



**PRECÍZIÓS ÖNTÖZÉSI TECHNOLÓGIA: AQUACROP
MODELL ALKALMAZHATÓSÁGA AZ IPARI
PARADICSOM TERMESZTÉSÉBEN**

Doktori (PhD) értekezés

TAKÁCS SÁNDOR

Gödöllő

2019

A doktori iskola

megnevezése: SZIE Növénytudományi Doktori Iskola
tudományága: Növénytermesztési és kertészeti tudományok
vezetője: Dr. Helyes Lajos
egyetemi tanár, az MTA doktora
Szent István Egyetem
Mezőgazdasági- és Környezettudományi Kar
Kertészeti Intézet

témavezető: Dr. Helyes Lajos
egyetemi tanár, az MTA doktora
Szent István Egyetem
Mezőgazdasági- és Környezettudományi Kar
Kertészeti Intézet

társtémavezető: Dr. Bíró Tibor
egyetemi docens
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Víz tudományi Kar
Vízépítési és Vízgazdálkodási Intézet

.....
A témavezető jóváhagyása

.....
A társtémavezető jóváhagyása

.....
Az iskolavezető aláírása

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés	5
1.1	Bevezető gondolatok	5
1.2	Kérdésfelvetés	7
2	Irodalmi áttekintés	8
2.1	Öntözés helyzete a világon	8
2.2	Az öntözés hazai helyzete.....	10
2.2.1	Területi megoszlás, vízfelhasználás megoszlása forrás szerint.....	10
2.2.2	Öntözési módok megoszlása, a felhasznált vízmennyiség.....	11
2.2.3	A zöldségnövények hazai öntözésének alakulása	12
2.3	Öntözésfejlesztés Magyarországon	13
2.3.1	A precíziós öntözés	15
2.4	A paradicsom fejlődése, termesztési igényei.....	19
2.4.1	A paradicsom rendszertana, származása, tulajdonságai.....	19
2.4.2	A paradicsom ökológiai igényei.....	20
2.5	Öntözési technológiák	24
2.5.1	A deficit öntözés és hatása a paradicsomra	24
2.5.2	A vízigény kiszámítása.....	24
2.5.3	Az öntözés hatása a terméseredményekre és a beltartalmi mutatókra	26
2.6	Környezeti stresszek és hatásai.....	27
2.6.1	Az aszály	28
2.6.2	A vízstressz hatása a növényekre	29
2.7	Növényi vízstressz követésének módszerei.....	29
2.7.1	Lombfelszín-hőmérséklet mérés	29
2.8	Növénynövekedési modellek.....	31
2.8.1	Az AquaCrop modellről	32
3	Anyag és módszer	35
3.1	A kísérleti terület bemutatása	35
3.2	A precíziós öntözőberendezés jellemzői	35
3.2.1	Az öntözés egyenletességének és az átmeneti zónák mérése.....	36
3.2.2	Az adatok értékelése.....	39
3.2.3	Az alul-felülöntözött területek meghatározása.....	40
3.3	Kísérlettervezés	41
3.3.1	Kísérleti körülmények	41
3.3.2	Öntözővíz mennyiségének kiszámítása:.....	42
3.4	Mérések	43
3.4.1	A talajnedvesség mérése	43

3.4.2	Növényi stressz indexek (lombfelszín hőmérséklet mérése, SDD, CWI)	43
3.4.3	A termés mennyiségének és minőségének elemzése	44
3.5	A modellezés	45
3.5.1	Az Aquacrop modell működése	45
3.5.2	A modell felépítése	46
3.6	Statisztikai elemzés	49
4	Eredmények	50
4.1	Meteorológiai és öntözővíz adatok.....	50
4.2	A precíziós öntözőgép vízkijuttatásának vizsgálata.....	52
4.2.1	Öntözési egyenletesség	52
4.3	Vízellátottság hatása a termésre az egyes kísérleti években	59
4.4	Az vízellátottság hatása a szárazanyagra az egyes kísérleti években.....	60
4.5	A vízellátottság hatása a vízfelhasználási együtthatóra (WUE).....	62
4.6	Vízellátottság hatása a lombfelszín-hőmérsékletre az egyes kísérleti években	63
4.7	A két kísérleti év összevont eredményei	70
4.8	Az eltérő vízellátottság hatása a mért változókra	71
4.9	A vízellátottság és a szárazságstressz indexek kapcsolata a két kísérleti év alapján	73
4.10	A szárazságstressz indexek összefüggései a termelési mutatókkal.....	74
4.11	Az AquaCrop szimulációk eredményei.....	79
4.11.1	A paradicsom biomassza-gyapodás modelljének vizsgálata 2018-as adatok alapján	80
4.11.2	A két kísérleti év biomassza és termés adatainak és modelljeinek vizsgálata	84
4.11.3	A modellezett és a mért stresszértékek vizsgálata	85
4.11.4	A július havi napi stresszértékek összevetése	86
4.11.5	A modellezett stresszértékek és a terméseredmények kapcsolata	89
4.12	Új tudományos eredmények.....	92
5	Következtetések és javaslatok	93
5.1	A vízellátás hatása az ipari paradicsom termelési mutatóira.....	93
5.2	A szárazságstressz vizsgálatok eredményei	93
5.3	A center pivot öntözőberendezés egyenletessége és az átmeneti zónák	94
5.4	Az AquaCrop szimulációk értékelése	95
6	Összefoglalás	96
7	Summary.....	98
8	Mellékletek	100
8.1	M.1. Irodalomjegyzék	100
8.2	M.2. Ábrák és táblázatok jegyzéke	114
	Köszönetnyilvánítás	119

1 BEVEZETÉS

1.1 Bevezető gondolatok

A szabadföldön termesztett növényi kultúráknál a csapadék mennyisége és eloszlása kulcskérdés, amely évről-évre változik a Kárpát-medencében (Spinoni et al., 2015). Sok évben okozott problémát a gazdálkodóknak a tenyészidőszakban hulló túl kevés csapadék vagy annak nem megfelelő eloszlása (Jolánkai et al., 2018; Szalai, 2009). A túl kevés csapadékból eredő bizonytalanságot a termesztésben legjobban öntözéssel védhetjük ki, bár léteznek más megoldások is az enyhítésre (Birkás et al., 2008). Az öntözés alkalmazása jelenleg főként a nagy hozzáadott értékű kultúrákban jellemző.

Az öntözési volumen hazánkban az elmúlt időszakban 100.000 ha környékén mozog, ingadozása főként a csapadékos és aszályos évek váltakozásának tulajdonítható. A legelterjedtebb öntözési mód az esőszerű öntözés. A vízkijuttatást leginkább csévéldobos megoldásokkal (vízagyús, konzolos) és lineár berendezésekkel végzik a termelők. Az öntözésre alkalmazott berendezések kiválasztásánál nagy szerepet játszik a vagyonsbiztonság is, így nem mindig a legtakarékosabb és legjobb hatékonyságú berendezések kerülnek beruházásra. A volumen növelését és korszerű eszközök beszerzését öntözéssel kapcsolatos pályázatok támogatják.

Az öntözővízhez való hozzáférés a nagy öntözőrendszerek által lefedett területeken általában kielégítő, ahol a gazdák felszíni vízből fedezhetik az igényüket. Vannak azonban veszélyeztetett felszín alatti vízbázisok, amelyek védelme elsődleges szempont és ahol az öntözővizet ezekből biztosítják, ott a takarékos módszerek és berendezések alkalmazása prioritás (Biró et al., 2011). Emellett az öntözési költségek csökkentése, a másodlagos szikesedés elkerülése, a nem megfelelő öntözési gyakorlat mindenhol fontos kérdés.

A helyspecifikus öntözés hozzájárul a víz- és energiatakarékossághoz és pozitív hatása van a növény vízhasznosítási mutatóira és a környezetre (Evans et al., 2013). Az alacsony vízellátottság mellett a túlöntözés kedvezőtlen hatásait is meg kell említeni, melyek a mélybeszivárgás, felszíni elfolyás vagy összefolyások lehetnek (Fiebig & Dodd, 2016). Ezek a jelenségek a talajdegradáció, tápanyag-kimosódás és a vízhasznosítási együttható csökkenésének lehetséges okai (O'Shaughnessy et al., 2016). A precíziós öntözésre képes öntözőberendezések elterjedése még nagyon korlátozott hazánkban. A precíziós önjáró esőztető berendezések a helyspecifikus vízkijuttatást sebesség- és zónavezérlés segítségével valósítják meg (Kranz et al., 2012). Az eltérő mennyiséggel öntözendő területek kialakítása recepttérképeken történik. A szomszédos, differenciáltan öntözött területek közötti átmeneti sávokról és a differenciált vízkijuttatások egyenletességéről csak kevés információ áll rendelkezésre. Ez különösen igaz a szórófejenként

vezérelhető gépekre. A recepttérképek elkészítése történhet a termőföldet jellemző különböző faktorok (pl.: beszivárgás, domborzat, víztartó kapacitás stb.) alapján. Ezek felmérésének részletessége fontos szempont, hiszen a nagyobb térbeli felbontásban végzett felmérés többletköltséggel és idővel jár. A nagy részletesség értelmét veszti, ha a gép nem tudja kellő precizitással lekövetni a recepttérképet. Emellett tudományos irányultságú, növényekkel folytatott öntözési kísérleteknél a mintavételi pontok meghatározásánál is fontos, hogy olyan helyről vegyünk a mintákat, ahol a növények az általunk előírt vízmennyiséggel voltak megöntözve. Ezek miatt van jelentősége az átmeneti zónák és az egyenletesség vizsgálatának, ami nem könnyű feladat, hiszen sztenderd mérési leírás nem létezik a VRI (variable rate irrigation) rendszerek működésének vizsgálatára vonatkozólag. A túl- és alulöntözött területek megoszlásának vizsgálata pedig meglehetősen elhanyagolt az egyenletességre vonatkozó méréseknél.

Az öntözés pontos hatásainak megismerése hozzájárulhat a víz és energia tudatos felhasználásához. Ez modellek segítségével is megszerezhető, hiszen léteznek olyan növény-növekedési modellek, amelyek képesek az öntözés növényekre gyakorolt hatását szimulálni. Emellett egy jó modell a gazdálkodók döntéstámogatási rendszerének is része lehet. Az AquaCrop egy FAO által kifejlesztett növény-növekedési modell, amely képes a talaj-növény-léghő rendszer interakcióinak leírására (Steduto et al., 2012). Egy jó modell amennyire csak lehetséges gyors és egyszerű, emellett számításai megfelelő pontosságúak (García-Vila & Fereres, 2012). A működtetéséhez szükséges input adatok viszonylag könnyen beszerezhetők. Az AquaCrop több, a szimulációhoz szükséges beépített adattal is rendelkezik, azonban a különböző termőhelyekre és növényekre elvégzett kalibráció és validáció hozzájárul a javuló pontossághoz és használhatósághoz (Karunaratne et al., 2011). Ezt már több fontosabb és kisebb területen termesztett növényre is elvégezték. A modell képes különböző stresszfaktorok hatását is figyelembe venni a szimulációnál (léghőmérséklet, talaj sótartalma, pangóvíz, vízhiány). A vízhiány sztómazáródást vált ki a növénynél és a transzspiráción keresztül hat a növényi produkcióra. Az eddig elkészült tanulmányokban még nem vizsgálták részletesen ezt a modell által számított stresszmutatót, így releváns az eltérő vízellátottságú paradicsom-állományban gyűjtött vízstressz-mutatók és a modellezett értékek összevetése.

A paradicsom egyike a legjelentősebb kertészeti növényeknek és termesztési területének szinte egészén termesztése csak öntözött körülmények között valósítható meg eredményesen. Emiatt az öntözésre adott reakcióinak ismerete elengedhetetlen. Megfigyelték a túlöntözés hajtásnövekedésre gyakorolt negatív hatását (Fiebig & Dodd, 2016), ugyanakkor a vízhiányra mutatott reakcióinak kutatása jóval gyakoribb. Ilyen esetben a növény biomassza- és termésprodukciója csökken, viszont megfelelő mértékű tudatos alkalmazása egy lehetőség az ipari

paradicsom termésminőségének javítására (Pék et al., 2017). Az ipari paradicsom vízdoldható szárazanyag-tartalmának megfelelő szintje a bogyóban egyaránt foglalkoztatja a termelőket, a feldolgozóipart és a tudományos szereplőket is. A deficit öntözés csökkenti a potenciális biomasszát és termést, de a javított minőség és a vízmegtakarítás révén hasznos lehet (Patanè et al., 2011), emellett maximalizálhatjuk az egységnyi vízre vetített növényi produktivitást (Fereses & Soriano, 2007). A vízhiány által kiváltott stressz szintjének értékelése a különböző vízellátottságú növényállományokban hozzájárulhat a deficit öntözés pontosabb alkalmazásához a termesztési technológiában. Egyéb vízmegtakarítást célzó módszerek, mint a részleges gyökérszárítás (Battilani et al., 2009) nem adaptálható esőszerű öntözésre.

1.2 Kérdésfelvetés

A kutatás során az alábbi kérdésekre kerestem választ:

- Milyen hatása lesz az esőszerű öntözéssel kijuttatott eltérő vízádagoknak az ipari paradicsom terméseredményeire, szárazanyag-tartalmára?
- Hogyan alakulnak az eltérő vízádaggal öntözött állományokban a vízhiányhoz köthető stressz-szintek?
- Melyik mérés technika (hőkamera vagy távhőmérő) és melyik vízstressz-mutató indexszám (CWSI vagy SDD) lesz alkalmasabb a vízstressz-monitorozásra az ipari paradicsom esetében?
- Milyen pontossággal képes az AquaCrop modell becsülni a megtermelt növényi biomassza szárazanyag és a termés szárazanyag mennyiségét?
- Az AquaCrop modell milyen pontossággal követi a vízhiány miatt kialakuló növényi stresszt?
- Alkalmas-e a precíziós központi körforgó öntözőberendezés deficit öntözési kísérletek lefolytatására a változtatható dózisu öntözést kihasználva, szem előtt tartva az átmeneti zónákat és a megfelelő egyenletességet?

2 IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1 Öntözés helyzete a világon

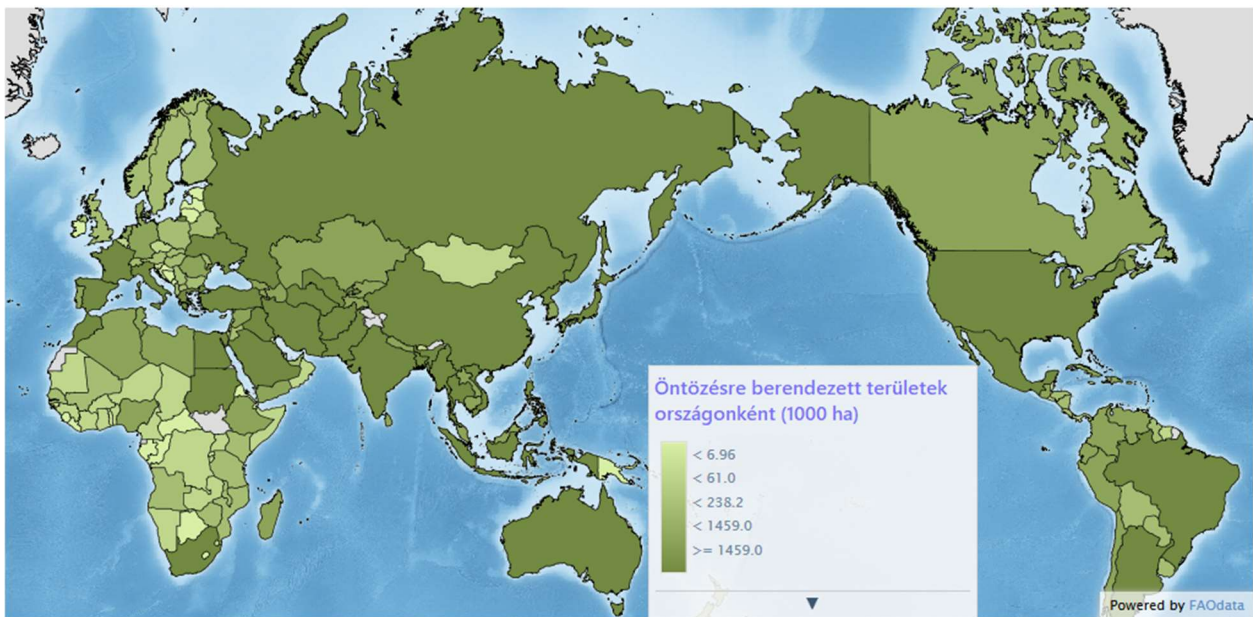
Az öntözés történelme 7500 évre nyúlik vissza. Kialakulása területileg Mezopotámiához köthető, ahol a Tigris és Eufrátesz folyók vizét hasznosították. Az ókori egyiptomi kultúra virágzása szintén az öntözéshez kapcsolódik. 1970-ben 184 millió hektár volt öntözésre berendezve világszerte. 20 év alatt ez a terület 258 millió hektárra növekedett. Jelenlegi volumene hozzávetőlegesen 324 millió hektár. A berendezett terület kontinensek közötti megoszlásának aránya egyenletesnek mondható. A legnagyobb területi kiterjedés természetesen Ázsiához köthető, melyet Észak- és Dél Amerika követ, majd Európa és Afrika. Ausztrália és Óceánia a legkisebb részarányal képviselteti magát. A világ összes termőterületének 21%-a öntözésre berendezett terület. Ez az arány 41%-kal Ázsiában a legmagasabb, melynek fő oka a rizstermesztés nagy jelentősége és volumene. Észak- és Dél Amerikában 13%, Európában 9% ez az érték. 2010-re Kína lett a vezető ország az öntözésre berendezett terület nagyságának rangsorában (69,4 millió hektárral). Nem sokkal marad le India 66,7 millió hektárral. Ebben a két országban található a világ öntözésre berendezett területeinek 42%-a, de a teljes lakosság 40%-a is ide koncentrálódik (FAO, 2016a). Ezekben az országokban a rizstermesztés miatt a nagy vízfelhasználással járó felületi öntözési mód dominál. A rangsor harmadik helyén az USA áll (26,4 millió hektár), ahol már nagy részarányt képvisel az esőszerű öntözési mód is. A vezető országokat Olaszország, Egyiptom és Ausztrália követi (AQUASTAT, 2014a).

Az öntözési módok szerinti megoszlás alapján 280 millió hektár felszíni öntözési módra van berendezve, amely 86%-a a teljes területnek. Ennek előnye az alacsony beruházási költség, azonban a legkevésbé hatékony. 35 millió hektár az esőszerű öntözési módra berendezett terület, amely 11 %-a a teljes területnek. Bekerülési költsége magasabb, azonban hatékonyságában is jóval meghaladja a felületi öntözési megoldásokat. A mikroöntözési mód képviseli a legkisebb részarányt, mindössze 3%-kal, összesen 9 millió hektáron. Ennek előnye, hogy hatékonysága a legmagasabb, viszont a kialakítás bekerülési költsége is a legmagasabb. A mikroöntözés elterjedését robbanásszerűvé tette az olcsó műanyagcsövek '70-es évekbeli felfedezése. 1981-ben még csak 0,5 millió hektáron használták és 30 év alatt ez 9 millió hektárra nőtt (FAO, 2016a). Az összes berendezett területnek csak 85%-án öntöznek ténylegesen (AQUASTAT, 2014a). Európában ez az arány 65%, melynek oka, hogy a mérsékelt klímájú területeken a csapadék miatt nem mindig kell öntözni a berendezett területeken sem.

Öntözésre nagyobb arányban használnak felszíni vizet, azonban a terület 38%-án felszín alatti vízből történik az öntözés. Ennek Észak- és Dél-Amerikában legnagyobb az aránya (46%), majd

Ázsia és Európa követi 39 és 30%-kal. Óceániában és Afrikában 25 és 18% ez az arány. A statisztika szerint legalább 111 millió hektáron használnak szivattyút a víz szállításához (AQUASTAT, 2014a).

Habár az öntözött területek csak 20%-át teszik ki a művelt területeknek, mégis az összes élelmiszer 40%-át állítják elő ezeken a területeken (FAO, 2016a). A berendezett területek kiterjedését szemlélteti az *1. ábra*.



1. ábra: Öntözésre berendezett területek a világon (FAO, 2016b).

2011-ben, 261 millió hektár ténylegesen öntözött területet tartottak nyilván. Ezeket a területeket 130%-os művelési intenzitás jellemezte. Ez azt jelenti, hogy öntözött területeken részben az öntözésnek, részben a kedvező klímának köszönhetően előfordul, hogy egynél több termesztési ciklus is lefolytatható. Emiatt azok az öntözött területek, amelyekről többször takarítanak be, azok a statisztikában is többször szerepelnek, így az öntözött területről történő betakarítás meghaladja a ténylegesen öntözött területeket. Ázsiában takarítják be 78%-át a világ azon területeinek, ahol öntözött termesztés folyik (271 millió ha). Ettől jelentősen lemaradva következik Észak- és Dél-Amerika (44 millió ha) és követi szinte fej-fej mellett Európa (15 millió ha) és Afrika (14 millió ha). Az öntözött területről betakarított gabonafélék 61%-át teszik ki az öntözött területnek, melynek legnagyobb részét a rizs teszi ki, hiszen a teljes öntözött területek 29%-át, míg az öntözött gabonaféléknek 50%-át adja. A zöldségfélék 10%-ot tesznek ki, majd következnek a takarmánynövények és legelők 7%-kal. Szintén 7%-on termesztnek olajnövényeket, 6%-on gyümölcsöket. A rosnövények részesedése 5%, a cukortermelés növényeie 4%. Az öntözött növények diverzifikáltabb fajspektrummal képviseltetik magukat a magasabb bevétellel rendelkező országokban. Néhány országban a csapadék alapú növénytermesztés annyira

megbízhatatlan, hogy szinte a teljes termelés öntözött területen valósul meg. Ilyenek: Egyiptom, Dzsibuti, Kuvait, Omán, Katar, Szaúd-Arábia, Tádzsikisztán, Türkmenisztán, az Egyesült Arab Emírségek vagy Üzbegisztán (AQUASTAT, 2014b).

Világszinten, átlagosan $7700 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ öntözési célú vízkivétel történik évente. A világ öntözési hatékonysága 56%, ami számokban kifejezve azt jelenti, hogy 2700 km^3 volt az öntözési célú vízkivétel, mellyel az 1500 km^3 -nyi öntözővíz szükségletet fedezik (AQUASTAT, 2014b).

2.2 Az öntözés hazai helyzete

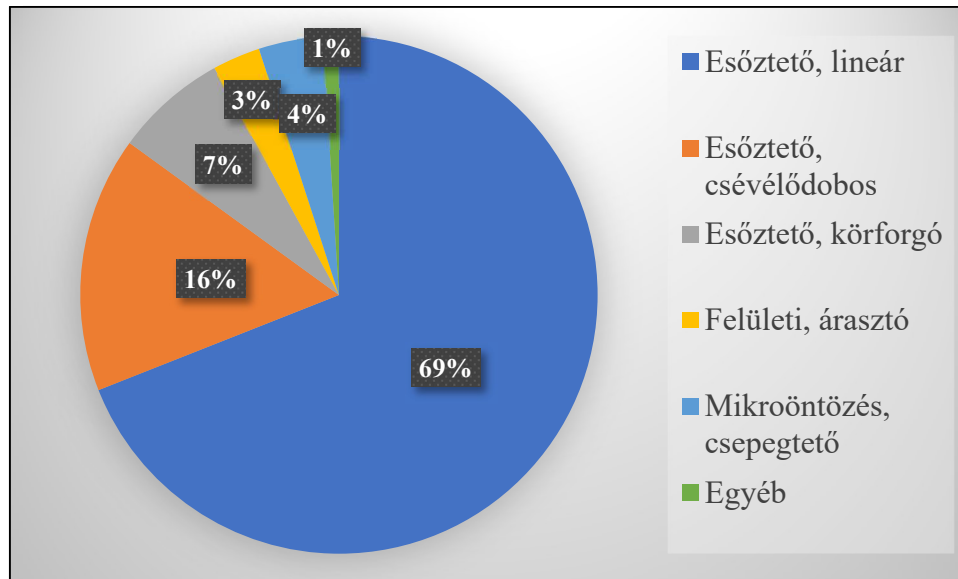
2.2.1 Területi megoszlás, vízfelhasználás megoszlása forrás szerint

Az Agrárgazdasági Kutató Intézet által elkészített Öntözési jelentés alapján a vízjogi engedéllyel rendelkezők 45% öntözött 2015-ben és 49,4%-a 2016-ban (Marosán, 2016, 2017). Fontos megjegyezni, hogy a jelentés alapjául szolgáló adatok az adatszolgáltatásra kijelöltek 74, illetve 73%-tól származnak. A legtöbb üzemre engedélyezett vízmennyiség az Észak-Alföldi régióra jut, míg a legtöbb engedélyezett terület a Dél-Alföldi régióba esik. 2015-ben víz és terület tekintetében is a Dél-Alföld volt a vezető (Marosán, 2016). A 2015-ös évet tekintve Békés megyében volt a legtöbb engedéllyel rendelkező terület (33.980 ha) és Nógrád megyében a legkevesebb ($62,6 \text{ ha}$). Üzemre engedélyezett éves vízmennyiség 304 millió m^3 volt. A ténylegesen megöntözött terület az Észak-Alföldön volt a legnagyobb, míg a kiöntözött vízmennyiség a Dél-Alföldön. Az öntözővíz eredetének megoszlása alapján 2015-ben a legjelentősebb a felszíni víz volt (91,6%), felszín alatti víz 8,3% és 0,1% a parti szűrésű víz (Marosán, 2016). Öntözési engedéllyel rendelkező összterület 154.266 ha volt 2015-ben és 128.823 ha 2016-ban. 2016-ban megyei leosztás szerint a legtöbb terület Jász-Nagykun-Szolnok megyében (29.175 ha), a legkisebb terület Nógrád-megyében ($66,5 \text{ ha}$) található. Az üzemre engedélyezett éves vízmennyiség 201 millió m^3 . A ténylegesen öntözött és öntözésre engedélyezett terület aránya nem éri el a 60%-ot az alföldi régiókban.

Országos átlagban $1066 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ vizet öntöztek ki. Az öntözővíz eredetére vonatkozóan a legnagyobb a részaránya a felszíni víznek (93,6%), míg a felszín alatti vízé mindössze 6,2%. Megjelenik a parti szűrésű víz is 0,2% arányban (Marosán, 2017). Magyarországon, ahol kiépített az öntözővíz-ellátás rendszere, ott a gazdáknak jó a hozzáférhetősége a kellő mennyiségű öntözővízhez. Azonban vannak veszélyeztetett felszín alatti vízbázisok, ahol a gazdák nem tudják felszíni vízből fedezni az öntözővíz-szükségletet és ezeken a részeken a vízmegtakarítás elsődleges szempont (Bíró et al., 2011).

2.2.2 Öntözési módok megoszlása, a felhasznált vízmennyiség

2015-ben a legnagyobb területen lineárral öntöztek (56%), ezt követte a csévélődobos (23%) és a körforgó berendezéssel öntözött területek részesedése (11%). Felületi öntözést (árasztás) 5%-on, csepegtető öntözést 4%-on használtak. A megoszlást a kiöntözött vízmennyiség alapján vizsgálva kicsit átalakulnak az arányok, mivel a felületi árasztó öntözés 31%-ot tesz ki. Ezt azonban még mindig megelőzi a lineárral való kijuttatás, amely 43% volt. Csévélődobos berendezéssel a vízmennyiség 14%-át, körforgós berendezéssel 9%-át juttatták ki (Marosán, 2016).



2. ábra: Az öntözött területek megoszlása a víz kiadagolásának módja szerint 2016-ban. Az AKI Agrárstatisztikai Információs Osztály adatai alapján (Marosán, 2017)

A kiadagolás módja alapján a legnagyobb területen esőszerű öntözést alkalmaztak a 2016-os évben (2. ábra), melyből a legnagyobb területen lineár öntözőberendezést használtak (38.180 ha), melynek aránya növekedett 2015-höz képest. Második a területi rangsorban a csévélődobos öntözés (8.816 ha), amelyet a körforgó berendezések (3.865 ha) követnek, az előző évihez képest kisebb arányban. A csepegtető rendszerek részaránya meghaladta a felületi öntözését, ellentétben a 2015-ös adatokkal (Marosán, 2017).

A legtöbb kiöntözött vízmennyiség Magyarországon a nem túl nagy volumenű rizstermesztéshez kötődik, mely az összes kiöntözött vízmennyiség 40%-a volt 2016-ban. Megöntözött területek tekintetében és kiöntözött vízmennyiségben is Jász-Nagykun-Szolnok megye és Békés megye a két legmeghatározóbb (Marosán, 2017).

2.2.3 A zöldségnövények hazai öntözésének alakulása

Néhány jelentősebb, szabadföldön termesztett zöldségfélék öntözött területének és a kiöntözött mennyiség adatait *1. táblázaton* mutatom be. Zöldségféléket összesen 18.852 ha területen öntöztek, 15,2 millió m³ öntözővíz mennyiséggel 2016-ban (Marosán, 2017).

1. táblázat: Zöldségfélék öntözése 2016-ban. AZ AKI Agrárstatisztikai Információs Osztály adatai alapján (Marosán, 2017).

Növény	Megöntözött terület (ha)	Kiöntözött vízmennyiség (1000 m ³)
csemegekukorica	11.579,2	8.706,3
fejeskáposzta	163,9	182
paprika	414,2	561,6
uborka	2,7	2,9
zöldbab	414,5	225,7
zöldborsó	4.530,1	2.979,9

A 2015-ös adatok szerint szintén a csemegekukorica volt az első helyen (13.256 ha, 16,6 millió m³). A paradicsom öntözésére 848.600 m³ vizet fordítottak, az öntözött 433,4 hektáron (Marosán, 2016). Az adatszolgáltatások alapján 2016-ban, hivatalosan, mindössze 235 ha paradicsomot öntöztek, melyhez 239 ezer m³ vizet használtak fel (Marosán, 2017).

A 2. táblázat tartalmazza a paradicsomra vonatkozó öntözési adatokat, amelyek a legálisan végzett és az adatszolgáltatásban résztvevő gazdaságok adatai alapján készültek 2004-ig visszamenőleg. 2014-re vonatkozó adatokat nem tudtam felkutatni. A legkisebb területen és vízmennyiséggel 2010-ben öntöztek paradicsomot, melynek fő oka az extrém csapadékos időjárás. A legkiterjedtebb öntözött terület 2006-ban volt, míg a legnagyobb kiöntözött mennyiség 2013-hoz köthető.

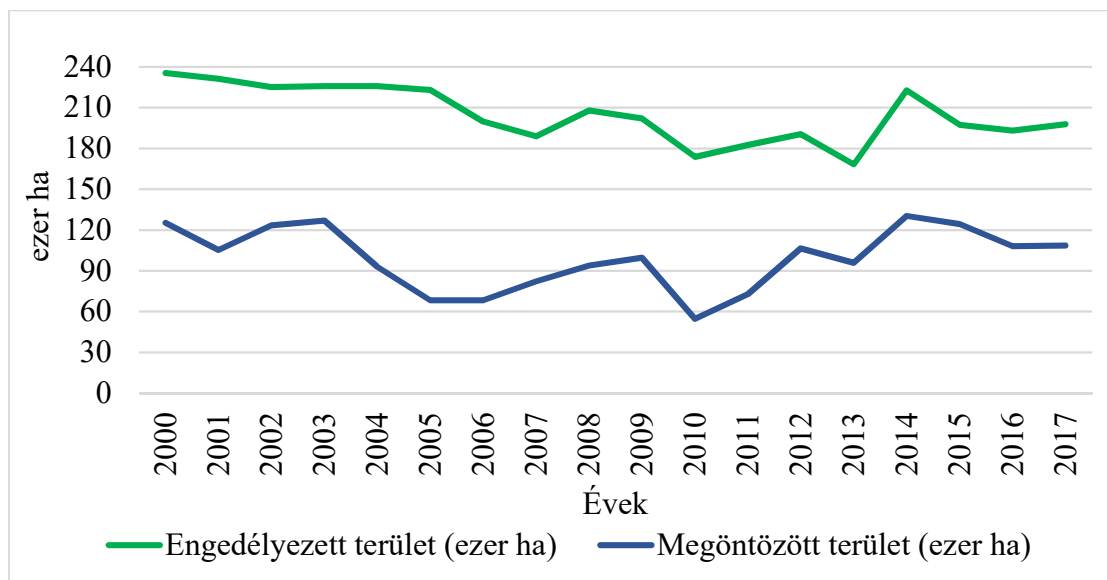
2. táblázat: A paradicsom hazai öntözésének alakulása (saját szerkesztés az AKI Öntözési jelentései alapján)

Év	Megöntözött terület (ha)	Kiöntözött vízmennyiség (ezer m ³)
2004	344	215
2005	381	137
2006	580	283
2007	414	453
2008	270	264
2009	565	746
2010	129	100
2011	374	434
2012	327	514
2013	276	1410
2015	433	848
2016	235	239

2.3 Öntözésfejlesztés Magyarországon

A mezőgazdaság vízigénye a klímaváltozás okán egyre növekszik, miközben a víztakarékosság fontossága is emelkedik. Emiatt átgondolt, törvényes vízhasználatra és ezeket támogató technológiákra van szükség, melyben a megfelelő öntözési technológiáknak nagy szerepe lehet. Az Agenda 2030 fenntarthatósági keretrendszer is célként fogalmazta meg a vízfelhasználás hatékonyságának növelését minden szektorban (United Nations, 2015). Az ENSZ határozatban fektette le a fenntartható vízkészlet-gazdálkodást, a növekvő és biztonságos mezőgazdasági termelés érdekében, valamint további törekvéseket motivál az öntözési létesítmények és víztakarékos technológiák fejlesztésére és megerősítésére (United Nations, 2016). Ezt erősíti meg az Európai Unió Víz keretirányelve (Európai Parlament és Tanács, 2000).

Jelenleg az EU-ban 6% körüli az öntözött területek aránya, míg Magyarországon mindössze 2-3%-át öntözik a művelt területeknek. Ez azt jelenti, hogy még az engedélyezett potenciált sem használjuk ki. A 2016-os adatok alapján az engedélyezett 128.823 ha területből, mindössze 68.722 hektáron öntöztek. Az egy évvel korábbra vonatkozó adatok: 154.266 ha és 86.757 ha az Agrárgazdasági Kutató Intézet adatai alapján (Marosán, 2016, 2017). A KSH adatai alapján különbözőek az értékek. 2016-ban 193.200 ha engedélyezett terület volt, amelyből 108.200 hektárt öntöztek ténylegesen (Központi Statisztikai Hivatal, 2018). A trendet 2000-től mutatja a 3. ábra.



3. ábra: Az engedéllyel rendelkező és ténylegesen öntözött területek aránya (Központi Statisztikai Hivatal, 2018).

Az öntözésben bőven van kiaknázatlan potenciál. Ahogy a Kvassay Jenő tervben rámutatnak, a vízkészletek alapján kb. 400.000 ha öntözésére lenne lehetőség, a jelenlegi 100.000 helyett (Nemzeti Vízstratégia, 2017). A terv szerint szem előtt tartandó a környezetvédelem, fő szempontok a vízkészletek megőrzése és újratermelése, a csapadék vízmegtartó rendszereinek kiépítése és fejlesztése vagy az alternatív öntözővíz források bevonása. A tapasztalatok szerint minden második évben közepes és minden harmadik évben súlyos aszály van Magyarországon. A prognózisok szerint ez egyre inkább növekedni fog, emiatt az öntözés célzott fejlesztése elkerülhetetlen.

A Széchenyi 2020 program keretében két jogcímen nyújtható be öntözésfejlesztési célú pályázat: A „Mezőgazdasági vízgazdálkodási ágazat fejlesztése” (44,3 milliárd Ft) és a „Kertészet korszerűsítése – ültetvénytelepítés támogatása öntözés kialakításának lehetőségével” (19,3 milliárd Ft) felhívásokban (B. Müller, 2017). Sajnos a gazdák nem képesek teljes mértékben kihasználni a lehetőségeket, melynek okai a vízjogi engedélyek megszerzésének bonyolult folyamata, az önerő hiánya vagy a tulajdonosi hozzájárulások beszerzése, amelynél külső szereplő is érintett (Schober, 2017). Az engedélyezési eljárások egyszerűsítése a VIZEK-projektől várható. Egyéb visszatartó erő lehet, hogy a gazdáknak hiányosak az információi arról, hogy lehetséges vagy célszerű-e az öntözőrendszer kialakítása. A sikertelen vízjogi eljárás is jelentős költséget jelenthet a termelőknek (B. Müller, 2017; Országos Vízügyi Főigazgatóság 2019).

A vízkészletjárulék fizetési mentesség 2017-től kezdődően, öntözés esetében, vízhasználókként, évi 50.000 m³ vízmennyiségig díjmentes (Országos Vízügyi Főigazgatóság, 2016). A korszerű megoldás azonban a speciális vízár-képzés, amely biztosítaná a hatékony mezőgazdasági

vízfelhasználást és visszaszorítaná a pazarló öntözési technológiák használatát. Bozán és munkatársai (2018) vizsgálatai alapján a vízdíj ismételt bevezetése nem csökkentené érdemben az öntözési igényt. A gazdaságossági vizsgálatok alapján az öntözési beruházások a kedvező termőhelyi adottságú területeken helytállóak, a várható megtérülés miatt. Az elemzések alapján, a felszíni vizekből a szabadföldi zöldségnövények öntözött területének növelése elképzelhető, akár 7.200 hektár volumenben és további 8.800 hektárral a felszín alatti vizek lehetőségeit kiaknázva. A vízkészletek korlátos rendelkezésre állása miatt a több, mint 800 ezer ha öntözhető területből, mindössze 332 ezer hektáron reális a fejlesztés megvalósíthatósága (Bozán et al., 2018).

2.3.1 A precíziós öntözés

A precíziós öntözés koncepcióját már többen is definiálták. Korábban a csepegtető öntözést értették a fogalom alatt, mivel pontosan kontrollálható a kijuttatás mennyisége és ideje. A tradicionális értelmezés szerint „precíz mennyiségek precíz helyre”, azonban ez a talajprofilon belül értendő, horizontálisan uniform kijuttatással (Smith et al., 2009). Raine és munkatársai (2007) szerint az a pontos és precíz vízkijuttatás, amely az egyes növények vagy gazdálkodási egységek igényeit kielégíti és minimalizálja a környezetre gyakorolt káros hatásokat. Egy másik megfogalmazás alapján egy adott területre való olyan vízkijuttatás, amely időben és volumenben megfelel az optimális növénytermesztéshez szükséges igényeknek, jövedelmezőségnek vagy más gazdasági célnak (Camp et al., 2006). Másik szövegezésben megjelenik a gazdálkodási zóna is, mint fogalom: A növény szükségletein alapuló öntözés, amely kisebb területegységeket határol le a táblán belül, mint gazdálkodási zónák (King et al., 2006). A definíciókban közös nevező a differenciált öntözés az uniform öntözés helyett. A teljes tábla helyett az egyedi növények vagy kisebb területegységek szolgálnak az öntözés alapjául. A precíziós öntözést az alábbiak jellemzik Smith és munkatársai (2009) szerint:

- az öntözés térbeli és időbeli befolyásoló tényezőinek megfelelő kezelése,
- az öntözőberendezés optimális működésének és a növény igényeinek összehangolása,
- a precíziós öntözés nem egy konkrét technológia, hanem egy gondolkodásmód, rendszerszemlélet,
- a precíziós öntözés adaptív, egy tanulási rendszer,
- a legfontosabb, hogy minden öntözési módszerre és növényre alkalmazható.

A táblán belüli térbeli különbségeknek több oka is lehet: a talajstruktúrának és a termékenységének, a talaj fizikai, kémiai és hidraulikai tulajdonságainak, az öntözésnek, a

kártevőknek és kórokozóknak, valamint a termesztett növény genetikai alapjainak térbeli és időbeli változatossága. Ezek miatt nyer értelmet a differenciált vízkijuttatás.

A precíziós öntözés hozzájárulhat az inputok hatékonyságának növeléséhez, a környezetterhelés csökkentéséhez, a gazdaságok haszonnövekedéséhez és a jobb termésminőséghez. A céljai az alábbiak lehetnek:

- vízmegtakarítás és költségcsökkentés, csak az optimum vízmennyiség kiöntözése,
- a környezetterhelés minimalizálása, jobb vízkészletgazdálkodás,
- a víz ökonómiai értékének optimalizálása,
- a növénytermelés optimalizálása (termés mennyiség és minőség).

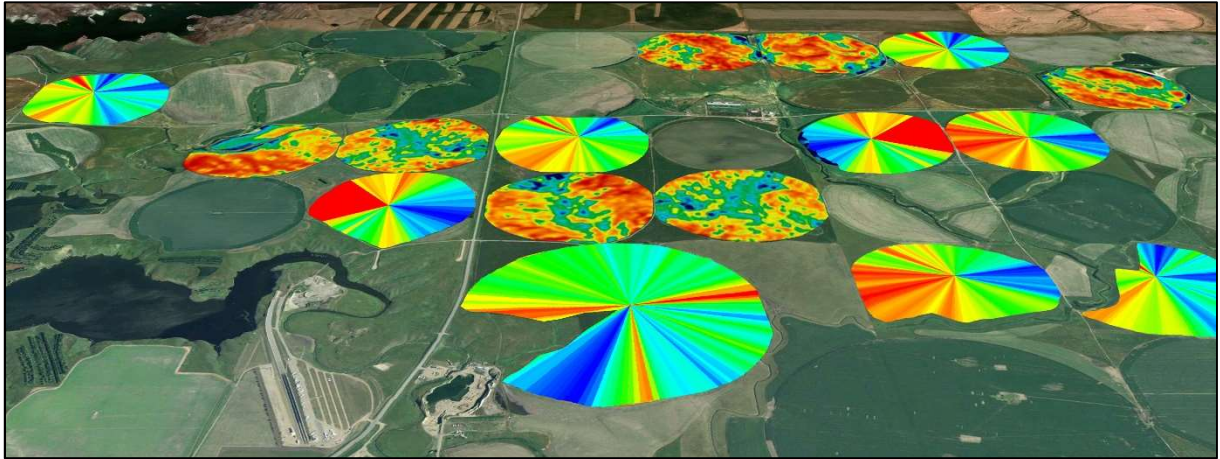
A precíziós öntözést menedzsment szemléletben értelmezve, alapjában véve négy lépésre bonthatjuk (Smith et al., 2009):

Első az adatbeszerzés, mivel konkrét alátámasztása szükséges a területek közötti és területeken belüli talaj- és növénytulajdonságokon alapuló térbeli változatosságnak, amely számszerűsíthető. Az adatgyűjtésben alkalmazhatók a talaj alapú vizsgálatok, időjárás követése, növényvizsgálathoz használt szenzorok. Ezek az eredmények akár valós időben, nagy térbeli pontossággal beszerezhetők és használhatók az öntözés beállítására. A következő lépés az adatok interpretációja, megfelelő gyakoriságú és léptékű értékelése. A harmadik lépés a vízkijuttatás. A táblán belüli különböző vízadagok kijuttatása megvalósítható az intenzitás változtatásával vagy a kijuttatási idő változtatásával. A negyedik lépés az egész ciklus értékelése. Az öntözőrendszer mérnöki, agronómiai és ökonómiai teljesítményének felmérése szükséges annak érdekében, hogy a következtetések alapján a jövőben fejlődhessen a rendszer.

Napjainkban pedig sokszor előfordul, hogy a precíziós öntözést a változtatható intenzitású öntözéssel (VRI) azonosítják. Azonban a helyspecifikus öntözés, mellett nagyon fontos a megfelelő idejű és mennyiségű kijuttatás is (González Perea et al., 2017).

2.3.1.1 A változtatható intenzitású öntözés

A változtatható intenzitású vagy változtatható dózisu öntözésnek fordított „variable rate irrigation” technológia alkalmas arra, hogy az esőztető öntözőberendezéssel lefedett területen eltérő mennyiséggel öntözött öntözési zónákat jelöljünk ki, melyek mérete és alakja eltérő lehet (4. ábra). Az eltérően kezelt területrészeket és a hozzájuk tartozó mennyiségeket a recepttérképekben alakítjuk ki. Ezek elkészítéséhez használhatók különböző talajparaméterek (Hedley & Yule, 2009; Yari et al., 2017), domborzati térképek (Boluwade et al., 2016) vagy a növényre vonatkozó adatokat (Colaizzi et al., 2017) tartalmazó térképek.



4. ábra: Recepttérképek alkalmazása a VRI megoldásoknál (CropMetrics website, 2018)

A differenciált vízkijuttatást a sebesség-vezérlés és zóna-vezérlés technológiák segítségével valósítják meg a VRI-képes öntözőgépek. A sebesség-vezérlés a járószerkezet haladási sebességét változtatja, így a lassabb haladás több, a gyorsabb kevesebb víz kijuttatását eredményezi. A zóna-vezérlés az egyes szórófejek vagy szórófej-csoportok működési idejét (ciklikus be- és kikapcsolás) változtatja egy mágnesszelep segítségével, így a szárnyvezeték különböző szakaszain eltérő vízmennyiség jut ki (Kranz et al., 2012).

Magyarországon jelenleg meglehetősen kevés öntözőberendezés alkalmas VRI által szabályozott, helyspecifikus öntözővíz kijuttatásra. Ahhoz, hogy egy precíziós berendezést precíziósan üzemeltessünk szükséges az öntözött terület heterogenitásának ismerete, amelyhez részletes felmérésekre lehet szükség. Minél részletesebb egy felmérés, annál költségesebb. Hiába áll rendelkezésünkre magas-felbontású adattérkép, ha a gép nem képes lekövetni a változó öntözési igényt. Emiatt fontos a berendezések egyenletessége, valamint a különböző zónák közötti átmenet szélességének ismerete (Takács et al., 2018a).

2.3.1.2 Az öntözés egyenletessége és az átmeneti zónák

Az öntözési egyenletesség az öntözési „teljesítmény” egyik mutatója (Burt et al., 1997), amely kihat a növények fejlődésére is. A tervezési hibákból eredő egyenletességi problémákat jól szemlélteti az 5. ábra.

Néhány tényező, amely az öntözés egyenletlenségét okozhatja center-pivot vagy lineár öntözőberendezéseknél (Burt et al., 1997):

- a szórófejeknél rosszul szabályozott nyomás,
- domborzati magasságkülönbség,
- különböző nyomásszabályozók,
- fúvóka eltömődése,

- elkopott fűvókák,
- szélhatás,
- a rendszer utazó sebességének változékonysága,
- változó magasságban elhelyezett szórófejek,
- a növényzet zavaró hatása,
- elkopott ütközőlapkák,
- szórófejek távolsága,
- vízbemeneti ponttól való távolság,
- a szivattyú reakciója a különböző nyomásigényekre.



- 5. ábra: Tervezési hibából eredő elégtelen öntözési kép (Tallemenco, 2011)

A szórófejek átfedése miatt a szomszédos zónák között átmeneti zónákat találunk, ahol az öntözőberendezés átáll egyik vízadagról a másikra (O'Shaughnessy et al., 2013). Az átmeneti sávok szélessége meghatározza hogyan jelöljük ki a zónáink határait. Ennek figyelembe vétele kis méretű parcelláknál különösen fontos (Sui & Fisher, 2015). Daccache és munkatársai (2015) szintén felhívják a figyelmet a túl kis méretű öntözési menedzsment zónák kialakítására, hiszen akkor a szórófej átfedések nagy eltéréseket okozhatnak a kívánt vízkijuttatásban.

Különböző vízadaggal célzott területrészekben vagy deficit öntözési kísérletekben, amelyeket esőztető öntözőberendezésekkel végeznek, nem elfogadható, ha a rendszer nem képes a megfelelő öntözési egyenletesség biztosítására vagy a kijuttatott vízmennyiség jelentősen eltér a megkívánttól. Ennek felmérése nem egyszerű feladat, mivel a VRI rendszerek munkaminőségének felmérésére sztenderd procedura nem áll rendelkezésre. Korábbi kutatások kimutatták, hogy sem a haladási sebesség változtatása, sem a szórófej ciklikus ki- és bekapcsolása nem befolyásolták az öntözés egyenletességét (Dukes & Perry, 2006; Perry et al., 2003), ámbar az eltérő fűvókák hatottak a kijuttatási egyenletességre (Dukes & Perry, 2006). Az előregeedett szórófejek és a szeles körülmények negatívan hatottak egy center pivot kijuttatási egyenletességére a mérések

alkalmával egy Kanadában végzett felmérésnél (Yari et al., 2017). Átlagosan 83,1% Heerman és Hein-féle egyenletességet közölt az 50%-os vízádaggal öntözött zónára és 88,7%-ot a 100%-kal öntözött zónára egy tanulmány, amely egy zóna-vezérléssel ellátott center pivotot vizsgált (Sui & Fisher, 2015).

Azoknak a modelleknek, amelyek az elért termésmennyiség és a felhasznált öntözővíz-mennyiség kapcsolatára vonatkoznak komoly szerep juthat az öntözési egyenletességnek is. Ezt bizonyítja az a tanulmány, amelyben kimutatták, hogy kukorica esetében a maximális termés eléréséhez az öntözési egyenletesség csökkenésével egyre több öntözővíz-felhasználásra volt szükség (Mantovani et al., 1995).

Az átmeneti zónák szélességének tekintetében 3 m-t jegyzett az első három tagra és 6-9 m-t az utolsó két tagra egy 6 tagú center pivoton végzett kutatás, ahol az egyenletességre hatással volt az átmenet (O'Shaughnessy et al., 2013). Zhao és munkatársai (2014) megállapítása alapján, maximum 4 m buffer zóna elégséges a szomszédos eltérő vízmennyiséggel öntözött zónák között, ha a $\geq 85\%$ -os CU_{HH} kielégítő.

2.4 A paradicsom fejlődése, termesztési igényei

2.4.1 A paradicsom rendszertana, származása, tulajdonságai

A paradicsom (*Solanum lycopersicum* L.) a *Solanaceae* családba tartozik további 75 nemzetségbe sorolt 2000 fajjal együtt (Zárvatermők/Valódi kétszikűek/Burgonyavirágúak). A *Solanaceae* család termesztési szempontból legfontosabb növényei a burgonya, a tojásgyümölcs, a paprika és a paradicsom.

A paradicsom Dél-Amerika nyugati részéből származik, de táplálkozási és ökonómiai jelentősége a világ más pontjain lett igazán nagy. A domesztikációját Mexikó területéhez kötik, de a vad fajok elterjedése alapján inkább Ecuador, Peru és Chile északi területeiről származhat. A vad fajok változatos élőhelyeken tenyésznek a tengerszinti óceánparttól az Andok 3300 méteres tengerszint feletti magasságban elhelyezkedő felföldjeiig, a száraztól a csapadékos klímáig. Indirekt ősenek a *Solanum. lycopersicum* var. *cerasiforme*-t tartják, amely már vad és termesztett növények keveréke (Nesbitt & Tanksley, 2002). Európába Mexikóból kerülhetett, mivel az észak-amerikai és európai paradicsomokban hasonló izoenzimek és molekuláris markerek találhatók, mint a mexikói és közép-amerikai növényekben (Bauchet & Causse, 2012). Európában kezdetben veszélyes eledelként tekintettek rá a rokonfajok ismerete miatt. Emiatt kezdetben dísnövényként termesztették. Európai elfogadását követően terjedése robbanásszerű volt (Rubatzky & Yamaguchi, 1997).

A termesztett fajták önbeporzásúak, legjellemzőbb a piros, félkemény bogyótermés, de a genetikai változatosságból kifolyólag nagy a variancia a szín és alak tekintetében (Tanksley, 2004). Hazánkban, szabadföldön egyévesként termesztik, őshazájukban a vad fajok évelők. A nemesítők vad fajokból emeltek át kórokozók- és kártevők elleni rezisztenciát (pl. *S. pimpinellifolium*), magas szárazanyag-tartalmat és egyéb hasznos tulajdonságot biztosító géneket. Az ipari paradicsomtermesztésben determinált fajtákat használunk.

A paradicsom bogyójának legnagyobb arányú összetevője természetesen a víz, ami 93-96%-ot tesz ki. A paradicsomot alkotó számos szerves összetevő közül a kereskedelmi szempontból legfontosabbak a vízdoldható komponensek (főként cukrok és szerves savak) (Favati et al., 2009; Nangare et al., 2016; Pék et al., 2015). Minél nagyobb ezek aránya a termésben, az annál értékeesebb. Az ipari felhasználási célú termesztésnél ez különösen fontos. A friss fogyasztási célra termelt paradicsomnál nagy jelentősége van a bogyóalaknak, sérülésmentességnek is, ami az ipari célúnál mérsékeltlen fontos. A paradicsom jó rostforrás, emellett fontos vitaminokat is tartalmaz (pl. C-vitamin). Legfontosabb összetevője a likopin (Helyes et al., 2013), amelynek megnövelt fogyasztása összeköthető a kardiovaszkuláris betegségek alacsonyabb előfordulásával (Arab & Steck, 2000). A legfontosabb likopin-forrásunk a paradicsom. Fontos tulajdonsága, hogy magas az oxigén-gyök megkötő és kioltó képessége (Dumas et al., 2003). Egy kutatás szerint a paradicsom és a paradicsomból készült termékek csökkentik a prosztatarák kockázatát (Böhm, 2006; Giovannucci et al., 2002). Ugyanakkor a β -karotin bevitel és a tüdőrák előfordulása között is fordított kapcsolat van (Böhm, 2006).

2.4.2 A paradicsom ökológiai igényei

2.4.2.1 Hőigény

A paradicsom éghajlattal szemben támasztott igényei leginkább a mérsékelt égövben teljesülnek, ahová termelése is koncentrálódik. A forróság (36-40 °C) rossz hatással van a paradicsom növények fejlődésére és kötődésére (Helyes, 1999). A Markov és Haev által meghatározott optimális hőigénye 22 ± 7 °C. Fejlődése 10 °C alatt leáll, tartós 32 °C felett korlátozott. A tavaszi utolsó és az első őszi fagyok idejének ismerete meghatározza a korai és a kései termesztés időszakait (Somos, 1978).

Csírázási hőmérséklet tekintetében a 20-22 °C a megfelelő. Ennél magasabb hőmérsékleten az apró növények deformáltak, alacsonyabb hőmérsékleten viszont (18 °C alatt) a csírázás elhúzódásával kell számolni. 10 °C alatt a mag nem csírázik ki (Hamar & Varga, 1985). A szikleveles fejlődési állapotban szintén zavart okozhat a magas hőmérséklet a magoncok

megnyúlása miatt. A vegetatív fejlődéshez a 18-24 °C közötti hőmérséklet az optimális. 30 °C feletti hőmérséklet esetén a pollentömlő növekedésének gátlása miatt a kötődés gátolt. Az optimális kötődés alsó hőmérsékleti küszöbértéke a 13-14 °C. A legmegfelelőbb hőmérséklet a bogyókötés szempontjából az éjszakai 16-18 °C és a nappali 20-25 °C. A legjobb bogyónövekedés 18-20 °C között várható. Az érés során a 32 °C alatti hőmérséklet az előnyös a karotinoid-összetétel kialakulásának szempontjából. Ez a hőmérséklet a likopin szintézisének felső küszöbértéke, ami a paradicsom karotinoid-összetételének legfontosabb tagja és a piros színért felelős. 32 °C felett a bogyók veszítenek piros színükből, mivel a β -karotin (narancssárga színanyag) szintézise kerül előtérbe, hiszen ezen a hőmérsékleten az még nem akadályozott (Helyes, 1999). A különböző genotípusok különböznek a hőtolerancia szintjükben (Camejo et al., 2005). A magas hőmérséklet a bogyónál is abnormális fejlődést idéz elő, amelyek repedések, vizenyős szövet vagy kicsi, éretlen bogyók lehetnek. Emellett, néhány hőtoleráns vonal jó genetikai alapot adhat hőtoleráns fajták kialakításához (Abdul-Baki, 1991). A hőstresszre prekondicionált növények, az expozíció során jobb ozmotikus alkalmazkodást mutattak és a levél nyomáspotenciálja is jobb volt. Továbbá, a regenerációs periódusban a növények szintén jobb nyomáspotenciállal és magasabb sztómakonduktanciával rendelkeztek az előre nem kondicionált növényeknél (Morales et al., 2003).

2.4.2.2 Fényigény

Fényigényes növényként tartjuk számon. Fejlődésében jelentős a szerepe a fény erősségének és a megvilágítás időtartamának egyaránt. Megfelelő fejlődés napi 200-300 J/cm² erősségű megvilágítás mellett várható. Zavartalan virágzás 8-16 óra megvilágítás mellett egyaránt várható, az optimális fejlődéshez napi 10-12 órás hosszúságú megvilágítás elengedhetetlen (Helyes, 1999). A szabadföldi termesztésnél nem kell számítanunk fényhiányra, ez a szokásos termesztési időszakban biztosított a kötődés időszakában is (Helyes, 1999). A tenyészidőszakban a 14-17 órás nappal és a 10-7 órás éjszaka megfelelő a termesztéshez (Somos, 1978). Fény szempontjából kritikus időszak a virágzat megjelenése és az azt követő időszak. Ebben az időszakban, a 10 napra kedvezőtlen megvilágításnak kitett növényeknél a virágok terméketlenné váltak. A kedvezőtlenből kedvező megvilágítási körülmények közé került növényeknél a folyamatok lassúak voltak, mivel 15 napra volt szüksége a virágzat kifejllesztéséhez (Kinet, 1977).

2.4.2.3 Tápanyagigény

A makroelemek szerepe a paradicsom tápanyag-utánpótlásában mára jól feltárt, azonban az eredményes termesztéshez szükséges mikroelemek szerepe még nem minden esetben tisztázott. A nitrogén legnagyobb arányban a termésben akkumulálódik, azonban a zöldtömeg és a

gyökérrendszer fejlődésében is nagy szerepet tölt be. A túlzott nitrogénellátás elnyújthatja a vegetatív fázist és kitolhatja a virágzás időpontját és ezzel együtt az érési időt is késlelteti, összességében a tenyészidő meghosszabbodik. Emiatt a vegetatív-generatív egyensúly fenntartására kell törekedni a nitrogén-utánpótlás tervezésénél. A paradicsom nitrogénigénye a fővirágzásban, a kötődés és a bogyónövekedés időszakában csúcsosodik ki. A nitrogénhiány nagymértékben hat a vegetatív részek fejlődésére (limitált hajtásnövekedés, elvékonyodó szár, keskenyebb levelek), emellett a bogyófejlődés intenzitása is megreked. Nitrogén-felvétel hatékonyságának szempontjából ipari paradicsomnál a gyakori tápoldatozás és öntözés a megfelelő stratégia, hogy a magas N szinteket ki tudjuk használni (Farneselli et al., 2015).

A három legfontosabb makroelem közül a foszforból szükséges a legkevesebb a megkívánt, jó termésszint eléréséhez. A foszforfelvétel két csúcsa a kezdeti fejlődési időszak, valamint a fővirágzás és kötődés fázisai. Liu és szerzőtársai (2011) szerint a foszfor-ellátás növekvő szintjei nem hatottak a piacképes termésre és a vízdoldható szárazanyag-tartalomra, azonban a zöld biomassza tömeget és a likopint növelte 60 kg P ha^{-1} -ig. A foszfornak nincs jelentős hatása a paradicsom feldolgozási paramétereire (Oke et al., 2005). A kálium a jó minőségű paradicsom-termés egyik legfőbb meghatározója. A kálium felhalmozódása főként a termésben történik (80%). Főszerephez jut a szénhidrátok szintézisében és a növényen belüli áramlásában, ezen keresztül a bogyók cukortartalmának jó szintre emelésében. Kifejezett csúcsa a káliumfelvételnek nincs, felvétele egyenletesebb a növények különböző fejlődési szakaszaiban, mint a foszfornak vagy a nitrogénnek. A bogyóminőség mellett fontos szerephez jut a gyökeresedésben és kötődésben is. A 200 -tól 600 kg K ha^{-1} -ig terjedő K-szint emelés nem növeli a termésmennyiséget és a bogyóméretet, azonban csepegtető öntözés mellett lineárisan növelte a vízdoldható szárazanyag tartalmat (Liu et al., 2011). Hartz és szerzőtársai (1999) szerint a talaj és a növény K állapotának kis hatása volt a bogyók vízdoldható szárazanyag-tartalmára, a többszöri levélen keresztüli K-pótlás a vizsgált területek felénél csökkentette a bogyók színnel kapcsolatos hibáit. Egy másik kutatás szerint a levélen keresztüli pótlás sem a termésre, sem a minőségre nem volt hatással, továbbá a K-tápoldatozás nem volt hatással a vízdoldható szárazanyag-tartalomra sem. A tápoldatozás termésmenvelő hatásának kihasználásához a terméskötődés befejezése előttre kell időzíteni a K adagolását (Hartz et al., 2005).

Nagyon fontos szerepet tölt be a paradicsom tápanyag-ellátásában a kalcium, amelynek a hiánya a termésminőségre igen negatívan hat, hiszen a bogyók csúcsának rothadása következik be (Adams & Ho, 1993), bár más tanulmány szerint nem ez a közvetlen ok (Saure, 2001). Emellett a gyökernövekedés megszűnése és a gyökerek rothadása is a kalcium hiánytüneteként jegyezhető fel. Fontos elem a magnézium, mint a klorofill egyik alkotóeleme, melynek hiánya főként magas

káliumszinteknél jelentkezhet. A mikroelemek szerepe még nem minden elem esetében tisztázott. Fontosabb mikroelemek a paradicsom számára: B, Fe, Zn, Cu, Mn, Mo (Helyes, 1999). Lombtrágyaként kijuttatva, ezeket együttesen vagy a bőrt önmagában alkalmazva kiemelkedő a termésre gyakorolt pozitív hatása egy tanulmány szerint (Patil et al., 2008).

2.4.2.4 *Talajigénye*

A megfelelő víztartó-kapacitású és levegőzöttségű talajok jó alapot teremtenek a szabadföldi paradicsomtermesztéshez. A jó vízáteresztő-képességű, homokos vályog textúrájú talajok az egyik legjobb termőhelyet biztosítják, azonban a kötöttebb talajokon is jó eredmények érhetők el megfelelő gazdálkodás mellett. A paradicsom nem tűri a talajtömörödést és a pangóvizet, emiatt a felső 15-20 cm-es réteg átjárhatóságának biztosítása szükséges. Agyag textúrájú talajoknál néha szükséges a mélyebb szántás annak érdekében, hogy a jó beszivárgás és a gyökér mélyebbre hatolása zavartalan legyen. Lehetőség szerint paradicsom termesztése utáni 3 éves periódusban se paradicsomot, se más burgonyafélét ne termesszünk a területen a kártevők és kórokozók elleni könnyebb védekezés érdekében. Jellemző a paradicsom 2 éves rotációban való termesztése is (Battilani et al., 2012). A kalciumban gazdag talaj különösen előnyös a paradicsom számára (Somos, 1978).

2.4.2.5 *Vízigénye*

Vízigényes, ugyanakkor a vizet gazdaságosan hasznosító zöldségféléként kategorizálható (Helyes, 1999). Gyökérzete mélyre hatol és a talajnedvességet jól hasznosítja (Hamar & Varga, 1985). Az ipari paradicsom vízigénye függ az adott klímától, talajtól, a növény típusától, az öntözéstől és az egyéb agrotechnikától. Keléstől a betakarításig 400-800 mm vizet vesz fel. A lombzat kifejlődését követően a diszponibilis víztartalom 50%-áig történő talajnedveség csökkenés nem okoz jelentős termésvesztést. A megfelelő talajnedvességszint biztosítása a kiültetést követően esszenciális. További kritikus időszak a vízellátás szempontjából a virágzás teljes időtartama és a terméskötés szakasza is. Gyakori technológiai elem a betakarítás előtti 2-3 hétben az öntözés felfüggesztése. Szubhumid klímán a csúcs növekedési időszakban a napi 4-7 mm vízfelhasználás jellemző, amely szárazabb területen elérheti a 8-9 mm/nap vízmennyiséget. A vízfelhasználás produktivitása biomásszára nézve 1,3-3,5 kg m⁻³ (Battilani et al., 2012). Helyes (1999) szerint a vízfogyasztási együtthatója 30-60 l kg⁻¹ termés, a transzspirációs együtthatója 240-370 között mozog. A termesztési időszakot tekintve a kezdeti, közvetlenül a kiültetést követő időszakban alacsonyabb a vízfogyasztás. Az intenzív lombnövekedési szakaszban ez fokozatosan emelkedik és a kötődés, bogyónövekedés idején csúcsosodik ki. Az érési időszakban a lomb előregedése kezdődik és a csökken a vízfogyasztás is.

2.4.2.6 Öntözési technológiák a paradicsom termesztésben

A barázdás öntözés világszinten még mindig széles körben alkalmazott öntözési mód, bár Magyarországon ez nem jellemző. A nyomás alatt működő technikák, mint az esőztető (Yacoubi et al., 2010), mini-szórófejes és csepegtető rendszerek (Ayars et al., 2015) mára elterjedtek a főbb termesztő országokban. Az öntözés korlátozása az érési időszakban széleskörben alkalmazott módszer, mely a bogyók színváltása után kezdődhet (Helyes et al., 2012; Macua et al., 2003). Szerepe van a vízmegtakarításban és a termésminőség növelésében is. Amennyiben a talajnedvesség kezdeti szintje megfelelő, úgy egy-két öntözés 2-4 hetes periódusonként elégséges lehet a növényállomány fejlődésének kezdeti szakaszában, kiültetést vagy vetést követően. A lombfejlődési időszakban, de még inkább a virágzási periódusban hatékony öntözés szükséges a gyors lombfejlődés biztosításának érdekében, ugyanakkor nem annyira sok, hogy túlzott levélnövekedéssel társult virág vagy bogyókezdemény elrúgás következzen be. Az érési időszakban az öntözés csökkentése függ a gyökérszóna nedvességtartalmától és az evapotranszspiráció mértékétől. Ennek optimális mértéke még elegendő, hogy az utolsó bogyók is elérjék a piacos méretet, javuljon a beltartalom és fennmaradjon az a megfelelő állapotú lomb, amely biztosítja a bogyók napégéstől való védelmét (Battilani et al., 2012).

2.5 Öntözési technológiák

2.5.1 A deficit öntözés és hatása a paradicsomra

A deficit öntözés egy vízmegtakarítást támogató módszer, ahol nem elégtjük ki a növények potenciális evapotranszspirációjának 100%-át. További cél, hogy maximalizáljuk az egységnyi vízre jutó produktivitást (Fereris & Soriano, 2007). Ez a módszer csökkenti a lehetséges maximálisan elérhető biomasszát, valamint termést, de a magasabb szintű minőség és a megtakarított vízmennyiség több hasznot hozhat (Patanè et al., 2011). A deficit öntözés folyhat hosszú ideig egy meghatározott szintű vízmennyiséggel vagy csak bizonyos fenológiai fázisoknál lecsökkentett öntözővíz-mennyiség alkalmazásával egyaránt (Battilani et al., 2009; Nangare et al., 2016). Előfordulhat, hogy az egyes vegetációs időszakokra teljesen felfüggesztjük az öntözést, bár a legjobb eredményt az érési fázisban felfüggesztett öntözés hozza (Kuşçu et al., 2014). Más víztakarékos technológiai megoldás, mint a részleges gyökérszóna kiszáritás (Battilani et al., 2009) nem alkalmazható esőszerű öntözési módnál.

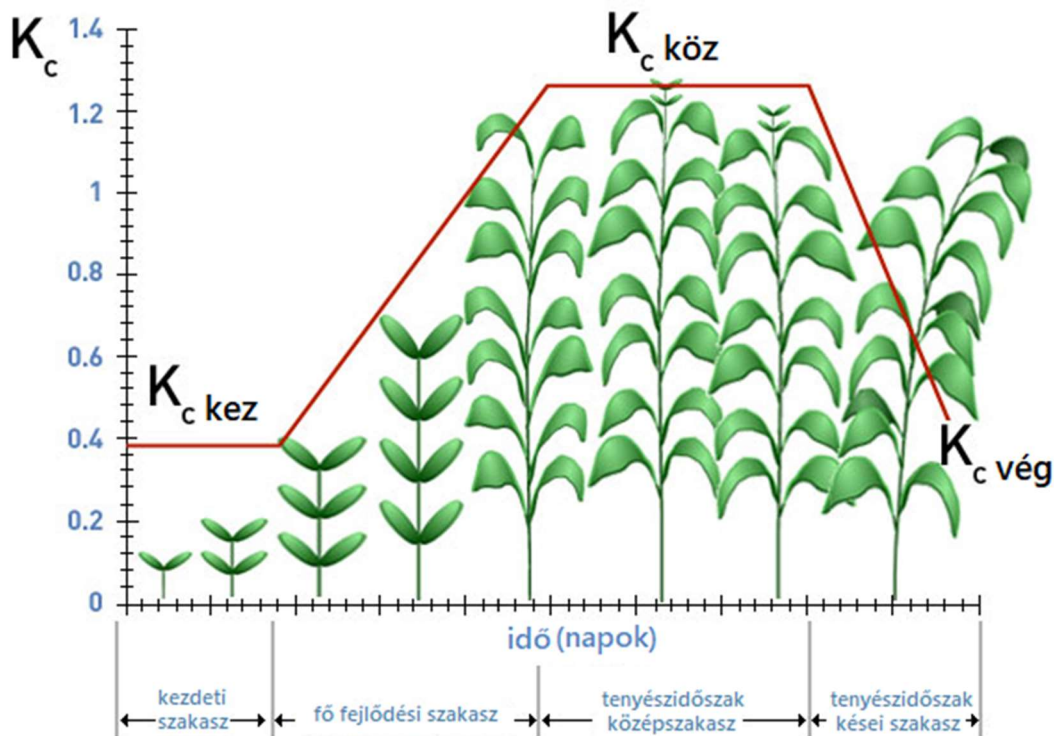
2.5.2 A vízigény kiszámítása

Magyarországi tapasztalatok alapján, szabadelvirágzású fajtaival folytatott kísérletek nyomán fejlesztett egy egyszerű módszert Helyes és Varga (1994), akik a napi középhőmérsékletet

használták számítási alapként. Kukoricához és burgonyához használt evapotranszspirációszámítás alapú módszer éghajlatváltozás hatásának monitorozására is alkalmazható (Nováky et al., 1996). A-típusú kád evaporációs mérései alapján számították a szükséges öntözővizet Rudich és munkatársai (1977).

Lehetőség van a potenciális evapotranszspiráció alapján számítani az öntözővíz igényt, melyhez a Penman-Monteith egyenletet használhatjuk (Allen et al., 1998). A referencia evapotranszspirációt egy 0,12 m magasságú füves referenciafelszínre számítjuk ki (Allen et al., 1994). A paradicsom lombfelszíne, élettana, transzspirációja természetesen eltér a fűvel borított felszínétől, emellett a különböző fejlettségi fázisokban is eltérő a vízigénye. Emiatt szükséges volt bevezetni egy olyan tényezőt, amely figyelembe veszi a fentebb említett befolyásoló elemeket. Így a referencia evapotranszspirációt egy Kc-tényezővel pontosítjuk az adott növényre és fejlettségi fázisra. A Kc-tényező alapján véve egy arány, amelyet bármilyen adott növény vagy talajfelszín evapotranszspirációja és az időjárás által meghatározott referencia evapotranszspiráció ad (Allen et al., 1998). A növényi vízigény tulajdonképpen megegyezik a Kc-tényezővel korrigált referencia evapotranszspirációval, vagyis a növényi evapotranszspirációval (ETc). Az öntözővíz igény alapján véve ETc és az effektív csapadék különbsége. Megjegyzendő azonban, hogy tovább növelheti az öntözővíz igényt, ha a gyökérszónából való só-kimosódást kívánjuk elősegíteni vagy az öntözés egyenetlenségét akarjuk megnövelt vízádaggal kompenzálni. Az ETc olyan növényállományra vonatkozik, ami egyáltalán nem vagy alig szenvedett bármilyen olyan tényezőtől, amely korlátozná az evapotranszspirációt, mint például vízhiány, betegségek ...stb. Ettől természetesen az adott termesztési körülmények között a növényállomány evapotranszspirációja eltérhet, mivel a szabadföldön nem mindig optimálisak a vízellátási vagy agrotechnikai körülmények. A Kc-tényező tehát változó értékeket mutat a növény tenyészideje során, amely egy görbével leírható (Doorenbos & Pruitt, 1977). Ez négy egyenes szakaszból áll, ahol az egyes szakaszok a különböző vegetációs fázisokat reprezentálják, amelyek a kiültetést követő kezdeti szakasz, a fő növekedési fázis, a középszezon periódusa és a szezon kései szakasza (6. ábra). A paradicsom esetében használható Kc-tényezők a különböző fázisok szerint, 90-120 napos tenyészidőkre vonatkoztatva (Allen et al., 1998; FAO, 2018):

- 0,4-0,5 a kezdeti fejlődési szakaszban (10-15 nap)
- 0,7-0,8 a fő fejlődési szakaszban (20-30 nap)
- 1,05-1,25 a tenyészidőszak középső szakaszban (30-40 nap)
- 0,8-0,9 a tenyészidőszak kései szakaszában (30-40 nap)
- 0,6-0,65 betakarításkor



6. ábra: A paradicsom K_c -tényezőjének alakulása a különböző fejlődési fázisokban

A kettős K_c -tényező az alapvető növényi korrekció mellett magába foglalja a talajfelület evaporációból adódó korrekciót is (Allen et al., 2005), amely természetes csapadék vagy öntözés nyomán történik.

2.5.3 Az öntözés hatása a terméseredményekre és a beltartalmi mutatókra

A paradicsom öntözésénél a teljes vízigényét kielégíthetjük, így maximalizálva a biomassza termelést vagy deficit öntözési stratégiákkal érhetjük el a megfelelő szárazanyagtartalmat, szignifikáns termés kiesés nélkül (Bakr et al., 2017; Böcs et al., 2011; Pék et al., 2014). A paradicsom vízstressz tűrése lehetővé teszi, hogy öntözés nélkül is életben maradjon, azonban jól reagál az öntözésre (Patané & Cosentino, 2010). Az öntözés egyértelmű termésmenővelő hatását állapították meg Le és munkatársai (2018), amikor a teljes vízellátás 300-500 mm közötti. 200 mm alatt és 500 mm felett a piacképes termés korlátozott. Giuliani és munkatársai (2016), kísérleteik alapján ~27%-os vízmegtakarítást tartanak lehetségesnek magas vízhasznosítási együttható és megnövelt bogyóminőség mellett. Ehhez az eltérő vegetációs periódusokban különböző mértékűek voltak a deficit öntözés alkalmazott arányai a maximális evapotranszpirációhoz képest. A termelők által használt öntözési gyakorlathoz képest a vízmegtakarítás aránya még nagyobb volt. Mediterrán klimatikus viszonyok között a legjobb szárazanyag hozam a deficit öntözéssel volt elérhető, még hozzá a virágzást követően az evapotranszpiráció 50%-ára csökkentett vízmennyiséggel (Patané & Cosentino, 2010). Nagy a

szerepe a szezon kései részében az öntözésnek. A sztenderd cut-off technológiához képest (3 héttel a betakarítás előtt az öntözés felfüggesztése) hosszabb ideig tartó deficit öntözés technikával is elérte a sztenderd technológia szárazanyag-hozamát és vízmegtakarítást realizált egy kaliforniai kutatócsoport (Johnstone et al., 2005). Egyiptomi, arid klímán végzett kísérletekben az ET 100%-a szükséges a maximális termés eléréséhez. Azonban az ETc 80%-val folytatott deficit öntözési stratégia a vízfelhasználási együttható maximalizálása érdekében javasolható a tenyészidőszak egy részében, mely kisebb arányban csökkenti a termést, mint amennyivel csökken az öntözővíz felhasználás (Abuarab et al., 2012). Ez a mutató különösen fontos a vízhiányos területeken. Az ETc 80%-val öntözött beállítás érte el a legnagyobb termést, relatíve jó minőséggel egy Kínában végzett kísérletben. A kutatók ezt az arányt javasolták a körzetben, homoktalajon végzett termesztéshez, műanyag mulcs és csepegtető öntözés esetén (Zhang et al., 2017).

A vízhiány és a vízért folytatott verseny fokozódásával egyre inkább várható a deficit öntözési technikák terjedése elsősorban az arid, szemi-arid régiókban többféle növényre alkalmazva (Heng et al., 2002).

2.6 Környezeti stresszek és hatásai

A stressz az egyensúlyi állapot megzavarására alkalmas, különböző faktorok által okozott, megváltozott fiziológiai állapot. Alapjában véve, a normális anyagcsere nyújt annyi rugalmasságot, hogy a környezet megszokott, előre jósolható napi vagy szezonális változásaira reagálni képes. Így nem minden optimálistól eltérő eset jár stresszhatással. A stressz kiváltója egy olyan kényszer vagy a megszokott anyagcsere mintákra ható, alig megjósolható ingadozás, amely sérüléseket, betegségeket okoz vagy abnormális fiziológiához vezet (Gaspar et al., 2002). A leginkább jellemző fizikai, kémiai és biotikus stressz-forrásokat a 3. táblázat tartalmazza (Nilsen & Orcutt, 1996).

3. táblázat: *Néhány a növények szempontjából fontos környezeti stressz-forrás*

Fizikai	Kémiai	Biotikus
Szárazság	Légszennyezés	Kompetíció
Hőmérséklet	Nehézfémek	Allelopátia
Sugárzás	Peszticidek	Növényevők
Áradás	Toxinok	Betegségek
Szél	Talaj pH	Patogén gombák
Mágneses tér	Sók, szikesedés	Vírusok

2.6.1 Az aszály

A szárazságot és az aszályt sokszor szinonimaként használják. A szárazság nem mindig párosul aszályal, hiszen a Föld azon részein, ahol a szárazság normális és megszokott a klímaadottságok alapján, ott nem beszélhetünk aszályról. Az aszály alapjában véve egy hosszú, csapadékmentes vagy nagyon kevés csapadékkal jellemezhető periódus. A kifejezésre legalább 150 különböző definíció létezik (House et al., 1985). A magyarországi irodalomban a száraz időszakot a több egymást követő száraz nap (amikor a talaj nedvességtartalma csökken) jelenti. Ez a hosszabb időszak általában 2-4 hét. Amennyiben ez jelentős vízhiánnyal jár együtt, akkor aszályról beszélünk (Varga-Haszonits, 1987). A definíciók általában a kezdetét, végét és a súlyosság fokát egy bizonyos időperiódus csapadékmennyiségének a történelmi átlaghoz való hasonlításával specifikálják (Wolchover, 2018). Nemzetközileg az egyik legelfogadottabb megfogalmazása, hogy az aszály egy relatív vízhiány. Az aszály öt típusát különböztetjük meg, melyek az alábbiak:

Meteorológiai aszály: McGuire és Palmer (1957) szerint egy periódus, amikor a havi vagy éves csapadék egy bizonyos százaléka (természetesen 100% alatti) a normálnak. Mivel ez konkrét számokat nem tartalmaz, ebből is látszik, hogy az aszályt másképp értékelhetjük a Föld különböző pontjain. Normálként elfogadhatjuk az elmúlt három évtized átlagát, bár számos helyen az évek közti nagy különbségek miatt ez túl rövid időszaknak bizonyul (House et al., 1985). Alkalmazzuk a csapadékon kívül más atmoszférikus paramétereket is a meteorológiai szárazság definiálására, mint például a vízgőznyomás hiányának aránya a levegőben (Levitt, 1958), bár ezek kevésbé népszerűek. Egyszerűen megfogalmazva az aszály egy elnyúlt és abnormális nedvesség-hiány (Palmer, 1965).

Mezőgazdasági aszály: Ennek definíciói tulajdonképpen a meteorológiai aszály különböző jellemzőit kapcsolják mezőgazdasági hatásokhoz, melyek alapjai lehetnek a csapadékhiány, a normáltól való eltérés vagy számos más meteorológiai faktor, mint az evapotranszpiráció.

Hidrológiai aszály: A száraz időszakok felszíni és felszín-alatti hidrológiára kifejtett hatását jelenti. A hidrológiai aszály az a periódus, amely alatt a vízfolyások nem képesek kielégíteni a hasznosítási célokat egy adott vízgazdálkodási rendszerben (Dracup et al., 1980; Linsley Jr. et al., 1975).

Szocio-ökonómiai aszály: A definíciói általában a gazdasági javak keresleti-kínálatti viszonyával függenek össze. Találónak tartom W. G. Hoyt (1942) megfogalmazását, miszerint az aszály akkor következik be, ha egy régió gazdasági fejlődésében nagyobb vízszükséglet alakul ki, mint ami rendelkezésre áll.

Továbbá megkülönböztetjük még a légköri aszályt is, mely akkor következik be, ha a levegő relatív páratartalma 30% alá süllyed. Ez a jelenség rendszerint több napig tart és magas léghőmérséklettel is párosul. Napközbeni előfordulása főként a késő délelőtti óráktól a kora délutáni órákig jellemző, napi 3-5 óra időtartamban (Szász, 1988).

2.6.2 A vízstressz hatása a növényekre

Vízstresszről beszélhetünk a szükségeshez képest túl sok vagy túl kevés víz áll a növény rendelkezésére (Helyes et al., 1999; Helyes & Varga, 1994). A túlzott vízellátás a hajtásnövekedést korlátozza és a vízkészletek felelőtlen használatát eredményezi (Fiebig & Dodd, 2016). A jelenlegi tendenciák szerint inkább a szárazság negatív hatásaival kell számolni Magyarországon (Szalai, 2009) és a Kárpát-medencében (Spinoni et al., 2015).

Limitált vízellátottság mellett a növényeknek csökkenteniük kell a transzspirációs aktivitásukat (Christmann et al., 2005; Nemeskéri et al., 2018, 2015). Ezt úgy tudják elérni, ha zárják a sztomáikat, amelyen a vízpára távozik és emiatt a hűtésük tökéletlen lesz, ami a lombzat hőmérsékletének emelkedéséhez vezet (Helyes et al., 2006). Ezért a növények lombfelszín-hőmérsékletének követése alkalmas a vízstressz monitorozására (Bates & Hall, 1981; Böcs et al., 2009; Helyes, 1990).

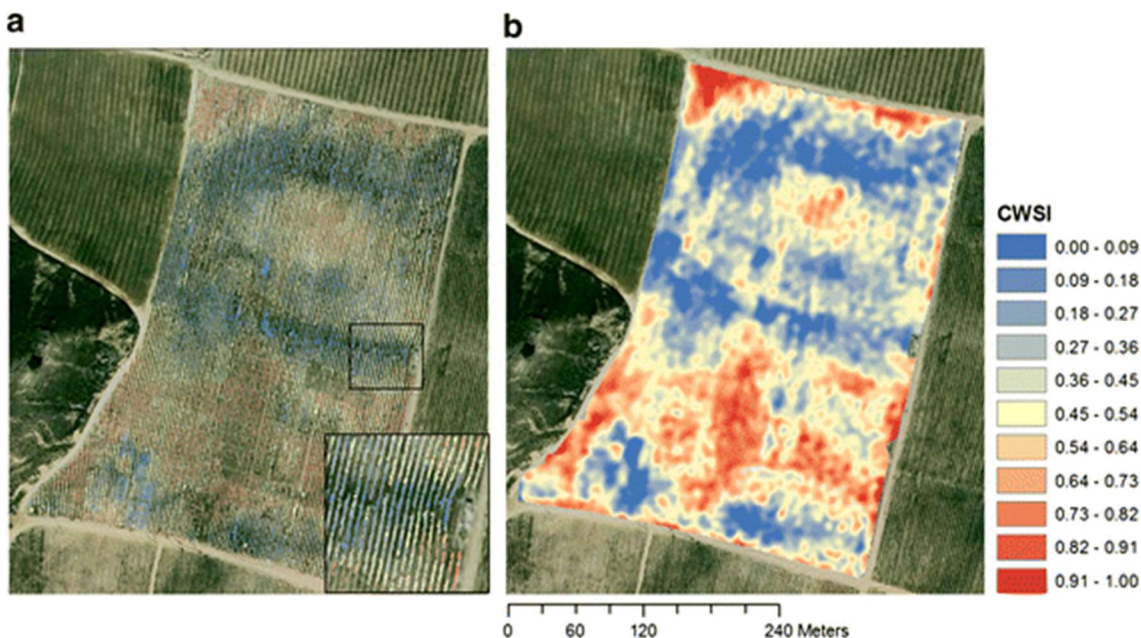
2.7 Növényi vízstressz követésének módszerei

A talajnedvesség követése az öntözés vezérlésére felvet néhány problematikus kérdést. A talajnedvességmérés pontszerűen történik, amely a talaj víztartóképeségének térbeli heterogenitása miatt nem mindig megbízható. A növény vízállapotát vizsgálva pontosabb képet kaphatunk a valós vízellátottságról, mivel így feltárhatjuk a talajnedvesség hozzáférhetőségének, párolgási szükségletek, belső hidraulikai ellenállás és a talajjal érintkező gyökérfelület felszívó kapacitásának kombinált hatását (Ihuoma & Madramootoo, 2017). Az ilyen típusú vízstressz vizsgálatokhoz rendelkezésünkre állnak széles körben elterjedt vagy terjedő módszerek, mint a sztomakonduktancia (Kirkham, 2014; Tardieu & Davies, 1983; Turner, 1991) és klorofill-fluoreszcencia mérések (Bresson et al., 2015; Embiale et al., 2016) vagy akár a térbeli felmérésre is alkalmazható spektrális reflektancia (Berni et al., 2009; Elvanidi et al., 2018; Gago et al., 2015; Gamon et al., 1992; Gerhards et al., 2016; Peñuelas et al., 1993; Rapaport et al., 2017; Riczu et al., 2014) és termális képalkotó módszerek (Bellvert et al., 2014).

2.7.1 Lombfelszín-hőmérséklet mérés

Amennyiben a vízstresszt csak önmagában a lombhőmérséklet összevetése alapján ítéljük meg, akkor a különböző időjárással jellemezhető napok nem lesznek összehasonlíthatók. Megoldás

lehet, ha az erre a célra fejlesztett, különböző indexeket használjuk. A legegyszerűbb a napi stresszfokozat index (Stress degree day – SDD), amely a levélfelszín-hőmérséklet és mérés időpontjában mért léghőmérséklet különbségeként számítható (Idso et al., 1981; Jackson et al., 1977). A mutató gyenge pontja, hogy a felhőzet nagyban befolyásolja és a relatív páratartalmat sem veszi figyelembe. Mérése és számítása azonban a legegyszerűbb. Pontosabb lehet ennél a növényi vízstressz index (Crop water stress index – CWSI) (Jackson et al., 1981). A mutató előnye, hogy a számításhoz nincs semmilyen meteorológiai adatszükséglete, figyelembe veszi a környezeti hatásokat is, mivel a levélfelszín-hőmérséklet mellett egy száraz és egy nedves referencia felszín hőmérsékletét is tartalmazza a képlet (DeJonge et al., 2015; Jones, 1999). A nedves referencia felszín reprezentálja az optimális vízellátottságú növény transzspirációját, illetve, hogy milyen hőmérsékletre képes lehűteni a lombzatot. A száraz referencia felszín a gátolt transzspiráció, a zárt sztómák hatását mutatja a levélfelszín-hőmérsékletre. Mivel ezekhez a módszerekhez mindenképp szükséges a lombfelszín-hőmérséklet mérése, ezért az infravörös termográfia jó lehetőség lehet számunkra a növényi vízstressz monitorozására (Jones, 2004). Széles körben elfogadott, hogy a sztómakonduktancia mérése pontos képet ad a növényi vízállapotról, azonban mérése pontszerűen megvalósítható és munkaigényes. Emiatt a termális képalkotás megfelelő opció a nagyobb állományok egyidejű vízállapot-felmérésére (7. ábra) (Jones et al., 2002).



7. ábra: UAV segítségével készített termális képből számított CWSI adatok és azok térbeli változatossága (Bellvert et al., 2014).

2.8 Növénynövekedési modellek

A növények növekedése meghatározott élettani alapok szerint zajlik. Bizonyos mértékig a különböző növekedési folyamatok egy matematikai formulával számszerűsíthetők a környezeti hatásokra adott válaszuk alapján. Az egyenletek egymáshoz kapcsolásával egy matematikai modellt kapunk, amely programmá írható, hogy megfeleljen a kényelmi és használhatósági szempontoknak. Az ilyen kvantitatív növénynövekedési modell lehetővé teszi a növények növekedési sebességének és a termésnek a becslését eltérő környezeti viszonyok és gazdálkodási körülmények között. A használt növénynövekedési modellek közül a legtöbb mechanisztikus, a növekedési folyamatot a környezettel kapcsolatban lévő alapvető fiziológiai folyamatokkal magyarázzák (Spitters, 1990).

A gazdálkodók számára ezek a modellek lehetőséget adhatnak, hogy megkönnyítsék a gazdálkodásban hozott döntéseiket, például az öntözés idejének és mennyiségének meghatározásában, a tápanyaggazdálkodásban vagy a növényvédelemben (Boote et al., 1996), továbbá a növényházi folyamatok vezérlésében, mint például a klímaszabályozás. A termés-előrejelzés, mint alkalmazás hasznos lehet a feldolgozóiparnak az ellátás tervezéséhez vagy akár a kormányzati döntéshozás számára is. Hasznos lehet akár a területhasználat felmérésnél, például új művelhető terület termelési potenciájának értékelésénél (Spitters, 1990). Természetesen a kutatás is széleskörűen alkalmazza az ilyen típusú modelleket. Egyik alkalmazási terület a klímaváltozás hatásának nyomon követése, vizsgálata (Bird et al., 2016; Challinor et al., 2009). A növénynövekedési modellek leginkább tábla szintre adaptálhatók, hiszen kifejlesztésük is táblaadatok alapján történt, azonban előfordul nagyobb területekre való alkalmazásuk is. Ilyen elsősorban annak felmérésében fordul elő, hogyan hathat és alkalmazkodhat a mezőgazdaság a klíma változékonyságához és változásához (Rosenberg, 2010). Ezek azonban sokszor nagy bizonytalanságot foglalnak magukban a modell paramétereire és struktúrájára nézve.

Az egyszerűbb teljesen empirikus modellek (pl. többszörös regresszió) alkalmasak a korábbi adatok összegzésére, esetleg a meglévő adatok spektrumán belüli interpolációra, de nem adnak kielégítő megoldást az extrapolált becslések esetén, továbbá nem adnak választ kísérleti eredmények ok-okozati összefüggéseire. Emiatt a kutatási eredmények magyarázatára átfogó és főként mechanisztikus elemekre épülő modell szükséges. A modellek általában empirikus és mechanisztikus keverékei (Boote et al., 1996; Whisler et al., 1986).

Az elmúlt évtizedekben számos növénynövekedési modell látott napvilágot, melyek alkalmasak a termés becslésére. Ilyen modellek többek között az APES (Donatelli et al., 2010), CropSyst

(Stockle et al., 1994), DAISY (Abrahamsen & Hansen, 2000), DSSAT (Jones et al., 2003), STICS (Brisson et al., 2003), WOFOST (Boogaard et al., 1998) és APSIM (Wang et al., 2002).

2.8.1 Az AquaCrop modellről

2.8.1.1 Általános leírás

Az AquaCrop egy növénynövekedés szimulációjára alkalmazható modell, mely képes leírni a talaj és növény közötti interakciót (Raes, 2017; Steduto et al., 2009). A modell eredményes futtatásához szükséges inputadatok többé-kevésbé könnyen beszerezhetők. A kielégítő szimulációhoz szükségesek az időjárási körülmények, a modellezni kívánt növényre vonatkozó információk (pl. ültetés időpontja, állománysűrűség, fajta), az alkalmazott agrotechnika (pl. tápanyagellátás, mulcsozás alkalmazása, gyommentesítés), az öntözés módjának, idejének és mennyiségének ismerete, továbbá a termőhelyre vonatkozó információké, mint a talajszelvény tulajdonságai és a talajvíz mélysége, minősége (Raes, 2017). A kielégítő szimuláció feltétele az információknak a pontos, a valóságnak a lehető legjobban megfelelő megadása. Az AquaCrop modellt eltérő környezeti viszonyok között és több növényre vonatkozóan tesztelték már. Eredményességét vizsgálták kukorica (Hsiao et al., 2009; Katerji et al., 2013), napraforgó (Todorovic et al., 2009), őszi búza (Toumi et al., 2016), rizs (Maniruzzaman et al., 2015) vagy éppen burgonya (Linker et al., 2016; Montoya et al., 2016) és paradicsom (Katerji et al., 2013; Takács et al., 2017; Takács et al., 2018c) modellnövényeken. A modell képes a talajnedvesség-szint által kiváltott stresszhatás eredményeként bekövetkező sztómazárodás százalékos értékét is modellezni, ezáltal lehetőséget ad a növények állapotának nyomon követésére (Takács et al., 2018c). A stressz azonban nem csak túlzottan meleg időjárási körülmények között lép fel a növényállományban, hanem előfordulhat alacsony hőmérséklet hatására is, amely szintén nyomon követhető AquaCrop segítségével (Vanuytrecht et al., 2014).

2.8.1.2 Az AquaCrop használhatósága

A talajnedvesség szimulációja, különösen a beépített paramétereket használva nem kielégítő, így aligha lehet erre alapozni az öntözést. További problémák a napi ET becslésének pontosságánál is megmutatkoznak, valamint a transzspiráció-evaporáció arány a transzspiráció irányába eltolódik. Kalibráció esetén jó biomassa és termésbecslés érhető el kukoricánál, a szezon végére a termés túlbecslésével. A levélborítás kalibrációja javít leginkább a modell pontosságán (Paredes et al., 2014). A levélborítás kalibrációja akár távérzékelt adatokkal is elvégezhető. MODIS műholdfelvételek levélfelület-index adataival már végeztek sikeres kalibrációt, azonban a validáció szintén ilyen felvételekre történt (Trombetta et al., 2016). A kalibrációhoz több vízellátási szint adatait használták Mohammadi és munkatársai (2016). A modell pontosságát

leginkább két vízellátási szint kalibrációs adatai befolyásolták. Ezek a teljes és a maximum deficit öntözési szintek voltak. Így kielégítő eredményeket szolgáltatott biomasszára és terméseredményre nézve egyaránt, minden vízellátási szinten. Ezt megerősíti más tanulmány is (Andarzian et al., 2011).

Búza esetében, kalibrációt követően megfelelőnek találták egy tanulmányban a levélborítás, ET, összes talajnedvesség és a termés szimulációját (Toumi et al., 2016). Hosszú távú adatsorokra is validálták már a modellt, ahol a kísérletből szerzett adatok mellett a régió statisztikában vezetett terméseredményekre nézve is jó eredményeket szolgáltatott a szimuláció, bizonyítva annak használhatóságát, szintén búza esetében (Iqbal et al., 2014). Öntözetlen és deficit öntözési kísérletek alapján árpanál kiválóan alkalmazható a modell termésbecslésre (Tavakoli et al., 2015). Ellenben árpa tesztnövényen szintén kimutatták a modell pontatlanságát a talajvíz-tartalom, növényi transzspiráció és a talaj evaporáció becslésében, amely természetesen a termésbecslésre is hatással van (Pereira et al., 2015). Rizzsel végzett kalibráció és validáció után a modellt értékelő mutatók alapján megállapították a modell jó alkalmazhatóságát különböző vízellátás mellett (Maniruzzaman et al., 2015). A legtöbb tudományos eredmény az AquaCrop modellel kapcsolatban búzára vonatkozik, azonban számos növényre nézve még nagyon korlátozott a tudományos publikációk száma.

Megfelelő a szimuláció a levélborítást és a napi biomassza gyarapodást tekintve kukoricára jó vízellátás és közepes vízstressz alatt (Greaves & Wang, 2016; Katerji et al., 2013). A biomassza és termésadatok felülbecslése volt felfedezhető a szezon végéhez közeledve. Erős vízstressznek kitett állománynál a termés- és biomassza-becslések nem megfelelők. Az ET becslés egyik vízellátás esetében sem működött jól (Katerji et al., 2013). A nem megfelelő szimulációk főleg a szezon végéhez közeledve, deficit öntözésnél a biomassza kalkulációknál jelentkeztek (Ahmadi et al., 2015). A modellezésnél pontatlan, végső biomassza- és termés-adatokról is beszámoltak közepes és jelentős vízstressznek kitett kukorica növényeknél (Ahmadi et al., 2015; Greaves & Wang, 2016). A termések modell általi általános túlbecslését más tanulmányban is megfigyelték (Akumaga et al., 2017). A modell biomassza- és termésbecslésre való jó használhatóságáról számoltak be Paredes és munkatársai (2014) kalibrációt követően. Az alapértelmezett beállítások mellett is jó eredményeket kaptak, elfogadható hibával.

Két másik, nagyobb inputigényű modellel összehasonlítva, különböző szintű vízellátottságu napraforgónál mindhárom modell hasonló eredménnyel teljesített. A tanulmány szerint a pontatlanságok az egyszerűsítések miatt fordulnak elő a vízhiánnyal sújtott állományok elemzésénél (Todorovic et al., 2009).

A talaj evaporációra és növényi transzspirációra vonatkozó becslésének hibáit szóján vizsgálva, más szerzők is megjegyezték, azonban a biomassa- és termésbecslésre megfelelő volt a modell (Paredes et al., 2015).

Káposztán végzett kísérletek alapján a modell szimulációja megbízható volt a biomásszára és a talaj víztartalmára egyaránt (Wellens et al., 2013). Szintén megerősítik a megfelelő biomassa- és termés-szimulációt Kiptum és munkatársai (2013), továbbá írnak a biomassa túlbecsléséről is.

Eltérő szintű vízellátás mellett burgonyán végzett kísérletek alapján elfogadható eredményeket adott a modell a levélborításra, termésre, talajvíz-tartalomra, az evapotranszspirációra nézve. A validációnál a terméseredmények pontatlanságát az okozhatja, ha a kalibrációnál a betakarítási indexet nem vesszük figyelembe (Montoya et al., 2016). Öntözési gyakorlat kialakítására használták a modellt Linker és szerzőtársai (2016), melynek használhatóságát az bizonyította, hogy a betakarítási indexek közel voltak a modell által lehetségesnek vélt maximumhoz. Ugyanígy referenciaértékhez közeli betakarítási indexeket jegyeztek paradicsom esetében is. Továbbá korábbi adatok alapján állították, hogy a betakarítási index a korai és középső növekedési periódusokban nem megfelelő, mert a zöldség irántolva tolja a szimulált értékeket.

Alkalmazható a modell különböző öntözési stratégiák tesztelésére is. Paradicsom teszt növényen vizsgáltak két stratégiát, miszerint ha a talaj nedvességtartalmát nem engedjük bizonyos szint alá csökkenni a talajban az hatásosabb, mint a fix időpontban végzett öntözési gyakorlat (Rinaldi et al., 2011).

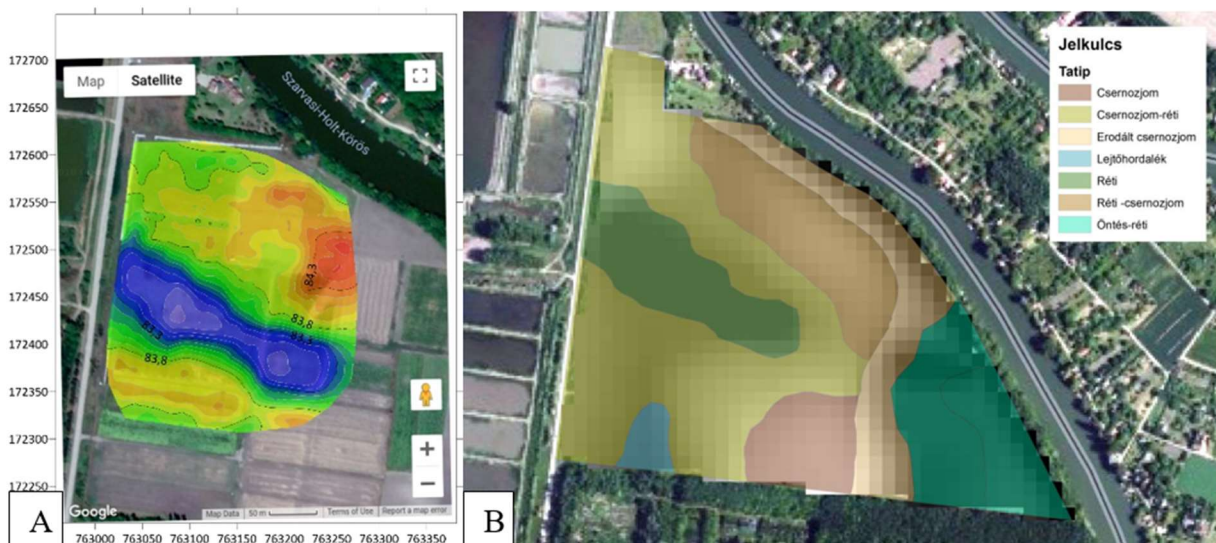
A modell beállításai lehetővé teszik rengeteg szcenárió vizsgálatát. Bird és munkatársai AquaCrop modellel végzett szimulációi alapján a jövőben Tunéziában a paradicsom-termelés a klímaváltozás hatására a termőhelyek talajának textúrái szerint eltérően változhat, valamint a vetési idő is befolyásolni fogja a termelés sikerességét. A különböző stratégiák, mint a vetésidő megváltoztatása, mulcsozás használata, a termesztésre megfelelőbb talajok választása, optimális fajtaválasztás megkönnyíthetik az alkalmazkodást (Bird et al., 2016).

Az AquaCrop modell kulcsparamétereit, mint a normalizált víz termelékenység, levélborítás és összes biomassa szükséges különböző klímán, talajon, fajtákkal, öntözési módokkal és agrotechnikával tesztelni a kalibráció érdekében (Paredes et al., 2014; Salemi et al., 2011). A modell eredményessége nagyban függ a növény vízstressz-állapotától, így a validációs tesztek a fejlődés érdekében szükséges különböző vízstressz-állapotok mellett végezni (Katerji et al., 2013).

3 ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1 A kísérleti terület bemutatása

A szabadföldi kísérleteket Szarvason állítottam be 2017-ben és 2018-ban, a Szent István Egyetem, Agrár- és Gazdaságtudományi Karának kísérleti tanüzemében, az „Iskolaföld” területen (GPS koordináták: É 46°53'011.5", K 20°31'058.6"). A területet északról és keletről a Szarvasi Holt-Körös határolja, szélében vízparti fás-bokros növényzettel, déli határa a szarvasi arborétum magas fákkal, nyugatról műút határolja, amelynek másik oldalán halastavak találhatók. A terület klímája alapján mérsékelt, azonban az óceáni, kontinentális és mediterrán hatások teszik változatosá. Szűkebb besorolás alapján a meleg-száraz éghajlati körzetbe tartozik, ahol az évi csapadékmennyiség általában nem éri el az 500 mm-t (Országos Meteorológiai Szolgálat, 2018). A tangazdasági terület talaja és domborzata változatos. Főként réti és csernozjom talajok közötti átmenetek dominálnak. Fizikai féleség alapján főleg agyagos vályog, agyag kategóriákba sorolhatók be. Domborzata a kistáj egészéhez viszonyítva változékony. tengerszint feletti magassága 81 és 85 m.B.f. között mozog (8. ábra).

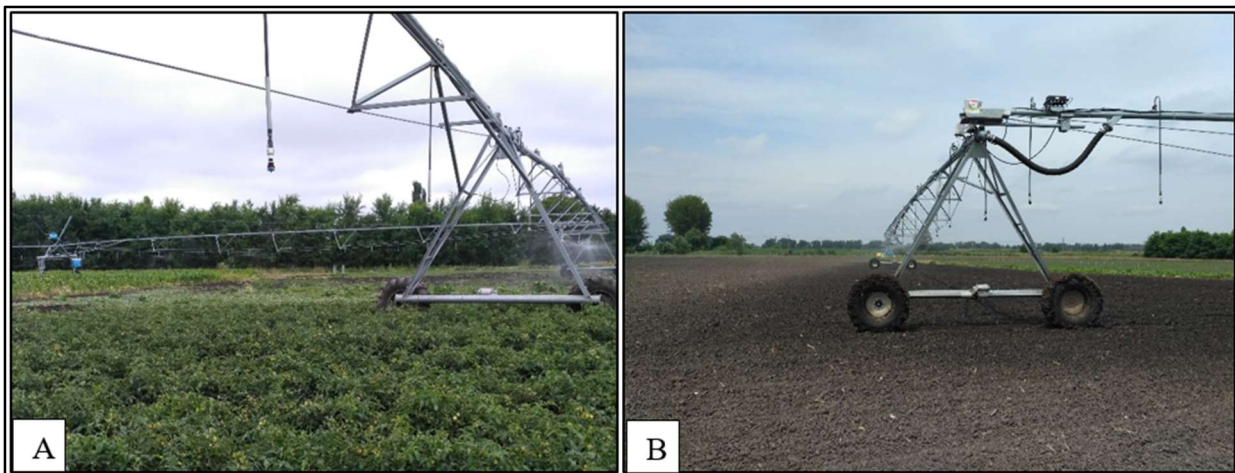


8. ábra: A terület talajtani térképe. A háttérben a terület domborzati modellje (Dr. Dobos Endre szerkesztése) (B) és a körforgó öntözőberendezéssel öntözött terület domborzati változékonysága (saját szerkesztés) (A)

3.2 A precíziós öntözőberendezés jellemzői

A központi körforgó öntözőberendezés (center pivot) két Valley 8120 tagból és egy 800C saroköntöző (corner) tagból áll. A gép VRI iS rendszerrel van felszerelve a két fix tagon (Valmont Irrigation, Valley, Neb.), amely a legkorszerűbb VRI rendszer, ahol a szórófejek egyenként vezérelhetők és képesek egymástól függetlenül működni, ellentétben a korábbi verzióval, ahol

több szórófej alkotott egy-egy külön kapcsolható egységet. A két tag és a saroköntöző tag teljes hossza 180,86 m, a VRI-vel felszerelt szakasz összesen 98,26 m. A teljes öntözött terület maximum napi 7,6 mm öntözővízzel öntözhető, amely képes kielégíteni a várható maximális napi evapotranszpirációt. Nelson R3000 D8 rotátor szórófejek találhatóak a fix tagokon, amelyek Valley Regulator PSR-2 (1,03 bar) nyomásszabályzókkal vannak szerelve, hogy a szárnyvezetékben található változó nagyságú nyomást, a szórófejek optimális működéséhez szükséges szintre csökkentse. A szórófejek hozzávetőleg 2,4 m magasságban találhatóak a talajszinttől (9. ábra A). A szórófejek szórási sugara átlagosan kb. 6-7 m. A legtöbb szórófej közötti távolság 5,73 m, azonban ez különbözhet a tornyok közelében elhelyezkedő szórófejeknél (9. ábra B). A működési nyomás ~1,8 bar a középső toronynál, amely a beépített nyomásmérővel mérhető. A szórófejek be- és kikapcsolásából eredő nyomásváltozások kiegyenlítését a szivattyú működését szabályzó frekvenciaváltó segíti. A berendezés kormányzása GPS rendszerrel történik. Az egyes, különböző vízádaggal öntözött zónák öntözését a gép a szórófejek bizonyos időközönkénti ki- és bekapcsolásával valósítja meg. A szórófejek pulzáló működése a beépített mágnesszelepek szabályozásával lehetséges. Ugyanakkor a berendezés képes a haladási sebességét is módosítani.



9. ábra: A kísérleti téren található precíziós center-pivot öntözőberendezés működés közben

3.2.1 Az öntözés egyenletességének és az átmeneti zónák mérése

A különböző méréseket májustól augusztusig folytattam a két kísérleti évben, a beállított ipari paradicsom deficit öntözési kísérletben, amely eltérő volt a két kísérleti évben. Az esőszerű öntözést a szél jelentősen befolyásolja. A szélesség mérése 10 m-es magasságban történt, majd az értékeket a logaritmusos szélprofil alapján 2 m-re vonatkozó értékre transzformáltam. A kijuttatott öntözővíz mérésére hagyományos műanyag csapadékmérőket használtam, amelyeket farudakra rögzítettem. Minden esetben egységes mérési magasságban végeztem a méréseket. Ez a

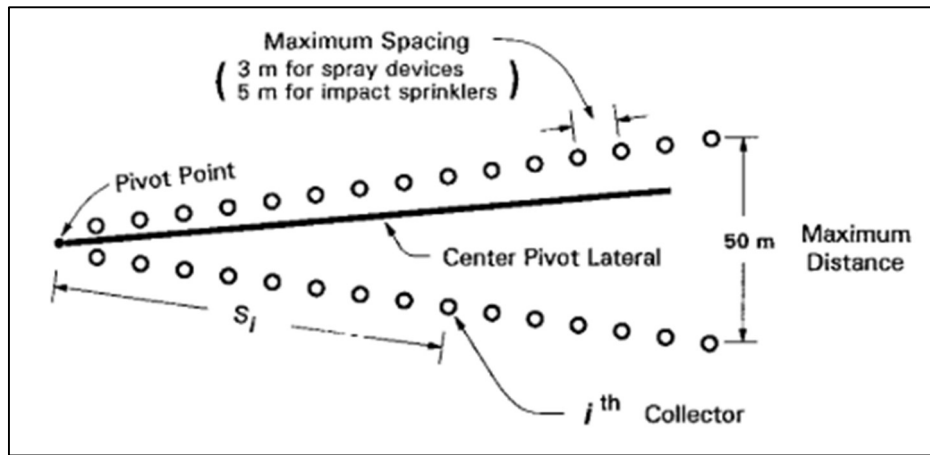
legtöbb esetben 60 cm-t jelentett, azonban a szezon végéhez közeledve 90 cm-re kellett emelni a fejlett vegetáció miatt.



10. ábra: A négyzethálós (A) és az átmeneti zónák méréshez használt mérési elrendezések (B).

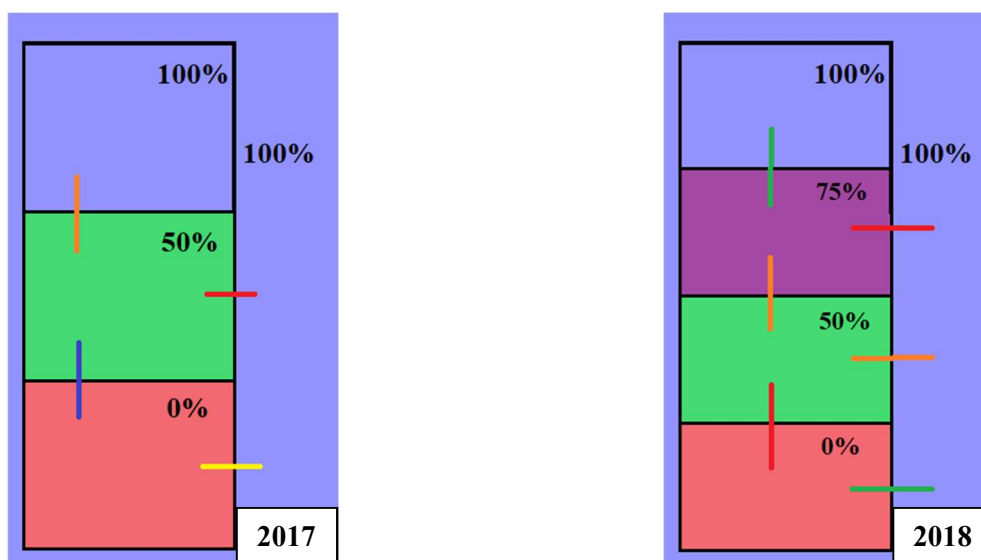
Az egyenletesség értékeléséhez szükséges mérésekhez a csapadékmérőket 4×5-ös négyzethálóba raktam ki, egymástól 3 m távolságra, 60 cm-es mérési magasságba (10. ábra A). A négyzethálók elhelyezése a parcellák belső részében történt, így az átmeneti zónák nem zavarták a méréseket. A legközelebbi csapadékmérő 51 m-re került az 50%-os parcellában a központi toronytól, míg a 100%-os parcellában 77 m-re. Ebben az elhelyezésben a méréseket 4 ismétlésben végeztem. Az öntözés pontosságának jellemzésére, hogy kiderüljön milyen közel voltak a felfogott vízmennyiségek a beállítottához, átlagos abszolút hiba (Mean absolute error - MAE) és négyzetes középhiba (Root mean square error - RMSE) mutatószámokat számoltam ki.

A második méréstípust egy sztenderd szerint végeztem, amelyet az Amerikai Agrármérnökök Társasága fejlesztett ki (American Society of Agricultural Engineers (ASAE), 1997) részben központi körforgó öntözőgépek vízkijuttatási egyenletességének mérésére (11. ábra). Eszerint a csapadékmérőket két egyenes sorba helyeztem ki sugárirányban, 60 cm-es mérési magasságba, egymástól 3 m-es távolságra. A legközelebbi csapadékmérő a központi toronytól 36 m-re került, mivel a mérésekből kihagytam az öntözetlen parcellát, amely a legközelebb esett a központi toronyhoz. Így megfelelt a mérési sztenderd javaslatának is, miszerint az effektív sugár belső 20%-ban nem ajánlott a csapadékgyűjtők elhelyezése.



11. ábra: Az ASAE mérési sztenderd center pivot berendezések egyenletességére vonatkozó vizsgálat sematikus ábrája (American Society of Agricultural Engineers (ASAE), 1997).

A harmadik típusú mérési elrendezéssel határoztam meg, hogy milyen szélesek az átmeneti zónák, a különböző vízádaggal öntözött parcellák között. Általában a négyszög alakú táblák jellemzők a termesztésben, emiatt az átmeneti zónák mérésénél a táblát, a tábla széleit vettem alapul. Az átmeneti zónák hozzávetőleges meghatározására az első mérésnél a csapadékmérőket a várható határookra merőlegesen helyeztem ki. Miután körvonalazódott az átmeneti zónák helye, a csapadékmérőket a parcella határvonalakra merőlegesen helyeztem ki. Ezúttal 1 m-es távolságba és 90 cm-es magasságba helyeztem el a mérőket, a magas vegetáció miatt. A 12. ábrán látható a mérési vonalak elhelyezkedése a két kísérleti évben. 2017-ben összesen 14 csapadékmérő került a kék vonalra, 14 db a narancssárga vonalra, 11 db a sárga vonalra és 9 db a piros vonalra. A mérést 2017. július 29-én végeztem, az öntözés ideje alatt mért $2,27 \text{ m s}^{-1}$ szélebség mellett. 2018-ban egymástól 1,5 m távolságra helyeztem el a csapadékmérőket, a tábla hosszabb oldalával párhuzamos vonalakra 11 db-ot, a merőleges vonalakra 12 db-ot.



12. ábra: Az átmeneti sávok mérésére szolgáló mérési vonalak elhelyezkedése a két kísérleti évben. A vonalak színei megegyeznek az átmeneteket bemutató diagramokon használt színekkel a könnyebb érthetőség érdekében.

A mérések ideje alatti evaporáció mérésére 3 db, 10 mm vizet tartalmazó csapadékmérőt helyeztem ki, hogy a csökkenés alapján tudjam pontosítani a mért értékeket. A legtöbb mérést éjszaka folytattam le és a mért értékeket a reggeli órákban olvastam le, így az értékeket nem kellett evaporációs veszteséggel korrigálni. A szórófejek és a csapadékmérők között bekövetkező veszteséggel nem tudtam számolni, de ez Schneider (2000) munkája szerint mindössze 1-2%-a a vízkijuttatásnak. Az öntözőberendezés minden esetben az óramutató járásával megegyező irányban haladt. A tesztek minden esetben az öntözési ütemterv részeként zajlottak le és nem jártak a kalkulált öntözővíz igény fölötti öntözővíz-többlettel.

3.2.2 Az adatok értékelése

Az egyenletességet az Christiansen-féle egyenletességi koefficienssel (CU_C) jellemeztem (Christiansen, 1941) az 50%-kal és 100%-kal öntözött parcellákban a 2017-es évben, melynek meghatározása a következő képlet szerint történt:

$$CU_C = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |V_i - \bar{V}|}{\sum_{i=1}^n V_i} \right] \quad (1)$$

, ahol:

V_i = az egyes csapadékmérőkben felfogott öntözővíz mennyiség (mm)

\bar{V} = a csapadékmérőkben felfogott öntözővíz mennyiségek átlaga (mm)

Ugyancsak a vízkijuttatási egyenletesség meghatározására használtam az eloszlási egyenletességet (distributed uniformity) (DU) (Kruse, 1978). Az eloszlási egyenletesség számításához a mért értékeket növekvő sorrendbe állítjuk, majd az alsó 25%-ba sorolt értékek átlagát vesszük és elosztjuk az összes mért érték átlagával:

$$DU = 100 \times \frac{\text{Alsó negye átlaga (mm)}}{\text{Összes érték átlaga (mm)}} \quad (2)$$

Emellett az ASAE sztenderd alapján végzett mérések értékelésére a Heerman and Hein formulát alkalmaztam (CU_{HH}), amely szintén az egyenletesség mérésére szolgál (American Society of Agricultural Engineers (ASAE), 1997). Számítása az alábbi képlet szerint történik:

$$CU_{HH} = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n S_i |V_i - \bar{V}_p|}{\sum_{i=1}^n V_i S_i} \right] \quad (3)$$

, ahol:

n = a csapadékmérők száma

i = i -edik csapadékmérő

V_i = az i -edik csapadékmérőben felfogott öntözővíz mennyiség (mm)

S_i = az i -edik csapadékmérő távolsága a központi toronytól (m)

\overline{V}_p = a felfogott öntözővíz mennyiségek súlyozott átlaga (mm), amelyet az alábbiak szerint számítunk:

$$\overline{V}_p = \frac{\sum_{i=1}^n V_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (4)$$

3.2.3 Az alul-felülöntözött területek meghatározása

Az alul- és felülöntözés meghatározása a négyzethálós (grid) méréseken alapul. Háromdimenziós felszíneket készítettem a grid adatokból és sík felszíneket az adott öntözésnél beállított vízadagok alapján. A célom az volt, hogy vizualizáljam a számított értékekhez tartozó vízeloszlási modelleket. Másik cél volt, hogy kiszámítsam az alul- és felülöntözött vízmennyiségeket. Ezért a grid mérések adataiból készített 3D felszínekből kivontam a beállított öntözővizet reprezentáló sík felszíneket. Ezek a felszínek grid-fájlokból készíthetők, amelyek elkészítéséhez a módosított Shepard eljárás (Franke & Nielson, 1980; Renka, 1988; Shepard & Donald, 1968) interpolációt használtam, amely sikerrel alkalmazható a szabálytalanul elszórt alappontú interpolációs problémákra. Az interpolátor inverz-súlyozású eljárást használ, így figyelembe veszi az ismert pontok interpolálandó ponttól való távolságát. A legfontosabb módosítás az eredeti Shepard eljáráshoz képest a lokalizáció volt (Franke & Nielson, 1980; Sári, 2015). Lehet egzakt vagy simító interpoláció is. Több, a Surfer szoftverben elérhető és vizuális ellenőrzés után a szórásképre adaptálhatónak vélt interpolációs módszer közül választottam ezt a módszert (távolsággal fordítottan arányos, krigelés, helyi polinomiális, minimális görbület, módosított Shepard módszer, radiális bázisfüggvény, háromszögelés lineáris interpolációval). A kiválasztáshoz teszteltem a különböző interpolációkat a 100%-kal öntözött kezelésben a június 8-i mérést alapul véve, mivel az alul- és felülöntözést egyaránt mutatott. Minden interpoláció segítségével elkészítettem a grid fájlokat, kiszámítottam a hozzájuk tartozó reziduálisokat, majd összesítettem ezek abszolút értékeit. A reziduálisok jelentik az eltéréseket a mért és az interpolált értékek között. A legkisebb értéket a módosított Shepard eljárás adta, 0,0125 értékkel, így döntöttem úgy, hogy a további számításokhoz ezt az interpolációt fogom használni. A kapott eredményeket hektárra vetítettem a könnyebb értelmezhetőség eléréséhez, mivel a mérések 98 m²-t fedtek le. A 3D modellek

elkészítését és a volumetrikus összevetéseket Surfer 15 szoftverkörnyezetben végeztem (Golden Software, Inc, Golden, Colorado).

A négyzethálós méréseket a 2017-es kísérleti évben folytattam le a paradicsom-öntözési kísérlethez használt 0%, 50% és 100% beállítások mellett. Összesen négy mérést végeztem ezzel a csapadékmérő elrendezéssel, ahol az öntözési vízádagok az alábbiak voltak: 12,2 mm, 12,7 mm, 22,1 mm és 25,1 mm, amelyek a 100%-ot jelentik.

3.3 Kísérlettervezés

3.3.1 Kísérleti körülmények

A növények a legjobb indikátorok a különböző öntözési adagok hatásának vizsgálatára. Emiatt egy deficit öntözési kísérletet állítottam be ipari paradicsom tesztnövényt használva. A kísérletben UG812 J (United Genetics Seeds Co., Hollister, CA) közép-korai érésű, több célra is hasznosítható hibridet használtam mind a két kísérleti évben. Az optimális tenyészideje a kiültetéstől számítva 98-100 nap. Átlagos bogyótömege 65-70 g. Általánosan jó minőségű, jó vízdoldható szárazanyag-tartalommal (5,4-5,6 Brix°) és színnel. Megbízható termőképességgel, kiváló tövön tarthatósággal jellemezhető.

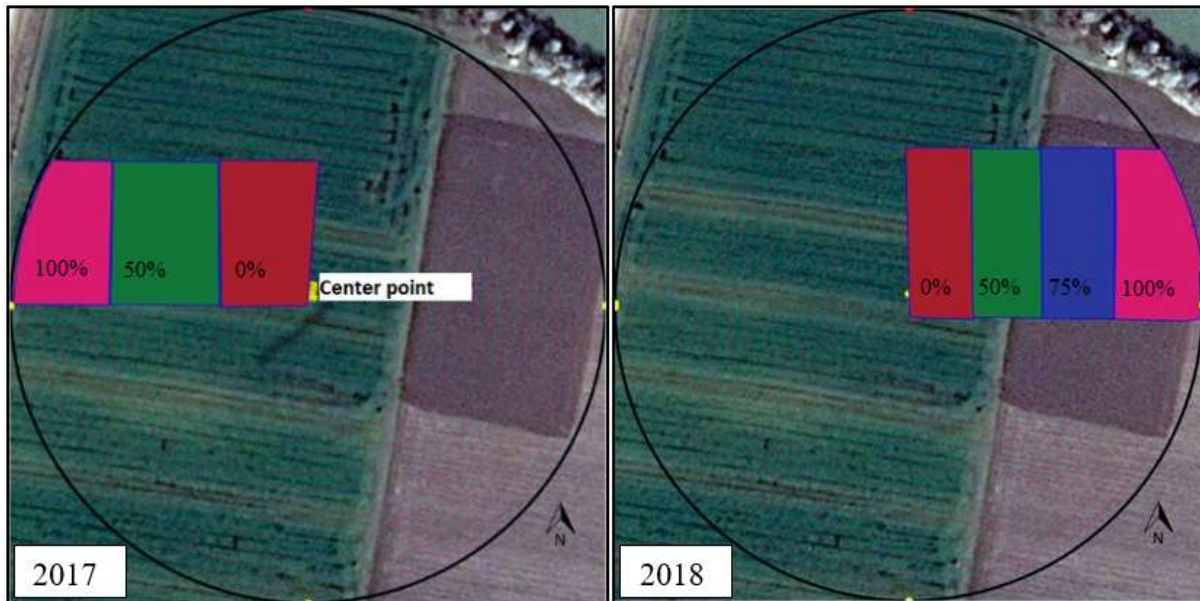
A kiültetés szimpla sorokba 140 cm-es sortávra és 20 cm-es tőtávolságra, gépi munkával történt (13. ábra). A termesztési technológia fontosabb adatai a 4. táblázatban kerülnek bemutatásra.

4. táblázat: A kiültetési- és betakarítási időre, valamint a tápanyagutánpótlásra vonatkozó adatok.

Év	Kiültetés napja	Betakarítás napja	Tenyészidő hossza (nap)	N-hatóanyag (kg ha ⁻¹)	P-hatóanyag (kg ha ⁻¹)	K-hatóanyag (kg ha ⁻¹)
2017	május 9.	augusztus 17.	100	138	117	183
2018	május 8.	augusztus 14.	98	137	69	174



13. ábra: A kísérleti paradicsom-állomány



14. ábra: A két kísérleti évre vonatkozó öntözővíz kijuttatási térkép a VRI vezérléséhez 2017-ben és 2018-ban.

A terület talaja a felső 35 cm-es rétegre vonatkozólag agyagos-vályog fizikai féleségű, az alábbi szemcseméret eloszlással: 37% agyag-, 29,4% homok- és 33,6% iszap-frakcióval. Humusztartalma 3%, kémhatása enyhén savanyú (pH=6,68).

A kísérlet mind a két évben egy precíziós központi körforgó öntözőberendezés alatt volt elhelyezve. A kísérleti tábla 2017-ben 3 db (méretük ~50×33 m), 2018-ban 4 db (méretük ~50×25 m) közel egyenlő parcellára lett felosztva. Ezeket a különböző vízádaggal öntözött téglalap alakú parcellákat egy recepttérképbe kellett foglalni, melyet Valley VRI 8.55 szoftverrel valósítottam meg, amely segítségével a parcellák alakját és az öntözővízádag arányát lehet beállítani (14. ábra). Alapértelmezetten 100%-kal öntöz a gép, így az ettől eltérő arányt jelző poligonokon kívül 100% vízkijuttatás jellemző. A különböző parcellákra 2017-ben a kiszámított öntözővíz adag 0% (K), 50% (I50) és 100%-a (I100) (14. ábra A), 2018-ban 0%, 50%, 75% (I75) és 100% lett kijuttatva esőszerű öntözés formájában (14. ábra B). Az I100 tehát optimális vízellátottságot, az I75 és I50 deficit öntözést, enyhe és mérsékelt vízstresszt, valamint a K az erős vízstresszt jelentette. A szezon végi mintavételnél mindkét évben figyelembe vettem a parcellák közötti átmeneti zónákat. A különböző öntözési szinteket és a többféle kísérleti mikrobiológiai készítményt szem előtt tartva kéttényezős sávos kísérleti elrendezést alkalmaztam. A mintavételnél az ismétléseket a blokkon belül random módon vettem.

3.3.2 Öntözővíz mennyiségének kiszámítása:

A növényi vízigény meghatározását 2017-ben AquaCrop v5.0, 2018-ban v6.0 szoftverrel végeztem (Battilani et al., 2012). A potenciális evapotranszpirációt (PET) a FAO Penman-

Monteith módszer alapján számítottam ki a szoftver segítségével, mely a referencia evapotranszpiráció K_c tényezővel korrigált értéke (Allen et al., 1998). Input adatként a napi minimum- és maximum-hőmérsékletet, a lehullott csapadék mennyiségét, a szélességet és a napi átlagos relatív páratartalmat használtam. Ezek az adatok a kísérleti tér közelébe felállított meteorológiai állomás által gyűjtött adatok voltak. A PET számításához szükséges volt megadni a szélességi fokot ($46,88^\circ$) és a tengerszint feletti magasságot (84 m.B.f). A kiültetést követően a palánták beiszapolása céljából kezdeti 15 mm öntözővizet juttattam ki, amely egy alap, kiindulási vízmennyiségként is szolgált a további vízigény számításnál. A vízadagokat mindig előre juttattam ki 3 és 4 napos öntözési fordulóval, heti két alkalommal. Az öntözővíz adagokat az Országos Meteorológiai Szolgálat előrejelzése alapján számoltam ki az alábbi képlet alapján: $Vízigény (mm) = (T_{min} + T_{max}) / 10$ (Helyes & Varga, 1994), azonban ezt az értéket pontosítottam az AquaCrop modell által számolt PET értékekkel. Ezek az értékek csak utólag, a helyben gyűjtött meteorológiai adatok megléte után voltak számíthatók. Emiatt a fenti képlettel számított vízigény és a modell által számított vízigény különbségével, valamint az esetleges csapadék értékével mindig pontosítottam a következő öntözést. Így a végső értékek a modellel számított értékek voltak.

3.4 Mérések

3.4.1 A talajnedvesség mérése

A talajnedvességet a felső 15 cm-es rétegben követtem nyomon a kezeléseknél. Erre a célra Trime-fm PS3 talajnedvességmérő szondát használtam (IMKO Micromoduletechnik GmbH, Ettlingen, Germany).

3.4.2 Növényi stressz indexek (lombfelszín hőmérséklet mérése, SDD, CWI)

A lombfelszín-hőmérsékletek nyomon követése mindkét kísérleti év júliusában történt minden kezelésben, 4 ismétlésben. 2017-ben 27, 2018-ban 24 napra vonatkozó adatot gyűjtöttem. A méréseket minden nap a legmelegebb órákban (13:00-15:00 között) végeztem. Két különböző műszert használtam az adatgyűjtéshez. Egy Raytek Raynger II infravörös távhőmérőt és egy FLIR One for Android, mobiltelefonhoz csatlakoztatható hőkamerát, amely 160×120 felbontással (termálkamera), a 8-14 μm spektrumban készít felvételeket (15. ábra). Emellett a műszer a látható tartományban is készít egy fotót párhuzamosan, VGA felbontásban.

A megmért hőmérséklet értékekből két különböző indexet számoltam. Az SDD érték az alábbi képlet szerint számítható: $(T_{levél} - T_{levegő})$. Ehhez az indexhez a megmért levélfelszín-hőmérséklet mellett a levegőhőmérséklet szükséges.



15. ábra: A kísérletben használt okostelefonhoz csatlakoztatható termális kamera (FLIR® Systems, Inc.) (FLIR website, n.d.).

A crop water stress index (CWSI) számításához szükséges képlet a $(T_{\text{levél}} - T_{\text{nedves}}) / (T_{\text{száraz}} - T_{\text{nedves}})$. A képletben a száraz és nedves hőmérsékletek egy száraz és nedves referenciacsúszár hőmérsékletét jelentik. A száraz referenciacsúszárhoz egy-egy levelet vazelinnel kentem be, így meggátolva, hogy a növény a transzspiráció segítségével hűtse a lombzatot. A nedves referenciacsúszár reprezentálja azt a levélfelszín-hőmérsékletet, amelyre a korlátlan vízellátással rendelkező növény visszahúlni képes. Ehhez a leveleket vízzel permeteztem be a levéllemez teljes felületének átnedvesítéséig. A hőkamerával készített képek elemzésére FLIR Tools 6.3. szoftvert használtam.

3.4.3 A termés mennyiségének és minőségének elemzése

A 2018-as szezon során hat alkalommal, kezelésenként 4 növényt vágtam ki közvetlen a talajszint fölött biomassza adatgyűjtés céljából. A friss biomassza tömegek mérését táramérlegem segítségével végeztem, majd a Szent István Egyetem Agrár- és Gazdaságtudományi Karának analitikai laboratóriumában, szárítószekrényben szárítottam ki a növényeket 105 °C-on. Az első három alkalommal 24 órát, majd a további mintavételi alkalmaknál 48 órát száradtak a növények tömegállandóságig, majd ezt követően a száraztömegeket mértem meg táramérlegemmel.

A betakarítást mindkét évben egy menetben, kézzel végeztem. A betakarítás napján megmértem a föld feletti teljes biomassza tömeget, ezt követően a bogyókat elválasztottam a szártól és szétválogattam három csoportra: piacképtelen, zöld és érett. Az egyes csoportokon belül megszámláltam a bogyókat, majd táramérleg segítségével a tömegüket is megmértem. Minden kezelésből és a kontrollokból 4-4 ismétlésben vettem mintát. Egy-egy minta 10 növényt foglalt magába. A bogyók vízdoldható szárazanyag tartalmát (Brix°) Krüss DR 201-95 típusú digitális refraktométerrel mértem meg (Krüss Optronic, Hamburg, Germany).

A vízfelhasználási együttható (Water use efficiency – WUE) számításánál a teljes vízellátást vettem alapul és ezzel osztottam el a megtermelt biomassza- és piacképes-terméshozamokat.

3.5 A modellezés

3.5.1 Az Aquacrop modell működése

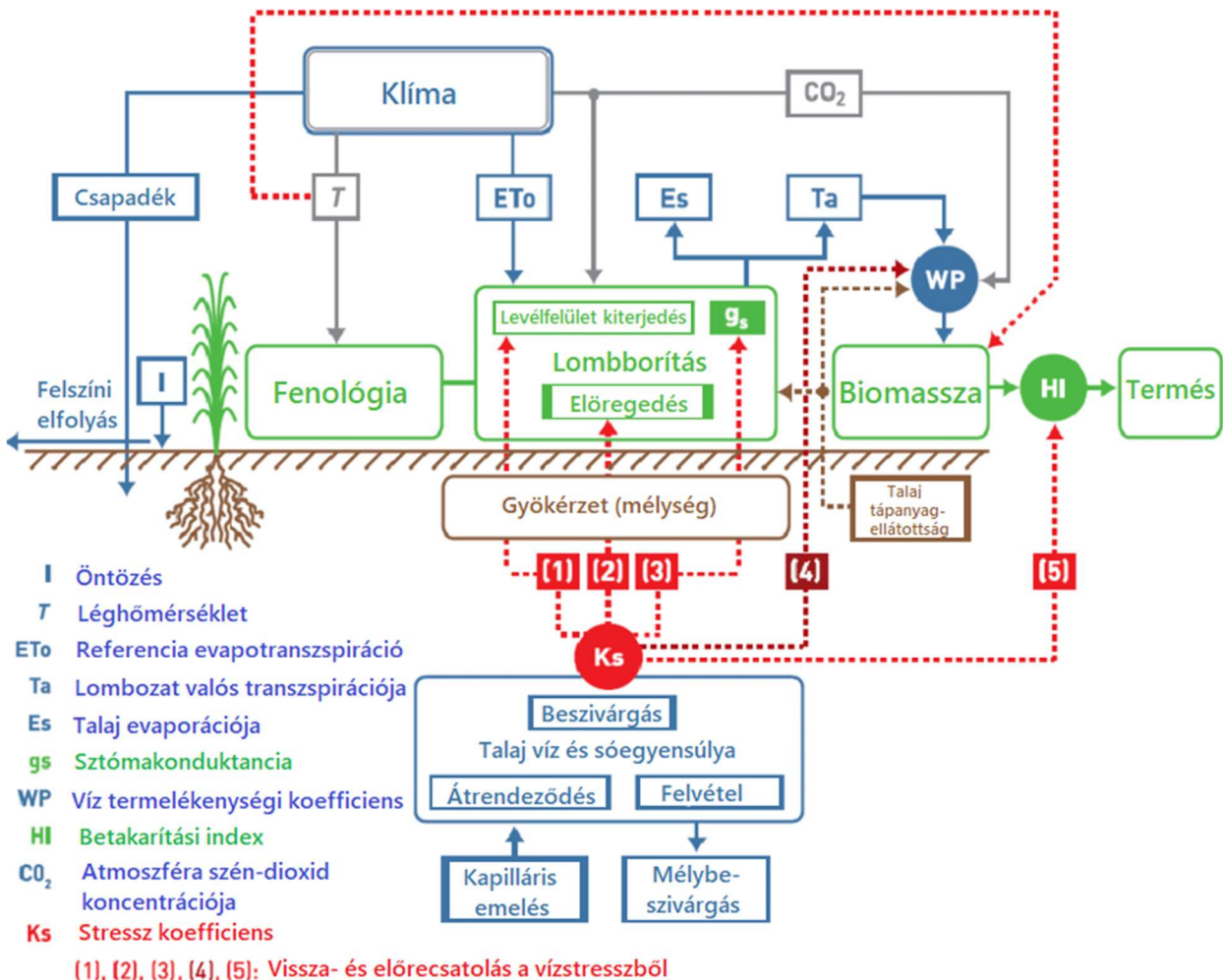
A növény növekedésének és termésének szimulációjához szükségesek a talaj fizikai és hidraulikai paramétereinek, a légköri viszonyok (csapadék, hőmérséklet, evapotranszpiráció, szén-dioxid koncentráció), továbbá a növény fiziológiai és termelési paramétereinek (fenológia, borítás, gyökerezési mélység, biomassza termelés és betakarítható termés) és az agrotechnika egyes komponenseinek (öntözés, tápanyagellátás, további agrotechnikai beavatkozások) ismerete (Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009).

Az AquaCrop külön modellezi a meteorológiai adatokból számított napi referencia ET segítségével a vízháztartási mérleg elemeit, a talaj evaporációját és a növények transzspirációját, amelyek a napi növényborításon és a talaj kiszáradásán alapulnak. A modell a növény reakcióját a vízstresszre négy stresszmutatón keresztül veszi számba a szimulációhoz (levélfelület kiterjedése, sztómazáródás, lomb elöregedése és a betakarítási indexben beálló változások). A víz termelékenységi paraméteren keresztül pedig a napi földfelszín feletti biomassza gyarapodást kalkulálja a szoftver (Hsiao et al., 2009; Steduto et al., 2009). A normalizált növényi víz produktivitás közel egységes egy adott klímára és növényre nézve.

A termés számítása a biomassza és a növény-specifikus betakarítási index szorzataként történik. A betakarítási index beállítása kapcsolatban van a rendelkezésre álló vízmennyiséggel és függ annak időbeli hozzáférhetőségével, a vízstressz mértékével és tartósságával. A betakarítási index beállítása öt vízstressz paraméter függvénye, amelyek a következők: a levélnövekedés gátlása, sztómák gátlása, az elöregedésből adódó zöld lomb tartósságának csökkenése, biomassza csökkenés a virágzást megelőző stresszből adódóan és az elégtelen kötődés. A levélborítás fejlettségét az alábbi paraméterek határozzák meg: lombnövekedési koefficiens, lombredukciós koefficiens, maximum levélborítás, a kiültetés utáni felépüléshez szükséges napok száma és a

lomb előregedésének kezdete. A lombnövekedési koeficiens mutatja meg milyen ütemben fejlődik ki a lombzat. A lombcsökkenési koeficiens mutatja meg milyen gyorsasággal hal el a lombzat az előregedés kezdetét követően (16. ábra).

Az AquaCrop-ban több, felhasználó által alakítható lehetőség is van az öntözési gyakorlat szimulációjának beállítására. Ezek az időzítés, kijuttatott mennyiség, az öntözési mód kiválasztása.



16. ábra: Folyamatábra az AquaCrop működéséről, a talaj-növény-atmoszféra főbb összetevőivel és a meghatározó modell paraméterekkel. A folytonos vonalak jelzik a közvetlen kapcsolatokat a változók és folyamatok között, a szaggatott vonalak a visszahatások (Steduto et al., 2008).

3.5.2 A modell felépítése

A szezon szimulációjához szükséges klímafájlhoz, a szarvasi meteorológiai állomás által rögzített adatokat használtam fel (napi minimum- és maximum hőmérséklet, csapadék, relatív páratartalom, szélsébség). A klímafájlhoz 2017. január 1-től 2018. augusztus 14-ig használtam meteorológiai adatokat. A 2017-es évben a szezon kezdete előtti bő 4 hónap hozzájárult, hogy a szezon elején a kiindulási állapot közelítse a valós állapotot, gondolva itt főként a talaj nedvességállapotára.

Növényfájlként a beépített paradicsom crop fájlt használtam „calendar” módban és az alábbiakban módosítottam:

- a használt hibridre jellemző naptári napokat állítottam be (pl. szezon hossza, levélöregedés beindulása stb.)
- a lombborítást 90%-on maximalizáltam az öntözött és 40%-on a kontroll állományokban
- a referencia betakarítási indexet a kísérletből származó eredmények alapján állítottam be

A táblakezelési adatoknál limit nélküli tápanyagellátást és jó gyommentesítést állítottam be.

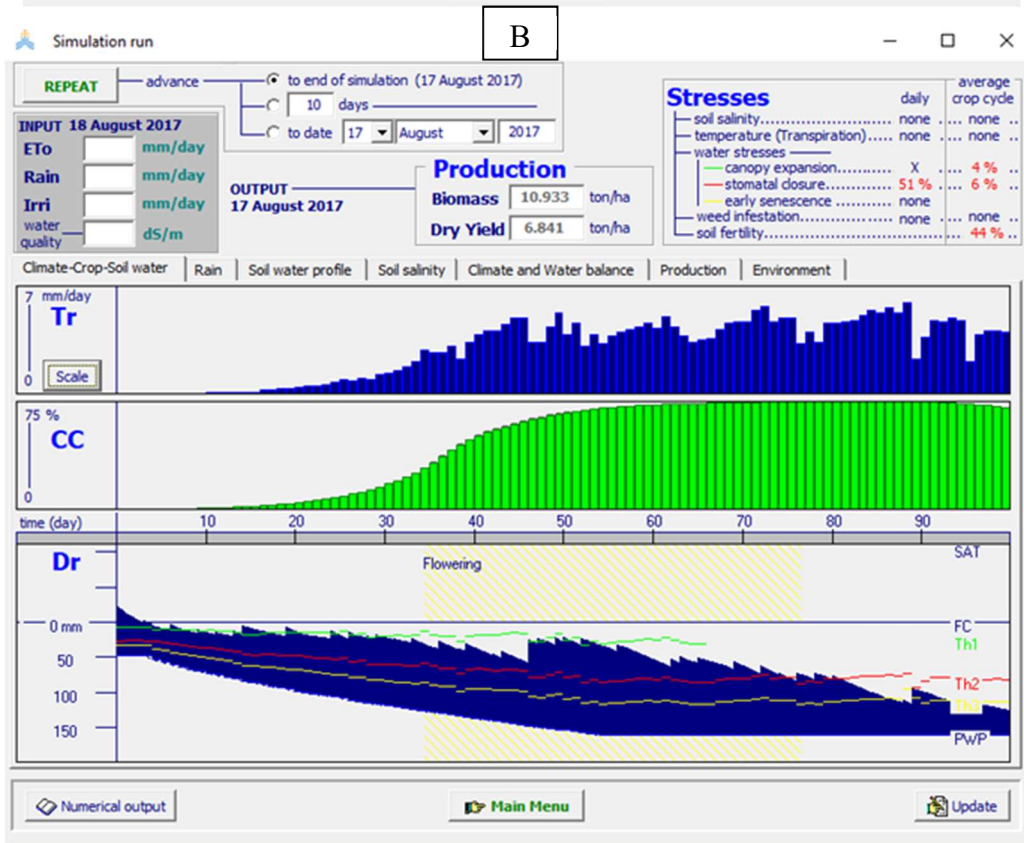
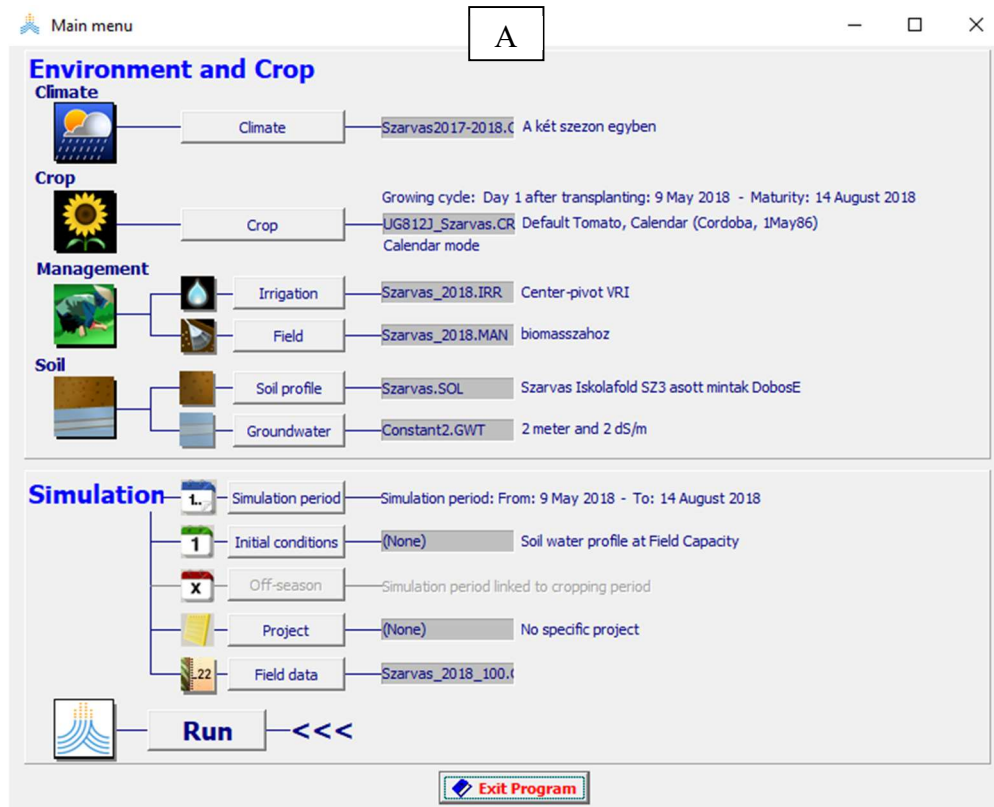
Talajfájlt a helyszínen végzett talajvizsgálat alapján készítettem el (17. ábra).

horizon	description	thickness m	TAW mm/m	Soil water retention in fine soil fraction			Penetrability hydraulic conductivity	
				PWP vol %	FC vol %	SAT	Ksat mm/day	tau
1	clay loam	0.35	138	22.9	36.7	48.0	88.1	0.42
2	clay	0.20	130	27.6	40.6	49.5	42.2	0.32
3	clay	0.30	133	24.8	38.1	47.4	48.7	0.34
4	clay	0.35	133	25.3	38.6	47.3	40.6	0.32
5	clay	0.30	133	24.6	37.9	46.4	44.6	0.33

17. ábra: A talajszelvény beállítása az AquaCrop-ban

Az öntözésfájlokat az egyes kezelésekben rögzített öntözővíz mennyiségek és kijuttatási időpontok szerint készítettem el. Az öntözővíz minőségére vonatkozólag a kiváló lehetőséget használtam. A talajvízre vonatkozólag konstans 2 m-es mélységet állítottam be. A teljes modell felépítése az 18. ábra A részén látható.

A modellezett értékek közül a biomassza adatokat, termésadatokat és a sztómazáródást kiváltó vízstressz-értékeket (St_{sto}) használtam fel az elemzésekhez (18. ábra B).



18. ábra: Az AquaCrop modell felépítése (A). A szimuláció eredményei (B).

3.6 Statisztikai elemzés

A statisztikai tesztekhez, valamint a grafikonok és diagrammok elkészítéséhez R 3.4.3-at (R Core Team, 2018), Rcommander csomagot (Fox & Bouchet-Valat, 2017), Microsoft Excel-t. Az adatok normáleloszlását Shapiro-Wilk teszttel, a homoszkedaszticitást Bartlett-teszttel ellenőriztem. A kezelések hatásának feltárására egytényezős varianciaanalízist (ANOVA), továbbá Tukey post-hoc tesztet használtam. Az adatok közötti összefüggések vizsgálatára Pearson-korrelációt, valamint lineáris regressziót használtam. A modellek hibáinak értékelésére MAE (Mean absolute error) és RMSE (Root mean squared error) mutatókat használtam.

4 EREDMÉNYEK

A doktori munkám során 2017 és 2018 években végeztem szabadföldi kísérleteket. Először a két szezon eredményeit mutatom be külön, majd ezeket összesítve. Közlöm a termésmennyiségek, szárazanyag-tartalom, vízfelhasználási együttható, lomfelszín-hőmérséklet mérések és az AquaCrop szoftverrel elkészített szimulációk eredményeit.

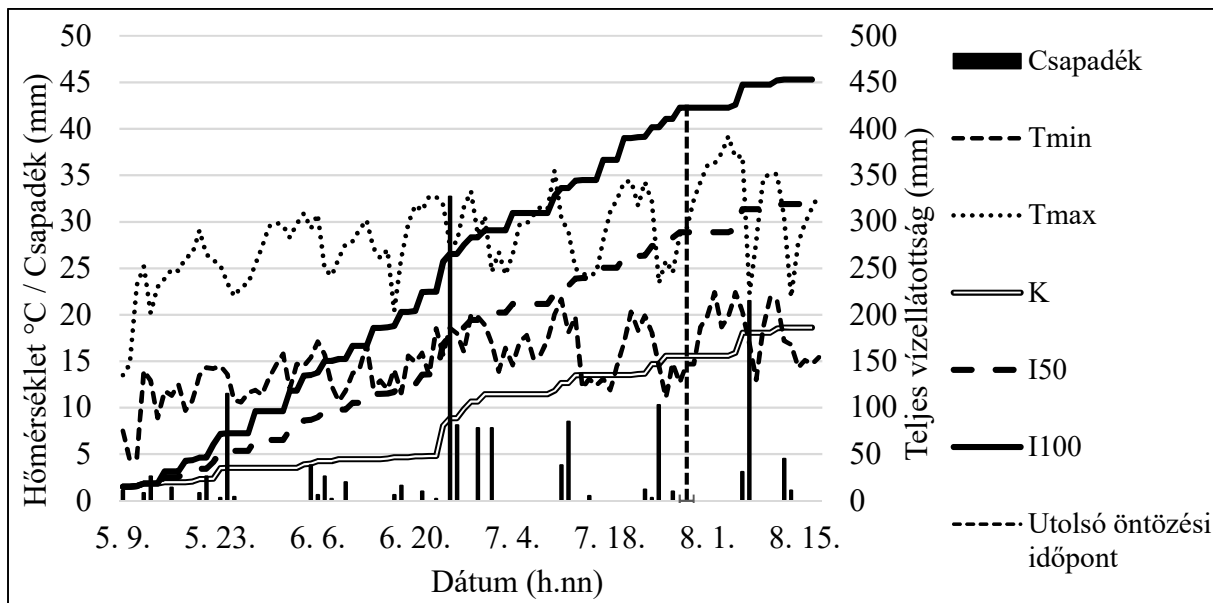
4.1 Meteorológiai és öntözővíz adatok

A meteorológiai állomás mérései alapján a teljes tenyészidő átlaghőmérséklete 21,9 °C volt. Az átlag relatív páratartalom 64,1%, míg a szezonban hullott csapadék mennyisége 146,3 mm volt. Az öntözési kezelések K parcelláját négy alkalommal öntöztem meg. Először a kiültetés után közvetlenül (15 mm), majd a perzselési kár elkerülése végett a tápanyagutánpótlások alkalmával, 10 mm, 8 mm és 8 mm vízádagokkal (összesen 41 mm). Ennek köszönhetően a kezelések vízellátása a csapadékot és az öntözővizet is figyelembe véve az alábbiak szerint alakult (19. ábra):

K: 186,2 mm

I50: 319,1 mm

I100: 453 mm



19. ábra: A 2017-es kísérleti év fontosabb meteorológiai adatai és a vízellátottság alakulása

Az utolsó öntözési időpont július 29. volt. Ennek az volt a célja, hogy a bogyók minősége javuljon, a bogyókban növekedjen a vízdoldható szárazanyag aránya a betakarítás időpontjáig. Ezt követően még 30,2 mm csapadék hullott. Hőségnapok összesen 37 alkalommal fordultak elő a tenyészidő során. 32 °C-ot meghaladó napi maximum hőmérséklet 21 alkalommal volt mérhető. Ebből 8

alkalom júliusban fordult elő, amikor a lombfelszín hőmérséklet mérések történtek. A forró nap, ahol a napi maximumhőmérséklet meghaladja a 35 °C-t, 9-szer fordult elő a szezonban.

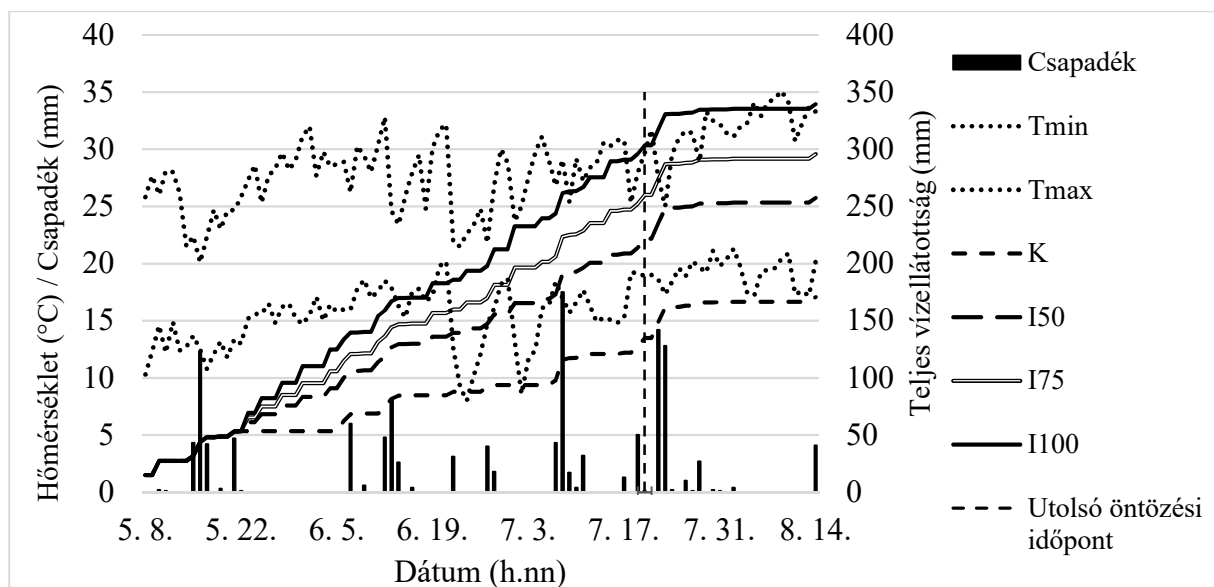
A 2018-as szezon középhőmérséklete 22,3 °C volt. A közepes relatív páratartalom 69%, míg az összes lehullott csapadék 126,9 mm volt. A K parcellát ebben a szezonban is meg kellett öntözni a kiültetést követő regenerációs időszakban, valamint a tápanyagutánpótlások alkalmával, amikor a levélvállakban esetlegesen megragadt műtrágyaszemcséket kellett lemosni a perzselési kár elkerülése végett. A K parcellában így összesen 43,8 mm-rel egészítettem ki öntözéssel a természetes csapadékot. A teljes vízellátás az alábbiak szerint alakult az eltérő vízellátású parcellákban (20. ábra):

K: 170,7 mm

I50: 257,9 mm

I75: 296,5 mm

I100: 340,4 mm



20. ábra: A 2018-es kísérleti szezon fontosabb meteorológiai adatai és a vízellátottság alakulása

Ebben a szezonban az utolsó öntözési időpont július 20-a volt, így a cut-off időszak a szezon végén 6 nappal hosszabb volt, mint a 2017-es szezonban, továbbá a hőségnapok és főként a forró napok száma is alacsonyabb volt, annak ellenére, hogy a szezon középhőmérséklete meghaladta az egy évvel korábbit. A melegebb periódus az öntözési időszakon kívülre tolódott. Ezek miatt a kijuttatott vízmennyiségek is szerényebbek az előző évinél. A kánikulai napok száma 34 db, míg a 32 °C feletti napok száma 15 volt. Ebből júliusban mindössze 3 napon volt ennél magasabb a maximum hőmérséklet. Mindössze 1 db forró nap volt a szezonban.

4.2 A precíziós öntözőgép vízkijuttatásának vizsgálata

4.2.1 Öntözési egyenletesség

4.2.1.1 Egyenletesség és pontosság

A Christiansen-féle egyenletességi tényező tekintetében az eredmények közel álltak egymáshoz. Az értékek két eset kivételével elérték a 90%-ot. A két eset az 50%-os aránynál fordult elő, de mindkét érték 86% fölött volt, amelyet az egyenletes öntözés határértékének tekinthetünk (Yari, Madramootoo, Woods & Adamchuk, 2017). A CU_C és a DU értékek is alacsonyabbak voltak a deficitelt öntözési beállításban. Egyenletes öntözésnek a legalább 80%-ot elérő DU értéket tekintik (Irmak et al., 2011). A mért adatokból számított értékek minden esetben efölött voltak (5. táblázat). A Student-féle t-próba alapján a két öntözési arány között különbség volt ($p < 0,05$), tehát a csökkentett arány hatással van az egyenletességre. Fontos azonban leszögezni, hogy az egyenletesség minden mérésnél megfelelő volt.

Mindegyik mérés alacsony szélesség mellett zajlott. A mérés közben előfordult legmagasabb átlag-szélesség $1,18 \text{ m s}^{-1}$ volt.

Az öntözés pontosságának értékelésére MAE és RMSE mutatókat használtam. A mutatók szerint az öntözés kisebb eltéréseket mutatott a két kisebb öntözési norma kijuttatásánál (12,2 és 12,7 mm). Az átlag MAE az 50%-os arányú öntözési parcellában 0,97 mm, míg a 100%-os arányú parcellában 1,44 mm. Az átlag RMSE érték 1,1 mm volt az 50%-os és 1,82 mm a 100%-os arányú öntözési parcellában (6. táblázat).

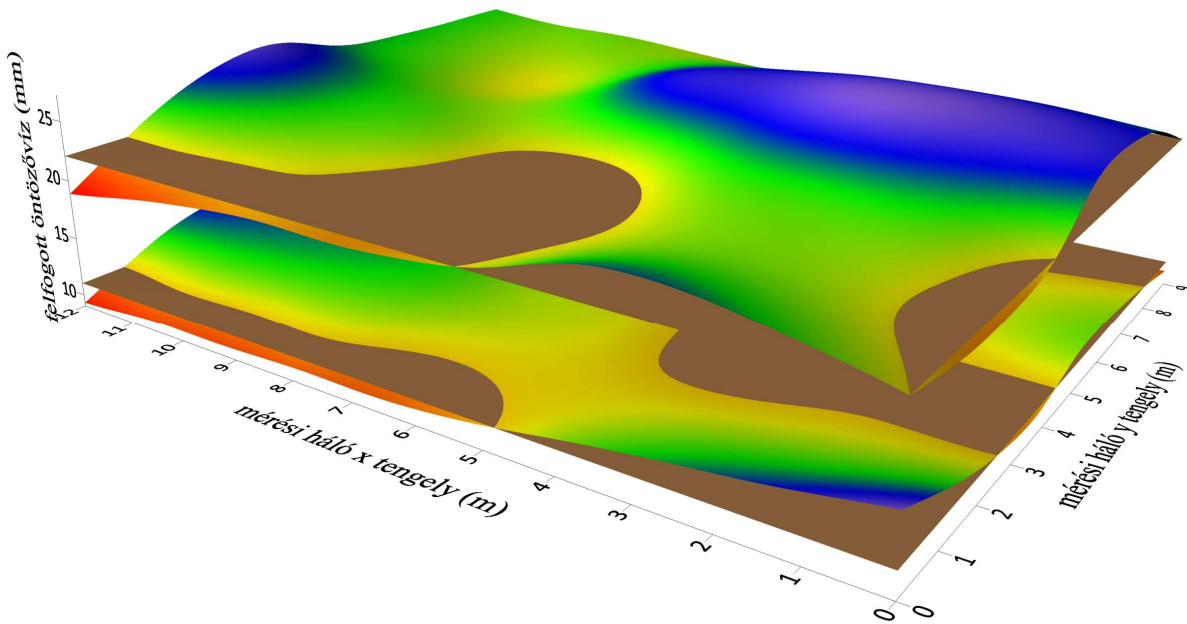
A I100 és I50 parcellák valós arányának becslésére a csapadékmérőkben felfogott öntözővíz mennyiség átlagát használtam. A 100%-hoz képest valóban 50% körül mozogtak az I50 parcellában öntözött mennyiségek. Mindössze egy alkalommal (június 6.) tért el számottevően az 50%-tól, amikor 5,4 százaléknyi víztöbblet kijuttatás volt tapasztalható (6. táblázat).

5. táblázat: A négyzethálós mérések egyenletességre vonatkozó eredményei, valamint az alul- és túllöntözés számított eredményei.

Mérés	Öntözési beállítás	Vízadagok (mm)	Egyenletesség		Térfogati becslés (m ³ ha ⁻¹)			Területi becslés (ha ha ⁻¹)	
			CU _c (%)	DU (%)	Túllöntözés	Alulöntözés	Különbőség	Túllöntözés	Alulöntözés
Mérés 1:	I100	25,1	91,8	88,7	14,1	11,8	2,3	0,51	0,48
Május 29.	I50	12,6	90,8	86,2	5,6	5,2	0,5	0,43	0,57
Mérés 2:	I100	22,1	92,8	90,0	15,8	1,1	14,8	0,83	0,17
Június 3.	I50	11,6	88,8	85,1	4,1	3,6	0,5	0,48	0,52
Mérés 3:	I100	12,2	92,3	88,7	6,1	4,0	2,1	0,53	0,47
Június 6.	I50	6,1	89,3	86,7	6,7	0,1	6,7	0,93	0,07
Mérés 4:	I100	12,7	92,9	89,5	6,4	1,4	5,0	0,67	0,33
Június 8.	I50	6,35	90,7	86,4	5,9	0,5	5,3	0,85	0,15

6. táblázat: Az öntözés eltérései az előírt mennyiségtől. Az öntözés hibaértékei. Az eltérő aránnyal öntözött parcellák valós aránya.

Mérés	Öntözési arány	Előírt vízmennyiség (mm)	Szélesség átlaga (m s ⁻¹)	MAE (mm)	RMSE (mm)	Átlag (mm)	Öntözővíz részaránya a 100%-hoz képest (%)
Mérés 1:	IR100	25,1	0,94	2,1	2,7	24,7	-
Május 29.	IR50	12,6		1,2	1,7	12,4	50,4
Mérés 2:	IR100	22,1	0,61	1,7	2,3	23,1	-
Június 3.	IR50	11,6		1,2	1,6	11,2	48,4
Mérés 3:	IR100	12,2	1,18	1,0	1,2	12,4	-
Június 6.	IR50	6,1		0,8	0,1	6,9	55,4
Mérés 4:	IR100	12,7	0,24	0,9	1,2	12,9	-
Június 8.	IR50	6,35		0,7	1,1	6,9	53,3



21. ábra: A kiadagolt vízmennyiség térbeli eloszlása az IR100 (felső) és az IR50 (alsó) öntözési arányoknál a 2. mérés alapján (a barna síkok a tervezett kijuttatási mennyiséget szemléltetik). A pirostól kékig színátmenet jelzi az alacsonyabb és magasabb értékeket.

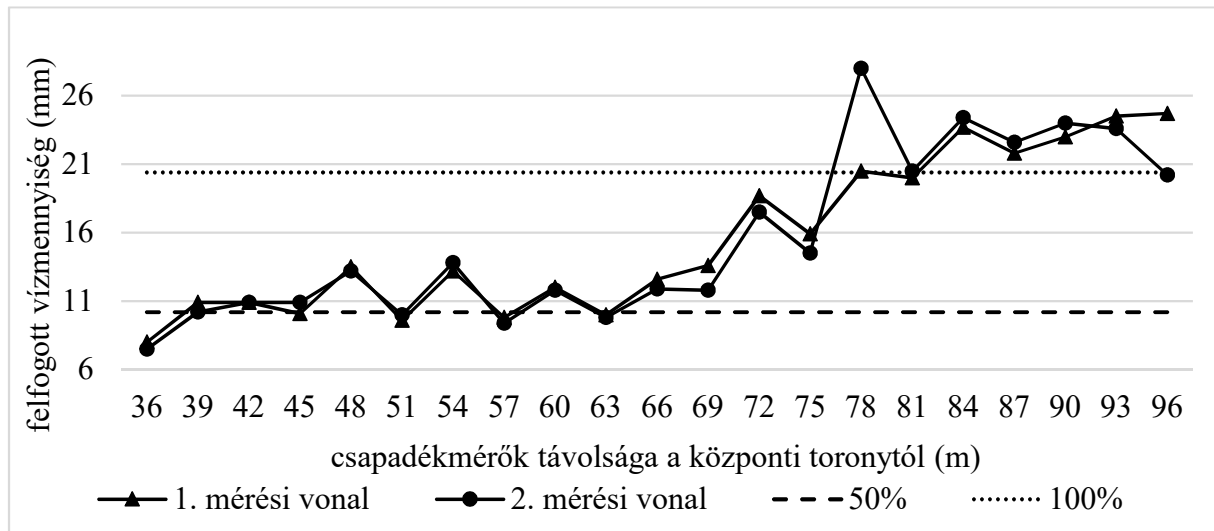
4.2.1.2 Alul- és túlöntözés

Az alul- és túlöntözés mennyisége változó volt a különböző mérési időpontokban és az eltérő aránnyal öntözött parcellákban. A legnagyobb mértékű túlöntözést a 20 mm feletti öntözéseknél tapasztaltam, 14,1 és 15,8 m³ ha⁻¹ mennyiségben. Egyéb esetekben ez a mennyiség 4,1-6,7 m³ ha⁻¹ terjedelemben változott. A modell alapján a túlöntözés átlaga 8,1 m³ ha⁻¹ volt. A mérési eredményekből készített modellek alapján az alulöntözés mértéke alacsonyabb volt. A legmagasabb érték 11,8 m³ ha⁻¹ volt, amely a 25,1 mm öntözési normánál fordult elő. A többi mérési alkalommal a minimum 0,1, a maximum pedig 5,2 m³ ha⁻¹ öntözővízzel jutott kevesebb az alulöntözött területrészekre. Az alulöntözések átlaga 3,46 m³ ha⁻¹ volt (5. táblázat). Változatos eredményeket hozott az alulöntözés értékeinek kivonása a túlöntözött mennyiségekből (21. ábra). A legkisebb különbséget a 20 mm feletti öntözési alkalmánál regisztráltam az I50 parcellában, mind a két esetben 0,5 m³ ha⁻¹-t. A legnagyobb különbséget az I100 parcellában a második mérési alkalommal tapasztaltam.

Az alul- és túlöntözött területeket nézve két esetben fordult elő, hogy az alulöntözött területek nagyobbak, mint a túlöntözöttek, annak ellenére, hogy a túlöntözött vízmennyiségek minden esetben nagyobbak voltak a hiányzó mennyiségeknél. Ez a két eset az első és második mérési időpontban az 50%-os arányban öntözött parcellákban történt meg.

4.2.1.3 Sugárirányú mérések

A mérési vonal folytonos volt a két eltérő arányú öntözésben részesült parcella között, így a kettő közötti átmeneti zónát is tartalmazták a mérések. A CU_{HH} számításánál azonban az átmeneti zónához tartozó értékeket nem vettem figyelembe. Az egyenletességek mellett így az átmeneti zóna szélességéről is szolgáltatott információt ez a típusú mérés. Ebben az esetben a mérési vonal nem merőleges a táblahatárokra, hiszen ezeket a mérési szabvány szerint a központi toronyhoz képest sugárirányban kell kijelölni (American Society of Agricultural Engineers (ASAE), 1997).



22. ábra: A sugárirányú mérés eredménye. A két vonal a két mérési vonalat jelenti.

A legalacsonyabb egyenletesség a 4. mérési alkalommal volt tapasztalható az I50 parcellában. Ugyanebben a parcellában regisztráltam a legjobb egyenletességet is a 3. mérési alkalomnál. Az összes mérés alkalmával nagyon jó egyenletességgel öntözött a körforgó szárnyvezeték (7. táblázat). A kiszámított egyenletességek két eset kivételével elérik a 90%-os egyenletességet. A két eltérő eset az I50 parcellára vonatkozik, de ezeknél is közel 90%-os egyenletesség volt mérhető.

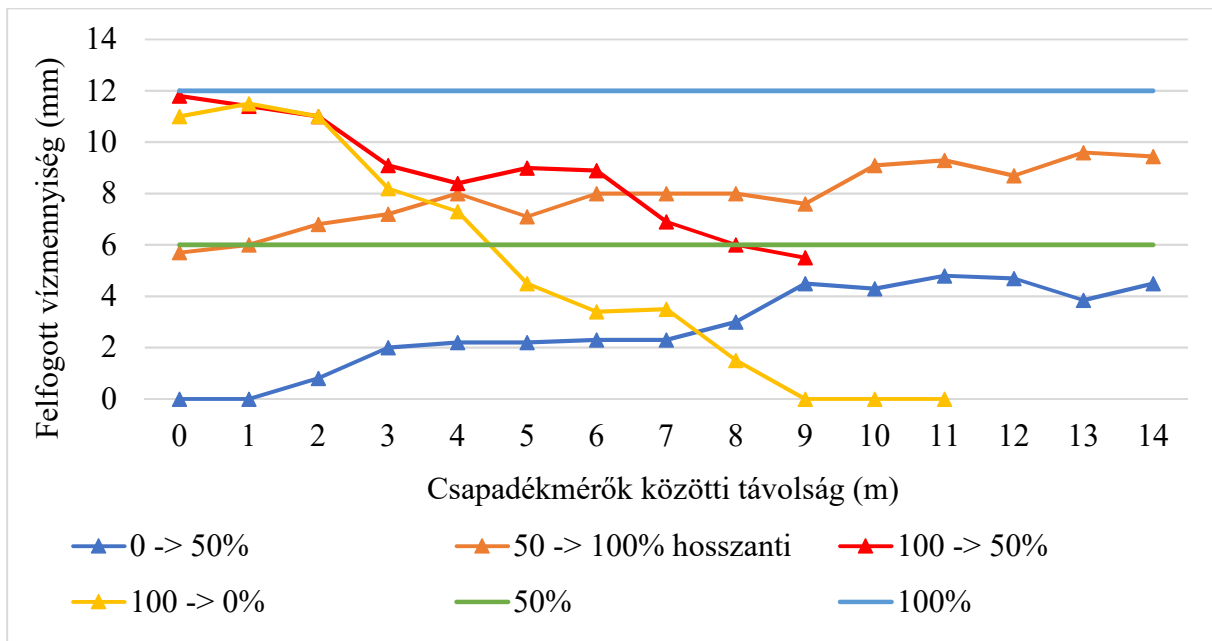
Mivel a csapadékmérők egymástól 3 m-es távolságra lettek felállítva, így pontos adatokat nehéz leszűrní az átfedési zóna szélességére vonatkozólag. Példaként a 3. mérési alkalommal mért értékeket ábrázoltam (22. ábra). Ennél a mérésnél az átmeneti zóna kb. 69 m-re kezdődik a központi toronytól mérve és 78 m-nél szűnik meg. A második mérési vonalon egy kiugró értéket regisztráltam, azonban a közelében kijelölt első mérési vonalon, a megegyező távolságban mért érték tökéletesen illeszkedik a kívánt vízmennyiséget jelző vonalra. A kiugró értéket okozhatta a szórófejekről lecsöpögő víz, amennyiben az pontosan a csapadékmérő fölé haladt el.

7. táblázat: A sugárirányú mérések alapján számított egyenletesség és mérés körülményeire vonatkozó információk.

Mérés	Öntözési arány	Átlag szélesség (m s ⁻¹)	Előírt vízmennyiség (mm)	Egyenletesség	
				CU _{HH} (%)	Átlag (mm)
Mérés 1: Június 12.	IR100 IR50	1,3	14,2 7,1	90,2 91,1	14,3 6,8
Mérés 2: June 16.	IR100 IR50		2,53	19,3 9,7	90 89,5
Mérés 3: June 19.	IR100 IR50	0,46	15,7 7,9	90 92,4	16,6 7,4
Mérés 4: June 23.	IR100 IR50		1,32	20,4 10,2	90,2 87,8

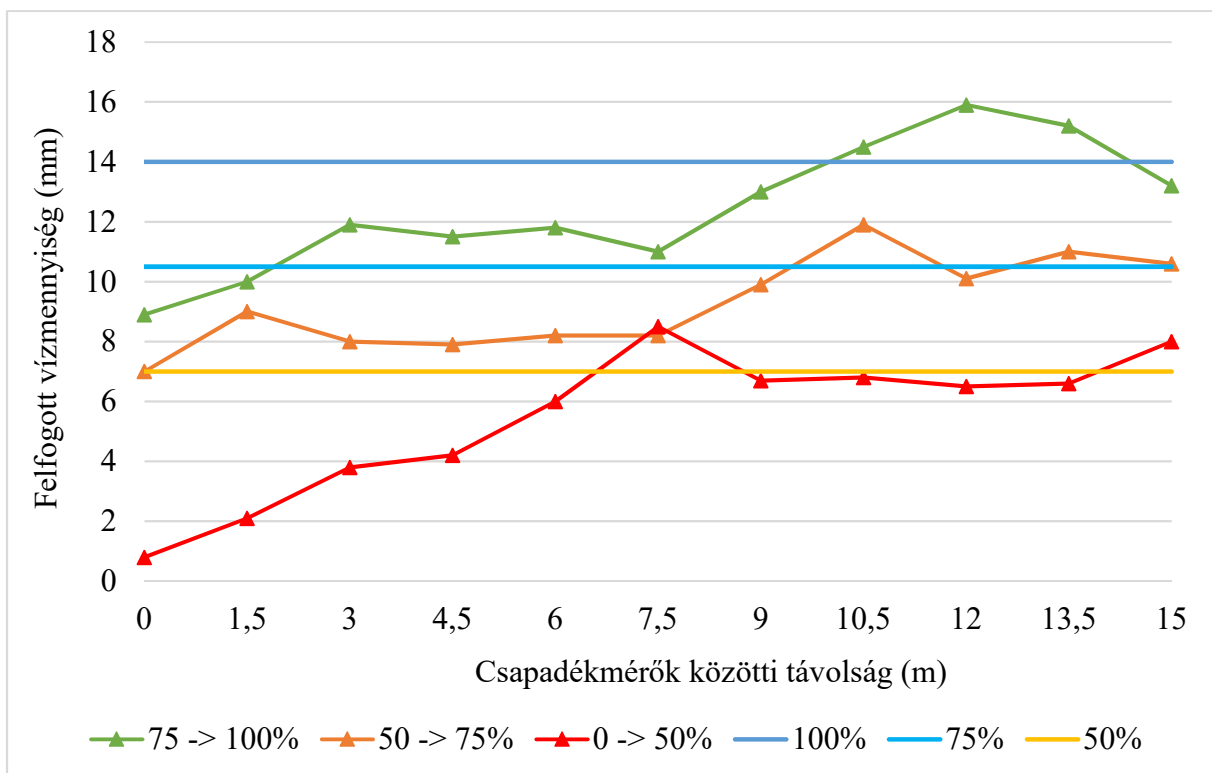
4.2.1.4 Az átmeneti zónák szélessége

Ábrázoltam a fokozatos, különböző öntözési aránnyal öntözött parcellák közötti átmenetet (23. ábra). A tábla hosszanti oldalára merőleges két mérési vonal a 0-100% és 50-100%-os átmenetekre vonatkozik. Az átmeneti zóna szélessége mindkét esetben kb. 9 m. A tábla hosszanti oldalával párhuzamosan elhelyezett mérési vonalaknál nehéz meghatározni az átmeneti sáv szélességét. Sem a 0-50%-os, sem az 50-100%-os átmenet nem éri el a kívánt vízmennyiséget a kijelölt mérési hosszokon belül. A 0-50% mérési vonalon a mért vízmennyiség a kívánatos szint (6 mm) 75%-át éri el 9 m-nél, és 80%-át 11 m-nél, de ennél közelebb nem kerül a kívánt értékhez a 14 m hosszú mérési vonalon. Az 50-100%-os mérési vonalon a kívánt vízmennyiség (12 mm) 75%-át 10 m-nél, a 80%-át 13 m-nél éri el az átmenet, de ettől közelebb nem jut az átmenet a kívánatos 12 mm-hez. Minden mérési vonal egy öntözési alkalommal került felmérésre, 1,64 m s⁻¹ átlag szélesség mellett.



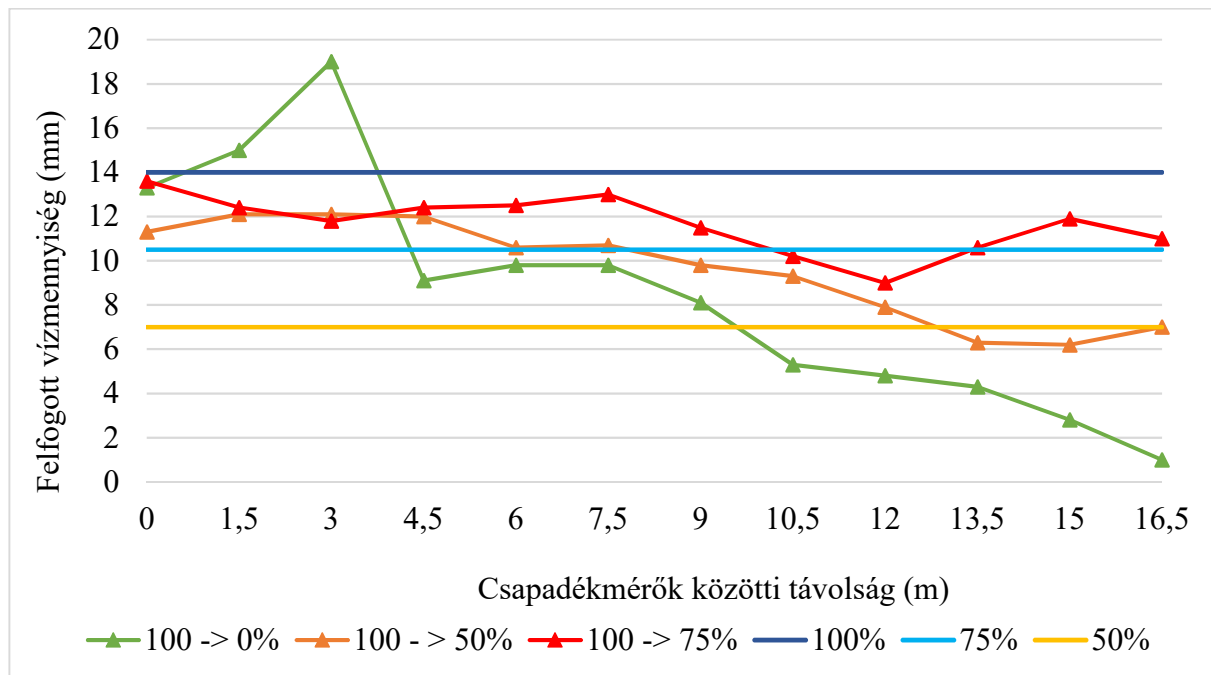
23. ábra: A parcellák közötti átmeneti sávok vizsgálatának eredménye a tábla hosszabb oldalára merőlegesen 2017-ben.

A 2018-as szezonban az átmeneti zónák szélességére vonatkozó vizsgálatokat szintén elvégeztem, hasonló mérési módszertannal. A második kísérleti évben több csapadékmérővel volt lehetőség elvégezni a méréseket, valamint 1,5 m-re növeltem a csapadékmérők közötti távolságot, így pontosítottam az első év tapasztalatait.



24. ábra: A parcellák közötti átmeneti sávok vizsgálatának eredménye a tábla hosszabb oldalával párhuzamosan 2018-ban.

Az öntözetlen kontroll parcellából az 50%-os arányú parcellába történő átmenet tökéletesen megvalósult, a szemléltető piros vonal szépen simul az elérni kívánt 7 mm-es vonalra az 24. ábra. Az átmenet 7,5 m-en belül megtörtént, de már 6 m-nél jól közelíti a 7 mm-es értéket. Az 50%-ból a 75%-os parcellába való átmenet a beállítások alapján 7 mm-ről, 10,5 mm-re való emelkedést jelent. Ezt az öntözőgép 10,5 m-en belül hajtotta végre, emellett megjegyzendő, hogy 9 m-nél, már 9,9 mm-es értéket sikerült regisztrálnom. Az I75-I100 parcellák közötti átmenet kezdőértéke viszonylag alacsony volt, így a kezdőértéknek az 1,5 m-t tekintem. Ehhez képest 9 m-en belül megvalósul a teljes átmenet, majd közel 2 mm-rel túlöntözött érték következik, amelyről visszatér a megfelelő értékre. Tehát átlagosan, az átmeneti sávok szélességének figyelembevételénél 9 m-rel szükséges számolni a táblán a hosszanti irányra nézve.



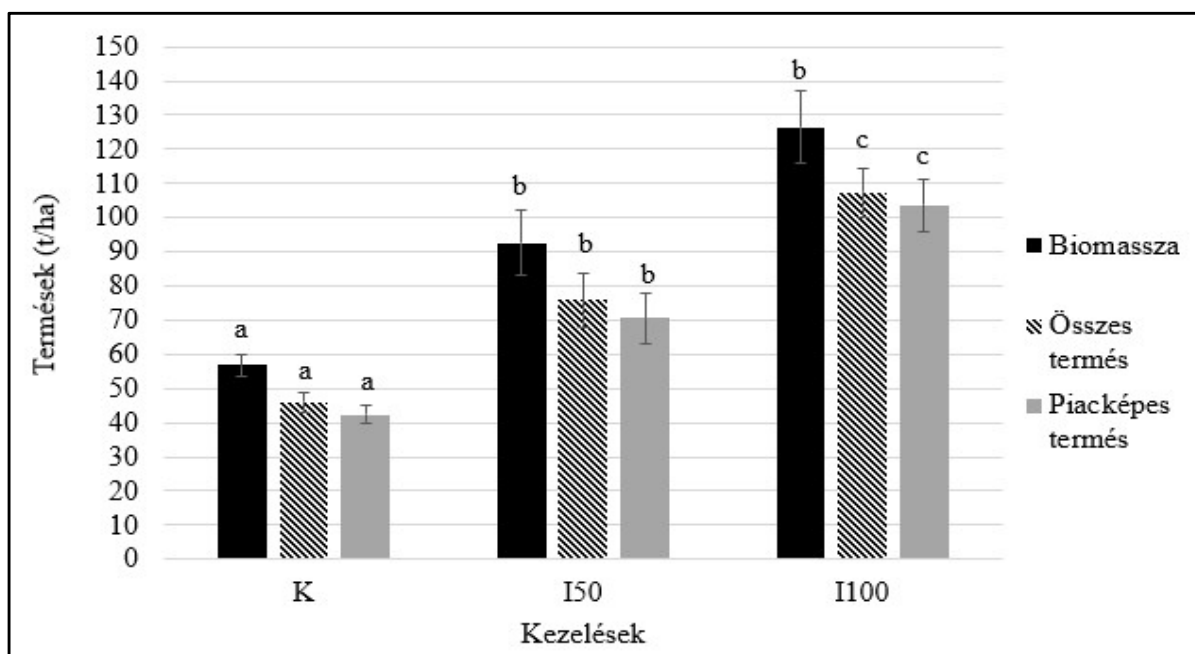
25. ábra: A parcellák szélső határain húzódó átmeneti sáv vizsgálatának eredménye 2018-ban a tábla hosszabb oldalára merőlegesen.

A 100%-ból az öntözetlen parcellába való átmenet szinte tökéletesen megvalósult a mérés során. A 13,3 mm-es induló értékről 1 mm-re csökkent a felfogott öntözővíz mennyiség a mérési vonal utolsó csapadékmérőjében. Ehhez 16,5 m-re volt szükség. A mérési vonal harmadik csapadékmérőjében regisztrált kiugró érték lehet a szórófejről történő csöpögés hatása is (25. ábra). Az I100 és I75 parcellák közötti átmeneti sáv szélességére nézve a mérés alapján nehezen adható meg a konkrét válasz. 0-tól 7,5 m-ig a 100%-os és 75%-os arány közötti intervallumban stagnálnak a mért értékek. Ezt követően 13 mm-es értékről 3 m alatt 10,2 mm-re esik, így közelében van a kívánatos 10,5 mm-es értéknek. A 24. ábra és 25. ábra mutatja be a 6 mérési vonal eredményeit, melyek közül a keresztirányú 100%-ból 50%-os arányú öntözésre való átmenet volt a legkevésbé pontos. Ennek oka, hogy a mérési vonal elején a mért értékek a kívánatos 14

mm helyett 12 mm körüli értékek voltak egészen 4,5 m-ig. Innen kezdődően csökkennek a mért értékek és 9 m-en belül csökken az 50%-os parcellában kívánatos 7 mm-es érték alá, majd marad az érték közelében.

4.3 Vízellátottság hatása a termésre az egyes kísérleti évekből

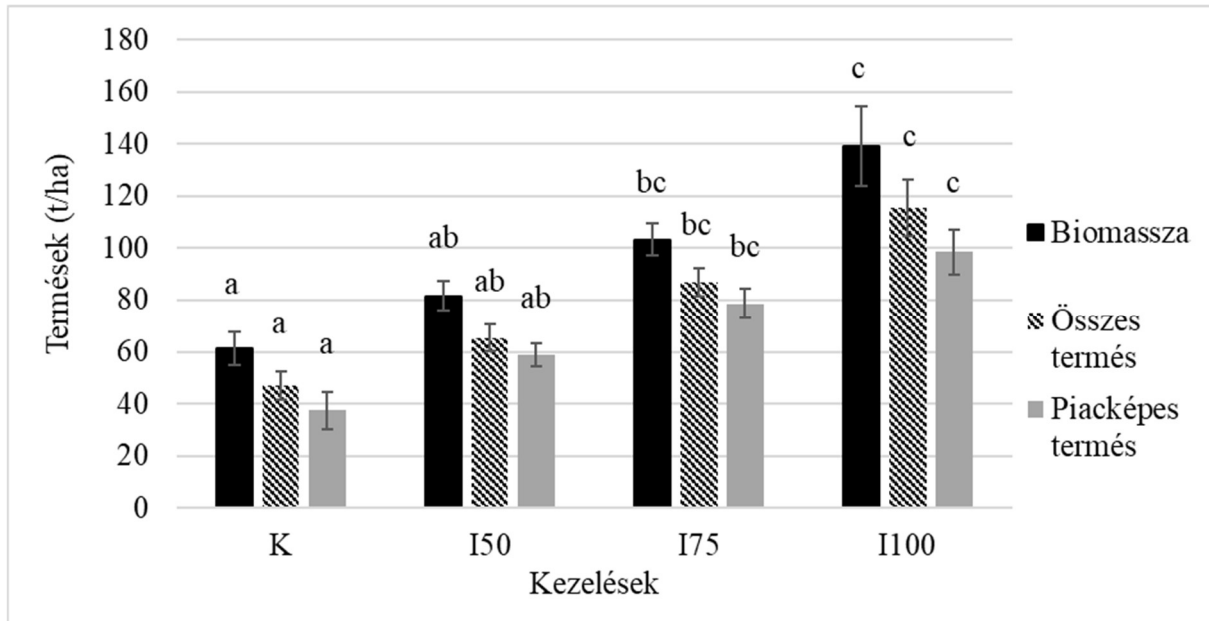
A termésátlagok alakulása a várható, emelkedő tendenciát mutatta az emelkedő vízellátás hatására a biomassza, az összes termés és a piacképes termés tekintetében egyaránt. A 100%-os vízellátás mellett a piacképes termés meghaladta a 100 t ha⁻¹-t. A kontroll piacképes termés átlaga 42,4 t ha⁻¹ lett a 2017-es évben. A kontrollhoz képest az I50 vízellátás 65,1%-kal, míg az I100 vízellátás 133,7%-kal növelte a terméshozamot (26. ábra).



26. ábra: Termésátlagok 2017-ben a különböző vízellátottság szerint. Az eltérő betűk jelentik a vízellátottsági szintek közötti szignifikáns különbséget a Tukey-teszt alapján ($p < 0,05$).

Az adatok normál eloszlása és homoszkedaszticitása lehetővé tette az egytényezős varianciaanalízis lefolytatását. Ennek eredménye alapján a növekvő vízellátás, hatással volt az összes- és a piacképes termésre, ugyanis a Tukey-teszt alapján mind a három kezelés átlagai különböznek egymástól. A biomassza esetében a post-hoc teszt nem különítette el az 50%-kal, illetve a 100%-os vízáddal öntözött beállításokat. Azonban meg kell jegyezni, hogy a p-érték alig haladta meg a 0,05-t ($p = 0,0508$). Illetve az átlagokat tekintve is jelentősnek mondható a különbség, hiszen az I50 kezelés átlaga 92,7 t ha⁻¹, míg az I100 kezelés átlaga 126,4 t ha⁻¹.

2018-ban a termésátlagok alakulása követi a 2017-es mintázatot, azonban ebben a szezonban többletinformációt jelentett a 2017-es év eredményei alapján történt kiegészítés, az I75 vízellátási szint beállítása.



27. ábra: Termésátlagok 2018-ban a különböző vízellátottság szerint. Az eltérő betűk jelentik a vízellátottsági szintek közötti szignifikáns különbséget a Tukey-teszt alapján ($p < 0,05$).

A normális eloszlások és a szórások összehasonlítása után egytényezős varianciaanalízis segítségével elemeztem az adatokat.

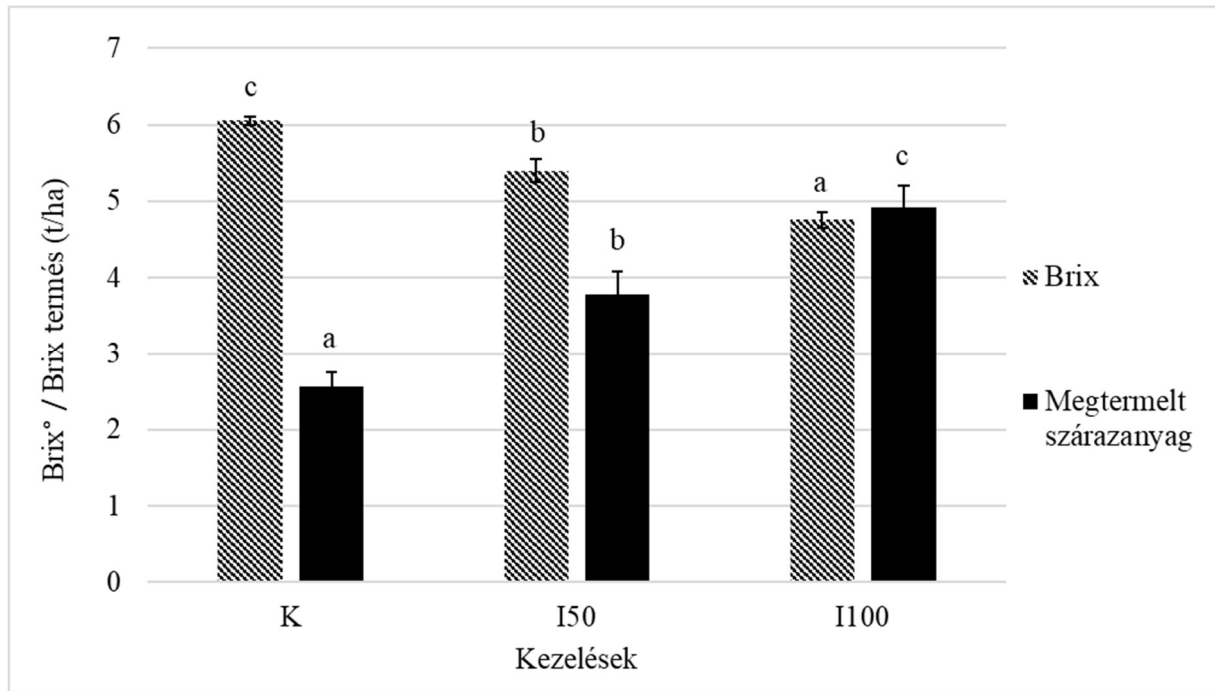
Az ANOVA eredménye minden esetben az volt, hogy az eltérő vízellátás hatással volt a terméseredményekre. A Tukey post hoc teszt eredményeként a csoportok közti különbségek a 27. ábrán látható módon alakultak, azonosan a biomassza, az összes termés és a piacképes termés esetében.

A biomasszatömeg átlaga az I100 beállításban majdnem elérte a 140 t ha^{-1} -t. Az I75-ben csak éppen meghaladta a 100 t ha^{-1} -t, majd kb. 20 tonnánként csökken az I50 és a K beállításokban. A piacképes termés átlagai egyik kezelésben sem érik el a 100 t ha^{-1} -t. A legmagasabb piacképes termést, $98,6 \text{ t ha}^{-1}$ -t a legtöbbet öntözött beállítás érte el, majd 20 tonnánként csökkent a három kisebb öntözési szintben a vízellátás szerint.

4.4 Az vízellátottság hatása a szárazanyagra az egyes kísérleti években

A vízellátás hatása a vízdoldható szárazanyag-tartalomra is egyértelmű, hasonlóan a terméseredményekhez. A vízellátás mennyiségének növelésével a °Brix csökkenő tendenciát mutat. A Tukey-teszt alapján mindhárom vízellátás szint esetében eltértek az átlagok. Az I50 vízellátás 11%-kal, az I100 vízellátás már sokkal jelentősebben 21,4%-kal csökkentette a °Brix-

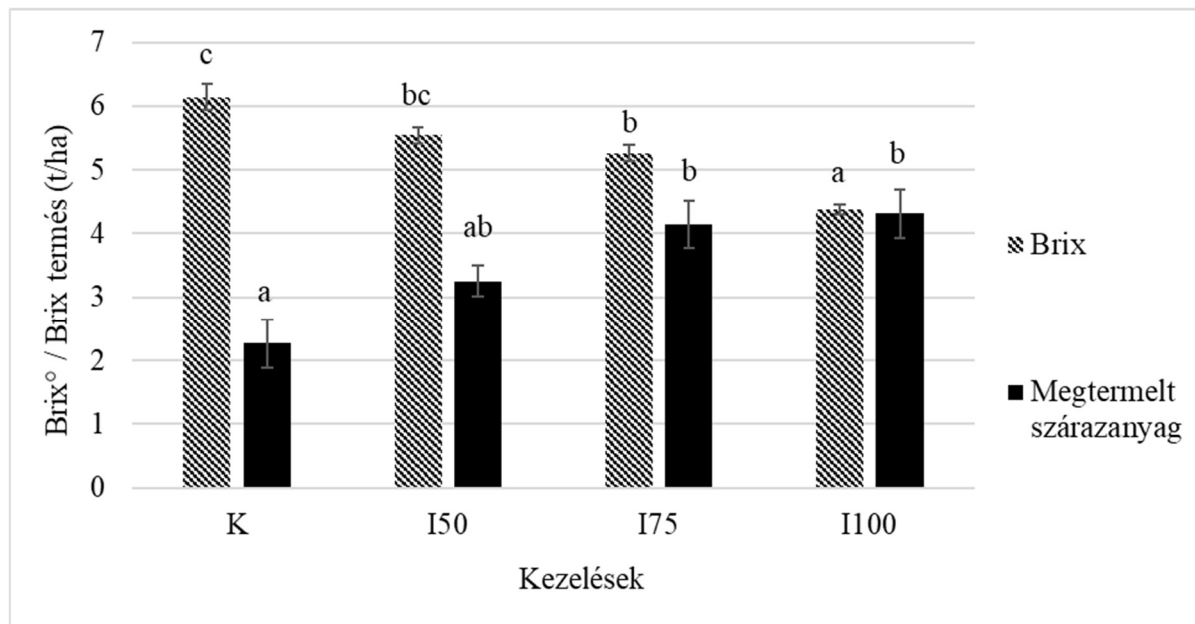
ot. Az ipari feldolgozás szempontjából kívánatos 5 °Brix-ot a K és az I50 kezelések érték el, míg az I100 kezelés átlaga 0,24 °Brix-kal elmaradt a kívánatos értéktől (28. ábra).



28. ábra: A vízdoldható szárazanyag-tartalmak alakulása 2017-ben az eltérő vízellátottság szerint. Az eltérő betűk jelentik a vízellátottsági szintek közötti szignifikáns különbséget a Tukey-teszt alapján ($p < 0,05$).

A hektáronként megtermelt szárazanyag a K beállításban lett a legkevesebb annak ellenére, hogy a bogyóknak itt volt átlagban a legmagasabb a vízdoldható szárazanyag-tartalmuk. Az I50 és I100 kezelések között több, mint 1 t ha^{-1} -os különbség van, így a két öntözött kezelést a post-hoc teszt is elkülönítette. Az I100 kezelés majdnem elérte a hektáronkénti 5 t szárazanyagot, így a legmagasabb hektáronkénti hozamot érte el, miközben az elvárásoknak megfelelően ezekben a mintákban volt a legkisebb a szárazanyag aránya.

2018-ban a vízdoldható szárazanyag-tartalom a növekvő vízellátottság szerint folyamatosan csökkent. Az egytényezős varianciaanalízis eredménye alapján jelentős különbségek alakultak ki a K, I75 és I100 beállítások között. Az I50 kezelés átlaga nem különbözött sem az I75, sem a kontroll beállításoktól. Az öntözött kezelések közül az I50 és I75 kezelések is 5 °Brix fölött maradtak. A legtöbb öntözővízzel ellátott kezelés viszont jelentősen lecsökkent, 4,37 -ra, a kontroll kezelés átlaga viszont meghaladja a 6 °Brix-ot.



29. ábra: A vízdoldható szárazanyag-tartalmak 2018-ban a különböző vízellátottság szerint. Az eltérő betűk jelentik a vízellátottsági szintek közötti szignifikáns különbséget a Tukey-teszt alapján ($p < 0,05$).

Bár jelentős különbség volt piacképes termés tekintetében az I100 és I75 kezelések között, az I100 beállítás alacsony °Brix-a miatt a szárazanyag-hozam átlagaiban már nem volt szignifikáns különbség. A két kezelés átlagai 4 t ha^{-1} szárazanyag-hozam fölötti értékeket értek el. A legmagasabb hektáronkénti szárazanyag-hozamhoz képest hozzávetőlegesen $1-1 \text{ t ha}^{-1}$ -al csökkennek az eredmények az I50 és K kezelésekben (29. ábra).

4.5 A vízellátottság hatása a vízfelhasználási együtthatóra (WUE)

Külön értékeltem a biomasszára és a piacképes termésre vonatkozó vízfelhasználási együtthatót. A statisztikai értékelés alapján a vízellátásnak nem volt hatása a vízfelhasználási együtthatóra sem a biomassza, sem a piacképes termés esetében 2017-ben. A teljes föld feletti biomassza tekintetében a kontroll érte el a legmagasabb WUE-értéket $30,51 \text{ kg m}^{-3}$ átlaggal. Az öntözött I50 kezelés és a kontroll között majdnem 4 kg m^{-3} különbség van, ennek ellenére, hogy a Tukey-teszt ezt nem hozta ki statisztikailag igazolható különbségnek. A két öntözött kezelés közötti különbség kisebb, mindössze 4% (8. táblázat).

A piacképes termésre vonatkozóan egyik WUE-érték sem haladja meg a 23 kg m^{-3} -t. A piacképes termésből számított vízfelhasználási együttható, mindhárom kezelésben közel azonos, a különbségek elhanyagolhatók.

Megvizsgáltam a betakarítási indexet is, amelyre szintén nincs hatása a vízellátásnak az egytényezős varianciaanalízis szerint 2017-ben. A legmagasabb átlag az I100 kezelésben volt 0,82-es értékkel. Az I50-es kezelés és a kontroll betakarítási indexe közel azonos.

A 2017-es szezon WUE értékeihez hasonlóan, 2018-ban sem sikerült a növekvő vízellátottság WUE-ra gyakorolt hatását kimutatni ANOVA-val és a Tukey-tesztel. A biomassza adatokra számolt vízfelhasználási együttható átlagai $31,7$ és $35,8 \text{ kg m}^{-3}$ között mozognak, ahol a legmagasabb a K és a legalacsonyabb az I50 kezeléshez tartozik (8. táblázat). A piacképes termésre számolt WUE értékeket tekintve már egyfajta trend megfigyelhető, annak ellenére, hogy a Tukey-teszt ebben az esetben sem talált különbségeket a kezelések között. Eszerint a kontrolltól a növekvő vízellátás irányába haladva enyhén növekszik a vízfelhasználási együttható, ám nem számottevően. A kontroll és az I100 beállítás átlagai között azonban 7 kg m^{-3} a különbség. A felső két érték között közel $2,5 \text{ kg m}^{-3}$, míg az alsó két érték között mindössze $0,87 \text{ kg m}^{-3}$ az eltérés.

A betakarítási indexet vizsgálva sem volt statisztikailag igazolható különbség az átlagok között. Az öntözött kezelések értékei nagyon hasonlóak, ahol mindegyik érték $0,7$ feletti. Ezeknél egy kissé alacsonyabb a kontrollban, ahol $0,61$ a betakarítási index.

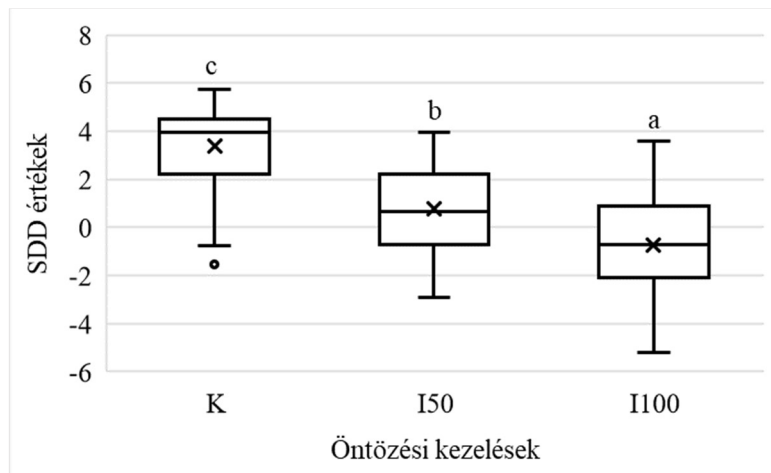
8. táblázat: A vízfelhasználási együtthatók biomasszára és piacképes termésre számítva.

Kezelések	Vízfelhasználási együttható (biomassza) kg m^{-3}		Vízfelhasználási együttható (termés) kg m^{-3}	
	2017	2018	2017	2018
K	36.4 ± 2.1	35.8 ± 3.7	27.2 ± 1.7	22 ± 4.2
I50	31.3 ± 3.2	31.7 ± 2.3	23.8 ± 2.5	22.8 ± 1.7
I75	-	34.8 ± 2	-	26.5 ± 1.9
I100	28.9 ± 2.4	33.9 ± 3.7	23.7 ± 1.7	29 ± 2.9

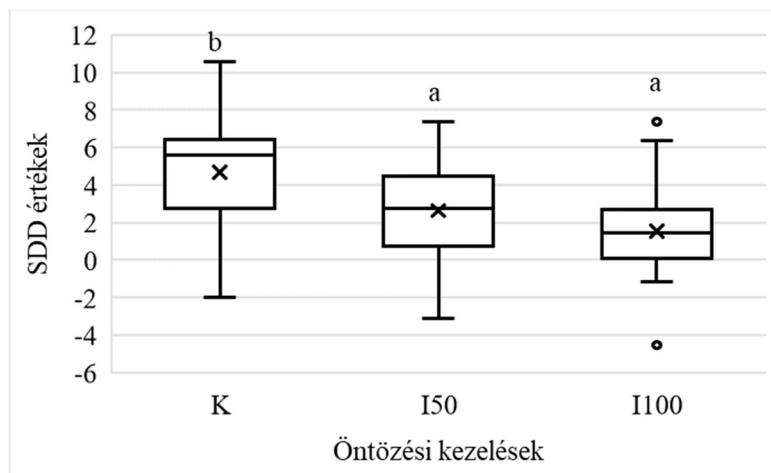
4.6 Vízellátottság hatása a lombfelszín-hőmérsékletre az egyes kísérleti években

Az infravörös távhőmérővel és a hőkamerával rögzített adatokat külön-külön értékeltem ki a két index tekintetében. Az elemzésnél 28 nap adatai alapján összehasonlítottam az átlagokat. Az SDD értékeknél az infravörös-távhőmérővel gyűjtött adatok segítségével mind a három csoportot sikerült elkülöníteni (30. ábra), míg a hőkamrával gyűjtött adatokból számolva, ugyan ez az index

nem volt ennyire informatív (31. ábra). Mindössze a kontrollt és az öntözött kezeléseket lehetett elkülöníteni, a két eltérő vízádaggal öntözött csoportot nem.

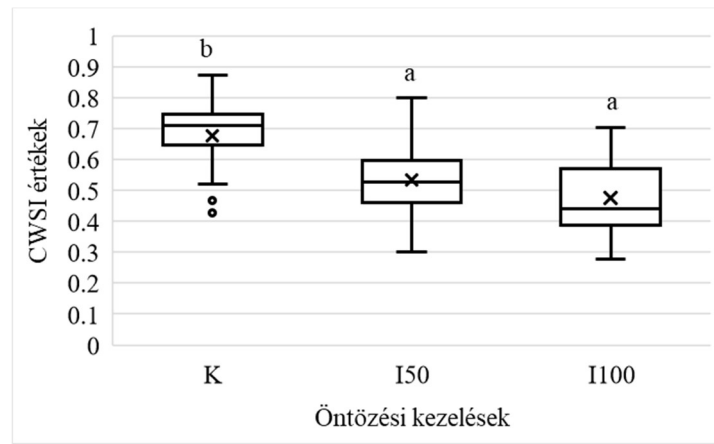


30. ábra: A lombfelszín- és léghőmérséklet különbségeinek alakulása a vízellátottság szerint az infravörös távhőmérő adataiból. Az eltérő betűk jelentik a szignifikáns különbségeket a Tukey-teszt eredményei alapján ($p < 0,05$). A dobozokban az X-ek jelölik a mediánt. A dobozokon kívüli üres karikák a kiugró értékeket.

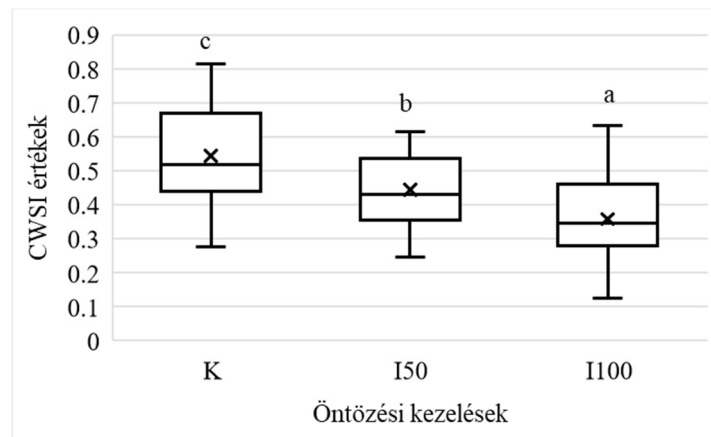


31. ábra: A lombfelszín- és léghőmérséklet különbségeinek alakulása a vízellátottság szerint a termális kamera adataiból. Az eltérő betűk jelentik a szignifikáns különbségeket a Tukey-teszt eredményei alapján ($p < 0,05$). A dobozokban az X-ek jelölik a mediánt. A dobozokon kívüli üres karikák a kiugró értékeket.

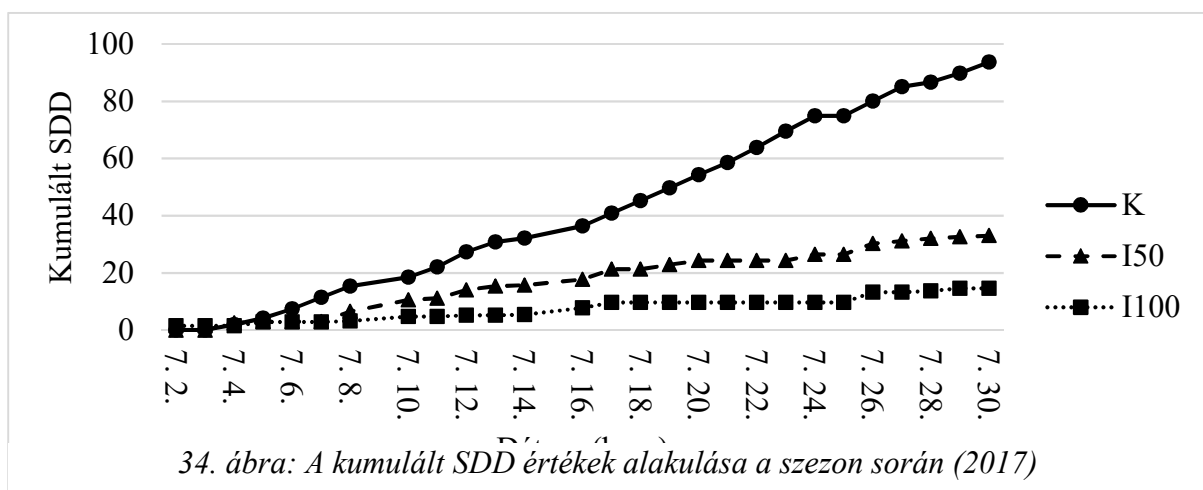
Az infravörös-távhőmérő által mért értékekből számított CWSI alapján mindössze a kontroll volt elkülöníthető a két rendszeresen öntözött kezeléstől (32. ábra), a két eltérő öntözés között nem mutatott ki különbséget a Tukey-teszt. A hőkamerával gyűjtött adatok esetében a CWSI volt a jobban használható (33. ábra), hiszen ennél is mind a három kezelést el lehetett különíteni, így jól megmutatkozott a különböző vízádaggok hatása a lombfelszín-hőmérsékletre, közvetetten a növények szárazságstressz-szintjeire.



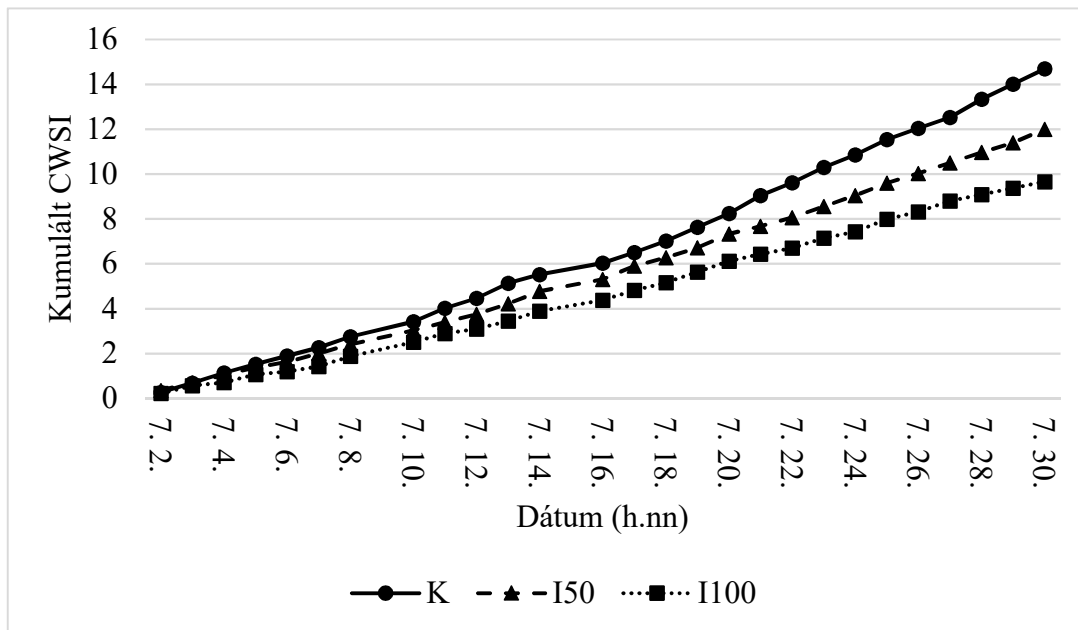
32. ábra: CWSI-értékek alakulása a vízellátottság szerint az infravörös távhőmérő adataiból (2017). Az eltérő betűk jelentik a szignifikáns különbségeket a Tukey-teszt eredményei alapján ($p < 0,05$). A dobozokban az X-ek jelölik a mediánt. A dobozokon kívüli üres karikák a kiugró értékeket.



33. ábra: CWSI-értékek alakulása a vízellátottság szerint az termális kamera adataiból (2017). Az eltérő betűk jelentik a szignifikáns különbségeket a Tukey-teszt eredményei alapján ($p < 0,05$). A dobozokban az X-ek jelölik a mediánt. A dobozokon kívüli üres karikák a kiugró értékeket.



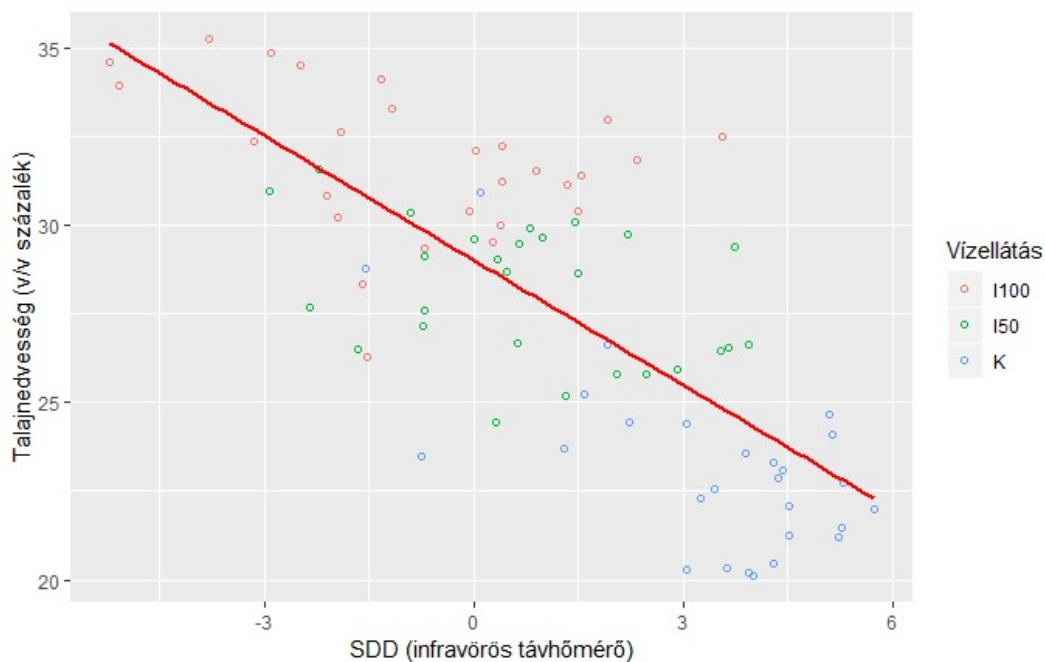
34. ábra: A kumulált SDD értékek alakulása a szezon során (2017)



35. ábra: A kumulált CWSI értékek alakulása a szezon során (2017)

A két esetet, amikor mind a három beállítás statisztikailag is elkülöníthető volt vonaldiagramon is ábrázolom. A napi értékeket kumulálva az idő függvényében, jól láthatóan, hamar elkülönülnek a kezelések és a hónap végére valóban hangsúlyos különbség alakult ki mindhárom kezelés között mind az SDD (34. ábra), mind a CWSI (35. ábra) értékek tekintetében.

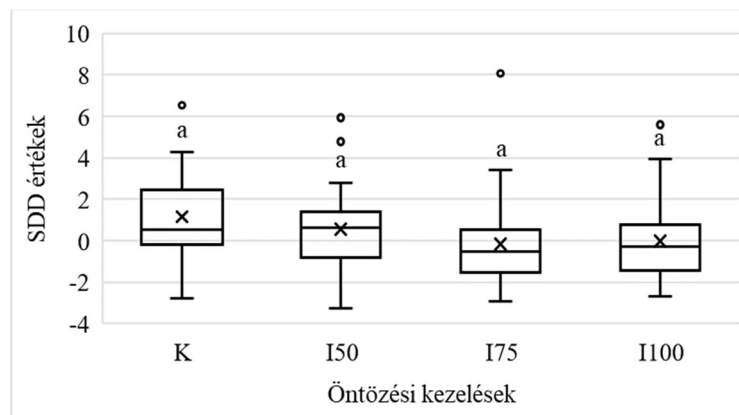
Mivel az SDD értékek negatív számok is lehetnek, így ezek a kumulálásnál csökkentenék a stresszértéket, ami logikailag nem megfelelő, hiszen egy korábban bekövetkezett stresszhatást az elkövetkező stresszmentes időszak nem ellensúlyoz. Emiatt a negatív értékeket 0-nak vettem a kumulálásnál, mint stresszmentes nap.



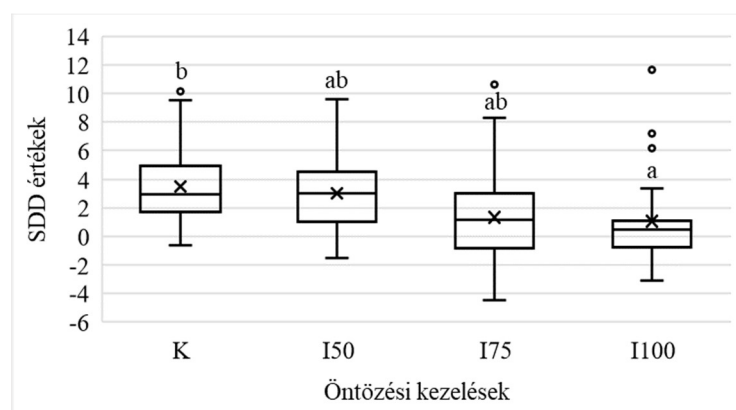
36. ábra: A talajnedvesség és az SDD értékek kapcsolata 2017-ben ($n=81$)

A lineáris regresszió szerint a talajnedvesség hatással volt a növények szárazságstressz szintjére. A legerősebb R^2 értéket (0,53) az infravörös távhőmérővel felvett adatokból számított SDD értékek mutatták a talajnedvességgel (36. ábra).

Az adatok a 2018-as szezonban 24 napra vonatkoznak. Az infravörös távhőmérővel felvett adatokból számított lombfelszín- és léghőmérséklet különbségek alapján nem lehetett az eltérő vízellátottság hatását kimutatni (37. ábra), a statisztikai teszt egyik csoport között sem talált különbséget. A hőkamerával készített képekből kinyert adatok alapján számított lombfelszín- és léghőmérséklet különbségek már a kontroll és az I100 öntözési beállítás között mutatott ki különbséget (38. ábra), azonban a két szélső vízellátás közötti I50 és I75 beállítások egyik csoporttól sem tértek el a teszt szerint.

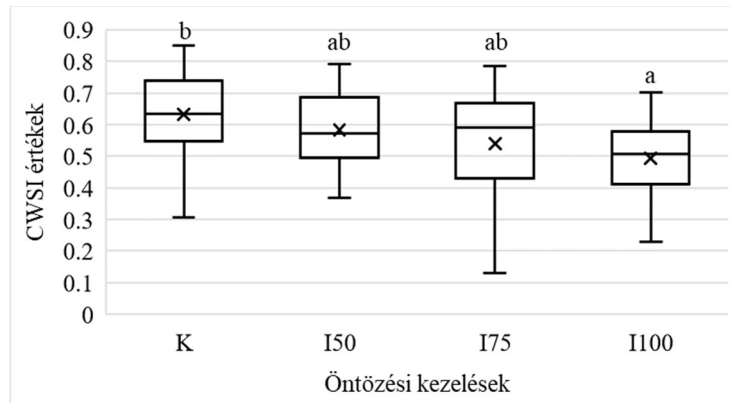


37. ábra: A lombfelszín- és léghőmérséklet különbségeinek alakulása a vízellátottság szerint az infravörös távhőmérő adataiból (2018). Az eltérő betűk jelentik a szignifikáns különbségeket a Tukey-teszt eredményei alapján ($p < 0,05$). A dobozokban az X-ek jelölik a mediánt. A dobozokon kívüli üres karikák a kiugró értékeket.

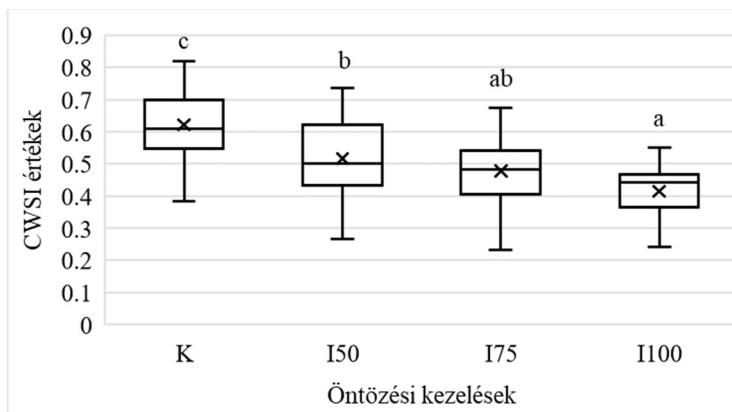


38. ábra: A lombfelszín- és léghőmérséklet különbségeinek alakulása a vízellátottság szerint a termális kamera adataiból (2018). Az eltérő betűk jelentik a szignifikáns különbségeket a Tukey-teszt eredményei alapján ($p < 0,05$). A dobozokban az X-ek jelölik a mediánt. A dobozokon kívüli üres karikák a kiugró értékeket.

A CWSI értékek informatívabbak voltak az SDD értékeknél. Az infravörös távhőmérő adataiból számított index-számok alapján, a hőkamerás SDD értékekhez hasonlóan, csak a K és I100 kezelés volt elkülöníthető és a két másik öntözési beállítás egyiktől sem különbözött (39. ábra). A legjobb eredményt a hőkamerás képekből nyert hőmérséklet adatokból számított CWSI értékek adták (40. ábra). Ezek alkalmasak voltak a különbségek pontosabb kimutatására és az öntözés hatásának részletesebb feltárására. A Tukey post hoc teszt alapján elkülöníthető volt a kontroll és az I50 kezelés átlagai, valamint az I100 és az I50 kezelés. Az I75 öntözési beállítás nem különbözött sem az I50, sem az I100 kezelésektől.



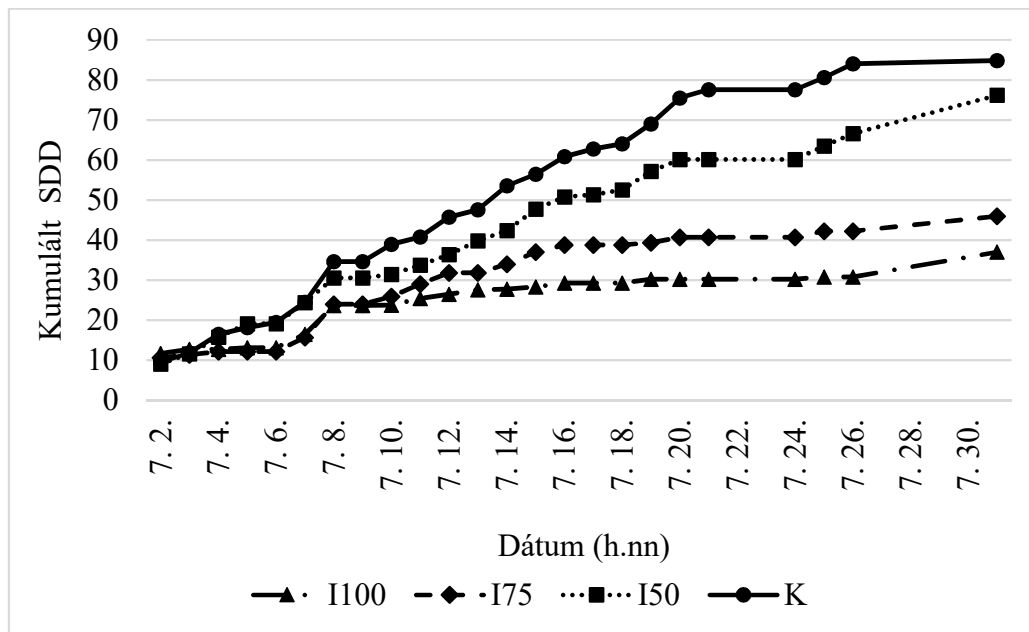
39. ábra: CWSI-értékek alakulása a vízellátottság szerint az infravörös távhőmérő adataiból (2018). Az eltérő betűk jelentik a szignifikáns különbségeket a Tukey-teszt eredményei alapján ($p < 0,05$). A dobozokban az X-ek jelölik a mediánt. A dobozokon kívüli üres karikák a kiugró értékeket.



40. ábra: CWSI-értékek alakulása a vízellátottság szerint a termális kamera adataiból (2018). Az eltérő betűk jelentik a szignifikáns különbségeket a Tukey-teszt eredményei alapján ($p < 0,05$). A dobozokban az X-ek jelölik a mediánt. A dobozokon kívüli üres karikák a kiugró értékeket.

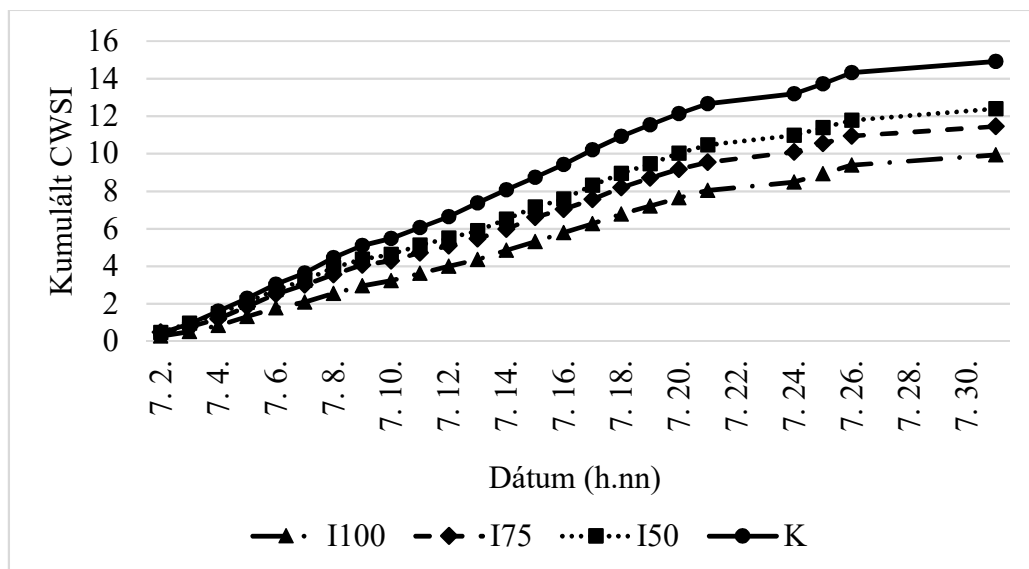
Az átlagok összehasonlítása alapján, így jobb, informatívabb az SDD értéknél a hőkamera adataiból számított verzió, emiatt ezt és a különbségeket a legrészletesebben feltáró hőkamerás CWSI adatokat választottam ki, hogy a szárazságstressz-szinteket kumulálva értékeljem. Az SDD értékeket tekintve a vizsgálat első 6-7 napjában még együtt halad a K és az I50, valamint az I75 és

I100 kezelések. Ezt követően egyre szembetűnőbbé válik a különbség a kezelések között és a mérésoroztat végére a legnagyobb különbség az I75 és I50 kezelések között alakul ki (41. ábra).



41. ábra: Kumulált SDD értékek alakulása a szezon során (2018)

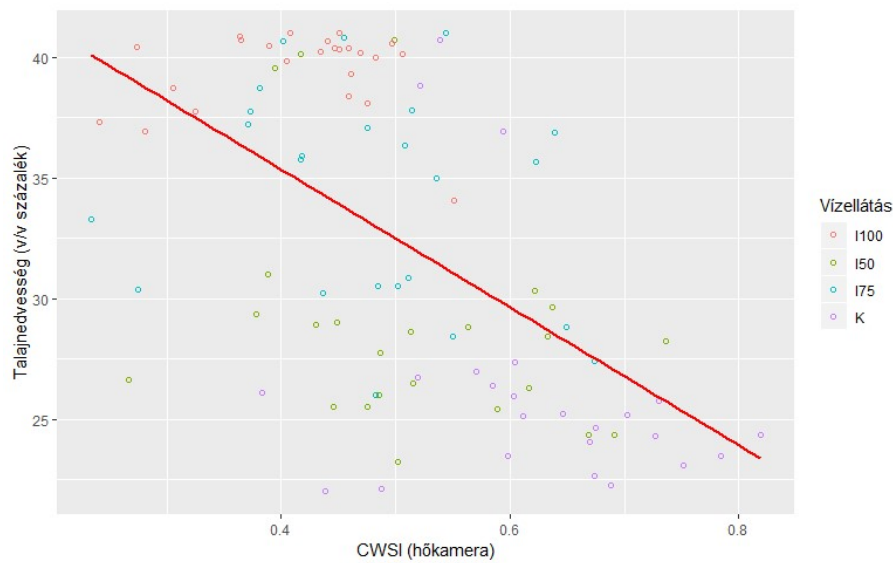
A CWSI értékeket tekintve egyenletesen válnak el a kezelések. Július hónap végére a növényi vízstressz index alapján a legnagyobb különbség a kontroll és az I50 kezelés között alakul ki. Az öntözött kezelések végső értékei így jól elkülönülnek a kontrolltól (42. ábra).



42. ábra: Kumulált CWSI értékek alakulása a szezon során (2018)

A talajnedvesség hatását a növények szárazságstressz állapotára lineáris regresszióval vizsgáltam. A legmagasabb R^2 -értéket a talajnedvesség és a hőkamerás CWSI értékek kapcsolata mutatta ($R^2=0,31$, $p<0,001$). A 2017-es évben talált összefüggésnél csak gyengébb értékeket kaptam a 2018-as szezon adataira. A kontroll, I100 és I50 kezelések értékei tömbökbé tömörülnek, azonban

az I75 kezelés értékei nagyon szórtak, de főként az I100 beállítás értékeihez közel helyezkednek el (43. ábra).



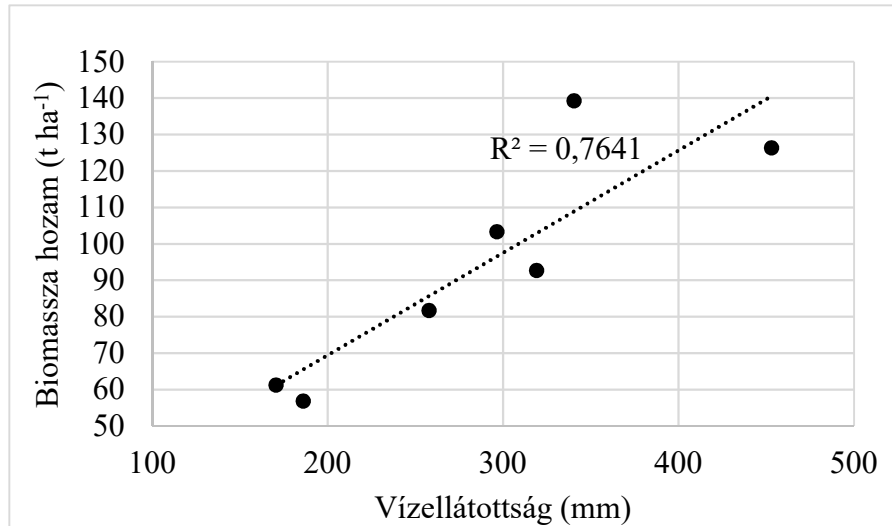
43. ábra: A talajnedvesség és az CWSI értékek kapcsolata 2018-ban (n=96)

4.7 A két kísérleti év összevont eredményei

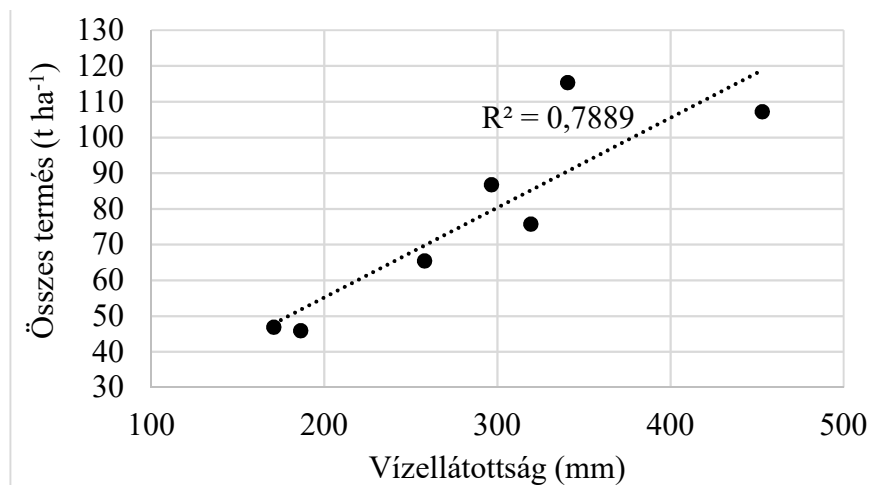
Mindkét kísérleti évben elvégeztem a deficit öntözési kísérletet és a júliusi szárazságstressz vizsgálatokat. Emiatt több változó is rendelkezésemre állt, hogy a két kísérleti év eredményeit több szempontból együtt értékelhessem. Így összefüggéseket kerestem a biomassa hozamok, termésátlagok, szárazanyagtartalmak, vízhasznosítási együtthatók, szárazságstressz értékek viszonyában. A 2017-es év három vízellátottsági szintje és a 2018-as szezon négy vizsgált vízellátási szintje együtt összesen 7 adatpontot jelentett, amely elégséges lineáris regressziók lefuttatására.

4.8 Az eltérő vízellátottság hatása a mért változókra

A növényállományok számára hozzáférhető vízmennyiség és a biomassa kapcsolata szignifikáns volt $p=0,01$ szinten. Az összefüggés erőssége $R^2=0,76$, amely alapján látható a vízellátás jelentős szerepe a paradicsom biomassa termelésében (44. ábra).

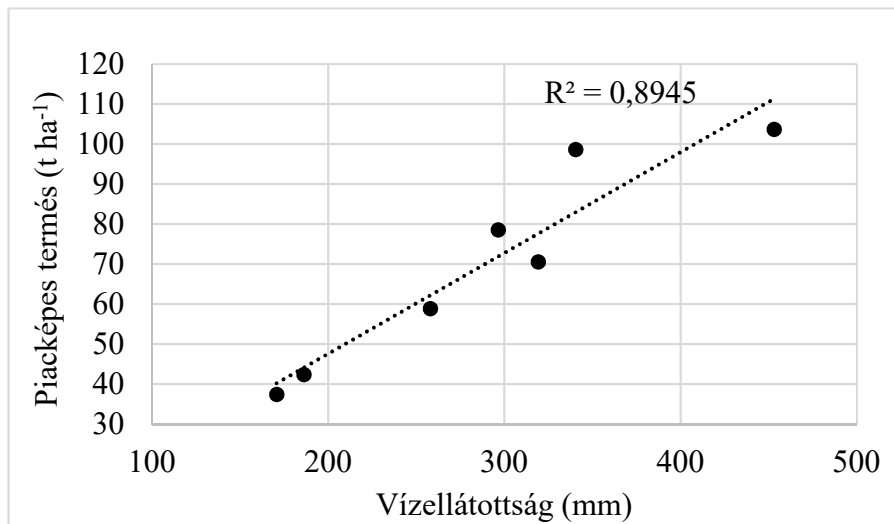


44. ábra: Vízellátottság és a biomassa hozam kapcsolata a két év eredményei alapján ($n=7$).



45. ábra: Vízellátottság és az összes termés kapcsolata a két év eredményei alapján ($n=7$).

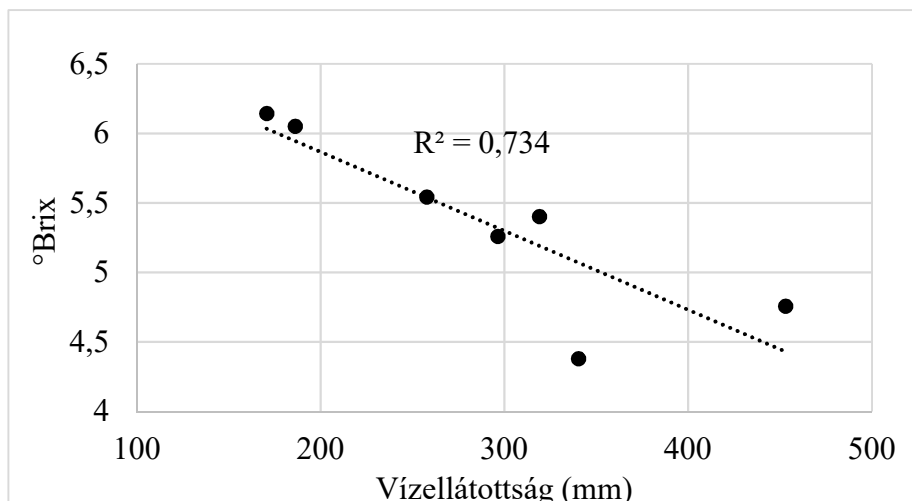
A vízellátás össztermésre gyakorolt hatása erősebb ($R^2=0,79$), mint a biomasszánál kimutatott kapcsolat. A lineáris regresszió szignifikáns volt $p<0,01$ szinten (45. ábra).



46. ábra: Vízellátottság és a piacképes termés kapcsolata a két év eredményei alapján ($n=7$).

A piacképes termésre való hatás $p < 0,01$ szinten szignifikáns volt a vízadagok tekintetében, amely a terméshozamok közül a legerősebb kapcsolatot mutatta ($R^2=0,89$). Ennek magyarázata lehet, hogy a teljes föld feletti biomasszába a szár és levelek is benne foglaltak, amelyek szárazanyag-tartalma magasabb, mint a bogyóké (46. ábra). Az összes termésnél a piacképtelen, beteg bogyók zavarhatnak. A piacképes termés kategóriába viszont csak egészséges bogyók kerültek, amelyekben magas a víz aránya, emiatt erősebb a víz hatása erre a mutatóra.

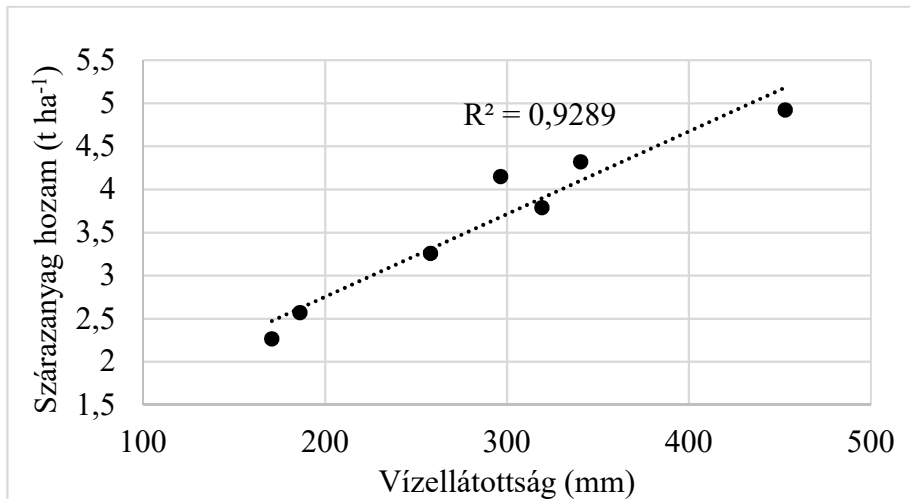
A vízellátás a szárazanyag arányát is befolyásolta a bogyókban, mind a bogyók szárazanyag-tartalma, mind a hektáronként megtermelt szárazanyag tekintetében. A vízdoldható szárazanyag-tartalomra gyakorolt hatása $p=0,01$ szinten szignifikáns volt és a vízellátás 73%-ban magyarázta a bogyók víz-szárazanyag arányát a többi befolyásoló faktor mellett (47. ábra).



47. ábra: Vízellátottság és a vízdoldható szárazanyag-tartalom kapcsolata a két év eredményei alapján ($n=7$).

A legerősebb összefüggést ($R^2=0,93$, $p<0,01$) a vízellátás és szárazanyag hozam között találtam a termelési szempontból jelentős változókra nézve (48. ábra). Ennek oka lehet, hogy a szárazanyag hozam a piacképes termésből és a vízoldható szárazanyagból számítható, melyekre egyenként is erősen hat a vízellátás. Így a kettőt összevonva, hatásuk tovább erősödik.

Az ANOVA és Tukey tesztek nem mutattak különbségeket a vízfelhasználási együtthatóra nézve egyik kísérleti évben sem. Ehhez hasonlóan a WUE-értékeket lineáris regresszióval vizsgálva sem találtam szignifikáns hatást ($p=0,22$) a két év adatait együtt vizsgálva.

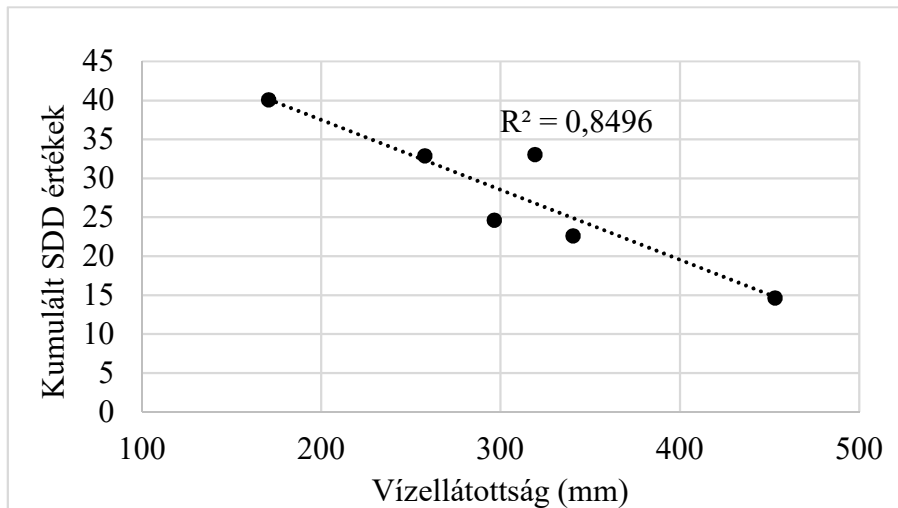


48. ábra: Vízellátottság és a vízoldható szárazanyag-hozam kapcsolata a két év eredményei alapján ($n=7$).

4.9 A vízellátottság és a szárazságstressz indexek kapcsolata a két kísérleti év alapján

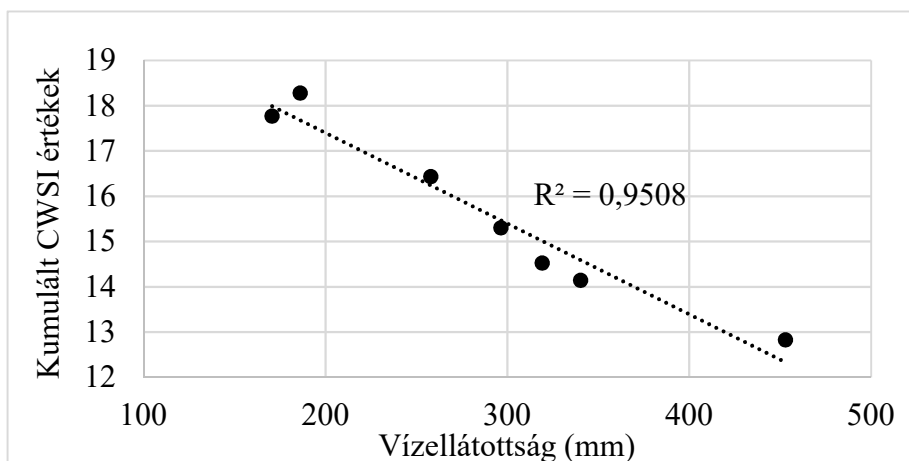
Mind a két kísérleti évben egységesen július hónapban végeztem lombfelszín hőmérséklet méréseket. Az infravörös távhőmérővel érzékelt adatok 2017-ben és 2018-ban is 28 naptári napra vonatkoznak. Emiatt az SDD és CWSI indexek 28 nap adataiból kumulált értékeit felhasználva kerestem az összefüggéseket.

A vízellátottság szignifikáns hatást gyakorolt az SDD értékekre, azonban ehhez a 2017-es év kontroll kezelésének kiugró értékét ki kellett hagyni az elemzésből. Ennek oka, hogy a második legmagasabb értéktől (2018-ban a kontroll) 133%-kal magasabb volt. Így a hat adatpontra számítva $R^2=0,85$ a kapcsolat erőssége (49. ábra).



49. ábra: Vízellátottság és a kumulált SDD-értékek kapcsolata a két év eredményei alapján ($n=6$).

Az indexek alkalmazhatóságának összehasonlításából már kiderült, hogy a CWSI index szofisztikáltabb az egyszerűbb SDD értéknél. Újabb bizonyítékot jelent erre, hogy a vízellátottság és a kumulált CWSI értékek között nagyon meggyőző kapcsolatot sikerült kimutatni ($R^2=0,95$), meggyőző, $p<0,01$ szignifikancia szinten (50. ábra).

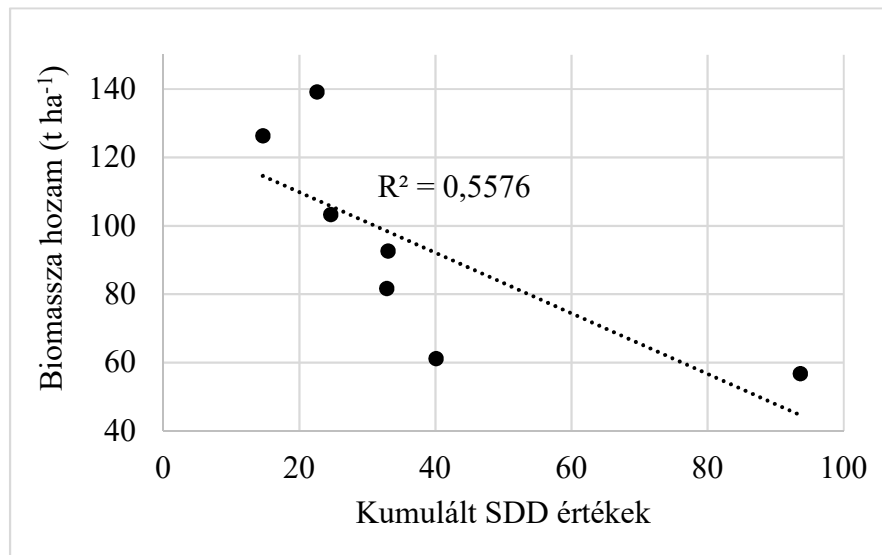


50. ábra: Vízellátottság és a kumulált CWSI-értékek kapcsolata a két év eredményei alapján ($n=7$).

4.10 A szárazságstressz indexek összefüggései a termelési mutatókkal

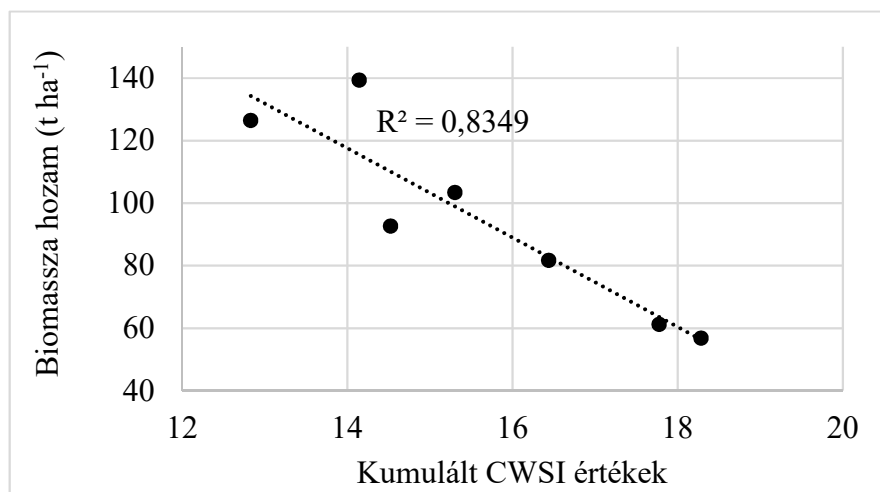
Az indexek összehasonlítását tekintve további információval szolgált az indexek termelési mutatókkal való összevetése. Így összefüggés vizsgálatokat végeztem az SDD és CWSI értékeket külön-külön vizsgálva.

A kumulált SDD értékeket tekintve közepes erősségű az összefüggés a biomassza hozammal. A változók közötti interakció mindössze 56%-os (51. ábra), sőt a lineáris regresszió szignifikanciája éppen az elfogadható határon van ($p=0,05$).



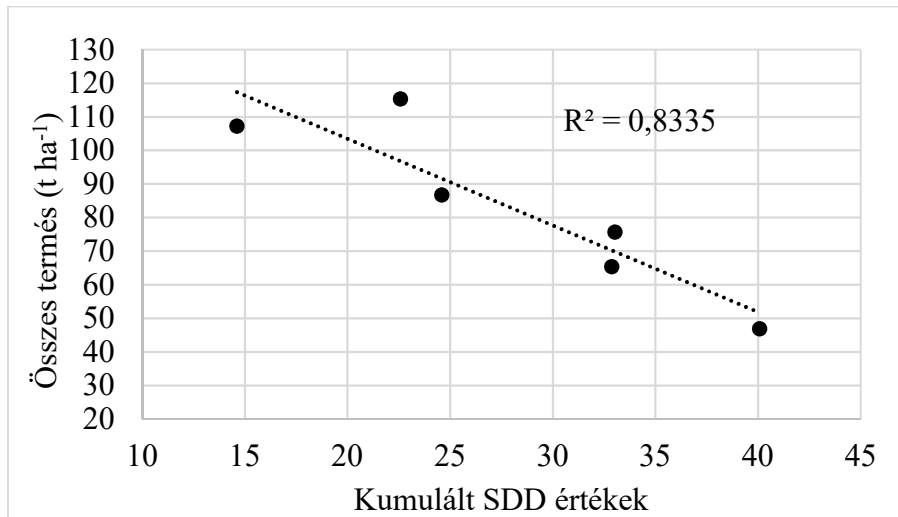
51. ábra: Víztstressz (SDD) hatása a biomassza hozamra a két év eredményei alapján ($n=7$).

Szignifikáns ($p<0,01$) és jó összefüggést ($R^2=0,83$) mutatott a kumulált CWSI értékek és a biomassza hozam összevetése, amely alapján megállapítottam, hogy a nagyobb összesített szárazságstressz értékek kisebb biomassza hozamhoz vezetnek (52. ábra).

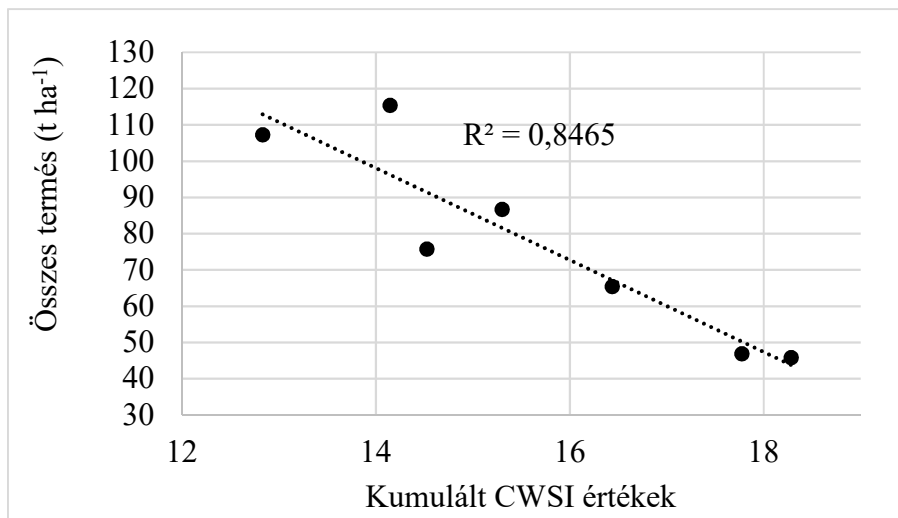


52. ábra: Víztstressz (CWSI) hatása a biomassza hozamra a két év eredményei alapján ($n=7$).

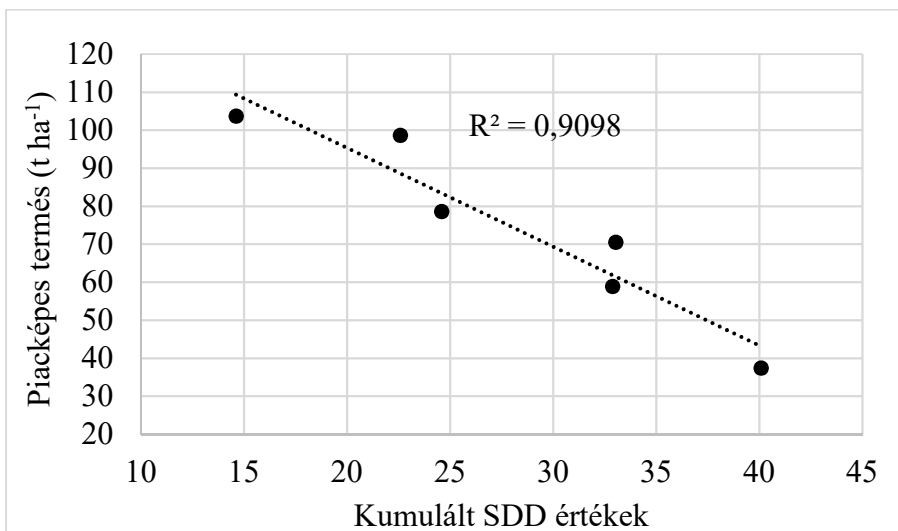
Az összes termés és a kumulált SDD értékek összefüggés vizsgálata 7 adatpontra nem volt szignifikáns ($p=0,06$), ezért a lineáris regressziót 6 adatra vizsgáltam meg, ahogy azt a vízellátottság és a kumulált SDD-értékek vizsgálatánál tettem. Így a kapcsolat szignifikáns volt ($p=0,01$) és erős kapcsolatot tárt fel ($R^2=0,83$) (53. ábra). A CWSI értékek az összes terméssel is kiváló összefüggést mutatnak (54. ábra). a lineáris kapcsolat erősségét 0,85 determinációs együttható jellemzi a meggyőző szignifikancia szint mellett ($p<0,01$).



53. ábra: Víztstressz (SDD) és az összes termés kapcsolata a két év eredményei alapján (n=6).

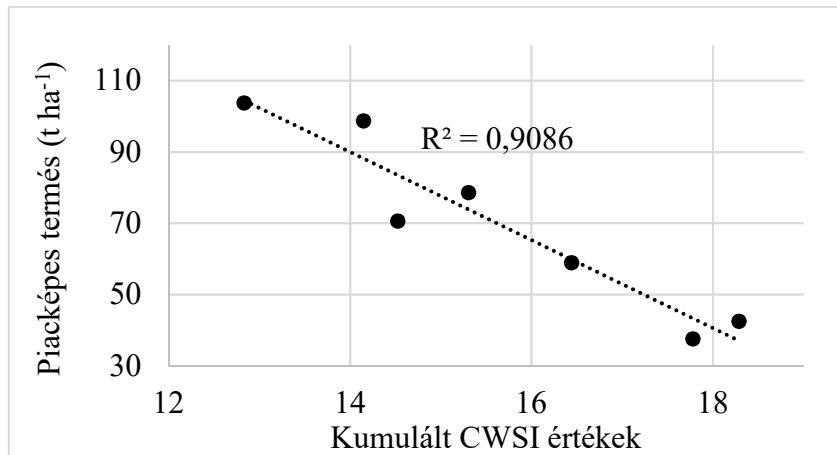


54. ábra: Víztstressz (CWSI) és az összes termés kapcsolata a két év eredményei alapján (n=7).



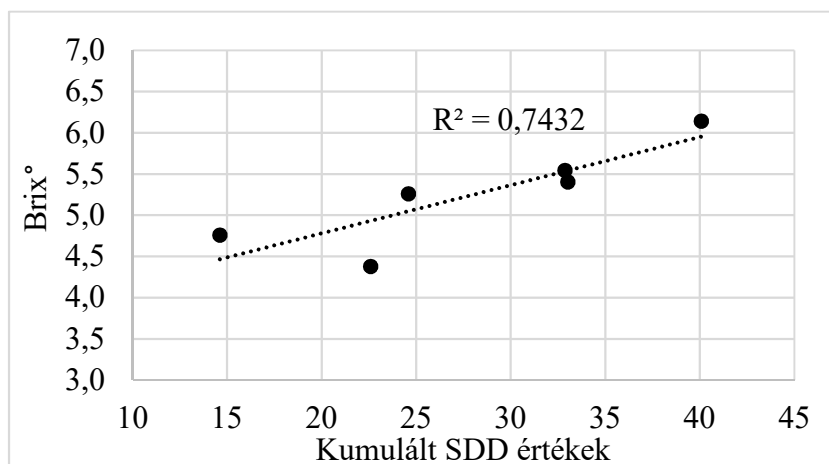
55. ábra: Víztstressz (SDD) és az piacképes termés kapcsolata a két év eredményei alapján (n=6).

A kumulált SDD értékek és a piacképes termés viszonya sem volt szignifikáns 7 adatpontra a lefuttatott lineáris regresszió szerint ($p=0,07$). A 2017-es K beállítás adatát kivéve a vizsgálatból, 6 adatpontra szignifikáns ($p<0,01$) és szoros kapcsolatot ($R^2=0,91$) sikerült feltárni (55. ábra).



56. ábra: Vízstressz (CWSI) és a piacképes termés kapcsolata a két év eredményei alapján ($n=7$).

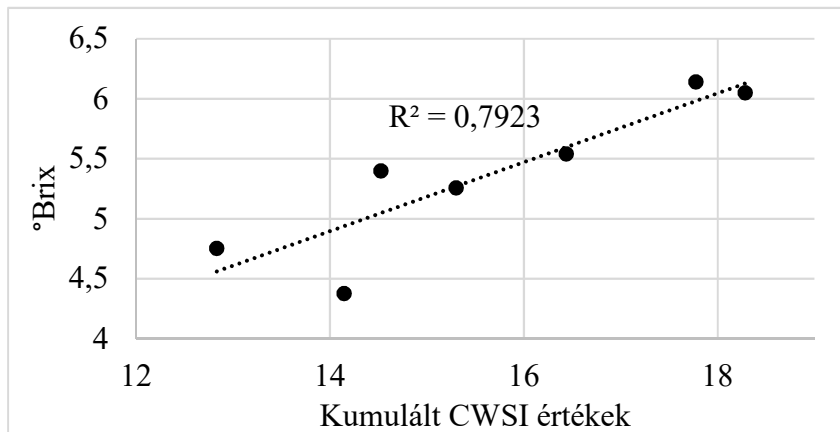
A vízellátottság és termelési mutatók tekintetében megfigyelhető volt a biomasszától a piacképes termésig haladva az összefüggés erősségének növekedése, amely igaz a kumulált SDD és CWSI értékekre is. A CWSI és piacképes termés szignifikáns ($p<0,01$) és erős ($R^2=0,91$) kapcsolatot az mutatott (56. ábra).



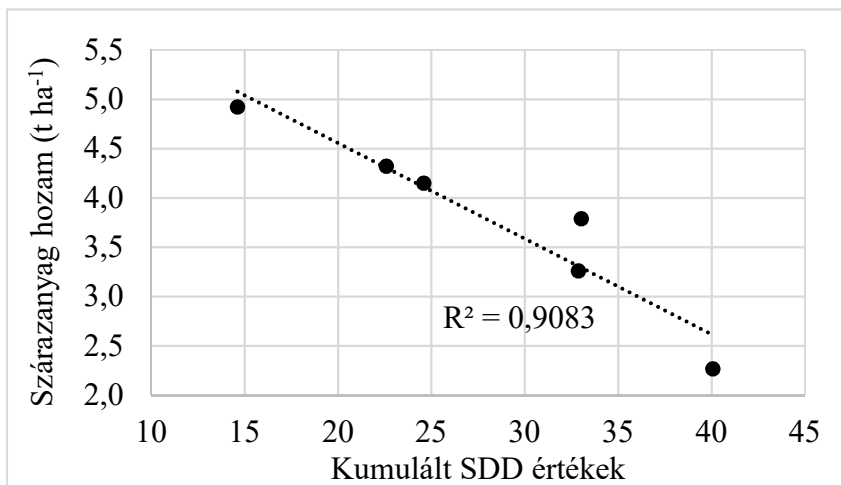
57. ábra: Vízstressz (SDD) és a bogyók vízdoldható szárazanyag-tartalmának kapcsolata a két év eredményei alapján ($n=6$).

Az SDD értékek 7 adatpontra számítva nem mutattak szignifikáns összefüggést a bogyók átlag vízdoldható szárazanyag tartalmával sem ($p=0,08$). A 6 pontra számított lineáris regresszió szignifikáns ($p<0,05$) a determinációs együttható értéke 0,74 (57. ábra). A CWSI kumulált értékei

szignifikáns ($p < 0,01$) és közepesen szoros ($R^2 = 0,79$) kapcsolatot mutattak a bogyók szárazanyag arányával (58. ábra).



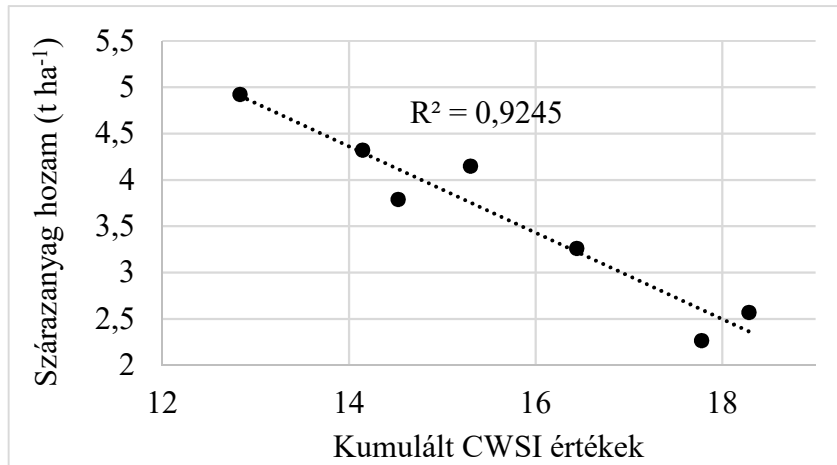
58. ábra: Víztstressz (CWSI) és a bogyók vízoldható szárazanyag-tartalmának kapcsolata a két év eredményei alapján ($n=7$).



59. ábra: Víztstressz (SDD) és a szárazanyag-hozam kapcsolata a két év eredményei alapján ($n=6$)

Az SDD értékei a szárazanyag hozam tekintetében is csak 6 adatpontra vizsgálva mutattak szignifikáns kapcsolatot ($p < 0,01$ és $R^2 = 0,91$) (59. ábra). A CWSI értékek alapján a növekvő szárazságstressz megbízhatóan ($p < 0,01$) okoz csökkenést ($R^2 = 0,92$) a szárazanyag hozamban (60. ábra).

A WUE értékek és a vízellátottság közötti kapcsolat elemzésére lefolytatott összefüggés vizsgálatok nem az elvárásoknak megfelelően alakultak. Annak ellenére, hogy a vízfelhasználási együttható a megtermelt hozamtól és a felhasznált vízmennyiségtől függ, nem mutatott szoros összefüggéseket egyikkel sem. A piacképes termésadatokból számított WUE-értékek nem mutattak szignifikáns összefüggéseket lineáris regresszióval vizsgálva egyik vizsgált stresszmutatóval sem.



60. ábra: Víztressz (CWSI) hatása a szárazanyag-hozamra a két év eredményei alapján ($n=7$).

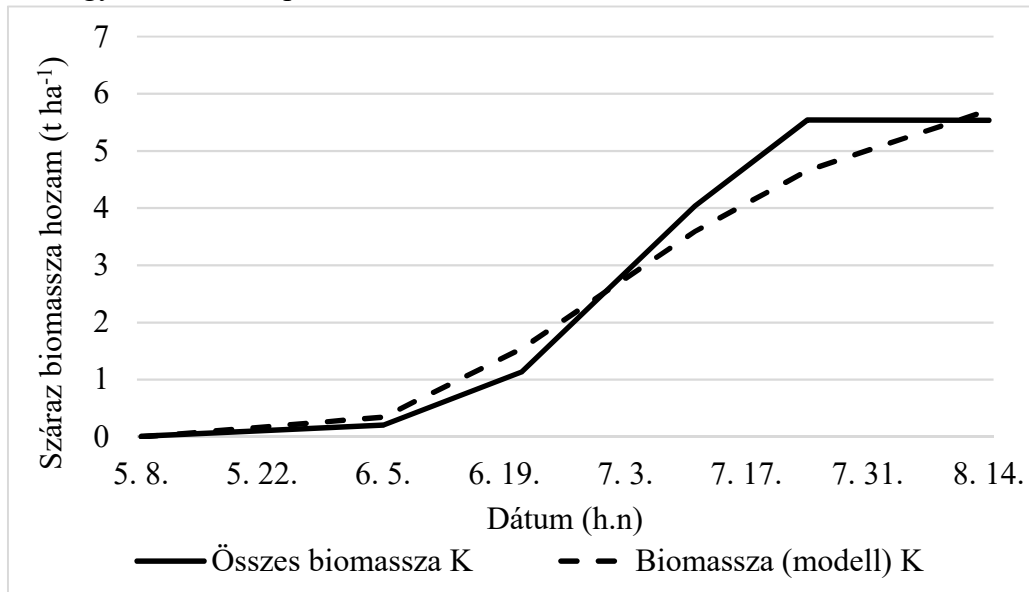
A föld feletti biomassza hozamból számított WUE-értékek és a két index között szintén nem sikerült szignifikáns összefüggést kimutatni. A szignifikancia szint $p=0,89$ az SDD- és $p=0,35$ a CWSI-értékekre nézve.

4.11 Az AquaCrop szimulációk eredményei

Mind a két kísérleti évre készítettem szimulációkat. A 2017-es évre vonatkozólag a szezonvégi termés adatokat (biomassza és bogyótermés) és a sztómazáródásra vonatkoztatott víztressz koefficientst vizsgáltam. A 2018-as évet kibővítettem az évközi biomassza adatokkal is, melyeket kezelésenként külön vizsgállok. A termésadatokkal és a víztresszel kapcsolatban a valós és a modellezett adatok közötti korrelációt vizsgáltam.

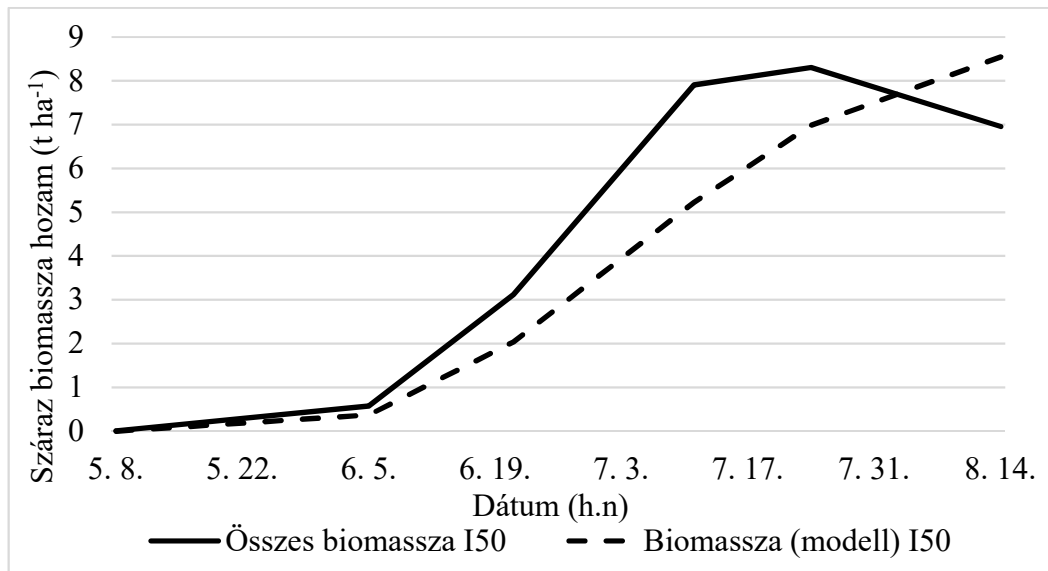
4.11.1 A paradicsom biomassza-gyarapodás modelljének vizsgálata 2018-as adatok alapján

A valós és modellezett biomassza adatok összevetésének egy lehetséges módja, ha egymás mellett ábrázoljuk őket vonaldiagrammokon. Minél inkább hasonlók a vonalak és minél jobban illeszkednek egymásra, annál pontosabb a modell.



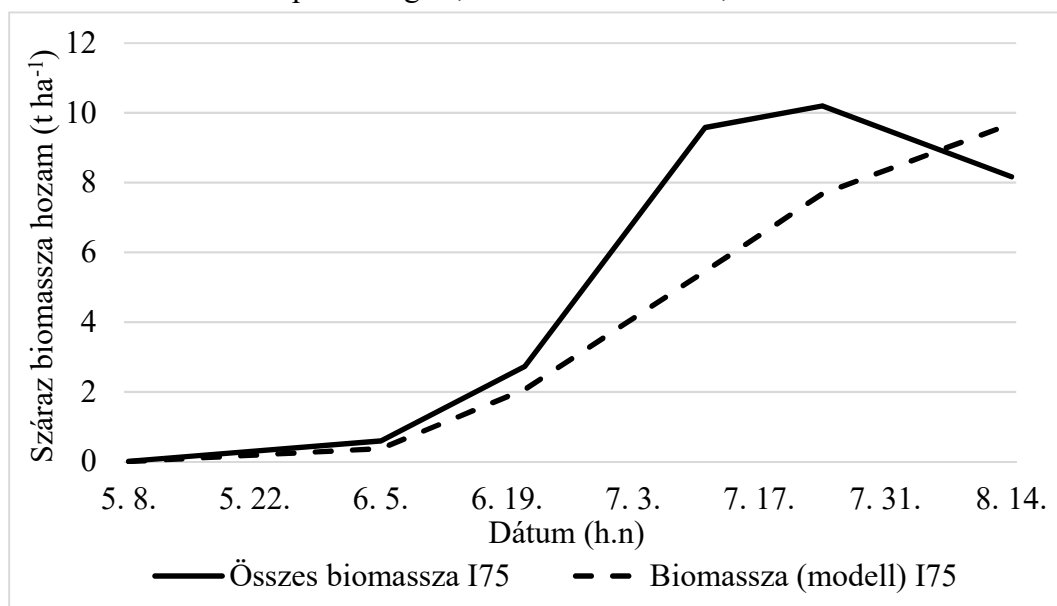
61. ábra: Biomassza gyarapodás a szezon közben a modell és a mért adatok alapján a kontrollban.

A kontroll kezelésből vett minták alapján a két vonal nagyon hasonló lefutású és jól is illeszkedik egymáshoz (61. ábra). Amikor a modellezett értékeket reprezentáló szaggatott vonal fölötté van a mért értékeket mutató egyszerű vonalnak, akkor a modell fölé becslül, így amikor a szaggatott vonal alá kerül az egyszerű vonalnak, az a modell alul becslését jelenti. A minták alapján a valós biomassza már július végére elérte a maximumát, míg a modell további gyarapodást jelez. Emiatt a betakarítást elérve a modellezett érték 0,176 t/ha száraz biomassza mennyiséggel van fölötté a mért értéknek, amely egy kicsivel több, mint 3%-os eltérést jelent. A modell pontatlanságát MAE és RMSE hibaértékekkel jellemezve 0,34 és 0,45 t/ha-t kaptam. A MAE és RMSE hibaértékeket tekintve ebben a kezelésben tévedett a legkevesebbet a modell. Megjegyzendő azonban, hogy a referencia levélborítást csökkenteni kellett az öntözött állományokéhoz képest ahhoz, hogy a modellezett eredmények közelítsék a valós adatokat.



62. ábra: Biomassa gyarapodás a szezon közben a modell és a mért adatok alapján a I50 kezelésben.

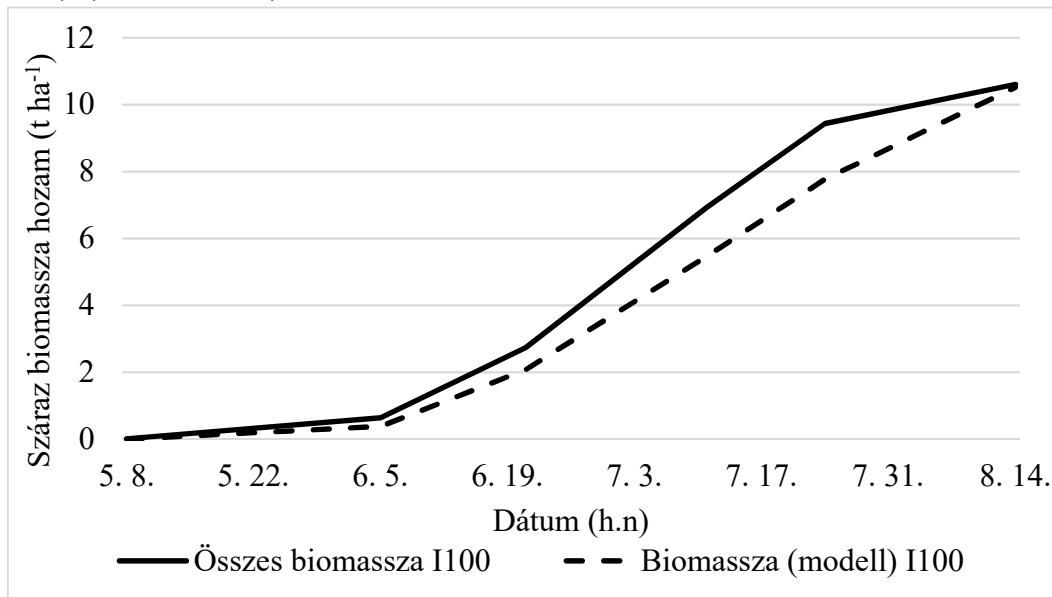
Az I50 kezelésben a modellezett biomassa hozam közel a szezon végéig a mért értékek alatt marad. Az utolsó két mintavételi időpont között azonban felcserélődik a két vonal, így a szezon végére túlbecsül a modell (62. ábra). A túllépés mértéke $1,59 \text{ t ha}^{-1}$, amely 22,9 %-os különbséget jelent. A valós biomassa értékek szerint a biomassa csökkent a végső betakarítási időpontra. Ebben a kezelésben a modell pontossága $1,15 \text{ t ha}^{-1}$ a MAE és $1,45 \text{ t ha}^{-1}$ az RMSE értékek alapján.



63. ábra: Biomassa gyarapodás a szezon közben a modell és a mért adatok alapján a I75 kezelésben.

Az I75 kezelés modellezett és mért biomassa hozamát reprezentáló vonalainak lefutása nagyon hasonlít az I50 kezelésben tapasztaltakéhoz (63. ábra). A modell kisebb értékeket becsül egészen a szezon végéig, amikor a modellezett értékek a mért értékek fölé kerülnek. Ebben a kezelésben is ugyan az a jelenség figyelhető meg, mint az I50 kezelésnél, az utolsó időpontra visszaeső

biomassza értékek miatt. Az I50 kezeléshez képest az I75 esetében kicsivel kevesebb, $1,52 \text{ t ha}^{-1}$. A mért biomassza hozam $84,3 \%$ -a a végső, modellezett értéknek. Annak ellenére, hogy a végső termésbeli eltérés nem ebben a kezelésben a legnagyobb, a legmagasabb hibaértékek itt jelentkeznek, $1,51 \text{ MAE}$ és $2,09 \text{ RMSE}$ értékkel.

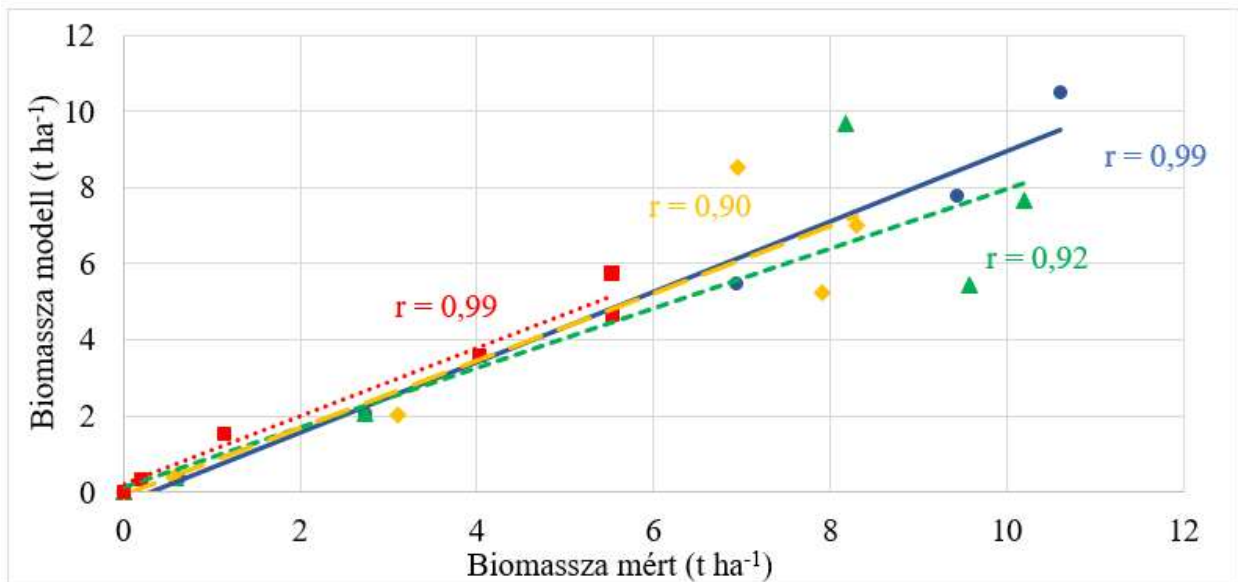


64. ábra: Biomassza gyarapodás a szezon közben a modell és a mért adatok alapján a I100 kezelésben.

A modellezett biomassza hozamot jelző vonal kimondottan jól halad együtt a valós értékeket jelző vonallal a legtöbb öntözővízzel ellátott kezelés esetében, azonban illeszkedése pontatlan (64. ábra). A kis arányú, negatív irányú becslési hiba eltűnik a betakarítás időpontjára. A betakarítás időpontjára a modell szerint $0,09 \text{ t ha}^{-1}$ mennyiséggel kevesebb biomassza produktum termett a területen, amely kevesebb, mint 1% -nyi különbség. A legnagyobb végső értékekre vonatkozó pontosság, tehát az I100 kezelésben volt elérhető, azonban a hibaértékek néhány tizeddel nagyobbak, mint a szezon közben is pontosabban illeszkedő K kezelésben. A MAE értéke $0,69$, az RMSE értéke $0,95 \text{ t ha}^{-1}$.

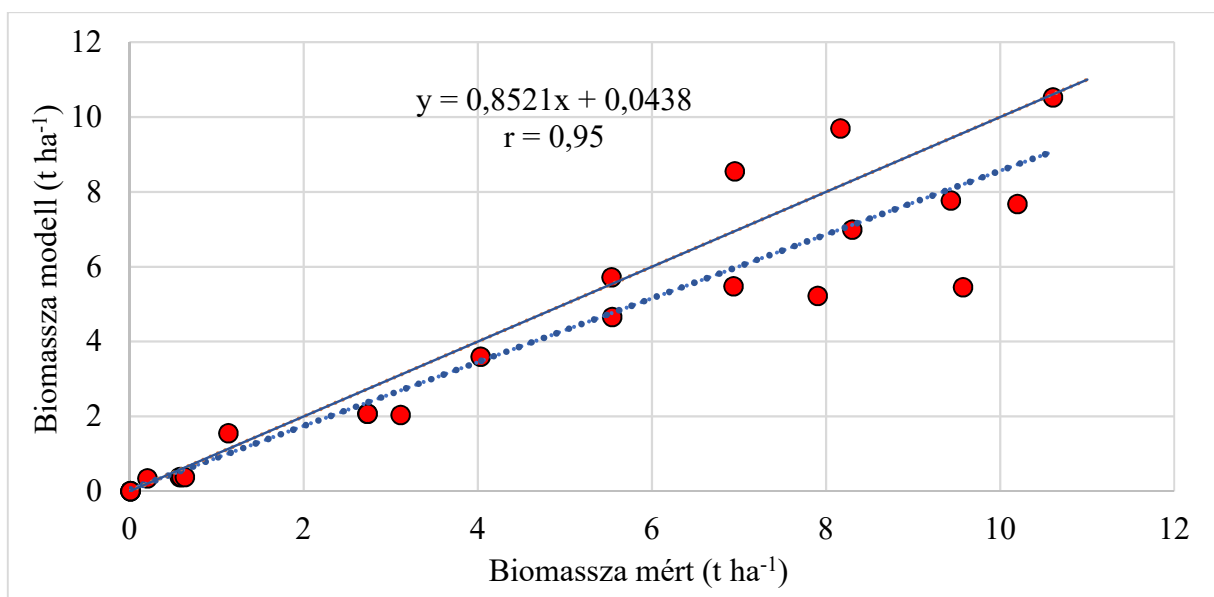
A vonaldiagrammok lefutásának elemzése mellett megvizsgáltam, hogyan függenek össze a modellezett értékek a minták értékével a száraz biomassza adatok tekintetében. A szemléltetés kedvéért pontdiagrammon ábrázoltam az eredményeket, ahol a trendvonalak csoportonként kerültek felrajzolásra.

A Pearson-féle korreláció teszt nagyon erős korrelációkat tárt fel a kontroll és az I100 kezelés esetében. Ez a két modell volt a legkisebb hibával jellemezhető és a végső biomassza produktumot is ez a két szimuláció volt képes alacsony eltéréssel megbecsülni. A korreláció erőssége $r=0,99$ mind a két kezelésben, $p<0,001$ szignifikancia szinteken.



65. ábra: A biomasszából, a szezon közben és végén vett minták kapcsolata a modellezett és a mért értékek alapján kezelésként ($n=6$). Kék: I100, zöld: I75, sárga: I50, piros: kontroll.

Nagyobb pontatlanságok voltak a deficit öntözési kezeléseknél, emiatt a korrelációk erőssége is alul maradt a másik két kezelésnél tapasztaltakhoz, hiszen a szezonközi pontatlan becslések mellett a betakarítási értékek között is nagy differencia volt. Az I75 kezelés pontjai közötti korreláció $r=0,92$, $p<0,01$ szignifikancia szinten. Az I50 kezelés adatai között $r=0,90$ erősségű korreláció van, $p=0,014$ szignifikancia szinten (65. ábra). Az eredmények alapján látható, hogy a pontatlanabb két deficit öntözött modell esetében is erős a modellezett és mért adatok korrelációja.



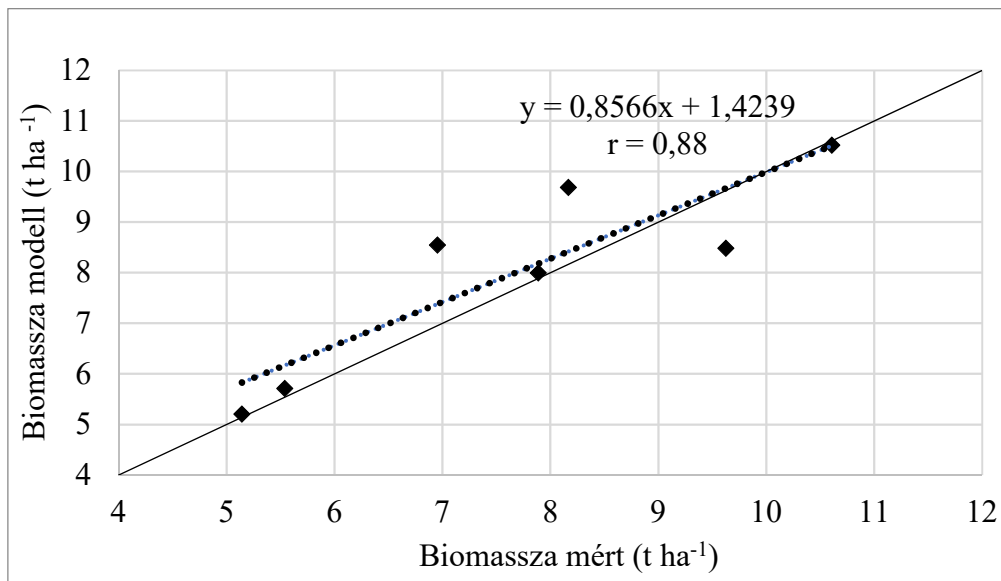
66. ábra: A biomasszából, a szezon közben és végén vett minták kapcsolata a modellezett és a mért értékek alapján az összes adatpontra, minden vízellátottsági szintet egybevéve ($n=24$). A pontozott vonal az adatokra illesztett vonalat reprezentálja. A közös vonal a tökéletes modellt jelenti.

A csoportonkénti korreláció mellett elemeztem az összes adatpontra nézve hogyan alakul ez a mutató. A korrelációs érték alapján erős az összefüggés az összes pontot összevetve is, $r=0,95$,

$p < 0,001$ szignifikancia szinten (66. ábra). Emellett leolvasható az ábráról, hogy az adatok szóródása leginkább a 7 t ha^{-1} feletti régióban jellemző, vagyis ez az a küszöbérték a biomassza szárazanyag tekintetében, ami fölött a modell pontatlansága növekszik. A trendvonal mellett egy referencia vonalat is illesztettem a diagrammra, ami a tökéletes modellt mutatja, meredeksége 1. Ettől kissé elmarad a jelenlegi modell trendvonala, melynek meredeksége 0,85.

4.11.2 A két kísérleti év biomassza és termés adatainak és modelljeinek vizsgálata

Együtt értékeltem a két kísérleti év, eltérő vízellátású parcelláiból szerzett adataimat. A modellezett termésadatok mellett összefüggéseket kerestem a valós termésértékekkel is.

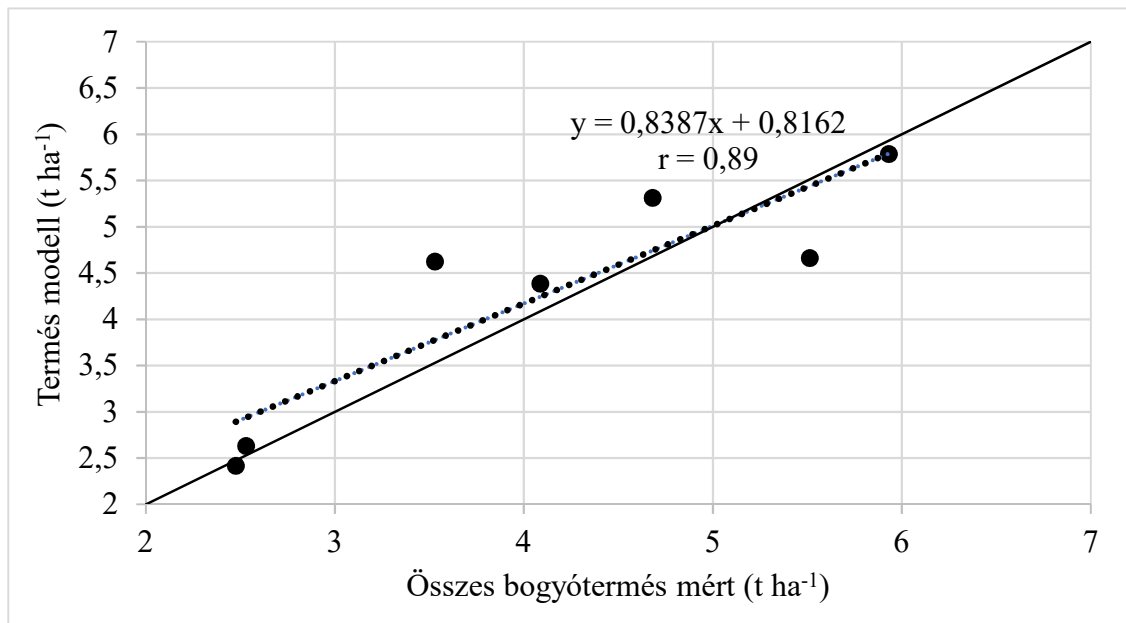


67. ábra: A szezon végi mintavételkor a biomassza mért és modellezett adatainak kapcsolata a két év alapján ($n=7$). A pontozott vonal az adatokra illesztett vonalat reprezentálja. A közös vonal a tökéletes modellt jelenti.

Elsőként a betakarításkori biomassza szárazanyag hozamot vizsgáltam meg. A két évben összesen hét különböző vízellátási szint volt, így hét adatpontra tudtam korreláció-tesztet végezni.

A Pearson-korreláció értéke $r=0,88$ volt, $p < 0,01$ szignifikancia szinten (67. ábra). A trendvonal meredeksége 0,86, amely jól közelíti a tökéletes modellt reprezentáló referenciavonalat. A MAE 0,67, míg az RMSE $0,94 \text{ t ha}^{-1}$ volt a biomassza hozamokra számítva.

A leglényegesebb mutató az ipari paradicsom termelés esetében a területegységre vetített megtermelt szárazanyag. Ebből is a leglényegesebb, hogy a betakarításkor várható hozamot tudjuk becsülni, előre jelezni. Ezért természetesen összevettem a modellezett és a valós megtermelt szárazanyag hozamot.



68. ábra: A szezon végi mintavételkor a termés mért és modellezett adatainak kapcsolata a két év alapján ($n=7$). A pontozott vonal az adatokra illesztett vonalat reprezentálja. A közöséges vonal a tökéletes modellt jelenti.

Az összes termés szárazanyagának korrelációs értéke erőssége hasonló a biomasszáéhoz, $r=0,89$, meggyőző, $p<0,01$ szignifikancia szinten (68. ábra). A MAE 0,45 és az RMSE 0,59 t ha⁻¹ volt a szárazanyaghozamra kiszámítva. Az illesztett trendvonal szintén a referencia vonal közelében van, meredeksége kicsivel enyhébb, mint a biomassza esetében (0,84). A referencia vonalhoz a két kontroll kezelés és a 2018-as I100 kezelés terméseredményei helyezkednek el a legközelebb. Ez az eredmény még inkább alátámasztja a 2018-as szezonközi biomassza-gyarapodás vizsgálatának eredményeit, miszerint a kontroll és 100%-kal öntözött parcellákban volt a legpontosabb a szimuláció.

Azonban fontos megjegyezni, hogy a kontroll és öntözött állományokban eltérő a beállított referencia levélborítás. Abban az esetben, ha a korrelációelemzésnél kihagyom a kontrollból származó két adatpontot, a korreláció erőssége gyengül ($r=0,66$) és az illesztett egyenes meredeksége is csökken, ami azt jelenti, hogy a csökkenő vízellátás nagyobb felülbecslést eredményez.

A pontos biomassza becslések esetén nagyon fontos a betakarítási index (harvest index) adott hibridre releváns beállítása. Ez a vegetatív tömeg és a bogyók megoszlását jelenti a teljes biomassza tömegben és növényenként változik. Helytelen érték esetén a pontos biomassza becslések mellett sem kapunk megfelelő modellezett értékeket a megtermelt szárazanyagra nézve.

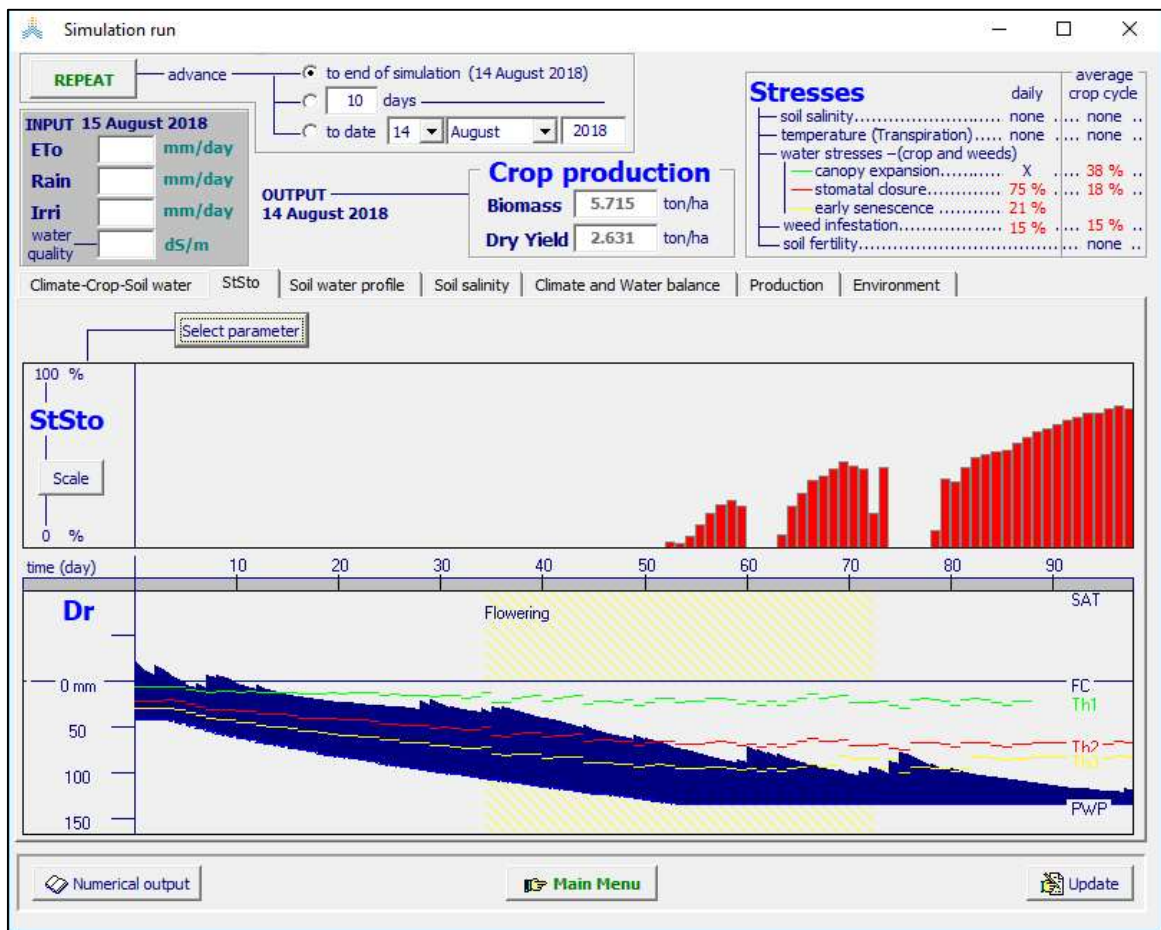
4.11.3 A modellezett és a mért stresszértékek vizsgálata

A sztómazáródásra vonatkozó vízstressz koefficiens kinyerhető a modelltől. Ezen keresztül a modell alapján is jellemezhető a növény elégtelen párologtatása, hogy mennyire stresszelt a

vízhiány miatt. Ennek vizsgálatára, a rendelkezésre álló júliusi lombfelszín hőmérséklet mérésekből származó stresszindexeket használtam fel, valamint összefüggést kerestem a modellezett stresszértékek és a valós, valamint modellezett termések között is.

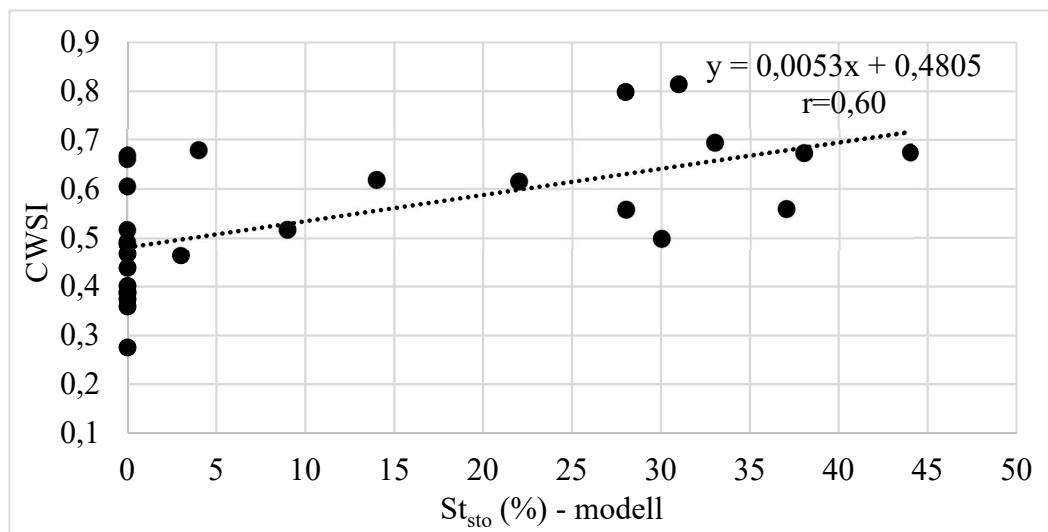
4.11.4 A július havi napi stresszértékek összevetése

A július havi lombfelszín hőmérsékletekből számolt infravörös távhőmérővel vagy hőkamerával gyűjtött adatokból számolt SDD és CWSI értékeket használtam az összefüggés-vizsgálatokhoz. A szimulációkból ugyanazokra a napokra vonatkozó St_{sto} -értékeket használtam, amelyekre a lombfelszín-hőmérséklet méréseket is el tudtam végezni. Az St_{sto} érték egyfajta százalékban kifejezett érték, mely a vízhiány által kiváltott sztómazáródást fejezi ki (69. ábra).

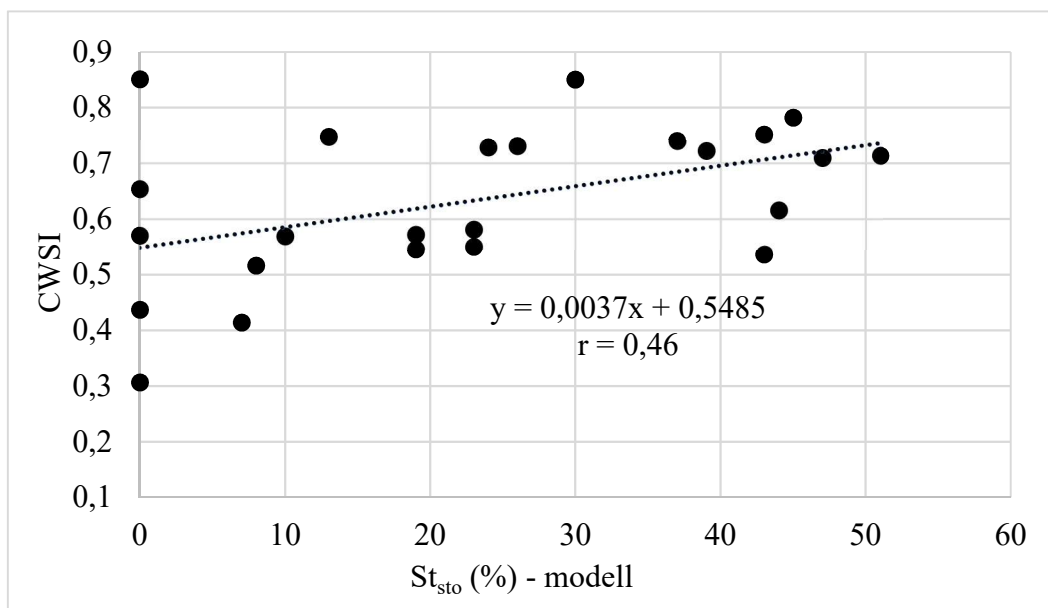


69. ábra: Vízhiány által kiváltott sztómazáródás szimulációja a 2018-as év kontroll beállításában.

A 2017-es szezon júliusából 27 napra vonatkozó mérés állt rendelkezésemre. Az I100-as kezelésben egyik nap sem volt 0-nál magasabb a modellezett St_{sto} -stresszérték, így értelmetlen volt a korreláció keresése. Az I50 kezelésben is mindössze 6 nap volt 0-nál magasabb a stresszérték a modell szerint a 27 nap során, így ennél a kezeléssel is eltekintettem az összefüggésvizsgálattól. A K kezelésben már 13 nap volt a stresszelt nap a 27-ből, így ezt alkalmasnak találtam az összefüggésvizsgálatok lefuttatására, amihez mind a 27 nap adatait felhasználtam, tehát a stresszmentes napok adatait is. A legerősebb korrelációt az St_{sto} -értékekkel a hőkamerával gyűjtött értékekből számított CWSI értékek mutatták (CWSI CAM) a kontroll csoportban, pontosan $r=0,60$ Pearson-korrelációs értékkel, $p<0,001$ szignifikancia szinten (70. ábra).

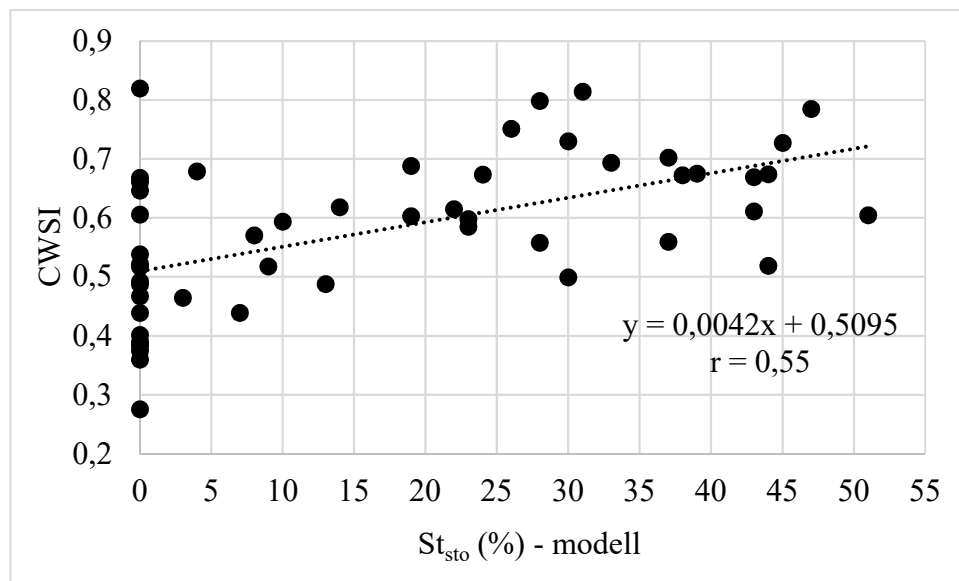


70. ábra: A modellezett vízstressz (St_{sto} %) és a méréseken alapuló értékek (CWSI) kapcsolata 2017. júliusában a kontrollban ($n=27$).

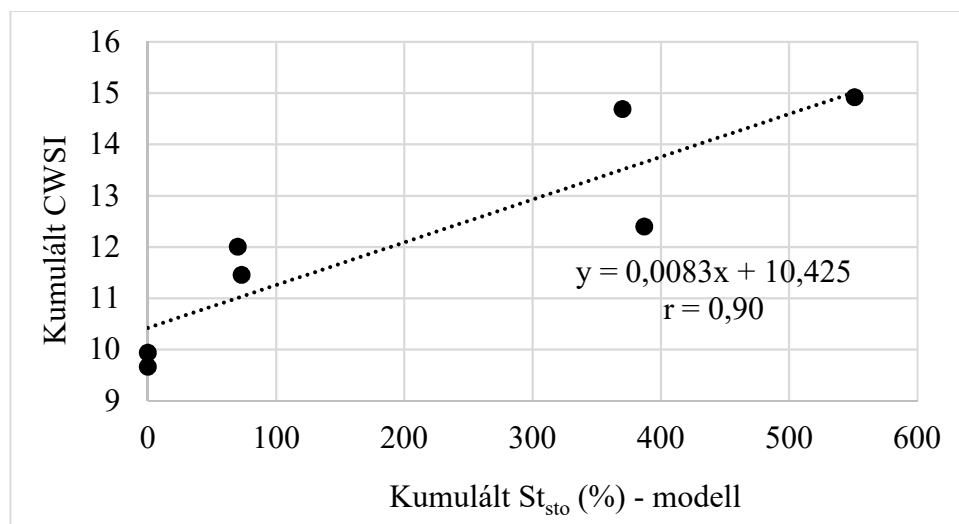


71. ábra: A modellezett vízstressz (St_{sto} %) és a méréseken alapuló értékek (CWSI) kapcsolata 2018. júliusában a kontrollban ($n=24$).

A 2018-as év júliusában 24 napra gyűjtöttem lombfelszín hőmérséklet adatot. Az I100-as kezelésben ebben az évben sem jelzett stresszt a modell. Az I75 kezelésben már megjelentek a stresszes napok, összesen 6 nap, alacsony stresszértékekkel (8-32-ig). Az I50 kezelésben már 15 napra mutatott kisebb-nagyobb stresszértékeket a modell. A legerősebb korreláció is azonban mindössze $r=0,45$ volt, amelyeket a hőkamerás CWSI adatokkal mutatta. A legtöbb (19 db) stresszes nap a K kezelésben fordult elő, azonban a korreláció erőssége a valós méréseken alapuló indexekkel ennél sem növekedett számottevően a többi vízellátási szinthez képest (71. ábra). A legerősebb összefüggést a távhőmérővel gyűjtött adatokból számított CWSI-értékekkel adták az St_{sto} -értékek. Ennek erőssége $r=0,46$ volt, $p<0,05$ szignifikancia szinten.



72. ábra: A modellezett vízstressz (St_{sto} %) és a méréseken alapuló értékek (CWSI) kapcsolata a két év július hónapjaiban a kontrollban ($n=51$).



73. ábra: A modellezett vízstressz (St_{sto} %) és a méréseken alapuló stresszmutató (CWSI) kumulált értékeinek kapcsolata a két év alapján ($n=7$).

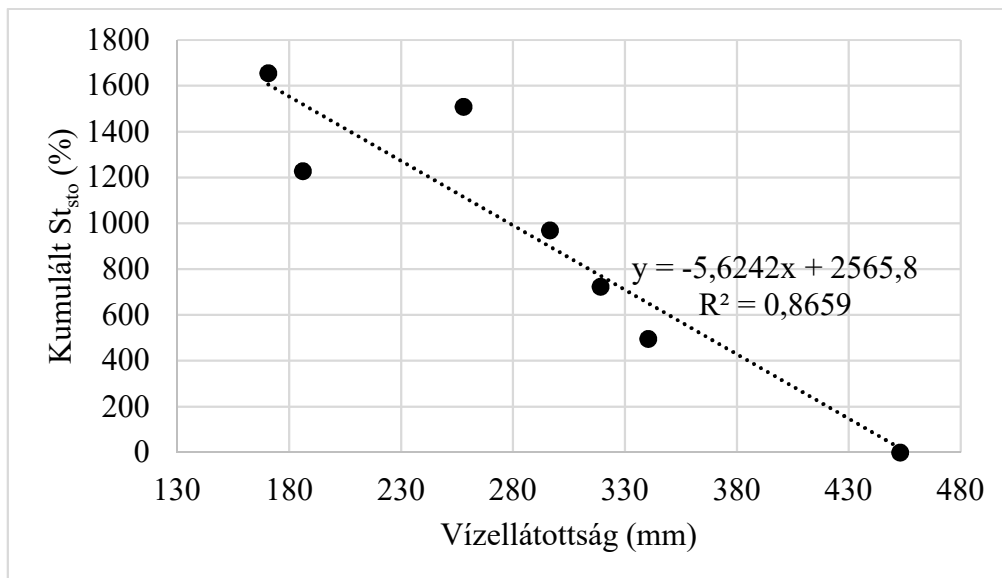
A két év összes K kezelésre vonatkozó St_{sto} -értékét a CWSI CAM értékekkel összevetve $r=0,55$ erősségű, szignifikáns ($p<0,001$) korrelációt kaptam (72. ábra). A két év adatainak összevetésére

alkalmasnak találtam a júliusra vonatkozó kumulált St_{sto} -értékek és a kumulált CWSI CAM értékek összevetését, amelybe bevontam a kontroll mellett az I50, I75 és I100 kezeléseket, így összesen 7 db adatpontra végeztem el a vizsgálatokat, amelyek nagyon erős, $r=0,90$ Pearson-korrelációt mutattak, $p<0,01$ szignifikancia szinten (73. ábra).

4.11.5 A modellezett stresszértékek és a terméseredmények kapcsolata

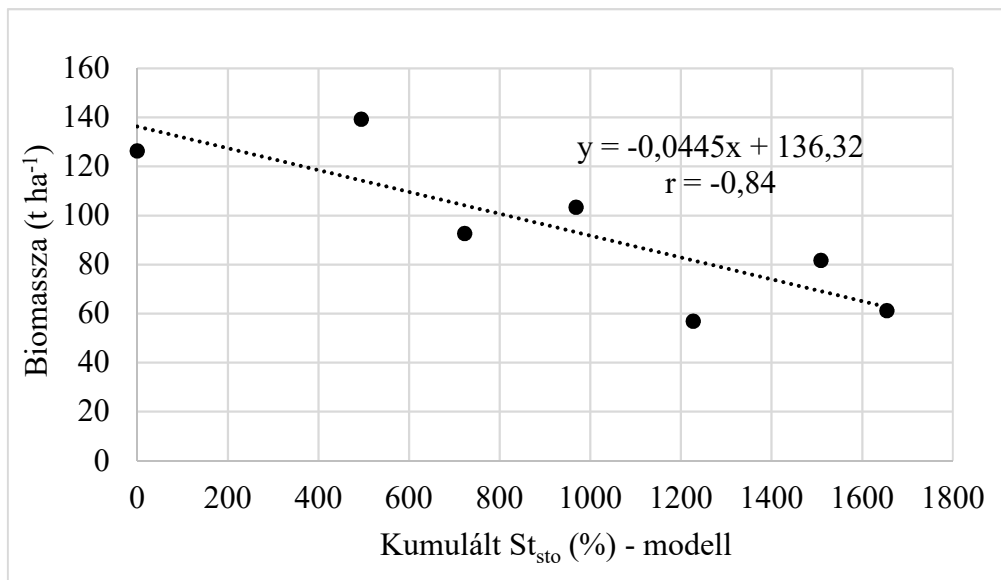
A modellezett stresszértékek és a terméseredmények kapcsolatának vizsgálatához a szezon teljes hosszára vonatkozó St_{sto} -értékeket kumuláltam. A kumulált értékek és a valós terméseredmények között kerestem az összefüggéseket.

Először megvizsgáltam hogyan hatott a vízellátás a modellezett stresszértékekre. A lineáris regresszió eredménye $p<0,01$ szignifikancia szinten, $R^2=0,87$, amely megmutatja, hogy a modellezett stresszértékek nagysága, főként a víztől függ (74. ábra).

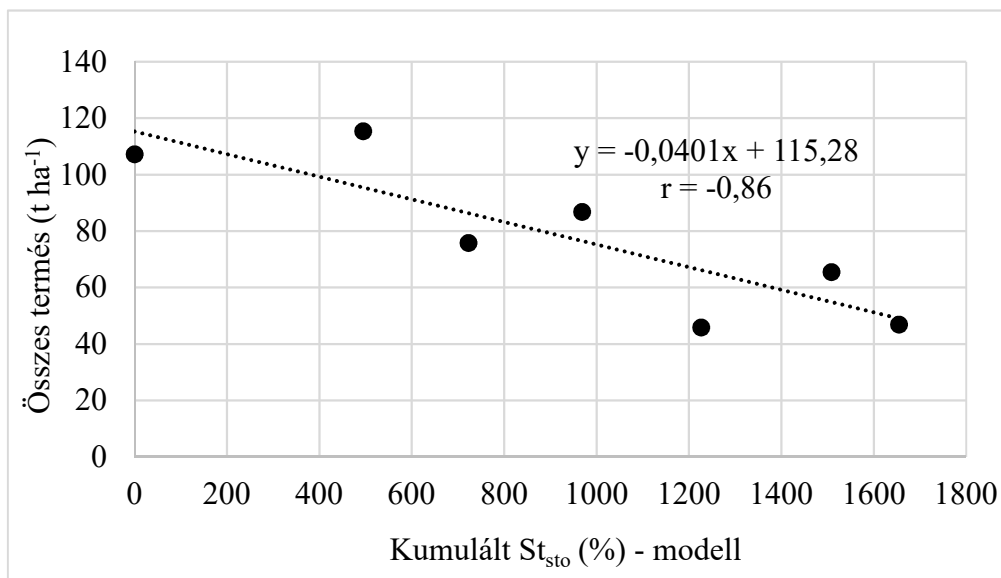


74. ábra: A vízellátás hatása a modellezett vízstresszre a két év alapján ($n=7$).

A terméseredmények és a kumulált, modell által kalkulált stresszértékek kapcsolatának feltárásához Pearson-korrelációt használtam. A biomassza hozam, összes termés és a piacképes termés és az St_{sto} összefüggései közül a biomasszával mutatható ki a leggyengébb kapcsolat. A biomassza hozam egyaránt tartalmazza a szezon során kifejlesztett vegetációs tömeget, valamint az összes bogyót. Ezek közül mindenre hatása van a vízellátásnak, ami pedig a stresszértékekre hat. Emiatt az előzetes várakozásaim alapján, még erősebb korrelációra számítottam. A kapcsolat erőssége $r=-0,84$, $p<0,05$ szignifikancia szinten (75. ábra).



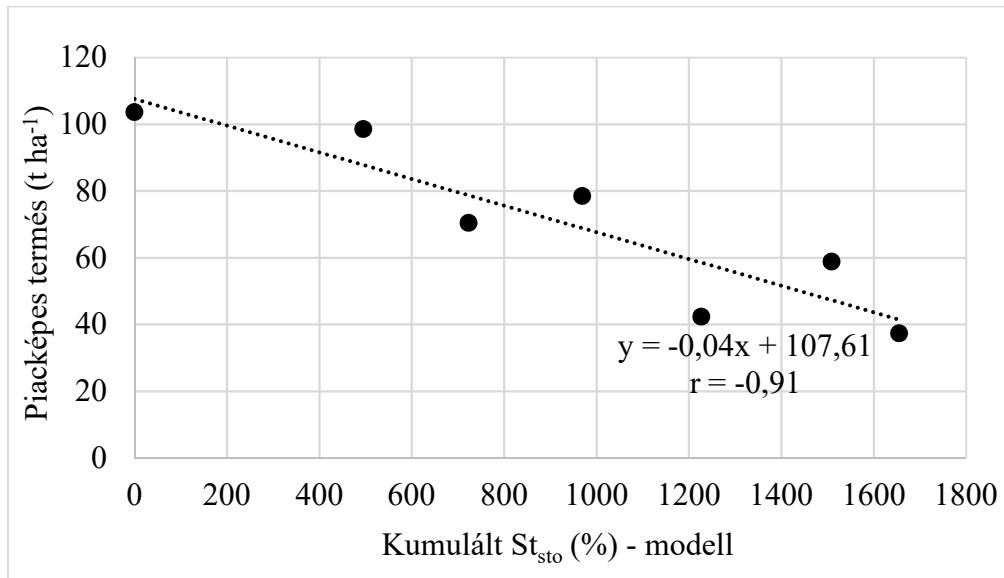
75. ábra: A modellezett vízstressz hatása a biomasszára a két év alapján ($n=7$).



76. ábra: A modellezett vízstressz hatása az összes termésre a két év alapján ($n=7$).

Az összes termés és a kumulált St_{sto} kapcsolata erősebb a biomasszáéhoz képest. A kapcsolat erőssége $r=-0,86$, $p=0,01$ szignifikancia szinten (76. ábra).

A piacképes termés és a modellezett stresszértékek kapcsolata a legerősebb a három terméseredmény közül (77. ábra). A kapcsolat szignifikancia szintje $p<0,01$ és erőssége $r=-0,91$. A negatív irányú összefüggés ebben az esetben is egyértelmű, hiszen minél inkább stresszelt a növény (növekvő kumulált értékek), várhatóan, annál kevesebb termést képes fejleszteni.



77. ábra: A modellezett vízstressz hatása a piacképes termésre a két év alapján ($n=7$).

4.12 Új tudományos eredmények

1. Az AquaCrop-pal számított potenciális evapotranszpiráció 75%-kal folytatott „deficit” öntözéssel $4,15 \text{ t ha}^{-1}$, az optimális vízellátottságú kezeléstől szignifikánsan nem különböző szárazanyag hozamot mutattam ki, viszont jelentős, 25 %-os ($\sim 44 \text{ mm}$) vízmegtakarítás érhető el az optimális vízellátottsághoz képest.
2. A paradicsom vízstressz-monitorozásra a CWSI alkalmasabb volt, mint az SDD. A CWSI adott részletesebb felbontást a két év alapján. A 160×120 felbontású, 8-14 μm spektrumban érzékeny termális kamera jobb volt, mint az infravörös távhőmérő. Az ipari paradicsom vízstressz monitorozására a CWSI és a termális kamera kombinációját javaslom.
3. A CWSI kumulált értékei szignifikáns kapcsolatot mutattak az ipari paradicsom fontosabb termésmutatóival. A kumulált CWSI stresszértékek és a piacképes termés között $R^2=0,91$ erősségű a kapcsolat. A magasabb stressz kisebb terméssel, de magasabb °Brix értékkel jár ($R^2=0,79$), hektáronkénti alacsonyabb szárazanyag hozamot eredményezve ($R^2=0,92$).
4. Az AquaCrop modellben az input adatok néhány kisebb módosítása után (referencia levélborítás és betakarítási index) a modell jó becslési pontosságot ad, a biomassa- és termésadatok esetében, az optimális vízellátottság és a legnagyobb vízstresszt elszenvedő kontroll kezeléseknél.
5. Az AquaCrop modell vízhiány által kiváltott modellezett stresszértékei csak a legnagyobb vízstresszt elszenvedő kontroll kezelésben volt összevethető a CWSI értékekkel.
A teljes monitorozott időszak kumulált stresszértékei, minden vízellátottsági szintet vizsgálva, szignifikáns kapcsolatot mutattak a modell kumulált stresszértékeivel ($r=0,90$). Megállapítom, hogy a napi követést kevésbé jól végzi a modell, azonban a teljes tenyészidőszak kumulált értékei meggyőző kapcsolatot mutatnak a termésparaméterekkel ($r= -0,84- -0,91$).

5 KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

5.1 A vízellátás hatása az ipari paradicsom termelési mutatóira

Az emelkedő vízellátás lépcsőzetesen növekvő termésszinteket eredményezett a biomassa, összes termés és piacképes termés esetében is, ahogy ezt nagyon sok tudományos kísérletben igazolták már (Giuliani et al., 2016; Patané et al., 2014, 2011). A vízdoldható szárazanyagtartalom és a növekvő vízellátottság fordítottan arányos kapcsolatát is több tanulmányban leírták már (Helyes et al., 2014; Kuşçu et al., 2014; Pék et al., 2015; Zhang et al., 2017). Ezek a mutatók mindkét kísérleti évben egyenletesen reagáltak a vízellátásra. Az eredeti célja a deficitöntözésnek, hogy a minőség javítása és a vízmegtakarítás olyan szinten legyen, amely ellensúlyozza a friss termés csökkenését. Ez legjobban a 2018-as kísérleti évben, az I75 kezelésben következett be, ahol a hektáronként megtermelt szárazanyag mennyiségében statisztikailag nem volt különbség a teljes vízádaggal és annak 75%-ával öntözött beállítások értékei között. Emiatt javasolható, hogy közepesen kötött talajon érdemes az AquaCrop által számított potenciális növényi evapotranszpiráció 75%-nak megfelelő öntözővizet kijuttatni, hogy elérjük a területegységre vetített megfelelő szárazanyaghozamot, de a növény maximális vízigényének kielégítéséhez képest öntözővíz-megtakarítást is realizálhatunk, egyetértésben más szerzőkkel (Nangare et al., 2016; Patané & Cosentino, 2010). A WUE tekintetében statisztikailag igazolható különbséget nem találtam. Az első kísérleti évben a kezelések átlagai közel álltak egymáshoz, azonban a második évben a K és I50 vízellátás, valamint az I100 kezelés átlagai között már jelentős különbség van az I100 javára. Azonban a statisztikai vizsgálat alapján arra következtetek, hogy egyenletes volt a növények vízhasznosítása minden vízellátási szinten.

5.2 A szárazságstressz vizsgálatok eredményei

A mindkét évben beállított 3 különböző vízellátási szint (K, I50, I100) mindkét évben elkülönült a vízstressz-szintek alapján. Az első évben az infravörös távhőmérő adataiból számított SDD értékek és a hőkamera adataiból számított CWSI értékek működtek jól, mivel ezeknél lehetővé vált minden vízellátási szint elkülönítése az átlagok és a kumulált értékek tekintetében egyaránt. A második évben már egyik esetben sem sikerült az átlagok alapján mind a négy vízellátási szintet elkülöníteni. A legjobb eredményt a hőkamera adataiból számított CWSI értékek adták, amellyel mindössze az I75 kezelés nem volt elkülöníthető az átlagok alapján a két szomszédos vízellátottsági szinttől és a kumulált értékek is meglehetősen közel voltak az I50 és I75 kezeléseknél. Emiatt megállapítottam, hogy az ipari paradicsom hibridnél a vízstressz követésére a hőkamerás adatbeszerzés és a CWSI a legalkalmasabb. A kumulált CWSI értékek nagy hatását mutatták ki a lineáris regressziók a piacképes termésre és a szárazanyag-hozamra egyaránt

(Nardella et al., 2008; Sezen et al., 2014). Így egy alacsony árfekvésű, okostelefonhoz csatlakoztatható termális kamera (160×120 pixel felbontás) és a viszonylag egyszerűen számítható CWSI jó opció lehet a különböző vízellátottsági szintű állományok vízstressz állapotának követésére vagy akár öntözés vezérléséhez (Gerhards et al., 2016; Ihuoma & Madramootoo, 2017; Jones, 2004). Továbbá javaslom a vizsgálatok kiterjesztését a térbeli alkalmazhatóság vizsgálatára (Berni et al., 2009; Meron et al., 2010), amely UAV-k bevonásával megvalósítható.

5.3 A center pivot öntözőberendezés egyenletessége és az átmeneti zónák

Az öntözőgép minden mérés alapján megfelelő egyenletességet mutatott az eltérő aránnyal öntözött parcellákban (Dukes & Perry, 2006; Irmak et al., 2011; Yari, Madramootoo, Woods & Adamchuk, 2017). Ennek vizsgálata nagyon fontos volt a kísérletek szempontjából is, hiszen egy tudományos igényességű öntözési kísérlet precizitása megkívánja, hogy egyenletes legyen a vízkijuttatás, valamint a kijuttatott mennyiség ne térjen el a megkívánttól. Ez a kijuttatott arányok vizsgálata alapján megvalósult. Az alul- és túlöntözés az elkészített modellek alapján egyik esetben sem volt jelentős.

Az átmeneti sávok szélességére vonatkozó mérések alapján megállapítható, hogy kb. 9-10 m átmenetet szükséges figyelembe venni a szomszédos, eltérő arányú vízkijuttatásban részesülő parcellák között. Ez minden esetben fontos a precíz vízellátás biztosításához növényi vízellátottsággal kapcsolatos kísérletekben (Takács et al., 2018b). Hasonló vagy kisebb szélességű átmenetről számoltak be más tanulmányban (O'Shaughnessy et al., 2013; Zhao et al., 2014). Amennyiben az öntözött tábla különböző, öntözési szempontból releváns tulajdonságaira végzünk felmérést, a térbeli részletesség tervezésénél szintén figyelembe vehető, hogy a gépnek is szüksége van az átállásra a különböző VRI zónák között.

A precíziós öntözőgép használatához feltárt gyakorlati információk:

1. Az öntözési egyenletesség minden mutató tekintetében megfelelő (CU_C : 88,8-92,9 %; DU : 85,1-90 %) volt az eltérő aránnyal öntözött parcellákban, vagyis a VRI iS rendszer megfelelő egyenletességet biztosított. Az egyenletességi mutatók mellett az alul- és túlöntözés nem volt számottevő egyik esetben sem. A túlöntözés átlagos értéke $8,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ volt, ami $0,81 \text{ mm ha}^{-1}$ -nak felel meg. Az alulöntözés átlagos értéke $3,46 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ volt a számítások alapján, amely mindössze $0,35 \text{ mm ha}^{-1}$.
2. A kiadagolt vízmennyiség térbeli eloszlásának vizsgálatához az interpolációk közül a módosított Shepard-módszer bizonyult a legalkalmasabbnak a reziduálisok legalacsonyabb kumulált értéke alapján.

3. A VRI rendszerben, a parcellák határain az átmeneti sávok, ahol a beállított értékek diszkrét módon még nem teljesülnek az átfedések miatt, legalább 9 m szélesek. Előfordul, hogy ennél már keskenyebb sávban is tökéletesen lezajlik az átmenet, azonban előfordul, hogy 9-10 m alatt csak a kívánt érték 75%-át éri el a vízkijuttatás. A legtöbb mérés alapján azonban a 9 m biztonságos átmenetet biztosít.

5.4 Az AquaCrop szimulációk értékelése

A szezon közbeni biomassza gyarapodás nyomon követése nagyon jól működött a maximum vízellátás esetében és a kontroll kezelés esetében is (Paredes et al., 2015). A deficit öntözési kezeléseknél nagy pontatlanságok voltak a kalkulációban a szezon közben és a szezon végére is (Ahmadi et al., 2015; Greaves & Wang, 2016), amely a modell túlbecslését jelentette. Más tanulmány a modellezett és mért termések közötti szorosabb kapcsolatról számol be (Katerji et al., 2013). A szezonközi eltérések részben magyarázhatók a szezonközi mintavételek alacsony mintaszámával. A referencia betakarítási indexek kísérleti adatok alapján történő beállítása miatt a betakarított termések jó korrelációt mutattak a modellezett értékekkel.

A modellezett, vízhiány által kiváltott stresszértékek napi felbontásban nem kellően szofisztikáltak, így az öntözött állományokban megfelelő összehasonlítás nem volt lehetséges, hiszen a modell alig kalkulált stresszértékeket az öntözött állományokra. A kontroll kezeléseknél szimulált stresszértékeket a valós levélfelszín-hőmérsékletek méréséből számított CWSI mutatókkal összevetve közepesen erős korrelációkat találtam. Tekintve, hogy a termésszimulációkban is felülbecslés jellemző a deficit öntözési kezeléseknél, így megállapítottam, hogy a kísérletben jelenlévő vízhiány által kiváltott stresszt a modell nem pontosan számította, alábecsülte. Ellenben a modellezett kumulált stresszértékek és a termelési mutatók között jó korrelációt találtam, tehát a kezelések egymáshoz viszonyított arányában jól becsül a modell, viszont a becslés mértéke kevésnek bizonyult.

A modell vizsgálatát mindenképp folytatni szükséges és további adatokat gyűjteni a kalibrációhoz, validációhoz, amely várhatóan pontosítani fogja az eredményeket (Mohammadi et al., 2016; Paredes et al., 2014; Salemi et al., 2011). Ehhez akár távérzékelési adatok felhasználása is lehetséges (Trombetta et al., 2016). A legfontosabb, hogy a vízellátás termésre gyakorolt hatásának szimulációja pontosabb legyen a deficit öntözés várható eredményeinek jobb feltárása érdekében.

6 ÖSSZEFOGLALÁS

A tenyészidőszak csapadékmennyiségének és időbeli-területi eloszlásából adódóan biztonságos növénytermesztés nem folytatható a vízigényesebb, nagy hozzáadott értéket adó kultúráknál, amilyen az ipari paradicsom is.

Az öntözött terület átlaga stagnált hazánkban az elmúlt időszakban, azonban ennek növekedése várható. Az öntözővíz megfelelő hozzáférhetősége - a lehetőségekhez mérten - biztosított Magyarországon, azonban a kijuttatás költségei mindenhol takarékosagra sarkallnak. Emiatt a deficit öntözés kutatása releváns hazánkban is, amely a víztakarékosság mellett többlétszerepet tölt be a paradicsomnál, hiszen, ha nem elégítjük ki teljes mértékben a növény vízigényét, de a fellépő stressz mértéke tolerálható, az a minőség javulásával jár, a termésmennyiség elfogadható csökkenése mellett. Ennek mélyreható vizsgálatához azonban a termésmennyiségek és szárazanyag-tartalmak mennyisége mellett a stressz-szintek nyomon követése is szükséges.

A helyspecifikus öntözéssel akár a táblán belül is megvalósítható különböző vízadagok kijuttatása. Ennek célja lehet a különböző növényfajokhoz vagy a kultúrák eltérő fejlettségi állapotához vagy a talajtulajdonságokhoz való alkalmazkodás. Azonban az eltérő arányú vízkijuttatás egyenletessége és a szórófejek átfedése miatt kialakuló átmeneti zónák kihathatnak az alkalmazhatóságra.

Szabadföldi kísérleteimet Szarvason a SZIE tanüzemében végeztem 2017-ben 3, 2018-ban 4 különböző vízellátási szinten, UG812J ipari paradicsom hibriddel. Mértem a megtermelt biomassa tömeget, bogyótermést és a bogyók vízdoldható szárazanyag-tartalmát. Július hónapban végig követtem a lombfelszín-hőmérsékletek alakulását egy infravörös távhőmérő és egy hőkamera segítségével, amikből SDD és CWSI stresszmutatókat számítottam. A különböző vízellátási szinteket egy precíziós, VRI iS-sel felszerelt center pivot öntözőberendezéssel biztosítottam. Az öntözőgép egyenletességét a VRI zónákban és a zónák közötti átmenetet megvizsgáltam. A különböző vízellátási szintek állományairól AquaCrop modellt készítettem és vizsgáltam mennyire közelítenek a szimulációk értékei a valós biomassa és termés száraz tömegéhez és a vízstressz-mutatókhoz.

A termés- és biomassa adatok lépcsőzetesen emelkedtek a vízellátás növelésével az elvárásoknak megfelelően. A bogyók szárazanyag-tartalma a vízellátás emelésével folyamatosan csökkent. A szárazanyag-hozam a jobb vízellátottsági szinteken volt magasabb, azonban az I75 kezelés szárazanyag-hozama elérte az I100 kezelését, számottevő vízmegtakarítás mellett.

A lombfelszín-hőmérsékletből számított CWSI értékek a két év adatai alapján részletesebb képet mutatott a paradicsom növények vízhiányból eredő stresszállapotáról, mint az SDD stresszmutató. A CWSI az okostelefonhoz csatlakoztatható, termális kamera képeinek adataiból számítva adott jobb eredményeket, mint az infravörös távhőmérővel mért adatokból számított indexek.

A precíziós öntözőberendezés egyenletessége minden eltérő aránnyal öntözött parcellában megfelelő volt. Az alul- és túlöntözött területek öntözővíz-mennyisége nem volt számottevő az öntözési kép modelljei alapján. A szomszédos VRI-zónák közötti átmeneti sávok szélessége átlagosan 9-10 m volt, amelyet figyelembe kell vennünk a VRI zónák kialakításához használt táblatulajdonságok felmérésének térbeli részletességénél vagy a kísérleti mintavételeknél, ahol fontos a vízkijuttatás pontossága.

Az AquaCrop kiválóan szimulálta a biomassza gyarapodást az I100 és a K beállításnál, azonban ehhez az öntözetlen modelljének referencia levélborítását csökkenteni kellett. A termések szimulációja jó eredményt adott a két év értékeit tekintve, erős kapcsolattal a modellezett és mért értékek között. Azonban a K értékeit kihagyva az elemzésből a kapcsolat gyengül, melynek fő oka a deficit öntözött állományok termésének túlbecslése. A napi és kumulált modellezett, vízhiány által kiváltott stresszértékek vizsgálata is megmutatta, hogy arányaiban jól becsülte a modell a stresszt, azonban az adatok alapján ennek mértéke alul marad a valóságos szintektől. A modell ígéretesnek mondható ipari paradicsom szárazanyag-hozamának becslésére, azonban további adatok szükségesek a kalibrációhoz és validációhoz a szimulációk pontosítása érdekében.

7 SUMMARY

Production of high-value crops with high water demand - such as processing tomato - is not safe due to the amount and spatial-temporal distribution of precipitation. The average of irrigated area has been stagnating in the past decade, however, rising of the area is expectable in the near future. The accessibility to irrigation water - considering the possibilities - is good in Hungary, but because of the costs of application, water-savings are encouraged after all. Thus, deficit irrigation research is relevant. Beside water savings, additional positive effect of deficit irrigation is the better fruit quality in processing tomato. If we do not satisfy perfectly the plant's water needs, but the occurring stress is tolerable by the plant, then it stimulates the rise of soluble solids content with an acceptable drop in yield quantity. For the deep investigation of the effect of deficit irrigation, the monitoring of stress levels is necessary along with the analysis of yield quantity and soluble solids content.

With the help of site-specific irrigation, application of different water rates in the field is possible. Hence, the different species or different development stages of crops can be irrigated precisely under one irrigation machine or the application can be fit to the varying soil properties. However, the distribution uniformity of different application rates and the transition zones (caused by sprinkler overlap) between the differently irrigated areas can affect the applicability of VRI technology.

I have conducted open field experiments at the experimental field of SZIU under 3 different water supply levels in 2017 and under 4 in 2018 with a processing tomato hybrid UG812J. I measured the biomass, fruit yield and soluble solids content of fruits. During July I monitored the leaf surface temperatures with an infrared thermometer and a thermal cam, moreover, I computed SDD and CWSI stress indicator indices from leaf surface temperature data in both years. I provided the different water supply levels with a precision centre pivot system equipped with VRI iS. I evaluated the water distribution uniformity in the VRI zones and the transition between zones. The processing tomato biomass, fruit yield and water stress levels were compared to results of the crop simulation model AquaCrop.

The biomass and yield rose step-like and the soluble solids content of fruits dropped according to the rising water supply levels. The soluble solids yields were the highest under maximum water supply level, nevertheless, the soluble solids yield of the I75 treatment reached the level of I100 accompanied with significant water saving.

The CWSI computed from the leaf surface temperature data showed more detailed picture about the stress-levels triggered by water shortage in tomato plants, than SDD. CWSI computed from

data collected with the thermal camera attached to a smartphone gave better results, than computed from the infrared thermometer data.

The water distribution uniformity of the precision irrigation machine was satisfactory in all the VRI zones with different application rates. Water volumes in the under- and overirrigated areas were not significant according to the models of water distribution characteristics. The transition between adjacent VRI zones were 9-10 m wide generally that one should consider during the determination of the spatial resolution of field properties' evaluation or sampling open-field experiments where the exact water supply is important.

AquaCrop simulated biomass growth excellently in the I100 and K treatments, but the reference canopy cover needed to be reduced for the K treatment to get this result. The simulation of yields gave good results in both years and showed strong correlation between the measured and modelled values. However, if the results of K treatments are left out from the correlation then the connection weakens. The reason is the overestimation of yields in the deficit irrigated treatments. The examination of the daily and cumulated modelled water stress coefficient for stomatal closure showed that the model estimates the stress well proportionally, although, according to the yield reduction rate, it is less than actual stress levels, since the yield estimation is higher than the real values in the water stressed treatments. The model showed promising results for modelling dry yield in processing tomato, but more data is needed for calibration and validation to specify the simulations after all.

8 MELLÉKLETEK

8.1 M.1. Irodalomjegyzék

- ABDUL-BAKI, A. A. (1991). Tolerance of Tomato Cultivars and Selected Germplasm to Heat Stress. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 116(6): 1113–1116 p.
- ABRAHAMSEN, P. & HANSEN, S. (2000). Daisy: an open soil-crop-atmosphere system model. *Environmental Modelling & Software*. 15(3): 313–330 p.
- ABUARAB, M. E., SHAHIEN, M. M. & HASSAN, A. M. (2012). Effects of regulated deficit irrigation and phosphorus fertilizers on yield, water use efficiency and total soluble solids of tomato. *American-Eurasian Journal Of Agricultural & Environmental Sciences*. 12(10): 1295–1304 p.
- ADAMS, P. & HO, L. C. (1993). Effects of environment on the uptake and distribution of calcium in tomato and on the incidence of blossom-end rot. *Plant and Soil*. 154: 127–132 p.
- AHMADI, S. H., MOSALLAEPOUR, E., KAMGAR-HAGHIGHI, A. A. & SEPASKHAH, A. R. (2015). Modeling Maize Yield and Soil Water Content with AquaCrop Under Full and Deficit Irrigation Managements. *Water Resources Management*. 29: 2837–2853 p.
- AKUMAGA, U., TARHULE, A. & YUSUF, A. A. (2017). Validation and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer on rainfed maize in Nigeria, West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*. 232: 225–234 p.
- ALLEN, R. G., SMITH, M., PEREIRA, L. S. & PERRIER, A. (1994). An Update for the Calculation of Reference Evapotranspiration. *ICID Bulletin*. 43(2): 35–92 p.
- ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, M. & AB, W. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper 56*. 1–15 p.
- ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., SMITH, M., RAES, D. & WRIGHT, J. L. (2005). *FAO-56 Dual Crop Coefficient Method for Estimating Evaporation from Soil and Application Extensions*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 131(1): 2–13 p.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS (ASAE). (1997). Test procedure for determining the uniformity of water distribution of center pivot and lateral move irrigation machines equipped with spray of sprinkler nozzles. ANSI/ASABE Standard S436.1. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, MI
- ANDARZIAN, B., BANNAYAN, M., STEDUTO, P., MAZRAEH, H., BARATI, M. E., BARATI, M. A. & RAHNAMA, A. (2011). Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*. 100: 1–8 p.
- AQUASTAT, F. GLOBAL INFORMATION SYSTEM. (2014a). *Area Equipped for Irrigation*. [Online], Elérhető: <http://www.fao.org/nr/aquastat>. Infografika.
- AQUASTAT, F. GLOBAL INFORMATION SYSTEM. (2014b). *Irrigated crops*. [Online], Elérhető: <http://www.fao.org/nr/aquastat>. Infografika.
- ARAB, L. & STECK, S. (2000). Lycopene and cardiovascular disease. *American Journal of Clinical Nutrition*. 71: 1691S–1695S p.
- AYARS, J. E., FULTON, A. & TAYLOR, B. (2015). Subsurface drip irrigation in California-Here to stay? *Agricultural Water Management*. 157: 39–47 p.

- B. MÜLLER, T. (2017). *Mezőgazdasági vízhasználat és öntözésfejlesztés*. Budapest. [Online], Elérhető: http://www.parlament.hu/documents/10181/1202209/Infojegyzet_2017_64_ontozesfejlesztés.pdf/e6e8b1af-c5c7-4485-98ee-479a966e801f. Infojegyzet.
- BAKR, J. A., DAOOD, H. G., PÉK, Z., HELYES, L. & POSTA, K. (2017). Yield and Quality of Mycorrhized Processing Tomato Under Water Scarcity. *Applied Ecology and Environmental Research*. 15(1): 401–413 p.
- BATES, L. M. & HALL, A. E. (1981). Stomatal Closure with Soil Water Depletion Not Associated with Changes in Bulk Leaf Water Status. *Oecologia*. 50: 62–65 p.
- BATTILANI, A., SOLIMANDO, D., JENSEN, C. R., PLAUBORG, F. L., ANDERSEN, M. N. & SANDEI, L. (2009). Water saving irrigation strategies for processing tomato. *Acta Horticulturae*. 823: 69–76 p.
- BATTILANI, A., PRIETO, M. H., ARGERICH, C., CAMPILLO, C. & CANTORE, V. (2012). Tomato. In: P. Steduto, T.C. Hsiao, E. Fereres, & D. Raes (eds.). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations *Fao Irrigation and Drainage Paper 66 - Crop yield response to water*. 192–201 p.
- BAUCHET, G. & CAUSSE, M. (2012). Genetic Diversity in Tomato (*Solanum lycopersicum*) and Its Wild Relatives. In: M. Caliskan (ed.). InTech *Genetic diversity in Plants*. 133–162 p.
- BELLVERT, J., ZARCO-TEJADA, P. J., GIRONA, J. & FERERES, E. (2014). Mapping crop water stress index in a ‘Pinot-noir’ vineyard: Comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. *Precision Agriculture*. 15: 361–376 p.
- BERNI, J. A. J., ZARCO-TEJADA, P. J., SEPULCRE-CANTÓ, G., FERERES, E. & VILLALOBOS, F. (2009). Remote Sensing of Environment Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery. *Remote Sensing of Environment*. 113(11): 2380–2388 p.
- BIRD, D. N., BENABDALLAH, S., GOUDA, N., HUMMEL, F., KOEBERL, J., LA JEUNESSE, I., MEYER, S., PRETTENTHALER, F., SODDU, A. & WOESS-GALLASCH, S. (2016). Modelling climate change impacts on and adaptation strategies for agriculture in Sardinia and Tunisia using AquaCrop and value-at-risk. *Science of the Total Environment*. 543: 1019–1027 p.
- BIRKÁS, M., STINGLI, A., SZEMŐK, A., KALMÁR, T. & BOTTLIK, L. (2008). Soil Condition and Plant Interrelations in Dry Years. In: Vol. 36. Akadémiai Kiadó *Cereal Research Communications*. 15–18 p.
- BIRÓ, S., APÁTI, F., SZÖLLŐSI, L., SZÜCS, I., KAPRONCZAI, I., SZÜCS, I., VÁRADI, L., APÁTI, F., BOJTÁRNÉ LUKÁCSIK, M., BOZÁN, C., FELKAI, B. O., GYALOG, G., HAMZA, E., KÖRÖSPARTI, J., PEKÁR, F., SZÉKELY, E., SZÖLLŐSI, L., TÓTH, P., VALENTINYI, K. & VARGA, E. (2011). Az öntözésfejlesztés gazdasági összefüggései. In: S. Biró, I. Kapronczai, I. Szűcs, & L. Váradi (eds.). Budapest: Agrárgazdasági Kutató Intézet *Vízhasználat és öntözésfejlesztés a magyar mezőgazdaságban*. 45–74 p.
- BŐCS, A., PÉK, Z., HELYES, L., NEMÉNYI, A. & KOMJÁTHY, L. (2009). Effect of Water Supply on Canopy Temperature and Yield of Processing Tomato. *Cereal Research Communications*. 37(January): 113–116 p.
- BŐCS, A., HELYES, L. & PÉK, Z. (2011). Simultaneous impact of the different water supply and year type on processing tomato yield. *International Journal of Horticultural Science*. 17: 79–81 p.
- BÖHM, V. (2006). *A likopin szerepe a szív- és érrendszeri rendellenességek megelőzésében*. [Online], Elérhető: http://www.lycocard.com/documents/public/Lyco_poster_HU_A4.pdf.

- BOLUWADE, A., MADRAMOOTOO, C. & YARI, A. (2016). Application of unsupervised clustering techniques for management zone delineation: Case study of variable rate irrigation in Southern Alberta, Canada. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 142(1): 1–8 p.
- BOOGAARD, H. L., DIEPEN, C. A. VAN, ROTTER, R. P., CABRERA, J. M. C. A. & LAAR, H. H. VAN. (1998). *WOFOST 7.1; user's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5*. (No. 52). SC-DLO.
- BOOTE, K. J., JONES, J. W. & PICKERING, N. B. (1996). Potential Uses and Limitations of Crop Models I. Model Use as a Research Tool. *Agronomy Journal*. 716: 704–716 p.
- BOZÁN, C., PÉTER, K., VÁRI, E., KISS, A., MISKÓ, K., DOMÁN, C., KEMÉNYNÉ HORVÁTH, Z. & GAÁL, M. (2018). *Az öntözhetőség természeti-gazdasági korlátainak hatása az öntözhető területekre*. Kemény G., Lámfalusi I., & Molnár A. (eds.). Budapest: Agrárgazdasági Kutató Intézet. 178 p.
- BRESSON, J., VASSEUR, F., DAUZAT, M., KOCH, G., GRANIER, C. & VILE, D. (2015). Quantifying spatial heterogeneity of chlorophyll fluorescence during plant growth and in response to water stress. *Plant Methods*. 11(1): 23 p.
- BRISSON, N., GARY, C., JUSTES, E., ROCHE, R., MARY, B., RIPOCHE, D., ZIMMER, D., SIERRA, J., BERTUZZI, P., BURGER, P., BUSSIÈRE, F., CABIDOCHÉ, Y. ., CELLIER, P., DEBAEKE, P., GAUDILLÈRE, J. ., HÉNAULT, C., MARAUX, F., SEGUIN, B. & SINOQUET, H. (2003). An overview of the crop model stics. *European Journal of Agronomy*. 18(3–4): 309–332 p.
- BURT, C. M., CLEMMENS, A. J., STRELKOFF, T. S., SOLOMON, K. H., BLIESNER, R. D., HARDY, L. A., HOWELL, T. A. & EISENHauer, D. E. (1997). Irrigation Performance Measures: Efficiency and Uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 123(6): 423–442 p.
- CAMEJO, D., RODRÍGUEZ, P., MORALES, M. A., DELL'AMICO, J. M., TORRECILLAS, A. & ALARCÓN, J. J. (2005). High temperature effects on photosynthetic activity of two tomato cultivars with different heat susceptibility. *Journal of Plant Physiology*. 162(3): 281–289 p.
- CAMP, C. R., SADLER, E. J. & EVANS, R. G. (2006). Precision Water Management: Current Realities, Possibilities and Trends. In: A. Srinivasan (ed.). Binghamton, NY: Food Products Press *Handbook of Precision Agriculture: Principles and Applications*. 683 p.
- CHALLINOR, A. J., EWERT, F., ARNOLD, S., SIMELTON, E. & FRASER, E. (2009). Crops and climate change: progress, trends, and challenges in simulating impacts and informing adaptation. *Journal of Experimental Botany*. 60(10): 2775–2789 p.
- CHRISTIANSEN, E. J. (1941). The uniformity of application of water by sprinkler systems. *Agricultural Engineering*. 22(3): 89–92 p.
- CHRISTMANN, A., HOFFMANN, T., TEPLOVA, I., GRILL, E. & MU, A. (2005). Generation of Active Pools of Abscisic Acid Revealed by In Vivo Imaging of Water-Stressed Arabidopsis 1. 137(January): 209–219 p.
- COLAIZZI, P. D., O'SHAUGHNESSY, S. A., EVETT, S. R. & MOUNCE, R. B. (2017). Crop evapotranspiration calculation using infrared thermometers aboard center pivots. *Agricultural Water Management*. 187: 173–189 p.
- CROPMETRICS WEBSITE. (2018). *VRI Optimization – CropMetrics*. [Online], Elérhető: <http://cropmetrics.com/services/vri-optimization/> Lekérdezés időpontja: 2018.12.06.
- DACCACHE, A., KNOX, J. W., WEATHERHEAD, E. K., DANESHKHAH, A. & HESS, T. M. (2015). Implementing precision irrigation in a humid climate - Recent experiences and on-going challenges. *Agricultural Water Management*. 147: 135–143 p.

- DEJONGE, K. C., TAGHVAEIAN, S., TROUT, T. J. & COMAS, L. H. (2015). Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize. *Agricultural Water Management*. 156: 51–62 p.
- DONATELLI, M., RUSSELL, G., RIZZOLI, A. E., ACUTIS, M., ADAM, M., ATHANASIADIS, I. N., BALDERACCHI, M., BECHINI, L., BELHOUCLETTE, H., BELLOCCHI, G., BERGEZ, J.-E., BOTTA, M., BRAUDEAU, E., BREGAGLIO, S., CARLINI, L., CASELLAS, E., CELETTE, F., CEOTTO, E., CHARRON-MOIREZ, M. H., CONFALONIERI, R., CORBEELS, M., CRISCUOLO, L., CRUZ, P., GUARDO, A., DITTO, D., DUPRAZ, C., DURU, M., FIORANI, D., GENTILE, A., EWERT, F., GARY, C., HABYARIMANA, E., JOUANY, C., KANSOU, K., KNAPEN, R., FILIPPI, G. L., LEFFELAAR, P. A., MANICI, L., MARTIN, G., MARTIN, P., MEUTER, E., MUGUETA, N., MULIA, R., NOORDWIJK, M., OOMEN, R., ROSENMUND, A., ROSSI, V., SALINARI, F., SERRANO, A., SORCE, A., VINCENT, G., THEAU, J.-P., THÉRON, O., TREVISAN, M., TREVISIOL, P., EVERT, F. K., WALLACH, D., WERY, J. & ZEROUROU, A. (2010). A Component-Based Framework for Simulating Agricultural Production and Externalities. In: Dordrecht: Springer Netherlands *Environmental and Agricultural Modeling*: 63–108 p.
- DOORENBOS, J. & PRUITT, W. O. (1977). Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*. 24: 144 p.
- DRACUP, J. A., LEE, K. S. & PAULSON, JR., E. G. (1980). On the Definition of Droughts. *Water Resources Research*. 16(2): 297–302 p.
- DUKES, M. D. & PERRY, C. (2006). Uniformity testing of variable-rate center pivot irrigation control systems. *Precision Agriculture*. 7(3): 205–218 p.
- DUMAS, Y., DADOMO, M., DI LUCCA, G. & GROLIER, P. (2003). Effects of environmental factors and agricultural techniques on antioxidant content of tomatoes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 83(5): 369–382 p.
- ELVANIDI, A., KATSIOULAS, N., FERENTINOS, K. P., BARTZANAS, T. & KITTAS, C. (2018). Hyperspectral machine vision as a tool for water stress severity assessment in soilless tomato crop. *Biosystems Engineering*. 165: 25–35 p.
- EMBIALE, A., HUSSEIN, M., HUSEN, A., SAHILE, S. & MOHAMMED, K. (2016). Differential sensitivity of *pisum sativum* L. cultivars to water-deficit stress: Changes in growth, water status, chlorophyll fluorescence and gas exchange attributes. *Journal of Agronomy*. 15(2): 45–57 p.
- EURÓPAI PARLAMENT ÉS TANÁCS. (2000). *2000/60/EK irányelv a vízpolitika terén a közösségi fellépés kereteinek meghatározásáról*. 93 p.
- EVANS, R. G., LARUE, J., STONE, K. C. & KING, B. A. (2013). Adoption of site-specific variable rate sprinkler irrigation systems. *Irrigation Science*. 31(4): 871–887 p.
- FAO. (2016a). *AQUASTAT website*. [Online], Elérhető: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/didyouknow/index3.stm> Lekérdezés időpontja: 2018.12.04.
- FAO. (2016b). *Area equipped for full control irrigation (1000 ha)*. [Online], Elérhető: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/maps/World-Map.EqIrr_eng.htm Lekérdezés időpontja: 2019.3.10.
- FAO. (2018). *Crop information: Tomato*. [Online], Elérhető: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/tomato/en/> Lekérdezés időpontja: 2018.12.11.

- FARNESELLI, M., BENINCASA, P., TOSTI, G., SIMONNE, E., GUIDUCCI, M. & TEI, F. (2015). High fertigation frequency improves nitrogen uptake and crop performance in processing tomato grown with high nitrogen and water supply. *Agricultural Water Management*. 154: 52–58 p.
- FAVATI, F., LOVELLI, S., GALGANO, F., MICCOLIS, V., DI TOMMASO, T. & CANDIDO, V. (2009). Processing tomato quality as affected by irrigation scheduling. *Scientia Horticulturae*. 122(4): 562–571 p.
- FERERES, E. & SORIANO, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*. 58(2): 147–159 p.
- FIEBIG, A. & DODD, I. C. (2016). Inhibition of tomato shoot growth by over-irrigation is linked to nitrogen deficiency and ethylene. *Physiologia Plantarum*. 156(1): 70–83 p.
- FLIR WEBSITE. (n.d.). *FLIR ONE Gen 2 - Buy Page | FLIR Systems*. [Online], Elérhető: <https://www.flir.com/flir-one/flir-one-gen-2---buy-page/> Lekérdezés időpontja: 2019.1.19.
- FOX, J. & BOUCHET-VALAT, M. (2017). Rcmdr: R Commander. R package version 2.3-2
- FRANKE, R. & NIELSON, G. (1980). Smooth interpolation of large sets of scattered data. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 15(11): 1691–1704 p.
- GAGO, J., DOUTHE, C., COOPMAN, R. E., GALLEGO, P. P., RIBAS-CARBO, M., FLEXAS, J., ESCALONA, J. & MEDRANO, H. (2015). UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture. *Agricultural Water Management*. 153: 9–19 p.
- GAMON, J. A., PENUELAS, J. & FIELD, C. B. (1992). A Narrow-Waveband Spectral Index That Tracks Diurnal Changes in Photosynthetic Efficiency. *Remote Sensing of Environment*. 41: 35–44 p.
- GARCÍA-VILA, M. & FERERES, E. (2012). Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *European Journal of Agronomy*. 36(1): 21–31 p.
- GASPAR, T., FRANCK, T., BISBIS, B., KEVERS, C., JOUVE, L., HAUSMAN, J. F. & DOMMES, J. (2002). Concepts in plant stress physiology. Application to plant tissue cultures. *Plant Growth Regulation*. 37(3): 263–285 p.
- GERHARDS, M., ROCK, G., SCHLERF, M. & UDELHOVEN, T. (2016). Water stress detection in potato plants using leaf temperature, emissivity, and reflectance. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 53: 27–39 p.
- GIOVANNUCCI, E., RIMM, E. B., LIU, Y., STAMPFER, M. J. & WILLET, W. C. (2002). A Prospective Study of Tomato Products, Lycopene, and Prostate Cancer Risk. *Journal of the National Cancer Institute*. 94(5): 391–398 p.
- GIULIANI, M. M., GATTA, G., NARDELLA, E. & TARANTINO, E. (2016). Water saving strategies assessment on processing tomato cultivated in Mediterranean region. *Italian Journal of Agronomy*. 11(1): 69–76 p.
- GONZÁLEZ PEREA, R., FERNÁNDEZ GARCÍA, I., MARTIN ARROYO, M., RODRÍGUEZ DÍAZ, J. A., CAMACHO POYATO, E. & MONTESINOS, P. (2017). Multiplatform application for precision irrigation scheduling in strawberries. *Agricultural Water Management*. 183: 194–201 p.
- GREAVES, G. AND WANG, Y.M., 2016. Assessment of FAO aquacrop model for simulating maize growth and productivity under deficit irrigation in a tropical environment. *Water*, 8(12): 557 p.
- HAMAR, N. & VARGA, G. (1985). A paradicsom környezeti igényei. In: *Paradicsomtermesztés* Második átdolgozott ed. Budapest: Mezőgazdasági Kiadó. 63–75 p.

- HARTZ, T. K., MIYAO, G., MULLEN, R. J., CAHN, M. D., VALENCIA, J. & BRITTAN, K. L. (1999). Potassium requirements for maximum yield and fruit quality of processing tomato. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 124(2): 199–204 p.
- HARTZ, T. K., JOHNSTONE, P. R., FRANCIS, D. M. & MIYAO, E. M. (2005). Processing tomato yield and fruit quality improved with potassium fertigation. *HortScience*. 40(6): 1862–1867 p.
- HEDLEY, C. B. & YULE, I. J. (2009). Soil water status mapping and two variable-rate irrigation scenarios. *Precision Agriculture*. 10(4): 342–355 p.
- HELYES, L. (1990). Relations among the water supply, foliage temperature and the yield of tomato. *Acta horticulturae*. 227: 115–121 p.
- HELYES, L. (1999). *A paradicsom és termesztése*. 1. kiadás ed. Budapest: SYCA Szakkönyvszolgálat. 234 p.
- HELYES, L. & VARGA, G. (1994). Irrigation demand of tomato according to the results of three decades. *Acta Horticulturae*. 376: 323–328 p.
- HELYES, L., GY, V., PÉK, Z. & DIMÉNY, J. (1999). The simultaneous effect of variety, irrigation and weather on tomato yield. *Acta Horticulturae*. 487: 499–505 p.
- HELYES, L., PÉK, Z. & MCMICHAEL, B. (2006). Relationship between the stress degree day index and biomass production and the effect and timing of irrigation in snap bean (*Phaseolus vulgaris* var. *nanus*) stands: results of a long term experiments. *Acta Botanica Hungarica*. 48(3–4): 311–321 p.
- HELYES, L., LUGASI, A. & PÉK, Z. (2012). Effect of irrigation on processing tomato yield and antioxidant components. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 36(6): 702–709 p.
- HELYES, L., NEMÉNYI, A., PÉK, Z., BERKI, M. & DAOOD, H. G. (2013). Effect of variety and water supply on phytochemical (phenolics and carotenoids) content and composition of processing tomato. *Acta Horticulturae*. 971: 93–98 p.
- HELYES, L., LUGASI, A., DAOOD, H. G. & PÉK, Z. (2014). The simultaneous effect of water supply and genotype on yield quantity, antioxidants content and composition of processing tomatoes. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 42(1): 143–149 p.
- HENG, L., MOUTONNET, P. & SMITH, M. (2002). Deficit irrigation practices. *Water Reports* 22. *Water Reports N° 22*. 102 p.
- HOUSE, M., WILHITE, D. A. & GLANTZ, M. H. (1985). The Role of Definitions Understanding : the Drought Phenomenon : The Role of Definitions. *Water International*. 10: 111–120 p.
- HOYT, W. G. (1942). Droughts. In: New York, NY: Dover Publications *Hydrology*. 579 p.
- HSIAO, T. C., HENG, L., STEDUTO, P., ROJAS-LARA, B., RAES, D. & FERERES, E. (2009). Aquacrop- The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*. 101(3): 448–459 p.
- IDSO, S. B., JACKSON, R. D., PINTER, P. J., REGINATO, R. J. & HATFIELD, J. L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*. 24: 45–55 p.
- IHUOMA, S. O. & MADRAMOOTOO, C. A. (2017). Recent advances in crop water stress detection. *Computers and Electronics in Agriculture*. 141: 267–275 p.
- IQBAL, M. A., SHEN, Y., STRICEVIC, R., PEI, H., SUN, H., AMIRI, E. & PENAS, A. (2014). Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agricultural Water Management*. 135: 61–72 p.

- IRMAK, S., ODHIAMBO, L. O., KRANZ, W. L. & EISENHAEUER, D. E. (2011). Irrigation Efficiency and Uniformity, and Crop Water Use Efficiency. *Biological Systems Engineering: Papers and Publications*. 451: 8 p.
- JACKSON, R. D., REGINATO, R. J. & IDSO, S. B. (1977). Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research*. 13(3): 651–656 p.
- JACKSON, R. D., IDSO, S. B., REGINATO, R. J. & PINTER, J. P. J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water resources research*. 17(4): 1133–1138 p.
- JOHNSTONE, P. R., HARTZ, T. K., LESTRANGE, M., NUNEZ, J. J. & MIYAO, E. M. (2005). Managing fruit soluble solids with late-season deficit irrigation in drip-irrigated processing tomato production. *HortScience*. 40(6): 1857–1861 p.
- JOLÁNKAI, M., KASSAI M., K., TARNAWA, Á., PÓSA, B. & BIRKÁS, M. (2018). Impact of precipitation and temperature on the grain and protein yield of wheat (*Triticum aestivum* L) varieties. *Időjárás*. 122(1): 31–40 p.
- JONES, H. G. (1999). Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology*. 95(3): 139–149 p.
- JONES, H. G. (2004). Application of Thermal Imaging and Infrared Sensing in Plant Physiology and Ecophysiology. *Advances in Botanical Research*. 41: 107–163 p.
- JONES, H. G., STOLL, M., SANTOS, T., SOUSA, C. DE, CHAVES, M. M. & GRANT, O. M. (2002). Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. *Journal of Experimental Botany*. 53(378): 2249–2260 p.
- JONES, J. ., HOOGENBOOM, G., PORTER, C. ., BOOTE, K. ., BATCHELOR, W. ., HUNT, L. ., WILKENS, P. ., SINGH, U., GIJSMAN, A. . & RITCHIE, J. . (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*. 18(3–4): 235–265 p.
- KARUNARATNE, A. S., AZAM-ALI, S. N., IZZI, G. & STEDUTO, P. (2011). Calibration and Validation of FAO-AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Bambara Groundnut. *Experimental Agriculture*. 47(3): 509–527 p.
- KATERJI, N., CAMPI, P. & MASTRORILLI, M. (2013). Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*. 130: 14–26 p.
- KINET, J. M. (1977). Effect of light conditions on the development of the inflorescence in tomato. *Scientia Horticulturae*. 6: 15–26 p.
- KING, B. A., STARK, J. C. & WALL, R. W. (2006). COMPARISON OF SITE-SPECIFIC AND CONVENTIONAL UNIFORM IRRIGATION MANAGEMENT FOR POTATOES. *Applied Engineering in Agriculture*. 22(5): 677–688 p.
- KIPTUM, C. K., KIPKORIR, E. C., MUNYAO, T. M. & NDAMBUKI, J. M. (2013). Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of cabbages in Keiyo Highlands. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*. 5(7): 360–369 p.
- KIRKHAM, M. B. (2014). Stomatal Anatomy and Stomatal Resistance. In: *Principles of Soil and Plant Water Relations*. 431–451 p.
- KÖZPONTI STATISZTIKAI HIVATAL. (2018). *KSH adatok: Mezőgazdasági vízfelhasználás (2000–)*. [Online], Elérhető: http://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_aves/i_uw001.html Lekérdezés időpontja: 2018.12.05.

- KRANZ, W. L., EVANS, R. G., LAMM, F. R. & PETERS, R. T. (2012). A Review of Mechanical Move Sprinkler Irrigation Control and Automation Technologies. *Applied engineering in agriculture*. 28(3): 389–397 p.
- KRUSE, E. G. (1978). Describing Irrigation Efficiency and Uniformity. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*. 104(1): 35–41 p.
- KUŞÇU, H., TURHAN, A., DEMİR, A. O., KUŞÇU, H., TURHAN, A. & DEMİR, A. O. (2014). The response of processing tomato to deficit irrigation at various phenological stages in a sub-humid environment. *Agricultural Water Management*. 133: 92–103 p.
- LE, T. A., PÉK, Z., TAKÁCS, S., NEMÉNYI, A., DAOOD, H. G. & HELYES, L. (2018). The Effect of Plant Growth Promoting Rhizobacteria on the Water-yield Relationship and Carotenoid Production of Processing Tomatoes Zolt a. *HortScience*. 53(6): 816–822 p.
- LEVITT, J. (1958). Frost, Drought, and Heat Resistance. In: Vienna: Springer Vienna *Frost, Drought, and Heat Resistance. Protoplasmatologia (Handbuch der Protoplasmaforschung)*. 1–85 p.
- LINKER, R., IOSLOVICH, I., SYLAIOS, G., PLAUBORG, F. & BATTILANI, A. (2016). Optimal model-based deficit irrigation scheduling using AquaCrop: A simulation study with cotton, potato and tomato. *Agricultural Water Management*. 163: 236–243 p.
- LINSLEY JR., R. K., KOHLER, M. A. & PAULHUS, J. (1975). *Hydrology for engineers*. New York, NY: McGraw-Hill, Incorporated. 482 p.
- LIU, K., CANADA, A., ZHANG, T. Q., CANADA, A., TAN, C. S., CANADA, A. & ASTATKIE, T. (2011). Responses of Fruit Yield and Quality of Processing Tomato to Drip-Irrigation and Fertilizers Phosphorus and Potassium. *Agronomy Journal*. 103(5): 1339–1345 p.
- MACUA, J. I., LAHOZ, I., ARZOZ, A. & GARNICA, J. (2003). The influence of irrigation cut-off time on the yield and quality of processing tomatoes. *Acta Horticulturae*. 613: 151–153 p.
- MANIRUZZAMAN, M., TALUKDER, M. S. U., KHAN, M. H., BISWAS, J. C. & NEMES, A. (2015). Validation of the AquaCrop model for irrigated rice production under varied water regimes in Bangladesh. *Agricultural Water Management*. 159: 331–340 p.
- MANTOVANI, E. C., VILLALOBOS, F. J., ORGAN, F. & FERERES, E. (1995). Modelling the effects of sprinkler irrigation uniformity on crop yield. *Agricultural Water Management*. 27(3–4): 243–257 p.
- MAROSÁN, Á. (2016). *Öntözésjelentés*. Budapest. Agrárgazdasági Kutató Intézet. XIX. (1) 18 p.
- MAROSÁN, Á. (2017). *Öntözésjelentés*. Budapest. Agrárgazdasági Kutató Intézet. XX. (1) 17 p.
- MCGUIRE, J. K. & PALMER, W. C. (1957). The 1957 Drought in the Eastern United States. *Monthly Weather Review*. 85(9): 305–314 p.
- MERON, M., TSIPRIS, J., ORLOV, V., ALCHANATIS, V. & COHEN, Y. (2010). Crop water stress mapping for site-specific irrigation by thermal imagery and artificial reference surfaces. *Precision Agriculture*. 11(2): 148–162 p.
- MOHAMMADI, M., GHAHRAMAN, B., DAVARY, K., ANSARI, H., SHAHIDI, A. & BANNAYAN, M. (2016). Nested Validation of Aquacrop Model for Simulation of Winter Wheat Grain Yield, Soil Moisture and Salinity Profiles under Simultaneous Salinity and Water Stress. *Irrigation and Drainage*. 65: 112–128 p.
- MONTOYA, F., CAMARGO, D., ORTEGA, J. F., CÓRCOLES, J. I. & DOMÍNGUEZ, A. (2016). Evaluation of Aquacrop model for a potato crop under different irrigation conditions. *Agricultural Water Management*. 164: 267–280 p.

- MORALES, D., RODRÍGUEZ, P., DELL'AMICO, J., NICOLÁS, E., TORRECILLAS, A. & SÁNCHEZ-BLANCO, M. J. (2003). High-temperature preconditioning and thermal shock imposition affects water relations, gas exchange and root hydraulic conductivity in tomato. *Biologia Plantarum*. 47(2): 203–208 p.
- NANGARE, D. D., SINGH, Y., KUMAR, P. S. & MINHAS, P. S. (2016). Growth, fruit yield and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) as affected by deficit irrigation regulated on phenological basis. *Agricultural Water Management*. 171: 73–79 p.
- NARDELLA, E., GIULIANI, M. M., GATTA, G., TARANTINO, E. & DE CARO, A. (2008). Irrigation Scheduling in Processing Tomato Crop Cultivated in Southern Italy: the Role of Physiological Parameters. In: Vol. 3 *Italian Journal of Agronomy*. 685–686 p.
- NEMESKÉRI, E., MOLNÁR, K., VÍGH, R., NAGY, J. & DOBOS, A. (2015). Relationships between stomatal behaviour, spectral traits and water use and productivity of green peas (*Pisum sativum* L.) in dry seasons. *Acta Physiologiae Plantarum*. 37(2): 34 p.
- NEMESKÉRI, E., MOLNÁR, K., PÉK, Z. & HELYES, L. (2018). Effect of water supply on the water use-related physiological traits and yield of snap beans in dry seasons. *Irrigation Science*. 36(3): 143–158 p.
- NEMZETI VÍZSTRATÉGIA. (2017). *Nemzeti Vízstratégia (Kvassay Jenő Terv)*. 140 p.
- NESBITT, T. C. & TANKSLEY, S. D. (2002). Comparative sequencing in the genus *lycopersicon*: Implications for the evolution of fruit size in the domestication of cultivated tomatoes. *Genetics*. 162(1): 365–379 p.
- NILSEN, E. & ORCUTT, D. M. (1996). *The Physiology of Plants Under Stress - Abiotic factors*. New York, New York, USA: John Wiley and Sons, Inc. 689 p.
- NOVÁKY, B., BUSSAYS, A. & DOMONKOS, P. (1996). Éghajlati változások hatása az öntözővízigényre. *Éghajlati és meteorológiai tanulmányok* 5. 108 p.
- O'SHAUGHNESSY, S. A., URREGO, Y. F., EVETT, S. R., COLAIZZI, P. D. & HOWELL, T. A. (2013). Assessing application uniformity of a variable rate irrigation system in a windy location. *Applied Engineering in Agriculture*. 29(4): 497–510 p.
- O'SHAUGHNESSY, S. A., EVETT, S. R., ANDRADE, M. A., WORKNEH, F., PRICE, J. A. & RUSH, C. M. (2016). Site-Specific Variable-Rate Irrigation as a Means to Enhance Water Use Efficiency. *Transactions of the ASABE*. 59(1): 239–249 p.
- OKE, M., AHN, T., SCHOFIELD, A. & PALIYATH, G. (2005). Effects of Phosphorus Fertilizer Supplementation on Processing Quality and Functional Food Ingredients in Tomato. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 53: 1531–1538 p.
- ORSZÁGOS METEOROLÓGIAI SZOLGÁLAT. (2018). *Magyarország éghajlata - általános leírás*. [Online], Elérhető: https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/altalanos_eghajlati_jellemzes/altalanos_leiras/ Lekérdezés időpontja: 2018.10.29.
- ORSZÁGOS VÍZÜGYI FŐIGAZGATÓSÁG. (2016). *Tájékoztató a 2017. évi mezőgazdasági vízszolgáltatásról - Országos Vízügyi Főigazgatóság*. [Online], Elérhető: <http://www.ovf.hu/hu/hirek-ovf/-1> Lekérdezés időpontja: 2018.12.05.
- ORSZÁGOS VÍZÜGYI FŐIGAZGATÓSÁG (2019). *Mezőgazdasági Vízhasználat Információs és ellenőrzési Keretrendszer (VIZEK) kialakítása*. [Online], Elérhető: <http://www.ovf.hu/hu/futo-projektek/vizek> Lekérdezés időpontja: 2019.3.12.
- PALMER, W. C. (1965). Meteorological Drought. *Research Paper No. 45*. 58 p.

- PAREDES, P., DE MELO-ABREU, J. P., ALVES, I. & PEREIRA, L. S. (2014). Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization. *Agricultural Water Management*. 144: 81–97 p.
- PAREDES, P., WEI, Z., LIU, Y., XU, D., XIN, Y., ZHANG, B. & PEREIRA, L. S. (2015). Performance assessment of the FAO aquaCrop model for soil water, soil evaporation, biomass and yield of soybeans in north china plain. *Agricultural Water Management*. 152: 57–71 p.
- PATANÉ, C. & COSENTINO, S. L. (2010). Effects of soil water deficit on yield and quality of processing tomato under a Mediterranean climate. *Agricultural Water Management*. 97(1): 131–138 p.
- PATANÉ, C., TRINGALI, S. & SORTINO, O. (2011). Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions. *Scientia Horticulturae*. 129(4): 590–596 p.
- PATANÉ, C., LA ROSA, S., PELLEGRINO, A., SORTINO, O. & SAITA, A. (2014). Water productivity and yield response factor in two cultivars of Processing tomato as affected by deficit irrigation under semi-arid climate conditions. *Acta Horticulturae*. 1038: 449–454 p.
- PATIL, B. C., HOSAMANI, R. M., AJAPPALAVARA, P. S., NAIK, B. H., SMITHA, R. P. & UKKUND, K. C. (2008). Effect of Foliar Application of Micronutrients on Growth and Yield components of Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill .). *Karnataka Journal of Agricultural Sciences*. 21(3): 428–430 p.
- PÉK, Z., SZUVANDZSIEV, P., DAOOD, H. G., NEMÉNYI, A. & HELYES, L. (2014). Effect of irrigation on yield parameters and antioxidant profiles of processing cherry tomato. *Central European Journal of Biology*. 9(4): 383–395 p.
- PÉK, Z., SZUVANDZSIEV, P., NEMÉNYI, A. & HELYES, L. (2015). Effect of season and irrigation on yield parameters and soluble solids content of processing cherry tomato. In: Vol. 1081 *Acta Horticulturae*. 197–202 p.
- PÉK, Z., DAOOD, H. G., NEMÉNYI, A., HELYES, L. & SZUVANDZSIEV, P. (2017). Seasonal and irrigation effect on yield parameters and soluble solids content of processing cherry tomato. *Acta Horticulturae*. 1159: 45–49 p.
- PEÑUELAS, J., FILELLA, I., BIEL, C., SERRANO, L. & SAVÉ, R. (1993). The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing*. 14(10): 1887–1905 p.
- PEREIRA, L. S., PAREDES, P., RODRIGUES, G. C. & NEVES, M. (2015). Modeling malt barley water use and evapotranspiration partitioning in two contrasting rainfall years. Assessing AquaCrop and SIMDualKc models. *Agricultural Water Management*. 159: 239–254 p.
- PERRY, C., POCKNEE, S. & HANSEN, O. (2003). A variable rate pivot irrigation control system. In: J. Stafford & A. Werner (eds.). Wageningen Academic Publishers *Precision Agriculture*. 1–6 p.
- R CORE TEAM. (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. [Online], Elérhető: <https://www.r-project.org/>.
- RAES, D. (2017). *AquaCrop training handbooks Book I Understanding AquaCrop*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. [Online], Elérhető: <http://www.fao.org/3/a-i6051e.pdf>.
- RAES, D., STEDUTO, P., HSIAO, T. C. & FERERES, E. (2009). AquaCropThe FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agronomy Journal*. 101(3): 438 p.

- RAINE, S. R., MEYER, W. S., RASSAM, D. W., HUTSON, J. L. & COOK, F. J. (2007). Soil-water and solute movement under precision irrigation: Knowledge gaps for managing sustainable root zones. *Irrigation Science*. 26(1): 91–100 p.
- RAPAPORT, T., HOCHBERG, U., COHAVI, A., KARNIELI, A. & RACHMILEVITCH, S. (2017). The potential of the spectral “water balance index” (WABI) for crop irrigation scheduling. *The New phytologist*. 216(3): 741–757 p.
- RENKA, R. J. (1988). Algorithm 660: QSHEP2D: Quadratic Shepard Method for Bivariate Interpolation of Scattered Data. *ACM Transactions on Mathematical Software*. 14(2): 149–150 p.
- RICZU, P., NAGY, A. & TAMÁS, J. (2014). Hyperspectral data in water stress detection. *International Journal of Horticultural Science*. 20(3–4): 15–17 p.
- RINALDI, M., GAROFALO, P., RUBINO, P. & STEDUTO, P. (2011). Processing tomatoes under different irrigation regimes in Southern Italy: Agronomic and economic assessments in a simulation case study. *Italian Journal of Agrometeorology*. (3): 39 p.
- ROSENBERG, N. (2010). Climate change, agriculture, water resources: what do we tell those that need to know? *Climatic change*. 100: 113–117 p.
- RUBATZKY, V. E. & YAMAGUCHI, M. (1997). Tomatoes, Peppers, Eggplants, and Other Solanaceous Vegetables. In: 2nd ed. New York: Chapman and Hall *World vegetables*. 532–575 p.
- RUDICH, J., KALMAR, D., GEIZENBERG, C. & HAREL, S. (1977). Low Water Tensions in Defined Growth Stages of Processing Tomato Plants and their Effects on Yield and Quality. *Journal of Horticultural Science*. 52(3): 391–399 p.
- SALEMI, H., AMIN, M., SOOM, M., LEE, T. S., MOUSAVI, S. F., GANJI, A. & KAMILYUSOFF, M. (2011). Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of Winter wheat in arid region. *African Journal of Agricultural Research*. 610: 2204–2215 p.
- SÁRI, Z. (2015). A Shepard interpoláció bemutatása. Óbudai Egyetem. [Online], Elérhető: http://sarizoltan.hu/sites/all/themes/mytheme/assets/files/SariZoltan_Shepard.pdf. 8 p. Lekérdezés időpontja: 2019.03.12.
- SAURE, M. C. (2001). Blossom-end rot of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill .) ð a calcium- or a stress-related disorder ? *Scientia Horticulturae*. 90: 193–208 p.
- SCHNEIDER, A. D. (2000). Efficiency and Uniformity of the LEPA and Spray Sprinkler Methods: A Review. *Transactions of the ASAE*. 43(4): 937–944 p.
- SCHÖBER, G. M. (2017). Az öntözésfejlesztés gátjai Magyarországon. *Agrofórum Online*. [Online], Elérhető: <https://agroforum.hu/szakcikkek/novenytermesztes-szakcikkek/az-ontozesfejlesztes-gatjai-magyarorszagon> Lekérdezés időpontja: 2018.12.05.
- SEZEN, S. M., YAZAR, A., DAS, Y., YUCEL, S. & AKYILDIZ, A. (2014). Evaluation of crop water stress index (CWSI) for red pepper with drip and furrow irrigation under varying irrigation regimes. *Agricultural Water Management*. 143: 59–70 p.
- SHEPARD, D. & DONALD. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In: New York, New York, USA: ACM Press *Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference*. 517–524 p.
- SMITH, R. J., BAILLIE, J. N. & FUTURES, I. (2009). Defining precision irrigation : A new approach to irrigation management. *National Centre for Engineering in Agriculture and Cooperative Research Centre for Irrigation Futures*., 18–21 p.
- SOMOS, A. (1978). A paradicsom. Budapest: Akadémiai kiadó. 112 p.

- SPINONI, J., NAUMANN, G., VOGT, J. V. & BARBOSA, P. (2015). The biggest drought events in Europe from 1950 to 2012. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 3: 509–524 p.
- SPITTERS, C. J. T. (1990). Crop Growth Models: Their Usefulness and Limitations. *Acta Horticulturae*. 267: 349–368 p.
- STEDUTO, P., RAES, D., HSIAO, T. C. & FERERES, E. (2009). AquaCrop : A New Model for Crop Prediction Under Water Deficit Conditions AquaCrop. FAO, Rome, 33(80): 285-292 p.
- STEDUTO, P., HSIAO, T. C., RAES, D. & FERERES, E. (2009). AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*. 101(3): 426–437 p.
- STEDUTO, P., HSIAO, T., FERERES, E. & RAES, D. (2012). *Crop yield response to water*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 151 p.
- STOCKLE, C. O., MARTIN, S. A. & CAMPBELL, G. S. (1994). CropSyst, a cropping systems simulation model: Water/nitrogen budgets and crop yield. *Agricultural Systems*. 46(3): 335–359 p.
- SUI, R. & FISHER, D. K. (2015). Field test of a center pivot irrigation system. *Applied Engineering in Agriculture*. 31(1): 83–88 p.
- SZALAI, S. (2009). Drought Tendencies in Hungary and its Impacts on the Agricultural Production. *Cereal Research Communications*. 37: 501–504 p.
- SZÁSZ, G. (1988). A vízgazdálkodás agrometeorológiája. In: Budapest: Mezőgazdasági Kiadó *Agrometeorológia*. 289–365 p.
- TAKÁCS, S., MÁTHÉ, B., KATONA, B. L., LE, A. T. & PÉK, Z. (2017). Ipari paradicsom modellezése AquaCrop szoftverrel. *Kertgazdaság*. 49(4): 31–38 p.
- TAKÁCS, S., HELYES, L., BÍRÓ, T. & PÉK, Z. (2018a). Irrigation water saving method using precision technology. Budapest. PREGA Science 2018. 44-45 p.
- TAKÁCS, S., BÍRÓ, T., HELYES, L. & PÉK, Z. (2018b). [Online] Variable rate precision irrigation technology for deficit irrigation of processing tomato. *Irrigation and Drainage*. in press.
- TAKÁCS, S., MOLNÁR, T., CSENGERI, E. & LE, T. A. (2018c). Application of AquaCrop in Processing Tomato Growing and Calculation of Irrigation Water. *Acta Agraria Debreceniensis*. 74: 183-187 p.
- TALLEMENCO. (2011). *Auditing: Pumping and Pipelines*. [Online], Elérhető: <http://www.talle.biz/pipes.html> Lekérdezés időpontja: 2019.1.02.
- TANKSLEY, S. D. (2004). The Genetic , developmental, and molecular bases of fruit size in tomato and shape variation. *Plant Cell*. 16(2004): 181–190 p.
- TARDIEU, F. & DAVIES, W. J. (1983). Integration of hydraulic and chemical signalling in the control of stomatal conductance and water status of droughted plants. *Plant, Cell and Environment*. 16: 341–349 p.
- TAVAKOLI, A. R., MAHDAVI MOGHADAM, M. & SEPASKHAH, A. R. (2015). Evaluation of the AquaCrop model for barley production under deficit irrigation and rainfed condition in Iran. *Agricultural Water Management*. 161: 136–146 p.
- TODOROVIC, M., ALBRIZIO, R., ZIVOTIC, L., ABI SAAB, M. T., STÖCKLE, C. & STEDUTO, P. (2009). Assessment of aquacrop, cropsyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy Journal*. 101(3): 509–521 p.

- TOUMI, J., ER-RAKI, S., EZZAHAR, J., KHABBA, S., JARLAN, L. & CHEHBOUNI, A. (2016). Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. *Agricultural Water Management*. 163: 219–235 p.
- TROMBETTA, A., IACOBELLIS, V., TARANTINO, E. & GENTILE, F. (2016). Calibration of the AquaCrop model for winter wheat using MODIS LAI images. *Agricultural Water Management*. 164(Part 2): 304–316 p.
- TURNER, N. C. (1991). Measurement and influence of environmental and plant factors on stomatal conductance in the field. *Agricultural and Forest Meteorology*. 54: 137–154 p.
- UNITED NATIONS. (2015). *70/1. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York, New York, USA. 35 p.
- UNITED NATIONS. (2016). *70/198. Agricultural technology for sustainable development*. 6 p.
- VANUYTRECHT, E., RAES, D., STEDUTO, P., HSIAO, T. C., FERERES, E., HENG, L. K., GARCIA VILA, M. & MEJIAS MORENO, P. (2014). AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environmental Modelling & Software*. 62: 351–360 p.
- VARGA-HASZONITS, Z. (1987). Káros meteorológiai jelenségek. In: Budapest: Mezőgazdasági Kiadó *Agrometeorológiai információk és hasznosításuk*. 156–175 p.
- WANG, E., ROBERTSON, M. J., HAMMER, G. L., CARBERRY, P. S., HOLZWORTH, D., MEINKE, H., CHAPMAN, S. C., HARGREAVES, J. N. G., HUTH, N. I. & MCLEAN, G. (2002). Development of a generic crop model template in the cropping system model APSIM. *European Journal of Agronomy*. 18(1–2): 121–140 p.
- WELLENS, J., RAES, D., TRAORE, F., DENIS, A., DJABY, B. & TYCHON, B. (2013). Performance assessment of the FAO AquaCrop model for irrigated cabbage on farmer plots in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*. 127: 40–47 p.
- WHISLER, F. D., B., A., BAKER, D. N., FYE, R. E., HODGES, H. F., LAMBER, J. R., H.E. LEMON, H. E., MCKINION, J. M. & REDDY, V. R. (1986). Crop simulation models in agronomic systems. *Advances in Agronomy*. 40: 141–208 p.
- WOLCHOVER, N. (2018). *What is Drought?* [Online], Elérhető: <https://www.livescience.com/21469-drought-definition.html> Lekérdezés időpontja: 2019.03.12.
- YACOUBI, S., ZAYANI, K., ZAPATA, N., ZAIRI, A., SLATNI, A., SALVADOR, R. & PLAYÁN, E. (2010). Day and night time sprinkler irrigated tomato: Irrigation performance and crop yield. *Biosystems Engineering*. 107(1): 25–35 p.
- YARI, A., MADRAMOOTOO, C. A., WOODS, S. A., ADAMCHUK, V. I. & HUANG, H.-H. (2017). Assessment of Field Spatial and Temporal Variabilities to Delineate Site-Specific Management Zones for Variable-Rate Irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 143(9): 04017037 p.
- YARI, A., MADRAMOOTOO, C. A., WOODS, S. A. & ADAMCHUK, V. I. (2017). Performance Evaluation of Constant Versus Variable Rate Irrigation. *Irrigation and Drainage*. 66(4): 501–509 p.
- ZHANG, H., XIONG, Y., HUANG, G., XU, X. & HUANG, Q. (2017). Effects of water stress on processing tomatoes yield, quality and water use efficiency with plastic mulched drip irrigation in sandy soil of the Hetao Irrigation District. *Agricultural Water Management*. 179: 205–214 p.

ZHAO, W., LI, J., YANG, R. & LI, Y. (2014). Field evaluation of water distribution characteristics of variable rate center pivot irrigation system. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 30(22): 53–62 p.

8.2 M.2. Ábrák és táblázatok jegyzéke

1. ábra: Öntözésre berendezett területek a világon (FAO, 2016b).....	9
2. ábra: Az öntözött területek megoszlása a víz kiadagolásának módja szerint 2016-ban. Az AKI Agrárstatisztikai Információs Osztály adatai alapján (Marosán, 2017).....	11
3. ábra: Az engedéllyel rendelkező és ténylegesen öntözött területek aránya (Központi Statisztikai Hivatal, 2018).....	14
4. ábra: Recepttérképek alkalmazása a VRI megoldásoknál (CropMetrics website, 2018)	17
• 5. ábra: Tervezési hibából eredő elégtelen öntözési kép (Tallemenco, 2011).....	18
6. ábra: A paradicsom Kc-tényezőjének alakulása a különböző fejlődési fázisokban.....	26
7. ábra: UAV segítségével készített termális képből számított CWSI adatok és azok térbeli változatossága (Bellvert et al., 2014).	30
8. ábra: A terület talajtani térképe. A háttérben a terület domborzati modellje (Dr. Dobos Endre szerkesztése) (B) és a körforgó öntözőberendezéssel öntözött terület domborzati változékonysága (saját szerkesztés) (A)	35
9. ábra: A kísérleti téren található precíziós center-pivot öntözőberendezés működés közben....	36
10. ábra: A négyzethálós (A) és az átmeneti zónák méréshez használt mérési elrendezések (B).37	
11. ábra: Az ASAE mérési sztenderd center pivot berendezések egyenletességére vonatkozó vizsgálat sematikus ábrája (American Society of Agricultural Engineers (ASAE), 1997).	38
12. ábra: Az átmeneti sávok mérésére szolgáló mérési vonalak elhelyezkedése a két kísérleti évben. A vonalak színei megegyeznek az átmeneteket bemutató diagramokon használt színkóddal a könnyebb érthetőség érdekében.	38
13. ábra: A kísérleti paradicsom-állomány	41
14. ábra: A két kísérleti évre vonatkozó öntözővíz kijuttatási térkép a VRI vezérléséhez 2017-ben és 2018-ban.	42
15. ábra: A kísérletben használt okostelefonhoz csatlakoztatható termális kamera (FLIR® Systems, Inc.) (FLIR website, n.d.).	44
16. ábra: Folyamatábra az AquaCrop működéséről, a talaj-növény-atmoszféra főbb összetevőivel és a meghatározó modell paraméterekkel. A folytonos vonalak jelzik a közvetlen kapcsolatokat a változók és folyamatok között, a szaggatott vonalak a visszahatások (Steduto et al., 2008).	46
17. ábra: A talajszelvény beállítása az AquaCrop-ban	47
18. ábra: Az AquaCrop modell felépítése (A). A szimuláció eredményei (B).	48
19. ábra: A 2017-es kísérleti év fontosabb meteorológiai adatai és a vízellátottság alakulása.....	50
20. ábra: A 2018-es kísérleti szezon fontosabb meteorológiai adatai és a vízellátottság alakulása	51

21. ábra: A kiadagolt vízmennyiség térbeli eloszlása az IR100 (felső) és az IR50 (alsó) öntözési arányoknál a 2. mérés alapján (a barna síkok a tervezett kijuttatási mennyiséget szemléltetik). A pirostól kékig színátmenet jelzi az alacsonyabb és magasabb értékeket.	54
22. ábra: A sugárirányú mérés eredménye. A két vonal a két mérési vonalat jelenti.	55
23. ábra: A parcellák közötti átmeneti sávok vizsgálatának eredménye a tábla hosszabb oldalára merőlegesen 2017-ben.....	57
24. ábra: A parcellák közötti átmeneti sávok vizsgálatának eredménye a tábla hosszabb oldalával párhuzamosan 2018-ban.....	57
25. ábra: A parcellák szélső határain húzódó átmeneti sáv vizsgálatának eredménye 2018-ban a tábla hosszabb oldalára merőlegesen.	58
26. ábra: Termésátlagok 2017-ben a különböző vízellátottság szerint. Az eltérő betűk jelentik a vízellátottsági szintek közötti szignifikáns különbséget a Tukey-teszt alapján ($p<0,05$).	59
27. ábra: Termésátlagok 2018-ban a különböző vízellátottság szerint. Az eltérő betűk jelentik a vízellátottsági szintek közötti szignifikáns különbséget a Tukey-teszt alapján ($p<0,05$).	60
28. ábra: A vízdoldható szárazanyag-tartalmak alakulása 2017-ben az eltérő vízellátottság szerint. Az eltérő betűk jelentik a vízellátottsági szintek közötti szignifikáns különbséget a Tukey-teszt alapján ($p<0,05$).	61
29. ábra: A vízdoldható szárazanyag-tartalmak 2018-ban a különböző vízellátottság szerint. Az eltérő betűk jelentik a vízellátottsági szintek közötti szignifikáns különbséget a Tukey-teszt alapján ($p<0,05$).	62
30. ábra: A lombfelszín- és léghőmérséklet különbségeinek alakulása a vízellátottság szerint az infravörös távhőmérő adataiból. Az eltérő betűk jelentik a szignifikáns különbségeket a Tukey-teszt eredményei alapján ($p<0,05$). A dobozokban az X-ek jelölik a mediánt. A dobozokon kívüli üres karikák a kiugró értékeket.	64
31. ábra: A lombfelszín- és léghőmérséklet különbségeinek alakulása a vízellátottság szerint a termális kamera adataiból. Az eltérő betűk jelentik a szignifikáns különbségeket a Tukey-teszt eredményei alapján ($p<0,05$). A dobozokban az X-ek jelölik a mediánt. A dobozokon kívüli üres karikák a kiugró értékeket.	64
32. ábra: CWSI-értékek alakulása a vízellátottság szerint az infravörös távhőmérő adataiból (2017). Az eltérő betűk jelentik a szignifikáns különbségeket a Tukey-teszt eredményei alapján ($p<0,05$). A dobozokban az X-ek jelölik a mediánt. A dobozokon kívüli üres karikák a kiugró értékeket.	65
33. ábra: CWSI-értékek alakulása a vízellátottság szerint az termális kamera adataiból (2017) Az eltérő betűk jelentik a szignifikáns különbségeket a Tukey-teszt eredményei alapján ($p<0,05$). A	

dobozokban az X-ek jelölik a mediánt. A dobozokon kívüli üres karikák a kiugró értékeket.	65
34. ábra: A kumulált SDD értékek alakulása a szezon során (2017).....	65
35. ábra: A kumulált CWSI értékek alakulása a szezon során (2017).....	66
36. ábra: A talajnedvesség és az SDD értékek kapcsolata 2017-ben (n=81).....	66
37. ábra: A lombfelszín- és léghőmérséklet különbségeinek alakulása a vízellátottság szerint az infravörös távhőmérő adataiból (2018). Az eltérő betűk jelentik a szignifikáns különbségeket a Tukey-teszt eredményei alapján (p<0,05). A dobozokban az X-ek jelölik a mediánt. A dobozokon kívüli üres karikák a kiugró értékeket.	67
38. ábra: A lombfelszín- és léghőmérséklet különbségeinek alakulása a vízellátottság szerint a termális kamera adataiból (2018). Az eltérő betűk jelentik a szignifikáns különbségeket a Tukey-teszt eredményei alapján (p<0,05). A dobozokban az X-ek jelölik a mediánt. A dobozokon kívüli üres karikák a kiugró értékeket.	67
39. ábra: CWSI-értékek alakulása a vízellátottság szerint az infravörös távhőmérő adataiból (2018). Az eltérő betűk jelentik a szignifikáns különbségeket a Tukey-teszt eredményei alapján (p<0,05). A dobozokban az X-ek jelölik a mediánt. A dobozokon kívüli üres karikák a kiugró értékeket.	68
40. ábra: CWSI-értékek alakulása a vízellátottság szerint a termális kamera adataiból (2018). Az eltérő betűk jelentik a szignifikáns különbségeket a Tukey-teszt eredményei alapján (p<0,05). A dobozokban az X-ek jelölik a mediánt. A dobozokon kívüli üres karikák a kiugró értékeket.	68
41. ábra: Kumulált SDD értékek alakulása a szezon során (2018).....	69
42. ábra: Kumulált CWSI értékek alakulása a szezon során (2018).....	69
43. ábra: A talajnedvesség és az CWSI értékek kapcsolata 2018-ban (n=96).....	70
44. ábra: Vízellátottság és a biomassza hozam kapcsolata a két év eredményei alapján (n=7)....	71
45. ábra: Vízellátottság és az összes termés kapcsolata a két év eredményei alapján (n=7).	71
46. ábra: Vízellátottság és a piacképes termés kapcsolata a két év eredményei alapján (n=7). ...	72
47. ábra: Vízellátottság és a vízdoldható szervesanyag-tartalom kapcsolata a két év eredményei alapján (n=7).	72
48. ábra: Vízellátottság és a vízdoldható szervesanyag-hozam kapcsolata a két év eredményei alapján (n=7).	73
49. ábra: Vízellátottság és a kumulált SDD-értékek kapcsolata a két év eredményei alapján (n=6).....	74
50. ábra: Vízellátottság és a kumulált CWSI-értékek kapcsolata a két év eredményei alapján (n=7).....	74
51. ábra: Vízzstressz (SDD) hatása a biomassza hozamra a két év eredményei alapján (n=7).....	75

52. ábra: Vízstressz (CWSI) hatása a biomassza hozamra a két év eredményei alapján (n=7). ...	75
53. ábra: Vízstressz (SDD) és az összes termés kapcsolata a két év eredményei alapján (n=6)...	76
54. ábra: Vízstressz (CWSI) és az összes termés kapcsolata a két év eredményei alapján (n=7).	76
55. ábra: Vízstressz (SDD) és az piacképes termés kapcsolata a két év eredményei alapján (n=6).	76
56. ábra: Vízstressz (CWSI) és a piacképes termés kapcsolata a két év eredményei alapján (n=7).	77
57. ábra: Vízstressz (SDD) és a bogyók vízdoldható szárazanyag-tartalmának kapcsolata a két év eredményei alapján (n=6).....	77
58. ábra: Vízstressz (CWSI) és a bogyók vízdoldható szárazanyag-tartalmának kapcsolata a két év eredményei alapján (n=7).....	78
59. ábra: Vízstressz (SDD) és a szárazanyag-hozam kapcsolata a két év eredményei alapján (n=6).....	78
60. ábra: Vízstressz (CWSI) hatása a szárazanyag-hozamra a két év eredményei alapján (n=7).	79
61. ábra: Biomassza gyarapodás a szezon közben a modell és a mért adatok alapján a kontrollban.	80
62. ábra: Biomassza gyarapodás a szezon közben a modell és a mért adatok alapján a I50 kezelésben.	81
63. ábra: Biomassza gyarapodás a szezon közben a modell és a mért adatok alapján a I75 kezelésben.	81
64. ábra: Biomassza gyarapodás a szezon közben a modell és a mért adatok alapján a I100 kezelésben.	82
65. ábra: A biomasszából, a szezon közben és végén vett minták kapcsolata a modellezett és a mért értékek alapján kezelésként (n=6). Kék: I100, zöld: I75, sárga: I50, piros: kontroll.....	83
66. ábra: A biomasszából, a szezon közben és végén vett minták kapcsolata a modellezett és a mért értékek alapján az összes adatpontra, minden vízellátottsági szintet egybevéve (n=24). A pontozott vonal az adatokra illesztett vonalat reprezentálja. A közös vonal a tökéletes modellt jelenti.....	83
67. ábra: A szezon végi mintavételkor a biomassza mért és modellezett adatainak kapcsolata a két év alapján (n=7). A pontozott vonal az adatokra illesztett vonalat reprezentálja. A közös vonal a tökéletes modellt jelenti.....	84
68. ábra: A szezon végi mintavételkor a termés mért és modellezett adatainak kapcsolata a két év alján (n=7). A pontozott vonal az adatokra illesztett vonalat reprezentálja. A közös vonal a tökéletes modellt jelenti.....	85

69. ábra: Vízhiány által kiváltott sztómazáródás szimulációja a 2018-as év kontroll beállításában.	86
70. ábra: A modellezett vízstressz (St_{sto} %) és a méréseken alapuló értékek (CWSI) kapcsolata 2017. júliusában a kontrollban (n=27).	87
71. ábra: A modellezett vízstressz (St_{sto} %) és a méréseken alapuló értékek (CWSI) kapcsolata 2018. júliusában a kontrollban (n=24).	87
72. ábra: A modellezett vízstressz (St_{sto} %) és a méréseken alapuló értékek (CWSI) kapcsolata a két év július hónapjaiban a kontrollban (n=51).	88
73. ábra: A modellezett vízstressz (St_{sto} %) és a méréseken alapuló stresszmutató (CWSI) kumulált értékeinek kapcsolata a két év alapján (n=7).	88
74. ábra: A vízellátás hatása a modellezett vízstresszre a két év alapján (n=7).	89
75. ábra: A modellezett vízstressz hatása a biomasszára a két év alapján (n=7).	90
76. ábra: A modellezett vízstressz hatása az összes termésre a két év alapján (n=7).	90
77. ábra: A modellezett vízstressz hatása a piacképes termésre a két év alapján (n=7).	91
1. táblázat: Zöldségfélék öntözése 2016-ban. AZ AKI Agrárstatisztikai Információs Osztály adatai alapján (Marosán, 2017).	12
2. táblázat: A paradicsom hazai öntözésének alakulása (saját szerkesztés az AKI Öntözési jelentései alapján).	13
3. táblázat: Néhány a növények szempontjából fontos környezeti stressz-forrás.	27
4. táblázat: A kiültetési- és betakarítási időre, valamint a tápanyagutánpótlásra vonatkozó adatok.	41
5. táblázat: A négyzethálós mérések egyenletességre vonatkozó eredményei, valamint az alul- és túlöntözés számított eredményei.	53
6. táblázat: Az öntözés eltérései az előírt mennyiségtől. Az öntözés hibaértékei. Az eltérő arányal öntözött parcellák valós aránya.	53
7. táblázat: A sugárirányú mérések alapján számított egyenletesség és mérés körülményeire vonatkozó információk.	56
8. táblázat: A vízfelhasználási együtthatók biomasszára és piacképes termésre számítva.	63

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek Dr. Helyes Lajosnak és társtémavezetőmnek Dr. Bíró Tibornak a kutatás feltételeinek biztosításáért, a disszertáció elkészültéhez nyújtott és minden más szakmai és nem szakmai segítségükért.

Külön köszönet illeti Dr. Pék Zoltánt a kutatási munkában nyújtott rengeteg segítségéért és iránymutatásáért, valamint Dr. Neményi Andrászt az idegen nyelvű publikációk finomhangolásában nyújtott segítségéért.

Szeretném megköszönni a SZIE MKK Kertészeti Intézet, a SZIE AGK Víz- és Környezetgazdálkodási Intézet munkatársainak, a Tanüzem dolgozóinak, valamint a Kertészeti Intézet doktoranduszainak segítségét, akik hozzájárultak az értekezés elkészültéhez.

Köszönet illeti a szabadföldi kísérlet lefolytatásában nyújtott segítségükért az abban résztvevő hallgatókat és Csengeri Erzsébetet.

Végül megköszönöm családtagjaim és barátaim biztatását!