

مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی رشد و نمو گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum* Mill.) در شرایط تنش

خشکی: ۱- محتوای رطوبت خاک، تبخیر و تعرق و پوشش کانوپی

اسماعیل فرخی^۱ - مهدی نصیری محلاتی^{۲*} - علیرضا کوچکی^۳ - سید علیرضا بهشتی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۷

چکیده

مطالعه حاضر با هدف شبیه‌سازی محتوای رطوبت خاک، تبخیر و تعرق و پوشش کانوپی گوجه‌فرنگی تحت رژیم‌های مختلف آبیاری در مراحل مختلف رشد با استفاده از مدل آکوواکراپ در شرایط آب و هوایی مشهد به اجرا درآمد. آزمایش به صورت کرت‌های خردشده در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در دو سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۵ اجرا شد. عامل کرت اصلی شامل کم‌آبیاری به میزان ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله رویشی و عامل کرت فرعی شامل کم‌آبیاری به میزان ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله زایشی بود. مدل آکوواکراپ با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده واسنجی و صحت‌سنجی گردید. به طور کلی، محتوای رطوبت خاک، تبخیر و تعرق و پوشش کانوپی گوجه‌فرنگی با دقت قابل قبولی توسط مدل آکوواکراپ صحت‌سنجی شد، با این وجود کارایی مدل با افزایش تنش آب کاهش پیدا کرد. میانگین مربعات خطای نرمال شده بدست آمده برای محتوای آب خاک و پوشش کانوپی گوجه‌فرنگی در همه تیمارهای آبیاری ۱۳/۳۶ و ۱۳/۸۷، ۱۶/۲۵ و ۱۲/۸۷ درصد به ترتیب برای مرحله واسنجی و صحت‌سنجی بود، که این نتایج نشان‌دهنده توانایی بالای مدل آکوواکراپ در شبیه‌سازی تغییرات رطوبت خاک و پوشش کانوپی در طول دوره رشد گوجه‌فرنگی می‌باشد. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل آکوواکراپ می‌تواند در شرایط تنش آبی در سطح قابل قبولی واسنجی شود و به عنوان ابزاری سودمند برای تصمیمات حمایتی در زمان و میزان آبیاری گوجه‌فرنگی تبدیل شود.

واژه‌های کلیدی: آکوواکراپ، کراپ وات، کم‌آبیاری، مدل‌سازی، موازنه آب خاک

مقدمه

جایگزین برای ارزیابی سریع عملکرد گیاهان در واکنش به محدودیت آب، به طور فزاینده‌ای در حال افزایش است (۲۱، ۱۸، ۴۸ و ۱۶). آکوواکراپ مدلی است چند گیاهی که عملکرد انواع گیاهان زراعی یکساله را در شرایط مختلف مدیریتی و فیزیولوژیکی در واکنش به محدودیت آب شبیه‌سازی می‌کند (۳۵ و ۴۱). آکوواکراپ در مقایسه با سایر مدل‌های گیاهی بوسیله چندین ویژگی منحصر به فرد متمایز می‌شود. اول، برای شبیه‌سازی رشد و گسترش کانوپی از پوشش سبز کانوپی به جای شاخص سطح برگ استفاده می‌کند. مزیت چنین رویکردی این است که خروجی‌های شبیه‌سازی شده مدل به راحتی می‌توانند به کمک مشاهدات چشمی و یا سنجش از دور مستقماً مورد ارزیابی قرار گیرند. مطابق با نتایج برخی مطالعات، شاخص‌های

در پاسخ به فشارهای رو به رشد به منابع آب محدود در جهان، اقدامی فوری جهت افزایش کارایی و بهره‌وری مصرف آب در کشاورزی نیاز است (۳۸، ۴۳ و ۳۶) و مقابله با این چالش مستلزم درکی صحیح از واکنش‌های فیزیولوژیک عملکرد گیاه به آب می‌باشد (۴۰). ارتباط بین عملکرد گیاه و تأمین آب براساس توابع تولید تجربی رایج استوار است (۱۰)، این در حالی است که از این توابع در مناطقی به غیر از مناطقی که در آن توسعه یافته‌اند، نمی‌توان با اطمینان استفاده کرد. از این رو، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی واسنجی شده در محدوده وسیعی از شرایط محیطی و مدیریتی به عنوان راه‌حلی

۴- دانشیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی
DOI: [10.22067/jsw.2021.15011.0](https://doi.org/10.22067/jsw.2021.15011.0)

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری و استادان گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(Email: mnassiri@um.ac.ir)
* نویسنده مسئول:

۱۸/۴۵، و ۲۶/۶ درصد بود.

صحت مدل آکوواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد گیاهان مختلف در محیط‌های متفاوت توسط محققان سراسر جهان تأیید شده است (ع ۵۰ و ۴۰). اگرچه از زمان توسعه مدل آکوواکراپ مطالعاتی در زمینه ارزیابی کارکرد مدل در شبیه‌سازی اثر کم آبیاری بر محصولات مختلف انجام گرفته است ولی تمرکز بر این نکته که مدل نسبت به تنش آبی در مراحل مختلف رشد چه واکنشی دارد، تحقیقات جامعی صورت نگرفته است. با وجودیکه در ایران نیز مطالعاتی بر روی مدل آکوواکراپ انجام گرفته است اما به نظر می‌رسد تاکنون مطالعه‌ای به منظور شبیه‌سازی رشد و نمو گوجه‌فرنگی در ایران صورت نگرفته است. اکثر مطالعات انجام گرفته بر روی گوجه‌فرنگی در جهان نیز در مورد گوجه‌فرنگی‌های مخصوص فرآوری می‌باشند که ویژگی مهم آن‌ها این است که تنها یک بار آن هم با دستگاه مکانیزه برداشت صورت می‌گیرد. بنابراین لزوم بررسی مدل آکوواکراپ در شرایط آب و هوایی ایران و بر روی گوجه‌فرنگی‌های مصرف تازه که چندین برداشت آن هم به صورت دستی دارند امری ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین هدف از مطالعه حاضر، شبیه‌سازی رشد و نمو گوجه‌فرنگی و همچنین پارامترهای مهمی از جمله محتوای رطوبت خاک، تبخیر و تعرق گیاه و پوشش کانوپی در واکنش به شرایط کم آبیاری در مراحل مختلف رشد گیاه در اقلیم مشهد با استفاده از مدل آکوواکراپ می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مدل آکوواکراپ

آکوواکراپ شاخص سطح برگ را شبیه‌سازی نمی‌کند. در عوض، رشد شاخ و برگ به عنوان پوشش سبز کانوپی^۲ (CC) بیان می‌شود که کسری از سطح خاک است که توسط کانوپی پوشانده شده است. CC بین صفر (قبل از سبز شدن) تا حداکثر میزان خود (CC_x) که بسته به نوع محصول و تراکم بوته می‌تواند تا نزدیک به ۱۰۰ درصد باشد، متفاوت است. CC به روش‌های مختلف از جمله الف) با استفاده از تصاویر دیجیتال که در فاصله یک هفته‌ای از توسعه کانوپی بدست آمده است؛ ب) با استفاده از اندازه‌گیری شاخص سطح برگ و ضریب خاموشی نور (معادله ۱) و ج) با استفاده از نسبت مقادیر اندازه‌گیری شده تشعشع فعال فتوسنتزی (PAR) بالا و پایین کانوپی (معادله ۲) برآورد می‌شود (۱۳). با توجه به نتایج بدست آمده از مطالعات متعدد مبنی بر ثابت نبودن مقدار ضریب خاموشی نور در طول دوره رشد بویژه هنگامی که گیاه در معرض تنش آبی قرار دارد، در مطالعه حاضر به منظور برآورد دقیق‌تر CC، از روش سوم (معادله ۲) استفاده شد.

$$CC = 1 - e^{(-k.LAI)} \quad (1)$$

رویشی^۱ بدست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای با پوشش سبز کانوپی همبستگی قوی دارد (۸، ۲۵ و ۲۶). امکان استفاده از چنین شاخص‌هایی (مانند NDVI) سرعت عمل بیشتر را برای واسنجی و صحت‌سنجی خروجی‌های شبیه‌سازی‌شده مدل آکوواکراپ در مقیاس‌های مکانی وسیع منطقه‌ای فراهم می‌آورد (۲۸). دوم، آکوواکراپ طیف وسیع‌تری از تأثیر تنش آب بر تعرق را نسبت به سایر مدل‌های گیاهی آب محور بررسی می‌کند. به طور خاص، آکوواکراپ تأثیر تنش آب بر تعرق را نه تنها به دلیل بسته شدن روزنه‌ها بلکه به دلیل کاهش در گسترش برگ و پیری زودرس کانوپی نیز مدنظر قرار می‌دهد (۱۷).

آکوواکراپ در مناطق مختلف جهان به منظور بررسی واکنش گیاه به تنش آب (۵، ۲۰ و ۴۴)، ارزیابی افزایش پتانسیل بهره‌وری گیاه از طریق مدیریت مزرعه (۱، ۳۰، ۳۱، ۳۹، ۴۶، ۴۷ و ۵۱)، توسعه برنامه‌های کم آبیاری (۱۹)، بهبود مدیریت آبیاری مزرعه (۱۸)، ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر تولید محصول (۵۱) و توسعه ابزارهای حمایتی تصمیم‌گیری در عملیات زراعی مزرعه (۹) مورد استفاده قرار گرفته است.

مطالعات متعددی با مدل آکوواکراپ در ایران انجام شده است. اندرزبان و همکاران (۴) با بررسی صحت‌سنجی و آزمون مدل آکوواکراپ تحت شرایط کم آبیاری و آبیاری کامل در گندم در شرایط اقلیمی اهواز بیان کردند که مدل قادر به شبیه‌سازی دقیق محتوی آب خاک ناحیه ریشه، زیست‌توده محصول و عملکرد دانه با جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE) کم‌تر از ۱۰ درصد، بود. توکلی و همکاران (۴۲) با ارزیابی مدل آکوواکراپ برای تولید جو تحت شرایط کم آبیاری و دیم در شرایط اقلیمی لرستان گزارش کردند که مدل با دقت بالا قادر به شبیه‌سازی درصد پوشش کانوپی، محتوی آب خاک و عملکرد دانه بود. احمدی و همکاران (۳) با مدل‌سازی عملکرد و محتوی آب خاک ذرت با مدل آکوواکراپ تحت مدیریت‌های آبیاری مختلف در شرایط آب و هوایی شیراز به این نتیجه رسیدند که دقت مدل در تیمارهای کم آبیاری با شدت متوسط نسبت به تیمارهای با شدت بالا، بهتر بود. بهمنی و اقبالیان (۷) با شبیه‌سازی پاسخ تولید نیشکر به کم آبیاری با استفاده از مدل آکوواکراپ در شرایط اقلیمی خوزستان نتیجه گرفتند که مدل قادر به شبیه‌سازی عملکرد (NRMSE = 1.89%) و بهره‌وری آب (NRMSE = 1.44%) با دقت بالا بود. پیرمردیان و دعوت‌گر (۳۴) با شبیه‌سازی تأثیرات نوسانات اقلیمی بر آب آبیاری مورد نیاز برنج با استفاده از مدل آکوواکراپ در شرایط آب و هوایی گیلان گزارش دادند که مدل قادر به شبیه‌سازی پوشش کانوپی، زیست‌توده، تبخیر و تعرق برنج و نفوذ عمقی به ترتیب با جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده ۷/۰، ۸/۸،

زودرس در برگ‌ها شود. اثر تنش آب بر پوشش کانوپی توسط ضریب تنش (KS) توصیف می‌شود.

به منظور شبیه‌سازی رشد و نمو محصول، آکوواکراپ به داده‌های آب و هوایی، گیاهی، خاک و روش‌های مدیریتی به عنوان داده‌های ورودی نیاز دارد. روش رایج و توصیه شده برای تعیین پارامترها در مدل‌های شبیه‌سازی، برآورد در طی کالیبراسیون است. این روش در مورد مدل اکواکراپ نیز توصیه شده و در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد (۲۴ و ۳۵). لازم به ذکر است که روش برآورد پارامترها در این پژوهش نیز قبلاً توسط فرخی و همکاران (۱۴) توضیح داده شده است.

محل اجرای آزمایش

پژوهشی مزرعه‌ای در دو سال متوالی (۹۶-۱۳۹۵) در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی و ارتفاع ۹۸۵ متری از سطح دریا واقع در استان خراسان رضوی اجرا شد. مشهد دارای اقلیم نیمه خشک با میانگین بارندگی سالانه حدود ۲۱۸/۹ میلی‌متر می‌باشد، این در حالی است که در طول اجرای این آزمایش بارندگی بسیار ناچیز بود و تنها در اوایل فصل رشد میزان اندکی بارندگی اتفاق افتاد. بارندگی تجمعی در طول فصل رشد در سال اول آزمایش ۲۹/۹ و در سال دوم ۸/۳ میلی‌متر بود (شکل ۱). خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده است.

طرح آماری و شرایط انجام آزمایش

آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با اجرای رژیم‌های مختلف آبیاری در مرحله رویشی و زایشی به ترتیب به عنوان فاکتورهای کرت‌های اصلی و فرعی در سه تکرار اجرا شد. نشاءهای ۳۵ روزه گوجه‌فرنگی با اندازه‌های یکسان (۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر) در مرحله ۴ تا ۵ برگی در ۲۷ کرت ۴/۵ در ۳ متری (۱۳/۵ متر مربع) در تاریخ‌های ۱۳۹۵/۲/۱۵ و ۱۳۹۶/۲/۱۵ با تراکم ۲/۶ بوته در مترمربع کاشته شدند. فاصله بین ردیف‌های کاشت ۱/۵ متر و فاصله بین نشاءها ۰/۲۵ متر در نظر گرفته شد. به منظور جلوگیری از نشست آب بین کرت‌های تیمارهای مختلف، فاصله بین کرت‌های اصلی ۳ متر، کرت‌های فرعی ۱/۵ متر و تکرارها ۲/۵ متر در نظر گرفته شد.

$$CC = 1 - (PAR_{below}) / (PAR_{above}) \quad (۲)$$

که در این معادلات، k ضریب خاموشی نور، LAI شاخص سطح برگ، PAR_{below} و PAR_{above} به ترتیب مقدار تشعشع فعال فتوسنتزی بالا و پایین کانوپی می‌باشند.

آکوواکراپ CC روزانه، در طول توسعه کانوپی و در طول کاهش کانوپی در انتهای فصل رشد را به ترتیب با استفاده از معادلات ۳ تا ۵ محاسبه می‌کند.

$$CC = CC_0 - e^{(CGC.t)} \quad \text{If } CC \leq CC_x/2 \quad (۳)$$

$$CC = CC_x - 0.25 \frac{(CC_x)^2}{CC_0} e^{(-t.CGC)} \quad \text{If } CC > CC_x/2 \quad (۴)$$

$$CC = CC_x \times \{1 - 0.05 \times [e^{\frac{3.33.CGC}{CC_x+2.29}t} - 1]\} \quad (۵)$$

در این معادلات CC_0 پوشش کانوپی اولیه، CGC ضریب رشد کانوپی، CDC ضریب کاهش کانوپی و t تعداد روز بعد از کاشت می‌باشد. پوشش کانوپی در مرحله جوانه زنی (CC_0) بسیار کند است (به طور کلی حدود ۱ درصد). در طول مرحله گسترش کانوپی CC افزایش می‌یابد که با استفاده از ضریب رشد کانوپی توصیف می‌شود (CGC). حداکثر پوشش کانوپی (CC_x) که در اواسط فصل رشد به دست می‌آید، بسته به نوع محصول و تراکم کاشت متفاوت است (به طور کلی حدود ۷۵ تا ۱۰۰ درصد). در اواخر فصل رشد پوشش سبز کانوپی به دلیل پیری شروع به کاهش می‌کند. که این عمل توسط ضریبی به عنوان ضریب کاهش کانوپی توصیف می‌شود.

CC_0 ، CGC، و CC_x زمان لازم برای رسیدن به حداکثر پوشش کانوپی را تعیین می‌کنند. اگر CC_0 و CGC بزرگ باشند، حداکثر پوشش کانوپی (CC_x) زودتر حاصل می‌شود. اگر توسعه رشد محصول با CC_0 کوچکی شروع شود، دوره رسیدن به حداکثر پوشش کانوپی بیشتر خواهد بود. ضریب کاهش کانوپی (CDC) سرعت کاهش کانوپی سبز را در اواخر فصل رشد تعیین می‌کند.

تعرق گیاه از حاصلضرب قدرت تبخیر جو در ضریب گیاهی (K_{cTr}) و با در نظر گرفتن تنش آب (KS) و تنش دما (K_{sTr}) محاسبه می‌شود (معادله ۶).

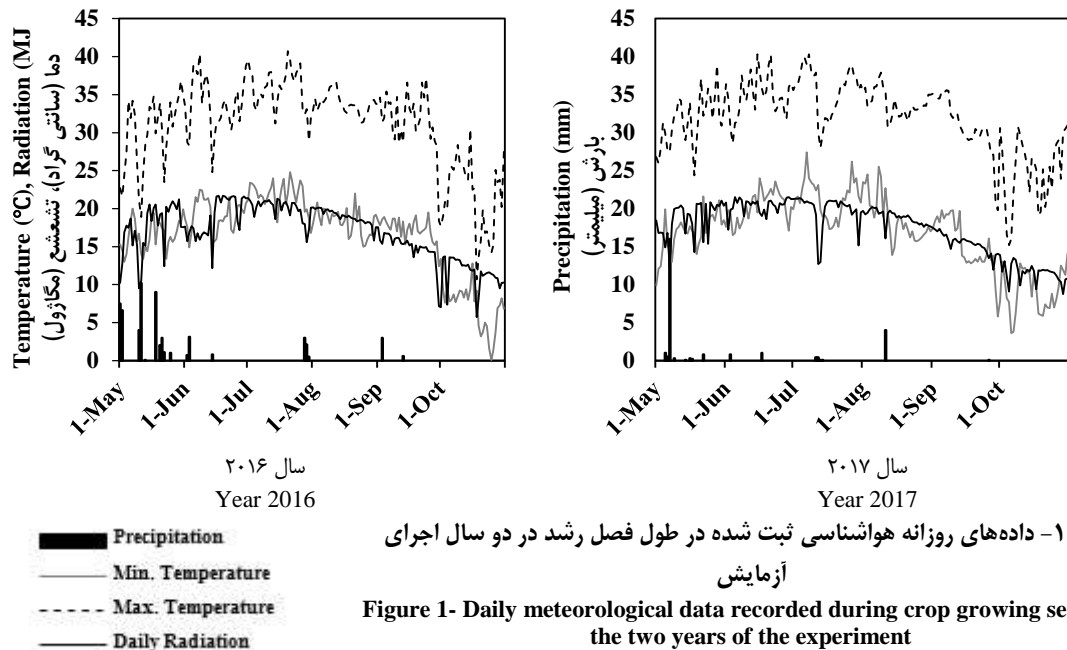
$$Tr = K_s K_{sTr} (K_{cTr,x} CC^*) ETo \quad (۶)$$

در این معادله قدرت تبخیر جو (ETo) بوسیله تبخیر و تعرق گیاه مرجع که توسط معادله پنمن-مونتیث فائو برآورد می‌شود، بیان می‌شود. همچنین CC^* پوشش کانوپی سبز تنظیم شده با روند جذب تشعشع روزانه توسط کانوپی و ($K_{cTr,x} CC^*$) ضریب گیاهی می‌باشد. اجرای شبیه‌سازی توسعه کانوپی در شرایط بدون محدودیت و شرایط دارای محدودیت کاملاً متفاوت است. تنش آبی ممکن است بر گسترش برگ‌ها تاثیر بگذارد و حتی ممکن است منجر به پیر شدن

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه محل آزمایش

Table 1- Physical and chemical characteristics of the soil

عمق (سانتی متر) Depth (cm)	بافت Texture	پتاسیم K (mg/kg)	فسفر P (mg/kg)	نیترژن کل Total N (%)	هدایت الکتریکی EC (dS/m)	کربن آلی OC (%)	ماده آلی OM (%)	اسیدیته pH
0-30	Silty clay loam	289	13.5	0.076	6.75	0.65	1.12	8.15



شکل ۱- داده‌های روزانه هواشناسی ثبت شده در طول فصل رشد در دو سال اجرای آزمایش

Figure 1- Daily meteorological data recorded during crop growing season in the two years of the experiment

قطره ای، مقدار خالص آب مورد نیاز گوجه‌فرنگی در شرایط آب و هوایی مشهد و مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد، ۸۲۴/۵ میلی‌متر و کل آبیاری ناخالص، ۱۲۰۴/۵ میلی‌متر محاسبه شد. به منظور آبیاری گیاهان از روش آبیاری قطره‌ای استفاده شد. به منظور برآورد دقیق تر تأثیر تیمارها در آزمایش و ایجاد شرایط یکسان در شروع اعمال همه تیمارها، تقریباً یک هفته بعد از انتقال هنگامی که بوته‌های گوجه‌فرنگی به خوبی مستقر شده بودند، تیمارهای آبیاری اجرا شد. آبیاری سه بار در هفته در زمان یکسان برای همه تیمارها بر اساس کل آبیاری ناخالص و برنامه آبیاری بدست آمده از کراپوات اجرا شد.

جمع‌آوری داده‌ها داده‌های گیاهی

در هر دو فصل رشد، پارامترهای رشدی و فیزیولوژیکی گیاه با اندازه‌گیری دو بوته در هر کرت با فاصله دو هفته‌ای ارزیابی شدند.

آزمایش به نحوی اجرا شد که اثر کم‌آبیاری و سطوح مختلف آن در هر دو مرحله رویشی و زایشی مورد بررسی قرار گیرد، به این منظور فاکتورهای اصلی این آزمایش شامل: ۱- آبیاری کامل به میزان ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله رویشی (100V)، ۲- آبیاری به میزان ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله رشد رویشی (75V)، ۳- آبیاری به میزان ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله رشد رویشی (50V) و فاکتورهای فرعی این آزمایش شامل: ۱- آبیاری کامل به میزان ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله زایشی (100R)، ۲- آبیاری به میزان ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله رشد زایشی (75R)، ۳- آبیاری به میزان ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله رشد زایشی (50R) بود. بنابراین این طرح شامل ۹ ترکیب تیماری می‌باشد. تیمارهای آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است. برای تنظیم حجم آب مورد نیاز در هر نوبت آبیاری از کنتورهای حجمی که در ابتدای محور آبیاری تعبیه شده بودند، استفاده شد. فرض شد که از کاشت تا تشکیل ۱۰ درصد گل‌ها در هر کرت به عنوان مرحله رویشی و از ۱۰ درصد گل‌دهی تا پایان دوره رشد به عنوان مرحله زایشی در نظر گرفته شود.

قبل از اجرای آزمایش، نیاز آبی گیاه گوجه‌فرنگی با استفاده از نرم‌افزار کراپوات ۰/۸ محاسبه شد. براساس داده‌های ۳۰ ساله هواشناسی و با در نظر گرفتن راندمان آبیاری ۹۰ درصد در آبیاری

نسبی، ساعت آفتابی، سرعت باد و بارندگی که اصلی‌ترین داده‌های مورد نیاز مدل آکوواکراپ می‌باشند در بازه سی‌ساله از ایستگاه هواشناسی مشهد بدست آمد.

داده‌های مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

در مدل آکوواکراپ به داده‌های خاک شامل میزان آب در خاک در حالت اشباع (θ_{sat})، ظرفیت زراعی (θ_{FC})، نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP}) و هدایت هیدرولیک خاک اشباع (K_{sat}) نیاز می‌باشد. با توجه به اطلاعات به دست آمده از آزمایش خاک مزرعه (جدول ۱) و با استفاده از برنامه Soil Water Characteristics (version 6.02.74) که توسط سازمان خدمات تحقیقات ایالات متحده آمریکا توسعه داده شده است، خصوصیات خاک ذکر شده در بالا به منظور استفاده در مدل آکوواکراپ برآورد شدند.

نمونه‌برداری از ۴۵ روز بعد از انتقال^۱ نشاء (DAT) تا ۱۴۵ روز بعد از انتقال نشاء ادامه یافت. به منظور لحاظ اثر حاشیه نمونه‌برداری‌ها از دو ردیف میانی در هر کرت انجام گرفت. سطح برگ با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ (DeltaT Ltd., UK) اندازه‌گیری شد. همزمان با این اندازه‌گیری‌ها، میزان تشعشع رسیده به بالای کانوپی و تشعشع عبور کرده از کانوپی و رسیده به سطح زمین در پایین کانوپی با استفاده از دستگاه سیتومتر خطی (AccuPAR-LP80, Decagon Devices, USA) اندازه‌گیری شد. میوه‌های گوجه‌فرنگی به صورت دستی و هنگامی که به طور کامل رسیدند برداشت شدند. برداشت در هر دو فصل رشد در ۵ نوبت در تاریخ‌های یکم، چهاردهم، بیست و یکم، بیست و نهم مرداد ماه، دوازدهم شهریور ماه و دوم مهرماه انجام گرفت.

داده‌های هواشناسی

داده‌های هواشناسی شامل حداقل و حداکثر دمای روزانه، رطوبت

جدول ۲- توصیف تیمارهای آزمایش

Table 2- Description of experimental treatments

تیمار (رژیم‌های آبیاری) Treatment (irrigation regimes)	توصیف تیمار Description
100V-100R	اعمال آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی در تمامی مراحل رشد (آبیاری کامل) Irrigation applied 100% water requirement at the all growth stages (full irrigation)
100V-75R	اعمال آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۷۵ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 100% water requirement at the vegetative stage and 75% water requirement at the reproductive stage
100V-50R	اعمال آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 100% water requirement at the vegetative stage and 50% water requirement at the reproductive stage
75V-100R	اعمال آبیاری ۷۵ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۱۰۰ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 75% water requirement at the vegetative stage and 100% water requirement at the reproductive stage
75V-75R	اعمال آبیاری ۷۵ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۷۵ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 75% water requirement at the vegetative stage and 75% water requirement at the reproductive stage
75V-50R	اعمال آبیاری ۷۵ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 75% water requirement at the vegetative stage and 50% water requirement at the reproductive stage
50V-100R	اعمال آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۱۰۰ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 50% water requirement at the vegetative stage and 100% water requirement at the reproductive stage
50V-75R	اعمال آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۷۵ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 50% water requirement at the vegetative stage and 75% water requirement at the reproductive stage
50V-50R	اعمال آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 50% water requirement at the vegetative stage and 50% water requirement at the reproductive stage

1- Day After Transplanting (DAT)

داده‌های رطوبت خاک

بر اساس خروجی‌های به دست آمده واسنجی مدل برای گیاه گوجه‌فرنگی آغاز شد. مدل ابتدا برای شرایط پتانسیل و بدون محدودیت آب واسنجی شد. سپس از طریق تأثیر ضرایب تنش آب، مدل برای تیمارهای تنش واسنجی شد. مرحله واسنجی با استفاده از روش سعی و خطا تا رسیدن به بهترین توافق بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده ادامه پیدا کرد. مقادیر پارامترهای گیاهی نهایی واسنجی شده در جدول ۴ ارائه شده است.

صحت‌سنجی مدل آکوواکراپ برای گیاه گوجه‌فرنگی با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای بدست آمده از فصل زراعی دوم (۱۳۹۶) و بدون تغییر در پارامترهایی نهایی شده در مرحله واسنجی برای تمامی تیمارهای مورد بررسی انجام شد. خروجی‌های بدست آمده از این مرحله نیز با مقادیر اندازه‌گیری شده متناظر در آزمایش مزرعه‌ای مقایسه شد.

تحلیل حساسیت به منظور بررسی حساسیت مدل نسبت به پارامترهای به کار رفته در آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. قطعاً انجام تحلیل حساسیت می‌تواند به شناخت دقیق‌تر مدل کمک کند البته در مورد مدل آکوواکراپ قبلاً آنالیز حساسیت با حجم زیادی از داده‌ها و با دامنه تغییرات مکانی و زمانی گسترده صورت گرفته و پارامترهای تأثیرگذار و بی‌تأثیر مشخص شده‌اند (۴۷) در نتیجه واسنجی و تعیین پارامترهای مدل با سهولت بیشتری انجام خواهد شد و در مورد پارامترهای بی‌تأثیر استفاده از پیش فرض مدل نتیجه مطلوبی به همراه خواهد داشت.

ارزیابی مدل

ارزیابی مدل، اثبات کارایی مدل به منظور استفاده آتی می‌باشد. به منظور ارزیابی دقت مدل آکوواکراپ در پیش‌بینی محتوای رطوبت خاک و پوشش کانوپی گوجه‌فرنگی از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق ویلموت (d) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. این آماره‌ها به ترتیب در روابط ۷ تا ۱۲ نشان داده شده‌اند.

دور آبیاری براساس برنامه آبیاری حاصل از برآورد مدل کراپوات تنظیم شد. دور آبیاری در طول فصل رشد ثابت نبود و بسته به مرحله رشد و نیاز آن مرحله به آب تغییر می‌کرد. اما به طور کلی و در اکثر مراحل، آبیاری هر دو روز یکبار انجام شد. همه آبیاری‌ها در محدوده زمانی ساعت ۸ تا ۱۰ صبح انجام شدند. اندازه‌گیری رطوبت در محدوده توسعه ریشه با استفاده از دستگاه انعکاس سنجی زمانی (TDR) در همه تیمارها صورت گرفت. اندازه‌گیری‌ها در سه نوبت شامل دقیقاً قبل از آبیاری، ۵ ساعت بعد از آبیاری و یک روز بعد از آبیاری انجام گرفت.

داده‌های ورودی مدل

در این مطالعه از نسخه ۶/۱ آکوواکراپ (۱۲) برای شبیه‌سازی رشد و نمو گوجه‌فرنگی استفاده شد. مدل در حالت زمان حرارتی (درجه روز رشد) اجرا شد. دوره‌های شبیه‌سازی با چرخه رشد گیاه مرتبط بودند (روز اول پس از کاشت تا رسیدگی). پارامترهای مورد نیاز مدل شامل پارامترهای آب و هوایی، گیاهی، خاکی، مدیریت مزرعه، آب زیرزمینی، عمق حداقل ریشه مؤثر و عمق اولیه آب خاک یا محتوای آب خاک می‌باشد. متغیرهای آب و هوایی شامل حداکثر و حداقل دمای هوا، بارندگی، غلظت دی‌اکسیدکربن جو و تبخیر و تعرق مرجع (ET_o) می‌باشد. در مطالعه حاضر، مقدار پیش فرض غلظت دی‌اکسید کربن استفاده شد. پارامترهای گیاهی شامل تراکم کشت، تاریخ کشت، بهره‌وری آب نرمال‌سازی شده برای تبخیر و تعرق مرجع و غلظت دی‌اکسید کربن جو (WP*) می‌باشد. پارامترهای خاکی شامل بافت خاک، محتوای آب اشباع، ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی و هدایت هیدرولیک اشباع می‌باشد. مدیریت مزرعه‌ای شامل روش آبیاری، ارتفاع کرت و زمان آبیاری می‌باشد.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل

تمامی داده‌های ورودی مورد نیاز بر اساس داده‌های به دست آمده از فصل کشت اول (۱۳۹۵) وارد مدل شد. پس از وارد کردن داده‌های اولیه شامل داده‌های اقلیمی، خاک، آبیاری و مدیریتی مدل اجرا گردید.

جدول ۴- مقایسه بین مقادیر پیش‌فرض در آکوواکراپ برای گوجه‌فرنگی و مقادیر واسنجی شده در مزرعه آزمایشی

Table 4- Comparison between the default and calibrated parameter values contained in the AquaCrop files for Tomato at field experiment

پارامتر Parameter value	واسنجی شده Calibrated	پیش‌فرض Default	واحد Unit
دمای پایه Base temperature	8	7	°C
حداکثر دما Upper temperature	35	28	°C

تراکم گیاه Plant density	2.7	3.3	Plant/m ²
ضریب تعرق گیاهی برای پوشش کامل در شرایط بدون محدودیت آب (Kc _{Tr})	1.25	1.10	
Maximum crop transpiration coefficient			
پوشش کانوپی اولیه (CC ₀)	0.53	0.67	%
Initial canopy cover			
ضریب رشد کانوپی (CGC)	10	11.8	%
Canopy growth coefficient			
ضریب کاهش کانوپی (CDC)	0.38	0.40	%
Canopy decline coefficient			
حداکثر پوشش کانوپی (CC _x)	91	0.75	%
Maximum canopy cover			
درجه روز رشد تا استقرار نشاءها	70	43	°C
GDD to recovery after transplanting			
درجه روز رشد تا حداکثر پوشش کانوپی	1503	1009	°C
GDD to maximum canopy cover			
درجه روز رشد تا شروع دوره پیری	2490	1553	°C
GDD to start senescence			
درجه روز رشد تا رسیدگی	2774	1933	°C
GDD to maturity			
درجه روز رشد تا شروع گلدهی	973	525	°C
GDD to start flowering			
طول دوره گلدهی	1657	750	°C
Length of the flowering			
حداکثر عمق مؤثر ریشه	1	1	m
Maximum effective rooting depth			
حداقل عمق مؤثر ریشه	0.25	0.30	m
Minimum effective rooting depth			
بهره‌وری آب نرمال شده (WP*)	18	18	g/m ²
Normalized water productivity			
شاخص برداشت مرجع (HI ₀)	41	63	%
Reference Harvest index			
آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای گسترش کانوپی (P _{upper})	0.02	0.15	
Upper threshold for canopy expansion			
آستانه پایین ضریب تنش آبی خاک برای گسترش کانوپی (P _{lower})	0.30	0.55	
Lower threshold for canopy expansion			
ضریب شکل منحنی ضریب تنش آبی خاک برای گسترش کانوپی گیاه	0.5	3.0	
Shape factor for stress coefficient for canopy expansion			
آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای بسته شدن روزنه‌ها (P _{upper})	0.38	0.50	
Upper threshold for stomal closer			
ضریب شکل منحنی تنش آبی خاک برای بسته شدن روزنه‌ها	3.4	3.0	
Shape factor for stress coefficient for stomal closer			
آستانه بالای تنش آبی خاک برای پیری کانوپی (P _{upper})	0.45	0.70	
Upper threshold for canopy senescence			
ضریب شکل منحنی تنش آبی خاک برای پیری کانوپی	1.4	3.0	
Shape factor for stress coefficient for canopy senescence			

تمام طول دوره رشد رطوبت در حد ظرفیت زراعی و یا بالاتر قرار داشت. در مواردی که پایین تر از حد ظرفیت زراعی قرار گرفته بود نیز با اجرای آبیاری، مجدداً به حالت قبل برگشت. در اوایل فصل رشد تقریباً در همه تیمارها حتی تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی، رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی مانده بود. دلیل آن می‌تواند جذب کمتر آب به علت عدم توسعه ریشه گیاه باشد. وقتی گیاه شروع به رشد کرد، مقدار جذب آب هم زیادتر شده است، که این روند با افزایش تبخیر و تعرق گیاه مطابقت داشت (شکل نشان داده نشده است). با گذشت زمان و رسیدن به حداکثر پوشش کانوبی، جذب آب از خاک زیادتر شده و رطوبت در خاک پایین تر رفته است. پایین افتادگی رطوبت روندی افزایشی داشته و در اواخر فصل رشد به دلیل کاهش مصرف آب توسط گیاه تا حدودی دوباره از حالت نزولی خارج گردیده است. آخرین آبیاری در ۱۳۵ روز بعد از کاشت انجام شد، بنابراین با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که از این تاریخ تا پایان فصل رشد (۱۴۵ روز بعد از کاشت) رطوبت خاک روندی کاملاً نزولی را طی می‌کند.

با توجه به شاخص‌های آماری محاسبه شده براساس مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده درصد محتوای رطوبت خاک در طول دو فصل کشت (جدول ۵)، مدل با جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده در محدوده ۸/۴۷ تا ۱۸/۶۵ درصد، کارایی مدل در محدوده ۰/۷۷ تا ۰/۹۶، شاخص توافق در محدوده ۰/۷۶ تا ۰/۹۹، ضریب تبیین در محدوده ۰/۷۹ تا ۰/۹۹، دارای دقت قابل قبولی در پیش‌بینی محتوای رطوبت خاک در طول دوره رشد در هر دو مرحله‌ی واسنجی و صحت‌سنجی در مدیریت‌های مختلف آبیاری بود.

با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول ۵ و مقایسه مقادیر مشاهده‌ای، مدل در مرحله صحت‌سنجی از دقت بالایی برخوردار بود. با توجه به مقادیر به دست آمده از محاسبه شاخص خطای نسبی (RE) (جدول ۵)، در مرحله واسنجی در بیشتر تیمارها به جز تیمارهای 1007-50R، 50V-100R و 50V-75R مقادیر پیش‌بینی شده محتوای رطوبت خاک از مقادیر واقعی کوچکتر بود. در مرحله صحت‌سنجی در همه تیمارها به جز تیمارهای 75V-75R و 50V-75R تمایل مدل به برآورد کمتر مقادیر شبیه‌سازی شده به مشاهده شده بیشتر بود.

به طور کلی، با مقایسه مقادیر محتوای رطوبت خاک شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده همه تیمارها با NRMSE حدود ۱۳ درصد و R^2 حدود ۹۰ در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد که مدل توانایی بالایی در پیش‌بینی محتوای رطوبت خاک در طول فصل رشد گوجه‌فرنگی داشت (شکل ۲).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n \bar{O}_i}} \quad (8)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (9)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O_i|)^2} \quad (11)$$

$$R^2 = \frac{(\sum (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))^2}{\sum (P_i - \bar{P})^2 \sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (12)$$

در معادله‌های فوق P_i مقدار شبیه‌سازی شده، O_i مقدار اندازه‌گیری شده، \bar{P} میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده، \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n برابر تعداد داده‌ها می‌باشد. مقدار آماره RMSE همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقدار مثبت آماره MBE نشان‌دهنده این است که مدل آکووکراپ مقدار پارامتر موردنظر را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی بیانگر این است که مدل در برآورد پارامتر موردنظر عدد کوچک‌تری به دست داده است.

مقدار EF نشان‌دهنده صحت برازش داده‌ها می‌باشد و از مقدار منفی بی‌نهایت در بدترین حالت تا یک در زمان برازش کامل داده‌ها متغیر است. مقدار R^2 از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌ها می‌باشد.

نتایج و بحث

شبیه‌سازی موازنه آب خاک

آکووکراپ عملکرد قابل حصول گوجه‌فرنگی را به عنوان تابعی از میزان آب مصرفی در شرایط آبیاری مختلف شبیه‌سازی می‌کند. آکووکراپ مدلی آب محور است بنابراین به منظور شبیه‌سازی عملکرد محصول ابتدا رطوبت آب خاک و در ادامه تبخیر و تعرق گیاه را شبیه‌سازی می‌کند.

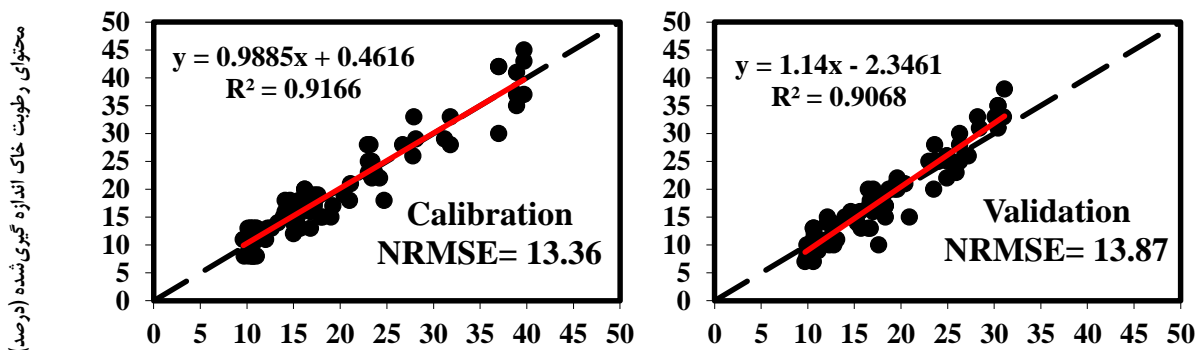
مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده میزان رطوبت خاک تا عمق ۱۵ سانتی‌متری در طول فصل رشد گوجه‌فرنگی مربوط به مرحله واسنجی مدل در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، مدل در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی، محتوای رطوبت آب خاک را در طول فصل رشد گوجه‌فرنگی تحت رژیم‌های مختلف آبیاری با دقت بسیار خوبی پیش‌بینی کرد (جدول ۵).

روند تغییرات رطوبت در شکل ۳ نشان می‌دهد که نوسان تغییرات رطوبت در عمق بالای خاک زیاد بود. در تیمار آبیاری کامل تقریباً در

جدول ۵- مقادیر شاخص‌های آماری برای تعیین دقت مدل در شبیه‌سازی محتوای رطوبت خاک تا عمق ۱۵ سانتی‌متر در تیمارهای مختلف آبیاری

Table 5- Statistical indices derived for evaluating the performance of AquaCrop model in predicting soil water content till 15 cm depth in different irrigation treatments

رژیم‌های آبیاری Irrigation regimes	واسنجی Calibration					صحت‌سنجی Validation				
	میانگین مربعات خطای نرمال‌شده	کارایی مدل- سازی	شاخص توافق ویلموت	خطای نسبی	ضریب تبیین	میانگین مربعات خطای نرمال‌شده	کارایی مدل- سازی	شاخص توافق ویلموت	خطای نسبی	ضریب تبیین
	NRMSE	ME	d	RE	R ²	NRMSE	ME	d	RE	R ²
100V-100R	8.47	0.94	0.99	0.80	0.95	11.66	0.86	0.96	-1.37	0.89
100V-75R	11.82	0.93	0.99	3.35	0.97	10.15	0.92	0.99	-6.97	0.98
100V-50R	14.40	0.93	0.98	-4.97	0.95	15.45	0.92	0.97	-6.73	0.99
75V-100R	12.82	0.87	0.97	1.47	0.90	10.21	0.87	0.96	-6.44	0.95
75V-75R	11.27	0.95	0.99	2.89	0.97	13.58	0.89	0.97	4.67	0.97
75V-50R	15.52	0.90	0.98	4.83	0.93	18.65	0.77	0.94	5.43	0.79
50V-100R	15.08	0.87	0.96	-11.7	0.96	16.17	0.87	0.96	-0.88	0.90
50V-75R	17.96	0.90	0.96	-5.43	0.93	10.04	0.91	0.96	-0.47	0.92
50V-50R	17.41	0.96	0.76	0.07	0.91	14.62	0.87	0.96	-0.88	0.90



محتوای رطوبت خاک اندازه‌گیری شده (درصد)
Simulated soil water content (%)

شکل ۲- مقایسه مقادیر محتوای رطوبت خاک مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده همه تیمارها در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی
Figure 2- Comparison between measured and simulated values of soil water content of all water treatments for calibration and validation

نوترونی بعد از فاصله زمانی کوتاه بعد از آبیاری که ممکن است حد بالای محتوای آب خاک را به خوبی قرائت نکند، توضیح داد. نیاکودیا و استروس‌نیجدر (۳۲) مشاهده کردند که مدل آکوواکراپ تمایل به بیش‌برآورد کل رطوبت خاک شبیه‌سازی شده با مقادیر RMSE ۱۱/۵ و ۱۷/۲ و مقادیر EF ۰/۷۸- و ۰/۰۴ داشت. در مطالعه‌ای دیگر، پاردس و همکاران (۳۳) گزارش کردند که آکوواکراپ با وجود دقت بالا در پارامتریزه کردن مدل، قادر به شبیه‌سازی دقیق محتوای آب

شواهد به دست آمده از مطالعات نشان می‌دهد که عملکرد مدل آکوواکراپ در شبیه‌سازی محتوای آب خاک ضعیف است (۳۷). شاو و همکاران (۲۴) گزارش کردند که کل آب خاک شبیه‌سازی شده در طول زمان در مقایسه با داده‌های مشاهده شده کمتر کاهش پیدا کرد، که نتیجه آن بیش‌برآورد مدل با بیش از ۸۰ میلی‌متر در تخمین کل رطوبت خاک بود. آنها همچنین بیان کردند که برخی از آریبی‌ها را می‌توان با خطاهای تصادفی در اندازه‌گیری‌هایی مانند خواندن میله

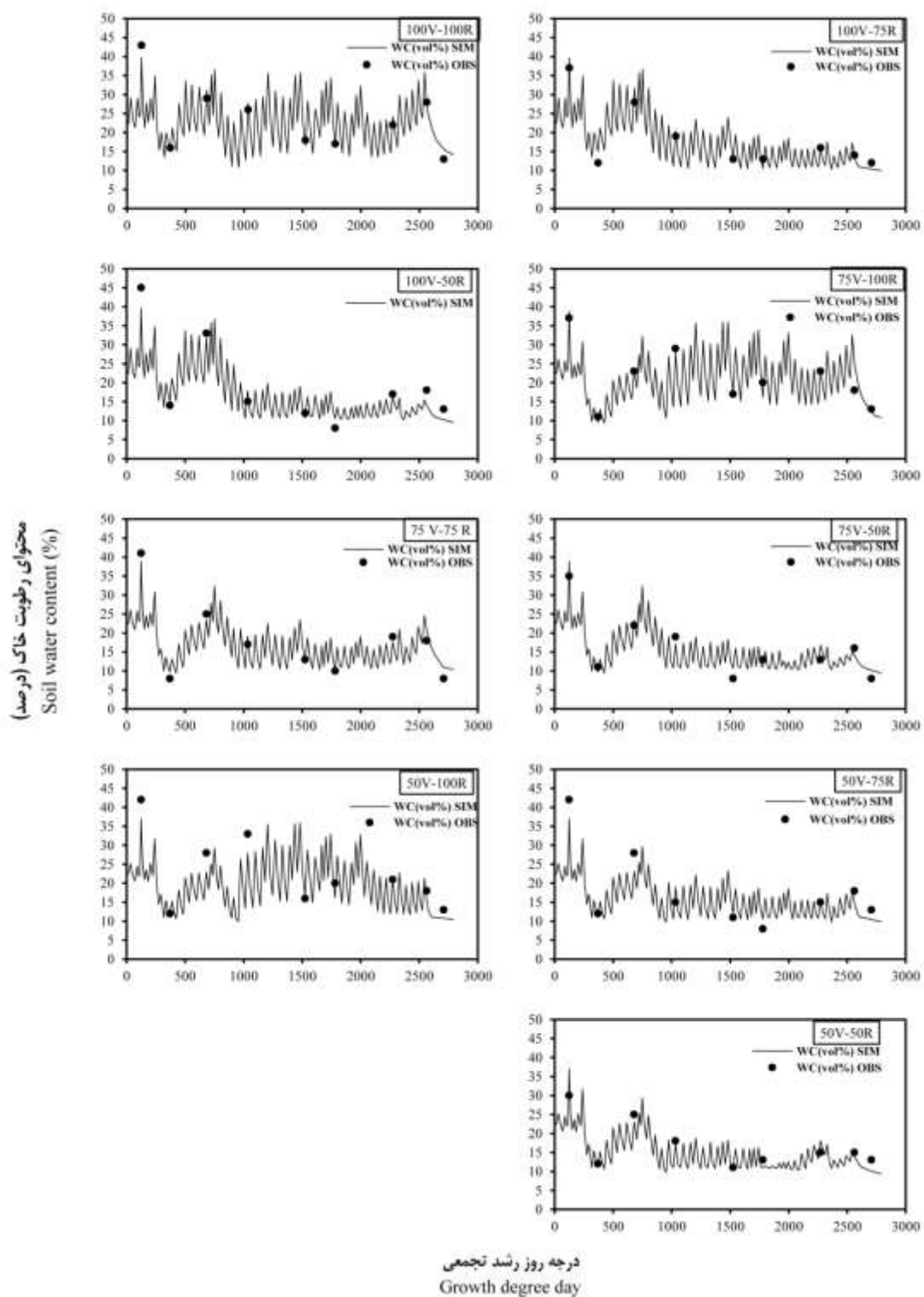
شبیه‌سازی تبخیر (E) و تعرق (Tr)

از آنجایی که زیست‌توده روزانه مستقیماً از بهره‌وری آب واسنجی شده و تعرق شبیه‌سازی شده محاسبه می‌شود بنابراین شبیه‌سازی دقیق تبخیر و تعرق واقعی (ET_a) و تقسیم‌بندی آن به تعرق و تبخیر به منظور پیش‌بینی زیست‌توده گیاه بسیار حائز اهمیت است (۱۱۳). هنگامی که پوشش کانوپی به درستی شبیه‌سازی شود، پارامتریزه کردن تبخیر و تعرق واقعی و زیست‌توده، به تعیین آستانه بسته‌شدن روزنه‌ها ($Threshold p value$) و شکل آن ($Shape$ factor) محدود می‌شود. در این آزمایش، مناسب‌ترین مقدار آستانه تخلیه رطوبتی خاک (Pupper) برای بسته شدن روزنه‌ها ۰/۳۸ با شکل تابع (f_{shape}) ۳/۴ تعیین شد (جدول ۴). نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی تبخیر و تعرق گیاه گوجه‌فرنگی در مرحله واسنجی نشان داد که همه تیمارها در طول فصل رشد روند یکسانی دارند، این در حالی است که گیاهانی که میزان آب بیشتری دریافت کرده‌اند تعرق بیشتری نیز داشته‌اند (شکل ۴). زیست توده تولید شده و به طبع آن عملکرد بدست آمده، متناسب با میزان تعرق تجمعی ($\sum Tr$) در طول فصل رشد می باشد (۳۵). بررسی روند ET در دوسال آزمایش نشان داد که در اوایل دوره رشد میزان تبخیر و تعرق در سال اول نسبت به سال دوم بیشتر بوده است، به طوری که واکنش‌های متفاوتی در عملکرد گوجه فرنگی در هر دو سال آزمایش مشاهده شد. تفاوت عملکرد بین دو فصل رشد را می توان با تفاوت در شرایط اقلیمی توضیح داد. بارندگی در طول دوره رشد در سال اول نسبت به سال دوم به خصوص در مرحله رویشی بیشتر بود و سال دوم به طور کلی سال خشک تری بود، بنابراین چنین می توان نتیجه گرفت که افزایش عملکرد در سال اول به خصوص در تیمارهایی که شامل تنش آبی در طول دوره رویشی بودند به دلیل بارندگی بیشتر بوده است (۱۵). میزان تبخیر و تعرق گیاه در طول فصل رشد از ۷۱۶/۶۷ میلی‌متر در تیمار 100V-100R تا ۳۴۲/۸ میلی‌متر در تیمار 50V-50R متغیر بود. هر چند عوامل متعددی بر میزان تبخیر و تعرق همچون سرعت باد و میزان تشعشع تأثیرگذار هستند (۳۷) اما در این آزمایش نتایج نشان می‌دهد که شبیه‌سازی تبخیر و تعرق بیشتر متأثر از میزان پوشش کانوپی می‌باشد. در واقع تیمارهای با پوشش کانوپی بیشتر، میزان تبخیر و تعرق بیشتری نسبت به تیمارهای با پوشش کانوپی کمتر نشان دادند. ساندها و ایرماک (۳۷) نیز نشان دادند که تیمارهایی که به میزان کمتری آبیاری شده بودند، تبخیر و تعرق کمتری داشتند و دلیل آن را کاهش در میزان پوشش کانوپی گیاه ذرت بیان کردند.

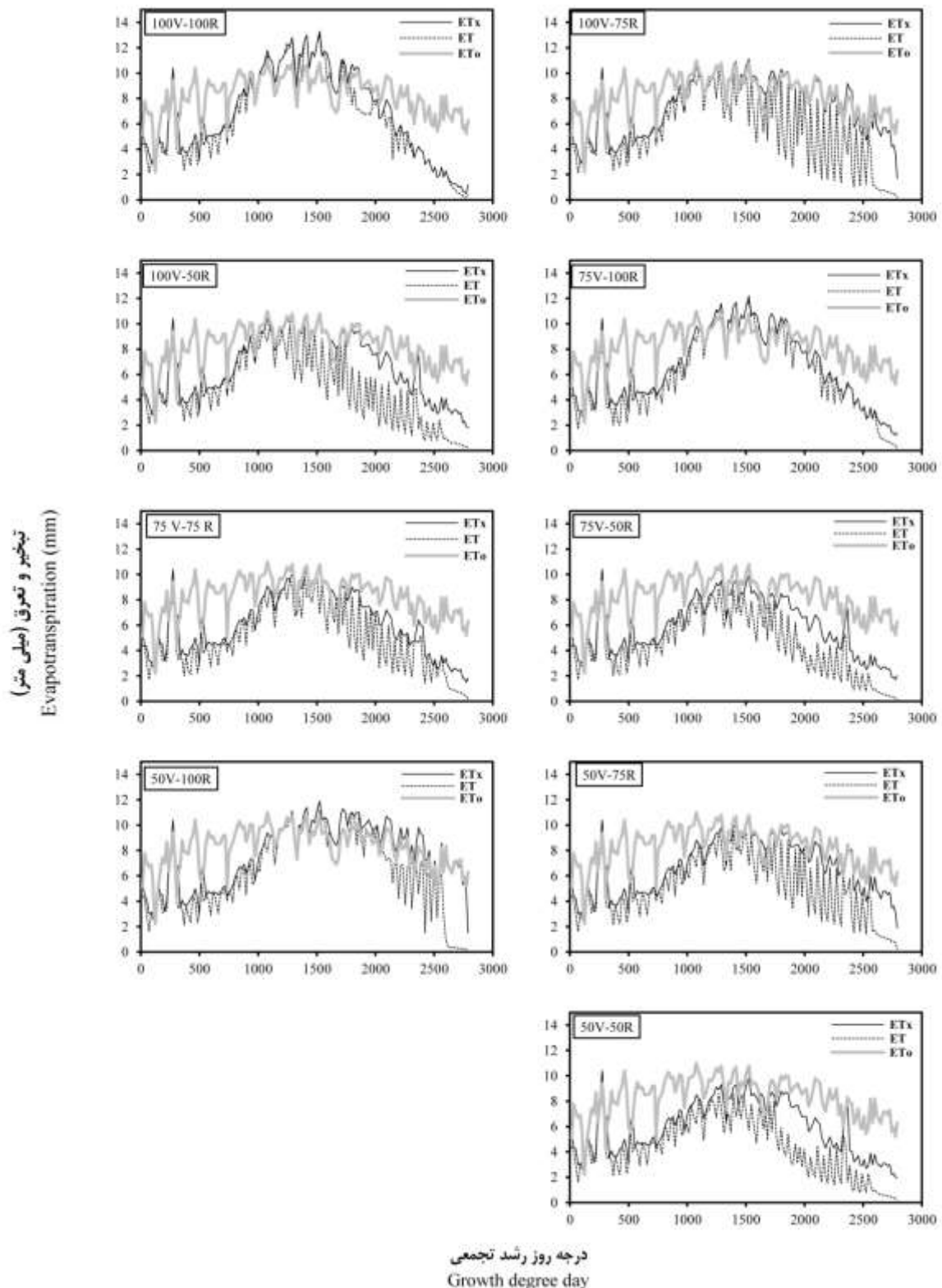
خاک نیست ($R^2 < 0/88$)، $RMSE < 0/11$ ، $EF < 0/03$) و نمی‌تواند برای اهداف برنامه‌ریزی آبیاری مورد استفاده قرار بگیرد. آنها روندی بیش‌برآورد برای تخمین محتوای رطوبت خاک مشاهده کردند و نتیجه گرفتند که تفکیک نادرست تبخیر و تعرق توسط مدل باعث ایجاد آریبی در تخمین محتوای رطوبت خاک شده است. آنها پیشنهاد کردند که اگر مدل به جای منحنی CC از منحنی ضریب گیاهی کلاسیک برای تنظیم ضریب گیاهی پایه برای تعرق استفاده کند، شبیه‌سازی کل رطوبت خاک بهبود می‌یابد، این محققین نتیجه حاصل از این پیشنهاد را چنین بیان کردند که به جای تغییرات روزانه در محتوای آب خاک، تنها تنش آب در طول دوره رویشی بر منحنی CC تأثیر بگذارد. این پیشنهاد ممکن است در مطالعه حاضر نیز معتبر باشد، زیرا شدت تنش آب بر محتوای رطوبت خاک تأثیرگذار است و کل رطوبت خاک توسط مدل شبیه‌سازی می‌شود. در مقابل علی‌رغم اندکی بیش‌برآوردی، احمدی و همکاران (۳) تخمین‌های خوبی از محتوای آب خاک بدست آوردند.

معمولاً حداکثر جذب آب توسط ریشه‌ها از لایه‌های بالایی سطح خاک صورت می‌گیرد (یعنی ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری خاک) و فرض می‌شود که جذب به تدریج با افزایش عمق کاهش می‌یابد که این امر باعث می‌شود برای درک مناسب از تراکم

ریشه و الگوی استخراج آب، شبیه‌سازی دقیق محتوای رطوبت خاک در این ناحیه ضروری باشد (۳۷). برای خاک سیلتی لوم (شبه خاک مزرعه مورد آزمایش در این مطالعه) جامان و ایرماک (۳۷) گزارش کردند که تحت شرایط تنش آبی، جذب آب از لایه‌های عمیق‌تر خاک نیز امکان‌پذیر است. آنها همچنین دریافتند که به طور کلی استخراج آب خاک با افزایش عمق خاک کاهش یافت و جذب آب از لایه بالایی خاک (۰-۳۰ سانتی‌متری) بیشترین سهم را در کل آب استخراج شده در طول فصل رشد به خود اختصاص داد به گونه‌ای که ۳۹، ۴۱، ۴۸، ۴۸، ۵۱ درصد استخراج آب به ترتیب در تیمارهای ۵۰، ۵۰ درصد آبیاری کامل، ۶۰ درصد آبیاری کامل، ۷۵ درصد آبیاری کامل و آبیاری کامل از لایه بالایی خاک بود. به طور کلی عمیق‌ترین لایه خاک (۱/۵ تا ۱/۸ متر) تنها ۵ تا ۸ درصد در استخراج کل آب فصلی نقش داشت. مبان و همکاران (۲۹) گزارش کردند که بیشترین میزان خطا در شبیه‌سازی محتوای آب خاک در لایه‌های میانی خاک (۵۰ و ۸۰ سانتی) و پس از آن در عمق ۲۰ سانتی‌متری خاک رخ داد، نتیجه‌گیری آنها از این مشاهدات این بود که تراکم بیشتر ریشه‌ها در این لایه‌ها بر خطاهای شبیه‌سازی تأثیرگذار است. آنها همچنین بیش‌برآورد مقادیر محتوای رطوبت خاک برای ذرت دیم به خصوص در سال‌های خشک را گزارش کردند. بنابراین به نظر می‌رسد که بالا بودن دقت مدل آکواکراپ در پیش‌بینی رطوبت خاک در تحقیق حاضر به این دلیل است که مقادیر اندازه‌گیری شده مربوط به لایه بالایی خاک یعنی صفر تا ۱۵ سانتی‌متری بوده‌اند.



شکل ۳- مقادیر محتوای رطوبت خاک مشاهده‌شده (WC, (vol%) OBS) و شبیه‌سازی شده (WC, (vol%) SIM) تا عمق ۱۵ سانتی‌متری تحت رژیم‌های مختلف آبیاری در طول فصل رشد جهت واسنجی (سال ۱۳۹۵)
 Figure 3- Observed and simulated values of soil water content till 15 cm depth under different irrigation regimes during growing season for calibration (2016)



شکل ۴- مقایسه تبخیر و تعرق گیاه گوجه‌فرنگی و تبخیر و تعرق گیاه مرجع شبیه‌سازی‌شده در مرحله واسنجی (۱۳۹۶).

ETx تبخیر و تعرق حداکثر گیاه، ET تبخیر و تعرق گیاه، ET0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع

Figure 4- Comparison between simulated values of tomato evapotranspiration and reference evapotranspiration for calibration stage (2016)

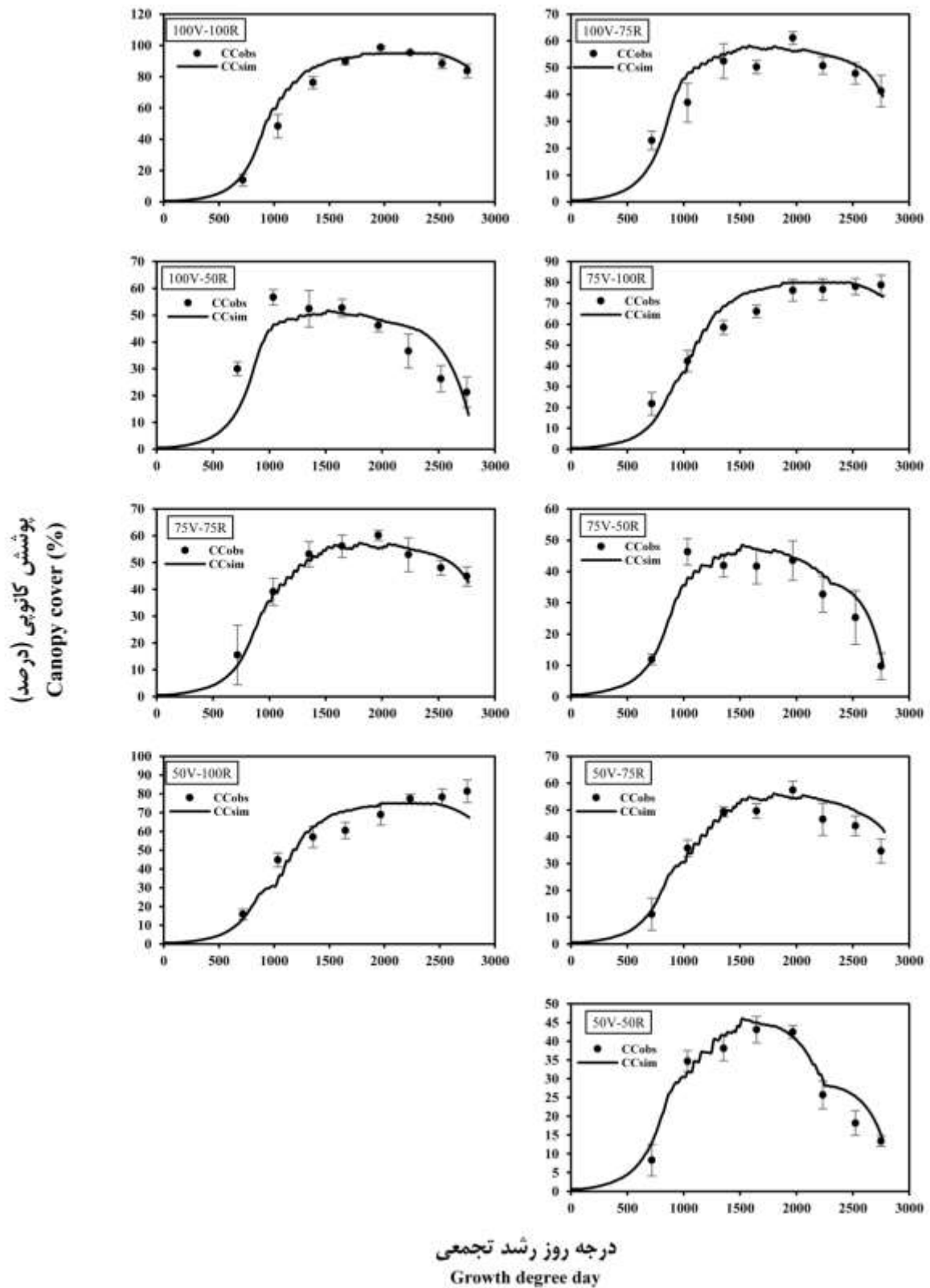
پوشش کانوپی، زیست‌توده و محتوای آب خاک قابل قبول (≥ 0.75) ضریب تبیین و ≥ 0.72 کارایی مدل) بود. به طور کلی نتایج واسنجی توافق خوبی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده برای توسعه CC در همه تیمارها با مقادیر R^2 بالا (> 0.87)، EF قابل قبول (< 0.61)، خطای پایین (RMSE، دامنه‌ای بین $4/5$ تا $9/2$) و مقادیر d بالا (< 0.92) نشان داد. RMSE پایین نشان‌دهنده استحکام مدل در شبیه‌سازی CC پس از انجام یک واسنجی قابل قبول تحت رژیم‌های مختلف آبیاری می‌باشد. پایین‌ترین دقت در تخمین CC در سال ۹۵ برای تیمار 50V-50R و بعد از آن برای تیمار 50V-75R یعنی جایی که بیشترین تنش آبی به گیاه وارد شده است، مشاهده شد. تأثیر تنش آب بر داده‌های مشاهده شده در این تیمارها بعد از ۱۰۰ روز پس از کاشت آشکارتر شد به صورتی که در این مرحله CC به سرعت کاهش پیدا کرد. با این حال مدل میزان CC را در مرحله پیری برای تیمارهای 50V-50R و 50V-75R کمی بالاتر پیش‌بینی کرد. از این جنبه در نظر گرفتن زمان شروع مرحله پیری کانوپی در هنگام واسنجی بسیار مهم است. با توجه به گفته استندوتو و همکاران (۴۰)، زمان پیری کانوپی باید هنگامی باشد که برگ‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای شروع به پیر شدن (زرد شدن) کنند که در این زمان شاخص سطح برگ بیشتر از ۳ تا ۴ نیست.

شبیه‌سازی توسعه پوشش کانوپی (CC)

در مدل آکوواکراپ برآورد مناسب منحنی CC به منظور تخمین دقیق تبخیر خاک، تعرق گیاه، زیست‌توده و عملکرد محصول بسیار مهم است (۳۷). به منظور برآورد تولید شاخ و برگ و شبیه‌سازی منحنی CC، مدل با استفاده از داده‌های آزمایشی سال ۱۳۹۵ واسنجی و با استفاده از داده‌های سال ۱۳۹۶ صحت‌سنجی شد. مقادیر واسنجی شده و صحت‌سنجی شده CC تحت رژیم‌های مختلف آبیاری به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. شاخص‌های آماری نشان‌دهنده عملکرد مدل نسبت پیش‌بینی منحنی CC در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۶ نشان داده شده است. روند منحنی CC در طی زمان گرمایی یا درجه روز رشد (GDD) در همه تیمارها در هر دو سال مشابه بود و مدل واسنجی شده به خوبی این روند را در طول فصل رشد شبیه‌سازی کرد. ساکماکیس و همکاران (۴۵) با بررسی عملکرد مدل آکوواکراپ در شبیه‌سازی رشد پنبه (*Gossypium herbaceum*) دریافتند که هنگامی که مدل در حالت درجه روز رشد اجرا شد با دقت خیلی بالا (≥ 0.93) ضریب تبیین و ≥ 0.91 کارایی مدل) توانست الگوی رشد ریشه، پوشش کانوپی، زیست‌توده و محتوای آب خاک را شبیه‌سازی کند، اما هنگامی که مدل در حالت تعداد روز اجرا شد شبیه‌سازی الگوی رشد ریشه رضایت بخش نبود و در واقع با شکست مواجه شد در حالی که شبیه‌سازی

جدول ۶- مقادیر شاخص‌های آماری برای تعیین دقت مدل در شبیه‌سازی پوشش کانوپی گوجه‌فرنگی (درصد) در تیمارهای مختلف آبیاری
Table 6- Statistical indices derived for evaluating the performance of AquaCrop model for predicting canopy cover (%) in different irrigation treatments

مرحله شبیه‌سازی Simulation	رژیم‌های آبیاری Irrigation regimes	شاخص‌های ارزیابی مدل Model evaluation indices						
		میانگین مربعات خطا RMSE	میانگین مربعات خطای نرمال شده NRMSE	کارایی مدل EF	شاخص توافق ویلموت d	ضریب تبیین R ²	خطای نسبی RE	کارایی مدل‌سازی ME
واسنجی Calibration	100V-100R	4.5	6	0.97	0.99	0.99	1.73	0.97
	100V-75R	7	15	0.64	0.93	0.92	7.40	0.63
	100V-50R	7.1	17.8	0.61	0.92	0.88	-0.84	0.61
	75V-100R	8.4	13.5	0.82	0.97	0.97	-1.64	0.82
	75V-75R	6.6	14.7	0.75	0.95	0.93	-5.88	0.75
	75V-50R	6.6	20.7	0.77	0.94	0.88	-4.18	0.77
	50V-100R	9.2	15.6	0.78	0.95	0.93	-3.17	0.78
	50V-75R	7.5	18.1	0.72	0.93	0.87	0.33	0.71
50V-50R	6.3	24.9	0.77	0.93	0.90	11.80	0.76	
میانگین Average		7.02	16.25	0.78	0.92	0.92	0.62	0.75
صحت‌سنجی Validation	100V-100R	6.9	9.3	0.93	0.98	0.98	5.72	0.93
	100V-75R	6.1	13.4	0.69	0.94	0.90	3.93	0.69
	100V-50R	8.6	21.4	0.54	0.89	0.81	-4.44	0.53
	75V-100R	6.6	10.6	0.88	0.98	0.97	2.55	0.88
	75V-75R	2.9	6.2	0.95	0.99	0.98	-1.68	0.95
	75V-50R	5.1	16.1	0.86	0.69	0.94	6.84	0.86
	50V-100R	7.9	13	0.85	0.96	0.93	-2.33	0.85
	50V-75R	5	12.1	0.86	0.96	0.95	6.64	0.86
50V-50R	3.8	13.7	0.91	0.97	0.97	8.35	0.91	
میانگین Average		5.88	12.87	0.83	0.93	0.94	2.84	0.82



شکل ۵- پوشش کانوپی شبیه‌سازی شده (CCsim) و مشاهده شده (CCobs) در هر یک از تیمارها در مرحله واسنجی (۱۳۹۵)
Figure 5- Observed (CCobs) and simulated (CCsim) values of canopy cover under different irrigation regimes during growing season for calibration (2016)

مدل آکوواکراپ را برای منطقه‌ای گرمسیری در تایوان ارزیابی کردند و گزارش دادند که مدل توسعه کانوبی را کمتر از داده‌های مشاهده شده پیش‌بینی کرد و همچنین تمایل مدل به کم برآوردی میزان CC مشهود بود و دقت مدل هنگام اجرای تنش آب کاهش یافت که باعث حصول مقادیر R^2 ، NRMSE، d و EF به ترتیب در محدوده ۰/۹۲ تا ۰/۹۸، ۶/۴ تا ۱۶/۰ درصد، ۰/۹۲ تا ۰/۹۹ و ۰/۶۰ تا ۰/۹۴ شد. کاترجی و همکاران (۲۷) نیز نشان دادند که مدل آکوواکراپ CC را در شرایط بدون تنش نسبت به شرایط تنش برای گیاه گوجه‌فرنگی با دقت بیشتری شبیه‌سازی کرد.

نتیجه‌گیری

نسخه ۶/۱ آکوواکراپ برای شبیه‌سازی محتوای آب خاک، تبخیر و تعرق گیاه و پوشش کانوبی گوجه‌فرنگی تحت شرایط رژیم‌های مختلف آبیاری در مراحل مختلف رشد واسنجی و صحت‌سنجی شد. مرحله واسنجی با موفقیت و دقت بالا انجام شد که حاصل آن بدست آمدن نتایجی با خطاهای پایین و اختلافات کم بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی بود. توافق بسیار خوبی بین مقادیر محتوای رطوبت خاک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده وجود داشت که باعث عملکرد خوب مدل در شبیه‌سازی میزان تبخیر و تعرق گیاه شد. به طور کلی نتایج واسنجی توافق خوبی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده برای توسعه CC در همه تیمارها با مقادیر R^2 بالا ($> 0/87$)، EF قابل قبول ($< 0/61$)، خطای پایین (RMSE، دامنه‌ای بین ۴/۵ تا ۹/۲) و مقادیر d بالا ($< 0/92$) نشان داد. همچنین مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده در دامنه ۸/۴۷ تا ۱۷/۹۶ درصد برای پیش‌بینی محتوای رطوبت خاک در محدوده قابل قبول بود.

بنابراین مطابق با بسیاری از مطالعات انجام شده مبنی بر کاهش کارایی مدل آکوواکراپ در شرایط تنش آبی، مطالعه حاضر نیز علی‌رغم تأیید کارایی و دقت مناسب مدل آکوواکراپ در شبیه‌سازی رشد و نمو و پیش‌بینی محتوای آب خاک، تبخیر و تعرق و پوشش کانوبی گوجه‌فرنگی در شرایط کم آبیاری، نشان داد که کارایی مدل آکوواکراپ با افزایش شدت تنش نسبت به شرایط بدون تنش، کاهش می‌یابد. اما به طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که مدل آکوواکراپ با سطح اطمینان قابل قبولی می‌تواند محتوای آب خاک، تبخیر و تعرق و پوشش کانوبی گیاه گوجه‌فرنگی تحت سناریوهای مختلف آبیاری را شبیه‌سازی کند.

در این مطالعه مشاهدات بصری نشان داد که تا حداقل ۱۲۵ روز پس از کاشت (۲۳۶۵ درجه روز رشد (GDD)) همه برگ‌ها سبز بودند بنابراین حداقل تا ۱۲۵ روز پس از کاشت پیری شروع نشده بود. در نتیجه، برای رسیدن به زردی قابل

توجه برگ‌ها، زمان شروع پیری کانوبی برای واسنجی مدل ۱۳۵ روز بعد از کاشت (۲۴۹۰ روز درجه رشد) در نظر گرفته شد.

با این حال، تنش شدید به‌کار برده شده در مزرعه باعث پیری زودتر با شدت بیشتر شد که می‌تواند دلیل کاهش بیشتر CC در داده‌های مشاهده شده نسبت به شبیه‌سازی شده در تیمارهایی که در مرحله زایشی تحت تنش بوده‌اند، باشد. بیش برآورد مدل در مرحله واسنجی در زمان پیری در مطالعه ساندها و ایرماک (۳۷) نیز گزارش شده است. به طور کلی نتایج حاصل از مدل در شبیه‌سازی CC در مرحله واسنجی از نظر آماری قابل قبول بود. در طول مرحله صحت‌سنجی، مدل قادر بود روند توسعه CC را با دقت بالا شبیه‌سازی کند. بالاترین خطا در شبیه‌سازی در تیمار 100V-50R مشاهده شد یعنی در تیماری که گیاه پس از دریافت آب کامل در دوره رویشی با تنش شدید آب در مرحله زایشی مواجه شد و سطح برگ با شدت و سرعت بیشتری کاهش پیدا کرد که در نتیجه مدل میزان CC را در مرحله انتهایی رشد بیش از داده‌های واقعی مشاهده شده در مزرعه پیش‌بینی کرد. بنابراین مدل تمایل به بیش برآورد داده‌ها تحت تأثیر تنش آب نسبت به داده‌های مشاهده شده دارد. تیمارهایی که در مرحله زایشی آب کامل دریافت کردند، به ویژه هنگامی که در زمان رویشی هم آب کامل یا حداقل با کاهش ۲۵ درصدی دریافت کردند، با دقت بسیار بالا با مقادیر $R^2 > 0/97$ ، $EF > 0/88$ ، $RMSE < 0/6$ و $NRMSE < 0/98$ و $d >$ شبیه‌سازی شدند.

نتایج CC در این مطالعه با گزارش‌های هنگ و همکاران (۲۳) برای ذرت آبیاری شده و کم‌آبیاری شده در سه منطقه تگزاس، فلوریدا و اسپانیا با شرایط محیطی متفاوت، مطابقت داشت. آنها مقادیر NRMSE و EF را به ترتیب در محدوده ۵/۱ تا ۳۴/۵ درصد و ۲/۰- تا ۰/۹۸ بدست آوردند و عدم تطابق جزئی در CC مرحله پیری با کاهش شدیدتر برای تگزاس و کندتر برای فلوریدا در مقایسه با CC مشاهده شده را گزارش کردند. پاردس و همکاران (۳۳) نیز مقادیر R^2 ، NRMSE و EF برای منطقه آلیپارسه به ترتیب ۰/۹۷، ۶/۶، ۰/۹۶ و برای منطقه سورایا در مرکز پرتغال به ترتیب ۰/۹۲، ۵/۱ و ۰/۹۱ گزارش کردند و بیان کردند که مدل با دقت خوبی قادر به پیش‌بینی CC بود. شاو و همکاران (۲۴) به محدودیت مدل‌ها در شبیه‌سازی سرعت کاهش مرحله پیری کانوبی به علت تنش آب پرداخته‌اند. آن‌ها NRMSE مربوط به پیش‌بینی پوشش کانوبی را برای تیمارهای بدون تنش و تحت تنش آب در دیویس ایالت کالیفرنیا در محدوده ۴/۸ تا ۱۳/۶ درصد و d بزرگتر از ۹۵ را گزارش دادند. گریوس و وانگ (۲۲)

منابع

- 1- Abrha B., Delbecque N., Raes D., Tsegay A., Todorovic M., Heng L.E.E., Vanutrecht E., Geerts S.A.M., Garcia-Vila M., and Deckers S. 2012. Sowing strategies for barley (*Hordeum vulgare* L.) Based on modelled yield response to water with aquacrop. *Experimental Agriculture* 48: 252-271.
- 2- Agricultural Statistics of Iran. 2018. The yearbook of agriculture statistics of Iran. Bureau of statistics and information technology, The ministry of Agriculture, Tehran, Iran. 232 pages. (In persian)
- 3- Ahmadi S.H., Mosallaepour E., Kamgar-Haghighi A.A., and 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.
- 4- Andarzian B., Bannayan M., Steduto P., Mazraeh H., Barati M.E., Barati M.A., and 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.
- 5- Araya A., Habtu S., Hadgu K.M., Kebede A., and Dejene T. 2010a. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management* 97: 1838-1846.
- 6- Araya A., Keesstra S.D., and Stroosnijder L. 2010b. Simulating yield response to water of Teff (*Eragrostis tef*) with FAO's AquaCrop model. *Field Crops Research* 116: 196-204.
- 7- Bahmani O., and Eghbalian S. 2018. Simulating the Response of Sugarcane Production to Water Deficit Irrigation Using the AquaCrop Model. *Agricultural Research* 7: 158-166.
- 8- Carlson T.N., and Ripley D.A. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment* 62: 241-252.
- 9- Cusicanqui J., Dillen K., Garcia M., Geerts S., Raes D., and Mathijs E. 2013. Economic assessment at farm level of the implementation of deficit irrigation for quinoa production in the Southern Bolivian Altiplano. *Spanish Journal of Agricultural Research* 11(4): DO - 10.5424/sjar/2013114-4097.
- 10- Doorenbos J., and Kassam A. 1979. Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage*, Paper No. 33: 257.
- 11- FAO STAT. 2018. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture (SOLAW)-Managing Systems at Risk. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earth scan, London.
- 12- FAO. 2019. Downloads for AquaCrop (Version 6.1) Standard Window Program and Plug-in Program. <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>.
- 13- Farahani H.J., Izzı G., and Oweis T.Y. 2009. Parameterization and Evaluation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Cotton. *Agronomy Journal* 101: 469-476.
- 14- Farrokhi E., Nassiri Mahalati M., Koocheki A., Beheshti S.A. 2022. Simulation of growth and development of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under drought stress: 2- simulation of water productivity, above ground biomass and yield. *Water and Soil*. (Accepted). (In Persian with English abstract)
- 15- Farrokhi E., Nassiri Mahalati M., Koocheki A., Beheshti S.A. 2021. Light extinction coefficient and radiation use efficiency in different growth stages of tomato exposed to different irrigation regimes. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. (Accepted). (In Persian with English abstract)
- 16- Foster T., Brozović N., and Butler A.P. 2014. Modeling irrigation behavior in groundwater systems. *Water Resources Research* 50: 6370-6389.
- 17- Foster T., Brozović N., Butler A.P., Neale C.M.U., Raes D., Steduto P., Fereres E., and Hsiao T.C. 2017. AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water productivity model. *Agricultural Water Management* 181: 18-22.
- 18- García-Vila M., and 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: 21-31.
- 19- Geerts S., Raes D., and Garcia M. 2010. Using AquaCrop to derive deficit irrigation schedules. *Agricultural Water Management* 98: 213-216.
- 20- Geerts S., Raes D., Garcia M., Miranda R., Cusicanqui J. A., Taboada C., Mendoza J., Huanca R., Mamani, A., Condori O., Mamani J., Morales B., Osco V., and Steduto P. 2009. Simulating yield response of quinoa to water availability with aquacrop. *Agronomy Journal* 101: 499-508.
- 21- Grassini P., Yang H., Irmak S., Thorburn J., Burr C., and Cassman K.G. 2011. High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt: II. Irrigation management and crop water productivity. *Field Crops Research* 120: 133-141.
- 22- Greaves E.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.
- 23- Heng L.K., Hsiao T., Evett S., Howell T., and Steduto P. 2009. Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize. *Agronomy Journal* 101: 488-498.
- 24- 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: III. Parameterization and Testing for Maize. *Agronomy Journal* 101: 448-459.
- 25- Jiang Z., Huete A.R., Chen J., Chen Y., Li J., Yan G., and Zhang X. 2006. Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment* 101: 366-378.
- 26- Johnson L.F., and Trout T.J. 2012. Satellite NDVI Assisted Monitoring of Vegetable Crop Evapotranspiration in California's San Joaquin Valley. *Remote Sensing* 4.
- 27- Katerji N., Campi P., and 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.
- 28- Kim D., and Kaluarachchi J. 2015. Validating FAO AquaCrop using Landsat images and regional crop information. *Agricultural Water Management* 149: 143-155.
- 29- Mebane V.J., Day R.L., Hamlett J.M., Watson J.E., and Roth G.W. 2013. Validating the FAO AquaCrop Model for Rainfed Maize in Pennsylvania. *Agronomy Journal* 105: 419-427.
- 30- Mhizha T. 2010. Increase of yield stability by staggering the sowing dates of different varieties of rainfed maize in Zimbabwe.
- 31- Mhizha T., Geerts S., Vanuytrecht E., Makarau A., and Raes D. 2014. Use of the FAO AquaCrop model in developing sowing guidelines for rainfed maize in Zimbabwe. *Water SA* 40: 233-244.
- 32- Nyakudya I.W., and Stroosnijder L. 2014. Effect of rooting depth, plant density and planting date on maize (*Zea mays* L.) yield and water use efficiency in semi-arid Zimbabwe: Modelling with AquaCrop. *Agricultural Water Management* 146: 280-296.
- 33- Paredes P., de Melo-Abreu J.P., Alves I., and 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.
- 34- Pirmoradian N., and Davatgar N. 2019. Simulating the effects of climatic fluctuations on rice irrigation water requirement using AquaCrop. *Agricultural Water Management* 213: 97-106.
- 35- Raes D., Steduto P., Hsiao T.C., and Fereres E. 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agronomy Journal* 101: 438-447.
- 36- Richey A.S., Thomas B.F., Lo M.H., Reager J.T., Famiglietti J.S., Voss K., Swenson S., and Rodell M. 2015. Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. *Water Resources Research* 51: 5217-5238.
- 37- Sandhu R., and Irmak S. 2019. Performance of AquaCrop model in simulating maize growth, yield, and evapotranspiration under rainfed, limited and full irrigation. *Agricultural Water Management* 223: 105687.
- 38- Schewe J., Heinke J., Gerten D., Haddeland I., Arnell N.W., Clark D.B., Dankers R., Eisner S., Fekete B.M., Colón-González F.J., Gosling S.N., Kim H., Liu X., Masaki Y., Portmann F.T., Satoh Y., Stacke T., Tang Q., Wada Y., Wisser D., Albrecht T., Frieler K., Piontek F., Warszawski L., and Kabat P. 2014. Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111: 3245-3250.
- 39- Shrestha N., Raes D., Vanuytrecht E., and Sah S.K. 2013. Cereal yield stabilization in Terai (Nepal) by water and soil fertility management modeling. *Agricultural Water Management* 122: 53-62.
- 40- Steduto P., Hsiao T.C., Fereres E., and Raes D. 2012. "Crop yield response to water," fao Rome.
- 41- Steduto P., Hsiao T. C., Raes D., and Fereres E. 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal* 101: 426-437.
- 42- Tavakoli A.R., Mahdavi Moghadam M., and 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.
- 43- Taylor R. 2014. When wells run dry. *Nature* 516: 179-180.
- 44- Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Saab, M.-T. A., 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.
- 45- Tsakmakis I.D., Kokkos N.P., Gikas G.D., Pisinaras V., Hatzigiannakis E., Arampatzis G., and Sylaios G.K. 2019. Evaluation of AquaCrop model simulations of cotton growth under deficit irrigation with an emphasis on root growth and water extraction patterns. *Agricultural Water Management* 213: 419-432.
- 46- Tsegay, A. 2012. Improving Crop Production by Field Management Strategies Using Crop Water Productivity Modeling: Case Study of Tef (*Eragrostis tef* (Zucc.) Trotter) Production in Tigray, Ethiopia. PhD Manuscript.
- 47- Tsegay A., Raes D., Geerts S., Vanuytrecht E., Abraha B., Deckers J., Bauer H., and Gebrehiwot K. 2012. Unravelling crop water productivity of tef (*Eragrostis tef* (Zucc.) Trotter) through AquaCrop in northern Ethiopia. *Experimental Agriculture* 48: 222-237.
- 48- Van Ittersum M.K., Cassman K.G., Grassini P., Wolf J., Tittonell P., and Hochman Z. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance—A review. *Field Crops Research* 143: 4-17.
- 49- Vanuytrecht E., Raes D., Steduto P., Hsiao T.C., Fereres E., Heng L.K., Garcia Vila M., and Mejias Moreno P. 2014.

- AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environmental Modelling & Software* 62: 351-360.
- 50- Zeleke K.T., Luckett D., and Cowley R. 2011. Calibration and Testing of the FAO AquaCrop Model for Canola. *Agronomy Journal* 103: 1610-1618.
- 51- Zinyengere N., Mhizha T., Mashonjowa E., Chipindu B., Geerts S., and Raes D. 2011. Using seasonal climate forecasts to improve maize production decision support in Zimbabwe. *Agricultural and Forest Meteorology* 151: 1792-1799.

Simulation of Growth and Development of Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under Drought Stress: 1- Simulation of Soil Water Content, Evapotranspiration, and Green Canopy Cover

E. Farrokhi¹- M. Nassiri Mahallati^{2*}- A. Koocheki³- S.A. Beheshti⁴

Received: 05-09-2020

Accepted: 17-05-2021

Introduction: The modeling approach for the simulation of the growth and development of tomatoes in Iran has been overlooked. Calibrated crop simulation models, therefore, are increasingly being used as an alternative means for the rapid assessment of water-limited crop yield over a wide range of environmental and management conditions. AquaCrop is a multi-crop model that simulates the water-limited yield of herbaceous crop types under different biophysical and management conditions. It requires a relatively small number of explicit and mostly intuitive parameters to be defined compared to other crop models and has been validated and applied successfully for multiple crop types across a wide range of environmental and agronomic settings. This study was conducted as a two-year field experiment with the aim of the simulation of soil water content, evapotranspiration, and green canopy cover of tomato using AquaCrop model under different irrigation regimes at two growth stages in Mashhad climate conditions.

Materials and Methods: A field experiment was conducted over two consecutive seasons (2016-2017) in the experimental field of Ferdowsi University of Mashhad, located in Khorasan Razavi province, North East of Iran. The experiment was laid out in a split-plot design with different irrigation regimes at the vegetative and at the reproductive stage as the main and subplot factors, replicated thrice. In total, 27 plots of 4.5×3 m (13.5 m²) were used at a planting density of 2.7 plants per m². Seedlings were planted in a zigzag pattern into twin rows, with a distance of 1.5 m between them, so there were four twin rows of three meters in each plot. The distance between tomato plants within each twin-row was 0.5 meters. A buffer zone spacing of 3 and 1.5 m was provided between the main plots and subplots, respectively. The following experimental factors were studied: three irrigation regimes (100= 100% of water requirement, 75= 75% of water requirement, 50= 50% of water requirement) and two crop growth stages (V= vegetative stage and R= Reproductive stage). The drip irrigation method was used for irrigation. The tomato water requirement was calculated using CROPWAT 8.0 software. The irrigation water was supplied based on total gross irrigation and obtained irrigation schedule of CROPWAT. Model accuracy was evaluated using statistical measures, e.g., R², normalized root means square error (NRMSE), model efficiency (E.F.), and d-Willmott. The 2016 and 2017 measured soil and canopy data sets were used for calibration and validation of the AquaCrop model, respectively.

Results and Discussion: For a water-driven model, such as AquaCrop, it is important to evaluate its effectiveness in simulating soil water content. During calibration (2016), the model simulated the soil water content with good accuracy. The simulated soil water content values were close to the observed values during calibration (2016) for all treatments with R² ranging from 0.90 to 0.97, NRMSE in range of 8.47 to 17.96%, d varying from 0.76 to 0.99, and M.E. ranging from 0.87 to 0.96. Validation results indicated the good performance of the model in simulating soil water content for most of the treatments (0.79<R²<0.99, 10.04%<NRMSE<18.65%, 0.77<ME<0.92).

Appropriate parameterization of canopy cover curve is critical for the model to provide accurate estimates of soil evaporation, crop transpiration, biomass, and yield. In general, the calibration results showed good agreement between simulated and observed data for canopy cover development in all treatments with high R² values (>0.87), good E.F. (>0.61), low estimation errors (RMSE, ranging from only 4.5 to 9.2) and high d values (>0.92).

Conclusion: The AquaCrop model (version 6.1) was calibrated and validated for modeling soil water content, evapotranspiration, and green canopy cover for tomatoes under drought stress conditions. In general, soil water content, evapotranspiration, and green canopy cover of tomato were simulated by AquaCrop model with acceptable accuracy in both calibration and validation stages. However, the model performance was more accurate in no and/or moderate stress conditions than in severe water stress environments. In conclusion, the AquaCrop

1, 2 and 3- Ph.D. Candidate and Professors of Agrotechnology Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: mnassiri@um.ac.ir)

3- Associate Professor, Agriculture and Natural Resources Research Center Khorasan Razavi, Iran

DOI: 10.22067/jsw.2021.15011.0

model could be calibrated to simulate the growth and soil water content of tomatoes under temperate conditions reasonably well and become a very useful tool to support the decision on when and how much irrigate.

For R^2 , values > 0.90 were considered very well, while values between 0.70 and 0.90 were considered good. Values between 0.50 and 0.70 were considered moderately well, while values less than 0.50 were considered poor. Root mean square error ranges from 0 to positive infinity and expresses in the units of the studied variable. An RMSE approaching 0 indicates good model performance.

Keywords: AquaCrop model, CropWat, Deficit irrigation, Modelling, Soil water balance