



Evaluation of Several Empirical Salinity-Yield Models for Sorghum Plant Response to Irrigation Water and Soil Salinity

M. Noroozi¹, E. Chavoshi^{1*}  and M. Ghajar Sepanlou² 

(Received: 23 November 2022; Accepted: 23 May 2023)

Abstract

Sorghum is considered as a cereal in the world but in Iran forage sorghum is preferred due to lack of forage. This research was conducted considering the importance of forage sorghum and the conditions of sorghum cultivation under salinity stress in Mazandaran province. The aims of this research were: 1) to investigate the functional response of forage sorghum (variety Speedfeed) to irrigation water salinity and soil salinity, and 2) to quantify the sorghum functional response to salinity during maturation, using several empirical models. Water salinity treatments included well water (control), ratios of 1:4, 2:4, and 3:4 sea water to well water, and pure sea water which were applied in a column study. Salinity-Yield threshold models (Mass and Hoffman, van Genuchten and Hoffman, Dirksen et al., Homaei et al., modified Weibull, bi-exponential and Gompertz) were fitted to the data obtained (relative yield of sorghum at maturation stage vs. electrical conductivity, EC) and the parameters of models were estimated. The van Genuchten model and the Hoffman and Gompertz model were better than other models in fitting the relative yield data as a function of the EC of the saturated soil extract, due to the lower root mean square errors (RMSE) and Akaike's information criterion (AIC) in these models (2.84 and -157.34 for the van Genuchten model and 3.11 and -152.53 for the Hoffmann and Gompertz model, respectively). The van Genuchten and Hoffmann model (-205.77, -1.09) and the corrected Weibull model (-213.21 and 0.95) were superior in fitting relative yield data as a function of EC of irrigation water. The salinity tolerance thresholds of sorghum based on fitting relative yield data as a function of EC of saturated soil extract and irrigation water were also estimated to be 3.65 and 2.33 dS m⁻¹, respectively. Also, no significant difference was observed between the relative yield obtained from the models as a function of the EC of saturated soil extract or irrigation water. In other words, the mentioned models are capable to estimate the yield based on the salinity of the irrigation water.

Keywords: Mathematical model, Statistical model, Threshold, Yield.

Background and Objective: Currently, the increasing growth of the world's population and the need for more agricultural products are important issues that human being is facing today. Limitation in water and soil resources is mentioned as the main restriction for agricultural production. Therefore, the proper use of

1- Department of Soil Science, College of Agriculture, Islamic Azad University, Isfahan (Khorasgan) Branch, Isfahan, Iran.

2- Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Mazandaran, Iran.

* Corresponding author, Email: chavoshie@yahoo.com

available water resources and poor-quality saline waters, is at the forefront of the activities of different countries (2). The detrimental effect of salinity on plant growth is due to low osmotic potential in the soil, unbalanced nutrition, specific ionic effects or a combination of these factors (1). Usually, the sensitivity of plants to salinity varies during the growing season (3). Therefore, proper water management requires analysis of plant sensitivity to salinity at each growth stage, in areas with unfavorable water and soil quality.

Methods: Five sorghum seeds were planted in 15 polyethylene columns filled with a clay loam soil, and after germination, they were reduced to three seedlings. The treatments included well water as control, 1:4, 2:4 and 3:4 ratios of sea water to well water, and pure sea water with the EC values of 0.99, 4.7, 8.1, 13.7 and 15.9 dS m⁻¹, respectively. After 56 days of plant growth, the effect of salinity on the growth and yield of sorghum was assessed and the salinity threshold for this plant was determined. The relative yield as a function of salinity was also calculated using the models of Mass and Hoffman, van Genuchten and Hoffman, Dirksen et al., Homaei et al., modified Weibull, bi-exponential and Gompertz. Quantitative comparison of the models was also conducted using some statistical indices. In order to fit and determine the optimized parameters of the root water uptake models, the Solver tool in Excel was used. Also, the mean comparison was statistically analyzed using *t*-test by MSTATC software.

Results: The salinity thresholds of sorghum based on the EC values of saturated soil extract and irrigation water were 3.5 and 1.4 dS m⁻¹, respectively. The slope of the linear relation between relative yield and soil EC was calculated to be about 3% per dS m⁻¹, indicating that sorghum is sensitive to salinity stress. Based on the EC of saturated soil extract, the RMSE and AIC were lower for van Genuchten and Hoffman, and Gompertz models. However, efficiencies of Dirksen et al.'s and bi-exponential models were slightly different and can be suggested. Also Mass and Hoffman's model can also be used due to the simplicity of its equation. The analysis based on the EC of irrigation water also showed that the van Genuchten and Hoffman's model and the modified Weibull model were the best ones according to the lower values of RMSE and AIC. Also, the results of the *t* test showed that there was no significant difference between the fitting of mathematical and statistical models to observational data and between the two groups of models as a function of EC values of saturated soil extract and irrigation water at *p*<0.01. Therefore, at this stage of plant growth, instead of using EC of saturated soil extract, EC of irrigation water can be used directly in the root water uptake models.

Conclusions: The results of this research showed that the salinity thresholds of sorghum based on the EC values of saturated soil extract and irrigation water were 3.5 and 1.4 dS m⁻¹, respectively. The non-linear models have better ability in modeling the water uptake by roots. Also, there was not significant difference between the fitting results of mathematical and statistical models with the measured data and the results of the two groups of models as a function of EC values of saturated soil extract and irrigation water. Therefore, by using these models, it is possible to determine the irrigation time for maximum plant growth without the need for field measurements.

References:

1. Munns, R., Gilliam, M., 2015. Salinity tolerance of crops—what is the cost? *New Phytologist* 208(3): 668–673.
2. Rhoades, J.D., Kandiah, A., Mashali, A.M., 1992. The Use of Saline Waters for Crop Production. FAO Irrigation and Drainage Paper, FAO, United Nations, Rome.
3. Saadat, S., Homaei, M., 2015. Modeling sorghum response to irrigation water salinity at early growth stage. *Agricultural Water Management* 152: 119–124.



ارزیابی چندین مدل تجربی عملکرد-شوری برای پاسخ گیاه سورگوم به شوری آب آبیاری و خاک

مرجان نوروزی^۱، الهام چاوشی^{۱*} و مهدی قاجار سپانلو^۲

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۳/۲)

چکیده

سورگوم در دنیا به عنوان یک غله مطرح است، ولی در ایران با توجه به کمبود علوفه، نوع علوفه‌ای آن اولویت دارد. با توجه به اهمیت کشت این گیاه و شرایط موجود کشت در استان مازندران مبنی بر وجود تنش شوری، این پژوهش با هدف بررسی واکنش عملکردی گیاه سورگوم به شوری آب آبیاری و شوری خاک و کمی کردن آن به شوری طی دوره بلوغ، با به کارگیری چند مدل تجربی انجام شد. در این پژوهش از سورگوم علوفه‌ای رقم اسپیدفید و تیمارهای شوری آب شامل آب چاه (شاهد)، نسبت‌های ۱:۴، ۲:۴ و ۳:۴ آب چاه : آب دریا، آب دریا (به صورت خالص) در ستون‌های خاک استفاده شد. مدل‌های حد آستانه‌ای عملکرد-شوری (ماس و هافمن، ون‌گنوختن و هافمن، دیرکسن و همکاران، همایی و همکاران، نمایی دوگانه، ویبول تصحیح شده و گومپرتز) بر داده‌های اندازه‌گیری شده (عملکرد نسبی در برابر رسانایی الکتریکی) در مرحله بلوغ گیاه سورگوم برازش داده شده و پارامترهای آن‌ها برآورد شدند. نتایج نشان داد که در بین مدل‌های مذکور، با توجه به مقادیر کمتر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و معیار آکائیکه (AIC) (به ترتیب ۲/۸۴، ۱۵۷/۳۴-) و (به ترتیب ۳/۱۱ و ۱۵۲/۵۳-) برای مدل‌های ون‌گنوختن، و هافمن و گومپرتز در برازش داده‌های عملکرد نسبی به عنوان تابعی از رسانایی الکتریکی عصاره اشباع خاک و مدل‌های ون‌گنوختن و هافمن (۱/۰۹، ۲۰۵/۷۷-) و ویبول تصحیح شده (۰/۹۵ و ۲۱۳/۲۱-) در برازش داده‌های عملکرد نسبی به عنوان تابعی از رسانایی الکتریکی آب آبیاری، برتری داشتند. حد آستانه تحمل سورگوم به شوری در برازش داده‌های عملکرد نسبی در برابر رسانایی الکتریکی عصاره اشباع خاک و آب آبیاری نیز به ترتیب ۳/۶۵ و ۲/۳۳ دسی‌زیمنس بر متر برآورد شد. همچنین بین عملکرد نسبی به دست آمده از مدل‌ها به عنوان تابعی از رسانایی الکتریکی عصاره اشباع خاک و آب آبیاری اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد، به عبارت دیگر مدل‌های مذکور توانایی تخمین عملکرد گیاه بر مبنای شوری آب آبیاری را نیز نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: حد آستانه، عملکرد، مدل آماری، مدل ریاضی.

مقدمه

از مسائل مهمی است که امروزه بشر با آن روبرو است. در این

رشد افزاینده جمعیت جهان و نیاز بیش‌تر به تولیدات کشاورزی ارتباط، محدودیت منابع آب و خاک به عنوان بستر اصلی

۱- گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران

۲- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: chavoshie@yahoo.com

زیمنس بر متر را به پتانسیل اسمزی برحسب سانتی متر آب تبدیل می کند ($h_0 = -360 \text{ EC}_e$).

از آنجا که منحنی عملکرد نسبی در برابر شوری، شکلی سیگموییدی (غیرخطی) دارد، ون گنوختن و هافمن (۳۶) معادله ای غیرخطی به صورت زیر پیشنهاد کردند:

$$\alpha(h_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h_0}{h_{050}}\right)^p} \quad (۳)$$

که در آن h_{050} مقدار فشار اسمزی (cm) که در آن جذب آب توسط گیاه ۵۰ درصد کاهش می یابد و p نیز ضریبی تجربی است که وابسته به گیاه، خاک و اقلیم است (۱۹).

برخی پژوهش های دیرکسن و آگوستین (۷) و دیرکسن و همکاران (۸)، نشان داده که جذب آب توسط گیاه تا رسیدن به شوری معین (h_0^*) کاهش نمی یابد (۷ و ۸). به همین دلیل دیرکسن و همکاران (۸) معادله ۳ را نسبت به شوری حد آستانه (h_0^*) تعدیل نموده و رابطه زیر را پیشنهاد کردند:

$$\alpha(h_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h_0^* - h_0}{h_0^* - h_{050}}\right)^p} \quad (۴)$$

$$p = \frac{h_{050}}{h_{050} - h_0^*} \quad (۵)$$

این رابطه نسبت به روابط پیشین با دقت بیش تری واکنش گیاه به شوری را شبیه سازی می کند اما مهم ترین محدودیت آن به دست آوردن h_{050} است. همچنین، پارامتر p چه به صورت فیزیکی و چه به صورت تجربی در آن تعریف نشده است. در واقع p همانند h_0^* و h_{050} فاکتوری وابسته به شکل تابع است. همایی و همکاران (۱۴) با فرض اینکه p پارامتری وابسته به محصول، خاک و اقلیم است، معادله (۵) را برای به دست آوردن آن پیشنهاد کردند.

به دلیل اینکه مشکل به دست آوردن h_{050} تا به اینجا حل نشده باقی مانده بود، همایی و همکاران (۱۴) مقدار h_{050} را با h_{0max} جایگزین نموده و تابع خطی زیر را پیشنهاد کردند که دارای دو آستانه کاهش است (۱۷ و ۱۸):

تولیدات کشاورزی مطرح بوده و استفاده بهینه از منابع آب موجود و آب های شور و با کیفیت نامناسب در سرلوحه فعالیت های کشورهای مختلف قرار دارد (۲۹). اثر زیان بار شوری بر رشد گیاه به پتانسیل اسمزی کم در خاک، تغذیه غیرمتعادل، سمیت یون های ویژه و یا ترکیبی از این عوامل بستگی دارد (۲۷). معمولاً آبیاری با آب شور، جذب آب توسط گیاه را کاهش داده و در نهایت سبب کاهش عملکرد می شود (۳۳).

مدل های کلان پاسخ عملکرد محصولات مختلف به شوری به صورت زیر بیان شده است:

$$Y = \alpha(h_0) Y_{max} \quad (۱)$$

که در آن h_0 شوری خاک (برحسب رسانایی الکتریکی خاک یا برحسب فشار اسمزی معادل)، Y عملکرد (به عنوان پاسخ قابل اندازه گیری گیاه به شوری) تحت تأثیر شوری و Y_{max} عملکرد گیاه در شرایط مشابه اما بدون اثر شوری است. α ضریبی در مقیاس ۰-۱ است که مقدارش علاوه بر شوری خاک (h_0) می تواند به عوامل مختلف از جمله نوع گیاه، خاک و اقلیم بستگی داشته باشد. پژوهش های متعددی در مورد ماهیت تابع $\alpha(h_0)$ انجام شده است.

توابع پیشنهاد شده برای $\alpha(h_0)$ ، توسط دانشمندانی مانند ماس و هافمن (۲۵)، ون گنوختن و هافمن (۳۶)، دیرکسن و همکاران (۸) و همایی و همکاران (۱۳) ارائه شده اند که به شرح زیر هستند:

ماس و هافمن (۲۵) تابعی خطی و دو-تکه ارائه کردند که بر مبنای آن با کاهش پتانسیل اسمزی عصاره اشباع خاک (h_0) تا حد آستانه ای (h_0^*) هیچ گونه کاهشی در جذب آب توسط گیاه پدید نمی آید اما از آن به بعد ($h_0 < h_0^*$) مقدار جذب به طور خطی کاهش می یابد (معادله ۲):

$$\alpha(h_0) = 1 - \frac{b}{360} (h_0^* - h_0) \quad (۲)$$

که در آن b شیب خط یا مقدار کاهش عملکرد به ازای یک واحد افزایش شوری پس از آستانه شوری (کاهش) بوده و ۳۶۰ ضریبی است که شوری عصاره اشباع خاک بر حسب دسی -

نیازمند کمی نمودن اثر شوری بر عملکرد در هر مرحله از رشد است. در اغلب پژوهش‌های انجام‌شده در این مورد، شوری عصاره اشباع خاک مبنای پاسخ عملکرد نسبی به شوری در نظر گرفته شده است (۱، ۱۰ و ۲۶). با توجه به عمق زیاد ریشه سورگوم، با لحاظ نمودن نیاز آبشویی مناسب می‌توان به‌جای استفاده از شوری عصاره اشباع به‌طور مستقیم در مدل‌های جذب، از شوری آب آبیاری استفاده کرد. زیرا اندازه‌گیری شوری آب آبیاری ساده‌تر بوده و به زمان کمتری در مقایسه با شوری عصاره اشباع خاک نیاز دارد. همچنین شوری آب آبیاری ویژگی تقریباً ثابتی است.

استفاده از شوری آب آبیاری نقش مؤثری در کاربرد آسان‌تر مدل‌های جذب آب در مدیریت کیفی آب در مزرعه ایفا خواهد کرد. چرا که محاسبه واکنش گیاه براساس یک ویژگی ثابت، مدیریت آب در مزرعه را از سطح پژوهشی به سطح کاربردی تغییر خواهد داد. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کمی پاسخ عملکرد نسبی سورگوم به شوری عصاره اشباع خاک و شوری آب آبیاری، برآورد آستانه کاهش عملکرد آن و نیز ارزیابی مقایسه‌ای کارایی مدل‌های ریاضی و آماری موجود برای برآورد عملکرد این گیاه نسبت به شوری آب آبیاری و شوری عصاره اشباع خاک در مرحله بلوغ انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان مازندران انجام شد. برای اجرای این پژوهش ۱۵ ستون پلی‌اتیلنی (قطر ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر) که در کف آن دارای زهکش بود، استفاده شد. به‌منظور آماده‌سازی ستون‌ها، ابتدا با توجه به حجم ستون‌ها و چگالی ظاهری خاک مزرعه (۱/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، مقدار خاک مورد نیاز برای هر ستون محاسبه شد. برای پرکردن ستون‌ها از خاک مزرعه‌ای در شهرستان ساری واقع در استان مازندران (بین ۳۶ درجه و ۲۱ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۸ دقیقه عرض شمالی و ۵۲ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۳ دقیقه طول شرقی-دارای

$$\alpha(h_0) = \frac{1}{1 + (1 - \alpha_0) / \alpha_0 \left(\frac{h_0^* - h_0}{h_0^* - h_{0\max}} \right)^p} \quad (6)$$

$$p = \frac{h_{0\max}}{h_{0\max} - h_0^*} \quad (7)$$

کاهش در مقدار α در مقادیر شوری بیش‌تر از h_0^* ادامه می‌یابد تا به یک شوری معین ($h_{0\max}$) برسد. در مقادیر شوری بیش‌تر از $h_{0\max}$ افزایش شوری نمی‌تواند با همان روند پیشین در مقدار α کاهش ایجاد کند. این واقعیت نشان می‌دهد که در دامنه $h_0 \leq h_{0\max}$ گیاه هنوز زنده بوده و در سطحی بسیار اندک به فعالیت‌های حیاتی خود ادامه می‌دهد. همایی و همکاران (۱۳) سپس مقدار p را با توجه به $h_{0\max}$ به‌صورت معادله (۷) تعریف کردند.

در رابطه با تغییر پارامترهای عملکرد نسبی گیاهان در برابر تنش شوری، ماس و هافمن (۲۵) مشاهده کردند که داده‌های آن‌ها تنها به‌عنوان مبنا استفاده می‌شوند و تحمل واقعی گیاهان به شوری ممکن است با اقلیم، عملیات کشاورزی و شرایط خاک تغییر کند. ماس (۲۴) بیان کرد که روابط ارائه‌شده بین عملکرد نسبی و رسانایی الکتریکی عصاره اشباع منطقه توسعه ریشه گیاه در کل فصل رشد، کاملاً تقریبی بوده و عدم قطعیت معنی‌داری دارند (۱ و ۱۰)؛ زیرا معمولاً حساسیت گیاهان به شوری در طول فصل رشد متغیر است (۳۱). ماس و گراتن (۲۶) با بررسی اثر شوری عصاره اشباع خاک بر گیاه ذرت نشان دادند که حد آستانه ۱/۷ دسی‌زیمنس بر متر و شیب خط کاهش عملکرد ۱۲ درصد بر دسی‌زیمنس بر متر است. اما این نتایج برای همه شرایط صادق نیست زیرا ویژگی‌های خاک و دیگر فاکتورهای محیطی و تغییر غلظت املاح را در نظر نگرفته است (۵). همچنین گیاهان در شرایط تنش شوری به‌طور واقعی در معرض رسانایی الکتریکی محلول خاک هستند و به آن پاسخ می‌دهند (۶). لذا اعمال مدیریت بهینه آبیاری در مناطقی که کیفیت آب و خاک آن‌ها چندان مطلوب نیست، نیازمند تجزیه و تحلیل حساسیت گیاه به شوری در هریک از مراحل رشد است. بنابراین، تعیین دقیق کاهش عملکرد و اعمال مدیریت مناسب

برای کاهش عملکرد سورگوم، ۴ دسی‌زیمنس بر متر است، درحالی‌که آستانه شوری در بررسی فرانکویز و همکاران (۱۰) ۶/۸ دسی‌زیمنس بر متر ذکر شده است. بنابراین در این بررسی سطوح شوری انتخاب‌شده برای آب آبیاری، بر این مبنا بود که حد آستانه گزارش‌شده در منابع به‌عنوان مرجع در نظر گرفته شد و شوری‌های بیش‌تر و کم‌تر از این مقدار به‌منظور تعیین دقیق حد آستانه شوری برای کاهش عملکرد در مرحله بلوغ رشد گیاه سورگوم انتخاب شد (۲۰).

به‌منظور تامین یکنواختی در اعمال شوری، از روش آبیاری قطره‌ای استفاده شد. همچنین به‌منظور کنترل آب مصرفی در مراحل مختلف رشد سورگوم، حجم آب مورد نیاز در هر دور آبیاری از طریق منحنی مشخصه رطوبتی خاک (۱۱) محاسبه شد. این میزان آب، ۵ تا ۱۰ درصد بیش‌تر از رطوبت گنجایش مزرعه‌ای (FC) خاک در نظر گرفته شد تا ستون‌های خاک زه‌آب داشته باشند.

با توجه به حساسیت گیاه سورگوم در مرحله جوانه‌زنی و استقرار (۲۲) به شوری، پس از کشت، آبیاری با آب چاه انجام شد تا گیاه بدون تنش شوری مرحله استقرار اولیه (رشد ابتدایی تا مرحله سه‌برگی) را طی نماید. سپس از این مرحله به بعد، آبیاری گیاه سورگوم در ستون‌ها با نسبت‌های مختلف ذکرشده آب دریا و آب چاه تا زمان برداشت ادامه یافت.

در مرحله بلوغ رشد گیاه سورگوم، عملکرد ماده خشک در تیمارهای مختلف اندازه‌گیری شده و عملکرد نسبی (Y_r) از تقسیم عملکرد ماده خشک تیمارهای تحت تنش بر عملکرد ماده خشک تیمار بدون تنش (تیمار شاهد، آب چاه) محاسبه شد. همچنین در پایان دوره رشد گیاه، از کل خاک ستون در تیمارهای مختلف نمونه‌برداری انجام شد. با تهیه گل اشباع، رسانایی الکتریکی عصاره اشباع خاک تیمارها اندازه‌گیری شد. در نهایت به‌منظور کمی‌نمودن رابطه عملکرد نسبی سورگوم در برابر شوری و تعیین حد آستانه شوری برای کاهش عملکرد گیاه در مرحله بلوغ، از مدل‌های ریاضی ماس و هافمن (۲۵)، ون‌گونختن و هافمن (۳۶)، دیرکسن و همکاران (۸)، همایی و

رژیم حرارتی ترمیک) به‌صورت لایه لایه نمونه‌برداری شده و به ستون‌های آزمایشی منتقل شدند. سپس به مدت سه ماه ۱۶ بار چرخه‌های تر و خشک‌شدن روی خاک اعمال شد تا شرایط خاک ستون‌ها تقریباً مشابه شرایط خاک در مزرعه شود. در مرحله بعد با توجه به میزان کود مصرفی در مزرعه و با استفاده از آزمون خاک برای گیاه سورگوم، مقادیر کود اوره، سوپرفسفات تریپل و سولفات پتاسیم (۱۰۰، ۵۰، ۱۰۰) به‌عنوان کود پایه با واحد میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، محاسبه شد و یک روز پیش از کاشت گیاه به هر ستون افزوده شد. در نهایت در هر ستون ۵ بذر سالم سورگوم کاشته شد و پس از سبز شدن به ۳ بوته سالم کاهش داده شد. طول دوره آزمایش ۵۶ روز بود که برابر طول دوره رشد گیاه سورگوم در نظر گرفته شد.

برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش در جدول (۱) ارائه شده است. بافت خاک به روش هیدرومتر (۳)، مقدار ماده آلی به روش والکی و بلک (۳۷)، میزان فسفر قابل جذب به روش اولسن و همکاران (۲۸)، میزان پتاسیم قابل جذب به روش فلیم‌فتمتری و رسانایی الکتریکی عصاره اشباع با دستگاه EC متر اندازه‌گیری شدند.

برای آبیاری از پنج تیمار آب چاه (شاهد)، نسبت‌های ۱:۴، ۲:۴ و ۳:۴ آب چاه (مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان مازندران): آب دریای خزر، و آب دریای خزر (به‌صورت خالص) استفاده شد. در اکثر پژوهش‌ها درباره اثر شوری بر رشد و عملکرد گیاه، از آب شور مصنوعی استفاده شده که عموماً NaCl یا ترکیبی از $CaCl_2 + NaCl$ است. با این روش، از احتمال اثر منفی سمیت برخی از عناصر و اثر آن‌ها بر فراهمی سایر عناصر غذایی از لحاظ جذب توسط ریشه‌ها و انتقال در درون گیاه، غفلت می‌شود که با شرایط واقعی هم‌خوانی ندارد (۱۹). به همین دلیل، در این پژوهش از آب شور طبیعی به‌جای آب شور مصنوعی استفاده شد. در جدول (۲) برخی ویژگی‌های شیمیایی آب چاه و آب دریای خزر ارائه شده است.

براساس یافته‌های اماچر و همکاران (۱)، حد آستانه شوری

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

Table 1. Some physical and chemical properties of the tested soil

ویژگی‌ها Properties	Sand	Clay	Silt	PWP (1.5 MPa)	FC (0.03 MPa)	pH _e	EC _e (dS m ⁻¹)	SAR	OM (%)	Available K ⁺ (mg kg ⁻¹)	P
مقدار Value	24.6	30.0	45.4	13	29	6.9	0.92	2.16	2.05	102.7	8.9

نقطه پژمردگی دائم؛ (PWP (permanent wilting point) گنجایش مزرعای؛ FC (Field capacity) واکنش عصاره اشباع خاک؛ pH_e (pH of saturated soil extract) رسانایی الکتریکی عصاره اشباع خاک؛
P (Phosphorus) پتاسیم قابل استفاده؛ Available K⁺، فسفر؛ OM (Organic matter) ماده آلی؛ SAR (Sodium adsorption ratio) نسبت جذب سدیم؛ EC_e (Electrical conductivity of saturated soil extract)

جدول ۲. نتایج تجزیه شیمیایی آب دریا و آب چاه در منطقه مطالعاتی

Table 2. Results of chemical analysis of sea water and well water in the study area

نمونه آب Water sample	pH	HCO ₃ ⁻ (meq L ⁻¹)	SAR	EC (dS m ⁻¹)	TDS	----- mg L ⁻¹ -----				
						Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	K ⁺	Na ⁺
آب چاه Well water	7.8	1.4	3.05	0.99	636.8	58	88	213	7.3	151
نسبت ۱:۴ آب چاه:آب دریا 1:4 ratio of seawater:well water	8.11	1.36	16.91	4.7	3008	300	168	1885	35.6	1597
نسبت ۲:۴ آب چاه:آب دریا 2:4 ratio of seawater:well water	7.37	1.31	18.21	8.1	5184	522	180	2609	40.6	2146
نسبت ۳:۴ آب چاه:آب دریا 3:4 ratio of seawater:well water	7.74	1.24	16.99	13.7	8768	794	196	3882	122.4	2398
آب دریای خزر Caspian Sea water	7.8	1.2	27.52	15.9	10182.4	811	240	5236	127.4	3993

TDS (Total dissolved solids) کل مواد جامد محلول؛ SAR (Sodium adsorption ratio) نسبت جذب سدیم؛ EC_e (Electrical conductivity) رسانایی الکتریکی؛ HCO₃⁻ پیکربنات؛ Na⁺ (Sodium) سدیم؛ K⁺ (Potassium) پتاسیم؛ Cl⁻ (Chloride) کلرید؛ Ca²⁺ (Calcium) کلسیم؛ Mg²⁺ (Magnesium) منیزیم؛

$$ME = \text{Max} |P_i - O_i|_{i=1}^n * \left(\frac{100}{O} \right) \quad (11)$$

$$RMSE = \left(\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n \right)^{1/2} \quad (12)$$

$$CRM = \left(\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i \right) / \sum_{i=1}^n O_i \quad (13)$$

$$CD = \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 / \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2 \quad (14)$$

$$AIC = 2K + N \ln \left(\frac{SSE}{N} \right) \quad (15)$$

$$AIC_c = AIC + \frac{2K(K+1)}{N-K+1} \quad (16)$$

که در آن‌ها K تعداد پارامترهای ورودی مدل برای بهینه‌سازی و SSE مجموع مربعات خطا است.

ME نشان‌دهنده چگونگی اجرای مدل است و مقدار زیاد آن نمایانگر بدترین حالت برآورد مدل و بیشینه خطا در مدل بوده و کم‌ترین مقدار آن برابر صفر است. معیار درستی تخمین RMSE مقادیر کلی یا میانگین انحراف مقادیر برآوردشده از مقادیر اندازه‌گیری‌شده را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده عدم اطمینان مطلق مدل است. کم‌ترین مقدار RMSE برابر صفر بوده که هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، عملکرد شبیه‌سازی مدل بهتر است و برآوردها دقیق‌ترند؛ یعنی نشان‌دهنده خطای کم‌تر در مدل پیش‌بینی است (۲۴). مقدار CRM نشان‌دهنده تمایل مدل برای بیش‌برآوردی و یا کم‌برآوردی در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری‌شده است. مقدار منفی CRM نشان‌دهنده تمایل مدل به بیش‌برآوردی است. CD نیز نشان‌دهنده نسبت پراکندگی میان مقادیر شبیه‌سازی‌شده به پراکندگی مقادیر اندازه‌گیری‌شده بوده و کم‌ترین مقدار آن صفر است. اگر تمامی داده‌های برآوردشده و اندازه‌گیری‌شده یکسان باشند (بهترین حالت)، نتایج معیارهای درستی تخمین به‌صورت زیر خواهد بود:

$$CRM = 0, RMSE = 0, ME = 0, CD = 1$$

به‌منظور برازش و تعیین پارامترهای بهینه مدل‌های عملکرد نسبی در برابر شوری، از ابزار Solver در نرم‌افزار Excel استفاده شد. همچنین نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel رسم شدند. همچنین با استفاده از آزمون t، مقایسه میانگین‌های

همکاران (۱۳) و نیز مدل‌های آماری ویبول اصلاح‌شده (۲۰۰۵a)، نمایی دوگانه (۲۰۰۵a) و گومپرتز (۲۰۰۵b) (۳۴) و (۳۵) بر اساس روابط (۲) تا (۱۰) استفاده شد:

$$Y_r = \exp(C(EC)^a) \quad (۲۰۰۵a) \quad (۸)$$

$$Y_r = \exp(C(EC) - a(EC)^2) \quad (۲۰۰۵a) \quad (۹)$$

$$Y_r = 1 - \exp[C(\exp(a(EC)))] \quad (۲۰۰۵b) \quad (۱۰)$$

Y_r و EC به ترتیب عملکرد نسبی (%) و شوری خاک یا آب آبیاری طی فصل رشد ($dS \ m^{-1}$) و a و C ضرایب مجهول این معادلات هستند. این ضرایب از طریق برازش هر معادله بر مقادیر مشاهده‌ای عملکرد نسبی (Y_r) در برابر EC بدست آمدند (۳۴ و ۳۵).

به‌منظور مقایسه مدل‌های ریاضی ماس و هافمن (۲۵)، ون‌گنوختن و هافمن (۳۶)، دیرکس و همکاران (۸)، همایی و همکاران (۱۳) و مدل‌های آماری ویبول اصلاح‌شده (۲۰۰۵a)، نمایی دوگانه (۲۰۰۵a) و گومپرتز (۲۰۰۵b) (۳۴) و (۳۵) ابتدا پارامترهای آن‌ها، از طریق روش بهینه‌سازی حداقل مجموع مربعات خطا و برازش مدل‌های مورد بررسی بر داده‌های عملکرد نسبی در برابر شوری اندازه‌گیری‌شده، تعیین شد. همچنین عملکرد نسبی برآوردشده توسط مدل‌ها با مقادیر اندازه‌گیری‌شده در برابر سطوح مختلف شوری عصاره اشباع خاک و شوری آب آبیاری ترسیم شده و نتایج مدل‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شد. همچنین مقایسه درستی تخمین مدل‌های مورد استفاده نیز با محاسبه معیارهای بیشینه خطای نسبی (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب جرم باقی‌مانده (CRM)، و ضریب کارایی (CD) (۲۲) با استفاده از روابط (۱۱) تا (۱۴) انجام شد. از آنجایی که تعداد پارامترهای هر مدل متفاوت بود لذا از معیارهای درستی تخمین آکائیکه (AIC) (۲) و آکائیکه تصحیح‌شده (AIC_c) (۴) برای هر کدام از مدل‌ها بر اساس روابط (۱۵) و (۱۶) نیز استفاده شد. معادله ۱۶ باید استفاده شود مگر اینکه N/K بزرگ‌تر از حدود ۴۰ باشد (۴) در این پژوهش، این نسبت بسیار کم‌تر از ۴۰ (یعنی در حدود ۲/۵-۱/۲۵) است:

جدول ۳. رسانایی الکتریکی عصاره اشباع خاک و عملکرد سورگوم در پایان آزمایش

Table 3. Electrical conductivity of saturated soil extract and sorghum yield at the end of the experiment

تیمارها Treatments	عملکرد (گرم در ستون) Yield (g per column)	عملکرد نسبی Relative yield	رسانایی الکتریکی عصاره اشباع خاک Electrical conductivity of saturated soil extract (dS m ⁻¹)
آب چاه Well water	240	1	1.06
نسبت ۱:۴ آب چاه:آب دریا 1:4 ratio of seawater:well water	226	0.94	4.68
نسبت ۲:۴ آب چاه:آب دریا 2:4 ratio of seawater:well water	194.36	0.80	8.72
نسبت ۳:۴ آب چاه:آب دریا 3:4 ratio of seawater:well water	146.21	0.60	12.26
آب دریای خزر Caspian Sea water	117.64	0.48	16.28

حاصل از مدل‌های جذب آب توسط ریشه گیاه نسبت به شوری عصاره اشباع خاک و نسبت به شوری آب آبیاری، توسط نرم‌افزار MSTATC انجام شد.

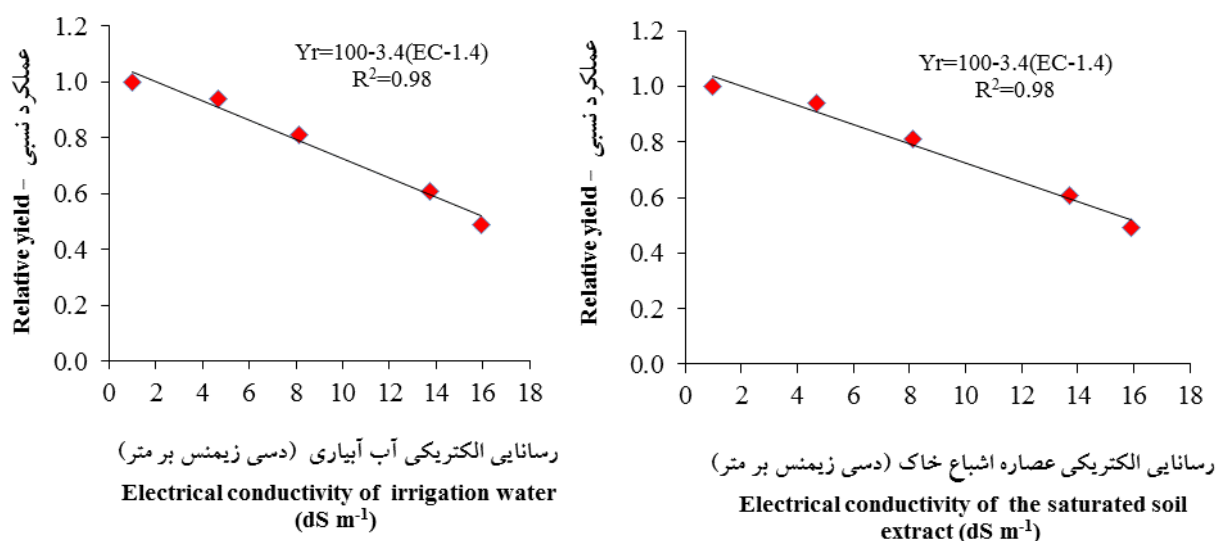
نتایج و بحث

نتایج عملکرد (زیتوده) گیاه سورگوم و رسانایی الکتریکی عصاره اشباع خاک در تیمارهای مختلف در جدول (۳) ارائه شده است.

شکل (۱) عملکرد نسبی سورگوم را به عنوان تابعی از شوری عصاره اشباع خاک و شوری آب آبیاری در مرحله بلوغ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود عملکرد نسبی سورگوم در این مرحله تا شوری عصاره اشباع خاک حدود ۳/۶ دسی‌زیمنس بر متر کاهش نداشت. اما پس از آن با افزایش شوری محلول خاک، عملکرد گیاه کاهش یافت و در شوری حدود ۱۷ دسی‌زیمنس بر متر به نصف رسید. با توجه به اینکه در همه مدل‌های کلان جذب آب، عملکرد نسبی به عنوان تابعی از مجموع تعرق دوره‌های مختلف رشد تعریف می‌شود، آستانه کاهش عملکرد محصول به دست آمده نماینده میانگین کل فصل

است. بنابراین آستانه کاهش عملکرد گیاه سورگوم بر اساس شوری عصاره اشباع خاک در فصل رشد برابر ۳/۶ دسی‌زیمنس بر متر است. حال آن‌که حد آستانه تحمل شوری سورگوم بر اساس یافته‌های اماچر و همکاران (۱) برابر ۴ دسی‌زیمنس بر متر بود. فرانکوئیز و همکاران (۱۰) و ماس و هافمن (۲۵) مقدار آستانه شوری برای گیاه سورگوم هنگامی که رسانایی الکتریکی خاک در تمام طول دوره رشد ثابت نگه داشته شده بود برابر ۶/۸ دسی‌زیمنس بر متر گزارش شد. علت آن می‌تواند این باشد که برای آزمایش ماس و هافمن (۲۵)، مخلوطی از NaCl + CaCl₂ برای شور کردن خاک استفاده شده است، در حالی که در پژوهش حاضر از آب شور طبیعی استفاده شد.

سعادت و همایی (۳۱) نیز در مرحله گیاهچه، حد آستانه گیاه سورگوم را برابر ۱ دسی‌زیمنس بر متر به دست آوردند. با برآزش معادله ماس و هافمن (۲۵)، شیب خط کاهش عملکرد سورگوم در برابر شوری عصاره اشباع خاک (شکل ۱) در این مرحله برابر ۳/۶ درصد بر دسی‌زیمنس بر متر محاسبه شد. بر اساس شیب خط به دست آمده در مرحله بلوغ، گیاه سورگوم به تنش شوری حساس بوده و جزء گیاهان حساس به تنش شوری



شکل ۱. عملکرد نسبی سورگوم (مشاهده شده) در مرحله بلوغ به عنوان تابعی از رسانایی الکتریکی عصاره اشباع خاک و آب آبیاری
Fig. 1. The relative yield of sorghum (observed) at the maturity stage as a function of the electrical conductivity of the saturated soil extract and irrigation water

عملکرد حدود ۳/۶ درصد بر دسی‌زیمنس بر متر است. در صورتی که فرانکوییز و همکاران (۱۰ و ۱۱) شیب خط کاهش عملکرد سورگوم در برابر شوری خاک را ۱۶ درصد بر دسی-زیمنس بر متر گزارش کردند. در مدل‌های ون‌گنوختن و هافمن (۳۶) و دیرکسن و همکاران (۸) در واکنش عملکرد به شوری عصاره اشباع، برابر ۱۷ دسی‌زیمنس بر متر محاسبه شد. مقدار پارامتر p مدل‌های ون‌گنوختن و هافمن (۳۶) و همایی و همکاران (۱۳) در توابع کاهش عملکرد برابر ۱/۲۵ و ضریب α در مدل همایی و همکاران (۱۳) برابر ۰/۲۲ تعیین شد. همان‌طور که در جدول (۴) نشان داده شده است، در برخی منابع برای گیاه سورگوم، مقدار پارامترهای p و EC_{50} در مدل ون‌گنوختن و هافمن (۳۶) به ترتیب برابر ۳ و ۲۳/۸۹ دسی-زیمنس بر متر برآورد شده است (۱۰ و ۱۱). نتایج پژوهش سعادت و همایی (۳۱) نیز بر روی گیاه سورگوم نشان داد که در مرحله گیاهچه، مقدار عملکرد گیاه در EC_e برابر ۱۱ دسی-زیمنس بر متر، ۵۰ درصد کاهش یافته است.

شیب خط کاهش عملکرد نسبی سورگوم به عنوان تابعی از رسانایی الکتریکی آب آبیاری در این مرحله برابر ۳/۵ درصد بر دسی‌زیمنس بر متر محاسبه شد. آستانه کاهش عملکرد گیاه

محسوب می‌شود. ولی ماس و هافمن (۲۵) گزارش کردند که گیاه سورگوم به تنش شوری نسبتاً حساس است. فرانکوییز و همکاران (۱۰ و ۱۱) نیز شیب خط کاهش عملکرد سورگوم با افزایش شوری عصاره اشباع خاک را برابر ۱۶ درصد بر دسی-زیمنس بر متر گزارش کردند. بر این اساس این پژوهشگران سورگوم را گیاهی نسبتاً مقاوم به شوری دانستند (جدول ۴).

همچنین تغییرات عملکرد نسبی سورگوم به عنوان تابعی از شوری آب آبیاری (شکل ۱) نشان داد که تا شوری حدود ۱/۴ دسی‌زیمنس بر متر، عملکرد نسبی گیاه کاهش نداشت. با افزایش بیشتر شوری، عملکرد کاهش یافته است به گونه‌ای که در شوری حدود ۱۵/۹ دسی‌زیمنس بر متر، عملکرد نسبی به نصف کاهش یافته است. پژوهش حاضر نشان داد که آستانه کاهش عملکرد سورگوم در مرحله بلوغ برای آب آبیاری حدود ۱/۴ دسی‌زیمنس بر متر است.

به منظور مقایسه مدل‌های عملکرد نسبی در برابر شوری، پارامترهای برازش یافته آن‌ها در جدول (۴) ارائه شده است. بر این اساس، آستانه کاهش عملکرد گیاه سورگوم بر اساس رسانایی الکتریکی عصاره اشباع برابر ۳/۶ دسی‌زیمنس بر متر (معادل فشار اسمزی برابر ۱۲۶۰ سانتی‌متر) و شیب خط کاهش

جدول ۴. پارامترهای مدل‌های ماس و هافمن (۱۹۷۷)، ون‌گنوتخن و هافمن (۱۹۸۴)، دیرکسن و همکاران (۱۹۹۳) و همایی و همکاران (۱۹۹۹) برای برآورد عملکرد نسبی سورگوم از رسانایی الکتریکی عصاره اشباع خاک و آب آبیاری در مرحله بلوغ

Table 4. The parameters of Mass and Hoffman (1977), van Genuchten and Hoffman (1984), Dirksen et al. (1993) and Homae et al. (1999) models for estimating relative yield of sorghum from the electrical conductivity of saturated soil extract (Sse) and irrigation water (IW) at the maturity stage

معادلات/Equations		Mass and Hoffman (1977)		van Genuchten and Hoffman (1984)		Direksen et al. (1993)		Homae et al. (1999)	
Parameters / پارامترها		Sse	IW	Sse	IW	Sse	IW	Sse	IW
مقادیر از منابع علمی (۱)، ۱۱ و ۲۵)	p	-	-	3	-	-	-	-	-
	h_{o50}	-	-	8600.4	-	-	-	-	-
	EC_{50}	-	-	23.89	-	-	-	-	-
	b	16	-	-	-	-	-	-	-
	Resource values (1,11,25)	2448 6.8 1440 4	-	-	-	-	-	-	-
مقادیر اولیه Initial values	p	-	-	1.25	1.09	1.25	1.09	1.25	1.09
	α	-	-	-	-	-	-	-	-
	b	0.036	0.034	-	-	-	-	-	-
	$h_{o\max}$	-	-	-	-	-	-	5860.8	5727.6
	EC_{\max}	-	-	-	-	-	-	16.28	15.91
مقادیر بهینه‌شده Optimized values	h_{o50}	-	-	6616.8	5724	6616.8	5724	-	-
	EC_{50}	-	-	17.38	15.9	17.38	15.68	-	-
	h_o^*	1260	504	-	-	-1260	504	1260	504
	EC_m	3.5	1.4	-	-	3.5	1.4	3.5	1.4
	p	-	-	2.76	2.13	2.85	2.13	1.14	1.08
α	-	-	-	-	-	-	0.22	0.34	
b	0.037	0.035	-	-	-	-	-	-	
مقادیر بهینه‌شده Optimized values	$h_{o\max}$	-	-	-	-	-	-	7700.4	7168
	EC_{\max}	-	-	-	-	-	-	21.39	19.91
	h_{o50}	-	-	5824.8	5868	5824.8	5868	-	-
	EC_{50}	-	-	16.18	16.30	16.18	16.30	-	-
	h_o^*	1314	839	-	-	569	-504	1163	853.2
EC_p	3.65	2.33	-	-	1.58	1.4	3.23	2.37	

EC: آستانه تحمل شوری برآورده شده توسط مدل برای گیاه سورگوم؛ EC_m : آستانه تحمل شوری اندازه‌گیری شده گیاه سورگوم؛ EC_{50} : مقدار شوری که در آن عملکرد گیاه ۵۰ درصد کاهش می‌یابد؛ EC_{\max} : مقدار شوری است که در مقادیر بیش از آن افزایش شوری نمی‌تواند با همان روند پیشین در عملکرد نسبی (α) کاهش ایجاد کند؛ b: شیب خط یا مقدار کاهش عملکرد نسبی گیاه به ازاء واحد افزایش شوری؛ α : تابع کاهش یا عملکرد نسبی (جذب نسبی آب توسط ریشه گیاه)؛ p: ضریب تجربی وابسته به نوع گیاه، شرایط خاک و اقلیم

EC_p : Salinity tolerance threshold estimated by the models for sorghum plant. EC_m : Measured salinity tolerance threshold of sorghum plant. EC_{50} : Salinity at which the yield of plant reduced by 50%. EC_{\max} : Maximum salinity, beyond that relative yield (α) cannot be reduced with the same rate as before. b: Slope of the line of relative yield versus salinity. α : reduction function or relative yield (relative water uptake by the plant roots). p: experimental coefficient depending on plant type, soil conditions and climate.

توجه به این که مدل ون گنوختن و هافمن (۳۶) از این ویژگی برخوردار است، در مرحله بلوغ نیز این مدل مناسب تر شناخته شد. ولی مدل دیرکسن و همکاران (۸) به دلیل اختلاف کمی که با مدل ون گنوختن و هافمن (۳۶) دارد در این مرحله قابل پیشنهاد است. ولی مدل ماس و هافمن را نیز به لحاظ سادگی معادله، در این مرحله می توان به کار برد. سرائی تبریزی و همکاران (۳۲) با بررسی واکنش گیاه ریحان به سطوح مختلف تنش شوری به این نتیجه رسیدند که مدل های همایی و همکاران (۱۳) و ون گنوختن و هافمن (۳۶) در شبیه سازی تابع کاهش عملکرد ریحان در برابر شوری آب آبیاری بیش ترین هم خوانی و برازش نسبت به داده های اندازه گیری شده را دارد. بر اساس مدل دیرکسن و همکاران (۸)، حد آستانه گیاه سورگوم در این مرحله برابر $1/58$ دسی زیمنس بر متر بوده که نسبت به مدل های دیگر، کم ترین مقدار را داشته است.

همان طور که از شکل (۲) و مقادیر R^2 ارائه شده در جدول (۵) بر می آید، مدل های غیرخطی ون گنوختن و هافمن (۳۶) و دیرکسن و همکاران (۸) نسبت به مدل ساده و خطی ماس و هافمن (۲۵)، در برآورد عملکرد نسبی به عنوان تابعی از رسانایی الکتریکی آب آبیاری، برازش بهتری بر داده های اندازه گیری شده، دارند. این دو مدل به دلیل پارامترهای ورودی بیش تر، ضرایب تبیین بیش تری داشتند و توانستند عملکرد نسبی گیاه را دقیق تر پیش بینی کنند.

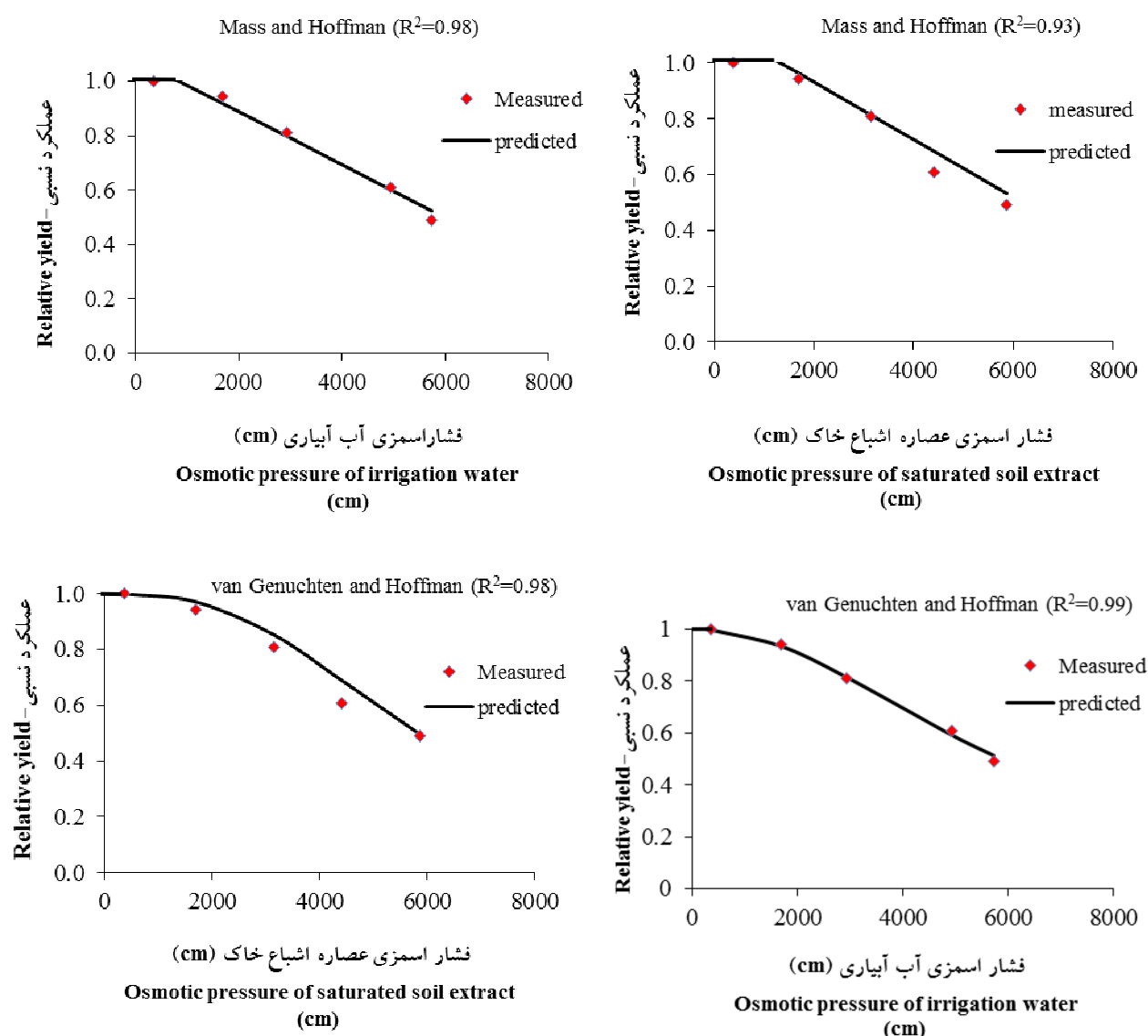
با توجه به این که مدل غیرخطی ون گنوختن و هافمن (۳۶) نسبت به مدل دیرکسن و همکاران (۸) مقدار AIC کم تری دارد، مناسب ترین مدل برای مرحله بلوغ شناخته شد (جدول ۵) که با نتایج پژوهش کیانی و همکاران (۲۲) هم خوانی دارد. همچنین حد آستانه گیاه برای این مدل برابر $1/4$ دسی زیمنس بر متر بود (جدول ۴). مدل همایی و همکاران نیز با توجه به این که CRM در برآورد عملکرد نسبی به عنوان تابعی از رسانایی الکتریکی شوری عصاره اشباع خاک و آب آبیاری منفی شد، نشان دهنده این است که مدل دارای بیش برآورد بوده است (جدول ۵).

سورگوم به عنوان تابعی از رسانایی الکتریکی آب آبیاری، برابر $1/4$ دسی زیمنس بر متر، EC_{50} در مدل های ون گنوختن و هافمن (۳۶) و دیرکسن و همکاران (۸)، برابر $16/30$ دسی-زیمنس بر متر، مقدار پارامتر p در مدل های ون گنوختن و هافمن (۳۶) و همایی و همکاران (۱۳) به ترتیب برابر $2/31$ و $1/08$ و ضریب α در مدل همایی و همکاران (۱۳)، برابر $0/34$ برآورد شد (جدول ۴).

در شکل (۲) برازش توابع کاهش عملکرد در برابر رسانایی الکتریکی عصاره اشباع و آب آبیاری بر داده های اندازه گیری شده در مرحله بلوغ ارائه شده است. مشاهده می شود مقادیر برآورد شده عملکرد نسبی توسط مدل های مختلف به ویژه در مدل های غیرخطی، با مقادیر اندازه گیری شده هم خوانی بیش تری دارد. آستانه کاهش برآورد شده توسط مدل خطی ماس و هافمن (۲۵) در برازش عملکرد نسبی به عنوان تابعی از رسانایی الکتریکی آب آبیاری، حدود $2/33$ دسی زیمنس بر متر است (جدول ۴)، در حالی که مدل غیرخطی دیرکسن و همکاران (۸) آستانه کم تری را ارائه می کند.

از آنجا که مبنای اثر شوری بر جذب آب توسط گیاه در مدل های آماری، رسانایی الکتریکی و در مدل های ریاضی جذب، فشار اسمزی است، مقایسه آنها تنها از طریق معیارهای درستی تخمین امکان پذیر است (جدول ۵). نتایج نشان می دهد که ضریب تبیین (R^2) هر سه مدل ماس و هافمن (۲۵)، ون گنوختن و هافمن (۳۶) و دیرکسن و همکاران (۸) نزدیک به هم بوده اما مقدار R^2 مدل ماس و هافمن (۲۵)، کم تر از مقادیر آن برای دو مدل ون گنوختن و هافمن (۳۶) و دیرکسن و همکاران (۸) است (جدول ۴). به عبارت بهتر، مدل های غیرخطی در این مرحله توانسته اند با حداقل اختلاف، بهترین برازش را ارائه دهند.

با توجه به این که معیارهای درستی تخمین شامل R^2 و RMSE مدل های دیرکسن و همکاران (۸) و ون گنوختن و هافمن (۳۶) تا حدودی با هم برابر است، مدلی مناسب تر است که RMSE و معیار درستی تخمین AIC کم تری داشته باشد. با

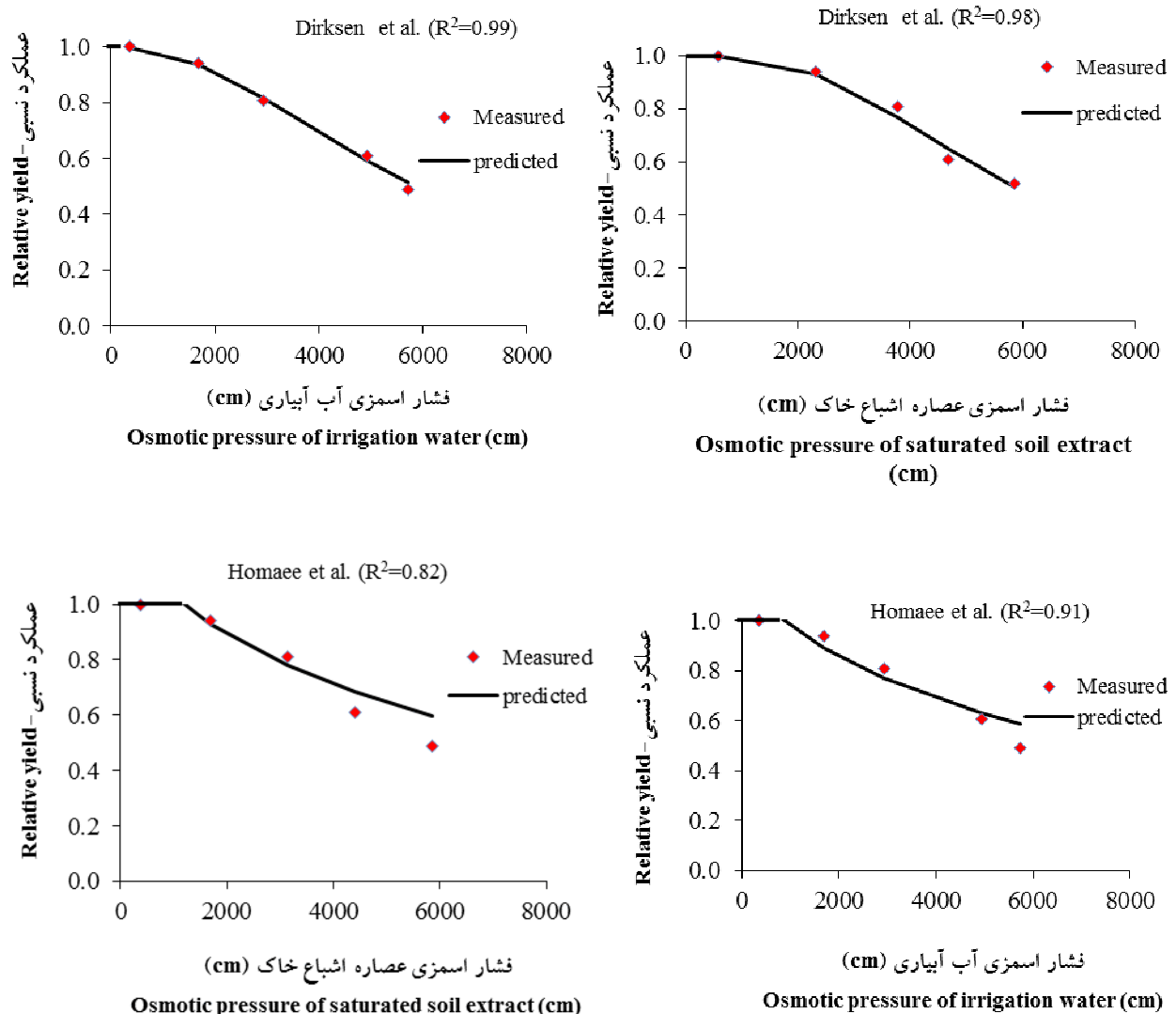


شکل ۲. مقایسه کارایی مدل‌های ماس و هافمن (۱۹۷۷)، ون‌گنوختن و هافمن (۱۹۸۴)، دیرکسن و همکاران (۱۹۹۳) و همایی و همکاران (۱۹۹۹) در برازش بر داده‌های عملکرد نسبی گیاه سورگوم در مرحله بلوغ به عنوان تابعی از فشار اسمزی عصاره اشباع خاک یا آب آبیاری

Fig. 2. Performance of Mass and Hoffman (1977), van Genuchten and Hoffman (1984), Dirksen et al. (1993) and Homaei et al. (1999) models in predicting relative yield of the sorghum plant at the maturity stage as a function of osmotic pressure of saturated soil extract

عصاره اشباع خاک و آب آبیاری ارائه شده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود، در برآورد گیاه سورگوم به عنوان تابعی از رسانایی الکتریکی عصاره اشباع خاک، مدل‌های نمایی دوگانه و گومپرتز دارای مقادیر R^2 برابرند (۰/۹۸) ولی RMSE و معیار درستی تخمین (AIC) کمتر مدل گومپرتز نسبت به

برازش مدل‌های آماری مختلف بر داده‌های اندازه‌گیری شده عملکرد نسبی گیاه سورگوم به عنوان تابعی از رسانایی الکتریکی عصاره اشباع خاک و آب آبیاری در شکل (۳) آورده شده است. در جدول (۶) پارامترها و معیارهای درستی تخمین برای هر کدام از مدل‌های آماری به عنوان تابعی از رسانایی الکتریکی



ادامه شکل ۲.

Fig. 2. (Continued)

شده دارای کمترین مقادیر RMSE و AIC بود، بهترین مدل در این مرحله شناخته شد. سرائی تبریزی و همکاران (۳۲) با پژوهش بر روی گیاه ریحان نشان دادند که در بین مدل‌های آماری واکنش عملکرد به شوری آب آبیاری، مدل‌های آماری اصلاح‌شده ویبول (۲۰۰۵a) (۳۳) و گومپرتز (۲۰۰۵b) دارای دقت مناسب می‌باشند که با نتایج پژوهش استپوهن و همکاران (۳۵) هم‌خوانی دارد.

مدل نمایی دوگانه را نیز به دلیل داشتن کمترین اختلاف نسبت به مدل ویبول اصلاح‌شده می‌توان در این مرحله پیشنهاد

مدل نمایی دوگانه، برآورد بهتری در برابر عملکرد نسبی گیاه سورگوم در مرحله بلوغ از خود نشان داد و بهترین مدل در این مرحله شناخته شد (شکل ۳). ولی با توجه به این که ضریب کارایی (CD) مدل نمایی دوگانه به یک نزدیک‌تر است و اختلاف چندانی از نظر RMSE و AIC با مدل گومپرتز ندارد، لذا از این مدل نیز می‌توان استفاده کرد.

همچنین نتایج جدول (۶) برای پاسخ گیاه به عنوان تابعی از شوری آب آبیاری نشان می‌دهد که هر سه مدل دارای ضرایب تبیین یکسانی بودند. ولی با توجه به این که مدل ویبول اصلاح-

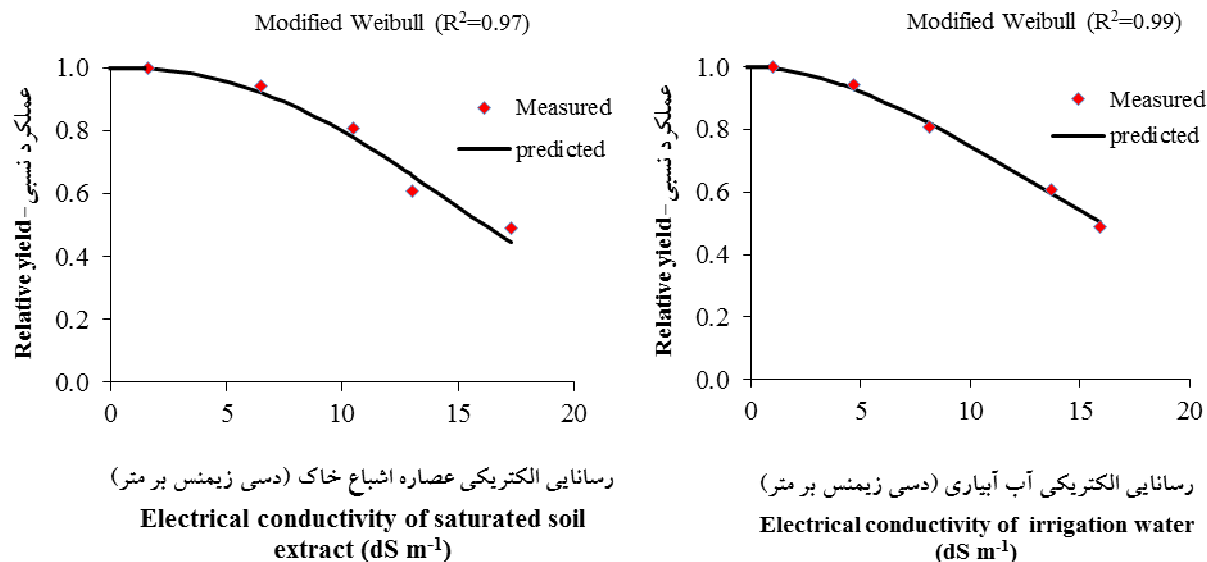
جدول ۵. معیارهای درستی تخمین عملکرد نسبی سورگوم با چهار مدل ریاضی بر مبنای شوری عصاره اشباع خاک و آب آبیاری در مرحله بلوغ

Table 5. Accuracy criteria for the prediction of sorghum relative yield by four mathematical models based on the salinity of saturated soil extract (Sse) and irrigation water (IW) at the maturity stage

Model / مدل	Mass and Hoffman (1977)		van Genuchten and Hoffman (1984)		Dirksen et al. (1993)		Homaei et al. (1999)	
معیار درستی تخمین / Prediction accuracy criterion	Sse	IW	Sse	IW	Sse	IW	Sse	IW
R ²	0.93	0.98	0.98	0.99	0.98	0.99	0.82	0.91
CRM	-1.60	0	0.001	-0.0004	0.001	-0.0004	-0.003	-0.001
ME	0.07	0.04	0.04	0.02	0.04	0.02	0.09	0.09
CD	1.07	1.01	1.01	1.00	1.03	1.00	1.38	1.22
RMSE	0.04	0.02	0.02	0.008	0.02	0.008	0.07	0.04
AIC _c	-118.38	-157.99	-156.84	-206.27	-156.44	-204.26	-88.31	-109.27
AIC	-118.88	-157.49	-157.34	-205.77	-156.94	-203.76	-88/81	-108.77

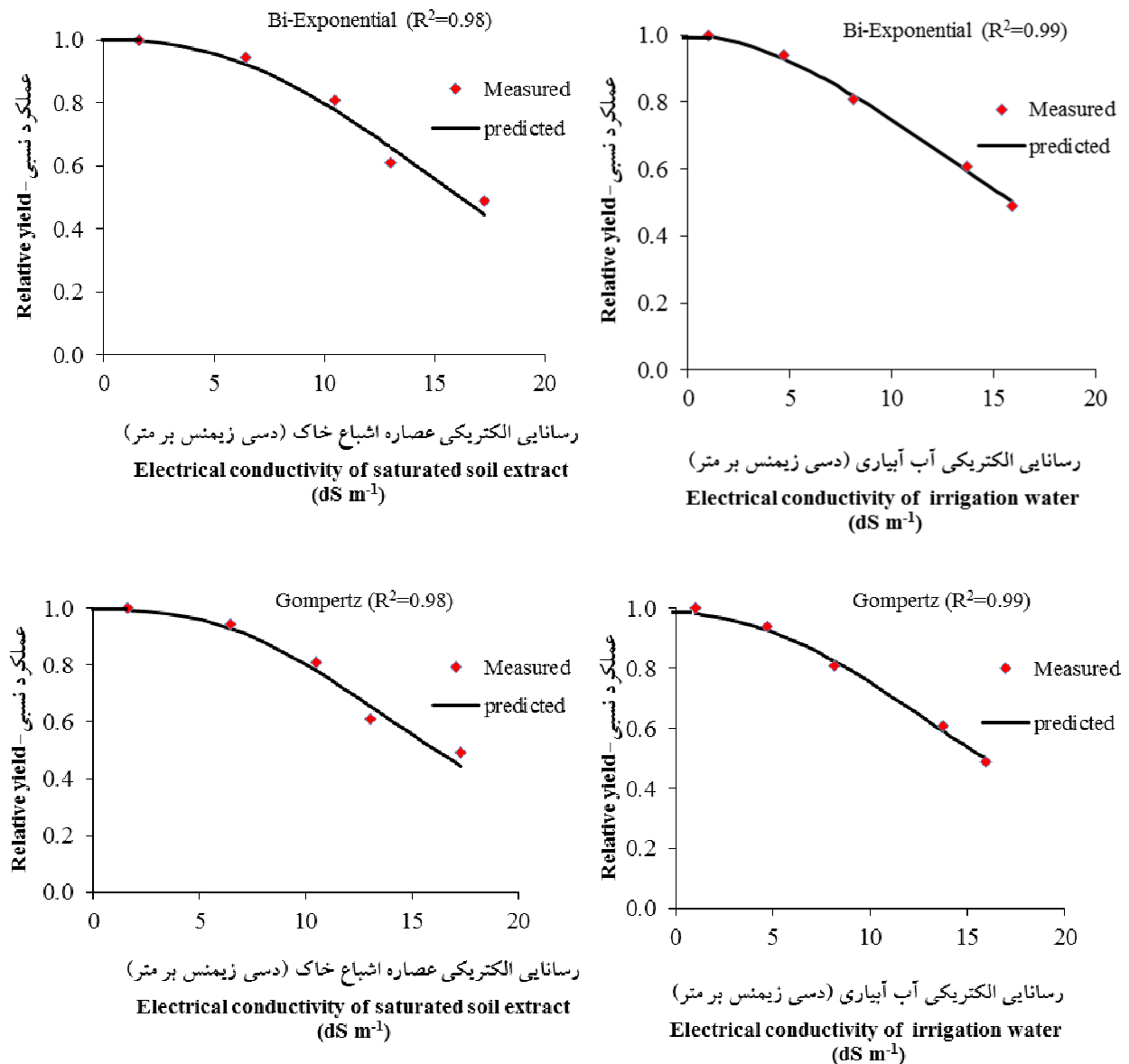
RMSE: ریشه میانگین مربعات خطا، CD: ضریب کارایی، ME: بیشینه خطای نسبی، CRM: ضریب جرم باقی مانده، R²: ضریب تبیین، AIC: معیار درستی تخمین آکائیکه، AIC_c: آکائیکه تصحیح شده

RMSE: root mean square error, CD: coefficient of efficiency, ME: maximum Error, CRM: coefficient of residual mass, R²: coefficient of determination, AIC: Akaike's prediction accuracy criterion, AIC_c: corrected Akaike



شکل ۳. مقایسه کارایی مدل‌های ویبول اصلاح شده (۲۰۰۵ا)، نمایی دوگانه (۲۰۰۵ا) و گومپرتز (۲۰۰۵ب) در برازش داده‌های عملکرد نسبی گیاه سورگوم در مرحله بلوغ به عنوان تابعی از رسانایی الکتریکی عصاره اشباع خاک یا آب آبیاری

Fig. 3. Performance of Modified Weibull (2005a), Bi-Exponential (2005a) and Gompertz (2005b) models for predicting relative yield of the sorghum plant at the maturity stage as a function of osmotic pressure of saturated soil extract



ادامه شکل ۳.

Fig. 3. (Continued)

سطح یک درصد تفاوت معنی داری وجود ندارد. همچنین، نتایج نشان داد که بین مدل‌های آماری و داده‌های مشاهده‌ای و همچنین بین دو گروه مدل‌ها در سطح یک درصد اختلاف معنی دار وجود ندارد.

به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهد که در اغلب موارد مدل-سازی، واکنش گیاه سورگوم به شوری آب آبیاری دقت بیشتری نسبت به مدل‌سازی بر مبنای شوری عصاره اشباع خاک داشته است.

داد (شکل ۳). چون هر دو مدل CD برابر و نزدیک به یک نسبت به مدل گومپرتز داشتند (جدول ۶).

برای مقایسه آماری بین دو گروه مدل‌های ریاضی و آماری با یکدیگر و با داده‌های مشاهده‌ای در برآورد عملکرد نسبی گیاه سورگوم به‌عنوان تابعی از رسانایی الکتریکی عصاره اشباع خاک و آب آبیاری، از آزمون مقایسه میانگین جامعه آماری به روش t استفاده شد (جدول ۷). همان‌گونه که در جدول (۷) مشاهده می‌شود بین مدل‌های ریاضی و داده‌های مشاهده‌ای در

جدول ۶. معیارهای درستی تخمین عملکرد نسبی سورگوم با سه مدل آماری بر مبنای شوری عصاره اشباع خاک و آب آبیاری در مرحله بلوغ

Table 6. Accuracy criteria for prediction of sorghum relative yield by three statistical models based on the salinity of saturated soil extract (Sse) and irrigation water (IW) at the maturity stage

Equations/معادلات	Modified Weibull (2005a)		Bi-Exponential (2005a)		Gompertz (2005b)	
پارامترها و معیارهای درستی تخمین محاسبه شده / Calculated parameters and correct estimation criteria	Sse	IW	Sse	IW	Sse	IW
R ²	0.97	0.99	0.98	0.99	0.98	0.99
CRM	0.003	0.0007	-0.0004	0.001	0.002	0.002
ME	0.04	0.01	0.04	0.01	0.04	0.01
CD	1.04	1.01	0.99	1.01	1.01	1.02
RMSE	0.026	0.007	0.024	0.008	0.023	0.01
AIC _c	-147.01	-213.71	-150.5	-209.71	-152.03	-193.13
AIC	-147.51	-213.21	-151	-209.21	-152.53	-192.63
a (Equations 8-10)	2.33	1.83	0.003	0.0024	-0.13	-0.11
C (Equations 8-10)	-0.0011	-0.0043	0.01	-0.004	-6.47	-4.59

RMSE: ریشه میانگین مربعات خطا، CD: ضریب کارایی، ME: بیشینه خطای نسبی، CRM: ضریب جرم باقی مانده، R²: ضریب تبیین، a و C: ضرایب ثابت هر

معادله، AIC: معیار درستی تخمین آکائیکه، AIC_c: آکائیکه تصحیح شده

RMSE: root mean square error, CD: coefficient of efficiency, ME: maximum Error, CRM: coefficient of residual mass, R²: coefficient of determination, a and C: constant coefficients of each equation, AIC: Akaike's prediction criteria, AIC_c: corrected Akaike corrected

جدول ۷. مقایسه مقادیر عملکرد نسبی برآورده شده توسط مدل‌های آماری و ریاضی بر مبنای شوری خاک و آب آبیاری با مقادیر اندازه‌گیری شده

با استفاده از آزمون *t*

Table 7. Comparison of the relative yield values predicted by the statistical and mathematical models based on soil (Sse) and irrigation water (IW) salinity with the measured ones using *t* test.

مقایسه با		داده مشاهده‌ای		مدل‌های ریاضی	
Compared with		Observational data		Mathematical models	
مدل‌ها		df	P _{value}	df	P _{value}
Models					
آماري / Statistical	(Sse)	4	0.72 ^{ns}	4	0.37 ^{ns}
	(IW)	4	1.00 ^{ns}	4	0.37 ^{ns}
ریاضی / Mathematical	(Sse)	4	1.00 ^{ns}	—	—
	(IW)	4	0.81 ^{ns}	—	—

ns: تفاوت معنی‌داری وجود ندارد، df: درجه آزادی

ns: There is no significant difference, df: degree of freedom

جدول ۸. مقایسه نتایج عملکرد نسبی یا $\alpha(h_0)$ به عنوان تابعی از شوری عصاره اشباع خاک یا شوری آب آبیاری با استفاده از آزمون t

Table 8. Comparing the results of the relative yield as a function of the salinity of the saturated soil extract or the salinity of the irrigation water using t test

مدل Model	عصاره اشباع خاک Saturated soil extract	آب آبیاری Irrigation water	P value	df	معنی دار Significant
	میانگین $\alpha(h_0)$ Mean $\alpha(h_0)$	میانگین $\alpha(h_0)$ Mean $\alpha(h_0)$			
Mass and Hoffman (1997)	0.76	0.77	0.84	4	ns
van Genuchten and Hoffman (1984)	0.75	0.76	0.71	4	ns
Dirksen et al. (1993)	0.76	0.76	0.93	4	ns
Homaee et al. (1999)	0.78	0.78	0.64	4	ns
Modified Weibull (2005a)	0.75	0.76	0.65	4	Ns
Bi-Exponential (2005a)	0.75	0.76	0.79	4	Ns
Gompertz (2005b)	0.76	0.76	0.84	4	Ns

df: degree freedom، درجه آزادی،

حد آستانه کاهش عملکرد سورگوم بر اساس رسانایی الکتریکی عصاره اشباع خاک و آب آبیاری با برازش مدل ماس و هافمن به ترتیب برابر ۳/۶۵ و ۲/۳۳ دسی‌زیمنس بر متر برآورد شده است. در نتیجه گیاه سورگوم در مرحله بلوغ با تیمار نسبت ۱:۴ آب چاه : آب دریا (شوری برابر ۴/۷ دسی‌زیمنس بر متر) می‌تواند بیشینه رشد و عملکرد گیاه را داشته باشد. بر اساس نتایج این پژوهش، استفاده از شوری آب آبیاری به جای شوری عصاره اشباع خاک در مدل‌های پاسخ عملکرد گیاه به شوری، در مرحله بلوغ امکان‌پذیر است زیرا بین نتایج عملکرد نسبی به دست آمده از مدل‌ها به عنوان تابعی از رسانایی الکتریکی عصاره اشباع خاک و آب آبیاری اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. این یافته می‌تواند نقش مؤثری در کاربردی نمودن مدل‌های پاسخ عملکرد به شوری ایفا خواهد کرد. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که از بین مدل‌های خطی و غیرخطی، مدل‌های غیرخطی برآورد بهتری در مدل‌سازی پاسخ عملکرد به شوری داشته‌اند. زیرا مدل‌های غیرخطی به دلیل داشتن پارامترهای ورودی بیشتر، توانایی برازش بهتری دارند و می‌توانند عملکرد نسبی گیاه را به طور دقیق‌تری پیش‌بینی نمایند. بین مدل‌های ریاضی و آماری اختلاف معنی‌داری در تخمین

به منظور مقایسه آماری بین دو روش مدل‌سازی بر اساس شوری عصاره اشباع و شوری آب آبیاری از آزمون t استفاده شد (جدول ۸). نتایج آزمون t نشان داد که در تمام مدل‌های ریاضی و آماری، بین دو روش مدل‌سازی (بر مبنای شوری عصاره اشباع خاک و شوری آب آبیاری) در سطح یک درصد اختلاف معنی‌داری وجود ندارد (جدول ۸) که با نتایج سرایی تبریزی و همکاران (۳۲) هم‌خوانی دارد. لذا براساس نتایج این پژوهش در این مرحله از رشد گیاه می‌توان در مدل‌های عملکرد نسبی سورگوم در برابر شوری به جای شوری عصاره اشباع خاک، از شوری آب آبیاری استفاده نمود. استفاده از شوری آب آبیاری به جای شوری عصاره اشباع خاک می‌تواند به کاربردی نمودن مدل‌های جذب آب گیاه در مدیریت مزرعه کمک کند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی پاسخ (عملکرد نسبی) گیاه سورگوم به رسانایی الکتریکی عصاره اشباع خاک و آب آبیاری و همچنین ارزیابی کارایی مدل‌های ریاضی موجود در برآورد عملکرد نسبی گیاه در مرحله بلوغ انجام شد. در این پژوهش

عملکرد نسبی گیاه وجود نداشت و هر دو گروه مدل می‌تواند عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نشده است. مورد استفاده قرار گیرند.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منافع با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

تشکر و سپاسگزاری

در انجام این پژوهش، حمایت مالی خاصی از مؤسسات

منابع مورد استفاده

1. Amacher, K., Koenig, J.R., Kitchen, B. 1997. Salinity and plant tolerance. Utah State University, Extension Electronic Publishing.
2. Akaike, H., 1974. A new look at the statistical model identification, *IEEE Transactions on Automatic Control* 19(6): 716–723.
3. Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal* 54(5): 464–465.
4. Burnham, K.P., Anderson, D.R., 2004. Multimodel inference: Understanding AIC and BIC in model selection, *Sociol Methods Res*, 33: 261–304.
5. Chaali, N., Comegna, A., Dragonetti, G., Todorovic, M., Albrizio, R., Hijazeen, D., Lamaddalena, N., Coppola, A., 2013. Monitoring and modeling root-uptake salinity reduction factors of a tomato crop under non-uniform soil salinity distribution. *Procedia Environmental Sciences* 19: 643–653.
6. De Jong van Lier, Q., Van Dam, J. C., Metselaar, K., 2009. Root water extraction under combined water and osmotic stress. *Soil Science Society of American Journal* 73: 862–875.
7. Dirksen, C., Augustijn, D. C., 1988. Root water uptake function for nonuniform pressure and osmotic potentials. *Agric. Abstracts*, pp. 188.
8. Dirksen, C., Kool, J.B., Koorevaar, P., 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 Verlag, New York, pp. 99–122.
9. Feddes, R.A., Kowalik, P.J. Zarandy, H., 1978. Simulation of field water use and crop yield. PUDOC, Wageningen, *Simulation Monographs*, 189p.
10. Francois, L.E., Donovan, T.J., Maas, E.V., 1984. Salinity effects on seed yield, growth and germination of grain sorghum. *Agronomy Journal* 76: 741–744.
11. -Francois, L.E., 1984. Salinity effects on germination, growth, and yield of turnips. *HortScience* 19: 82–84.
12. Hamblin, Ap., 1981. Filter – paper method for routine measurement of field water potential. *Journal of Hydrology* 53: 355–360.
13. Homae, M., Dirksen, C., Feddes, R. A., 2002. Simulation of root water uptake I. Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. *Agricultural Water Management* 57: 89–109.
14. Homae, M., Dirksen, C., Feddes, R. A., 2002b. Simulation of root water uptake II, Nonuniform transient water stress using different macroscopic reduction functions. *Agricultural Water Management* 57: 111–126.
15. Homae, M., Dirksen, C., Feddes, R. A., 2002c. A macroscopic water extraction model for non-uniform transient salinity and water stress. *Soil Science Society of American Journal* 66: 1764–1772.
16. Homae, M., Dirksen, C., Feddes, R. A., 2002d. Simulation of root water uptake III. Nonuniform transient combined salinity and water stress. *Agricultural Water Management* 57: 127–144.
17. Homae, M., Feddes, R.A., 1999. Water uptake under non-uniform transient salinity and water stress. In: Feyen, J., Wiyo, K. (Eds.), *Modelling of Transport Processes in Soils at Various Scales in Time and Space*. Wageningen Press, Wageningen. The Netherlands, pp. 416–427.
18. Homae, M., Feddes, R. A., 2001. Quantification of water extraction under salinity and drought. In: Horst, W.J. (Ed.), *Plant Nutrition- Food Security and Sustainability of Agro-Ecosystems*.
19. Homae, M., Feddes, R. A., 2002. Modeling the sink term under variable soil water osmotic and pressure heads. 14th Intern. Conf. on Computational Methods in Water Resources, Delft, The Netherlands.
20. Jalali, V.R., Homae, M., Mirnia S. Kh., 2016. Modeling the response of rapeseed to salinity during different stages of vegetative growth. *Agricultural Engineering Research* 8(4): 112–95.

21. Kiani, A.R., Mirlatifi, M., Homaei, M., Cheraghi, A. 2004. Effect of different irrigation regimes and salinity on wheat yield in Gorgan region. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources* 11(1): 79–89. (In Persian with English abstract)
22. Krishnamurthy, L., Reddy, B. V. S., Seraj, R., 2003. Screening sorghum germplasm for tolerance to soil salinity. *International Sorghum and Millets Newsletter* 44: 90–93.
23. Loague, K., Green, R.E., 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *Journal of Contaminant Hydrology* 7: 51–73.
24. Maas, E.V., 1990. Agricultural salinity assessment and management. ASCE Manuals and Reports on Engineering. New York: American Society of Civil Engineers, 262–304.
25. Mass, E.V., Hoffman, G.J., 1977. Crop salt tolerance—current assessment. *Journal of Irrigation and Drainage, Division ASCE* 103: 115–134.
26. Maas, E. V., Grattan, S.R., 1999. Crop yields as affected by salinity. *Agronomy* 38: 55–110.
27. Munns, R., Gilliam, M., 2015. Salinity tolerance of crops—what is the cost? *New Phytologist* 208(3): 668–673.
28. Olsen, S.R., Sommers, L.E., 1982. Phosphorus, In: Page A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), *Method of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Agronomy Monograph 9, 2nd ed., ASA/SSSA, Madison, WI, pp. 403–430.
29. Rhoades, J.D., Kandiah, A., Mashali, A.M., 1992. The use of saline waters for crop production. FAO Irrigation and Drainage Paper. FAO, United Nations, Rome.
30. Richards, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics* 1: 318–333.
31. Saadat, S., Homaei, M., 2015. Modeling sorghum response to irrigation water salinity at early growth stage. *Agricultural Water Management* 152: 119–124.
32. Sarai Tabrizi, M., Babazadeh, H., Homaei, M., Kaveh, F., Parsinejad, M., 2014. Simulation of basil plant response to irrigation water salinity. *Journal of Water Research in Agriculture* 28(4): 701–691. (In Persian with English abstract)
33. Skaggs, T.H., van Genuchten, M.T., Shouse, P.J., Poss, J.A., 2006. Macroscopic approaches to root water uptake as a function of water and salinity stress. *Agricultural Water Management* 86: 140–149.
34. Steppuhn, H., van Genuchten, M.Th., Grieve, C.M., 2005a. Crop ecology, management and quality: root zone salinity: I. Selecting a product-yield index and response function for crop tolerance. *Crop Science* 45(1): 209–220.
35. Steppuhn, H., van Genuchten, M.Th., Grieve, C.M., 2005b. Crop ecology, management and quality: root-zone salinity: II. Indices for tolerance in agricultural crops. *Crop Science* 45(1): 221–232.
36. van Genuchten, M.Th., Hoffman, G.J., 1984. Analysis of crop salt tolerance data. In: Shainberg, I., Shalhevet, J. (Eds.), *Soil Salinity under Irrigation Process and Management*. Ecological Studies, Springer-Verlag, Berlin, New York, pp. 258–271.
37. Walkey, A., Black, I. A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Science* 63: 251–263.