

مدل‌سازی اثر زمان اعمال تنش شوری محیط ریشه بر عملکرد گیاه کلزا

وحیدرضا جلالی^۱ و مهدی همایی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۸۸/۱/۱۶ و تاریخ پذیرش: ۸۹/۲/۱۸

E-mail: mhomaei@modares.ac.ir

چکیده

پاسخ گیاه کلزا به تنش شوری محیط رشد ریشه، به‌طور قابل توجهی به مرحله رشد گیاه وابسته است. این مطلب در اکثر پژوهش‌های مربوط به شوری مورد غفلت واقع گردیده و آزمایشات مربوط به شوری براساس فرض یکسان بودن آستانه تحمل گیاه طی کل دوره رشد، طراحی شده و تنها یک آستانه کاهش برای هر گیاه ارائه شده است. بررسی کمی پاسخ گیاه کلزا (رقم Option500) به تنش شوری طی دو آزمایش کاملاً متفاوت انجام گرفت. در آزمایش نخست، گیاه از ابتدا تحت تنش شوری بود. حال آنکه در آزمایش دوم، گیاه تنها در مرحله آخر رشد خود تحت تنش قرار گرفت. بدین ترتیب آزمایش‌ها با یک تیمار غیرشور و هشت تیمار با شوری‌های سه، پنج، هفت، نه، 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. به منظور کمی کردن اثر شوری در هر یک از دو آزمایش، مقادیر عملکرد نسبی دانه در شوری‌های مختلف، با استفاده از مدل‌های ماس و هافمن، ونگنوختن و هافمن، دیرکسن و همکاران و همایی و همکاران برآورد و پارامترهای مورد نظر به‌دست آمد، سپس مقایسه مدل‌ها با استفاده از پنج آماره کمی انجام شد. برازش مدل‌های مختلف بر مقادیر اندازه‌گیری شده، طی دو آزمایش نشان داد که مدل همایی و همکاران از دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار است.

کلمات کلیدی: شوری آستانه، عملکرد نسبی، کلزا، مدل‌سازی، مراحل رشد

۱- دانشجوی دکتری رشته خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران - ایران

۲- استاد گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس تهران - ایران (*مسئول مکاتبه)

مقدمه

مقاومت در برابر شوری، برای گیاهی که در معرض تنش شوری قرار گرفته، به‌طور قابل ملاحظه‌ای به مرحله رشد گیاه وابسته است. پژوهش‌گران مختلف در پژوهش‌های خود مطلب بالا را اثبات نموده‌اند (۳، ۴ و ۹). از طرف دیگر روند سریع رشد جمعیت جهان و نیاز بیشتر به فرآورده‌های کشاورزی از مسایل مهمی است که بشر با آن روبروست. در این ارتباط، محدودیت منابع آب و خاک به عنوان بستر اصلی تولیدات کشاورزی مطرح بوده و این امر استفاده بهینه از منابع آب و خاک موجود را ضروری ساخته است. واکنش گیاهان به تنش شوری طی فصل رشد، دائماً تغییر می‌کند. اغلب گیاهان از جمله کلزا در مرحله پیش از سبز شدن (جوانه‌زنی) به تنش شوری مقاوم هستند، لیکن در مرحله گیاهچه و اوایل رشد، به شوری حساس شده و با افزایش سن، مقاومت آنها نیز افزایش می‌یابد (۱، ۲ و ۸). 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 (۴). بنابراین، تعیین دقیق کاهش میزان عملکرد و اعمال مدیریت مناسب نیازمند شناخت اثر شوری بر عملکرد در هر مرحله رشد می‌باشد. به عبارت دیگر، با تجزیه و تحلیل کمی واکنش گیاه به شوری در مراحل مختلف رشد، می‌توان در دوره‌هایی از رشد که مقاومت گیاه به شوری نسبتاً بالاست، مقادیر متناهی از منابع آب شور را همراه با حفظ سطح مطلوب عملکرد به‌کار برد.

گیاهان برای فتوسنتز و تعرق، به آب نیاز دارند. با افزایش میزان شوری، جذب آب توسط گیاه کاهش می‌یابد. مناسب‌ترین روش کمی کردن جذب آب توسط ریشه گیاهان، استفاده از معادله کلی جریان یا معادله ریچاردز است که به صورت زیر نوشته می‌شود (۱۷):

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

در این فرمول، θ رطوبت حجمی خاک ($L^3 L^{-3}$)، t زمان (T)، z عمق (L)، K ضریب آبگذری غیراشباع خاک

($L T^{-1}$)، h پتانسیل ماتریک (L) و S مقدار آب جذب شده به وسیله ریشه گیاه در واحد حجم خاک و زمان ($L^3 L^{-3} T^{-1}$) می‌باشد. برای بیان کمی S مدل‌هایی وجود دارد که می‌توان آنها را به دو گروه مدل‌های خرد (Microscopic Models) و مدل‌های کلان (Macroscopic Models) تقسیم کرد. مدل‌های خرد به دلیل فرضیات مبنایی غیرواقعی و نیز غیرقابل اندازه‌گیری بودن پارامترهای آن، تا به حال به‌بوته آزمایش گذاشته نشده‌اند. به همین خاطر گروه دیگری از مدل‌ها که به مدل‌های کلان شهرت دارند، طراحی و ارایه گردیده‌اند (۴). در مدل‌های کلان مقدار آب جذب شده توسط گیاه برابر با میزان تعرق واقعی (T_a Actual Transpiration) و در شرایطی که هیچ‌گونه محدودیت آبی در خاک وجود نداشته باشد، برابر با تعرق پتانسیل (T_p Potential Transpiration) در نظر گرفته شده و معادله کلی آن به صورت زیر است (۷):

$$S = S_{\max} = \frac{T_p}{Z_r} \quad (۲)$$

در این فرمول، $S_{\max}$ حداکثر مقدار آب جذب شده به وسیله ریشه گیاه در واحد حجم خاک و زمان ($L^3 L^{-3} T^{-1}$)، 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 α که به آن تابع کاهش (Reduction Function) گفته می‌شود، از تعرق کاسته می‌شود (۷):

$$S = \alpha S_{\max} = \alpha \cdot \frac{T_p}{Z_r} \quad (۳)$$

معمولاً α تابعی از پتانسیل ماتریک خاک بوده و آن را به صورت $\alpha(h)$ نشان می‌دهند. معادله (۳) شکل عمومی مدل‌های کلان است (۷). در شرایط شور، α تابعی از پتانسیل اسمزی محلول خاک (h_o) بوده و مقدار جذب آب توسط گیاه در این شرایط به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha(h_o) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h_o^* - h_o}{h_o^* - h_{o50}} \right)^P} \quad (7)$$

این رابطه نسبت به روابط قبلی می تواند با دقت بیشتری واکنش گیاه به شوری را شبیه سازی کند، ولی مهمترین محدودیت آن، به دست آوردن h_{o50} است. همچنین پارامتر P به صورت فیزیکی و یا به صورت تجربی در آن تعریف نشده است. در واقع P مانند h_o^* و h_{o50} فاکتوری وابسته به شکل تابع است. با فرض اینکه P پارامتری وابسته به محصول، خاک و اقلیم است، همایی و همکاران (۱۲) معادله زیر را برای به دست آوردن آن پیشنهاد نمودند:

$$p = \frac{h_{o50}}{h_{o50} - h_o^*} \quad (8)$$

به دلیل اینکه مشکل به دست آوردن h_{o50} تا بدین جا حل نشده باقیمانده بود، مقدار h_{o50} با h_{omax} جایگزین شده و تابع خطی زیر را که دارای دو آستانه کاهش می باشد، پیشنهاد شد (۱۴ و ۱۵):

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

کاهش در مقدار α در شوری های بیشتر از h_o^* ادامه می یابد تا به یک شوری معین (h_{omax}) برسد. در شوری های بیشتر از h_{omax} افزایش شوری نمی تواند با همان روند قبلی در مقدار α کاهش ایجاد کند. این واقعیت نشان می دهد که در $h_o > h_{omax}$ گیاه هنوز زنده بوده و در سطحی بسیار اندک به فعالیت های حیاتی خود ادامه می دهد (۱۱). سپس مقدار P را با توجه به h_{omax} به صورت زیر تعریف شد:

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

$$S = \alpha(h_o) S_{max} = \alpha(h_o) \frac{T_p}{Z_r} \quad (11)$$

توابعی که برای $\alpha(h_o)$ پیشنهاد شده اند منحصر به روابطی هستند که توسط منابع زیادی (۶، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۸) ارایه گردیده اند و به شرح زیر می باشند:

ماس و هافمن (۱۶) تابعی خطی و دو ناحیه ای ارایه کردند (معادله ۵) که بر مبنای آن تا پیش از آستانه شوری (h_o^*)، هیچ گونه کاهشی در جذب آب پدید نمی آید. اما با افزایش h_o به مقادیر بالاتر از h_o^* مقدار جذب به طور خطی کاهش می یابد:

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

که در آن a شیب خط یا مقدار کاهش عملکرد به ازای یک واحد افزایش شوری پس از آستانه شوری می باشد. از آنجا که منحنی دقیق پاسخ گیاه به شوری، شکلی سیگموییدی، نه خطی دارد، به همین دلیل ونگنوختن و هافمن (۱۸) معادله ای غیر خطی به صورت زیر پیشنهاد کردند:

$$\alpha(h_o) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h_o}{h_{o50}} \right)^P} \quad (6)$$

در این فرمول، h_{o50} (L) مقدار فشار اسمزی است که در آن میزان جذب آب توسط گیاه ۵۰ درصد کاهش می یابد و P ضریبی تجربی است که وابسته به گیاه، خاک و اقلیم می باشد.

تحقیقات نشان داد که جذب آب توسط گیاه تا رسیدن به یک شوری معین (h_o^*) کاهش نمی یابد، به همین خاطر محققین (۵ و ۶) معادله فوق را نسبت به آستانه شوری (h_o^*) تعدیل و رابطه زیر را پیشنهاد نمودند:

همان‌طور که گفته شد کلزا در مراحل مختلف رشد خود نسبت به شوری واکنش‌های متفاوتی دارد. درحالی‌که تمام مدل‌های موجود که واکنش گیاهان به شوری را به‌صورت کمی بیان می‌کنند، براساس فرض غلط ثابت بودن شوری خاک از آغاز تا پایان دوره رشد و ثابت بودن آستانه کاهش کل دوره رشد استوارند (۱۰). به همین خاطر می‌توان انتظار داشت که این مقادیر آستانه شوری که از این آزمایشات به‌دست آمده است، به‌طور کامل نتواند واکنش گیاه را در مقابل شوری تخمین بزند، بنابراین اولین هدف این تحقیق، بررسی نحوه واکنش کلزا به شوری در دو آزمایش متفاوت بود. بدین صورت که در آزمایش اول تیمارها از ابتدا و در آزمایش دوم تیمارها فقط در یک مرحله از رشد (مرحله آخر فیزیولوژیک) با آب شور آبیاری گردیدند. از آنجایی‌که شکل توابع کاهش جذب آب برای هر یک از آزمایشات فوق مشخص نیست، لذا هدف بعدی این تحقیق پاسخ به این سؤال بود که آیا توابع کاهش جذب آب در دو آزمایش بالا با مدل‌های موجود برآورد می‌شوند یا می‌بایست مدلی مناسب برای آنها به‌دست آورد.

مواد و روش‌ها

دو آزمایش جداگانه و با تیمارهای مشترک در یک خاک شور زراعی با بافت لومی-شنی و در گلدان‌هایی به ارتفاع ۳۶ و قطر ۲۲ سانتی‌متر به منظور بررسی اثر شوری بر رشد و عملکرد کلزا و شناسایی دوره‌های حساسیت و مقاومت آن در برابر شوری، انجام گرفت. برای اعمال تیمارهای شوری، یک نمونه خاک سبک‌بافت (Toriorthent Typic) از منطقه قمروود استان قم (۴۷° و ۵۹° طول شرقی و ۴۳° و ۳۴° عرض شمالی) تهیه و به گلخانه حمل شد.

بافت لومی-شنی به این دلیل انتخاب شد تا بتوان شوری کل توده خاک را با اعمال جزء آب‌شویی (Leaching Fraction, LF) زیاد (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.

از آب شور مصنوعی که عموماً NaCl و یا ترکیبی از NaCl و CaCl₂ بوده، در بیشتر پژوهش‌های انجام شده در مورد تأثیر شوری بر رشد و عملکرد گیاه استفاده شده است. 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 می‌گردد. این موضوع با شرایط واقعی منابع آب و خاک شور تطابق ندارد. به‌همین دلیل، در این پژوهش استفاده از آب شور طبیعی نسبت به آب شور مصنوعی ترجیح داده شد. در جدول (۱) برخی ویژگی‌های شیمیایی این آب ارایه شده است.

آب شور تهیه شده از دریاچه حوض سلطان با شوری 600 dS.m^{-1} برای استفاده در تیمارهای موردنظر با آب معمولی رقیق گردید تا شوری‌های موردنظر برای اعمال تیمارهای آزمایشی به‌دست آید. برای تهیه بالاترین تیمار شوری 17 dS.m^{-1} ، نمونه آب اولیه ۴۲ بار رقیق شد، درحالی‌که این نسبت برای کمترین تیمار شوری یعنی 3 dS.m^{-1} ، ۲۲۰ بار بود. تیمارهای به‌کار رفته در این پژوهش، در سه تکرار و شامل آب شهر به عنوان شاهد و هشت سطح شوری ۳، ۵، ۷، ۹، ۱۱، ۱۳، ۱۵ و 17 dS.m^{-1} بود.

در آزمایش اول، گیاه کلزا از ابتدای رشد با سطوح شوری ذکر شده آبیاری گردید درحالی‌که در آزمایش دوم پس از کاشت، گلدان‌ها تا ابتدای مرحله بلوغ با آب معمولی آبیاری گردیدند تا تنشی به آنها وارد نشود. پس از رسیدن به مرحله موردنظر، هر گلدان با تیمار شوری مربوطه سه بار آب‌شویی شد و تیمارهای شوری پس از آن اعمال گردید.

نحوه آماده‌سازی خاک و پر کردن گلدان‌ها به این صورت بود که ابتدا خاک از الک پنج 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 پنج 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)

تراکم ۸۰ بوته در مترمربع). زمان آبیاری بدین صورت بود که گلدان ها روزانه توزین شده و در روز سوم به گلدان ها تا حد ظرفیت زراعی آب داده می شد تا مشکلی از لحاظ تنش آبی به وجود نیاید.

عمل فشرده سازی خاک انجام گرفت. این کار برای همه گلدان ها تکرار شد تا چگالی خاک گلدان ها به مقدار $g.cm^{-3}$ ۱/۳ برسد. پس از آن در هر گلدان هشت بذر سالم کاشته و پس از سبز شدن به سه بوته سالم تقلیل داده شد (معادل

جدول ۱ - نتایج تجزیه شیمیایی نمونه آب

واکنش شیمیایی	هدایت الکتریکی ($dS.m^{-1}$)	بی کربنات ($g.l^{-1}$)	کلر ($g.l^{-1}$)	سولفات ($mg.l^{-1}$)	بر ($mg.l^{-1}$)	کلسیم ($g.l^{-1}$)	منیزیم ($g.l^{-1}$)	سدیم ($g.l^{-1}$)	نترات ($mg.l^{-1}$)
۷/۲۵	۶۰۰	۸/۶	۱۶۱	۳۴۱/۵	۵۴/۸	۱/۲	۲۲/۴	۱۱۵	۲/۷۵

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2} \quad (14)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n o_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n o_i} \quad (15)$$

در این فرمول ها، P_i مقادیر برآورد شده، O_i مقادیر اندازه گیری شده و n تعداد نمونه است. کمترین مقدار برای ME ، $RMSE$ و CD صفر است. مقدار ME نمایان گر بدترین حالت برآورد مدل است. درحالی که مقدار $RMSE$ نشان دهنده بیش برآورد (Overestimate) و یا کم برآورد (Underestimate) است. CD نسبت بین پراکنش مقادیر برآورد شده و اندازه گیری شده را نشان می دهد. بیشترین مقدار برای EF یک است. مقادیر EF و CRM می توانند منفی باشند. EF مقادیر برآورد شده را نسبت به مقدار میانگین اندازه گیری ها مقایسه می کند. مقدار منفی EF دلالت بر آن دارد که میانگین مقادیر اندازه گیری شده تخمین بهتری را نسبت به مقادیر برآورد شده ارائه می دهند. CRM بیان کننده گرایش مدل به تخمین بیشتر و یا کمتر از مقادیر اندازه گیری شده است. به دست آوردن مقدار منفی CRM برای یک مدل تمایل مدل را برای بیش برآورد اندازه گیری ها نشان می دهد. اگر تمامی داده های برآورد شده و اندازه گیری شده یکسان باشند، نتایج آماره ها به صورت

در این دو آزمایش، عملکرد نسبی شامل وزن دانه در هر سطح شوری نسبت به شاهد (آب شهر) در نظر گرفته می شد. به منظور کمی کردن اثر شوری بر رشد و عملکرد کلزا، عملکرد نسبی با استفاده از مدل های (۵)، (۶)، (۷) و (۹) محاسبه شد. مدل های یاد شده بر داده های عملکرد نسبی به دست آمده در دو آزمایش بالا برازش داده شدند. عملکرد نسبی برآورد شده توسط مدل ها با مقادیر اندازه گیری شده در برابر سطوح مختلف شوری عصاره اشباع رسم و نتایج مدل های مختلف با یکدیگر مقایسه گردیدند. همچنین مقایسه کمی مدل ها با محاسبه آماره های خطای ماکزیمم $(ME)^1$ ، ریشه میانگین مربعات خطا $(RMSE)^2$ ، ضریب تبیین $(CD)^3$ ، کارایی مدل $(EF)^4$ و ضریب جرم باقیمانده $(CRM)^5$ برای هر کدام از مدل ها انجام شد. بیان ریاضی آماره های یاد شده به صورت زیر است:

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n \quad (11)$$

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

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{o})^2} \quad (13)$$

1 - Maximim Error

2 - Root Mean Square Error

3 - Coefficient of Determination

4 - Efficiency of model

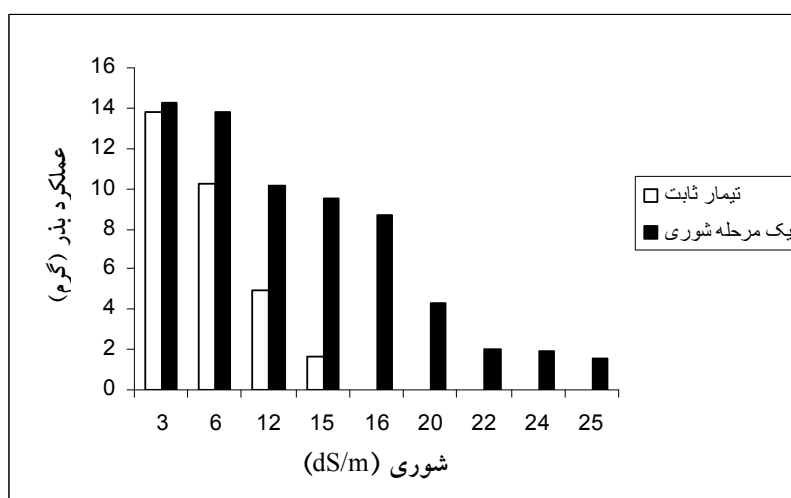
5 - Coefficient of Residual Mass

این شکل دیده می‌شود، در تیماری که کل دوره رشدی خود را تحت تنش بود، تا شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر مقداری عملکرد وجود داشت. لیکن در شوری‌های بالاتر از این مقدار هیچ عملکردی حاصل نشد. در تیماری که تنها یک دوره از دوره‌های رشد خود را تحت تنش شوری بود، به رغم کاهش مقدار عملکرد در شوری‌های بیشتر، در همه تیمارهای شوری مقدار اندکی عملکرد استحصال شد.

$ME = 0$, $RMSE = 0$, $CD = 1$, $EF = 1$ و $CRM = 0$ خواهد بود. در پایان تجزیه و تحلیل‌های آماری و کارهای گرافیکی با نرم‌افزار SPSS و Excel انجام پذیرفت.

نتایج و بحث

شکل (۱) عملکرد تیماری که از ابتدا تحت تنش شوری بود را در مقایسه با تیماری که تنها در مرحله آخر رشد خود تحت تنش سپری کرد، نشان می‌دهد. همان‌گونه که در



شکل ۱ - مقایسه عملکرد بذر کلزا در دو آزمایش متفاوت

شده گیاهچه کلزا و EC_o آستانه تحمل به شوری برآورد شده توسط مدل می‌باشد.

در این آزمایش (شکل ۲)، ضریب تبیین مدل‌های غیرخطی به دلیل پیچیده بودن و نیز تعداد پارامتر ورودی بیشتر نسبت به مدل ساده و خطی ماس و هافمن، اندکی بیشتر بوده است.

شکل (۲) برازش مدل‌ها بر داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش اول (تیمار ثابت) را نشان می‌دهد. حروف O و P به ترتیب بیان‌گر داده‌های مشاهده شده (Observed) و پیش‌بینی شده توسط مدل (Predicted) می‌باشد. با برازش مدل‌های مختلف بر داده‌های اندازه‌گیری شده، پارامترهای مختلف هر یک از مدل‌ها برآورد گردید (جدول ۲). در جدول (۲)، EC_m بیان‌گر آستانه تحمل شوری اندازه‌گیری

جدول ۲ - پارامترهای مدل‌های ۵، ۶، ۷ و ۹ برای برآورد پاسخ گیاه کلزا به شوری عصاره اشباع خاک در آزمایش اول

مدل	EC_o	EC_{50}	EC_{max}	b	α	p	R^2
Maas & Hoffman	۳/۹	-	-	۰/۰۵۶	-	-	۰/۹۸
van Genuchten	-	۱۲/۵۳	-	-	-	۳/۴۱	۰/۹۹
Dirksen et al	۳/۹	۱۲/۳۲	-	-	-	۲/۰۰	۰/۹۹
Homaee et al	۳/۹	-	۲۶	-	۰/۱۲	۲/۰۰	۰/۹۹

از آنجا که مدل‌های غیرخطی نسبت به مدل خطی ماس و هافمن ضریب تبیین بالاتری دارند، برای تعیین و انتخاب بهترین مدل در این مرحله از آنالیزهای آماری استفاده گردید. باتوجه به اینکه کارایی (EF) و ریشه میانگین مربعات خطای (RMSE) هر دو مدل همایی و دیرکسن برابر بود، لذا مدلی انتخاب می‌شود که پارامترهای آن کاملاً مشخص و تعریف

شده باشد (جدول ۳). همچنین پارامترهای آن به راحتی قابل اندازه‌گیری باشد، باتوجه به اینکه از بین تمام مدل‌های غیرخطی فقط مدل همایی و همکاران (۱۵) ویژگی‌های بالا را دارا می‌باشد. بنابراین در آزمایش تیمار ثابت، مدل مذکور مناسب‌ترین مدل شناخته شده و توصیه می‌گردد.

جدول ۳ - آماره‌های محاسبه شده برای مقایسه مدل‌های برآورد پاسخ گیاه کلزا به شوری خاک در آزمایش اول (تیمار ثابت)

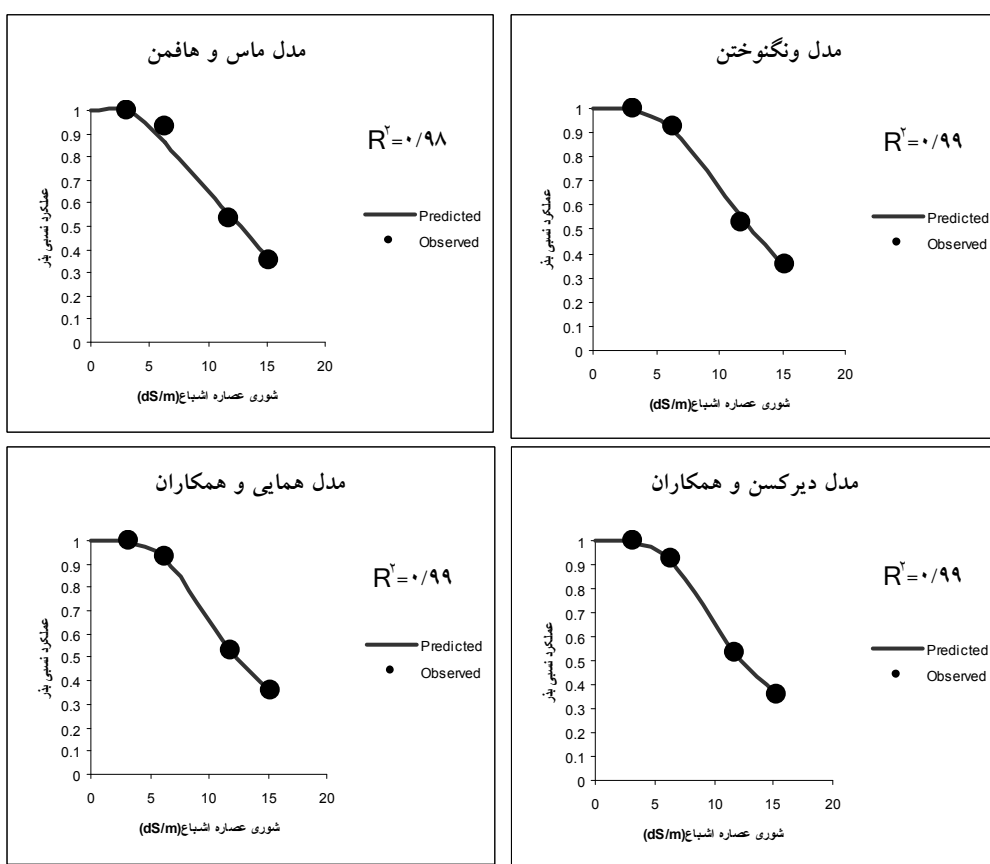
مدل	RMSE	CD	EF	ME	CRM	R ²
Maas & Hoffman	۵/۷۵۰	۱/۰۳	۰/۹۸	۰/۰۶۸	۰/۰۰۲۰	۰/۹۸
van Genuchten <i>et al</i>	۲/۲۸۰	۱/۰۳	۰/۹۹	۰/۰۱۸	۰/۰۰۹۰	۰/۹۹
Dirksen <i>et al</i>	۰/۰۹۴	۱/۰۷	۰/۹۹	۰/۰۱۰	۰/۰۰۵۶	۰/۹۹
Homaee <i>et al</i>	۰/۹۴۰	۱/۰۷	۰/۹۹	۰/۰۱۰	۰/۰۰۵۶	۰/۹۹

شکل (۳) برازش مدل‌ها بر داده‌های اندازه‌گیری شده برای تیماری که تنها مرحله آخر رشد خود را تحت تنش بوده است، به نمایش می‌گذارد. این شکل نشان می‌دهد که مقادیر برآورد شده عملکرد نسبی بذر توسط مدل‌های مختلف به‌ویژه 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 (۴) ارایه شده است.

جدول ۴ - پارامترهای مدل‌های ۵، ۶، ۷ و ۹ برای برآورد پاسخ گیاه کلزا به شوری عصاره اشباع خاک در آزمایش دوم

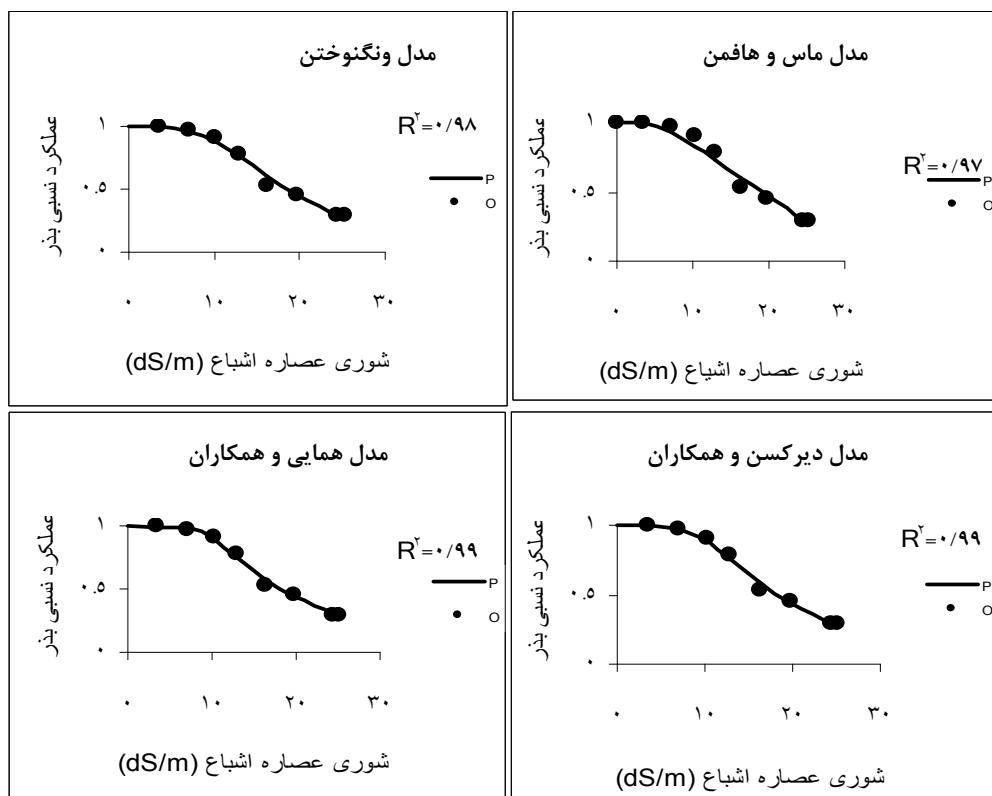
مدل	EC ₀	EC ₅₀	EC _{max}	b	a	p	R ²
Maas & Hoffman	۵/۵	-	-	۰/۰۳۶	-	-	۰/۹۷
van Genuchten <i>et al</i>	-	۱۸/۵	-	-	-	۳/۲۵	۰/۹۸
Dirksen <i>et al</i>	۳/۴	۱۸/۳	-	-	-	۱/۴۰	۰/۹۹
Homaee <i>et al</i>	۵/۶	-	۲۹/۹	-	۰/۲۱	۲/۰۰	۰/۹۹



شکل ۲ - برازش مدل‌ها بر داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش اول

اختلاف، بهترین برازش را ارائه دهند. بنابراین با کمک آمارهای ذکر شده در جدول (۵) مربوط به مدل‌های مختلف، می‌توان به ارزیابی صحیحی از میزان کارایی هر مدل دست یافت و مناسب‌ترین مدل را انتخاب نمود.

ضریب تبیین (R^2) مدل ۵، کمتر از ضرایب تبیین دیگر معادله (معادلات ۶، ۷ و ۹) می‌باشد که البته از لحاظ آماری هر چهار مدل در یک سطح قرار دارند (۱۶). به عبارت بهتر، مدل‌های غیرخطی در این مرحله توانسته‌اند با حداقل



شکل ۳ - برازش مدل ها بر داده های اندازه گیری شده در آزمایش دوم

سهل الوصول تر باشد. از آنجایی که مدل همایی و همکاران (۱۵) از این ویژگی برخوردار است، در مرحله بلوغ این مدل مناسب تر شناخته شد، ولی مدل ماس و هافمن (۱۶) را نیز به لحاظ سادگی و روانی معادله، می توان به کار برد.

باتوجه به اینکه آمارهای ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و کارایی (EF) مدل های دیرکسن و همکاران (۵) و همایی و همکاران (۱۵) برابر است، مدلی مناسب تر می باشد که پارامترهای ورودی آن

جدول ۵ - آماره های محاسبه شده برای مقایسه مدل های برآورد پاسخ گیاه کلزا به شوری خاک در آزمایش دوم

مدل	RMSE	CD	EF	ME	CRM	R^2
Maas & Hoffman	۷/۹	۱/۰۳	۰/۹۷	۰/۰۸	-۰/۰۰۰۳	۰/۹۷
van Genuchten et al	۴/۲	۱/۰۳	۰/۹۹	۰/۰۶	۰/۰۰۵۴	۰/۹۸
Dirksen et al	۳/۷	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۰۵	۰/۰۰۳۵	۰/۹۹
Homae et al	۳/۷	۱/۰۷	۰/۹۹	۰/۴۴	۰/۰۰۳۵	۰/۹۹

حد آستانه تحمل شوری کلزا، هنگامی که شوری خاک از ابتدا تا پایان دوره رشد ثابت باشد، براساس یافته‌های ماس و هافمن، ۱۱ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد، درحالی که آستانه کاهش عملکرد کلزا در پژوهش حاضر بسیار متفاوت از عدد ذکر شده توسط این محققین بوده و به شدت به مرحله فیزیولوژیکی که گیاه در آن قرار دارد، وابسته است (۱۶).

نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نشان داد که در تیماری که کل دوره رشدی خود را تحت تنش بوده، تا شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر مقداری عملکرد به‌دست می‌آید و پس از آن هیچ عملکردی عاید نمی‌شود. لیکن در تیماری که تنها یک دوره از دوره‌های رشد خود را تحت تنش شوری بوده، به‌رغم کاهش مقدار عملکرد در شوری‌های بیشتر، در همه تیمارهای شوری اندکی عملکرد قابل استحصال می‌باشد. مطلب بالا باید از این پس مورد توجه پژوهش‌گران و برنامه‌نویسان کامپیوتری که در پی برآورد کمی عملکرد گیاهان در محیط‌های شور هستند، واقع شود.

در آزمایش اول، به منظور برآورد عملکرد نسبی، مدل‌های غیرخطی (با حداقل اختلاف) نسبت به مدل خطی ماس و هافمن، دارای ضریب تبیین (R^2) بالاتری بودند و

توانستند برازش رضایت‌بخشی بر داده‌های اندازه‌گیری شده داشته باشند. استفاده از پارامترهای آماری برای تعیین مناسب‌ترین مدل در بین مدل‌های غیرخطی، نشان داد که مدل‌های دیرکسن و همکاران، همایی و همکاران و ونگونخن و هافمن، دارای ضریب تبیین (R^2) و کارایی (EF) یکسانی می‌باشند. در این راستا باید مدلی انتخاب شود که اولاً پارامترهای آن کاملاً مشخص و تعریف شده باشد و ثانیاً پارامترهای آن به راحتی قابل اندازه‌گیری باشد. باتوجه به اینکه از بین تمام مدل‌های غیرخطی، فقط مدل همایی و همکاران (۱۵) ویژگی‌های فوق را دارا می‌باشد، این مدل مناسب‌ترین مدل شناخته شد. همچنین در آزمایش دوم همانند آزمایش اول، آمارهای محاسبه شده نشان داد که مدل‌های غیرخطی دیرکسن و همکاران و همایی و همکاران به علت داشتن پارامترهای ورودی بیشتر، دارای ضرایب تبیین بالاتری شده و توانستند عملکرد نسبی گیاه را به طور دقیق‌تری پیش‌بینی نمایند. باتوجه به اینکه کارایی (EF) هر دو مدل یاد شده برابر بود، مدل همایی و همکاران که پارامترهای آن کاملاً مشخص و تعریف شده است، مناسب‌ترین مدل شناخته شد.

منابع مورد استفاده

۱. جلالی و. ر.، همایی م. و میرنیا س. خ (۱۳۸۶) مدل‌سازی واکنش کلزا به شوری طی مراحل مختلف رشد رویشی. تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۸ (۴): ۹۵-۱۱۲.
۲. جلالی و. ر.، همایی م. و میرنیا س. خ (۱۳۸۶) تأثیر سطوح مختلف شوری محیط رشد بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه کلزا (*Brassica napus* L.). علوم خاک و آب. ۲۱ (۲): ۲۰۹-۲۱۸.
۳. جلالی و. ر.، همایی م. و میرنیا س. خ (۱۳۸۷) مدل‌سازی واکنش کلزا به شوری طی مراحل مختلف رشد زایشی. علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۲ (۴۴): ۱۱۱-۱۲۱.
۴. همایی م (۱۳۸۱) واکنش گیاهان به شوری. کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. نشریه شماره ۵۸. تهران. ایران.
5. Dirksen C and Augustijn DC (1988) Root water uptake function for nonuniform pressure and osmotic potential. *Agron. J.* 15: 185 (Abst.).
6. Dirksen C, Kool JB, Koorevaar P and Van Genuchten MTh (1993) HYSWASOR- Simulation model of hysteretic water and solute transport in the root zone. *In: Russo D and Dagan G (Eds.), Water Flow and Solute Transport in Soils.* Springer Verlage, New York. Pp. 99-122.
7. Feddes RA, Kowalik P and Zarandy H (1978) Simulation of Field Water Use and Crop Yield. Pudoc. Wageningen. The Netherlands Saline water in supplemental irrigation of wheat and barley under rainfed agriculture. *Agr. Water Manage.* 78: 122-127.
8. Francois LE (1994) Growth, seed yield, and oil content of canola grown under saline conditions. *Agron. J.* 86: 233-237.

9. Hamdy A, Sardo V and Farrag Ghanem KA (2005) heads. 14th International Conference on Computational Methods in Water Resources. Delft. The Netherlands.
10. Homaee M and Schmidhalter U (2008) Water integration by Plants root under non-uniform soil salinity. Irrigation Sci. 27: 83-95.
11. Homaee M and Feddes RA (2002) Modeling the sink term under variable soil water osmotic and pressure heads. Develop. Water Sci. 47: 17-24.
12. Homaee M, Dirksen C and Feddes RA (2002a) Simulation of root water uptake. I. Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. Agr. Water Manage. 57: 89-109.
13. Homaee M, Feddes RA and Dirksen C (2002b) Simulation of root water uptake. II. Non-uniform transient water stress using different reduction functions. Agr. Water Manage. 57: 111-126.
14. Homaee M, Feddes RA and Dirksen C (2002c) Simulation of root water uptake. III. non-uniform transient combined salinity and water stress. Agr. Water Manage. 57: 127-144.
15. Homaee M, Feddes RA and Dirksen C (2002d) A macroscopic water extraction model for non-uniform transient salinity and water stress. Soil Sci. Soc. Am. J. 66: 1764-1772.
16. Maas EV and Hoffman GJ (1977) Crop salt tolerance - current assessment. J. Irrig. Drain. E- ASCE. 103: 115-134.
17. Richards LA (1931) Capillary conduction of liquids in porous mediums. Physics. 1: 318-333.
18. Van enuchten MTH and Hoffman GJ (1984) Analysis of crop salt tolerance data. In: Shainberg I and shalhevet J (Eds.), Soil salinity under irrigation process and management. Ecol. Stud. 51. Springer-Verlag, New York. Pp: 258-271.

Modeling the effect of salinity application time of root zone on yield of canola (*Brassica napus* L.)

V. R. Jalali¹ and M. Homaei¹

E-mail: mhomaei@modares.ac.ir

Abstract

Canola response to root media salinity highly depends on its phenological stage. In most investigations, this fact is neglected. Therefore in most studies a single threshold value for each plant is introduced. The objective of this study was to investigate the quantitative response of canola to salinity. The study was done in two different experiments. In the first experiment, canola was exposed to salinity from the first growth stage. In second experiment, plants were irrigated with saline water only at final growth stage. Both experiments were conducted on a natural saline loamy sand soil, using salinity treatments including a non-saline water (tap water) and eight saline waters of levels (3, 5, 7, 11, 13, 15 and 17 dS.m⁻¹). The Maas and Hoffman, van Genuchten and Hoffman, Dirksen *et al.*, and Homaei *et al.*, models were used to predict relative yield as a function of soil salinity. The obtained results based on the calculated maximum error (ME), root mean square error (RMSE), coefficient of determination (CD), modeling efficiency (EF) and coefficient of residual mass (CRM) statistics indicated the Homaei et al., model provides better prediction for both experiments.

Keywords: Canola, Growth stages, Modeling, Relative yield, Threshold salinity

¹-Tarbiat Modares University, Faculty of Agriculture, Department of Soil Science. Tehran, Iran (Corresponding Author)