نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۵، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۷، ص. ۶۴-۵۳

Water Management in Agriculture
Vol. 5, No. 2, Autumn and Winter 2018, 53-64

برنامه‌ریزی آبیاری کلزا با استفاده از مدل AquaCrop در دشت قزوین

اصلان اگدرنژاد[۱*]، نیازعلی ابراهیمی پاک[۲]، آرش تافته[۳] و محسن احمدی[۴]

چکیده

برنامه‌ریزی آبیاری بهینه می‌تواند به عملکرد مناسب و سود مکفی کمک نماید. بدین منظور، برای برنامه‌ریزی آبیاری گیاه کلزا، از مدل AquaCrop استفاده شد. در ابتدا مقادیر بهینه آب آبیاری برای حصول بیشترین عملکرد (Im) و سود اقتصادی (Iw) تعیین شدند. سپس با استفاده از این مقادیر، دوازده سناریوی مختلف کم‌آبیاری (T12-T1) برای هر کدام از مقادیر Im و Iw توسط مدل واسنجی شده‌ی AquaCrop شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که مقادیر Im و Iw به ترتیب برابر با ۵۳ و ۴۵ سانتی‌متر بود. بیشترین عملکرد در تیمار آبیاری کامل (FI) برای هر دو مقدار Iw (۲۴۳۲ تن بر هکتار) و Im (۲۴۹۶ تن بر هکتار) به دست آمد. بالاترین کارایی مصرف آب با کاربرد Im در تیمارهای T8، T11 و T6 به ترتیب با مقادیر ۰/۶۵، ۰/۶۳ و ۰/۵۸ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. در عمق Iw، بالاترین کارایی مصرف آب برابر با ۰/۳۳، ۰/۳۷ و ۰/۳۸ مترمکعب بر ثانیه به دست آمد. براساس این نتایج، تیمارهای T8، T11 و T6 به دلیل کارایی مصرف آب بالا و عملکرد قابل‌قبول (به ترتیب با ۱۸۳۲، ۱۵۶۶ و ۱۸۷۶ تن بر هکتار در آبیاری با Im و ۱۲۶۴، ۱۱۶۹ و ۱۱۸۹ تن بر هکتار در آبیاری با Iw) توصیه می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: عمق بهینه آب آبیاری، قطع آب آبیاری، مدل‌سازی گیاهی، مدیریت آبیاری

مقدمه

تعیین برنامه‌ریزی مناسب آبیاری یکی از اقدامات اساسی در مدیریت آب آبیاری در مزرعه است. این عمل مخصوصاً در شرایط کمبود آب ارزش بیشتری نسبت به قبل پیدا می‌کند. این اقدام سبب خواهد شد که بهره‌وری آب در مزرعه نیز بیشتر شود و با مقدار آب در دسترس به بیشترین عملکرد یا سود قابل حصول دست‌یافت (انصاری و همکاران، ۱۳۹۳). بر این اساس نیاز است تا واکنش گیاهان به مقدار آب آبیاری تعیین گردد. بدین منظور مدل‌های گوناگونی تاکنون ارائه‌شده است. یکی از مهم‌ترین مدل‌ها معرفی‌شده، مدل رشد گیاهی AquaCrop است این مدل رشد گیاهی نسبت به مدل‌های گیاهی رایج از لحاظ تعداد داده‌ها، محیط کاربرپسند و دقت قابل‌قبول، برتری دارد (Todorovic et al., 2009; Raes et al., 2012). این مدل رشد گیاهی توانایی شبیه‌سازی عملکرد محصول را تحت گزینه‌های مختلف آب آبیاری دارد (Heng et al., 2009) و به همین علت در مدت کوتاهی پس از انتشار توسط محققان بسیاری موردتوجه قرار گرفت. به‌عنوان‌مثال می‌توان به تحقیقات علیزاده و همکاران (۱۳۸۹) در مدیریت کم‌آبیاری گندم، بابازاده و سرایی تبریزی (۱۳۹۱) در کم‌آبیاری محصول سویا، حیدری‌نیا و همکاران (۱۳۹۱) در برنامه‌ریزی آفتابگردان، آرایا و همکاران (Araya et al., 2010) در کم‌آبیاری جو و استریچویچ و همکاران (Stricevic et al., 2011) در برنامه‌ریزی آب آبیاری ذرت دیم و آبی اشاره کرد. کلیه این محققان گزارش کردند که دقت این مدل در شبیه‌سازی واکنش گیاهان به مقدار آب آبیاری قابل قبول بود. تعیین عمق بهینه آب آبیاری برای این گیاهان با شبیه‌سازی توسط مدل رشد گیاهی AquaCrop قابل پیش‌بینی است لیکن نیاز به داده‌های زیاداست. تعیین عمق مناسب آب آبیاری برای این گیاهان با شبیه‌سازی توسط مدل AquaCrop قابل پیش‌بینی است لیکن نیاز به داده‌برداری بسیار دارد. به همین دلیل پیشنهادشده است تا ابتدا عمق

۱- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران. (*نویسنده مسئول: a_eigder@ymail.com)
۲- دانشیار، بخش آبیاری و فیزیک خاک، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
۳- استادیار، بخش آبیاری و فیزیک خاک، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
۴- دانش‌آموخته دکتری آبیاری و زهکشی
تاریخ دریافت: ۹۷/۲/۷
تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۰/۱۶

آبیاری توسط مدل‌های پیشنهادشده تعیین گردد سپس از توابع تولید برای بهینه کردن عمق آب آبیاری، برای دستیابی به حداکثر سود، استفاده شود (وردی‌نژاد و همکاران، ۱۳۸۹؛ انصاری و همکاران، ۱۳۹۳) در این شرایط، فرض بر دقت مدل‌های مورد استفاده خواهد بود. لیکن محققینی مانند اکبری (۱۳۹۰) در ابتدا با واسنجی مدل AquaCrop برای شبکه آبیاری آبشار اصفهان، از این مدل برای تعیین میزان آب آبیاری بهینه برای محصول گندم استفاده کردند. سپس این محقق تابع تولید محصول گندم را در این شبکه آبیاری تعیین و با تغییر مقادیر آبیاری در سناریوهای مختلف، بهترین مقدار آب آبیاری را محاسبه کرد.

یکی از عوامل مهم در تعیین عمق بهینه آب آبیاری در مزرعه بدست آوردن توابع تولید محصول است. دلیل استفاده از توابع تولید بر این فرض استوار است که هزینه‌های ثابت و متغیر، قیمت فروش محصول و مقدار زمین از دیگر عوامل مؤثر در تعیین عمق آب آبیاری بهینه هستند (سپاسخواه و همکاران، ۱۳۸۵). توابع تولید محصول رابطه کمی ریاضی بین عملکرد محصول و عوامل تولید می‌باشند و نرخ تبدیل عوامل مؤثر بر تولید را به عملکرد مشخص می‌کنند (وردی‌نژاد و همکاران، ۱۳۸۹). در رابطه با توابع تولید تحقیقات متعددی انجام شد و توابع تولید متعددی برای محصولات مختلف ارائه‌شده است که می‌توان به انصاری (۱۳۸۷) برای ذرت زودرس، امیدی و همایی (۱۳۹۴) برای گندم و زارعی و مهرابی بشرآبادی (۱۳۹۵) برای محصول یونجه اشاره کرد.

کلزا (Brassica napus) یکی از گیاهان زراعی است که به‌منظور تعیین روغن خوراکی، کاشت می‌شود (رسولی و همکاران، ۱۳۹۵؛ Reddy and Reddi, 2003). سازگاری گیاه کلزا با اقلیم‌ها مختلف سبب شده است تا کشت آن در بسیاری از مناطق کشور گسترش یابد. بااین‌وجود، کمبود آب به در بسیاری از مناطق کشور به دلایل مختلف، سبب شده است تا توجه به عمق بهینه آب آبیاری برای این محصول موردتوجه قرار گیرد. استفاده از توابع تولید می‌تواند عمق بهینه آبیاری را برای این محصول مشخص کند؛ لیکن این مقدار برای یک‌فصل زراعی مطرح است و اثر تنش آبی را در دوره‌های مختلف رشد نشان نمی‌دهد. بر اساس سابقه تحقیق، در این مطالعه به بررسی الف) تعیین عمق بهینه اقتصادی و عمق بهینه آبیاری پرداخته شد. سپس ب) با استفاده از مدل واسنجی AquaCrop، اثر تنش آبیاری با استفاده از دو عمق آبیاری به‌دست‌آمده بر عملکرد کلزا بررسی شد.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مزرعه‌ای

در این تحقیق از داده‌های سه سال زراعی یک مزرعه تحقیقاتی به مساحت ۵۰۰ مترمربع واقع در ایستگاه تحقیقاتی اسماعیل‌آباد قزوین با طول جغرافیایی ً ۲۶ َ ۴۹°۵۴ شرقی و عرض جغرافیایی ۱۵ ً َ ۳۶°۱۵ شمالی و ارتفاع ۱۲۸۵ متر از سطح دریا استفاده شد. پس از آماده‌سازی زمین و دیسک زدن آن، کرت‌های مورداستفاده در ابعاد ۵×۴ (مساحت ۲۰ مترمربع) تهیه و آزمایش در اوایل مهرماه و در قالب بلوک کامل تصادفی با ۴ تیمار آب آبیاری (شامل E1، E2، E3 و E4 به ترتیب معادل ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ میلی‌متر تبخیر تجمعی از تشت تبخیر) در ۳ تکرار انجام شد. مشخصات خاک مورد آزمایش و آب آبیاری به ترتیب در جداول (۱) و (۲) نشان داده‌شده است. به‌منظور تعیین میزان آب ورودی به کرت‌ها از کنتور استفاده و برای کاشت گیاه کلزا از رقم SLM46 استفاده شد. وجین علف‌های هرز در طول آزمایش به‌صورت دستی انجام شد. محصول نهایی نیز پس از برداشت خشک و وزن آن با استفاده از ترازو محاسبه شد.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه مورد آزمایش

عمق	رطوبت در ظرفیت زراعی	رطوبت در نقطه پژمردگی دائم	جرم مخصوص ظاهری	بافت خاک	فراوانی نسبی و اندازه ذرات خاک (درصد)		
	$cm^3.cm^{-3}$		$g.cm^{-3}$		شن	سیلت	رس
cm							
۰-۳۰	۰/۲۲	۰/۱۳	۱/۴۴	لوم‌رسی	۱۵	۳۹	۳۳
۳۰-۶۰	۰/۲۴	۰/۱۴	۱/۴۷	لوم‌رسی	۱۵	۲۹	۳۹

جدول ۲- مشخصات آب آبیاری

EC	pH	کلسیم	منیزیم	سدیم	پتاسیم	کربنات	بی‌کربنات	کلر	سولفات
$dS.m^{-1}$	-	$meq.l^{-1}$							
۰/۵۱	۷/۳	۱/۴	۱/۸	۱/۸	۰/۶	۰	۳/۹	۰/۵	۱/۰

مدل AquaCrop

مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی به چهار دسته داده (اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه) نیاز دارد. داده‌های اقلیمی براساس آمار برداشت‌شده از ایستگاه‌های هواشناسی به مدل رشد گیاهی معرفی می‌شوند و شامل عواملی حداکثر و حداقل دمای روزانه، بارندگی، تبخیر–تعرق گیاه مرجع (ETo) و میانگین غلظت CO2 سالیانه است. داده‌های خاک نیز براساس جدول (۲) به مدل رشد گیاهی معرفی شد. مدیریت مزرعه شامل الف: مدیریت زراعی و حاصل خیزی، ب: آب آبیاری است. با توجه به شرایط آزمایش، قسمت الف بدون محدودیت و قسمت ب براساس نوع تیمار به مدل رشد گیاهی معرفی گردید. داده‌های گیاهی نیز شامل تعداد کثیری از عوامل است که برخی براساس شرایط آزمایش به مدل رشد گیاهی واردشده و برخی نیز به‌صورت پیش‌فرض مدل رشد گیاهی باقی می‌مانند. به‌منظور حصول صحت این عوامل، ابتدا با استفاده از داده‌های واقعی عمل واسنجی انجام شد.

این مدل رشد گیاهی مقادیر عملکرد محصول را براساس رابطه (۱) تعیین می‌کند:

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) = K_y\left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \qquad (۱)$$

در این معادله، Yx و Ya به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی عملکرد محصول، ETx و ETa به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی تبخیر–تعرق گیاه و Ky ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به کاهش تبخیر–تعرق است. این مدل رشد گیاهی برای شبیه‌سازی مصرف آب تولیدی گیاه، از پوشش تاج گیاه به‌به جای شاخص سطح برگ (LAI) استفاده می‌کند (رابطه ۲).

$$CC = CC_0 \times e^{CGC.t} \qquad (۲)$$

که در این رابطه، CC پوشش تاج در مرحله توسعه گیاه (درصد)، CC0 پوشش تاج اولیه (درصد)، CGC ضریب رشد پوشش تاج (عکس روز) و t زمان (روز) هست. بدین ترتیب، میزان تعرق گیاه بر اساس پوشش تاج از رابط (۳) محاسبه می‌شود:

$$T_r = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \qquad (۳)$$

که در آن، Ks و Kc به ترتیب ضرایب تنش آبی و گیاهی هستند. بیوماس خشک نیز طبق رابطه (۴) برآورد می‌گردد:

$$B = WP^* \left[\frac{Tr_i}{ET_{0,i}}\right] \qquad (۴)$$

که در آن، Tr مقدار کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی، WP بهره‌وری آب، ETo تبخیر–تعرق گیاه مرجع و B عملکرد گیاه (بیوماس خشک) است. مقدار عملکرد وزن دانه (Y) نیز با استفاده از ماده خشک تولیدشده و شاخص برداشت (HI) طبق رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$Y = B \times HI \qquad (۵)$$

برنامه‌ریزی آبیاری

به‌منظور تعیین مقدار آب آبیاری بهینه، از تابع تولید محصول نسبت به مقدار آب آبیاری مطابق رابطه (۶) استفاده شد (شهیدی و احمدی، ۱۳۹۴).

$$Y(w) = a_1 + b_1 w + c_1 w^2 \qquad (۶)$$

که در این رابطه Y(w) مقدار عملکرد محصول کلزا برحسب کیلوگرم در هکتار، w عمق آب آبیاری برحسب سانتی‌متر و a1، b1 و c1 ضرایب ثابت هستند. به‌منظور تعیین ضرایب ثابت معادله (۶)، پس از واسنجی مدل رشد گیاهی AquaCrop این مدل رشد گیاهی ۱۵ بار برای مقادیر مختلف آب آبیاری اجرا شد، نتایج آن در معادله (۶) قرار گرفت. برای حل معکوس این معادله از الگوریتم لونبرگ–مارکوات در محیط برنامه‌نویسی متلب استفاده شد و ضرایب ثابت به دست آمد. به‌راحتی می‌توان با مشتق گرفتن از رابطه (۶) و مساوی قرار دادن آن با صفر، حداکثر عملکرد محصول را با کاربرد آب آبیاری به دست آورد (رابطه ۷):

$$I_m = -\frac{b_1}{2c_1} \qquad (۷)$$

که در این رابطه، Im مقدار آب آبیاری برای حصول حداکثر عملکرد است. با توجه به شرایط منطقه، آب آبیاری عامل محدودکننده است. به همین دلیل برای تعیین مقدار بهینه آب آبیاری در شرایط محدودیت آب، ابتدا توابع هزینه مطابق روابط (۸) و (۹) محاسبه شدند. سپس عمق بهینه آب آبیاری براساس رابطه (۱۰) تعیین شد.

$$C_c = a_2 + b_2 I \quad (۸)$$

$$NB = P_c.y - C_c \quad (۹)$$

$$I_w = \left(\frac{P_c a_1 - a_2}{P_c c_1} \right)^{0.5} \quad (۱۰)$$

که در این روابط، Cc تابع هزینه (ریال بر هکتار)، a2 هزینه‌های ثابت محصول (ریال بر هکتار)، b ضریب هزینه‌های متغیر (ریال بر سانتی‌متر)، Pc قیمت فروش (ریال بر کیلوگرم)،NB سود خالص (ریال در هکتار) و Iw عمق بهینه آب آبیاری می‌باشد. هزینه‌های ثابت شامل هزینه‌های زمین، آماده‌سازی زمین، کاشت، داشت و برداشت و هزینه‌های متغیر شامل هزینه‌های آب آبیاری و آب بهاء برای سال زراعی در نظر گرفته شد.

پس از تعیین مقدار آب آبیاری برای حصول حداکثر محصول (رابطه ۷) و مقدار بهینه آب آبیاری (رابطه ۱۰)، گزینه‌های مختلفی براساس کاهش آبیاری در دوره‌های مختلف رشد براساس دستورالعمل ارائه‌شده با استفاده از مدل رشد گیاهی AquaCrop در نظر گرفته شد.

FI: آبیاری کامل

T1: کم‌آبیاری در دوره‌های ساقه‌دهی (صفر درصد FI) و گلدهی (۳۵ درصد FI)؛

T2: کم‌آبیاری در دوره‌های گلدهی (۳۵ درصد FI) و رسیدگی کامل (صفر درصد FI)؛

T3: کم‌آبیاری در دوره‌های گلدهی (۳۵ درصد FI)، دوره غلاف‌بندی (۱۰ درصد FI) و رسیدگی کامل (صفر درصد FI)؛

T4: کم‌آبیاری فقط در دوره گلدهی (۳۵ درصد FI)؛

T5: کم‌آبیاری در دوره‌های غلاف‌بندی (صفر درصد FI) و رسیدگی کامل (صفر درصد FI)؛

T6: کم‌آبیاری در دوره‌های گلدهی (۷۰ درصد FI)، غلاف‌بندی (صفر درصد FI) و رسیدگی کامل (صفر درصد FI)؛

T7: کم‌آبیاری در دوره‌های غلاف‌بندی (۷۰ درصد FI) و رسیدگی کامل (۷۰ درصد FI)؛

T8: کم‌آبیاری در دوره‌های رشد اولیه (۵۰ درصد FI)، گلدهی (۷۰ درصد FI)، غلاف‌بندی (صفر درصد FI) و رسیدگی کامل (صفر درصد FI)؛

T9: کم‌آبیاری در دوره‌های جوانه‌زنی (۷۰ درصد FI)، رشد اولیه (۶۰ درصد FI) و گلدهی (۶۰ درصد FI)؛

T10: کم‌آبیاری در دوره‌های جوانه‌زنی (۷۰ درصد)، رشد اولیه (۶۰ درصد FI)، گلدهی (۶۰ درصد FI) و رسیدگی کامل (۷۵ درصد)؛

T11: کم‌آبیاری در دوره‌های جوانه‌زنی (۷۰ درصد FI)، رشد اولیه (۶۰ درصد FI)، گلدهی (۶۰ درصد FI)، غلاف‌بندی (۱۰ درصد FI) و رسیدگی کامل (صفر درصد FI)؛

T12: کم‌آبیاری در دوره‌های جوانه‌زنی (۷۰ درصد FI)، رشد اولیه (۶۰ درصد FI)، گلدهی (۶۰ درصد FI) و رسیدگی کامل (۸۰ درصد FI).

نتایج و بحث

داده‌های ورودی مدل AquaCrop در جدول ۳ ارائه‌شده است. طبق این جدول، برخی داده‌های به‌صورت پیش‌فرض برای مدل رشد گیاهی تعریف شد و برخی داده‌های نیز براساس اندازه‌گیری مزرعه‌ای برای مدل رشد گیاهی تعریف شد. با استفاده از نتایج عملکرد محصول برای داده‌های در دسترس، عوامل گیاهی واسنجی شدند. به‌منظور مقایسه نتایج واسنجی با داده‌های واقعی، از آماره‌های ضریب تبیین (R2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل رشد گیاهی (EF) و شاخص توافق (d) استفاده شد. براساس نتایج نشان داده‌شده در جدول (۴)، مقادیر این آماره‌ها به ترتیب برابر با ۰/۶۶، ۰/۰۹، ۰/۰۴، ۰/۰۰۸، ۰/۶۶ و ۰/۷۷ است. این نتایج نشان داد که مقدار خطای شبیه‌سازی بسیار کم بود و مدل رشد گیاهی از کارایی خوبی برخوردار بود. به همین دلیل می‌توان به نتایج شبیه‌سازی حاصل از آن اعتماد کرد. مطالعات در خصوص نیاز آبی کلزا در مناطق مختلف بسیار متفاوت است به‌طوری‌که این مقادیر از ۲۱۴ تا ۵۵۰ میلی‌متر متغیر بوده است (Peterson, 1999؛ Hall, 1999؛ Buader, 2003؛ Nielsen, 1997؛ Vigit et al., 1993). نتایج به‌دست‌آمده برای مقادیر بهینه آب آبیاری در دشت موردمطالعه در جدول (۵) نشان داده‌شده است. براساس این نتایج، مقادیر Im و Iw به ترتیب برابر با ۵۳ و ۴۵ سانتی‌متر به دست آمد. با توجه به این نتایج می‌توان گفت که با در نظر میزان آب آبیاری به مقدار ۵۳ سانتی‌متر در هر هکتار، می‌توان به حداکثر عملکرد دست‌یافت. با توجه به مقدار به‌دست‌آمده برای Iw، در شرایط کمبود آب آبیاری، می‌بایست مقدار ۴۵ سانتی‌متر را برای این محصول در نظر گرفت تا به حداکثر عملکرد اقتصادی رسید.

جدول ۳- عوامل ورودی مدل رشد گیاهی AquaCrop

توضیح پارامتر	مقدار	واحد	توضیح
دمای پایه	صفر	درجه سانتی‌گراد	پیش‌فرض
دمای بالا	۳۰	درجه سانتی‌گراد	پیش‌فرض
تراکم کشت	۹۵۰۰۰۰	گیاه در هکتار	اندازه‌گیری
ضریب رشد کانوپی	۸/۵	درصد بر روز	پیش‌فرض
پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه‌زنی	۵	سانتی‌مترمربع	پیش‌فرض
عمق مؤثر ریشه	۰/۶	متر	پیش‌فرض
مدت‌زمان کاشت تا جوانه‌زنی	۱۰	روز	اندازه‌گیری
مدت‌زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی	۹۵	روز	اندازه‌گیری
مدت‌زمان کاشت تا دوره پیری	۱۳۵	روز	اندازه‌گیری
مدت‌زمان کاشت تا برداشت محصول	۱۶۰	روز	اندازه‌گیری
بهره‌وری آب نرمال شده	۱۱/۸	گرم بر مترمربع	واسنجی
پوشش گیاهی اولیه	۸/۵	درصد	واسنجی
بیشینه رشد کانونی	۸۶	درصد	واسنجی
حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	۰/۱۲	–	واسنجی
حد پایین ضریب تخلیه آب برای توسعه گیاه	۰/۶۱	–	واسنجی
ضریب رشد پوشش	۷/۴	درصد بر روز	واسنجی
ضریب کاهش پوشش	۵	درصد بر روز	واسنجی
حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق	۱/۰۴	درصد بر روز	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی جهت بسته شدن روزنه‌ها	۵	–	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای توسعه پوشش تاجی گیاه	۰/۶	–	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای مرحله پیری	۰/۶	–	واسنجی

جدول ٤-مقایسه عملکرد و کارایی مصرف آب شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی براساس آماره‌های مورداستفاده

پارامتر	مرحله	RMSE	NRMSE	MBE	EF	d	R^2
عملکرد*	واسنجی	۰/۱۲	۰/۰۲	-۰/۰۵	۰/۲	۰/۶۳	۰/۸۳
	صحت‌سنجی	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۰۰۱	۰/۷	۰/۷۸	۰/۷۷
کارایی مصرف آب	واسنجی	۰/۰۴	۰/۱۵	-۰/۰۸	۰/۱	۰/۹۵	۰/۷۹
	صحت‌سنجی	۰/۰۲	۰/۰۹	۰/۱۰	۰/۴	۰/۹۰	۰/۶۵

*** واحدهای RMSE و MBE برای عملکرد تن بر هکتار و برای کارایی مصرف آب کیلوگرم بر مترمکعب است.**

جدول ۵- عوامل معادله توابع تولید کلزا

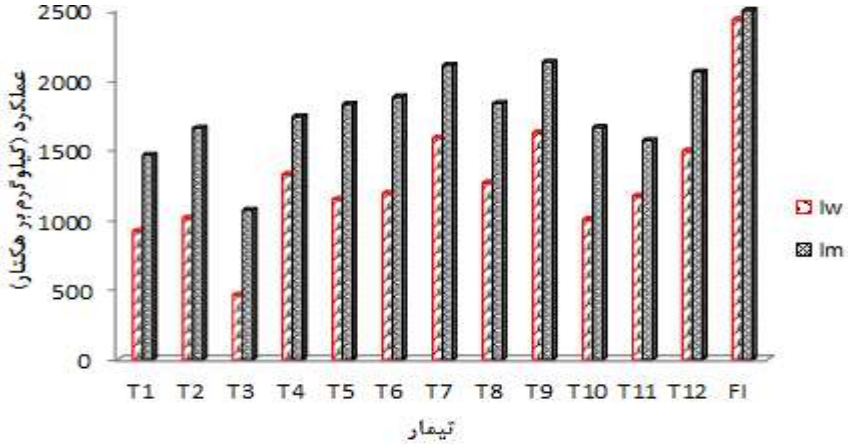
a_1	b_1	c_1	a_2	b_2	I_m	I_w
-۱۱۵۱/۵۶	۱۳۹/۵	-۱/۳۳	۷۳۷۷۷۸۰	۱۷۹۱۲	۵۳	۴۵

$$I_m = -\frac{b_1}{2c_1} \qquad I_w = \left(\frac{P_c a_1 - a_2}{P_c c_1}\right)^{0.5}$$

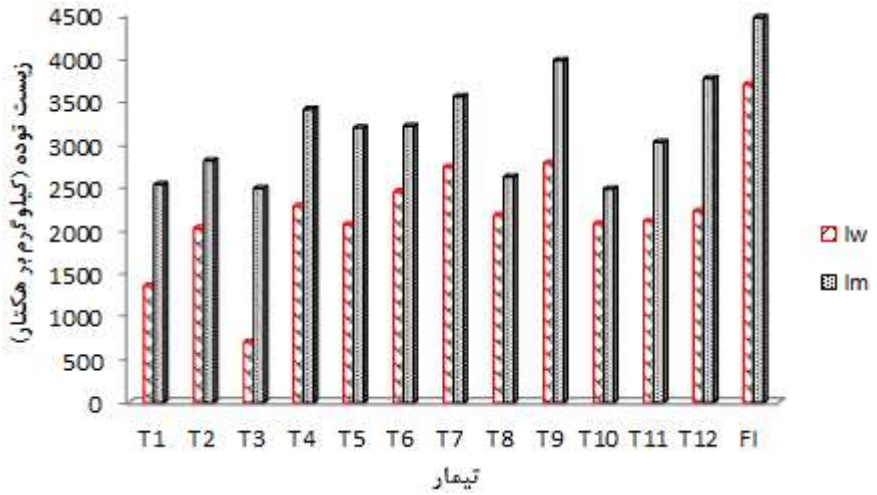
نتایج شبیه‌سازی عملکرد کلزا در سناریوهای مختلف با استفاده از مدل واسنجی شده‌ی AquaCrop در شکل (۱) نشان داده‌شده است. براساس این نتایج، در همه‌ی سناریوهای مورداستفاده مقدار عملکرد در کاربرد آب آبیاری Im بیشتر از Iw بود. از طرفی، بیشترین مقدار

عملکرد کلزا برای هر دو مقدار آب کاربردی (Im و Iw) در تیمار آبیاری کامل (FI) به دست آمد. در مقدار آب کاربردی Iw، کمترین عملکرد در تیمارهای T3، T1 و T10 به دست آمد. مقادیر عملکرد این تیمارها به ترتیب ۸۰، ۶۲ و ۵۸ درصد کمتر از عملکرد در حالت آبیاری کامل (FI) بود. تیمارهای T9، T7 و T12 نیز نزدیک‌ترین عملکرد را به تیمار آبیاری کامل داشتند. مقادیر کاهش عملکرد در این تیمارها به ترتیب ۳۳، ۳۴ و ۳۸ درصد بود. برای آب آبیاری با مقدار Im، تیمارهای T3، T1 و T11 کمترین عملکرد را داشتند به‌طوری‌که کاهش عملکرد در این تیمارها نسبت به تیمار آبیاری کامل، به ترتیب ۵۶، ۳۹ و ۳۵ درصد بود. نزدیک‌ترین عملکرد به تیمار آبیاری کامل نیز در تیمارهای T9، T7 و T12 مشاهده شد. کاهش عملکرد در این تیمارها به ترتیب برابر با ۱۲، ۱۳ و ۱۵ درصد بود. بررسی‌های موسوی‌زاده و همکاران (Mousavizadeh et al., 2017) نیز نشان داده است که کاهش مقادیر آبیاری در دوره‌های رشد کلزا سبب کاهش عملکرد می‌شود. براساس نتایج این محققان، تنش آبی در اواخر دوره رشد کلزا سبب کاهش ۸ تا ۷۲ درصدی عملکرد خواهد شد. با مقایسه دو مقدار آب آبیاری Im و Iw مشاهده می‌شود که سه تیمار T9، T7 و T12 در هر دو مقدار آب آبیاری نزدیک‌ترین مقدار عملکرد را به تیمار آبیاری کامل داشتند. مقایسه عملکرد کلزا در دو مقدار Im و Iw نشان داد که برای تیمارهای FI، T9، T7 و T12 تفاوت عملکرد به ترتیب برابر با ۶۵، ۵۰۵، ۵۲۰ و ۵۶۴ کیلوگرم در هکتار بود. به‌جز تیمار FI، تفاوت بین عملکرد تیمارهای آبیاری در دو مقدار Iw و Im قابل‌توجه بود. عملکرد دو تیمار T9 و T7 در مقدار آبیاری Iw از اکثر تیمارهای تحت مقدار آبیاری Im کمتر بود. با توجه به شکل (۲)، عملکرد تیمار T2 با مقدار آب آبیاری Im از دو تیمار T9 و T7 تحت آبیاری Iw به ترتیب به میزان ۱/۸ و ۴/۱ بیشتر بود. درحالی‌که میزان آب آبیاری برای تیمار T2 نسبت به دو تیمار مذکور به ترتیب ۴ درصد بیشتر و ۱۱ درصد کمتر بود.

مقادیر زیست‌توده شبیه‌سازی‌شده برای هر دو مقدار آب آبیاری Im و Iw در شکل (۲) نشان داده‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود؛ تفاوت زیست‌توده بین دو مقدار آب کاربردی Im و Iw در اکثر تیمارها قابل‌ملاحظه است. بیشترین زیست‌توده برای هر دو مقدار آب کاربردی در تیمار آبیاری کامل (FI) به دست آمد. در مقدار آب آبیاری Im، نزدیک‌ترین مقدار زیست‌توده به تیمار آبیاری کامل برای تیمارهای T9، T12 و T7 به دست آمد. کاهش زیست‌توده در این تیمارها به ترتیب برابر با ۱۱، ۱۵ و ۲۰ درصد بود. کمترین زیست‌توده نیز در تیمارهای T10، T3 و T1 مشاهده شد. کاهش مقدار زیست‌توده در این تیمارها به ترتیب برابر با ۴۵، ۴۴ و ۴۳ درصد بود. برای مقدار آب آبیاری Iw، نزدیک‌ترین مقدار زیست‌توده به تیمار FI در تیمارهای T9، T7 و T6 به دست آمد. کاهش زیست‌توده در این تیمارها به ترتیب برابر با ۲۴، ۲۵ و ۳۳ درصد بود. کمترین مقدار زیست‌توده نیز برای تیمارهای T3، T1 و T2 به دست آمد به‌طوری‌که کاهش عملکرد در این تیمارها به ترتیب برابر با ۸۱، ۶۳ و ۴۵ درصد نسبت به آبیاری کامل بود.



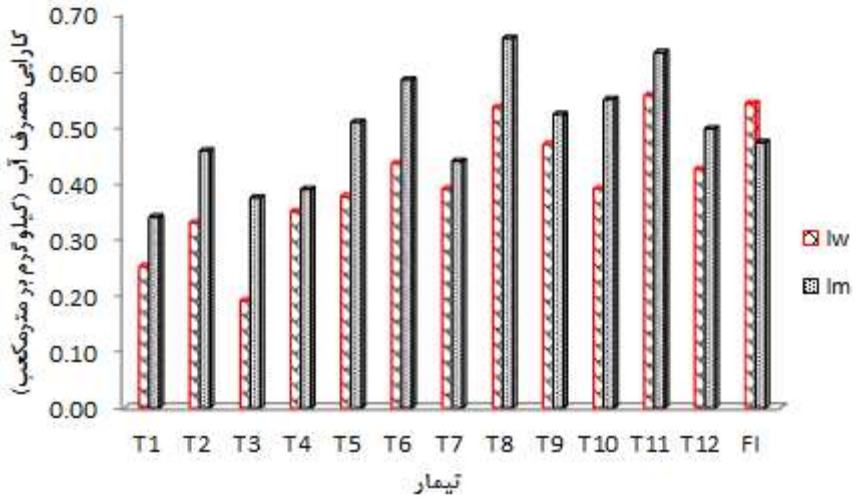
شکل ۱- مقایسه عملکرد شبیه‌سازی‌شده کلزا برای دو مقدار آب آبیاری Im=530 mm و Iw=450 mm در سناریوهای مختلف



شکل ۲- مقایسه زیست‌توده شبیه‌سازی‌شده کلزا برای دو مقدار آب آبیاری Im=530 mm و Iw=450 mm در سناریوهای مختلف

کارایی مصرف آب برای هر دو مقدار آب آبیاری Im و Iw در شکل (۳) نشان داده شده است. براساس این نتایج، بیشترین مقدار کارایی مصرف آب برای آب آبیاری Im در تیمارهای T8، T11 و T6 و به ترتیب برابر با ۰/۶۵، ۰/۶۳ و ۰/۵۸ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. این مقادیر به ترتیب ۳۹، ۳۳ و ۲۳ درصد بیشتر از کارایی مصرف آب برای تیمار آبیاری کامل (FI) بود. کمترین مقدار کارایی مصرف آب نیز به ترتیب در تیمارهای T1، T3 و T4 و به ترتیب با ۰/۳۳، ۰/۳۷ و ۰/۳۸ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. برای مقدار آب کاربردی Iw، بیشترین مقدار کارایی مصرف آب در تیمارهای T11، FI و T8 به ترتیب با مقادیر ۰/۵۵، ۰/۵۴ و ۰/۵۳ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. علت افزایش کارایی مصرف آب در تیمار T11 نسبت به FI در مقدار آبیاری Iw به دلیل کاهش آب آبیاری در برخی از دوره‌های رشد کلزا است؛ گرچه عملکرد در تیمار T11 به‌مراتب کمتر از تیمار FI است. کمترین مقدار کارایی مصرف آب نیز به ترتیب در تیمارهای T3، T1 و T2 به ترتیب با مقادیر ۰/۱۹، ۰/۲۵ و ۰/۳۳ مشاهده شد.

در تیمارهای T3، T11 و T1 در هر دو مقدار آب آبیاری، عملکرد دانه بسیار پایین بود. در تیمارهای T3 و T11 مقدار آب آبیاری در انتهای دوره کمتر از مقدار موردنیاز گیاه است و برای تیمار T1، در دوره میانی و گلدهی میزان آب آبیاری بسیار کمتر از سایر تیمارها است. به همین علت عملکرد این تیمارها به‌شدت کاهش‌یافته است. برای آب آبیاری Im، مقدار آب آبیاری در تیمار T11 نسبت به دو تیمار T1 و T3 به ترتیب ۷۴ و ۱۵ درصد کمتر بود. بااین‌وجود عملکرد تیمار T11 نسبت به دو تیمار مذکور به ترتیب ۲۱ و ۶۰ درصد بیشتر به دست آمد. در مقدار آب آبیاری Iw، عملکرد تیمار T11 نسبت به دو تیمار T1 و T3 به ترتیب ۶/۵ و ۳۱ درصد بیشتر بود. به‌عبارت‌دیگر، در تیمار T3، کمترین مقدار آب آبیاری نسبت به سایر تیمارها در نظر گرفته‌شده بود که براساس نتایج به‌دست‌آمده، نه‌تنها عملکرد مناسبی در این تیمار مشاهده نشد؛ بلکه پایین‌ترین کارایی مصرف آب نیز به این تیمار اختصاص داشت. از طرف دیگر، گرچه در تیمار T1 مقدار کاربرد آب آبیاری در هر دو مقادیر آبیاری Im و Iw نسبت به برخی از تیمارها بالاتر بود؛ لیکن اعمال تنش آبی در مراحل حساس مانند گلدهی و رسیدگی کامل سبب شد تا عملکرد و کارایی مصرف آب در این تیمار بسیار پایین باشد (Tesfamriam et al., 2010; Hamed et al., 2015). برخی محققان تأمین نیاز آبی حدود ۵۰ تا ۶۰ میلی‌متر آب آبیاری برای گیاه کلزا را در این دوره‌ها ضروری دانسته‌اند (توکلی و عبالرحمنی، ۱۳۸۶). برای هر دو مقدار آب آبیاری Iw و Im، تنها در تیمارهای FI، T9، T12 و T7 این میزان آب آبیاری تأمین‌شده است. به همین دلیل عملکرد دانه و زیست‌توده مطلوبی داشتند. از طرف دیگر، تیمار T11 به علت سرشکنی کم‌آبیاری در برخی دوره‌ها، نسبت به دو تیمار T3 و T1 کارایی مصرف آب بهتری داشت.



شکل ۳- مقایسه کارایی مصرف آب شبیه‌سازی‌شده کلزا برای دو مقدار آب آبیاری Im=530 mm و Iw=450 mm در سناریوهای مختلف

در حالت کلی، کارایی مصرف آب برای تیمارهای با عمق آبیاری Im بیشتر از عمق آبیاری Iw بود. بر این اساس، تیمارهای T8، T11 و T6 با مقدار آب آبیاری Im بهترین کارایی مصرف آب را داشتند. کارایی مصرف آب در کل غلات برای ایران به‌صورت متوسط ۰/۴ مترمکعب بر هکتار تعیین‌شده است (Farrahani and Oweis, 2008) ولی برای برخی مناطق با شرایط اقلیمی قزوین این مقدار بیشتر از ۰/۵ مترمکعب بر هکتار بیان شده است (Dehghanisanij and Moayeri, 2008)؛ بنابراین کارایی مصرف آب در بسیاری از تیمارهای آبیاری با مقدار Iw قابل‌قبول نیست. از طرف دیگر، میزان کارایی مصرف آب تیمارهای T8، T11 و T6 قابل‌قبول است. عملکرد این تیمارها نسبت به تیمار T11 با مقدار آب آبیاری Iw به ترتیب ۵۶، ۳۴ و ۶۱ درصد بیشتر بود؛ بنابراین می‌توان این تیمارها را مناسب‌ترین تیمارها برای دستیابی به عملکرد مناسب و کارایی مصرف آب بالا در شرایط کمبود آب پیشنهاد کرد.

رهیافت ترویجی

در این تحقیق، ابتدا با استفاده از داده‌های مزرعه آزمایشی در قزوین، مدل AquaCrop واسنجی شد. سپس با تعیین مقادیر آب آبیاری برای حصول حداکثر محصول (Im) و آب آبیاری جهت حصول حداکثر سود اقتصادی (Iw)، برای هرکدام از این مقادیر، دوازده سناریوی کم‌آبیاری در مراحل مختلف رشد تعیین شد. نتایج نشان داد که مقادیر Im و Iw به ترتیب برابر با ۵۳ و ۴۵ سانتی‌متر بود. بیشترین مقدار عملکرد و زیست‌توده در هر دو مقدار Im و Iw در تیمار آبیاری کامل (FI) به دست آمد. میزان کارایی مصرف آب برای مقدار آب آبیاری Im در تیمارهای T8 و T11 بیشترین مقدار را داشت. در مقدار آب آبیاری Iw نیز بیشترین کارایی مصرف آب در تیمارهای آبیاری کامل (FI) و T9 مشاهده شد. گرچه به نسبت برخی از تیمارها آب بیشتری در طول فصل رشد برای دو تیمار T3 و T1 در نظر گرفته شد؛ لیکن عملکرد کلزا و کارایی مصرف آب برای این دو تیمار برای هر دو مقدار آب آبیاری Im و Iw مقادیر بسیاری پایینی داشت. علت آن کم‌آبیاری در اواخر مرحله رشد گیاه به‌خصوص در دوره رشد کامل اعمال بود. با توجه به کلیه نتایج، تیمارهای T8، T11 و T6 با مقدار آب آبیاری Im، عملکرد و کارایی مصرف آب قابل قبولی داشتند؛ بنابراین در شرایط کمبود آب، این تیمارها در منطقه قزوین پیشنهاد می‌شوند.

تشکر و قدردانی

داده های مورد نیاز جهت انجام این پژوهش برگرفته از طرح هـای تحقیقاتی موسسه تحقیقات خاک و آب با عناوین "تعیـین عمـق و دور آبیاری زراعت کلزا در قزوین"، به شماره ۰۰۳-۸۰-۱۵-۱۰۰ و "تعیین مناسب ترین زمان قطع آبیاری کلزا در قزوین"، بـه شـماره ۰۴۵-۸۰-۱۵-۱۰۰ می باشد. بدین وسیله از مسئولین محترم موسسـه تحقیقـات خاک و آب برای ایجـاد تسـهیلات لازم جهـت انجـام ایـن پـژوهش، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌گردد.

مراجع

اکبری، م. ۱۳۹۰. بیلان آب خاک و عملکرد محصول گندم با استفاده از مدل شبیه‌سازی AquaCrop (مطالعه موردی در شبکه آبیاری آبشار اصفهان). مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۱۲(۴). ۳۴-۱۹.

امیدی، ف. و همایی، م. ۱۳۹۴. اشتقاق توابع تولید محصول برای برآورد آب مجازی و قیمت آب آبیاری گندم. تحقیقات غلات. ۵(۲). ۱۴۳-۱۳۱.

انصاری، ح. ۱۳۸۷. تعیین عمق شاخص و بهینه آبیاری در ذرت‌های زودرس باهدف احتساب حداکثر سود. آب‌وخاک. ۲۲(۲). ۱۱۶-۱۰۷.

انصاری، ح.، سالاریان، م.، تکرلی، ع.، و بایرام، م. ۱۳۹۳. تعیین عمق بهینه آبیاری برای محصول گندم و گوجه‌فرنگی به کمک مدل AquaCrop (مطالعه موردی مشهد). آبیاری و زهکشی. ۱(۸). ۹۵-۸۶.

بابا زاده، ح. و سرایی تبریزی، م. ۱۳۹۱. ارزیابی مدل AquaCrop تحت شرایط مدیریت کم‌آبیاری سویا. نشریه آب‌وخاک (علوم و صنایع کشاورزی). شماره ۲۶(۲). صفحات ۳۳۹-۳۲۹.

توکلی، ع.، عبالرحمنی، ب. ۱۳۸۶. افزایش بهره‌وری آب (WP) و تعیین مقدار و زمان بهینه تک آبیاری برای کلزای بهاره دیم. ۸(۲). ۹۲-۷۹.

حیدری نیا، م.، ناصری، ع.، و برومند نسب، س. ۱۳۹۱. بررسی امکان کاربرد AquaCrop در برنامه‌ریزی آبیاری آفتابگردان در اهواز. مجله مهندسی منابع آب. ۵(۱). ۴۱-۳۹.

رسولی، س. ج.، نصیری محلاتی، م.، ناصری‌پوریزدی، م. ت.، و قربانی، ر.، ۱۳۹۵. تعیین مدل پیش‌بینی عملکرد کلزا بر اساس شاخص‌های هواشناسی کشاورزی و پارامترهای اقلیمی در شهرستان مشهد. نشریه آب‌وخاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۳۰(۴). ۱۳۳۳-۱۳۲۲.

زارعی، ن.، و مهرابی‌بشرآبادی، ح. ۱۳۹۵. برآورد تقاضای آب در تولید محصول یونجه (مطالعه شهرستان‌های قروه و دهگلان)، پژوهش آب ایران. ۱۰(۱-پیاپی ۲۰). ۱۲۲-۱۱۵.

سپاسخواه، ع. ر.، توکلی، ع. ر.، و موسوی، ف. ۱۳۸۵. اصول و کاربرد کم‌آبیاری، کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.

شهیدی، ع.، و احمدی، م. ۱۳۹۴. توابع تولید گیاهی در مناطق خشک. انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد/دانشگاه بیرجند.

عباسعلی، د. ۱۳۸۲. بررسی تأثیر دور آبیاری و مقادیر مختلف پتاسیم بر عملکرد و میزان روغن کلزا. گزارش نهایی موسسه تحقیقات خاک و آب. سازمان تحقیقات. آموزش و ترویج کشاورزی. ۲۶ صفحه.

علیزاده، ح.، نظری، ب.، پارسی نژاد، م.، رمضانی اعتدالی، ه.، و جانباز، ح. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل AquaCrop در مدیریت کم‌آبیاری گندم در منطقه کرج. مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۴. ۲۸۳-۲۷۳.

وردی نژاد، و.، سهرابی، ت.، حیدری، ن.، عراقی نژاد، ش.، و فیضی، م. ۱۳۸۹. تعیین عمق بهینه آبیاری محصولات زراعی در شرایط شوری با استفاده از مدل SWAP. آب‌وخاک. ۲۴(۳). ۴۷۵-۴۶۳.

Araya, A., Habtu, S., Hadgu, K.M., Kebede, A., and Dejene, T. 2010. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficit and irrigated barely. Agricultural Water Management. 97.1838–1846.

Buader, J. W. 2003. The right strategy for irrigation your canola crop, Online Service of Montana University. Canada.

Dehghanisanij H. and Moayeri M. 2008. Overview of crop water productivity in irrigated agriculture in lower Karkheh river basin. In: Improving On-farm Agricultural Water Productivity in Karkheh River Basin. A Compendium of Review Papers. CGIAR challenge program on water and food. Research Report No. 1.

Farahani, H., and Oweis, T. 2008. Agricultural water productivity in Karkheh river basin. In: Improving On-farm Agricultural Water Productivity in Karkheh River Basin. A Compendium of Review Papers. CGIAR challenge program on water and food. Research Report No. 1.

Hall, D., 1999. Water use in cropping system, Crop Updates, Department of Agriculture Western Australia.

Hamed, A., Akbari, Gh., Khosh Kholgh Sima, N. A., Shirani Rad, A. H., Jabbari, H., and Tabatabaee, S. A. 2015 Evaluation of the agronomic characteristics and some physiological traits of canola varieties under drought stress. Environmental Stresses in Crop Science. 7(2). 155-171.

Heng, L.k., Hsiao, T.C., Evett, S., Howell, T., and Steduto, P. 2009. Validating the FAO AquaCrop

model for Irrigated and Water Deficient field maize. Agronomy Journal. 101(3). 488-498.

Mousavizadeh, S. F., Honar, T., and Rahmati, H. 2017. Simulation of seed yield and dry matter of canola under the condition of water stress using SWAP model, Irrigation Science and Engineering. 40(1/1). 153-165.

Nielsen, D. C., 1997. Water use and yield of canola under dry land conditions in the central Great Plains. Journal of Production Agriculture. 10(2). 307-313.

Peterson, H. G., 1999. Field irrigation and water quality. Water Research Crop and Agriculture and Agri-Food. Saskatchewan. Canada.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. and Freres, E. 2012.Refrence manual AquaCrop, FAO, land and water division, Rome Italy.

Reddy T.Y., andReddi G.H.S. 2003. Principles of Agronomy.Kalyani Publishers. Ludhiana. 48–77.

Stricevic, R., Cosic, M., Djurovic, N., Pejic, B., and Maksimovic, L. 2011. Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize sugar beet and sunflower. Agricultural Water Management. 98. 1615-1621.

Tesfamriam, E.H., Annandale, J. G. and Steyn, J.M. 2010. Water stress effects on winter canola growth and yield. Agronomy Journal. 102. 658–666.

Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Abi, S., Stockle, C. and Steduto, P. 2009. Asswssment of AQUACROP, cropsyst, and wofost models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. Agronomy Journal. 101. 509-521.

Vigit, M. F., Nielsen, D. C., Haivorson, A., and Beard, B., 1993. Dry land canola production: variety selection, nitrogen response and water use in the central great plains. ARS Central Great Plains Research Station. USDA. Akron. Colorado. USA.

Water Management in Agriculture
Vol. 5, No. 2, Autumn and Winter 2018, 53-64

نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۵، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۷، ص. ۶۴-۵۳

Canola Irrigation Scheduling using AquaCrop Model in Qazvin Plain

A. Egdernezhad[1*], N.A. EbrahimiPak[2], A.Tafteh[3] and M. Ahmadee[4]

Abstract:

Irrigation planning caused to achieve high crop yield and economic benefit. Regarding that, AquaCrop model was used to determine canola irrigation scheduling. At first, optimum depth of irrigation (Iw) and irrigation depth for maximum yield (Im) were determined. Then, these two irrigation depth (Iw and Im) were used to simulate 12 scenarios (T1-T12) for each Im and Iw using calibrated AquaCrop model. The results showed that Im and Iw were 53 and 45 cm, respectively. The highest values for yield and biomass in both Iw (2432 ton.ha^{-1}) and Im (2496 ton.ha^{-1}) irrigation depths were obtained in scenario FI. The highest WUE values using Im were obtained for T8, T11, and T6 as 0.65, 0.63, and 0.58 kg.m^{-3}, respectively. For Iw irrigation depth, the highest WUE values were obtained for T11, FI, and T8 as 0.33, 0.37, and 0.38 kg.m^{-3}, respectively. To put in nutshell, Treatments T8, T11 and T6 are recommended for achieving high WUE and acceptable yield (1832, 1566, 1876 ton.ha^{-1} using Im and 1264, 1169 and 1189 ton.ha^{-1} using Iw) in this region.

Key words: Crop Modeling, Cut-off Irrigation, Irrigation Management, Optimum Depth of Irrigation

[1]- Assistant professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran. (* a_eigder@ymail.com)
[2]- Associated professor, Department of irrigation and soil physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
[3]- Assistant professor, Department of irrigation and soil physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
[4]- PhD of irrigation and drainage.
Received: 27 Apr 2018
Accepted: 6 Jan 2019