

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

مهدی سرائی تبریزی<sup>۱</sup>، حسین بابازاده<sup>۲\*</sup>، مهدی همائی<sup>۳</sup>، فریدون کاوه<sup>۴</sup> و مسعود پارسی نژاد<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۹۱/۵/۱۷ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۰/۲۵

<sup>۱</sup> دانش آموخته دکترای دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> استاد، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۳۳۶۰-۱۴۱۱۵، ایران

<sup>۴</sup> دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

<sup>۵</sup> 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](mailto: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 فدس 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 فدس 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 فدس 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 Tabrizi<sup>1</sup>, H Babazadeh\*<sup>2</sup>, M Homae<sup>3</sup>, F Kaveh<sup>4</sup> and M Parsinejad<sup>5</sup>

Received: 7 August 2012 Accepted: 15 January 2014

<sup>1</sup>- PhD Graduated, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

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

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

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

<sup>5</sup>- 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](mailto: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 evaluated 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 evaluated models, based on calculated statistical indices, 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

در مناطق خشک و نیمه خشک 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 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 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 2010, Esmaili et al., 1998).

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 معنی دار 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 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

حال به بوته آزمایش گذاشته نشده اند. به همین خاطر گروه دیگری از مدل ها که به مدل های کلان شهرت دارند، طراحی و ارائه گردیده اند ( Nimah and Hanks 1973, Gardner 1991). در مدل های کلان، مقدار آب جذب شده توسط گیاه برابر با میزان تعرق واقعی و در شرایطی که هیچ گونه محدودیت آبی در خاک وجود نداشته باشد، برابر با تعرق پتانسیل در نظر گرفته شده و به صورت کلی زیر بیان می شود (Homaei et al., 2002a):

$$S = S_{\max} = \frac{T_p}{Z_r} \quad [2]$$

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 اندازه ای که به آن تابع کاهش گفته می شود، از تعرق کاسته می شود. مهم ترین مدل های جذب، موسوم به مدل های کلان، توابعی تجربی هستند که جذب آب توسط گیاه را بر مبنای پاسخ گیاه به پتانسیل آب خاک توصیف می کنند. در حال حاضر این مدل ها به دلیل کاربردی بودن، بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند. بر اساس این مدل ها، 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 می شود (کیانی و همکاران ۱۳۸۵، همایی ۱۳۸۱).

$$S = \alpha \cdot S_{\max} = \alpha(h, N) \cdot \frac{T_p}{Z_r} \quad [3]$$

که در آن،  $\alpha$  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 می دهند. رابطه ۳ شکل عمومی مدل های کلان تحت شرایط تنش توأم کمبود آب و نیتروژن است.

در زمینه مدل سازی اثرهای همزمان تنش های آبی و کودی تاکنون مطالعاتی صورت نگرفته است.

مصرف آب افزایش می یابد. جمع بندی نتایج تحقیقات مختلف نشان می دهد که برای دستیابی به مقدار بهینه مصرف کود و آب آبیاری در شرایط وجود تنش های آبی، کمبود نیتروژن و یا تنش توأم کمبود آب و نیتروژن لازم است واکنش گیاه به تنش های مختلف محیطی بررسی و تابع کاهش عملکرد گیاه برای شرایط وجود تنش همزمان کمبود آب و نیتروژن استخراج شود. مدل سازی پاسخ گیاه به تنش توأم آب و کمبود نیتروژن می تواند نقشی کلیدی در مدیریت آب در مزرعه ایفا نماید.

مناسب ترین روش کمی کردن جذب آب توسط ریشه گیاهان، استفاده از معادله کلی جریان یا معادله ریچاردز است. تقریباً همه مدل های ریاضی حرکت آب و املاح در خاک به وسیله حل عددی معادله ریچاردز- دارسی با در نظر گرفتن ترم جذب آب برای جریان در بعد عمودی ارائه شده اند (Cardon and Letey 1992). از آنجا که جذب آب توسط گیاهان در رطوبت های غیراشباع صورت می گیرد، 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, Homaei 1999):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \frac{\partial h}{\partial z} - K(h) \right] - S \quad [1]$$

که در آن،  $\theta$  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، ویژگی های ریشه و شرایط آب و هوایی همچون نیاز تبخیری می باشد (Homaei 1999; Homaei et al. 2002a).

برای بیان کمی  $S$ ، مدل هایی وجود دارند که می توان آنها را به دو گروه مدل های خرد و مدل های کلان تقسیم کرد. مدل های خرد به دلیل مبانی غیرواقعی و نیز غیرقابل اندازه گیری بودن پارامترهای آن، تا 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 تهران قرار گرفته است. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب و خاک مورد استفاده در جداول ۱، ۲ و ۳ ارائه شده 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 تکرار به

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 <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>			
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	۰-۳۰

جدول ۳. مشخصات فیزیکی خاک گلدان‌های آزمایش

چگالی ظاهری خاک	رطوبت وزنی در مکش ۱۰ اتمسفر	رطوبت وزنی در مکش ۰/۳ اتمسفر	رطوبت اشباع (%)	بافت	سپت رس	شن
۱/۵۴	۷/۰۹	۱۳/۷۷	۲۷/۵۵	Sandy loam	۱۳	۷

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 با روش‌های مختلف (خطی، غیرخطی و روش ویژه) و اسنجی شد (Miller and Gaskin 1997, Robinson et al., 1999). نتایج نشان داد که روش اسنجی 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

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. از مزایای این روش،

دلیل تعداد زیاد تقسیط نیتروژن دهی، 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.

پس از افزودن عناصر غذایی به خاک درون کیسه ها و رسیدن رطوبت خاک به حد ظرفیت مزرعه ای، خاک درون کیسه ها 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 سانتی متر مکعب) 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 برگگی 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 اندازه گیری می شد تا از صحت اعمال  $LF=0/3$  اطمینان حاصل شود.

مقایسه کمی مدل های مورد مطالعه با استفاده از آماره های بیشینه خطای نسبی ( $ME$ )<sup>۲</sup>، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده ( $nRMSE$ )<sup>۳</sup>، کارآیی مدل سازی ( $EF$ )<sup>۴</sup> و ضریب جرم باقی مانده ( $CRM$ )<sup>۵</sup> برای هر کدام از مدلها انجام شد. بیان ریاضی آماره های یاد شده به صورت زیر است:

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n \times \frac{100}{O} \quad [۴]$$

$$nRMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{100}{O} \quad [۵]$$

<sup>۲</sup> Maximum Error

<sup>۳</sup> Normalized Root Mean Square Error

<sup>۴</sup> Modeling Efficiency

<sup>۵</sup> Coefficient of Residual Mass

روش سازندگان دستگاه برای برآورد رابطه بین رطوبت و ثابت دی الکتریک استفاده شد. به منظور اندازه گیری پتانسیل ماتریک ابتدا منحنی مشخصه رطوبتی خاک با استفاده از دستگاه صفحات فشاری<sup>۱</sup> و نرم افزار RETC تعیین و سپس با جایگزینی مقادیر رطوبت های روزانه اندازه گیری شده در منحنی مشخصه رطوبتی خاک، قدرمطلق پتانسیل ماتریک محاسبه می شد. به منظور اندازه گیری رطوبت حجمی خاک، رطوبت همه گلدانها هر روز با دستگاه تتاپروب اندازه گیری می شد.

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 سانتی متر استفاده گردید. در پایان آزمایش ماده خشک در تیمارهای مختلف اندازه گیری 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 می داد که بهترین خاک برای استفاده از دستگاه تتاپروب، خاک با بافت سبک می باشد (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 آماده سازی گلدانهای آزمایشی، ۶ کیلوگرم خاک خشک وزن و در کیسه های 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 مزرعه ای خاک مورد آزمایش به خاک درون کیسه ها 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.

<sup>۱</sup> Pressure Plate

غذایی شامل مدل خطی لیبیگ- اسپرینگل (LS) و مدل غیرخطی میچرلیخ - بال (MB) و مدل‌های تنش کمبود آب شامل مدل خطی فوس و همکاران (۱۹۷۸) (F)، مدل‌های غیرخطی ون‌گنوختن (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،  $h_4$  و  $h_3$  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<sup>۸</sup> و  $\alpha_0$  پارامتر واسنجی مدل می‌باشد (Homaei 1999, Homaei et al., 2002b). کاهش در مقدار  $\alpha$  در تنش‌های آبی بیشتر از  $h^*$  ادامه می‌یابد تا به یک تنش کمبود آب معین ( $h_{\max}$ ) برسد. در

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

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

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<sup>۶</sup> و یا کم‌برآوردی<sup>۷</sup> در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده است. اگر تمامی داده‌های برآورد شده و اندازه‌گیری شده یکسان باشند، نتایج آماره‌ها به صورت  $ME$ ،  $CRM$  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  $\alpha(h, N)$  در این پژوهش پیشنهاد شده است که از اشتقاق مدل‌های تنش مواد

<sup>8</sup> Liebig-Sprengel

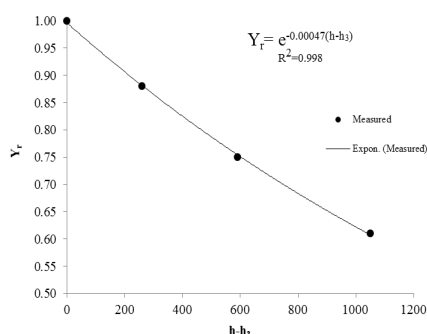
<sup>9</sup> Mitscherlich-Baule

<sup>10</sup> Evaporative Demand

<sup>۶</sup> Overestimate

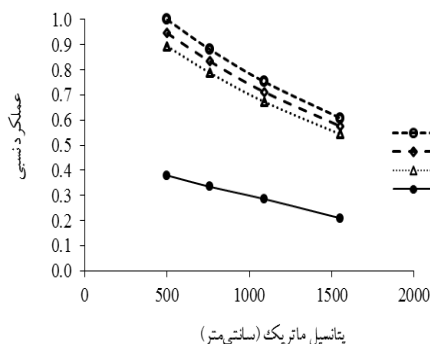
<sup>۷</sup> Underestimate

از روی بهترین برازش تابع نمایی بر داده‌های اندازه‌گیری شده تیمارهای تنش کمبود آب، میزان ضریب  $\beta$  محاسبه شد.



شکل ۱. برازش تابع نمایی بر داده‌های اندازه‌گیری شده تیمارهای تنش کمبود آب

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

پتانسیل‌های ماتریک بیشتر از  $h_{max}$  افزایش تنش کمبود آب نمی‌تواند با همان روند قبلی در مقدار  $\alpha$  کاهش ایجاد کند. این واقعیت نشان می‌دهد که در  $h > h_{max}$  گیاه هنوز 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.

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

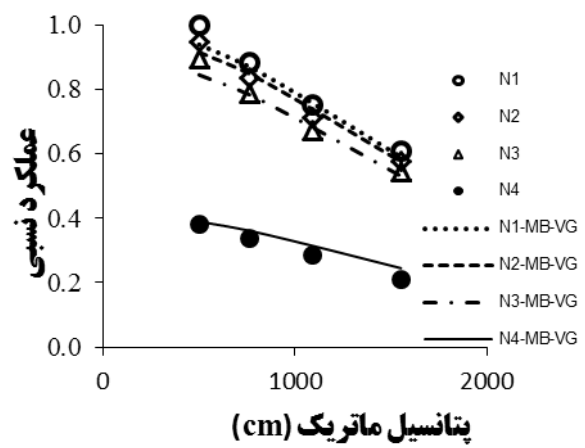
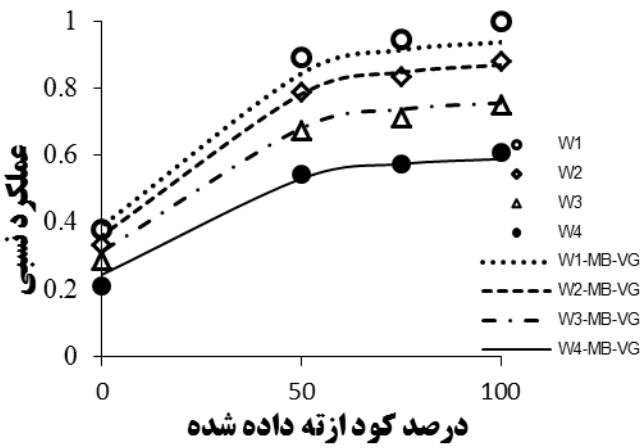
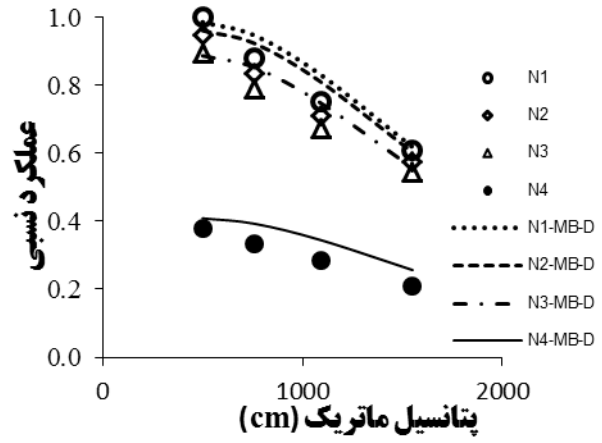
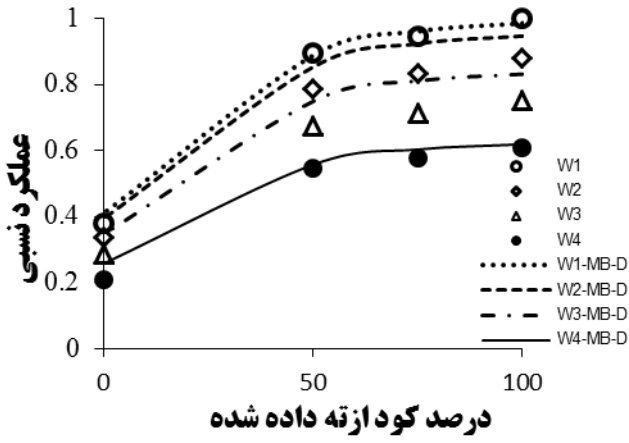
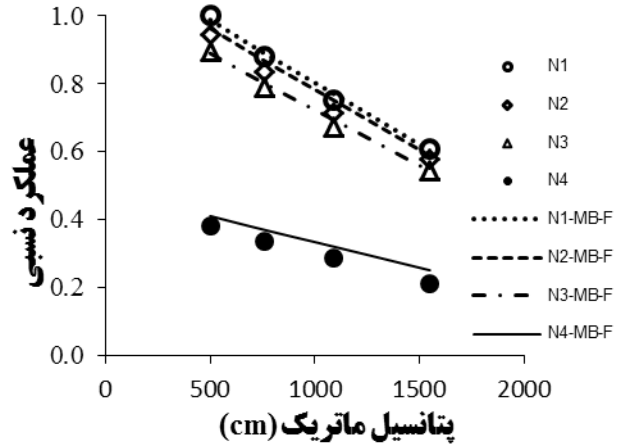
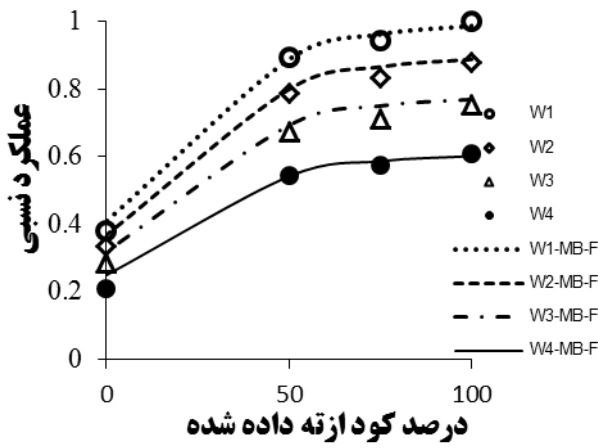
ماده خشک نسبی گیاه ریحان به عنوان تابعی از سطوح مصرف نیتروژن و مقدار آب آبیاری در شکل ۲ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تنش کمبود آب، عملکرد نسبی ریحان کاهش و با افزایش کود نیتروژنی مصرفی مقدار آن افزایش یافت. در تیمار بدون مصرف نیتروژن با افزایش تنش کمبود آب تأثیر چندانی بر کاهش عملکرد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

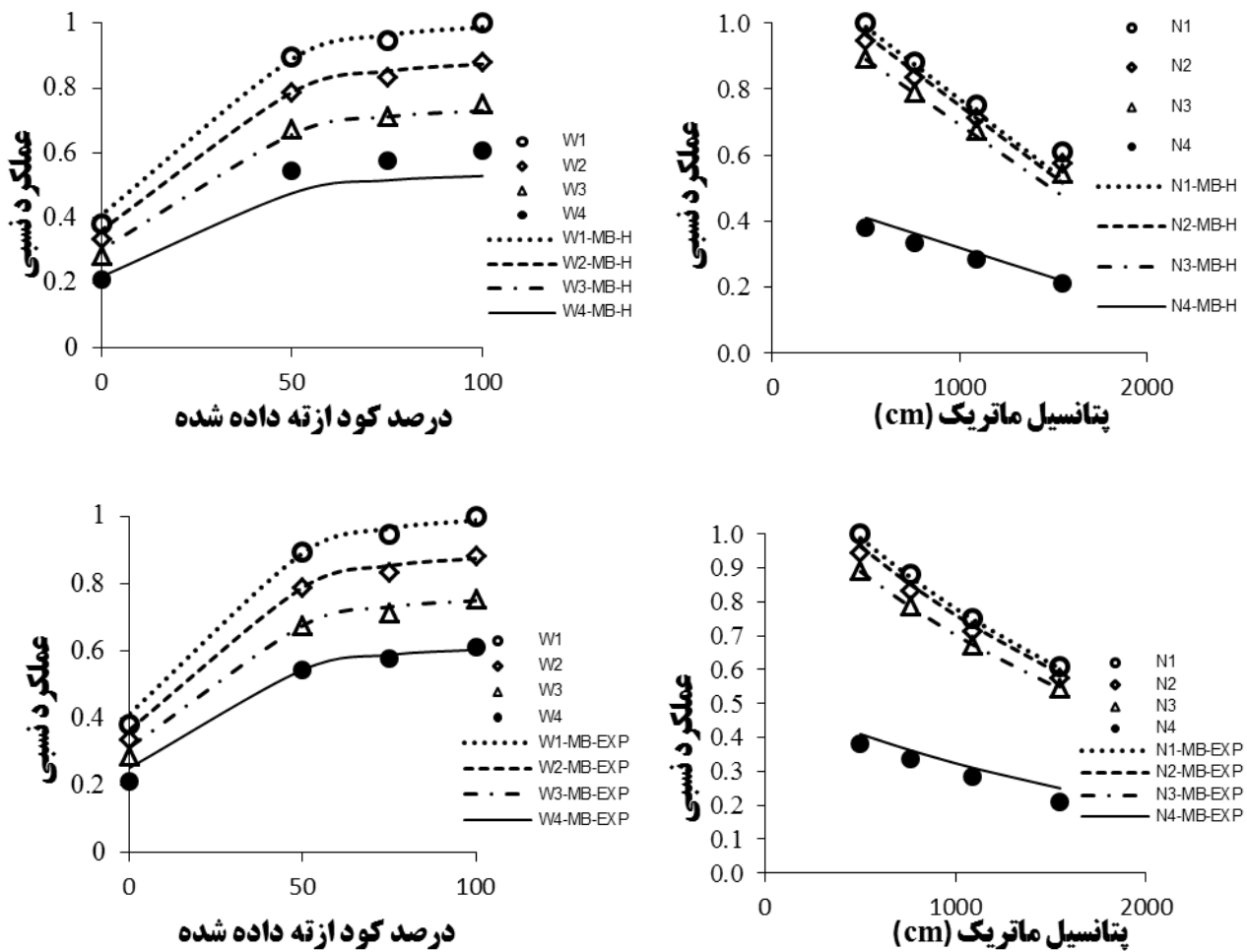


می‌باشد. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش تنش کودی و تنش کمبود آب دقت شبیه‌سازی همه مدل‌ها تا حدی کاهش می‌یابد. سطوح کود مصرفی بهینه در هر یک از تیمارهای آبی متفاوت می‌باشد، بنابراین به عنوان مناسب‌ترین گزینه مدیریت کودی تحت شرایط تنش کمبود آب پیشنهاد می‌شود در تنش‌های ملایم کم‌آبی تأمین 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 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 تنش‌های که شدیدتر است عملکرد را بیشتر افزایش می‌دهد تا تنش‌های 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.

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 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 می‌دهد که در سطوح مختلف کود نیتروژنی  $N_1$ ،  $N_2$ ،  $N_3$  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-VG، 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. بر اساس آماره‌های محاسبه شده، بهترین مدل که بیشترین انطباق را با داده‌های اندازه‌گیری شده دارد، به ترتیب مدل‌های MB-EXP، MB-F، 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





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

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

مدل‌ها	nRMSE	ME	EF	CRM	R <sup>2</sup>
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

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.

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, Maranwille 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.