

تاثیر تنش شوری بر عملکرد گیاه ذرت بر اساس توابع تولید کلان طی رشد زایشی

وحیدرضا جلالی^{۱*} و صفورا اسدی کیورچال^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۱۸

چکیده

ذرت در مواجهه با تنش شوری، واکنش‌های متفاوتی را طی مراحل مختلف رشدی نشان می‌دهد و دوره رشد زایشی، حساس‌ترین دوره زندگی گیاه است. هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی توانمندی مدل‌های شبیه‌ساز شوری در تخمین عملکرد ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ طی دوره رشد زایشی بود. برای این منظور، مدل‌های فرایندی-فیزیکی شامل ماس و هافمن، ونگنوختن و هافمن، دیرکسن و همکاران و همایی و همکاران مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور ایجاد شرایط واقعی رشد در خاک‌های شور، از آب شور طبیعی دریاچه نمک نوق واقع در رفسنجان استفاده و برای تهیه تیمارهای شوری مورد مطالعه در این آزمایش با آب معمولی رقیق شد. تیمارهای مورد استفاده در این پژوهش شامل سطوح شوری ۱، ۲، ۴، ۶ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر به همراه یک تیمار آب غیرشور (به عنوان شاهد) بودند که در سه تکرار مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج حاصل از آماره‌های ضریب کارایی اصلاح شده (E')، شاخص مطابقت اصلاح شده (d') و ضریب جرم باقیمانده (CRM)، نشان داد که برای متغیر ارتفاع اندام هوایی، مدل ونگنوختن و هافمن با دارا بودن بیش‌ترین دقت ($d'=0/91$ و $E'=0/87$) دقیق‌ترین مدل بود، در حالی‌که برای متغیر وزن خشک اندام هوایی، مدل غیرخطی همایی و همکاران ($d'=0/90$ و $E'=0/86$) و برای متغیر عملکرد نهایی دانه، مدل ماس و هافمن ($d'=0/96$ و $E'=0/94$) دارای بیش‌ترین دقت بودند و بهترین تخمین را ارائه دادند. به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که مدل‌های شبیه‌ساز شوری، توانمندی خوبی در تخمین عملکرد گیاه ذرت تحت شرایط تنش شوری و مدیریت بهتر تخصیص منابع آب کم کیفیت در مراحل مختلف رشد گیاه داشتند. به عبارت دیگر، استفاده از مدل‌های چهارگانه ماس و هافمن، ونگنوختن و هافمن، دیرکسن و همکاران و همایی و همکاران، می‌تواند ابزار موثری در استفاده از منابع آب شور با درجات مختلف شوری در جهت دستیابی به تولید بهینه ذرت باشند. بنابراین، با تعیین دقیق مدل بهینه برای هر دوره رشد و پذیرش میزان ریسک افت عملکرد به‌ازای میزان شوری آب آبیاری، می‌توان به طور قابل توجهی از منابع آب کم کیفیت نیز در تولید محصول ذرت بهره برد.

واژه‌های کلیدی: افت عملکرد، تنش غیر زیستی، شاخص مطابقت، شبیه‌سازی

۱- دانشیار، پژوهشکده فناوری تولیدات گیاهی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۲- دانشیار، مجتمع آموزش عالی شیروان، شیروان، ایران

۳- استادیار، گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

* نویسنده مسئول: v.jalali@uk.ac.ir

مقدمه

ذرت از جمله گیاهان زراعی مهم به‌شمار می‌رود که پس از گندم و برنج، سومین محصول مهم در میان غلات است. توسعه کشت این محصول از نظر تأمین غذای دام، طیور و انسان از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به اهمیت استراتژیک ذرت و نیز عدم خودکفایی کشور در پاسخ به نیازهای مصرفی این محصول، لزوم پرداختن به فاکتورهای دخیل در تولید این محصول بسیار ضروری است (Zand and Laali Nia, 2010). کمبود آب با کیفیت، مهم‌ترین عامل تنش‌آفرین غیر زیستی در رسیدن به عملکرد پتانسیل گیاهان زراعی محسوب می‌شود (Jalali et al., 2017). با توجه به تغییر جدی در منابع آب با کیفیت، به‌نظر می‌رسد که تغییر در استراتژی‌های مناسب برای کاهش اختلاف عملکرد واقعی و پتانسیل عملکرد گیاهان زراعی در این مناطق لازم و ضروری باشد (Sasani et al., 2014; Salar Ashaeri et al., 2018). در همین راستا، ایران یکی از کشورهایی است که در معرض شور شدن منابع آب و خاک قرار دارد. بر طبق آمار فائو، ۲۵/۵ میلیون هکتار از زمین‌های ایران شور بوده و ۸/۵ میلیون هکتار آن نیز در کلاس بسیار شور قرار گرفته است (FAO, 2011). از طرفی کاهش شدید بارش در کشور طی سال‌های اخیر (به استثناء سال زراعی ۹۷) روند نگران‌کننده‌ای به خود گرفته که پیامد این امر در مناطقی مانند استان‌های کرمان، یزد، قزوین، تهران و خراسان رضوی برداشت و فشار بیش از حد جبران بر منابع آب زیر زمینی بوده که اخیراً به مرحله هشدار رسیده است. یکی از مشکلات مهم در ارتباط با برداشت بی‌رویه آب از سفره‌های زیرزمینی افت سطح آب و متراکم شدن لایه‌ها و رسوبات است. این پدیده سبب نشست سطح زمین (Land subsidence) به صورت ناگهانی (در سفره‌های ماسه‌ای) و یا به‌طور تدریجی (در سفره‌های رسی) می‌شود که این امر به‌صورت بالقوه می‌تواند مشکلات زیست محیطی دیگری را به‌دنبال داشته باشد. بنابراین مدیریت مصرف آب‌های شیرین در بخش کشاورزی و استفاده از منابع آب کم کیفیت و شور برای تولیدات کشاورزی امری ضروری است. لزوم اعمال مدیریت بهینه آب در مناطقی که کیفیت آب و خاک آنها چندان مطلوب نیست، نیازمند تجزیه و تحلیل حساسیت گیاه به شوری با استفاده از مدل‌های شبیه ساز است. به بیان دیگر با تجزیه و تحلیل کمی واکنش گیاه به شوری از طریق مدل‌های شبیه ساز، می‌توان مقادیر

متناهی از منابع آب شور و لب‌شور را برای دوره‌هایی از رشد که مقاومت گیاه به شوری نسبتاً بالاست همراه با حفظ سطح مطلوب عملکرد استفاده کرد (Asadi et al., 2013).

کمی‌سازی تأثیر فاکتورهای محیطی بر میزان عملکرد، به منظور برنامه‌ریزی و استفاده بهینه از منابع موجود از سالیان طولانی مورد توجه پژوهشگران بوده است. مطالعات متعددی تأثیر عوامل محیطی-اقلیمی بر تولید محصول را بررسی کرده‌اند (Saadat et al., 2005; Hosseini et al., 2015; Jalali et al., 2017). کمی‌سازی تأثیر عوامل اقلیمی و محیطی بر میزان عملکرد، از دو رویکرد کلی استفاده کرده‌اند. رویکرد اول مربوط به مدل‌های فرآیند پایه (process-based models) یا مدل‌های مکانیستک است که این مدل‌ها بر اساس قوانین فیزیکی و روابط ریاضی ارتباط بین عوامل محیطی و عملکرد بیان می‌کنند. دسته دوم مدل‌های آماری (Statistical models) هستند که به طور تجربی و بر مبنای مشاهدات گذشته، عملکرد را تخمین می‌زنند. مدل‌های فرآیندی به بررسی تأثیرات جزئی تک تک عوامل مؤثر در تولید محصول می‌پردازند لیکن مدل‌های آماری داده‌هایی را که در مقیاس‌های زمانی مختلف جمع‌آوری شده‌اند را در غالب تجزیه‌های رگرسیونی پردازش می‌کنند (Basso and Ritchie, 2012).

هرچند پژوهشگران مختلفی تأثیر تنش شوری بر عملکرد گیاهان زراعی را بررسی کرده‌اند لیکن واکنش گیاه به شوری در مراحل مختلف رشد کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از جمله پژوهش‌های انجام شده در ارتباط با واکنش گیاه به تنش شوری در مراحل مختلف رشد می‌توان به پژوهش‌های جلالی و همکاران (Jalali et al., 2010 a, b; Jalali and Homaei, 2010) و سعادت و همکاران (Saadat et al., 2005) بر سورگوم علوفه‌ای و کلزا اشاره کرد. در پژوهش انجام شده توسط جلالی و همکاران (Jalali et al., 2017) مدل‌های شبیه ساز عملکرد گندم دوروم در شرایط شور طی دوره رشد زایشی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که از بین مدل‌های برآزش داده شده مدل همایی و همکاران (۲۰۰۲) در مرحله ظهور سنبله از دقت بیشتری برخوردار بوده در حالی که در مرحله رسیدن مدل ماس و هافمن (۱۹۷۷) دارای اندک دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها بود.

از آنجایی که اکثر مدل‌های موجود که واکنش گیاهان به شوری را به صورت کمی بیان می‌کنند، شوری خاک را از آغاز تا پایان دوره رشد ثابت فرض می‌کنند، بنابراین می‌توان انتظار داشت که این مقادیر آستانه‌ی شوری که از این آزمایش‌ها به دست آمده، به طور کامل نمی‌تواند واکنش گیاه را در مقابل شوری تخمین بزند، بنابراین در این پژوهش سعی بر آن بوده که نحوه دقیق واکنش پارامترهای زراعی ذرت به تنش شوری طبیعی آب آبیاری بر اساس مدل‌های شبیه ساز کلان مورد بررسی قرار گیرد و در ادامه بتوان با تعیین پارامترهای مدل بهینه، اقدام به تخمین عملکرد گیاه ذرت در شرایط تنش نمود.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در سال زراعی ۹۷-۹۶ در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه شهید باهنر کرمان با موقعیت جغرافیایی عرض ۳۰ درجه شمالی و طول ۵۷ درجه شرقی با ارتفاع ۱۷۵۴ متر از سطح دریا انجام شد. رقم مورد استفاده در این پژوهش رقم هیبرید ذرت سینگل کراس ۷۰۴ (KSC 704) بوده که رقم غالب مورد استفاده در استان و به‌ویژه جنوب استان به‌شمار می‌رود.

با توجه به اینکه در این آزمایش، هدف اعمال تنش شوری از طریق آب آبیاری بود، بنابراین سعی شد از خاکی با درصد بالای شن استفاده شود تا آبشویی خاک با اعمال جزء آبشویی (Leaching Fraction) زیاد ($LF=0/5$) به راحتی امکان پذیر باشد. از این‌رو، نمونه خاکی با توزیع اندازه ذرات ۵۷ درصد شن، ۲۶ درصد رس و ۱۷ درصد سیلت از مزرعه دانشگاه شهید باهنر کرمان انتخاب و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن با روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد (جدول ۱).

در پژوهش انجام شده توسط اکبری قدسی و همکاران (Akbari Ghodsi *et al.*, 2011) که اثر تنش شوری بر تغییرات مورفولوژیک ژنوتیپ‌های گندم را بررسی کرده بودند، اثر سطوح شوری ایجاد شده با نمک‌های $NaCl+CaCl_2$ نشان داد که همه صفات به جز وزن ویژه برگ با افزایش شوری در ارقام مورد بررسی به طور چشم‌گیری کاهش یافت. عبدی (Abdi, 2000) در پژوهشی مقاومت به شوری را در سه گونه شبدر بررسی کرد. نتایج ایشان نشان داد که در غلظت‌های بالای نمک جوانه‌زنی بذرهاى شبدر به طور معنی‌داری کاهش یافت؛ همچنین تفاوت چشم‌گیری در جوانه‌زنی هر کدام از گونه‌ها مشاهده شد.

با توجه به محدودیت منابع آب شیرین در دسترس، لزوم انجام تحقیقات و امکان سنجی استفاده از آب شور در تولید ذرت بسیار مهم است. استان کرمان با داشتن اقلیم مناسب برای کشت ذرت، یکی از قطب‌های تولید این گیاه به شمار می‌آید. سطح زیر کشت ذرت در کل استان کرمان بالغ بر ۱۸ هزار و ۵۰۰ هکتار است و ذرت به دو صورت علوفه‌ای و دانه‌ای برداشت می‌شود. سطح زیر کشت ذرت دانه‌ای ۱۴ هزار هکتار بوده و پیش‌بینی می‌شود ۱۱۲ هزار تن ذرت دانه‌ای و بالغ بر ۱۸۰ هزار تن ذرت علوفه‌ای برداشت شود (Ahmadi *et al.*, 2016). دوره رشدی گیاه ذرت را می‌توان به دو دوره کلی رشد رویشی و رشد زایشی تقسیم کرد. دوره رشد زایشی، حیاتی‌ترین بخش زندگی گیاه می‌باشد. زیرا گیاهی که در این دوره تحت تنش قرار گیرد، با وجود داشتن ظاهری سالم، عملکرد چندانی نخواهد داشت (Jalali and Asadi, 2017).

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

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

Mg	Ca	Na	K	P	Clay	Silt	Sand	TNV [†]	OC [†]	ECe [†]	SAR [†]	pH
meq/lit			mg/kg		%					dS/m		
9.1	16	5.7	212.3	11	17	26	57	7.7	0.4	1.9	1.2	7.4

[†]: SAR, ECe, OC and TNV are sodium adsorption ratio, soil electrical conductivity of the saturation extract, organic carbon content and total neutralizing value, respectively.

مورد استفاده در جدول ۲ ارایه شده است. آب شور تهیه شده از دریاچه نوق رفسنجان برای تهیه سطوح شوری تیمارهای آزمایشی با آب معمولی رقیق شد. با توجه به اینکه در اکثر منابع، آستانه تحمل به شوری ذرت معادل

به‌منظور ایجاد شرایط واقعی رشد در خاک‌های شور، یک نمونه آب شور طبیعی از دریاچه نمک واقع در نوق رفسنجان با شوری ۴۲/۶ دسی‌زیمنس بر متر تهیه و به آزمایشگاه منتقل شد. نتایج تجزیه شیمیایی نمونه آب شور

اندام هوایی، ارتفاع نهایی بوته و عملکرد دانه به عنوان عملکرد نسبی در هر سطح شوری نسبت به شاهد (آب شهر) در نظر گرفته شد. بدین منظور در انتهای این مرحله رشدی، ارتفاع گیاه با استفاده از متر از محل طوقه برحسب سانتی‌متر اندازه‌گیری گردید. همچنین برای اندازه‌گیری وزن خشک اندام هوایی گیاه، پس از جدا کردن ساقه گیاهان از قسمت سطح خاک، بلافاصله ساقه‌های مربوط به هر گلدان توزین شد. سپس ساقه‌ها و ریشه‌های مربوط به هر تیمار را به‌طور جداگانه در دمای ۷۵ درجه سلسیوس در آون قرار داده و پس از ۴۸ ساعت، توزین نمونه‌ها انجام شد. توزین تمامی نمونه‌ها برحسب گرم و به‌وسیله ترازوی دیجیتال AND (مدل GF-600) با دقت ۰/۰۱ گرم صورت پذیرفت و در انتهای آزمایش، (آخرین مرحله رشدی یا بلوغ) بلال‌های هر گلدان وزن شدند.

$$LF = \frac{DWL}{WUL} \quad (1)$$

در این رابطه، LF جزء آبشویی، DWL ارتفاع آب زهکش‌شده از انتهای گلدان و WUL نیز ارتفاع آب اعمال‌شده برای رفع نیاز آبی گیاه و شستشوی نمک‌های اضافی است.

۱/۷ دسی‌زیمنس بر متر برای هدایت الکتریکی آب آبیاری بیان شده است (Blanco *et al.*, 2008; Maas, 1990). بنابراین تیمارهای مورد استفاده در این آزمایش در سه تکرار و شامل آب شهر (به عنوان شاهد) و تیمارهای ۱، ۲، ۴، ۶ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر بود. پس از آماده‌سازی گلدان‌ها، کاشت بذرها انجام شد. گلدان‌های هر مرحله رشدی تا قبل از رسیدن به مرحله زایشی، با آب غیرشور آبیاری شدند تا تنش ناشی از کاهش پتانسیل اسمزی در این دوره‌ها را نداشته باشند و سپس تیمارهای شوری اعمال‌شده و عملکرد نسبی هر مرحله نسبت به شاهد سنجیده شد. با توجه به دوره آبیاری گیاه ذرت که هر هفت روز یک‌بار بود، رطوبت گلدان‌های آزمایشی توسط دستگاه TDR مدل HD2 شرکت IMKO (۲۰۱۷) اندازه‌گیری شد. در هر نوبت آبیاری به هر گلدان به‌اندازه دو برابر میزان کمبود رطوبت تا ظرفیت مزرعه، آب‌داده شد تا هم نیاز آبشویی (LF=۰/۵) برطرف شده و هم نمک‌های اضافی شسته شوند. با در نظر داشتن رابطه جزء آبشویی (رابطه ۱)، با اعمال این جزء آبشویی، شوری عصاره خاک تا حد امکان به شوری آب آبیاری نزدیک می‌شد. به‌طور کلی سعی بر این بود در طول دوره آزمایش هیچ‌گونه تنش خشکی به تیمارها وارد نشود و بدین طریق از اثرات خشکی بر آزمایش جلوگیری شود. سه فاکتور رشدی وزن خشک

جدول ۲- برخی ویژگی‌های شیمیایی آب شور طبیعی دریاچه نمک نوق رفسنجان جهت تهیه تیمارهای شوری

Table 2. Some chemical characteristics of natural saline water

CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	Na	K	TDS	B	EC	SAR	pH
meq/lit								mg/lit		(dS/m)		
0.0	2.09	380.1	71.1	31.08	49.86	404.5	3.36	27678	6.84	42.6	63.6	8.2

از ریشه گیاه در واحد حجم خاک در زمان ($L^3 \cdot L^{-3} \cdot T^{-1}$) است.

به‌طور کلی در رویکرد مدل‌سازی مبتنی بر فرآیند برای بیان کمی S، مدل‌هایی وجود دارند که می‌توان آن‌ها را به دو گروه خرد (Microscopic Models) و کلان (Macroscopic Models) تقسیم کرد. رابطه (۳) شکل کلی مدل‌های خرد را نشان می‌دهد که نخستین بار توسط گاردنر (Gardner, 1960) ارائه شد:

$$S = \frac{\Delta_{qr}}{\Delta_z} = BLK(h - h_r - z) \quad (3)$$

با افزایش شوری، جذب آب در گیاه کاهش می‌یابد. بیان کمی جذب آب در گیاهان با استفاده از رابطه کلی جریان یا رابطه ریچاردز (Richards, 1931)، به‌صورت رابطه (۲) ارائه شود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(h) \frac{\partial h}{\partial z} + k(h) \right] - S \quad (2)$$

که در آن، θ رطوبت حجمی خاک ($L^3 \cdot L^{-3}$)، t زمان (T)، z عمق خاک (L)، k ضریب آبگذری غیراشباع خاک ($L \cdot T^{-1}$)، h پتانسیل ماتریک (L) و S مقدار آب جذب‌شده

شوری (h_o^*) هیچ‌گونه کاهشی در جذب آب پدید نمی‌آید، اما با افزایش h_o مقدار جذب به‌طور خطی کاهش می‌یابد:

$$\alpha(h_o) = 1 - \frac{a}{360}(h_o^* - h_o) \quad (7)$$

که در آن، a شیب خط یا مقدار کاهش عملکرد به ازای یک واحد افزایش شوری پس از آستانه کاهش است. از آنجا که منحنی دقیق پاسخ گیاه به شوری، شکلی سیگموییدی (و نه خطی) دارد، ون گنوختن و هافمن (van Genuchten and Hoffman, 1984) رابطه‌ای غیرخطی به‌صورت رابطه (۸) پیشنهاد کردند:

$$\alpha(h_o) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h_o}{h_{o50}}\right)^p} \quad (8)$$

در این رابطه، h_{o50} مقدار فشار اسمزی (L) است که در آن جذب آب ۵۰ درصد کاهش و یا عملکرد نسبی به نصف تقلیل می‌یابد که اصطلاحاً این مقدار تنش شوری را با EC50 نشان می‌دهند، p نیز ضریبی تجربی است که وابسته به گیاه، خاک و اقلیم است (Homaei and Feddes, 2002).

پژوهش‌های دیرکسن و همکاران (Dirksen *et al.*, 1993) نشان داد که جذب آب در گیاه تا رسیدن به شوری معینی (h_o^*) کاهش نمی‌یابد. به‌همین دلیل آن‌ها رابطه (۷) را نسبت به شوری حد آستانه (h_o^*) تعدیل و رابطه (۹) را پیشنهاد کردند:

$$\alpha(h_o) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h_o^* - h_o}{h_o^* - h_{o50}}\right)^p} \quad (9)$$

این رابطه نسبت به روابط قبلی با دقت بیشتری واکنش گیاه را به شوری برآورد می‌کند، اما مهم‌ترین محدودیت آن به‌دست آوردن h_{o50} است. همچنین، پارامتر p چه به‌صورت فیزیکی و چه به‌صورت تجربی در آن تعریف نشده است. در واقع p همانند h_o^* و h_{o50} پارامتری وابسته به شکل تابع است. همایی و همکاران (Homaei *et al.*, 2002a) با فرض اینکه p پارامتری وابسته به محصول، خاک و اقلیم است، رابطه زیر را برای به‌دست آوردن آن پیشنهاد کردند:

$$p = \frac{h_{o50}}{h_{o50} - h_o^*} \quad (10)$$

که در آن، B شاخص بدون بعد توزیع هندسی ریشه، L طول مشخصی از ریشه، K ضریب آبگذری غیراشباع خاک، h پتانسیل ماتریک خاک اطراف ریشه، qr شدت جذب آب توسط ریشه، h_r پتانسیل ماتریک سطح خارجی ریشه و Z عمق نفوذ ریشه است.

به‌دلیل فرضیات غیرواقعی و نیز عدم امکان دستیابی به پارامترهای مدل‌های خرد در شرایط فعلی، گروه دیگری از مدل‌ها طراحی و ارائه شدند که به مدل‌های کلان شهرت دارند. در مدل‌های کلان، مقدار آب جذب شده در گیاه با میزان تعرق واقعی (T_a) و در شرایطی که هیچ‌گونه محدودیت آبی در خاک وجود نداشته باشد، معادل تعرق پتانسیل (T_p) در نظر گرفته می‌شود و رابطه کلی آن به صورت رابطه (۴) است:

$$S = S_{max} = \frac{T_p}{Z_r} \quad (4)$$

که در آن، Z_r عمق توسعه ریشه (L) و T_p تعرق پتانسیل ($L.T^{-1}$) است.

اگر خاک نتواند نیاز آبی گیاه را برای حداکثر تعرق (T_p) فراهم کند، به اندازه α که به آن تابع کاهش (Reduction Function) گفته می‌شود، از تعرق کاسته می‌شود:

$$S = \alpha S_{max} = \alpha \frac{T_p}{Z_r} \quad (5)$$

معمولاً α تابعی از پتانسیل ماتریک خاک است و آن را به‌صورت αh نشان می‌دهند. رابطه (۵) شکل عمومی مدل‌های کلان است که توسط فدس و همکاران (Feddes *et al.*, 1978) ارائه شد. در شرایط شوری، α تابعی از پتانسیل اسمزی محلول خاک h_o است و مقدار جذب آب در گیاه در این شرایط به‌صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود:

$$S = \alpha(h_o) S_{max} = \alpha(h_o) \frac{T_p}{Z_r} \quad (6)$$

توابع پیشنهاد شده برای $\alpha(h_o)$ منحصر به روابطی هستند که ماس و هافمن (Maas and Hoffman, 1997)، ون گنوختن و هافمن (van Genuchten and Hoffman, 1984)، دیرکسن و همکاران (Dirksen *et al.*, 1993) و همایی و همکاران (Homaei *et al.*, 2002 a, b) ارائه داده‌اند و به‌شرح زیر می‌باشند. ماس و هافمن (Maas and Hoffman, 1997) تابعی خطی و دوتکه ارائه کردند که بر مبنای آن تا قبل از آستانه کاهش

$$E' = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{\sum_{i=1}^n |O_i - O'|} \quad (14)$$

$$d' = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O'| + |O_i - O'|)} \quad (15)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (16)$$

در این روابط، O_i مقادیر اندازه‌گیری شده، P_i مقادیر شبیه‌سازی شده، O' میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n تعداد زوج داده‌های اندازه‌گیری شده - برآورد شده عملکرد می‌باشد.

محدوده آماره E' از یک تا منفی بی‌نهایت است. E' برابر با یک، نشان‌دهنده برابری مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده بوده و هر چه مقدار آن از یک کم‌تر باشد، دقت مقادیر برآورد شده نیز کم‌تر است. محدوده d' از صفر تا یک است. هر چه مقدار d' بیش‌تر و به یک نزدیک‌تر باشد، به معنی نزدیک‌تر بودن مقادیر برآورد شده به مقادیر اندازه‌گیری شده است. CRM نیز گرایش مدل به تخمین بیش‌تر یا کم‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد، به طوری که به دست آوردن مقدار منفی برای CRM در یک مدل، تمایل مدل را برای بیش‌برآورد (Over-stimate) اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

ارتفاع اندام هوایی

عملکرد نسبی ذرت برای این فاکتور رشدی در واقع نسبت ارتفاع گیاه در سطوح مختلف شوری به ارتفاع گیاه در تیمار شاهد بود. اثر شوری بر ارتفاع نسبی گیاهان ذرت در شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که عملکرد نسبی گیاه تا شوری ۰/۸ دسی‌زیمنس بر متر کاهش نداشت و با افزایش شوری، مقدار عملکرد نسبی روندی کاهشی به خود گرفت. به عبارت دیگر، آستانه کاهش عملکرد ذرت بر اساس متغیر ارتفاع اندام هوایی، شوری ۰/۸ دسی‌زیمنس بر متر بود.

به دلیل اینکه مشکل به دست آوردن $h_{0.50}$ تا این مرحله نیز حل نشده باقی مانده بود، همایی و همکاران (Homaei *et al.*, 2002b) مقدار $h_{0.50}$ را با h_{0max} جایگزین و تابع خطی زیر (رابطه ۱۱) را پیشنهاد کردند که دارای دو آستانه کاهش است:

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \frac{1 - \alpha_0}{\alpha_0 [(h^* - h)/(h^* - h_{max})]^p}} \quad (11)$$

کاهش در مقدار α در شوری‌های بیشتر از (h_0^*) ادامه می‌یابد تا به یک شوری معین (EC_{max}) یا پتانسل اسمزی متناظر آن (h_{0max}) برسد. در شوری‌های بیش‌تر از h_{0max} ، افزایش شوری نمی‌تواند با همان روند قبلی در مقدار α کاهش ایجاد کند. این واقعیت نشان می‌دهد که در h_{0max} گیاه هنوز زنده است و در سطحی بسیار اندک به فعالیت‌های حیاتی خود ادامه می‌دهد. همایی و همکاران سپس مقدار p را با توجه به h_{0max} به صورت رابطه ۱۲ تعریف کردند:

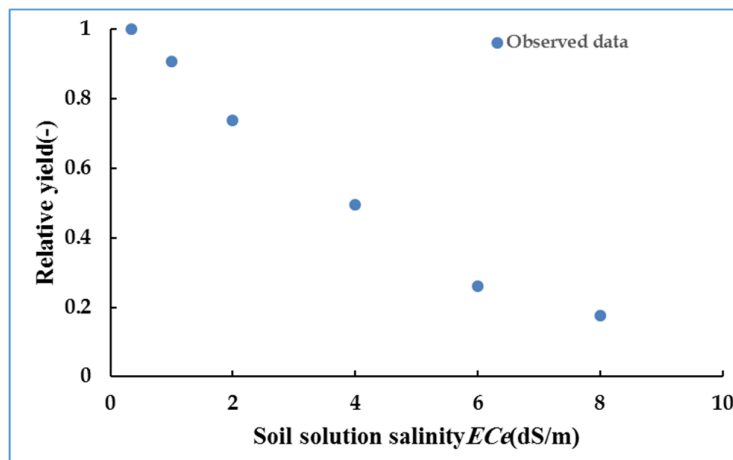
$$p = \frac{h_{0max}}{h_{0max} - h_0^*} \quad (12)$$

شاخص‌های ارزیابی مدل‌ها

برای مقایسه کمی توانمندی مدل‌های شبیه‌سازی در تخمین عملکرد نسبی ذرت در مرحله رشد زایشی از آماره‌های ضریب همبستگی (r)، ضریب کارایی اصلاح شده (E')، شاخص مطابقت اصلاح شده (d') و ضریب جرم باقیمانده (CRM) استفاده شد (Moriassi *et al.*, 2007; Jalali *et al.*, 2017). بیان ریاضی این آماره‌ها به صورت زیر است:

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n P_i O_i - \sum_{i=1}^n P_i \sum_{i=1}^n O_i}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n P_i^2 - (\sum_{i=1}^n P_i)^2][n \sum_{i=1}^n O_i^2 - (\sum_{i=1}^n O_i)^2]}} \quad (13)$$

از آنجایی که ضریب همبستگی نسبی فقط همبستگی داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده را تعیین می‌کند و نمی‌تواند اختلاف جفت داده‌ها را به صورت قطعی محاسبه کند، از این‌رو به منظور اجتناب از خطاهای سیستماتیک، از شاخص‌های آماری ضریب کارایی اصلاح شده (E')، شاخص مطابقت اصلاح شده (d') و ضریب جرم باقیمانده (CRM) به صورت زیر استفاده شد:



شکل ۱- اثر شوری بر ارتفاع نسبی بوته‌های ذرت در مرحله رشد زایشی
Figure 1. The effect of salinity on relative height of maize plants at reproductive growth stage

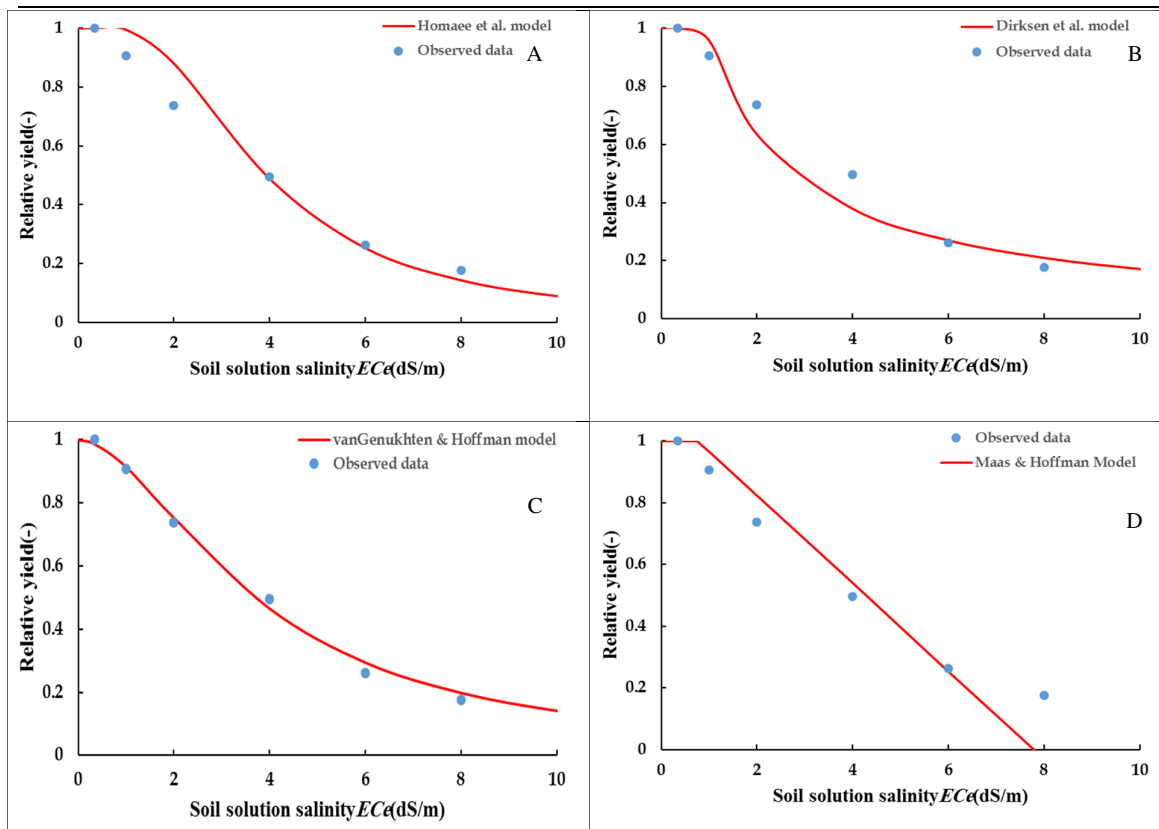
همچنین، نتایج جدول ۴ برای تعیین دقیق‌ترین مدل به‌خوبی نشان می‌دهد که مدل ونگنوختن و هافمن با داشتن مقادیر $0/91$ و $0/87$ به‌ترتیب برای شاخص‌های d' و E' بیش‌ترین دقت را در بین مدل‌های چهارگانه در ارزیابی تخمین‌های خود داشت و پس از آن، مدل غیرخطی همایی و همکاران نیز توانست تخمین‌های قابل قبولی در این مرحله داشته باشد. نکته قابل توجه دیگر، کم‌برآورد کردن تخمین‌های صورت گرفته توسط مدل دیرکسن و همکاران ($CRM=+0/25$) است، در حالی که سه مدل دیگر با دارا بودن مقادیر منفی برای آماره CRM ، تا حدی در تخمین‌های خود بیش‌برآورد داشتند. با در نظر گرفتن این شاخص‌های آماری، در این مرحله مدل ونگنوختن و هافمن با داشتن بیش‌ترین دقت و کم‌ترین خطا، به‌عنوان مدل بهینه در تخمین و شبیه‌سازی عملکرد گیاه ذرت بر اساس متغیر ارتفاع نهایی بوته شناخته شد.

وزن خشک اندام هوایی

اثر شوری بر وزن خشک اندام هوایی بوته‌های ذرت در مرحله رشد زایشی در شکل ۳ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، آستانه کاهش عملکرد ذرت بر اساس متغیر وزن خشک اندام هوایی حدود یک دسی‌زیمنس بر متر بود. به‌همین ترتیب، برازش مدل‌های چهارگانه مورد مطالعه در این پژوهش بر داده‌های اندازه‌گیری شده برای این متغیر در شکل ۴ نشان داده شده است.

به‌منظور تعیین میزان دقت چهار مدل شبیه‌سازی استفاده شده در این تحقیق در تخمین میزان عملکرد نسبی ذرت، در این مرحله با برازش مدل‌های مختلف بر داده‌های اندازه‌گیری شده، پارامترهای مختلف هر یک از مدل‌ها برآورد و در جدول ۳ ارائه شد. در این جدول، EC_p ، EC_m و P_p به‌ترتیب نشان‌دهنده آستانه کاهش عملکرد اندازه‌گیری شده، آستانه کاهش عملکرد برآورد شده و ضریب بدون بعد شکل در مدل‌های مختلف هستند. ارتباط بین عملکرد نسبی اندازه‌گیری شده و برآورد شده گیاه ذرت با استفاده از مدل‌های مختلف نیز در شکل ۲ ارائه شده است. با توجه به این شکل، به‌راحتی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدل‌های غیرخطی (به‌ویژه مدل ونگنوختن و هافمن و مدل همایی و همکاران) نسبت به مدل خطی ماس و هافمن، برازش بهتری بر داده‌های اندازه‌گیری شده داشتند.

برای مقایسه مدل‌های مختلف، مقادیر آماره‌های محاسباتی شامل ضریب همبستگی نسبی (r)، ضریب کارایی اصلاح شده (E')، شاخص مطابقت اصلاح شده (d') و ضریب جرم باقیمانده (CRM) محاسبه و در جدول ۴ ارائه شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مدل غیرخطی و بدون آستانه ونگنوختن و هافمن واجد بیش‌ترین ضریب همبستگی ($r=0/98$) بود و پس از آن مدل همایی و همکاران با داشتن همبستگی بالا ($r=0/96$) بیش‌ترین تطابق بین داده‌های تخمینی و مشاهداتی را ارائه داد.



شکل ۲- عملکرد نسبی اندازه‌گیری شده و برآورد شده گیاه ذرت با استفاده از مدل‌های همایی و همکاران (A)، دیرکسن و همکاران (B)، ونگنوختن و هافمن (C) و ماس و هافمن (D)

Figure 2. Measured and predicted relative yield of maize by Homaei *et al.* (A), Dirksen *et al.* (B), van Genuchten and Hoffman (C) and Maas and Hoffman (D) models

جدول ۳- پارامترهای برآورد شده در مدل‌های مختلف با استفاده از روابط ۷، ۸، ۹ و ۱۱ برای ارتفاع اندام هوایی

Table 3. Predicted parameters of different models using the equations of 7, 8, 9 and 11 for relative plant height

Model	EC_m	EC_p	EC_{50}	EC_{max}	Alpha	α	P_p
Homaei <i>et al.</i>	0.8	0.7	-	7.4	0.16	-	2.18
Dirksen <i>et al.</i>	0.8	0.91	2.8	-	-	-	0.99
van Genuchten and Hoffman	0.8	-	3.7	-	-	-	1.8
Maas and Hoffman	0.8	0.75	-	-	-	-0.14	-

جدول ۴- آماره‌های محاسبه شده جهت مقایسه مدل‌های مختلف فرآیندی- ماکروسکوپی برای ارتفاع اندام هوایی

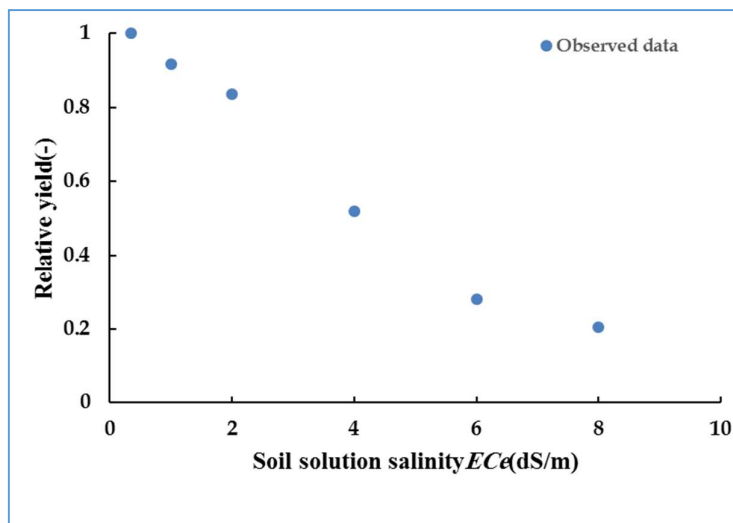
Table 4. Calculated statistics to compare different macroscopic-process models for relative plant height

Model	E'	d'	CRM	r
Homaei <i>et al.</i>	0.79	0.89	-0.15	0.96
Dirksen <i>et al.</i>	0.71	0.86	+0.25	0.94
van Genuchten and Hoffman	0.87	0.91	-0.074	0.98
Maas and Hoffman	0.69	0.83	-0.21	0.94

و نگونختن و هافمن محاسبه شد که نشان‌دهنده کارایی نسبی بیش‌تر مدل همایی و همکاران نسبت به مدل و نگونختن و هافمن است.

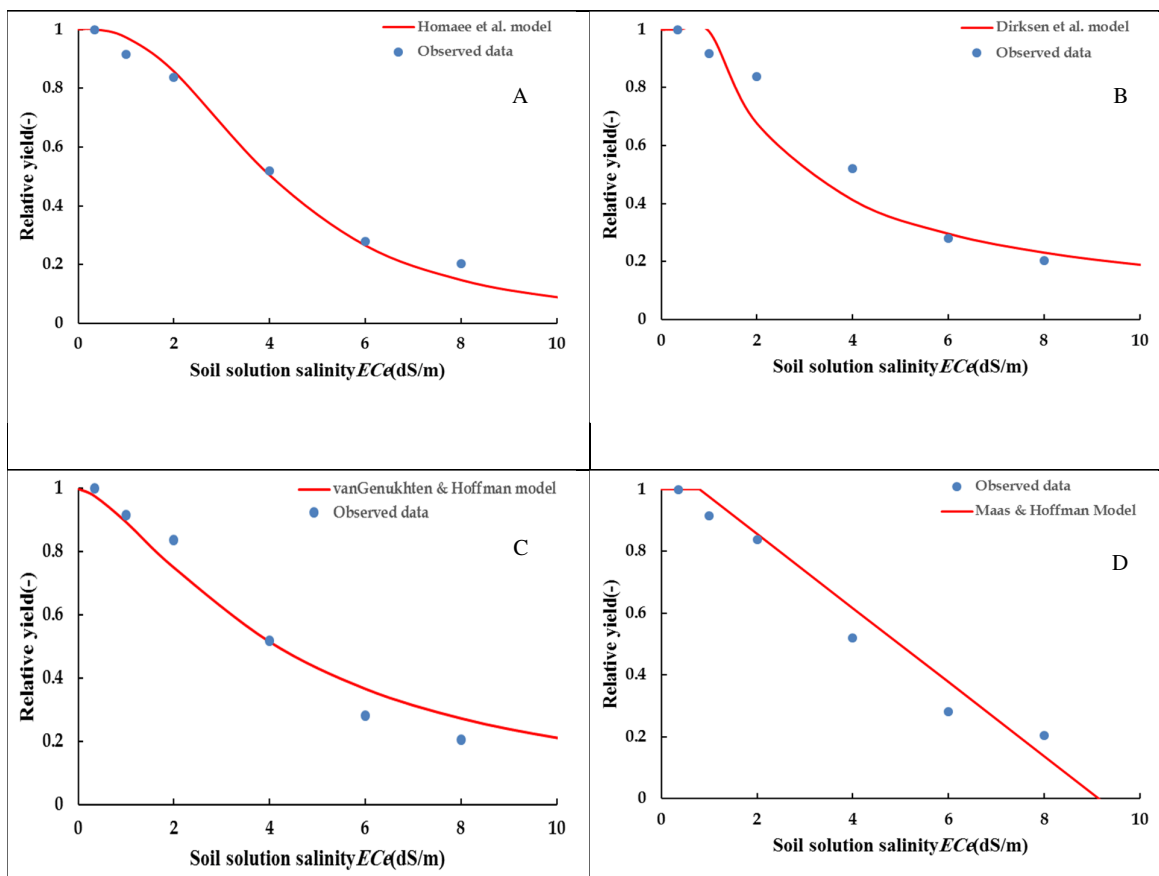
از دیدگاه کاربردی از بین دو مدل همایی و همکاران و مدل و نگونختن و هافمن، مدلی قابل توصیه و کاربرد است که پارامترهای آن کاملاً تعریف شده و مشخص باشند. از آنجا که در مدل و نگونختن و هافمن، پارامتر p و EC_{50} به‌طور روشن و مشخصی تعریف نشده‌اند و قابل اندازه‌گیری مستقیم نیستند و همچنین با در نظر گرفتن کارایی نسبی بهتر مدل همایی و همکاران (بر اساس شاخص‌های آماری آرایه شده در جدول ۶) از بین مدل‌های مورد استفاده، مدل غیرخطی همایی و همکاران، مدل مناسب‌تری برای این مرحله شناخته شد. در پژوهشی که توسط جلالی و اسدی کپورچال (Jalali and Asadi, 2017) به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد گندم دوروم در شرایط تنش شوری بر اساس مدل‌های کلان انجام شد نیز مدل همایی و همکاران دقیق‌ترین مدل برای شبیه‌سازی عملکرد گندم دوروم معرفی شد.

پارامترهای برآوردشده توسط هر یک از مدل‌های چهارگانه در جدول ۵ و آماره‌های محاسبه شده جهت مقایسه این مدل‌ها و تعیین دقیق‌ترین مدل در جدول ۶ آرایه شده است. همان‌طور که شکل ۴ و ضرایب همبستگی گزارش شده در جدول ۶ به‌روشنی نشان می‌دهند، مدل‌های غیرخطی نسبت به مدل خطی و ساده ماس و هافمن، برازش بهتری بر داده‌های اندازه‌گیری شده داشتند و از دقت بیش‌تری در شبیه‌سازی میزان نسبی وزن خشک اندام هوایی ذرت برخوردار بودند. بنابراین، برای انتخاب مناسب‌ترین مدل برآوردی در این مرحله، با کمک آماره‌های ذکر شده (جدول ۶) بهترین مدل تعیین شد. ضریب همبستگی هر دو مدل همایی و همکاران (Homaee *et al.* 2002) و مدل و نگونختن و هافمن (van Genuchten and Hoffman, 1984) یکسان و برابر با ۰/۹۵ به‌دست آمد، اما در ادامه مقدار عددی شاخص‌های ضریب کارایی اصلاح شده (E')، شاخص مطابقت اصلاح شده (d') برای مدل همایی و همکاران اندکی بیش‌تر از مقادیر همین شاخص‌ها برای مدل



شکل ۳- اثر شوری بر وزن خشک اندام هوایی بوته‌های ذرت در مرحله رشد زایشی

Figure 3. The effect of salinity on shoot dry weight of maize plants at reproductive growth stage



شکل ۴- عملکرد نسبی اندازه‌گیری شده و برآورد شده گیاه ذرت به کمک مدل‌های همایی و همکاران (A)، دیرکسن و همکاران (B)، ونگنوختن و هافمن (C) و ماس و هافمن (D)

Figure 4. Measured and predicted relative yield of Maize by Homaee *et al.* (A), Dirksen *et al.* (B), van Genuchten and Hoffman (C) and Maas and Hoffman (D) models

جدول ۵- پارامترهای برآورد شده در مدل‌های مختلف با استفاده از روابط ۷، ۸، ۹ و ۱۱ برای وزن خشک اندام هوایی

Table 5. Predicted parameters of different models using the equations of 7, 8, 9 and 11 for shoot dry weight

Model	EC_m	EC_p	EC_{50}	EC_{max}	Alpha	α	P_p
Homaee <i>et al.</i>	1	0.8	-	6.4	0.15	-	1.4
Dirksen <i>et al.</i>	1	0.8	3	-	-	-	1.04
van Genuchten and Hoffman	1	-	4.17	-	-	-	1.5
Maas and Hoffman	1	0.8	-	-	-	-0.12	-

جدول ۶- آماره‌های محاسبه شده جهت مقایسه مدل‌های مختلف فرآیندی- ماکروسکوپی برای وزن خشک اندام هوایی

Table 6. Calculated statistics to compare different macroscopic-process models for shoot dry weight

Model	E'	d'	CRM	r
Homaee <i>et al.</i>	0.86	0.90	-0.06	0.97
Dirksen <i>et al.</i>	0.78	0.86	+0.15	0.94
van Genuchten and Hoffman	0.84	0.89	+0.09	0.97
Maas and Hoffman	0.73	0.84	-0.147	0.94

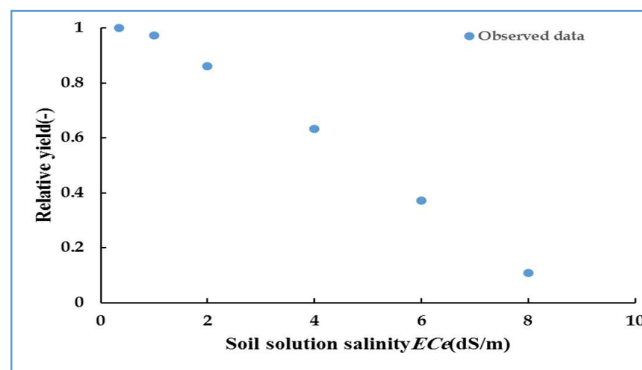
عملکرد دانه

نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد تیمارهای شوری اثر معنی‌داری بر عملکرد نسبی گیاه ذرت در مرحله رشد زایشی داشت. مدل‌سازی عملکرد گیاه در مرحله رشد زایشی برای متغیرهای ارتفاع اندام هوایی، وزن خشک اندام هوایی و عملکرد نهایی دانه با استفاده از مدل‌های مختلف نشان داد که این مدل‌ها به‌خوبی قادر به شبیه‌سازی عملکرد نسبی ذرت تحت شرایط تنش شوری بودند و در سطح قابل قبولی توانستند عملکرد گیاه ذرت را پیش‌بینی کنند. در بین مدل‌های ارزیابی شده، مدل غیرخطی و نگونوختن و هافمن برآزش بهتری بر داده‌های اندازه‌گیری شده متغیر ارتفاع نهایی گیاه داشت. به‌همین ترتیب، مدل همایی و همکاران و مدل خطی ماس و هافمن، دقیق‌ترین مدل برای ارزیابی و پیش‌بینی عملکرد متغیرهای وزن خشک اندام هوایی و وزن نهایی دانه بودند. همچنین نتایج نشان داد که آستانه کاهش عملکرد اندازه‌گیری شده در شرایط شوری ثابت نیست و بسته به مرحله مورد بررسی تغییر می‌کند. برای متغیر ارتفاع نهایی گیاه، حد آستانه تحمل گیاه به شوری، $0/8$ دسی‌زیمنس بر متر بود، ولی آستانه کاهش عملکرد برای متغیر وزن خشک اندام هوایی و مرحله بلوغ (عملکرد دانه نسبی) روند افزایشی داشت و میزان آن به‌ترتیب به یک و $1/5$ دسی‌زیمنس بر متر رسید. از مجموع صفات مورد بررسی، مقاوم‌ترین متغیر نسبت به تنش شوری، وزن دانه ذرت بود. با استفاده از یافته‌های این تحقیق می‌توان برنامه‌هایی بهینه برای مدیریت استفاده از آب‌های شور در کشاورزی و به‌ویژه در دوره‌هایی که گیاه حساسیت کم‌تری نسبت به تنش شوری دارد، ارائه کرد.

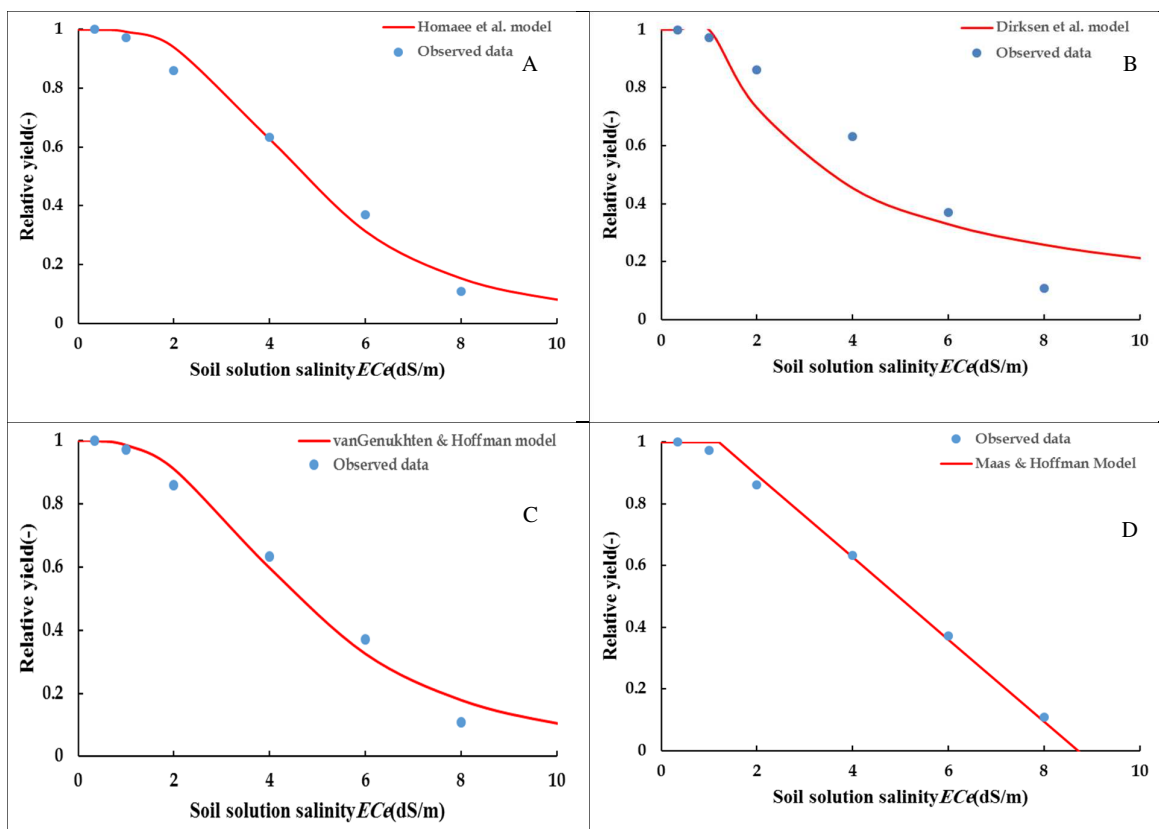
اثر شوری بر عملکرد دانه نسبی ذرت در شکل ۵ ارایه شده است. نتایج نشان داد که عملکرد دانه نسبی ذرت تا شوری حدود $1/5$ دسی‌زیمنس بر متر کاهش نداشت، اما از آن پس با افزایش شوری محلول خاک، عملکرد گیاه کاهش یافت و در شوری حدود $4/5$ دسی‌زیمنس بر متر به نصف تقلیل یافت. نکته قابل توجه در این مرحله، افزایش آستانه کاهش عملکرد به اندازه نیم واحد نسبت به مرحله قبلی بود. به عبارت دیگر با افزایش سن گیاه و در دوران انتهایی رشد، از حساسیت گیاه به تنش شوری کاسته شد (شکل ۵). شکل ۶، برآزش مدل‌های چهارگانه مورد مطالعه را بر داده‌های عملکرد دانه نسبی گیاه ذرت در آخرین مرحله رشدی نشان می‌دهد. پارامترهای برآوردشده توسط هر کدام از این مدل‌ها نیز در جدول ۷ ارایه شده است. بر خلاف مراحل قبلی، در این مرحله مدل خطی ماس و هافمن توانست با دقت قابل قبولی میزان عملکرد نسبی وزن دانه را شبیه‌سازی کند که در واقع اشاره به عدم پیچیدگی فرآیند رشد در این مرحله نسبت به مراحل قبلی رشد دارد.

آماره‌های محاسبه شده جهت تعیین کارآمدی مدل‌های چهارگانه در جدول ۸ ارایه شده است. با توجه به نتایج موجود در این جدول کاملاً پیداست که در این مرحله، مدل خطی ماس و هافمن با دقت بسیار بالایی توانست از عهده تخمین عملکرد برآید. هر چند که مدل همایی و همکاران و مدل و نگونوختن و هافمن نیز قابل پذیرش هستند، اما از آنجایی که مدل ماس و هافمن از سادگی و سهولت کار بیش‌تری نسبت به مدل‌های پیچیده غیرخطی برخوردار است، بنابراین در این مرحله مدل خطی ماس و هافمن به‌عنوان مدل مناسب انتخاب شد.



شکل ۵- اثر شوری بر عملکرد دانه نسبی ذرت در دوره رشد زایشی

Figure 5. The effect of salinity on relative grain yield of maize plant at reproductive growth stage



شکل ۶- عملکرد دانه نسبی اندازه‌گیری شده و برآورد شده ذرت به کمک مدل‌های همایی و همکاران (A)، دیرکسن و همکاران (B)، ونگنوختن و هافمن (C) و ماس و هافمن (D)

Figure 6. Measured and predicted relative yield of maize by Homaee *et al.* (A), Dirksen *et al.* (B), van Genuchten and Hoffman (C) and Maas and Hoffman (D) models

جدول ۷- پارامترهای برآورد شده در مدل‌های مختلف با استفاده از روابط ۷، ۸، ۹ و ۱۱ برای عملکرد دانه

Table 7. Predicted parameters of different models using the equations of 7, 8, 9 and 11 for grain yield

Model	EC_m	EC_p	EC_{50}	EC_{max}	Alpha	α	P_p
Homaee <i>et al.</i>	1.5	1.2	-	8	0.15	-	3.2
Dirksen <i>et al.</i>	1.5	1.11	3.37	-	-	-	1.07
van Genuchten and Hoffman	1.5	-	4.6	-	-	-	2.77
Maas and Hoffman	1.5	1.2	-	-	-	-0.13	-

جدول ۸- آماره‌های محاسبه شده جهت مقایسه مدل‌های مختلف فرآیندی- ماکروسکوپی برای عملکرد دانه ذرت

Table 8. Calculated statistics to compare different macroscopic-process models for relative grain yield of maize

Model	E'	d'	CRM	r
Homaee <i>et al.</i>	0.93	0.95	-0.09	0.98
Dirksen <i>et al.</i>	0.81	0.86	+0.174	0.97
van Genuchten and Hoffman	0.94	0.95	-0.07	0.98
Maas and Hoffman	0.94	0.96	-0.047	0.99

References

- Abdi, N. 2000.** Effect of salinity on germination of three species of clover. M. Sc. Dissertation, University of Tehran, Iran. (In Persian).
- Ahmadi, K., Gholizadeh, H. A., Ebadzadeh, H. R., Hoseinpour, R., Abdshah, H., Kazemian, A. and Raffee, M. 2016.** Agricultural statistics of cropping year 2015. Volume 1: Crop plants. Department of Planning and Budget, Office of Statistics and Information, Ministry of Agriculture, Tehran, Iran. (In Persian)
- Akbari Ghodsi, E., Izadi-Darbandi, A., Borzouei, A. and Majdabadi, A. 2011.** Evaluation of morphological changes in some wheat genotypes under salt stress. **Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture** 1 (4): 71-83. (In Persian with English Abstract).
- Asadi Kapourchal, S., Homae, M. and Pazira, E. 2013.** Modeling leaching requirement for desalinization of saline soils. **Journal of Water and Soil Resources Conservation** 2 (2): 65-84. (In Persian with English Abstract).
- Basso, B. and Ritchie, J. T. 2012.** Assessing the impact of management strategies on water use efficiency using soil-plant-atmosphere models. **Vadose Zone Journal** 11 (3): vzj2011.0173.
- Blanco, F. F., Folegatti, M. V., Gheyi, H. R. and Fernandes, P. D. 2008.** Growth and yield of corn irrigated with saline water. **Scientia Agricola** 65 (6): 574-580.
- Dirksen, C., Kool, J. B., Koorevaar, P. and van Genuchten, M. Th. 1993.** HYSWASOR-Simulation model of hysteretic water and solute transport in the root zone. In: Russo, D. and Dagan, G. (Eds.). Water flow and solute transport in soils. Springer Verlag, New York. pp: 99-122.
- FAO. 2011.** Food and Agriculture Organization. Looking ahead in world food and agriculture. Perspectives to 2050, by P. Conforti. Rome, Italy. www.fao.org/docrep/014/i2280e/i2280e00.htm.
- Feddes, R. A., Kowalik, P. J. and Zarandy, H. 1978.** Simulation of field water use and crop yield. Wageningen, The Netherlands.
- Gardner, W. R. 1960.** Dynamic aspects of water availability to plants. **Soil Science** 89: 63-73.
- Grieve, C. M., Grattan, S. R. and Maas, E. V. 2012.** Plant salt tolerance. In: Wallender, W.W. and Tanji, K. K. (Eds.). ASCE Manual and Reports on Engineering Practice, No. 71. Agricultural Salinity Assessment and Management (2nd Edition). ASCE, Reston, VA. Chapter 13. pp: 405-459. https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/20360500/pdf_pubs/P2246.pdf
- 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 (2): 89-109.
- Homae, M. and Feddes, R. A. 2002.** Modeling the sink term under variable soil water osmotic heads. In: Hassanizadeh, S. M., Schotting, R. J., Gray, W. G. and Pinder, G. F. (Eds.). Proceedings of the XIVth International Conference on Computational Methods in Water Resources (CMWR XIV). Vol. 47. Elsevier Science B.V., The Netherlands. pp: 17-24.
- Homae, M., Feddes, R. A. and Dirksen, C. 2002b.** Simulation of root water uptake. III. Non-uniform transient combined salinity and water stress. **Agricultural Water Management** 57 (2): 127-144.
- Jalali, V. R. and Asadi Kapourchal, S. 2017.** Simulating durum wheat (*Triticum turgidum* L.) response to root zone salinity based on statistics and macroscopic models. **Journal of Agroecology** 9 (2): 520-534. (In Persian with English Abstract).
- Jalali, V. R., Asadi Kapourchal, S. and Homae, M. 2017.** Evaluating performance of macroscopic water uptake models at productive growth stages of durum wheat under saline conditions. **Agricultural Water Management** 180: 13-21.
- Jalali, V. R. and Homae, M. 2010.** Modeling the effect of salinity application time of root zone on yield of canola (*Brassica napus* L.). **Journal of Crop Improvement** 12 (1): 29-40. (In Persian with English Abstract).
- Jalali, V. R., Homae, M. and Mirnia, S. Kh. 2008a.** Modeling canola response to salinity on vegetative growth stages. **Journal of Agricultural Engineering Research** 8 (4): 95-112. (In Persian with English Abstract).
- Jalali, V. R., Homae, M. and Mirnia, S. Kh. 2008b.** Modeling canola response to salinity in productive growth stages. **Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources (Water and Soil Science)** 12 (44): 111-121. (In Persian with English Abstract).
- Hosseini, S., Jalali, V. R. and Homae, M. 2015.** Macroscopic simulation of durum wheat response to salinity on vegetative growth stages. **Cereal Research** 4 (4): 319-331. (In Persian with English Abstract).

- Maas, E. V. 1990.** Crop salt tolerance. In: Tanji, K. K. (Ed.). Agricultural salinity assessment and management. Vol. 71. American Society of Civil Engineers, New York. pp: 262-304.
- Maas, E. V. and Hoffman, G. J. 1977.** Crop salt tolerance-Current assessment. **Journal of the Irrigation and Drainage Division** 103: 115-134.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D. and Veith, T. L. 2007.** Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE** 50 (3): 885-900.
- Richards, L. A. 1931.** Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics* 1: 318-333.
- Saadat, S., Homaei, M. and Liaghat, A. M. 2005.** Effect of soil solution salinity on the germination and seedling growth of sorghum plant. **Iranian Journal of Soil and Water Sciences** 19 (2): 243-254. (In Persian with English Abstract).
- Salar Ashaeri, M., Khaledian, M. R., Kavousi Kalashomi, M. and Rezaei, M. 2018.** Determination of irrigation water economic value using production function in paddy fields categorized with cluster analysis method in Sefidroud irrigation and drainage network. **Cereal Research** 8 (3): 277-289. (In Persian with English Abstract).
- Sasani, S., Jahansooz, M. R. and Ahmadi, A. 2014.** The effects of deficit irrigation on water use efficiency, yield and quality of forage pearl millet. Proceedings of the 13th International Crop Science Congress. Sept. 4-7, 2014, Karaj, Iran. (In Persian).
- van Genuchten, M. Th. and Hoffman, G. J. 1984.** Analysis of crop salt tolerance data. In: Shainberg, I. and Shalhevet, J. (Eds.). Soil salinity under irrigation process and management. Ecological Studies 51. Springer-Verlag, New York. pp: 258-271.
- Zand, B. and Laali Nia, A. 2010.** Cereal crops. Payam-e-Noor Publication. (In Persian).



The effects of salinity stress on maize yield based on macroscopic production functions at reproductive growth stage

Vahidreza Jalali^{1,2*} and Safoora Asadi Kapourchal³

Received: August 24, 2019

Accepted: November 9, 2019

Abstract

Maize in response to salinity stress exhibits different responses during different growth stages and reproductive growth stage is the most sensitive stage of plant growth. The objective of the present study was to evaluate the ability of salinity simulator models to estimate maize (SC704) yield, during reproductive growth stage. Process-physical models including Maas and Hoffman, van Genuchten and Hoffman, Dirksen et al. and Homaei et al. models were used to access this objective. In order to create real growth conditions in saline soils, natural saline water of Nough lake in Rafsanjan, Kerman province, Iran, with electrical conductivity of 42.6 dS.m^{-1} , was used and diluted with normal fresh water for preparation of salinity treatments studied in this experiment. Treatments used in this study were five salinity levels of 1, 2, 4, 6 and 8 dS/m with a non-saline water (as check treatment) that were studied in three replications. The results of modified efficiency coefficient (E'), modified agreement index (d') and coefficient of residual mass (CRM) statistics showed that the van Genuchten and Hoffman model with the highest accuracy ($E'=0.87$, $d'=0.91$) was the most accurate model for shoot height, while for shoot dry weight, the Nonlinear model of Homaei et al. (with the accuracy of $E'=0.86$ and $d'=0.90$) and for final grain yield, the Maas and Hoffman model (with the accuracy of $E'=0.94$ and $d'=0.96$), had the most accuracy and the best estimate. In total, the results of this study showed that salinity simulation models had good ability to estimate maize yield under salinity stress and better management of allocation of low quality water resources in different stages of plant growth. In other words, the four models of Maas and Hoffman, van Genuchten and Hoffman, Dirksen et al. and Homaei et al. can be effective tools in using saline water sources with varying degrees of salinity to achieve optimal maize production. Therefore, by precisely determining the optimal model for each growth stage and accepting the risk of yield loss due to salinity of irrigation water, low-quality water resources can also be considerably utilized in maize yield production.

Keywords: Abiotic stress, Agreement index, Simulation, Yield decrease

1. Assoc. Prof., Research and Technology Institute of Plant Production (RTIPP), Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

2. Assoc. Prof., Higher Education Complex of Shirvan, Shirvan, Iran

3. Assist. Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

* Corresponding author: v.jalali@uk.ac.ir