

## شبیه‌سازی عملکرد گندم دوروم (*Triticum turgidum* L.) در شرایط تنش شوری بر اساس مدل‌های آماری و مدل‌های کلان

وحیدرضا جلالی<sup>۱\*</sup> و صفورا اسدی کپورچال<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۹/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۲۵

جلالی، و.ر.، و اسدی کپورچال، ص. ۱۳۹۶. شبیه‌سازی عملکرد گندم دوروم (*Triticum turgidum* L.) در شرایط تنش شوری بر اساس مدل‌های آماری و مدل‌های کلان. بوم‌شناسی کشاورزی، ۹(۲): ۵۳۴-۵۲۰.

### چکیده

در مناطق خشک و نیمه‌خشک کمبود آب به عنوان عامل اصلی و شوری خاک عامل ثانویه کاهش رشد گیاه و عملکرد دانه به شمار می‌رود. بنابراین، برای استفاده از منابع آب‌های کم کیفیت و لب‌شور، باید تجزیه و تحلیل کمی واکنش گیاهان این مناطق نسبت به تنش شوری، توسط مدل‌های شبیه‌ساز انجام شود. در این پژوهش، دو رویکرد کلی شبیه‌سازی شامل مدل‌های فرآیندی-فیزیکی و آماری-تجربی مورد بررسی قرار گرفت. بدین ترتیب که برای کمی کردن اثر شوری بر عملکرد نسبی بذر گندم دوروم (*Triticum turgidum* L.) (رقم به‌رنگ) در مقادیر مختلف شوری خاک، از مدل‌های فرآیندی-فیزیکی شامل مدل ماس و هافمن، ون گنوختن و هافمن، دیرکسن و همکاران و همایی و همکاران و همچنین مدل‌های آماری-تجربی شامل تابع اصلاح شده گومپرتز، تابع نمایی دوگانه و تابع اصلاح شده ویبول استفاده گردید. گیاهانی که با آب غیر شور آبیاری شده بودند به عنوان تیمار بهینه در نظر گرفته شدند و عملکرد مطلق سایر بوته‌ها نسبت به عملکرد در این تیمار بهینه سنجیده شد. پس از برداشت بوته‌ها، وزن دانه در هر سطح شوری ثبت گردید. مقایسه کارایی نسبی مدل‌ها بر اساس شاخص‌های آماری ضریب کارایی اصلاح شده و شاخص مطابقت اصلاح شده نشان داد که در بین مدل‌های آماری-تجربی، تابع اصلاح شده گومپرتز بیشترین دقت را داشته‌اند. بررسی تطبیقی تمام مدل‌ها بر اساس شاخص‌های آماری فوق نشان داد که مدل همایی و همکاران دقیق‌ترین مدل برای شبیه‌سازی عملکرد گندم دوروم بوده است. همچنین، پارامترهای معادله همایی و همکاران از لحاظ فیزیکی دارای مفهوم بوده و کاملاً تعریف شده و به راحتی قابل اندازه‌گیری می‌باشد، در حالی که در مدل‌های آماری-تجربی مقادیر پارامترهای هر معادله فاقد مفهوم بیوفیزیکی بوده و مقادیر مطلق هر پارامتر هیچ‌گونه اطلاعاتی از وضعیت رشدی گیاه بیان نمی‌کند. بنابراین، در این پژوهش مدل همایی و همکاران به عنوان مدل بهینه برگزیده شد.

**واژه‌های کلیدی:** آب شور، تابع اصلاح شده گومپرتز، تنش محیطی، شبیه‌سازی

### مقدمه

گرفته است (FAO, 2010). از طرفی کاهش شدید بارش در کشور در سال‌های اخیر روند نگران‌کننده‌ای به خود گرفته، به طوری که بر اساس آمار وزارت نیرو حجم کل ریزش‌های جوی مهر ماه سال آبی ۹۳-۱۳۹۲ معادل ۴/۷ میلی‌متر بوده که این مقدار در مقایسه با میانگین دوره مشابه ۴۵ ساله (۷ میلی‌متر) ۳۳ درصد کاهش و در مقایسه با دوره مشابه سال گذشته (۶/۲ میلی‌متر) ۲۴ درصد کاهش نشان می‌دهد (IWRMC, 2015). پیامد این امر در مناطقی مانند استان‌های کرمان، قزوین، تهران و خراسان رضوی برداشت و فشار

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 اراضی ایران شور بوده و ۸/۵ میلیون هکتار آن نیز در کلاس بسیار شور قرار

۱ و ۲- به ترتیب استادیار، گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان و استادیار، گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

(Email: v.jalali@uk.ac.ir)

DOI: 10.22067/jag.v9i2.51978

\*- نویسنده مسئول:

پلی‌اتیلن گلیکول<sup>۲</sup> (PEG) بر پارامترهای رشدی اولیه دو رقم گندم دوروم Omrabria و BD290273 بررسی شد. سطوح تنش حاصله از دو منشأ مصنوعی NaCl و PEG در دامنه پتانسیل اسمزی ۰/۲- تا ۰/۸- مگاپاسکال تنظیم شد. نتایج نشان داد که تنش حاصله از محلول NaCl نسبت به محلول PEG تأثیر منفی کمتری بر روی سرعت جوانه‌زنی، درصد نهایی جوانه‌زنی و سرعت استقرار گیاهچه در هر دو گونه گندم دوروم داشته است (Sayar et al., 2010). هادی و همکاران (Hadi et al., 2008) تأثیر تجمع عناصر در تحمل به شوری در هفت ژنوتیپ گندم دوروم را بررسی کردند. ایشان در تحقیق خود، تنها از نمک کلرید سدیم (NaCl) و با غلظت‌های ۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌مولار به عنوان منبع شوری استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد که کلیه ژنوتیپ‌ها در تیمارهای شوری ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌مولار از بین رفت. بررسی تأثیر تنش شوری بر عملکرد و اجزای عملکرد غله جدید تریتی‌پایرم در مقایسه با گندم و تریتیکاله (*Triticum secale*) با کاربرد سطوح شوری صفر (شاهد)، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار نمک کلرید سدیم (NaCl) نشان داد که مقاومت غله جدید تریتی‌پایرم در مقایسه با گندم و تریتیکاله به مراتب بیشتر است، به طوری که استفاده از لاین‌های اولیه این غله می‌تواند برای احیاء مراتع و تولید علوفه در مناطق متأثر از شوری توصیه گردد (Razeghi Jahromi et al., 2012).

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در اکثر پژوهش‌های انجام شده در مورد تأثیر شوری بر رشد و عملکرد گیاه، از آب شور مصنوعی که عموماً ترکیبات NaCl و یا NaCl+CaCl<sub>2</sub> و یا دیگر ترکیبات مصنوعی است، استفاده شده و از تأثیر منفی سمیت برخی از عناصر و همچنین تأثیر آنها بر قابلیت فراهمی سایر عناصر غذایی از لحاظ جذب در سطح ریشه‌ها و انتقال در درون گیاه، صرف‌نظر می‌گردد (Eskandari et al., 2014). این موضوع با شرایط واقعی منابع آب و خاک شور تطابق ندارد. به همین دلیل، در این پژوهش استفاده از آب شور طبیعی نسبت به آب شور مصنوعی ترجیح داده شد. گندم دوروم (*Triticum turgidum* L.) که برای تولید پاستا (ماکارونی و اسپاگتی) به کار می‌رود، از نظر اهمیت پس از گندم نان (*Triricum aestivum* L.) قرار داشته و نقش عمده‌ای در تغذیه میلیون‌ها انسان در خاورمیانه و شمال آفریقا دارد (Oleson, 1996). ارقام محلی گندم

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 باعث نشست سطح زمین<sup>۱</sup> به صورت ناگهانی (در سفره‌های ماسه‌ای) و یا به‌طور تدریجی (در سفره‌های رسی) می‌گردد که این امر به‌صورت بالقوه می‌تواند باعث بروز مشکلات زیست محیطی بعدی گردد. با توجه به مطالب بیان شده نیاز است تا با برنامه‌ریزی و مدیریت کارشناسی، مصرف آب‌های شیرین در بخش کشاورزی را مدیریت نموده و به نوعی از منابع آب کم-کیفیت و شور نیز برای تولیدات کشاورزی بهره‌جست.

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 شبیه‌ساز است. به عبارت دیگر، با تجزیه و تحلیل کمی واکنش گیاه به شوری از طریق مدل‌های شبیه‌ساز، می‌توان در دوره‌هایی از رشد که مقاومت گیاه به شوری نسبتاً بالاست همراه با حفظ سطح مطلوب عملکرد، مقادیر متناهی از منابع آب شور را نیز به کار برد. شوری به عنوان یک تنش غیرزنده می‌تواند اختلالات زیادی را برای بذرها در دوره رشد ایجاد کند. گندم (*Triticum turgidum* L.) اصلی‌ترین منبع تأمین کالری در سبد غذایی ایرانیان بوده و تولید کافی آن در شرایط مختلف، همواره جزو دغدغه‌های اصلی مسئولان ذیربط بوده است. در مقیاس جهانی نیز بررسی وضعیت آینده تولید غلات به‌ویژه گندم که یکی از مهم‌ترین محصولات مهم کشاورزی به شمار می‌رود از جمله مسائلی است که توجه پژوهشگران پرشماری را به خود معطوف کرده است (Nekahi et al., 2014; Koocheki et al., 2014).

اکبری قدسی و همکاران (Akbari Ghogdi et al., 2011) تغییرات مورفولوژیک ژنوتیپ‌های گندم در شرایط تنش شوری را بررسی کردند. سطوح شوری استفاده شده در تحقیق ایشان با استفاده از نمک‌های NaCl+CaCl<sub>2</sub> با نسبت مولی ۱:۱۰ تهیه شد. نتایج ایشان نشان داد که تمامی صفات به‌جز وزن ویژه برگ با افزایش شوری، در تمامی ارقام گندم مورد آزمایش به طور معنی‌داری کاهش یافت.

در پژوهشی دیگر اثر تنش شوری حاصله از محلول‌های NaCl و

دوروم از گذشته بسیار دور در مناطق مختلف کشور به‌ویژه شمال غرب تا جنوب غرب به صورت دیم کشت شده و سطح زیر کشت دیم این محصول در سال‌های اخیر حدود ۲۵۰ هزار هکتار برآورد می‌گردد. تا پیش از سال ۱۳۷۰ گندم دوروم آبی به صورت گسترده کشت نمی‌شد، لیکن در دهه هشتاد با وارد شدن بذر رقم یاواروس-۷۹ و معرفی سه رقم گندم دوروم سیمینه، آریا و کرخه برای کشت در زراعت آبی، سطح کشت گندم دوروم آبی به بیش از ۲۰۰ هزار هکتار بالغ گردید که نشان‌دهنده سازگاری وسیع گندم دوروم با شرایط آب و هوایی خشک به‌ویژه مناطق گرم و خشک جنوب کشور که دچار بحران کم‌آبی هستند، می‌باشد (Seed and Plant Improvement Institute, 2013).

رقم مورد استفاده در این تحقیق بنا بر توصیه مرکز تحقیقات کشاورزی، رقم به‌رنگ بود که از نظر پایداری عملکرد و میانگین عملکرد دانه، برترین لاین در بین گونه‌های موجود گندم دوروم در اقلیم‌های گرم و خشک جنوب محسوب می‌شود. میانگین عملکرد دانه آن طی سه سال در چهار منطقه بالغ بر ۶/۷۹۶ تن در هکتار بوده است. این رقم به دلیل داشتن سازگاری مناسب و عملکرد مطلوب در اقلیم گرم و خشک جنوب کشور و نیز کیفیت خوب دانه آن برای تهیه ماکارونی، از مزیت خوبی برخوردار است (Seed and Plant Improvement Institute, 2013). با توجه به اینکه بیشترین سطح زیر کشت گندم دوروم کشور در اقلیم مزبور واقع شده است، در پژوهش حاضر گونه مورد نظر برای مطالعات کمی شوری انتخاب گردید. کمی‌سازی تأثیر فاکتورهای محیطی بر میزان عملکرد، به منظور برنامه‌ریزی برای استفاده بهینه از منابع موجود از سالیان طولانی مورد توجه پژوهشگران بوده است. به همین منظور در مطالعات متعدد، تأثیر عوامل محیطی-اقلیمی بر تولید محصول بررسی شده است. برای کمی‌سازی تأثیر این عوامل اقلیمی و محیطی بر میزان عملکرد، دو رویکرد کلی موجود است. رویکرد اول مربوط به مدل‌های فرآیندی<sup>۱</sup> یا مدل‌های تئوریک است که این مدل‌ها ارتباط بین عوامل محیطی و عملکرد را بر اساس قوانین فیزیکی و روابط ریاضی به طور کامل تبیین می‌نمایند. دسته دوم مدل‌های آماری<sup>۲</sup> بوده که به طور تجربی و بر مبنای مشاهدات گذشته، اقدام به تخمین عملکرد می‌نمایند. مدل‌های مبتنی بر فرآیند قادرند تا تأثیرات جزئی

1- process-based crop models

2- Statistical models

تک تک عوامل مؤثر در تولید محصول را در نظر گرفته و در محاسبات لحاظ کنند. لیکن مدل‌های آماری معمولاً در غالب تجزیه‌های رگرسیونی داده‌هایی که در مقیاس زمانی مختلف (ماهانه، سالانه، مرحله رشدی و ...) گردآوری شده‌اند، عمل می‌نمایند (Basso et al., 2013). نظر به اینکه تاکنون تحقیقی مستقل در زمینه شبیه‌سازی عملکرد گندم دوروم در شرایط تنش شوری و همچنین تعیین میزان آستانه کاهش عملکرد آن صورت نگرفته است و تمام مدل‌های موجود که واکنش گیاهان به شوری را به‌صورت کمی بیان می‌کنند، بر اساس فرض غلط ثابت بودن شوری خاک از آغاز تا پایان دوره رشد استوار می‌باشند، می‌توان انتظار داشت که این مقادیر آستانه شوری که از این آزمایش‌ها به‌دست آمده، به‌طور کامل نتواند واکنش گیاه را در مقابل شوری تخمین بزند، بنابراین هدف اول این تحقیق بررسی نحوه واکنش گندم دوروم به شوری در آزمایش فوق بود. همچنین از آن‌جا که شکل توابع کاهش جذب آب برای گندم دوروم مشخص نیست، لذا دومین هدف پژوهش حاضر پاسخ به این سؤال بود که آیا توابع کاهش جذب آب در مورد گیاه گندم با مدل‌های موجود برآورد می‌شوند یا می‌بایست مدلی مناسب برای آن‌ها به‌دست آورد.

### مواد و روش‌ها

برای کمی‌سازی اثر شوری بر رشد و عملکرد گندم دوروم بر اساس مدل‌های شبیه‌ساز آماری و فرآیندی، آزمایشی در یک خاک زراعی با بافت لوم شنی انجام گرفت. بافت لوم شنی به این دلیل انتخاب شد تا بتوان شوری کل توده خاک را با اعمال جزء آبشویی<sup>۳</sup> زیاد ( $LF=0/5$ ) نسبتاً یکنواخت نگه داشت. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش در جدول ۱ گزارش شده است. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن همچون بافت، عناصر پرمصرف و کم مصرف، کربن آلی، آهک، pH، عصاره اشباع خاک و هدایت الکتریکی عصاره اشباع ( $EC_e$ ) با استفاده از روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد (Pansu & Gautheyrou, 2006).

همان‌طور که در بخش مقدمه اشاره شد، در بیشتر پژوهش‌های انجام شده در مورد تأثیر شوری بر رشد و عملکرد گیاه، از آب شور مصنوعی که عموماً NaCl و یا ترکیبی از NaCl و  $CaCl_2$  بوده

3- Leaching fraction

استفاده شده‌است. بدین ترتیب از تأثیر منفی سمیت برخی از عناصر و یا تأثیر آن‌ها بر قابلیت فراهمی دیگر عناصر غذایی از لحاظ جذب در سطح ریشه‌ها و انتقال در درون گیاه، صرف‌نظر شده است.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک مورد استفاده  
Table 2- Some physical and chemical properties of the experimental soil

واکنش عصاره اشباع pH <sub>e</sub>	نسبت جذب سدیم SAR	هدایت الکتریکی عصاره اشباع (دسی‌زیمنس بر متر) Saturated EC (EC <sub>e</sub> ) (dS.m <sup>-1</sup> )	آهک (درصد) TNV (%)	کربن آلی (درصد) Organic Carbon (OC) (%)	شن (درصد) Sand (%)	سیلت (درصد) Silt (%)	رس (درصد) Clay (%)	فسفر قابل جذب (میلی‌گرم در کیلوگرم) P <sub>ava</sub> (mg.kg <sup>-1</sup> )	پتاسیم قابل جذب (میلی‌گرم در کیلوگرم) K <sub>ava</sub> (mg.kg <sup>-1</sup> )	سدیم (میلی‌اکی‌والان در لیتر) Na (meq.L <sup>-1</sup> )	منیزیم (میلی‌اکی‌والان در لیتر) Mg (meq.L <sup>-1</sup> )	کلسیم (میلی‌اکی‌والان در لیتر) Ca (meq.L <sup>-1</sup> )
7.6	1.5	2.9	6.8	0.3	55	27	18	8.0	241.3	5.5	18.7	8.3

این موضوع با شرایط واقعی منابع آب و خاک شور تطابق ندارد. به همین دلیل، در این پژوهش استفاده از آب شور طبیعی نسبت به آب شور مصنوعی ترجیح داده شد. با توجه به بالا بودن میزان شوری نمونه آب، برای تعیین دقیق شوری آن، نمونه آب چندین بار رقیق و در نهایت میزان هدایت الکتریکی آن ۵۱۲ دسی‌زیمنس بر متر محاسبه شد. تجزیه شیمیایی نمونه آب استفاده شده در این پژوهش در جدول ۲ ارائه شده است. آب شور تهیه شده از دریاچه مهارلوی فارس با شوری ۵۱۲ دسی‌زیمنس بر متر برای استفاده در تیمارهای مورد نظر با آب معمولی رقیق گردید تا شوری‌های مورد نظر برای اعمال تیمارهای آزمایشی به دست آید. تیمارهای به کار رفته در این

پژوهش در سه تکرار و شامل آب شهر به عنوان شاهد و پنج سطح شوری ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر بود پس از آماده‌سازی بستر کشت، بذره‌های گندم با تراکم ۳۵۰ بوته در مترمربع کاشته شد (Omidi et al., 2013; Rezvani et al., 2013). پس از آن تیمارهای آب شور اعمال شدند و از این زمان به بعد هر تیمار با در نظر گرفتن جزء آبشویی (LF) برابر با ۰/۵ با مقدار معینی از آب شور (دارای EC متناسب با هر تیمار) آبیاری شدند. با اعمال این جزء آبشویی، شوری عصاره خاک تا حد امکان به شوری آب آبیاری نزدیک می‌شود. در این آزمایش، عملکرد نسبی شامل وزن دانه در هر سطح شوری نسبت به شاهد (آب شهر) در نظر گرفته شد.

جدول ۲- برخی ویژگی‌های شیمیایی آب شور طبیعی اولیه  
Table 2- Some chemical characteristics of natural saline water

هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) EC (dS.m <sup>-1</sup> )	pH	آن‌یون (میلی‌اکی‌والان در لیتر) Anions (meq.L <sup>-1</sup> )				کاتیون (میلی‌اکی‌والان در لیتر) Cations (meq.L <sup>-1</sup> )				نسبت جذب سدیم SAR	کل جامدات محلول (میلی‌گرم بر لیتر) TDS (mg.L <sup>-1</sup> )	بور (میلی‌گرم بر لیتر) B (mg.L <sup>-1</sup> )
		کربنات CO <sub>3</sub>	بی‌کربنات HCO <sub>3</sub>	کلر Cl	سولفات SO <sub>4</sub>	کلسیم Ca	منیزیم Mg	سدیم Na	پتاسیم K			
512.0	6.9	0.0	18.7	4847.0	1120.7	38.4	2858.1	3363.5	131.9	88.4	344792.0	2.46

در گیاهان با استفاده از معادله کلی جریان یا معادله ریچاردز (Richards, 1931) به صورت زیر ارائه می‌شود:

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

که در آن:  $\theta$ : رطوبت حجمی خاک (L<sup>3</sup>L<sup>-3</sup>);  $t$ : زمان (T);  $z$ : عمق خاک (L);  $K$ : ضریب آب‌گذری غیراشباع خاک (LT<sup>-1</sup>);

همان‌طور که اشاره شد، دو رویکرد کلی در پیش‌بینی عملکرد گیاهان در شرایط اقلیمی متفاوت و کیفیت آب آبیاری گوناگون وجود دارد. در این تحقیق به هر دو گونه این رویکردها پرداخته شده است. بدین ترتیب که ابتدا مدل‌های مبتنی بر فرآیند مورد بررسی قرار گرفته است. گیاهان برای فتوسنتز و تعرق به آب نیازمند می‌باشند. با افزایش شوری، جذب آب در گیاه کاهش می‌یابد. بیان کمی جذب آب

فدس و همکاران (Feddes et al., 1978) آن را ارائه داده‌اند. در شرایط شوری، تابعی از پتانسیل اسمزی محلول خاک ( $h_0$ ) است و مقدار جذب آب در گیاه در این شرایط به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S = \alpha(h_0)S_{max} = \alpha(h_0)\frac{T_p}{Z_r} \quad (5)$$

توابع پیشنهاد شده برای ( $h$ )، منحصر به روابطی هستند که ماس و هافمن (Maas & Hoffman, 1977)، ون‌گنوختن و هافمن (van Genuchten & Hoffman, 1984)، دیرکسن و همکاران (Dirksen et al., 1993) و همایی و همکاران (Homaei et al., 2002 a,b) ارائه داده‌اند که به شرح زیر می‌باشند. ماس و هافمن (Maas & Hoffman, 1977) تابعی خطی و دو تکه ارائه کردند که بر مبنای آن تا پیش از آستانه کاهش شوری ( $h_0^*$ ) هیچ‌گونه کاهش در جذب آب پدید نمی‌آید، لیکن با افزایش  $h_0$  مقدار جذب به طور خطی کاهش می‌یابد:

$$\alpha(h_0) = 1 - \frac{a}{360}(h_0^* - h_0) \quad (6)$$

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، ون‌گنوختن و هافمن (van Genuchten & Hoffman, 1984) معادله‌ای غیر خطی به صورت زیر پیشنهاد کردند:

$$\alpha(h_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h_0}{h_{050}}\right)^p} \quad (7)$$

که در آن،  $h_{050}$ : مقدار فشار اسمزی ( $L$ ) است که در آن جذب آب ۵۰ درصد کاهش یافته و یا عملکرد نسبی به نصف تقلیل می‌یابد که اصطلاحاً این مقدار تنش شوری را با  $EC_{50}$  نشان می‌دهند، همچنین  $p$  ضریبی تجربی است که وابسته به گیاه، خاک، و اقلیم است (Homaei & Feddes, 2002).

پژوهش‌های دیرکسن و همکاران (Dirksen et al., 1993) نشان داده که جذب آب در گیاه تا رسیدن به شوری معینی ( $h_0^*$ ) کاهش نمی‌یابد. به همین دلیل آن‌ها معادله ۶ را نسبت به شوری حد آستانه ( $h_0^*$ ) تعدیل و رابطه زیر را پیشنهاد کردند:

$$\alpha(h_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h_0^* - h_0}{h_0^* - h_{050}}\right)^p} \quad (8)$$

این رابطه نسبت به روابط قبلی با دقتی بیشتر واکنش گیاه را به شوری برآورد می‌کند، لیکن مهم‌ترین محدودیت آن به دست آوردن

پتانسیل ماتریک ( $L$ )، و  $S$ : مقدار آب جذب‌شده از ریشه گیاه در واحد حجم خاک و زمان ( $L^3L^{-3}T^{-1}$ ) است.

به‌طور کلی در رویکرد مدل‌سازی تئوریک یا فرآیندی، برای بیان کمی  $S$ ، مدل‌هایی<sup>۱</sup> وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به دو گروه خرد<sup>۲</sup> و کلان<sup>۳</sup> تقسیم کرد. معادله ۲ شکل کلی مدل‌های خرد را نشان می‌دهد که نخستین بار توسط گاردنر (Gardner, 1960) ارائه گردید.

$$S = \frac{\Delta q r}{\Delta z} = BLK(h - h_r - Z) \quad (2)$$

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

اشکال عمده مدل‌های خرد به غیر کاربردی بودن آن‌ها مربوط می‌شود، زیرا دستیابی به کمیت‌هایی نظیر  $B$  و  $h_r$  در حال حاضر غیر ممکن است. افزون بر این، فرض یکنواخت بودن همه مکان‌های جذبی در سطح ریشه و یا ماندگار بودن جریان آب که از پایه‌های اساسی این مدل‌هاست، با واقعیت منطبق نیست. به همین دلیل، گروه دیگری از مدل‌ها طراحی و ارائه شدند که به مدل‌های کلان شهرت دارند. در مدل‌های کلان، مقدار آب جذب‌شده در گیاه با میزان تعرق واقعی ( $T_a$ )<sup>۴</sup> و در شرایطی که هیچ‌گونه محدودیت آبی در خاک وجود نداشته باشد، معادل تعرق پتانسیل ( $T_p$ )<sup>۵</sup> در نظر گرفته شده و معادله کلی آن به صورت زیر است:

$$S = S_{max} = \frac{T_p}{Z_r} \quad (3)$$

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 آورد، به اندازه که به آن تابع کاهش<sup>۶</sup> گفته می‌شود، از تعرق کاسته می‌شود:

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

معمولاً<sup>۷</sup>: تابعی از پتانسیل ماتریک خاک است و آن را به صورت ( $h$ ) نشان می‌دهند. معادله ۴ شکل عمومی مدل‌های کلان است که

- 1- Models
- 2- Microscopic models
- 3- Macroscopic models
- 4- Actual transpiration
- 5- Potential transpiration
- 6- Reduction function

آن بسته به دامنه تغییرات متغیر مستقل، از صفر تا یک افزایش می-یابد (Weibull, 1951). از تابع اصلاح شده ویبول برای تخمین عملکرد نسبی ( $Y_r$ ) در سطوح مختلف شوری ناحیه ریشه (C) به صورت زیر استفاده شده است:

$$Y_r = \exp[a(C^b)] \quad (12)$$

که در رابطه فوق، ضریب رگرسیون  $a$  همواره منفی بوده و بیانگر میزان ارتباط بین متغیر مستقل و وابسته است. همچنین ثابت  $b$  بیانگر شیب منحنی پاسخ گیاه می‌باشد. نکته قابل توجه در این رابطه آماری این است که ثابت‌های  $a$  و  $b$ ، بیانگر هیچ گونه ویژگی بیوفیزیکی نبوده و تنها ارزش آماری دارند.

### تابع نمایی دوگانه<sup>۲</sup>

ون گنوختن (van Genuchten, 1983)، به منظور بررسی داده-های تحمل به شوری گیاهان مختلفی همانند چاودار (*Secale cereale*)، تابع تولید نمایی کلی‌تری به صورت زیر ارائه نمود:

$$Y_r = \exp[aC - b(C^2)] \quad (13)$$

که در رابطه فوق نیز ثابت‌های تجربی  $a$  و  $b$  همچنان فاقد هویت بیوفیزیکی بوده و می‌توانند از طریق رگرسیون غیر خطی محاسبه گردند. محققین مختلفی در بررسی‌های خود از این تابع تولید برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان مختلف بهره برده‌اند (Wang et al., 2002).

### تابع اصلاح شده گومپرتز<sup>۳</sup>

بر اساس گزارش لاپ و اسکروپات (Lapp & Skoropad, 1976)، متخصصین آمار انسانی، برای سالیان متمادی از فرمول ارائه شده توسط گومپرتز (Gompertz, 1825) برای بررسی نرخ مرگ و میر جوامع انسانی استفاده کرده‌اند. پس از آن اشکال مختلف این رابطه در انواع کاربری‌های کشاورزی همانند بررسی میزان جوانه‌زنی بذر و سرعت رشد و نمو استفاده گردیده است (Steppuhn et al., 2005). به همین ترتیب تابع اصلاح شده گومپرتز به صورت زیر نیز می‌تواند به‌عنوان تابع عملکرد گیاه در شرایط شور استفاده گردد.

$$Y_r = 1 - \exp[a \exp(bC)] \quad (14)$$

که ثابت‌های تجربی  $a$  و  $b$  همواره منفی بوده و همانند دو مورد

$h_{050}$  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  $h_{050}$  پارامتری وابسته به شکل تابع است. همایی و همکاران (Homaee et al., 2002b) با فرض اینکه  $p$  پارامتری وابسته به محصول، خاک، و اقلیم است، معادله زیر را برای به دست آوردن آن پیشنهاد کردند:

$$p = \frac{h_{050}}{h_{050} - h_0^*} \quad (9)$$

به دلیل اینکه مشکل به دست آوردن  $h_{050}$  تا بدین‌جا حل نشده باقی مانده بود، همایی و همکاران (Homaee et al., 2002b) مقدار  $h_{050}$  را با  $h_{0max}$  جایگزین و تابع خطی زیر را پیشنهاد کردند که دارای دو آستانه کاهش است (Homaee et al., 2002 c,d):

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + (1 - \alpha_0) / \alpha_0 [(h^* - h) / (h^* - h_{max})]^p} \quad (10)$$

کاهش در مقدار 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 کاهش ایجاد کند. این واقعیت نشان می‌دهد که در  $h_0 > h_{0max}$  گیاه هنوز زنده است و در سطحی بسیار اندک به فعالیت‌های حیاتی خود ادامه می‌دهد. همایی و همکاران (Homaee et al., 2002b) سپس مقدار  $p$  را با توجه به  $h_{0max}$  به صورت زیر تعریف کردند.

$$p = \frac{h_{0max}}{h_{0max} - h_0^*} \quad (11)$$

در ادامه این پژوهش، توانمندی مدل‌های آماری نیز به بوته آزمایش گذاشته شد. در سال‌های اخیر مدل‌های دیگری نیز ارائه شده که بر خلاف مدل‌های کلان، که مبنای فیزیکی دارند، این مدل‌ها مبنای آماری دارند. شکل کلی این معادلات به صورت  $Y_r = f(EC_e)$  تعریف شده و مهمترین آن‌ها شامل ویبول تصحیح شده، نمایی دوگانه و تابع اصلاح شده گومپرتز است که در آن‌ها  $Y_r$  و  $EC$  به ترتیب عملکرد نسبی (درصد) و متوسط شوری آب آبیاری طی فصل رشد (دسی‌زیمنس بر متر) است (Saraee Tabrizi et al., 2015).

### تابع اصلاح شده ویبول<sup>۱</sup>

مدل آماری ویبول در واقع یک توزیع احتمال تجمعی است که یک متغیر را به متغیر دیگری به صورت نمایی مرتبط می‌سازد و مقدار

قبل فاقد مفهوم بیوفیزیکی هستند و از طریق آنالیز رگرسیون خیر خطی به دست می‌آیند.

به منظور کمی کردن اثر شوری بر رشد و عملکرد گندم دوروم، عملکرد نسبی با استفاده از مدل‌های کلان شامل مدل ماس و هافمن (Maas & Hoffman, 1977)، ون‌گنوختن و هافمن (van Genuchten & Hoffman, 1984)، دیرکسن و همکاران (Dirksen et al., 1993)، همایی و همکاران (Homaee et al., 2002b) و مدل‌های آماری تابع اصلاح شده ویبول، تابع نمایی دوگانه و تابع اصلاح شده گومپرتز محاسبه شد. مدل‌های یاد شده بر داده‌های عملکرد نسبی به دست آمده برازش داده شدند.

پارامترهای مجهول هر کدام از مدل‌ها از طریق بهینه‌سازی حداقل مجموع مربعات خطا با استفاده از حل تابع سولور<sup>۱</sup> در محیط نرم‌افزار Excel انجام پذیرفت. سپس عملکرد نسبی برآورد شده توسط مدل‌ها با مقادیر اندازه‌گیری شده در برابر سطوح مختلف شوری عصاره اشباع رسم و نتایج مدل‌های مختلف با یکدیگر مقایسه گردید. همچنین، مقایسه کمی مدل‌ها بر اساس آماره‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت.

#### مقایسه کمی دقت شبیه‌سازی مدل‌های شبیه‌ساز

برای مقایسه کمی عملکرد اندازه‌گیری شده با مقدار شبیه‌سازی شده با مدل‌های فوق، از آماره‌های آماری زیر استفاده گردید (Jalali & Homaee, 2010; Saadat & Homaee, 2015).

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

$$d' = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - S_i|}{\sum_{i=1}^n (|S_i - O'| + |O_i - O'|)} \quad (16)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (17)$$

که در این معادلات،  $O_i$ : مقادیر اندازه‌گیری شده،  $S_i$ : مقادیر شبیه‌سازی شده،  $O$ : میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده،  $n$ : تعداد زوج مقادیر اندازه‌گیری شده- برآورد شده عملکرد می‌باشد.  $E'$  ضریب کارایی اصلاح شده<sup>۲</sup> است و محدوده‌ی آن از یک تا منفی بی‌نهایت می‌باشد.  $E'$  برابر با یک، نشان‌دهنده برابری مقادیر برآورد شده با اندازه‌گیری بوده و هرچه مقدار آن از یک کمتر باشد دقت مقادیر

برآورد شده کمتر می‌باشد.  $d'$  شاخص مطابقت اصلاح شده<sup>۳</sup> است که محدوده آن از صفر تا یک است. هرچه مقدار  $d'$  بیشتر باشد یعنی مقادیر برآورد شده به مقدار اندازه‌گیری نزدیک‌تر می‌باشد. CRM، ضریب جرم باقیمانده<sup>۴</sup> است. CRM گرایش مدل به تخمین بیشتر یا کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده را برای هر مدل ارائه می‌دهد. به دست آوردن مقدار منفی برای یک مدل، تمایل مدل را برای بیش برآورد اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد (Jalali et al., 2008). در نهایت تجزیه و تحلیل‌های آماری، برازش منحنی و کارهای گرافیکی به ترتیب با نرم افزار SPSS 16.0، DATAFIT 9 و Excel 2010 انجام پذیرفت.

## نتایج و بحث

### الف- شبیه‌سازی عملکرد گندم دوروم بر اساس مدل‌های فرآیندی-ماکروسکوپی

شکل ۱ عملکرد نسبی بذر در سطوح مختلف شوری عصاره اشباع خاک ( $EC_e$ ) را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، عملکرد نسبی گیاه تا شوری ۱/۸ دسی‌زیمنس بر متر کاهش نداشته، لیکن از آن پس، با افزایش شوری، مقدار عملکرد نسبی روندی کاهشی به خود گرفته است.

حد آستانه تحمل شوری گندم دوروم، بر اساس یافته‌های ماس و گراتان (Maas & Grattan, 1999)، ۵/۹ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد، حال آن‌که پژوهش حاضر نشان داد که آستانه کاهش عملکرد گندم دوروم (رقم به‌رنگ) هنگامی که شوری خاک از ابتدا تا پایان دوره رشد ثابت باشد، نزدیک دو دسی‌زیمنس بر متر است که این امر لزوم اعمال حساسیت بیشتر در استفاده از ارقام دول‌های ارائه شده توسط محققین سایر مناطق دنیا را القا می‌کند. شکل ۲ برازش مدل‌های ماکروسکوپی را بر داده‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. با برازش مدل‌های مختلف بر داده‌های اندازه‌گیری شده، پارامترهای مختلف هر یک از مدل‌ها، برآورد و در جدول ۳ ارائه شده است. در جدول مورد نظر، اصطلاحات  $EC_m$ ،  $EC_p$  و  $P_p$  به ترتیب اشاره به آستانه کاهش عملکرد اندازه‌گیری شده، آستانه کاهش عملکرد برآورد شده و ضریب بدون بعد شکل، در مدل‌های مختلف می‌باشد.

3- Modified index of agreement

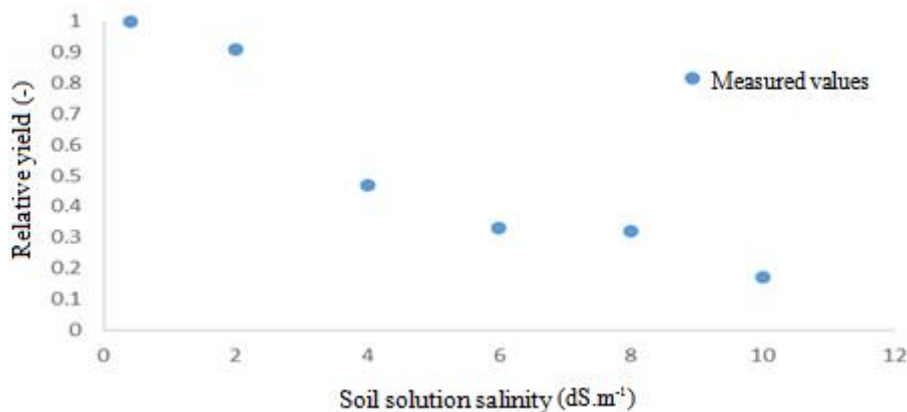
4- Coefficient of residual mass

1- Solver

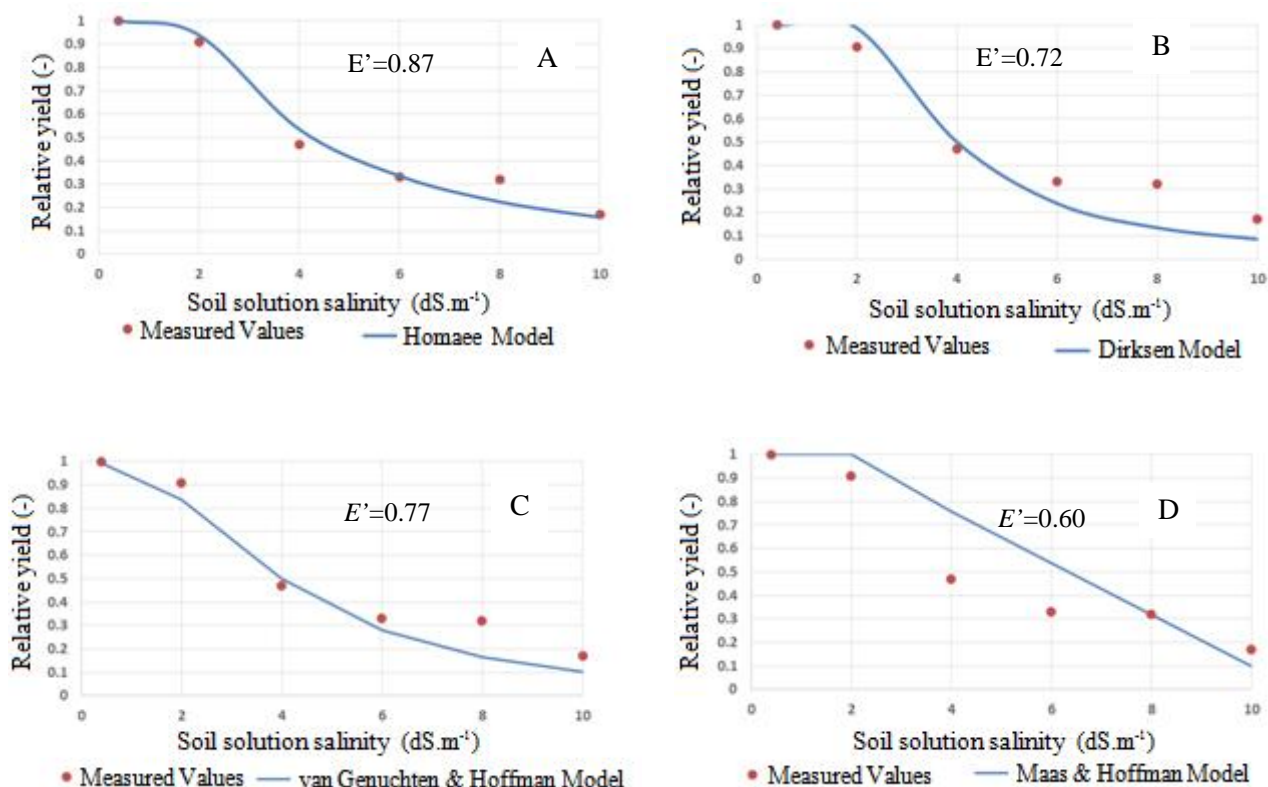
2- Modified coefficient efficiency

شده داشته و دارای ضریب تبیین بالاتری هستند. بنابراین برای انتخاب مناسب‌ترین مدل برآوردی در این مرحله، با کمک آماره‌های ذکر شده (جدول ۴) بهترین مدل تعیین شد.

همان‌طور که از شکل ۲ و ضرایب تبیین ( $R^2$ ) ارائه شده در جدول ۴ برمی‌آید، مدل‌های غیرخطی نسبت به مدل خطی ماس و هافمن (Maas & Hoffman, 1977) برازش بهتری بر داده‌های اندازه‌گیری



شکل ۱- اثر شوری بر عملکرد نسبی بوته‌های گندم دوروم  
Fig. 1- The effect of salinity on relative yield of durum wheat



شکل ۲- عملکرد نسبی بوته‌های گندم اندازه‌گیری شده و برآورد شده به کمک مدل‌های همایی و همکاران (A)، دیرکسن و همکاران (B)، ون‌گنوختن و هافمن (C) و ماس و هافمن (D)

Fig. 2- Measured and predicted relative yield of durum wheat by Homae et al., (A), Dirksen et al., (B), van Genuchten & Hoffman (C) and Maas & Hoffman (D) models



جدول ۳- پارامترهای برآورد شده مدل‌های مختلف به کمک معادلات ۶، ۷، ۸ و ۱۰  
Table 3- Predicted parameters of different models with equations of 6, 7, 8 and 10

مدل Model	آستانه کاهش عملکرد اندازه‌گیری شده EC <sub>m</sub>	آستانه کاهش عملکرد برآورد شده EC <sub>p</sub>	شوری عملکرد میانه EC <sub>50</sub>	آستانه دوم شوری EC <sub>max</sub>	شیب خط b	ضریب بدون بعد شکل P <sub>p</sub>
همایی و همکاران Homaee et al.	1.8	1.9	-	9.0	-	2.8
دیرکسن و همکاران Dirksen et al.	1.8	2.0	4.0	-	-	1.8
ون‌گنوختن و هافمن van Genuchten & Hoffman	1.8	-	4.0	-	-	2.35
ماس و هافمن Maas & Hoffman	1.8	2.0	-	-	-0.11	-

جدول ۴- آماره‌های محاسبه‌شده برای مقایسه معادلات مختلف فرآیندی-ماکروسکوپی  
Table 4- The obtained statistics to assess different process- macroscopic model performances

مدل Model	ضریب کارایی اصلاح شده E'	شاخص مطابقت اصلاح شده d'	ضریب جرم باقیمانده CRM	ضریب تبیین R <sup>2</sup>
همایی و همکاران Homaee et al.	0.87	0.93	-4.20	0.98
دیرکسن و همکاران Dirksen et al.	0.72	0.87	0.08	0.97
ون‌گنوختن و هافمن van Genuchten & Hoffman	0.77	0.89	0.10	0.97
ماس و هافمن Maas & Hoffman	0.60	0.81	-0.16	0.85

مدل ون‌گنوختن و هافمن (van Genuchten & Hoffman, 1984)، مدلی قابل توصیه و کاربرد است که پارامترهای آن کاملاً تعریف شده و مشخص باشند، از آن‌جا که در مدل ون‌گنوختن و هافمن (van Genuchten & Hoffman, 1984) پارامتر  $p$  و  $EC_{50}$  به‌طور واضح تعریف نشده و قابل اندازه‌گیری مستقیم نمی‌باشند و همچنین با در نظر گرفتن کارایی نسبی بهتر مدل همایی و همکاران (Homaee et al., 2002b) (بر اساس شاخص‌های آماری ارائه شده در جدول ۴) در بین مدل‌های فرآیندی ماکروسکوپی، مدل غیرخطی همایی و همکاران، مدل مناسب شناخته شد.

#### ب- شبیه سازی عملکرد گندم دوروم بر اساس مدل‌های آماری-تجربی

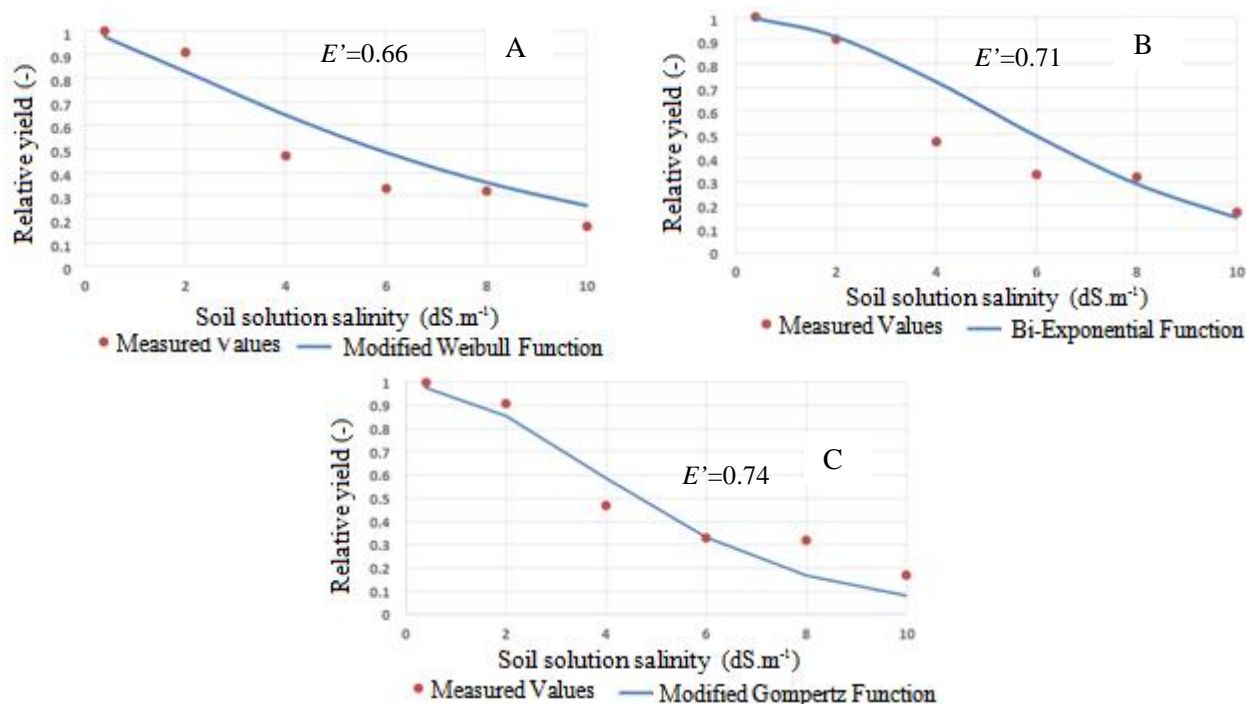
همانند حالت قبل، شکل ۳ برآزش مدل‌های آماری-تجربی بر داده‌های اندازه‌گیری شده عملکرد نسبی بذر گندم دوروم را نشان

بررسی و مقایسه شاخص‌های آماری نشان می‌دهد که در بین مدل‌های غیرخطی، مدل همایی و همکاران (Homaee et al., 2002b) دقت بالایی در تخمین عملکرد گندم دوروم در این آزمایش داشته است. با اندک اختلافی از این مدل، مدل فاقد آستانه ون-گنوختن نیز توانسته است عملکرد نسبی گندم را تا حد نسبتاً قابل قبولی تخمین بزند. نکته دیگری که از بررسی شاخص آماری CRM برمی‌آید، بیش‌برآورد<sup>۱</sup> نمودن عملکرد نسبی توسط مدل خطی ماس و هافمن (Maas & Hoffman, 1977) و مدل غیر خطی همایی و همکاران (Homaee et al., 2002b) بوده در حالی که سایر مدل‌های غیر خطی تمایل به کم‌برآوردی مقادیر نسبی عملکرد در این آزمایش داشته‌اند.

از بین دو مدل همایی و همکاران (Homaee et al., 2002b) و

1- Overestimate

می‌دهد. با برازش مدل‌های مورد بررسی بر داده‌های به‌دست آمده، پارامترهای مختلف هر کدام از مدل‌ها برآورد و در جدول ۵ ارائه شده است.



شکل ۳- عملکرد نسبی بوته‌های گندم اندازه‌گیری شده و برآورد شده به کمک تابع اصلاح شده ویبول (A)، تابع نمایی دوگانه (B) و تابع اصلاح شده گومپرتز (C)

Fig. 3- Measured and predicted relative yield of durum wheat by Modified Weibull Function (A), Bi-Exponential Function (B) and Modified Gompertz Function (C)

Steppuhn et al., ) و همکاران (Tabrizi et al., 2015) نیز به برتری نسبی تابع اصلاح شده گومپرتز در شبیه‌سازی عملکرد گیاهان اشاره داشته‌اند.

نکته دیگری که از بررسی شاخص آماری CRM برمی‌آید، کم برآورد<sup>۱</sup> کردن عملکرد نسبی توسط تابع اصلاح شده گومپرتز است، در حالی که سایر مدل‌ها تمایل به بیش‌برآوردی مقادیر نسبی عملکرد در این مرحله داشته‌اند.

مقایسه شاخص‌های آماری ارائه شده در جدول‌های ۴ و ۶ که به- ترتیب توانمندی مدل‌های فرآیندی- ماکروسکوپی و معادلات مختلف آماری- تجربی را نشان داده است، بیانگر آن است که در اکثر موارد، مدل‌های فرآیندی- ماکروسکوپی از دقت نسبی بالاتری در شبیه‌سازی عملکرد گندم دوروم تحت تنش شوری نسبت به معادلات

بررسی شاخص‌های آماری محاسبه شده در جدول ۶ بیانگر آن است که در بین مدل‌های آماری- تجربی، تابع اصلاح شده گومپرتز توانایی نسبی بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها داشته‌اند. به طوری که میزان شاخص ضریب کارایی اصلاح شده (E') و شاخص مطابقت (d') تابع اصلاح شده گومپرتز نسبت به تابع نمایی دوگانه و تابع اصلاح شده ویبول به ترتیب سه و هشت واحد و دو و شش واحد بیشتر بوده که این امر برتری نسبی این تابع را در شبیه‌سازی عملکرد بذر گندم دوروم در شرایط تنش شوری نشان می‌دهد. در مرحله بعد تابع نمایی دوگانه نیز با دقت نسبتاً خوبی توانسته پس از تابع اصلاح شده گومپرتز عملکرد گندم را پیش‌بینی نماید. در بین توابع آماری- تجربی، ضعیف‌ترین تخمین‌ها توسط تابع اصلاح شده ویبول با دارا بودن مقادیر شاخص ضریب کارایی اصلاح شده (E') ۰/۶۶ و همچنین شاخص مطابقت اصلاح شده (d') ۰/۸۱ دارا بوده است. محققین مختلفی همانند سرایی تبریزی و همکاران (Saraee

1- Underestimate

بوده و کاملاً تعریف شده هست و به راحتی قابل اندازه‌گیری می‌باشد، در حالی که در مدل‌های آماری-تجربی مقادیر پارامترهای هر معادله فاقد مفهوم بیوفیزیکی بوده و مقادیر مطلق هر پارامتر هیچ‌گونه اطلاعاتی از رشدی گیاه بیان نمی‌کند. بنابراین، هرچند کار با توابع آماری راحت‌تر بوده و با آنالیزهای رگرسیونی، ضرایب آن‌ها به‌دست می‌آید لیکن، این ضرایب به هیچ وجه قابل تعمیم به سایر شرایط نبوده و بسیار تغییر پذیر هستند.

مختلف آماری-تجربی برخوردار بوده‌اند. به همین ترتیب، بررسی تطبیقی شاخص‌های دقت بهترین مدل ماکروسکوپی (یعنی مدل همایی و همکاران) با بهترین تابع آماری-تجربی (یعنی تابع اصلاح شده گومپرتز) حاکی از بیشتر بودن ۱۳، ۶ و ۴ واحد به ترتیب در پارامترهای ضریب کارایی اصلاح شده ( $E'$ )، شاخص مطابقت ( $d'$ ) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) بوده است. ضمن اینکه پارامترهای معادله همایی و همکاران (Homae et al., 2002b) از لحاظ فیزیکی دارای مفهوم

جدول ۵- پارامترهای برآورد شده مدل‌های مختلف به کمک معادلات ۱۲، ۱۳ و ۱۴

Table 5- Predicted parameters of different models with equations of 12, 13 and 14

مدل Model	a	b
تابع اصلاح شده گومپرتز Modified Gompertz Function	-4.217	-0.2919
تابع نمایی دوگانه Bi-Exponential Function	-0.0067	0.0184
تابع اصلاح شده ویبول Modified Weibull Function	-0.081	1.223

جدول ۶- آماره‌های محاسبه شده برای مقایسه معادلات مختلف آماری-تجربی

Table 6- The obtained statistics to assess different statistical-experimental model performances

مدل Model	ضریب کارایی اصلاح شده $E'$	شاخص مطابقت اصلاح شده $d'$	ضریب جرم باقیمانده CRM	ضریب تبیین $R^2$
تابع اصلاح شده گومپرتز Modified Gompertz Function	0.74	0.87	0.063	0.94
تابع نمایی دوگانه Bi-Exponential Function	0.71	0.85	-0.117	0.88
تابع اصلاح شده ویبول Modified Weibull Function	0.66	0.81	-0.108	0.93

دو دسی‌زیمنس بر متر به‌دست آمد که این امر باید از این پس مورد توجه پژوهشگران و برنامه‌نویسان کامپیوتری که در پی برآورد کمی عملکرد گیاهان در محیط‌های شور هستند، واقع شود. در ادامه این پژوهش، بررسی تطبیقی دو رویکرد فرآیندی و آماری در شبیه‌سازی عملکرد گندم دوروم تحت تنش شوری حاکی از برتری نسبی رویکرد فرآیندی در تخمین عملکرد بوده است. به‌طوری‌که در بین تمامی مدل‌های فرآیندی و آماری-تجربی، مدل همایی و همکاران از دقت قابل قبولی برخوردار بود. همچنین تجزیه و تحلیل‌های آماری نشان داد که تابع اصلاح شده گومپرتز نیز در بین مدل‌های آماری-تجربی، توانایی قابل قبولی در تخمین میزان کاهش عملکرد به ازای سطوح مختلف شوری را دارد.

## نتیجه‌گیری

استفاده از آب‌های شور و لب شور در تولید محصولات کشاورزی وابسته به تعیین حساسیت گیاهان به شوری است. درباره اثر شوری بر گیاهان مختلف پژوهش‌های فراوان انجام شده لیکن نتایج حاصل عموماً به صورت کمی بیان نشده‌اند. اندک پژوهش‌هایی هم که به صورت کمی ارائه شده‌اند بر مبنای "میانگین شوری" ناحیه رشد ریشه بوده‌اند. بنابراین استفاده از داده‌های چنین جدول‌هایی چندان قابل اعتماد و استناد نیست. به‌طوری‌که بر خلاف عدد ارائه شده توسط ماس و گراتن (Mass & Grattan, 1999)، که آستانه کاهش عملکرد گندم دوروم را ۵/۹ دسی‌زیمنس بر متر اعلام نموده است، آستانه کاهش عملکرد گندم دوروم رقم بهرنگ در این پژوهش عدد

## سیاسگزاری

هزینه پژوهش اخیر توسط قطب تنش‌های محیطی در غلات دانشگاه شهید باهنر کرمان تامین شده که بدین وسیله سیاسگزاری می‌گردد.

بر اساس یافته‌های فوق توصیه می‌شود تا با شناخت و مطالعه کمی حساسیت ارقام غالب زراعی هر ناحیه و استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز مناسب، زمینه استفاده از آب‌های کم کیفیت و لب‌شور را به منظور جبران بخشی از کمبود آب شیرین در برنامه‌های علمی و ترویجی کشاورزی گنجانند.

## منابع

- Akbari Ghogdi, 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 Summary)
- Basso, B., Cammarano, D., and Carfagna, E. 2013. Review of Crop Yield Forecasting Methods and Early Warning Systems. FAO Publication, Rome, Italy.
- Dirksen, C., Kool, J.B., Koorevaar, P., and Van Genuchten, M.T. 1993. HYSWASOR- Simulation Model of Hysteretic Water and Solute Transport in the Root Zone. In: D. Russo and G. Dagan (Eds.). *Water Flow and Solute Transport in Soils*. Springer, Berlin, Heidelberg. p. 99-122.
- Eskandari, M., Homaei, M., Asadi Kapourchal, S., and Mirnia, S.K. 2014. Barley seed germination in  $\text{NaCl}^+\text{CaCl}_2$  solution, natural saline water and saline soil. *Cereal Research* 3(4): 335- 347. (In Persian with English Summary)
- FAO. 2010. Extent and causes of salt-affected soils in participating countries. Available at Web site: URL: <http://www.fao.org/ag/AGL/agll/spuch/topic4.htm>.
- Feddes, R.A., Kowalik, P., and Zarandy, H. 1978. *Simulation of Field Water Use and Crop Yield*. Pudoc. Wageningen. The Netherlands.
- Gardner, W.R. 1960. Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Science* 89: 63-73.
- Gompertz, B. 1825. On the nature of the function expressive of the law of human mortality and on a new mode of determining the value of life contingencies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 115: 513-583.
- Hadi, M.R., Khosh Kholgh Sima, N.A., Khavarinejad, R., and KiyamNekoie, S.M. 2008. The effect of elements accumulation on salinity tolerance in seven genotype durum wheat (*Triticum turgidum* L.) Collected from the Middle East. *Iranian Journal of Biology* 21(1): 326-340. (In Persian with English Summary)
- Homaei, M., and Feddes, R.A. 2002. Modeling the Sink Term under Variable Soil Water Osmotic Heads. In: Hassanizadeh et al. (Eds.), *Developments in water resources* 47 (1); *Computational methods in water resources*. Elsevier Science B.V., the Netherlands p. 17-24.
- Homaei, 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.
- Homaei, 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.
- Homaei, M., Feddes, R.A., and Dirksen, C. 2002c. A macroscopic water extraction model for non-uniform transient salinity and water stress. *Soil Science Society of America Journal* 66(6): 1764-1772.
- Homaei, M., Feddes, R.A., and Dirksen, C. 2002d. Simulation of root water uptake. II. Non-uniform transient water stress using different reduction functions. *Agricultural Water Management* 57(2): 111-126.
- Iran Water Resources Management Company (IWRMC). 2015. Available at Web site: <http://www.wrm.ir>
- Jalali, V.R., and Homaei, M. 2010. Modeling the effect of salinity application time of root zone on yield of canola (*brassica napus* l.). *Agricultural Crop management (Journal of Agriculture)* 12(1): 29-40. (In Persian with English Summary)
- Jalali, V.R., Homaei, M., and Mirnia, K. 2008. Modeling canola response to salinity on vegetative growth stages. *Journal of Agricultural Engineering Research* 8: 95-112. (In Persian with English Summary)

- Koocheki, A., Fallahpour, F., Khorramdel, S and Jafari, L. 2014. Intercropping wheat (*Triticum aestivum* L.) with canola (*Brassica napus* L.) and their effects on yield, yield components, weed density and diversity. *Journal of Agroecology* 6(1): 11-20. (In Persian with English Summary)
- Lapp, M.S., and Skoropad, W.P. 1976. A mathematical model of conidial germination and appressorial formation for *Colletotrichum graminicola*. *Canadian Journal of Botany* 54(19): 2239-2242.
- Maas, E.V., and Grattan, S.R. 1999. Crop Yields as Affected by Salinity. In: R.W. Skaggs and J. van Schilfgaarde (Eds.). *Agricultural Drainage*. Madison, WI: ASA, CSSA, SSA. Agron. Monograph 38. p. 55-108.
- Maas, E.V., and Hoffman, G.J. 1977. Crop salt tolerance-current assessment. *Journal of the Irrigation and Drainage Division* 103: 115-134.
- Nekahi, M.Z., Soltani, A., Siahmarguee, A., and Bagherani, N. 2014. Yield gap associated crop management in wheat (Case study: Golestan province-Bandar-gaz). *Electronic Journal of Crop Production* 7(2): 135-156. (In Persian with English Summary)
- Oleson, B.T. 1996. World Wheat Production Utilization and Trade. In: W. Bushuk and V.F. Rasper (Eds.). *Wheat production, properties and quality*. Chapman and Hall p. 1-11.
- Omidi, M., Siahpoosh, M.R., Mamghani, R., and Modarresi, M. 2013. The effects of terminal heat stress on yield, yield components and some morpho-phenological traits of wheat genotypes in Ahwaz weather conditions. *Electronic Journal of Crop Production* 6(4): 33-53. (In Persian with English Summary)
- Pansu, M., and Gautheyrou, J. 2006. *Handbook of Soil Analysis, Mineralogical, Organic and Inorganic Methods*. Springer.
- Razeghi Jahromi, F., Shahsavand Hassani, H., and Rezaeithe, A.H. 2012. Study of salt stress effects on yield and its components of new cereal (primary tritipyrum lines: AABBEbEb) in comparison with wheat and triticale. *Electronic Journal of Crop Production* 4(1): 1-16. (In Persian with English Summary)
- Rezvani, H., Asghari, J., Ehteshami, S.M.R., and Kamkar, B. 2013. Study the response of yield and component yield of wheat cultivars in competition with wild mustard in Gorgan. *Electronic Journal of Crop Production* 6(4): 187-214. (In Persian with English Summary)
- Richards, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics* 1:318-333.
- Saadat, S., Homae, M., and Liaghat, A.M. 2005. Effect of soil solution salinity on the germination and seedling growth of sorghum plant. *Journal of Soil and Water Science* 19: 243-254. (In Persian with English Summary)
- Saadat, S., and Homae, M. 2015. Modeling sorghum response to irrigation water salinity at early growth stage. *Agricultural Water Management* 152: 119-124.
- Saraee Tabrizi, M., Babazadeh, H., Homae, M., Kaveh, F., and Parsinejad, M. 2015. Simulating basil response to irrigation water salinity. *Journal of Water Research in Agriculture* 28(4): 691-701. (In Persian with English Summary)
- Sayar, R., Bchini, H., Mosbahi, M., and Khemira, H. 2010. Response of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) growth to salt and drought stresses. *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding* 46(2): 54-63.
- Seed and Plant Improvement Institute. 2013. Available at Web site: [www.spii.ir/spSPII/default.aspx?Page= Document & app = Documents & docId=11952&docParId=11470](http://www.spii.ir/spSPII/default.aspx?Page=Document&app=Documents&docId=11952&docParId=11470)
- Steppuhn, H., Van Genuchten, M.T., and Grieve, C.M. 2005. 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.
- Van Genuchten, M.T. 1983. Analyzing crop salt tolerance data: Model description and user's manual. UDSA, ARS, U.S. Salinity Lab. Research Report No. 120. U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Van Genuchten, M.T., and Hoffman, G.J. 1984. Analysis of crop salt tolerance data. In: I. Shainberg and J. Shalhevet (Eds.). *Soil Salinity under Irrigation Process and Management*. Ecological Studies 51. Springer-Verlag. New York p. 258-271.
- Wang, D., Poss, J.A., Donovan, T.J., Shannon, M.C., and Lesch, S.M. 2002. Biophysical properties and biomass production of elephant grass under saline conditions. *Journal of Arid Environments* 52(4): 447-456.
- Weibull, W. 1951. A statistical distribution function of wide application. *Journal of Applied Mechanics* 18: 293-297.



## Simulating Durum Wheat (*Triticum turgidum* L.) Response to Root Zone Salinity based on Statistics and Macroscopic Models

V.R. Jalali<sup>1\*</sup> and S. Asadi Kapourchal<sup>2</sup>

Submitted: 19-12-2015

Accepted: 13-04-2016

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.

### Introduction

Salinity as an abiotic stress can cause excessive disturbance for seed germination and plant sustainable production. Salinity with three different mechanisms of osmotic potential reduction, ionic toxicity and disturbance of plant nutritional balance, can reduce performance of the final product. Planning for optimal use of available water and saline water with poor quality in agricultural activities is of great importance. Wheat is one of the eight main food sources including rice, corn, sugar beet, cattle, sorghum, millet and cassava which provide 70-90% of all calories and 66-90% of the protein consumed in developing countries. Durum wheat (*Triticum turgidum* L.) is an important crop grows in some arid and semi-arid areas of the world such as Middle East and North Africa. In these regions, in addition to soil salinity, sharp decline in rainfall and a sharp drop in groundwater levels in recent years has emphasized on the efficient use of limited soil and water resources. Consequently, in order to use brackish water for agricultural productions, it is required to analyze its quantitative response to salinity stress by simulation models in those regions. The objective of this study is to assess the capability of statistics and macro-simulation models of yield in saline conditions.

### Material and Methods

In this study, two general approach of simulation includes process-physical models and statistical-experimental models were investigated. For this purpose, in order to quantify the salinity effect on seed relative yield of durum wheat (Behrang Variety) at different levels of soil salinity, process-physical models of Maas & Hoffman (1977), van Genuchten & Hoffman (1984), Dirksen et al. (1993) and Homaee et al. (2002b) models were used. Also, statistical-experimental models of Modified Gompertz Function, Bi-Exponential Function and Modified Weibull Function were used too. In order to get closer to real conditions of growth circumstances in saline soils, a natural saline water was taken from Maharlu Lake, Fars province, Iran. This natural and highly saline water with electrical conductivity of 512 dS.m<sup>-1</sup> diluted with fresh water to obtain the designated saline waters required for the experimental treatments. The designed experimental treatments were consisted of a non-saline water and five salinity levels of 2, 4, 6, 8 and 10 dS/m with three replicates. Three statistics of modified coefficient efficiency (E'), modified index of agreement (d') and coefficient of residual mass (CRM) were used to compare the used models and to assess their performances.

### Results and Discussion

Comparing the relative performance of models based on statistical indices of Modified Coefficient Efficiency (E') and Modified Index of agreement (d') indicated that the nonlinear model of Homaee et al. (2002b) is most accurate between process-physical models and Modified Gompertz Function is most accurate between statistical-experimental models. Comparison assessment of all models based on statistical index indicated that Homaee et al. model was the most accurate model for simulation of durum wheat yield. This is while the parameters of Homaee et al. (2002b) equation is well-defined concept and is easily measurable, but in statistical-experimental models, parameters of each model have no biophysical concept and the absolute values of each parameter do not express any information about development status of the plant. So, the nonlinear model of Homaee et al. was chosen as the optimal model in this research.

1 and 2- Assistant Professor, Department of Soil Science Engineering , Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman and Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran, respectively.

(\*- Corresponding author Email: v.jalali@uk.ac.ir)

DOI: 10.22067/jag.v9i2.51978

## Conclusion

Most of the plants such as wheat, are sensitive to salinity and by increasing the age, their sensitivity to salinity are reduced. Based on the obtained results of this study, by knowing and quantitative assessment of the dominant cultivars sensitivity of each region, as well as using appropriate simulation models, one can use brackish or saline waters to partly compensate fresh water shortage for scientific and extension Agricultural programs.

**Keywords:** Environmental stress, Modified Gompertz Function, Saline water, Simulation