



Simulating Maize response to Nitrogen fertilizer using the critical Nitrogen dilution curve

Arash Ranjbar 

Soil and Water Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Moghan, Iran. E-mail: Arashranjbar@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: May. 15, 2024

Revised: June. 15, 2024

Accepted: June. 24, 2024

Published online: Oct. 2024

Keywords:

AquaCrop Model,
Critical Nitrogen Dilution Curve,
Nitrogen Stress,
Semi-Quantitative Approach.

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.

Cite this article: Ranjbar, A. (2024) Simulating Maize Response to Nitrogen Fertilizer Using the Critical Nitrogen Dilution Curve, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55 (8), 1401-1414. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.376546.669713>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.376546.669713>





EXTENDED 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 (r_c), transpiration (T_r), 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 T_r and WP^* . In other words, increasing N stress led to decreased values of T_r 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.

Author Contributions

The author contributed to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the author.

Acknowledgements

The author would like to thank all participants of the present study.

Ethical considerations

The author avoided from data fabrication and falsification.

Conflict of interest

The author declare no conflict of interest.

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

آرش رنجبر

بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی و منابع طبیعی اردبیل، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی،

اردبیل، ایران. رایانامه: Arashranjbar@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	استفاده از مدل‌های گیاهی برای شبیه‌سازی پاسخ محصول به آب و نیتروژن نقش اساسی در ارتقاء مدیریت کشاورزی دارد. در اغلب این مدل‌ها از معادلات پیچیده برای شبیه‌سازی 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 کمی، اثر تنش نیتروژن بر تعرق و عملکرد زیست‌توده 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 شبیه‌سازی اثر کمبود نیتروژن بر تعرق و عملکرد زیست‌توده استفاده شد. هدف اصلی در این مطالعه، ارزیابی کارایی این روش و مقایسه نتایج آن با روش نیمه کمی بود. برای این منظور از داده‌های بدست آمده در تیمارهای تحت تنش نیتروژن طی دو سال کشت ذرت استفاده شد. مقادیر زیست‌توده و غلظت نیتروژن گیاه در طول فصل رشد اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان دادند که شاخص RRMSE (ریشه متوسط مربعات خطای نسبی) در شبیه‌سازی زیست‌توده به روش مستقیم، به طور متوسط برای هر تیمار، چهار درصد نسبت به روش نیمه کمی کمتر بود. همچنین، افزایش تنش نیتروژن موجب افزایش خطای شبیه‌سازی زیست‌توده شد. به طوری که RRMSE برای شبیه‌سازی زیست‌توده 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.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲/۲۶	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۳/۱۶	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۴/۴	
تاریخ انتشار: آبان ۱۴۰۳	
واژه‌های کلیدی: تنش نیتروژن، روش نیمه کمی، مدل AquaCrop، منحنی ترقیق نیتروژن بحرانی.	

استناد: رنجبر، آرش، (۱۴۰۳) شبیه‌سازی پاسخ ذرت به کود نیتروژن با استفاده از منحنی ترقیق نیتروژن بحرانی، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۵ (۸)، ۱۴۱۴-۱۴۰۱.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.376546.669713>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.376546.669713>

مقدمه

استفاده از مدل‌های رشد گیاه نقش مهمی در ارتقاء شاخص‌های کمی و کیفی کشاورزی و زیست‌محیطی دارد. اکثر این مدل‌ها قابلیت پیش‌بینی اثر سناریوهای مختلف مدیریتی بر تولید محصول، کارایی مصرف و میزان تلفات آب و کود را دارند و از این طریق به انتخاب سازگارترین سناریوها به توسعه پایدار کشاورزی و محیط‌زیست در هر منطقه کمک می‌کنند. مدل‌های گیاهی بر اساس منابع جذب‌شده از جمله آب، مواد مغذی، تابش خورشیدی و دی‌اکسید کربن رشد گیاه و عملکرد محصول را طی فصل رشد شبیه‌سازی می‌کنند (Steduto, 2003). کمبود آب و کود نیتروژن (N) در خاک از عوامل اصلی کاهش عملکرد محصولات کشاورزی هستند. بنابراین، برای پیش‌بینی میزان کاهش عملکرد و شبیه‌سازی پاسخ گیاهان به شرایط مختلف محیطی و مدیریتی، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی 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 نسبتاً زیادی دارند (Vanuytrecht et al., 2014).

مدل AquaCrop توسط سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (فائو) برای شبیه‌سازی 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 کمی (Semi-quantitative) شامل پارامترهای کمی و کیفی، به‌جای بررسی بیلان انتقال املاح در خاک، که اساساً دارای روابط و پیچیدگی‌های خاصی هست، استفاده می‌شود. در روش مذکور، شبیه‌سازی پاسخ گیاه به کمبود نیتروژن با استفاده از تعدادی ضرایب کاهش و اعمال آن‌ها بر پوشش گیاهی^۱ (CC) و بهره‌وری نرمال شده آب^۲ (WP*) انجام می‌شود. این تغییرات منجر به تغییر میزان تعرق^۳ (Tr)، رطوبت خاک، تولید زیست‌توده^۴ (B) و عملکرد نهایی در نسبت‌های مختلف حاصلخیزی که بیشتر 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 کمی مدل AquaCrop را با هدف شبیه‌سازی پاسخ ذرت در شرایط تنش نیتروژن ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که دقت مدل در شبیه‌سازی تغییرات CC و B طی دوره کشت نسبت به برآورد عملکرد نهایی زیست‌توده و دانه، کمتر است. همچنین مشخص شد که هرچه تنش نیتروژن بیشتر باشد دقت مدل در شبیه‌سازی کمتر خواهد بود. نتایج مطالعه Ran et al. (2019) نشان می‌دهد که در روش نیمه کمی برای برآورد WP* از یک معادله رگرسیون خطی ثابت طی دوره رشد استفاده می‌شود که همین مورد باعث افزایش خطا در شبیه‌سازی 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 تعیین‌کننده میزان دقت شبیه‌سازی عملکرد محصول در این مدل است. (Guo et al., 2019). بنابراین، در مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی رشد گیاه و عملکرد محصول باید اثر تنش حاصلخیزی خاک به‌طور دقیق مشخص شود.

تخمین نیاز گیاه به کودهای نیتروژن دار از طریق روش‌های 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 مدیریت مقدار و زمان مناسب کودهای نیتروژن تعیین می‌کنند. پایش شاخص تغذیه نیتروژن^۵ (NNI) در طول فصل رشد، 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 می‌شود. منظور از N_c، حداقل غلظت نیتروژن موردنیاز در گیاه است که منجر به تولید حداکثر عملکرد در زمان معینی از دوره رشد می‌شود. مقادیر N_c با استفاده از منحنی ترقیق نیتروژن بحرانی^۶ که برای هر گیاه قابل توسعه است محاسبه می‌شود. استفاده از مفهوم N_c در مدل‌های گیاهی برای شبیه‌سازی پاسخ گیاه به کمبود نیتروژن به‌عنوان یک روش مناسب توصیه شده است (Plenet and Lemaire, 2000).

- 1- Canopy cover
- 2 - Normalized water productivity
- 3 - Transpiration
- 4 - Biomass
- 5 - Nitrogen nutrition index
- 6 - Critical nitrogen dilution curve

تنش نیتروژن نه تنها بر فرآیندهای متابولیک گیاه تأثیر می‌گذارد، بلکه بر عملکرد روزنه‌ها و مقاومت پوشش گیاهی نیز مؤثر است. بر همین اساس، Stockle and Debaeke (1997) یک روش مستقیم برای شبیه‌سازی تعرق گیاه بر اساس منحنی N_e توسعه داده‌اند که از آن به‌عنوان 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 rc شبیه‌سازی می‌شود (Van Keulen and Seligman, 1987). اگر غلظت نیتروژن گیاه برابر یا بیشتر از غلظت N_e باشد، B و Tr تحت شرایط کمبود نیتروژن کاهش نمی‌یابند. در مقابل، اگر غلظت نیتروژن گیاه کوچک‌تر از غلظت N_e باشد سرعت رشد گیاه کاهش یافته و متابولیسم گیاه به سمت صفر میل می‌کند (Plenet and Lemaire, 2000). از جمله مزیت‌های روش Stockle and Debaeke (1997) این است که اثر کمبود نیتروژن با اعمال ضرایب کاهش B و Tr و سپس B به طور مستقیم شبیه‌سازی می‌شود. این ضرایب بر اساس مقادیر N_e و rc در طول فصل رشد برآورد می‌شوند، بنابراین مقدار آن‌ها ثابت نیست. از مزایای این روش نسبت به روش نیمه کمی مورد استفاده در مدل AquaCrop، کاربرد ضرایب کاهش غیر ثابت در طول فصل رشد است. علاوه بر این، با استفاده از این روش، مقدار و زمان کمبود نیتروژن در طول فصل رشد برآورد خواهد شد. اما آیا در عمل استفاده از این روش مستقیم نسبت به روش نیمه کمی AquaCrop نتایج دقیق‌تری ایجاد می‌کند یا خیر، سؤال است که باید بر اساس داده‌های میدانی مورد بررسی قرار بگیرد. به همین منظور، Rahimikhoob et al. (2021) روش نیمه کمی 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 کمی 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_e برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت در طول فصل رشد و تحت شرایط تنش نیتروژن است. هم‌چنین نتایج بدست آمده از روش مستقیم با نتایج روش نیمه کمی 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. 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.

جدول ۱. 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
نترات ($mg.cm^{-3}$)	۰/۰۱۵	۰/۰۱۰	۰/۰۰۵
آمونیم ($mg.cm^{-3}$)	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
رس	۱۳/۶	۱۳/۶	۱۷/۶
سیلت	۳۴/۶	۳۶/۶	۳۴/۶
شن	۵۱/۸	۴۹/۸	۴۷/۸
درصد ذرات خاک			

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 به‌طور یکنواخت به مزرعه تحقیقاتی اضافه شد. بنابراین تنها عنصر محدودکننده حاصلخیزی خاک، نیتروژن بود و تیمارهای کودی بر اساس آن طراحی شدند. لذا در این مطالعه، تیمارها شامل پنج سطح صفر به‌عنوان شاهد (N0)، ۵۰ (N1)، ۱۰۰ (N2)، ۱۵۰ (N3) و ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار (N4) توسط کود اوره (حاوی ۴۶٪ نیتروژن) و به‌صورت 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 مترمربع 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^۱ 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.

نمونه‌برداری

نمونه‌های گیاهی برای اندازه‌گیری عملکرد زیست‌توده 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 مجدداً 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 کانوپتو^۲ طبق روش Patrigiani 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 ($P \leq 0.05$) (least significant difference) استفاده شد. از آنجایی که مشخص شد سال‌های آزمایش هیچ اثر معنی‌داری روی پارامترهای اندازه‌گیری نداشتند، از داده‌های هر دو سال در تجزیه و تحلیل‌ها استفاده گردید. بدین ترتیب، تیمار بهینه کودی (Nopt) که علی‌رغم دریافت کود کمتر عملکرد زیست‌توده‌اش 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 (N_{max}) و حداقل (N_{min}) غلظت نیتروژن گیاه نیز محاسبه شد.

روش مستقیم شبیه‌سازی

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

$$Tr_i = K_{CTrx} \cdot CC \cdot ET_{O_i} \quad Tr_i = K_{CTrx} \times CC \times ET_{O_i} \quad \text{رابطه (۱)}$$

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

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_{Tx} حداکثر ضریب تعرق گیاهی (بدون بعد)، B مقدار زیست‌توده تولیدشده (گرم بر مترمربع)، WP^* بهره‌وری آب نرمال شده گیاه (گرم بر مترمربع)، n تعداد روزهای بعد از کشت می‌باشند.

در مدل AquaCrop از یک روش نیمه کمی برای شبیه‌سازی اثر کمبود نیتروژن بر روی مقادیر B در طول فصل رشد استفاده می‌شود. در این روش، بعد از اعمال ضرایب کاهش بر روی CC و WP^* در روابط ۱ و ۲ مقادیر B برآورد می‌شوند. این ضرایب کاهش برای هر تیمار کودی ثابت هستند و در راهنمای کاربرد مدل به‌طور کامل تشریح شده‌اند (Rase et al., 2018). در مطالعه حاضر، به‌جای استفاده از روش نیمه کمی، از روش مستقیم ارائه‌شده توسط Stockle and Debaeke (1997) استفاده شد. این روش مبتنی بر مفهوم منحنی N_c است و برای برآورد تعرق در شرایط تنش نیتروژن پیشنهاد شده است. در این روش فرض می‌شود که کمبود نیتروژن با تأثیر مستقیم بر سطح پوشش گیاه (CC) و مقاومت آن (r_c) باعث کاهش تعرق خواهد شد. از روش مستقیم به‌عنوان یکی از زیر بخش‌های مدل‌های گیاهی نظیر CropSyst، در شبیه‌سازی تأثیر 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، r_c برای شرایط بدون تنش کودی توسط رابطه ۳ محاسبه می‌شود (Hatfield and Allen, 1996).

$$r_c = \frac{0.3 LAI + 1.2}{LAI} \times r_s \quad \text{رابطه ۳}$$

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

$$CC = 100.51 - \exp\left\{\frac{LAI}{0.01}\right\}(-0.6LAI)1.2 \quad \text{رابطه ۴}$$

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

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

در این رابطه، r_s مقاومت سطحی ($s.m^{-1}$)، R_n تابش خالص ($MJ m^{-2} day^{-1}$)، $(e_s - e_a)$ کمبود فشار بخار هوا (kPa)، ρ_a میانگین جرم مخصوص هوا در فشار ثابت ($kg m^{-3}$)، c_p گرمای ویژه هوا ($J kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)، Δ شیب منحنی فشار بخار آب نسبت به دما ($kPa \cdot ^\circ C^{-1}$)، λ گرمای نهان تبخیر ($MJ kg^{-1}$)، γ ضریب ثابت سایکرومتری ($kPa \cdot ^\circ C^{-1}$)، ET_c تبخیر و تعرق گیاه ($mm.day^{-1}$) و r_a مقاومت آئرودینامیک ($s.m^{-1}$) می‌باشند. مراحل محاسبه ET_c 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 جمع‌آوری 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 ET_c محاسبه شد.

تأثیر کمبود نیتروژن بر مقاومت پوشش گیاهی با تصحیح مقدار r_c توسط مقادیر N_c و واقعی گیاه تعیین می‌گردد (رابطه ۶) (Stockle et al., 2003). جزئیات بیشتر راجع به روابط تعیین N_c ، N_{min} و N_{max} توسط Ranjbar et al. (2020) تشریح شده است.

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

که در آن، r_{cN} مقدار تصحیح‌شده مقاومت پوشش گیاهی تحت تنش نیتروژنی است ($s.m^{-1}$)، N_c و N_{min} 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).

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

علاوه بر تعرق گیاه، تنش نیتروژنی به‌طور معنی‌داری بر روی بهره‌وری آب محصول نیز تأثیر 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 به‌عنوان ضریب کاهش WP^* در تیمارهای تحت تنش نیتروژن

در نظر گرفته شده است. در نهایت، مقدار زیست‌توده در تیمارها بر اساس رابطه (۹) که تصحیح‌شده 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

به‌منظور ارزیابی دقت روش مستقیم برآورد Tr در تیمارهای تحت تنش نیتروژنی، مقادیر زیست‌توده در تیمارهای مختلف یا مقادیر اندازه‌گیری شده در مزرعه مورد مقایسه قرار گرفتند. برای این منظور از شاخص‌های آماری شامل ضریب تبیین^۱ (R^2)، ریشه متوسط مربعات خطای نسبی^۲ (RRMSE) و میانگین انحراف خطا^۳ (MBE) بر طبق روابط زیر استفاده شد:

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

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

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

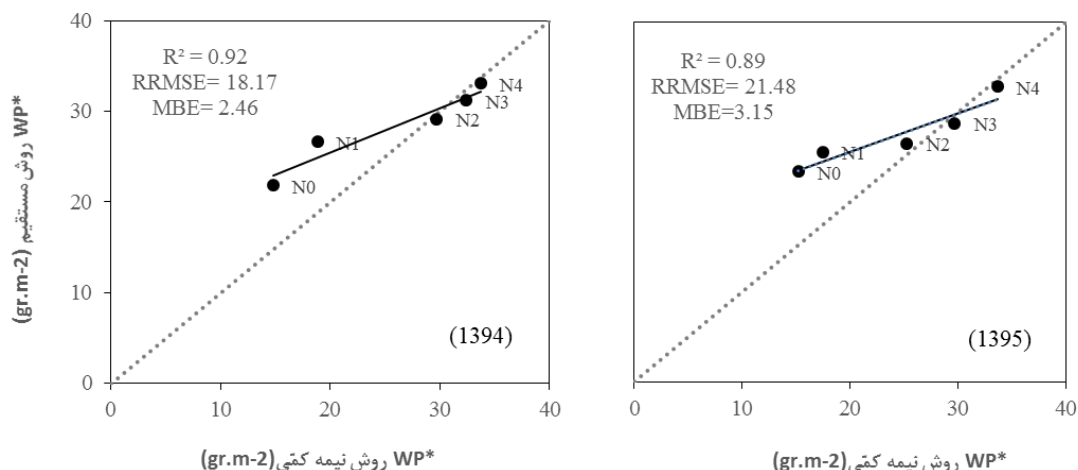
که در این روابط O_i برابر مقادیر مشاهده‌ای، S_i مقادیر شبیه‌سازی‌شده، \bar{O} متوسط مقادیر مشاهده‌ای و \bar{S} متوسط مقادیر شبیه‌سازی‌شده، n تعداد داده‌های مشاهده‌ای بود.

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. در این روش بر اساس تأثیری که کمبود نیتروژن بر روی پارامترهای Tr و WP^* دارد، مقادیر B در طول دوره رشد گیاه شبیه‌سازی 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 کمی 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 مترمربع و در روش نیمه کمی به ترتیب ۱۴/۸ و ۳۳/۷ گرم بر مترمربع 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 کمی، عدد بزرگ‌تری است. در حالی که، دامنه تغییرات WP^* در روش نیمه کمی بیشتر است. در واقع، به دلیل این که در روزهای ابتدایی رشد که گیاه هنوز با تنش نیتروژن مواجه نشده است و غلظت نیتروژن در گیاه بالاست، مقدار NNI نیز بالا می‌باشد. در این شرایط طبق رابطه (۸) مقدار WP^* در کلیه تیمارها تقریباً نزدیک به هم است. بعد از مرحله ابتدایی رشد که اثر تنش نیتروژن بر روی میزان CC و Tr تأثیر 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 مترمربع گزارش شده است.

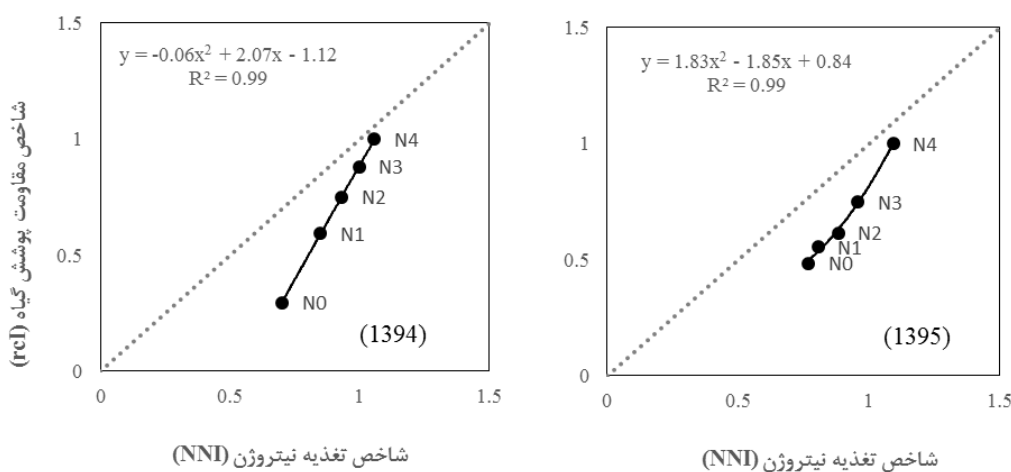


شکل ۱. مقایسه WP* برآورد شده با روش مستقیم و نیمه کمی در دو سال آزمایش

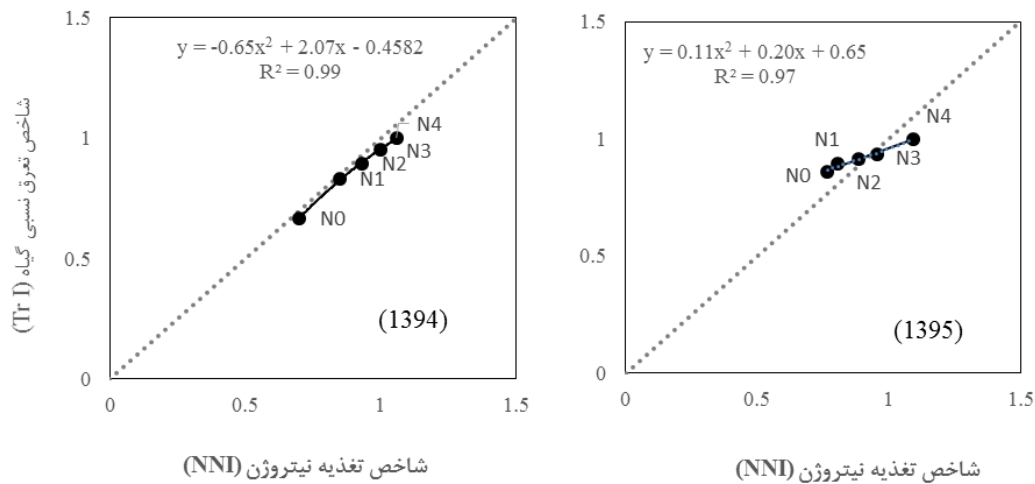
ارزیابی مقادیر مقاومت پوشش گیاهی و تعرق

به منظور بررسی اثر تنش نیتروژن بر r_c ، از شاخص مقاومت نسبی پوشش گیاه (r_{cI}) که عبارت است از نسبت r_c در تیمار بدون تنش به r_{cN} مقادیر متناظر در تیمارهای تحت تنش، در مقابل NNI استفاده شد (شکل ۲). مقادیر به دست آمده برای r_{cI} 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 r_c بیشتر باشد، r_{cI} کمتر است. رابطه بین r_{cI} و NNI برای هر دو سال آزمایش در شکل ۲ ارائه شده است. این شکل به خوبی نشان می‌دهد که یک رابطه غیرخطی بین r_{cI} و NNI وجود دارد. به عبارت دیگر، هر چه مقدار NNI بیشتر می‌شود و تنش کودی کمتر است، r_{cI} 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 r_{cI} 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 غیرخطی 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 r_c و Tr در تیمارها استفاده شده است.

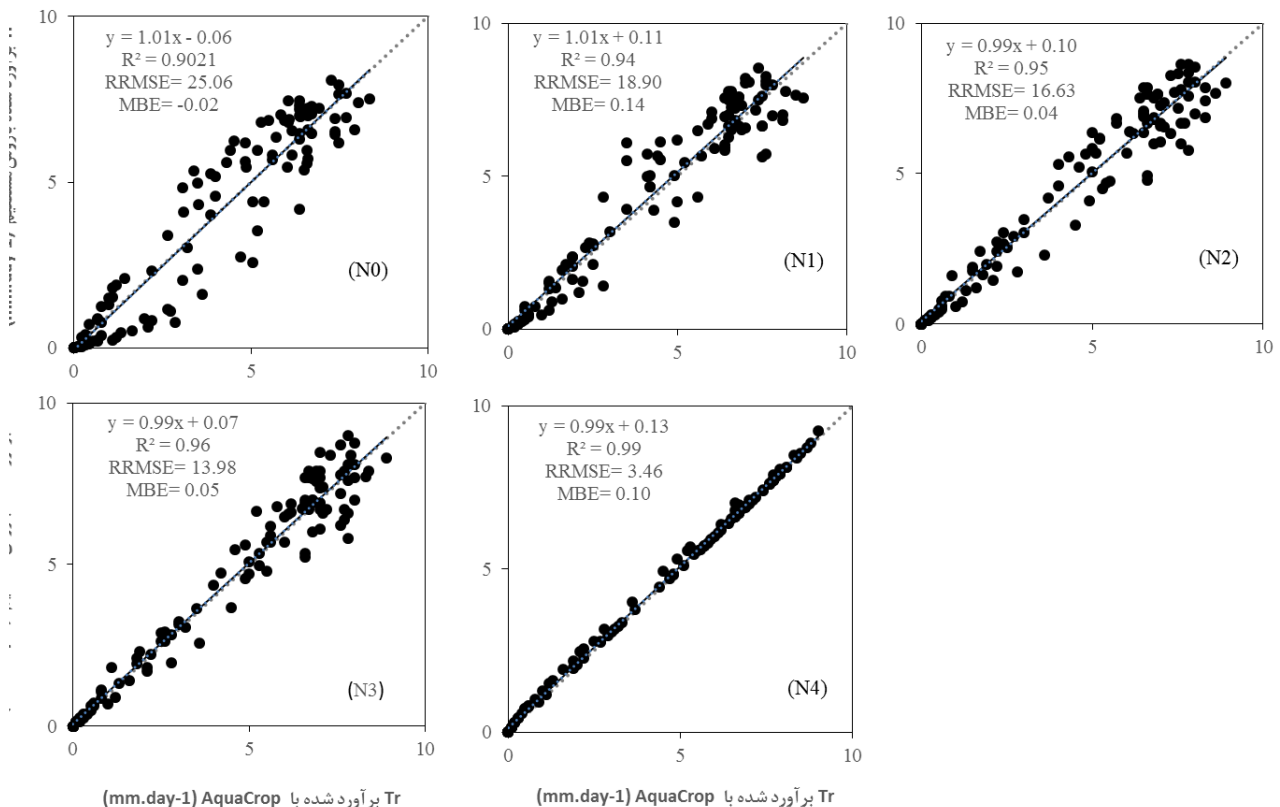


شکل ۲. رابطه بین شاخص تغذیه نیتروژن و شاخص مقاومت پوشش گیاه در دو سال آزمایش

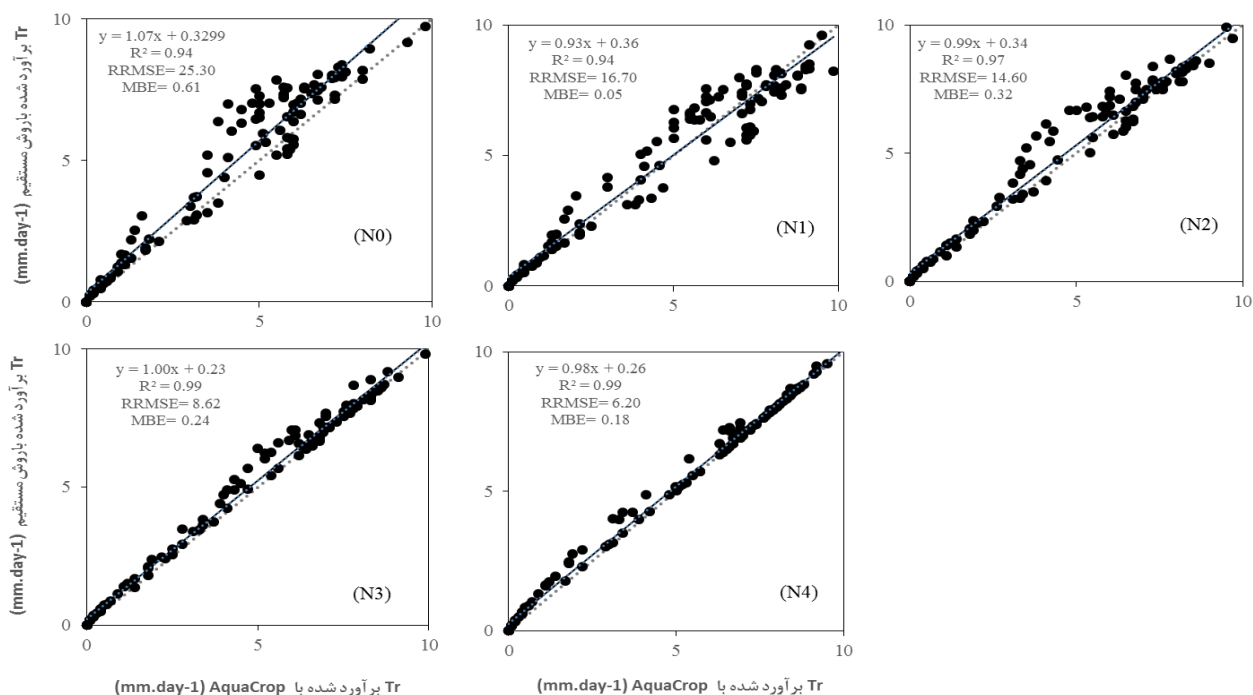


شکل ۳. رابطه بین شاخص تغذیه نیتروژن و شاخص تعرق نسبی گیاه در دو سال آزمایش

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 کاهش 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 زیست‌توده باید بیشتر مورد توجه قرار بگیرد. بنابراین واسنجی CC تأثیر زیادی در دقت برآورد Tr دارد. در روش مستقیم طبق رابطه ۷، مقاومت پوشش گیاهی در شرایط تنش نیتروژن بیشتر می‌شود 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

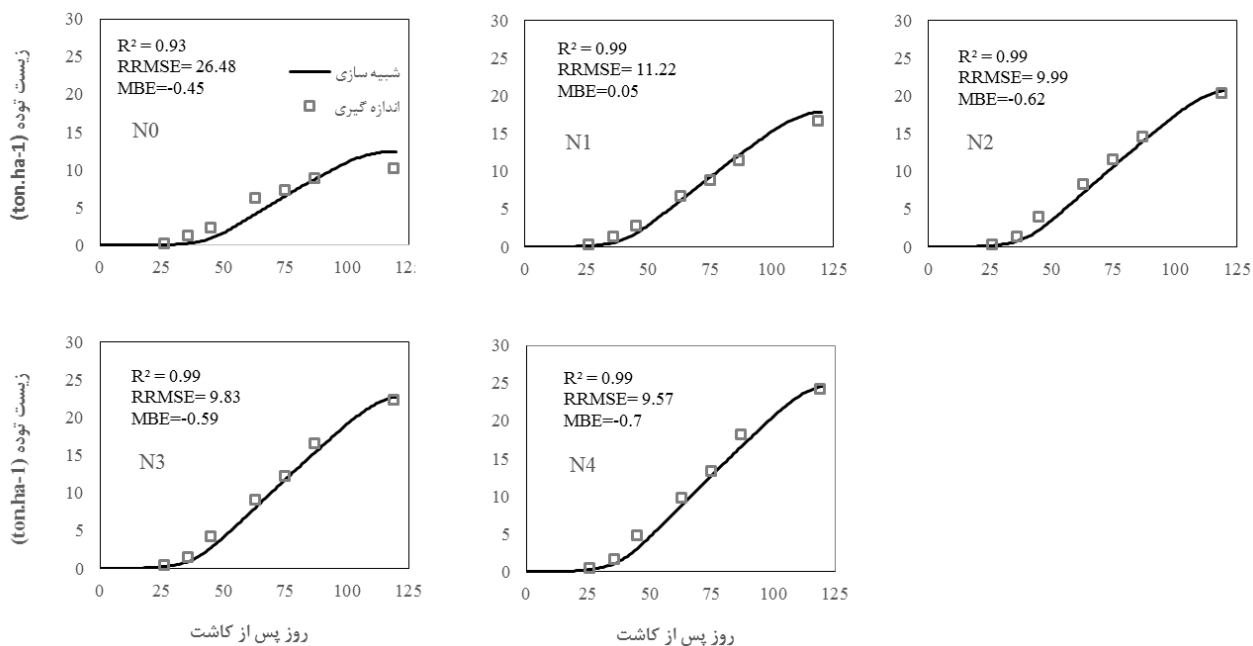
ارزیابی مقادیر زیست‌توده

مقادیر شبیه‌سازی شده زیست‌توده گیاه ذرت در طول دوره رشد توسط روش مستقیم به همراه مقادیر اندازه‌گیری 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 زیست‌توده نهایی در این تیمارها بیشتر از مقدار واقعی برآورد شده است. به طوری که RRMSE برای شبیه‌سازی زیست‌توده 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 شبیه‌سازی B به روش مستقیم تطابق نسبتاً 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 شبیه‌سازی در این مطالعه را ارائه می‌دهد. مقدار R^2 ، RRMSE (%) و MBE ($\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}$) برای تیمار N0 (بیشترین تنش) به ترتیب برابر ۰/۹۷۹، ۱/۵۳، ۲۹/۱۶ و برای N4 (کمترین تنش) به ترتیب برابر ۰/۹۹۷، ۹/۱۸ و ۰/۲۶ بود. این مدل عملکرد زیست‌توده نهایی را بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌کرد ($\text{MBE} = 0.41 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$). دلیل بیش‌برآورد B نهایی در هر دو روش می‌تواند نادیده گرفتن تأثیر عواملی نظیر آفات و بیماری‌ها بر عملکرد گیاه در محاسبات این روش‌ها باشد.

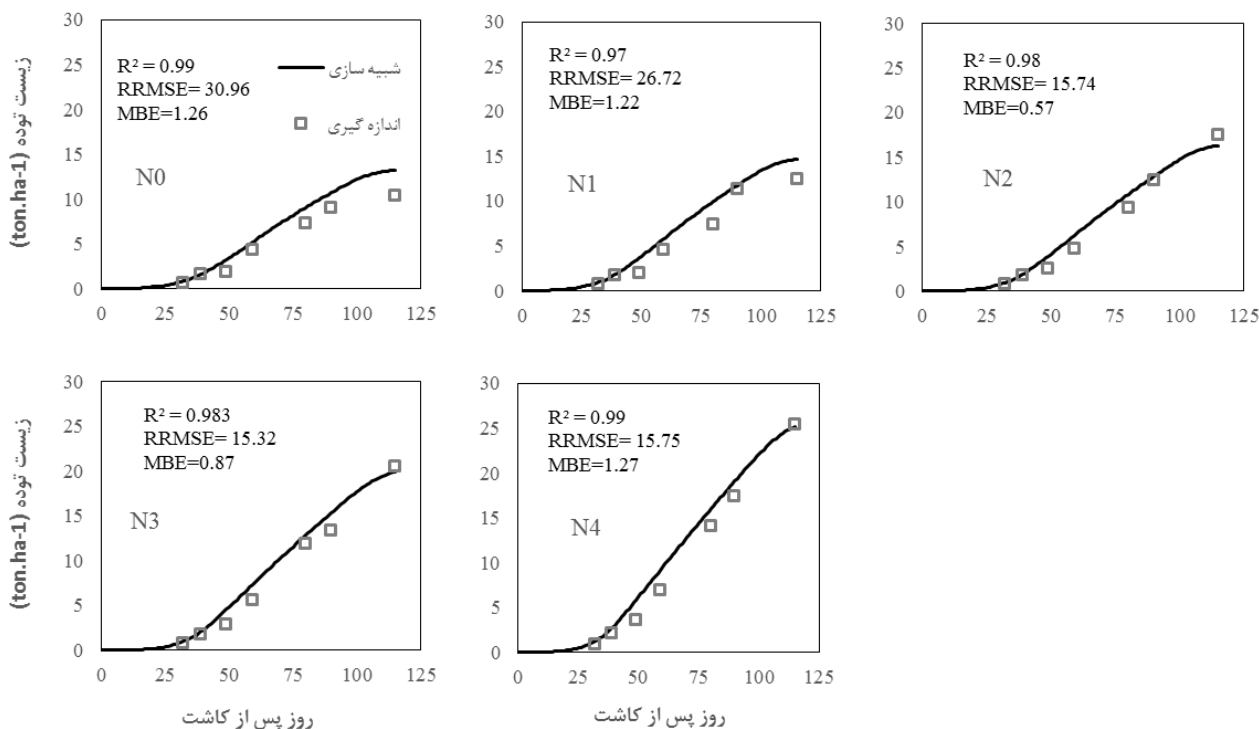
جدول ۲. نتایج شبیه‌سازی زیست‌توده توسط مدل AquaCrop در هر دو سال آزمایش و نقش تیمارها در واسنجی و صحت

سنجی مدل نیمه کمی (Ranjbar et al., 2019).

سال آزمایش	تیمار	R^2	RRMSE (%)	MBE ($\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}$)
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



شکل ۶. ارزیابی دقت زیست‌توده شبیه‌سازی شده به روش مستقیم در تیمارهای مختلف سال اول آزمایش



شکل ۷. ارزیابی دقت زیست‌توده شبیه‌سازی شده به روش مستقیم در تیمارهای مختلف سال دوم آزمایش

شاخص RRMSE (ریشه متوسط مربعات خطای نسبی) در شبیه‌سازی زیست‌توده به روش مستقیم، به طور متوسط برای هر تیمار ۴ درصد نسبت به روش نیمه کمی کمتر بود. نتایج مشابهی برای شبیه‌سازی 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 می‌شود. این عامل ممکن است باعث ایجاد خطای بیشتر در شبیه‌سازی 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 غیرخطی را از معادلات لجستیک و سیگموئید توسعه داده‌اند. نتایج آنها نشان داد که مدل‌های جدید توسعه‌یافته دقت شبیه‌سازی B را به‌طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. این در حالی است که در روش شبیه‌سازی

مستقیم، بعد از اعمال تأثیر کمبود نیتروژن تیمارها بر پارامترهای Tr ، rc 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 شبیه‌سازی بین کاربرد کود در یک مرحله یا به صورت سرک در طول فصل تفاوتی قائل شود. چون اساساً برای این منظور طراحی نشده است و بیلان املاح را محاسبه نمی‌کند و به‌جای آن از یک روش نیمه کمی (تلفیقی از پارامترهای کمی و کیفی) استفاده می‌کند. در حالی که زمان و دفعات کاربرد کود و تلفات آن تأثیر قابل توجهی بر تولید زیست‌توده دارد.

عامل دیگری که باعث عملکرد بهتر روش مستقیم نسبت به مدل AquaCrop در شبیه‌سازی B می‌شود، 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 Y و A ، 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 کاهش ثابت بر روی CC و در نهایت Tr اعمال می‌شود. به طور کلی، در نظر گرفتن تغییرات rc روزانه در طول دوره شبیه‌سازی، 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 کمی 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 می‌شود 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 موردنظر است. به عبارت دیگر، استفاده از منحنی توسعه‌یافته برای یک گیاه خاص در اقلیم متفاوت می‌تواند دقت نتایج را به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهد (Yue et al., 2014). همچنین، در روش شبیه‌سازی مستقیم اندازه‌گیری دقیق پارامترهای ورودی بیشتری از جمله مقاومت‌های آبرودینامیکی، 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 شبیه‌سازی B نشان داده است (Akumaga et al., 2017; Ranjbar et al., 2019). علاوه بر این، با توجه به اینکه مدل AquaCrop توسط سازمان FAO توسعه‌یافته، 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، منطقی‌تر به نظر می‌رسد.

نتیجه‌گیری

مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی پاسخ گیاه در شرایط تنش نیتروژن از یک روش نیمه کمی استفاده می‌کند. در این روش، اثر کمبود نیتروژن بر تولید زیست‌توده بر اساس تعدادی ضریب کاهش 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 زیست‌توده 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 تأثیری که کمبود نیتروژن بر روی پارامترهای Tr ، rc و WP^* دارد، مقادیر زیست‌توده در طول دوره رشد گیاه شبیه‌سازی 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 شبیه‌سازی B شد. بررسی شاخص‌های آماری نشان داد که RRMSE در شبیه‌سازی زیست‌توده به روش مستقیم، به‌طور متوسط برای هر تیمار ۴ درصد نسبت به روش نیمه کمی کمتر بود. همچنین، افزایش تنش نیتروژن موجب افزایش خطای شبیه‌سازی 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.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

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 Gaalen, 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.