Archive of SID
DOI:10.22059/ijswr.2020.298460.668516 تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۱، شماره ۶، شهریور ماه ۱۳۹۹ (ص ۱۳۵۱-۱۳۴۱)

Sensitivity Analysis of Basil Crop Growth Parameters in the Aquacrop Model under Different Nitrogen Fertilizer Stresses

HADISSEH RAHIMIKHOOB[1*], TEYMOUR SOHRABI[1], MOJTABA DELSHAD[2]
1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
2. Department of Horticultural Sciences, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
(Received: March. 6, 2020- Revised: Apr. 5, 2020- Accepted: Apr. 12, 2020)

ABSTRACT

Crop model parameters are influenced by different management and environmental conditions. Sensitivity analysis is recognized as an effective approach for identifying the most influential parameters in the modelling process and output uncertainty assessment. In present study, the sensitivity of AquaCrop model parameters for basil was evaluated under different nitrogen fertilizer stresses. For this purpose, an experiment was conducted in the research greenhouse of the College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Crop growth parameters used for sensitivity analysis include normalized water productivity (WP^*), initial canopy cover (CC0), maximum transpiration coefficient (K_{CTrx}), canopy growth coefficient (CGC) and canopy decline coefficient (CDC) which analyzed by Beven (1979) approach. The results showed that the highest sensitivity of the AquaCrop model was due to the change in the WP^* parameter. Therefore, it is necessary to calibrate this parameter under different environmental conditions and for diverse crop species to increase the accuracy and performance of the model. Also, comparison of the sensitivity coefficients obtained for each of the growth parameters showed that by increasing nitrogen fertilizer stress, the model sensitivity also increased. But the growth rate was not the same among the selected parameters. In other words, the impressibility of parameters was different from nitrogen deficiency.

Keywords: Aquacrop Model, Crop Growth Parameters, Sensitivity Analysis.

* Corresponsing Author's Email: h.rahimikhoob@ut.ac.ir
www.SID.ir

Archive of SID

تحلیل حساسیت پارامترهای رشد گیاه ریحان در مدل AquaCrop تحت تنش‌های مختلف کود نیتروژن

حدیثه رحیمی‌خوب[1*]، تیمور سهرابی[1]، مجتبی دلشاد[2]

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

۲. گروه علوم باغبانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۶- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱/۱۷- تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱/۲۴)

چکیده

پارامترهای به‌کار رفته در مدل‌های شبیه‌ساز تحت شرایط مختلف مدیریتی و زیست‌محیطی مقادیر متفاوتی به خود اختصاص می‌دهند. تحلیل حساسیت به عنوان یک رویکرد مؤثر برای تشخیص اثرگذارترین پارامترها در روند مدل‌سازی و بررسی عدم قطعیت خروجی مدل‌ها شناخته شده است. در این پژوهش حساسیت پارامترهای رشد مدل AquaCrop برای گیاه ریحان تحت تنش‌های مختلف کود نیتروژن مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور آزمایشی در گلخانه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در کرج انجام شد. پارامترهای رشد به کار رفته در مدل AquaCrop شامل بهره‌وری آب نرمال‌شده (WP^*)، پوشش گیاهی اولیه (CC_0)، حداکثر ضریب تعرق گیاهی (K_{CTrx})، ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC) و ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC) با استفاده از روش Beven (1979) تحلیل حساسیت شدند. نتایج نشان داد، بیشترین حساسیت خروجی مدل AquaCrop، نسبت به تغییر پارامتر WP^* است. در نتیجه لازم است برای افزایش دقت و عملکرد مدل، این پارامتر برای شرایط محیطی و نوع محصول واسنجی شود. هم‌چنین، مقایسه ضرایب حساسیت به دست آمده برای هر یک از پارامترهای رشد نشان داد با افزایش درجه تنش کود نیتروژن، حساسیت مدل نیز افزایش یافته است. اما نرخ افزایش یکسانی بین پارامترهای رشد مشاهده نشد. به عبارت دیگر، تأثیرپذیری پارامترها از کمبود کود نیتروژن متفاوت بود.

واژه‌های کلیدی: تحلیل حساسیت، مدل AquaCrop، پارامترهای رشد گیاه.

مقدمه

مدل‌های شبیه‌ساز، بیانگر روابط متقابل بین اجزاء یک سیستم توسط معادلات ریاضی هستند (Wallach *et al.*, 2019). مدل‌های گیاهی به عنوان ابزاری ارزشمند برای شبیه‌سازی یکپارچه فرآیندهای مؤثر در رشد گیاه شناخته می‌شوند (Wallach *et al.*, 2019). این مدل‌ها در بسیاری از زمینه‌های تحقیقاتی شامل پیش‌بینی تولید محصولات کشاورزی تحت شرایط مختلف زیست‌محیطی و مدیریتی (Ahmadi *et al.*, 2015; Sandhu and Irmak, 2019 و هم‌چنین برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی مصرف آب و کود (Fang *et al.*, 2017a; Fang *et al.*, 2017b; Liu *et al.*, 2017) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مدل‌های گیاهی متشکل از پارامترهایی هستند که تحت تأثیر عوامل متعدد محیطی و مدیریتی قرار دارند. این عوامل منجر به عدم قطعیت در خروجی مدل‌ها خواهد شد (Guo *et al.*, 2019). در این راستا به منظور تحلیل عدم قطعیت مدل‌های شبیه‌سازی، اثر عوامل و فاکتورهای غیرقطعی بر خروجی مدل با تعیین ضریب حساسیت بررسی می‌شود (Vanuytrecht *et al.*, 2014). نتایج حاصل از تحلیل حساسیت[1] به کاربر این امکان را می‌دهد تا کم‌اهمیت‌ترین و مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار در فرآیند شبیه‌سازی رشد گیاه را بشناسد و طی مرحله واسنجی به آن‌ها توجه بیش‌تری نماید (Guo *et al.*, 2019).

مدل گیاهی AquaCrop که الگوریتم آن بر اساس میزان آب مصرف‌شده توسط گیاه (تعرق) توسعه داده شده است، یکی از پرکاربردترین و ساده‌ترین مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاه است (Raes *et al.*, 2009b; Steduto *et al.*, 2009). پارامترهای ورودی در مدل AquaCrop به دو دسته پارامترهای ثابت[2] و غیرثابت[3] تقسیم‌بندی می‌شوند. پارامترهای ثابت وابسته به نوع گیاه بوده و عواملی مانند زمان، مکان و شرایط مدیریتی بر مقدار آن‌ها اثر می‌گذارد (Raes *et al.*, 2009b). به عبارت دیگر، پارامترهای ثابت در اصل همان پارامترهای حساس در مدل AquaCrop هستند

* نویسنده مسئول: h.rahimikhoob@ut.ac.ir

1. Sensitivity Analysis
2. Conservative parameters
3. Non-conservative parameters

www.SID.ir

Archive of SID

که نیاز به واسنجی دارند. اما در شرایط مختلف محیطی و مدیریتی میزان حساسیت هر یک از این پارامترها و اثری که تغییرات هریک بر خروجی مدل می‌گذارد، متفاوت است. در کشور چین تحقیقی به منظور تحلیل حساسیت مدل AquaCrop در کشت گیاه ذرت تحت مدیریت‌های مختلف آب و کود انجام شد (Guo *et al*., 2019). نتایج این تحقیق نشان داد، حساسیت مدل به تغییر پارامترهای ورودی تحت تنش حاصلخیزی[1] بیش‌تر از تنش آبی بود. هم‌چنین پارامترهای حداکثر ضریب تعرق گیاهی[2] (K_{CTrx})، ضریب رشد پوشش گیاهی[3] (CGC)، ضریب کاهش پوشش گیاهی[4] (CDC) و حداکثر پوشش گیاهی[5] (CC_x)، بیشترین تأثیر را در میزان دقت و عملکرد مدل AquaCrop نشان داد. در تحقیق دیگری حساسیت خروجی مدل AquaCrop به پارامترهای ورودی گندم زمستانه در چین و گندم بهاره در کانادا مورد بررسی قرار گرفت (Jin *et al*., 2018). تغییرات ۱۰±، ۳۰± و ۵۰± درصد بر روی هر یک از پارامترهای گیاهی اعمال شد. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد، پارامترهای پوشش گیاهی[6] (CC)، بهره‌وری آب نرمال‌شده[7] (WP^*) و حداکثر پوشش گیاهی جزو پارامترهای حساس مدل محسوب می‌شوند و نیاز به واسنجی دارند. در ایران نیز تحقیقی به منظور بررسی حساسیت مدل AquaCrop برای چهار پارامتر تبخیر و تعرق مرجع گیاه، پارامتر بهره‌وری آب نرمال‌شده، پوشش گیاهی اولیه[8] (CC_0) و حداکثر پوشش گیاه جو در منطقه پاکدشت انجام شد (Karimi Avargani *et al*., 2019). تیمارهای آبیاری شامل آبیاری کامل و دو تیمار کم‌آبیاری اعمال شدند. نتایج نشان داد، بیشترین حساسیت مدل نسبت به متغیر تبخیر و تعرق مرجع است و هرچه درجه کم‌آبیاری بیشتر شود، حساسیت مدل بیشتر خواهد شد. با توجه به مرور منابع در مورد تحلیل حساسیت مدل AquaCrop، می‌توان نتیجه گرفت درجه حساسیت هریک از پارامترهای ورودی مدل تحت شرایط مختلف مدیریتی و محیطی متفاوت است. درنتیجه لازم است پیش از انجام شبیه‌سازی ابتدا پارامترهای حساس مدل تعیین و واسنجی شوند و پس از آن اثر هر یک از سناریوهای مدیریتی بر تولید محصول مورد سنجش و ارزیابی قرار گیرند.

امروزه با توجه به افزایش روزافزون جمعیت جهان و کاهش منابع آب در دسترس، بهره‌گیری از تکنولوژی کشت در محیط کنترل‌شده گلخانه در حال گسترش است. در کشت‌های گلخانه‌ای کنترل عوامل و پارامترهای مهم اقلیمی شامل دما، رطوبت و تهویه، نه تنها عملکرد گیاه و بهره‌وری آب را افزایش می‌دهد بلکه با ایجاد امکان کشت در خارج از فصل زراعی و در شرایط نامطلوب اقلیمی، بازده اقتصادی قابل‌توجهی برای کشاورزان فراهم می‌آورد (Algharibi *et al*., 2013; Stanghellini, 2014). از این رو، انتقال محصولات آب‌بر مانند سبزی و صیفی به گلخانه‌ها راه‌کار مطمئنی است که در بسیاری از کشورهای پیشرفته انجام می‌گیرد (Stanghellini, 2014). در کشور ایران نیز سطح زیرکشت محصولات گلخانه‌ای تا پایان سال ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ به ترتیب برابر با ۶۴۳۱/۴ و ۱۱۳۲۴/۹ هکتار بوده که رشدی معادل ۵۶/۷۸ درصد داشته است. بررسی آمار اعلام‌شده توسط وزارت جهاد کشاورزی نشان می‌دهد که به طور میانگین در حدود ۶۵/۵۱ درصد از کل سطح زیرکشت محصولات گلخانه‌ای به کاشت محصولات سبزی و صیفی اختصاص دارد (Ministry of Jihad-Agriculture, 2018). ریحان (*Ocimum basilicum* L.) از جمله سبزی‌های برگی و معطر از خانواده نعناعیان است. این گیاه یکی از پرمصرف‌ترین 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 داروسازی، آرایشی و بهداشتی استفاده می‌شود (Ahmed *et al*., 2014; Nguyen *et al*., 2010). با توجه به روند رو به رشد کشت محصولات گلخانه‌ای به ویژه سبزی و صیفی، هدف از این تحقیق تحلیل حساسیت مدل AquaCrop نسبت به پارامترهای رشد گیاه ریحان تحت تنش حاصلخیزی در شرایط کشت کنترل‌شده 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 ۲۰×۸ متر، از نوع چند دهانه‌ای با دیواره‌های شیشه‌ای 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 شد. سنجش متغیر دما و رطوبت با استفاده از سنسور دیجیتال مدل HTC-1 و متغیر تابش توسط دستگاه تابش‌سنج مدل TES-

1. Fertility stress
2. Maximum crop transpiration coefficient
3. Canopy Growth Coefficient
4. Canopy Decline Coefficient
5. Maximum Canopy Cover
6. Canopy Cover
7. Normalized water productivity
8. Initial Canopy Cover

www.SID.ir

Archive of SID

1333R انجام شد. اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی در گلخانه در ماه‌های اردیبهشت تا مرداد انجام گرفت. میانگین دما و رطوبت نسبی در طول دوره به ترتیب برابر با ۳۳/۴ درجه سانتی‌گراد و ۳۱/۳ درصد بود. تابش طول موج کوتاه توسط دستگاه تابش‌سنج به صورت تجمعی در ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شد. میانگین میزان تابش طول موج کوتاه ثبت‌شده برابر با ۲۰/۹ مگاژول بر مترمربع بر روز بود. خاک مورد استفاده در این تحقیق، بافت لوم که در این منطقه بخش عمده‌ای از خاک بستر گلخانه‌ها را تشکیل می‌دهد، انتخاب شد. نتایج آنالیز خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

ذرات تشکیل‌دهنده خاک			ظرفیت زراعی	نقطه پژمردگی	جرم مخصوص ظاهری	شوری عصاره اشباع	اسیدیته	نیتروژن
رس (٪)	سیلت (٪)	شن (٪)	(درصد وزنی)	(درصد وزنی)	(گرم بر سانتی‌متر مکعب)	(دسی‌زیمنس بر متر)	(pH)	(٪)
۲۰	۳۴	۴۶	۲۱/۲۴	۱۰/۳۶	۱/۳۳	۱/۴۶	۸/۱	۰/۰۹

آزمایش‌های گلدانی (قطر و ارتفاع ۲۱ سانتی‌متر) در قالب طرح کامل تصادفی در دو دوره کشت با پنج تیمار کودی (کود اوره) در سه تکرار انجام شد. مقادیر کود داده‌شده به گیاه در تیمارهای N0، N1، N2، N3 و N4 به ترتیب برابر با صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۴۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار به صورت خالص بود. با استفاده از روش تناسب و در نظر گرفتن سطح گلدان مقادیر کود تحت تیمارهای مختلف برای هر گلدان به دست آمد. عملیات کوددهی در سه نوبت (۱۸، ۲۴ و ۳۰ روز پس از کاشت) انجام شد.

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. برای تعیین میزان آب آبیاری از روش وزنی استفاده شد. بدین ترتیب که ابتدا وزن هر میکرولایسیمتر در حالت ظرفیت زراعی مشخص شد. تعیین حد ظرفیت زراعی برای هر میکرولایسیمتر ابتدا از طریق اشباع نمودن کامل آن‌ها انجام گرفت. سپس بعد از گذشت ۴۸ ساعت و در بازه زمانی کوتاه‌مدت ۱۲ ساعته، زمانی که تغییر قابل‌توجهی در وزن میکرولایسیمترها مشاهده نشد، وزن هر یک به عنوان وزن میکرولایسیمتر در حالت ظرفیت زراعی ثبت شد. سپس با توجه به اطلاعات برداشت‌شده، میزان آب آبیاری برای هر میکرولایسیمتر از رابطه زیر محاسبه شد:

$$IW_i=W_{fci}-W_i \quad \text{(رابطه ۱)}$$

در رابطه فوق، IW_i میزان آب آبیاری برای میکرولایسیمتر iام (گرم)، W_{fci} وزن میکرولایسیمتر iام در حالت ظرفیت زراعی (گرم) و W_i وزن میکرولایسیمتر iام پیش از انجام آبیاری (گرم) می‌باشد. میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع نیز با استفاده از روش مستقیم توسط میکرولایسیمترهای وزنی و کاشت گیاه چمن محاسبه شد.

برای تعیین میزان زیست‌توده 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 سانتی‌گراد 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 کنوپی، درصد پوشش محاسبه شد. در آخر داده‌های اندازه‌گیری شده شامل زیست‌توده و پوشش گیاهی توسط آنالیز واریانس (ANOVA) در سطح معناداری ۱ درصد با استفاده از نرم‌افزار SPSS مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفتند.

مدل AquaCrop

مدل گیاهی AquaCrop یکی از جدیدترین مدل‌های گیاهی است که توسط سازمان FAO با تمرکز بر بهره‌وری مصرف آب توسعه داده شده و به عنوان یک ابزار تحلیلی برای مطالعه اثر سناریوهای مختلف مدیریتی کاربرد دارد (Steduto *et al*., 2009). در مدل AquaCrop آب به‌عنوان عامل تعیین‌کننده بهره‌وری محصول شناخته می‌شود؛ به طوری که در این مدل، تعرق روزانه گیاه و عامل بهره‌وری نرمال‌شده به زیست‌توده تبدیل می‌شود (Raes *et al*., 2009b). معادله اساسی به کار رفته در مدل AquaCrop برای برآورد زیست‌توده گیاه مطابق روابط زیر است:

$$B=WP^{*}\sum_{i=1}^{n}\frac{Tr_i}{ET_{o_i}} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

$$Tr_i=K_s\times K_{CTrx}\times CC\times ET_{o_i} \quad \text{(رابطه ۳)}$$

در روابط فوق، B عملکرد زیست‌توده تجمعی (گرم بر متر-مربع)، WP^{*} پارامتر بهره‌وری آب نرمال‌شده (گرم بر مترمربع)، Tr_i تعرق روزانه گیاه (میلی‌متر در روز)، ETo_i تبخیر و تعرق

www.SID.ir

Archive of SID

مرجع (میلی‌متر در روز)، n تعداد روزهای پس از کشت، CC ضریب پوشش گیاهی (بدون بعد)، K_s ضریب تنش آبی (بدون بعد) و K_{CTrx} حداکثر ضریب تعرق گیاهی (بدون بعد) می‌باشند.

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 (CC_0)، ۲- ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC)، ۳- حداکثر پوشش گیاهی (CC_x)، ۴- ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC)، ۵- تعداد روزها تا جوانه‌زنی و ۶- تعداد روزها تا رسیدن به مرحله پیری وجود دارد (Steduto *et al*., 2009). با استفاده از ضرایب فوق، پوشش گیاهی در هر مرحله از چرخه رشد گیاه توسط روابط (۳) الی (۵) به دست خواهد آمد.

$$CC=CC_0\times e^{tCGC} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

$$CC=CC_x\text{-}0.25\frac{(CC_x)^2}{CC_0}\times e^{-tCGC} \quad \text{(رابطه ۵)}$$

$$CC=CC_x\left[1\text{-}0.05\left(e^{\frac{CDC}{CC_x}\times t}\text{-}1\right)\right] \quad \text{(رابطه ۶)}$$

از رابطه (۴) برای محاسبه پوشش گیاهی از ابتدای دوره تا نیمه مرحله توسعه (زمانی که پوشش گیاهی کمتر از نصف پوشش گیاهی حداکثر باشد)، رابطه (۵) از نیمه تا آخر مرحله توسعه (زمانی که پوشش گیاهی بیشتر از نصف پوشش گیاهی حداکثر باشد) و رابطه (۶) از ابتدای مرحله پیری تا آخر دوره کشت استفاده می‌شود. پارامتر t معرف تعداد روز پس از کاشت است.

در مدل AquaCrop چنانچه گیاه تحت تنش حاصلخیزی قرار نداشته باشد، پارامترهای گیاهی کاهش نخواهد یافت و به عبارتی توسعه و تولید زیست‌توده در حالت حداکثر و پتانسیل است. اما در شرایطی که رشد گیاه تحت تأثیر تنش حاصلخیزی قرار گیرد، پارامترهای رشد کاهش یافته که منجر به کاهش میزان عملکرد در واحد سطح محصول خواهد شد (Steduto *et al*., 2009). مدل AquaCrop بیلان املاح در خاک را به طور مستقیم شبیه‌سازی نمی‌کند بلکه اثر درجات مختلف تنش حاصلخیزی توسط روشی نیمه‌کمی[1] از طریق تعیین تأثیر تنش بر توسعه پوشش گیاهی و تولید زیست‌توده گیاه مشخص می‌شود (Akumaga *et al*., 2019). توضیحات کامل در مورد این روش و ارزیابی آن برای گیاه ریحان در تحقیق Rahimikhoob *et al*. (2019) ارائه شده است.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، در مدل AquaCrop دو نوع پارامتر تحت عنوان پارامترهای ثابت و غیرثابت وجود دارند که مقادیر آن‌ها برای گیاه ریحان در تحقیق Rahimikhoob et al. (2019) به طور کامل آورده شده است. در تحقیق حاضر، پارامترهای WP*، CC_0، K_{CTrx}، CGC و CDC برای تحلیل حساسیت خروجی مدل AquaCrop (Version 5.0) انتخاب شدند. این پارامترها جزو اثرگذارترین پارامترهای مدل در محاسبه زیست‌توده گیاه است (Hui-min *et al*., 2017). حد پایین و بالای هریک از پارامترهای مذکور از جداول ارائه‌شده در پیوست مدل AquaCrop استخراج شدند (Raes *et al*., 2009a) (جدول ۲). لازم به ذکر است این دامنه تنها برای گیاهان سه‌کربنه (C3) که ریحان هم جزئی از آن است، صدق می‌کند. مقادیر اصلی هر یک از پارامترهای گیاه ریحان نیز برای تیمار کود بهینه در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲- مقادیر اصلی، حد بالا و پایین و نمو پارامترهای رشد گیاه ریحان

پارامتر	واحد	مقدار اصلی برای گیاه ریحان	حد پایین	حد بالا	نمو
بهره‌وری آب نرمال‌شده (WP*)	$g\ m^{-2}$	۱۸/۱	۱۱	۲۰	۰/۵
حداکثر ضریب تعرق گیاهی (K_{CTrx})	–	۰/۹۷	۰/۷	۱/۲	۰/۰۵
پوشش گیاهی اولیه (CC_0)	$cm^2\ plant^{-1}$	۱	۰/۵	۱/۳	۰/۱
ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC)	$\%\ day^{-1}$	۲۱/۲	۱۵	۴۰	۵
ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC)	$\%\ day^{-1}$	۱۳/۹	۳	۲۹	۲

تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت یک روش مفهومی برای نشان دادن عدم قطعیت پارامترهای ورودی بر نتایج مدل‌های شبیه‌ساز است (Guo *et al*., 2019). سوالاتی که در مبحث تحلیل حساسیت مطرح می‌شوند عبارتند از: الف) عدم قطعیت کدام یک از پارامترهای ورودی بیشترین تأثیر را بر خروجی مدل دارد؟ ب) آیا پارامتری وجود دارد که عدم قطعیت آن اثر ناچیزی بر دقت مدل داشته و بتوان از واسنجی آن صرف‌نظر کرد؟

1. Semi-quantitative approach

www.SID.ir

Archive of SID

در این تحقیق برای تحلیل حساسیت پارامترهای گیاهی، از ضریب حساسیت نسبی و بدون بعد ارائه‌شده توسط Beven (1979) استفاده شد (رابطه ۷).

$$S_{Pi}=\lim_{\Delta P_i\to 0}\frac{\frac{\Delta y}{y}}{\frac{\Delta P_i}{P_i}}=\frac{\partial y}{\partial P_i}\times\frac{P_i}{y} \qquad \text{(رابطه ۷)}$$

در رابطه فوق، S_{Pi} ضریب حساسیت، P_i پارامتر مورد بررسی و y خروجی مدل (در این تحقیق عملکرد محصول) است. S_P برابر با ۰/۱ نشان می‌دهد که ۱۰ درصد افزایش در پارامتر P_i باعث افزایش خروجی مدل به میزان یک درصد خواهد شد. مثبت یا منفی بودن ضریب حساسیت بیانگر آن است که با افزایش پارامتر مورد نظر، عملکرد محصول افزایش یا کاهش می‌یابد.

با توجه به جدول (۲)، مقادیر مختلفی برای هریک از پارامترهای مورد بررسی (در دامنه تغییرات آن) انتخاب و با ارائه آن‌ها به مدل AquaCrop، زیست‌توده گیاه شبیه‌سازی شد. سپس برای هر یک از پارامترها، نمودار پراکنش مقادیر پارامتر ورودی در مقابل زیست‌توده گیاه ترسیم و بهترین معادله برازش بین نقاط به دست آمد. مطابق رابطه (۶)، ضریب حساسیت هر پارامتر از حاصل‌ضرب شیب معادله در نقطه مقدار اصلی در نسبت مقدار اصلی پارامتر ورودی به عملکرد متناظر آن ($\frac{P_i}{y}$) محاسبه شد.

در این تحقیق مدل با پنج سناریو کوددهی اجرا شد و ضرایب حساسیت تحت تیمارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. به منظور ارزیابی و مقایسه حساسیت هر یک از پارامترها، مقادیر ضریب حساسیت در چهار گروه طبقه‌بندی شدند (جدول ۳) (Lenhart *et al*., 2002).

جدول ۳- طبقه‌بندی مقادیر ضریب حساسیت

گروه	دامنه تغییرات ضریب حساسیت	شرح
۱	$0\leq\|S_P\|<0.05$	کم
۲	$0.05\leq\|S_P\|<0.2$	متوسط
۳	$0.2\leq\|S_P\|<1$	زیاد
۴	$\|S_P\|\geq 1$	بسیار زیاد

نتایج و بحث

برای بررسی اثر تغییرات پارامترهای رشد بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد زیست‌توده گیاه ریحان، مقادیر واقعی هر یک از پارامترها مطابق با نمو ذکرشده در جدول (۲)، تغییر داده شدند. سپس با استفاده از مدل AquaCrop خروجی مدل یا همان زیست‌توده گیاه تحت تیمارهای مختلف کوددهی شبیه‌سازی شد. ضریب حساسیت پارامترهای رشد ریحان با استفاده از روش Beven (1979) محاسبه شد (جدول ۴).

جدول ۴- ضرایب حساسیت به‌دست‌آمده برای پارامترهای رشد گیاه ریحان

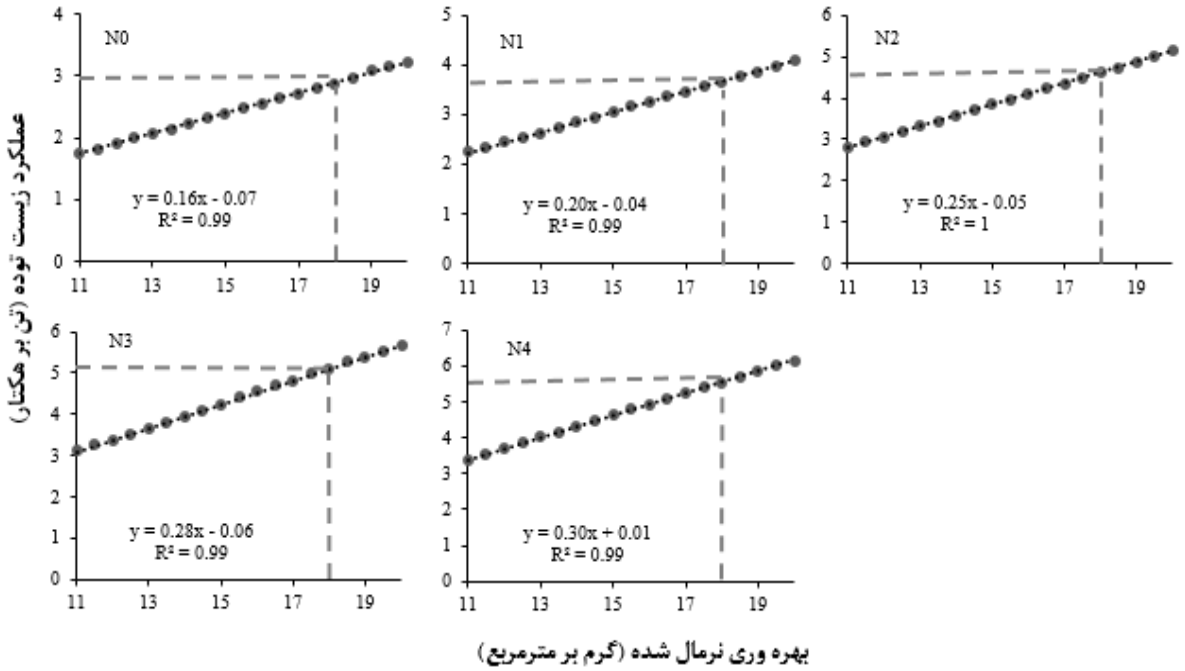
تیمار	پارامترهای رشد				
	WP^* (g m^{-2})	K_{CTrx}	CC_0 (cm^2 plant^{-1})	CGC (% day^{-1})	CDC (% day^{-1})
N0	۱/۰۳	۰/۶۶	۰/۱۲	۰/۴۶	-۰/۰۳
N1	۱/۰۱	۰/۶۵	۰/۱۱	۰/۴۳	-۰/۰۲
N2	۱/۰۱	۰/۶۴	۰/۱۰	۰/۴۲	-۰/۰۱
N3	۱/۰۱	۰/۶۲	۰/۰۹	۰/۴۱	-۰/۰۱
N4	۱/۰۰	۰/۵۸	۰/۰۹	۰/۴۰	-۰/۰۱
انحراف معیار	۰/۰۱۰	۰/۰۲۹	۰/۰۱۱	۰/۰۲۵	۰/۰۰۹

شکل (۱) اثر تغییرات پارامتر WP^* بر زیست‌توده شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. مقدار اصلی این پارامتر برای گیاه ریحان ۱۸/۱ گرم بر مترمربع در روز است (Rahimikhoob *et al*., 2019). بازه تغییرات برای این پارامتر با توجه به منابع و تحقیقات انجام‌شده در مورد گیاهان C3 بین ۱۱ تا ۲۰ گرم بر مترمربع در روز در نظر گرفته شد. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، روند تغییرات پارامتر WP^* و زیست‌توده شبیه‌سازی‌شده هم‌جهت هستند؛ به این معنا که با افزایش این پارامتر زیست‌توده گیاه نیز افزایش خواهد یافت. با استفاده از رابطه (۶)، ضریب حساسیت برای تیمارهای N0، N1، N2، N3 و N4 به ترتیب برابر با ۱/۰۳، ۱/۰۱، ۱/۰۱، ۱/۰۱ و ۱ برآورد شد. مطابق با جدول (۳)، حساسیت مدل AquaCrop به تغییر پارامتر WP^* در محدوده بسیار زیاد قرار دارد. میزان حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییر پارامتر WP^* برای گیاه جو و تربچه در منطقه پاکدشت به ترتیب مقدار ۹۶/ ۰ و ۰/۸۸ گزارش شده است (Karimi Avargani *et al*., 2019; Hajizadeh *et al*., 2019). از مقایسه ضرایب به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که درجه حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییر پارامتر WP^*

www.SID.ir

Archive of SID

وابسته به نوع گیاه مورد مطالعه است.



شکل ۱- اثر تغییر پارامتر بهره‌وری نرمال‌شده بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد زیست‌توده گیاه ریحان تحت تنش‌های مختلف کود نیتروژن

مقدار واقعی پارامتر K_{CTrx} برای گیاه ریحان از روی مقادیر روزانه اندازه‌گیری شده ET_c و ET_o برابر با ۰/۹۷ به دست آمد. برای سنجش میزان حساسیت خروجی مدل به تغییرات این پارامتر، حداکثر ضریب تعرق گیاهی در بازه ۰/۷ تا ۱/۲ به مدل داده شد و عملکرد زیست‌توده در مقابل K_{CTrx} برای هر یک از تیمارها رسم شدند (شکل ۲). همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود، روند تغییرات به دست آمده برای این پارامتر غیرخطی است؛ به طوری که با افزایش K_{CTrx} تا حدود ۸ درصد مقدار واقعی آن، زیست‌توده گیاه افزایش پیدا می‌کند در حالی که افزایش بیشتر آن، منجر به کاهش نرخ رشد زیست‌توده خواهد شد. علت اصلی وقوع این پدیده، به وجود آمدن تنش آبی در روند شبیه-سازی است. زیرا با توجه به میزان آبی که برای آبیاری گیاه محاسبه شده است، اگر K_{CTrx} بیشتری در نظر گرفته شود گیاه دچار کمبود آب خواهد شد. به عبارت دیگر، میزان آب در دسترس کمتر از نیاز گیاه برای تعرق شده در نتیجه روند توسعه پوشش گیاهی[1] متوقف می‌شود. ضرایب حساسیت خروجی مدل AquaCrop به تغییرات پارامتر K_{CTrx} برای تیمارهای N0، N1، N2، N3 و N4 به ترتیب برابر با ۰/۶۶، ۰/۶۵، ۰/۶۴، ۰/۶۲ و ۰/۵۸ و در محدوده حساسیت زیاد به دست آمد.

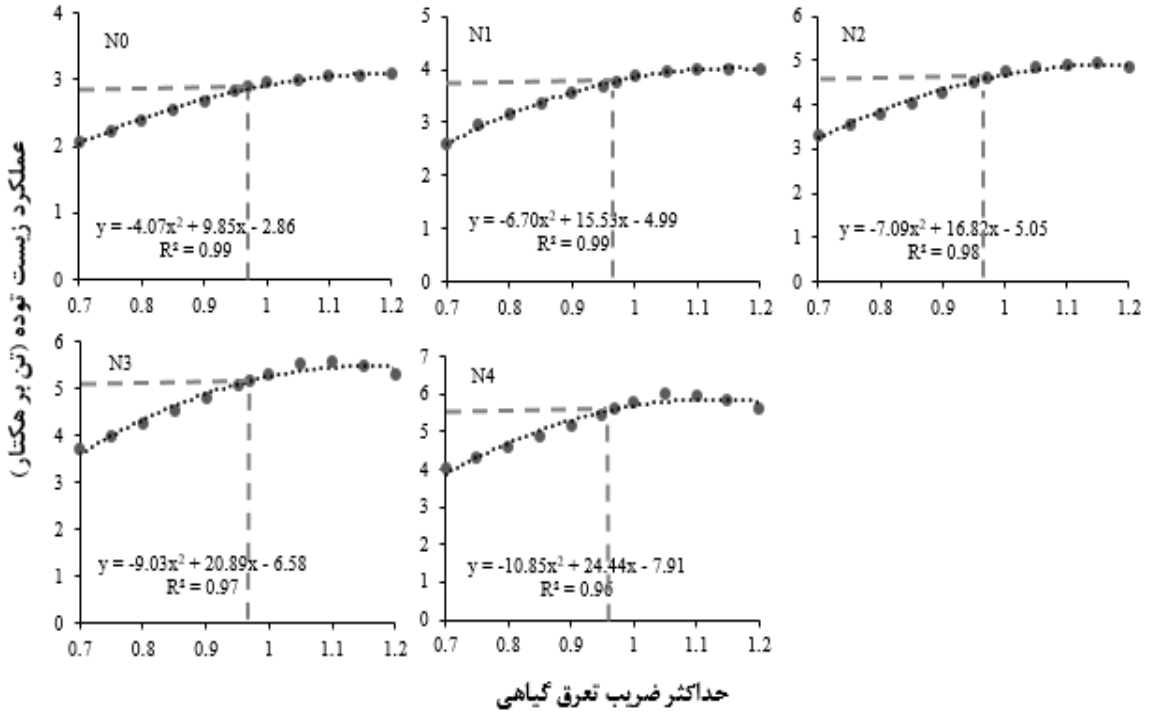
مقدار واقعی پارامتر پوشش گیاهی اولیه برای گیاه ریحان یک سانتی‌متر مربع بر گیاه است. برای تعیین اثر تغییرات این پارامتر بر عملکرد زیست‌توده ریحان، مقدار آن از ۰/۵ تا ۱/۳ سانتی‌متر مربع بر گیاه با نمو ۰/۱ به مدل AquaCrop داده و عملکرد محصول شبیه‌سازی شد (شکل ۳). ضریب حساسیت این پارامتر با استفاده از رابطه (۶) برای تیمارهای N0، N1، N2، N3 و N4 به ترتیب برابر با ۰/۱۲، ۰/۱۱، ۰/۱۰، ۰/۰۹ و ۰/۰۹ برآورد شد. با توجه به مقادیر به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که مدل، حساسیت متوسطی به تغییرات پارامتر CC_0 دارد.

مدل AquaCrop با مقادیر مختلف پارامتر CGC از ۱۵ تا ۴۰ درصد بر روز با نمو ۵ درصد برای تیمارهای مختلف کودی اجرا شد. مقدار واقعی این پارامتر برای گیاه ریحان ۲۰/۱۰ درصد بر روز است که نمودار تغییرات آن و اثر این پارامتر بر نتایج شبیه‌سازی در شکل (۴) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۴)، روند یکسانی بین پارامتر CGC و عملکرد زیست‌توده ریحان مشاهده می‌شود. به عبارتی با افزایش این پارامتر مقدار زیست‌توده بیشتر برآورد خواهد شد. ضریب حساسیت به دست آمده برای پارامتر CGC تحت تیمارهای N0، N1، N2، N3 و N4 به ترتیب برابر با ۰/۴۶، ۰/۴۳، ۰/۴۲، ۰/۴۱ و ۰/۴۰ است.

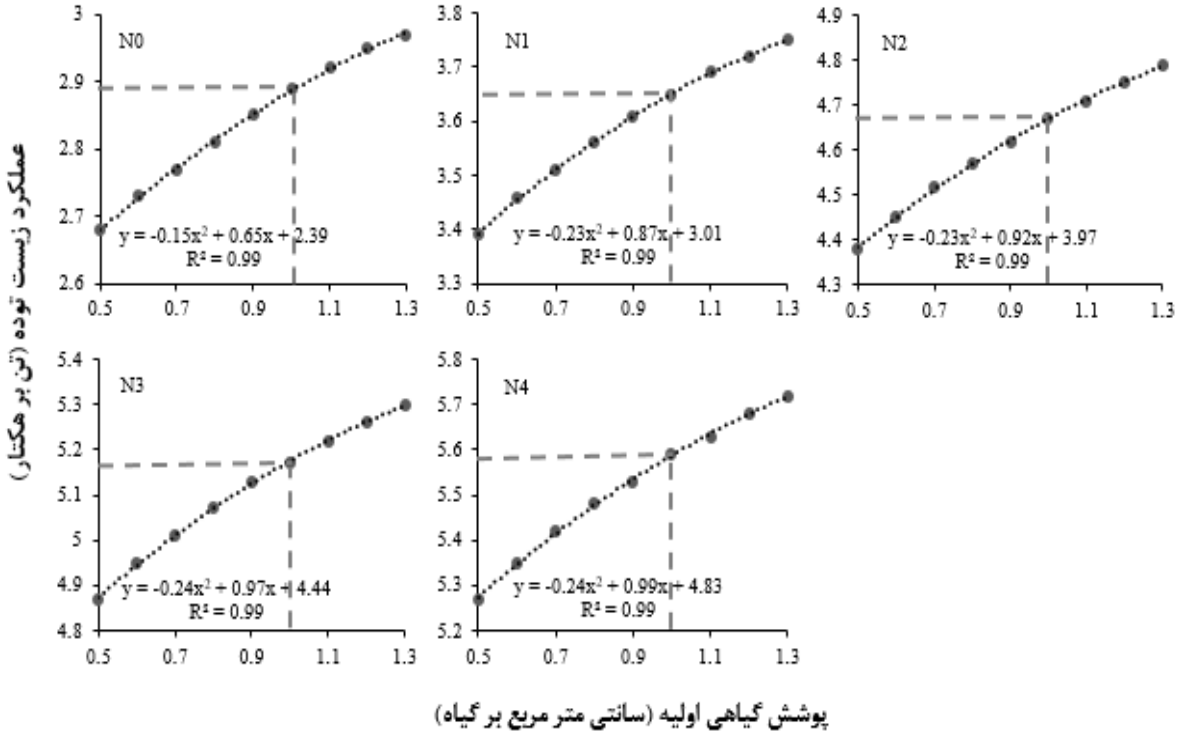
1. Canopy expansion

www.SID.ir

Archive of SID



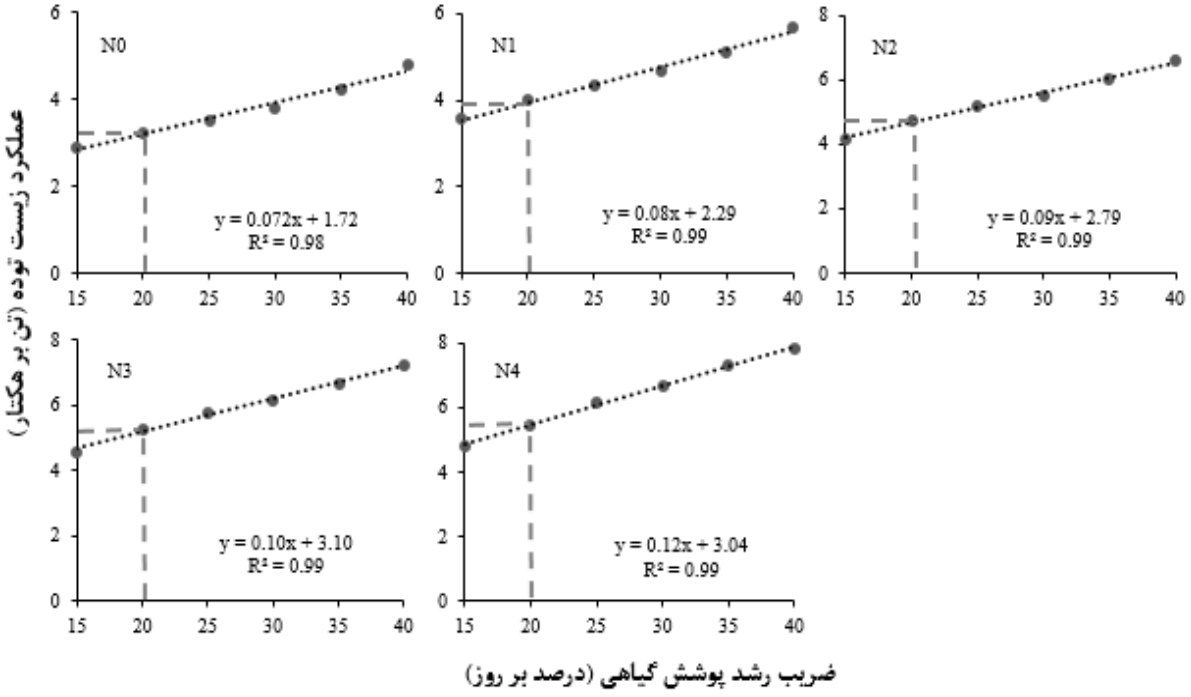
شکل ۲- اثر تغییر پارامتر حداکثر ضریب تعرق گیاهی بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد زیست‌توده گیاه ریحان تحت تنش‌های مختلف کود نیتروژن



شکل ۳- اثر تغییر پارامتر پوشش گیاهی اولیه بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد زیست‌توده گیاه ریحان تحت تنش‌های مختلف کود نیتروژن

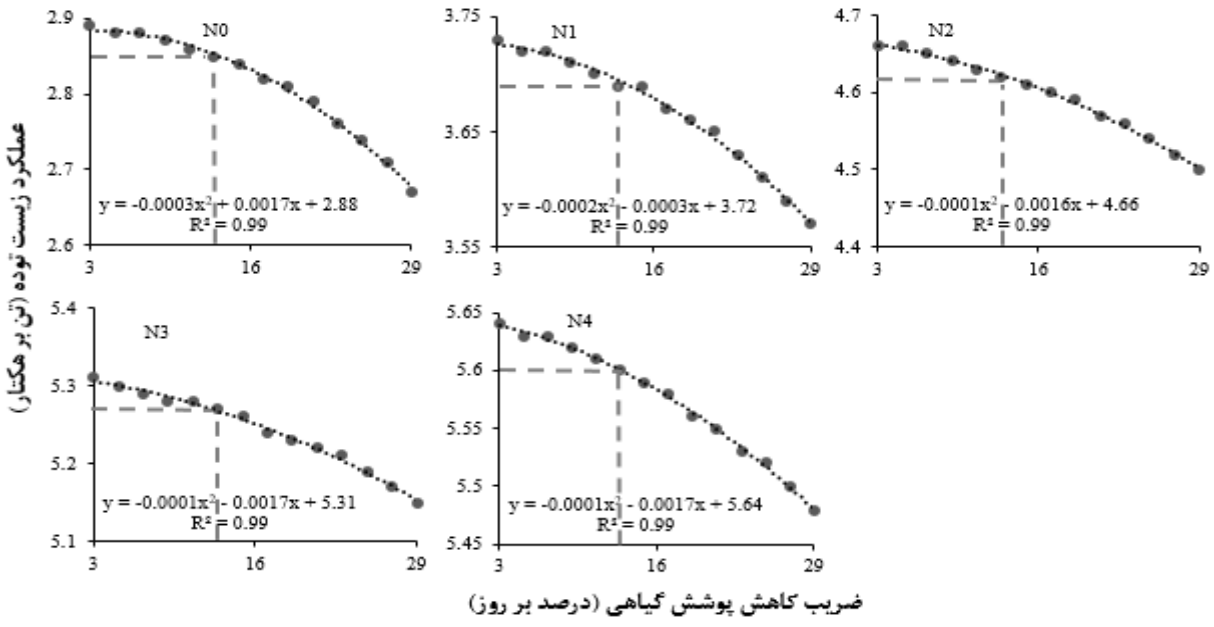
www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴- اثر تغییر ضریب رشد پوشش گیاهی بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد زیست‌توده گیاه ریحان تحت تنش‌های مختلف کود نیتروژن

مقدار پارامتر CDC گیاه ریحان برابر با ۱۳/۹۰ درصد بر روز است. برای برآورد ضریب حساسیت این پارامتر مقادیر مختلف از ۳ تا ۲۹ درصد بر روز با نمو ۲ درصد در نظر گرفته شد. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، خط برازش داده‌شده بین مقادیر CDC و زیست‌توده روند معکوس دارد، به این معنا که اگر مقدار CDC بیش از مقدار واقعی آن به مدل داده شود، زیست‌توده گیاه کمتر از واقعیت شبیه‌سازی خواهد شد. ضریب حساسیت مدل نسبت به پارامتر CDC برای تیمارهای N0، N1، N2، N3 و N4 به ترتیب برابر با ۰/۰۳-، ۰/۰۲-، ۰/۰۱-، ۰/۰۱- و ۰/۰۱- برآورد شد.



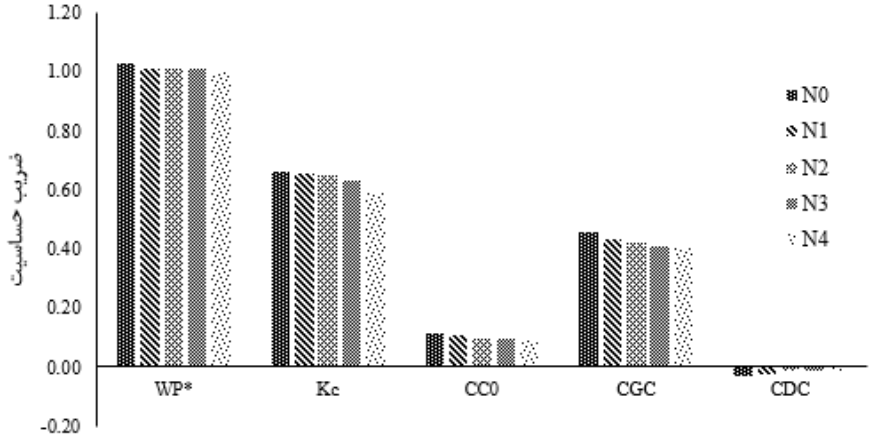
شکل ۵- اثر تغییر پارامتر ضریب کاهش پوشش گیاهی بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد زیست‌توده گیاه ریحان تحت تنش‌های مختلف کود نیتروژن

به منظور مقایسه بهتر ضرایب حساسیت هریک از پارامترهای رشد گیاه ریحان تحت تیمارهای مختلف کوددهی، نمودار مقادیر به دست آمده ترسیم شد (شکل ۶). همان‌طور که ملاحظه می‌شود، از بین پارامترهای گیاهی مورد بررسی در این

www.SID.ir

Archive of SID

تحقیق، پارامتر WP* و پس از آن پارامتر K_{CTrx} بیش‌ترین ضریب حساسیت را دارند. در مقابل ضریب حساسیت پارامتر CDC بسیار ناچیز است. هم‌چنین مقایسه مقادیر به دست آمده برای هریک از تیمارهای کودی نشان می‌دهد، با افزایش تنش، میزان حساسیت خروجی مدل به تغییر پارامترهای رشد بیشتر خواهد شد. نتایج مشابه در مورد اثر تنش (آبی و کودی) بر حساسیت ضرایب گیاهی مدل AquaCrop برای گیاه ذرت (Guo *et al*., 2019)، جو (Karimi Avargani *et al*., 2019) و تربچه (Hajizadeh *et al*., 2019) نیز گزارش شده است. برای سنجش پراکندگی مقادیر ضرایب حساسیت محاسبه‌شده برای هر یک از پارامترهای رشد تحت تنش کود نیتروژن از شاخص انحراف معیار استفاده شد. با توجه به جدول (۲)، انحراف معیار پارامترهای K_{CTrx} و CGC نسبت به دیگر پارامترها بیشتر است. می‌توان نتیجه گرفت، تنش کودی تأثیر بیشتری بر تغییر ضرایب حساسیت این دو پارامتر می‌گذارد.



شکل ۶- مقایسه ضرایب حساسیت پارامترهای رشد گیاه ریحان تحت تنش‌های مختلف کود نیتروژن

پارامترهای CGC و CDC به عنوان پارامترهای اصلی برای محاسبه توسعه پوشش گیاهی، حساسیت یکسانی در برآورد زیست‌توده گیاه نشان ندادند زیرا در مدل AquaCrop از پارامتر CGC از ابتدای دوره رشد تا آخر مرحله توسعه (روابط ۳ و ۴) در معادلات محاسبه پوشش گیاهی استفاده می‌شود؛ در حالی که پارامتر CDC تنها در اواخر دوره رشد گیاه کاربرد دارد (رابطه ۵). نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که پارامتر WP* از مهم‌ترین و اثرگذارترین پارامترهای گیاهی در مدل AquaCrop است که می‌بایست مقدار دقیق آن برای هر گیاه واسنجی شود. نتیجه مشابه در تحلیل حساسیت مدل AquaCrop در کشت گندم بهاره و زمستانه گزارش شده است (Jin *et al*., 2018). به طوری که در این تحقیق پارامترهای WP* و CC به عنوان پارامترهای حساس مدل شناخته شده‌اند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، حساسیت مدل AquaCrop به تغییر پارامترهای رشد گیاه ریحان شامل WP*، CC_0، K_{CTrx}، CGC و CDC مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل به تغییر پارامتر WP* حساسیت بیشتری دارد. کمترین ضریب حساسیت به دست آمده برای پارامتر CDC است که نشان می‌دهد وجود خطا در تعیین میزان آن، تأثیر قابل‌توجهی بر دقت برآورد زیست‌توده نخواهد داشت. ضرایب حساسیت به دست آمده برای تمامی پارامترها به جز پارامتر CDC مثبت بود. به عبارتی با افزایش پارامتر CDC زیست‌توده گیاه کم‌تر برآورد خواهد شد. هم‌چنین نتایج نشان داد هرچه تنش حاصلخیزی بیشتر باشد، حساسیت مدل به تغییر هر یک از پارامترهای رشد افزایش می‌یابد ولی نرخ افزایش آن یکسان نیست. درجه تأثیر کمبود کود نیتروژن بر افزایش حساسیت پارامتر K_{CTrx} نسبت به مابقی پارامترها بیش‌تر بود. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، حساسیت مدل AquaCrop به تغییر پارامترهای رشد برای گیاهان دیگر تحت تنش‌های آب و کود نیز تحلیل شود.

سپاسگزاری

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

www.SID.ir

Archive of SID

REFERENCES

Ahmadi, S., Mosallaeepour, E., Kamgar-Haghighi, A. and Sepaskhah, A. (2015). Modeling Maize Yield and Soil Water Content with AquaCrop Under Full and Deficit Irrigation Managements. *Water Resources Management*, 29(8), 2837-2853.

Ahmed, E. A., Hassan, E. A., Tobgy, K.M., Ramadan, E.M. (2014). Evaluation of rhizobacteria of some medicinal plants for plant growth promotion and biological control. *Annals of Agricultural Sciences*. 59 (2), 273–280.

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

Algharibi, E., Schmitz, G., Lennartz, F., Schutze, N., Grundmann, J. and Kloss, S. (2013). Evaluation of field and greenhouse experiments with tomatoes using the AquaCrop model as a basis for improving water productivity. *Assessment of Climate Change Impact on Water Resources in Serbia*. 560-576.

Beven K. (1979). A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. *Journal of Hydrology*, 44(3-4), 169-190.

Fang, Q. X., Ma, L., Trout, T. J., Comas, L. H., DeJonge, K. C., Ahuja, L. R. (2017b). Modeling N concentration and uptake for maize hybrid under growth stage based deficit irrigations *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*. 60(6): 2067-2081.

Fang, Q., Ma, L., Ahuja, L., Trout, T., Malone, R., Zhang, H., Guo, D. and Yu, Q. (2017a). Long-term simulation of growth stage-based irrigation scheduling in maize under various water constraints in Colorado, USA. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 4(2):172.

Guo, D., Zhao, R., Xing, X., and Ma, X. (2019). Global sensitivity and uncertainty analysis of the AquaCrop model for maize under different irrigation and fertilizer management conditions. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 1-19.

Hajizadeh M., Rahimikhoob A., Aliniaeifard S. and Varavipour M. (2019). Determination of Normalized Water Productivity and Sensitivity Analysis of AquaCrop Model for Radish Product. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 5(13): 1527-1537.

Hui-min X., Xin-gang X. U., Zhen-hai L. I., Yi-jin C., Hai-kuan, F. and Gui-jun Y. (2017). Global sensitivity analysis of the AquaCrop model for winter wheat under different water treatments based on the extended Fourier amplitude sensitivity test. J. *Integrated. Agriculture*. 16(11):2444–2458.

Jin, X., Li, Z., Nie, C., Xu, X., Feng, H., Guo, W., and Wang, J. (2018). Parameter sensitivity analysis of the AquaCrop model based on extended fourier amplitude sensitivity under different agro-meteorological conditions and application. *Field Crops Research*, 226, 1-15.

Karimi Avargani H., Rahimikhoob A. and Nazari Fard M. (2019). Sensitivity Analysis of Aquacrop Model for Barley in Pakdasht Region. *Journal of Water and Soil Science*. 2019; 23 (3) :53-63. (In Farsi)

Lenhart, T., Eckhardt, K., Fohrer, N. and Frede, H. (2002). Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Physics and Chemistry of the Earth*, Parts A/B/C, 27(9-10), 645-654.

Liu, C., Qi, Z., Gu, Z., Gui, D., and Zeng, F. (2017). Optimizing irrigation rates for cotton production in an extremely arid area using RZWQM2 simulated water stress. *Transactions of the ASABE*. 60(6), 2041-2052.

Ministry of Jihad. (2018). Greenhouse cultivation area in Iran. Retrieved April 12, 2019, from https://horticulture.maj.ir.(In Farsi)

Nguyen, P.M., Kwee, E.M., and Niemeyer, E.D. (2010). Potassium rate alters the antioxidant capacity and phenolic concentration of basil (Ocimum basilicum L.) leaves. *Food Chemistry*. 123, 1235–1241.

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 TC, Fereres E (2009a) AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: Reference Manual Annexes.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C. and Fereres, E. (2009b). AquaCrop - the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*. 101(3): 438–447.

Rahimikhoob H., Sohrabi T. and Delshad M. (2019). Performance evaluation of AquaCrop model in simulating Basil (Ocimum basilicum L.) growth under different soil fertility stress in controlled greenhouse conditions. *Iranian journal of soil and water research*. Accepted for publication. (In Farsi)

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.

Stanghellini C. (2014). Horticultural Production in Greenhouses: Efficient Use of Water. *Acta horticulturae*. 1034: 25-32.

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.

Vanuytrecht, E., Raes, D., and Willems, P. (2014). Global sensitivity analysis of yield output from the water productivity model. *Environmental Modelling & Software*, 51, 323-332.

Wallach, D., Makowski, D., Jones, J., and Brun, F. (2019) Working with dynamic crop models (3rd ed.). Elsevier.

www.SID.ir