مدل‌سازی پاسخ ریحان (*Ocimum basilicum* L.) به تنش‌های توأمان شوری و کمبود نیتروژن

مهدی سرائی تبریزی[۱]، مهدی همایی[۲*]، حسین بابازاده[۱]، فریدون کاوه[۱] و مسعود پارسی‌نژاد[۳]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۴/۰۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۲/۰۶)

چکیده

شوری و کمبود مواد غذایی به‌ویژه نیتروژن، دو عامل مهم کاهش‌دهندهٔ محصول در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشند. هدف از این پژوهش، مدل‌سازی پاسخ گیاه ریحان به تنش‌های توأمان شوری و کمبود نیتروژن بود. بدین‌منظور، مدل‌های تعدیل‌یافته لیبیگ- اسپرینگل (LS) و میچرلیخ- بال (MB) و همچنین مدل‌های اشتقاقی از ترکیب مدل میچرلیخ- بال برای تنش مواد غذایی و مدل‌های ماس و هافمن (۳۱)، ون‌گنوختن و هافمن (۳۶)، دیرکسن و آگوستین (۱۷) و همایی و همکاران (۲۳) برای تنش شوری ارائه و مورد ارزیابی قرار گرفتند. آزمایش‌ها در ۴ سطح مختلف شوری شامل ۱/۱۷۵، ۳، ۵، و ۸ دسی‌زیمنس بر متر و چهار سطح کود نیتروژن شامل صفر، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز کودی در ۳ تکرار انجام شد. نتایج نشان داد به‌ترتیب مدل‌های اشتقاقی MB و ماس و هافمن (RMSE =۴/۹)، MB و ون‌گنوختن و هافمن (RMSE =۵/۴) و همچنین MB و همایی و همکاران (RMSE =۷/۰) بهترین انطباق را با داده‌های اندازه‌گیری شده دارند. همچنین عملکرد نسبی برآورد شده برای سطوح شوری آب آبیاری، به‌وسیله مدل تعدیل یافته LS (RMSE =۴/۶) در مقایسه با مدل MB نتایج رضایتبخش‌تری دارد (RMSE =۵/۹)، لیکن در سطوح نیتروژن خاک و اثرات متقابل شوری و نیتروژن، مدل تعدیل یافته MB (RMSE =۱۰/۳) نتایج رضایتبخش‌تری نسبت‌به مدل LS (RMSE =۱۴/۴) دارد. بنابراین، توصیه می‌شود به جای مدل تعدیل یافته MB و LS از مدل‌های پیشنهادی در این پژوهش استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: شوری؛ مدل LS تعدیل شده؛ مدل MB تعدیل شده؛ نیتروژن

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

۲. گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۳.گروه مهندسی آبیاری و آبادانی؛ پردیس کشاورزی و منابع طبیعی؛ دانشگاه تهران

*:مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mhomaee@modares.ac.ir

مقدمه

تنش شوری، عامل محیطی مهمی است که اثر زیان‌باری بر تولید محصولات کشاورزی دارد. از نظر تاریخی، شوری خاک سبب نابودی چندین تمدن قدیمی شده است. به رغم پیشرفت فناوری در جهان امروز، شور شدن میلیون‌ها هکتار از خاک‌های زیرکشت، به‌شدت تولید کشاورزی را تهدید می‌کند. بنابراین شور شدن خاک، تهدیدی است که به‌صورت پیوسته خاک‌های قابل کشت را کاهش می‌دهد (۳، ۷، ۸ و ۱۸). شوری از سه راه، رشد و عملکرد گیاه را محدود می‌کند. اثر نخست و غالب مربوط به زیادی غلظت نمک‌های محلول در خاک است که کاهش پتانسیل اسمزی را به‌دنبال دارد. با کاهش پتانسیل اسمزی، انرژی آزاد آب کاهش یافته و گیاه برای به‌دست آوردن مقدار مشخصی آب باید انرژی حیاتی بیشتری مصرف نماید. بنابراین بخشی از انرژی که گیاه برای رشد و نمو به آن نیاز دارد، صرف به‌دست آوردن آب شده و به این ترتیب رشد آن کاهش می‌یابد (۱۴، ۲۷ و ۳۴). اثر دوم مربوط به وجود یون‌های ویژه در محلول خاک شور است. یون‌هایی همچون Cl^-، Na^+ و B به تنهایی می‌توانند به‌طور مستقیم موجب بروز سمیت در گیاه شده و یا در فرآیند جذب گیاه اختلال ایجاد نمایند. اثر سوم شوری که در حقیقت زاییده اثر نوع دوم می‌باشد، بر هم زدن تعادل تغذیه‌ای است. بدین معنی که وجود یون‌هایی چون Na^+، Cl^- و B در محلول خاک شور، باعث اختلال در جذب و انتقال سایر عناصر غذایی از جمله نیتروژن (به‌صورت یون‌های نیترات و آمونیوم) از خاک به گیاه می‌شوند (۱، ۸، ۱۱ و ۱۵).

نیتروژن در بیشتر خاک‌ها، اعم از شور یا غیر شور، عاملی محدود کننده برای رشد گیاه به‌شمار می‌آید. لیکن در خاک‌های شور، به‌دلایلی متعدد کمبود این عنصر ممکن است تشدید شود. از جمله این عوامل می‌توان به کمبود شدید مواد آلی، عدم رشد کافی ریشه، رقابت یون Cl^- با یون NO_3^- برای جذب توسط ریشه، آبشویی یون NO_3^- و همچنین نبود شرایط مناسب برای تشکیل غده‌های تثبیت کننده نیتروژن در بقولات در خاک‌های شور اشاره کرد (۱۳، ۱۹، ۲۳ و ۲۷). معمولاً در خاک‌های شور افزون بر تنش شوری، کمبود نیتروژن نیز وجود دارد. بنابراین دانستن پاسخ گیاه به هر یک از عوامل محدود کننده رشد و نیز اثر متقابل این عوامل ضروری است. بدیهی است چنانچه چگونگی پاسخ گیاه به تنش همزمان شوری و کمبود نیتروژن مشخص نباشد، ممکن است کاربرد نامناسب نیتروژن باعث کاهش عملکرد و یا آلوده کردن آب‌های زیرزمینی به نیترات گردد (۲، ۹ و ۱۰).

پیرامون مدل‌سازی تنش توأمان شوری و کمبود نیتروژن با استفاده از مدل‌های تعدیل شده MB و LS پژوهش‌های اندکی انجام گرفته است. شنکر و همکاران (۳۵) عملکرد ذرت شیرین را با استفاده از مدل‌های تعدیل شده LS و MB برآورد کرده و با عملکرد اندازه‌گیری شده مقایسه کردند. نتایج نشان داد که هر دو مدل می‌توانند عملکرد محصول را تحت شرایط تنش توأمان شوری و نیتروژن شبیه‌سازی نمایند ولی مدل غیر خطی MB تعدیل شده بهتر از مدل دیگر شبیه‌سازی را انجام می‌دهد. حسینی و همکاران (۷) از دو مدل LS و MB تعدیل یافته برای مدل‌سازی پاسخ گیاه کلزا به تنش‌های توأمان شوری و کمبود نیتروژن استفاده کردند. نتایج نشان داد که براساس مقایسهٔ آماره‌های مختلف، عملکرد نسبی دانه کلزا برآورد شده برای سطوح نیتروژن خاک، همچنین شوری‌های آب آبیاری و اثرات متقابل شوری و نیتروژن به‌وسیلهٔ مدل تعدیل شده MB در مقایسه با مدل تعدیل شده LS، نتایج رضایت‌بخش‌تری داشت. بنابراین، استفاده از مدل تعدیل شده MB برای برآورد عملکرد نسبی دانه کلزا به هنگام وجود تنش‌های شوری و نیتروژن توصیه شد. اختری و همکاران (۱) واکنش گیاه کلزا (*Brassica napus* L.) به شوری در شرایط کمبود نیتروژن را مدل‌سازی کردند و مدل‌های مبنایی باروری خاک شامل لیبیگ- اسپرنگل (LS) و میچرلیخ- بال (MB) که تنها برای پاسخ گیاه به یک عامل محدودکننده غذایی پیشنهاد شده‌اند، به‌گونه‌ای اشتقاق دادند که بتوان از آنها برای تنش‌های توأمان شوری و کمبود نیتروژن استفاده کرد. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی LS برای

جدول ۱. نتایج آزمایش تجزیه شیمیایی نمونه آب رودخانه شور

Na ٪	SAR*	meq/L مجموع کاتیون‌ها	meq/L K^+	meq/L Na^+	meq/L Mg^{++}	meq/L Ca^{++}	meq/L مجموع آنیون‌ها	meq/L SO_4^-	meq/L Cl	meq/L HCO_3^-	meq/L CO_3^-	pH	EC (dS/m)	T.D.S (mg/lit)
۶۴/۶	۱۶/۷	۱۱۸/۷	۰/۱۷	۷۶/۵	۳۱/۶	۱۰/۴	۱۲۳/۱	۴۹/۱	۷۰	۴	۰/۰۴	۷/۹	۱۰/۵	۷۵۲۰

*: برحسب $(meq/L)^{0.5}$

جدول ۲. مشخصات فیزیکی خاک مورد استفاده در این تحقیق

کربن آلی (٪)	شن	سیلت	رس	کلاس بافت	رطوبت اشباع (٪)	رطوبت حجمی در مکش۰/۳ اتمسفر	رطوبت حجمی در مکش ۱۵ اتمسفر	جرم مخصوص ظاهری
۰/۴۹	۸۰	۷	۱۳	Sandy loam	۴۱/۴	۲۵/۴	۱۱/۰	۱/۵۴

برآورد عملکرد نسبی دانه در سطوح نیتروژن خاک نسبت به سایر مدل‌ها مناسب‌تر است. حال آن‌که مدل پیشنهادی MB در سطوح شوری آب آبیاری و ترکیب سطوح شوری و نیتروژن توانست نسبت به دیگر مدل‌ها برآوردی بهتر ارائه دهد.

بیشتر پژوهش‌های قبلی، پاسخ کمی گیاه به شوری و کمبود نیتروژن را فقط با استفاده از دو مدل تعدیل شده LS و MB مورد بررسی قرار دادند. بنابراین هدف از انجام این پژوهش، مدل‌سازی پاسخ گیاه ریحان به تنش‌های توأمان شوری و کمبود نیتروژن با استفاده از مدل‌های تعدیل یافته و مدل‌های اشتقاقی و همچنین تعیین میزان بهینه مصرف کود نیتروژنه تحت شرایط تنش شوری می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌صورت گلدانی و در شرایط گلخانه انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل چهار سطح آب شور ۱/۱۷۵ (تیمار شاهد)، ۳، ۵ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر و چهار سطح نیتروژن شامل صفر، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیتروژن توصیه شده براساس آزمایش حاصلخیزی خاک بود. آزمایش در سه تکرار به‌صورت طرح فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی اجرا شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب و خاک مورد استفاده در جدول ۱ و جدول ۲ ارائه شده است.

انتخاب این بافت خاک سه دلیل داشت، نخست آن که در موقع آبیاری با آب شور، شوری کل نیمرخ خاک با اعمال جزء آبشویی نسبتاً زیاد (LF=۰/۳) تا حد امکان یکنواخت گردد. دوم این‌که براساس مطالعات صورت گرفته در مورد دستگاه تتاپروب، نشان می‌داد که بهترین خاک برای استفاده از دستگاه تتاپروب، خاک با بافت سبک می‌باشد (۲۹، ۳۲ و ۳۳). دلیل دیگر این انتخاب، نگهداشت یکنواخت توزیع رطوبت در محیط ریشه گیاه بود. آب شور به‌منظور اعمال تیمارهای مورد نظر از رودخانه شور واقع در منطقهٔ بین پیک زرند و ورامین تهیه گردید. 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 براساس توصیه مؤسسه تحقیقات خاک و آب برای گیاه ریحان، به‌صورت محلول و با توجه به‌ظرفیت زراعی خاک مورد آزمایش به خاک درون کیسه‌ها اضافه شد (۱ و ۷). 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 به‌اعمال جزء آبشویی بود. همچنین مقادیر پتاسیم و فسفر نیز در سه نوبت

مساوی در طول دوره آزمایش به گلدان‌ها اضافه شد (۸ و ۳۵).

پس از افزودن عناصر غذایی به خاک درون کیسه‌ها و رسیدن رطوبت خاک به حد ظرفیت زراعی، خاک درون کیسه‌ها بهم زده و سعی شد تا عمل مخلوط شدن خاک با عناصر غذایی اضافه شده به‌طور 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. همهٔ گلدان‌ها در دو هفته اول استقرار گیاهچه و تا رسیدن به مرحله سه برگی شدن با آب تیمار شاهد (۱/۱۷۵ دسی‌زیمنس بر متر) آبیاری شدند. پس از این مرحله تعداد گیاهان هر گلدان به ۷ بوته کاهش یافت. برای کاهش تبخیر، سطح خاک هر گلدان با ۲۸۰ گرم شن درشت پوشانیده شد. به‌منظور اعمال تیمارهای شوری، ابتدا آب شور منتقل شده به گلخانه، متناسب با هر تیمار آب شور رقیق گردید. سپس، آبیاری گلدان‌ها با استفاده از آب شور مربوطه و تا رسیدن به FC با رعایت جزء آبشویی مناسب انجام گردید. طی آزمایش، حجم و EC زهاب به‌طور پیوسته اندازه‌گیری می‌شد تا از صحت اعمال LF=۰/۳ اطمینان حاصل شود.

از روش‌های نسبتاً جدید برای اندازه‌گیری رطوبت خاک، استفاده از دستگاه تتاپروب می‌باشد. برای برنامه‌ریزی آبیاری از دستگاه تتاپروب استفاده شد که به‌روش وزنی نیز مورد واسنجی قرار گرفت. پس از گل‌دهی کامل (به گل رفتن ۸۰ درصد بوته‌ها) بوته‌ها از بالای دو گره انتهایی (۶ سانتی‌متری سطح خاک) کف بر و در پاکت مقوایی قرار داده شدند. طی انجام آزمایش به‌همین ترتیب تا سه چین محصول برداشت و به آزمایشگاه منتقل شد. در آزمایشگاه عملکرد ماده خشک محاسبه شد. دو مدل تعدیل یافته برای بررسی پاسخ گیاه در شرایط تنش همزمان یک عنصر غذایی همچون نیتروژن و شوری وجود دارند که شامل مدل‌های لیبیگ- اسپرینگل (Liebig-Sprengel (LS)) و میچرلیخ- بال (Mitscherlich-Baule (MB)) هستند. بر مبنای مدل LS در هر زمان، یک عامل رشد که محدود کننده‌ترین آنهاست، مقدار عملکرد را تعیین می‌کند و پاسخ گیاه به این عامل رشد خطی است. به‌صورت زیر مدل تعدیل یافته لیبیگ- اسپرینگل بیان می‌شود (۱۶، ۲۸ و ۳۵):

$$Y_r = \min\begin{cases}\begin{cases}۱ & ; \ EC < EC_{cr}\\ a - b\,.\,(EC - EC_{cr}) & ; \ EC \geq EC_{cr}\end{cases}\\ \begin{cases}۱ & ; \ N \geq N_{cr}\\ n.N & ; \ N < N_{cr}\end{cases}\end{cases} \qquad [۱]$$

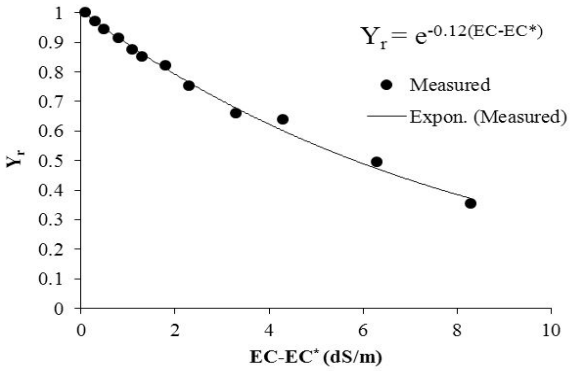
که در آن، EC_{cr} و N_{cr} عامل‌های تنش‌زا به‌ترتیب حد آستانهٔ گیاه به شوری و حد آستانهٔ گیاه به کمبود نیتروژن، a و b به‌ترتیب عرض از مبدأ و شیب تابع پاسخ عملکرد به عامل EC_{cr}، و n شیب پاسخ عملکرد به عامل N_{cr} می‌باشد. min در حقیقت مفهوم قانون حداقل را بیان می‌کند و Y_r عملکرد نسبی گیاه است.

مدل MB در اصل از یک مبنای فیزیولوژیک تبعیت می‌کند که می‌گوید افزودن یک عنصر به‌محیط ریشه سبب اشباع ناقل پروتئینی ریشه (که انتقال‌دهنده عنصر از سطح ریشه به داخل ریشه است) با آن عنصر می‌شود. این امر، پاسخ نزولی عملکرد محصول به کاربرد آن عنصر را به‌دنبال دارد (۱۶ و ۳۵). در این مدل اگر چند عامل رشد را با مفهوم میچرلیخ با هم در نظر بگیریم این عوامل رشد به‌طور همزمان رشد گیاه را تحت تأثیر قرار داده و به‌صورت تجمعی عمل می‌کنند. بدین‌ترتیب مدل MB را با فرض خطی بودن پاسخ گیاه به تنش شوری، برای تنش‌های توأمان شوری و کمبود نیتروژن می‌توان به‌صورت زیر تعدیل کرد (۲۸ و ۳۵):

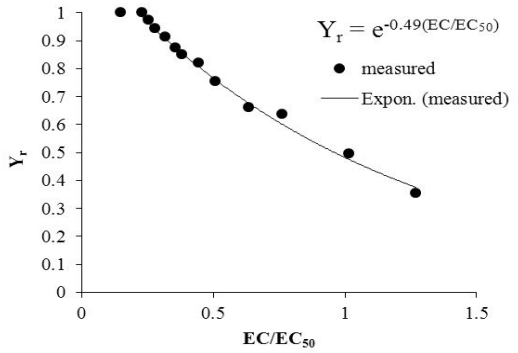
$$y_r = (۱ - e^{-C_N N})\,(۱ - e^{C_{EC}(EC - EC_{max})}) \qquad [۲]$$

که در آن EC_{max} مقدار هدایت الکتریکی آب شور می‌باشد که در آن عملکرد محصول برابر صفر است. EC و N مقادیر عامل‌های مؤثر بر رشد، C_{EC} و C_N عامل کارآیی یا ضریب میچرلیخ برای عامل‌های مؤثر رشد مربوطه که برای هر عامل رشد ثابت فرض می‌شود.

به‌منظور کمّی کردن اثر شوری و نیتروژن بر عملکرد محصول، عملکرد نسبی با استفاده از مدل‌های تعدیل یافتهٔ MB



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



شکل ۲. برازش تابع نمایی بر داده‌های اندازه‌گیری شده تیمارهای تنش شوری

و LS و همچنین مدل‌های اشتقاقی MB و دیرکسن و آگوستین (MB-D)، MB و ون‌گنوختن و هافمن (MB-VG) ، MB و ماس و هافمن (MB- MH) و MB و همایی و همکاران (MB-H) محاسبه شد. روابط مدل‌های اشتقاقی MB-VG، MB-D، MB- MH و MB-H به‌ترتیب به‌صورت زیر می‌باشند:

$$\alpha(N,h_o) = (1-e^{-C_N N}) \times \frac{1}{1+\left(\frac{h_o}{h_{o50}}\right)^P} \qquad [3]$$

که در آن h_o پتانسیل اسمزی (سانتی‌متر)، h_{o50} مقدار پتانسیل اسمزی (سانتی‌متر) است که در آن جذب آب توسط گیاه به‌اندازهٔ ۵۰ درصد کاهش می‌یابد و P نیز ضریبی تجربی است که وابسته به گیاه، خاک و اقلیم می‌باشد (۴، ۵ و ۶).

$$\alpha(N,h_o) = (1-e^{-C_N N}) \times \frac{1}{1+\left(\frac{h_o^* - h_o}{h_o^* - h_{o50}}\right)^P} \qquad [4]$$

که در آن h_o^* پتانسیل اسمزی در حد آستانه کاهش شوری می‌باشد (۳۴).

$$\alpha(N,h_o) = (1-e^{-C_N N}) \times \left[1-\frac{b}{360}(h_o^* - h_o)\right] \qquad [5]$$

که در آن b شیب خط کاهش عملکرد محصول به‌ازای یک واحد افزایش شوری پس از آستانه شوری می‌باشد (۲۸ و ۳۴).

$$\alpha(h_o) = (1-e^{-C_N N}) \times \frac{1}{1+(1-\alpha_o)/\alpha_o\left[(h_o^* - h_o)/(h_o^* - h_{o\,max})\right]^P} \qquad [8]$$

که در آن α_0 ضریب اصلاح مدل همایی و همکاران (۲۶) و h_{omax} حداکثر پتانسیل اسمزی که در آن گیاه هنوز زنده بوده و در سطحی بسیار اندک به فعالیت‌های حیاتی خود ادامه می‌دهد (۱۹، ۲۰، ۲۱ و ۲۲).

از روی بهترین برازش تابع نمایی بر داده‌های اندازه‌گیری شده تیمارهای تنش شوری، میزان ضریب β محاسبه شد.

$$\alpha(N,h_o) = (1-e^{-C_N N})\,(e^{\beta(EC-EC^*)}) \qquad [6]$$

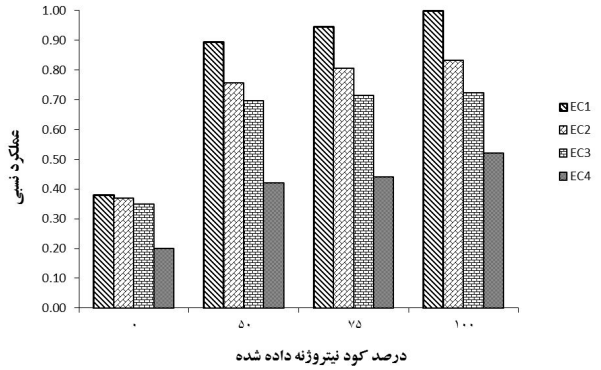
که در آن EC^* شوری آستانه کاهش عملکرد و β ضریب شوری متناسب با شیب کاهش عملکرد محصول معادل $\beta = \frac{100}{b}$ می‌باشد.

اگر به‌جای $EC\text{-}EC^*$، ترم EC/EC_{50} قرار گیرد و برازش تابع نمایی آن مجدداً بر داده‌های اندازه‌گیری شده عملکرد نسبی در تیمارهای تنش شوری ترسیم شود. رابطه نمایی زیر برای تابع کاهش جذب نمایی تنش شوری به‌دست می‌آید:

$$\alpha(N,h_o) = (1-e^{-C_N N})\,(e^{\beta(EC/EC_{50})}) \qquad [7]$$

که در آن EC_{50} شوری که به‌ازای آن ۵۰ درصد عملکرد کاهش پیدا می‌کند و β ضریب شوری متناسب با شیب کاهش عملکرد محصول و با استفاده از برازش بهینه مدل بر داده‌های اندازه‌گیری شده معادل ۰/۴۹ محاسبه شد.

عملکرد نسبی برآورد شده توسط مدل‌ها با مقادیر اندازه‌گیری شده در برابر سطوح مختلف شوری و نیتروژن ترسیم و نتایج مدل‌ها با یکدیگر مقایسه گردیدند. همچنین مقایسه کمی مدل‌ها با محاسبه آماره‌های بیشینه خطای نسبی



شکل ۳. تأثیر مقدار نیتروژن بر عملکرد نسبی ریحان در شوری‌های مختلف آب آبیاری

(Maximum Error) (ME)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (Normalized Root Mean Square Error) (nRMSE)، کارآیی مدل‌سازی (Modeling Efficiency) (EF) و ضریب جرم باقی‌مانده (Coefficient of Residual Mass) (CRM) برای هرکدام از مدل‌ها انجام شد. بیان ریاضی آماره‌های یاد شده به‌صورت زیر است:

$$ME = \max\left|P_i - O_i\right|_{i=1}^{n} \times \frac{100}{\overline{O}} \quad [9]$$

$$nRMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}\right]^{\frac{1}{2}} \frac{100}{\overline{O}} \quad [10]$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2 - \sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2} \quad [11]$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n} O_i - \sum_{i=1}^{n} P_i}{\sum_{i=1}^{n} O_i} \quad [12]$$

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

آمارهٔ nRMSE مقادیر کلی یا میانگین انحراف مقادیر برآورد شده از مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد که نمایش دهنده 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 ۱+ متغیر است. هر چه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد مدل کارآتر است. در حالی‌که مقدار CRM نشان‌دهنده تمایل مدل برای بیش‌برآوردی (Overestimation) و یا کم‌برآوردی (Underestimation) در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده است. اگر تمامی داده‌های برآورد شده و اندازه‌گیری شده یکسان باشند، نتایج آماره‌ها به‌صورت ME، CRM و nRMSE برابر صفر و EF برابر یک خواهد بود (۲۵، ۲۶ و ۳۰).

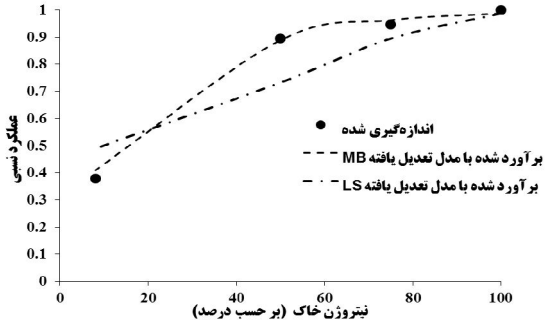
پارامترهای مدل‌ها با روش بهینه‌سازی حداقل مجموع مربعات خطا تعیین گردید. نرم‌افزارهای آماری مورد استفاده در این پژوهش، SPSS و Excel بودند.

نتایج و بحث

عملکرد نسبی گیاه ریحان به‌عنوان تابعی از سطوح مصرف نیتروژن و شوری آب آبیاری در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش شوری، عملکرد نسبی ریحان کاهش و با افزایش کود نیتروژنه مصرفی مقدار آن افزایش می‌یابد. در تیمار بدون مصرف نیتروژن به استثناء سطح شوری ۸ دسی‌زیمنس بر متر با افزایش شوری تأثیر چندانی بر کاهش عملکرد نسبی نداشته که نشان دهنده تأثیرگذارتر بودن عامل کمبود نیتروژن نسبت به شوری می‌باشد. از این حیث نتایج این تحقیق با نتایج حسینی و همکاران (۷) مطابقت دارد.

جدول ۳. پارامترهای بهینه‌سازی شده برای مدل‌های تعدیل‌یافتهٔ LS و MB

نام مدل	پارامتر	مقدار	واحد
مدل تعدیل‌یافته LS	حد آستانه شوری (EC_{cr})	۱/۷	dSm^{-1}
	n	۰/۰۰۳۳۵	افزایش عملکرد نسبی به ازای افزایش هر واحد نیتروژن ($mg\ kg^{-1}$)
	b	۰/۰۸۱۱	کاهش عملکرد نسبی به ازای افزایش هر واحد شوری (dSm^{-1})
مدل تعدیل‌یافته MB	C_N	۰/۰۴۴	$Kg\ mg^{-1}$
	C_{EC}	۰/۳۰۱	dSm^{-1}
	EC_{max}	۱۰/۲	dSm^{-1}



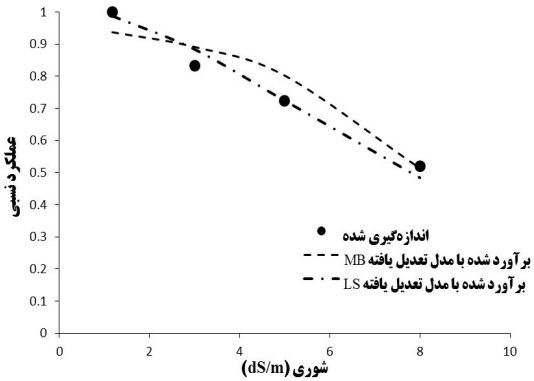
شکل ۴. مقایسه عملکردهای نسبی اندازه‌گیری شده و برآورد شده ریحان در سطوح مختلف نیتروژن

جدول ۴. آماره‌های محاسبه شده برای مقایسه مدل‌های LS و MB بر اساس سطوح نیتروژن خاک

مدل‌ها	nRMSE (٪)	ME (٪)	EF (٪)	CRM (٪)	R^2
LS	۱۲/۶	۱۶/۱	۰/۹۸	۰/۶۹	۰/۸۸
MB	۲/۳	۳/۷	۰/۹۹	۰/۶۸	۰/۹۴

پارامترهای بهینه شده مدل‌های تعدیل یافتهٔ LS و MB به هنگام وجود تنش توأمان شوری و کمبود نیتروژن در جدول ۱ خلاصه شده است. پارامترهای این دو مدل، برای نیتروژن، در شرایط عدم وجود تنش شوری محاسبه شد ($EC=۱/۱۷۵\ dSm^{-1}$). همچنین، پارامترهای دو مدل تعدیل یافته LS و MB، برای سطوح شوری، در شرایط عدم وجود تنش مواد مغذی محاسبه شده است (در سطح تأمین ۱۰۰ نیاز کودی توصیه شده براساس آزمایش حاصلخیزی خاک).

شکل ۴ عملکرد برآورد شده با مدل‌های تعدیل یافته LS و MB در مقایسه با عملکرد اندازه‌گیری شده برای سطوح مختلف نیتروژن خاک را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مدل LS مقدار عملکرد را در سطوح نیتروژنی ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌نماید. مقایسه کمی بین مدل‌های LS و MB با استفاده از آماره‌های مربوطه انجام و نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. مقایسه آماره‌های دو مدل نشان می‌دهد که مدل MB میانگین عملکرد نسبی در سطوح مختلف نیتروژن خاک را با دقت مناسب‌تری نسبت به مدل LS برآورد می‌نماید. زیرا علاوه بر کارآیی بالاتر، مقادیر



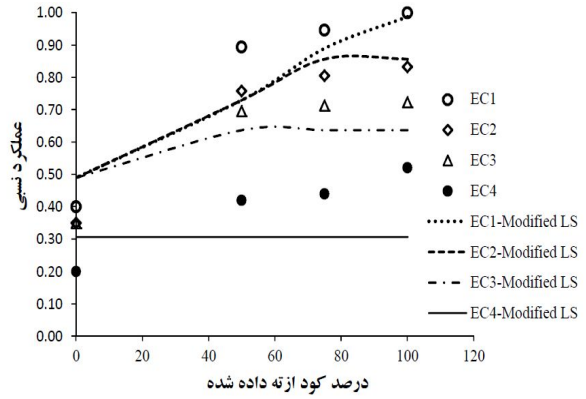
شکل ۵. مقایسه عملکردهای نسبی اندازه‌گیری شده و برآورد شده ریحان در سطوح مختلف شوری

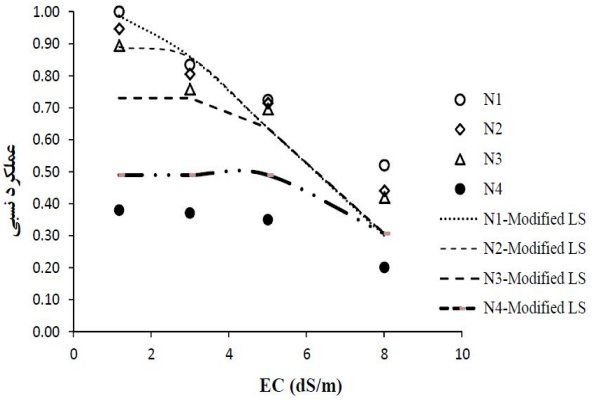
جدول ۵. آماره‌های محاسبه شده برای مقایسه مدل‌های LS و MB بر اساس سطوح شوری آب آبیاری

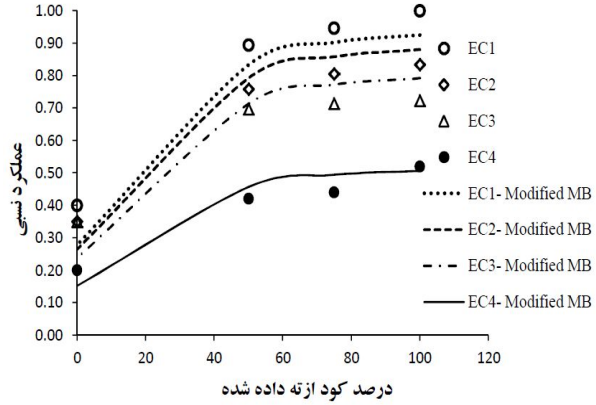
مدل‌ها	nRMSE (٪)	ME (٪)	EF (٪)	CRM (٪)	R^2
LS	۴/۶	۹/۹	۰/۹۲	۰/۵۱	۰/۸۸
MB	۵/۹	۱۰/۲	۰/۸۹	-۰/۰۶	۰/۸۶

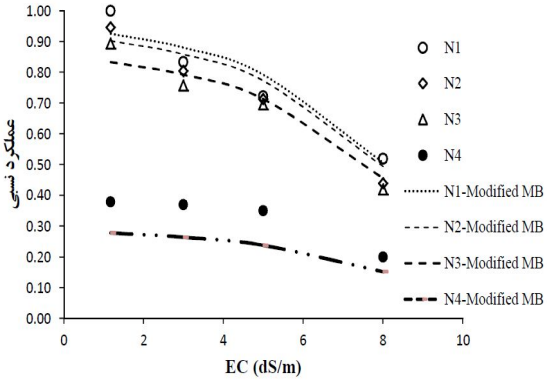
ME و nRMSE نیز برای این مدل کمتر می‌باشد. از آنجا که مقدار nRMSE برای مدل تعدیل یافته LS تقریباً پنج برابر مدل تعدیل یافته MB است، تخمین عملکرد نسبی ریحان برای سطوح نیتروژن خاک به‌وسیله مدل تعدیل یافته MB به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر می‌باشد. از آنجا که همه آماره‌های جدول ۴ نشان از برتری مدل تعدیل یافته MB نسبت به مدل تعدیل یافته LS دارند، استفاده از مدل تعدیل یافته MB برای برآورد عملکرد نسبی در سطوح نیتروژن خاک توصیه می‌گردد. از این حیث هم نتایج این تحقیق با نتایج شنکر و همکاران (۳۵) و حسینی و همکاران (۷) مطابقت دارد.

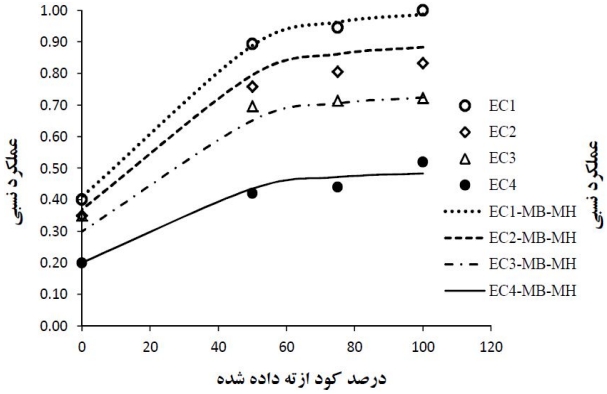
شکل ۵ برازش مدل‌های تعدیل یافته LS و MB بر عملکرد نسبی اندازه‌گیری شده ریحان در سطوح مختلف شوری را نشان می‌دهد. در جدول ۵ نیز مقادیر شاخص‌های آماری مدل‌های مورد ارزیابی در سطوح مختلف شوری ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود و به استناد آماره‌های محاسبه شده، مدل تعدیل یافتهٔ LS در پیش‌بینی عملکرد نسبی ریحان در سطوح مختلف شوری مناسب‌تر از مدل تعدیل یافته MB می‌باشد. کارآیی مدل تعدیل یافته LS بیشتر از مدل تعدیل یافته MB می‌باشد. همچنین، مقایسه ME و nRMSE دو مدل، برتری مدل تعدیل یافته LS را نسبت به مدل تعدیل یافته MB نشان می‌دهد که با نتایج پژوهش شنکر و همکاران (۳۵) همخوانی دارد.در شکل ۶ مقادیر عملکرد نسبی شبیه‌سازی شده ریحان در شرایط تنش همزمان شوری و نیتروژن توسط مدل‌های تعدیل یافته LS و MB و همچنین مدل‌های اشتقاقی MB-MH، MB-D، MB-VG، MB-H، MB-EXP1 و MB-EXP2 ارائه شده است. شکل۶- الف مفهوم مدل LS تعدیل یافته را نشان می‌دهد که در آن اگر گیاه به‌طور همزمان تحت تنش شوری و کمبود نیتروژن قرار گیرد، عملکرد آن تابع محدود کننده‌ترین عامل (شوری و یا نیتروژن) است. بنابراین تنش شدیدتر، عملکرد گیاه را تعیین می‌کند. در شکل ۴، هر کدام از خطوط افقی که به خط شیب‌دار وصل شده، پاسخ عملکرد نسبی ریحان به شوری در سطوح مختلف مصرف نیتروژن را نشان می‌دهد. با کمک این شکل می‌توان عامل غالب و کنترل کننده عملکرد در

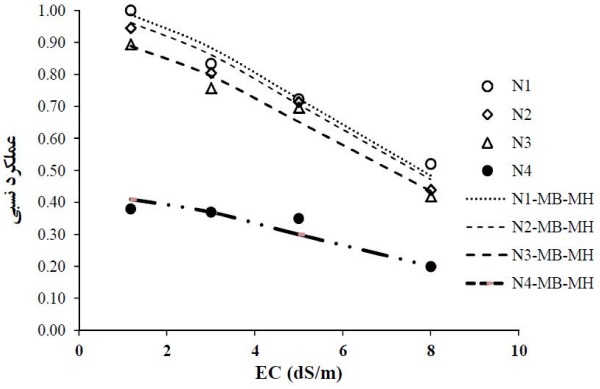

عملکرد نسبی
درصد کود ازته داده شده
EC1
EC2
EC3
EC4
EC1-Modified LS
EC2-Modified LS
EC3-Modified LS
EC4-Modified LS

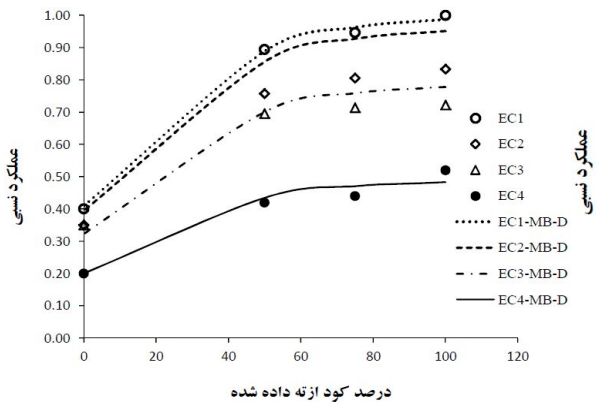

عملکرد نسبی
EC (dS/m)
N1
N2
N3
N4
N1-Modified LS
N2-Modified LS
N3-Modified LS
N4-Modified LS

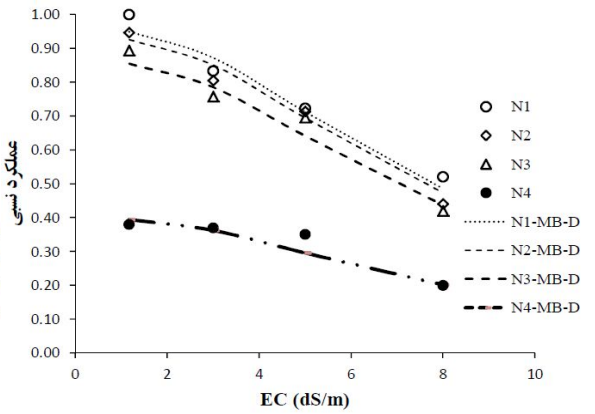

عملکرد نسبی
درصد کود ازته داده شده
EC1
EC2
EC3
EC4
EC1- Modified MB
EC2- Modified MB
EC3- Modified MB
EC4- Modified MB

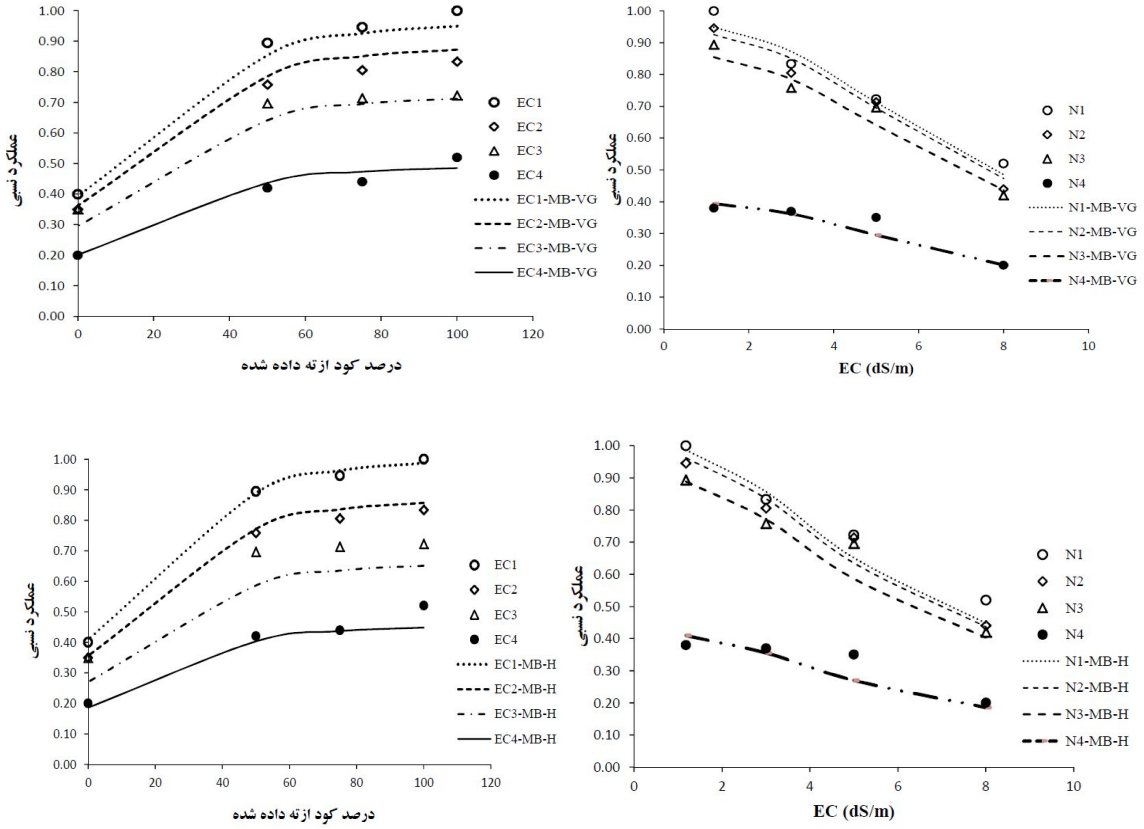

عملکرد نسبی
EC (dS/m)
N1
N2
N3
N4
N1-Modified MB
N2-Modified MB
N3-Modified MB
N4-Modified MB


عملکرد نسبی
درصد کود ازته داده شده
EC1
EC2
EC3
EC4
EC1-MB-MH
EC2-MB-MH
EC3-MB-MH
EC4-MB-MH


عملکرد نسبی
EC (dS/m)
N1
N2
N3
N4
N1-MB-MH
N2-MB-MH
N3-MB-MH
N4-MB-MH


عملکرد نسبی
درصد کود ازته داده شده
EC1
EC2
EC3
EC4
EC1-MB-D
EC2-MB-D
EC3-MB-D
EC4-MB-D


عملکرد نسبی
EC (dS/m)
N1
N2
N3
N4
N1-MB-D
N2-MB-D
N3-MB-D
N4-MB-D



شکل ۶. مقایسه عملکردهای نسبی اندازه‌گیری شده و برآورد شده در سطوح مختلف نیتروژن و شوری آب آبیاری

مقادیر مختلف تنش شوری و نیتروژن برای گیاه ریحان را مشخص کرد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، آستانه کاهش عملکرد در شرایط شور ثابت نبوده و بستگی به‌میزان نیتروژن موجود در خاک دارد. هنگامی که نیتروژن، عملکرد گیاه را محدود نمی‌کند (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز کود نیتروژن)، حد آستانه کاهش عملکرد شوری بیشتر است. می‌توان نتیجه گرفت که حد کفایت نیتروژن برای گیاه نیز در شوری‌های 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 نیتروژنه N_{100}، N_{75}، N_{50} و N_0، متوسط حد آستانه شوری متفاوت و به‌ترتیب برابر ۱/۷، ۳، ۴/۵ و ۶ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد.

همچنین در جدول ۶ آماره‌های محاسبه شده برای شش مدل مورد مطالعه شامل مدل‌های تعدیل یافته LS و MB و مدل‌های اشتقاقی MB-MH، MB-D، MB-VG، MB-H، MB-EXP1 و MB-EXP2 تحت شرایط تنش توأمان شوری و کمبود نیتروژن ارائه شده است. براساس آماره‌های محاسبه شده، بهترین مدل که بیشترین انطباق را با داده‌های اندازه‌گیری شده دارد، به‌ترتیب مدل‌های MB-MH، MB-VG و MB-H می‌باشند. مدل MB اصلاح شده در سطوح شوری S_1، S_2 و S_3 دارای دقت بسیار مناسب می‌باشد لیکن در شوری S_4 دقت مدل پایین می‌باشد. همین مسئله باعث شده است تا برخی از مدل‌های اشتقاقی که ترم شوری را با دقت بیشتری شبیه‌سازی می‌نمایند، دارای دقت قابل قبول‌تری باشند. همان‌طور که پیشتر ذکر شد یکی از مهم‌ترین سئوالاتی که در سال‌های اخیر توجه دانشمندان کشاورزی را جلب کرده است، بررسی چگونگی اثرات مصرف کود (به‌عنوان یک عامل افزایش دهنده پتانسیل

جدول ۶. آماره‌های محاسبه شده برای مقایسه مدل‌ها براساس سطوح مختلف نیتروژن و شوری آب آبیاری

مدل‌ها	nRMSE (٪)	ME (٪)	EF (٪)	CRM (٪)	R^2
LS	۱۴/۴	۴۰/۹	۰/۸۵	۰/۰۴	۰/۷۹
MB	۱۰/۳	۱۷/۸	۰/۹۳	۰/۰۲	۰/۸۲
MB-MH	۴/۹	۸/۹	۰/۹۹	-۰/۰۱	۰/۹۸
MB-D	۸/۸	۱۹/۵	۰/۹۵	-۰/۰۵	۰/۸۵
MB-VG	۵/۴	۸/۷	۰/۹۸	۰/۰۱	۰/۹۴
MB-H	۷/۰	۱۵/۶	۰/۹۶	۰/۰۴	۰/۹۱
MB-EXP۱	۷/۸	۱۷/۵	۰/۹۷	۰/۰۳	۰/۹۶
MB-EXP۲	۹/۵	۲۳/۵	۰/۹۸	-۰/۰۳	۰/۹۵

اسمزی) بر پاسخ گیاه به تنش شوری می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که گیاه در حالت فقر مواد غذایی مقاومت کمتری به شوری نشان می‌دهد، گیاه پس از مصرف کود کافی مقاومت بیشتری از آنچه که باید، از خود نشان می‌دهد، زیرا اثر منفی شوری بر عملکرد نمی‌تواند به اندازهٔ اثرات مثبت تغذیه کافی باشد. به‌طور کلی مصرف بهینه کود موجب افزایش عملکرد می‌گردد، قطع نظر از این‌که خاک شور بوده یا نه ولی مسلماً هنگامی که خاک شور نباشد این افزایش بیشتر می‌باشد. هنگامی که عملکرد بر اثر کمبود نیتروژن و یا شوری به‌طور مشابهی کاهش یافته باشد، کاهش شوری 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 تنشی که شدیدتر است عملکرد را بیشتر افزایش می‌دهد تا تنشی که سهم کمتری در کاهش عملکرد دارد. بنابراین، به‌هنگام وجود هر دو تنش شوری و کمبود نیتروژن باید دقت نمود که آیا مصرف کود تحمل گیاه به شوری را کاهش و یا افزایش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

سیستم پویای آب- خاک- گیاه بسیار پیچیده است و برهمکنش‌های زیادی بین اجزای مختلف آن وجود دارد. در این پژوهش پاسخ گیاه ریحان به دو عامل تنش‌زای شوری و کمبود نیتروژن بررسی گردید. به استناد آماره‌های مختلف بهترین مدل که بیشترین انطباق را با داده‌های اندازه‌گیری شده دارد، به‌ترتیب مدل‌های MB-MH، MB-VG و MB-H می‌باشند. نتایج نشان داد که آستانه کاهش عملکرد در شرایط شور ثابت نبوده و بستگی به‌مقدار نیتروژن موجود در خاک دارد. مقایسه آماره‌های دو مدل نشان داد که عملکرد نسبی برآورد شده برای سطوح شوری آب آبیاری، به‌وسیله مدل تعدیل یافته LS در مقایسه با مدل MB نتایج رضایت‌بخش‌تری داشت ولی در سطوح نیتروژن خاک و اثرات متقابل شوری و نیتروژن ، مدل تعدیل یافته MB نتایج رضایت‌بخش‌تری نسبت به مدل LS داشت. توصیه می‌شود جهت مدل‌سازی گیاه ریحان در شرایط تنش توأمان شوری و کمبود نیتروژن از مدل‌های اشتقاقی MB-MH، MB-VG و MB-H به‌جای مدل‌های تعدیل یافته LS و MB استفاده شود زیرا این مدل‌ها به‌واسط شبیه‌سازی مناسب‌تر ترم شوری، برازش بهتری با داده‌های اندازه‌گیری شده دارند. با توجه به‌نتایج به‌دست آمده توصیه می‌شود در شرایط خاک‌های شور ۱۰۰ درصد نیاز کودی گیاه تأمین شود. چرا که تأمین نیاز کودی گیاه باعث افزایش مقاومت آن در مقابل تنش شوری می‌گردد.

منابع مورد استفاده

۱. اختری، ا.، م. همایی و ی. حسینی. ۱۳۹۳. مدل‌سازی پاسخ گیاه به تنش‌های شوری و کمبود ازت خاک. حفاظت منابع آب و خاک (۳) ۴: ۵۰-۳۳.

۲. اسماعیلی، ا.، م. همایی، و م. ج. ملکوتی. ۱۳۸۴. اثرات متقابل شوری محلول و کود ازتی بر رشد و ترکیبات سورگوم. علوم خاک و آب ۱۹ (۱): ۱۴۳-۱۲۶.

۳. جلالی، و. ر.، م. همایی و س.خ. میرنیا. ۱۳۸۷. مدل‌سازی واکنش کلزا به شوری طی مراحل مختلف رشد زایشی. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی (علوم آب و خاک) ۱۲ (۴۴): ۱۲۱-۱۱۱.

۴. جلالی، و.ر. و م. همایی. ۱۳۸۹. مدل‌سازی اثر زمان اعمال تنش شوری محیط ریشه بر عملکرد گیاه کلزا. مجلهٔ به زراعی کشاورزی ۱۲(۱): ۴۰-۲۹.

۵. جلالی، و. ر.، م. همایی و س. خ. میرنیا، ۱۳۸٦. مدلسازی واکنش کلزا به شوری طی دوره رشد رویشی. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی ۸(۴): ۱۱۲-۹۵.

٦. جلالی، و. ر.، م. همایی و س. خ. میرنیا. ۱۳۸٦. تأثیر سطوح مختلف شوری محیط رشد بر جوانه زنی و رشد گیاهچه کلزا. مجله علوم خاک و آب ۲۱ (۲): ۲۱۷-۲۰۹.

۷. حسینی، ی.، م. همایی، ن. ع. کریمیان و س. سعادت. ۱۳۸۷. مدل‌سازی واکنش کلزا به تنش‌های توأمان شوری و کمبود نیتروژن. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی (علوم آب و خاک) ۱۲ (٤٦): ۷۳۵-۷۲۱.

۸. حسینی، ی.، م. همایی، ن. ع. کریمیان و س. سعادت. ۱۳۸۷. اثرات فسفر و شوری بر رشد، غلظت عناصر غذایی و کارایی مصرف آب در کلزا (*Brassica napus* L.). پژوهش کشاورزی، آب، خاک و گیاه در کشاورزی ۸ (۴)، ۱۸-۱.

۹. سعادت، س. و م. همایی. ۱۳۹۳. نمون سازی واکنش سورگوم به شوری در مرحله جوانه زنی. مجله پژوهش آب در کشاورزی (۳) ۲۸: ٥١٦-٥٠٣.

۱۰. سعادت، س.، م. همایی و ع. م. لیاقت. ۱۳۸۴. اثر شوری محلول خاک بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه سورگوم علوفه‌ای. مجله علوم خاک و آب (۲)۱۹: ۲۵۴-۲۴۳.

۱۱. کریمی، ا.، م، همایی، ع. م. لیاقت و م. معز اردلان. ۱۳۸۴. یکنواختی توزیع آب و کود در سیستم آبیاری قطره‌ای- نواری. مجله پژوهش کشاورزی ۵(۲): ٦٧-۵۳.

۱۲. کریمی، ا.، م. معز اردلان، ع. م. لیاقت و م. همایی. ۱۳۸٦. اثر کود-آبیاری بر اجزای عملکرد کارآیی مصرف آب. مجله علوم و صنایع کشاورزی ۱۱(۲۱): ۲۲-۱۱.

۱۳. کریمی، ا.، م. معز اردلان، م. همایی و ع. م. لیاقت. ۱۳۸٦. کارآیی مصرف کود در آفتابگردان با سیستم کود آبیاری. مجله علوم و فنون کشاورزی ۱۱(۴۰): ۷۷-٦۵.

۱۴. کیانی، ع. ر.، م. همایی و م. میرلطیفی. ۱۳۸۵. ارزیابی توابع کاهش عملکرد گندم در شرایط توأم شوری و کم آبی. مجله علوم خاک و آب ۲۰(۱): ۸۳-۷۳.

۱۵. همایی، م. ۱۳۸۱. واکنش گیاهان به شوری. انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، شماره نشر ۵۸، ۹۷ صفحه.

16. Black, C. A. 1993. Soil fertility evaluation and control. Lewis Publisher, Boca Raton, FL.

17. Dirksen, C. and D. C. Augustijn. 1988. Root water uptake function for nonuniform pressure and osmotic potentials. Agric. Abstracts, pp. 188.

18. Esmaili, E., Asadi Kapourchal S., M. J. Malakouti and M. Homaee. 2008. Interactive effect of salinity and two

nitrogen fertilizers on growth and composition of sorghum. Plant Soil and Environment 56(12): 537-546.
19. Homaee, M. 1999. Root water uptake under non-uniform transient salinity and water stress. PhD dissertation, Wageningen Agricultural University, The Netherlands, p. 173.
20. Homaee, M. and R. A. Feddes. 2002. Modeling the sink term under variable soil water osmotic heads. PP: 17-24. *In*: Hassanizadeh et al. (Ed.), developments in water resources 47 (1); Computational methods in water resources. Elsevier Science B. V., The Netherlands.
21. Homaee, M. and R. A. Feddes. 2001. Quantification of water extraction under salinity and drought. PP: 376-377. *In*: W.J. Horst *et al*. (Ed.), Plant nutrition-Food security sustainability of agro-ecosystems. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
22. Homaee, M. and R. A. Feddes. 1999. Water uptake under non-uniform transient salinity and water stress. PP. 416-427. *In*: J. Feyen and K. Wiyo (Ed.), Modeling of transport processes in soils at various scales in time and space.
23. Homaee, M., C. Dirksen and R. A. Feddes. 2002a. Simulation of root water uptake. I. Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. Agric. Water Manage. 57: 89-109.
24. Homaee, M., R. A. Feddes and C. Dirksen. 2002b. Simulation of root water uptake. II. Nonuniform transient water stress using different reduction functions. Agric. Water Manage. 57(2): 111-126.
25. Homaee, M., R. A. Feddes and C. Dirksen. 2002c. Simulation of root water uptake. III. Nonuniform transient combined salinity and water stress. Agric. Water Manage. 57(2): 127-144.
26. Homaee, M., R. A. Feddes and C. Dirksen. 2002. A macroscopic water extraction mode for nonuniform transient salinity and water stress. Soil Sci. Soc. Am. J. 66(6): 1764-1772.
27. Homaee, M. and U. Schmidhalter. 2008. Water integration by Plants root under non-uniorm soil salinity. Irrig. Sci. 27: 83-95.
28. Hosaini, Y., Homaee, M., Karimian, N. A. and S. Saadat. 2009. Modeling Vegetative Stage Response of Canola (Brassica napus L.) to Combined Salinity and Boron tresses. Int. J. of Plant Prod. 3(1): 91-104.
29. Jacobsen, O. J. and P. Schjonning. 1993. A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture. J. of Hydrol. 5: 147-157.
30. Loague, K. and R.E. Green. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. J. of Contaminant Hydrology 7: 51-73.
31. Maas, E. V. and G. J. Hoffman. 1977. Crop salt tolerance-current assessment. J. Irrig. and Drainage Div., ASCE, 103 (IR2): 115-134.
32. Miller, J. D. and G. Gaskin. 1997. The development and application of the theta probes soil water sensor. MLURI. Technical note, 312 p.
33. Robinson, D. A., Gardner, C. M. K. and J. D. Cooper. 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 Hydrol. 223: 198-211.
34. Saadat, S. and M. Homaee. 2015. Modeling sorghum response to irrigation water salinity at early growth stage. Agric. Water Manage. 152:119-124.
35. Shenker, M., Ben-Gal, A. and U. Shani. 2003. Sweet corn response to combined nitrogen and salinity environmental stresses. Plant Soil 256: 139-147.
36. Van Genuchten, M. Th. and G. J. Hoffman. 1984.Analysis of crop production. PP. 258-271. *In*: I. Shainberg and J. Shalhevet (Eds.), Soil salinity under irrigation. Springer-Verlag.