

## Performance Evaluation of AquaCrop Model in Simulating Basil (*Ocimum basilicum L.*) Growth under Different Soil Fertility Stress in Controlled Greenhouse Conditions

HADISSEH RAHIMIKHOOB<sup>1\*</sup>, TEYMOUR SOHRABI<sup>1</sup>, MOJTABA DELSHAD<sup>2</sup>

1. Irrigation and Reclamation Engineering Department, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2. Horticultural Sciences Department, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

(Received: Oct. 17, 2019- Revised: Nov. 25, 2019- Accepted: Nov. 27, 2019)

### ABSTRACT

The agricultural sector is particularly important in the economic growth and development of different societies. The application of Nitrogen fertilizer is one of the most influential factors in agricultural productivity enhancement. Management and optimum fertilizer consumption based on field or greenhouse experiments are time and cost consuming. Therefore, the application of models that simulate the effects of different fertility stresses on crop production are useful tools in fertilizer planning and optimization. In the AquaCrop model, the crop biomass is simulated using a semi-quantitative method. The purpose of this study was to simulate basil response to different fertilizer treatments and evaluate the semi-quantitative method used in the AquaCrop model. For this purpose, a study was carried out in a research greenhouse of the College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, during two growth periods. Five levels of nitrogen fertilizer application (Urea fertilizer) with three replications was investigated to find out the effect of fertility stress on basil yield. Initially, the semi-quantitative method was calibrated. The calibration results showed that the normalized water productivity coefficient decreased by 41%. Then, the AquaCrop model was validated using statistical measures to estimate biomass and canopy cover. The variation range for R<sup>2</sup>, MBE and RRMSE indices for crop biomass were 0.95-0.98, 1.72-21.56 g m<sup>-2</sup>, 17/42-19.07% and for canopy cover were 0.66-0.78, 6.44-12.86% and 19.66-21.83%, respectively. According to the results, the AquaCrop model and the semi-quantitative method can be used as a suitable tool to simulate crop growth under soil fertility stress conditions.

**Keywords:** AquaCrop model, semi-quantitative method, Basil.

## ارزیابی عملکرد مدل AquaCrop در شبیه‌سازی رشد گیاه ریحان تحت تنش‌های مختلف حاصلخیزی در شرایط کشت کنترل شده گلخانه

حدیثه رحیمی‌خوب<sup>۱\*</sup>، تیمور سهرابی<sup>۱</sup>، مجتبی دلشاد<sup>۲</sup>

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲. گروه علوم باغبانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۷/۲۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۹/۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۹/۶)

### چکیده

بخش کشاورزی در فرآیند رشد و توسعه اقتصادی جوامع مختلف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. کاربرد کودهای نیتروژنی به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تولید و افزایش بهره‌وری محصولات کشاورزی به‌شمار می‌آید. مدیریت و مصرف بهینه کود صرفاً بر اساس آزمایش‌های مزرعه‌ای یا گلخانه‌ای زمان‌بر و هزینه‌بر است. لذا مدل‌هایی که اثرات تنش‌های مختلف حاصلخیزی بر تولید محصول را شبیه‌سازی می‌کنند، ابزارهایی مفید در برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی مصرف کود هستند. در مدل AquaCrop میزان عملکرد محصول تحت تنش کودی توسط روش نیمه‌کمی (Semi-quantitative) شبیه‌سازی می‌شود. هدف از این تحقیق، شبیه‌سازی پاسخ گیاه به تیمارهای مختلف کوددهی و ارزیابی روش نیمه‌کمی در مدل AquaCrop است. بدین منظور، گیاه ریحان در داخل گلخانه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران طی دو دوره کشت شد. بررسی اثر تنش حاصلخیزی در پنج سطح کاربرد کود نیتروژنی (کود اوره) و سه تکرار انجام شد. ابتدا روش نیمه‌کمی مورد واسنجی قرار گرفت. نتایج واسنجی نشان داد، ضریب بهره‌وری آب نرمال شده در اثر تنش حاصلخیزی به میزان ۴۱ درصد کاهش یافت. سپس مدل AquaCrop در تخمین متغیرهای زیست‌توده و پوشش گیاهی با استفاده از شاخص‌های آماری صحت‌سنجی شد. دامنه تغییرات به دست آمده برای شاخص‌های  $R^2$ ، MBE و RRMSE برای متغیر زیست‌توده گیاه به ترتیب برابر با ۰/۹۵-۰/۹۸، ۲۱/۵۶-۱/۷۲ گرم بر مترمربع، ۱۹/۰۷-۱۷/۴۲ درصد و برای پوشش گیاهی به ترتیب برابر با ۰/۷۸-۰/۶۶، ۱۲/۸۶-۶/۴۴ درصد و ۲۱/۸۳-۱۹/۶۶ درصد بود. با توجه به نتایج، از مدل AquaCrop و روش نیمه‌کمی می‌توان به عنوان یک ابزار مناسب جهت شبیه‌سازی رشد گیاه در شرایط تنش حاصلخیزی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: مدل AquaCrop، روش نیمه‌کمی، گیاه ریحان.

### مقدمه

نیتروژن‌دار روی آورده‌اند. پتانسیل بالای آبشویی کودهای نیتروژنی در مزارع، علاوه بر اثرات زیان‌بار زیست‌محیطی، موجب تحمیل هزینه‌های مازاد در فرآیند تولید محصولات کشاورزی می‌شود. با توجه به کمبود منابع آب و ضرورت تأمین امنیت غذایی، مدیریت و بهبود بهره‌وری مصرف کود یک چالش مهم در مطالعات بخش کشاورزی است.

مدل‌های گیاهی ابزار مفیدی در مطالعه اثر پارامترهای مؤثر بر فرآیند رشد گیاه و شناخت مؤلفه‌های مدیریتی به‌شمار می‌آیند (Steduto *et al.*, 2009; Vanuytrecht *et al.*, 2014). با استفاده از این مدل‌ها علاوه بر کاهش نیاز به آزمایش‌های وقت‌گیر و هزینه‌بر می‌توان تأثیر عوامل مختلف طبیعی و محیطی را بر تولید محصول در دراز مدت پیش‌بینی نمود (De Wit *et al.*, 1958). بدین منظور مدل‌های متعددی توسط محققان علم کشاورزی

آب و نیتروژن به‌عنوان مهم‌ترین عناصر و عوامل مؤثر در بهبود بهره‌وری و دستیابی به اهداف توسعه پایدار کشاورزی در دنیا شناخته شده‌اند. متوسط مصرف آب در بخش کشاورزی در مقیاس جهانی در حدود ۷۰ درصد است (Sandhu and Irmak, 2019). مطالعات انجام شده توسط سازمان خواروبار کشاورزی (FAO) بیانگر آن است که با توجه به روند رو به رشد جمعیت تا سال ۲۰۲۵ تولید محصولات کشاورزی به منظور تأمین امنیت غذایی می‌بایست به بیش از ۵۰ درصد افزایش یابد. این در حالی است که تنها ۱۰ درصد افزایش استحصال و مصرف آب در بخش کشاورزی امکان‌پذیر خواهد بود (FAO, 2017). از طرف دیگر در سال‌های اخیر کشاورزان به‌منظور افزایش تولید محصول در واحد سطح، به مصرف بیشتر کودهای شیمیایی به خصوص کودهای

داروسازی، آرایشی و بهداشتی استفاده می‌شود (Singh *et al.*, 2014). در کشت این محصول، بر خلاف گیاهان تک بوته مانند گوجه‌فرنگی و خیار، دستیابی به حداکثر پوشش گیاهی اهمیت بالایی دارد. در این راستا به کاربرد مؤثر کودهای نیتروژنی در جهت افزایش کیفیت و میزان تولید زیست‌توده ریحان توصیه شده است (Adler *et al.*, 1989; Sifola and Barbieri, 2006; Singh *et al.*, 2014). در نتیجه لازم است مدل‌های شبیه‌ساز رشد در شرایط گلخانه برای برآورد میزان تولید زیست‌توده توسعه داده شود تا بتوان اثر سناریوهای مختلف مدیریتی اعم از اهمیت کاربرد کود نیتروژن را بررسی نمود.

به‌طور کلی، در تمام پروژه‌های تحقیقاتی، انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای یا گلخانه‌ای با در نظر گرفتن اثرات متقابل گیاه-خاک-اتمفسفر از اهمیت ویژه‌ای برای ارزیابی گزینه‌های مدیریتی برخوردار هستند. اطلاعات و داده‌هایی که از این آزمایش‌ها حاصل می‌گردد، برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های شبیه‌سازی لازم و ضروری است (Sandhu and Irmak, 2019). علاوه بر این، بررسی مطالعات انجام شده نشان داد، عملکرد مدل AquaCrop در شبیه‌سازی پارامترهای رشد تحت تنش حاصلخیزی در مناطق محدودی در سطح جهان مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نتیجه، با توجه به اینکه عوامل متعددی شامل شرایط اقلیمی، گیاهی و مدیریتی بر عملکرد و تولید محصولات کشاورزی اثر قابل توجهی دارند، لازم است مدل‌های گیاهی برای شرایط مختلف واسنجی شوند. هدف اصلی از این مطالعه، ارزیابی روش نیمه‌کمی مدل AquaCrop در برآورد زیست‌توده گیاه ریحان و بررسی تغییرات پوشش گیاهی طی دوره رشد در شرایط کشت کنترل شده گلخانه است.

### مواد و روش‌ها

این تحقیق در گلخانه پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در کرج با عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه شرقی و با ارتفاع ۱۲۹۲/۹ متر از سطح دریا انجام شد. ابعاد سالن گلخانه مورد مطالعه ۸×۲۰ متر، از نوع چند دهانه‌ای با دیواره‌های شیشه-ای و پوشش سقف از جنس پلی‌کربنات بود. به‌منظور تعدیل درجه حرارت محیط، گلخانه مجهز به سیستم پد و فن خودکار و حرارت مرکزی است. پارامترهای هواشناسی، شامل حداکثر و حداقل دمای روزانه، حداکثر و حداقل رطوبت نسبی و تابش طول موج کوتاه رسیده به داخل گلخانه به صورت روزانه برداشت گردید. سنسور متغیر دما و رطوبت با استفاده از سنسور دیجیتال مدل

توسعه یافته است که از جمله می‌توان به مدل‌های Cropsyst (Jones *et al.*, 1991) EPIC (Steduto *et al.*, 2009) CERES، WOFOST (Ritchie *et al.*, 1985) (Boogard *et al.*, 1998) و AquaCrop (Hsiao *et al.*, 2009; Steduto *et al.*, 2009; Raes *et al.*, 2009) اشاره نمود. دلیل تفاوت کاربرد مدل‌های گیاهی در شبیه‌سازی فرآیند رشد، نوع معادلات به‌کار رفته در ساخت مدل و در تعداد پارامترهای ورودی می‌باشد. به‌طور مثال محوریت مدل Cropsyst در پیش‌بینی عملکرد محصول بر پایه انرژی تابشی و آب استوار بوده و در مدل WOFOST، عملکرد گیاه بر اساس میزان کربن جذب شده توسط برگ‌ها از طریق فرآیند فتوسنتز برآورد می‌شود. در حالی که مدل AquaCrop عملکرد محصول را بر اساس میزان آب مصرفی توسط گیاه (تعرق) و پارامتر بهره‌وری آب محاسبه می‌کند. نتایج تحقیقات مختلف نشان داده است که مدل AquaCrop نسبت به دیگر مدل‌های گیاهی عملکرد بهتری در شبیه‌سازی فرآیند رشد دارد (Todorovic *et al.*, 2009; Amiri *et al.*, 2014; Abi Saab *et al.*, 2015).

یکی دیگر از عوامل اثرگذار بر عملکرد و بهره‌وری آب، کاربرد کود و مواد غذایی مورد نیاز گیاه در زمان و به میزان مناسب است. امروزه کاربرد کودهای نیتروژنی نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش عملکرد بسیاری از محصولات کشاورزی دارد و مقدار نیتروژن کودی مصرف شده، بخش قابل توجهی از تغییرات عملکرد را توجیه می‌کند (Zeinali *et al.*, 2012). در مدل AquaCrop تأثیر میزان کاربرد کود و تنش حاصلخیزی طی روند شبیه‌سازی عملکرد محصول و اثر آن بر پارامترهای رشد به صورت نیمه‌کمی‌آدر نظر گرفته شده است. این روش در نیجریه برای بررسی توانایی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد محصول ذرت دیم تحت تیمارهای مختلف نیتروژن مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد مدل AquaCrop دقت قابل قبولی در تخمین زیست‌توده گیاه در شرایط تنش حاصلخیزی دارد (Akumaga *et al.*, 2017). در مطالعه دیگری در ایران، روش نیمه‌کمی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی پاسخ ذرت به کود نیتروژن مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که مدل مذکور از دقت خوبی در شبیه‌سازی رطوبت ناحیه ریشه و ضریب بهره‌وری آب نرمال شده برخوردار است (Ranjbar *et al.*, 2017).

ریحان از جمله سبزی‌های برگی و معطر از خانواده نعنائیان است. این گیاه یکی از پر مصرف‌ترین نوع سبزی است که در ایران مصرف آن به صورت تازه‌خوری رواج دارد. هم‌چنین از ریحان به دلیل دارا بودن ترکیبات آنتی‌اکسیدان و اسانس در صنایع

می‌دهد، انتخاب شد. نتایج آنالیز خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول (۱) ارائه شده است.

آزمایش‌های گلدانی (قطر و ارتفاع ۲۱ سانتی‌متر) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در دو دوره کشت با پنج تیمار کودی (کود اوره) در سه تکرار انجام شد. اطلاعات دقیق مربوط به تاریخ کاشت و برداشت، نرخ کاربرد کود، تاریخ کوددهی و نمونه‌برداری برای هر دوره کشت در جدول (۲) آورده شده است. میزان توصیه کودی بر اساس نتایج تجزیه خاک (جدول ۱)، ۱۴۰ کیلوگرم بر هکتار بود.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

ذرات تشکیل دهنده خاک	ظرفیت زراعی	نقطه پژمردگی	جرم مخصوص ظاهری	شوری عصاره اشباع	اسیدیته	نیترژن
رس (%)	شن (%)	(درصد وزنی)	(گرم بر سانتی متر مکعب)	(دسی زیمنس بر متر)	(pH)	(%)
۲۰	۳۴	۴۶	۱/۳۳	۱/۴۶	۸/۱	۰/۰۹

جدول (۲) - اطلاعات مربوط به هر دوره کشت گیاه ریحان

دوره کشت	تاریخ کاشت/ برداشت	تیمارهای کودی ( $kg\ h^{-1}$ )	تاریخ کوددهی (روز پس از کاشت)	تاریخ نمونه‌برداری (روز پس از کاشت)
اول	۱۸ اردیبهشت ۱۳۹۷ / ۲۷ خرداد ۱۳۹۷	N0-0	۱۸	۲۱
		N1-50		۲۳
		N2-100	۲۴	۲۶
		N3-120	۳۰	۳۵
دوم	۸ تیر ۱۳۹۷ ۱۵ مرداد ۱۳۹۷	N4-140	۳۰	۳۸
		N0-0	۱۸	۲۲
		N1-50	۲۴	۲۶
		N2-100	۳۰	۳۰
		N3-120	۳۰	۳۴
		N4-140	۳۰	۳۷
				۳۹

وزنی و کاشت گیاه چمن محاسبه شد. برای تعیین میزان زیست-توده کل، نمونه‌های گیاهی (۲۵ عدد بوته) در هفت نوبت از هر پنج تیمار در طول دوره رشد گیاه برداشت شدند. نمونه‌ها پس از برداشت به آزمایشگاه منتقل و در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی-گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک و سپس توزین شدند. درصد پوشش گیاهی در طول دوره رشد با استفاده از روش Patrignani and Ochsner (2015) به دست آمد. در این روش، با تهیه تصویر از سطح پوشش گیاهی و انتقال آن به نرم‌افزار کانوپی، درصد پوشش محاسبه می‌گردد. در آخر داده‌های اندازه‌گیری شده شامل زیست‌توده و پوشش گیاهی توسط آنالیز واریانس (ANOVA) در

بذر گیاه ریحان در عمق ۱ سانتی‌متری از سطح خاک کشت شد. سپس لایه نازکی از کوکوپیت برای جلوگیری از جابه‌جایی بذرها در حین آبیاری، روی سطح خاک ریخته شد. پس از جوانه زدن بذرها با انجام عملیات تنک کاری، تراکم کشت معادل ۲۵ عدد بوته در هر گلدان تثبیت شد. در طول دوره رشد برای جلوگیری از ایجاد تنش رطوبتی، عملیات آبیاری به صورت روزانه انجام شد. میزان آب آبیاری از طریق توزین گلدان‌ها و محاسبه کمبود رطوبت نسبت به حد ظرفیت نگهداری رطوبتی خاک گلدان (Pot Capacity) به دست آمد. میزان تبخیر-تعرق گیاه مرجع نیز با استفاده از روش مستقیم توسط میکرو لایسیمترهای

ضریب  $WP^*$  در طول روند شبیه‌سازی ثابت نخواهد بود و نیاز به واسنجی دارد.

در مدل AquaCrop تخمین دقیق پوشش گیاهی نقش مهمی در روند مدل‌سازی و در نهایت دقت و صحت عملکرد مدل دارد. در این مدل توسعه پوشش گیاهی توسط منحنی رشد پوشش گیاهی بیان می‌شود. شش پارامتر اصلی برای تعیین و ترسیم منحنی پوشش گیاهی شامل ۱- پوشش گیاهی اولیه<sup>۱</sup> ( $CC_0$ )، ۲- ضریب رشد پوشش گیاهی<sup>۲</sup> (CGC)، ۳- حداکثر پوشش گیاهی<sup>۴</sup> ( $CC_x$ )، ۴- ضریب کاهش پوشش گیاهی<sup>۵</sup> (CDC)، ۵- تعداد روزها تا جوانه‌زنی<sup>۶</sup> و ۶- تعداد روزها تا رسیدن به مرحله پیری<sup>۷</sup> وجود دارد (Steduto *et al.*, 2009). با استفاده از ضرایب فوق، پوشش گیاهی در هر مرحله از چرخه رشد گیاه توسط روابط ۳، ۴ و ۵ به دست خواهد آمد.

$$CC = CC_0 \times e^{t \times CGC} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$CC = CC_x - 0.25 \frac{(CC_x)^2}{CC_0} \times e^{-t \times CGC} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$CC = CC_x \left[ 1 - 0.05 \left( e^{\frac{CDC}{CC_x} \times t} - 1 \right) \right] \quad (\text{رابطه ۵})$$

از رابطه (۳) برای محاسبه پوشش گیاهی از ابتدای دوره تا نیمه مرحله توسعه (زمانی که پوشش گیاهی کمتر از نصف پوشش گیاهی حداکثر باشد)، رابطه (۴) از نیمه تا آخر مرحله توسعه (زمانی که پوشش گیاهی بیشتر از نصف پوشش گیاهی حداکثر باشد) و رابطه (۵) از ابتدای مرحله پیری تا آخر دوره کشت استفاده می‌شود. پارامتر  $t$  معرف تعداد روز پس از کاشت است.

چنانچه گیاه تحت تنش‌هایی مثل کم‌آبی، شوری یا حاصلخیزی قرار نداشته باشد، پارامترهای گیاهی کاهش نخواهد یافت و به‌عبارت دیگر توسعه و تولید زیست‌توده در حالت حداکثر و پتانسیل قرار خواهد داشت. اما در شرایطی که رشد گیاه تحت تأثیر تنش حاصلخیزی قرار گیرد، پارامترهای رشد شامل CGC،  $CC_x$  و CDC کاهش یافته که منجر به کاهش میزان عملکرد در واحد سطح محصول خواهد شد. مدل AquaCrop بیان املاح در خاک را به‌طور مستقیم شبیه‌سازی نمی‌کند. بلکه اثر درجات مختلف تنش حاصلخیزی توسط روشی نیمه‌کمی از طریق تعیین تأثیر تنش بر تولید زیست‌توده گیاه مشخص می‌شود (Akumaga *et al.*, 2017). در این رویکرد، پارامتر زیست‌توده نسبی ( $B_{rel}$ ) از طریق محاسبه نسبت کل زیست‌توده تولید شده در شرایط تنش حاصلخیزی ( $B_{stress}$ ) به کل زیست‌توده تولید شده در شرایط بدون تنش

سطح معناداری ۱ درصد با استفاده از نرم‌افزار SPSS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

### توصیف مدل AquaCrop

مدل گیاهی AquaCrop مبتنی بر روابط متقابل بیوفیزیکی در سیستم گیاه-خاک-اتمسفر توسعه داده شده است (Sandhu and Irmak, 2019). با استفاده از این مدل اثرات کمی فاکتورهای مدیریتی و زیست‌محیطی بر بهره‌وری محصولات کشاورزی قابل پیش‌بینی است (Steduto *et al.*, 2009).

معادله اساسی به کار رفته در مدل AquaCrop برای برآورد زیست‌توده گیاه مطابق رابطه (۱) است:

$$B = WP^* \sum_{i=1}^n \frac{Tr_i}{ET_{O_i}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$Tr_i = K_{CTRX} \times CC \times ET_{O_i} \quad (\text{رابطه ۲})$$

در روابط فوق،  $B$  عملکرد زیست‌توده تجمعی (گرم بر متر-مربع)،  $WP^*$  بهره‌وری آب نرمال شده<sup>۱</sup> (گرم بر مترمربع)،  $Tr_i$  تعرق روزانه گیاه (میلی‌متر در روز)،  $ET_{O_i}$  تبخیر-تعرق مرجع (میلی‌متر در روز)،  $n$  تعداد روزهای پس از کشت،  $CC$  ضریب پوشش گیاهی (بدون بعد) و  $K_{CTRX}$  حداکثر ضریب تعرق گیاهی (بدون بعد) می‌باشد.

یکی از مهم‌ترین ضرایب به کار رفته در مدل AquaCrop برای برآورد مقدار زیست‌توده گیاه، ضریب بهره‌وری آب ( $WP$ ) است. این ضریب بیانگر میزان ماده خشک یا بیوماس (بر حسب گرم یا کیلوگرم) تولید شده در واحد سطح (مترمربع یا هکتار) به‌ازای میزان آب تعرق یافته (بر حسب میلی‌متر) است. ضریب  $WP$  بستگی به میزان آب مصرفی توسط گیاه دارد و از آنجا که میزان آب مصرفی توسط گیاه وابسته به شرایط اقلیمی است، در مدل AquaCrop این ضریب با تقسیم آن بر تبخیر-تعرق مرجع ( $ET_0$ ) نرمال شده که آن را بهره‌وری آب نرمال شده می‌نامند. این ضریب مقدار تولید زیست‌توده به‌ازای واحد سطح است که گیاه بدون تنش آبی و محدودیت مواد غذایی رشد می‌کند (Steduto *et al.*, 2007). بر حسب تعریف و مطابق رابطه (۱)، با ترسیم نمودار مجموع تعرق نرمال شده در مقابل زیست‌توده تجمعی و برازش یک رابطه خطی گذرنده از مبدأ مختصات، شیب خط معرف  $WP^*$  است. ضریب  $WP^*$  تحت تأثیر نوع و ژنتیک محصول ( $C_3$  یا  $C_4$ ) و میزان دسترسی به مواد غذایی در طول دوره رشد (کمبود مواد غذایی برابر با  $WP^*$  کمتر) است (Van Gaelen *et al.*, 2015). به‌همین دلیل در شرایط تنش حاصلخیزی تغییرات

5. Canopy Decline Coefficient  
6. Time to emergence  
7. Time to senescence

1. Normalized Water Productivity  
2. Initial Canopy Cover  
3. Canopy Growth Coefficient  
4. Maximum Canopy Cover

(B<sub>ref</sub>) به دست می آید (رابطه ۶) (Van Gaelen *et al.*, 2015).

$$B_{rel} = \frac{B_{stress}}{B_{ref}} \times 100\% \quad (\text{رابطه ۶})$$

در این رابطه، B<sub>rel</sub> زیست توده نسبی (که دامنه تغییرات آن بین صفر به معنای توقف رشد در اثر تنش کودی تا ۱۰۰ درصد به معنای شرایط بدون تنش است)، B<sub>stress</sub> مقدار زیست توده به دست آمده برای تیمار تحت تنش کودی (تن در هکتار)، B<sub>ref</sub> مقدار زیست توده به دست آمده برای تیمار بدون تنش کودی (تن در هکتار) می باشد.

در روش نیمه کمی، شبیه سازی اثر تنش حاصلخیزی بر تولید محصول توسط اعمال چهار ضریب انجام می شود که شامل: الف) ضریب کاهش حداکثر پوشش گیاه (K<sub>sccx</sub>)، ب) ضریب کاهش توسعه پوشش گیاه (K<sub>sexp,f</sub>)، ج) ضریب کاهش بهره وری آب (K<sub>swp</sub>) و د) ضریب کاهش روزانه پوشش گیاه پس از رسیدن به حداکثر میزان آن (f<sub>cdecline</sub>) است (Raes *et al.*, 2012). در مدل AquaCrop طی مرحله واسنجی برای اعمال تنش حاصلخیزی، منحنی های مربوط به چهار ضریب ذکر شده توسط الگوریتم بهینه سازی تکرار ترسیم می شوند. بدین ترتیب اثرات کاهش یافته پارامترهای رشد گیاه تعیین می گردند.

#### واسنجی و صحت سنجی مدل AquaCrop

در این مرحله ابتدا ضریب WP\* برای تیمار N4 که حداکثر تولید زیست توده در واحد سطح را داشت، به دو روش محاسباتی و سعی و خطا محاسبه گردید. در روش محاسباتی مقدار این ضریب با

تخمین پوشش گیاهی توسط روابط (۳)، (۴) و (۵) برای مراحل مختلف رشد و سپس محاسبه تعرق روزانه و در نهایت برآزش رابطه خطی بین تعرق تجمعی نرمال شده و زیست توده گیاه به دست آمد. در روش سعی و خطا با استفاده از مدل AquaCrop ضریب WP\* واسنجی شد. به منظور واسنجی ضریب WP\* پارامترهایی که برای گیاهان از نوع سبزیجات برگی ثابت در نظر گرفته می شوند، تعیین شدند (جدول ۳). همچنین پارامترهای گیاهی و مدیریتی که ثابت نیستند، بر اساس مشاهدات عینی در طول دوره کشت تغییر داده شدند (جدول ۴). سپس ضریب WP\* در مدل AquaCrop به روش سعی و خطا تا جایی تغییر داده شد که نتایج شبیه سازی (زیست توده) کمترین خطا را نسبت به مقادیر مشاهداتی داشته باشد.

پس از واسنجی ضریب WP\* به هر دو روش محاسباتی و سعی و خطا، پاسخ گیاه نسبت به تنش حاصلخیزی با استفاده از روش نیمه کمی شبیه سازی شد. برای محاسبه زیست توده نسبی ابتدا از بین تیمارهای کودی اعمال شده، تیمار N4 در دوره اول کشت که تحت تنش قرار نداشت به عنوان تیمار مبنا (reference) و تیمار N0 به عنوان تیمار تحت تنش (stress) در نظر گرفته شدند. بدین ترتیب مقادیر داده های ورودی مورد نیاز برای واسنجی بخش حاصلخیزی مدل برای زیست توده نسبی، حداکثر پوشش گیاه در شرایط بیشترین تنش کودی و نرخ کاهش پوشش گیاهی به ترتیب برابر با ۴۹ درصد، ۵۰ درصد و متوسط (medium) تعیین شدند.

جدول ۳- پارامترهای ثابت (Conservative) مدل AquaCrop برای گیاه ریحان

علامت	شرح	مقدار	واحد
Tbase	دمای پایه رشد	۴	°C
Tupper	دمای بالا	۴۰	°C
CC <sub>0</sub>	پوشش گیاهی همزمان با ظهور جوانه ۹۰٪ از بذرها	۱	cm <sup>2</sup> /plant
CGC	ضریب رشد پوشش	۲۱/۲	% day <sup>-1</sup>
K <sub>ctr,x</sub>	ضریب گیاهی در دوره رشد کامل قبل از شروع پیری	۰/۹۷	-
CDC	ضریب کاهش پوشش	۱۳/۹	% day <sup>-1</sup>
pexp,lower	آستانه تخلیه آب خاک برای گسترش تاج پوشش - سطح آستانه بالا	۰/۲۰	-
pexp,upper	آستانه تخلیه آب خاک برای گسترش تاج پوشش - سطح آستانه پایین	۰/۵۵	-
-	عامل شکل برای ضریب تنش آبی رشد گیاه	۳/۰	-
Psto	آستانه تخلیه آب خاک برای کنترل روزنه گیاه - سطح آستانه بالا	۰/۵۵	-
-	عامل شکل ضریب تنش آب برای کنترل روزنه	۳/۰	-
Psen	آستانه تخلیه آب خاک برای پیری تاج پوشش - سطح آستانه بالا	۰/۵۵	-
-	عامل شکل ضریب تنش آب برای پیری تاج پوشش	۳/۰	-

جدول ۴- پارامترهای گیاهی غیر ثابت (Non-Conservative) برای گیاه ریحان بر اساس مشاهدات عینی برای تیمار N4 در کشت اول

پارامتر	مقدار	واحد
زمان جوانه زنی	۴	روز پس از کاشت
حداکثر پوشش گیاهی	۹۶	درصد
زمان رسیدن به حداکثر پوشش گیاهی	۲۸	روز پس از کاشت
زمان شروع دوره پیری	۳۷	روز پس از کاشت
زمان برداشت	۴۱	روز پس از کاشت
تراکم کشت	۷۳۵	بوته در مترمربع
حداقل عمق مؤثر ریشه	۰/۱	متر
حداکثر عمق مؤثر ریشه	۰/۲۱	متر

در آخر، صحت‌سنجی عملکرد مدل با استفاده از داده‌های باقیمانده در کشت اول (شامل تیمارهای N1، N2 و N3) و نیز داده‌های کشت دوم شامل مقادیر زیست‌توده و پوشش گیاهی انجام گرفت. شاخص‌های آماری مورد استفاده برای ارزیابی دقت مدل در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی شامل ضریب تبیین ( $R^2$ )، میانگین خطای اریب (MBE) و ریشه میانگین مربعات خطای نسبی (RRMSE) بودند. شاخص  $R^2$  بیان‌کننده میزان پراکندگی متغیر وابسته نسبت به خط رگرسیون است. مقادیر بالای این شاخص بیان‌کننده‌ی تطابق کامل روش محاسباتی با شرایط واقعی است. شاخص MBE با مقایسه اختلاف بین مقادیر پیش-بینی شده توسط مدل و مقادیر واقعی، بیش‌برآورد یا کم برآورد بودن هر روش را با همان واحد و مقیاس متغیر مورد بررسی نشان می‌دهد (Muniandy *et al.*, 2016). شاخص RRMSE نسبت شاخص RMSE به میانگین مقادیر مشاهده شده است که به صورت درصد بیان می‌شود. مقادیر RRMSE کمتر از ۱۰ درصد نشان‌دهنده عملکرد عالی مدل، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد عملکرد خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد عملکرد متوسط و بالای ۳۰ درصد بیانگر عملکرد ضعیف مدل است (Jamieson *et al.*, 1991).

در رابطه فوق،  $S_{V_i}$  ضریب حساسیت،  $V_i$  متغیر مورد بررسی (در این تحقیق ضریب  $WP^*$ ) و  $y$  خروجی مدل (در این تحقیق عملکرد محصول) است. مطابق رابطه (۷)، ضریب حساسیت از حاصل ضرب تغییرات ضریب  $WP^*$  نسبت به تغییرات عملکرد محصول در مقدار اصلی ضریب  $WP^*$  به عملکرد ریحان محاسبه شد.

### نتایج و بحث

**واسنجی و آنالیز حساسیت ضریب بهره‌وری آب نرمال شده**  
 ضریب  $WP^*$  برای تیمار N4 در کشت اول با استفاده از روش محاسباتی و روش سعی و خطا به ترتیب برابر با ۲۱/۹۲ و ۱۸/۱۰ گرم بر مترمربع به دست آمد (شکل ۱-الف). در پیش‌فرض مدل AquaCrop دامنه تغییرات ضریب  $WP^*$  برای گیاهان سه کرینه شامل سبزی‌ها بین ۱۵ تا ۲۰ گرم بر مترمربع در نظر گرفته شده است (Steduto *et al.*, 2009). با توجه به اینکه آزمایش انجام شده در این تحقیق در محیط کنترل شده گلخانه انجام گرفته بود، میزان ضریب بهره‌وری آب به دست آمده، نزدیک به حد بالای دامنه تغییرات آن است. البته لازم به ذکر است که ضریب به دست آمده با استفاده از روش محاسباتی خارج از این دامنه بوده که نشان‌دهنده خطای این روش نسبت به روش سعی و خطا (مدل AquaCrop) است (شکل ۱-ب).

در آخر، صحت‌سنجی عملکرد مدل با استفاده از داده‌های باقیمانده در کشت اول (شامل تیمارهای N1، N2 و N3) و نیز داده‌های کشت دوم شامل مقادیر زیست‌توده و پوشش گیاهی انجام گرفت. شاخص‌های آماری مورد استفاده برای ارزیابی دقت مدل در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی شامل ضریب تبیین ( $R^2$ )، میانگین خطای اریب (MBE) و ریشه میانگین مربعات خطای نسبی (RRMSE) بودند. شاخص  $R^2$  بیان‌کننده میزان پراکندگی متغیر وابسته نسبت به خط رگرسیون است. مقادیر بالای این شاخص بیان‌کننده‌ی تطابق کامل روش محاسباتی با شرایط واقعی است. شاخص MBE با مقایسه اختلاف بین مقادیر پیش-بینی شده توسط مدل و مقادیر واقعی، بیش‌برآورد یا کم برآورد بودن هر روش را با همان واحد و مقیاس متغیر مورد بررسی نشان می‌دهد (Muniandy *et al.*, 2016). شاخص RRMSE نسبت شاخص RMSE به میانگین مقادیر مشاهده شده است که به صورت درصد بیان می‌شود. مقادیر RRMSE کمتر از ۱۰ درصد نشان‌دهنده عملکرد عالی مدل، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد عملکرد خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد عملکرد متوسط و بالای ۳۰ درصد بیانگر عملکرد ضعیف مدل است (Jamieson *et al.*, 1991).

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad \text{(رابطه ۷)}$$

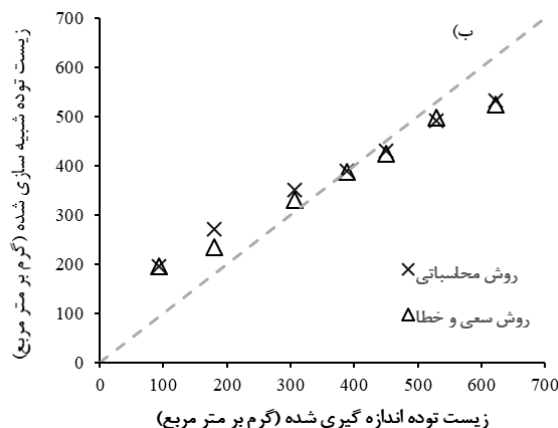
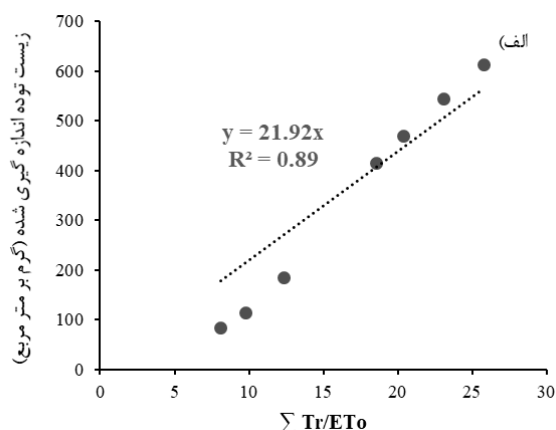
$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{N} \quad \text{(رابطه ۸)}$$

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{N}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad \text{(رابطه ۹)}$$

در معادلات فوق N بیانگر تعداد داده‌ها،  $P_i$  مقادیر شبیه‌سازی شده،  $O_i$  مقادیر واقعی،  $\bar{O}$  میانگین مقادیر مشاهده شده است.

### آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت یک روش مفهومی برای نشان دادن عدم قطعیت



شکل ۱- الف- نمودار تعیین ضریب بهره وری آب نرمال شده به روش محاسباتی برای تیمار N4 ب- نمودار مقایسه دو روش محاسباتی و سعی و خطا در برآورد  $WP^*$

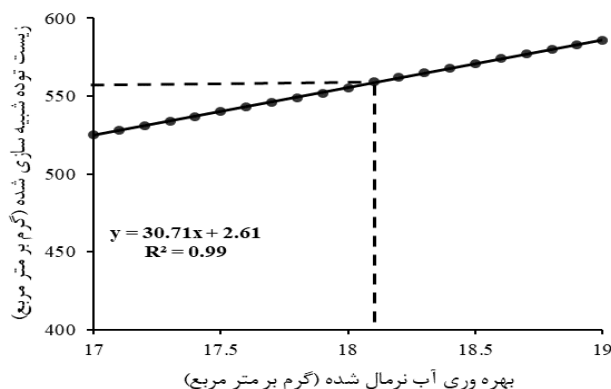
معادله بین نقاط برازش داده شد. ضریب حساسیت متغیر  $WP^*$  از حاصل ضرب شیب معادله در نقطه  $WP^*$  واسنجی شده (۱/۱۸) گرم بر متر مربع) در نسبت مقدار واسنجی شده ضریب  $WP^*$  به عملکرد محصول محاسبه شد (شکل ۲). ضریب حساسیت خروجی مدل AquaCrop به تغییرات ضریب  $WP^*$  برابر با ۰/۹۹ به دست آمد. این مقدار بیانگر حساسیت بالای مدل به تغییرات ضریب  $WP^*$  است. مثبت بودن ضریب حساسیت نشان دهنده آن است که با افزایش خطای متغیر ورودی، متغیر خروجی بیش تر از مقدار واقعی تخمین زده خواهد شد یا به عبارت دیگر مدل دارای خطای بیش برآورد است. نتیجه مشابه در تحقیق Geerts et al. (2009) در مورد حساسیت مدل AquaCrop به تغییرات ضریب  $WP^*$  گزارش شده است.

پس از مرحله واسنجی ضریب  $WP^*$ ، صحت و دقت آن با استفاده از داده‌های دوره دوم کشت توسط شاخص‌های آماری برای هر دو روش مورد مقایسه قرار گرفت. همانطور که در جدول (۵) آورده شده است، می‌توان نتیجه گرفت روش سعی و خطا از دقت بیشتری نسبت به روش محاسباتی در تخمین زیست‌توده گیاه برای تیمار N4 برخوردار است.

برای تعیین میزان حساسیت خروجی مدل به تغییرات ضریب  $WP^*$  از رابطه (۱۰) استفاده شد. بدین منظور ابتدا دامنه‌ی تغییرات متغیر  $WP^*$  بین ۱۷ تا ۱۹ گرم بر مترمربع با نرخ تغییر ۰/۱ در نظر گرفته شد. سپس مقادیر عملکرد محصول ریحان متناظر با مقادیر  $WP^*$  توسط مدل AquaCrop شبیه‌سازی شد. پراکنش متغیر ورودی در مقابل متغیر خروجی ترسیم و بهترین

جدول ۵- مقایسه شاخص‌های آماری در برآورد ضریب بهره‌وری تیمار N4 به دو روش محاسباتی و سعی و خطا

شاخص	روش محاسباتی	روش سعی و خطا
$R^2$	۰/۹۹	۰/۹۹
MBE (gr m <sup>-2</sup> )	۱۲/۷۸	۹/۴۵
RRMSE (%)	۱۸/۰۲	۱۷/۴۲



شکل ۲- اثر تغییر ضریب بهره‌وری آب نرمال شده روی نتایج شبیه‌سازی عملکرد زیست‌توده در مدل AquaCrop



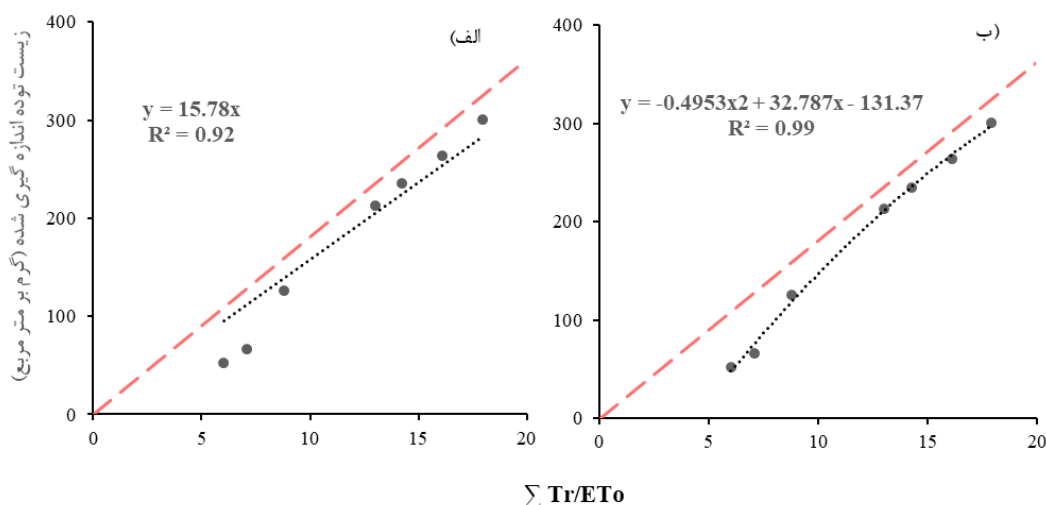
با توجه به شکل (۳-الف)، در صورتی که ضریب  $WP^*$  از طریق رگرسیون خطی محاسبه شود، میزان آن برابر با  $15/78$  گرم بر متر مربع است. ضریب به دست آمده از این روش در طول دوره رشد ثابت فرض خواهد شد. در حالی که در اثر تنش حاصلخیزی، تغییرات آن خطی نخواهد بود. به همین دلیل استفاده از روش نیمه کمی (مدل AquaCrop) در شبیه سازی اثر تنش حاصلخیزی به واقعیت نزدیک تر است.

نتایج واسنجی به روش نیمه کمی نشان داد که ضریب  $WP^*$  برای گیاه ریحان تحت تنش کود نیتروژن به میزان ۴۱ درصد کاهش یافته است. در دیگر تحقیقات انجام شده مقدار کاهش ضریب  $WP^*$  در اثر تنش حاصلخیزی برای گیاه تف، ذرت، گندم و کوینوا در اتیوپی به ترتیب برابر با ۱۹، ۳۱، ۵۰ و ۱۹ درصد (Van Gaelen *et al.*, 2015)، برای ذرت در آفریقا ۵۳ درصد (Akumaga *et al.*, 2017) و برای ذرت در پاکدشت ۵۶ (Ranjbar *et al.*, 2017) درصد گزارش شده است. می توان نتیجه گرفت میزان کاهش ضریب  $WP^*$  بستگی به نوع گیاه و اقلیم منطقه مورد مطالعه دارد.

بررسی اثر تنش حاصلخیزی بر ضریب بهره وری آب نرمال شده پس از واسنجی ضریب  $WP^*$  برای تیمار N4، اثر تنش حاصلخیزی بر تولید محصول توسط روش محاسباتی (رگرسیون خطی) و نیمه کمی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور تیمارهای N0 و N4 از کشت دوره اول انتخاب شدند و واسنجی مدل AquaCrop بر اساس داده های این دو تیمار انجام شد. نتایج تاثیر تنش حاصلخیزی بر پارامترهای رشد برای هر دو روش در جدول (۶) آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود میزان کاهش پارامترهای رشد به جز ضریب  $WP^*$  برای هر دو روش یکسان است. به عبارت دیگر ضریب کاهش  $K_{SWP}$  در روش نیمه کمی بیشتر از روش محاسباتی است. علت این پدیده مربوط به روند محاسبه ضریب  $WP^*$  در روش محاسباتی است.

جدول ۶- اثر تنش حاصلخیزی بر ضرایب گیاهی

شرح	روش محاسباتی	روش نیمه کمی
میزان کاهش ضریب CGC (%)	۲۹	۲۹
میزان کاهش $CC_x$ (%)	۴۸	۴۸
میزان کاهش ضریب CDC ( $\text{day}^{-1}$ )	۰/۷۷	۰/۷۷
میزان کاهش ضریب $WP^*$ (%)	۲۸	۴۱



شکل ۳-الف- مقایسه ضریب  $WP^*$  در کشت اول برای تیمار N0 توسط رگرسیون خطی (ب) توسط رگرسیون غیرخطی (خط قرمز رنگ معرف شاخص  $WP^*$  در حالت پتانسیل و بدون تنش حاصلخیزی است ( $y=18.1x$ ))

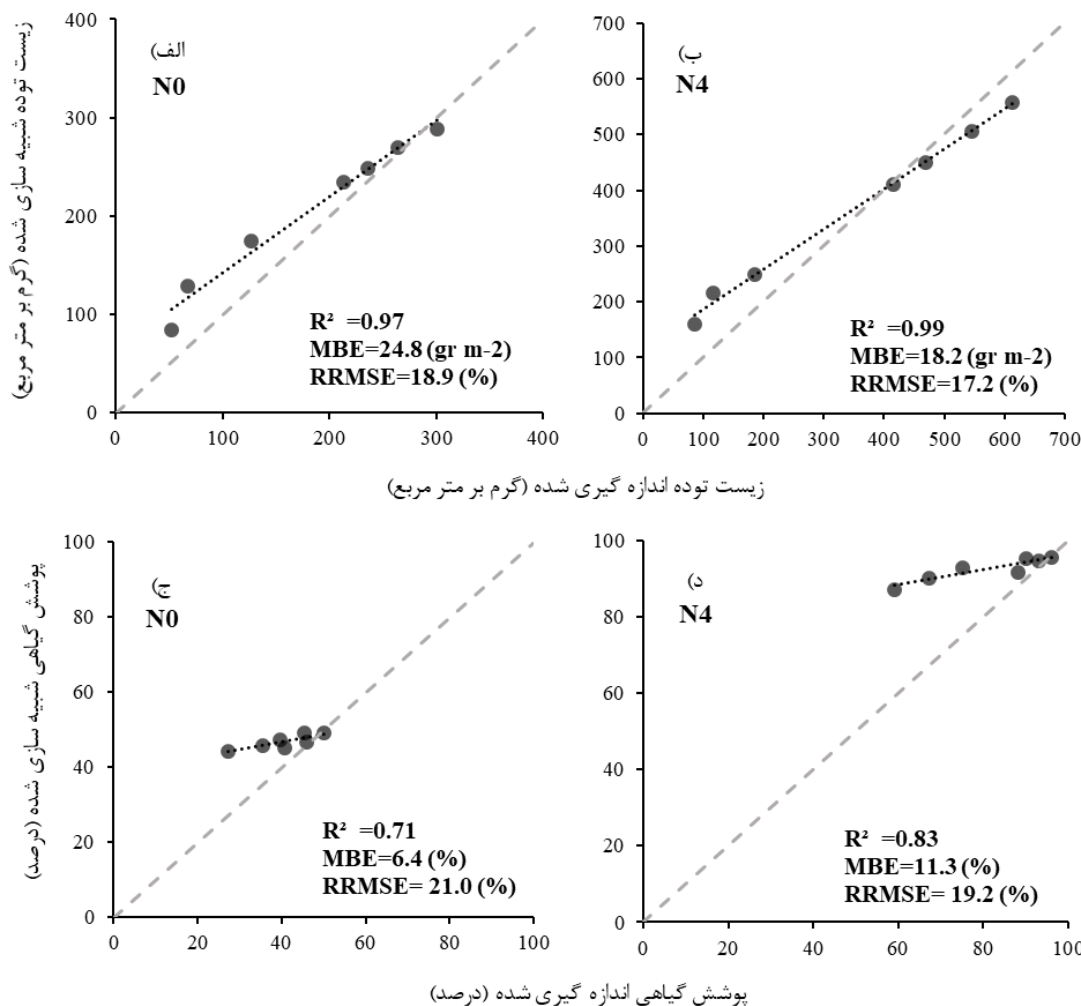
$R^2$ ، MBE و RRMSE به ترتیب برابر با ۰/۷۱، ۶/۴ درصد و ۲۱/۰ درصد بود.

شاخص های آماری برای تیمار N4 در دوره کشت اول نیز محاسبه شدند. نتایج نشان دهنده مقادیر  $R^2$ ، MBE و RRMSE به ترتیب برابر با ۰/۹۹، ۱۸/۲ گرم بر متر مربع و ۱۷/۲ درصد در شبیه سازی زیست توده و ۰/۸۳، ۱۱/۳ درصد و ۱۹/۲ درصد در شبیه سازی پوشش گیاهی است (شکل ۴-ب و د). با توجه به

صحت عملکرد روش نیمه کمی برای تیمار تحت تنش (N0) با استفاده از شاخص های آماری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دهنده عملکرد مناسب مدل با  $R^2$ ، MBE و RRMSE به ترتیب برابر با ۰/۹۷، ۲۴/۸ گرم بر متر مربع و ۱۸/۹ درصد در شبیه سازی زیست توده گیاه است (شکل ۴-الف). علاوه بر آن، مقادیر پوشش گیاهی در طول دوره رشد نیز مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۴-ج). نتایج به دست آمده برای شاخص های آماری

(2017). از مقایسه شاخص‌های آماری به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت، دقت مدل در شبیه‌سازی زیست‌توده و پوشش گیاهی برای تیمار N4 بیشتر از N0 است.

شاخص MBE، عملکرد مدل در تخمین زیست‌توده و پوشش گیاهی برای هر دو تیمار دارای خطای بیش‌برآورد است. عملکرد مشابه برای دو متغیر زیست‌توده و پوشش گیاهی ذرت تحت تنش نیتروژن در آفریقا نیز گزارش شده است (Akumaga et al.,).



شکل ۴- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده زیست توده و پوشش گیاهی برای تیمار N0 (الف و ج) و N4 (ب و د) در کشت اول

مقادیر شاخص MBE نشان می‌دهد مدل در برآورد هر دو متغیر زیست‌توده و پوشش گیاهی خطای بیش برآورد دارد. علت بیش برآورد بودن مدل نسبت به شرایط واقعی مربوط به ساختار مدل AquaCrop است. زیرا این مدل تغییرات زمانی و دفعات کاربرد کود را در روند شبیه‌سازی در نظر نمی‌گیرد. در صورتی که زمان کاربرد کود می‌تواند اثر قابل توجهی بر عملکرد محصول داشته باشد (Akumaga et al., 2017).

دامنه تغییرات مقادیر شاخص RRMSE برای زیست توده و پوشش گیاهی نیز به ترتیب در بازه ۱۷/۴۲ تا ۱۹/۰۷ و ۱۹/۶۶ تا ۲۱/۸۳ درصد قرار دارد. با توجه به دامنه مقادیر ذکر شده، عملکرد مدل در تخمین متغیر پوشش گیاهی نسبت به زیست-توده، بیشتر تحت تأثیر تنش حاصلخیزی قرار می‌گیرد. ولی به‌طور کلی، با افزایش تنش حاصلخیزی، دقت مدل در شبیه‌سازی هر

#### صحت‌سنجی مدل

نتایج صحت‌سنجی مدل توسط شاخص‌های آماری در جدول (۷) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، شاخص آماری R<sup>2</sup> برای شبیه‌سازی زیست‌توده و پوشش گیاهی به ترتیب در محدوده ۹۵ تا ۹۸ درصد و ۶۶ تا ۷۸ درصد قرار دارد. مقایسه این شاخص بین دو متغیر زیست‌توده و پوشش گیاهی نشان می‌دهد، مدل در تخمین مقادیر زیست‌توده تطابق بیشتری با شرایط واقعی دارد. نتیجه مشابه در برآورد زیست‌توده و پوشش گیاهی توسط مدل AquaCrop تحت تنش حاصلخیزی برای گیاهان تف، ذرت، گندم و کوینوا (Van Gaelen et al., 2015) و در شرایط کم آبیاری برای ذرت (Greaves et al., 2016) نیز به‌دست آمده است. آن‌ها نشان دادند، مدل AquaCrop مقادیر زیست‌توده را با دقت بیشتری در مقایسه با پوشش گیاهی شبیه‌سازی کرده است.

گیاه نیز می‌باشد. زیرا تنش حاصلخیزی از طریق افزایش مقاومت در برابر رشد پوشش گیاهی، منجر به کاهش حداکثر ضریب تعرق گیاهی ( $K_{cTrx}$ ) و در نتیجه تعرق گیاه می‌شود. به همین علت پیشنهاد می‌شود در مطالعات بررسی اثر تنش حاصلخیزی بر رشد گیاه، متغیر تعرق به طور مستقیم اندازه‌گیری گردد.

دو متغیر کاهش یافته است. نتیجه مشابه در ارزیابی اثر تنش کودی بر رشد گیاه ذرت در منطقه پاکدشت گزارش شده است (Ranjbar et al., 2017).

خطای شبیه‌سازی زیست‌توده گیاه نه‌تنها به دقت شبیه‌سازی متغیر پوشش گیاهی بستگی دارد، بلکه تحت تأثیر تعرق

جدول ۷- نتایج صحت‌سنجی متغیرهای زیست‌توده و پوشش گیاهی

کشت دوره دوم					کشت دوره اول			شاخص آماری	متغیر
N4	N3	N2	N1	N0	N3	N2	N1		
۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۷	R <sup>2</sup>	زیست توده
۹/۴۵	۷/۳۹	۱/۷۲	۴/۱۲	۵/۵۲	۲۱/۵۶	۱۷/۴۹	۱۲/۱۲	MBE (gr m <sup>-2</sup> )	
۱۷/۴۲	۱۸/۴۶	۱۸/۶۰	۱۹/۰۱	۱۹/۰۷	۱۷/۹۰	۱۸/۲۴	۱۸/۸۱	RRMSE (%)	
۰/۷۵	۰/۷۳	۰/۶۹	۰/۶۸	۰/۶۶	۰/۷۸	۰/۷۸	۰/۷۷	R <sup>2</sup>	پوشش گیاهی
۱۲/۸۶	۱۱/۵۳	۱۰/۰۴	۸/۳۸	۶/۴۴	۱۱/۵۷	۸/۸۷	۸/۰۷	MBE (%)	
۲۰/۰۱	۲۰/۲۲	۲۰/۷۴	۲۱/۰۰	۲۱/۸۳	۱۹/۶۶	۱۹/۷۶	۲۰/۳۶	RRMSE (%)	

#### حداقل گردد.

سپس اثر تنش حاصلخیزی توسط روش نیمه‌کمی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج واسنجی نشان داد ضریب بهره‌وری آب نرمال شده در اثر تنش کودی، ۴۱ درصد کاهش می‌یابد. در آخر صحت‌سنجی مدل با داده‌های باقیمانده از دوره اول و داده‌های دوره دوم کشت انجام شد. بررسی شاخص‌های آماری به‌دست آمده برای دو متغیر زیست‌توده و پوشش گیاهی نشان‌دهنده کارایی بالای مدل در شبیه‌سازی پاسخ گیاه به تنش حاصلخیزی بود. در نتیجه می‌توان از مدل AquaCrop به عنوان ابزاری مناسب برای مطالعه اثر مدیریت کود بر تولید محصول استفاده نمود.

#### سپاسگزاری

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی (شماره ۹۶۰۱۳۰۷۳) با حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور اجرا گردیده است و نویسندگان از مساعدت‌های آنان تقدیر می‌نمایند.

#### REFERENCES

Abi Saab, M.T., Todorovich, M., Albrizio, R. (2015). Comparing AquaCrop and CropSyst models in simulating barley growth and yield under different water and nitrogen regimes. Does calibration year influence the performance of crop growth models? *Agric Water Manag.* 147:21-33

Adler, P.R., Simon, J.E., Wilcox, G.E. (1989). Nitrogen form alters basil growth and essential oil content and composition. *Hort Sci.* 24: 789-790.

Akumaga, U., Tarhule, A. and Yusuf, A.A. (2017). Validation and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer

#### نتیجه‌گیری

مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاهان برای پیش‌بینی عملکرد محصول و بررسی اثر سناریوهای مختلف مدیریتی کاربرد زیادی دارند. در این تحقیق روش نیمه‌کمی مدل AquaCrop در تخمین پارامترهای رشد گیاه ریحان تحت تنش حاصلخیزی مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفت. ابتدا ضریب بهره‌وری آب نرمال شده به عنوان یکی از اثرگذارترین ضرایب در شبیه‌سازی رشد گیاه توسط دو روش محاسباتی و سعی و خطا واسنجی شد. نتایج صحت‌سنجی برای این ضریب نشان داد، روش سعی و خطا دقت بیشتری نسبت به روش محاسباتی دارد. همچنین آنالیز حساسیت متغیر بهره‌وری آب نرمال شده بر خروجی مدل AquaCrop انجام شد. مقدار ضریب حساسیت به دست آمده نشان داد تغییرات متغیر بهره‌وری آب نرمال شده اثر قابل توجهی بر میزان زیست‌توده شبیه‌سازی شده دارد. در نتیجه این متغیر می‌بایست با دقت بالا واسنجی شود تا خطای شبیه‌سازی

on rainfed maize in Nigeria, West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology.* 232: 225-234.

Amiri, E., Rezaei, M., Eyshi Rezaei, E., Bannayan, M. (2014) Evaluation of Ceres-rice, AquaCrop and Oryza2000 models in simulation of rice yield response to different irrigation and nitrogen management strategies. *J Plant Nutr* 37:1749-1769.

Beven, K. A. (1979) Sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. *J. Hydrol.* 44: 169-190.

- Boogard, H.L., C.A. van Diepen, R.P. Rotter, J.M.C.A. Cabrera, and H.H. van Laar. (1998). User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5. Tech. Doc. 52. DLOWin and Staring Centre, Wageningen, the Netherlands.
- De Wit, C.T. (1958). Transpiration and crop yields. Agric. Res. Rep. 64.6. PUDOC, Wageningen, the Netherlands.
- FAO, 2017. The future of food and agriculture – Trends and challenges. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- 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. *Agron. J.* 101:499–508.
- Greaves, Geneille E., Wang and Yu-Min, (2016). Assessment of FAO AquaCrop model for simulating maize growth and productivity under deficit irrigation in a tropical environment. *Water* 8 (557). doi:10.3390/w8120557
- 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(3): 448–459.
- Jamieson, P. D., Porter, J. R. and Wilson, D. R. (1991). A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research*. 27(4): 337-350.
- Jones, C.A., P.T. Dyke, J.R. Williams, J.R. Kiniry, C.A. Benson, and R.H. Griggs. (1991). EPIC: An operational model for evaluation of agricultural sustainability. *Agric Syst*. 37:341–350.
- Muniandy, J.M., Yusop, Z. and Askari, M. (2016). Evaluation of reference evapotranspiration models and determination of crop coefficient for *Momordica charantia* and *Capsicum annum*. *Agric Water Manage*. 169: 77–89.
- Patrignani, A. and Ochsner, T.E. (2015). Canopeo: A Powerful New Tool for Measuring Fractional Green Canopy Cover. *Agronomy Journal*. 107(6): 2312-2320.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C. and Fereres, E. (2012). AquaCrop Reference Manual, AquaCrop version 4.0. Rome, Italy: FAO.
- 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(3): 438–447.
- Ranjbar, A., Rahimikhoob, A. and Ebrahimiyan, H. (2017). Evaluating Semi-Quantitative Approach of the AquaCrop Model for Simulating Maize Response to Nitrogen Fertilizer. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 11(2), 286-298. (In Farsi)
- Ritchie, J.T., D.C. Godwin, and S. Otter-Nacke. (1985). CERES-Wheat: A simulation model of wheat growth and development. Texas A&M Univ. Press, College Station.
- 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. 10.1016/j.agwat.2019.105687.
- Sifola, M.I. and Barbieri, G. (2006). Growth, yield and essential oil content of three cultivars of basil grown under different levels of nitrogen in the field. *Sci. Hortic*. 108, 408–413. doi:10.1016/j.scienta.2006.02.002
- Singh, K., Chand, S. and Yaseen, M. (2014). Integrated nutrient management in Indian basil (*Ocimum basilicum*). *Ind. Crops Prod*. 55: 225–229.
- 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(3): 426-437.
- Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Abi Saab, M., Stwckle, C. and Steduto, P. (2009). Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agron. J.* 101: 509–521.
- Van Gaelen, H., Tsegay, A., Delbecque, N., Shrestha, N., Garcia, M., Fajardo, H., Miranda, R., Vanuytrecht, E., Abrha, B., Diels, J. and Raes, D. (2015). A semi-quantitative approach for modelling crop response to soil fertility: evaluation of the Aquacrop procedure. *Journal of Agricultural Science*. 153(7): 1218-1233.
- Vanuytrecht, E., Raes, D. and Willems, P. (2014). Global sensitivity analysis of yield output from the water productivity model. *Environ Model Softw*. 51: 232-332.
- Zeinali, E., Soltani, A., Galeshi, S. and Movahedi Naeni, S.A. (2012). Evaluating Nitrogen Nutrition Index of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Fields in Gorgan. *J. of Plant Production*. 19(4). (In farsi).