

Performance Evaluation of the AquaCrop Semi-quantitative Method for Prediction of Radish Growth under Different Levels of Nitrogen Fertilizer

PARISA ATA EI¹, ALI RAHIMIKHOOB^{2*}, MOSTAFA ARAB³

1. Master Science Student, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran, Pakdasht, Iran.
 2. Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran, Pakdasht, Iran.
 3. Assistance Professor, Department of Horticulture, Aburaihan Campus, University of Tehran, Pakdasht, Iran.
- (Received: Nov. 30, 2018- Revised: Feb. 15, 2019- Accepted: Feb. 17, 2019)

ABSTRACT

In this research, the performance of semi-quantitative method in AquaCrop model for prediction of biomass and vegetation under various nitrogen fertilizer managements was evaluated by comparing the simulated parameters with the measured results in the greenhouse. The radish cherrybel cultivar was cultivated in the greenhouse of Pardis Aburaihan, University of Tehran without thermal and water stress during two periods (February 2018 and April 2018). The experiment was conducted as a randomized complete block design with different treatments such as zero fertilizer as control (N0), 50 (N1), 100 (N2), 150 (N3), 200 (N4), 250 kg nitrogen per hectare (N5), using Urea fertilizer with three replications. N0 and N3 treatment data of the first cultivation period were used for calibration and the other data were applied for model validation. Relative Root Mean Square Error (RRMSE), Determination Coefficient (R^2) and Mean Bios Error (MBE) were used to evaluate the performance of model. The values of these parameters (RRMSE, R^2 and MBE) for biomass simulation were 11.12%, 0.973, 0.032 ton.ha⁻¹, respectively for N0 and 10.32%, 0.975, and -0.002 ton.ha⁻¹, respectively for N3 in the calibration step. These parameters for canopy cover simulation were 15.93%, 0.884 and 4.30%, respectively for N0 and 12.84%, 0.916 and 5.94%, respectively for N3 in the calibration step. Also, in the validation step, the range of changes in these parameters for biomass simulation were 13.7-25.7%, 0.923-0.988, -0.110-0.118 ton.ha⁻¹ and for canopy cover simulation were 19-25.4%, 0.768-0.867, 5.7-10.18%, respectively. Based on the results, AquaCrop model simulated the biomass and canopy cover precisely under different levels of nitrogen fertilizer and during the growing period.

Keywords: AquaCrop, Nitrogen, Radish, Semi-quantitative method.

ارزیابی کارایی روش نیمه کمی مدل AquaCrop برای پیش بینی رشد تربچه با سطوح مختلف کود نیتروژن

پریسا عطایی^۱، علی رحیمی خوب^۲، مصطفی عرب^۳

۱. دانشجوی ارشد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران

۲. استاد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران

۳. استادیار گروه علوم باغبانی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۹/۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۱/۲۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۱۱/۲۸)

چکیده

در این پژوهش کارایی روش نیمه کمی (Semi-quantitative) در مدل شبیه سازی رشد گیاه (AquaCrop) برای پیش بینی زیست توده و پوشش گیاهی تحت مدیریت های مختلف کود نیتروژن از طریق مقایسه پارامترهای شبیه سازی شده با نتایج اندازه گیری در گلخانه ارزیابی گردید. گیاه تربچه رقم چریبل (cherrybel) طی دو دوره (بهمن ماه ۱۳۹۶ و فروردین ۱۳۹۷) در گلخانه پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، بدون تنش آبی و حرارتی کشت شد. آزمایش به صورت طرح بلوک های کامل تصادفی تحت تیمارهای مختلف کودی صفر به عنوان شاهد (N0)، ۵۰ (N1)، ۱۰۰ (N2)، ۱۵۰ (N3)، ۲۰۰ (N4)، ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار (N5)، به صورت اوره با سه تکرار انجام شد. داده های تیمار N0 و N3 در کشت اول برای واسنجی و سایر داده ها برای صحت سنجی مدل استفاده گردید. برای ارزیابی عملکرد مدل از شاخص های آماری ریشه میانگین مربعات خطای نسبی (RRMSE)، ضریب تعیین (R^2) و متوسط خطای اریب (MBE) استفاده شد. در مرحله واسنجی مقدار این پارامترها در شبیه سازی زیست توده به ترتیب برابر ۱۱/۱۲٪، ۰/۹۷۳، ۰/۳۳۲ و ۰/۳۳٪، ۰/۹۷۵، ۰/۹۱۶ و ۰/۱۰۰۲ تن در هکتار برای N3 و در شبیه سازی پوشش گیاهی به ترتیب ۱۵/۹۳٪، ۰/۸۸۴ و ۴/۳۰٪ برای N0 و ۱۲/۸۴٪، ۰/۹۱۶ و ۵/۹۴٪ برای N3 به دست آمد. همچنین در مرحله صحت سنجی محدوده تغییرات این مقادیر در پیش بینی زیست توده به ترتیب برابر ۱۳/۷-۲۵/۷٪، ۰/۹۸۸-۰/۹۲۳ و ۰/۱۱۸-۰/۱۱۰٪ تن در هکتار و در پیش بینی پوشش گیاهی به ترتیب ۱۹-۲۵/۴٪، ۰/۷۶۸-۰/۸۶۷ و ۵/۷-۱۰/۸٪ به دست آمد. بر اساس نتایج، مدل AquaCrop، زیست توده و پوشش گیاهی را تحت سطوح مختلف کود نیتروژن با دقت بالایی در طول دوره رشد گیاه شبیه سازی نمود.

واژه های کلیدی: آکواکراپ، تربچه، روش نیمه کمی، نیتروژن

مقدمه

گیاهانی که مقدار نیترات آن ها بالا باشد، بخصوص در کودکان بسیار زیان بار و سرطان زاست (Hasani and Nourzadeh, 2016). در سال های گذشته، به دلیل اثر مثبت نیتروژن بر روی عملکرد گیاه، کودهای نیتروژنه بیش از حد مورد استفاده قرار می گیرند (Ata-ul-karim et al., 2014). اکثر کشاورزان مقادیر زیاد آب و نیتروژن را استفاده می کنند و در نتیجه باعث آبخوبی نیتروژن و ورود آن به منابع آب زیرزمینی می شوند که این امر تهدیدی جدی برای نابودی محیط زیست به شمار می رود (Ramos et al., 2012). توجه به مقدار نیتروژن باقی مانده در خاک در زمان کاشت، از طریق آزمون خاک، در تعیین مقدار بهینه مصرف کود نقش تعیین کننده ای دارد (Berenguer et al., 2009). آزمایش های مزرعه ای نیازمند صرف وقت، هزینه و انرژی بوده و همچنین به دلیل محدودیت این آزمایش ها به شرایط فیزیکی مزرعه، کوتاه بودن مدت آزمایش و نیز محدودیت در تعداد سناریوهایی که توسط آزمایش بررسی می شوند، استفاده از

با توجه به قرار گرفتن ایران در منطقه خشک و نیمه خشک، مواد آلی پایین خاک و نیز روش های نامطلوب مصرف کودهای نیتروژن، کارایی مصرف نیتروژن پایین است و مصرف به هنگام و به مقدار آن برای کاهش هدر رفت نیتروژن می تواند مفید باشد (Malakouti, 2011). علاوه بر کمبود آب، کمبود نیتروژن نیز باعث افزایش فشار مضاعفی بر رشد و عملکرد گیاه می شود. وجود نیتروژن برای انجام اغلب فرایندهای حیاتی گیاه لازم و ضروری است (Hopkins, 2004). هدف از کشاورزی پایدار حذف کودهای شیمیایی نیست، بلکه مصرف بهینه این کودهاست (Guler, 2006). در صورت مصرف بهینه کود نیتروژنی، مشکلی در کیفیت محصولات کشاورزی دیده نخواهد شد (Stefanelli et al., 2012). ولی مصرف بی رویه کود نیتروژنی بر چرخه نیتروژن در محیط زیست اثر گذاشته و موجب برخی نابسامانی ها از جمله تجمع نیترات در گیاهان می شود. (Powelson et al., 2008). تداوم مصرف

مدل‌ها و نرم‌افزارها در روابط آب و خاک توسعه یافته است (Russo and Bakker, 1986). از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل CROPWAT, Budget, CropSyst, WOFOST, SWAP و CRPM اشاره کرد که هر کدام مزیت‌هایی بر دیگری دارد (2003 Stockle et al., Sepaskhah et al., 2006; van Dam and Kroes., 2008). در اغلب مدل‌های گیاهی به منظور بررسی تأثیر سطوح مختلف نیتروژن بر رشد و عملکرد گیاه از روابط پیچیده‌ای استفاده می‌گردد که به پارامترهای متعددی برای واسنجی نیاز دارند (Hsiao et al., 2009; Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009).

بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که تاکنون روش نیمه کمی مورد استفاده در AquaCrop برای بررسی اثر تنش کودی روی گیاه، در مناطق و محصولات محدودی مورد ارزیابی قرار گرفته است. این مهم تاکنون برای گیاه تربچه در منطقه گرم و خشک انجام نشده است. تازگی مدل و عدم آشنایی کاربران با نحوه کار و مزایای روش مذکور در مدل، سبب محدودیت تحقیقات انجام شده با استفاده از این مدل تا امروز شده است. لذا از این منظر بررسی و ارزیابی روش نیمه کمی برای شبیه‌سازی رشد گیاه تربچه نوآوری این پژوهش می‌باشد. بنابراین هدف اصلی در این پژوهش، ارزیابی (واسنجی و اعتبارسنجی) روش نیمه کمی مورد استفاده در مدل آکواکراپ به منظور تأثیر و بهبود مدیریت کود نیتروژن بر رشد تربچه و پیش‌بینی میزان زیست‌توده و پوشش گیاهی در گلخانه می‌باشد. تربچه قرمز (Raphanus Sativus) از سبزیجاتی است که مصرف تازه خوری دارد و در سفره بیشتر ایرانیان موجود است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش گیاه تربچه (رقم چریبل) که جزو گیاهان C3 است، طی دو دوره کشت در تاریخ ۲ بهمن ۱۳۹۶ و ۲۰ فروردین ۱۳۹۷ در گلخانه پلاستیکی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران کشت شد. گلخانه تحقیقاتی به‌صورت شمالی-جنوبی، در طول و عرض جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۸ دقیقه شرقی و ۳۵ درجه و ۲۸ دقیقه شمالی (۴۸°E، ۵۱°N، ۳۵°) و ارتفاع ۱۰۲۱ متر از سطح دریا واقع گردیده است. خاک گلدان‌ها پس از نمونه‌برداری از عمق ۳۰ سانتی‌متری از خاک مزرعه دانشگاه تهیه شد و میزان عناصر غذایی، وضعیت شوری، بافت و سایر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک تعیین و در (جدول ۱) ارائه گردید. همچنین بر اساس آزمون خاک قبل از کشت، مشخص شد که خاک مورد مطالعه هیچ‌گونه کمبودی از نظر مقادیر فسفر و پتاسیم ندارد و تیمارهای کودی تنها بر اساس نیتروژن موجود طراحی شدند (جدول ۱). از این رو آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با شش تیمار کودی (۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰) کیلوگرم نیتروژن در هکتار و با سه تکرار بر روی رشد

مدل‌ها و نرم‌افزارها در روابط آب و خاک توسعه یافته است (Russo and Bakker, 1986). از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل CROPWAT, Budget, CropSyst, WOFOST, SWAP و CRPM اشاره کرد که هر کدام مزیت‌هایی بر دیگری دارد (2003 Stockle et al., Sepaskhah et al., 2006; van Dam and Kroes., 2008). در اغلب مدل‌های گیاهی به منظور بررسی تأثیر سطوح مختلف نیتروژن بر رشد و عملکرد گیاه از روابط پیچیده‌ای استفاده می‌گردد که به پارامترهای متعددی برای واسنجی نیاز دارند (Hsiao et al., 2009; Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009).
 اما توجه به اینکه مدل‌های شبیه‌سازی قبلی از پیچیدگی و تعداد پارامترهای ورودی زیادی برخوردار بودند، بنابراین تلاش‌های زیادی از طرف FAO برای رسیدن به یک مدل گیاهی جدید که از دقت، سادگی و توانایی زیادی برخوردار باشد صورت گرفت و این تلاش باعث به وجود آمدن مدل AquaCrop که یک مدل مهندسی است، شد (Steduto et al., 2009). مدل AquaCrop در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته و در مطالعات مختلفی در سطح جهان استفاده شده و نتایج رضایت بخشی داشته است. به عنوان مثال در تحقیقی، پارامتر درجه روز رشد از کاشت بذر تا شروع به مرحله پیری گیاه که یکی از متغیرهای ورودی مدل AquaCrop است، برای ذرت علوفه‌ای در منطقه قزوین مورد واسنجی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که شاخص‌های آماری ضریب تعیین، جذر میانگین مربع خطا و میانگین انحراف خطا به ترتیب برابر ۰/۹۳، ۱/۵ تن در هکتار و ۰/۵ تن در هکتار برآورد شدند (Rahimikhoob et al., 2014).

مدل AquaCrop با ارائه ورژن ۴ در سال ۲۰۱۲ با اضافه کردن اثر تنش شوری بر رشد گیاه و شبیه‌سازی انتقال املاح، ارتقاء یافت (Raes et al., 2012). از این رو در شرایط شوری نیز در سال‌های اخیر تحقیقات قابل توجهی در این زمینه صورت گرفته است، نتایج حاصل نشان داد که مدل قادر به شبیه‌سازی عملکرد گیاه با دقت زیاد می‌باشد. همچنین مشخص شد که مدل آکواکراپ در پیش‌بینی شوری عصاره اشباع در مقایسه با رطوبت خاک و عملکرد دانه دچار خطای بیشتری است (Khorsand et al., 2014). در آخرین نسخه‌های مدل (نسخه‌های ۴ به بعد) برای شبیه‌سازی پاسخ گیاه تحت سطوح مختلف کودی از یک روش نیمه کمی (Semi-quantitative) استفاده شده است. مدل AquaCrop با استفاده از این روش مشخص می‌کند که در چه سطح کودی، بهره‌وری آب محصول بهینه می‌گردد (Van Gaelen et al., 2014; Akumaga et al., 2017). در مطالعه‌ای اثر کم آبیاری و افزودن کود نیتروژن بر عملکرد ذرت و بهره‌وری آب طی سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ در دهلی با استفاده از مدل

گلدان‌ها که بلافاصله بعد از جوانه‌زنی گیاه انجام شد در هر گلدان ۱۰ بوته نگهداری شد. به دلیل اهمیت پارامتر ظرفیت زراعی در تعیین میزان آبیاری، این پارامتر به دو روش گلدانی و صفحه فشاری در دانشگاه اندازه‌گیری شد. آب آبیاری توسط استوانه مدرج به طور دقیق اندازه‌گیری و دور آبیاری ثابت و برابر سه و دو روز به ترتیب در کشت اول و دوم اعمال شد تا اینکه شرایط مناسب و بدون تنش برای تبخیر- تعرق مهیا گردد. در (جدول ۲) خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب آبیاری نشان داده شده است.

و عملکرد گیاه تربچه اجرا گردید. کود نیتروژن از منبع اوره و مقدار توصیه کودی بر اساس نتایج تجزیه خاک (جدول ۱) ۱۵۰ kg/ha بود.

در این آزمایش بذر تربچه رقم (cherrybel) با قوه نامیه بیش از ۹۸٪ از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه و در ۱۰۸ گلدان کشت شد. سپس خاک داخل گلدان‌های پلاستیکی ۴ کیلوگرمی به صورت یکنواخت ریخته شد. بذر تربچه در عمق ۱/۵ سانتی‌متر به تعداد ۱۵ عدد در هر گلدان کاشته شد. بعد از تنک نمودن

جدول ۱- نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

پارامتر	بافت خاک	جرم مخصوص ظاهری	هدایت اشباع	رطوبت اشباع	رطوبت حد FC	رطوبت حد PWP	اسیدیته (pH)	الکتریکی (EC)	نیتروژن آلی	کربن آلی	بر	فسفر	پتاسیم
	g.cm ⁻³	mm.day ⁻¹	%	%	%	%	dS.m ⁻¹	%	%	%	ppm	mg.kg ⁻¹	mg.kg ⁻¹
مقدار لوم	۱/۳۸	۱۵۰	۴۵/۲	۳۰	۱۴	۷/۵	۱/۴۲	۰/۰۳	۰/۸	۰/۷۸	۲۱	۲۲۰	

جدول ۲- نتایج آنالیز شیمیایی آب آبیاری

پارامتر	نیترات	آمونیم	نیتروژن	فسفر دسترس	پتاسیم دسترس	در اسیدیته	هدایت الکتریکی (EC)
	mg.cm ⁻³	mg.cm ⁻³	%	mg.cm ⁻³	mg.cm ⁻³	(pH)	dS.m ⁻¹
مقدار	۰/۰۲۸	۰/۰۱۶	۰/۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۵	۷/۲	۱/۴

موجود قبل از توزین، از رابطه زیر محاسبه و بر اساس آن آب مورد نیاز هر گلدان برای رساندن رطوبت خاک به حد ظرفیت زراعی در هر نوبت آبیاری، محاسبه گردید:

$$W_{AW} = W_d(\theta_{fc} - \frac{W_{ty} - W_t}{W_d}) \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن W_d وزن خاک خشک درون گلدان در ابتدای آزمایش (Kg)، θ_{fc} رطوبت وزنی خاک در حد ظرفیت زراعی (gg⁻¹)، W_t وزن گلدان و محتویات آن قبل از هر نوبت آبیاری (Kg)، W_{ty} وزن گلدان و محتویات آن بعد از آبیاری (و احياناً خروج آب مازاد) پیشین (Kg) و W_{AW} مقدار آب قابل استفاده (kg) می‌باشد. توزین گلدان‌ها هر روز رأس ساعت مشخص توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم انجام شد. اختلاف وزن هر کدام از گلدان‌ها در دو مقطع زمانی متوالی بیانگر میزان آب مصرفی آن گیاه بود. با تقسیم این اختلاف وزن بر حجم خاک داخل هر گلدان، مقدار عمق آبیاری به دست آمد (جدول ۳).

در ادامه عملیات کود دهی به این صورت انجام گرفت که در طول هر دو فصل کشت مقدار ۴۰، ۳۰ و ۳۰ درصد از کل کود ازت مشخص شده برای هر تیمار به صورت محلول در آب به ترتیب طی سه مرحله در هنگام کاشت، ۱۵ و ۳۰ روز پس از کاشت در کشت اول و در کشت دوم به ترتیب، در هنگام کاشت،

برای محاسبه میزان تبخیر- تعرق، از گلدان‌ها به عنوان یک لایسیمتر وزنی استفاده شد. به منظور سهولت اندازه‌گیری‌ها، وزن خاک خشک درون تمام گلدان‌ها (W_d)، یکسان در نظر گرفته شد. طی چندین نوبت طی دوره رشد، بوته‌هایی بطور کامل بریده و وزن شدند که با لحاظ وزن بوته (W_B) در وزن گلدان در حد ظرفیت زراعی (W_{fc})، مقدار آب آبیاری طوری تنظیم گردید تا اینکه رطوبت خاک دقیقاً تا حد ظرفیت زراعی افزایش یابد و خروج آب مازاد برابر صفر گردد. این شرایط (اطمینان از عدم خروج آب زهکشی) همواره و طی دوره آزمایش بررسی گردید. در طول آزمایش، برداشت محصول قبل از توزین گلدان‌ها و وزن گلدان‌ها و محتویات آن (W_t) به صورت روزانه انجام گرفت. در مواردی نیز وزن گلدان و محتویات آن بعد از آبیاری (خروج آب مازاد در صورت وجود) نیز اندازه‌گیری شد (W_{ty}). در صورت عدم خروج آب زهکشی، W_{ty} برابر با W_t به علاوه وزن آب آبیاری (W_w) فرض گردید و W_{ty} اندازه‌گیری نشد. میزان آب مصرفی (W_u) گیاه از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$W_u = (W_{ty})_i - (W_t)_{i+1} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن $(W_t)_{i+1}$ وزن گلدان و محتویات آن قبل از آبیاری $i+1$ و $(W_{ty})_i$ وزن گلدان و محتویات آن بعد از آبیاری i و W_u وزن آب مصرفی شده در فاصله بین دو آبیاری می‌باشد. حجم آب

انتقال سریع به آزمایشگاه در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک می‌شدند (به عبارتی در هر تاریخ نمونه‌برداری تعداد ۱۸ گلدان برای اندازه‌گیری به آزمایشگاه منتقل شدند).

فرآیند خشک شدن در آون تا جایی که وزن نمونه‌ها به ثبات می‌رسید ادامه داشت. سپس وزن خشک نمونه‌ها که شامل اندام هوایی و ریشه ذخیره‌ای (غده) گیاه بود اندازه‌گیری می‌شد.

۱۱ و ۲۶ روز پس از کاشت در اختیار گیاه قرار داده شد. علف‌های هرز نیز به روش دستی کنترل گردید و آفات و امراض در طی مراحل رشد مشاهده نگردید. در هر تکرار ۳۶ گلدان وجود داشت (برای هر تیمار ۶ گلدان)، لذا در هر مرحله نمونه‌برداری (در مجموع شش مرحله) از هر تکرار و از هر تیمار، یک گلدان از ردیف‌های میانی و به صورت تصادفی انتخاب شد و پس از جداسازی گیاه از خاک و شستن آن با آب مقطر بلافاصله بعد از

جدول ۳- جدول میزان آب مصرفی در طول دوره رشد

کشت دوم		کشت اول	
عمق آبیاری (mm)	روز پس از کاشت	عمق آبیاری (mm)	روز پس از کاشت
۲۱	۱	۲۰	۱
۷	۶	۳	۶
۸	۸	۳	۹
۹	۱۰	۳	۱۲
۹	۱۲	۴	۱۵
۹	۱۴	۴	۱۸
۹	۱۶	۴	۲۱
۱۰	۱۸	۴	۲۴
۱۰	۲۰	۵	۲۷
۱۰	۲۲	۵	۳۰
۱۰	۲۴	۵	۳۳
۱۰	۲۶	۵	۳۶
۱۰	۲۸	۵	۳۹
۱۰	۳۰	۷۰	مجموع
۱۰	۳۲		
۱۰	۳۴		
۱۲۶	مجموع		

عکس گرفت سپس از طریق نرم‌افزار متلب میزان درصد تاج-پوشش را اندازه‌گیری کرد. نمونه‌هایی از تصاویر گرفته شده از سطح تاج‌پوشش گیاه قبل و بعد از پردازش در (شکل ۱) ارائه شده است.

علاوه بر این، تعداد روزهای پس از کاشت تا مراحل مختلف فنولوژیکی نظیر سبز شدن، بیشترین پوشش گیاهی و زمان رسیدن به آن، با استفاده از مشاهدات در گلخانه با دقت اندازه‌گیری و ثبت می‌شد. در نهایت کشت اول بعد از ۴۰ روز و کشت دوم بعد از ۳۶ روز پس از تاریخ کاشت برداشت شد. برای تعیین تبخیرتقرق مرجع درون گلخانه، ابتدا پارامترهای هواشناسی در داخل گلخانه، شامل (دما، رطوبت، تشعشع

مقدار پوشش گیاهی طی هر دو دوره کشت نیز در شش مرحله با استفاده از تهیه عکس‌های دیجیتال و تحلیل آن‌ها توسط نرم‌افزار کانوپئو (Canopeo) برآورد گردید. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار Canopeo که قابل نصب بر روی گوشی‌های با سیستم عامل اندروید و ios می‌باشد همچنین به صورت برنامه کاربردی برای نرم‌افزار متلب است، درصد تاج پوشش اندازه‌گیری شد. طریقه استفاده از آن بدین صورت است که برنامه را روی گوشی باز کرده و سپس گوشی را به فاصله ۶۰ سانتیمتر بالای تاج گیاه به صورت موازی با سطح زمین قرار داده و با استفاده از برنامه عکس گرفته و دکمه Run زده می‌شود (Patrignani and Ochsner, 2015). یا می‌توان با استفاده از دوربین از تاج گیاهان

مجهر به لوکس متر برای تعیین میزان تشعشع خورشید بود. عمق ریشه برای ورودی مدل در تمامی تیمارها عمق ماکزیمم ریشه (۱۵ سانتی‌متر) در نظر گرفته شد. این عمق پس از هر نمونه‌برداری به وسیله کولیس اندازه‌گیری شد.

در نهایت تجزیه و تحلیل واریانس داده‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از نرم‌افزار (Statistical Analysis SAS Software) صورت گرفت (جدول ۵). در همین راستا مشخص شد که سال‌های آزمایش هیچ اثر معنی‌داری روی پارامترهای اندازه‌گیری نداشتند.

همچنین بین تکرارهای آزمایش نیز تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. لازم به ذکر است در این پژوهش از نسخه ۶ مدل اکواکراپ استفاده شد.

خورشیدی و فشار هوا) اندازه‌گیری شد و این پارامترها در معادله فائو پنمن-مونتیت (که در نشریه شماره ۵۶ آبیاری و زهکشی تعریف شده است) جایگذاری و ET₀ به دست آمد. این روش با در نظر گرفتن قوانینی برای گلخانه نیز استفاده می‌شود مثلاً طبق پیشنهاد فائو ۵۶ سرعت باد برای این فرمول در گلخانه ۰/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود، همچنین براساس پیشنهاد فائو ۵۶ برای فواصل روزانه، مقدار G (شار گرمایی خاک) صفر در نظر گرفته می‌شود. هارمانتو و همکاران (۲۰۰۵) نیز از این روش برای اندازه‌گیری تبخیر تعرق در گلخانه استفاده کردند. دمای روزانه در گلخانه توسط دماسنج و رطوبت روزانه توسط رطوبت‌سنج اندازه‌گیری شد (جدول ۴). فشار هوا در گلخانه نیز توسط فشارسنج هر ۲۴ ساعت یک‌بار اندازه‌گیری شد. همچنین گلخانه



شکل ۱- تعیین درصد پوشش گیاهی توسط نرم‌افزار Canopeo در تاریخ‌های مختلف از دوره رشد تیمار N3 مربوط به کشت اول الف- تصاویر برداشت شده توسط دوربین و قبل از برداشش ب- تصاویر پس از برداشش توسط نرم‌افزار

جدول ۴- جدول پارامترهای اقلیمی گلخانه در طول دوره رشد

کشت اول					کشت دوم				
روز پس از کاشت	دمای مینیمم	دمای ماکزیمم	دمای متوسط	رطوبت نسبی (%)	روز پس از کاشت	دمای مینیمم	دمای ماکزیمم	دمای متوسط	رطوبت نسبی (%)
۱	۱۳/۶	۲۸/۶	۲۱/۱	۵۷	۱	۱۵/۵	۲۶/۵	۲۱	۵۳
۵	۱۵/۲	۲۷/۰	۲۱/۱	۵۳	۵	۱۶/۴	۳۲/۹	۲۴/۶	۵۸
۱۰	۱۱/۵	۲۹/۳	۲۴/۴	۶۲	۱۰	۱۷/۰	۳/۸	۲۴/۴	۵۶
۱۵	۱۱/۳	۳۴/۵	۲۲/۹	۵۶	۱۵	۱۶/۷	۲۹/۰	۲۲/۸	۶۲
۲۰	۱۴/۸	۳۱/۸	۲۳/۳	۵۵	۲۰	۱۶/۹	۲۹/۹	۲۳/۴	۶۰
۲۵	۱۳/۷	۲۶/۶	۲۰/۲	۶۴/۵	۲۵	۱۷/۱	۲۹/۷	۲۳/۴	۶۲/۵
۳۰	۱۶/۳	۲۴/۷	۲۰/۵	۷۰/۵	۳۰	۱۷/۴	۳۰/۰	۲۳/۷	۵۸/۵
۳۵	۱۳/۰	۳۰/۴	۲۱/۷	۵۳/۵	۳۵	۱۸/۶	۳۰/۰	۲۴/۳	۵۹/۵
۴۰	۱۴/۴	۲۹/۶	۲۲	۵۹/۵					

جدول ۵- جدول تجزیه واریانس تأثیر تیمار بر زیست توده

منبع تغییرات	درجه آزادی (DF)	SS	Mean Square	F Value
سال	۱	۰/۱۸۴۱۶	۰/۱۸۴۱۶	۲/۷۶ ^{ns}
تکرار* سال	۴	۰/۲۰۹۵۴	۰/۰۵۲۳۸۵	۱/۹۴ ^{ns}
سطح نیتروژن	۵	۳۶/۴۳۵۸۸۷	۷/۲۸۷۱۷۷	۱۷۵/۸۹ ^{**}
سطح نیتروژن* سال	۵	۰/۲۰۷۱۴۸	۰/۰۴۱۴۳۰	۱/۵۳ ^{ns}
خطای کل	۲۰	۰/۵۴۰۸۷۴	۰/۰۲۷۰۴۴	

* در سطح ۵ درصد معنی‌دار است ** در سطح ۱ درصد معنی‌دار است ns: از نظر آماری معنی‌دار نیست

(B_{rel}) و وضعیت کاهش پوشش طی فصل کشت (که به صورت کیفی به مدل معرفی می‌شود)، برای دو تیماری که یکی از آن‌ها تحت بیشترین تنش کودی قرار دارد (Stress field) و دیگری که هیچ تنش کودی را طی دوره رشد تجربه نمی‌کند (Reference field) به عنوان پارامترهای ورودی به مدل وارد می‌شود. B_{rel} یا زیست‌توده نسبی نیز بدین ترتیب محاسبه می‌گردد:

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

در این رابطه، B_{rel} زیست‌توده نسبی (که دامنه تغییرات آن بین صفر تا ۱۰۰ درصد است)، B_{stress} مقدار زیست‌توده به دست آمده در تیمار تحت تنش کودی حداکثر (تن در هکتار)، B_{ref} مقدار زیست‌توده به دست آمده در تیمار بدون تنش کودی (تن در هکتار) می‌باشد.

هر دو پارامتر B_{stress} و B_{ref} باید در شرایط بدون تنش رطوبتی و یا سایر تنش‌های زیستی و حرارتی به دست آمده باشند. از طرف دیگر این پارامترها در هر منطقه می‌توانند با استفاده از نتایج سایر مطالعات و یا تجربیات کشاورزان بومی به دست بیایند (Van Gaelen *et al.*, 2014).

این روش نشان می‌دهد که تنش کودی به صورت‌های مختلف موجب کاهش محصول و تبخیر و تعرق می‌گردد و از ضرایبی برای توصیف این کاهش استفاده می‌کند که شامل: الف) ضریب تنش کودی خاک برای بیشینه توسعه گیاه (Stress coefficient for maximum canopy cover, K_{SCC}) که نشان‌دهنده کاهش توسعه تاج پوشش گیاه (canopy cover) بر اثر تنش کودی خاک است، ب) ضریب تنش کودی برای گسترش گیاه (Stress coefficient for canopy expansion, K_{SE}) که نشان‌دهنده اثر محدودیت کود بر کاهش توسعه گیاه است، ج) ضریب تنش کودی برای کاهش بهره‌وری آب (Stress coefficient for biomass water productivity, K_{SWP}) که نشان‌دهنده کاهش تولید ماده خشک گیاه است (Rase *et al.*, 2012).

وضعیت کمبود عناصر غذایی خاک باعث کاهش پیکنواخت پوشش گیاهی نسبت به بیشینه پوشش گیاهی در نیمه فصل می‌شود بنابراین علاوه بر ضرایب مذکور، مدل از ضریب $fC_{decline}$ برای افت روزانه پوشش گیاه بلافاصله بعد از رسیدن به بیشترین مقدار آن استفاده می‌کند. متوسط کاهش روزانه پوشش کانوبی گیاه با (Stress decline coefficient of the canopy cover, $fC_{decline}$) برحسب درصد بر روز بیان می‌شود. با گذشت زمان از

توصیف روش نیمه کمی مدل AquaCrop

روند کلی کار با مدل‌ها بدین صورت است که خروجی‌های به دست آمده با مقادیر اندازه‌گیری شده کمترین اختلاف ممکن را داشته باشد. AquaCrop یک مدل گیاهی است که علاوه بر سادگی و پارامترهای ورودی کم، دارای دقت بالایی در شبیه‌سازی رشد گیاهان مختلف می‌باشد (Rase *et al.*, 2012). چنانچه گیاه تحت تنش کودی نباشد، مدل، عملکرد محصول (Y) را بر اساس مقدار آب تعرق یافته از گیاه (Tr) محاسبه می‌کند. مقدار تعرق به عواملی نظیر شرایط اقلیمی (تبخیر و تعرق مرجع)، مقدار پوشش گیاهی (CC) و ضریب تعرق گیاهی (K_{CTrx}) بستگی دارد (رابطه ۳). در AquaCrop توسعه پوشش گیاه از ابتدای کشت (CC_0) تا رسیدن به حداکثر مقدار آن (CC_x) با استفاده از ضریب رشد پوشش^۱ (CGC) تعیین می‌گردد. همچنین در انتهای کشت مقدار کاهش CC با استفاده از ضریب کاهش پوشش^۲ (CDC) تعیین می‌شود. سپس مقدار تعرق محاسبه شده نیز با استفاده از پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده^۳ (WP^*) به مقدار زیست‌توده گیاهی^۴ (B) تبدیل می‌گردد (رابطه ۴). در نهایت مقدار عملکرد دانه با استفاده از شاخص برداشت^۵ (HI) محاسبه خواهد شد.

$$Tr_i = K_{CTrx} \cdot CC \cdot ET_{O_i} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$B = WP^* \times \sum_{i=1}^n \frac{Tr_i}{ET_{O_i}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$Y = HI \times B \quad (\text{رابطه ۵})$$

در این روابط Tr_i مقدار تعرق گیاه در روز i ام (میلی‌متر بر روز)، CC نسبت پوشش گیاهی در طول فصل (بدون بعد)، ET_{O_i} مقدار تبخیر و تعرق مرجع در روز i ام (میلی‌متر بر روز)، K_{CTrx} حداکثر ضریب تعرق گیاهی (بدون بعد)، B مقدار زیست‌توده تولیدشده (گرم بر مترمربع)، WP^* بهره‌وری آب نرمال شده گیاه (گرم بر مترمربع)، n تعداد روزهای بعد از کشت، Y عملکرد دانه (گرم بر مترمربع) و در نهایت HI شاخص برداشت (گرم بر گرم) می‌باشند.

اما در شرایطی که گیاه تحت تنش کودی قرار گیرد، توسعه گیاه و تولید ماده خشک تحت تأثیر قرار می‌گیرد، بنابراین در نسخه‌های اخیر AquaCrop (نسخه ۴ به بعد) برای شبیه‌سازی رشد گیاه در این شرایط (شبیه‌سازی کاهش CC و WP^*) از یک روش نیمه کمی استفاده می‌شود که باید بر اساس نوع گیاه، اقلیم و خاک واسنجی گردد. این روش نسبت به نسخه‌های قبل، واسنجی را ساده‌تر کرده است که در آن، CC_x ، زیست‌توده نسبی

4. Biomass
5. Harvest Index

1. Canopy Growth Coefficient
2. Canopy Decline Coefficient
3. Normalized Water Productivity

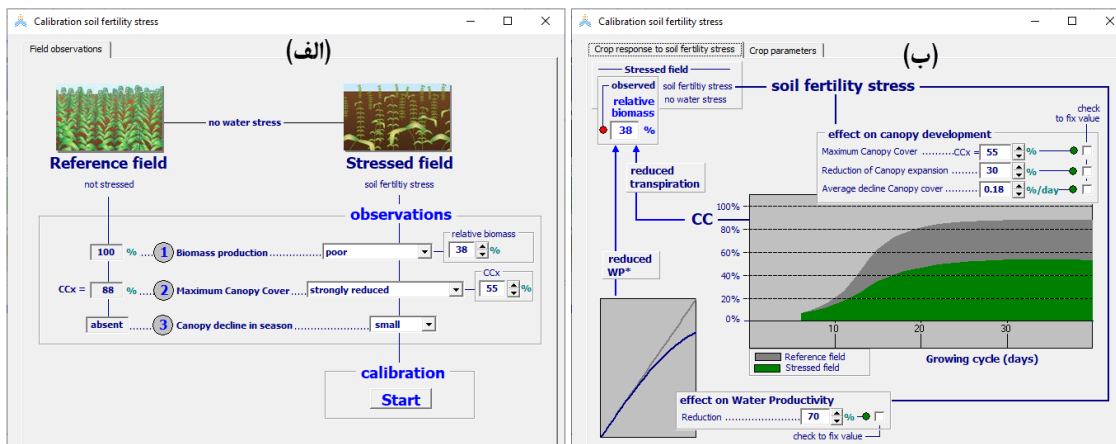
درجه رشد روز (GDD) و $t_{fullcanopy}$ زمان رسیدن به حداکثر رشد گیاه است. متوسط روزانه کاهش پوشش گیاهی ($fC_{decline}$) برای رسیدن به ضرایب $Ks_{exp,f}$ و Ks_{CCx} واسنجی می‌شود. در شرایط بدون محدودیت تنش

حاصلخیزی خاک، کاهش پوشش گیاهی صفر است. زمانی که تنش حاصلخیزی کامل شود (۱۰۰ درصد تنش کودی)، ماکزیمم کاهش برابر یک درصد بر روز فرض می‌شود. بنابراین بالاترین و پایین‌ترین حد تنش کودی، $fC_{decline}$ پهن صفر و یک درصد بر روز تغلیب می‌کند.

ابتدای فصل رشد، کاهش کانوپی بیشتر می‌شود. اصلاح تاج پوشش گیاه و شروع زمان پیری گیاه در انتهای فصل رشد (t_{sen}) با استفاده از رابطه زیر در مدل AquaCrop شبیه‌سازی می‌شود (Rase et al., 2012).

$$CC_{adj} = CC_{x,adj} - \frac{fC_{decline} (t - t_{fullcanopy})^2}{(t_{sen} - t_{fullcanopy})^2} \quad \text{(رابطه ۷)}$$

که در آن t زمان پس از پوشش کامل گیاه بر حسب روز یا



شکل ۲- الف- واسنجی و تعیین زیست‌توده نسبی (B_{rel}) برابر ۲۸٪ (به ازای تیمار کودی NO). ب- نمودار پوشش گیاهی طی دوره رشد در شرایط بدون تنش کودی (رنگ روشن) و تحت تنش کودی (رنگ تیره)

گیاه در خاک موجود نباشد، رشد گیاه برای طولانی مدت ممکن نیست و ضرایب Ks به حداقل مقدار تثوری یعنی صفر می‌رسد (Rase et al., 2012). بر اساس مقادیر B_{rel} و CC_x در دو تیماری که شامل B_{stress} و B_{ref} هستند، هر کدام از چهار منحنی Ks به طور خودکار توسط مدل تعیین می‌شود. شکل منحنی Ks می‌تواند محدب، خطی یا مقعر باشد. شکل هر منحنی با واسنجی به وسیله مقادیر ویژه‌ی پهن صفر و یک، $Ks_{exp,f}$ و Ks_{CCx} ، برای واسنجی پاسخ گیاه به تنش حاصلخیزی خاک تغلیب می‌شود (Rase et al., 2012).

واسنجی مدل AquaCrop

واسنجی مدل شامل دو بخش زیر است:

الف- واسنجی پارامتر بهره‌وری آب

مدل AquaCrop برای پیش‌بینی رشد و عملکرد محصول از پارامتر بهره‌وری آب (WP) استفاده می‌کند. بهره‌وری آب عبارت است از عملکرد محصول در واحد آب تعرق یافته. این پارامتر بر

محدودیت حاصلخیزی خاک، ظرفیت رشد گیاه (CGC), CGC را کاهش می‌دهد، همچنین بیشینه رشد گیاه (CC_x , Maximum canopy cover) به نیمه فصل می‌رسد. که در این روش اصلاح ضرایب CGC و CC_x برای حاصلخیزی خاک با استفاده از روابط زیر انجام می‌شود:

$$CGC_{adj} = Ks_{exp,f} \times CGC \quad \text{(رابطه ۸)}$$

$$CC_{x,adj} = Ks_{CCx} \times CC_x \quad \text{(رابطه ۹)}$$

که در آن CGC و CC_x به ترتیب ضرایب رشد تاج پوشش گیاه (درصد بر روز) و بیشینه پوشش گیاهی (درصد) برای حالت بدون محدودیت حاصلخیزی است و $Ks_{exp,f}$ و Ks_{CCx} به ترتیب ضرایب تنش حاصلخیزی برای گسترش گیاه و توسعه تاج پوشش گیاه می‌باشند. حد بالا و پایین ضرایب Ks نیز برای حاصلخیزی خاک پهن یک و صفر است. در شرایط عدم محدودیت حاصلخیزی خاک ضرایب تنش حاصلخیزی خاک برابر یک است و زمانی که تنش کودی کامل می‌شود (مواد غذایی مورد نیاز برای رشد و بقای

تأثیر قرار می‌دهد بنابراین اندازه‌گیری این پارامتر ضروری است. در پژوهش حاضر برای به دست آوردن پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده از داده‌های تیمار N3 (تیمار بدون تنش کودی در کشت اول) که متناسب با فرض مدل است استفاده شد. برای ورود داده‌ها به مدل به منظور واسنجی، ابتدا آن دسته از پارامترها که برای هر نوع گیاه و تحت هر شرایطی (از جمله زمان و اختلاف در مدیریت مزرعه، مکان جغرافیایی و اقلیم) ثابت در نظر گرفته می‌شوند (conservative)، بر اساس مقادیر توصیه شده برای تربچه در دستورالعمل کاربرد مدل AquaCrop تعیین شدند (جدول ۶). سپس تعدادی دیگر از پارامترهای گیاهی مدل که به رقم و مدیریت کشت بستگی داشتند (non-conservative) توسط کاربر قابل تغییر بوده و بر اساس مشاهدات و یا روش سعی و خطا تعیین گردیدند. نتایج به دست آمده در این مرحله در (جدول ۷) گزارش شده است.

اساس شرایط اقلیمی و غلظت CO2 موجود در اتمسفر پیرامون نرمال می‌گردد (WP*). فرض مدل در برآورد این پارامتر، این است که پوشش گیاهی ۱۰۰ درصد و آبیاری کامل بوده و هیچ‌گونه تنشی به گیاه وارد نشود. در مدل آکواکراپ از پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده (WP*) برای تعیین زیست‌توده گیاهی استفاده می‌شود (Steduto et al., 2007). کارشناسان فائو مقدار این پارامتر را برای اکثر نباتات زراعی محاسبه و در پیوست راهنمای مدل آکواکراپ (Raes et al., 2012) ارائه داده‌اند. مقدار پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده در شرایطی که هیچ تنش کودی وجود نداشته باشد در طول فصل کشت تقریباً ثابت در نظر گرفته می‌شود اما با افزایش درجه تنش کودی مقدار آن کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، با کاهش مقدار WP*، تولید زیست‌توده روزانه تحت تأثیر تنش کودی نیز کاهش می‌یابد. از آنجا که تنش کودی، پوشش گیاهی و تولید زیست‌توده را تحت

جدول ۶- پارامترهای ثابت (Conservative) ورودی به مدل برای گیاه تربچه در تیمار N3 (بدون تنش کودی) مربوط به کشت اول

علامت	شرح	مقدار	واحد
Tbase	دمای پایه رشد	۴	°C
Tupper	دمای بالا	۳۵	°C
-	پوشش گیاهی هم‌زمان با ظهور جوانه ۹۰٪ از بذرها	۲	cm ² /plant
CGC	ضریب رشد پوشش	۲۶/۶	% day ⁻¹
KCTr,x	ضریب گیاهی در دوره رشد کامل قبل از شروع پیری	۱/۱۰	-
-	کاهش ضریب گیاهی در اثر پیری با کمبود نیتروژن و غیره	۰/۱۵	% day ⁻¹
CDC	ضریب کاهش پوشش	۱۷/۸	% day ⁻¹
pexp, lower	آستانه تخلیه آب خاک برای گسترش تاج پوشش - سطح آستانه بالا	۰/۲۵	-
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	۰/۵۰	-
-	عامل شکل ضریب تنش آب برای کنترل روزنه	۳/۰	-
Psen	آستانه تخلیه آب خاک برای پیری تاج پوشش - سطح آستانه بالا	۰/۸۵	-
-	عامل شکل ضریب تنش آب برای پیری تاج پوشش	۳/۰	-

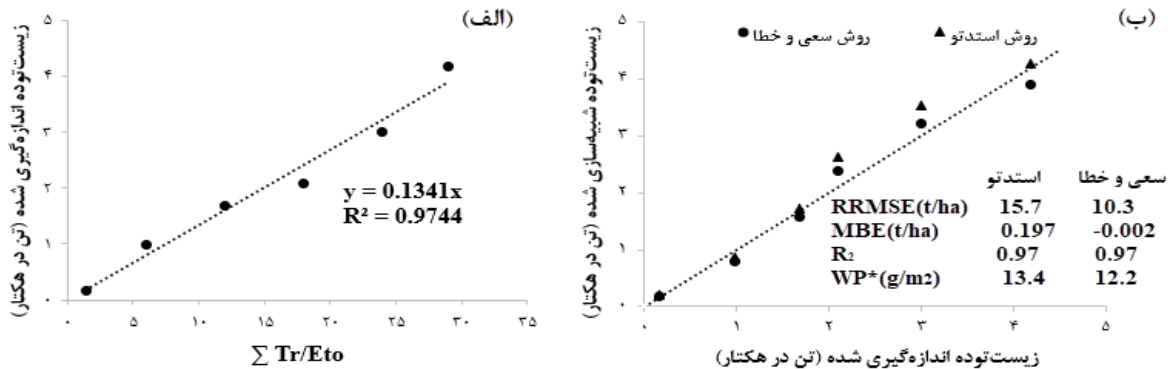
جدول ۷- پارامترهای گیاهی واسنجی شده (Non-Conservative) برای گیاه تربچه بر اساس مشاهدات در تیمار N3 مربوط به کشت اول

پارامتر	مقدار	واحد
حداکثر پوشش گیاهی	۸۸	درصد
زمان رسیدن به حداکثر پوشش گیاهی	۲۵	روز پس از کاشت
زمان شروع دوره پیری	۴۰	روز پس از کاشت
زمان برداشت	۴۰	روز پس از کاشت
شاخص برداشت مرجع	۵۵	درصد
تراکم کشت	۳۵۲۶۸۰	بوته در هکتار
بهره‌وری آب نرمال شده	۱۲/۲	گرم بر مترمربع

در این رابطه، WP^* بهره‌وری آب نرمال شده (گرم بر مترمربع)، B مقدار زیست‌توده اندازه‌گیری شده (گرم بر مترمربع)، Tr مقدار تعرق محاسبه شده (میلی‌متر بر روز) با استفاده از مدل AquaCrop (بر اساس پارامترهای ورودی مربوط به رشد و پوشش اندازه‌گیری شده گیاه، شرایط اقلیمی و رطوبت خاک) و ET_0 مقدار تبخیر و تعرق مرجع روزانه (میلی‌متر بر روز)، (شکل ۳-۱) طبق این روش ضریب بهره‌وری آب نرمال شده $13/4$ و با روش سعی و خطا مقدار این ضریب $12/2$ گرم بر مترمربع به دست آمد (شکل ۳-۲).

واسنجی پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده به دو روش (Steduto *et al.*, 2009) و روش سعی و خطا انجام گرفت و ملاحظه شد روش سعی و خطا با دقت بیشتری این پارامتر را برآورد کرد. در روش استدوتو، پراکنش داده‌های نسبت تجمعی تعرق گیاه به تبخیر- تعرق مرجع $(\sum \frac{Tr}{ET_0})$ و زیست‌توده تجمعی رسم شده و بهره‌وری آب نرمال شده برابر با ضریب بهترین خطی بود که از مبدأ مختصات به نقاط برازش گذشته است. به عبارتی، معادله تعیین پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده در این روش به صورت زیر می‌باشد (Steduto *et al.*, 2009):

$$WP^* = \left[\frac{B}{\sum \left(\frac{Tr}{ET_0} \right)} \right]_{[CO_2]} \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$



شکل ۳- الف- نمودار تعیین پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده به روش استدوتو ب- نمودار مقایسه دو روش استدوتو و سعی و خطا در واسنجی WP^*

صحت سنجی مدل استفاده شد. برای این منظور، با استفاده از مدل واسنجی شده، رشد زیست‌توده و پوشش گیاهی در تیمار-های $N1$ ، $N2$ در سال ۱۳۹۶ و تیمارهای سال ۱۳۹۷ برآورد و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شدند.

شاخص‌های آماری مورد استفاده در مراحل واسنجی و صحت سنجی مدل شامل ضریب تبیین (R^2)، ریشه متوسط مربعات خطای نسبی ($RRMSE$) و حداقل خطای اریب (MBE) بودند که بر طبق روابط زیر محاسبه شدند:

(رابطه ۱۱)

$$RRMSE = \frac{RMSE \times 100}{\bar{O}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}}$$

(رابطه ۱۲)

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \right)^2$$

(رابطه ۱۳)

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

ب- واسنجی بخش حاصلخیزی مدل

در این بخش، بر اساس داده‌های دو تیمار $N0$ و $N3$ مربوط به کشت اول، پاسخ گیاه به سطوح مختلف نیتروژن با استفاده از روش نیمه کمی واسنجی شد. از بین تیمارهای مورد بررسی، تیمار $N3$ که تحت هیچ‌گونه تنش نیتروژنی قرار نداشت به عنوان تیمار مبنی (Reference) و تیمار $N0$ که تحت بیشترین تنش نیتروژنی قرار داشت به عنوان تیمار تنش (Stress) در مدل AquaCrop در نظر گرفته شد (Rase *et al.*, 2012). داده‌های ورودی در این مرحله واسنجی عبارتند از زیست‌توده نسبی ($Brel$)، حداکثر درصد پوشش در شرایط بیشترین تنش کودی (CCx) در تیمار $N0$ و نرخ کاهش پوشش گیاهی که بر اساس داده‌های مشاهده‌ای در این مطالعه به ترتیب برابر 38% ، 55% و کم ($small$) در نظر گرفته شد. علاوه بر این CCx برای تیمار $N3$ در طول دوره کشت برابر 88% ثبت شده بود (شکل ۱- الف).

صحت سنجی مدل AquaCrop

از داده‌های باقیمانده در کشت اول و نیز داده‌های کشت دوم برای

جدول ۸- نتایج مقایسه میانگین عملکرد زیست توده (تن در هکتار) تحت آزمون دانکن

تیمار	عملکرد زیست توده (تن در هکتار)
	کشت اول
	کشت دوم
N5	۴/۵۰۳۶ ^a
N4	۴/۴۲۷۶ ^a
N3	۴/۱۷۸۸ ^a
N2	۳/۴۰۴۵ ^b
N1	۲/۷۲۹۳ ^c
N0	۱/۵۷۱۸ ^d

بنابراین با توجه به اینکه در تیمار N3 کمتر از دو تیمار دیگر کود نیتروژنه (اوره) استفاده شده است این تیمار به عنوان تیمار بهینه کودی انتخاب گردید و با توجه به هدف پژوهش که مصرف کود کمتر (آسیب کمتر به محیط زیست) به ازای تولید ماده خشک مناسب است، دیگر نیازی به شبیه سازی برای دو تیمار N4 و N5 نیست.

واسنجی مدل بر اساس داده های دو تیمار N0 و N3 (مربوط به کشت اول) انجام شد. در این مرحله پارامترهای ضرایب کاهش توسعه پوشش (CGC reduction)، کاهش حداکثر پوشش (CCx reduction)، متوسط کاهش پوشش (درصد در روز) و درصد کاهش WP* به ترتیب برابر ۳۰٪، ۳۸٪، ۰/۱۸ (٪/day) و ۷۰٪ به دست آمد. سپس با استفاده از این ضرایب، ارتباط بین مقادیر زیست توده و پوشش گیاهی تخمینی و اندازه گیری شده مشخص و با یکدیگر مقایسه شدند (شکل ۴). نتایج نشان دهنده عملکرد خوب مدل با R²، RRMSE و MBE به ترتیب برابر ۱۱/۱۲٪، ۰/۹۷۳ و ۰/۳۲ تن در هکتار برای N0 و ۰/۹۷۵ و ۰/۰۰۲ تن در هکتار برای N3 در تخمین زیست توده به دست آمد. همچنین مقدار این پارامترها در شبیه سازی پوشش گیاهی ۱۵/۹۳٪، ۰/۸۸۴، ۴/۲۹۷٪ برای تیمار N0 و ۰/۹۱۶، ۱۲/۸۴٪، ۵/۹۳۸٪ برای تیمار N3 حاصل شد (جدول ۹).

که در این روابط O_i برابر مقادیر مشاهده ای، iS مقادیر شبیه سازی شده، \bar{O} متوسط مقادیر مشاهده ای و \bar{S} متوسط مقادیر شبیه سازی شده، n تعداد داده های مشاهده ای بود. بدین ترتیب عملکرد مدل می تواند با پارامتر RRMSE به عالی ($RRMSE < 10\%$)، خوب ($10\% < RRMSE < 20\%$)، متوسط ($20\% < RRMSE < 30\%$) و ضعیف ($RRMSE > 30\%$) تفکیک شود (Jamieson et al., 1991). هر چه مقدار RMSE و |MBE| (قدر مطلق) کمتر باشند دقت مدل بالاتر است. مقادیر مثبت MBE نشان دهنده آن است که مقادیر پیش بینی شده توسط مدل بیشتر از مقادیر واقعی و مقادیر منفی آن نشان دهنده آن است که مقادیر پیش بینی شده توسط مدل کمتر از مقادیر واقعی می باشند. هر چه ضریب تبیین (R^2) بالاتر و به یک نزدیک تر باشد همبستگی داده های مشاهداتی و داده های مدل بالاتر است و هر چه ضریب زاویه خط همبستگی بین داده ها به یک نزدیک تر شود دقت مدل بالاتر خواهد بود.

نتایج و بحث

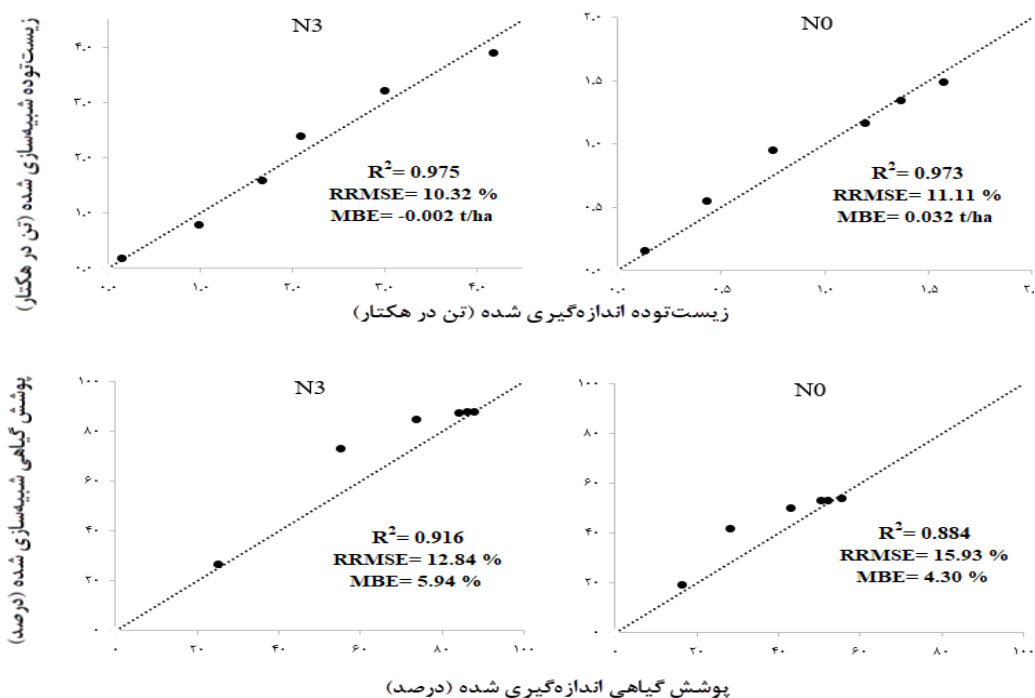
الف- نتایج واسنجی

نتایج بررسی اثر کود بر تولید ماده خشک در تیمارهای مختلف طی دو سال آزمایش نیز نشان داد که عملکرد زیست توده در طول این دو سال در تیمارهای N3، N4 و N5 تفاوت معنی داری ندارد (جدول ۸).

جدول (۸) نشان می دهد در تیمارهای N0، N1 و N2 نیتروژن به عنوان عامل محدود کننده رشد در آن ها به حساب می آید، به عبارت دیگر در این تیمارها با افزایش سطح نیتروژن مقدار ماده خشک نیز به طور معنی داری افزایش می یابد و به علت معنی دار بودن عملکرد این تیمارها داده های آن با نمادهای c، b و d مشخص شدند ($p < 0.05$). اما افزایش کاربرد نیتروژن در تیمارهای N3، N4 و N5 باعث افزایش ماده خشک به طور معنی دار نمی گردد و داده های عملکرد تیمارها با نماد a مشخص شد.

جدول ۹- شاخص های آماری به دست آمده در مرحله واسنجی پاسخ گیاه به سطوح مختلف نیتروژن طی دوره کشت اول

شاخص	N3	N0
R ²	۰/۹۷۵	۰/۹۷۳
زیست توده RRMSE(%)	۱۰/۳۲	۱۱/۱۲
MBE(ton/ha)	-۰/۰۰۲	۰/۰۳۲
R ²	۰/۹۱۶	۰/۸۸۴
پوشش گیاهی RRMSE(%)	۱۲/۸۴	۱۵/۹۳
MBE(%)	۵/۹۳۸	۴/۲۹۷



شکل ۴- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده زیست توده و پوشش گیاهی در کشت اول برای دو تیمار N3 و N0 در مرحله واسنجی

تیمارهای تحت تنش نیتروژنی بیشتر می‌باشد. مقدار دامنه تغییرات R^2 و MBE به ترتیب برابر ۰/۹۲۳ تا ۰/۹۸۸ و ۰/۱۱۰ تا ۰/۱۱۸ تن در هکتار بود.

علاوه بر این، بیشترین مقدار RRMSE برای پوشش گیاهی برابر ۲۵/۷۴٪ (مربوط به تیمار N0 در کشت دوم) بود و کمترین مقدار آن برابر ۱۳/۷۳٪ در تیمار N2 (متعلق به کشت اول) به دست آمد. مقدار دامنه تغییرات R^2 و MBE برای CC به ترتیب برابر ۰/۷۶۸ تا ۰/۸۶۷ و ۵/۷ تا ۱۰/۸ درصد به دست آمد.

نتایج نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل در برآورد هر دو پارامتر (زیست توده و پوشش گیاهی) در کشت اول نسبت به کشت دوم نیز بود. علت این امر می‌تواند ساختار مدل باشد که برای برآورد بیشترین مقدار عملکرد در شرایط ایده‌آل طراحی شده است. بدین ترتیب چنانچه در واقعیت فاکتورهایی نظیر زمان نامناسب کاربرد کود یا آفات و بیماری‌ها روی عملکرد گیاه تأثیر بگذارند و باعث کاهش عملکرد نهایی شوند، مدل قادر به در نظر گرفتن این عوامل نیست و بدین ترتیب ناچاراً در نتایج بیش برآورد صورت می‌گیرد (Akumaga et al., 2017)؛ و از آنجایی که در این پژوهش مدل با استفاده از دو تیمار N3 و N0 در کشت اول واسنجی می‌شود، لذا کشت اول با خطای کمتری تخمین زده شد.

در شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده زیست توده و پوشش گیاهی برای تیمارها در مرحله صحت‌سنجی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در نهایت مشخص شد

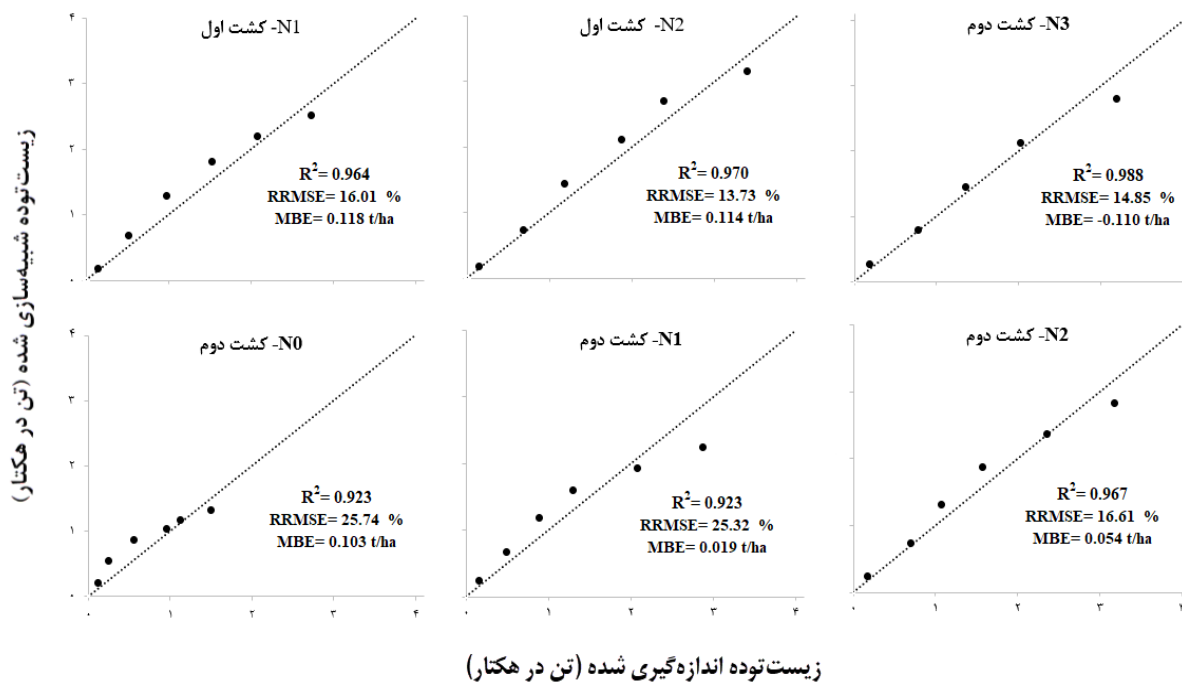
مدل، زیست توده را برای تیمار N3 کمتر از مقدار واقعی و برای تیمار N0 بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرد. این در حالی است که در تخمین پوشش گیاهی در هر دو تیمار خطای بیش برآورد مشاهده شد. همچنین، مدل، تیمار N3 را نسبت به تیمار N0 با خطای کمتر و دقت بیشتری برآورد کرد. در مجموع، نتایج به دست آمده در مرحله واسنجی نشان می‌دهند که مدل در برآورد تولید زیست توده و پوشش گیاهی طی فصل رشد عملکرد خوبی داشته است.

ب- نتایج صحت سنجی

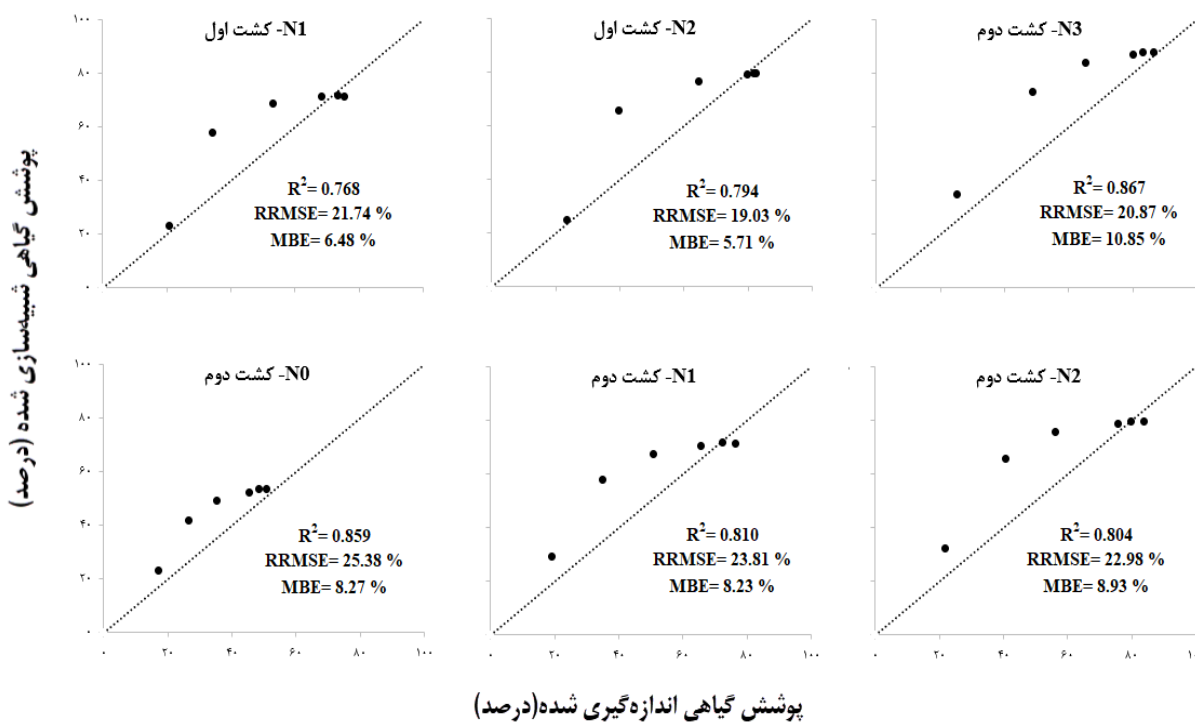
در مرحله صحت‌سنجی، مقادیر اندازه‌گیری شده پوشش گیاهی و زیست توده در تیمارهای N1 و N2 مربوط به کشت اول و تیمارهای کشت دوم با مقادیر نظیر شبیه‌سازی شده مقایسه گردید و مقدار شاخص‌های آماری به دست آمده در (جدول ۱۰) نشان داده شد. مقدار دامنه تغییرات RRMSE در شبیه‌سازی زیست توده در طول دوره رشد گیاه در تیمارهای مختلف کودی از ۱۳/۷ تا ۲۵/۷ درصد بود. با توجه به اینکه کمترین مقدار RRMSE مربوط به تیمار N2 در کشت اول و N3 در کشت دوم به دست آمد، بنابراین در این پژوهش مشخص شد که با افزایش تنش نیتروژنی و حساس‌تر شدن گیاه، تأثیر سایر تنش‌های محیطی (مانند آفات) که توسط مدل در نظر گرفته نمی‌شوند روی گیاه بیشتر شود و همین عامل باعث کاهش دقت مدل در

آکیوماگا و همکاران و ون گایلن و همکاران در زمینه ارزیابی روش نیمه کمی مدل AquaCrop می‌باشد (Van Gaelen *et al.*, 2014; Akumaga *et al.*, 2017; Ranjbar *et al.*, 2017)

که در مرحله صحت سنجی، مدل به خوبی قادر به تخمین پارامترهای زیست توده، پوشش گیاهی در طول دوره رشد گیاه تریچه تحت تنش‌های مختلف کود نیتروژن بود که مشابه نتایج مطالعات



شکل ۵- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده زیست توده در مرحله صحت‌سنجی



شکل ۶- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده پوشش گیاهی در مرحله صحت‌سنجی

جدول ۱۰- شاخص‌های آماری به دست آمده در مرحله صحت‌سنجی پاسخ گیاه به سطوح مختلف نیتروژن طی دوره‌های کشت اول و دوم

کشت دوم				کشت اول			
N3	N2	N1	N0	N2	N1	شاخص	پارامتر
۰/۹۸۸	۰/۹۶۷	۰/۹۲۳	۰/۹۲۳	۰/۹۷۰	۰/۹۶۴	R ²	
۱۴/۸۵	۱۶/۶۱	۲۵/۳۲	۲۵/۷۴	۱۳/۷۳	۱۶/۰۱	RRMSE(%)	زیست‌توده
-۰/۱۱۰	۰/۰۵۴	۰/۰۱۹	۰/۱۰۳	-۰/۱۱۴	۰/۱۱۸	MBE(ton/ha)	
۰/۸۶۷	۰/۸۰۴	۰/۸۱۰	۰/۸۵۹	۰/۷۹۴	۰/۷۶۸	R ²	
۲۰/۸۷	۲۲/۹۸	۲۳/۸۱	۲۵/۳۸	۱۹/۰۳	۲۱/۷۴	RRMSE(%)	پوشش گیاهی
۱۰/۸۴۹	۸/۹۳۳	۸/۲۲۸	۸/۲۷۳	۵/۷۱۴	۶/۴۷۶	MBE(%)	

می‌باشد.

در این روش، مقدار تنش کودی وارد شده به گیاه و میزان ارتباط آن با عملکرد محصول بررسی می‌گردد تا با ارائه راهکارهای مناسب به کشاورزان و مسئولین کشاورزی بتوان از پیامدهای زیان‌بار استفاده نامناسب از کودهای نیتروژنی جلوگیری به عمل آورده و مدیریت آب و نیتروژن در مزرعه را بهبود بخشید. پیشنهاد می‌شود که با توجه به گرایش شدید به سمت کشت گلخانه‌ای، آزمایش‌های مشابه بر روی دیگر گیاهان مناسب کاشت در گلخانه و گونه‌های مختلف انجام گرفته و با تعیین نیاز آبی و کودی و ضرایب مربوط به هر گیاه، اقدامی مناسب به منظور بهره‌وری از آب و کود و راندمان بالای تولید محصول انجام پذیرد.

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به آثار زیان‌بار استفاده بیش از حد کودهای نیتروژنی به منظور جلوگیری از هدر رفت سرمایه ملی، حفظ محیط زیست، افزایش راندمان کودهای نیتروژنی و ارتقاء سلامتی جامعه، در پژوهش حاضر، کارایی روش نیمه‌کمی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی پارامترهای زیست‌توده و پوشش گیاهی تحت سطوح مختلف کود نیتروژن ارزیابی شد. ابتدا مدل واسنجی شد و سپس پارامترهای شبیه‌سازی شده با نتایج اندازه‌گیری در گلخانه مقایسه گردید. نتایج حاصل نشان داد که مدل AquaCrop با وجود سادگی و داده‌های ورودی کمتر نسبت به سایر مدل‌ها دارای دقت بالایی در شبیه‌سازی پارامترهای مذکور از طریق روش نیمه‌کمی

REFERENCES

- Akumaga, U., Tarhule, A. and Yusuf, A. A. (2017). Validation and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer on rainfed maize in Nigeria, West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, 225-234.
- Ata-UI-Karim, S. T., Yao, X., Liu, X., Cao, W. and Zhu, Y. (2014). Determination of Critical Nitrogen Dilution Curve Based on Stem Dry Matter in Rice. *PLoS ONE*, 9(8), <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0104540>.
- Berenguer, P., Santiveri, F., Bioxadera, J. and Lioveras, J. (2009). Nitrogen fertilization of irrigated maize under Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*. 30(3), 163-171.
- Guler, S. (2006). Developments on fertilizer consumption of the world and Turkey. *Journal of the Faculty of Agriculture*, 21(2), 243-248.
- Harmanto, V.M.S., M.S. Babel and H.J. Tantau. 2005. Water requirement of drip irrigated tomatoes grown in greenhouse in tropical environment. *Agric. Water Manage.* 71:225-242
- Hasani, A. and Nourzadeh-Haddad, M. (2016). Effect of Ammonium Nitrate and Free Amino Acids on the Nitrate Accumulation in Radish. *Water and Soil Science-University of Tabriz*, 26(4.1), 67-78. (In Farsi)
- Hopkins, W. G. (2004). *Introduction to Plant Physiology* (3th ed.). New York: Wiley. pp. 557.
- 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.
- Khorsand, A., Verdinejad, V. R. and Shahidi, A. (2014). Comparison of FAO Aquacrop and SWAP agro-hydrological models to simulate water and salt transport during growing season of winter wheat. *International Journal of Biosciences*. 11(4), 223-233.
- Kroes, J. G. and Van Dam, J. C. (2008). Reference manual SWAP version 3.2. *Alterra green world Research*. Wagennigen. Report 1649. Avaiabel at: <http://www.swap. Alterra.nl>.
- Malakouti, M. J. (2011). Relationship between Balanced Fertilization and Healthy Agricultural Products (A Review). *Journal of Crop and Weed Ecophysiology*, 4(16), 133-152. (In Farsi)

- Patrignani, A. and Ochsner, T.E.(2015). Canopeo: A Powerful New Tool for Measuring Fractional Green Canopy Cover. *Agronomy Journal*, 107(6), 2312-2320.
- Powelson, D. S., Addiscott, T. M. and Benjamin, N. (2008). When does nitrate become a risk for humans. *Journal of Environmental Quality*. 37(2), 291-295.
- 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.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C. and Fereres, E. (2012). AquaCrop Reference Manual, AquaCrop version 4.0. Rome, Italy: FAO.
- Rahimikhoob, H., Sotoodehnia, A. and Massahbavani, A. R. (2014). Calibration and Evaluation of AquaCrop for Maize in Qazvin Region. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 8(1), 108-115. (In Farsi)
- Ramos, T. B., Šimuněk, J., Goncalves, M. C., Martins, J. C., Prazeres, A. and Pereira, L.S. (2012). Two dimensional modeling of water and nitrogen fate from sweet sorghum irrigated with fresh and blended saline waters. *Agricultural Water Management*. 111, 87-104.
- Ranjbar, A., Rahimikhoob, A. and Ebrahimian, 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)
- Russo, D. and Bakker, D. (1986). Crop water production function for sweet corn and cotton irrigated and saline water. *Soil science society and American journal*. 51(6), 1554-1562.
- Sepaskhah, A. R, Bazafshan, A. R. and Shirmohammadi-Aliakbarian, Z. (2006). Development and evaluation of model for yield production of wheat, maize and sugarbeet under water and salt stresses. *Biosystems engineering*. 93(2), 139-152.
- 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.
- Steduto, P., Hsiao, T. C. and Fereres, E. (2007). On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*. 25(3), 189-207.
- Stefanelli, D. S., Brady, S., Winkler, R. B., Jones, J. and Tomkins, B. T. (2012). Lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth and quality response to applied nitrogen under hydroponic conditions. *Acta Agriculturae*, 927, 353-360.
- Stockle, C. O., Donatelli, M. and Nelson, R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18(3), 289-307.
- Stricevic, R., Dzeletovic, Z., Djurovic, N. and Cosic, M. (2014). Application of the AquaCrop model to simulate the biomass of *Miscanthus x giganteus* under different nutrient supply conditions. *GCB Bioenergy*, 7(6), 1203-1210.
- Van Gaalen, H., Tsegay, A., Delbecque, N., Shrestha, N., Garcia, M., Fajardo, H., Miranda, R., Vanuytrecht, E., Abrha, B., Diels, J. and Raes, D. (2014). A semi-quantitative approach for modelling crop response to soil fertility: evaluation of the Aquacrop procedure. *Journal of Agricultural Science*, 153(7), 1218-1233.