

## شبیه‌سازی ماکروسکوپیک واکنش گندم دوروم به شوری طی دوره رشد رویشی

سارا حسینی<sup>۱</sup>، وحیدرضا جلالی<sup>۲\*</sup> و مهدی همایی<sup>۳</sup>

۱ و ۲ - به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد و استادیار گروه خاک‌شناسی دانشگاه شهید باهنر کرمان،

۳- استاد گروه خاک‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۱۸ - تاریخ پذیرش: ۹۳/۶/۳۱)

### چکیده

کمبود منابع آب شیرین از چالش‌های مهم تولید فرآورده‌های کشاورزی در مناطق خشک و نیمه خشک است. از این رو باید با تجزیه و تحلیل کمی واکنش گیاهان این مناطق نسبت به تنش شوری، از آب‌های کم کیفیت و لب‌شور نیز برای تولید بهره برد. دوره رشد رویشی، حیاتی‌ترین بخش زندگی گیاه است، زیرا بقای گیاه در این دوره بر عملکرد تاثیر می‌گذارد. هدف از این پژوهش، کمی کردن واکنش گندم دوروم به شوری طی مراحل مختلف رشد رویشی با استفاده از مدل‌های کلان بود. بدین منظور، آزمایشی شامل یک تیمار غیر شور (۰/۴ دسی‌زیمنس بر متر) و پنج تیمار با شوری‌های ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر اجرا شد. به منظور کمی کردن اثر شوری در هر یک از مراحل رشد، تعداد نسبی گیاهچه و مقادیر تعرق نسبی در شوری‌های مختلف خاک، با استفاده از مدل‌های ماس و هافمن، ون‌گنوختن و هافمن، دیرکسن و همکاران، و همایی و همکاران، برآورد و پارامترهای مورد نظر به دست آمد. مدل‌ها با استفاده از آماره‌های ضریب کارآیی اصلاح شده، شاخص تطبیق اصلاح شده و ضریب جرم باقیمانده مقایسه شدند. آماره‌های مربوط به برازش مدل‌های مختلف بر مقادیر اندازه‌گیری شده، طی مرحله اول رشدی نشان داد که مدل همایی و همکاران نسبت به سایر مدل‌ها مناسب‌تر است، لیکن برای مراحل دوم و سوم رشد رویشی، مدل خطی ماس و هافمن برآورد نسبتاً بهتری ارائه داد.

واژه‌های کلیدی: تنش شوری، شبیه‌سازی، گندم دوروم

## مقدمه

برابر آمار موجود، سطح کلی خاک‌های شور در ایران حدود ۴۴ میلیون هکتار تخمین زده می‌شود که حدود ۳۰ درصد مساحت دشتهای و متجاوز از ۵۰ درصد اراضی تحت کشت آبی کشور است (Banaee *et al.*, 2004). به طور کلی می‌توان گفت به استثنای اراضی گیلان و بخش‌هایی از مازندران، تقریباً تمامی دشتهای و اراضی پست ایران کم و بیش شور هستند و بیشترین شوری در خاک‌هایی وجود دارد که فعلاً تحت آبیاری هستند و زهکشی مناسبی ندارند. افزون بر بالا بودن مقدار تجمع املاح در خاک‌های کشور، کاهش شدید نزولات جوی و افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی در سال‌های اخیر نیز بر استفاده بهینه از منابع محدود آب و خاک تأکید دارد. لزوم اعمال مدیریت بهینه آب در مناطقی که کیفیت آب و خاک آنها چندان مطلوب نیست، نیازمند تجزیه و تحلیل حساسیت گیاه به شوری در هر یک از مراحل رشد است. بنابراین، تعیین دقیق کاهش میزان عملکرد و اعمال مدیریت مناسب، نیازمند کمی‌کردن اثر شوری بر عملکرد در هر مرحله رشد است.

شوری به عنوان یک تنش غیر زنده می‌تواند اختلالات زیادی را برای بذرها در دوره جوانه‌زنی ایجاد کند (Saadat *et al.*, 2005). حساسیت گیاه به شوری طی فصل رشد دائماً تغییر می‌کند (Homaei *et al.*, 2002; Jalali and homaei, 2010). این مسئله برای اسفناج و کلم قرمز (Wilson *et al.*, 1999)، گندم (Hamdy *et al.*, 2005)، جو (Eskandari *et al.*, 2014)، کلزا (Jalali *et al.*, 2008; Akhtari *et al.*, 2014) و سورگوم (Maas and Poss, 1989) گزارش شده است. حسینی و همکاران در پژوهشی به مطالعه تاثیر تنش همزمان شوری و عنصر بُر روی جوانه‌زنی و سبز شدن بذر کلزا پرداختند. یافته‌های ایشان نشان داد که سطوح بالای بُر نیز همانند شوری سبب کاهش جوانه‌زنی و تاخیر بیشتر در جوانه‌زنی گردید، و ترکیب شوری با بُر سبب تشدید آنها شد (Hosseini *et al.*, 2014).

بیشتر گیاهان در مرحله جوانه‌زنی به تنش شوری مقاوم هستند، لیکن در مرحله گیاهچه و مراحل اولیه پس از آن حساس و در معرض آسیب هستند (Zeynali *et al.*, 2002). چنانچه گیاه در خاک استقرار یابد و با موفقیت مرحله رشد رویشی را سپری نماید، با گذشت

زمان و در مراحل بعدی رشد به شوری مقاوم‌تر می‌شود. در تحقیقی که توسط حمدی و همکاران صورت گرفت، امکان استفاده از آب‌های لب شور و با کیفیت نامناسب با شوری حدود ۳ تا ۹ دسی‌زیمنس بر متر به عنوان آبیاری تکمیلی برای استفاده در مزارع گندم و جو که در مناطق مدیترانه‌ای کشت شده بودند، مورد بررسی قرار گرفت (Hamdy *et al.*, 2005).

اختری و همکاران (Akhtari *et al.*, 2014) به بررسی کمی اثر همزمان شوری و کمبود ازت در کلزا پرداختند و نشان دادند که مدل میچرلیخ-بال در شرایط وجود شوری و کمبود ازت، از دقت قابل قبولی در تخمین عملکرد گیاه برخوردار است.

گیاهان به دو منظور فتوسنتز و تعرق، به آب احتیاج دارند. تعیین نیاز آبی گیاهان برای نیل به حداکثر عملکرد بستگی به اندازه‌گیری صحیح تبخیر و تعرق دارد. وجود رابطه‌ای خطی بین رشد گیاه و میزان تعرق یا تبخیر و تعرق طی یک فصل زراعی معین، در پژوهش‌های متعددی گزارش شده است (de Wit, 1958; Childs and Hanks, 1975; Feddes *et al.*, 1978).

ارقام محلی گندم دوروم از گذشته بسیار دور در مناطق مختلف کشور خصوصاً شمال غرب تا جنوب غرب به صورت دیم کشت شده اند و سطح زیر کشت دیم این محصول در سال‌های اخیر حدود ۲۵۰ هزار هکتار برآورد می‌گردد. تا قبل از سال ۱۳۷۰ گندم دوروم آبی به صورت گسترده کشت نمی‌شد، اما 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 شد که نشان دهنده سازگاری وسیع گندم دوروم با شرایط آب و هوایی خشک به‌ویژه مناطق گرم و خشک جنوب کشور که دچار بحران کم آبی هستند، می‌باشد (Seed and Plant Improvement Institute, 2013).

گندم همانند اکثر گیاهان زراعی در مراحل مختلف رشد خود نسبت به شوری واکنش‌های متفاوتی دارد، در حالی که تمام مدل‌های موجود که واکنش گیاهان را به شوری به صورت کمی بیان می‌کنند، بر فرض ثابت بودن شوری خاک از آغاز تا پایان دوره رشد استوارند و به همین دلیل می‌توان انتظار داشت که شوری آستانه کاهش

این پژوهش در ۳ تکرار و شامل آب شهر به عنوان شاهد و ۵ سطح شوری ۲، ۴، ۶، ۸ و  $10 \text{ dS.m}^{-1}$  بود.

نحوه آماده سازی خاک و پرکردن گلدان‌ها بدین گونه بود که نخست خاک از الک ۴ میلی‌متری رد شد تا مشکلی از لحاظ یکنواختی در نفوذ و آب‌شویی ایجاد نشود. سپس رطوبت خاک از طریق پاشیدن آب روی آنها، به حدود ۵ درصد رسید تا مناسبترین شرایط برای فشرده سازی خاک ایجاد گردد. یک سوم از این خاک مرطوب، به درون گلدانها ریخته شد و سپس به کمک یک هاون مخصوص (که قطر آن برابر قطر داخلی گلدان بود) عمل فشرده سازی خاک انجام گرفت. این کار برای همه گلدان‌ها تکرار شد تا جرم ویژه ظاهری خاک گلدان‌ها به  $1/3 \text{ g.cm}^{-3}$  برسد. پس از آن در هر گلدان ۳۰ بذر سالم کاشته شد و پس از سبز شدن به ۱۰ بوته سالم تقلیل داده شد. زمان آبیاری بدین صورت بود که گلدان‌ها روزانه وزن شده و در روز سوم به گلدان‌ها تا حد ظرفیت زراعی آب داده می‌شد تا مشکلی از لحاظ تنش آبی پیش نیاید. دوره رشد رویشی گندم دوروم شامل مراحل: جوانه زنی تا سبز شدن (E)، از سبز شدن تا آغازین گلدهی (GS1) و از آغازین گلدهی تا گلدهی (GS2) بود که طول این دوره‌ها در رقم بهاره گندم بهرنگ، به ترتیب حدود ۱۴، ۵۰ و ۲۱ روز بود. به همین منظور، گلدان‌های مربوط به هر مرحله، تا ابتدای مرحله مورد نظر با آب معمولی آبیاری گردید تا تنشی به آنها وارد نشود. پس از رسیدن به مرحله مورد نظر، هر گلدان با تیمار شوری مربوطه ۳ بار آبشویی شد و تیمارهای شوری پس از آن اعمال گردید. طی انجام آزمایش، حجم و EC زه‌آب به طور پیوسته اندازه‌گیری می‌شد تا از صحت اعمال  $LF = 0/5$  اطمینان حاصل شود. در مرحله گیاهچه‌ای، عملکرد نسبی شامل تعداد بوته های سالم در هر سطح شوری نسبت به تعداد بوته ها در تیمار غیر شور محسوب می‌شود. در سایر مراحل گلدان‌ها بصورت روزانه توزین و تعرق هر کدام از گلدان‌ها محاسبه و ثبت گردید و بر اساس رابطه دویت (de Wit, 1958)، عملکرد نسبی در این مرحله شامل تعرق گیاه در هر سطح شوری نسبت به تیمار شاهد (آب معمولی) در نظر گرفته شد.

با افزایش شوری، جذب آب در گیاه کاهش می‌یابد. بیان کمی جذب آب در گیاهان با استفاده از معادله کلی

عملکرد گندم در هر یک از مراحل رشد رویشی با دیگر مراحل رشد آن متفاوت باشد. همچنین مشخص نیست که توابع کاهش جذب آب برای هر یک از مراحل رشد رویشی گندم از چه شکلی برخوردار است. افزون بر آن، این پرسش بی‌پاسخ مانده است که آیا توابع کاهش جذب آب در دوره رشد رویشی با مدل‌های موجود برآورد می‌شوند یا مدل مناسب برای آنها باید به دست آید. هدف از این پژوهش، پاسخ‌دادن به این پرسش‌های سه‌گانه بود.

## مواد و روش‌ها

در این پژوهش برای بررسی دقیق تاثیرات آب شور با ترکیبات طبیعی (بر خلاف آنچه که معمولاً از ترکیبات  $NaCl$  و یا  $NaCl+CaCl_2$  استفاده می‌گردد) نمونه آبی از دریاچه مهارلوی استان فارس تهیه و به آزمایشگاه منتقل شد. همچنین آزمایش در یک خاک زراعی با بافت لوم شنی و در گلدان‌هایی به ارتفاع ۳۲ و قطر ۲۰ سانتی‌متر انجام گرفت. برای اعمال تیمارهای شوری، یک نمونه خاک سبک بافت لوم شنی از مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان، تهیه و به گلخانه حمل شد. برخی از ویژگیهای فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است.

بافت لوم شنی به این دلیل انتخاب شد تا بتوان شوری کل توده خاک را با اعمال برخه آبشویی (Leaching Fraction) زیاد ( $LF=0/5$ ) نسبتاً یکنواخت نگه داشت. همانگونه که پیشتر اشاره شد، در اکثر پژوهش‌های انجام شده پیرامون اثر شوری بر رشد و عملکرد گیاه، از آب شور مصنوعی که عموماً ترکیبات  $NaCl$  و یا  $NaCl+CaCl_2$  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 شده است. این موضوع با شرایط واقعی منابع آب و خاک شور تطابق ندارد. به همین دلیل، در این پژوهش از آب شور طبیعی استفاده شد.

آب شور تهیه شده از دریاچه مهارلوی فارس با شوری  $512 \text{ dS.m}^{-1}$  برای استفاده در تیمارهای مورد نظر با آب معمولی رقیق گردید تا شوری‌های مورد نظر برای اعمال تیمارهای آزمایشی بدست آید. تیمارهای به کار رفته در

توابع پیشنهاد شده برای  $\alpha(h_0)$ ، منحصر به روابطی هستند که ماس و هافمن (Maas and Hoffman, 1977)، ون گنوختن و هافمن (van Genuchten and Dirksen et al., 1984)، دیرکسن و همکاران (Hoffman, 1984)، و همایی و همکاران (Homae et al., 2002a,b,c,d) ارائه داده‌اند که به شرح زیرند:

ماس و هافمن (Maas and 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:

$$\alpha(h_0) = 1 - \frac{a}{360} (h_0^* - h_0) \quad (5)$$

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) معادله‌ای غیر خطی به صورت زیر پیشنهاد کردند:

$$\alpha(h_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h_0}{h_{0.50}}\right)^p} \quad (6)$$

که در آن  $h_{0.50}$  مقدار فشار اسمزی ( $L$ ) است که در آن جذب آب ۵۰ درصد کاهش می‌یابد، و  $p$  ضریبی تجربی است که وابسته به گیاه، خاک، و اقلیم است (Homae and Feddes, 2002).

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

$$\alpha(h_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h_0^* - h_0}{h_0^* - h_{0.50}}\right)^p} \quad (7)$$

این رابطه نسبت به روابط قبلی با دقتی بیشتر واکنش گیاه را به شوری برآورد می‌کند، لیکن مهم‌ترین محدودیت آن به دست آوردن  $h_{0.50}$  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  $h_{0.50}$  پارامتری

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 ( $L^3L^{-3}$ )،  $t$  زمان عمق خاک ( $L$ )،  $K$  ضریب آب‌گذری غیر اشباع خاک ( $LT^{-1}$ )،  $h$  پتانسیل ماتریک ( $L$ ) و  $S$  مقدار آب جذب شده از ریشه گیاه در واحد حجم خاک و زمان ( $L^3L^{-3}T^{-1}$ ) است.

برای بیان کمی  $S$ ، مدل‌هایی وجود دارد که می‌توان آنها را به دو گروه خرد (Microscopic Models) و کلان (Macroscopic Models) تقسیم کرد. مدل‌های خرد به دلیل فرضیات مبنایی غیر واقعی و نیز غیر قابل اندازه‌گیری بودن برخی پارامترهای آن در شرایط کنونی، تا به حال آزمایش نشده‌اند. به همین دلیل، 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 شده و معادله کلی آن به صورت زیر است:

$$S = S_{\max} \frac{T_p}{Z_r} \quad (2)$$

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

اگر خاک نتواند نیاز آبی گیاه را برای حداکثر تعرق ( $T_p$ ) فراهم کند، به اندازه  $\alpha$  که تابع کاهش (Reduction Function) نام دارد، از تعرق کاسته می‌شود:

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

معمولاً  $\alpha$  تابعی از پتانسیل ماتریک خاک است و آن را به صورت  $\alpha(h)$  نشان می‌دهند. معادله ۳ شکل عمومی مدل‌های کلان است که فدس و همکاران (Feddes et al., 1978) آن را ارائه داده‌اند. در شرایط شوری،  $\alpha$  تابعی از پتانسیل اسمزی محلول خاک ( $h_0$ ) است و مقدار جذب آب در گیاه در این شرایط به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S = \alpha(h_0) S_{\max} = \alpha(h_0) \frac{T_p}{Z_r} \quad (4)$$

Dirksen *et al.* (Hoffman, 1984)، دیرکسن و همکاران (Homaei *et al.*, 1993) و همایی و همکاران (Homaei *et al.*, 2002b) محاسبه شد. مدل‌های یاد شده بر داده‌های عملکرد نسبی بدست آمده در مراحل سه‌گانه فوق برآزش داده شدند. عملکرد نسبی برآورد شده توسط مدل‌ها با مقادیر اندازه‌گیری شده در برابر سطوح مختلف شوری رسم و نتایج مدل‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شدند.

#### مقایسه کمی دقت شبیه‌سازی مدل‌های چهارگانه

برای مقایسه کمی داده‌های اندازه‌گیری شده با مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل‌ها، از آماره‌های ضریب کارایی اصلاح شده ( $E'$ )، شاخص تطبیق اصلاح شده ( $d'$ ) و ضریب جرم باقیمانده (CRM) استفاده شد:

$$E' = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - S_i|}{\sum_{i=1}^n |O_i - O'|} \quad (11)$$

$$d' = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - S_i|}{\sum_{i=1}^n (|S_i - O'| + |O_i - O'|)} \quad (12)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (13)$$

که در آن‌ها  $O_i$  مقادیر اندازه‌گیری شده،  $S_i$  مقادیر شبیه‌سازی شده،  $O'$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و  $n$  تعداد زوج مقادیر اندازه‌گیری شده - برآورد شده عملکرد می‌باشد. محدوده ضریب کارایی اصلاح شده از یک تا منهای بی‌نهایت است،  $E'$  برابر با یک، نشان دهنده برابری مقادیر برآورد شده با اندازه‌گیری شده بوده و هرچه مقدار آن از یک کمتر باشد، دقت مقادیر برآورد شده کمتر است. محدوده شاخص تطبیق اصلاح شده از صفر تا یک است. هرچه مقدار  $d'$  بیشتر باشد، مقادیر برآورد شده به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک‌ترند. 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 برآوردی اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد (OswaldoSalazara *et al.*, 2008). در نهایت تجزیه و تحلیل نتایج با استفاده از آماره‌ها (معادلات ۱۱، ۱۲ و ۱۳) انجام شد.

وابسته به شکل است. همایی و همکاران (Homaei *et al.*, 2002a) با فرض اینکه  $p$  پارامتری وابسته به محصول، خاک، و اقلیم است، معادله زیر را برای به دست آوردن آن پیشنهاد کردند:

$$p = \frac{h_{0.50}}{h_{0.50} - h_o^*} \quad (8)$$

به دلیل اینکه مشکل به دست آوردن  $h_{0.50}$  تا اینجا 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 را پیشنهاد کردند که دارای دو آستانه کاهش است:

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + (1 - \alpha_0)/\alpha_0 [(h^* - h)/(h^* - h_{max})]^p} \quad (9)$$

کاهش در مقدار  $\alpha$  در شوری‌های بیشتر از ( $h_o^*$ ) ادامه می‌یابد تا به یک شوری معین ( $h_{0max}$ ) برسد. در شوری‌های بیشتر از  $h_{0max}$  افزایش شوری نمی‌تواند با همان روند قبلی در مقدار  $\alpha$  کاهش ایجاد کند. این واقعیت نشان می‌دهد که در  $h_o > h_{0max}$  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 زیر تعریف کردند.

$$p = \frac{h_{0max}}{h_{0max} - h_o^*} \quad (10)$$

رقم مورد استفاده در این تحقیق، رقم به‌رنگ بود. این رقم 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 ۳ سال در ۴ 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 و با توجه به اینکه بیشترین سطح زیر کشت گندم دوروم کشور در اقلیم مزبور واقع شده است، گونه مورد نظر برای مطالعات کمی شوری انتخاب شد.

به منظور کمی کردن اثر شوری بر رشد و عملکرد گندم در دوره زایشی، عملکرد نسبی با استفاده از مدل‌های ماس و هافمن (Maas and Hoffman, 1977)، و گنوختن و هافمن (van Genuchten and

جدول ۱- برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک مورد آزمون

Table 1. Some chemical and physical properties of experimental soil

منیزیم (Mg)	کلسیم (Ca)	سدیم (Na)	پتاسیم قابل جذب (K <sub>ava</sub> )	فسفر قابل جذب (P <sub>ava</sub> )	کربن آلی (OC)	آهک (TNV)	EC	SAR	pH
meq. l <sup>-1</sup>			mg. kg <sup>-1</sup>		%		dS .m <sup>-1</sup>	-	-
8.3	18.7	5.5	241.3	8	0.3	6.8	2.9	1.5	7.6

## نتایج و بحث

## الف- مرحله E (جوانه زنی تا سبز شدن)

در این مرحله، تعداد گیاهچه‌های زنده‌مانده در هر گلدان تا پایان دوره گیاهچه‌ای به عنوان شاخص عملکرد نسبی در نظر گرفته شد. شکل ۱ اثر شوری را بر تعداد نسبی گیاهچه‌های گندم نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که با افزایش سطوح شوری، تعداد گیاهچه‌های گندم کاهش می‌یابد. در مرحله بعد و به منظور بررسی توانایی مدل‌های چهارگانه فوق در تخمین مقدار عملکرد در این مرحله رشدی، مدل‌های مذکور بر داده‌های اندازه‌گیری شده برازش داده شد. شکل ۲ برازش مدل‌ها را بر داده‌های اندازه‌گیری شده در مرحله گیاهچه نشان می‌دهد.

با برازش مدل‌های مختلف بر داده‌های اندازه‌گیری شده، پارامترهای مختلف هر یک از مدل‌ها برآورد شد که نتایج حاصل در جدول ۲ ارائه شده است. در این جدول،  $EC_m$  بیانگر آستانه تحمل به شوری اندازه‌گیری شده گیاهچه گندم و  $EC_p$  آستانه تحمل به شوری برآورد شده توسط مدل است. مشاهده می‌شود که مدل‌های مختلف، مقادیر آستانه متفاوتی را گزارش نموده‌اند. از بین مدل‌هایی که واجد آستانه کاهش عملکرد می‌باشند، مقادیر تخمینی مدل‌های همایی و همکاران و مدل ماس و

هافمن نسبت به مقادیر آستانه مشاهده شده، ارقام نزدیک‌تری ارائه کرده‌اند. همچنین شیب کاهش عملکرد در مدل ماس و هافمن حدود ۵ درصد محاسبه شد. به منظور انتخاب کارآترین مدل در این مرحله، از شاخص‌های آماری ضریب کارایی اصلاح شده ( $E'$ )، شاخص مطابقت اصلاح شده ( $d'$ ) و ضریب جرم باقیمانده (CRM) استفاده شد (جدول ۳). با در نظر گرفتن شاخص‌های آماری فوق مشخص می‌شود که مدل همایی و همکاران، با در نظر گرفتن شرایط واقعی رشد در محیط تنش شوری، توانسته است با دقت قابل قبولی نسبت به سایر مدل‌های موجود، عملکرد نسبی گندم در مرحله گیاهچه‌ای را بهتر تخمین بزند. پس از آن، مدل خطی ماس و هافمن واجد بیشترین کارایی و دقت شده است. با در نظر گرفتن مقادیر آماره CRM در مدل‌های چهارگانه فوق، این مطلب مشخص می‌شود که تمامی مدل‌های غیرخطی تخمین‌های خود را با مقداری کم‌برآوردی (under-estimate) انجام داده‌اند، در حالی که مدل خطی ماس و هافمن همواره دچار بیش‌برآوردی (Over-estimate) بوده و یکی از دلایل احتمالی کوچکی شاخص مطابقت اصلاح شده در این مدل‌ها نیز احتمالاً همین امر است.

جدول ۲- پارامترهای برآورد شده با استفاده از معادلات ۵، ۶، ۷ و ۹ در مدل‌های مختلف

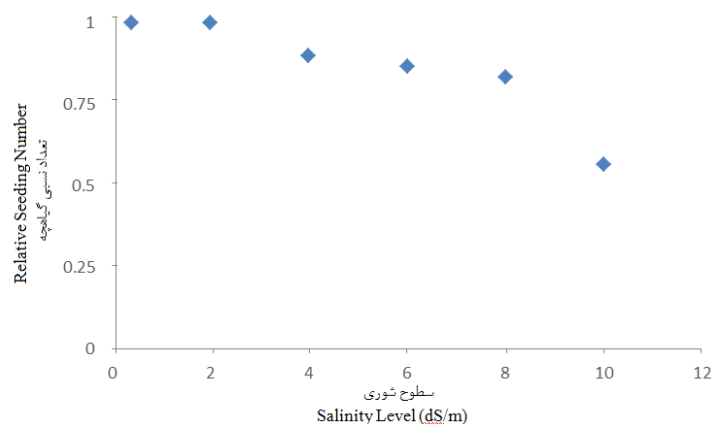
Table 2. Estimated parameters by equations 5, 6, 7 and 9 in different models

مدل (Model)	$EC_p$	$EC_m$	$EC_{50}$	$EC_{max}$	B	$P_p$
Homaee <i>et al.</i>	2.6	3	-	17.5	-	1.15
Dirksen <i>et al.</i>	2	3	11.57	-	-	1.2
van Genuchten	-	3	11.65	-	-	1.71
Maas & Hoffman	3.4	3	-	-	0.0517	-

جدول ۳- آماره‌های محاسبه شده برای مقایسه مدل‌های مختلف در مرحله رشد گیاهچه‌های

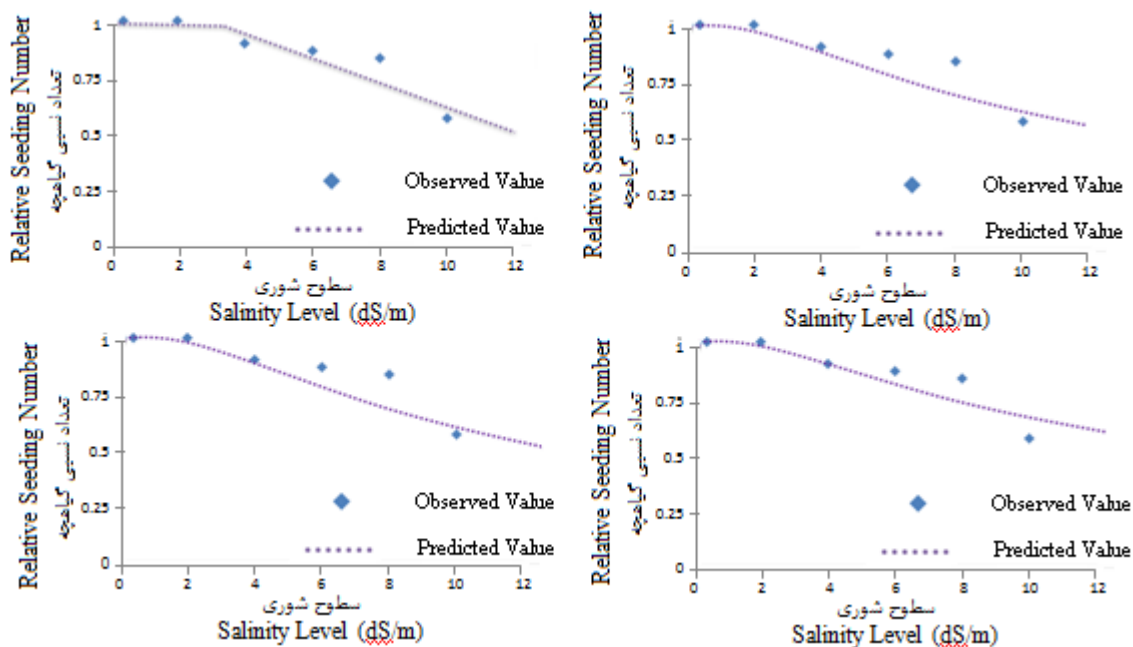
Table 3. The calculated statistics for comparison of different models in seedling growth stage

مدل (Model)	E'	d'	CRM	R <sup>2</sup>
Homaee <i>et al.</i>	0.77	0.68	10.13	0.88
Dirksen <i>et al.</i>	0.73	0.59	24.3	0.80
van Genuchten	0.71	0.61	22.13	0.81
Maas & Hoffman	0.73	0.63	-16.34	0.83



شکل ۱- اثر شوری بر تعداد نسبی گیاهچه‌های گندم دوروم

Figure 1. Salinity effect on the relative numbers of durum wheat seedling



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

Figure 2. The measured relative number of durum wheat seedlings and those predicted by Maas and Hoffman (A), van Genuchten and Hoffman (B), Dirksen *et al.*, (C) and Homaee *et al.*, (D) models.

## ب- مرحله GS1 (از سبز شدن تا آغازین گلدهی)

در این مرحله و پس از استقرار کامل بوته‌ها، عملکرد نسبی هر سطح شوری نسبت به تیمار شاهد (آب شهر)، شامل تعرق اندازه‌گیری شده در هر سطح شوری بود. مطابق شکل ۳، در این مرحله نیز سطوح مختلف شوری تاثیرات کاهشی بر میزان تبخیر و تعرق گیاهی داشته است. با برازش مدل‌های مختلف بر داده‌های اندازه‌گیری شده (شکل ۴)، پارامترهای مختلف هر یک از مدل‌ها، برآورد و در جدول ۴ ارائه شده است.

بر اساس منابع موجود، مرحله رشد اولیه گیاهچه‌ها یکی از حساس‌ترین مراحل رشدی در مقابل تنش شوری است. بطوریکه که شیب کاهش عملکرد نسبی (تعرق نسبی) در این مرحله نسبتاً افزایش یافته و همچنین آستانه کاهش عملکرد نیز به نسبت مرحله قبل کمتر شده است. در این مرحله مدل‌های غیر خطی واجد آستانه (یعنی مدل‌های دیرکسن و همکاران و همایی و همکاران)، شوری آستانه کاهش عملکرد را بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده (شوری  $1 \text{ dS.m}^{-1}$ ) برآورد نموده‌اند در حالیکه مدل خطی ماس و هافمن، شوری آستانه را بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده، تخمین زده است. همچنین درصد کاهش عملکرد نسبی (افت شیب خط عملکرد به ازای یک واحد افزایش شوری) در شوری‌های بیشتر از حد آستانه، ۶۱۳ درصد محاسبه گردید.

برای انتخاب دقیق‌ترین مدل تخمینی در این مرحله نیز مجدداً آنالیز شاخص‌های آماری در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن جدول شماره ۵، کارایی نسبی و همچنین درجه تطابق داده‌های تخمینی و اندازه‌گیری شده توسط مدل غیرخطی همایی و همکاران و مدل خطی ماس و هافمن، بهتر از سایر مدل‌ها بوده است. بنابراین در این مرحله هر دو مدل مذکور قابل توصیه و کاربرد است. البته مدل خطی ماس و هافمن به علت سهولت کاربرد و تعداد پارامتر محدود مورد نیاز، بیشتر قابل توصیه است. قابل ذکر است که در این مرحله مدل‌های همایی و همکاران و مدل ماس و هافمن تمایل به کم‌برآورد تخمین‌های خود داشته‌اند در حالیکه مدل دیرکسن و همکاران و مدل ون‌گنوختن و هافمن بر اساس آماره CRM، تمایل به بیش‌برآوردی تخمین‌های خود داشته‌اند.

## ج- GS2: (از آغازین گلدهی تا گلدهی)

آخرین مرحله رشد رویشی، از انتهای ساقه‌روی شروع شده و تا گلدهی امتداد می‌یابد. گلدان‌های مربوط به این مرحله رشدی نیز تا ابتدای مرحله با آب غیر شور آبیاری شده و در شروع مرحله سه بار با تیمارهای مربوطه آبخوبی شدند. پس از آن هر گلدان با تیمار موردنظر و البته با در نظر گرفتن برخه آبخوبی حداکثر جهت نزدیک شدن شوری محیط ریشه به شوری موردنظر، آبیاری شدند. در این مرحله از رشد، گلدان‌ها روزانه توزین شدند و تعرق هر یک محاسبه شد. شکل ۵ روند کاهشی تعرق نسبی گیاه را با افزایش شوری نشان می‌دهد.

به منظور کمی‌سازی واکنش گندم دوروم به تنش شوری در این مرحله، مدل‌های چهارگانه فوق بر داده‌های اندازه‌گیری شده برازش داده شد. شکل شماره ۶ نتایج برازش مدل‌ها را نشان می‌دهد. با برازش مدل‌های مختلف بر داده‌های اندازه‌گیری شده، پارامترهای مختلف هر یک از مدل‌ها، برآورد و در جدول ۶ ارائه شده است. در این جدول،  $P_p$ ,  $EC_m$ ,  $EC_p$  به ترتیب آستانه تحمل به شوری برآورده‌شده گندم در مرحله پایانی رشد رویشی، آستانه تحمل به شوری اندازه‌گیری شده و ضریب شکل برآورد شده در مدل‌های غیر خطی می‌باشد. با توجه به شکل ۶ همچنین ضریب همبستگی محاسبه شده در جدول ۷، مشاهده می‌شود که در این مرحله مدل خطی ماس و هافمن تخمین‌های خود را با دقت قابل قبولی نسبت به سایر مدل‌های غیرخطی ارائه نموده است. مقایسه نسبی مدل‌های چهارگانه فوق بر اساس شاخص‌های ضریب کارایی اصلاح شده ( $E'$ ) و شاخص مطابقت اصلاح شده ( $d'$ ) نیز مؤید بهبود نسبی تخمین‌های صورت گرفته مدل خطی ماس و هافمن نسبت به سایر مدل‌های غیرخطی می‌باشد. در مقایسه با مرحله رویشی قبل، آستانه کاهش عملکرد در این مرحله نسبت به مرحله پیشین، کمی افزایش یافته و شیب افت عملکرد نیز تا حدی کمتر شده است که این مطلب به نوعی گواه افزایش تحمل به شوری توسط گیاه با گذشت زمان است.



جدول ۴- پارامترهای برآورد شده با استفاده از معادلات ۵، ۶، ۷ و ۹ در مدل‌های مختلف

Table 4. Estimated parameters by equations 5, 6, 7 and 9 in different models

مدل (Model)	EC <sub>p</sub>	EC <sub>m</sub>	EC <sub>50</sub>	EC <sub>max</sub>	B	P <sub>p</sub>
Homaee <i>et al.</i>	1.6	1	-	14.50	-	1.67
Dirksen <i>et al.</i>	1.8	1	7.8	-	-	2.2
van Genuchten	-	1	7.8	-	-	2.11
Maas & Hoffman	0.7	1	-	-	0.0627	-

جدول ۵- آماره‌های محاسبه شده برای مقایسه معادلات مختلف در مرحله اول رشد رویشی

Table 5. The calculated statistics for comparison of different models in the first vegetative growth stage

مدل (Model)	E'	d'	CRM	R <sup>2</sup>
Homaee <i>et al.</i>	0.74	0.86	4.55	0.85
Dirksen <i>et al.</i>	0.70	0.77	-6.3	0.80
van Genuchten	0.69	0.75	-4.5	0.80
Maas & Hoffman	0.76	0.85	6.6	0.85

جدول ۶- پارامترهای برآورد شده با استفاده از معادلات ۵، ۶، ۷ و ۹ در مدل‌های مختلف

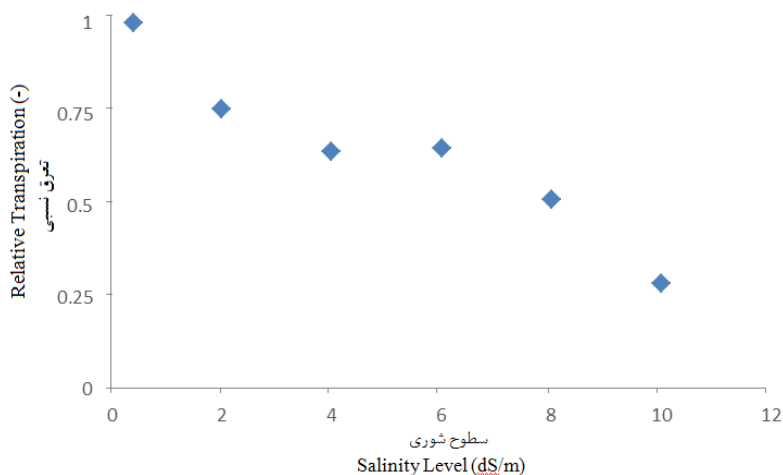
Table 6. Estimated parameters by equations 5, 6, 7 and 9 in different models

مدل (Model)	EC <sub>p</sub>	EC <sub>m</sub>	EC <sub>50</sub>	EC <sub>max</sub>	B	P <sub>p</sub>
Homaee <i>et al.</i>	1.7	1.5	-	16	-	1.33
Dirksen <i>et al.</i>	1.6	1.5	9.8	-	-	1.7
van Genuchten	-	1.5	11.8	-	-	1.48
Maas & Hoffman	1.6	1.5	-	-	0.055	-

جدول ۷- آماره‌های محاسبه شده برای مقایسه معادلات مختلف در مرحله دوم رشد رویشی

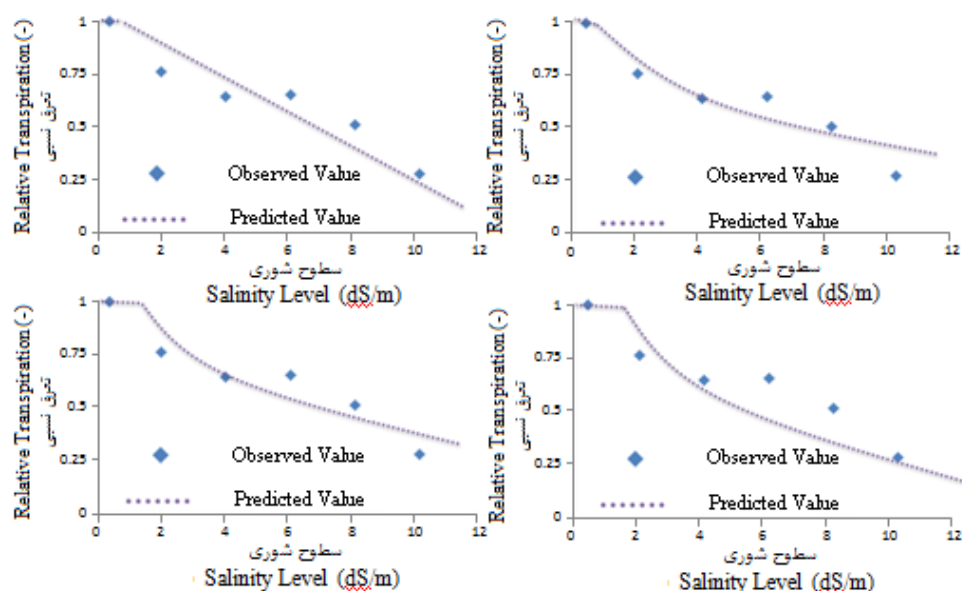
Table 7. The calculated statistics for comparison of different models in the second vegetative growth stage

مدل (Model)	E'	d'	CRM	R <sup>2</sup>
Homaee <i>et al.</i>	0.76	0.80	7.45	0.76
Dirksen <i>et al.</i>	0.71	0.76	12.4	0.71
van Genuchten	0.66	0.71	16.7	0.69
Maas & Hoffman	0.81	0.86	-1.65	0.88



شکل ۳- اثر شوری بر تعرق نسبی گیاهچه‌های گندم دوروم در مرحله اول رشد رویشی

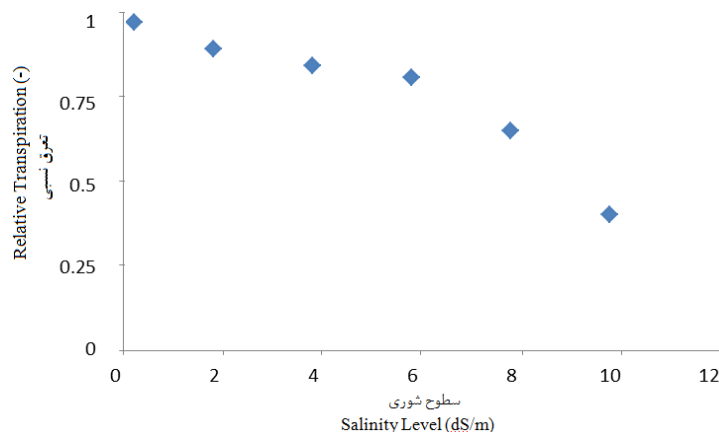
Figure 3. Salinity effect on relative transpiration of durum wheat seedlings at first vegetative growth stage



شکل ۴- تعرق نسبی گیاهچه‌های گندم دوروم اندازه‌گیری شده و برآورد شده به کمک مدل‌های ماس و هافمن (A)، ونگنوختن و هافمن (B)،

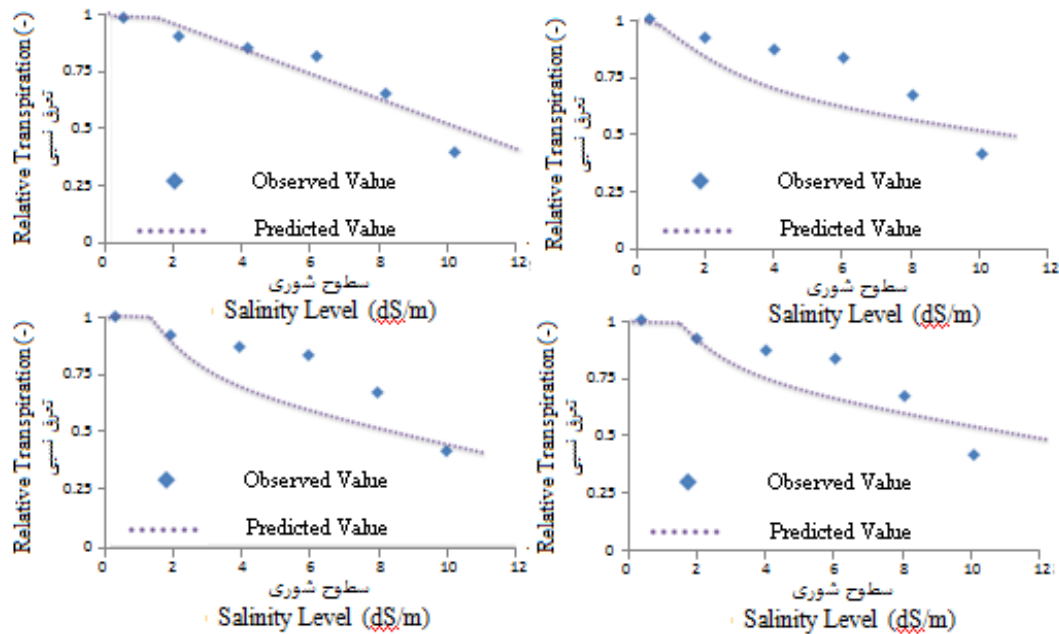
دیرکسن و همکاران (C) و همایی و همکاران (D) در مرحله اول رشد رویشی

Figure 4. The measured relative transpiration of durum wheat seedlings and those predicted by Maas and Hoffman (A), van Genuchten and Hoffman (B), Dirksen *et al.*, (C) and Homae *et al.*, (D) models at first vegetative growth



شکل ۵- اثر شوری بر تعرق نسبی گیاهچه‌های گندم دوروم در مرحله دوم رشد رویشی

Figure 5. Salinity effect on relative transpiration of durum wheat seedlings at second vegetative growth stage



شکل ۶- تعرق نسبی گیاهچه‌های گندم دوروم اندازه‌گیری شده و برآورد شده به کمک مدل‌های ماس و هافمن (A)، ونگنوختن و هافمن (B)، دیرکسن و همکاران (C) و همایی و همکاران (D) در مرحله دوم رویشی

Figure 6. The measured relative transpiration of durum wheat seedlings and those predicted by Maas and Hoffman (A), van Genuchten and Hoffman (B), Dirksen *et al.* (C) and Homaei *et al.* (D) models at second vegetative growth

همچنین ارایه یک حد آستانه ثابت (همانند آنچه که در بیشتر منابع موجود است)، برای تمامی مراحل رشدی چندان دقیق و علمی نیست. از این‌رو لازم است تا با شناخت و مطالعه کمی حساسیت ارقام غالب زراعی هر ناحیه، و اراه 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.

#### سپاسگزاری

هزینه اولیه پژوهش اخیر توسط "قطب تنش‌های محیطی در غلات" دانشگاه شهید باهنر کرمان تامین شده که بدین وسیله سپاسگزاری می‌شود.

به طور کلی انتظار بر این است که مدل‌های غیر خطی، به علت در نظر گرفتن شرایط واقعی رشد گیاه تحت تنش و همچنین تعداد پارامترهای ورودی بیشتر، یافته‌های واقعی تری نسبت به مدل‌های ساده و خطی (مانند ماس و هافمن) ارایه دهند، ولی الزاماً این‌گونه نیست، زیرا بر اساس یافته‌های این پژوهش، رفتار و حساسیت گیاه طی دوره‌های مختلف رشدی دچار تغییر می‌شود. همچنین در رفتار با مدل‌های پیچیده و غیر خطی، به دست آوردن دقیق پارامترها بسیار کار حساس و دقیقی است، به طوری که با کمی اختلاف در اندازه‌گیری پارامترهای این مدل‌ها (مانند پارامتر  $p$  در مدل دیرکسن و همکاران)، تخمین‌های حاصله بسیار دچار دستخوش و تغییر می‌شوند. به طور کلی و بر اساس یافته‌های این پژوهش، مشخص شد که واکنش گندم دوروم به تنش شوری طی دوره رشد دائماً تغییر می‌کند.

#### References

- Akhtari, A., Homaei, M. and Hoseini, M. 2014. Modeling plant response to salinity and soil nitrogen deficiency. *Journal of Water and Soil Resources Conservation* 3 (4): 33-50. (In Persian).
- Banaei, M., Momeni, H., Bybordi, M. and Malakuti, M. J. 2004. Soils of Iran: New achievements in perception, management and use. Soil and Water Research Institute, Tehran, Iran. (In Persian).
- Childs, S. W. and Hanks, R. J. 1975. Model of soil salinity effects on crop growth. *Soil Science Society of American journal* 39: 617-622.

- De Wit, C. T. 1958.** Transpiration and crop yields. Verslagen van Landbouwkundige Onderzoekingen, No. 64.6. Wageningen, The Netherlands.
- 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. Russo, D. and Dagan, G. (Eds.). Water flow and solute transport in soils. Springer-Verlag. N. Y.
- Eskandari, M., Homaei, M., Asadi Kapourchal, S. and Mirnia, S. K. 2014.** Barley seed germination in NaCl + CaCl<sub>2</sub> solution, natural saline water and saline soil. **Cereal Research** 3 (4): 335-347. (In Persian).
- Feddes, R. A., Kowalik, P. and Zarandy, H. 1978.** Simulation of field water use and crop yield. Pudoc., Wageningen, The Netherlands.
- Hamdy, A., Sardo, V. and Farrag Ghanem, K. A. 2005.** Saline water in supplemental irrigation of wheat and barley under rainfed agriculture. **Agricultural Water Management** 78: 122-127.
- Homaei, M. and Feddes, R. A. 2002.** Modeling the sink term under variable soil water osmotic and pressure heads. Proceeding of 14<sup>th</sup> International Conference on Computational Methods in Water Resources. Delft. The Netherlands. **Developments in Water Science** 47: 17-24.
- Homaei, M., Dirksen, C. and Feddes, R. A. 2002a.** Simulation of root water uptake. I. Nonuniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. **Agricultural Water Management** 57: 89-109.
- Homaei, M., Feddes, R. A. and Dirksen, C. 2002b.** Simulation of root water uptake. II. Nonuniform transient water stress using different reduction functions. **Agricultural Water Management** 57: 111-126.
- Homaei, M., Feddes, R. A. and Dirksen, C. 2002c.** Simulation of root water uptake. III. Nonuniform transient combined salinity and water stress. **Agricultural Water Management** 57: 127-144.
- Homaei, M., Feddes, R. A. and Dirksen, C. 2002d.** A macroscopic water extraction model for nonuniform transient salinity and water stress. **Soil Science Society of America Journal** 66: 1764-1772.
- Hosseini, Y., Homaei, M., Karimian, N. and Saadat, S. 2014.** Effect of salinity and boron on seed germination and emergence of canola (*Brassica napus* L.). **Environmental Stresses in Crop Sciences** 7 (1): 79-91. (In Persian).
- 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).
- Jalali, V. R. and Homaei M. 2010.** Modeling the effect of salinity application time of root zone on yield of canola (*Brassica napus* L.). **Journal of Crops Improvement** 12: 29-40. (In Persian).
- Maas, E. V. and Hoffman, G. J. 1977.** Crop salt tolerance-current assessment. **Journal of the Irrigation and Drainage Division** 103: 115-134.
- Maas, E. V. and Poss, J. A. 1989.** Salt sensitivity of cowpea at various growth stages. **Irrigation Science** 10: 313-320.
- Osvaldo-Salazara, O., Wesströma, I. and Joela, A. 2008.** Evaluation of DRAINMOD using saturated hydraulic conductivity estimated by a pedotransfer function model. **Agricultural Water Management** 95: 1135-1143.
- 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. **Journal of Soil and Water Science** 19: 243-254. (In Persian).
- Seed and Plant Improvement Institute. 2013.** From <http://www.spii.ir/spSPII/default.aspx?Page=Document&app=Documents&docId=11952&docParId=11470>
- van Genuchten, M. T. and Hoffman, G. J. 1984.** Analysis of crop salt tolerance data. In: Shainberg, I. and Shalhevet, J. (Ed.). Soil salinity under irrigation process and management. Ecol. Stud. 51. Springer-Verlag. N. Y.
- Wilson, C., Lesch, S. M. and Grieve, C. M. 1999.** Growth stage modulates salinity tolerance of New Zealand Spinach (*Tetragoniatetra goniooides*, Pall.) and Red Orach (*Atriplex hortensis* L.). **Annals of Botany** 85: 501-509.
- Zeynali, A., Soltani, A. and Galeshi, S. 2002.** Canola germination response to salinity. **Iranian Journal of Agricultural Sciences** 33: 137-145. (In Persian).

## Macroscopic simulation of durum wheat response to salinity on vegetative growth stages

Sara Hosseini<sup>1</sup>, Vahid Reza Jalali<sup>2\*</sup> and Mehdi Homae<sup>3</sup>

1 and 2. M. Sc. Student and Assist. Prof., respectively, Dept. of Soil Science, Shahid Bahonar University of Kerman, 3. Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University

(Received: March 9, 2014- Accepted: Sep 22, 2014)

### Abstract

Fresh water deficit is one the most limiting factors in arid and semi-arid regions for agricultural productions. Consequently, it is needed that quantitative response of plants to salinity stress be analyzed in order to use marginal and brackish water to produce agricultural crops in such regions. The vegetative growth stage is the most critical period of plant growth, because the final production directly depends on this early phenologic stage. The objective of this research was to quantitatively assess durum wheat response to salinity at different vegetative growth stages by using macroscopic models. Consequently, an extensive experiment was conducted in a loamy sand soil, using different salinity treatments including one non-saline water (0.4 ds.m<sup>-1</sup>) and five natural saline waters of 2, 4, 6, 8 and 10 dS.m<sup>-1</sup>. The macroscopic models of Maas and Hoffman, van Genuchten and Hoffman, Dirksen *et al.*, and Homae *et al.* were used to predict the relative seedling numbers and relative transpiration. To compare the models and their efficiency, the Modified Coefficient Efficiency ( $E'$ ), Modified Index of Agreement ( $d'$ ) and Coefficient of Residual Mass (CRM) statistics were calculated. Results indicate that Homae *et al.* model provides a reasonable prediction at the first growth stage (E), while Maas and Hoffman model can provide relatively better predictions at the second and third growth stages.

**Keywords:** Durum wheat, Salt stress, Simulation

\*Corresponding author: [v.jalali@uk.ac.ir](mailto:v.jalali@uk.ac.ir)