نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره2، جلد 11، خرداد - تیر 1396، ص. 298-286

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 2, Vol. 11, Jun.-Jul. 2017, p. 286-298

ارزیابی روش نیمه‌کمی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی پاسخ ذرت به کود نیتروژن

آرش رنجبر[1]، علی رحیمی‌خوب[2*]، حامد ابراهیمیان[3]

تاریخ دریافت: 1396/1/27 تاریخ پذیرش: 1396/2/19

چکیده

در مدل AquaCrop، پاسخ گیاه تحت تنش‌های مختلف کودی توسط یک روش ساده و نیمه‌کمی پیش‌بینی می‌شود. هدف اصلی در این مطالعه ارزیابی روش مذکور در شبیه‌سازی پارامترهای رشد ذرت برای تیمارهای مختلف کود نیتروژن در مناطق گرم و خشک ایران است. بدین منظور گیاه ذرت طی سال‌های زراعی 1394 و 1395 در مزرعه پردیس ابوریحان بدون تنش رطوبتی کشت شد. در این مطالعه تیمارها شامل پنج سطح کودی صفر به عنوان شاهد (N0)، 50 (N1)، 100 (N2)، 150 (N3)، 200 کیلوگرم نیتروژن در هکتار (N4) به صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی، با سه تکرار ایجاد شدند. از داده‌های تیمارهای N0 و N4 در سال 1394 برای واسنجی و از باقیمانده داده‌ها برای صحت‌سنجی مدل استفاده گردید. در مرحله واسنجی مقدار پارامترهای ریشه میانگین مربعات خطای نسبی (RRMSE)، ضریب تعیین (R^2) و متوسط خطای اریب (MBE) در شبیه‌سازی زیست‌توده طی دوره رشد به ترتیب برابر 11/8%، 0/995 و 0/51 تن در هکتار برای N0 و 11/8%، 0/988 و 1/02- تن در هکتار برای N4 بدست آمد. در مرحله صحت‌سنجی مقدار RRMSE، R^2 و MBE به ترتیب برابر 19/06%، 0/920 و 0/92 تن در هکتار برای تخمین عملکرد دانه و 5/32%، 0/975 و 0/41 تن در هکتار برای تخمین زیست‌توده نهایی بدست آمد. نتایج بدست آمده حاکی از دقت بالای مدل در برآورد رطوبت ناحیه ریشه و بهره‌وری آب نرمال شده در تیمارهای مختلف بود. از طرف دیگر مشخص شد که مدل AquaCrop قادر نیست تغییرات زیست‌توده و پوشش گیاه طی دوره کشت در تیمارهای مختلف را همانند عملکرد نهایی زیست توده و دانه، نسبتا دقیق پیش‌بینی کند.

واژه‌های کلیدی: تنش کودی، شبیه‌سازی رشد گیاه، صحت سنجی، واسنجی، AquaCrop

مقدمه

با رشد روزافزون جمعیت و نیاز به مواد غذایی بیش‌تر، نقش کاربرد کودهای نیتروژنه در کنار آب به عنوان اصلی‌ترین عوامل رشد گیاه، به‌خصوص در مناطق گرم و خشک، برجسته‌تر شده است. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که در سال‌های گذشته، به دلیل اثر مثبت نیتروژن بر روی عملکرد گیاه، کودهای نیتروژنه بی‌رویه مورد استفاده قرار می‌گیرند که می‌تواند تهدیدی جدی در جهت آلودگی محیط زیست بشمار می‌رود (Ata-ul-karim et al., 2014). بنابراین باید مصرف کود نیتروژن بر اساس مقدار آب در دسترس گیاه بهینه گردد تا علاوه بر دست‌یابی به عملکرد پتانسیل، احتمال تلفات آن حداقل گردد.

استفاده از مدل‌های گیاهی در کنار مزارع آزمایشی ابزار مناسبی برای بهبود مدیریت کاربرد نیتروژن در کشاورزی تحت شرایط محیطی و اقلیم‌های متفاوت قلمداد می‌شود (Myers., 2005). اما در اغلب مدل‌های گیاهی به منظور بررسی تاثیر سطوح مختلف نیتروژن بر رشد و عملکرد گیاه از روابط پیچیده‌ای برای تخمین اجزای معادله بیلان نیتروژن در خاک و گیاه نظیر روابط جذب و تغییر شکل املاح استفاده می‌گردد که به پارامترهای متعددی برای واسنجی نیاز دارند. به همین دلیل این مدل‌ها در خیلی مواقع فقط برای پیش‌بینی عملکرد و رشد یک نوع گیاه خاص توسعه داده می‌شوند. بنابراین استفاده از این مدل‌ها برای سایر محصولات کشاورزی و در اقلیم‌های مختلف امکان‌پذیر نیست.

AquaCrop یک مدل گیاهی ساده و کاربر دوست است که توسط سازمان فائو به منظور شبیه‌سازی عملکرد انواع محصولات کشاورزی در اقلیم‌های مختلف ارایه شده است (Hsiao et al., 2009; Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009). این مدل برای بسیاری از گیاهان از جمله غلاتی مثل گندم، جو و ذرت در سراسر دنیا با موفقیت واسنجی و تست شده است (Heng et al., 2009; Andarzian et al., 2011). با توجه به این‌که پاسخ گیاه تحت تنش‌های مختلف در طول دوره کشت متفاوت است، برای

1- دانش آموخته دکتری گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران
2- استاد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران
3- استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران
(*- نویسنده مسئول: (Email: akhob@ut.ac.ir

پیش‌بینی عملکرد گیاه در تنش‌های مختلف کودی باید AquaCrop به درستی واسنجی شود. به همین دلیل در آخرین نسخه‌های مدل (نسخه‌های 4 و 5) برای شبیه‌سازی پاسخ گیاه به میزان حاصلخیزی خاک از یک روش نیمه کمی (Semi- quantitative) استفاده شده است که طی یک فرآیند خودکار واسنجی می‌گردد. در این روش به جای بررسی بیلان انتقال املاح در خاک و جذب گیاهی، مقدار تنش کودی وارد شده به گیاه و میزان ارتباط آن با عملکرد محصول بررسی می‌گردد. پارامترهای ورودی مورد نیاز در این روش به‌راحتی می‌توانند توسط اطلاعات برداشت شده از مطالعات قبلی در منطقه و یا کشاورزان بومی بدست بیایند. مدل AquaCrop با استفاده از این روش مشخص می‌کند که در چه سطح کودی یا حاصلخیزی، بهره‌وری آب محصول بهینه می‌گردد اما قادر نیست مقدار و نوع کود مورد نیاز برای این منظور را تعیین کند (Van Gaelen et al., 2014).

روش نیمه کمی برای اولین بار توسط ون گایلن و همکاران در کشت ذرت و گندم (در نپال)، تف[1] (در اتیوپی) و کینوا[2] (در بولیوی) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که روش نیمه کمی مورد استفاده در مدل AquaCrop قابلیت بالایی در شبیه‌سازی پارامترهایی نظیر رطوبت خاک در ناحیه ریشه، افزایش پوشش و زیست‌توده در طول فصل رشد تحت تنش‌های مختلف کودی (شامل کودهای آلی و معدنی مورد نیاز گیاه) و خشکی را دارد. آن‌ها دقت مدل را هم‌تراز با سایر مدل‌های گیاهی که از بیلان املاح برای شبیه‌سازی رشد گیاه در شرایط مختلف کودی استفاده می‌کنند، ارزیابی کردند (Van Gaelen et al., 2014). آکیوماگا و همکاران نیز توانایی این روش در شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده ذرت دیم تحت تیمارهای مختلف نیتروژن در شمال نیجریه را ارزیابی کردند (Akumaga et al., 2017). نتایج آن‌ها نیز حاکی از این بود که مدل AquaCrop با استفاده از روش نیمه کمی، علی‌رغم تعداد کم پارامترهای ورودی، عملکرد زیست‌توده و دانه را بادقت بالایی برای سطوح مختلف نیتروژن شبیه‌سازی می‌کند. علاوه بر این، نتایج آن‌ها نشان داد با توجه به این‌که مدل، حداکثر محصول را بدون در نظر گرفتن تنش‌های محیطی شبیه‌سازی می‌کند، بنابراین نتایج بدست آمده تا حدودی بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد می‌شود.

اکثر مناطق کشاورزی ایران در مناطق گرم و نیمه‌خشک واقع شده است. ذرت نیز به عنوان گیاهی چهار کربنه، یکی از مهم‌ترین غلاتی است که در این مناطق کشت می‌شود. میزان رشد و عملکرد پتانسیل محصول ذرت تا حد بسیار زیادی به مصرف بهینه آب و کود نیترورن در مزرعه بستگی دارد (Liu and Zhang., 2007). بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که تا به این‌جا روش نیمه کمی مورد استفاده در AquaCrop در بررسی اثر تنش کودی روی گیاه، در مناطق محدودی در سطح دنیا مورد ارزیابی قرار گرفته است. بنابراین، با توجه به تفاوت‌هایی که پارامترهای گیاهی، خاکی و اقلیمی در مناطق مختلف دارند، هدف اصلی در این مطالعه ارزیابی روش نیمه کمی مورد استفاده در AquaCrop به منظور شبیه‌سازی پارامترهایی از قبیل رطوبت خاک در ناحیه ریشه، تغییرات پوشش و زیست‌توده گیاهی طی دوره رشد و عملکرد نهایی دانه تحت تیمارهای مختلف نیتروژن در منطقه گرم و خشک ایران است. سپس پارامتر بهره‌وری آب (WP*) برآورد شده توسط مدل در هر تیمار نسبت به مقادیر محاسبه شده توسط داده‌های مزرعه‌ای، مقایسه شد. از آن‌جایی که در مناطق گرم و خشک ایران، کمبود نیتروژن بعد از آب اصلی‌ترین عامل محدود کننده رشد گیاه است، در این مطالعه نیتروژن به عنوان عنصر شاخص در حاصلخیزی خاک در نظر گرفته شد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در مزرعه تحقیقاتی اراضی کشاورزی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، واقع در شهرستان پاکدشت، یکی از مهم‌ترین مناطق کشاورزی جنوب‌شرقی تهران انجام شد. منطقه مورد مطالعه با ارتفاع 1020 متری از سطح دریا، از نظر جغرافیایی در طول ´66 °51 شرقی و عرض ´46 °35 شمالی واقع شده است. میانگین سالانه دمای هوای منطقه طی دهه گذشته در حدود 19 درجه سانتی‌گراد بوده است که ماه‌های جولای (تیر) و ژانویه (دی) به ترتیب با 34 و 6/8 درجه سانتی‌گراد بیش‌ترین و کم‌ترین میانگین دما را داشته‌اند. متوسط بارندگی در این منطقه 165 میلی‌متر در سال می‌باشد و براساس طبقه‌بندی دومارتن دارای اقلیمی خشک است. عمق خاک زراعی در منطقه مورد مطالعه 60 سانتی‌متر و بافت آن لوم بود. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب و خاک منطقه مورد مطالعه در جداول 1 و 2 نشان داده شده‌اند. مقدار تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از رابطه فائو پنمن- مونتیث و پارامترهای اقلیمی جمع‌آوری شد از ایستگاه هواشناسی واقع در دانشگاه بدست آورده شد (Allen et al., 1998).

گیاه ذرت (رقم سینگل کراس 704) در تاریخ 10 خرداد 1394 و 24 اردیبهشت 1395 به روش جوی و پشته کشت شد. بر اساس آزمون خاک قبل از کشت و مقادیر فسفر و پتاسیم موجود در آن (جدول 2) مشخص شد که خاک مزرعه مورد مطالعه هیچ‌گونه کمبودی از این عناصر ندارد. بنابراین تنها عنصر محدود کننده حاصلخیزی خاک، نیتروژن بود و تیمارهای کودی بر اساس آن طراحی شدند. در این مطالعه، تیمارها شامل پنج سطح صفر به عنوان شاهد (N0)، 50 (N1)، 100 (N2)، 150 (N3) و 200 کیلوگرم نیتروژن در هکتار (N4) توسط کود اوره (حاوی 46% نیتروژن) و به

1- Tef
2- Quinoa

صورت طرح بلوک‌های تصادفی و با سه تکرار ایجاد شدند. در طول هر دو فصل کشت40، 30 و 30 درصد از کل کود مشخص شده برای هر تیمار به ترتیب طی سه مرحله شش برگی، ساقه رفتن و گلدهی در اختیار گیاه قرار داده شد. در نهایت کشت سال اول بعد از 119 روز از تاریخ کاشت (5 مهر همان سال) و کشت سال دوم بعد از 115 روز از تاریخ کاشت (15 شهریور همان سال) برداشت شد.

برای هر کرت آزمایشی مساحتی حدود 25 مترمربع در نظر گرفته شد. فاصله ردیف‌ها در هر کرت 75 سانتی‌متر و فاصله بین هر گیاه در ردیف‌های کشت 18 سانتی‌متر بود. برای جلوگیری از تاثیر کرت‌ها روی نتایج یکدیگر بین آن‌ها از هر طرف حاشیه یک متری لحاظ گردید. به منظور تعیین زمان مناسب آبیاری تغییرات رطوبت خاک در طول فصل کشت با استفاده از روش انعکاس سنجی زمانی[1] (با دستگاه TDR) به طور مستمر در طول دوره کشت رصد می‌شد و بعد از اتمام میزان آب سهل الوصول و رسیدن رطوبت خاک به حدود 20 درصد حجمی، اقدام به آبیاری مجدد گردید تا گیاه با هیچ‌گونه تنش رطوبتی مواجه نشود. پراب‌های مخصوص TDR طی هر دو سال فقط در دو تیمار N0 و N3 نصب گردیدند و رطوبت برداشت شده فقط به تیمارهای مذکور تعلق داشت. مجموع آب آبیاری و میزان تبخیر - تعرق مرجع در طول دوره کشت به ترتیب برابر 779 و 725 میلی‌متر برای سال 1394 و 797 و 776 میلی‌متر برای سال 1395 بود.

نمونه‌های گیاهی در هر دو سال، بعد از کاشت بذر تا انتهای فصل کشت طی شش نوبت برداشت شدند. در هر مرحله نمونه‌برداری شش گیاه از ردیف‌های میانی هر کرت آزمایشی انتخاب و از سطح خاک بریده شده و بعد از انتقال سریع به آزمایشگاه در آون با دمای 70 درجه سانتی‌گراد خشک شدند. فرآیند خشک شدن در آون تا جایی‌که وزن نمونه‌ها به ثبات می‌رسید ادامه داشت. سپس وزن خشک نمونه‌ها که شامل اندام هوایی گیاه بود اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، زمان گلدهی، طول بازه زمان گلدهی، بیش‌ترین پوشش گیاهی و زمان رسیدن به آن، زمان شروع پیری و رسیدگی کامل گیاه با استفاده

از مشاهدات مزرعه‌ای با دقت ثبت شد. در زمان برداشت نهایی مقدار عملکرد زیست‌توده نهایی و عملکرد دانه (در رطوبت 15%) اندازه‌گیری شد.

مقدار پوشش گیاهی طی هر دو دوره کشت سال 1394 و 1395 به ترتیب در 6 و 22 مرحله با استفاده از تهیه عکس‌های دیجیتال و تحلیل آن‌ها توسط نرم‌افزار کانوپئو[2] طبق روشی که توسط پاتریکنانی و اچسنر تشریح شده است، برآورد گردید (Patrignani and Ochsner., 2015). همچنین، تجزیه و تحلیل واریانس داده‌های اندازه‌گیری شده (ANOVA) با استفاده از نرم‌افزار SAS (Statistical Analysis Software) صورت گرفت. همچنین برای مقایسه میانگین از آزمون LSD (least significant difference) ($P\leq0.05$) استفاده شد. در همین راستا مشخص شد که سال‌های آزمایش هیچ اثر معنی‌داری روی پارامترهای اندازه‌گیری نداشته و به همین دلیل از داده‌های هر دو سال در تجزیه و تحلیل‌ها استفاده گردید.

1- Time-Domain Reflectometer
2- Canopeo

روش نیمه کمی در AquaCrop

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). زمانی که گیاه تحت تنش کودی نباشد، AquaCrop عملکرد محصول (Y) را بر اساس مقدار آب تعرق یافته از گیاه (Tr) محاسبه می‌کند. مقدار تعرق به عواملی نظیر شرایط اقلیمی (تبخیر - تعرق مرجع)، مقدار پوشش گیاهی (CC) و ضریب تعرق گیاهی (KC_{Tr}) بستگی دارد. در AquaCrop توسعه پوشش گیاه از ابتدای کشت (CC_0) تا رسیدن به حداکثر مقدار آن (CCx) با استفاده از یک تابع منطقی[3] و ضریب رشد پوشش[4] (CGC) تعیین می‌گردد. همچنین در انتهای کشت مقدار کاهش CC با استفاده از ضریب کاهش پوشش[5] (CDC) تعیین می‌شود. سپس مقدار تعرق محاسبه شده نیز با استفاده از پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده[6] (WP*) به مقدار زیست‌توده گیاهی[7] (B) تبدیل می‌گردد (رابطه 2). در نهایت مقدار عملکرد دانه با استفاده از شاخص برداشت[8] (HI) محاسبه خواهد شد. علاوه بر این، AquaCrop رطوبت در ناحیه ریشه (Wr) را با استفاده از محاسبه اجزای بیلان آب در خاک و گیاه برای هر روز در طول دوره کشت برآورد می‌کند. زمانی که مقدار رطوبت خاک از محدوده رطوبت سهل الوصول برای هر گیاه کم‌تر گردد AquaCrop اثر تنش خشکی را در توسعه CC، میزان Tri و HI در نظر می‌گیرد. مجموع این محاسبات در روابط 1 تا 3 نشان داده شده‌اند (Rase et al., 2012).

$$Tr_i = K_{CTrx} . CC . ET_{Oi} \quad (1)$$

$$B = WP^* \times \sum_{i=1}^{n} \frac{Tr_i}{ET_{Oi}} \quad (2)$$

$$Y = HI \times B \quad (3)$$

3- Logistic function
4- canopy growth coefficient
5- canopy decline coefficient
6- Normalized water productivity
7- Biomass
8- Harvest index

در این روابط Tri مقدار تعرق گیاه در روز i ام (میلی‌متر بر روز)، CC نسبت پوشش گیاهی در طول فصل (بدون بعد)، ETOi مقدار تبخیر و تعرق مرجع در روز i ام (میلی‌متر بر روز)، KCTrx حداکثر ضریب تعرق گیاهی (بدون بعد)، B مقدار زیست توده تولید شده (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.

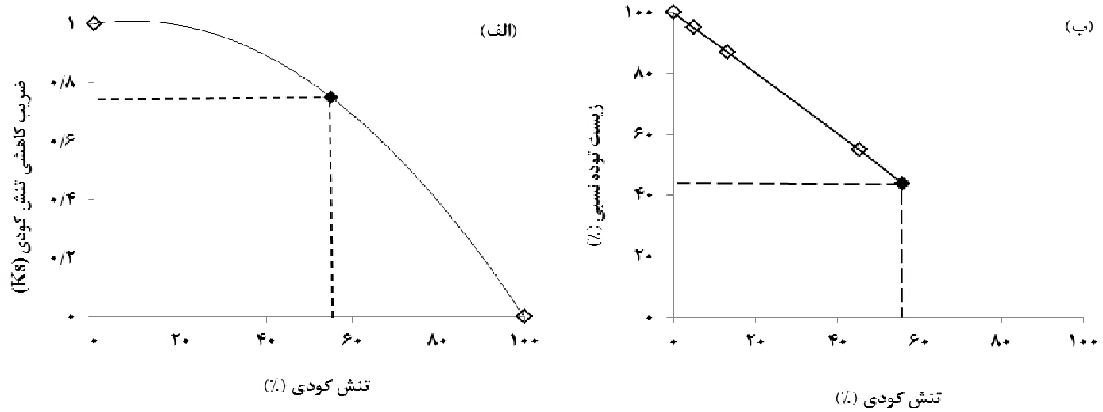
جدول 1- نتایج آنالیز شیمیایی آب، آبیاری در مزرعه آزمایشی

پارامتر	مقدار در سال 1394	مقدار در سال 1395
نیترات ($mg.cm^{-3}$)	0/020	0/024
آمونیوم ($mg.cm^{-3}$)	0/017	0/015
نیتروژن (%)	0/01	0/01
فسفر در دسترس ($mg.cm^{-3}$)	<0/0001	<0/0001
پتاسیم در دسترس ($mg.cm^{-3}$)	0/005	0/005
اسیدیته (pH)	7/9	7/7
هدایت الکتریکی ($dS.m^{-1}$)	0/71	0/60

جدول2- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی (متوسط دو سال)

پارامتر		عمق 0 تا 20 (cm)	عمق 20 تا 40 (cm)	عمق 40 تا 60 (cm)
جرم مخصوص ظاهری ($g.cm^{-3}$)		1/60	1/61	1/61
ظرفیت زراعی (درصد حجمی)		26/2	26/6	27/9
رطوبت پژمردگی (درصد حجمی)		13/0	13/3	13/8
نیترات ($mg.cm^{-3}$)		0/015	0/010	0/005
آمونیوم ($mg.cm^{-3}$)		0/012	0/007	0/004
نیتروژن (%)		0/1	0/08	0/05
ماده آلی (%)		1/41	0/85	0/56
بافت خاک		لوم	لوم	لوم
درصد ذرات خاک	رس	13/6	13/6	17/6
	سیلت	34/6	36/6	34/6
	شن	51/8	49/8	47/8

نرخ رشد گیاه و تولید زیست‌توده با افزایش تنش کودی، کاهش می‌یابد. این واکنش گیاه به تنش کودی با نوع گیاه و شرایط اقلیمی و خاک منطقه کشت تغییر می‌کند. مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی رشد گیاهی که تحت تاثیر تنش کودی قرار دارد، بجای استفاده از معادلات پیچیده بیلان املاح در خاک از یک روش نیمه کمی برای تعیین شدت و درجه تنش کودی وارد شده به گیاه استفاده می‌کند که باید بر اساس نوع گیاه، اقلیم و خاک واسنجی گردد. در این روش اثرات تنش کودی بر روی توسعه CC و رشد زیست توده شبیه‌سازی می‌گردد. برای این منظور، نرخ رشد CC (CGC) و در نتیجه مقدار CCx بر اساس مقدار تنش کاهش داده می‌شود. علاوه بر این مقدار CC بعد از رسیدن به حداکثر مقدار خود در حدود اواسط فصل کشت، بلافاصله با شیبی تقریبا یکنواخت کاهش می‌یابد (CDC). شبیه-سازی کاهش CC تحت تاثیر تنش کودی از این جهت بسیار مهم است که باعث کاهش تعرق روزانه و در نتیجه تغییرات بیلان آب خاک می‌گردد (Van Gaelen et al., 2014). از طرف دیگر، در روش مذکور کاهش تولید زیست توده روزانه تحت تاثیر تنش کودی، با کاهش مقدار *WP لحاظ می‌گردد. در مجموع، برای شبیه‌سازی کاهش CC و *WP از ضرایب کاهشی $Ks_{exp,f}$ برای توسعه پوشش گیاه، Ks_{CCx} برای حداکثر پوشش گیاه و Ks_{WP} برای تولید زیست توده گیاه استفاده می‌گردد که مقادیر آن‌ها در دامنه صفر (100 درصد تنش کودی) تا یک (صفر درصد تنش کودی) متغیر هستند. علاوه بر این، از ضریب $fC_{decline}$ برای افت روزانه پوشش گیاه بلافاصله بعد از رسیدن به بیشترین مقدارش استفاده می‌شود که دامنه تغییر آن از صفر (صفر درصد تنش کودی) تا 1 درصد در روز (100 درصد تنش کودی) می‌باشد. در مدل AquaCrop، با واسنجی پاسخ گیاه به تنش کودی، ارتباط بین هر کدام از ضرایب Ks و نیز ضریب $fC_{decline}$ با درجه تنش کودی که می‌تواند خطی و یا به صورت منحنی محدب یا مقعر باشد، مشخص می‌شود (شکل 1).



شکل 1- الف- منحنی واسنجی شده یکی از ضرایب کاهشی تنش کودی (Ks) به ازای زیست‌توده نسبی (Brel) برابر 44% (نقطه مشکی رنگ نشان‌دهنده نقطه واسنجی شده می‌باشد که شکل منحنی ضریب کاهشی بر اساس آن تعیین می‌گردد). ب- رابطه بین درصد تنش کودی با زیست‌توده نسبی.

مدل از دو نقطه معلوم صفر و 100 درصد تنش کودی که به آن‌ها اشاره شد، به علاوه نقطه واسنجی (جمعاً سه نقطه) که از اطلاعات ورودی به مدل بدست می‌آید شکل چهار منحنی برای ضرایب Ks و $fC_{decline}$ را تعیین می‌کند (شکل 1- الف). بعد از مشخص شدن این منحنی‌ها، به ازای هر درجه تنش کودی، ضرایب مذکور محاسبه شده و بدین ترتیب پارامترهایی نظیر پوشش، تبخیر و تعرق، رطوبت خاک، بهره‌وری مصرف آب، زیست توده و عملکرد نهایی دانه توسط مدل قابل تخمین خواهند بود. در نهایت رابطه بین زیست توده نسبی و درجه تنش (شکل 1- ب) نیز تعیین می‌گردد (Rase et al., 2012).

برای ساده کردن واسنجی، یک فرآیند خودکار در نسخه‌های اخیر AquaCrop (نسخه‌های 4 و 5) توسعه داده شده است. در این فرآیند داده‌های مزرعه‌ای شامل CCx، زیست‌توده نسبی[1] (Brel) و وضعیت کاهش پوشش طی فصل کشت (پارامتر کیفی) در دو تیماری که یکی از آن‌ها تحت تنش کودی (ترجیحا بیش‌ترین تنش) قرار دارد (Stress field) و دیگری هیچ تنش کودی را طی دوره رشد تجربه نمی‌کند (Reference field) به عنوان پارامترهای ورودی مورد نیاز می‌باشند. Brel یا زیست‌توده نسبی نیز بدین ترتیب محاسبه می‌گردد:

$$B_{rel} = \frac{B_{stress}}{B_{ref}} \times 100\% \quad (4)$$

در این رابطه، Brel زیست‌توده نسبی (که دامنه تغییرات آن بین صفر تا 100 درصد است)، Bstress مقدار زیست‌توده بدست آمده در تیمار تحت تنش کودی حداکثر (تن در هکتار)، Bref مقدار زیست‌توده بدست آمده در تیمار بدون تنش کودی (تن در هکتار) می‌باشد. هر دو پارامتر Bstress و Bref باید در شرایط بدون تنش رطوبتی و یا سایر تنش‌های زیستی و حرارتی بدست آمده باشند. از طرف دیگر این پارامترها در هر منطقه می‌توانند با استفاده از نتایج سایر مطالعات و یا تجربیات کشاورزان بومی بدست بیایند (Van Gaelen et al., 2014). بر اساس مقادیر Brel و CCx در دو تیماری که شامل Bstress و Bref هستند، هر کدام از چهار منحنی Ks به طور خودکار توسط الگوریتم بهینه‌سازی تکرار[2] تعیین می‌شود. جزییات بیش‌تر تر راجع به فرآیند واسنجی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی پاسخ گیاه به تنش کودی در دستورعمل مدل توسط ریس و همکاران تشریح شده است (Rase et al., 2012).

محاسبه پارامتر بهره‌وری آب

در مدل AquaCrop به‌واسطه پارامتر بهره‌وری آب بین نرخ رشد و تعرق گیاه رابطه‌ای خطی برقرار می‌گردد (Steduto and Alberizio, 2005). پارامتر بهره‌وری آب در AquaCrop بر اساس شرایط اقلیمی و غلظت CO2 موجود در اتمسفر پیرامون نرمال می‌گردد (WP*) و مقدار آن در شرایطی که تنش کودی وجود نداشته باشد در طول فصل کشت تقریبا ثابت در نظر گرفته می‌شود. اما با افزایش درجه تنش کودی مقدار آن کاهش می‌یابد. معادله تعیین پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده به صورت رابطه 5 می‌باشد (Steduto et al., 2009):

$$WP^* = \left[\frac{B}{\sum\left(\frac{Tr}{ET_o}\right)}\right]_{[CO_2]} \quad (5)$$

در این رابطه، WP* بهره‌وری آب نرمال شده (گرم بر مترمربع)، B مقدار زیست‌توده اندازه‌گیری شده در تیمارهای مختلف کودی (گرم

1- Relative biomass

2- Iterative optimization algorithm

بر مترمربع)، Tr مقدار تعرق محاسبه شده (میلی‌متر بر روز) با استفاده از مدل AquaCrop (براساس پارامترهای ورودی مربوط به رشد و پوشش اندازه‌گیری شده گیاه، شرایط اقلیمی و رطوبت خاک) و ETo مقدار تبخیر و تعرق مرجع روزانه (میلی‌متر بر روز) که با استفاده از رابطه پنمن - مونتیث محاسبه می‌گردد. این پارامترها برای هر تیمار جداگانه محاسبه و اندازه‌گیری شد و در نهایت مقدار WP* بدست آورده شد (Yuan et al., 2013). در این مطالعه مقدار WP* بدست آمده از رابطه 5 با مقدار WP* برآورد شده توسط مدل AquaCrop (بعد از شبیه‌سازی هر تیمار) مقایسه شد و مقدار دقت مدل در برآورد WP* توسط شاخص‌های آماری محاسبه گردید.

واسنجی و صحت سنجی AquaCrop

واسنجی مدل ابتدا بر اساس داده‌های تیمار N4 مربوط به سال 1394 که تحت تنش کودی نبود انجام گرفت. بدین ترتیب، ابتدا آن دسته از پارامترهای مدل که برای هر نوع گیاه و تحت هر شرایطی ثابت در نظر گرفته می‌شوند (conservative)، بر اساس مقادیر توصیه شده برای ذرت در دستورعمل کاربرد مدل AquaCrop تعیین شدند (جدول 3). سپس تعدادی دیگر از پارامترهای گیاهی مدل که به رقم و مدیریت کشت بستگی داشتند (non-conservative) بر اساس مشاهدات مزرعه‌ای و یا روش سعی و خطا تعیین گردیدند. پارامترها در روش سعی و خطا تا جایی تغییر داده شدند که نتایج شبیه‌سازی مقدار عملکرد دانه و رطوبت خاک نسبت به نتایج مشاهداتی کم‌ترین خطا را داشته باشند. سپس برای تعیین دقیق‌تر پارامترها (fine-tuned)، مقادیر زیست‌توده و پوشش گیاهی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده نیز مقایسه شدند و پارامترها تا استحصال دقیق‌ترین جواب تغییر داده شدند (Mousavizadeh et al., 2016; Akumaga et al., 2017). نتایج بدست آمده در این مرحله در جدول 4 گزارش شده است. در ادامه، پاسخ گیاه به تیمارهای مختلف نیتروژن نیز بر اساس داده‌های دو تیمار N0 و N4 مربوط به سال 1394 واسنجی شد. طبق روش ارایه شده در دستورعمل مدل AquaCrop، از بین تیمارهای مورد بررسی، تیمار N4 که بر اساس نتایج مطالعه رنجبر (1394) تحت هیچ‌گونه تنش نیتروژنی قرار نداشت به عنوان تیمار مبنی (Reference) در نظر گرفته شد (Rase et al., 2012). تیمار N0 که تحت بیش‌ترین تنش نیتروژنی قرار داشت به عنوان تیمار تنش (Stress) نیز انتخاب شد. داده‌های ورودی در این مرحله واسنجی عبارت بودند 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 44%، 78% و متوسط (medium) در نظر گرفته شد. علاوه بر این CCx برای تیمار N4 در طول دوره کشت برابر 93% ثبت شده بود.

جدول 3- پارامترهای ثابت (Conservative) ورودی به مدل AquaCrop برای گیاه ذرت .

علامت	شرح	Value	واحد
Tbase	دمای پایه رشد	8	$^{\circ}C$
Tupper	دمای بالا	30	$^{\circ}C$
CCo	پوشش گیاهی هم‌زمان با ظهور جوانه 90% از بذرها	6/5	cm^2
CGC	ضریب رشد پوشش	19/9	% day^{-1}
$Kc_{Tr,x}$	ضریب گیاهی ذرت در دوره رشد کامل قبل از شروع پیری	1/05	-
-	کاهش ضریب گیاهی در اثر پیری با کمبود نیتروژن و غیره...	0/3	% day^{-1}
CDC	ضریب کاهش پوشش	12/7	% day^{-1}
pexp,lower	آستانه تخلیه آب خاک برای گسترش تاج پوشش - سطح آستانه بالا	0/14	-
pexp,upper	آستانه تخلیه آب خاک برای گسترش تاج پوشش - سطح آستانه پایین	0/72	-
-	عامل شکل برای ضریب تنش آبی رشد گیاه	2/9	-
psto	آستانه تخلیه آب خاک برای کنترل روزنه گیاه - سطح آستانه بالا	0/69	-
-	عامل شکل ضریب تنش آب برای کنترل روزنه	6	-
psen	آستانه تخلیه آب خاک برای پیری تاج پوشش - سطح آستانه بالا	0/69	-
-	عامل شکل ضریب تنش آب برای پیری تاج پوشش	2/7	-
WP*	بهره‌وری آب نرمال شده برای تبخیر و تعرق و دی اکسیدکربن	33/7	$g.m^{-2}$

جدول 4- پارامترهای گیاهی واسنجی شده (Non-Conservative) برای گیاه ذرت بر اساس مشاهدات مزرعه‌ای در تیمار N4 مربوط به سال 1394 برای منطقه پاکدشت.

علامت	شرح	Value	واحد
-	زمان جوانه‌زنی	10	Day*
CCx	حداکثر پوشش گیاهی	93	%
-	زمان رسیدن به حداکثر پوشش گیاهی	63	Day
-	زمان شروع پیری	98	Day
-	زمان رسیدگی فیزیولوژیک	119	Day
-	زمان گلدهی	65	Day
-	زمان رسیدن به حداکثر عمق ریشه	60	Day
-	طول دوره گلدهی	10	Day
Zx	حداکثر عمق موثر ریشه	65	cm
Zn	حداقل عمق موثر ریشه	30	cm
HIo	شاخص برداشت مرجع	40	%
-	تراکم کشت	74000	$Plant.ha^{-1}$

* روز بعد از کاشت.

از داده‌های باقی‌مانده در سال 1394 و نیز کل داده‌های سال 1395 برای صحت‌سنجی استفاده شد. برای این منظور، با استفاده از مدل واسنجی شده مقادیرعملکرد دانه، رشد زیست‌توده و پوشش گیاهی و تغییرات رطوبت خاک در تیمارهای N1، N2 و N3 در سال 1394 و کل تیمارهای سال 1395 برآورد و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شدند. شایان ذکر است که برای شبیه‌سازی در سال دوم از داده‌های اقلیمی و زراعی مربوط به همان سال نیز استفاده گردید.

شاخص‌های آماری مورد استفاده در مراحل واسنجی و صحت-سنجی مدل شامل ضریب تبیین(R2)، ریشه متوسط مربعات خطای نسبی (RRMSE) و حداقل خطای اریب (MBE) بودند که طبق روابط 6 تا 8 محاسبه شدند:

$$RRMSE = \frac{RMSE \times 100}{\bar{O}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - S_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (6)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(S_i - \bar{S})^2}} \right)^2 \quad (7)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)}{n} \quad (8)$$

که در این روابط Oi برابر مقادیر مشاهده‌ای، Si مقادیر شبیه-سازی شده، متوسط مقادیر مشاهده‌ای و $\bar{S}$ متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده، n تعداد داده‌های مشاهده‌ای 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).

نتایج و بحث

واسنجی مدل AquaCrop

نتایج حاصل از واسنجی پاسخ گیاه به تنش کودی بر اساس داده-های دو تیمار N0 و N4 (مربوط به سال 1394)، تعیین اثر تنش بر چهار ضریب کاهش توسعه پوشش (CGC reduction)، کاهش حداکثر پوشش (CCx reduction)، متوسط کاهش پوشش (درصد در روز) و درصد کاهش *WP بود که مقادیر متناظر هر کدام از این ضرایب به ترتیب برابر 2%، 22%، 0/86 (%/day) و 56% بدست آمد. با استفاده از این ضرایب، مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی با یکدیگر مقایسه شدند.

نتایج بدست آمده از مدل واسنجی شده در تخمین رطوبت خاک ناحیه ریشه (Wr) حاکی از قابلیت بالای مدل در این بخش بود. مقدار RRMSE، R2 و MBE برای تیمار N0 به ترتیب برابر 5/49%، 0/822، 0/88% (حجمی) بدست آمد. مقدار هر چه دقیق‌تر تخمین Wr در تخمین اجزای بیلان آب در خاک و همچنین تبخیر و تعرق بسیار اهمیت دارد و در کل باعث تخمین دقیق‌تر عملکرد محصول توسط مدل می‌گردد (Ahmadi et al., 2015; Geerts and Raes., 2010). دقت مدل در تخمین Wr با نتایج ارایه شده توسط سایر مطالعات (برای مثال مطالعه ون گایلن و همکاران) مطابقت زیادی داشت (Van Gaelen et al., 2014). همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها اشاره شد، مقدار رطوبت در ناحیه ریشه فقط در دو تیمار N0 و N3 در طول دوره کشت هر سال اندازه‌گیری می-

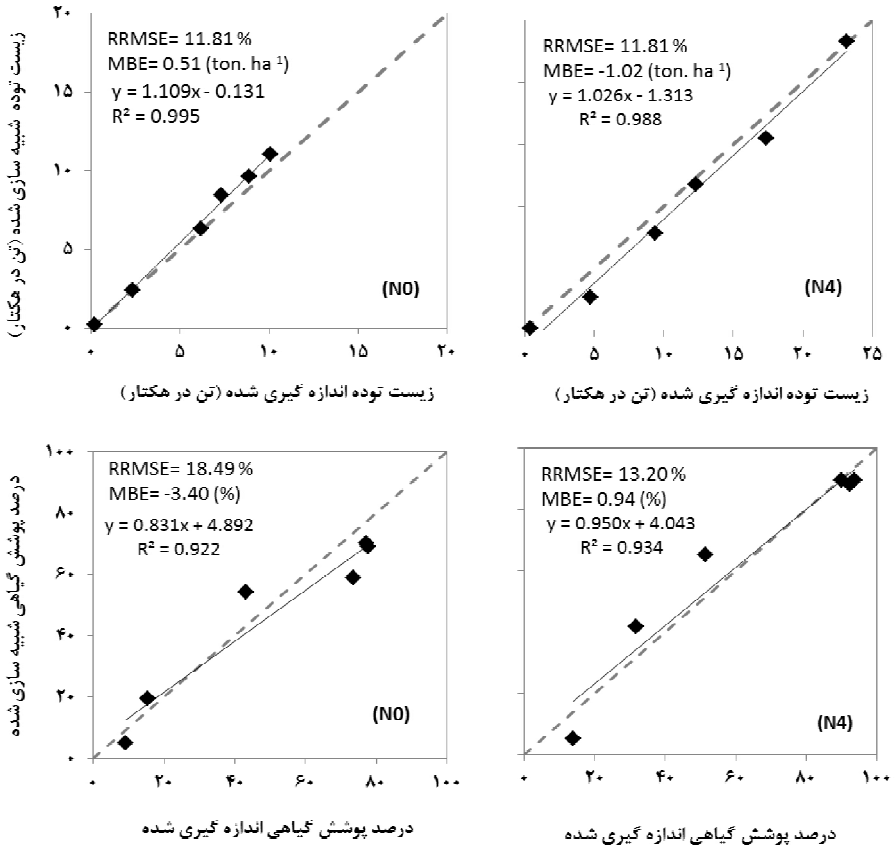
شد. بنابراین مقدار Wr در تیمار N4 اندازه‌گیری نشده بود و در بخش واسنجی مورد بررسی قرار نگرفت.

علاوه بر این مقدار افزایش CC در طول فصل رشد تطابق بالایی با رشد زیست‌توده گیاه دارد. نتایج نشان دادند که CC در تیمار N0 تحت تاثیر تنش نیتروژنی کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته که توسط مدل به خوبی شبیه‌سازی شده است. این قابلیت مدل نیز در مطالعه ون گایلن و همکاران بر روی ذرت و گندم اشاره شده بود (Van Gaelen et al., 2014). نتایج ارایه شده در شکل 2 نیز نشان دهنده عملکرد خوب مدل با RRMSE، R^2 و MBE به ترتیب برابر 18/49%، 0/922، 3/40%- برای تیمار N0 و 13/20%، 0/934، 0/94% برای تیمار N4 می‌باشد. این در حالی است که دقت برآورد CC توسط مدل در تیمار N4 بیش‌تر از تیمار N0 بود.

تنش کودی با تاثیر بر روی توسعه پوشش گیاه می‌تواند بر افزایش زیست‌توده نیز موثر باشد. نتایج بدست آمده در مرحله واسنجی نشان می‌دهند که مدل در برآورد تولید زیست‌توده طی فصل رشد عملکرد خوبی داشته است. ارتباط بین مقادیر زیست‌توده تخمینی و اندازه‌گیری شده نیز در شکل 2 نشان داده شده است. مقدار RRMSE، R^2 و MBE در شبیه‌سازی زیست‌توده به ترتیب برابر 11/81%، 0/995 و 0/51 تن در هکتار برای N0 و 11/81%، 0/988 و 1/02- تن در هکتار برای N4 بدست آمد. در نهایت مشخص شد که در مرحله واسنجی، مدل به خوبی قادر به تخمین پارامترهای زیست‌توده، پوشش گیاهی و رطوبت خاک در طول دوره رشد گیاه بود.

صحت‌سنجی مدل AquaCrop

در مرحله صحت‌سنجی مدل، مقادیر اندازه‌گیری شده Wr، CC، زیست‌توده و عملکرد نهایی دانه در تیمارهای N1، N2 و N3 مربوط به سال 1394 و همه تیمارهای مربوط به سال 1395 با مقادیر نظیر شبیه‌سازی شده مقایسه گردید. جدول 5 مقدار شاخص‌های آماری بدست آمده از مقایسه مقادیر تخمینی و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج، عملکرد مدل در تخمین Wr مناسب ارزیابی شد.



شکل 2- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده زیست‌توده و پوشش گیاهی در طول دوره کشت سال 1394 برای دو تیمار N0 و N4 طی مرحله واسنجی.

مقدار RRMSE برای تیمار N3 در سال 1394 و تیمارهای N0 و N3 در سال 1395 به ترتیب برابر 3/92%، 10/78% و 8/22% بود که نشان دهنده توانایی مدل در برآورد رطوبت ناحیه ریشه گیاه در طول فصل رشد است. مقدار R^2 و MBE برای تیمارهای مذکور به ترتیب در بازه 0/805 تا 0/857 و 0/49- تا 0/19- درصد حجمی قرار داشت. در مجموع نتایج بدست آمده در این مطالعه با نتایج ارایه شده توسط ون گایلن و همکاران برای تخمین Wr که در دامنه 6% تا 13% (حجمی) گزارش شده بود تطابق بالایی داشت (Van Gaelen et al., 2014).

عملکرد مدل در تخمین تغییرات CC در طول فصل رشد طی مرحله صحت‌سنجی متغیر بود. مقدار RRMSE در بیش‌ترین حالت برابر 24/12% و مربوط به تیمار N0 (متعلق به سال 1395) بود. از طرف دیگر مقدار این شاخص در کم‌ترین حالت برابر 16/23% در تیمار N3 (متعلق به سال 1394) بدست آمد. علاوه بر این، مقدار دامنه تغییرات R^2 و MBE برای CC به ترتیب برابر 0/635 تا 0/939 و 2/30 تا 10/04 درصد بدست آمد. این نتایج حاکی از آن هستند که دقت مدل در برآورد CC سال 1394 تا حدودی بالاتر از سال 1395 بوده است.

از آن‌جایی که مدل با استفاده از دو تیمار N0 و N4 در سال 1394 واسنجی شده است، بنابراین دقت بالاتر مدل در برآورد پوشش گیاه در سال 1394 می‌تواند به همین دلیل بوده باشد.

نتایج شبیه‌سازی تولید زیست‌توده در طول دوره رشد گیاه همسو با نتایج بدست آمده در برآورد CC بود. مقدار دامنه تغییرات RRMSE در تیمارهای مختلف کودی از 6/09% تا 32/39% بود. همچنین مقدار

دامنه تغییرات R^2 و MBE به ترتیب از 0/964 تا 0/997 و 0/81- تا 2/31 تن در هکتار بود. نتایج صحت‌سنجی نشان داد که مدل زیست توده را در سال 1394 دقیق‌تر از سال 1395 شبیه‌سازی کرده بود. علت آن نیز می‌تواند همان دلیل مطرح شده برای CC باشد. این در حالی‌است که همانند نتایج بدست آمده در این مطالعه، هنگ و همکاران و موسوی‌زاده و همکاران در مطالعه خود گزارش داده‌اند که مدل AquaCrop در تخمین زیست‌توده ذرت و کلزا طی فصل رشد خیلی دقیق نیست (Mousavizadeh et al., 2016; Heng et al., 2009).

برآورد دقیق عملکرد دانه و زیست‌توده نهایی در مدل‌های گیاهی از اهمیت به مراتب بالاتری از تخمین زیست‌توده در طول فصل رشد برخوردار است. مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده عملکرد نهایی زیست‌توده در شکل 3 نشان داده شده است. مقدار RRMSE، R^2 و MBE برای مرحله صحت‌سنجی به ترتیب برابر 5/32%، 0/975 و 0/41 تن در هکتار بدست آمد. این مقادیر همانند نتایج بدست آمده در سایر مطالعات (Van Gaelen et al., 2014; Akumaga et al., 2017) نشان دهنده دقت بالای مدل در برآورد زیست‌توده نهایی توسط مدل هستند (RRMSE< 10%).

علاوه بر این، دقت مدل در برآورد عملکرد دانه در انتهای فصل کشت نیز قابل قبول بود (RRMSE< 20%). همان‌طورکه در شکل 3 نشان داده شده است، مقدار RRMSE، R^2 و MBE به ترتیب برابر 19/06%، 0/920 و 0/92 تن در هکتار بدست آمد. با این حال، مدل تا حدودی مقادیر عملکرد دانه را در اکثر تیمارها بیش‌تر از مقادیر واقعی برآورد می‌کند. آکیوماگا و همکاران گزارش دادند که این بیش برآورد مدل خیلی عجیب و دور از ذهن نیست و دلیل آن ساختار مدل است که برای برآورد بیش‌ترین مقدارعملکرد در شرایط ایده‌آل طراحی شده است. بدین ترتیب چنان‌چه در واقعیت فاکتورهایی نظیر زمان نامناسب کاربرد کود یا آفات و بیماری‌ها روی عملکرد گیاه تاثیر بگذارند و باعث کاهش عملکرد نهایی شوند، مدل‌قادر به در نظر گرفتن این عوامل نیست و بدین ترتیب به ناچار در نتایج بیش‌برآورد صورت می‌گیرد (Akumaga et al., 2017).

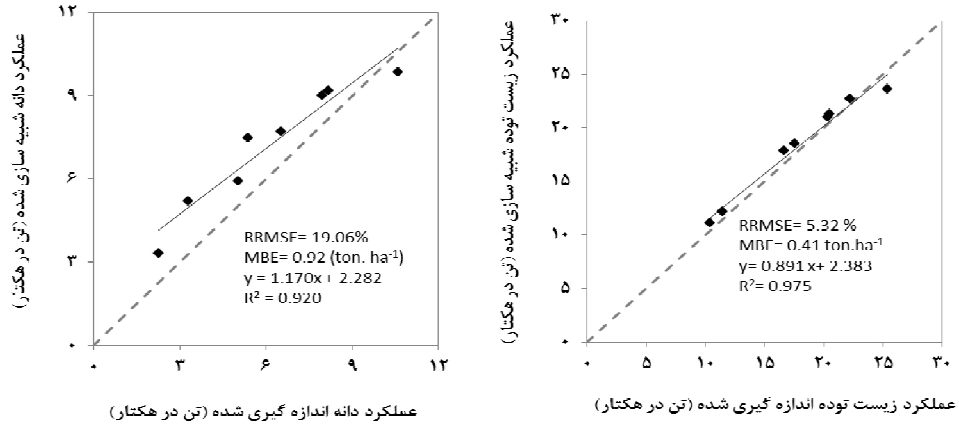
در شکل 4 مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده *WP برای تیمارها در مرحله صحت‌سنجی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مقدار RRMSE، R^2 و MBE به ترتیب برابر 9/02%، 0/907 و 0/642- گرم بر مترمربع بدست آمد. این نتایج نشان دهنده دقت بالای مدل واسنجی شده در برآورد *WP در تیمارهای مختلف کودی است. از طرف دیگر در این شکل به خوبی مشخص شده است که مقدار نیتروژن مصرفی و *WP در طول دو سال با یکدیگر رابطه مستقیم دارند و مقدار *WP با افزایش نیتروژن افزایش می‌یابد.

نتایج بدست آمده همگی نشان‌دهنده قابلیت بالای روش نیمه کمی مورد استفاده در مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی پاسخ گیاه ذرت تحت تنش‌های مختلف کود نیتروژن می‌باشند و در راستای نتایج بدست آمده از مطالعات آکیوماگا و همکاران و ون گایلن و همکاران در مناطق متفاوت هستند (Van Gaelen et al., 2014; Akumaga et al., 2017). همان‌طور که در سایر مطالعات ثابت شده بود که دقت مدل با افزایش تنش خشکی کاهش می‌یابد، در این مطالعه نیز مشخص شد که با افزایش تنش نیتروژنی دقت مدل کاهش خواهد داشت. از طرف دیگر، ممکن است با افزایش تنش نیتروژنی و حساس‌تر شدن گیاه، تاثیر سایر تنش‌های محیطی که توسط مدل در نظر گرفته نمی‌شوند روی گیاه بیش‌تر شود و همین عامل باعث کاهش دقت مدل در تیمارهای تحت تنش نیتروژنی بیش‌تر باشد. در مجموع، روش نیمه کمی ارایه شده توسط مدل AquaCrop به خوبی قادر است تاثیر کود نیتروژن در تولید زیست-توده و عملکرد نهایی گیاه تحت شرایط اقلیمی گرم و خشک را لحاظ کند.

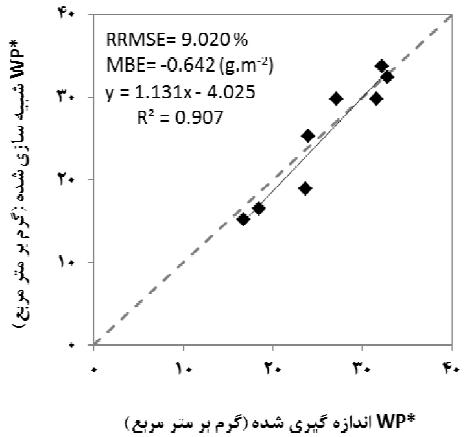
جدول 5- شاخص‌های آماری بدست آمده در مرحله صحت‌سنجی پاسخ گیاه به سطوح مختلف نیتروژن طی دوره کشت سال‌های 1394 و 1395.

پارامتر	شاخص آماری	1394			1395				
		N1	N2	N3	N0	N1	N2	N3	N4
رطوبت خاک	R^2	*	*	0/857	0/805	*	*	0/826	*
	RRMSE (%)	*	*	3/92	10/78	*	*	8/22	*
	MBE (vol %)	*	*	-0/19	-0/49	*	*	-0/25	*
پوشش گیاهی	R^2	0/939	0/930	0/915	0/635	0/672	0/791	0/816	0/802
	RRMSE (%)	18/45	21/53	23/16	24/12	22/56	24/05	22/72	20/57
	MBE (%)	5/98	7/93	2/30	-2/66	-1/81	9/74	10/04	8/36
زیست توده	R^2	0/985	0/996	0/991	0/979	0/964	0/967	0/983	0/997
	RRMSE (%)	19/12	6/09	10/47	29/16	29/20	32/39	20/70	9/18
	MBE ($ton.ha^{-1}$)	1/08	-0/05	-0/81	1/53	1/57	2/31	1/71	0/26

* اندازه‌گیری نشده است.



شکل 3- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه و زیست‌توده نهایی در مرحله صحت‌سنجی



شکل 4- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده (WP*) در مرحله صحت‌سنجی

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، روش نیمه کمی مورد استفاده در مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی پاسخ گیاه ذرت در تیمارهای مختلف نیتروژن ارزیابی شد. بدین منظور، بعد از واسنجی مدل، پارامترهای

تغییرات رطوبت خاک، زیست‌توده و پوشش گیاهی طی فصل رشد و نیز عملکرد زیست‌توده و دانه در انتهای فصل کشت در تیمارهای مختلف شبیه‌سازی و با مشاهدات مزرعه‌ای مقایسه شد. این مطالعه برای شرایط آبیاری کامل ذرت و تحت شرایط اقلیمی گرم و خشک در ایران انجام شد. نتایج نشان دادند که مدل AquaCrop توسط روش نیمه کمی، با دقت مناسبی می‌تواند پارامترهای مذکور در تیمار-های مختلف نیتروژن را شبیه‌سازی کند. همچنین، مدل واسنجی شده قادر بود تا مقدار *WP را با دقت بالایی در تیمارهای تحت تنش نیتروژن برآورد کند. بدین ترتیب، مدل نسبتا ساده AquaCrop به کاربران این اجازه را

می‌دهد تا با در نظر گرفتن تیمارهای مختلف کودی، مدیریت آب و نیتروژن در مزرعه را، به‌خصوص در اقلیم‌های گرم و خشک نظیر اقلیم ایران، ارتقا ببخشند. این در حالی است که در مقایسه با سایر مدل‌های گیاهی، مدل AquaCrop برای در نظر گرفتن تاثیر کود در رشد و عملکرد محصول، داده‌های ورودی به مراتب کم‌تری نیاز دارد.

منابع

رنجبر،آ. 1395. شبیه‌سازی توامان آب، نیتروژن و عملکرد محصول به منظور تعیین شاخص تغذیه نیتروژن در دوره رشد ذرت. رساله دکتری، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، پاکدشت.

Ahmadi,S.H., Mosallaeepour,E., Kamgar-Haghighi,A.K 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.

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.

Allen,R.G., Pereira,L.S., Raes, D and Smith,M. 1998. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements, Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, Italy, 300 pp.

Andarzian,B., Bannayan,M., Steduto,P., Mazraeh,H., Barati,M.E 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.

Ata-Ul-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. 9.8:1-12

Geerts,S and Raes,D. 2010. Using AquaCrop to derive deficit irrigation schedules. Agricultural Water Management. 98: 213-216.

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.

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.

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: 337–350.

Liu,W.Z and Zhang,X. 2007. Optimizing water and fertilizer input using an elasticity index: a case study with maize in the loess plateau of china. Field Crops Research. 100: 302-310.

Mousavizadeh,S.F., Honar,T and Ahmadi,S.H. 2016. Assessment of the AquaCrop Model for simulating Canola under different irrigation managements in a semiarid area. International Journal of Plant Production. 10.4:425- 445

Myers,R.J.K. 2005. Helping small-scale farmers in the semi-arid tropics: Linking participatory research, traditional research and simulation modelling. In Nutrient and Water Management Practices for Increasing Crop Production in Rainfed Arid/Semi-Arid Areas – Proceedings of a Coordinated Research Project. IAEA-TECDOC 1468. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency (IAEA). 127–137.

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: 438–447.

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.

Steduto,P and Alberizio,R. 2005. Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea: II. Water use efficiency and comparison with radiation use efficiency. Agricultural and Forest Meteorology 130: 269–281.

Van Gaelen,H., Tsegay,A., Delbecque,N., Shrestha,N., Garcia,M., Fajardo,H., Miranda, R., Vanuytrecht,E., Abrha,B., Diels,J and Raes,D. 2014. Asemi-

Van der Werf,W. 2013. Assessment of crop growth and water productivity for five C3 species in semi-arid Inner Mongolia. Agricultural Water Management. 122: 28– 38.

quantitative approach for modelling crop response to soil fertility: evaluation of the Aqua crop procedure. Journal of Agricultural Science. 1–16.

Yuan,M., Zhang,L., Gou,L., Su,Z., Spiertz,J.H.J and

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 2, Vol. 11, Jun.-Jul. 2017, p. 286-298

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره2، جلد 11، خرداد - تیر 1396، ص. 298-286

Evaluating Semi-Quantitative Approach of the AquaCrop Model for Simulating Maize Response to Nitrogen Fertilizer

A. Ranjbar[1], **A. Rahimikhoob**[2]*, **H. Ebrahimian**[3]
Recived: Apr.16, 2017 Accepted: May.08, 2017

Abstract

AquaCrop model determines the response of plant to degree of soil fertility stress by a simple and semi-quantitative approach. The objective of this study was to evaluate this approach to simulate maize growth parameters under different nitrogen application in semi-arid environment of Iran. The experiment was conducted at the research farm of the College of Aburaihan, during two years (2015 and 2016) and without water stress. Five nitrogen (N) treatments were investigated including no nitrogen (N0), 50(N1), 100(N2), 150(N3) and 200 kg N. ha^{-1} (N4) by Randomized Complete Block design with three replications for each year. Calibration was carried out using the data of N0 and N4 for 2015 and validation was performed with data of remaining treatments in 2015 and whole data of 2016. The accuracy of the model in calibration stage was tested using relative root-mean-square error (RRMSE), coefficient of determination (R^2) and mean bias error (MBE), which were about 11.8%, 0.995 and 0.51 $ton.ha^{-1}$ and 11.8%, 0.988, -1.02 $ton.ha^{-1}$ for estimating biomass development in the N0 and N4 treatments, respectively. The RRMSE, R^2 and MBE values for validation treatments were obtained as 19.06 %, 0.920, 0.92 $ton.ha^{-1}$ for grain yield and 5.32%, 0.975, 0.41 $ton.ha^{-1}$ for final biomass yield, respectively. The results show that calibrated model estimates soil water content and water productivity in different treatment accurately. Nevertheless, It is demonstrated that AquaCrop was not able to simulate development of biomass and CC precisely during growing season, but it is more accurate in estimating final biomass and grain yield.

Keywords: AquaCrop, Calibration and Validation, Fertilization Stress, Simulation of Plant Growth.

1- Former PhD Student of Irrigation and Drainage, College of Aburaihan, University of Tehran
2- Professor, Department of Irrigation and Drainage Eng., College of Aburaihan, University of Tehran
3- Assistant professor, Department of Irrigation and Reclamation Eng., College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran
(*- Corresponding Author Email: akhob@ut.ac.ir)