

شبیه‌سازی واکنش گیاه پنبه به تنش خشکی و شوری با استفاده از مدل

AquaCrop

مجتبی خوش روش^۱، علی قدمی فیروزآبادی^۲، پویا شیرازی^۳ و محمد حسین نجفی مود^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۵/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۷/۱۸

چکیده

در حال حاضر کشاورزی تکیه‌گاه مهم امنیت غذایی و حیات اقتصادی در کشور می‌باشد. در این میان آب به‌عنوان مهمترین و محدودترین عامل تولید محصولات کشاورزی از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. مدل‌هایی که اثرات مقادیر مختلف آب و شوری آب آبیاری بر روی عملکرد محصول را به صورت کمی شبیه‌سازی می‌کنند، ابزارهایی مفید در مدیریت آب در سطح مزرعه و بهینه‌سازی کارایی مصرف آب می‌باشند. مدل AquaCrop یک ابزار قدرتمند و با ارزش برای بهبود مدیریت آب در مزرعه و محاسبه بهره‌وری آب می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از مدل AquaCrop به شبیه‌سازی درصد پوشش گیاهی، عملکرد، بیوماس و تبخیر و تعرق گیاه پنبه تحت تنش‌های مختلف خشکی و شوری آب آبیاری پرداخته شده است. تیمارها شامل سه سطح شوری آب آبیاری و سه سطح عمق آب آبیاری بودند. طرح آزمایشی به صورت کرت دو بار خرد شده در قالب فاکتوریل و با سه تکرار انجام شد. نتایج نشان داد که مدل می‌تواند پارامترهای مختلف را با دقت بالایی ($d > 0.95$) شبیه‌سازی کند. با کاهش مقدار آب آبیاری و افزایش شوری آب آبیاری، خطای شبیه‌سازی مدل افزایش یافت ولی نتایج شبیه‌سازی در محدوده قابل قبولی بود. برای سطوح پایین تنش خشکی و شوری آب آبیاری، خطای زیادی در شبیه‌سازی وجود نداشت. با توجه به نتایج این پژوهش، می‌توان از مدل AquaCrop به‌عنوان یک ابزار مناسب جهت بهبود مدیریت آب و شوری استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب، بیوماس، پوشش گیاهی، عملکرد، مدل AquaCrop

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. ۰۹۱۱۳۵۲۱۶۵۴. khoshravesh_m24@yahoo.com

۲- استادیار پژوهش، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی همدان. ۰۹۱۸۸۱۴۷۱۹۴. aghadami@gmail.com (مسئول مکاتبه)

۳- کارشناس ارشد آبیاری و زهکشی، دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. ۰۹۱۳۱۰۰۹۶۶۷. p.shirazi.a@gmail.com

۴- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. ۰۹۱۳۱۰۰۹۶۶۷. mhnajafi2020@yahoo.com

مقدمه

رشد روزافزون جمعیت جهان و در نتیجه نیاز بیشتر به تولیدات کشاورزی، از مسایل مهمی است که امروزه بشر با آن روبه‌روست. این مسئله هنگامی به یک چالش بزرگ جهانی تبدیل شده است که پیش‌بینی می‌شود، در سال ۲۰۵۰ تعداد ۶۵ کشور جهان با جمعیتی افزون بر ۷ میلیارد نفر، با کمبود آب مواجه خواهند بود (سپاسخواه و همکاران، ۲۰۰۶). از طرفی کمبود منابع آب مهمترین عامل در تولیدات کشاورزی محسوب می‌شود، لذا استفاده بهینه از منابع آب، در سرلوحه فعالیت‌های کشورهای مختلف قرار گرفته و باید برای مصرف منابع آب قابل دسترس به‌عنوان یک کالای با ارزش، اهمیت بیشتری قایل شد. در ایران نیز عامل اصلی محدودکننده توسعه کشاورزی و افزایش تولیدات غذایی، محدودیت منابع آب و استفاده نامطلوب و غیر اقتصادی از آن است که این امر در مناطق خشک، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند (کشاورز و صادق‌زاده، ۱۹۹۹).

استفاده از آب‌های با کیفیت پایین در برنامه‌های آینده توسعه اراضی فاریاب با اعمال روش‌های مدیریتی صحیح، جهت کاهش این بحران و تداوم پایداری کشاورزی و رسیدن به عملکرد معقول، باید مورد توجه جدی‌تری قرار گیرد (شهیدی، ۲۰۰۸). در این راستا، می‌توان کاربرد آب‌های لب‌شور و شور در بخش کشاورزی را به‌عنوان یک منبع تامین آب در نظر گرفته و از قلمداد کردن آن به عنوان آب نامطلوب برای کشاورزی اجتناب کرد (کیانی و کوچک‌زاده، ۲۰۰۱).

پنبه یکی از با ارزش‌ترین محصولات کشاورزی و جزو مهم‌ترین گیاهان الیافی است که تامین‌کننده یکی از ضروری‌ترین نیازهای انسان یعنی مواد اولیه پوشاک می‌باشد. امروزه پنبه نه تنها از نظر صنعت نساجی، بلکه از نظر غذایی نیز بسیار حائز اهمیت است و در بازار جهانی جزو پنج دانه روغنی مهم می‌باشد. این گیاه به دلیل تاثیر مستقیم در صنعت و اقتصاد کلی کشور مانند کارخانه‌های نساجی، پنبه

پاک‌کنی، روغن‌کشی، کارگاه‌های قالیبافی، بافندگی دستی و تامین پارچه و روغن نباتی مصرفی مردم، دارای اهمیت خاصی است (نجفی مود، ۲۰۰۷).

تهیه برنامه‌های آبیاری صرفاً بر اساس آزمایش‌های مزرعه‌ای دشوار، زمان‌بر و همراه با هزینه بسیار است. در کنار آزمایش‌های مزرعه‌ای، به‌کارگیری مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه بر اساس برنامه بهینه آبیاری می‌تواند موثر واقع شود (Droogers & Kite, 2001). در سال‌های گذشته مدل‌های زیادی برای مطالعه مدیریت آبیاری در سطح مزرعه به‌کار برده شده‌اند که می‌توان به مدل CROPWAT (Kuo et al, 2006) و مدل Budget (Raes, 2002) اشاره نمود. مدل AquaCrop توسط فائو جهت تجزیه و تحلیل سناریوهای مختلف برنامه‌ریزی و به‌عنوان یک ابزار پشتیبانی در تصمیم‌گیری توسعه یافته است (Geerts et al, 2009). همچنین مدل SWAP که بر اساس معادلات جریان آب و املاح در خاک (معادله ریچاردز) عمل می‌کند، یکی دیگر از مدل‌های بسیار کاربردی است که برای مطالعه توازن آب و املاح در شرایط وجود پوشش گیاهی و همچنین برای مدیریت آبیاری استفاده می‌شود (Marinov et al, 2005). مدل AquaCrop به نسبت مدل‌های شبیه‌ساز دیگر، پارامترها و داده‌های ورودی کمتری برای شبیه‌سازی واکنش گیاه به آب احتیاج دارد و برای اغلب محصولات گیاهی و زراعی اصلی در سراسر جهان قابل استفاده است (Steduto et al, 2009).

مدل AquCarop بر اساس یک گام زمانی بلندمدت بر اساس نشریه بازنگری شده ۳۳ فائو عمل می‌کند. این مدل از طریق تفکیک سهم مولد یعنی تعرق از تبخیر و تعرق و میزان زیست توده تولیدی و به‌واسطه شاخص برداشت، مقادیر شاخص بهره‌وری آب (تعرق) و عملکرد محصول را در گام‌های زمانی روزانه برآورد می‌کند. در این مدل برای محاسبه تعرق و برای جداسازی تبخیر از سطح خاک نسبت به تعرق از سطح گیاه، به جای استفاده از شاخص سطح برگ از پوشش تاجی که سطح زمین را می‌پوشاند، استفاده می‌شود (Steduto et al, 2009).

به صورت کرت دو بار خرد شده در قالب فاکتوریل انجام شد. در این آزمایش ابعاد کرت‌های فرعی ۴×۵ متر با فاصله ۵۰ سانتی‌متر از یکدیگر و فاصله کرت‌های اصلی از یکدیگر برابر ۵ متر بودند. روش آبیاری به صورت بارانی کلاسیک بوده و نیاز آبی بر اساس روش فائو-پنمن-مانتیت محاسبه شده است. راندمان آبیاری برابر ۸۰ درصد و نیاز آبشویی برابر ۱۰ درصد در نظر گرفته شد.

جدول (۱) مقادیر تبخیر و تعرق محاسباتی و آب آبیاری را نشان می‌دهد.

جدول (۱): مقادیر تبخیر و تعرق محاسباتی و آب آبیاری

آب آبیاری (میلی‌متر)	تبخیر و تعرق (میلی‌متر)	تیمار
۱۲۱۲/۳	۸۷۲/۹	I ₁ S ₁
۹۱۷/۴	۶۶۰/۵	I ₂ S ₁
۶۲۲/۷	۴۴۸/۴	I ₃ S ₁
۱۱۵۸	۸۳۳/۸	I ₁ S ₂
۸۷۵/۲	۶۳۰/۲	I ₂ S ₂
۵۸۵/۱	۴۲۱/۳	I ₃ S ₂
۱۱۲۳/۶	۸۰۹	I ₁ S ₃
۸۴۳/۳	۶۰۷/۲	I ₂ S ₃
۵۵۵/۵	۴۰۰	I ₃ S ₃

مدل AquaCrop

AquaCrop مدلی است که جهت بررسی کارایی مصرف آب گیاه، توسط بخش آب و خاک سازمان خواروبار جهانی (FAO) با تجدید نظر در نشریه شماره ۳۳ سازمان FAO طراحی شده است (Doorenbos et al, 1979).

مدل AquaCrop از معادله پیشین دورنباس و همکاران (Doorenbos et al, 1979) (معادله ۱) با تفکیک نمودن ET_a به تبخیر از سطح خاک (E_s) و تعرق (T_a) و مجزا نمودن عملکرد نهایی (Y) به ماده خشک (B) و شاخص برداشت توسعه یافته است (Steduto et al, 2007). جدا نمودن ET_a به E_s و T_a سبب می‌گردد که بخش غیر مؤثر آب در تولید

تودرویک و همکاران (Todorovic et al, 2009) به مقایسه سه مدل AquaCrop، CropSyst و WOFOST در شبیه‌سازی رشد و توسعه آفتابگردان تحت رژیم‌های آبی متفاوت در جنوب ایتالیا پرداختند. نتایج این طرح، تفاوت قابل توجهی بین نتایج شبیه‌سازی این سه مدل نشان داد. اما نهایتاً مدل AquaCrop به دلیل پارامترهای ورودی کمتر، در شرایطی که اطلاعات کمتری در دسترس می‌باشد، توصیه شد.

تاکنون مطالعه‌ای در مورد شبیه‌سازی اثرهای تنش آب و شوری بر گیاه پنبه با استفاده از مدل AquaCrop صورت نگرفته است. مهم‌ترین هدف این پژوهش، واسنجی مدل AquaCrop به منظور شبیه‌سازی درصد پوشش گیاهی و مقدار بیوماس تجمعی در طول فصل رشد گیاه پنبه تحت تیمارهای مختلف سطح آب آبیاری و شوری می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند با عرض جغرافیایی ۵۳ و ۳۲ شمالی و طول جغرافیایی ۱۳ و ۵۵ شرقی و با ارتفاع ۱۴۸۰ متر از سطح دریا انجام شد. بیرجند از نظر اقلیمی جزو مناطق خشک دارای زمستان‌های سرد و تابستان‌های گرم است. در یک دوره آماری ۳۰ ساله، میانگین بارندگی سالیانه ۱۷۳ میلی‌متر می‌باشد که بیشترین بارش ماهیانه آن در اسفند ماه به مقدار ۴۲/۳ میلی‌متر و کمترین آن در مرداد ماه به مقدار ۰/۱۳ میلی‌متر به وقوع پیوسته است. متوسط دمای سالیانه ۱۶/۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. متوسط روزهای یخبندان در سال، ۶۷ روز و میانگین سرعت باد سالانه ۹/۷ کیلومتر بر ساعت برآورد شده است.

در این پژوهش، سطوح مختلف شوری (S_1 ، S_2 و S_3) به ترتیب معادل ۲/۲، ۵/۵ و ۸/۳ دسی‌زیمنس بر متر) و سه سطح عمق آب آبیاری (I_1 ، I_2 و I_3) به ترتیب معادل ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد عمق آب موردنیاز گیاه) در سه تکرار در نظر گرفته شد. طرح آزمایشی

نسبی حداکثر و حداقل، سرعت باد، ساعات آفتابی و میانگین سالانه غلظت CO₂ اتمسفر. به منظور تامین اطلاعات اقلیمی مدل، ابتدا داده‌های هواشناسی مربوط به دوره رشد پنبه در سال انجام آزمایش از ایستگاه هواشناسی بیرجند گرفته شد و به نرم‌افزار EToCalculator که با مدل AquaCrop پیوند دارد، داده شد و تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش فائو پنمن مانیتیت برآورد شد (Allen et al, 1998).

داده‌های خاک

خصوصیات فیزیکی شامل هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat}) که به روش پرماترگلف (Guelph permeameter) اندازه‌گیری شد، مقدار رطوبت حجمی خاک در حالت اشباع (θ_{sat})، ظرفیت مزرعه (θ_{fc}) و نقطه پژمردگی (θ_{wp}) می‌باشند. مقدار رطوبت خاک خاک به روش وزنی اندازه‌گیری شد. نتایج تجزیه خاک مزرعه مورد مطالعه در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲): خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد مطالعه

عمق (سانتی‌متر)	بافت خاک	FC (%)	WP (%)	ρ_b (%)	EC (دسی‌زیمنس بر متر)	pH
۰-۳۵	لوم	۳۱/۱	۱۵/۲	۱/۳۲	۶/۱	۷/۸
۳۵-۷۰	لومی شنی	۲۲/۳	۱۰/۱	۱/۵۱	۴/۵	۷/۹
۷۰-۱۰۰	لومی شنی	۲۲/۶	۱۰/۶	۱/۶۵	۴/۷	۷/۸

متوسط و کم طبقه‌بندی می‌شود. اگر پاسخ مدل به تغییر در پارامترها بیشتر از ۱/۵ باشد، دارای حساسیت زیاد است. اگر پاسخ مدل به تغییر در پارامترهای ورودی بین ۰/۳ تا ۱/۵ و یا کمتر از ۰/۳ باشد، به ترتیب نشان‌دهنده حساسیت متوسط و کم می‌باشد (Geerts et al, 2009). با استفاده از اطلاعات این مزرعه آزمایشی، داده‌های ورودی مورد نیاز تهیه و واسنجی مدل AquaCrop مطابق مراحل زیر انجام شد.

- اجرای مدل و تعیین عملکرد شبیه‌سازی شده در شرایط مختلف مزرعه آزمایشی فوق‌الذکر

محصول (تبخیر) در نظر گرفته نشود. این موضوع به-ویژه زمانی که هنوز پوشش گیاهی تکمیل نگردیده حائز اهمیت است.

$$\left(\frac{Y_m - Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(\frac{ET_m - ET_a}{ET_m}\right) \quad (1)$$

که در آن Y_m و Y_a ، به ترتیب عملکرد حداکثر و واقعی محصول، ET_m و ET_a به ترتیب تبخیر و تعرق حداکثر و واقعی گیاه و K_y ضریب تناسب بین کاهش عملکرد نسبی و کاهش نسبی در تبخیر و تعرق است. اگرچه مدل مبنی بر فرایندهای بیوفیزیکی پیچیده بنا نهاده شده است، اما نیاز به پارامترهای ورودی کمی دارد (Kuo et al, 2006) ورودی‌های مدل شامل موارد زیر می‌باشد.

داده‌های اقلیمی

متغیرهای ورودی هوا برای اجرای مدل عبارتند از: دمای حداکثر و حداقل روزانه، بارش روزانه، رطوبت

داده‌های گیاه

در AquaCrop سیستم گیاهی از پنج جزء تشکیل شده است که شامل پاسخ‌های دینامیک فنولوژی، کانوپی، عمق ریشه‌زنی، تولید ماده خشک و عملکرد اقتصادی است.

در این پژوهش، شبیه‌سازی مقدار پوشش گیاهی، عملکرد و بیوماس پنبه در طول فصل کشت تحت تنش‌های مختلف عمق آب آبیاری و شوری آب آبیاری با استفاده از مدل AquaCrop بررسی شد.

به منظور تعیین آنالیز حساسیت مدل، دامنه تغییرات ضریب حساسیت به سه کلاس حساسیت زیاد،

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{M}| + |M_i - \bar{M}|)^2} \quad (4)$$

ضریب E بیانگر نسبت انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر اندازه‌گیری شده به انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده از مقادیر میانگین می‌باشد. هر چه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد، مدل کارتر است.

نتایج و بحث

مقادیر حساسیت محاسبه شده برای تعدادی از پارامترهای ورودی مدل AquaCrop در جدول (۳) ارائه شده است. حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات بهره‌وری آب نرمال شده (WP)، زمان از کاشت تا پیری پوشش گیاهی، شاخص برداشت مرجع (HI_0)، ماکزیمم پوشش گیاهی و زمان تا رسیدن به ماکزیمم پوشش گیاهی بیشتر از سایر پارامترها است. بنابراین بایستی این داده‌ها با دقت بیشتری اندازه‌گیری شوند زیرا در غیر این صورت، خطای قابل توجهی در نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل به وجود می‌آید.

از داده‌های سال ۱۳۸۸ برای واسنجی و از داده‌های سال ۱۳۸۹ برای صحت‌سنجی مدل AquaCrop استفاده شده است (جدول ۴).

- مقایسه عملکرد واقعی حاصل از آزمایش مزرعه‌ای با عملکرد شبیه‌سازی شده برای همان شرایط
- اجرای مدل و تعیین عملکرد شبیه‌سازی شده در شرایط مختلف مزرعه آزمایشی فوق‌الذکر
- در صورت عدم تطابق عملکرد شبیه‌سازی شده با عملکرد واقعی، با تغییر دادن ضرایب گیاهی، مراحل فوق‌الذکر تکرار گردید تا نتایج عملکرد شبیه‌سازی شده با دقت قابل قبولی بر عملکرد واقعی منطبق شود.
- به منظور صحت‌یابی مدل، با استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری شده، عملکرد محصول در شرایط مختلف مدیریتی (شوری و عمق آب آبیاری) شبیه‌سازی و با عملکرد واقعی مقایسه شد.

آنالیز داده‌ها

برای بررسی نتایج حاصل از مدل با نتایج مشاهده‌ای در سطح مزرعه و صحت‌یابی نتایج و ارزیابی قابل اعتماد بودن مدل، از برخی شاخص‌های ارزیابی مزرعه‌ای شامل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب راندمان (E) و شاخص سازگاری (d) استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2} \quad (2)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad (3)$$

جدول (۳): ضریب حساسیت پارامترهای ورودی مدل AquaCrop

پارامترهای ورودی مدل	مقدار S_e در حالت +۵۰٪	مقدار S_e در حالت -۵۰٪	درجه حساسیت
K_{cb}	۰/۱۳۵	۰/۴۹۳	متوسط
ضریب افزایش سطح سایه‌انداز (CGC)	۰/۳۲۶	۰/۱۰۹	متوسط
بهره‌وری آب نرمال شده (WP)	۱/۵۶۶	۰/۸۵	زیاد
زمان از کاشت تا پیری پوشش گیاهی	۱/۵۳۲	۰/۰۸۹	زیاد
عمق ریشه	۰/۴۸۸	۰/۱۵۶	متوسط
فاکتور تخلیه آب خاک برای توسعه برگ‌ها (حد بالا)	۰/۳۰۹	۰/۰۵۳	متوسط
فاکتور تخلیه آب خاک برای توسعه برگ‌ها (حد پایین)	۰/۰۱۹	۰/۰۰۹	کم
شاخص برداشت (HI_0)	۱/۷۷۴	۰/۹۰۱	زیاد
فاکتور شکل تابع تنش آب	۰/۳۹۱	۰/۱۵۲	متوسط
زمان تا رسیدن به ماکزیمم پوشش گیاهی	۱/۵۳۳	۰/۴۱۹	زیاد

ادامه جدول (۳): ضریب حساسیت پارامترهای ورودی مدل AquaCrop

پارامترهای ورودی مدل	مقدار S_c در حالت $+50\%$	مقدار S_c در حالت -50%	درجه حساسیت
ماکزیمم پوشش گیاهی (CC_x)	۱/۸۷۹	۰/۹۶۶	زیاد
پوشش گیاهی اولیه	۰/۰۹۲	۰/۱۰۷	کم
فاکتور تخلیه آب خاک برای کنترل بسته شدن روزنه‌ها	۰/۰۲۳	۰/۰۰۳	کم
کاهش ضریب پوشش گیاهی	۰/۰۲۸	۰/۰۱۳	کم
کاهش پوشش گیاهی ماکزیمم	۰/۳۱۹	۰/۰۹۱	متوسط
کاهش تعرق گیاه	۰/۰۰۵	۰/۰۰۹	کم
متوسط کاهش پوشش گیاهی	۰/۴۴۷	۰/۱۰۸	متوسط

جدول (۴): برخی پارامترهای گیاهی مورد استفاده برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل

سال	تاریخ کشت	سبز شدن	گلدهی	شروع پیری پوشش گیاهی	رسیدگی فیزیولوژیکی	حداکثر عمق ریشه (متر)
اول	۸۹/۲/۸	۷	۵۸	۱۲۷	۱۷۰	۱/۲
دوم	۹۰/۲/۱۲	۷	۵۵	۱۳۰	۱۷۴	۱/۲

شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار پوشش گیاهی شبیه‌سازی شده برای تیمار S_3 ، بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده شده است (شکل ۳). کاهش مقدار آب آبیاری باعث کاهش پوشش گیاهی به‌ویژه پوشش گیاهی ماکزیمم شده است. پوشش گیاهی سبز به‌وسیله ضریب کاهش پوشش سبز تشریح می‌شود (اندرزیان و همکاران، ۲۰۱۱). تیمار I_3 کمترین مقدار پوشش گیاهی را داشته است چون این تیمار کمترین مقدار آب دریافتی را داشته است. نتایج این تحقیق با نتایج فراهانی و همکاران (فراهانی و همکاران، ۲۰۰۹) مطابقت دارد.

جدول ۵ مقادیر واسنجی شده مدل AquaCrop برای گیاه پنبه تحت تنش‌های مختلف سطح آب آبیاری و شوری آب آبیاری را ارائه می‌دهد.

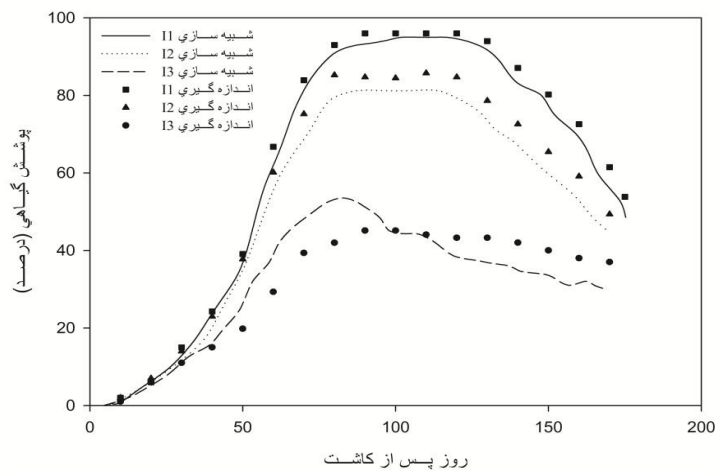
شکل‌های ۱، ۲ و ۳ درصد پوشش گیاهی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی را برای تیمارهای مختلف سطح آب آبیاری در طول دوره رشد گیاه پنبه به‌ترتیب برای تیمارهای S_1 ، S_2 و S_3 نشان می‌دهد. مقدار پوشش گیاهی شبیه‌سازی شده توسط مدل AquaCrop در همه تیمارهای آب آبیاری برای تیمارهای S_1 و S_2 کمتر تخمین زده شده است. همچنین مقدار پوشش گیاهی ماکزیمم شبیه‌سازی شده نیز برای این تیمارها، کمتر از مقدار واقعی برآورد

جدول (۵): مقادیر واسنجی شده پارامترهای مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی رشد گیاه پنبه

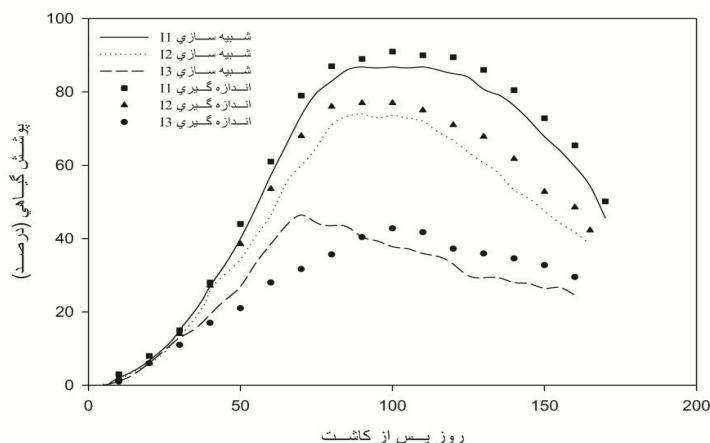
عنوان پارامتر	مقدار پارامتر	واحد
دمای پایه	۱۲	$^{\circ}C$
دمای ماکزیمم	۳۵	$^{\circ}C$
پوشش گیاهی اولیه	۰/۷۲	%
ضریب افزایش پوشش گیاهی	۷/۵	%/day
پوشش گیاهی ماکزیمم	۹۸	%
ضریب کاهش پوشش گیاهی	۲/۷	%/day

ادامه جدول (۵): مقادیر واسنجی شده پارامترهای مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی رشد گیاه پنبه

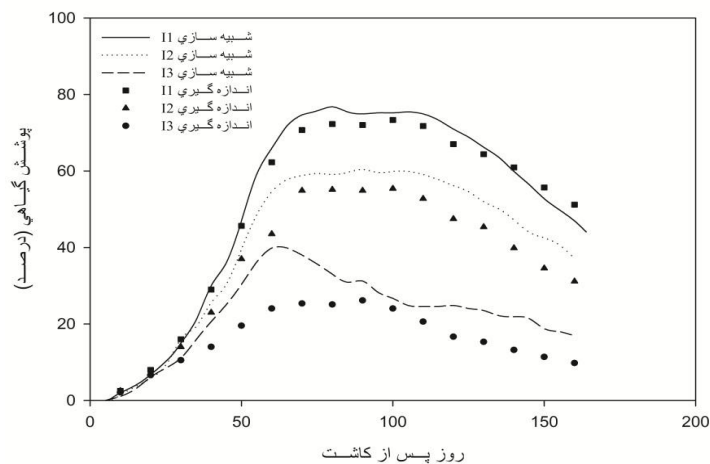
عنوان پارامتر	مقدار پارامتر	واحد
پارامترهای پاسخ تنش آب		
فاکتور تخلیه آب خاک برای توسعه برگ‌ها (حد بالا)	۰/۲۵	-
فاکتور تخلیه آب خاک برای توسعه برگ‌ها (حد پایین)	۰/۶۶	-
فاکتور شکل تابع تنش آب	۲/۷	-
فاکتور تخلیه آب خاک برای کنترل بسته شدن روزنه‌ها	۰/۶	-
فاکتور تخلیه آب خاک برای کنترل شروع پیری پوشش گیاهی	۰/۷	-
پارامترهای پاسخ تنش شوری		
کاهش ضریب پوشش گیاهی	۲۳	%
کاهش پوشش گیاهی ماکزیمم	۴۰	%
کاهش تعرق گیاه	۷	%
متوسط کاهش پوشش گیاهی	۰/۴۴	%/day
پارامترهای تولید گیاهی		
شاخص بهره‌وری آب	۱۵	gr/m ²
شاخص برداشت	۳۵	%



شکل (۱): مقایسه درصد پوشش گیاهی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده برای سطوح مختلف عمق آب آبیاری و تیمار S₁



شکل (۲): مقایسه درصد پوشش گیاهی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده برای سطوح مختلف عمق آب آبیاری و تیمار S_2



شکل (۳): مقایسه درصد پوشش گیاهی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده برای سطوح مختلف عمق آب آبیاری و تیمار S_3

می‌دهند که افت سریع پوشش گیاهی برای تیمار I_3 اتفاق افتاده است. اثر کم آبیاری با افزایش تنش خشکی، افزایش یافته و موجب کوتاه شده فصل رشد، کاهش ارتفاع گیاه، زودرس شدن و کاهش محصول می‌شود (Restuccia, 1995).

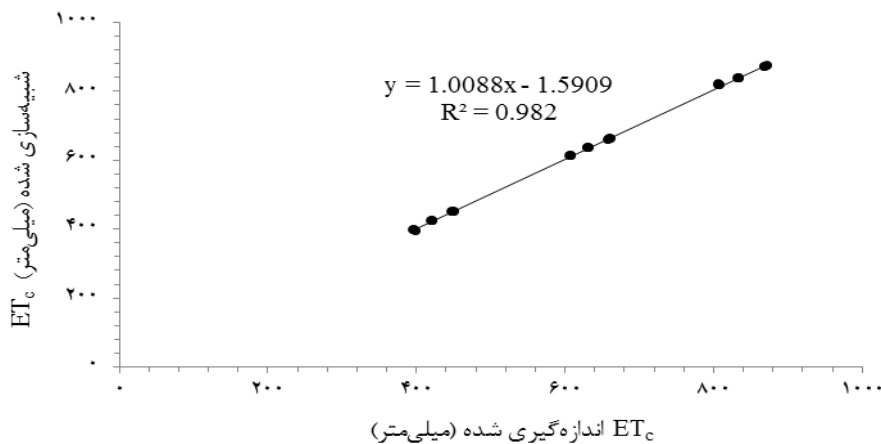
همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار پوشش گیاهی در تیمار I_3 تقریباً ۳۰ تا ۴۰ درصد پوشش گیاهی تیمار آبیاری کامل (I_1) می‌باشد. نتیجه این عمل باعث شده است که مقدار بیوماس تیمار I_3 ، ۳۰ تا ۴۰ درصد مقدار بیوماس تیمار I_1 شود. برار (Brar, 1986) نشان داد که پنبه در مراحل گلدهی و رشد قوزه‌ها بیشترین حساسیت را نسبت به تنش خشکی دارد. همچنین

افزایش مقدار شوری آب آبیاری در تیمار S_3 نسبت به تیمارهای S_1 و S_2 باعث کاهش مقدار پوشش گیاهی شده است. مقدار پوشش گیاهی شبیه‌سازی شده تقریباً مشابه با مقدار پوشش گیاهی واقعی از زمان کاشت تا گلدهی گیاه بوده است. افزایش اختلاف بین مقدار پوشش گیاهی شبیه‌سازی شده و مقدار واقعی، بعد از زمان گلدهی مشاهده شده بود که می‌تواند به علت افزایش دمای هوا و در نتیجه پیری سریع‌تر پوشش گیاهی و کاهش پوشش گیاهی باشد. کاهش مقدار آب آبیاری و افزایش شوری آب آبیاری، باعث پیری زودرس در گیاه و در نتیجه باعث کاهش پوشش گیاهی شده است. شکل‌های ۱، ۲ و ۳ نشان

مقادیر ET_c محاسبه شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل AquaCrop در شکل ۴ ارایه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که مدل قادر است مقدار ET_c را با دقت نسبتاً مناسب شبیه‌سازی کند. مقدار RMSE در شبیه‌سازی ET_c برابر ۷/۴٪ به دست آمد. RMSE مقادیر کلی انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده عدم اطمینان مطلق مدل می‌باشد. هر چه RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، عملکرد شبیه‌سازی مدل بهتر است. مدل تمایل به برآورد مقادیری بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده دارد. به دلیل این که تبخیر و تعرق در روش اندازه‌گیری مزرعه‌ای از فرمول بیلان حجم و در مدل از روش فائو-پنمن-مانتیت استفاده شد که اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده، قابل پیش‌بینی بود.

مشخص نمود که بیشترین اثر تنش بر عملکرد پنبه در طول مرحله رشد قوزه‌ها و تقریباً بعد از مرحله گلدهی اتفاق می‌افتد. اعمال تنش در این مرحله موجب توقف رشد قوزه می‌شود.

شکل‌های ۱ تا ۳ نشان می‌دهند که با افزایش شوری آب آبیاری، درصد پوشش گیاهی کاهش یافته است. صغیر و همکاران (Saghir et al, 2002) نشان دادند که تنش‌های شوری باعث کاهش سطح برگ، نازک شدن ساقه، کاهش شاخ و برگ و ریشه‌ها و در نتیجه تولید کمتر قوزه می‌شوند. تحقیق دیگری بر روی تحمل ارقام مختلف پنبه به شوری نیز نشان داد که کیفیت‌های مختلف آب آبیاری (۴، ۷، ۱۰ و ۱۳ دسی‌زیمنس بر متر) بر روی عملکرد، تأثیر معنی‌دار داشته است و بیشترین عملکرد مربوط به تیمار آبیاری ۴ دسی‌زیمنس بر متر بوده است (جعفرآقایی و دهقانی، ۲۰۰۶).



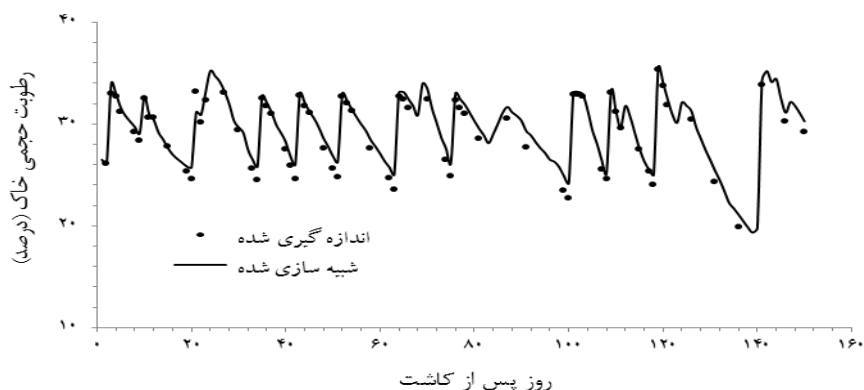
شکل (۴): مقایسه مقادیر ET_c اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده آن توسط مدل

اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده، افزایش یافت. نتیجه مشابهی توسط هسیا و همکاران (2009 Hsiao et al.) برای تیمارهای آبیاری کامل و تنش متوسط آب آبیاری به‌دست آمد.

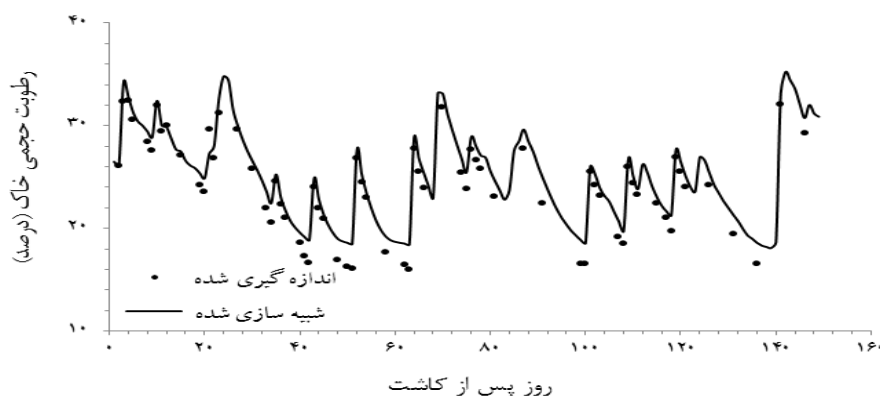
به‌طور کلی شبیه‌سازی مناسبی برای مقدار رطوبت خاک توسط مدل AquaCrop به‌دست آمد. متوسط RMSE بین مقدار رطوبت خاک اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در عمق ۰-۱۰۰ سانتی‌متر خاک برای تیمارهای I₁، I₂ و I₃ به‌ترتیب برابر ۰/۸۹، ۱/۰۸ و ۱/۴۷ بود. فراهانی و همکاران (Farahani et al, 2009) در مطالعه خود برای کشت پنبه به این نتیجه رسیده‌اند که مدل AquaCrop مقدار رطوبت در لایه سطحی خاک را کمتر از مقدار واقعی تخمین زده است.

شکل‌های ۵، ۶ و ۷ به‌ترتیب مقدار رطوبت خاک اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده را برای تیمارهای I₁S₁، I₁S₂ و I₁S₃ نشان می‌دهند. مدل AquaCrop مقدار رطوبت خاک را برای همه تیمارها بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی کرده است. مقدار رطوبت از سطح خاک تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری خاک روند کاهشی داشت. به‌طوری که با افزایش عمق خاک، خطای پیش‌بینی مدل نیز افزایش یافت و این بدان علت است که مدل به کمبود رطوبت خاک حساس می‌باشد. با افزایش تنش خشکی و شوری، خطای پیش‌بینی مدل افزایش یافت.

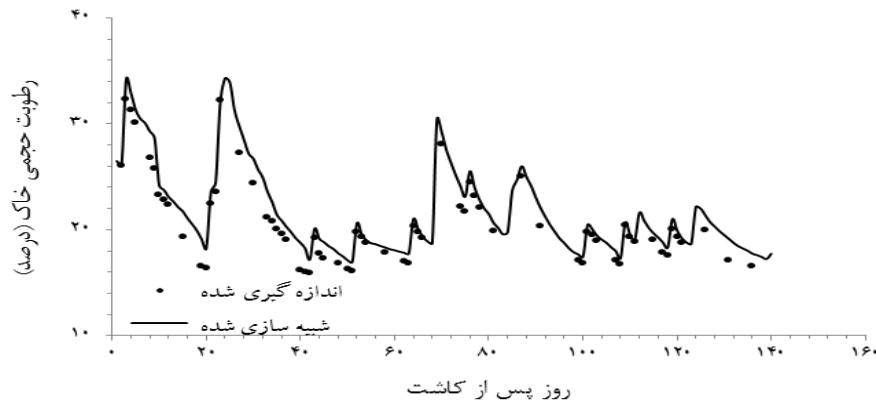
مقدار رطوبت خاک پیش‌بینی شده تقریباً نزدیک به مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده در روزهای اول پس از آبیاری بود و پس از آن اختلاف مقادیر رطوبت



شکل (۵): مقایسه مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده توسط مدل در طول فصل رشد برای تیمار I₁S₁



شکل (۶): مقایسه مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده توسط مدل در طول فصل رشد برای تیمار I₂S₁



شکل (۷): مقایسه مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده توسط مدل در طول فصل رشد برای تیمار I_3S_1

(d) بسیار نزدیک به یک به‌دست آمد که نشان‌دهنده سازگاری روند کاهش عملکرد محصول با کاهش مقدار آب آبیاری و همچنین افزایش شوری آب آبیاری در مدل نسبت به روند عملکرد محصول اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه با آب آبیاری می‌باشد. ضریب RMSE به‌دست آمده، نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی پارامترهای قابل پیش‌بینی است.

شاخص‌های آماری جهت ارزیابی مدل AquaCrop برای واسنجی و صحت‌یابی در جدول ۶ آمده است. نتایج نشان داد که رابطه خوبی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی با مقدار کم RMSE وجود دارد. نتایج مقدار عملکرد شبیه‌سازی شده توسط مدل AquaCrop نشان می‌دهد که در هر دو سال، مدل توانست مقدار عملکرد پنبه را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند (جدول ۶). مقدار شاخص سازگاری

جدول (۶): شاخص‌های آماری ارزیابی مدل برای واسنجی و صحت‌یابی

پارامتر	سال ۱۳۸۸			سال ۱۳۸۹		
	d	E	RMSE	d	E	RMSE
عملکرد	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۱۸۷	۰/۹۸	۰/۹۴	۰/۱۹۳
بیوماس	۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۳۳۱	۰/۹۷	۰/۹۴	۰/۳۴۸
کارایی مصرف آب گیاه	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۰۴۸	۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۰۶۶
رطوبت خاک	۰/۹۲	۰/۸۹	۱/۴۵	۰/۹۰	۰/۸۸	۱/۵۹

نتیجه‌گیری

هدف فائو از توسعه مدل AquaCrop، فراهم کردن ابزاری برای کمک به طراحان، کشاورزان و مدیران کشت و صنعت‌ها جهت انتخاب مدیریت بهینه آبیاری در سیستم‌های مختلف کشاورزی موجود در سراسر جهان است. بنابراین ارزیابی و اعتبار بخشی مدل به‌ویژه برای محصولات استراتژیک ضروری است. به‌طور کلی مدل AquaCrop توانست درصد پوشش گیاهی، عملکرد و بیوماس گیاه پنبه را در طول فصل

رشد برای تیمارهای مختلف عمق آب آبیاری و شوری آب آبیاری با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند. به‌طور کلی روند تغییرات پارامترها در هر دو سال زراعی، با هم مشابه بود. مقدار پوشش گیاهی شبیه‌سازی شده توسط مدل AquaCrop در همه تیمارهای آب آبیاری برای تیمارهای S_1 و S_2 کمتر از مقدار واقعی و برای تیمار S_3 بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده شده است. با توجه به این‌که مدل AquaCrop نسبت به سایر مدل‌ها، نیاز به پارامترهای ورودی کمتری دارد،

تاثیر تنش خشکی و شوری بر میزان محصول، توصیه می‌شود.

استفاده از این مدل در طرح‌های تحقیقاتی جهت پیش‌بینی میزان محصول، کارایی مصرف آب و بررسی

منابع

- جعفرآقایی، م. و م. دهقانی. ۱۳۸۵. تاثیر شوری آب آبیاری بر خصوصیات کمی و کیفی پنبه (ارقام B557 و تابلا دیلا). نهمین کنگره علوم زراعت و اصلاح نباتات ایران، ۵ تا ۷ شهریور، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، تهران. سپاسخواه ع. ع. توکلی و س. ف. موسوی. ۱۳۸۵. اصول و کاربرد کم آبیاری. انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۲۱۰ صفحه.
- شهیدی، ع. ۱۳۸۷. اثر برهم کنش کم آبیاری و شوری بر عملکرد و اجزای عملکرد ارقام گندم با تعیین تابع تولید آب و شوری در منطقه بیرجند. رساله دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۵۰ صفحه.
- کشاورز ع. و ک. صادق‌زاده. ۱۳۷۹. کم آبیاری بهینه و تجزیه تحلیل ریاضی و اقتصادی آن. مجله تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، ۵ سال پنجم، شماره ۱۷، ص ۲۶-۱.
- کیانی ع. و م. کوچک‌زاده. ۱۳۸۰. راهکارهای اجرایی و مدیریتی کاربرد آب شور در کشاورزی. اولین کنفرانس ملی بررسی راهکارهای مقابله با بحران آب، ۲۰ اسفند، دانشگاه زابل، زابل.
- نجفی مود م. ح. ۱۳۸۶. تاثیر دو روش آبیاری شیاری و بارانی بر عملکرد و کیفیت پنبه. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۴۰ صفحه.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrig. Drain. Paper No.56, FAO, Rome, Italy, 300 pp.
- Andarzian, B., M. Bannayan, P. Steduto, H. Mazraeh, M.E. Barati, M.A. Barati and A. Rahnama. 2011. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, 100: 1-8.
- Brar, A.S. 1986. Response of upland cotton to deficit irrigation management. *Sciences and Engineer*, 46(7): 2122-2135.
- Doorenbos, J., A.H. Kassam, C.L.M. Bentvelsen, V. Branscheid, J.M.G.A. Plusje, M. Smith, G.A. Uittenbogard and H.K. Vanderwal. 1979. Yield response to water. *Irrigation and Drainage*. Paper No. 33. FAO, Rome, Italy, 200 pp.
- Droogers, P. and G. Kite. 2001. Simulation modelling at different scales to evaluate the productivity of water. *Physics and Chemistry of the Earth*, 26(11-12): 877-880.
- Farahani, H.J., G. Izzi and T.Y. Oweis. 2009. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy Journal*, 101: 469-476.
- Geerts, S., D. Raes, M. Garcia, R. Miranda, J.A. Cusicanqui, C. Taboada, J. Mendoza, R. Huanca, A. Mamani, O. Condori, J. Mamani, B. Morales, V. Osco, and P. Steduto. 2009. Simulating Yield Response of Quinoa to Water Availability with AquaCrop. *Agronomy Journal*, 101(3): 499-508.
- Hsiao, T.C., L. Heng, P. Steduto, B. Rojas-Lara, D. Raes, and E. Fereres. 2009. AquaCrop The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101:448-459.
- Kuo, Sh.F., B.J. Lin and H.J. Shieh. 2006. Estimation irrigation water requirements with derived crop coefficients for upland and paddy crops in ChiaNan Irrigation Association, Taiwan. *Agricultural Water Management*, 82: 433-451.
- Marinov, D., E. Querner and J. Roelsma. 2005. Simulation of water flow and nitrogen transport for a Bulgarian experimental plot using SWAP and ANIMO models. *J. Contam. Hydrol.* 77: 145-164.
- Raes, D. 2002. Reference manual of Budget model. K. U. Leuven, Faculty of Agricultural and Applied Biological sciences, Institute for Land and Water Management, Leuven, Belgium.

Restuccia, G. 1995. Effects of irrigations regimes on the agronomic behavior of cotton cultivated in the Mediterranean region. *Rivistali Agronomia*, 29(2):123-131.

Saghir, A., N. Khan, M. Zafar and M. Hassan. 2002. Salt tolerance of cotton. *Asian Journal of Plant Sciences*. 1(6): 715-719.

Steduto, P., T.C. Hsiao and E. Fereres. 2007. on the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*, 25:189-207.

Steduto, P., T.C. Hsiao, D. Raes, and E. Fereres. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*, 101(3): 426-437.

Todorovic, M., R. Albrizio, L. Zivotic, M.T.A. Saab, C. Stöckle and P. Steduto. 2009. Assessment of AquaCrop, Crop Syst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy Journal*, 101(3): 509–521.

Cotton Response Simulation to Dry and Salinity Stress by using of AquaCrop Model

Mojtaba Khoshravesh¹, Ali Ghadami Firouzabadi², Pooya Shirazi³ and Mohammad Hossein Najafi-Mood⁴

Abstract

Currently, agriculture is a crucial support for the national food security as well as economic sustainability. Among all factors, water is the most important and limited production factor. The simulation models of yield response to the water and irrigation water salinity are expected to play an increasingly important role in the optimization of water productivity (WP) in agriculture. AquaCrop model is a powerful and valuable tool for improvement of water management in the field and calculating water productivity. In this study, canopy cover, yield, biomass and evapotranspiration of cotton were simulated by using AquaCrop model under different levels of water salinity and deficit irrigation condition. The treatments included three levels of irrigation water salinity and three levels of irrigation depth. The experiment design was laid out with split-split plot in a factorial design with three replications. Results showed that the model can simulate different parameters with high accuracy ($d > 0.95$). By reducing the amount of irrigation water and increasing of irrigation water salinity, simulation error was increased, but simulation results were in the acceptable range. For low levels of water and salinity stress, there was no very difference in the simulation results. AquaCrop model can be valuable tool in water and salinity management.

Keywords: AquaCrop model, Biomass, Canopy cover, Water productivity, Yield.

¹ Assistant professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. Email: khoshravesh_m24@yahoo.com.

² Assistant professor, Water Engineering Department, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research Center, Hamedan, Iran. Email: aghadami@gmail.com.

³ Master of Irrigation and Drainage, PhD Student of Irrigation and Drainage, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: p.shirazi.a@gmail.com.

⁴ Assistant Professor, Water Engineering Department, University of Birjand, Birjand, Iran. Email: mhnajafi2020@yahoo.com