

توسعه و ارزیابی چند مدل اشتقاقی برای مدل‌سازی تنش توأم کمبود آب و نیتروژن

مهدی سرائی تیریزی^۱، حسین بابازاده^{۲*}، مهدی همائی^۳، فریدون کاوه^۴، مسعود پارسی‌نژاد^۵

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۶/۲۹ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۴/۲۵

^۱ - استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، گروه مهندسی آب، تهران، ایران

^۲ - دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، گروه مهندسی آب، تهران، ایران

^۳ - استاد، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۴ - دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، گروه مهندسی آب، تهران، ایران

^۵ - دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: h_babazadeh@srbiau.ac.ir

چکیده

آب و نیتروژن مهم‌ترین عوامل محدود کننده تولید محصولات کشاورزی در نواحی خشک و نیمه‌خشک هستند. بنابراین تعیین مقدار جذب آب بوسیله گیاه تحت شرایط تنش توأم آب و کمبود نیتروژن می‌تواند در مدیریت آب در مزرعه به‌ویژه صرفه‌جویی در مصرف آب و کود با هدف حداکثر عملکرد محصول و نهایتاً حداکثر سود اقتصادی نقش کلیدی ایفا نماید. هدف از انجام این پژوهش، ارائه برخی مدل‌های اشتقاقی جذب آب در شرایط تنش توأم کمبود آب و نیتروژن و نهایتاً واسنجی پارامترهای آنها برای گیاه ریحان بود. بدین منظور، مدل‌های اشتقاقی از ترکیب مدل میچرلیخ-بال (MB) برای تنش کمبود نیتروژن و مدل‌های فوس و همکاران (F)، ون‌گنوختن (VG)، نمایی پیشنهادی (EXP) و همایی و همکاران (H) برای تنش کم‌آبی و مدل لیبیگ-اسپرینگل (LS) برای تنش کمبود نیتروژن و مدل فوس و همکاران (F) برای تنش کم‌آبی ارائه و مورد ارزیابی قرار گرفتند. این آزمایش‌گلدانی با چهار سطح مختلف آب آبیاری شامل ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه و چهار سطح کود نیتروژن شامل ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و صفر درصد نیاز کودی بر اساس آزمون خاک در ۳ تکرار انجام شد. نتایج نشان داد که از میان مدل‌های ارزیابی شده، به استناد آماره‌های محاسبه شده به‌ترتیب مدل‌های اشتقاقی MB و نمایی پیشنهادی (MB-EXP)، MB و فوس و همکاران (MB-F)، MB و ون‌گنوختن (MB-VG) و همچنین MB و همایی و همکاران (MB-H) بهترین انطباق را با داده‌های اندازه‌گیری شده داشتند.

واژه‌های کلیدی: تنش‌های همزمان، کم‌آبی، مدل‌های اشتقاقی پیشنهادی، نیتروژن

Developing and Evaluating some Derived Models for Modeling Simultaneous Water and Nitrogen Deficit Stress

M Sarai Tabrizi¹, H Babazadeh^{*2}, M Homae³ F Kaveh⁴, M Parsinejad⁵

Received: 20 September 2015 Accepted: 1 July 2014

¹ Young Researchers and Elites Club, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

² Assoc. Prof, Dept of Water Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

³ Prof, Dept of Soil Science, Tarbiat Modares University, Tehran 14115-336, Iran.

⁴ Assoc. Prof, Dept of Water Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

⁵ Assoc. Prof, Dept of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering & Technology College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

*Corresponding Author, Email: h_babazadeh@srbiau.ac.ir

Abstract

Water and nitrogen are the most important effective limiting factors for agricultural production in arid and semi-arid regions. Therefore, determining the amount of root water uptake under simultaneous water and nitrogen deficit stress conditions can play a key role in farm water management particularly in saving water and fertilizer with the purpose of maximum crop yield and consequently the maximum economical profit. The objective of this research was to introduce and evaluate derived models under simultaneous water and nitrogen deficit stress conditions and consequently calibrating their parameters for basil. In order to do so, derived models from the composition of Mitscherlich-Baule (MB) for nutrients stress conditions and models of Feddes *et al.*, (F), van Genuchten (VG), recommended exponential (EXP) and Homae *et al.*, (H) for water stress conditions and also the composition model of Liebig-Sprengel (LS) for nutrients and model of Feddes *et al.*, (F) for water stress conditions were presented and evaluated. This experiment was conducted with four irrigation water quantity levels including 120, 100, 80, and 60 percent of crop water requirement and four nitrogen fertilizer levels including 100, 75, 50, and zero percent of fertilizer requirement based on soil fertility test with three replicates. The results indicated that among the evaluated models, based on calculated statistical indices, the derived model of MB-EXP, MB-F, MB-VG, and MB-H had the best fitting on the measured data respectively.

Keywords: Combined stresses, Water stress, Recommended derived models, Nitrogen

مقدمه

مهم‌ترین عوامل محدود کننده تولید محصولات کشاورزی در این مناطق می‌باشند. بدیهی است که وجود هر یک از نهاده‌های آب و کود برای رشد و افزایش عملکرد ضروری است و کمبود یکی از آنها بر کارایی مصرف دیگری مؤثر است. زمانی که آب به کار رفته از

در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان همانند ایران نه تنها محدودیت کمی و کیفی منابع آب و خاک وجود دارد بلکه خاک‌های این مناطق از نظر حاصلخیزی خاک نیز با کمبود مواجه می‌باشند. بنابراین آب و نیتروژن

افزایش میزان نیتروژن از صفر تا ۱۰۹ کیلوگرم در هکتار عملکرد دانه افزایش یافته و افزایش مقدار نیتروژن از ۱۰۹ تا ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار در عملکرد دانه تغییری ایجاد نمی‌کند.

فرهمند و همکاران (۱۳۸۴) اثر سطوح مختلف آب و نیتروژن مصرفی و برهمکنش آنها بر عملکرد و بازده مصرف آب گوجه‌فرنگی رقم ارلی اوربانا را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنان نشان داد که حداکثر عملکرد محصول در سطوح آبی و کودی ۱۰۰ درصد حاصل شد. همچنین نتایج نشان داد که با کاهش مصرف آب به میزان ۲۰ درصد، ۴۰ درصد و ۶۰ درصد نیاز آبی عملکرد محصول به ترتیب ۲۴٪، ۵۷٪ و ۷۴٪ کاهش یافت. در صورت عدم وجود تنش کمبود آب (تیمارهای بدون تنش کمبود آب)، افزایش مقدار کود مصرفی باعث افزایش عملکرد و در شرایط تنش کمبود آب شدید مصرف کودهای شیمیایی می‌تواند عملکرد محصول را کاهش دهد.

کریمی و همکاران (۱۳۸۶) اثر سطوح مختلف آب و کود مصرفی را بر عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت به روش آبیاری قطره‌ای بررسی نمودند. نتایج نشان داد که عملکرد محصول و کارایی مصرف آب ذرت تحت تأثیر میزان آب آبیاری، میزان کود مصرفی و اثر متقابل این دو عامل قرار دارد. با افزایش آب مصرفی، کارایی مصرف کود و با افزایش مقدار کود مصرفی نیز کارایی مصرف آب افزایش می‌یابد. جمع‌بندی نتایج تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که برای دستیابی به مقدار بهینه مصرف کود و آب آبیاری در شرایط وجود تنش‌های آبی، کمبود نیتروژن و یا تنش توأم کمبود آب و نیتروژن لازم است واکنش گیاه به تنش‌های مختلف محیطی بررسی و تابع کاهش عملکرد گیاه برای شرایط وجود تنش همزمان کمبود آب و نیتروژن استخراج شود. مدل‌سازی پاسخ گیاه به تنش توأم آب و کمبود نیتروژن می‌تواند نقشی کلیدی در مدیریت آب در مزرعه ایفا نماید.

طریق آبیاری کمتر از مقدار نیاز آبی گیاه باشد به کار بردن کود بر مبنای آبیاری کامل باعث افزایش پتانسیل آلودگی آب‌های زیرزمینی در آینده می‌شود (Tiercelin and Vidal 2006، همایی ۱۳۸۱، اسماعیلی و همکاران ۱۳۸۴)؛ زیرا با کاهش رطوبت خاک، مقدار معدنی شدن نیتروژن آلی و انتقال نیترات به سمت ریشه‌ها کاهش و به تبع آن جذب نیتروژن در گیاهان کاهش یافته و نیتروژن در خاک باقی می‌ماند (پتانسیل تلف شدن این نیتروژن زیاد است). هر چند با افزایش مقدار آب و نیتروژن عملکرد ماده خشک افزایش می‌یابد (Pandey et al., 2000, Zand-Parsa and Sepaskhah 2001) اما مصرف بیش از اندازه نیز باعث هدرروی منابع و ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی می‌شود (Pang and Letey, 1998, Esmaili et al., 2010).

لیو و ژانگ (۲۰۰۷) نشان دادند که عملکرد گیاهان زراعی با افزایش مقدار آب و نیتروژن تا سطوح بهینه مصرف افزایش می‌یابد. سطوح بهینه مصرف کود در سطوح مختلف آب کاربردی با هم متفاوت می‌باشند. با افزایش تنش کمبود آب، کاربرد کود مطابق نیاز کودی منجر به تشدید تنش کمبود آب شده، بنابراین مقدار بهینه کود مصرفی کمتر از نیاز کودی خواهد بود. در تحقیقی مشابه عباسی و همکاران (۱۳۹۱) اثرهای سطوح مختلف آب و کود بر عملکرد ذرت دانه‌ای را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آنان نشان داد که بین عملکرد محصول در سطوح مختلف آب و کود تفاوت معنی‌دار وجود داشت. در صورت تأمین نیاز آبی گیاه (عدم وجود تنش کمبود آب) با افزایش مصرف کود عملکرد محصول افزایش می‌یابد. در صورت وجود تنش کمبود آب مقدار کود مصرفی بهینه جهت دستیابی به حداکثر عملکرد متفاوت بود. به عنوان مثال در تیمار آبی ۶۰ درصد افزایش کود مصرفی تا سطح تأمین ۶۰ درصد نیاز کودی باعث افزایش عملکرد محصول و افزایش بیشتر کود مصرفی منجر به کاهش عملکرد محصول می‌گردد. در آزمایشی دیگر اُیکه و همکاران (۱۹۸۸) در نیجریه نشان دادند که با

که در آن، S_{max} حداکثر مقدار آب جذب شده به وسیله ریشه گیاه در واحد حجم خاک و زمان تحت شرایط عدم تنش ($L^3L^{-3}T^{-1}$)، Z_r عمق توسعه ریشه (L) و T_p تعرق پتانسیل (LT^{-1}) است. اگر خاک نتواند نیاز آبی گیاه را برای حداکثر تعرق (T_p) فراهم آورد، به اندازه‌ای که به آن تابع کاهش گفته می‌شود، از تعرق کاسته می‌شود. مهم‌ترین مدل‌های جذب، موسوم به مدل‌های کلان، توابعی تجربی هستند که جذب آب توسط گیاه را بر مبنای پاسخ گیاه به پتانسیل آب خاک توصیف می‌کنند. در حال حاضر این مدل‌ها به دلیل کاربردی بودن، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. بر اساس این مدل‌ها، تابع جذب آب توسط گیاه به صورت توابعی از پتانسیل ماتریک تعریف و بر اساس آن رابطه کلی جذب آب بوسیله گیاه به صورت زیر بیان می‌شود (کیانی و همکاران ۱۳۸۵، همایی ۱۳۸۱).

$$S = \alpha \cdot S_{max} = \alpha(h, N) \cdot \frac{T_p}{Z_r} \quad [۳]$$

که در آن، α توابعی از پتانسیل ماتریک خاک و مقدار نیتروژن بوده و آن را به صورت $\alpha(h, N)$ تابع بدون بعد پاسخ به تنش توأم کمبود آب و نیتروژن نشان می‌دهند. رابطه ۳ شکل عمومی مدل‌های کلان تحت شرایط تنش توأم کمبود آب و نیتروژن است.

در زمینه مدل‌سازی اثرهای همزمان تنش‌های آبی و کودی تاکنون مطالعاتی صورت نگرفته است. هدف از انجام این پژوهش، توسعه و ارزیابی مدلی ریاضی برای مدل‌سازی واکنش گیاه به تنش توأم کمبود آب و نیتروژن می‌باشد.

مواد و روش‌ها

آزمایشات مزرعه‌ای

آزمایش با ۴ تیمار آبی شامل ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه و چهار سطح نیتروژن شامل ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و صفر درصد نیتروژن توصیه شده بر اساس آزمایش حاصلخیزی خاک بود. آزمایش در سه

مناسب‌ترین روش کمی کردن جذب آب توسط ریشه گیاهان، استفاده از معادله کلی جریان یا معادله ریچاردز است. تقریباً همه مدل‌های ریاضی حرکت آب و املاح در خاک به وسیله حل عددی معادله ریچاردز-داریسی با در نظر گرفتن ترم جذب آب برای جریان در بعد عمودی ارائه شده‌اند (Cardon and Letey 1992). از آنجا که جذب آب توسط گیاهان در رطوبت‌های غیراشباع صورت می‌گیرد، بنابراین باید آن را در معادله ریچاردز لحاظ کرد. شکل معادله ریچاردز پس از لحاظ کردن ترم جذب آب توسط گیاه به صورت زیر است (Richards 1931, Homae 1999):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} - K(h) \right] - S \quad [۱]$$

که در آن، θ درصد رطوبت حجمی خاک، $h(L)$ بار فشاری آب خاک، $t(T)$ زمان، $Z(L)$ عمق خاک، $K(LT^{-1})$ هدایت هیدرولیکی غیراشباع و $S(T^{-1})$ منبع مصرف آب است. ترم جذب آب S توسط ریشه در رابطه ۱ توابعی از پتانسیل ماتریک، پتانسیل اسمزی، ویژگی‌های ریشه و شرایط آب و هوایی همچون نیاز تبخیری می‌باشد (Homae 1999; Homae et al. 2002a).

برای بیان کمی S ، مدل‌هایی وجود دارند که می‌توان آنها را به دو گروه مدل‌های خرد و مدل‌های کلان تقسیم کرد. مدل‌های خرد به دلیل مبانی غیرواقعی و نیز غیرقابل اندازه‌گیری بودن پارامترهای آن، تا به حال به بوته آزمایش گذاشته نشده‌اند. به همین خاطر گروه دیگری از مدل‌ها که به مدل‌های کلان شهرت دارند، طراحی و ارائه گردیده‌اند (Nimah and Hanks 1973, Gardner 1991). در مدل‌های کلان، مقدار آب جذب شده توسط گیاه برابر با میزان تعرق واقعی و در شرایطی که هیچ‌گونه محدودیت آبی در خاک وجود نداشته باشد، برابر با تعرق پتانسیل در نظر گرفته شده و به صورت کلی زیر بیان می‌شود (Homae et al., 2002a):

$$S = S_{max} = \frac{T_p}{Z_r} \quad [۲]$$

تهران قرار گرفته است. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب و خاک مورد استفاده در جداول ۱، ۲ و ۳ ارائه شده است.

تکرار به صورت طرح فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در گلخانه سایت پژوهشی دوشان تپه تهران در سال ۱۳۹۲ اجرا شد. منطقه مورد مطالعه در موقعیت طول جغرافیایی ' ۴۲° ۳۵، عرض جغرافیایی ' ۲۸° ۵۱ و ارتفاع ۱۲۰۹ متر از سطح دریا در جنوب شرقی

جدول ۱. نتایج آزمایش تجزیه شیمیایی نمونه آب چاه سایت پژوهشی دوشان تپه.

جمع کاتیون‌ها	کاتیون‌ها (meq/L)				جمع آنیون‌ها	آنیون‌ها (meq/L)				pH	EC	SAR
	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺		SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻			
۱۲/۶۰	-	۶/۶۰	۴/۸۰	۱/۲	۱۰/۶۷	۰/۱۷	۳/۰۰	۶/۶۰	۰/۹	۸/۲۰	۱/۱۷۵	۳/۸۱

جدول ۲. برخی مشخصات شیمیایی خاک گلدان‌های آزمایش.

Fe	Mn	Zn	Cu	پتاسیم قابل جذب	فسفر قابل جذب	نیتروژن کل	کربن آلی	عمق نمونه
(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(%)	(%)	(cm)
۳/۸	۳/۰۶	۰/۵۸	۰/۴	۸۰	۱/۴۸	۰/۰۰۲	۰/۱۳	۳۰-۰

جدول ۳. مشخصات فیزیکی خاک گلدان‌های آزمایش.

چگالی ظاهری خاک	رطوبت وزنی در مکش ۱۵ اتمسفر	رطوبت وزنی در مکش ۱۰/۳ اتمسفر	رطوبت اشباع (%)	بافت	سیلت	رس	شن
۱/۵۴	۷/۰۹	۱۳/۷۷	۲۷/۵۵	Sandy loam	۱۳	۷	۸۰

با روش‌های مختلف (خطی، غیرخطی و روش ویژه) واسنجی شد (Miller and Gaskin 1997, Robinson *et al.*, 1999). نتایج نشان داد که روش واسنجی غیرخطی که توسط سازندگان دستگاه پیشنهاد شده است بیشترین دقت را در برآورد رطوبت داشت ($RMSE = 0.023$ و $R^2 = 0.935$). بنابراین در این مطالعه از روش سازندگان دستگاه برای برآورد رابطه بین رطوبت و ثابت دی الکتریک استفاده شد. به منظور اندازه‌گیری پتانسیل ماتریک ابتدا منحنی مشخصه رطوبتی خاک با استفاده از دستگاه صفحات فشاری^۱ و نرم افزار RETC تعیین و سپس با جایگزینی مقادیر رطوبت‌های روزانه

برای برنامه‌ریزی دقیق آبیاری از دستگاه تتاپروب (Theta Probe, Delta-T Devices, 3118-ML2, Dynamax, Inc., Houston, Tex.) استفاده شد و روش وزنی نیز به عنوان یک روش کنترلی برای واسنجی دستگاه تتاپروب مورد استفاده قرار گرفت. دستگاه تتاپروب از چهار میله هم اندازه به طول ۶۰ میلی‌متر و قطر ۳ میلی‌متر، یک محفظه ضد آب (بدنه پروب) و کابلی که سیگنال‌های ورودی و خروجی را به صفحه نمایش دهنده داده‌ها وصل می‌کند، تشکیل شده است. مزایای این روش، اندازه‌گیری سریع، دقت زیاد، اندازه‌گیری مستقیم در صحرا و در شرایط طبیعی و قابلیت اندازه‌گیری رطوبت خاک از حد رطوبت پژمردگی تا رطوبت اشباع است. در این مطالعه دستگاه تتاپروب

¹ Pressure Plate

پس از افزودن عناصر غذایی به خاک درون کیسه‌ها و رسیدن رطوبت خاک به حد ظرفیت مزرعه‌ای، خاک درون کیسه‌ها به هم زده و سعی شد تا عمل مخلوط شدن خاک با عناصر غذایی اضافه شده به طور کامل انجام پذیرد. سپس خاک‌ها با چگالی ظاهری یکسان (۱/۵۴ گرم بر سانتی‌مترمکعب) در گلدان‌ها قرار داده شد. ۱۵ عدد بذر ریحان (*Ocimum basilicum*) توده مازندران در هر گلدان کاشته شد. همه گلدان‌ها در دو هفته اول استقرار گیاهچه و تا رسیدن به مرحله سه برگی شدن با آب تیمار شاهد (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه) آبیاری شدند. پس از این مرحله تعداد گیاهان هر گلدان به ۷ بوته کاهش یافت. طی آزمایش، حجم و EC زهاب به طور پیوسته اندازه‌گیری می‌شد تا از صحت اعمال $LF=0/3$ اطمینان حاصل شود.

مقایسه کمی مدل‌های مورد مطالعه با استفاده از آماره‌های بیشینه خطای نسبی (ME)^۱، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده ($nRMSE$)^۲، کارآیی مدل‌سازی (EF)^۳ و ضریب جرم باقی‌مانده (CRM)^۴ برای هر کدام از مدل‌ها انجام شد. بیان ریاضی آماره‌های یاد شده به صورت زیر است:

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n \times \frac{100}{O} \quad [4]$$

$$nRMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{100}{O} \quad [5]$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad [6]$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad [7]$$

اندازه‌گیری شده در منحنی مشخصه رطوبتی خاک، قدرمطلق پتانسیل ماتریک محاسبه می‌شد. به منظور اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک، رطوبت همه گلدان‌ها هر روز با دستگاه تتاپروب اندازه‌گیری می‌شد.

تعرق نسبی با استفاده از تغییرات رطوبت روزانه خاک محاسبه شد. برای کاهش تبخیر از سطح خاک گلدان‌ها، از یک لایه شن به ضخامت دو سانتی‌متر استفاده گردید. در پایان آزمایش ماده خشک در تیمارهای مختلف اندازه‌گیری و ماده خشک نسبی از تقسیم ماده خشک تیمارها بر ماده خشک شاهد محاسبه شد.

دلیل اصلی انتخاب این بافت خاک، نخست آن بود که بر اساس مطالعات صورت گرفته در مورد دستگاه تتاپروب، نشان می‌داد که بهترین خاک برای استفاده از دستگاه تتاپروب، خاک با بافت سبک می‌باشد (Jacobsen et al., 1993, Robinson et al., 1999). دلیل دیگر این انتخاب، نگهداشت یکنواخت توزیع رطوبت در محیط ریشه گیاه بود. برای انجام این آزمایش، گلدان‌های ۸ لیتری تهیه و کف آنها با مته سوراخ شد. پس از آماده‌سازی گلدان‌های آزمایشی، ۶ کیلوگرم خاک خشک وزن و در کیسه‌های پلاستیکی بزرگ ریخته شد. سپس، مقادیر مناسب عناصر غذایی ضروری بر اساس توصیه مؤسسه تحقیقات خاک و آب برای گیاه ریحان، به صورت محلول و با توجه به ظرفیت مزرعه‌ای خاک مورد آزمایش به خاک درون کیسه‌ها اضافه شد. در این مرحله فقط یک پنجم مقادیر محاسبه شده تیمارهای نیتروژن به خاک اضافه گردید. چهار نوبت دیگر آن هر ۸ روز یکبار از طریق آب آبیاری به گلدان‌ها اضافه شد. دلیل تعداد زیاد تقسیط نیتروژن‌دهی، تأمین نیتروژن مورد نیاز گیاه با توجه به اعمال جزء آبشویی بود. همچنین مقادیر پتاسیم و فسفر نیز در سه نوبت مساوی در طول دوره آزمایش به گلدان‌ها اضافه شد.

¹ Maximum Error

² Normalized Root Mean Square Error

³ Modeling Efficiency

⁴ Coefficient of Residual Mass

(F)، مدل‌های غیرخطی ون‌گونختن (۱۹۸۷) (VG)، مدل دیرکسن و همکاران (۱۹۹۳) (D)، مدل همایی و همکاران (۲۰۰۲) (H) و مدل نمایی پیشنهادی این پژوهش (EXP) به دست آمده است:

$$Y_r = (I - e^{-C_N N}) \times \frac{h - h_4}{h_3 - h_4} \quad [8]$$

که در آن، Y_r عملکرد نسبی بر حسب درصد، C_N عامل کارایی یا ضریب میچرلیخ، N مقدار عامل مؤثر بر رشد، h_3 و h_4 به ترتیب بار فشاری آب خاک در نقطه شروع تنش کمبود آب و در نقطه پژمردگی دائم می‌باشند.

$$Y_r = (I - e^{-C_N N}) \times \frac{I}{I + \left(\frac{h}{h_{50}}\right)^p} \quad [9]$$

که در آن، h_{50} بار فشاری آب خاک که به ازای آن میزان جذب ۵۰ درصد کاهش می‌یابد و معمولاً از طریق آزمون و خطا بدست می‌آید و p یک ضریب تجربی است که معمولاً مقدار آن ۳ در نظر گرفته می‌شود. p پارامتری وابسته به گیاه، خاک و اقلیم می‌باشد.

$$Y_r = (I - e^{-C_N N}) \times \frac{I}{I + \left(\frac{h^* - h}{h^* - h_{50}}\right)^p} \quad [10]$$

$$Y_r = (I - e^{-C_N N}) \times \frac{I}{I + (I - \alpha_0) / \alpha_0 \left[\frac{(h^* - h)}{(h^* - h_{max})} \right]^p} \quad [11]$$

که در آن، h^* بار فشاری آب خاک در حد آستانه کاهش عملکرد محصول در شرایط تنش کمبود آب، مقدار h_3 تابعی از نیاز تبخیری^۵ و α_0 پارامتر واسنجی مدل می‌باشد (Homaei 1999, Homaei et al., 2002b). کاهش در مقدار α در تنش‌های آبی بیشتر از h^* ادامه می‌یابد تا به یک تنش کمبود آب معین (h_{max}) برسد. در پتانسیل‌های ماتریک بیشتر از h_{max} افزایش تنش کمبود آب نمی‌تواند با همان روند قبلی در مقدار α کاهش ایجاد کند. این واقعیت نشان می‌دهد که در $h > h_{max}$ گیاه هنوز

که در آنها، P_i مقادیر برآورد شده، O_i مقادیر اندازه‌گیری شده، n تعداد مشاهدات و \bar{O} میانگین مقادیر O_i می‌باشد.

آماره $nRMSE$ مقادیر کلی یا میانگین انحراف مقادیر برآورد شده از مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد که نمایش‌دهنده عدم اطمینان مطلق مدل می‌باشد. هر چه $nRMSE$ به صفر نزدیک‌تر باشد عملکرد شبیه‌سازی مدل بهتر است. کمترین مقدار برای ME و $nRMSE$ صفر است. مقدار زیاد ME نمایانگر بدترین حالت برآورد مدل است. ضریب EF بیانگر نسبت انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از اندازه‌گیری شده به انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده از مقادیر میانگین می‌باشد. مقدار EF بین $-\infty$ تا $+1$ متغیر است. هر چه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد مدل کارآتر است. در حالی که مقدار CRM نشان‌دهنده تمایل مدل برای بیش‌برآوردی^۱ و یا کم‌برآوردی^۲ در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده است. اگر تمامی داده‌های برآورد شده و اندازه‌گیری شده یکسان باشند، نتایج آماره‌ها به صورت CRM ، ME و $nRMSE$ برابر صفر و EF برابر یک خواهد بود (Loague and Green 1991).

پارامترهای مدل‌ها با روش بهینه‌سازی حداقل مجموع مربعات خطا تعیین گردید. نرم افزارهای آماری مورد استفاده در این پژوهش SPSS و Excel بودند.

نتایج و بحث

توابعی چند برای برآورد تابع کاهش جذب تحت تنش توأم کمبود آب و نیتروژن $\alpha \square \square (h, N)$ در این پژوهش پیشنهاد شده است که از اشتقاق مدل‌های تنش مواد غذایی شامل مدل خطی لیبیگ-اسپرینگل (LS)^۳ و مدل غیرخطی میچرلیخ - بال (MB)^۴ و مدل‌های تنش کمبود آب شامل مدل خطی فوس و همکاران (۱۹۷۸)

¹ Overestimate

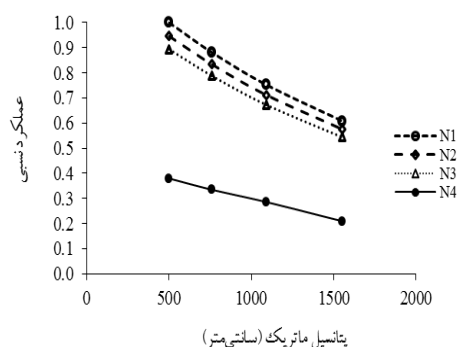
² Underestimate

³ Liebig-Sprengel

⁴ Mitscherlich-Baule

⁵ Evaporative Demand

خطی با یک شیب نسبتاً ملایم عملکرد محصول کاهش یافت که نشان دهنده تأثیرگذارتر بودن عامل کمبود نیتروژن نسبت به تنش کمبود آب می‌باشد. اما در سطوح دیگر نیتروژن با افزایش تنش کمبود آب کاهش عملکرد با افزایش تنش کمبود آب محسوس‌تر است. بنابراین در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط تنش مواد غذایی شدید افزایش مقدار آب مصرفی تأثیر چندانی بر عملکرد محصول ندارد و در شرایط تنش کمبود آب شدید نیز افزایش کود مصرفی تأثیر چندانی بر عملکرد محصول ندارد. از این حیث نتایج این تحقیق با نتایج واعظی و همکاران (۱۳۸۱)، کریمی و همکاران (۱۳۸۴) و عباسی و همکاران (۱۳۹۱) مطابقت دارد.



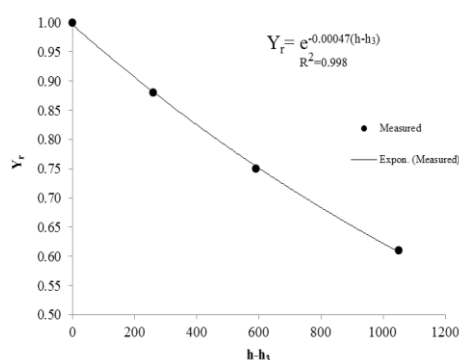
شکل ۲- تأثیر مقدار نیتروژن بر عملکرد نسبی ریحان در سطوح مختلف رطوبت خاک.

در شکل ۳ مقادیر عملکرد نسبی شبیه‌سازی شده ریحان در شرایط تنش همزمان آبی و نیتروژن توسط مدل‌های اشتقاقی MB-F، MB-D، MB-VG، MB-، H، MB-EXP و LS-F ارائه شده است. در شکل ۳، هر کدام از خطوط افقی که به خط شیب‌دار وصل شده، پاسخ عملکرد نسبی ریحان به تنش کمبود آب در سطوح مختلف مصرف نیتروژن را نشان می‌دهد. با کمک این شکل می‌توان عامل غالب و کنترل کننده عملکرد در مقادیر مختلف تنش کمبود آب و نیتروژن برای گیاه ریحان را مشخص کرد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، آستانه کاهش عملکرد در شرایط تنش کمبود آب ثابت نبوده و بستگی به میزان نیتروژن

زنده بوده و در سطحی بسیار اندک به فعالیت‌های حیاتی خود ادامه می‌دهد. سپس مقدار p با توجه به h_{max} به صورت زیر تعریف شد (Homaei et al., 2002b):

$$Y_r = \min \begin{cases} 1 & ; h < h_3 \\ \frac{h-h_4}{h_3-h_4} & ; h \geq h_3 \\ 1 & ; N \geq N_{cr} \\ n.N & ; N < N_{cr} \end{cases} \quad [12]$$

که در آن N_{cr} عامل تنش‌زا به حد آستانه گیاه به کمبود نیتروژن و n شیب پاسخ عملکرد به عامل N_{cr} می‌باشد. \min در حقیقت مفهوم قانون حداقل را بیان می‌کند و Y_r عملکرد نسبی گیاه است. از روی بهترین برازش تابع نمایی بر داده‌های اندازه‌گیری شده تیمارهای تنش کمبود آب، میزان ضریب β محاسبه شد.



شکل ۱- برازش تابع نمایی بر داده‌های اندازه‌گیری شده تیمارها.

$$Y_r = (1 - e^{-C_N N}) \times e^{\beta(h-h_3)} \quad [13]$$

ماده خشک نسبی گیاه ریحان به عنوان تابعی از سطوح مصرف نیتروژن و مقدار آب آبیاری در شکل ۲ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تنش کمبود آب، عملکرد نسبی ریحان کاهش و با افزایش کود نیتروژنی مصرفی مقدار آن افزایش یافت. در تیمار بدون مصرف نیتروژن با افزایش تنش کمبود آب تأثیر چندانی بر کاهش عملکرد نسبی نداشته و به صورت

می‌دهد که در سطوح مختلف کود نیتروژنی N_3 ، N_2 ، N_1 و N_4 ، متوسط حد آستانه تنش کمبود آب متفاوت می‌باشد.

برای انتخاب بهترین مدل از بین شش مدل مورد مطالعه شامل مدل‌های اشتقاقی MB-F، MB-D، MB-H، MB-EXP و LS-F تحت شرایط تنش توأم کمبود آب و نیتروژن شاخص‌های آماری ارزیابی مدل‌ها محاسبه و در جدول ۴ ارائه شده است.

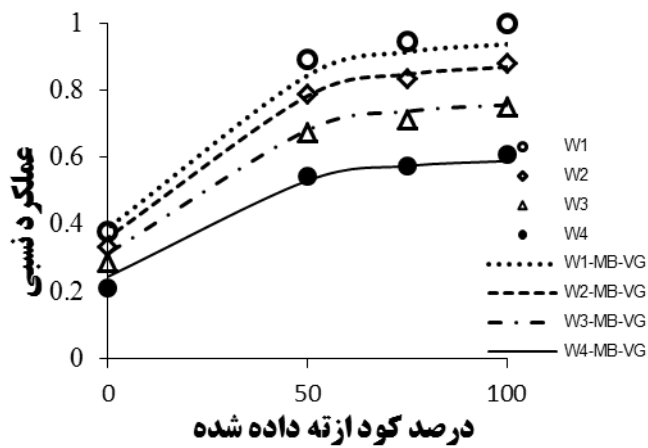
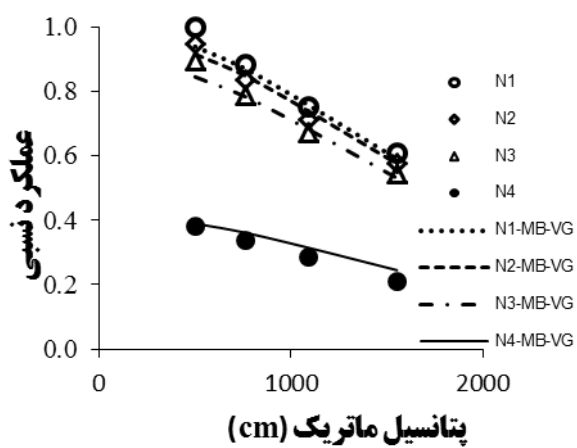
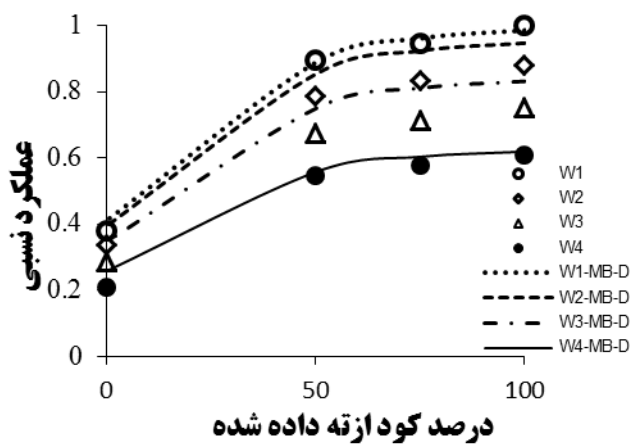
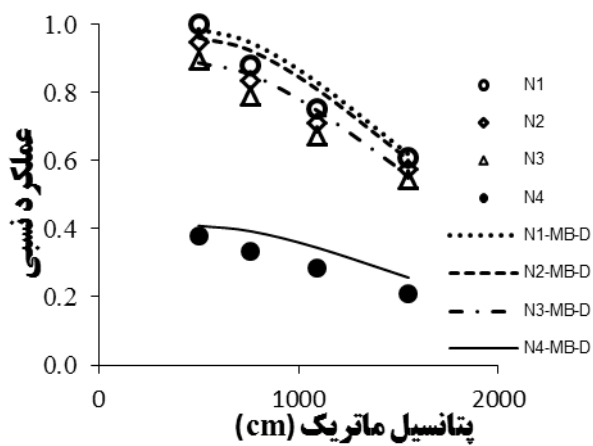
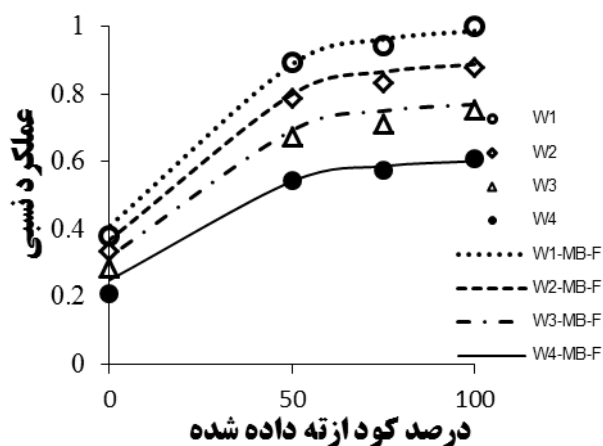
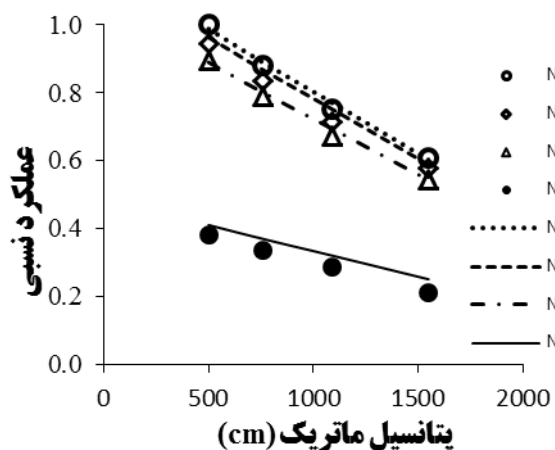
موجود در خاک دارد. هنگامی که نیتروژن، عملکرد گیاه را محدود نمی‌کند (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز کود نیتروژن)، حد آستانه کاهش عملکرد تحت شرایط تنش کمبود آب بیشتر است. می‌توان نتیجه گرفت که حد کفایت نیتروژن برای گیاه نیز در سطوح رطوبتی مختلف متفاوت می‌باشد و کاربرد کمتر یا بیشتر از حد مناسب، سبب کاهش عملکرد و یا هدر رفت نیتروژن و آلودگی منابع آب‌های زیرزمینی می‌شود. نتایج نشان

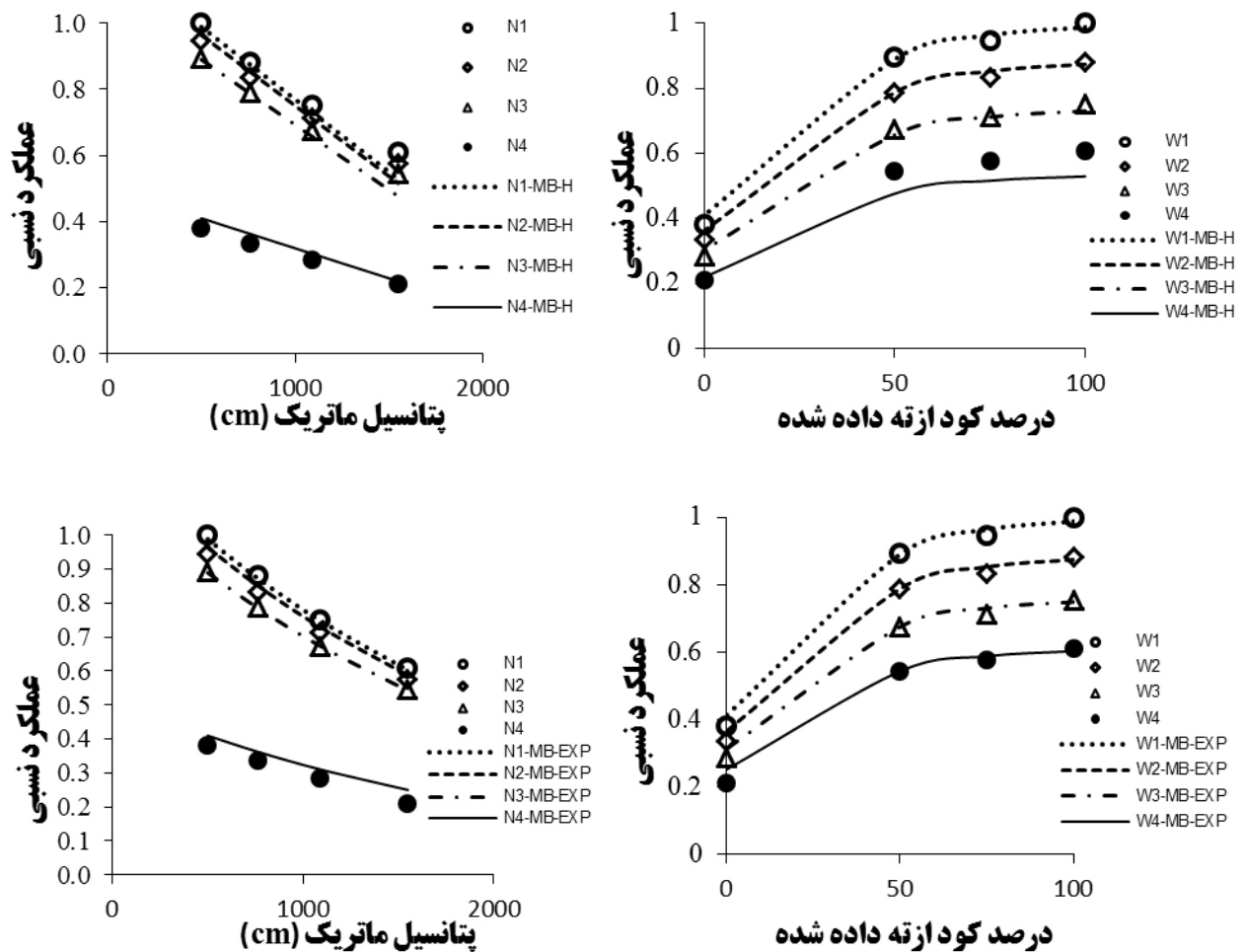
جدول ۴. آماره‌های محاسبه شده برای مقایسه مدل‌ها بر اساس سطوح مختلف نیتروژن و مقادیر آب آبیاری.

مدل‌ها	nRMSE	ME	EF	CRM	R ²
MB-F	۳/۶۴	۶/۱۶	۰/۹۹	۰/۰۱	۰/۹۸
MB-D	۸/۵۲	۱۵/۱۱	۰/۹۵	-۰/۰۴	۰/۹۹
MB-VG	۴/۱۴	۹/۴۲	۰/۹۹	۰/۰۳	۰/۹۹
MB-H	۵/۱۹	۱۲/۲۳	۰/۹۸	۰/۰۴	۰/۹۹
MB-EXP	۲/۷۸	۶/۱۴	۰/۹۹	۰/۰۱	۱/۰۰
LS-F	۱۷/۴۸	۲۹/۴۸	۰/۷۷	-۰/۰۳	۰/۹۲

از ۲۰ درصد) افزایش مقدار مصرف کود تأثیر چندانی بر افزایش عملکرد محصول نداشته و سطح بهینه مصرف کود کمتر از ۱۰۰ درصد نیاز کودی می‌باشد. هنگامی که عملکرد بر اثر کمبود نیتروژن و یا تنش کمبود آب به طور مشابهی کاهش یافته باشد، کاهش کم‌آبی و یا مصرف کود، افزایش عملکرد را در برخواهد داشت. اما چنانچه اثر یکی از این دو تنش در کاهش عملکرد بیش از دیگری باشد، جلوگیری از تنش که شدیدتر است عملکرد را بیشتر افزایش می‌دهد تا تنشی که سهم کمتری در کاهش عملکرد دارد. بنابراین، به هنگام وجود هر دو تنش کمبود آب و نیتروژن باید دقت نمود که آیا مصرف کود تحمل گیاه به تنش کمبود آب را کاهش و یا افزایش می‌دهد. قابل ذکر است که برای قابل تحلیل بودن آماره‌های مدل‌سازی و ارزیابی توانایی مدل‌ها در این پژوهش، با ۵۰ درصد داده‌ها واسنجی و با ۵۰ درصد دیگر داده‌ها اعتبارسنجی مدل‌های ریاضی انجام شد.

بر اساس آماره‌های محاسبه شده، بهترین مدل که بیشترین انطباق را با داده‌های اندازه‌گیری شده دارد، به ترتیب مدل‌های MB-F، MB-EXP، MB-VG و MB-H می‌باشند. مدل‌های پیشنهادی MB-EXP در تمام سطوح رطوبتی W_1 ، W_2 ، W_3 و W_4 دارای دقت بسیار مناسب می‌باشد. مدل‌های MB-F، MB-VG و MB-H در سطوح رطوبتی W_1 ، W_2 و W_3 دارای دقت مناسب می‌باشند لیکن در سطح تنش کمبود آب W_4 دقت این مدل‌ها از مدل پیشنهادی پایین‌تر می‌باشد. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش تنش کودی و تنش کمبود آب دقت شبیه‌سازی همه مدل‌ها تا حدی کاهش می‌یابد. سطوح کود مصرفی بهینه در هر یک از تیمارهای آبی متفاوت می‌باشد، بنابراین به عنوان مناسب‌ترین گزینه مدیریت کودی تحت شرایط تنش کمبود آب پیشنهاد می‌شود در تنش‌های ملایم کم‌آبی تأمین نیاز کامل کودی گیاه صورت گیرد زیرا این امر باعث افزایش مقاومت گیاه در مقابل تنش‌های وارده می‌شود. در تنش‌های آبی شدیدتر (تنش کمبود آب بیش





شکل ۳- مقایسه عملکردهای نسبی اندازه‌گیری شده و برآورد شده در سطوح مختلف نیتروژن و مقادیر آب آبیاری.

پیدا می‌کند. سطوح کود مصرفی بهینه در هر یک از تیمارهای آبی متفاوت می‌باشد. در تنش‌های ملایم کم‌آبی تأمین نیاز کامل کودی گیاه باعث افزایش مقاومت گیاه در مقابل تنش‌های وارده می‌شود. در تنش‌های آبی شدیدتر (تنش کمبود آب بیش از ۲۰ درصد) افزایش مقدار مصرف کود تأثیر چندانی بر افزایش عملکرد محصول نداشته و سطح بهینه مصرف کود کمتر از ۱۰۰ درصد نیاز کودی می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج نشان داد که مدل نمایی پیشنهادی این تحقیق (MB-EXP)، دارای بیشترین دقت در برآورد جذب آب در شرایط تنش توأم کمبود آب و نیتروژن می‌باشد. مدل‌های MB-F، MB-VG و MB-H نیز دارای دقت مناسب بوده و در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. مدل خطی LS-F دارای کمترین دقت در برآورد جذب آب در شرایط تنش توأم کمبود آب و نیتروژن می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تنش کودی و تنش کمبود آب دقت شبیه‌سازی همه مدل‌ها تا حدی کاهش

منابع مورد استفاده

- اسماعیلی، ا، همایی م و ملکوتی م ج، ۱۳۸۴. اثرات متقابل شوری محلول و کود ازتی بر رشد و ترکیبات سورگوم. علوم خاک و آب، جلد ۱۹، شماره ۱، صفحه‌های ۱۲۶ تا ۱۴۳.
- عباسی ف، چوگان ر، علیزاده ح و لیاقت ع م، ۱۳۹۱. بررسی اثر کود آبیاری جویچه‌ای بر کارایی مصرف کود و آب، عملکرد و برخی صفات ذرت دانه‌ای. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، جلد ۴۳، شماره ۴، صفحه‌های ۳۷۵ تا ۳۸۵.
- کریمی، ا، معز اردلان م، لیاقت ع م و همایی م، ۱۳۸۶. اثر کود-آبیاری بر اجزای عملکرد و کارایی مصرف آب. مجله علوم و صنایع کشاورزی، جلد ۲۱، شماره ۱۱، صفحه‌های ۱۱ تا ۲۲.
- کریمی، ا، همایی م، لیاقت ع م و معز اردلان م، ۱۳۸۴. یکنواختی توزیع آب و کود در سیستم آبیاری قطره‌ای- نواری. مجله پژوهش کشاورزی، جلد ۵، شماره ۲، صفحه‌های ۵۳ تا ۶۷.
- کیانی ع، همایی م و میر لطیفی م، ۱۳۸۵. ارزیابی توابع کاهش عملکرد گندم در شرایط توأم شوری و کم‌آبی. مجله علوم خاک و آب، جلد ۲۰، شماره ۱، صفحه‌های ۷۳ تا ۸۳.
- واعظی ع، همایی م و ملکوتی م ج، ۱۳۸۱. اثر کود آبیاری بر کارایی مصرف کود و آب در ذرت علوفه‌ای. مجله علوم خاک و آب، جلد ۱۶، شماره ۲، صفحه‌های ۱۵۲ تا ۱۶۰.
- همایی م، ۱۳۸۱. واکنش گیاهان به شوری. انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، شماره نشر ۵۸، ۹۷ صفحه.
- Black C A, 1993. Soil fertility evaluation and control. Lewis Publisher, Boca Raton, FL.
- Cardon G E and Letey J, 1992. Plant water uptake terms evaluated for soil water and solute movement models. Soil Science Society American Journal 32: 1876-1880.
- Dirksen C, Kool JB, Koorevaar P and van Genuchten M Th, 1993. HYSWASOR: simulation model of hysteretic water and solute transport in the root zone. In: Russo, D., Dagan, G. (Eds), Water Flow and Solute Transport in Soils. Springer, Berlin, pp. 99-122.
- Esmaili E, Asadi Kapourchal S, Malakouti M J and Homae M, 2008. Interactive effect of salinity and two nitrogen fertilizers on growth and composition of sorghum. Plant, Soil and Environment 56(12): 537-546.
- Feddes R A, Kowalik P and Zarandy H, 1978. Simulation of Field Water Use and Crop Yield. Pudoc. Wageningen. The Netherlands Saline water in supplemental irrigation of wheat and barley under rainfed agriculture. Agricultural Water Management 78: 122-127.
- Gardner WR, 1991. Modeling water uptake by roots. Irrigation Science 12: 109-114.
- Homae M, 1999. Root water uptake under non-uniform transient salinity and water stress. PhD dissertation, Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 173 pp.
- Homae M, Dirksen C and Feddes R A, 2002a. Simulation of root water uptake. I. Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. Agricultural Water Management 57: 89-109.
- Homae M, Dirksen C and Feddes R A, 2002b. Simulation of root water uptake. II. Nonuniform transient water stress using different reduction functions. Agricultural Water Management 57: 111-126.
- Jacobsen O J and Schjonning P, 1993. A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture. J. of Hydrology 5: 147-157.
- Liua W Z and Zhang X, 2007. Optimizing water and fertilizer input using an elasticity index: a case study with maize in the loess plateau of China. Field Crops Research 100 (2-3): 302-310.
- Loague K and Green R E, 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. Journal of Contaminant Hydrology 7: 51-73.
- Miller J D and Gaskin G, 1997. The development and application of the theta probes soil water sensor. MLURI. Technical note, 312 pp.
- Oikeh SO, Kling J G and Okoruwa A E, 1988. Nitrogen fertilizer management effects on maize grain quality in the West African Moist Savanna. Journal of Crop Science 38: 1056-1061.
- Pandey RK, Maranville JW and Admou A, 2000. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment. I. Grain yield and yield components. Agricultural Water Management 46 (1): 1-13.

- Pang XP and Letey J, 1998. Development and evaluation of ENVIRO-GRO, an integrated water, salinity, and nitrogen model. *Soil Science Society American Journal* 62 (5): 1418–1427.
- Richards L A, 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics*. 1: 318-333.
- Robinson D A, Gardner C M K and Cooper J D, 1999. Measurement of relative permittivity in sandy soils using TDR, capacitance and theta probes: comparison, including the effects of bulk soil electrical conductivity. *J. of Hydrology* 223: 198–211.
- Tiercelin JR. and Vidal A, 2006. *Traite' d'Irrigation*, 2nd edition. Lavoisier edition. 1266 pp.
- Van Genuchten M Th, 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Research Report. US Salinity Laboratory, Riverside, CA.
- Zand-Parsa Sh and Sepaskhah A L, 2001. Optimal applied water and nitrogen for maize. *Agricultural Water Management* 52(1): 73–85.