مجله پژوهش آب ایران
سال هشتم/ شماره چهاردهم/ بهار و تابستان ۱۳۹۳ (۹-۱۷)

واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop برای کلزا در شرایط مزرعه

حجت‌اله اروانه[۱] و فریبرز عباسی[۲*]

چکیده

این پژوهش برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل AquaCrop برای کلزا رقم هایولا ۴۰۱ در شرایط مزرعه‌ای انجام شد. آزمایش‌ها در یک خاک سیلتی لوم در منطقه دهلران استان ایلام با روش آبیاری جویچه‌ای و آرایش دو ردیف کاشت روی پشته تحت مدیریت کشاورزان در دو مزرعه چهار (مزرعه A) و یک هکتاری (مزرعه B) انجام شدند. بدین منظور در آذر ماه سال ۱۳۸۹ اقدام به کشت کلزا کرده و اندازه‌گیری‌های لازم از جمله اجزای بیلان آب، اندازه‌گیری مراحل رشد و توسعه گیاه تا زمان برداشت محصول انجام شد. از داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه A برای واسنجی و از داده‌های مزرعه B برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. مقدار آب مصرفی (تبخیر و تعرق گیاه) و عملکرد دانه کلزا در فصل زراعی مربوطه برای مزرعه چهار هکتاری به‌ترتیب ۴۲۶۹ m^3/ha و ۱۸۳۷ kg/ha، و برای مزرعه یک هکتاری، مقدار آب مصرفی ۳۸۱۲ m^3/ha و عملکرد ۱۵۰۹ kg/ha با مدل برآورد شد. کارایی مصرف آب با مدل AquaCrop، در مزرعه‌های A و B به‌ترتیب ۰/۴۳ و ۰/۳۹ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد شد که سازگاری خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده در مزرعه‌های مورد مطالعه داشت (۰/۴۴ و ۰/۴۳ kg/m^3 به‌ترتیب در مزارع A و B). مدل عملکرد محصول، تغییرات رطوبت خاک، عمق توسعه ریشه و وزن اندام هوایی را به خوبی در مزرعه‌های مورد مطالعه پیش‌بینی کرد.

واژه‌های کلیدی: AquaCrop، دهلران، کارایی مصرف آب، کلزا.

ارجاع: اروانه ح. و عباسی ف. ۱۳۹۳. واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop برای کلزا در شرایط مزرعه. مجله پژوهش آب ایران. ۸(۱۴):۹-۱۷.

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد رشته آبیاری و زهکشی، دانشکده علوم آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شوشتر.
۲- استاد مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج.
*** نویسنده مسئول:** **Fariborzabbasi@ymail.com** و **F.abbasi@aeri.ir**
تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۷/۰۳

مقدمه

با توجه به کاهش تدریجی منابع آب، تغییرات اقلیمی و کاهش آب تخصیصی به بخش کشاورزی به علت افزایش جمعیت، بهبود کارایی مصرف آب (WUE) مهم است. برای رسیدن به این هدف، آگاهی دقیق از رابطه بین مصرف آب و عملکرد محصول ضروری است. تلاش‌های اولیه برای درک این رابطه‌ها باعث یافتن رابطه‌های تجربی بین آب و عملکرد موسوم به توابع تولید آب شد. توابع تولید به طور گسترده در تجزیه و تحلیل‌های اقتصادی پاسخ عملکرد محصول به آب، استفاده شده و تلاش‌های زیادی برای بهینه کردن تخصیص منابع آب در سطوح منطقه‌ای صورت گرفته است. از میان روش‌های مبتنی بر این دیدگاه، واکنش عملکرد به آب در نشریه ۳۳ آبیاری و زهکشی فائو را می‌توان دید. سال‌هاست که این نشریه برای شبیه‌سازی واکنش عملکرد محصولات به آب، توسط طراحان و مهندسان استفاده می‌شود. تقاضای زیاد برای افزایش کارایی مصرف آب یکی از ابزارهای کنترل کم‌آبی، فائو را به ارزیابی دوباره این نشریه عبور کرد. این کار باعث معرفی مدل AquaCrop در سال ۲۰۰۷ برای بررسی واکنش محصولات زراعی به مقدار آب مصرفی شد (شائو و همکاران، ۲۰۰۷، ۲۰۰۹ و راس و همکاران، ۲۰۰۹).

آرایا و همکاران (۲۰۱۰) در پژوهشی در اتیوپی واکنش گیاه جو را به آب، وزن توده هوایی و عملکرد تحت مدیریت کم‌آبیاری و آبیاری کامل و تاریخ کاشت با استفاده از مدل AquaCrop را ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل به خوبی وزن توده هوایی و عملکرد محصول را تحت تاریخ‌های کاشت متفاوت در منطقه مورد مطالعه شبیه‌سازی می‌کند. آرایا و همکاران (۲۰۰۹) در پژوهشی دیگر در منطقه‌های نیمه‌خشک در شمال اتیوپی، مدل AquaCrop را برای گیاه خاکشیر واسنجی و ارزیابی کردند. نتایج مدل نشان داد که آبیاری تکمیلی بعد از زمان گل‌دهی موجب افزایش کارایی مصرف آب خاکشیر شد. آن‌ها بهترین روش برای استفاده بهینه از آب موجود در منطقه را، کم‌آبیاری کردن دانستند. اما هنگام پرکردن دانه بهترین گزینه آبیاری کامل است. گارسیا و همکاران (۲۰۰۸) در چند طرح آزمایشی در جنوب اسپانیا کارایی مصرف آب پنبه را در چند منطقه با آب و هوا و خاک‌های متفاوت با استفاده از مدل AquaCrop بررسی کردند. بدین منظور از نتایج چهار آزمایش در دو منطقه در جنوب اسپانیا برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل استفاده شد. نتایج آن‌ها نشان داد که کم‌آبیاری بهترین استراتژی کاربرد آب آبیاری در اراضی مناطق تحت مطالعه بود. گیرتس و همکاران (۲۰۰۸) در پژوهشی در بولیوی واکنش گیاه سلمه‌تره نسبت به تنش آب تحت شرایط مختلف را مدل AquaCrop بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که شاخص برداشت در واکنش به خشکی کاهش و در شرایط پرآبیاری، وزن اندام هوایی ۹ درصد کاهش یافت. هنگ و همکاران (۲۰۰۹) در پژوهشی مدل AquaCrop را برای سه منطقه با شرایط محیطی متفاوت در اسپانیا برای ذرت ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل قادر به شبیه‌سازی وزن توده هوایی، عملکرد محصول و سطح سایه‌انداز در شرایط خشک بود. اما شبیه‌سازی در شرایط کم‌آبیاری کمتر رضایت‌بخش بود.

تودورووویک و همکاران (۲۰۰۹) در آزمایشی رشد گیاه آفتاب‌گردان را با استفاده از مدل AquaCrop و مقایسه آن با دو مدل CropSyst و WOFOST تحت رژیم‌های مختلف آب را بررسی و شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد مدل AquaCrop با وجود اطلاعات ورودی کمتر نسبت به CropSyst و WOFOST، مشابه دو مدل دیگر کار شبیه‌سازی وزن اندام هوایی و عملکرد محصول را انجام می‌دهد. علیزاده و همکاران (۱۳۸۹) کارآیی مدل AquaCrop را برای گندم در کرج ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که برای دور آبیاری ۷ روزه، مدل در پیش‌بینی عملکرد دانه، تبخیر و تعرق گیاهی (ET_c) و کارآیی مصرف آب قابلیت خوبی داشته است. در حالی که کارآیی مدل در پیش‌بینی این عامل‌ها در دور آبیاری ۱۴ روزه کمتر بود. حیدری‌نیا و همکاران (۱۳۸۹) در پژوهشی در هاشم‌آباد گرگان برای تعیین عمق بهینه و زمان آبیاری پنبه از مدل AquaCrop استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که آبیاری قبل از دوره گلدهی و ادامه آن تا انتهای دوره گلدهی، سبب کاهش عملکرد محصول می‌شود. آن‌ها سناریوهای کم‌آبیاری پنبه را با مدل AquaCrop بررسی و نتایج را رضایت‌بخش اعلام کردند. کریمی (۱۳۸۸) آب مصرفی و بهره‌وری آب ذرت را با استفاده از مدل‌های CropSyst و AquaCrop بررسی کرد. بدین منظور در منطقه ورامین دو مزرعه انتخاب و اجزای معادله بیلان آب و شاخص‌های رشد گیاه شامل وزن اندام هوایی، عمق توسعه ریشه و شاخص سطح برگ در طول فصل رشد

اندازه‌گیری شد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرآیند رشد و تبخیر و تعرق گیاه، نشان داد که مدل AquaCrop در ارزیابی شاخص‌های رشد و مقدار تبخیر- تعرق واقعی کارآیی بهتری نسبت به مدل CropSyst نشان داد. هدف اصلی از انجام این پژوهش، واسنجی و اعتبارسنجی مدل AquaCrop برای برآورد عملکرد و کارایی مصرف آب کلزا رقم هایولا ۴۰۱ تحت مدیریت کشاورزان در یک خاک سیلتی لوم در منطقه دهلران (استان ایلام) است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال زراعی ۹۰-۱۳۸۹ در دو مزرعه چهار هکتاری (A) و یک هکتاری (B) که کنار هم قرار داشتند، در مزرعه‌های کشاورزان و تحت مدیریت آن‌ها در جنوب شرقی شهرستان دهلران با طول جغرافیایی ″۱۱ ′۲۷۰ ^{0}۴۷ شرقی و عرض جغرافیایی ″۱۶ ′۳۰ ^{0}۳۲ شمالی و ارتفاع ۲۳۲ متر از سطح دریا انجام شد. خاک مزارع مورد مطالعه سیلتی لوم بود. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه‌ها مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه‌های مورد مطالعه

پارامتر / مزرعه	عمق (cm)	بافت خاک	EC (dS/m)	pH	O.C (%)	Pava [1] (ppm)	ρ_b (g/cm3)	Kava [2] (ppm)	N Total [3] (%)	Cu (ppm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Zn (ppm)
مزرعه A	۰-۳۰	Si.L	۳/۸	۷/۲۹	۱/۱۸	۱/۲۷	۱/۲	۱۷۸	۱/۰۸	۰/۵۲	۱/۵	۶	۱/۷
	۳۰-۶۰	Si.L	۲/۳	۷/۴	۱/۲۶	۲/۱۷	۱/۲	۱۵۹	۱/۰۸	۰/۴۰	۱/۳	۲	۱/۸
	۶۰-۹۰	Si.L	۲	۷/۳	۱/۱۶	۱/۱۶	۱/۲	۱۴۷	۱/۰۵	۰/۳۳	۱/۱	۳	۱/۷
مزرعه B	۰-۳۰	Si.L	۱۵/۸	۷/۱۲	۱/۲۷	۱۶	۱/۲	۶۰۰	۱/۰۵	۰/۸	۱/۷۰	۷	۲/۳
	۳۰-۶۰	Si.L	۱۰/۲	۷/۲۴	۱/۲۱	۱۲	۱/۲	۴۰۰	۱	۰/۷	۱/۱۰	۴	۲/۴
	۶۰-۹۰	Si.L	۹/۳	۷/۳۰	۱/۱۲	۱۰	۱/۲	۴۰۰	۰/۸	۰/۶	۱/۱۰	۳	۲/۵

هدایت هیدرولیکی خاک و پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از داده‌های زودیافت از جمله درصد ذرات خاک، وزن مخصوص ظاهری و رطوبت ظرفیت زراعی با مدل ROSETTA (شاپ و همکاران، ۲۰۰۱) برآورد شدند. آب مورد استفاده برای آبیاری مزرعه‌های مورد مطالعه از یک حلقه چاه در شمال مزرعه‌ها تأمین و با یک کانال بتنی ذوزنقه‌ای به مزرعه‌ها منتقل می‌شد. هدایت الکتریکی آب آبیاری ۱/۹ dS/m بود. پس از تهیه زمین، عملیات کاشت کلزا رقم هایولا ۴۰۱ در مزرعه A در اول آذر ماه و در مزرعه B در بیستم آذر ماه سال ۱۳۸۹ با آرایش دو ردیف کشت روی پشته انجام شد. روش آبیاری مزرعه‌های موردنظر جویچه‌ای و فاصله جویچه‌ها از یکدیگر ۸۰ سانتی‌متر و طول آن‌ها ۲۲۵ متر بود. در طول فصل زراعی، ۸۰۰ کیلوگرم کود اوره و ۱۶ کیلوگرم کود سولوپتاس به مزرعه A و ۲۰۰ کیلوگرم کود اوره و ۴ کیلوگرم کود سولوپتاس به مزرعه B داده شد. حجم آب ورودی در هر نوبت آبیاری با اندازه‌گیری سرعت آب در کانال، سطح مقطع کانال و مدت زمان آبیاری برآورد شد. دور آبیاری در طول فصل زراعی بین ۱۰ تا ۱۵ روز متفاوت بود. در مجموع، مزرعه چهار هکتاری ده بار و مزرعه یک هکتاری هشت بار طی فصل رشد آبیاری شدند. حجم آب مصرفی و عمق خالص آبیاری در مزرعه A و B به‌ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

۱- فسفر قابل دسترس
۲- پتاسیم قابل دسترس
۳- نیتروژن کل

جدول ۲- حجم آب ورودی و عمق خالص آبیاری در مزرعه A (۴ هکتار)

نوبت و تاریخ آبیاری	اول (۱۵آذر)	دوم (۲۵آذر)	سوم (۱۰دی)	چهارم (۲۰دی)	پنجم (۱بهمن)	ششم (۷اسفند)	هفتم (۱۷اسفند)	هشتم (۲۷اسفند)	نهم (۱۳فروردین)	دهم (۲۷فروردین)
حجم آب مصرفی (m^3)	۱۲۰۹/۶	۱۲۵۳	۱۲۹۶	۱۳۸۲/۴	۱۳۳۹/۲	۱۲۹۶	۱۲۰۹/۶	۱۲۹۶	۱۲۰۹/۶	۱۲۰۹/۶
عمق خالص آبیاری (mm)	۳۰	۳۱	۳۲	۳۵	۳۳	۳۲	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰

جدول ۳- حجم آب ورودی و عمق خالص آبیاری در مزرعه B (۱ هکتار)

نوبت و تاریخ آبیاری	اول (۲دی)	دوم (۹دی)	سوم (۱۹دی)	چهارم (۲۹دی)	پنجم (۶اسفند)	ششم (۱۶اسفند)	هفتم (۲۶اسفند)	هشتم (۱۲فروردین)
حجم آب مصرفی (m^3)	۳۵۶/۴	۳۴۵/۶	۳۶۵/۴	۳۵۶/۶	۳۲۴	۳۲۴	۳۱۳/۲	۳۰۲/۴
عمق خالص آبیاری (mm)	۳۶	۳۴	۳۶	۳۵	۳۲	۳۲	۳۱	۳۰

به‌دلیل بسته بودن انتهای جویچه‌ها، تلفات ناشی از رواناب سطحی وجود نداشت. برای تعیین رطوبت خاک در طول دوره رشد از روش وزنی استفاده شد. بدین منظور از سه قسمت مزرعه (ابتدا، وسط و انتها) در عمق‌های ۳۰-۰، ۶۰-۳۰، ۹۰-۶۰ سانتی‌متری نمونه خاک دو تا سه روز بعد از هر آبیاری تهیه شد. عمق توسعه ریشه گیاه و وزن توده هوایی طی فصل رشد کلزا به‌صورت ماهیانه اندازه‌گیری شدند. برداشت کلزا در هر دو مزرعه در ۱۳ اردیبهشت ماه ۱۳۹۰ انجام شد. کارآیی مصرف آب از تقسیم عملکرد دانه بر مجموع آب ناشی از بارندگی مؤثر و آب آبیاری (معادله ۱) محاسبه شد. بارندگی مؤثر از معادله SCS (معادله ۲) تعیین شد (سپه‌وند، ۱۳۸۸).

$$WUE = \frac{Y}{Pe + Ir} \quad (۱)$$

$$Pe = P \times \frac{(125 - (0.2 \times P))}{125} \quad (۲)$$

که در آن، WUE کارایی مصرف آب (kg/m^3)، Y عملکرد دانه (kg)، Pe بارندگی مؤثر (mm)، Ir آبیاری (m^3) و P بارندگی ماهیانه (mm) می‌باشد.

برای محاسبه تبخیر- تعرق گیاه مرجع از مدل ET_o-Calculator استفاده شد (رادفر، ۱۳۸۹). این نرم‌افزار برای محاسبه ET_o از معادله پنمن- مانتیث اصلاح شده استفاده می‌کند. داده‌های لازم برای محاسبه ET_o داده‌های هواشناسی از قبیل طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا منطقه مورد مطالعه، داده‌های دمایی شامل میانگین روزانه دما یا حداقل و حداکثر دما، رطوبت هوا، متوسط دمای نقطه شبنم و متوسط فشار بخار هوا، سرعت باد و ارتفاع اندازه‌گیری آن، ساعت‌های آفتابی، ساعت‌های نسبی آفتابی و تشعشع است. داده‌های ورودی مدل AquaCrop شامل داده‌های اقلیمی، داده‌های گیاهی، مدیریت مزرعه و آبیاری و داده‌های خاک هستند. پس از تعریف داده‌های ورودی مدل در پنجره‌های مختلف، ابتدا مدل AquaCrop برای مزرعه چهار هکتاری واسنجی و سپس برای مزرعه یک هکتاری اعتبارسنجی شد. کارآیی مدل با از آماره‌های خطای مربع میانگین ریشه (RMSE)، خطای انحراف میانگین (MBE) و انحراف استاندارد کلی (GSD)، ضریب کارایی (E) و ضریب همبستگی (R^2) ارزیابی شد.

نتایج و بحث

واسنجی مدل

همان‌طور که قبل از این گفته شد، برای واسنجی مدل AquaCrop از داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه A استفاده شد. پارامترهای اندازه‌گیری شده گیاهی مربوط به این مزرعه در جدول ۴ و مقادیر پارامترهای واسنجی شده مدل AquaCrop در جدول ۵ ارائه شده‌اند. مقادیر این پارامترها با سعی و خطا طوری تعیین شدند که نتایج شبیه‌سازی مدل بیشترین سازگاری را با مقادیر اندازه‌گیری شده در مزرعه داشته باشند.

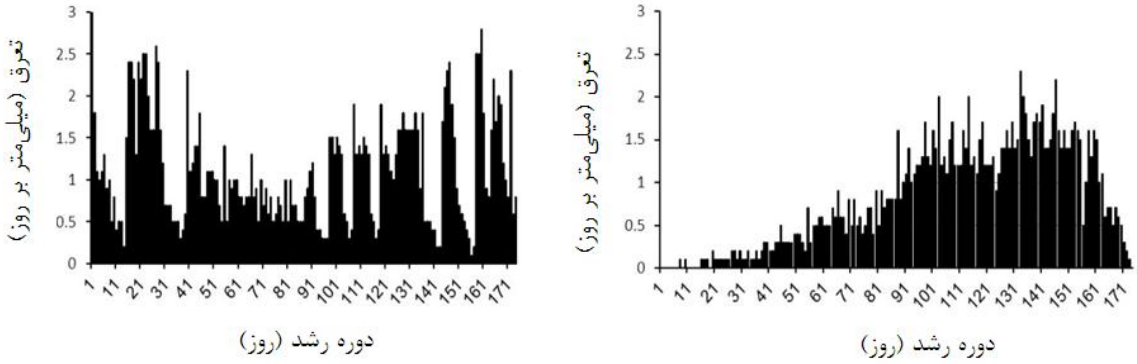
جدول ۴- مقادیر پارامترهای مورد استفاده برای واسنجی مدل

طول دوره گلدهی (روز)	روزهای پس از کاشت						تراکم کشت (بوته در هکتار)	تاریخ کشت
	حداکثر عمق توسعه ریشه	گلدهی	رسیدگی فیزیولوژیکی	پیری	بیشترین پوشش تاجی	جوانه زنی		
۷۹	۸۰	۵۰	۱۶۲	۱۴۰	۸۰	۷	۳۰۰۰۰۰	۸۹/۹/۱

جدول ۵- مقادیر ضرایب واسنجی شده برای مدل

پارامتر	واحد	مقدار
پوشش سطح اولیه[1] (CC_0)	درصد	۱/۵
نرخ توسعه اندام هوایی[2] (CGC)	درصد بر روز	۸/۷
کاهش اندام هوایی[3] (CDC)	درصد بر روز	۹
درجه حرارت پایه	درجه سانتی‌گراد	۵
بالاترین درجه حرارت قابل تحمل	درجه سانتی‌گراد	۴۰
بهره‌وری آب (WP^*)	گرم بر مترمربع	۱۷
شاخص برداشت مرجع	درصد	۲۹
تبخیر از سطح خاک (K_e)	درصد	۶۰
تعرق از سطح گیاه (K_{cb})	درصد	۸۰
حد بالای عامل تخلیه رطوبت خاک برای توسعه برگ	_____	۰/۲
حد پایین عامل تخلیه رطوبت خاک برای توسعه برگ	_____	۰/۵
فاکتور شکل برای ضریب تنش آب برای توسعه برگ	_____	۳
کاهش تخلیه رطوبت خاک برای کنترل روزنه	_____	۰/۵
فاکتور تخلیه رطوبت خاک اندام هوایی در زمان پیری	_____	۰/۸۵
فاکتور تخلیه رطوبت خاک برای ضریب تنش آبی در زمان پیری	_____	۳
تنش هوادهی در هنگام اشباع خاک	درصد حجمی	۵

یکی از ویژگی‌های مدل AquaCrop توانایی تفکیک دو پارامتر تبخیر از سطح خاک و تعرق از گیاه است. براساس نتایج این پژوهش، مقدار تبخیر بین ۰/۱ تا ۳ و تعرق بین۰ تا ۲/۳ میلی‌متر در روز در طول دوره رشد کلزا متغیر بود (شکل ۱).



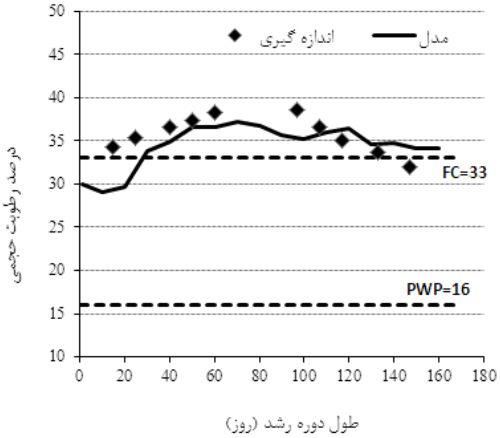
شکل ۱- مقادیر تبخیر از سطح خاک (سمت چپ) و تعرق از گیاه (سمت راست) در مزرعه A (چهار هکتاری) با استفاده از مدل AquaCrop

در ابتدای فصل رشد به‌دلیل خالی بودن سطح خاک از پوشش گیاهی مقدار تبخیر بیش‌تر از تعرق و در وسط و آخر فصل رشد مقدار تعرق از تبخیر بیش‌تر به دست آمد.

مقدار کل تبخیر و تعرق در طول فصل زراعی برای مزرعه A به‌ترتیب ۱۸۳/۳ میلی‌متر و ۱۲۵/۵ میلی‌متر با مدل برآورد شد. مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع با مدل ET_oCalculator در منطقه مورد مطالعه ۴۵۴/۳ میلی‌متر

1- Canopy cover
2- Canopy growth coefficient
3- Canopy decline coefficient

برآورد شد. میانگین تغییرات رطوبت حجمی خاک در مزرعه A در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- مقایسه تغییرات رطوبت حجمی خاک اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop در مزرعه A

مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت خاک از ۳۲ تا ۳۹ درصد در طول فصل رشد متغیر بود. مدل AquaCrop تغییرات رطوبت حجمی خاک را از ۳۲ تا ۳۷ درصد شبیه‌سازی کرد که همخوانی خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده داشت. کمی اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در ابتدای فصل زراعی شاید به خاطر خطا در اندازه‌گیری رطوبت اولیه خاک مزرعه مورد مطالعه بوده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود رطوبت خاک در بخش زیادی از فصل زراعی بیش‌تر از رطوبت ظرفیت زراعی (FC) بوده و نشان دهنده بیش‌آبیاری در مزرعه است.

مقدار عملکرد اندازه‌گیری شده در مزرعه ۴ هکتاری (A) ۱۹۰۰ kg/ha بود. مدل AquaCrop نیز مقدار عملکرد را ۱۸۳۷kg/ha شبیه‌سازی کرد. این مقادیر با مقادیر آمارنامه سالانه وزارت جهاد کشاورزی برای کلزا در منطقه مورد مطالعه سازگاری دارد. ضریب همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده عمق توسعه ریشه در مزرعه A، ۰/۸۶ بود که نشان دهنده کارایی خوب مدل است (جدول ۶).

مدل AquaCrop، وزن توده هوایی گیاه را در بیش‌تر زمان‌های نمونه‌برداری، کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد کرد (جدول ۷). کل آب مصرفی کلزا در دوره رشد ۱۶۲ روزه برای مزرعه ۴ هکتاری (A) برابر ۴۲۶/۹ میلی‌متر بود (جدول ۸). مقایسه این رقم با مقدار تبخیر و تعرق کلزا در طول فصل زراعی (۳۰۸/۸ میلی‌متر) نشان می‌دهد که حدود ۲۸ درصد (۱۱۸/۱ میلی‌متر) از آب داده شده به مزرعه در اثر نفوذ عمقی از بین رفته است. نتایج شکل ۲ این مطلب را به خوبی تأیید می‌کند. مقدار کارایی مصرف آب اندازه‌گیری و برآورد شده با استفاده از مدل AquaCropبه‌ترتیب ۰/۴۴ و ۰/۴۳ kg/m^3 بود. همچنین شاخص‌های آماری، کارایی خوب مدل را درشبیه‌سازی عمق توسعه ریشه گیاه و وزن اندام هوایی نشان داد (جدول‌های ۶ و ۷).

جدول ۶- ارزیابی کارایی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عمق توسعه ریشه در مزرعه ۴ هکتاری (A)

ماه رشد	اندازه‌گیری شده (متر)	شبیه‌سازی شده (متر)	شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل AquaCrop			
			RMSE	E	MBE	GSD
آذر	۰/۲۰	۰/۳۳				
دی	۰/۳۵	۰/۵۶				
بهمن	۰/۵۵	۰/۶۹	۰/۱	۰/۹	۰/۹۰	۰/۲
اسفند	۰/۷۰	۰/۷۰				
فروردین	۰/۷۰	۰/۷۰				

جدول ۷- ارزیابی کارایی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی وزن توده هوایی در مزرعه ۴ هکتاری (A)

ماه رشد	اندازه‌گیری شده (ton/ha)	شبیه‌سازی شده (ton/ha)	شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل AquaCrop			
			RMSE	E	MBE	GSD
دی	۱/۸۸	۲/۱۱۷				
بهمن	۴/۴۸	۴/۰۶۳	۰/۷	۰/۸	-۰/۱۸	۰/۱۵
اسفند	۵/۱۲	۵/۷۴۵				
فروردین	۷/۳۶	۶/۱۷۰				

جدول ۸- مقادیر آب مصرفی مزرعه ۴ هکتاری (A)

ماه	بارندگی (mm)	بارندگی مؤثر (mm)	مقدار آب آبیاری (mm)	کل آب مصرفی (mm)
آذر	۳۷	۳۴/۸۱	۶۱/۵۶	۹۶/۳۷
دی	۱۸	۱۷/۴۸	۶۶/۹	۸۴/۳۸
بهمن	۱۸	۱۷/۴۸	۳۳/۴	۵۰/۸۸
اسفند	۱۹	۱۸/۴۲	۹۵	۱۱۰/۴۲
فروردین	۹	۷/۸۹	۶۰/۴	۶۸/۲۹
اردیبهشت	۱۷	۱۶/۵۳	ـــــ	۱۶/۵۳
جمع				۴۲۶/۸۶

اعتبارسنجی مدل

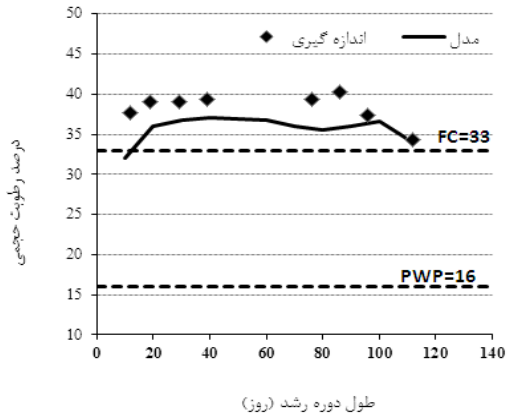
اعتبارسنجی مدل AquaCrop با داده های اندازه‌گیری شده در مزرعه یک هکتاری (مزرعه B) انجام شد (جدول ۹). بدین منظور با پارامترهای واسنجی شده در مرحله قبل مدل اجرا و نتایج شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شد.

جدول ۹- برخی پارامترهای گیاهی اندازه‌گیری شده در مزرعه یک هکتاری (B) کلزا

طول دوره گلدهی (روز)	روزهای پس از کاشت					تراکم کشت (بوته در هکتار)	تاریخ کشت
	حداکثر عمق توسعه ریشه	گلدهی	رسیدگی فیزیولوژیکی	پیری	بیشترین پوشش تاجی	جوانه‌زنی	
۵۹	۸۳	۴۵	۱۴۰	۱۲۰	۷۰	۱۰	۳۰۰۰۰۰	۸۹/۹/۲۰

نتایج مدل برای دو پارامتر تبخیر از سطح خاک و تعرق از گیاه در طول فصل رشد برای مزرعه B نشان داد که مقدار تبخیر بین ۰/۲ تا ۴ و مقدار تعرق بین۰ تا ۲/۲ میلی‌متر در روز در طول دوره رشد کلزا متغیر بود (نتایج ارائه نشده‌اند). مقدار کل تبخیر و تعرق در طول فصل زراعی به‌ترتیب ۱۶۹/۹ میلی‌متر و ۸۹/۵ میلی‌متر با مدل برآورد شد. در هر دو مزرعه مورد مطالعه بیش از ۵۰ درصد آب مورد استفاده صرف تبخیر شده است. اختلاف بین تبخیر و تعرق در دو مزرعه A و B به خاطر اختلاف در تاریخ کاشت دو مزرعه است.

میانگین رطوبت حجمی خاک در مزرعه B از ۳۴ تا ۳۹ درصد متغیر بود که مدل AquaCrop تغییرات رطوبت حجمی را در این مزرعه به نسبت خوب شبیه‌سازی نموده است (شکل ۳).



شکل ۳- مقایسه تغییرات رطوبت حجمی خاک اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده توسط مدل AquaCrop در مزرعه B (یک هکتاری)

همانند مزرعه A، رطوبت خاک در این مزرعه نیز در طول فصل زراعی بیش تر از رطوبت ظرفیت زراعی بوده و نشان‌دهنده بیش آبیاری با زارع و یا توزیع نامناسب زمانی بارندگی است.

ضریب همبستگی بین داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده برای عمق توسعه ریشه و وزن توده هوایی گیاه در مزرعه B، ۰/۹۷ بود. مقادیر شاخص‌های آماری این دو پارامتر کارایی خوب مدل را نشان داد (جدول‌های ۱۰ و ۱۱). عملکرد اندازه‌گیری شده برای مزرعه B، kg/ha ۱۶۵۰ بود. مدل AquaCrop مقدار عملکرد را kg/ha ۱۵۰۹ شبیه‌سازی کرد. دلیل اصلی کمتر بودن عملکرد کلزا در مزرعه B نسبت به مزرعه A تأخیر ۲۰ روزه در تاریخ کاشت بوده است. کل آب مصرفی گیاه در دوره ۱۴۲ روزه رشد کلزا برای مزرعه B برابر ۳۸۱/۲ میلی‌متر به دست آمد (جدول ۱۲). همانند مزرعه B، مقایسه این رقم با تبخیر و تعرق کلزا در طول فصل رشد (۲۵۹/۴ میلی‌متر) نشان از ۳۲ درصد (۱۲۱/۸ میلی‌متر) تلفات نفوذ عمقی در مزرعه است. این مهم به خوبی با نتایج شکل ۳ تأیید می‌شود. مقدار کارایی مصرف آب برای این مزرعه با مدل AquaCrop، kg/m^3 ۰/۳۹ که با مقدار اندازه‌گیری شده (kg/m^3 ۰/۴۳) همخوانی خوبی داشت.

جدول ۱۰- مقایسه مقادیر عمق توسعه ریشه اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده با مدل در مزرعه B

ماه رشد	اندازه‌گیری شده (m)	شبیه‌سازی شده (m)	شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل AquaCrop			
			RMSE	E	MBE	GSD
دی	۰/۳۰	۰/۱۸	۰/۰۸	۰/۷	-۰/۰۷	۰/۱۴
بهمن	۰/۵۰	۰/۴۲				
اسفند	۰/۷۰	۰/۶۱				
فروردین	۰/۷۰	۰/۷				

جدول ۱۱- مقایسه مقادیر وزن توده هوایی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده با مدل در مزرعه B

ماه رشد	اندازه‌گیری (ton/ha)	شبیه‌سازی (ton/ha)	شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل AquaCrop			
			RMSE	E	MBE	GSD
دی	۱/۸	۰/۴۴۳	۱/۶	۰/۲۷	-۱/۶	۰/۳
بهمن	۳/۴۸	۱/۸۷۶				
اسفند	۶/۲۰	۴/۰۳۸				
فروردین	۶/۵۶	۵/۲۰۳				

جدول ۱۲- مقادیر آب مصرفی مزرعه B (۱ هکتاری)

ماه	بارندگی (mm)	بارندگی مؤثر (mm)	مقدار آب آبیاری (mm)	کل آب مصرفی (mm)
آذر	۳۷	۳۴/۸۱	ـــــ	۳۴/۸۱
دی	۱۸	۱۷/۴۸	۱۴۲/۲	۱۵۹/۶۸
بهمن	۱۸	۱۷/۴۸	ـــــ	۱۷/۴۸
اسفند	۱۹	۱۸/۴۲	۹۶/۱۲	۱۱۴/۵۴
فروردین	۹	۷/۸۹	۳۰/۲۴	۳۸/۱۳
اردیبهشت	۱۷	۱۶/۵۳	ـــــ	۱۶/۵۳
جمع				۳۸۱/۲

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این پژوهش مدل AquaCrop در دو مزرعه آبیاری جویچه‌ای کلزا تحت مدیریت کشاورزان واسنجی و اعتبارسنجی شد. نتایج حاصل از واسنجی مدل نشان داد که مدل عملکرد محصول، کارایی مصرف آب، تغییرات رطوبت خاک، عمق توسعه ریشه و وزن اندام هوایی را با دقت خوبی شبیه‌سازی کرد. مقدار کارایی مصرف آب با مدل AquaCrop برای مزرعه A (۴ هکتاری) kg/m^3 ۰/۴۳ برآورد شد که همخوانی خوبی با مقدار اندازه‌گیری شده (kg/m^3 ۰/۴۴) داشت. اعتبارسنجی مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه یک هکتاری (مزرعه B) انجام شد. ضریب همبستگی بین داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده و مقادیر سایر شاخص‌های آماری کارایی خوب مدل را نشان داد. مقدار کارایی مصرف آب از مدل

AquaCrop برای مزرعه B (۱ هکتاری)، ۰/۳۹ kg/m^3 برآورد شد که با مقدار اندازه‌گیری شده (۰/۴۳ kg/m^3) سازگاری خوبی داشت. در مجموع، مدل AquaCrop با وجود سادگی ابزار خوبی برای مطالعه مدیریت آبیاری، عملکرد محصول، کارایی مصرف آب، اجزاء بیلان آب خاک و سایر عامل‌های مؤثر بر رشد کلزا در مزرعه‌ها و اقلیم مورد مطالعه تشخیص داده شد. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده کارآیی مدل برای سایر محصولات زراعی، خاک‌های مختلف و در اقلیم‌های دیگر با استفاده از داده‌های صحرایی دراز مدت انجام شود.

منابع

۱. حیدری‌نیا م. ناصری ع. برومندنسب س. و سهرابی مشک‌آبادی ب. ۱۳۸۹. کالیبراسیون مدل AquaCrop در برنامه‌ریزی آبیاری پنبه در گرگان. سومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، ۱۲-۱۰ اسفند، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲. رادفر م. ۱۳۸۹. کاربرد نرم‌افزارهای ET0Calculator و AquaCrop در مدل‌سازی برای مدیریت مزارع. انتشارات کنکاش. ۹۶ ص.

۳. سپه‌وند م. ۱۳۸۸. مقایسه نیاز آبی، بهره‌وری آب و بهره‌وری اقتصادی آن در گندم و کلزا در غرب کشور در سال‌های پرباران. مجله پژوهش آب ایران. ۳(۴):۶۳-۶۸.

۴. علیزاده ح. نظری ب. پارسی‌نژاد م. رمضانی اعتدالی ه. و جانباز ح. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل AquaCrop در مدیریت کم‌آبیاری گندم در منطقه کرج. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۲(۴):۲۷۳-۲۸۳.

۵. کریمی م. ۱۳۸۸. بررسی مدیریت مصرف آب و کود ذرت سیلویی با مدل‌های CropSyst و AquaCrop در منطقه ورامین. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشگاه تربیت مدرس. ۱۶۸ ص.

6. Araya A. Keesstra S. D. and Stroosnijder L. 2009. Simulating yield response to water of Teff (Eragrostis tef) with FAO's AquaCrop model. Field Crops Research. 116:196-204.
7. Araya A. Habtu S. Hadguc K. M. Kebede A. and Dejene T. 2010. Test of AquaCrop modeling simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (Hordeum vulgare). Agricultural Water Management. 97:1838-1846.
8. García M. Fereres E. Mateos L. Orgaz F. and Steduto P. 2008. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. Agronomy Journal. 101(3):477-487.
9. Geerts S. Raes D. Garcia M. Taboada C. Miranda R. Cusicanqui J. Mhizha T. and Vacher J. 2008. Modeling the potential for closing quinoa yield gaps under varying water availability in the Bolivian Altiplano, Agricultural Water Management. 96:1652-1658.
10. Heng L. K. Evett S. R. Howell T. A. and Hsiao T. C. 2009. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. Agronomy Journal. 101:488-498.
11. Hsiao T. Steduto P. and Fereres E. 2007. A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture. Irrigation Science. 25:209-231.
12. Hsiao T. C. Heng L. Steduto P. Rojas-Lara B. Raes D. and Fereres E. 2009. AquaCrop the FAO crop model to simulate yield response to water: Parameterization and testing for maize. Journal of Agronomy. 101(3):448-459.
13. Raes D. Steduto P. Hsiao T. and Fereres E. 2009. AquaCrop the FAO crop model to simulate yield response to water: Main algorithms and software description. Journal of Agronomy. 101(3):438-447.
14. Schaap M. G. Leij F. J. and van Genuchten M. Th. 2001. ROSETTA: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. Journal of Hydrology. 251:163-176.
15. Todorovic M. Albrizio R. Zivotic L. Abi Saab T. Stöckle C. and Steduto P. 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes, Agronomy Journal. 101:509-521.