	-1,06	0,82	0,22	0,03
<b>Szórás</b>	0,80	0,65	0,90	0,86	0,46	0,77
<b>Variancia</b>	0,64	0,43	0,81	0,73	0,21	0,59
<b>Szóródás terjedelme</b>	3,75	3,19	4,79	3,89	2,65	2,96
<b>Átlagos abszolút hiba (MAE)</b>	0,62	0,47	1,12	0,94	0,38	0,62
<b>Összeg (mm/teljes időszak)</b>	-11,77	-10,84	-65,51	51,05	13,74	1,90
(n=62)						

A Bowen-arány mérésének körülményeivel kapcsolatos bizonytalanságok miatt a 2010-es év eredményeit kisebb súllyal vettük figyelembe a kiértékelés során. A 2011-es időszak mérési eredményei alapján a szisztematikus hiba szinte nullára csökkent a Szász-módszerrel számoló modellváltozat esetében, de a hiba szórása nem ennél a változatnál volt a legkisebb. Mindhárom változat felülbecsülte a párolgást a kontrollhoz képest, legnagyobb mértékben a PMF56, melynél a hiba szórása is nagyobb volt. 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.



4.40. ábra: A FAO modellváltozatok és a Bowen-arány módszer által becsült  $ET_c$  közötti korreláció (a korrelációs együtthatók "r" értékeit ld. a 4.13. sz. táblázatban)

A kontroll és a modellváltozatok eredményei közötti kapcsolat szorosságát több mutatóval is jellemeztük. A Pearson-féle korrelációs együttható ( $r$ ), a hibaszórás (RMSE), valamint az abszolút százalékos hiba (PE) értékét a 4.13. sz. táblázat tartalmazza, míg a determinációs együttható alakulását a 4.40. sz. ábrán szemléltettük.

4.13. táblázat: A modellváltozatok és az  $ET_{c, BR}$  közötti kapcsolat egyes statisztikai mutatói

$mm\ nap^{-1}$	2010			2011		
	PMF56	P&T	Szász	PMF56	P&T	Szász
<b>r</b>	0,84	0,87	0,81	0,84	0,89	0,86
<b>RMSE</b>	1,04	0,82	0,88	1,11	0,62	0,97
<b>PE (%)</b>	4,55	4,19	25,32	19,95	5,37	0,74

(n=62)

A korrelációs együtthatókban egyik évben sem tapasztaltunk számottevő különbséget, azonban elsősorban szórásmutatóinak a kontrollhoz való hasonlósága miatt rendre a P&T-változat mutatta a legszorosabb korrelációt. Emellett 2010-ben a PMF56, 2011-ben pedig a Szász esetében adódott erősebbnek a kontroll adatsorral való kapcsolat.

A középgyök hiba ugyancsak a P&T változatnál volt a legkisebb, és a szórásmutatókkal összhangban, mindkét szezonban a PMF56-nál volt a legnagyobb. A százalékos hiba

2010-ben egyaránt alacsonyan alakult a PMF56 és a P&T esetében, míg a Szász 25%-nál nagyobb mértékű eltérést mutatott. 2011-re a PMF56-változat eltérése a 20%-ot közelítette, ezzel szemben a Szász százalékos hibája a MBE-hoz hasonlóan minimális volt. A P&T azonban ezúttal is meglehetősen stabil módon, csekély mértékben tért el a kontrolltól.

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.

#### **4.6.4. A referenciapárolgás ( $ET_c$ ) és tényleges ( $ET_{c,BR}$ ) párolgás viszonya – a $K_c$ értékek validálása**

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  $K_{cb}$  (transzspirációs) és  $K_e$  (evaporációs koefficiens összegével egyezik meg. A Bowen-arány módszerrel becsült tényleges evapotranspiráció az állomány levélfelületének fejlettségével arányosan ugyancsak felbontható transzspirációra és evaporációra. A relatív vízhiányt kifejező, a FAO-modellben a  $K_{cb}$  szorzójaként szereplő  $K_s$  stressz-koefficiens ebben az esetben a transzspirációban már jelen van, így  $K_{cb}$  alatt a vizsgálat eredményeinek tárgyalása során mindvégig a  $K_{cb} \cdot K_s$  szorzatot értjük.

A hőáramok alapján becsült evapotranspiráció transzspirációra és evaporációra történő felosztását a levélfelületi indexre alapozva végeztük. A transzspiráció ( $T_r$ ) nagyságát természetes alapú hatványfüggvénnyel határoztuk meg:

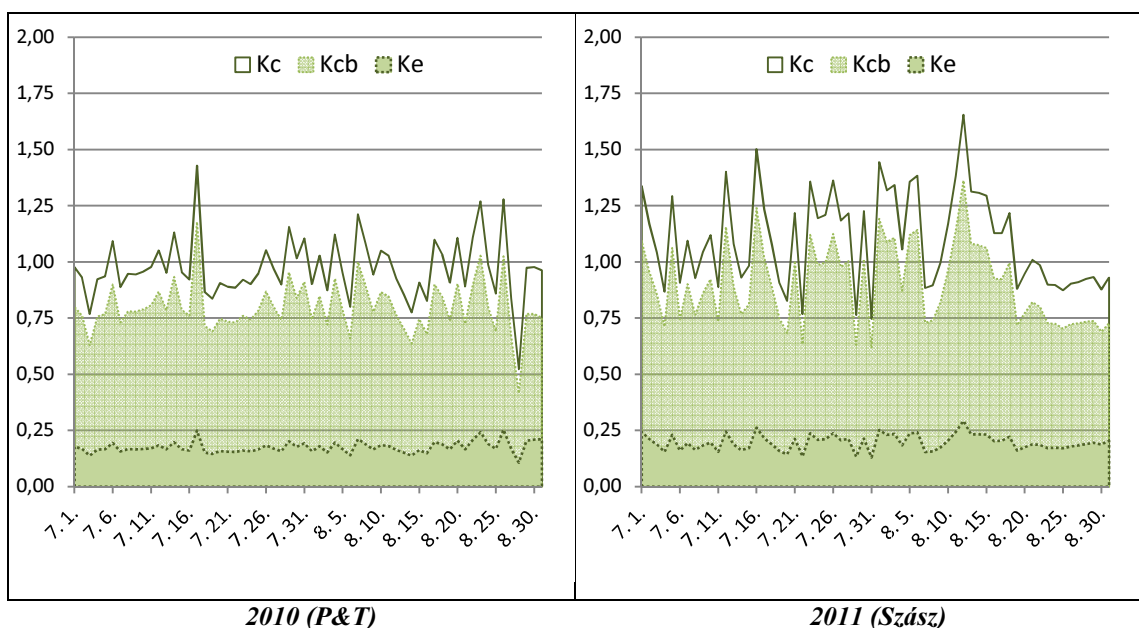
$$T_r = ET_c \cdot 1 - e^{k_\beta \cdot LAI} \quad (4.1)$$

Az evaporáció (E) kiszámítása ezzel analóg módon:

$$E = ET_c \cdot e^{k_\beta \cdot LAI} \quad (4.2)$$

Az evapotranspiráció két összetevőjének ismeretében ezek arányában osztottuk fel a  $K_{cb}$  koefficiens két alkotójára  $K_{cb-re}$  és  $K_e-re$ .

A korábbi eredményekből és összefüggésekből kiindulva, a FAO-modellváltozatok közül összehasonlításra a 2010-es tenyészéből a P&T, a 2011-esből pedig a Szász-változatot választottuk ki.



4.41. ábra: A Bowen-arány módszerrel becsült  $ET_c$  alapján számolt növényi koefficiensek

A két vizsgált időszak közül a magasabb értékek 2011-ben voltak jellemzők, az átlagérték alapján 0,1-del magasabb  $K_c$  jellemezte a növényállományt (4.41. sz. ábra). A tenyészidő utószakaszában viszont tartósan 1,0 alá csökkent a koefficiens értéke, kukoricaállomány párolgása a csökkenő zöld levélfelület miatt fokozatosan a referenciapárolgás alá csökkent. A 2010-es év két vizsgált hónapjában folyamatosan 1

körül ingadozó  $K_c$  jelzi a tényleges párolgás korlátozott mértékét, még az ekkor jellemző szintén alacsony referenciapárolgás és a magas aktuális LAI érték ellenére is.

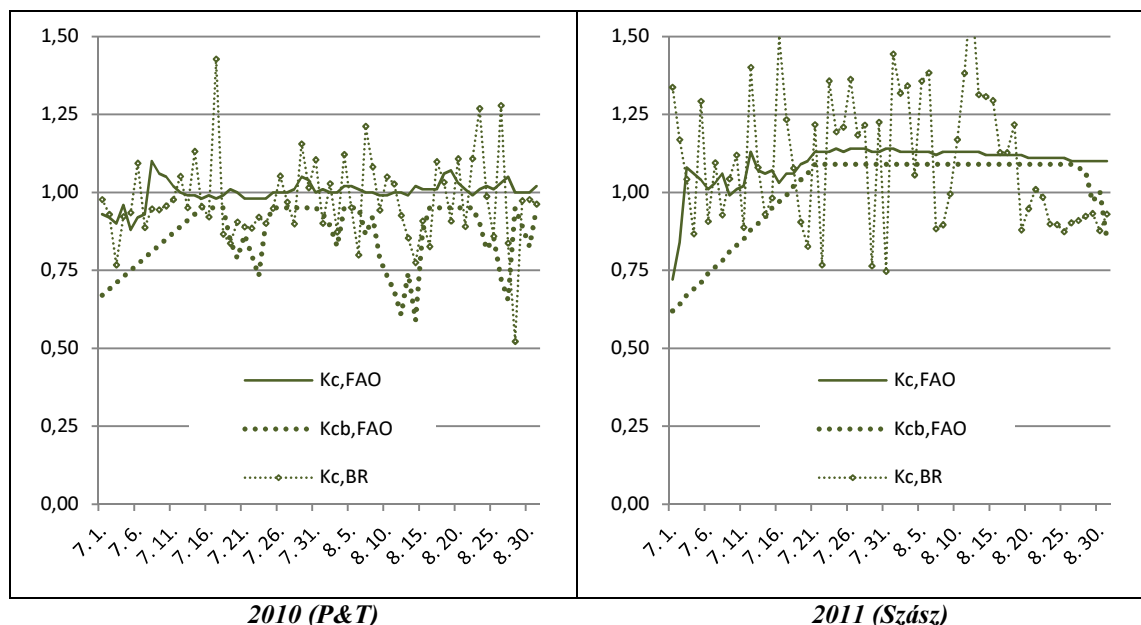
4.14. táblázat: A vizsgált időszakok  $K_c$  értékeinek leíró statisztikai paraméterei

	$K_c$		$K_{cb}$		$K_e$	
	2010	2011	2010	2011	2010	2011
<b>Abszolút maximum</b>	1,43	1,66	1,18	1,36	0,25	0,29
<b>Abszolút minimum</b>	0,52	0,75	0,42	0,62	0,11	0,13
<b>Középérték</b>	0,97	1,10	0,80	0,90	0,18	0,20
<b>Szórás</b>	0,14	0,21	0,11	0,18	0,03	0,03
<b>Variancia</b>	0,02	0,04	0,01	0,03	0,00	0,00
<b>Szórásintervallum</b>	0,91	0,91	0,76	0,75	0,15	0,16
<b>CV (%)</b>	14,01	18,98	14,10	19,48	14,93	17,42

(n=62)

A  $K_c$ -t alkotó két rész-koefficiens értékei alapján megállapítottuk, hogy az állomány transzspirációját jellemző, a  $K_s$  hatását is magában hordozó  $K_{cb}$  szórása, variációs koefficiense általában is, de különösen 2011-ben igen magas (4.14. sz. táblázat). 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, (4.42. sz. ábra).



4.42. ábra: A FAO-56 modell által használt, valamint a Bowen-arány módszerrel becsült  $ET_c$  alapján számolt növényi koefficiensek



Alapvető különbség a kétféle eredetű értékek között, hogy míg a FAO koefficiensei időben kiegyenlítettebbek, az  $ET_{c,BR}$  alapján számoltak jelentős ingadozást mutatnak. A FAO  $K_{cb}$  a modell adatbázisának vegetációs szakaszra jellemző (a DEV szakaszban interpolált) értékétől akkor tér el, ha az evaporációs réteg és a gyökérzóna mélyebb rétegeiben a felvehető vízmennyiség limitálja a párolgást. Ekkor a  $K_s$  1,0 alatti értéket vesz fel, így  $K_{cb,FAO}$  csökken, a párolgás korlátozódik, de mindez nem feltétlenül jár együtt alacsony diszponibilis vízkészlettel, hasonló jelenséget pl. a 2010-es vizsgált periódusban sem tapasztaltunk. Azonban a kiugróan nagy potenciális párolgású napokon a növény a jellemző vízfelvételi ütemmel képtelen fedezni a légkör „páraéhségét”, s e jelenséggel a modell is számol a vízkészlet-hasznosítási hányadon ( $p$ ) keresztül. A  $K_c$  alapértéktől való nagyobb mértékű pozitív eltérése általában a teljes állományfejltség elérése előtt fordul elő, ennek magyarázata a talajfelszín viszonylag nagy hányadának fedetlensége és az evaporációs tag megnövekedett súlya.

A valós  $K_{cb,BR}$  értékek ezzel szemben nagy napi ingadozást mutatnak pozitív és negatív előjellel egyaránt. A legnagyobb ingadozást a 2011-es időszakban mértük, akkor csaknem a teljes tenyészidőszakra jellemző volt a potenciális párolgás nagy változékonysága. Emellett a Bowen-arány módszerrel számított tényleges párolgás is nagy ingadozásokat produkál, s a kétféle fizikai megközelítés alapján számolt mennyiségek közötti különbségeket a  $K_c$  mint indexszám jeleníti meg.

## 5. KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK

*Mikroklíma mérések a növényállományban:*

- A látens és szenzibilis hőáramok intenzitásának számításához az állomány felső, illetve afeletti térrészbe célszerű összpontosítani a mérési kapacitást. Amennyiben a cél az állomány egészének mikroklímájának jellemzése is, úgy azonban az alsóbb szintek mérése is szükséges.

*A tényleges párolgás becslése a Bowen-arány módszerrel:*

- A mérési szintek megválasztásakor fontos szempont, hogy az állomány felső része ne érhesse el a  $z_1$ - $z_2$  térrészt, attól még hímvirággal együtt is legalább 0,25-0,5 m-re maradjon az állomány felszíne.
- A  $\beta$ -paraméter nagy szórása következtében szükséges nagyarányú adatszelekció miatt minél nagyobb adatpontmennyiség szükséges a becslés megfelelő pontosságának eléréséhez.
- A sugárzás szerepe a párolgásban meghatározó, és akkor maximális, ha a vízellátottság nem korlátozott.

*A referenciapárolgás becselő módszereinek vizsgálata:*

- Az egyes numerikus módszerek pontossága nagyban függ a helyi viszonyoktól, ezért teljesítményük helyi kalibrációt követően nagymértékben javulhat az eredeti változatokéhoz képest.

*Öntözési döntéstámogató rendszer diagnosztikai vizsgálata:*

- A figyelembe vett talajszelvény maximális mélységét ( $Z_{r,max}$ ) a lehető legnagyobbak célszerű megválasztani, de a kukorica esetenként igen nagy gyökerezési mélysége miatt ez esetben is kompromisszumokat szükséges tenni.
- A DP és CR pontos meghatározása a modell pontosságának meghatározó tényezője, ezért akár laboratóriumi talajvizsgálatokkal célszerű pontosítani ezek valós értékét.
- A FAO-modell eredeti, szakaszos növénymagasság, gyökerezési mélység, LAI, valamint  $K_c$  becselő görbéit a nagyobb pontosság érdekében valamely életgörbetrendfüggvénnyel szükséges helyettesíteni, amint azt vizsgálataink során részben már megvalósítottuk.

## 6. 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 vízgyenlegét, 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.

## 7. ÖSSZEFOGLALÁS

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 pontos mennyiségbeli és időbeli jelzéséhez az állományok vízforgalmának mélyreható ismerete szükséges. A folyamat egyik sarokpontja a párolgás fizikai hátterének minél részletesebb feltárása, valamint meghatározási 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 Magyarország egyik legbővebb mérési programmal működő mérőrendszerének, a Debreceni Egyetem (DE-ATK) debrecen-kismacsi Agrometeorológiai Obszervatóriumának adatbázisára támaszkodva kívántuk tesztelni a párolgás becselő algoritmusait, módszereit. Mérési eredményeinket statisztikai vizsgálatok, érzékenységvizsgálatok, majd komparatív analízisek útján dolgoztuk fel.

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

*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

Vizsgálataink az agrometeorológia tudományterületének számos részegységét ölelik fel, így ezek szakirodalmának áttekintése során csak a kutatási területhez szorosabban kapcsolódó munkák számbavétele került előtérbe. Az alapvető háttérismeretek részletezésére csak ott kerítettünk sort, ahol az eredmények érthetősége szempontjából ez feltétlenül szükséges volt.

A kutatás alapanyagának egyik fő részét a mért meteorológiai adatok képezték. Ezek részben az Országos Meteorológiai Szolgálat Debrecen-repülőtéri mérőállomásának, részben pedig a DE-ATK Agrometeorológiai Observatóriumának adatbázisából származnak. Az adatok alapján összesen tíz, a potenciális evapotranspiráció becslésére szolgáló módszert vontunk összehasonlító statisztikai- és érzékenységvizsgálat alá. A vizsgálatokat két lépcsőben végeztük, melyek közül a másodikban már csak három modellt teszteltünk az állományklíma mérések helyszíne közelében mért kismacsi klímaadatokra támaszkodva. A közvetlenül az Observatórium szomszédságában végzett állományi mikroklíma-, talajnedvesség- és fenológiai méréseink részben az állományi hő- és nedvességáramok leírását, részben pedig a tényleges párolgás energiaháztartás-alapú (Bowen-arány) módszerének tesztjét szolgálták. Ez utóbbi megvalósításához a három szelektált  $ET_0$ -becslő modell kimenetei, valamint a FAO (*Allen et al 1998*) által fejlesztett öntözési döntéstámogató rendszer alkalmazásával jutottunk referenciaadatokhoz a tényleges párolgás nagyságát illetően. A rendszer által számított vízháztartási egyenleg verifikációs kísérleteihez a kukoricaállomány alatt mért saját, részletes talajnedvesség adatbázisunkat használtuk referenciaként.

### *Kutatásaink fontosabb eredményei:*

A kukoricaállományban végzett részletes mikroklíma méréseink végzéséhez – noha vizsgálatainkban betöltött szerepe alapján sokkal inkább anyagként, illetve módszerként jelenik meg, mégis fontos eredménynek tekintjük – egyedileg tervezett, alacsony költségű, nagy felbontású mérésekre alkalmas rendszert állítottunk össze. A rendszerben 3 m magasságig 0,25 m-enként összesen 12 db árnyékolt hőmérséklet és relatív nedvesség érzékelő-adatgyűjtő került elhelyezésre. A rendszer teljesen mobil, automatizálható működésű, és akár másodpercenkénti mérésre képes folyamatos üzemben. A minél nagyobb pontosság elérése érdekében az adatgyűjtőket normalizáltuk, valamint hitelesített referenciaműszerekkel kalibráltuk.

A mérőrendszer segítségével két tenyészidőszakban, 1 perces felbontásban végeztünk mikroklíma méréseket 3 m magasságig, valamint párhuzamosan fenológiai adatokat gyűjtöttünk. Mért adatainkra támaszkodva részletesen jellemeztük a kukoricaállományra intenzív és gyenge párolgású időjárási típushelyzetekben jellemző látens és szenzibilis hőeloszlást, a teljes hőprofil, valamint ennek összefüggését a fenológiai paraméterekkel.

Elemeztük az állományban energiamennyiség és a párolgás viszonyát különböző időjárási epizódokban. Száraz periódusban a sugárzási egyenleg rendelkezésre álló részének 98, míg nedves időszakban 99 %-a fordítódott párolgásra, melynek folyamatát mindössze a maradék 1-2%-ban befolyásolták advekciónak hatások.

A teljes energiamérlegből kiindulva a Bowen-arány ( $\beta$ ) módszerrel becsültük az állomány tényleges párolgását ( $ET_{c,BR}$ ). Két eltérő karakterű évszám (2010, 2011) nyári hónapjaira elvégezve a vizsgálatokat, a  $\beta$ -érték igen nagy szórását tapasztaltuk, ennek ellenére – megfelelő hibaszűrés módszerrel – használható, és további összehasonlító vizsgálatokra alkalmas párolgási értékeket kaptunk. Megállapítottuk továbbá, hogy a módszer használata szempontjából kulcsfontosságú a mérés szintjeinek helyes megválasztása.

A potenciális evapotranspirációt becsülő modelleket két lépcsőben teszteltük. Először két-két modellt választottunk ki a kádmérésen alapuló, a hőmérséklet-alapú, a sugárzás-alapú empirikus, a tömegáram-alapú, végül a kombinált módszerek közül. Az értékelés során egymással, illetve a mért „A”-kád adatsorral hasonlítottuk össze az eredményeket 6 év tenyészidőszakának adatai alapján. Komparatív analíziseink szerint az azonos

típusba tartozó módszerek eredményhalmazai között kimutatható összefüggés van, ugyanakkor a Szász és a Priestley-Taylor (P&T) modell a módszerek legtöbbjével összevetve is jó egyezést adott. Érzékenységvizsgálataink során stabil és robusztus modellnek értékeltük a Szász, Makkink, P&T és Penman-Monteith-FAO-56 (PMF56) módszereket.

A helyi vizsgálatokra való alkalmasságuk, a rendelkezésre álló meteorológiai adatok, valamint az előzetes értékelés alapján helyi viszonyok közötti tesztre (Debrecen-Kismacs adatsora) a PMF56, P&T és a Szász-modellt választottuk ki. Újabb értékelő analízist követően megállapítottuk, hogy a PMF56 viszonylag magas értékeket ad, míg a P&T és a Szász-módszer ennél jelentősen (átlagosan 20 illetve 30 %-kal) alacsonyabbat. Az eredmények szórása előbbinél a legnagyobb, a variációs koefficiens értéke viszont a Szász-modell esetében. Érzékenységük négy meteorológiai paraméter tekintetében is meglehetősen hasonló volt, kiemelhető viszont, hogy a P&T modell reagált a paraméterváltozások legtöbbjére a legkisebb szórásintervallum-növekedéssel.

Munkánk további szakaszában a potenciális párolgás három becslő modelljével kapott  $ET_0$  adatsorokból a FAO öntözési döntéstámogatási algoritmus nyomán modelleztük kukoricaállományok tényleges párolgását ( $ET_{c,FAO}$ ) 2010 és 2011 tenyészidőszakaira. A kimeneteket (párolgás időszaki összegei) közvetlenül is összevetettük. Megállapítottuk, hogy a referenciapárolgás és a tényleges párolgás aránya nagymértékben különbözhet, elsősorban a száraz időszakokban. A három párolgási modell eredményeit az öntözési döntéstámogató modell által kukoricaállományra számított öntözővíz-szükséglet tükrében is értékeltük. 2010 csapadékos tenyészidőszakára legfeljebb 20 mm-es kiadható vízadagok mellett a PMF56 és P&T modellváltozat 40, ill. 20 mm-es öntözővíz igényt jelzett, míg a Szász – a gyakorlati tapasztalatok alapján helyesen – 0 mm-t. 2011-ben a PMF56 160, míg a P&T és Szász egyaránt mindössze 60-60 mm-t, mely alapján a PMF56 párolgás felülbecsléséből adódó túlzó vízigény jelzésre következtettünk. Ennek okát a későbbiekben részletesen vizsgáltuk.

A referenciapárolgás alapján számolt tényleges párolgás adatsorok, illetve a FAO-modell verifikációja céljából meghatároztuk a kukoricaállományok teljes vízegyenlegét. Ehhez a szimulált, valamint a gravimetriás úton mért (és ugyancsak a FAO-modell segítségével napi léptékre interpolált) talaj diszponibilis vízkészletet (DV) hasonlítottuk össze. A modell a vízháztartás egyszerűsített egyenlegét képezi, azaz a fejlesztés e pontján *nem számol sem mélyleszivárgással (-DP), sem kapilláris vízemeléssel (CR).*

Ebből következően a referenciával való jó egyezés csak az egyenleg helyességét igazolta, a párolgás adott változatának mint inputnak a jóságára csak következtetni tudtunk. A mért referenciasorhoz viszonyítva a PMF56 és különösen a P&T  $ET_0$ -szubmodellel dolgozó változat jó egyezést mutatott, a Szász-változat alacsonyabb párolgásértékei miatt jelentősen felülbecsülte a DV-t. Feltételeztük, hogy a valóságban nedves évjáratban  $-DP+CR < 0$  azaz  $|-DP| > CR$ , csapadékszegény időszakban pedig  $-DP+CR \geq 0$  azaz  $|-DP| < CR$  teljesül. A modellben  $-DP$  és  $+CR$  nullának vétele esetén, előbbi esetben PMF56 és P&T  $ET_0$ -értékeivel paraméterezve, a modell pontosan szimulálta a diszponibilis vízkészlet (DV) egyenlegét az igazoltan túlbecsült párolgásértékkel. Száraz évjáratban viszont a P&T és a Szász változat teljesített jobban.

Felmerült a szükségessége DP és CR meghatározásának is, kísérletet tettünk ezek kalkulációjára és validálására is. Tapasztalataink szerint a FAO-modell működésének velejárója bizonyos mértékű „virtuális” DP és CR mennyiségek megjelenése a korlátos mélységű talajszelvények, illetve a  $-DP+CR$ -egyenleg 0-nak vétele miatt. Virtuális CR elsősorban az INI és DEV szakaszokban jelentkezett, mértéke minimális, összesen 2,7-3,3 mm volt a vizsgált tenyészidőszakokban. A jelenség oka a figyelembe vett talajszelvény csekély mélysége, melyben, ha  $DV=0$ , a napi párolgás értékét nem valós vízkészletből fedezi a modell. Különösen nagy hozamú csapadékeseményeket követően lépett fel virtuális DP, ekkor a véges mélységű talajszelvény telítettségének elérése után a „felesleges” vízmennyiséget elveti a modell. Mértéke esetenként a 20-40 mm-t is elérte.

A valós  $-DP+CR$ -egyenleg megállapításához összehasonlítottuk a csapadékból származó bevétel és a párolgás okozta veszteség összegét a mért DV napi változásával ( $\Delta DV$ ). A kapott értékek szolgáltak referenciaként a modellváltozatok kimeneteinek hasonló adatsoraihoz. A mért DV-adatsor szerint elsősorban az INI és DEV szakaszban volt jellemző a sekély szelvény miatt nagyobb DP és CR érték. A modellezett változatokat ezzel összevetve hasonló következtetésre jutottunk, a  $-\Delta DP+CR$ -egyenleg nagyságát általában -5 – +10 mm között határoztuk meg. Ettől csak negatív (DP)-irányban volt jelentős eltérés nagyobb csapadékeseményeket követően.

Vizsgálataink utolsó részében összevetettük a tényleges párolgás modellezett értékeit ( $ET_{c,FAO}$ ) a Bowen-arány módszerrel ( $ET_{c,BR}$ ) becsült július-augusztusi idősorokkal. Általánosságban jó egyezést találtunk a három  $ET_{c,FAO}$ -változat és az  $ET_{c,BR}$  között, a reziduumokat részletes statisztikai vizsgálatnak is alávetettük. Összességében a P&T és



a Szász-modellváltozatokat emeltük ki, nagyobb szórása ellenére mutatott igen alacsony hibája alapján a Szász változatot értékeltük a kontroll által megerősítettnek.

Validálás céljából a referencia- és a tényleges párolgás hányadosaként felírható növényi konstanst ( $K_c$ ) az  $ET_{c,BR}$  értékekre is kiszámítottuk. A magasabb értékek 2011-ben voltak jellemzők, az átlagérték alapján 0,1-del magasabb  $K_c$  jellemezte a növényállományt, míg 2010-ben  $K_c=1.0$  körül ingadozott az érték. A vizsgálatot a transzspirációs ( $K_{cb}$ ) és evaporációs tagra is ( $K_e$ ) elvégeztük. Összehasonlítva a modellezett és az  $ET_{c,BR}$  alapján számolt értékeket, utóbbi ingadozása jóval nagyobb volt, különösen a 2011-es tenyészidő változékony párolgási viszonyainak következtében.

## 8. SUMMARY

Considering the aspects of arable farming, the region of Hajdúhát is one of the most advantageous croplands of Hungary. Its continental climate with mostly unbalanced precipitation often limits the efficiency of the production of crops having high water requirements. The high available water capacity of the Chernozem soils of the area may compensate the lack of water to a certain extent; however, sustaining the optimal level of production requires the use of irrigation farming technologies.

High input costs of irrigation will return only by reasonable use of water, thus, the improvement of decision support systems (DSS) and utility of precision agricultural techniques have an outstanding importance. The accurate timing and calculation of the water needs of irrigation requires profound knowledge about water cycle of the field plant stands. One of its crucial points is the exploration of the physical background of evapotranspiration, and also the systematization and evaluation of its estimation methods.

For our study, grain maize has been chosen as a test plant for the reason of its considerable water demand, and its significant role in the agricultural production of the region. Our main purpose was to monitoring the climate of a selected maize stand by means of continuous and accurate measurements, and also the exploration and characterization of the physical processes playing key-role in evapotranspiration. We intended to perform overall tests on the different estimation methods and algorithms of evapotranspiration, partially on the basis of the data series measured at the Debrecen-Kismacs Agro-meteorological Observatory of the University of Debrecen – Centre for Agricultural Sciences (DE-ATK) – one of the observatories keeping the widest measurement programme in Hungary. Results of the measurements were processed by means of statistical analyses, sensitivity tests and comparative analyses.

Enabling the practical utility of our results, complete tests were also planned by the use of a complex DSS. As an outcome, performance of different evapotranspiration models was evaluated, and on the other hand, by the exploration of opportunities for the development of the model-complex, we gathered information about the operational specialities of the system. Thus, tests were extended on the whole model-sub model system.

*Main purposes of the study:*

- the enrichment of databases of microclimatic measurements in maize stands
- constructing a sufficiently accurate and low-cost measurement system for the purpose of monitoring
- performing a comparative analysis of the methods for estimation of actual and potential evapotranspiration
- performing diagnostic tests on an operating complex decision support system for irrigation

Our study covers many fields of the science of agricultural meteorology, thus, we focused on the review of only the most relevant pieces of the abundant related literature. Discussion of elementary background works was carried out only when making clear our results certainly required it.

Meteorological data meant one of the main parts of the material of this present study. These data originates partially from the weather station of the Hungarian Meteorological Service at Debrecen Airport, and from the DE-ATK Agrometeorological Observatory. On the basis of the data, 10 estimation methods for potential evapotranspiration were involved in a comparative statistical- and a sensitivity analysis. Analyses were performed in two sessions. In the second one we narrowed the tests for 3 methods on the basis of the Kismacs Observatory data series, which were measured very close to the site of microclimatic measurements in the selected maize fields. Microclimate, soil moisture and plant-phenological data series from the maize fields were used for the purpose of describing latent and sensible heat transfer processes, and also for the test of an energy-balance based method (the Bowen-ratio method) for estimating the actual evapotranspiration of maize. For this last, we used the output data of the selected 3  $ET_0$ -estimation models and the actual evapotranspiration data outputs of the DSS for irrigation developed by the FAO (Allen et al. 1998), as a reference. For our verification attempts for the water balance calculated by the system, our own soil moisture database measured in the study site was applied as a reference.

*Main results of the study:*

For the microclimate measurements performed in maize fields a unique, low-cost and high resolution measurement system was constructed— although it may be mentioned as “data and method” based on its role in this study, we consider this an important result of our research. The system consists of 12 shielded temperature and air-humidity sensor-data logger units set in 0.25 m intervals vertically up to the height of 3 meters. The system is moveable, automated, and suitable for measurements with up to 1 sec. resolution and continuous data logging. For the highest accuracy the data loggers have been normalized and also calibrated to officially certified instruments.

Microclimate measurements were performed by the system in two growing seasons of maize, in 1 min. resolution up to 3 m height. Plant-phenological data were collected simultaneously. On the basis of our measurements we gave detailed characterization about the latent and sensible heat distribution of maize stands, the full temperature and energy profile of the stands and the relationship between these and the phenological parameters under high and low evapotranspiration weather patterns.

Relationships between the extant energy amount and the evapotranspiration in typical weather scenarios were also studied. During dry periods 98% of the energy of the net radiation was used for evapotranspiration, while it was 99% during wet periods. Thus, the influence of the effects of advection processes on evapotranspiration was only 1-2%.

On the basis of the full energy balance, the actual evapotranspiration of the maize stand was estimated by the Bowen-ratio ( $\beta$ ) method ( $ET_{c,BR}$ ). Performing the calculations for the summer months of two growing seasons (2010 and 2011) with differing weather characteristics, we found significant standard deviation for  $\beta$  values, although – by use of appropriate data filtering method – these evapotranspiration data were useable and suitable for further comparative analyses. It was also stated that utility of the method inevitably requires the proper and reasonable selection of the height-levels for the measurements.

Estimation models for potential evapotranspiration were evaluated in two stages. First, two models were selected from each of the pan-based, temperature-based, radiation-based empirical, mass transfer-based and combined typemethods. During the evaluation, outputs of the methods were compared to each other and to the “A-type” pan evaporation data series for a 6-year-long test period. According to the comparative

analyses performed, there was a demonstrable correlation between the outputs of the same type methods; however, the Szász and the Priestley-Taylor (P&T) method were in a fair agreement with the majority of the tested models. During the sensitivity tests, the Szász, Makkink, P&T and Penman-Monteith-FAO-56 (PMF-56) methods were found steady and robust.

On the basis of their suitability for local tests, the weather data series available and the results of the preliminary evaluation we selected the PMF-56, P&T and Szász methods for the local analyses with the Debrecen-Kismacs Observatory data series. After a second analysis it was stated that while PMF-56 method results in higher output values, P&T and Szász estimate evapotranspiration significantly (an average of 20-30%) lower. Standard deviation of the results was the highest for P&T, while variation coefficient was higher for the outputs of the Szász method. The sensitivity of the models was similar in case of four independent meteorological parameters, but we pointed out that P&T resulted in the lowest increase of the total output range for the changes of the most parameters.

In the further parts of our study, actual evapotranspiration of maize ( $ET_{c,FAO}$ ) was modelled on the basis of the  $ET_0$  data series calculated by the 3 estimation models. Modelling was carried out by the FAO irrigation DSS for the growing seasons of 2010 and 2011. Outputs (actual evapotranspiration sums for the period) were compared to each other, too. We found the ratio of the reference evapotranspiration and the actual evapotranspiration may substantially differ, mostly for dry periods. Results of the 3  $ET_0$  models were also evaluated on the basis of irrigation water needs calculated by the FAO irrigation DSS. For the wet growing season of 2010 the PMF-56 and P&T system-version indicated 40 and 20 mm irrigation needs respectively, while the Szász-version indicated 0 mm correctly – as it was confirmed by observation from the maize fields. In 2011, PMF-56 calculated 160 mm, while P&T and Szász estimated not more than 60 mm respectively. According to these amounts, it was concluded that the PMF-56-version might overestimate irrigation needs. The reasons of this phenomenon were examined in the further parts of the study.

For the purpose of the verification of the FAO model and the actual evapotranspiration data series calculated from the reference evapotranspiration, total water balance of the maize stand was determined. The available water (DV) amounts calculated on the basis of the simulated and the gravimetric (interpolated for daily step by also the FAO model)

measurements data series were compared. The model calculates the simplified water-balance, thus, at the present point of the development it neglects deep percolation (DP) and capillary rise (CR), taking these values zero, respectively. Subsequently, the good agreement with the measured reference data verifies the correctness of only the water-balance, not that of the used  $ET_0$  method as an input. The correctness of any of the  $ET_0$  models used as an input may only be an implication at this point. Compared to the measured reference data series, PMF-56 and mainly the sub-model parameterized with the P&T  $ET_0$  values showed very good agreement, the Szász-version significantly overestimated the value of DV owing to its low estimated evapotranspiration level. It was assumed that during wet growing seasons  $-DP+CR < 0$  i.e.  $|-DP| > CR$ , and during low-precipitation periods  $DP+CR \geq 0$  i.e.  $|-DP| < CR$  applies. In the first case, taking the values of  $-DP$  and  $+CR$  zero, parameterized with  $ET_0$  values of PMF-56 and P&T methods, the model accurately simulated the available water of the soil (DV), although the used evapotranspiration data were assuredly overestimated. During dry period, performance of P&T and Szász version was the better.

As the need of estimating DP and CR values occurred, an attempt was carried out for the calculation and validation of these. According to our observations, operation of the FAO model naturally induces “virtual” DP and CR values owing to the finite rooting depth and the neglected (zero valued)  $-DP+CR$  balance. Virtual CR occurred mainly during the INI and DEV phenological stages, representing a minor, 2.7-3.3 mm amount of water for the growing season. The reason of the phenomenon is the shallow soil column, in which, when  $DV=0$  applies, the model covers the amount of the daily evapotranspiration from non-existent water supplies. Virtual DP occurred particularly after high precipitation events, when the model neglects the amount of water which exceeds the water capacity of the finite depth soil column. The amount of the excessive water reached 20-40 mm in several cases.

For the purpose of determining the actual  $-DP+CR$  balance, sum of the income originating from the precipitation and the losses caused by evapotranspiration was compared to the daily changes in DV ( $\Delta DV$ ). The calculated data served as a reference for the similar values of the model outputs. According to the measured data series, DP and CR reached major values mostly in the INI and DEV phenological stages owing to the shallow rooting depth. Comparing the model output variations to this, the same conclusion has been drawn and the  $-DP+CR$  balance has been determined between -5

and +10 mm. Major deviation from this interval was observed only to negative (DP) direction, following high precipitation events.

In the final part of the study, model values of the actual evapotranspiration ( $ET_{c,FAO}$ ) were set against the similar data series estimated by the Bowen-ratio method ( $ET_{c,BR}$ ), all for the July-August period. Good agreement was generally found between the 3  $ET_{c,FAO}$  variations and  $ET_{c,BR}$ , residues were evaluated by a detailed statistical analysis. On the whole, P&T and Szász model-variations were highlighted as more accurate ones, additionally, in spite of the higher standard deviation of its output, the low error level of the Szász method was confirmed by the reference data.

For the purpose of validation we calculated the crop coefficient ( $K_c$ ) which is defined as a ratio of the reference- and the actual evapotranspiration. Higher values were observed typically in 2011 when  $K_c$  was 0.1 higher on average, while in 2010  $K_c$  values were set around 1.0. The same analysis was performed for the transpiration ( $K_{cb}$ ) and the evaporation ( $K_e$ ) terms, too. Comparing the calculated values on the basis of  $ET_{c,BR}$  to the modelled data, fluctuation of the calculated ones was found significantly higher due to the changeable evapotranspiration rate in the growing season of 2011, particularly.

## 9. SZAKIRODALOM JEGYZÉK

- Adeboye, O.B. – Osunbitan J.A. – Adekalu K.O. – Okunade D.A.*: 2009. Evaluation of FAO-56 Penman-Monteith and Temperature Based Models in Estimating Reference Evapotranspiration Using Complete and Limited Data, Application to Nigeria. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 11: 1-25.p.
- Aina, P.O. – Fapohunda, H.O.*: 1986. Root distribution and water uptake patterns of maize cultivars field-grown under differential irrigation. *Plant and Soil*. Vol. 94: 2. 257-265.p.
- Allen, L.H. – Lemon, E.R.*: 1972. Net radiation frequency distribution in a corn crop. *Boundary-layer meteorology*. 3 (1972): 246-254.p.
- Allen, L.H. – Yocum, C.S. – Lemon, E.R.*: 1964. Photosynthesis under field conditions: VII. Radiant energy exchange. *Agronomy Journal*. 56: 253-259.p.
- 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
- Amato, M. – Ritchie, J.T.*: 2002. Spatial Distribution of Roots and Water Uptake of Maize (*Zea mays* L.) as Affected by Soil Structure. *Crop Sci*. 42: 773–780.p.
- Anda A.*: 1986. A kukorica (*Zea mays* L.) levélfelületének meghatározására alkalmas módszerek összehasonlítása. *Növénytermelés*. 35 (2). 99-107.p.
- Anda A.*: 1998. Water loss and microclimate of two maize (*Zea mays* L.) hybrids. *Acta Agronomica Hungarica*. 46 (2): 121-133.p.
- Anda A.*: 2001. Az állományklímát befolyásoló néhány eljárás mikrometeorológiai elemzése. Akadémiai Doktori Értekezés. Budapest.
- Antal E. – Posza I.*: 1983. A tényleges párolgás számításához használt növénykonstansok értékei többévi mérés alapján. *Időjárás*. 87: 170-177.p.
- Antal E.*: 1966.: Egyes mezőgazdasági növényállományok potenciális evapotranszspirációja. *Öntözéses Gazd.* 4, 69–86.p.
- Antal E.*: 1968a. Az öntözés előrejelzése meteorológiai adatok alapján. Kandidátusi értekezés.



- Antal E.*: 1968b. Új módszer a potenciális evapotranspiráció számítására. Beszámolók az 1967-ben végzett tudományos kutatásokról. OMI Hiv. Kiadványa. XXXIV. 414-430.p.
- Antal E.*: 2000. A növényi vízellátottság hazai kérdőjelei a jövő évtizedekben a globális éghajlatváltozás tükrében. [In: Dr. sen. Berényi Dénes születésének centenáris jubileumi ülése. Konferencia kiadvány]. Debreceni Egyetem, Debrecen. 119-145.p.
- Anyoji, H. – Takeuchi, S. – Yano, T. – Zeggaf, T.A.*: 2007. Partitioning energy fluxes between canopy and soil surface under sparse maize during wet and dry periods. [In: Lamaddalena, N. – Bogliotti, C. – Todorovic, M. – Scardigno, A. (ed.): Water saving in Mediterranean agriculture and future research needs Vol. 1.] Bari: CIHEAM. 201-211.p.
- Aujeszki L. – Berényi D. – Béll B.*: 1951. Mezőgazdasági meteorológia. Az agrometeorológiai ismeretek kézikönyve. Akadémiai Kiadó, Budapest
- Aylor, D.E.*: 2005. Quantifying maize pollen movement in a maize canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*. 131. (3–4): 247–256.p.
- Bacsó N.*: 1967. A mikroklíma fizikai szemlélete. Tud. Értesítő. ATE. Gödöllő.
- Baros Z. – Bíróné Kircsi A. – Szegedi S. – Tóth T.*: 2006. Meteorológiai műszerek. Kossuth Egyetemi Kiadó, Debrecen
- Berényi D.*: 1945. A kukorica termelése és összefüggése az időjárással. Tiszántúli Mezőgazdasági Kamara, Debrecen
- Berényi D.*: 1948. Mikroklimatikus mérések dohányban és napraforgóban. *Debreceni Tudományegyetem Meteorológiai Int. Közl.* 8. 1-58.p.
- Berényi D.*: 1958. Az állományklímát kialakító tényezők. *MTA Agr. Tud. Oszt. Közl.* 14. 155-193.p.
- Berényi D.*: 1967. Mikroklíma der bodennahen Atmosphäre. Akadémiai Kiadó – Gustav Fischer Verlag, Budapest-Stuttgart
- Berzsenyi Z.*: 2000. Növekedésanalízis a növénytermesztésben (Ph.D-jegyzet) VE-Georgikon-Mezőgazdaságtudományi Kar, Keszthely

- Bíróné Kircsi A.*: 2008. A szélenergia hasznosítás klimatológiai vonatkozásai. Doktori értekezés. DE-TTK, Meteorológiai Tanszék, Debrecen
- 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
- Bocz E. – Nagy J.*: 1978. A klasszifikációs módszerek alkalmazása a növénytermesztési kísérleti adatok kiértékelésében. *Debr. Agrártudományi Egyetem Tud. Közl.* 21 (2): 185-198.p.
- Bocz E.*: 1988. Vízellátottsági és öntözési jelzés. DATE Növénytermesztéstani Tanszék, Debrecen
- Bocz E.*: 1992. Szántóföldi növénytermesztés. Mezőgazda Kiadó, Budapest
- Bois, B. – Pieri, P. – Van Leeuwen, C. – Gaudillère, J.P.*: 2005. XIV. International GESCO Viticulture Congress, Geisenheim, Germany, 23-27 August, 2005 2005. 187–193.p.
- Bottemanne, F.A. – Goudriaan, J. – Stiger, C.J. – Reitsma, T.*: 1976. Some aspects of crop climate simulating. [In: Agrometeorology of maize (corn) crop. Proc. Symp. Agrometeorology of the maize (corn) crop, Ames, Iowa. WMO.]. 377-389.p.
- Bowen, I.S.*: 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Phys. Rev.* 27-779.p.
- Briggs, D.J. – Smithson, P. – Addison, K. – Atkinson, K.*: 2002. Fundamentals of the physical environment. Routledge, London
- Brown, K.W. – Covey, W.*: 1966. The energy-budget evaluation of the micrometeorological transfer processes within a cornfield. *Agricultural Meteorology.* 3. 73-96.p.
- Burman, R. – Pochop, L.O.*: 1994. Evaporation, evapotranspiration and climatic data. Developments in Atmospheric Science, 22. Elsevier, Amsterdam
- Businger, J.A.*: 1975. Aerodynamics of vegetated surfaces. [In: de Vries, D.A. – Afgan, N.H. (ed.) Heat and mass transfer in the biosphere. Part I. Transfer processes in the plant environment]. John Wiley and Sons, New York. 139-165.p.

- Campbell, G.S.*: 1977. An introduction to environmental biophysics. Springer-Verlag, New York.
- Czelnai R. – Szepesi D-né*: 1986. Meteorológia. Műszaki Értelmező Szótár. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Cselőtei L.*: 1967. A meteorológia szerepe az öntözés megalapozásában. *MTA Agrártudományi Osztály Közl.* 26: 155-164.p.
- Daughtry, C.S.T. – Gallo, K.P. –Goward, S.N. –Prince, S.D. –Kustas, W.P.*: 1992. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. *Remote Sensing of Environment.* 39(2): 141–152.p.
- Deacon, E.L.*: 1953. Vertical profiles of mean wind in the surface layers of the atmosphere. *Geophys. Mem.* No. 91. 61.p.
- Debreczeni B. – Debreczeni B-né*: 1983. A tápanyag- és vízellátás kapcsolata. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest.
- Denmead, O.T. – Shaw, R.H.*: 1959. Evapotranspiration in relation to the development of the corn crop. *Agronomy Journal.* 51: 725-726.p.
- Doorenbos, J. – Kassam, A.H.*: 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper. No.33. Rome. 193.p.
- 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. (2<sup>nd</sup> Ed.) FAO, Rome
- Dunay S. – Posza I. – Varga-Haszonits Z.*: 1969. Egyszerű módszer a tényleges evapotranszpiráció és a talaj vízkészletének meghatározására. II. Tényleges párolgás. *Öntözéses Gazdálkodás.* VII. 2: 27-38.p.
- Dunkel Z.*: 2000. A területi párolgás meghatározásának módszerei mezőgazdasági hasznosítású területekre. Doktori értekezés. Debreceni Egyetem, Agrártudományi Centrum, Mezőgazdaságtudományi Kar, Debrecen
- Dyer, A.J.*: 1974. A Review of flux profile relationships. *Bound. Lay. Meteorol.* 7:363–372.p.

- Er-Raki, S. – Chehbouni, A. – Khabba, S. – Simonneaux, V. – Jarlan, L. – Ouldbba, A. – Rodriguez, J.C. – Allen, R.:* 2010. Assessment of reference evapotranspiration methods in semi-arid regions: Can weather forecast data be used as alternate of ground meteorological parameters? *Journal of Arid Environments*. 74: 1587–1596.p.
- FAO (Food and Agriculture Organization):* 1996. Guidelines: Agro-ecological zoning. FAO Soils Bulletin 73. Rome, FAO
- FAO:* 1992. CROPWAT — A Computer Program for Irrigation Planning and Management. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 46. Food and Agriculture Organization, Rome.
- Federer, C.A. – Vörösmarty, C. – Fekete, B.:* 1996. Intercomparison of Methods for Calculating Potential Evaporation in Regional and Global Water Balance Models. *Water Resources Research*. 32 (7): 2315-2321.p.
- Filep Gy.:* 1999. Talajtani alapismeretek I. Általános talajtan. Egyetemi jegyzet. DATE-MTK
- Frank M. – Hank O.:* 1949. Kísérletek egyes gazdasági növények dinamikai vízigényének megállapítására. *Agrártudomány*. Budapest. 374-379.p.
- Fuchs, M – Tanner, C.B.:* 1965. Radiation shields for air temperature thermometers. *Journal of Applied Meteorology*. 4: 544-547.p.
- Gao, Y. – Duan, A. – Qiu, X. – Liu, Z. – Sun, J. – Zhang, J. – Wang, H.:* 2010. Distribution of roots and root length density in a maize/soybean strip intercropping system. *Agricultural Water Management*. 98: 199–212.p.
- Gavilán, P. – Berengena, J.:* 2007. Accuracy of the Bowen-ratio energy balance method for measuring latent heat flux in a semiarid advective environment. *Irrig. Sci.* 25: 127-140.p.
- Gay, L.W. – Knoerr, K.R.:* 1970. Radiation budget of a forest canopy. *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimat. Ser. B.* 118 (2): 187-196.p.
- Geiger, R.:* 1927. Das Klima der bodennahen Luftschicht. Ein Lehrbuch der Mikroklimatologie. I. Auflage. Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig
- Geiger, R.:* 1961. Das Klima der bodennahen Luftschicht. Braunschweig

- Gerwitz, A. – Page, E.R.:* 1974. An empirical mathematical model to describe plant root systems. *Journal of Appl. Ecol.* 11(2):773-781.p.
- Gitelson, A.A.:* 2004. Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation. *Journal of Plant Physiology.* 161: 165–173.p.
- Gombos B.:* 2008. A hazai rizstermesztés agrometeorológiai vonatkozásai. Doktori értekezés. Debreceni Egyetem, Mezőgazdaságtudományi Kar, Növénytermesztési és kertészeti tudományok Doktori Iskola, Debrecen, 135.p.
- Goudriaan, J.:* 1977. Crop Micrometeorology: A simulation study. Simulation monographs. Pudoc, Center for Agricultural Publishing and Documentation. Wageningen
- Grace, J.:* 1977. Plant response to wind. Academic Press, London
- Hanway, J.J.:* 1966. How a corn plant develops.: Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service. Special Report. No. 48. Iowa State University. Ames, Iowa
- Hargreaves, G.H. – Samani, Z.A.:* 1982. Estimating of potential evapotranspiration. *J. Irrig. Drain. E-ASCE* 108, 223-230.p.
- Heyne, E.G. – Laude, H.H.:* 1940. Resistance of corn seedlings to high temperatures in laboratory tests. *Journal of American Soc. Agr.* 32: 116-129.p.
- Huzsvai L. – Rajkai K. – Szász G.:* 2005. Az agroökológia modellezéstechnikája. Elektronikus tankönyv az OM Felsőoktatási Tankönyv és Szakkönyvtámogatás keretében. Debreceni Egyetem Agrártudományi Centrum, Debrecen. <http://www.hik.hu>
- Huzsvai, L. – Dövényi Nagy T. – Rajkai K.:* 2011. A növény vízfelvétele a talajból szélsőséges időjárási helyzetben. [In: Herdon, M. – Rózsa T. – Szilágyi R. (szerk.) Agrárinformatika 2011. Conference Proceedings]. Hungarian Association of Agricultural Informatics, Debrecen. 185-195.p.
- Impens, I. – Lemeur, R. – Hoermans, R.:* 1970. Spatial and temporal variation of net radiation in crop canopies. *Agricultural Meteorology.* 7: 335-337.p.

- Impens, I. – Lemeur, R.:* 1969. Extinction of net radiation in different crop canopies. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie Serie B*, Volume 17. 4: 403-412.p.
- Irmak, S. – Haman, D.Z.:* 2011. Evapotranspiration: Potential or reference? ABE 343. University of Florida, IFAS. Gainesville. 1-2.p.
- Jarvis, N.J.:* 1989. A simple empirical model of root water uptake. *Journal of Hydrology*. 107: 57-72.p.
- Jensen, M.E. – Burman, R.D. – Allen, R.G.:* 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice. 70.p.
- Jonckheere, I. – Fleck, S. – Nackaerts, K. – Muysa, B. – Coppin, P. – Weiss, M. – Baret, F.:* 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*. 121: 19–35.p.
- Jones H.G.:* 1992. Plants and microclimate: A quantitative approach to environmental plant physiology, 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge
- Jones, H.G.:* 1983. Plant and microclimate. Cambridge Univ. Press., Cambridge
- Justyák J.:* 1981. Az erdők sugárzásforgalma. *Acta Geographica Debrecina*. Tom. XVIII-XIX. Debrecen. 209-235.p.
- Justyák J.:* 1989. A tokaj-hegyaljai szőlőültetvények mezo- és mikroklímatis jellemzői. Akadémiai doktori értekezés
- Kádár B.:* 1966. Az öntözés eredményességének vizsgálata a Tiszántúlon. *Öntözéses Gazdálkodás*. Vol. IV. No. 2. 45-62.p.
- Kanemasu, E.T. – Rosenthal, W.:* 1976. Estimating daily evapotranspiration for scheduling irrigation for corn. [In: Agrometeorology of maize (corn) crop. Proc. Symp. Agrometeorology of the maize (corn) crop, Ames, Iowa. WMO.]. 135-140.p.
- Késmárki I.:* 2003. *Agronapló*. Országos mezőgazdasági szakfolyóirat. Budapest VII. (5.)

- Kiese, O.:* 1972. Bestandsmeteorologische Untersuchungen zur Bestimmung des Wärmehaushalts eines Buchenwaldes. Berichte des Instituts für Meteorologie und Klimatologie Univ., Hannover. 6-132.p.
- Konstantinov, A.R.:* 1963. Regime of evapotranspiration from the surface of ponds and reservoirs. [ford. Robbins, L.G.]. *Soviet Hydrology*. No. 1. (1963): 76-85.p.
- Kozmáné Tóth E. – Posza I. – Tiringner Cs.:* 1995. Szántóföldi növényállományok vízigénye, tényleges párolgása és öntözővíz szükséglete. *Éghajlati és Agrometeorológiai Tanulmányok*. OMSZ. 3: 33-96.p.
- Kustas, W. P – C.S.T. Daughtry.:* 1990. Estimation of the soil heat flux/net radiation ratio from spectral data. *Agricultural and Forest Meteorol.* 49 (3): 205 - 223.p.
- Lakatos L. - Gonda I. – Soltész M. - Szabó Z. - Sun, Z.F. – Nyéki J.:* 2011. Mikroklíma-vizsgálatok őszibarack- és szilvaállományban. *Klíma -21 Füzetek*. 45-53.p.
- Liedgens, M. – Richner, W.:* 2001. Root development: Minirhizotron observations of the spatial distribution of the maize root system. *Agron. J.* 93: 1097–1104.p.
- Lieth, H.:* 1975. Modeling the primary productivity of the world. [In: Lieth, H. – Whittaker, R.H. (szerk.) Primary productivity of the biosphere.. Ecological studies] Springer – Verlag New York. 14: 237–263.p.
- Ligetvári F.:* 2008. Öntözés. Szent István Egyetem – MKK., Gödöllő
- Lim, W.H. – Roderick, M.L. – Hobbins, M.T. – Wong, S.C. – Groeneveld, P.J. – Sun, F. Farquhar, G.D.:* 2011. The aerodynamics of pan evaporation. *Agricultural and Forest Meteorology*. 52. (2012): 31–43.p.
- Lu, J. – Sun, G. – Mc Nulty, S.G. – Amatya, D.M.:* 2005. A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the south-eastern United States. *Journal of the American Water Resources Association*. 41 (3): 621–633.p.
- 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.

- Mándy Gy.*: 1958. Ökológiai vizsgálatok kukoricafajtákkal. [In: I'só I. (szerk.) Kukoricatermesztési kísérletek 1953-1957.]. Akadémiai Kiadó, Budapest. 91-105.p.
- McMahon, T.A. – Peel, M.C. – Lowe, L. – Srikanthan, R. – McVicar, T.R.*: 2012. Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis. *Hydrology and Earth System Sciences Discuss.* 9: 11829-11910.p.
- McNaughton, K.G. – Black, T.A.*: 1973. A study of evapotranspiration from a Douglas-fir forest using the energy-balance approach. *Water Resources Research.* Vol. 9. no. 6. 1579-1590.p.
- McNaughton, K.G. – Jarvis, P.G.*: 1983. Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation. [In: Water Deficits and Plant Growth. Szerk: Kozlowski, T.T. Vol. VII.]. Academic Press. 1-47.p.
- Mendez-Millan, M. – Dignac, M.-F – Rumpel, C. – Rasse, D.P. – Bardoux, G – Derenne, S.*: 2012. Contribution of maize root derived C to soil organic carbon throughout an agricultural soil profile assessed by compound specific <sup>13</sup>C analysis. *Organic Geochemistry.* 42: 1502-1511.p.
- Menyhért Z. (szerk.)*: 1979. Kukoricáról a termelőknek. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest.
- Meyer, A.F.*: 1915. Computing runoff and rainfall and other physical data. *Trans. Am. Soc. Civil Eng.* 79: 1055-1155.p.
- Milthorpe, F.L. – Moorby, J.*: 1969. Vascular transport and its significance in plant growth. *Annual Review of Plant Physiology.* 20: 117-38.p.
- Milthorpe, F.L. – Moorby, J.*: 1974. An introduction to crop physiology. Cambridge Academic Press, Cambridge
- Monin, A.S. – Obukhov, A.M.*: 1954. Osznovije zakonomernosztyi turbulentnovo peremesivanyija v prizemnom szloje atmosferi. Trudi Geofizicheskovo. Insztituta. No.24. (151). Akademia. Nauk SSSR, Leningrad. 163-187.p.
- Monteith, J.L.*: 1963. Gas exchange in plant communities. Proc. Symp. Held Canberra 1962. Academic Press, London. 95-112.p.



- Monteith, J.L.:* 1965. Evaporation and environment. Symposia of the Society for Experimental Biology 19: 205–224.p.
- Monteith, J.L.:* 1973. Principles of Environmental Physics. Edward Arnold, London.
- Monteith, J.L.:* 1976. Vegetation and the Atmosphere. Vol. 1-2. Academic Press, New York
- Montgomery, E.G.:* 1911. Correlation studies in corn. *Nebraska Agr. Exp. Sta. Annu. Rep.* 24:108-159.p.
- Nagy J.:* 2007. Kukoricatermesztés. Akadémiai Kiadó, Budapest
- Nagy V.:* 2004. Termőhely-specifikus növénytermesztés hidrológiai alapjai, különös tekintettel Csallóközre és szigetközre. Doktori értekezés. Nyugat-Magyarországi Egyetem-MÉK, Mosonmagyaróvár
- Novák, V.:* 1994. Water uptake of maize roots under conditions of non-limiting soil water content. *Soil Technology.* 7: 37-45.p.
- Oke, T.R.:* 1978. Boundary layer climates. 2nd ed. Methuen, London
- Palmer, P.:* 2005. AGRIMET: Modeling evapotranspiration for irrigating water management. Conference Paper. Western Snow Conference 2005, Boise
- Penman, H.L.:* 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. *Mathematical and Physical Sciences.* 193. 1032. 120-145.p.
- Pepó P.:* 2005. A globális klímaváltozás hatásai és válaszai a Tiszántúl szántóföldi növénytermelésében. *AGRO-21 füzetek.* 41/2005. 59-65.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.
- Perez, P.J. – Castellvi, F. – Ibañez, M. – Rosell J.I.:* 1999. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology.* 97: 141–150.p.
- Perez, P.J. – Castellvi, F. – Martínez-Cob, A.:* 2008. A simple model for estimating the Bowen ratio from climatic factors for determining latent and sensible heat flux. *Agricultural and Forest Meteorology.* 148 (2008): 25-37.p.

- Petrasovits I.:* 1974. Az evapotranszspirációs vizsgálatok öntözött növényállományokban. *Öntözéses Gazd.* Szarvas. 4: 49-68.p.
- Pretty, J.:* 2006. Agroecological approaches to agricultural development. Background paper for the WDR 2008.
- 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.
- Rao, G.G.S.N – Rajput, R.K.:* 1992. Evapotranspiration estimates for crop water requirements under different agro-climatic conditions in India [In: Proc. Int. Comm. Irrig. Dra. 16th European Regional Conference Vol 2. Ecological, Technical and Social-Economical Impacts on Agricultural Water Management]. Budapest, Hungary, June 21-27. 1992. 277-288.p.
- Rijtema, P.E.:* 1965. An analysis of actual evapotranspiration. Centre for Agricultural Publications and Documentation. *Agric. Res. Rep.* No. 69., Wageningen
- Ritchie, J.T. – Johnson, B.S.:* 1990. Soil and plant factors affecting evaporation. *Irrigation of Agricultural Crops – Agronomy Monograph.* No. 30. 363-390.p.
- Robinson S.M.:* 1962. Computing wind profile parameters. *J. Atmos. Sci.* 19. 189–190.p.
- Rose, C.W.:* 1966. Agricultural physics. Com. Int. Lib., Pergamon Press, Oxford
- Rosenberg, N.J., Blad, B.L. and Verma, S.B.:* 1983. Microclimate. The Biological Environment (2nd edition). J. Wiley, New York.
- Rosenberg, N.J.:* 1974. Microclimate. The Biological Environment. J. Wiley, New York.
- Ross, J.:* 1975. Radiative transfer in plant communities. [In: Monteith (szerk.) *Vegetation and the atmosphere.*]. Academic Press, London. 13-55.p.
- Ross, J.:* 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. J. Dr W. Junk Publishers, The Hague
- Schneider, K. – Ketzer, B. – Breuer, L. – Vaché, K.B. – Bernhofer, C. – Frede, H.-G.:* 2007. Evaluation of evapotranspiration methods for model validation in a semi-arid watershed in northern China. *Advances in Geosciences.* 11: 37-42.p.

- Shaw, R.H.*: 1976. Water use and requirements of maize - Review. [In: Agrometeorology of maize (corn) crop. Proc. Symp. Agrometeorology of the maize (corn) crop, Ames, Iowa. WMO.]. 119-134.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.
- Spittlehouse, D.L. – Black, T.A.*: 1979. Evaluation of the Bowen ratio/energy balance method for determining forest evapotranspiration. *Atmosphere-Ocean*. 18 (2): 98-116.p.
- Steduto, P. – Hsiao, T.C. – Raes, D. – Fereres, E.*: 2009. AquaCrop: a new model for crop prediction under water-deficit conditions. FAO, Rome
- Stewart, D.W. – Dwyer, L.M.*: 1999. Mathematical characterization of leaf shape and area of maize hybrids. *Crop Science*. 39: 422-427.p.
- Sumner, D.M. – Jacobs, J.M.*: 2005. Utility of Penman–Monteith, Priestley–Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration. *Journal of Hydrology*. 308: 81–104.p.
- Suyker, A.E. – Verma, S.B.*: 2009. Evapotranspiration of irrigated and rainfed maize-soybean cropping systems. *Agr. Forest Met.* 149 (3-4): 443-452.p.
- Sverdrup, H.U.*: 1946. The humidity gradient over the sea surfaces. *Monthly Weather Review*. 67: 4-11.p.
- Szász G. – Nagy Z. – Weidinger T.*: 2011. Agrometeorológiai mérések Debrecenben, az alapéghajlati mérőhálózat kismacsi mérőállomása. Meteorológiai Tudományos Napok 2011., OMSZ, Budapest
- Szász G. – Percze J.*: 1966. A nyári félév csapadékviszonyainak vizsgálata az öntözés szükségességének megítélésére szempontjából. *Hidrológiai Közöny*. 12: 560-566.p.
- Szász G.*: 1956. Talajkülönbségek hatása az őszi árpa állományéghajlatára. *Agrokémia és talajtan*. 5. 471-484.p.
- Szász G.*: 1968. A kukorica- és lucernaállomány nyári vízfogyasztásának meteorológiai vizsgálata. *Növénytermelés*. 17. (2): 129-138.p.
- Szász G.*: 1973. A potenciális párolgás meghatározásának új módszere. *Hidrológiai Közöny*. 435-442.p.

- Szász G.*: 1974. A hajdúsági löszhát természetes felszínének sugárzási energiaforgalma. *Időjárás*. 78. 267-280.p.
- Szász G.*: 1987. The role of climate in the intensive development of agriculture. Conference on Climatic Change, Brno. 43-56.p.
- Szász G.*: 1988. Általános és speciális agrometeorológia. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest
- Szász G.*: 1997a. A mikroklimatológia alapjai. In: Meteorológia mezőgazdáknak, kertészeknek, erdészeknek. Szerk.: Szász G.-Tőkei L. Mezőgazda Kiadó, Budapest 264-335.p.
- Szász G.*: 1997b. A víz a talajban, a légkörben és a növényben. In: Meteorológia mezőgazdáknak, kertészeknek, erdészeknek. Szerk.: Szász G.-Tőkei L. Mezőgazda Kiadó, Budapest 111-184.p.
- Szász G.*: 1998. A természetes vízellátottság szerepe a főbb növények növekedésének és termésének mennyiségi, minőségi alakulásában. Met. Tud. Napok '98. OMSZ, Budapest
- Száva-Kováts J. – Berényi D.*: 1948. A talajmenti légréteg éghajlata. Mikroklíma és növényklíma. Országos Meteorológiai és Földmágneselességi Intézet, Budapest
- Szlovák S.*: 1979. A kukorica transzspirációjának és evapotranszspirációjának vizsgálata. Kandidátusi értekezés. Öntözési Kutató Intézet, Szarvas
- Tabari, – H. Grismer, M.E. – Trajkovic, S.*: 2005. Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. *Irrig. Sci.* 23 (4): 1-11.p.
- Taboada, M.A. – Alvarez, C.R.*: 2008. Root abundance of maize in conventionally tilled soils of Argentina. *Bras. Ci. Solo.* 32: 769-779.p.
- Tanner, B.C.*: 1968. Evaporation of water from plants and soil. [In: Kozlowski, T.T. (szerk.): Water deficits and plant growth. Academic Press, Vol.1. Development, Control and Measurement]. New York. 73–106.p.
- Tanner, B.C., – Peterson, A.E. – Love, J. R.*: 1960. Radiant energy exchange in a corn field. *Agronomy. Journal.* 52: 373-379.p.
- Tavčar, R. – Lieber, L.*: 1939. Mais. *Zea mays*. [In: Roemer-Rudolf: Handbuch der Pflanzenzüchtung. II.]. Parey, Berlin. 75-129.p.

- Thom, A.S.: 1971. Momentum adsorption by vegetation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 97: 414-428.p.
- Thornthwaite, C.W. – Holzman, B.: 1939. The determination of evaporation from land and water surface. *Monthly Weather Review*. 67:4-11.p.
- Thornthwaite, C.W.: 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*. 38 (1): 55–94.p.
- Tőkei L. - Bulátkó F. - Ligetvári F. - Gránásky T.: 1996. An investigation concerning crop canopy temperatures in apple plantations, *Acta Agronomica Hungarica*. 1. 43-53.p.
- Turc, L.: 1961. Evaluation de besoins en eau d'irrigation, ET potentielle. *Ann. Agron.* 12: 13-49.p.
- Uchijama, Z. – Wright, J.L.: 1964. An experimental study of air flow in a corn plant-air layer. *Bull. Nat. Inst. Agric. Sci. (Japan), Ser. A*, 11: 19–66.p.
- Van Dam, J.C. – Huygen, J. – Wesseling, J.G. – Feddes, R.A. – Kabat, P. – van Waslum, P.E.V. – Groenendijk, P. – Van Diepen, C.A.: 1997. Theory of SWAP version 2.0: Simulation of water flow and plant growth in the Soil-Atmosphere-Plant environment. Tech. Doc. 45. Wageningen Agric. Univ., Wageningen
- Varga-Haszonits Z. – Varga Z.: 1999. Agroklimatológia. (Éghajlat és Növénytermesztés) Pannon Agrártudományi Egyetem, Mosonmagyaróvár.
- Varga-Haszonits Z.: 1981. A növények termeszthetőségének agroklimatológiai feltételei. *Beszámolók az 1979-ben végzett tudományos kutatásokról*. OMSZ, Budapest. 45-51.p.
- Varga-Haszonits Z.: 1987. Mezőgazdasági információk és hasznosításuk. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest
- Varga-Haszonits, Z. – Varga Z. – Lantos Zs. – Enzsölné Gerencsér E. – Milics G.: 2008. A talajok vízellátottságának hatása a gazdasági növények vízigényének alakulására. *Agrokémia és Talajtan*. 57 (2008): 7-20.p.
- Vazin, F.: 2012. The effects of pigweed redroot (*Amaranthus retroflexus*) weed competition and its economic thresholds in corn (*Zea mays*). *Planta daninha*. Vol 30, no.3 Viçosa July/Sept.

- von Hoynigen-Huene, J.: 1976. Heat and water budget of corn crops under the climatic conditions of Central Europe. [In: Agrometeorology of maize (corn) crop. Proc. Symp. Agrometeorology of the maize (corn) crop, Ames, Iowa. WMO.]. 174-186.p.
- Wagner, R.: 1964. Lufttemperaturmessungen in einer Doline des Bükk Gebirges. *Zeitschr. f. Angew. Meteorol.* 5.
- Weiss M. – Baret, F. – Smith, G.J. – Jonckheere, I. – Coppin, P.: 2004. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination. Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology.* 121: 37–53.p.
- Wesseling, J.G. – van de Broek, B.J.: 1983. Prediction of irrigation scheduling with the numerical model SWATRE. Institute for Land and Water Management Research, Wageningen
- WMO: 1966. Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration. Technical Paper (CIMO-Rep.) No. 83. Genf
- WMO: 2006. Guide to Instruments and Methods of Observations, WMO. 8. I.2 1-17.p.
- Xia, H.-Y. – Zhao, J.-H. – Sun, J.-H. – Bao, X.-G. – Christie, P. – Zhang, F.-S. – Li, L.: 2013. Dynamics of root length and distribution and shoot biomass of maize as affected by intercropping with different companion crops and phosphorus application rates. *Field Crops Research.* 150: 52–62.p.
- Yates, D. – Strzepek, K.: 1994. Potential evapotranspiration methods and their impact on the assessment of river basin runoff under climate change. *International Institute of Applied Systems Analysis Working Papers.* 94–46. 28.p.
- Yoder, R.E. – Odhiambo, L.O. – Wright, W.C.: 2005. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in humid Southeast United States. *Applied Engineering in Agriculture.* 21 (2): 197–202.p.
- Zhou, M.: 2011. Estimates of Evapotranspiration and Their Implication in the Mekong and Yellow River Basins. [In: Evapotranspiration. Szerk: Leszek Labedzki. ISBN: 978-953-307-251-7, InTech.]. DOI: 10.5772/14791.p.

## 10. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN MEGJELENT SAJÁT TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

### 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. (2014). 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: 13<sup>th</sup> 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.*

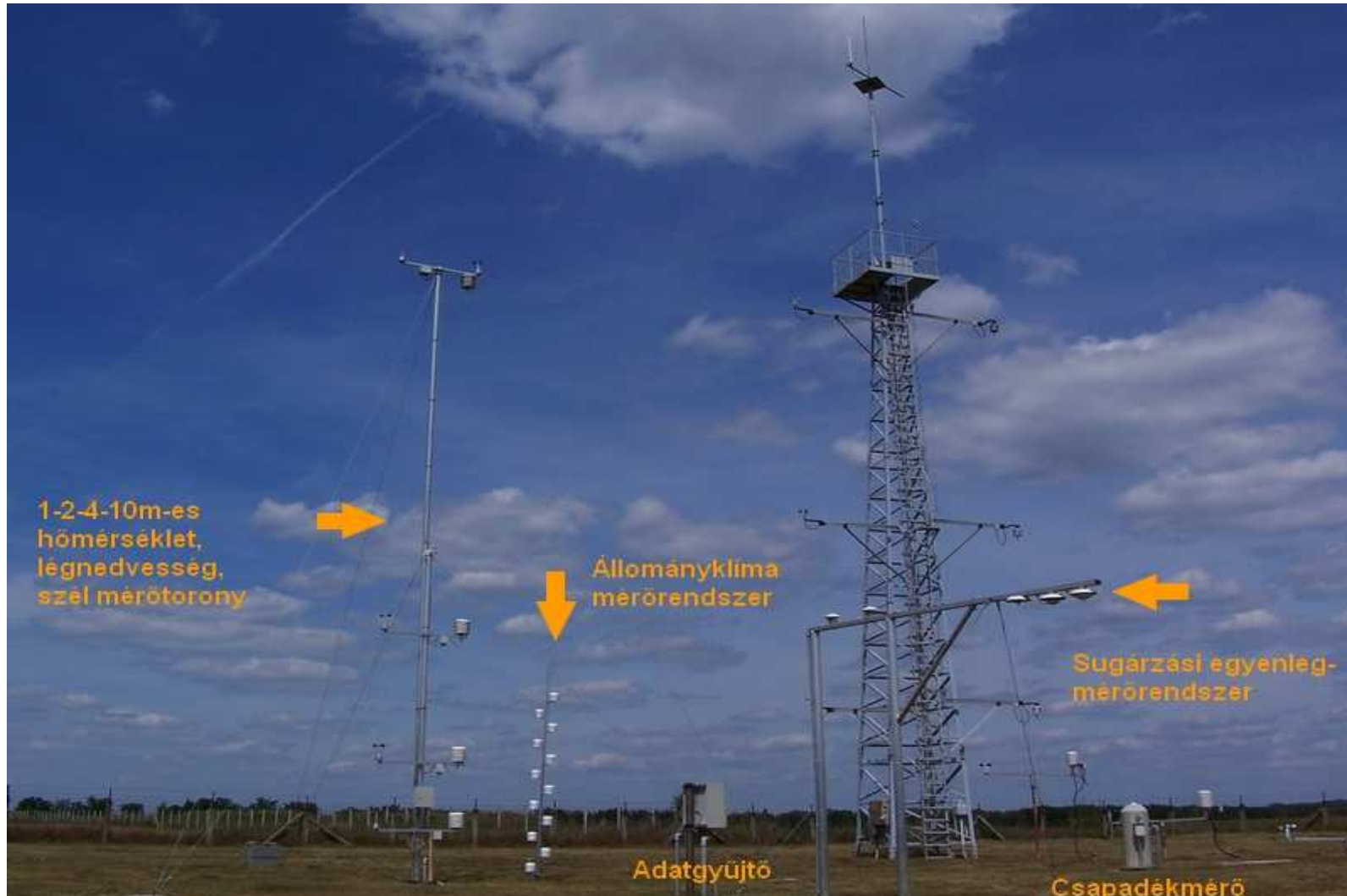
*Szász G. – Rácz Cs.: 2010. A harmonikus víz- és tápanyagellátás kutatása (1960-2010). [In: Pepó P. (szerk.) Termesztési tényezők a fenntartható növénytermesztésben. Jubileumi kiadvány Bocz Ernő 90. születésnapja alkalmából]. DE-AGTC-MÉK, Debrecen. 204-217.p.*

## **FÜGGELÉK**





F.1. ábra: Az állományklíma mérőrendszer elhelyezése 2010-ben (fent), illetve 2011-ben (lent)



F.2. ábra: A Debrecen-Kismacson található Agrometeorológiai Observatórium műszerparkja az állományklíma mérőrendszerrel

## **NYILATKOZAT**

Ezen értekezést a Debreceni Egyetem Mezőgazdaság-, Élelmiszertudományi és Környezetgazdálkodási Karán a Kerpely Kálmán Növénytermesztési, kertészeti és Regionális Tudományok Doktori Iskola keretében készítettem el a Debreceni Egyetem MÉK doktori (Ph.D.) fokozatának elnyerése céljából.

Debrecen, 2014. április 25.

Rácz Csaba  
doktorjelölt

## **NYILATKOZAT**

Tanúsítom, hogy Rácz Csaba doktorjelölt 2007 - 2013 között a fent megnevezett Doktori Iskola keretében irányításommal – irányításunkkal végezte munkáját. Az értekezésben foglalt eredményekhez a jelölt önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult, az értekezés a jelölt önálló munkája. Az értekezés elfogadását javaslom.

Debrecen, 2014. április 25.

Dr. Szász Gábor DSc  
témavezető

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetemet fejezem ki mindenekelőtt témavezetőmnek, Dr. Szász Gábor professor emeritusnak, aki szakmai tapasztalatával és iránymutatásával támogatta a doktori programban való előrehaladásomat, e munka elkészülését. Ugyancsak köszönet illeti opponenseimet, Dr. Varga-Haszonits Zoltánt és Bíróné Dr. Kircsi Andreát, akik észrevételeikkel, építő jellegű kritikájukkal segítették értekezésem végleges formába öntését.

Végezetül megköszönöm Dr. Dobos Attila Csaba tudományos főmunkatársnak, Dr. Dövényi-Nagy Tamás tudományos munkatársnak és Horváth Andrea tanszéki munkatársnak támogatásukat, készséges közreműködésüket a kutatómunkám során felmerülő problémák megoldásában.

Az értekezéshez kapcsolódó kutatások költségeit a Debreceni Egyetem tudományos képzési műhelyeinek támogatása című TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0024 program fedezte.