Simulating Maize Response to Nitrogen Fertilizer Using the Critical Nitrogen Dilution Curve

ABSTRACT

The application of crop models to simulate crop responses to water and nitrogen (N) is crucial for improving agricultural management. The majority of these models involve complex equations and require several input parameters for calibration. AquaCrop simulates crop response to different N levels using a semi-quantitative approach, which simulates the effect of N stress on transpiration and biomass production during the growing season. This model does not provide information on the optimal timing and quantity of N fertilizer application for efficient farm management. In the present study, a direct simulation approach based on the concept of a critical nitrogen curve was applied to simulate the effect of N deficiency on transpiration and biomass production. The main objective of this study was to evaluate a direct simulation approach and compare its results with those derived from the semi-quantitative approach. For this purpose, experimental data were collected from two years of maize cultivation. Biomass and plant nitrogen concentrations were measured during the growing season. The results showed that the RRMSE (relative root mean square error) index in biomass simulation by the direct method was, on average, 4% lower for each treatment compared to the semi-quantitative approach. In addition, increased N stress led to increased errors in simulating biomass. Thus, the RRMSE for biomass simulation using the direct method was 26.48 % and 30.96% for treatments under the highest stress, and 9.57% and 15.75 % for non-stressed treatments. In general, these findings show that integrating the critical nitrogen concentration concept into crop models provides more accurate estimates for crops under nitrogen stress.

***Keywords**: AquaCrop model, Critical nitrogen dilution curve, Nitrogen stress, Semi-quantitative approach.*

ABSTRACT

Background and purpose:
The application of crop models to simulate crop responses to water and nitrogen (N) is crucial for improving agricultural management. The majority of these models involve complex equations and require several input parameters for calibration. They are used to simulate the water flow and N transport in soil and plants. AquaCrop as a user-friendly model, simulates the crop response to different amounts of N using a semi-quantitative approach which simulates the effect of N stress on transpiration and biomass production during the growing season. In this method, the effect of N deficiency on biomass production is simulated based on several constant reduction coefficients for each stress level during the growing season. This model cannot determine the proper time and amount of N fertilizer for efficient farm management. In the present study, a direct simulation approach based on the concept of a critical nitrogen curve was applied to simulate the effect of N deficiency on transpiration and biomass production. In this method, biomass values were simulated based on the effect of N deficiency on canopy resistance (rc), transpiration (Tr), and normalized water productivity (WP^*) parameters, during the growing season. The main objective of this study was to evaluate a direct simulation approach and compare its results with the AquaCrop semi-quantitative approach.

Materials and methods:
For this purpose, field experiments were conducted at the research farm located in Tehran, during the 2015 and 2016 growing seasons. Five N treatments were investigated including no nitrogen (N0), 50(N1), 100(N2), 150(N3) and 200 kg N. ha−1 (N4) for each year. Biomass and plant nitrogen concentrations were measured during the growing season.

Findings:
The results showed an inverse relationship between N stress and both Tr and WP^*. In other words, increasing N stress led to decreased values of Tr and WP^*. Moreover, in the direct simulation approach, WP^* changes during the growing season based on the nitrogen nutrition index. In the AquaCrop model, WP^* is obtained from a linear regression equation, which is assumed to be constant during the growing season. This factor may cause more errors in biomass simulation. The RRMSE (relative root mean square error) index in biomass simulation by the direct method was, on average, 4% lower for each treatment compared to the semi-quantitative approach. In addition, increased N stress led to increased errors in simulating biomass. Thus, the RRMSE for biomass simulation using the direct method was 26.48 % and 30.96% for treatments under the highest stress, and 9.57% and 15.75 % for non-stressed treatments.

Conclusion:
In general, these findings show that integrating the critical nitrogen concentration concept into crop models provides more accurate estimates for crops under nitrogen stress. Therefore, the integration of a direct simulation approach and critical nitrogen concentration concept proves highly effective in examining nitrogen management scenarios for agriculture.

Keywords: *AquaCrop model, Critical nitrogen dilution curve, Nitrogen stress, Semi-quantitative approach.*

ویراستاری نشده

شبیه‌سازی پاسخ ذرت به کود نیتروژن با استفاده از منحنی ترقیق نیتروژن بحرانی

چکیده

استفاده از مدل‌های گیاهی برای شبیه سازی پاسخ محصول به آب و نیتروژن نقش اساسی در ارتقاء مدیریت کشاورزی دارد. در اغلب این مدل‌ها از معادلات پیچیده برای شبیه سازی حرکت آب و نیتروژن در خاک و گیاه استفاده می‌شود که پارامترهای ورودی متعددی برای واسنجی نیاز دارند. در مدل AquaCrop با استفاده از یک روش نیمه کمّی، اثر تنش نیتروژن بر تعرق و عملکرد زیست توده در طول فصل رشد شبیه‌سازی می‌شود. این مدل قابلیت تعیین زمان و مقدار مناسب کود نیتروژن برای مدیریت دقیق مزرعه را ندارد. در مطالعه حاضر از یک روش مستقیم مبتنی بر منحنی ترقیق نیتروژن بحرانی برای شبیه سازی اثر کمبود نیتروژن بر تعرق و عملکرد زیست توده استفاده شد. هدف اصلی در این مطالعه، ارزیابی کارایی این روش و مقایسه نتایج آن با روش نیمه‌کمّی بود. برای این منظور از داده‌های بدست آمده در تیمارهای تحت تنش نیتروژن طی دو سال کشت ذرت استفاده شد. مقادیر زیست توده و غلظت نیتروژن گیاه در طول فصل رشد اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان دادند که شاخص RRMSE (ریشه متوسط مربعات خطای نسبی) در شبیه‌سازی زیست توده به روش مستقیم، به طور متوسط برای هر تیمار، چهار درصد نسبت به روش نیمه کمّی کمتر بود. همچنین، افزایش تنش نیتروژن موجب افزایش خطای شبیه سازی زیست توده شد. به طوری که RRMSE برای شبیه‌سازی زیست توده به روش مستقیم در تیمارهای تحت بیشترین تنش ۲۶/۴۸ و ۳۰/۹۶ و در تیمارهای بدون تنش ۹/۵۷ و ۱۵/۷۵ درصد بود. این نتایج نشان می‌دهند که کاربرد مفهوم منحنی ترقیق نیتروژن بحرانی در مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاه، برآورد دقیق‌تری از شرایط محصول تحت تنش نیتروژن ارائه می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: تنش نیتروژن، روش نیمه کمّی، مدل AquaCrop، منحنی ترقیق نیتروژن بحرانی

ویرایش استاری نشده

مقدمه

استفاده از مدل‌های رشد گیاه نقش مهمی در ارتقاء شاخص‌های کمّی و کیفی کشاورزی و زیست محیطی دارد. اکثر این مدل‌ها قابلیت پیش‌بینی اثر سناریوهای مختلف مدیریتی بر تولید محصول، کارایی مصرف و میزان تلفات آب و کود رادارند و از این طریق به انتخاب سازگارترین سناریوها به توسعه پایدار کشاورزی و محیط زیست در هر منطقه کمک می‌کنند. مدل‌های گیاهی بر اساس منابع جذب شده از جمله آب، مواد مغذی، تابش خورشیدی و دی اکسید کربن رشد گیاه و عملکرد محصول را طی فصل رشد شبیه سازی می‌کنند (Steduto, 2003). کمبود آب و کود نیتروژن (N) در خاک از عوامل اصلی کاهش عملکرد محصولات کشاورزی هستند. بنابراین، برای پیش بینی میزان کاهش عملکرد و شبیه سازی پاسخ گیاهان به شرایط مختلف محیطی و مدیریتی، استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاه ضروری است. در اغلب این مدل‌ها از روابط پیچیده‌ای برای تخمین اجزای معادله بیلان آب و املاح در خاک و گیاه نظیر روابط جذب و تغییر شکل نیتروژن استفاده می‌گردد که معمولاً واسنجی این مدل‌ها دشوار است و یا نتایج آن‌ها عدم قطعیت نسبتا زیادی دارند (Vanuytrecht et al. 2014).

مدل AquaCrop توسط سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (فائو) برای شبیه سازی عملکرد انواع محصولات کشاورزی در اقلیم‌های مختلف مبتنی بر میزان آب دریافتی، توسعه داده شده است. (Raes et al., 2018; Steduto et al., 2009). این مدل برای بسیاری از گیاهان در شرایط اقلیمی متنوع و تحت مدیریت‌های متفاوت آبیاری و حاصلخیزی ارزیابی شده است (Akumaga et al. 2017; Ranjbar et al., 2019). در این مدل برای شبیه‌سازی رشد گیاه در سطوح مختلف کود از یک روش نیمه کمّی (Semi-quantitative) شامل پارامترهای کمّی و کیفی، به جای بررسی بیلان انتقال املاح در خاک، که اساساً دارای روابط و پیچیدگی‌های خاصی هست، استفاده می‌شود. در روش مذکور، شبیه سازی پاسخ گیاه به کمبود نیتروژن با استفاده از تعدادی ضرایب کاهشی و اعمال آن‌ها بر پوشش گیاهی[1] (CC) و بهره‌وری نرمال شده آب[2] (WP*) انجام می شود. این تغییرات منجر به تغییر میزان تعرق[3] (Tr)، رطوبت خاک، تولید زیست توده[4] (B) و عملکرد نهایی در نسبت‌های مختلف حاصلخیزی که پیشتر توسط کاربر تعیین شده بودند، خواهند شد. در نهایت مشخص می‌شود که در چه سطحی از کود نیتروژن، بهره‌وری آب محصول بهینه خواهد بود. در حالی که در این روش، زمان، مقدار نیتروژن مورد نیاز و تغییرات تنش نیتروژن در طول فصل رشد تعیین نمی‌شوند (Van Gaelen et al., 2015). Ranjbar et al. (2019) روش نیمه کمّی مدل AquaCrop را با هدف شبیه سازی پاسخ ذرت در شرایط تنش نیتروژن ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که دقت مدل در شبیه سازی تغییرات CC و B طی دوره کشت نسبت به برآورد عملکرد نهایی زیست توده و دانه، کمتر است. همچنین مشخص شد که هرچه تنش نیتروژن بیشتر باشد دقت مدل در شبیه سازی کمتر خواهد بود. نتایج مطالعه Ran et al. (2019) نشان می‌دهد که در روش نیمه کمّی برای برآورد WP* از یک معادله رگرسیون خطی ثابت طی دوره رشد استفاده می‌شود که همین مورد باعث افزایش خطا در شبیه سازی رشد گیاه در شرایط تنش نیتروژن خواهد شد. همچنین، تحقیقاتی که با هدف تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی و عدم قطعیت خروجی مدل AquaCrop تحت شرایط مختلف آبیاری و مدیریت نیتروژن انجام شده‌اند حاکی از آن هستند که تنش نیتروژن، یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین کننده میزان دقت شبیه سازی عملکرد محصول در این مدل است.(Guo et al., 2019). بنابراین، در مدل AquaCrop برای شبیه سازی رشد گیاه و عملکرد محصول باید اثر تنش حاصلخیزی خاک به طور دقیق مشخص شود.

تخمین نیاز گیاه به کودهای نیتروژن دار از طریق روش های مختلفی مبتنی بر سنجش وضعیت نیتروژن در خاک یا گیاه انجام می‌گیرد. روش‌های گیاهی تشخیص نیتروژن از جمله روش‌های دقیقی هستند که شرایط نیتروژنی گیاه در طول فصل رشد را برای

---

[1]- Canopy cover

[2] - Normalized water productivity

[3] - Transpiration

[4] - Biomass

مدیریت مقدار و زمان منا سب کودهای نیتروژن تعیین می‌کنند. پایش شاخص تغذیه نیتروژن[1] (NNI) در طول فصل ر شد، یکی از این روش‌های تشخیصی مدیریت نیتروژن است. NNI از نسبت غلظت واقعی نیتروژن (N_a) به غلظت نیتروژن بحرانی (N_c) در گیاه محاسبه می‌شـــود. منظور از N_c، حداقل غلظت نیتروژن مورد نیاز در گیاه اســـت که منجر به تولید حداکثر عملکرد در زمان معینی از دوره رشـــد می‌شود. مقادیر N_c با استفاده از منحنی ترقیق نیتروژن بحرانی[2] که برای هر گیاه قابل توسعه است محاسبه می‌شود. استفاده از مفهوم N_c در مدل‌های گیاهی برای شبیه‌سازی پاسخ گیاه به کمبود نیتروژن به عنوان یک روش مناسب توصیه شده است (Plenet and Lemaire, 2000).

تنش نیتروژن نه تنها بر فرآیندهای متابولیک گیاه تأثیر می‌گذارد، بلکه بر عملکرد روزنه‌ها و مقاومت پوشش گیاهی نیز موثر است. بر همین اساس، tockle and Debaeke (1997) یک روش مستقیم برای شبیه‌سازی تعرق گیاه بر اساس منحنی N_c توسعه داده‌اند که از آن به عنوان یکی از زیر بخش‌های مدل CropSyst استفاده می‌شود (Stockle et al., 2003). در این روش، اثر تنش نیتروژن بر تعرق گیاه با در نظر گرفتن افزایش مقاومت پوشش گیاهی[3] (rc) شبیه سازی می شود (Van Keulen and Seligman, 1987). اگر غلظت نیتروژن گیاه برابر یا بیشتر از غلظت N_c با شد، Tr و B تحت شرایط کمبود نیتروژن کاهش نمی‌یابند. در مقابل، اگر غلظت نیتروژن گیاه کوچک‌تر از غلظت N_c با شد سرعت ر شد گیاه کاهش یافته و متابولیسم گیاه به سمت صفر میل می‌کند (Plenet and Lemaire, 2000). از جمله مزیت‌های روش Stockle and Debaeke (1997) این ا ست که اثر کمبود نیتروژن با اعمال ضرایب کاهشی بر Tr و سپس B به طور مستقیم شبیه‌سازی می‌شود. این ضرایب بر اساس مقادیر N_c وrc در طول فصل رشد برآورد می‌شوند، بنابراین مقدار آن‌ها ثابت نیست. از مزایای این روش نسبت به روش نیمه کمّی مورد استفاده در مدل AquaCrop ، کاربرد ضرایب کاهشی غیرثابت در طول فصل رشد است. علاوه بر این، با ا ستفاده از این روش، مقدار و زمان کمبود نیتروژن در طول فصل ر شد برآورد خواهد شد. اما آیا در عمل ا ستفاده از این روش مستقیم نسبت به روش نیمه کمّی AquaCrop نتایج دقیق‌تری ایجاد می‌کند یا خیر، سوالی است که باید بر اساس داده‌های میدانی مورد بررسی قرار بگیرد. به همین منظور، Rahimikhoob et al. (2021) روش نیمه کمّی مدل AquaCrop را با روش مستقیم پیشنهادی Stockle and Debaeke (1997) در شبیه‌سازی B تحت تنش نیتروژن مقایسه کردند. مطالعه آن‌ها بر روی گیاه ریحان و در شرایط کشت گلخانه‌ای انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که روش مستقیم به طور معنی‌داری پاسخ گیاه ریحان به کمبود نیتروژن را بهتر از روش نیمه کمّی شبیه‌سازی می‌کند. علاوه بر این مطالعه آن‌ها نشان دادند که مدل AquaCrop در شرایط تنش نیتروژن دقت کمتری در شبیه‌سازی B داشته است. مطالعات دیگری نیز کاهش دقت برآورد مدل را تحت شرایط تنش بیشتر نیتروژن گزارش داده بودند (Akumaga et al. 2017; Ranjbar et al., 2019). به منظور ارزیابی دقیق‌تر کارایی روش مستقیم ضروری است تا مطالعات بیشتری بر روی محصولات و شرایط کشت متفاوت (کشت در مزرعه) صورت پذیرد. از این رو، هدف اصلی در مطالعه حاضر، ارزیابی کارایی روش مستقیم مبتنی بر N_c برای شبیه سازی عملکرد ذرت در طول فصل ر شد و تحت شرایط تنش نیتروژن ا ست. هم‌چنین نتایج بدست آمده از روش مستقیم با نتایج روش نیمه کمّی در مدل AquaCrop مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده در این مطالعه از آزمایش مزرعه‌ای که در اراضی کشاورزی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران و طی سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ انجام شده بود بدست آمده است. این منطقه در جنوب شرقی استان تهران واقع شده و براساس طبقه‌بندی دومارتن دارای اقلیمی خشک با ارتفاع ۱۰۲۰ متری از سطح دریا، میانگین سالانه دمای هوای ۱۹ درجه سانتیگراد و متوسط بارندگی ۱۶۵ میلیمتر در سال است.

---

[1] - Nitrogen nutrition index

[2] - Critical nitrogen dilution curve

[3]- Canopy resistance

عمق خاک زراعی در منطقه مورد مطالعه ۶۰ سانتیمتر و بافت آن لوم بود. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی (متوسط دو سال)

پارامتر		عمق ۰ تا ۲۰ (cm)	عمق ۲۰ تا ۴۰ (cm)	عمق ۴۰ تا ۶۰ (cm)
جرم مخصوص ظاهری ($g.cm^{-3}$)		۱/۶۰	۱/۶۱	۱/۶۱
ظرفیت زراعی (درصد حجمی)		۲۶/۲	۲۶/۶	۲۷/۹
رطوبت پژمردگی (درصد حجمی)		۱۳/۰	۱۳/۳	۱۳/۸
نیترات ($mg.cm^{-3}$)		۰/۰۱۵	۰/۰۱۰	۰/۰۰۵
آمونیوم ($mg.cm^{-3}$)		۰/۰۱۲	۰/۰۰۷	۰/۰۰۴
نیتروژن (٪)		۰/۱	۰/۰۸	۰/۰۵
ماده آلی (٪)		۱/۴۱	۰/۸۵	۰/۵۶
بافت خاک		لوم	لوم	لوم
درصد ذرات خاک	**رس**	۱۳/۶	۱۳/۶	۱۷/۶
	سیلت	۳۴/۶	۳۶/۶	۳۴/۶
	شن	۵۱/۸	۴۹/۸	۴۷/۸

گیاه مورد استفاده در این مطالعه ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ بود که در تاریخ ۱۰ خرداد ۱۳۹۴ و ۲۴ اردیبهشت ۱۳۹۵ در روی پشته‌هایی به فاصله ۷۵ سانتی‌متر و به صورت تک ردیفی و به فاصله گیاهی ۱۸ سانتی‌متر کشت شد. آزمون خاک قبل از کشت انجام شد و به جز نیتروژن، سایر عناصر مورد نیاز گیاه توسط کودهای مربوطه به طور یکنواخت به مزرعه تحقیقاتی اضافه شد. بنابراین تنها عنصر محدود کننده حاصلخیزی خاک، نیتروژن بود و تیمارهای کودی بر اساس آن طراحی شدند. لذا در این مطالعه، تیمارها شامل پنج سطح صفر به عنوان شاهد (N0)، ۵۰ (N1)، ۱۰۰ (N2)، ۱۵۰ (N3) و ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار (N4) توسط کود اوره (حاوی ۴۶٪ نیتروژن) و به صورت طرح بلوک‌های تصادفی و با سه تکرار ایجاد شدند. در طول هر دو فصل کشت ۴۰، ۳۰ و ۳۰ 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. طول دوره کشت در سال اول و دوم به ترتیب ۱۱۹ و ۱۱۵ روز بود.

برای هر کرت آزمایشی مساحتی حدود ۲۵ متر مربع با فاصله یک متری از هم در نظر گرفته شد. زمان دقیق آبیاری توسط پایش تغییرات رطوبت خاک در طول فصل کشت با استفاده از دستگاه TDR طوری تعیین می‌شد تا گیاه با هیچ‌گونه تنش خشکی مواجه نشود. مقدار و زمان آبیاری با استفاده از اندازه‌گیری دبی حجمی و محاسبه عمق آب آبیاری توسط پارامترهای رطوبت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی خاک و با در نظر گرفتن ضریب مدیریتی مجاز آبیاری[1] برای گیاه ذرت (۰/۵) محاسبه می‌گردید. بر اساس مساحت هر کرت و عمق آبیاری محاسبه شده و دبی حجمی آب ورودی به هر کرت، مدت زمان آبیاری تعیین می‌شد. مجموع آب آبیاری و میزان تبخیر تعرق مرجع در طول دوره کشت به ترتیب برابر ۷۷۹ و ۷۲۵ میلیمتر برای سال ۱۳۹۴ و ۷۹۷ و ۷۷۶ میلیمتر برای سال ۱۳۹۵ بود. اطلاعات کامل‌تر راجع به مزرعه آزمایشی در (Ranjbar et al., 2019) ارائه شده است.

نمونه برداری

1 - Management Allowed Depletion

نمونه‌های گیاهی برای اندازه‌گیری عملکرد زیست توده و N_a در هر دو سال آزمایش بعد از کاشت بذر تا انتهای فصل کشت طی شش نوبت برداشت شدند. در هر مرحله نمونه‌ها از ردیف‌های میانی هر کرت آزمایشی انتخاب و از سطح خاک بریده می‌شدند و بعد از انتقال سریع به آزمایشگاه و توزین آنها، در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک و مجددا وزن می‌شدند. در هر مرحله، با استفاده از روش استاندارد کجلدال (Horowitz, 1970) غلظت نیتروژن واقعی نمونه‌ها (N_a) اندازه‌گیری می‌شد. تغییرات مورفولوژیکی گیاه نیز در زمان مناسب ثبت می‌شد. مقدار پوشش گیاهی طی هر دو دوره کشت سال ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ در مراحل مختلف رشد با استفاده از تهیه عکس‌های دیجیتال و تحلیل آن‌ها توسط نرم‌افزار کانوپئو[1] طبق روش Patrignani and Ochsner (2015) برآورد گردید.

منحنی نیتروژن بحرانی و آنالیز آماری

با استفاده از معادله N_c ارائه شده برای ذرت در منطقه پاکدشت (Ranjbar et al., 2020)، N_c برای تیمارهای مختلف در هر مرحله تعیین گردید. شاخص NNI برای کلیه مراحل رشد از نسبت N_a به N_c برای کلیه مراحل رشد محاسبه شد. همچنین، تجزیه و تحلیل واریانس داده‌های اندازه‌گیری شده (ANOVA) با استفاده از نرم‌افزار SAS صورت گرفت. برای مقایسه میانگین از آزمون LSD (least significant difference) ($P\leq0.05$) استفاده شد. از آنجایی که مشخص شد سال‌های آزمایش هیچ اثر معنی‌داری روی پارامترهای اندازه‌گیری نداشتند، از داده‌های هر دوسال در تجزیه و تحلیل‌ها استفاده گردید. بدین ترتیب، تیمار بهینه کودی (Nopt) که علی‌رغم دریافت کود کمتر عملکرد زیست توده‌اش تفاوت معنی‌داری با حداکثر عملکرد نداشت، تعیین شد (که همان تیمار N4 است). همچنین، برای تیمار بهینه و سایر تیمارها تغییرات NNI در طول فصل رشد محاسبه گردید. علاوه بر منحنی ترقیق N_c ، منحنی ترقیق حداکثر (Nmax) و حداقل (Nmin) غلظت نیتروژن گیاه نیز محاسبه شد.

روش مستقیم شبیه سازی

در مدل AquaCrop از روابط زیر برای برآورد تعرق و تولید زیست توده در طول فصل رشد استفاده می‌شود (Rase et al., 2018).

$$Tr_i = K_{CTrx} \times CC \times ET_{Oi} \quad (۱)$$

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

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_{oi} مقدار تبخیر و تعرق مرجع در روز i ام (میلیمتر بر روز)، KC_{Trx} حداکثر ضریب تعرق گیاهی (بدون بعد)، B مقدار زیست توده تولید شده (گرم بر متر مربع)، WP^* بهره‌وری آب نرمال شده گیاه (گرم بر متر مربع)، n تعداد روزهای بعد از کشت می‌باشند.

در مدل AquaCrop از یک روش نیمه کمّی برای شبیه‌سازی اثر کمبود نیتروژن بر روی مقادیر B در طول فصل رشد استفاده می شود. در این روش، بعد از اعمال ضرایب کاهشی بر روی CC و WP^* در روابط ۱ و ۲ مقادیر B برآورد می شوند. این ضرایب کاهشی برای هر تیمار کودی ثابت هستند و در راهنمای کاربرد مدل به طور کامل تشریح شده‌اند (Rase et al., 2018). در مطالعه حاضر، به جای استفاده از روش نیمه کمی، از روش مستقیم ارائه شده توسط Stockle and Debaeke (1997) استفاده شد. این روش مبتنی بر مفهوم

2- Canopeo

ویرایشی نشده

منحنی N_c است و برای برآورد تعرق در شرایط تنش نیتروژن پیشنهاد شده است. در این روش فرض می‌شود که کمبود نیتروژن با تاثیر مستقیم بر سطح پوشش گیاه (CC) و مقاومت آن (rc) باعث کاهش تعرق خواهد شد. از روش مستقیم به عنوان یکی از زیر بخش‌های مدل‌های گیاهی نظیر CropSyst، در شبیه سازی تاثیر کمبود نیتروژن بر روی عملکرد گیاه استفاده می‌شود. در نهایت نتایج بدست آمده از این روش بعد از ارزیابی با داده‌های اندازه‌گیری شده، با نتایج بدست آمده از مدل AquaCrop در سایر مطالعات مقایسه شد.

در روش مستقیم، rc برای شرایط بدون تنش کودی توسط رابطه ۳ محاسبه می‌شود (Hatfield and Allen, 1996).

$$r_c = \frac{0.3\,LAI + 1.2}{LAI} \times r_s \qquad (۳$$

که در آن rs مقاومت سطحی و LAI شاخص سطح برگ است. برای محاسبه LAI توسط مقادیر CC از رابطه ۴ (Hsiao et al., 2009) استفاده شد.

$$CC = 100.5[1 - \exp(-0.6LAI)]^{1.2} \qquad (۴$$

همچنین برای محاسبه پارامتر rs از معادله پنمن مونتیث به همراه مقادیر محاسبه شده تبخیر و تعرق گیاهی و پارامترهای اقلیمی استفاده شد (Allen et al., 1998).

$$r_s = \frac{r_a[\Delta R_n - \lambda ET_c(\Delta + \gamma)] + \rho_a C_p(e_s - e_a)}{\gamma \lambda ET_c} \qquad (۵$$

در این رابطه، rs مقاومت سطحی (s.m^{-1})، Rn تابش خالص (MJ m^{-2} day^{-1})، (es – ea) کمبود فشار بخار هوا (kPa)، ρa میانگین جرم مخصوص هوا در فشار ثابت (kg m^{-3})، cp گرمای ویژه هوا (J kg^{-1}◦C^{-1})، Δ شیب منحنی فشار بخار آب نسبت به دما (kPa◦C^{-1})، λ گرمای نهان تبخیر (MJ kg^{-1})، γ ضریب ثابت سایکرومتری (kPa◦C^{-1})، ETc تبخیر و تعرق گیاه (mm.day^{-1}) و ra مقاومت آئرودینامیک(s.m^{-1}) می‌باشند. مراحل محاسبه ETc برای گیاه ذرت طبق دستورالعمل فائو ۵۶ (Allen et al., 1998) انجام شد. بدین ترتیب که ابتدا تبخیر و تعرق مرجع روزانه توسط رابطه پنمن مونتیث و پارامترهای اقلیمی جمع آوری شده از ایستگاه هواشناسی واقع در دانشگاه محاسبه شد. سپس با تصحیح ضریب گیاهی ذرت در مراحل مختلف رشد و بر اساس پارامترهای هواشناسی، مقادیر روزانه ETc محاسبه شد.

تاثیر کمبود نیتروژن بر مقاومت پوشش گیاهی با تصحیح مقدار rc توسط مقادیر N_c و واقعی گیاه تعیین می‌گردد (رابطه ۶) (Stockle et al., 2003).. جزئیات بیشتر راجع به روابط تعیین N_c، Nmin و Nmax توسط Ranjbar et al. (2020) تشریح شده است.

$$r_{cN} = \frac{r_c}{\left[1 - \frac{N_c - N_a}{N_c - N_{min}}\right]} \qquad (۶$$

که در آن، rcN مقدار تصحیح شده مقاومت پوشش گیاهی تحت تنش نیتروژنی است (s.m^{-1})، N_c و Nmin به ترتیب N_c و حداقل N_a (%) است. با توجه به تصحیح مقاومت پوشش گیاهی، تعرق گیاه در تیمارهای تحت تنش نیز با تصحیح تعرق پتانسیل گیاه محاسبه می‌شود (رابطه ۷) (Stockle et al., 2003).

ویراستاری نشده

$$Tr_{Ni} = Tr_{Pi} \times \left[\frac{\Delta + \gamma\left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)}{\Delta + \gamma\left(1 + \frac{r_{cN}}{r_a}\right)}\right] \quad (۷$$

علاوه بر تعرق گیاه، تنش نیتروژنی به طور معنی‌داری بر روی بهره‌وری آب محصول نیز تاثیر می‌گذارد (Rase et al., 2018). بنابراین بهره‌وری آب نرمال شده نیز باید در تیمارهای تحت تنش تصحیح شود. برای این منظور از شاخص تغذیه نیتروژن در رابطه (۸) استفاده شد (Rahimikhoob et al., 2021). در این رابطه شاخص تغذیه نیتروژن به عنوان ضریب کاهشی WP^* در تیمارهای تحت تنش نیتروژن در نظر گرفته شده است. در نهایت، مقدار زیست توده در تیمارها بر اساس رابطه (۹) که تصحیح شده رابطه (۱) نیز است محاسبه شد.

$$WP^*_{Ni} = WP^*_{Pi} \times NNI_i \quad (۸$$

$$B_N = WP^*_{Ni} \sum_{i=1}^{n} \frac{Tr_{Ni}}{ET_{oi}} \quad (۹$$

ارزیابی مدل

به منظور ارزیابی دقت روش مستقیم برآورد Tr در تیمارهای تحت تنش نیتروژنی، مقادیر زیست توده در تیمارهای مختلف یا مقادیر اندازه‌گیری شده در مزرعه مورد مقایسه قرار گرفتند. برای این منظور از شاخص‌های آماری شامل ضریب تبیین[1] (R^2)، ریشه متوسط مربعات خطای نسبی[2] (RRMSE) و میانگین انحراف خطا[3] (MBE) بر طبق روابط زیر استفاده شد:

$$RRMSE = \frac{RMSE \times 100}{\bar{O}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - S_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (۱۰$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(S_i - \bar{S})^2}}\right)^2 \quad (۱۱$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)}{n} \quad (۱۲$$

که در این روابط Oi برابر مقادیر مشاهده‌ای، iS مقادیر شبیه‌سازی شده، $\bar{O}$ متوسط مقادیر مشاهده‌ای و $\bar{S}$ متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده، n تعداد داده‌های مشاهده‌ای بود.

نتایج و بحث

در مطالعه حاضر، مقادیر B توسط یک روش مستقیم مبتنی بر منحنی N_c و بر اساس غلظت روزانه نیتروژن ذرت شبیه‌سازی شده است.

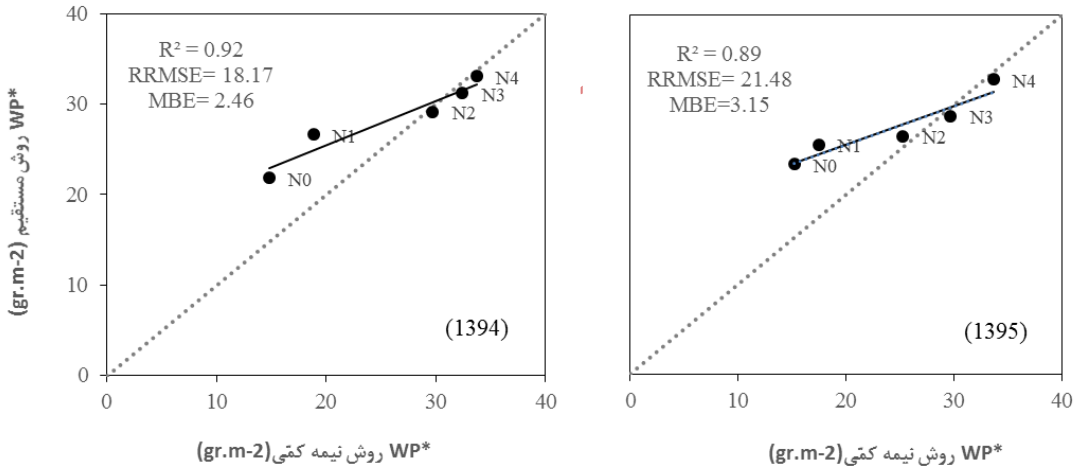
1- Coefficient of determination
2 - Relative root mean square error
3- Mean bias error

ویرایشگر

در این روش بر ا ساس تاثیری که کمبود نیتروژن بر روی پارامترهای rc، Tr و WP^* دارد، مقادیر B در طول دوره ر شد گیاه شبیه سازی شد. بنابراین، هرچقدر این پارامترها در تیمارهای تحت تنش نیتروژن با دقت بالاتری برآورد شوند، در نهایت مقادیر B در طول دوره رشد گیاه نیز دقیق‌تر برآورد خواهد شد. برای درک بهتر، نتایج هر مرحله از شبیه‌سازی مورد بررسی و بحث قرار گرفت و با نتایج مطالعات قبلی مقایسه شد.

ارزیابی مقادیر بهره‌وری آب نرمال شده

در شکل (۱) مقادیر WP^* برآورد شده به وسیله روش مستقیم و روش نیمه کمّی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مقادیر WP^* در روش مستقیم در طول فصل رشد برای هر روز بر اساس NNI محاسبه می‌شود. در اینجا از میانگین این مقادیر برای مقایسه استفاده شده است. حداقل و حداکثر مقدار برای WP^* در روش مستقیم به ترتیب ۲۱/۸ و ۳۳/۱ گرم بر متر مربع و در روش نیمه کمّی به ترتیب ۱۴/۸ و ۳۳/۷ گرم بر متر مربع بود. مقادیر کوچکتر برای تیمارهایی است که تحت تنش بیشتری قرار دارند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که مقادیر WP^* در روش مستقیم نسبت به روش نیمه کمّی، عدد بزرگ‌تری است. در حالی که، دامنه تغییرات WP^* در روش نیمه کمّی بیشتر است. در واقع، به دلیل این‌که در روزهای ابتدایی رشد که گیاه هنوز با تنش نیتروژن مواجه نشده است و غلظت نیتروژن در گیاه بالا ست، مقدار NNI نیز بالا می‌باشد. در این شرایط طبق رابطه (۸) مقدار WP^* در کلیه تیمارها تقریبا نزدیک به هم است. بعد از مرحله ابتدایی رشد که اثر تنش نیتروژن بر روی میزان CC و Tr تاثیر می‌گذارد، ب تدریج با افت غلظت نیتروژن در گیاه، مقدار WP^* نیز کاهش پیدا می‌کند که شیب آن به شدت تنش بستگی دارد. در نهایت کاهش WP^* منجر به کاهش B خواهد شد. در مطالعه Rahimikhoob et al. (2021) دامنه تغییرات WP^* برای ریحان از ۱۰/۷ (N0) تا ۱۸/۱ (N4) گرم در متر مربع گزارش شده است.



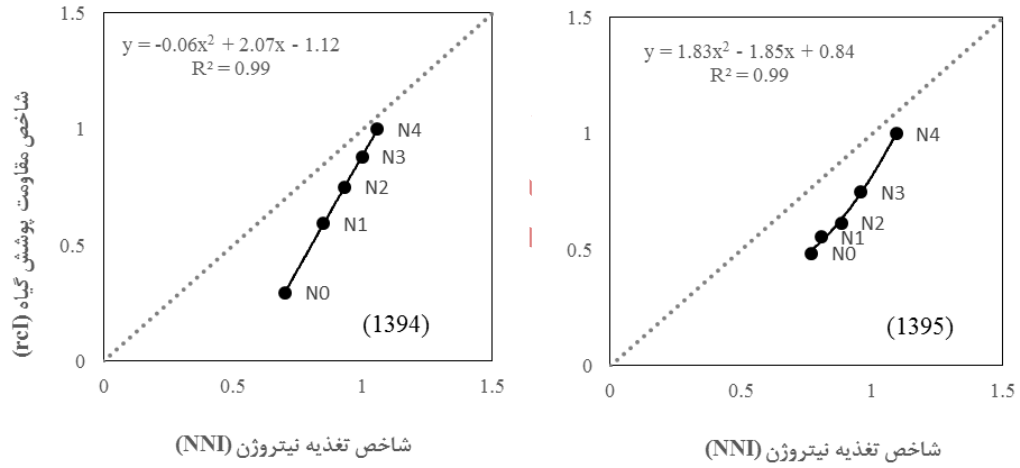
شکل ۱. مقایسه WP^* برآورد شده با روش مستقیم و نیمه کمّی در دو سال آزمایش

ارزیابی مقادیر مقاومت پوشش گیاهی و تعرق

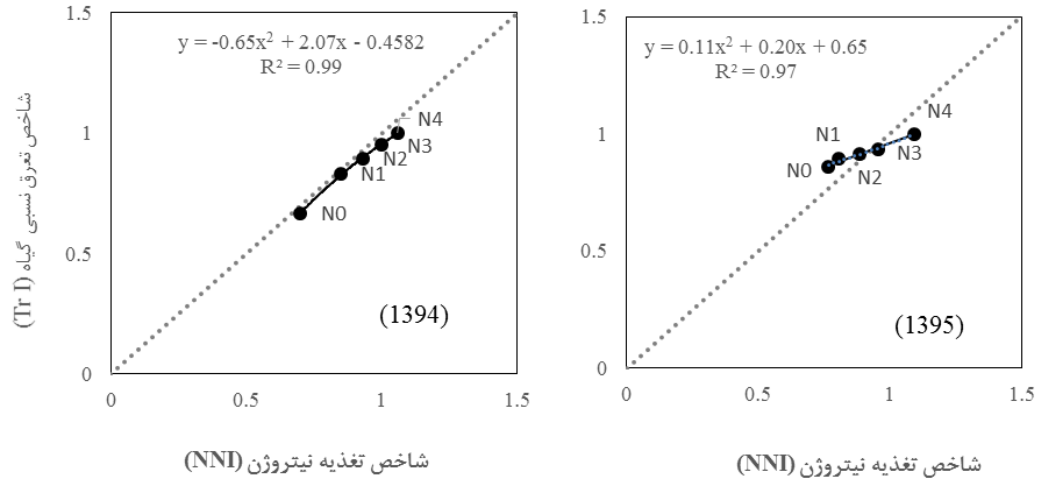
به منظور بررسی اثر تنش نیتروژن بر rc، از شاخص مقاومت نسبی پوشش گیاه (rcI) که عبارت است از نسبت rc در تیمار بدون تنش به rcN مقادیر متناظر در تیمارهای تحت تنش، در مقابل NNI استفاده شد (شکل ۲). مقادیر به دست آمده برای rcI بین ۰ تا ۱ است. چنانچه گیاه در معرض تنش نیتروژن قرار نگیرد، مقدار این شاخص برابر با یک خواهد بود. در مقابل، در شرایط کمبود نیتروژن، هر چه

rc بیشتر باشد، rcI کمتر است. رابطه بین rcI و NNI برای هر دو سال آزمایش در شکل ۲ ارائه شده است. این شکل به خوبی نشان می‌دهد که یک رابطه غیر خطی بین rcI و NNI وجود دارد. به عبارت دیگر، هر چه مقدار NNI بیشتر می‌شود و تنش کودی کمتر است، rcI نیز بیشتر خواهد بود.

از طرف دیگر، جهت بررسی اثر تنش نیتروژن بر تعرق، از شاخص تعرق نسبی گیاه (TrI) که از نسبت Tr در تیمارهای تحت تنش (TrN) به Tr پتانسیل (TrP) محاسبه می‌شود، در مقابل NNI استفاده شد (شکل ۳). همانند rcI، مقادیر به دست آمده برای TrI بین ۰ تا ۱ است. چنانچه گیاه در معرض تنش نیتروژن قرار نگیرد، مقدار این شاخص برابر با یک است. در مقابل، در شرایط کمبود نیتروژن، هر چه Tr کمتر باشد، TrI کمتر خواهد بود. رابطه بین شاخص TrI و NNI برای هر دو سال آزمایش در شکل ۳ ارائه شده است. این شکل به خوبی نشان می‌دهد که یک رابطه غیر خطی بین TrI و NNI وجود دارد. به عبارت دیگر، هر چه مقدار NNI بیشتر می‌شود و تنش کودی کمتر است، TrI نیز بیشتر خواهد بود. در مطالعه Rahimikhoob et al. (2021) نیز از این شاخص‌ها برای بررسی تغییرات rc و Tr در تیمارها استفاده شده است.

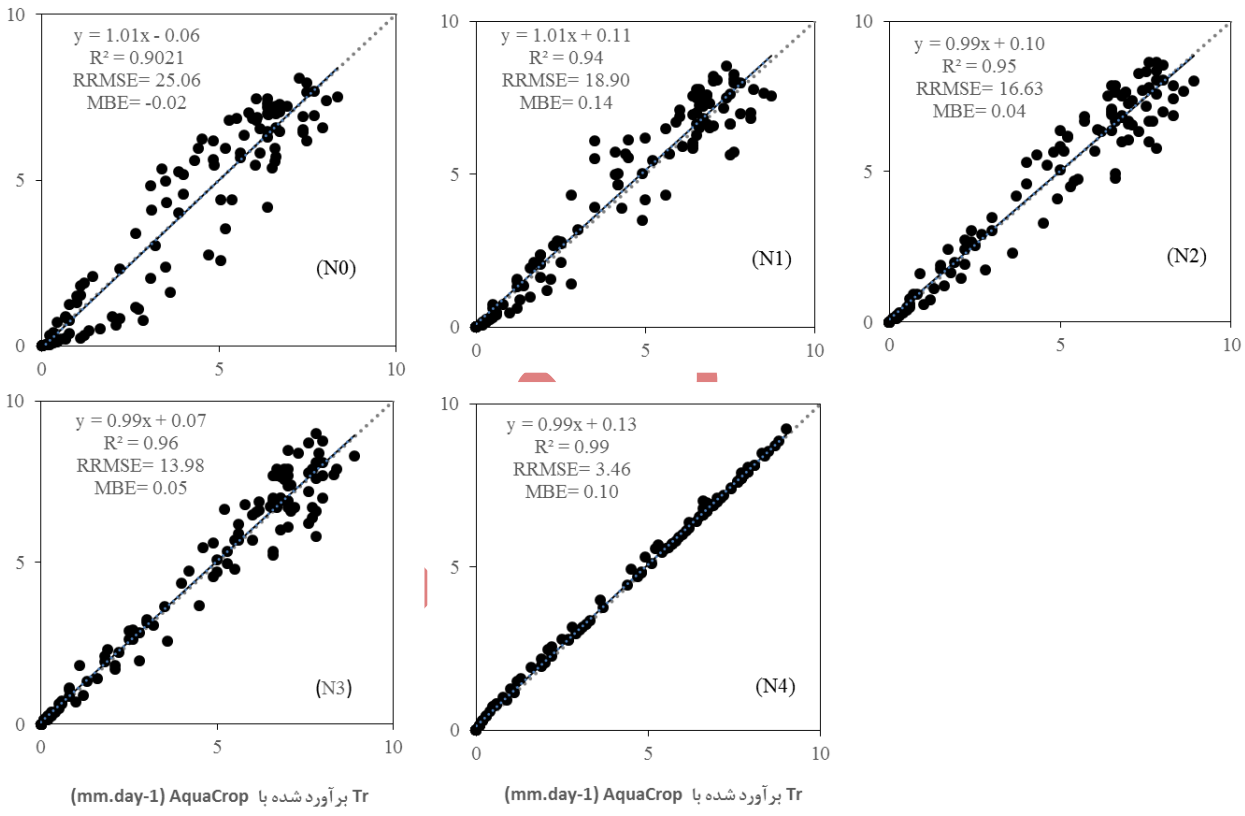


شکل ۲. رابطه بین شاخص تغذیه نیتروژن و شاخص مقاومت پوشش گیاه در دو سال آزمایش

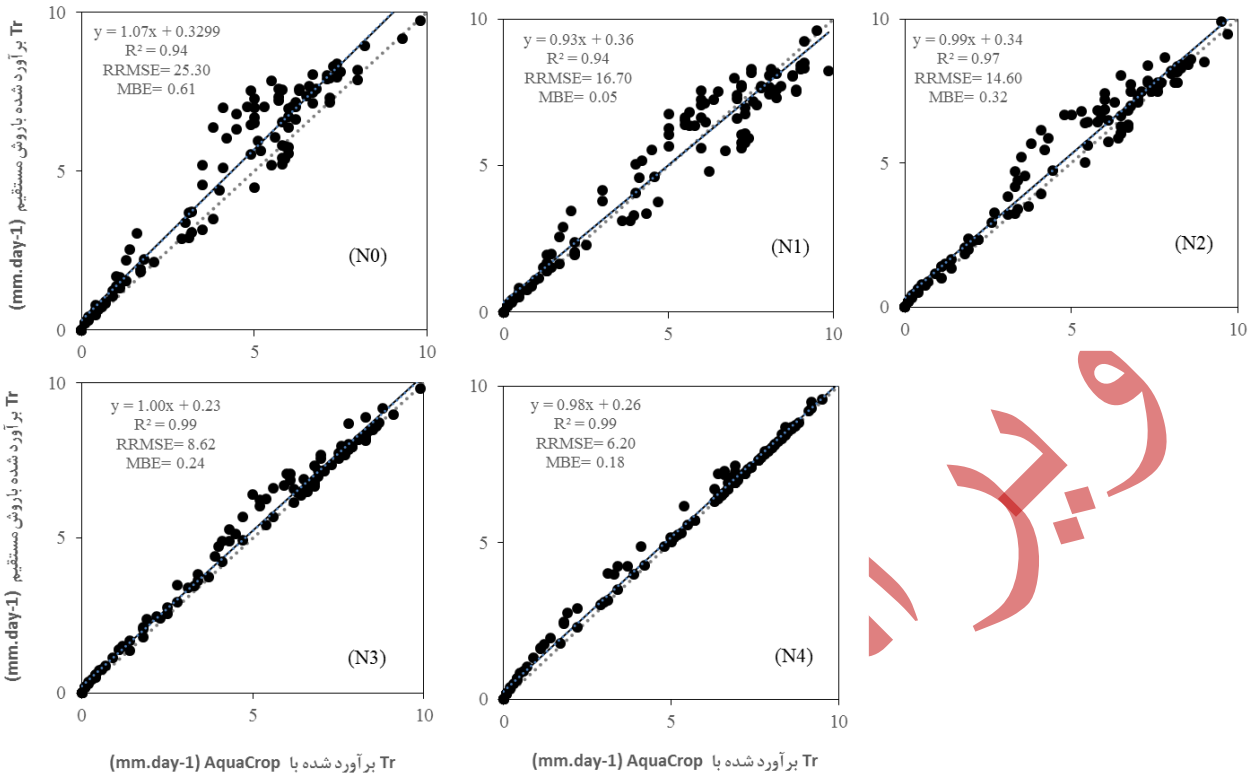


شکل ۳. رابطه بین شاخص تغذیه نیتروژن و شاخص تعرق نسبی گیاه در دو سال آزمایش

در شکل (۴) و (۵) مقادیر Tr برآورد شده به روش مستقیم و مدل AquaCrop برای تیمارها تحت بیشترین (N0) تا کمترین (N4) تنش نیتروژن در هر دو سال آزمایش نشان داده شده است. اختلاف مقادیر Tr برآورد شده به دو روش تحت شرایط بدون تنش ناچیز است. هر چقدر مقدار تنش نیتروژن بیشتر شده، اختلاف برآورد دو روش با یکدیگر نیز بیشتر شده است. در مدل AquaCrop اثر تنش نیتروژنی توسط ضرایب کاهشی که روی CC اعمال می‌شود، منجر به کاهش Tr در تیمارهای تحت تنش خواهد شد. این در حالی است که Guo et al. (2019) گزارش دادند که در واسنجی مدل AquaCrop، تنش کودی نسبت به تنش خشکی عامل مهم‌تر و تأثیرگذارتری است و واسنجی پارامتر CC نسبت به عملکرد زیست توده باید بیشتر مورد توجه قرار بگیرد. بنابراین واسنجی CC تاثیر زیادی در دقت برآورد Tr دارد. در روش مستقیم طبق رابطه ۷، مقاومت پوشش گیاهی در شرایط تنش نیتروژن بیشتر می شود که این عامل منجر به کاهش تعرق و رشد گیاه خواهد شد. دقت بالای برآورد Tr در این روش نیز به دقت برآورد N_c و اندازه‌گیری N_a گیاه بستگی دارد.



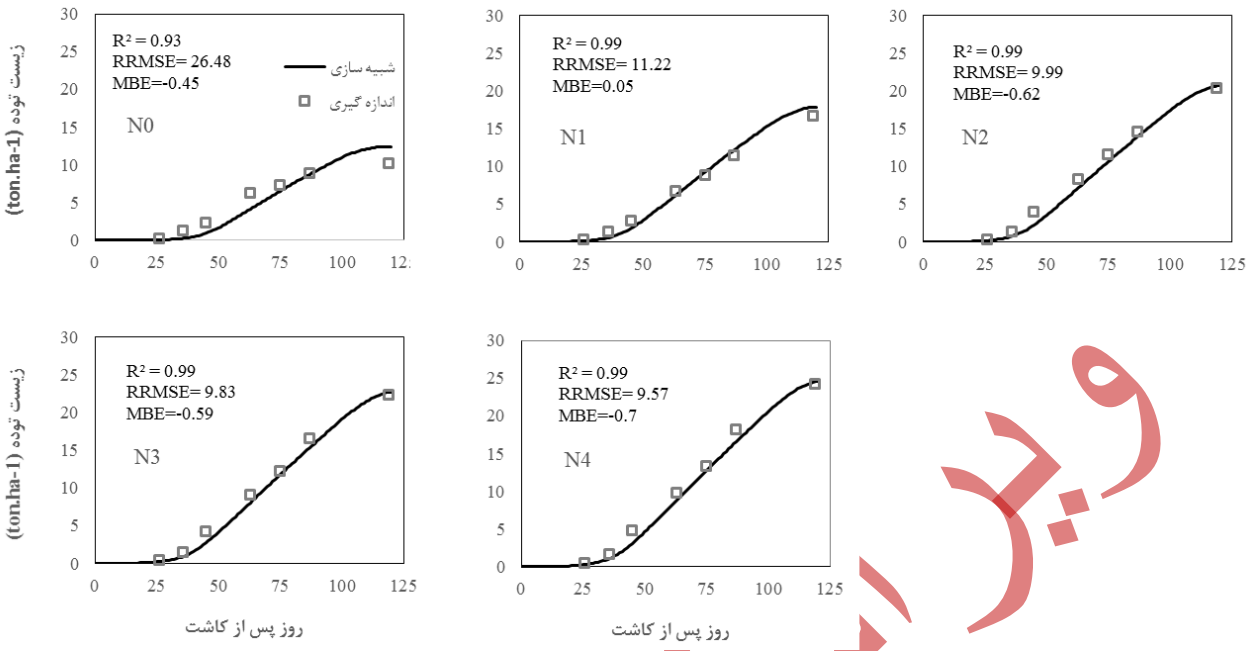
شکل ۴.رابطه بین تعرق برآورد شده به روش مستقیم و مدل **AquaCrop** در سال اول آزمایش



شکل ۵. رابطه بین تعرق برآورد شده به روش مستقیم و مدل AquaCrop در سال دوم آزمایش

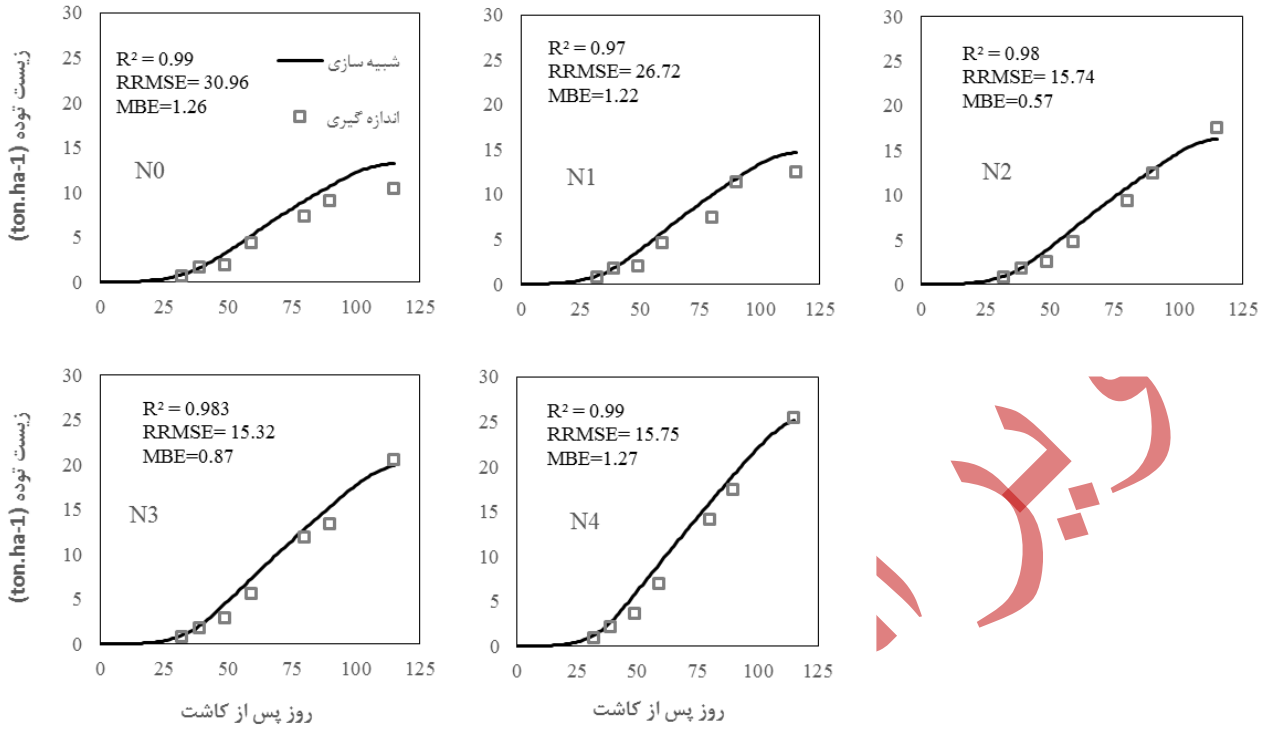
ارزیابی مقادیر زیست توده

مقادیر شبیه سازی شده زیست توده گیاه ذرت در طول دوره رشد توسط روش مستقیم به همراه مقادیر اندازه گیری شده در شکل ۶ و ۷ نمایش داده شده است. نتایج بدست آمده برای هر دو سال آزمایش حاکی از آن هستند که شبیه‌سازی B در تیمارهایی که تحت بیشترین تنش نیتروژنی قرار دارند (N0) با دقت کمتری انجام شده است و عملکرد زیست توده نهایی در این تیمارها بیشتر از مقدار واقعی برآورد شده است. به طوری که RRMSE برای شبیه‌سازی زیست توده به روش مستقیم در تیمارهای تحت بیشترین تنش ۲۶/۴۸ و ۳۰/۹۶ و در تیمارهای بدون تنش ۹/۵۷ و ۱۵/۷۵ درصد بود. با این وجود، روند افزایشی B در طول دوره کشت در سایر تیمارها با دقت مناسبی توسط روش مستقیم شبیه‌سازی شده است. نتایج بدست آمده از شبیه سازی B به روش مستقیم تطابق نسبتا بالایی با نتایج بدست آمده از مدل AquaCrop با داده‌های ورودی یکسان داشت. Ranjbar et al. (2019) گزارش دادند که، دقت شبیه‌سازی B توسط AquaCrop در تیمارهایی که تنش بیشتری داشتند، کمتر بود. جدول ۲ نتایج شبیه سازی در این مطالعه را ارائه می‌دهد. مقدار R^2، RRMSE (%) و MBE (ton. ha^{-1}) برای تیمار N0 (بیشترین تنش) به ترتیب برابر ۰/۹۷۹، ۲۹/۱۶، ۱/۵۳ و برای N4 (کمترین تنش) به ترتیب برابر ۰/۹۹۷، ۹/۱۸ و ۰/۲۶ بود. این مدل عملکرد زیست توده نهایی را بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌کرد (MBE= 0.41 ton.ha^{-1}). دلیل بیش‌برآورد B نهایی در هر دو روش می‌تواند نادیده گرفتن تاثیر عواملی نظیر آفات و بیماری‌ها بر عملکرد گیاه در محاسبات این روش‌ها باشد.



شکل ۶. ارزیابی دقت زیست توده شبیه سازی شده به روش مستقیم در تیمارهای مختلف سال اول آزمایش

ویراستاری نشده



شکل ۷. ارزیابی دقت زیست توده شبیه سازی شده به روش مستقیم در تیمارهای مختلف سال دوم آزمایش

جدول ۲. نتایج شبیه سازی زیست توده توسط مدل AquaCrop در هر دو سال آزمایش و نقش تیمارها در واسنجی و صحت سنجی مدل نیمه کمی (Ranjbar et al., 2019).

سال آزمایش	تیمار	R^2	RRMSE (%)	MBE (ton.ha^{-1})
۱۳۹۴	N0 (واسنجی)	۰/۹۹۵	۱۱/۸۱	۰/۵۱
	N1 (صحت سنجی)	۰/۹۸۵	۱۹/۱۲	۱/۰۸
	N2 (صحت سنجی)	۰/۹۹۶	۶/۰۹	-۰/۰۵
	N3 (صحت سنجی)	۰/۹۹۱	۱۰/۴۷	-۰/۸۱
	N4 (واسنجی)	۰/۹۸۹	۱۱/۸۱	۱/۰۲
۱۳۹۵	N0 (صحت سنجی)	۰/۹۷۹	۲۹/۱۶	۱/۵۳
	N1 (صحت سنجی)	۰/۹۶۴	۲۹/۲۰	۱/۵۷
	N2 (صحت سنجی)	۰/۹۶۷	۳۲/۳۹	۲/۳۱
	N3 (صحت سنجی)	۰/۹۸۳	۲۰/۷۰	۱/۷۱
	N4 (صحت سنجی)	۰/۹۹۷	۹/۱۸	۰/۲۶

شاخص RRMSE (ریشه متوسط مربعات خطای نسبی) در شبیه‌سازی زیست توده به روش مستقیم، به طور متوسط برای هر تیمار ۴

درصد نسبت به روش نیمه کمّی کمتر بود. نتایج مشابهی برای شبیه سازی گیاه ریحان در گلخانه توسط Rahimikhoob et al. (2021) نیز گزارش شده است. در روش مستقیم، طبق رابطه ۸، مقادیر WP^* در طول دوره رشد بر اساس شاخص تغذیه نیتروژن تغییر می‌کند. در حالی که در مدل AquaCrop مقدار WP^* از یک معادله رگرسیون خطی به دست می‌آید که در طول دوره رشد ثابت فرض می شود. این عامل ممکن است باعث ایجاد خطای بیشتر در شبیه سازی B شود. تغییرات در مقادیر WP^* در طول دوره رشد گیاه توسط Ran et al. (2019) مورد بررسی قرار گرفته است. آنها دو مدل دینامیکی غیر خطی را از معادلات لجستیک و سیگموئید توسعه داده‌اند. نتایج آنها نشان داد که مدل‌های جدید توسعه‌یافته دقت شبیه‌سازی B را به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد. این در حالی است که در روش شبیه سازی مستقیم، بعد از اعمال تاثیر کمبود نیتروژن تیمارها بر پارامترهای rc، Tr و WP^* ، مقادیر B روزانه در طول فصل رشد برآورد خواهند شد. به عبارت دیگر، اثر کاربرد نیتروژن از طریق افزایش غلظت واقعی نیتروژن (جذب گیاه) در نظر گرفته می‌شود. در حالی که مدل AquaCrop قادر نیست در فرآیند شبیه سازی بین کاربرد کود در یک مرحله یا به صورت سرک در طول فصل تفاوتی قائل شود. چون اساسا برای این منظور طراحی نشده است و بیلان املاح را محاسبه نمی‌کند و به جای آن از یک روش نیمه کمّی (تلفیقی از پارامترهای کمّی و کیفی) استفاده می‌کند. در حالی که زمان و دفعات کاربرد کود و تلفات آن تأثیر قابل توجهی بر تولید زیست توده دارد.

عامل دیگری که باعث عملکرد بهتر روش مستقیم نسبت به مدل AquaCrop در شبیه سازی B می شود، روش محاسبه Tr گیاه تحت شرایط تنش نیتروژن است. در روش مستقیم، اثر تنش نیتروژن بر تعرق بر اساس تئوری غلظت بحرانی نیتروژن شبیه‌سازی می‌شود. طبق روابط ۷ و ۸، هر روزی که غلظت نیتروژن به کمتر از مقدار بحرانی کاهش یابد اثر کمبود نیتروژن بر rc و در نتیجه Tr اعمال می‌گردد. در حالی که در مدل AquaCrop اثر کمبود نیتروژن با اعمال ضرایب کاهشی ثابت بر روی CC و در نهایت Tr اعمال می شود. به طور کلی، در نظر گرفتن تغییرات rc روزانه در طول دوره شبیه سازی، برای درک بهتر پاسخ گیاه به کمبود نیتروژن ضروری است (Rahimikhoob et al., 2021).

در مجموع، این نتایج نشان می‌دهند که روش مستقیم در مقایسه با روش نیمه کمّی مدل AquaCrop می‌تواند عملکرد بهتری در شبیه‌سازی گیاه و مدیریت نیتروژن مزرعه داشته باشد و قابلیت این را دارد که به عنوان بخشی از مدل‌های جدید شبیه‌سازی رشد گیاهان مورد استفاده قرار گیرد. پیشنهاد می شود تحقیقات بیشتری برای بررسی دقت این روش در شرایط مدیریتی، اقلیمی و محیطی متفاوت انجام گیرد. اما محدودیت اصلی در این روش، در دسترس بودن معادله ترقیق N_c با ضرایب واسنجی شده برای گیاه و منطقه مورد نظر است. به عبارت دیگر، استفاده از منحنی توسعه یافته برای یک گیاه خاص در اقلیم متفاوت می‌تواند دقت نتایج را به طور قابل توجهی تحت تاثیر قرار دهد (Yue et al., 2014). همچنین، در روش شبیه سازی مستقیم اندازه‌گیری دقیق پارامترهای ورودی بیشتری از جمله مقاومت‌های آیرودینامیکی، مقاومت پوشش گیاهی، غلظت واقعی و بحرانی نیتروژن نیاز است. این در حالی است که مدل AquaCrop به عنوان یک مدل کاربردوست، علی‌رغم اینکه به داده‌های ورودی کمتری نیاز دارد، دقت قابل قبولی در در شبیه سازی B نشان داده است (Akumaga et al. 2017; Ranjbar et al., 2019). علاوه بر این، با توجه به اینکه مدل AquaCrop توسط سازمان FAO توسعه یافته، مطالعات متعددی با هدف ارزیابی عملکرد این مدل در اکثر نقاط دنیا انجام شده و راهنمای کاربرد و بانک داده‌های کاملی برای واسنجی دارد. بنابراین کاربرد آن در شرایطی که مجموعه داده‌های ورودی تکمیل نباشد، منطقی تر به نظر می‌رسد.

نتیجه‌گیری

مدل AquaCrop برای شبیه سازی پاسخ گیاه در شرایط تنش نیتروژن از یک روش نیمه کمّی استفاده می‌کند. در این روش، اثر کمبود نیتروژن بر تولید زیست توده بر اساس تعدادی ضریب کاهشی ثابت برای هر سطح تنش در طول فصل رشد شبیه‌سازی می‌شود. در حالی که این روش قابلیت تعیین مقدار و زمان تنش نیتروژن در طول فصل رشد را ندارد. کمبود نیتروژن باعث افزایش مقاومت پوشش گیاهی و کاهش تولید زیست توده خواهد شد. بنابراین، به منظور تعیین وضعیت نیتروژن گیاه و تعیین میزان کمبود نیتروژن در طول فصل رشد از یک روش شبیه‌سازی مستقیم در کنار مفهوم N_c استفاده شد. در این روش بر اساس تاثیری که کمبود نیتروژن بر روی پارامترهای rc،

Tr و WP^* دارد، مقادیر زیست توده در طول دوره رشد گیاه شبیه سازی شد. نتایج نشان داد که تنش نیتروژن رابطه معکوس با Tr و WP^* دارد. به عبارت دیگر، افزایش تنش نیتروژن باعث کاهش Tr و WP^* خواهد شد. همچنین، افزایش تنش نیتروژن موجب افزایش خطای شبیه سازی B شد. بررسی شاخص‌های آماری نشان داد که RRMSE در شبیه‌سازی زیست توده به روش مستقیم، به طور متوسط برای هر تیمار ۴ درصد نسبت به روش نیمه کمّی کمتر بود. همچنین، افزایش تنش نیتروژن موجب افزایش خطای شبیه سازی B شد. در مجموع، این نتایج نشان می‌دهند که ادغام روش شبیه‌سازی مستقیم و منحنی N_c ، کارایی بالایی در بررسی سناریوهای مدیریت نیتروژن برای اراضی کشاورزی را دارد.

References

Akumaga, U., Tarhule, A., & 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., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9), D05109.

Guo, D., Zhao, R., Xing, X., & Ma, X. (2020). Global sensitivity and uncertainty analysis of the AquaCrop model for maize under different irrigation and fertilizer management conditions. Archives of Agronomy and Soil Science, 66(8), 1115-1133.

Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., & 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.

Patrignani, A., & Ochsner, T. E. (2015). Canopeo: A powerful new tool for measuring fractional green canopy cover. Agronomy journal, 107(6), 2312-2320.

Plénet, D., & Lemaire, G. (1999). Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration. Plant and soil, 216, 65-82.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2018). Reference manual for AquaCrop, version 6.0/6.1. AquaCrop Website http://www. fao. org/nr/water/aquacrop. html.

Ran, H., Kang, S., Hu, X., Li, F., Du, T., Tong, L., ... & Parsons, D. (2019). Newly developed water productivity and harvest index models for maize in an arid region. Field crops research, 234, 73-86.

Rahimikhoob, H., Sohrabi, T., & Delshad, M. (2021). Simulating crop response to Nitrogen-deficiency stress using the critical Nitrogen concentration concept and the AquaCrop semi-quantitative approach. Scientia Horticulturae, 285, 110194.

Ranjbar, A., Rahimikhoob, A., Ebrahimian, H., & Varavipour, M. (2019). Assessment of the AquaCrop model for simulating maize response to different nitrogen stresses under semi-arid climate. Communications in soil science and plant analysis, 50(22), 2899-2912.

Ranjbar, A., Rahimikhoob, A., Ebrahimian, H., & Varavipour, M. (2020). Determination of critical nitrogen dilution curve based on canopy cover data for summer maize. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 51(17), 2244-2256.

Shan-Chao, Y. U. E., Fu-Lai, S. U. N., Qing-Feng, M. E. N. G., Rong-Fang, Z. H. A. O., Fei, L. I., Xin-Ping, C. H. E. N., ... & Zhen-Ling, C. U. I. (2014). Validation of a critical nitrogen curve for summer maize in the North China Plain. Pedosphere, 24(1), 76-83.

Steduto, P. (2003). Biomass water-productivity. Comparing the growth-Engines of Crop Models. FAO expert consultation on crop water productivity under deficient water supply, 26-28.

Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & 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.

Hatfield, J. L., & Allen, R. G. (1996). Evapotranspiration estimates under deficient water supplies. Journal of irrigation and drainage engineering, 122(5), 301-308.

Stockle, C. O., & Debaeke, P. (1997). Modeling crop nitrogen requirements: a critical analysis. European Journal of Agronomy, 7(1-3), 161-169.

Stöckle, C. O., Donatelli, M., & Nelson, R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. European journal of agronomy, 18(3-4), 289-307.

.Van Gaelen, H., Tsegay, A., Delbecque, N., Shrestha, N., Garcia, M., Fajardo, H., ... & Raes, D. (2015). A semi-quantitative approach for modelling crop response to soil fertility: evaluation of the AquaCrop procedure. The Journal of Agricultural Science, 153(7), 1218-1233.

Van Keulen, H. V., & Seligman, N. G. (1987). Simulation of water use, nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop (pp. 310-pp).

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

ویراستاری نشده