مدل‌سازی واکنش کلزا به شوری طی دوره‌های رشد زایشی

وحیدرضا جلالی [*]، مهدی همایی و سیدخلاق میرنیا [۱]

(تاریخ دریافت: ۸۵/۹/۱۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۸۶/۱۲/۱)

چکیده

گیاه کلزا در پاسخ به تنش شوری، مقاومت‌های متفاوتی طی مراحل مختلف رشد از خود بروز می‌دهد. اغلب گیاهان از جمله کلزا، در مراحل نخستین رشد به شوری حساس‌تر بوده و با افزایش سن، مقاومت آنها به شوری افزایش می‌یابد. 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. هدف از این پژوهش، کمّی نمودن واکنش گیاه کلزا (رقم Option500) به شوری طی مرحله رشد زایشی به کمک یک مدل بود. برای بررسی اثر شوری آب آبیاری بر تعرق گیاه در مرحله گل‌دهی و عملکرد دانه، آزمایشی در سال ۱۳۸۴ در دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، شامل یک تیمار غیرشور و ۸ تیمار با شوری‌های ۳، ۵، ۷، ۹، ۱۱، ۱۳، ۱۵ و ۱۷ دسی‌زیمنس بر متر که از منبع آب شور طبیعی دریاچه حوض سلطان قم تأمین شده بود، در یک خاک شن لومی انجام گرفت. بوته‌های کلزا پیش از رسیدن به مرحله مورد نظر با آب غیر شور آبیاری و پس از آن هر گلدان با تیمارهای مربوطه آبیاری گردید. به منظور کمّی کردن اثر شوری در هر یک از مراحل رشد، مقادیر تعرق نسبی(T_a / T_D) و عملکرد نسبی دانه (Y / Y_m) 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 به‌دست آمد. مقایسه مدل‌ها با استفاده از آماره‌های مربوطه انجام شد. برازش مدل‌های مختلف بر مقادیر اندازه‌گیری شده، طی مرحله گل‌دهی نشان داد که مدل ونگنوختن و هافمن از دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار است. حال آن‌که برای مرحله بلوغ، مدل همایی و همکاران توانست برآورد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها ارائه دهد.

واژه‌های کلیدی: شوری آستانه، تعرق نسبی، عملکرد نسبی، مدل ونگنوختن و هافمن، مدل همایی و همکاران

مقدمه

رشد فزاینده جمعیت جهان و نیاز بیشتر به تولیدات کشاورزی از مسائل مهمی است که امروزه بشر با آن روبه‌روست. در این ارتباط، محدودیت منابع آب و خاک به عنوان بستر اصلی تولیدات کشاورزی نیز مطرح بوده و به‌ویژه استفاده بهینه از منابع آب موجود و آب‌های شور و با کیفیت نامناسب در سرلوحهٔ فعالیت‌های کشورهای مختلف قرار دارد (۲۵).

پژوهش‌هایی پرشمار پیرامون اثر شوری بر گیاهان مختلف انجام شده است، ولی نتایج حاصله عموماً به‌صورت کمّی بیان نشده‌اند (۱). گلین و همکاران (۹) در تحقیقات خود بیان کردند که غلظت‌های زیاد نمک تأثیر زیان‌آوری بر رشد گیاهان دارد هم‌چنین ماس و پس (۲۱) در پژوهشی روی لوبیا چشم بلبلی دریافتند که این گیاه طی مراحل مختلف رشد، واکنش‌های متفاوتی را نسبت به شوری از خود نشان می‌دهد.

۱. به ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیاران خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: V_Jalali@Modares.ac.ir

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.9.4]

در تحقیقی که توسط ویلسون و همکاران (۲۸) انجام گرفت، واکنش دو گونه گیاهی خاص از اسفناج و کلم قرمز نسبت به سطوح مختلف شوری طی زمان‌های گوناگون مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که این دو گونه زراعی در اوایل فصل رشد به شوری حساس بوده ولی با به تعویق افتادن اعمال شوری، مقاومت آنها به تنش افزایش می‌یابد. فرانسوا (۸) در آزمایشی به بررسی رشد بوته، عملکرد دانه و محتوی روغن بذر کلزا تحت شرایط شور پرداخت. او در آزمایش‌های خود به این نکته پی برد که گیاه روغنی کلزا در مراحل گیاهچه و ابتدای دوره رشد به شوری حساس و در انتهای فصل رشد مانند مرحله پر شدن دانه از حساسیتش به شوری بسیار کاسته می‌شود. این یافته‌ها توسط کشتا و همکاران (۱۹) تأیید شده است. در تحقیقی که توسط حمدی و همکاران (۱۰) 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. پیرسون و برن‌اشتاین (۲۳) دریافتند که شوری طی مرحله پنجه‌زنی، وزن خشک گندم را نسبت به زمانی که گیاه در مراحل رسیدگی (بلوغ) تحت تنش قرار گیرد، به میزان دو برابر کاهش می‌دهد. کادا (۱۷) گزارش داد هنگامی که تیمار شوری در مراحل گیاهچه اعمال گردد، کاهش عملکرد نسبت به زمانی که شوری در بقیه مراحل اعمال گردد، بسیار چشم‌گیر و قابل توجه است. این موضوع برای گندم (۲۶)، فلفل (۳)، ذرت (۱۸)، لوبیا چشم‌بلبلی (۲۱) و خربزه (۲) نیز گزارش شده است. لوتس و همکاران (۲۰) دریافتند که برنج در مراحل گیاهچه و رشد زایشی نسبت به مرحله پنجه‌دهی به شوری حساس‌تر می‌باشد.

گیاهان برای دو منظورِ فتوسنتز و تعرق، به آب نیاز 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 و یا تبخیر و تعرق طی یک فصل زراعی معین طی پژوهش‌های متعدد گزارش شده است (۴ و ۷). با افزایش میزان شوری، جذب آب توسط گیاه کاهش می‌یابد. مناسب‌ترین روش کمّی کردن جذب آب توسط ریشه گیاهان، استفاده از معادلهٔ کلّی جریان یا معادلهٔ ریچاردز (۲۴) است که به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K(h)\frac{\partial h}{\partial z} + K(h)\right] - S \qquad [۱]$$

که در آن θ رطوبت حجمی خاک (L^3L^{-3})، t زمان (T)، z عمق (L)، K ضریب آبگذری غیر اشباع خاک (LT^{-1})، h پتانسیل ماتریک (L) و S مقدار آب جذب شده به وسیلهٔ ریشهٔ گیاه در واحد حجم خاک و زمان ($L^3L^{-3}T^{-1}$) است. برای بیان کمّی S، مدل‌هایی (Models) وجود دارد که می‌توان آنها را به دو گروه مدل‌های خُرد (Microscopic models) و مدل‌های کلان (Macroscopic models) تقسیم کرد. مدل‌های خرد به‌دلیل فرضیات مبنایی غیرواقعی و نیز غیرقابل اندازه‌گیری بودن پارامترهای آن، تابه‌حال به بوته آزمایش گذاشته نشده اند (۱۳). به همین خاطر گروه دیگری از مدل‌ها که به مدل‌های کلان شهرت دارند، طراحی و ارائه گردیده‌اند. در مدل‌های کلان مقدار آب جذب شده توسط گیاه برابر با میزان تعرق واقعی (Actual transpiration, T_a)، و در شرایطی که هیچ‌گونه محدودیت آبی در خاک وجود نداشته باشد، برابر با تعرق پتانسیل (Potential transpiration, T_p) در نظر گرفته شده و معادلهٔ کلی آن به‌صورت زیر است:

$$S = S_{max} = \frac{T_p}{Z_r} \qquad [۲]$$

که در آن S_{max} حداکثر مقدار آب جذب شده به وسیلهٔ ریشهٔ گیاه در واحد حجم خاک و زمان ($L^3L^{-3}T^{-1}$)، Z_r عمق توسعهٔ ریشه (L) و T_p تعرق پتانسیل (LT^{-1}) است. اگر خاک نتواند نیاز آبی گیاه را برای حداکثر تعرق (T_p) فراهم آورد، به اندازهٔ α که به آن تابع کاهش (Reduction Function) گفته می‌شود از تعرق کاسته می‌شود:

$$S = \alpha S_{max} = \alpha.\frac{T_p}{Z_r} \qquad [۳]$$

معمولاً α تابعی از پتانسیل ماتریک خاک بوده و آن را به‌صورت $\alpha(h)$ نشان می‌دهند. معادلهٔ ۳ شکل عمومی مدل‌های کلان است

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.9.4]

که توسط فدس و همکاران (۷) ارائه شده است. در شرایط شور، α تابعی از پتانسیل اسمزی محلول خاک (h_o) بوده و مقدار جذب آب توسط گیاه در این شرایط به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S = \alpha(h_\circ) S_{max} = \alpha(h_\circ) \frac{T_P}{Z_r} \qquad [۴]$$

توابعی که برای $\alpha(h_\circ)$ پیشنهاد شده‌اند منحصر به روابطی هستند که توسط ماس و هافمن (۲۲)، ونگنوختن و هافمن (۲۷)، دیرکسن و همکاران (۶) و همایی و همکاران (۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶) ارائه گردیده‌اند و به شرح زیر می‌باشند:

ماس و هافمن (۲۲) تابعی خطی و دو ناحیه‌ای ارائه کردند که برمبنای آن تا پیش از آستانهٔ شوری ($h_\circ^*$)، هیچ‌گونه کاهشی در جذب آب پدید نمی‌آید. اما با افزایش $h_\circ$ به مقادیر بالاتر از ($h_\circ^*$) مقدار جذب به‌طور خطی کاهش می‌یابد:

$$\alpha(h_\circ) = 1 - \frac{a}{360}(h_\circ^* - h_\circ) \qquad [۵]$$

که در آن a شیب خط یا مقدار کاهش عملکرد به ازای یک واحد افزایش شوری پس از آستانه شوری می‌باشد. از آنجا که منحنی دقیق پاسخ گیاه به شوری، شکلی سیگموییدی، و نه خطی دارد، به همین دلیل ونگنوختن و هافمن (۲۷) معادله‌ای غیر خطی به‌صورت زیر پیشنهاد کردند:

$$\alpha(h_\circ) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h_\circ}{h_{\circ 50}}\right)^P} \qquad [۶]$$

که در آن $h_{\circ 50}$ (L) مقدار فشار اسمزی است که در آن جذب آب توسط گیاه ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. P نیز ضریبی تجربی است که وابسته به گیاه، خاک و اقلیم می‌باشد (۱۲).

پژوهش‌هایی که توسط دیرکسن و آگوستین (۵) و دیرکسن و همکاران (۶) انجام شد نشان داد که جذب آب توسط گیاه تا رسیدن به یک شوری معین ($h_\circ^*$) کاهش نمی‌یابد. به همین خاطر دیرکسن و همکاران (۶) معادله ۶ را نسبت به آستانه شوری ($h_\circ^*$) تعدیل و رابطه زیر را پیشنهاد نمودند:

$$\alpha(h_\circ) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h_\circ^* - h_\circ}{h_\circ^* - h_{\circ 50}}\right)^P} \qquad [۷]$$

این رابطه نسبت به روابط قبلی می‌تواند با دقت بیشتری واکنش گیاه به شوری را شبیه‌سازی کند، ولی مهم‌ترین محدودیت آن، به‌دست آوردن $h_{\circ 50}$ است. هم‌چنین پارامتر P چه به‌صورت فیزیکی و چه به‌صورت تجربی در آن تعریف نشده است. در واقع P مانند ($h_\circ^*$) و $h_{\circ 50}$ فاکتوری وابسته به شکل تابع است. با فرض این‌که P پارامتری وابسته به محصول، خاک و اقلیم است، همایی و همکاران (۱۳) معادله زیر را برای به‌دست آوردن آن پیشنهاد نمودند:

$$p = \frac{h_{o50}}{h_{o50} - h_o^*} \qquad [۸]$$

به‌دلیل این‌که مشکل به‌دست آوردن h_{o50} تا بدینجا حل نشده باقی مانده بود، همایی و همکاران (۱۴) مقدار $h_{\circ 50}$ را با h_{omax} جایگزین نموده و تابع خطی زیر را که دارای دو آستانه کاهش می‌باشد پیشنهاد نمودند (۱۱):

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + (1-\alpha_\circ)/\alpha_\circ [(h_o^* - h_o)/(h_o^* - h_{omax})]^p} \qquad [۹]$$

کاهش در مقدار α در شوری‌های بیشتر از $h_\circ^*$ ادامه می‌یابد تا به یک شوری معین (h_{omax}) برسد. در شوری‌های بیشتر از h_{omax} افزایش شوری نمی‌تواند با همان روند قبلی در مقدار α کاهش ایجاد کند. این واقعیت نشان می‌دهد که در $h_o > h_{omax}$ گیاه هنوز زنده بوده و در سطحی بسیار اندک به فعالیت‌های حیاتی خود ادامه می‌دهد. همایی و همکاران (۱۴) سپس مقدار P را با توجه به h_{omax} به‌صورت زیر تعریف نمودند:

$$p = \frac{h_{omax}}{h_{omax} - h_o^*} \qquad [۱۰]$$

همان‌طور که گفته شد کلزا در مراحل مختلف رشد خود نسبت به شوری واکنش‌های متفاوتی دارد. در حالی‌که تمام مدل‌های موجود که واکنش گیاهان به شوری را به‌صورت کمّی بیان می‌کنند، بر فرض ثابت بودن شوری خاک از آغاز تا پایان دوره رشد وثابت بودن آستانه کاهش در کل دوره رشد

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.9.4]

استوارند. به همین خاطر می‌توان انتظار داشت که آستانه شوری برای کلزا در مرحله رشد زایشی با دیگر مراحل رشد آن متفاوت باشد. هم‌چنین مشخص نیست که توابع کاهش جذب آب برای هر یک از مراحل دوره رشد زایشی کلزا از چه شکلی برخوردار است. افزون بر آن، این پرسش که آیا توابع کاهش جذب آب در دوره رشد زایشی با مدل‌های موجود برآورد می‌شوند یا می‌بایست مدلی مناسب برای آنها به‌دست آورد بی پاسخ مانده است. هدف از انجام این پژوهش پاسخ به پرسش‌های سه‌گانه فوق بود.

مواد و روش‌ها

آزمایش در یک خاک شور زراعی با بافت لوم شنی و در گلدان‌هایی به ارتفاع ۳۶ و قطر ۲۲ سانتی‌متر انجام گرفت. برای اعمال تیمارهای شوری، یک نمونه خاک سبک‌بافت (Typic Toriorthent) از منطقه قمرود استان قم (´47 و °۵۹ طول شرقی و ´۴۳ و °۳۴ عرض شمالی) تهیه و به گلخانه حمل شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش در جدول ۱ گزارش شده است.

بافت لوم شنی به این دلیل انتخاب شد تا بتوان شوری کل توده خاک را با اعمال برخه آبشویی (Leaching Fraction, LF) زیاد(LF=۰/۵) نسبتاً یک‌نواخت نگه داشت. در این پژوهش افزون بر خاک شور، از آب شور طبیعی که از دریاچه حوض سلطان قم فراهم شده بود نیز استفاده گردید.

در اکثر پژوهش‌های انجام شده در مورد تأثیر شوری بر رشد و عملکرد گیاه، از آب شور مصنوعی که عموماً NaCl و یا ترکیبی از NaClو $CaCl_2$است استفاده شده و از تأثیر منفی سمیّت 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. 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. در جدول ۲ برخی ویژگی‌های شیمیایی این آب ارائه شده است.

آب شور تهیه شده از دریاچه حوض سلطان با شوری ۶۰۰$dS.m^{-1}$ برای استفاده در تیمارهای مورد نظر با آب معمولی رقیق گردید تا شوری‌های مورد نظر برای اعمال تیمارهای آزمایشی به‌دست آید. برای تهیه بالاترین تیمار شوری ۱۷ $dS.m^{-1}$، نمونه آب اولیه ۴۲ بار رقیق شد در حالی‌که این نسبت برای کمترین تیمار شوری یعنی ۳ $dS.m^{-1}$، ۲۲۰ بار بود. تیمارهای به کار رفته در این پژوهش در ۳ تکرار و شامل آب شهر به‌عنوان شاهد و ۸ سطح شوری ۳، ۵، ۷، ۹، ۱۱، ۱۳، ۱۵ و ۱۷ $dS.m^{-1}$ بود.

نحوه آماده‌سازی خاک و پرکردن گلدان‌ها به این صورت بود که ابتدا خاک از الک ۵ میلی‌متری عبور داده 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 فشرده‌سازی 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 فشرده‌سازی خاک انجام گرفت. این کار برای همه گلدان‌ها تکرار شد تا چگالی خاک گلدان‌ها به مقدار$g.cm^{-3}$ ۱/۳ برسد. پس از آن در هر گلدان ۸ بذر سالم کاشته شد و پس از سبز شدن به ۳ بوته سالم تقلیل داده شد (معادل تراکم ۸۰ بوته در متر مربع). زمان آبیاری بدین صورت بود که گلدان‌ها روزانه توزین شده و در روز سوم به گلدان‌ها تا حد ظرفیت زراعی آب داده می‌شد تا مشکلی از لحاظ تنش آبی به‌وجود نیاید. دوره رشد زایشی کلزا شامل مراحل گل‌دهی و بلوغ است که طول این دوره‌ها در رقم بهاره Option 500، به ترتیب حدود ۳۰ و ۲۴ روز می‌باشد. 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 به‌طور پیوسته اندازه‌گیری

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.9.4]

جدول۱. برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک مورد استفاده

SP[1] (٪)	pH[2]	Sand (٪)	Silt (٪)	Clay (٪)	ECss[3] (dS.m-1)	OC[4] (٪)	T.N.V[5] (٪)	پتاسیم (mg/kg)	فسفر (mg/kg)	کلسیم (meq/lit)	منیزیم (meq/lit)	آهن (mg/kg)	روی (mg/kg)	مس (mg/kg)	منگنز (mg/kg)
۲۱/۳۶	۷/۸۴	۵۵	۱۹	۲۶	۳/۸۵	۰/۰۳۹	۹/۲۵	۷۷/۶	۱/۰۲	۳۴	۴	۰/۹	۰/۱	۰/۲۶	۱/۴۲

۱تا ۵ به ترتیب بیانگر میزان رطوبت اشباع، میزان اسیدیته، هدایت الکتریکی عصاره اشباع، میزان کربن آلی و میزان آهک معادل خاک می باشد.

جدول۲. نتایج تجزیه شیمیایی مدله آب دریاچه حوض سلطان

pH	EC ($dS.m^{-1}$)	HCO_3^- ($g.l^{-1}$)	Cl^- ($g.l^{-1}$)	SO_4^{2-} ($mg.l^{-1}$)	B ($mg.l^{-1}$)	Ca^{2+} ($g.l^{-1}$)	Mg^{2+} ($g.l^{-1}$)	Na^+ ($g.l^{-1}$)	NO_3^- ($mg.l^{-1}$)
۷/۲۵	۶۰۰	۸/۶	۱۶۱	۳۴۱/۵	۵۴/۸	۱/۲	۲۲/۴	۱۱۵	۲/۷۵

می‌شد تا از صحت اعمال LF =۰/۵ اطمینان حاصل شود. در مرحله گل‌دهی، گلدان‌ها به صورت روزانه توزین و تعرق هر کدام از گلدان‌ها محاسبه و ثبت گردید و بر اساس رابطه دویت (۴)، عملکرد نسبی در این مرحله شامل تعرق گیاه در هر سطح شوری نسبت به تیمار شاهد (آب معمولی) در نظر گرفته شد. در مرحله بلوغ، عملکرد نسبی شامل وزن دانه در هر سطح شوری نسبت به شاهد (آب شهر) در نظر گرفته می‌شد. به منظور کمّی کردن اثر شوری بر رشد و عملکرد کلزا در دوره زایشی، عملکرد نسبی با استفاده از مدل‌های ماس و هافمن (۲۲)، ونگنوختن و هافمن (۲۷)، دیرکسن و همکاران (۶) و همایی و همکاران (۱۴) محاسبه شد. مدل‌های یاد شده بر داده‌های عملکرد نسبی به‌دست آمده در مراحل گل‌دهی و بلوغ برازش داده شدند. 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 گردیدند. هم‌چنین، مقایسه کمّی مدل‌ها با محاسبه آماره‌های خطای ماکزیمم (Maximim Error) (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error) (RMSE)، ضریب تبیین (Coefficient of Determination) (CD)، کارایی مدل (Efficiency of model) (EF) و ضریب جرم باقی‌مانده (Coefficient of Residual Mass) (CRM) برای هر کدام از مدل‌ها انجام شد. بیان ریاضی آماره‌های مذکور به‌صورت زیر است:

$$ME = \max\left|P_i - O_i\right|_{i=1}^{n} \quad [11]$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}\right]^{\frac{1}{2}} \frac{100}{\overline{O}} \quad [12]$$

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

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2 - \sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2} \quad [14]$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n}O_i - \sum_{i=1}^{n}P_i}{\sum_{i=1}^{n}O_i} \quad [15]$$

که در آنها P_i مقادیر برآورد شده، O_i مقادیر اندازه‌گیری شده و n تعداد نمونه است. کمترین مقدار برای ME، RMSE و CD صفر است. مقدار ME نمایانگر بدترین حالت برآورد مدل است. در حالی‌که مقدار RMSE نشان‌دهنده بیش‌برآورد (Overestimate) یا کم‌برآورد (Underestimate) است. CD نسبت بین پراکنش مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار برای EF یک است. مقادیر EF و CRM می‌توانند منفی باشند. EF مقادیر برآورد شده را نسبت به مقدار میانگین اندازه‌گیری‌ها مقایسه می‌کند. مقدار منفی EF دلالت بر آن دارد که میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده تخمین

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.9.4]

بهتری را نسبت به مقادیر برآورد شده ارائه می‌دهند. CRM بیان کننده گرایش مدل به تخمین بیشتر و یا کمتر از مقادیر اندازه گیری شده است. به‌دست آوردن مقدار منفی CRM برای یک مدل تمایل مدل را برای بیش‌برآورد اندازه گیری‌ها نشان می‌دهد. اگر تمامی داده‌های برآورد شده و اندازه‌گیری شده یکسان باشند، نتایج آماره‌ها به‌صورت ME = ۰، RMSE = ۰، CD = ۱، EF = ۱ و CRM = ۰ خواهد بود. در نهایت تجزیه و تحلیل‌های آماری وکارهای گرافیکی با نرم افزار SPSS و Excel انجام پذیرفت.

نتایج و بحث

مرحله گل‌دهی

تعرق نسبی کلزا در مرحله گل‌دهی در سطوح مختلف شوری عصاره اشباع خاک (ECe) در شکل ۱ نشان داده شده است. براساس این شکل، تعرق نسبی گیاه تا شوری ۷ دسی‌زیمنس بر متر کاهش نداشته، اما از آن پس، با افزایش شوری، کاهش و در شوری حدود ۲۴ دسی زیمنس بر متر به کمترین مقدار خود رسیده است.

حد آستانه تحمل شوری کلزا، هنگامی‌که شوری خاک از ابتدا تا پایان دوره رشد ثابت باشد، بر اساس یافته‌های ماس و هافمن (۲۲)، ۱۱ دسی زیمنس بر متر می‌باشد، حال آن‌که پژوهش حاضر نشان داد که آستانه کاهش عملکرد کلزا در مرحله گل‌دهی۷ دسی‌زیمنس بر متر است. شکل ۲ برازش مدل‌ها بر داده‌های اندازه‌گیری شده در مرحله گلدهی را نشان می‌دهد. حروف O و P به ترتیب بیانگر داده‌های مشاهده شده (Observed) و پیش بینی شده توسط مدل (Predicted) می‌باشد. با برازش مدل‌های مختلف بر داده‌های اندازه‌گیری شده، پارامترهای مختلف هر یک از مدل‌ها، برآورد و در جدول ۳ ارائه شده است.

همان‌طور که از شکل ۲ و ضرایب تبیین (R^2) ارائه شده در جدول ۳ بر می‌آید، مدل‌های غیرخطی نسبت به مدل ساده و خطی ماس و هافمن (۲۲)، برازش بهتری بر داده‌های اندازه‌گیری شده دارند. بنابراین برای انتخاب مناسب‌ترین مدل براوردی در این مرحله، با کمک آماره‌های ذکر شده (جدول ۴) بهترین مدل تعیین شد.

کارایی(EF) و خطای ماکزیمم (ME) مدل‌های ونگنوختن و هافمن (۲۷)، دیرکسن و همکاران (۶) و همایی و همکاران (۱۴) یکسان است. و از طرفی مناسب‌ترین مدل، مدلی است که RMSE کمتری داشته باشد و ضریب تخمین (CD) آن به یک نزدیکتر باشد، بنابراین برای این مرحله در بین مدل‌های غیر خطی، مدل ونگنوختن و هافمن (۲۷) واجد شرایط فوق بوده و مناسب‌ترین مدل شناخته شد.

مرحله بلوغ

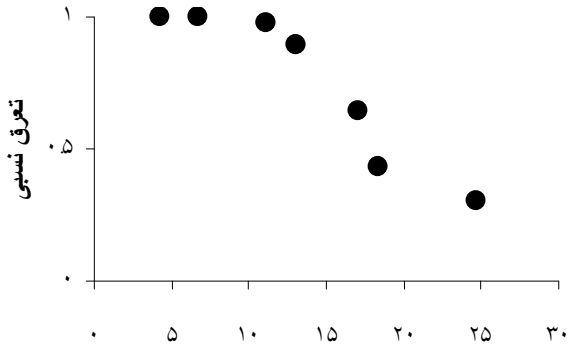
شکل ۳ روند تغییرات عملکرد نسبی دانه کلزا را با افزایش شوری محلول خاک نشان می‌دهد. عملکرد نسبی دانه کلزا تا شوری حدود ۵ دسی‌زیمنس بر متر کاهش نداشت. لیکن از آن پس با افزایش شوری محلول خاک، عملکرد گیاه کاهش یافت و در شوری حدود ۱۸ دسی زیمنس بر متر به نصف رسید.

شکل ۴ برازش مدل‌ها بر داده‌های اندازه‌گیری شده در مرحله بلوغ را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که مقادیر برآورد شده عملکرد نسبی بذر توسط مدل‌های مختلف به ویژه در مدل‌های غیرخطی، با مقادیر اندازه‌گیری شده مطابقت بیشتری دارد. با برازش مدل‌های مورد بررسی بر داده‌های به‌دست آمده، پارامترهای مختلف هر کدام از مدل‌ها برآورد و در جدول ۵ ارائه شده است.

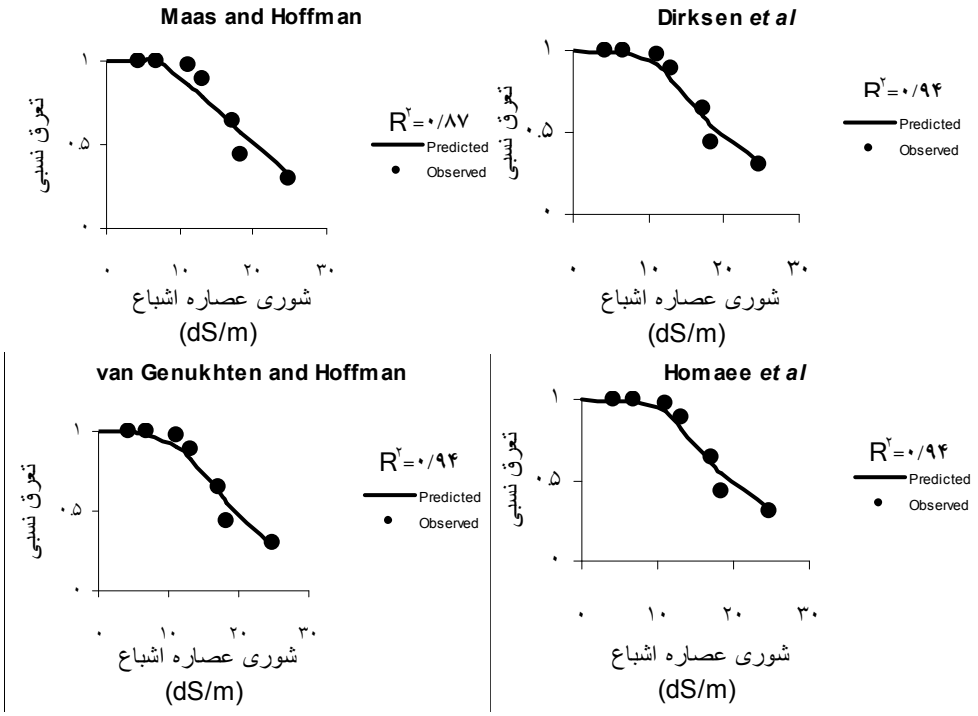
ضریب تبیین (R^2) مدل ماس و هافمن (۲۲)، کمتر از ضرایب تبیین سه معادله دیگر (معادلات ۶، ۷ و۹) می باشد که البته از لحاظ آماری هر چهار مدل در یک سطح قرار دارند. به عبارت بهتر مدل‌های غیرخطی در این مرحله توانسته‌اند با حداقل اختلاف، بهترین برازش را ارائه دهند. بنابراین با کمک آماره‌های ذکر شده در جدول می‌توان به ارزیابی صحیحی از

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.9.4]



شکل۱. تعرق نسبی گیاه کلزا در مرحله گلدهی به‌عنوان تابعی از شوری عصاره



شکل۲. مقایسه کارآیی مدل‌های ماس و هافمن، ونگنوختن و هافمن، دیرکسن و همکاران و همایی و همکاران در برازش بر داده‌های تعرق نسبی گیاه کلزا در مرحله گل‌دهی به عنوان تابعی از شوری عصاره اشباع خاک

میزان کارایی هر مدل دست یافت و مناسب‌ترین مدل را انتخاب نمود. جدول ۶ مقادیر این آماره‌ها را برای مدل‌های مختلف نشان می‌دهد.

با توجه به این‌که آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و کارایی (EF) مدل‌های دیرکسن و همکاران (۶) و همایی و همکاران (۱۴) برابر است، مدلی مناسب‌تر می‌باشد که پارامترهای ورودی آن سهل‌الوصول‌تر باشد. با توجه به این‌که مدل همایی و همکاران (۱۴) از این

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-10]

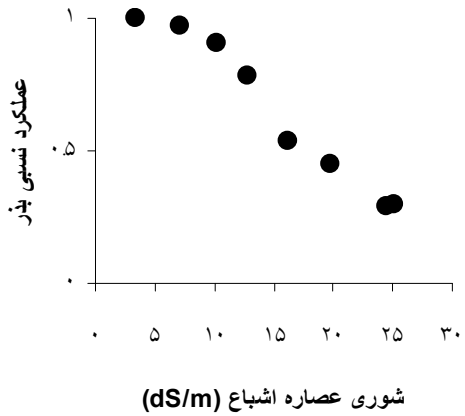
[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.9.4]

جدول۳. پارامترهای مدل‌های ماس و هافمن، ونگنوختن و هافمن، دیرکسن و همکاران و همایی و همکاران برای براورد پاسخ گیاه کلزا به شوری عصاره اشباع خاک در مرحله گل‌دهی

مدل	EC_o	EC_{50}	EC_{max}	b	α	p	R^2
Maas & Hoffman	۷/۶	-	-	۰/۰۴۰	-	-	۰/۸۷
van Genuchten	-	۱۹/۴	-	-	-	۳/۹	۰/۹۴
Dirksen *et al*	۷/۶	۱۹/۳	-	-	-	۲	۰/۹۴
Homaee *et al*	۷/۶	–	۲۷	–	۰/۲۷	۲	۰/۹۴

جدول۴. آماره های محاسبه شده برای مقایسه مدل‌های برآورد پاسخ گیاه کلزا به شوری عصاره اشباع خاک در مرحله گل‌دهی

مدل	RMSE	CD	EF	ME	CRM	R^2
Maas & Hoffman	۱۲/۸۳	۱/۰۷	۰/۸۸	۰/۱۳	–۰/۰۱۲	۰/۸۷
van Genuchten	۸/۲۲	۱/۲۱	۰/۹۵	۰/۱۰	۰/۰۲۰۳	۰/۹۴
Dirksen *et al*	۸/۳۴	۱/۳۵	۰/۹۵	۰/۱۰	۰/۰۲۶	۰/۹۴
Homaee *et al*	۸/۳۴	۱/۳۵	۰/۹۵	۰/۱۰	۰/۰۲۶	۰/۹۴



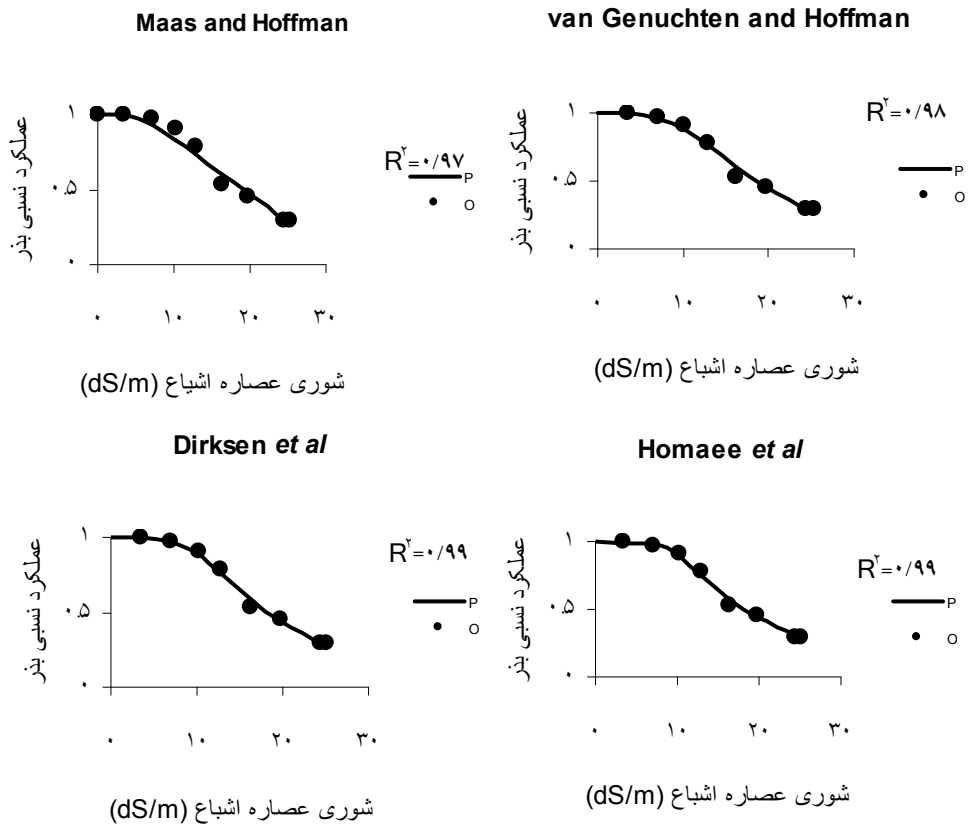
شکل۳. عملکرد نسبی بذر کلزا در مرحله بلوغ به‌عنوان تابعی از شوری عصاره اشباع خاک

جدول ۵. پارامترهای مدل‌های ماس و هافمن، ونگنوختن و هافمن، دیرکسن و همکاران و همایی و همکاران برای برآورد پاسخ گیاه کلزا به شوری عصاره اشباع خاک در مرحله بلوغ

مدل	EC_o	EC_{50}	EC_{max}	b	α	p	R^2
Maas & Hoffman	۵/۵	–	–	۰/۰۳۶	–	–	۰/۹۷
van Genuchten	–	۱۸/۵	–	–	–	۳/۲۴۸	۰/۹۸
Dirksen *et al*	۳/۴	۱۸/۳	–	–	–	۱/۶	۰/۹۹
Homaee *et al*	۵/۶	–	۲۹/۹	–	۰/۲۱	۲	۰/۹۹

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.9.4]



شکل ۴. مقایسه کارآیی مدل‌های ماس و هافمن، ونگنوختن و هافمن، دیرکسن و همکاران و همایی و همکاران در برازش بر داده‌های عملکرد نسبی گیاه کلزا در مرحله بلوغ به عنوان تابعی از شوری عصاره اشباع خاک

جدول۶. آماره های محاسبه شده برای مقایسه مدل‌های برآورد پاسخ گیاه کلزا به شوری عصاره اشباع خاک در مرحله بلوغ

مدل	RMSE	CD	EF	ME	CRM	R^2
۵	۷/۹	۱/۰۳	۰/۹۶۵	۰/۰۸	−۰/۰۰۰۲۹	۰/۹۷
۶	۴/۲	۱/۰۳	۰/۹۹	۰/۰۶۴	۰/۰۰۵۴	۰/۹۸
۷	۳/۷	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۰۵۴	۰/۰۰۳۵	۰/۹۹
۹	۳/۷	۱/۰۷	۰/۹۹	۰/۰۴۴	۰/۰۰۳۵	۰/۹۹

ویژگی برخوردار است، در مرحله بلوغ این مدل مناسب‌تر شناخته شد. ولی مدل ماس و هافمن را نیز به لحاظ سادگی و روانی معادله، در این مرحله می‌توان به‌کار برد.

نتیجه‌گیری

نتایج کاربرد شوری‌های مختلف آب بر عملکرد کلزا نشان داد که در مرحله گل‌دهی، تعرق نسبی واقعی گیاه تا شوری حدود ۷ دسی زیمنس بر متر کاهش نداشته، ولی با افزایش شوری تعرق کاهش می‌یابد و در شوری حدود ۲۴ دسی‌زیمنس بر متر به کمترین مقدار می‌رسد. در برآورد عملکرد نسبی، مدل‌های غیرخطی نسبت به مدل خطی ماس و هافمن (۲۲)، واجد ضریب تبیین (R^2) بالاتری شدند و توانستند برازش رضایت بخشی بر داده‌های اندازه‌گیری شده داشته باشند. استفاده از پارامترهای آماری برای تعیین مناسب‌ترین مدل در بین مدل‌های غیرخطی،

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.9.4]

نشان داد که مدل‌های دیرکسن و همکاران (۶)، همایی و همکاران (۱۴) و ونگنوختن و هافمن (۲۷)، واجد ضریب تبیین (R^2) و کارایی (EF) یکسانی بوده ولی ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای مدل ونگنوختن و هافمن (۲۷) از مقدار کمتری برخوردار بود. به همین دلیل این مدل برای این مرحله پیشنهاد شد. در مرحله بلوغ تحلیل‌های آماری نشان داد مدل‌های غیرخطی دیرکسن و همکاران (۶) و همایی و همکاران (۱۴) به علت داشتن پارامترهای ورودی بیشتر، واجد ضرایب تبیین بالاتری شده و توانستند عملکرد نسبی گیاه را به‌طور دقیق‌تری پیش‌بینی نمایند. با توجه به این‌که کارایی (EF) هر دو مدل یاد شده برابر بود، مدل همایی و همکاران (۱۴) که پارامترهای آن کاملاً مشخص و تعریف شده است مناسب‌ترین مدل شناخته شد. هم‌چنین در این پژوهش مشخص شد که کلزا در مراحل مختلف دوره رشد زایشی خود به تنش شوری حساسیت‌های متفاوتی نشان می‌دهد. طی این دوره، بر خلاف گزارش‌های ارائه شده، مرحله گل‌دهی نسبت به مرحله بلوغ در برابر تنش شوری مقاومت بیشتری نشان داد.

منابع مورد استفاده

۱. همایی، م. ۱۳۸۱. واکنش گیاهان به شوری. کمیته ملی آبیاری و زه‌کشی ایران. نشریه شماره ۵۸، تهران.

2. Carvajal, M., F. M. del Amor, G. Fernandez-Ballester, V. Martinez and A. Cerda. 1998. Time course of solute accumulation and water relation in muskmelon plants exposed to salt during different growth stages. Plant Sci. 138 : 103–112.
3. Chartzoulakis, K. and G. Klapaki. 2000. Response of two greenhouse pepper hybrids to NaCl salinity during different growth stages. Scientia Horticulturae 86 : 247-260
4. De Wit, C. T. 1958. Transpiration and Crop Yields. Verslagen van Landbouwkundige Onderzoekingen, No. 64.6.Wageningen, The Netherlands.
5. Dirksen, C. and D. C. Augustijn. 1988. Root water uptake function for nonuniform pressure and osmotic potential. PP. 185. *In:* Agronomy Abstract. ASA, Madison, WI.
6. Dirksen, C., K. B. Koorevaar and M. Th. vanGenuchten. 1993. HYSWASOR- Simulation model of hysteretic water and solute transport in the root zone. PP.99-122. *In*: Russo, D. and G. Dagan (Eds.), Water Flow and Solute Transport in Soils Springer Verlag, New York.
7. Feddes, R. A., P. Kowalik and H. Zarandy. 1978. Simulation of Field Water Use and Crop Yield. Pudoc, Wageningen, The Netherlands.
8. Francois L. E. 1994. Growth, seed yield, and oil content of canola grown under saline conditions. Agron. J. 86: 233-237.
9. Gleen, E. P., M. W. Olsen, R. J. Frye and D. W. Moore. 1994. How much sodium accumulation is necessary for salt tolerance of sub spices of the halophyte, *Atriplex canascens*. Plant Cell and Environ. 17: 71-79.
10. Hamdy, A., V. Sardo and K. A. Farrag Ghanem. 2005. Saline water in supplemental irrigation of wheat and barley under rain fed agriculture. Agric. Water Manag. 78: 122–127.
11. Homaee, M. and R. A. Feddes. 2001. Quantification of water extraction under salinity and drought. PP. 376-377. *In*: W. J. Hort et al. (Eds.), Plant Nutrition-Food Security and Sustainability of Agro-Ecosystems. Kluwer Pub., The Netherlands.
12. Homaee, M. and R. A. Feddes. 2002. Modeling the sink term under variable soil water osmotic and pressure heads. 14th Intern. Conf. on Computational Methods in Water Resources, Delft, The Netherlands.
13. Homaee, M., C. Dirksen and R. A. Feddes. 2002a. Simulation of root water uptake. I. Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. Agric. Water Manag. 57: 89-109.
14. Homaee, M. R., A. Feddes and C. Dirksen. 2002b. Simulation of root water uptake. II. Non-uniform transient water stress using different reduction functions. Agric. Water Manag. 57: 111-126.
15. Homaee, M. R., A. Feddes and C. Dirksen. 2002c. Simulation of root water uptake. III. Non-uniform transient combined salinity and water stress. Agric. Water Manag. 57: 127-144.
16. Homaee, M. R., A.Feddes and C. Dirksen. 2002d. A macroscopic water extraction model for non-uniform transient salinity and water stress. Soil Sci. Soc. of Am. J. 66: 1764-1772.
17. Kaddah, M. T.1963. Salinity effects on growth of rice at the seedling and inflorescence stage of development. Soil Sci. 96: 105-111.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.9.4]

18. Kaddah, M. T. and S. L. Ghowail. 1964. Salinity effects on growth of corn at different stage of development. Agron. J. 56: 214-217.
19. Keshta, M. M., M. Hammad and W. A. I. Sorour. 1999. Evaluation of rapeseed genotype in saline soil. Proc. 10th Intern. Rapeseed Congress, Canberra, Australia.
20. Lutts, S., J. M. Kinet and J. Bouharmont. 1995. Change in plant response to NaCl during development of rice (*Oriza sativa* L.) varieties differing in salinity resistance. J. Exp. Bot. 46: 1843-1852.
21. Maas, E. V. and J. Poss. 1989. Salt sensitivity of cowpea at various growth stages. Irrig. Sci. 10: 313-320
22. Maas, E. V. and G. J. Hoffman. 1977. Crop salt tolerance - current assessment. J. Irrig. Drain. Div. ASCE. 103: 115-134.
23. Pearson, G. A. and L. Bernstein. 1959. Salinity effects at several growth stages of rice. Agron. J. 51 : 654-657
24. Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums. Physics. 1: 318-333.
25. Rhoades, J. D., A. Kandiah, and A. M. Mashali. 1992. The use of saline waters for crop production. FAO Irrigation and Drainage Paper. FAO, United Nations, Rome.
26. Steppuhn H. and K. G. Wall. 1997. Grain yields from spring-sown Canadian wheat's grown in saline rooting media. Can. J. Plant Sci. 77: 63-68.
27. van Genuchten, M. Th. and G. j. Hoffman. 1984. Analysis of crop salt tolerance data. PP. 258-271. *In* I. Shainberg and J. Shalhevet (Eds.), Soil Salinity under Irrigation Process and Management. Ecol. Stud. 51. Springer-Verlag, New York.
28. Wilson, C. Lesch, S. M. and C. M. Grieve. 1999. Growth Stage Modulates salinity tolerance of New Zealand Spinach (*Tetragonia tetragonioides*) and Red Orach (*Atriplex hortensis* L.) Ann. Bot. 85: 501-509.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.44.9.4]