

مدل سازی واکنش کلزا به شوری طی دوره رشد رویشی

وحیدرضا جلالی، مهدی همایی و سیدخلاق میرنیا*

* به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد؛ و دانشیاران دانشگاه تربیت مدرس، نشانی: تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ص. پ.

۴۸۳۸-۱۴۱۵۵، تلفن: ۴-۴۴۱۹۴۹۱۱(۰۲۱)، پیام‌نگار: v_jalali@modares.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۸۵/۷/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۸۶/۳/۱۲

چکیده

واکنش کلزا به تنش شوری طی فصل رشد، دائماً تغییر می‌کند. اغلب گیاهان از جمله کلزا در مرحله پیش از سبزشدن (جوانه‌زنی) به تنش شوری مقاوم هستند، ولی در مرحله گیاهچه و اوایل رشد، به شوری حساس می‌شوند و با افزایش سن، مقاومت آنها نیز افزایش می‌یابد. دوره رشد رویشی، حیاتی‌ترین بخش زندگی گیاه است زیرا بقای گیاه در این دوره بر عملکرد تاثیر می‌گذارد. درباره اثر شوری بر گیاهان مختلف پژوهش‌های فراوان شده اما نتایج حاصل عموماً به صورت کمی بیان نشده‌اند. اندک پژوهش‌هایی هم که به صورت کمی ارائه شده‌اند بر مبنای "میانگین شوری" ناحیه رشد ریشه، آنهم طی "کل فصل رشد" بوده‌اند. هدف از این پژوهش، کمی کردن واکنش گیاهان به شوری طی مراحل مختلف رشد، به صورت مدل‌های کاربردی است. به این منظور کلزا برگزیده شد که از گیاهان مهم زراعی است و ارزش اقتصادی زیادی دارد. کلزا در دوره رشد رویشی خود سه مرحله فنولوژیک: گیاهچه، روزت، و ساقه‌رفتن دارد. برای بررسی اثر شوری در مراحل رشد رویشی، آزمایشی شامل یک تیمار غیر شور (آب معمولی با شوری ۶/۰ دسی‌زیمنس) و ۸ تیمار با شوری‌های ۳، ۵، ۷، ۹، ۱۱، ۱۳، ۱۵، و ۱۷ دسی‌زیمنس بر متر اجرا شد. از آب شور طبیعی دریاچه حوض سلطان قم استفاده شد. خاک محل آزمایش "لوم شنی" بود. دلیل انتخاب آب و خاک شور طبیعی، به حداقل رساندن انحراف از شرایط طبیعی است که گیاه در آن رشد می‌کند. بوته‌های کلزا پیش از رسیدن به ابتدای هر یک از مراحل رشد رویشی با آب غیر شور آبیاری و پس از آن با تیمارهای شوری مربوطه آبیاری شدند. به منظور کمی کردن اثر شوری در هر یک از مراحل رشد، تعداد نسبی گیاهچه و مقادیر تعرق نسبی (T_a/T_p) در شوری‌های مختلف خاک، با استفاده از مدل‌های مس و هافمن، ون گنوختن و هافمن، دیرکسن و همکاران، و همایی و همکاران برآورد و پارامترهای مورد نظر به دست آمد. مدل‌ها با استفاده از آماره‌های خطای بیشینه (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (CD)، کارایی مدل (EF)، و ضریب خطای تجمعی (CRM) مقایسه شدند. آماره‌های مربوط به برازش مدل‌های مختلف بر مقادیر اندازه‌گیری شده، طی مرحله گیاهچه نشان داد که مدل خطی مس و هافمن نسبت به سایر مدل‌ها مناسب‌تر است اما برای مرحله روزت و ساقه رفتن، مدل همایی و همکاران، توانست نسبت به سایر مدل‌ها برآوردی بهتر ارائه دهد.

واژه‌های کلیدی

دوره رشد رویشی، شوری، شوری آستانه کاهش، کلزا، مدل سازی

زیر کشت زراعت آبی بر دامنه آن افزوده می‌شود

(Szaboles, 1994; Kingsbury et al., 1984). برابر آمار

موجود، سطح کلی خاک‌های شور در ایران حدود ۴۴

میلیون هکتار تخمین زده می‌شود که حدود ۳۰ درصد

مقدمه

شوری یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده

تولیدات گیاهان زراعی است. این مشکل در اقلیم‌های

مرطوب و خشک وجود دارد و با افزایش سطح



ابتدای دوره رشد به شوری حساس است و در انتهای فصل رشد خود، مانند مرحله پرشدن دانه، از حساسیتش به شوری بسیار کاسته می‌شود. کشتا و همکاران (Keshta, 1999) نیز در تحقیقی روی کلزا یافته‌هایی مشابه گزارش کرده‌اند. بر اساس طبقه‌بندی مس و هافمن (Maas & Hoffman, 1977)، کلزا گیاهی نسبتاً متحمل به شوری 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 پژوهش‌هایی متعدد گزارش شده است (Feddes *et al.*, 1978; Childs & Hanks, 1975; de Wit, 1958).

با افزایش شوری، جذب آب در گیاه کاهش می‌یابد. بیان کمی جذب آب 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، 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 از ریشه گیاه در واحد حجم خاک و زمان ($L^3L^{-3}T^{-1}$) است. برای بیان کمی که مدل‌ها¹ یا نمونه‌هایی وجود دارد که می‌توان آنها را به دو گروه خرد² و کلان³ تقسیم کرد. نمونه‌های خرد به دلیل فرضیات مبنایی غیر واقعی و نیز غیر قابل اندازه‌گیری بودن پارامترهای آن در

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 زمین‌هایی دیده می‌شود که فعلاً تحت آبیاری هستند و زهکشی مناسبی ندارند. 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 کمی کردن اثر شوری بر عملکرد در هر مرحله رشد است.

حساسیت گیاه به شوری طی فصل رشد دائماً تغییر می‌کند (Homaee, 2002). این مسئله برای اسفناج و کلم قرمز (Wilson *et al.*, 1999)، گندم (Hamdy *et al.*, 1997)، جو (Steppuhun & Wall, 2005)، لفل (Chartzoulakis & Klapaki, 2000)، برنج (Lutts *et al.*, 1995)، ذرت (Kaddah & Ghowail, 1964)، سورگوم (Maas & Poss, 1989)، و خربزه (Carvajal *et al.*, 1998) گزارش شده است.

بیشتر گیاهان در مرحله جوانه‌زنی به تنش شوری مقاوم هستند، اما در مرحله گیاهچه و مراحل اولیه پس از آن حساس و در معرض آسیب هستند (Zeynali *et al.*, 2002; Saadat, 2006). چنانچه گیاه در خاک استقرار یابد، با گذشت زمان و در مراحل بعدی رشد به شوری مقاوم‌تر می‌شود (Francois & Bernstein, 1964). فرانکوئیس (Francois, 1994) در آزمایشی به بررسی رشد بوته، عملکرد دانه، و مقدار روغن دانه کلزا تحت شرایط شور پرداخت و در آزمایش‌های خود به این نکته پی برد که گیاه روغنی کلزا در مراحل گیاهچه و

ون گنوختن و هافمن (van Genuchten & Hoffman, 1984)، دیرکسن و همکاران (Dirksen *et al.*, 1993) و همایی و همکاران (Homaee *et al.*, 2002a, b, c, d) ارائه داده‌اند که به شرح زیرند:

مس و هافمن (Maas & Hoffman, 1977) تابعی خطی و دو تکه ارائه کردند که بر مبنای آن تا پیش از آستانه کاهش شوری (h_o^*) هیچ‌گونه کاهش در جذب آب پدید نمی‌آید اما با افزایش h_o مقدار جذب به طور خطی کاهش می‌یابد:

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

که در آن، a = شیب خط یا مقدار کاهش عملکرد به ازای یک واحد افزایش شوری پس از آستانه کاهش است. از آنجا که منحنی دقیق پاسخ گیاه به شوری، شکلی سیگموییدی و نه خطی دارد، ون گنوختن و هافمن (van Genuchten & Hoffman, 1984) معادله‌ای غیر خطی به صورت زیر پیشنهاد کردند:

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

که در آن، h_{o50} = مقدار فشار اسمزی (L) است که در آن جذب آب ۵۰ درصد کاهش می‌یابد؛ و p = نیز ضریبی تجربی است که وابسته به گیاه، خاک، و اقلیم است (Homaee & Feddes, 2002).

برخی تحقیقات Augustijn و Dirksen (1998) و Dirksen و همکاران (1993)، نشان داده که جذب آب در گیاه تا رسیدن به شوری معین (h_o^*) کاهش نمی‌یابد (Dirksen & Augustijn, 1998; Dirksen *et al.*, 1993).

شرایط کنونی، تا به حال آزمایش نشده‌اند. به همین دلیل، گروه دیگری از نمونها طراحی و ارائه شدند که به نمونها کلان شهرت دارند. در نمونها کلان، مقدار آب جذب‌شده 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 آورد، به اندازه α ، که به آن تابع کاهش^۳ گفته می‌شود، از تعرق کاسته می‌شود:

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

معمولاً α 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، α تابعی از پتانسیل اسمزی محلول خاک (h_o) است و مقدار جذب آب در گیاه در این شرایط به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

توابع پیشنهاد شده برای $\alpha(h_o)$ منحصر به روابطی هستند که مس و هافمن (Maas & Hoffman, 1977)،

همان روند قبلی در مقدار α کاهش ایجاد کند. این واقعیت نشان می‌دهد که در $h_0 > h_{omax}$ گیاه هنوز زنده است و در سطحی بسیار اندک به فعالیت‌های حیاتی خود ادامه می‌دهد. همایی و همکاران (Homaei et al., 2002) سپس مقدار P را با توجه به h_{omax} به صورت زیر تعریف کردند.

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

کلزا 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 عملکرد کلزا 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 دوره رشد رویشی کلزا از چه شکلی برخوردار است. افزون بر آن، این پرسش بی‌پاسخ مانده است که آیا توابع کاهش جذب آب در دوره رشد رویشی با نمون‌های موجود برآورد می‌شوند یا نمونی مناسب برای آنها باید به دست آورد. هدف از این پژوهش، پاسخ‌دادن به پرسش‌های سه‌گانه فوق بود.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی اثر شوری بر رشد و عملکرد کلزا و کمی کردن آن، آزمایشی در یک خاک شور با بافت "لوم شنی" و در گلدان‌هایی به ارتفاع ۳۶ و قطر ۲۲ سانتی‌متر

به همین دلیل دیرکسن و همکاران (Dirksen et al., 1993) معادله ۶ را نسبت به شوری حد آستانه (h_o^*) تعدیل و رابطه زیر را پیشنهاد کردند:

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

این رابطه نسبت به روابط قبلی با دقت بیشتری واکنش گیاه را به شوری شبیه‌سازی می‌کند اما مهم‌ترین محدودیت آن به دست آوردن h_{o50} است. همچنین، پارامتر P چه به صورت فیزیکی و چه به صورت تجربی در آن تعریف نشده است. در واقع P همانند (h_o^*) و h_{o50} فاکتوری وابسته به شکل تابع 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:

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

به دلیل اینکه مشکل به دست آوردن h_{o50} تا بدینجا حل نشده باقی مانده بود، همایی و همکاران (Homaei et al., 2002b) مقدار h_{o50} را با h_{omax} جایگزین و تابع خطی زیر را پیشنهاد کردند که دارای دو آستانه کاهش است (Homaei & Feddes 1999, 2001).

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

کاهش در مقدار α در شوری‌های بیشتر از (h_o^*) ادامه می‌یابد تا به یک شوری معین (h_{omax}) برسد. در شوری‌های بیشتر از h_{omax} ، افزایش شوری نمی‌تواند با

آب شور مصنوعی استفاده شده که عموماً NaCl یا ترکیبی از CaCl₂ + NaCl است. با این روش، از تأثیر منفی سمیت برخی از عناصر و تأثیر آنها بر قابلیت فراهمی سایر عناصر غذایی از لحاظ جذب در سطح ریشه‌ها و انتقال در درون گیاه، صرف‌نظر می‌شود که با شرایط واقعی منابع آب و خاک شور تطابق ندارد. به همین دلیل، در این پژوهش ترجیح داده شد از آب شور طبیعی استفاده شود نه آب شور مصنوعی. در جدول ۲ برخی ویژگی‌های شیمیایی این آب ارائه شده است.

اجرا 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 نیمرخ خاک را با اعمال جزء آبشویی^۱ (LF) زیاد نسبتاً یکنواخت نگه داشت. در این صورت جزء آبشویی مورد نظر که برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده بود، اعمال گردید.

در این پژوهش افزون بر خاک شور، از آب شور طبیعی فراهم‌شده از دریاچه حوض سلطان قم نیز استفاده شد. در اکثر مطالعات درباره تأثیر شوری بر رشد و عملکرد گیاه، از

جدول ۱- نتایج تجزیه شیمیایی و فیزیکی خاک مورد استفاده در آزمایش

SP (درصد)	pH	EC خاک (دسی‌زیمنس)	OC (درصد)	T.N.V (درصد)	پتاسیم	فسفر	کلسیم	منیزیم	آهن	روی	مس	منگنز
۲۱/۳۶	۷/۸۴	۳/۸۵	۰/۳۹	۹/۲۵	۷۷/۶	۱/۰۲	۳۴	۴	۰/۹	۰/۱	۰/۲۶	۱/۴۲
(میلی‌گرم بر کیلوگرم)												
(بر متر)												

جدول ۲- نتایج تجزیه شیمیایی نمونه آب دریاچه حوض سلطان

pH	(EC)	(CO ₃ ²⁻) (میلی‌گرم بر لیتر)	(HCO ₃ ⁻) (میلی‌گرم بر لیتر)	(CL ⁻) (گرم بر لیتر)	(SO ₄ ²⁻) (میلی‌گرم بر لیتر)	(B) (میلی‌گرم بر لیتر)	(Ca ²⁺) (گرم بر لیتر)	(Mg ²⁺) (گرم بر لیتر)	(Na ⁺) (گرم بر لیتر)	(NO ₃ ⁻) (میلی‌گرم بر لیتر)
۷/۲۵	۶۰۰	۰/۰	۸/۶	۱۶۱	۳۴۱/۵	۵۴/۸	۱/۲	۲۲/۴	۱۱۵	۲/۷۵

شوری‌های پایینتر و بالاتر از این حد با فواصل ۲ دسی‌زیمنس بر متر انتخاب شد.

برای آماده‌سازی خاک و پرکردن گلدان‌ها، ابتدا خاک از الک ۵ میلی‌متری عبور داده شد تا مشکلی از لحاظ یکنواختی در نفوذ و آبشویی ایجاد نشود. پس از آن، رطوبت نمونه‌های خاک از طریق اسپری کردن آب روی آنها به حدود ۵ درصد رسانده شد تا مناسب‌ترین شرایط برای فشرده‌سازی خاک ایجاد شود. برای پرکردن گلدان‌ها یک سوم از خاک مرطوب (حدود ۴ تا ۵ درصد

برای استفاده در تیمارهای موردنظر، آب شور تهیه‌شده از دریاچه حوض سلطان با شوری ۶۰۰ دسی‌زیمنس بر متر با آب معمولی رقیق شد. تیمارهای به کار رفته در این پژوهش در ۳ تکرار و شامل آب معمولی به عنوان شاهد و ۸ سطح شوری ۳، ۵، ۷، ۹، ۱۱، ۱۳، ۱۵، و ۱۷ دسی‌زیمنس بر متر بود. آستانه کاهش عملکرد کلزا در منابع رسمی مانند (Maas & Hoffman, 1977)، ۱۱ دسی‌زیمنس بر متر عنوان شده است، بر این اساس و به منظور تعیین حد دقیق آستانه کاهش عملکرد،

1- Leaching Fraction

حال گلدان‌هایی با همان شرایط ولی بدون گیاه در بین تیمارها قرار داده شد تا میزان واقعی تبخیر مشخص شود. به منظور کمی کردن اثر شوری بر رشد و عملکرد کلزا در دوره رویشی، عملکرد نسبی با استفاده از مدل‌های مس و هافمن (Maas & Hoffman, 1977)، ون گنوختن و هافمن (van Genuchten & Hoffman, 1984)، دیرکسن و همکاران (Dirksen *et al.*, 1993)، همایی و همکاران (Homae *et al.*, 2002b) محاسبه شد. مدل‌های یادشده بر داده‌های تعرق نسبی به دست آمده در هر مرحله از رشد گیاه برآزش داده شدند. تعرق نسبی برآوردشده توسط مدل‌ها با مقادیر اندازه‌گیری‌شده در مقابل سطوح مختلف شوری رسم و نتایج مدل‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شدند. همچنین، مقایسه کمی مدل‌ها با محاسبه آماره‌های خطای ماکزیمم (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تخمین (CD)، کارایی مدل (EF)، و ضریب جرم باقیمانده (CRM) برای هر یک از مدل‌ها اجرا شد. بیان ریاضی آماره‌ها به صورت زیر است:

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

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

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

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

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

رطوبت وزنی)، به درون همه گلدان‌ها ریخته و با هاون مخصوص (که قطر آن برابر قطر داخلی گلدان بود) فشرده شد. تا جرم ویژه ظاهری خاک گلدان‌ها با جرم ویژه ظاهری طبیعی خاک (۱/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب) برابر شود. سپس هر گلدان با توجه به تیمار شوری مربوط، با آب شور ۳ بار آبخوبی شد تا شوری محلول خاک با شوری آب آبیاری یکسان شود. در هر گلدان ۸ بذر سالم کاشته شد؛ پس از سبز شدن، به جز ۳ بوته سالم بقیه حذف شد. برای آبیاری، گلدان‌ها روزانه توزین شده و در روز سوم به آنها تا حد ظرفیت زراعی آب داده شد تا مشکلی از لحاظ تنش آبی به وجود نیاید.

دوره رشد رویشی کلزا شامل مراحل گیاهچه، روزت، و ساقه‌رفتن است. گلدان‌های مرحله گیاهچه از ابتدای رشد تحت تنش شوری قرار گرفتند، ولی گلدان‌های مربوط به سایر مراحل تا ابتدای مرحله مورد نظر با آب معمولی آبیاری شدند تا تنشی به آنها وارد نشود. پس از رسیدن به مرحله مورد نظر، هر گلدان با تیمار شوری مربوطه ۳ بار آبخوبی و تیمارهای شوری پس از آن اعمال شد. طی آزمایش، حجم و EC زه‌آب پیوسته اندازه‌گیری می‌شد تا از صحت اعمال LF=۰/۵ اطمینان حاصل شود. در مرحله گیاهچه، عملکرد نسبی شامل تعداد گیاهچه‌های زنده‌مانده در هر سطح شوری عصاره اشباع خاک نسبت به شاهد (آب معمولی) در نظر گرفته می‌شد. در سایر مراحل تعرق واقعی روزانه گیاه از طریق وزنی اندازه‌گیری و ثبت می‌شد و بر اساس رابطه دویت (de Wit, 1958)، عملکرد نسبی در مرحله روزت و ساقه‌رفتن شامل تعرق گیاه در هر سطح شوری نسبت به تیمار شاهد (آب معمولی) در نظر گرفته شد. به منظور جلوگیری از تبخیر، سطح گلدان‌ها با یک لایه شن به ضخامت ۴ سانتی‌متر پوشانده شد و در عین

اندازه‌گیری شده یکسان باشند، نتایج آماره‌ها به صورت $CRM = 0$ و $EF = 1$ ، $CD = 1$ ، $RMSE = 0$ ، $ME = 0$ خواهد بود.

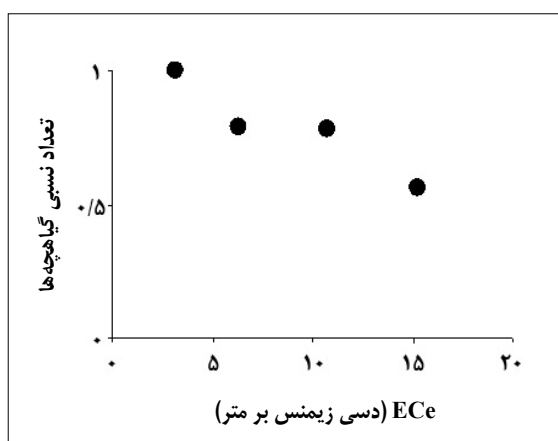
نتایج و بحث

مرحلهٔ گیاهچه

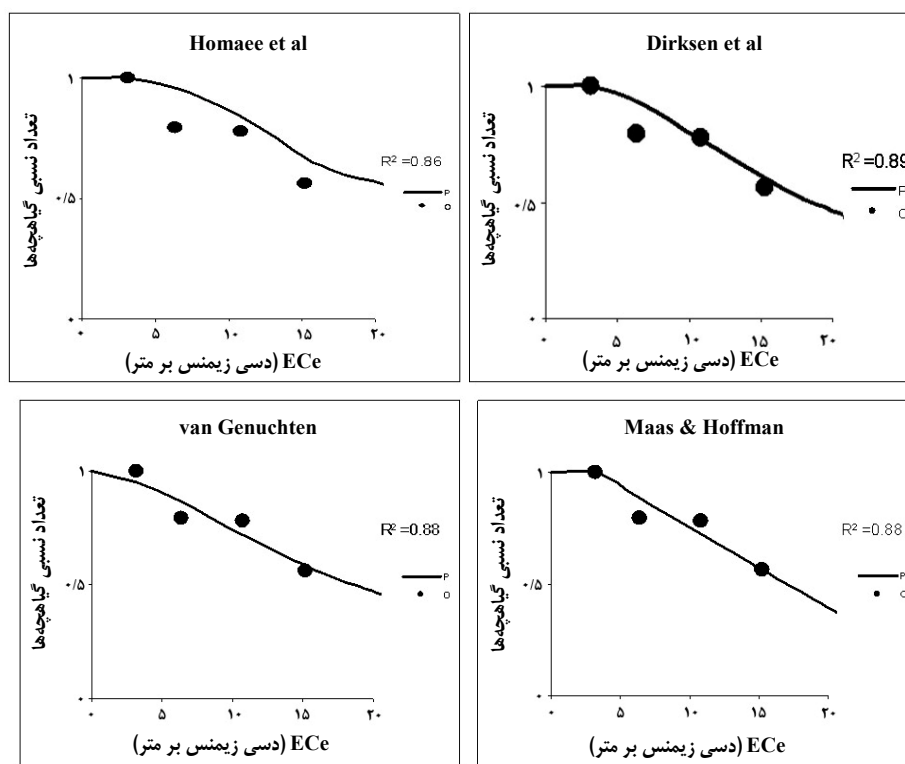
شکل ۱ اثر شوری را بر تعداد نسبی گیاهچه‌های کلزا نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش سطوح شوری عصارهٔ اشباع خاک (EC_e)، تعداد گیاهچه‌های کلزا کاهش می‌یابد. در این مرحله، تعداد گیاهچه‌های زنده‌مانده در هر گلدان تا پایان دورهٔ گیاهچه به عنوان شاخص عملکرد نسبی در نظر گرفته شد. پس از آن مدل‌های ذکر شده بر داده‌های اندازه‌گیری شده برازش داده شد.

شکل ۲ برازش مدل‌ها را بر داده‌های اندازه‌گیری شده در مرحلهٔ گیاهچه نشان می‌دهد. حروف O و P به ترتیب بیانگر داده‌های مشاهده شده (Observed) و پیش‌بینی شده توسط مدل (Predicted) هستند.

که در آنها، P_i مقادیر برآوردشده؛ 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 حالی که مقدار $RMSE$ نشان می‌دهد که برآوردها نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده چه مقدار بیش‌برآوردی^۱ یا کم‌برآوردی^۲ دارند. CD نسبت بین پراکنش مقادیر برآوردشده و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار برای EF یک است. مقادیر EF و CRM می‌توانند منفی باشند. مقدار EF مقادیر برآوردشده را نسبت به مقدار میانگین اندازه‌گیری‌ها مقایسه می‌کند. مقدار منفی EF دلالت بر آن دارد که میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده تخمین بهتری را نسبت به مقادیر برآوردشده می‌دهند. 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 بیش‌برآورد اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد. اگر تمامی داده‌های برآوردشده و



شکل ۱- اثر شوری بر تعداد نسبی گیاهچه‌های کلزا



شکل ۲- تعداد نسبی گیاهچه‌های کلزای اندازه‌گیری شده و برآورد شده به کمک معادلات ۵، ۶، ۷ و ۹

در این جدول، EC_m بیانگر آستانه تحمل به شوری اندازه‌گیری شده گیاهچه کلزا و EC_o آستانه تحمل به شوری برآورد شده توسط مدل است.

با برآورد مدل‌های مختلف بر داده‌های اندازه‌گیری شده، پارامترهای مختلف هر یک از مدل‌ها برآورد شد که نتایج حاصل در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- پارامترهای مدل‌های مختلف که به کمک معادلات ۵، ۶، ۷ و ۹ برآورد شده است

معادلات	EC_o	EC_m	EC_{50}	EC_{max}	b	α	P_p	RMSE	R^2
Homae et al	۳/۸	۳	-	۱۴/۹۹	-	۰/۶۱	۰/۹	۱۰/۸۳	۰/۸۶
Dirksen et al	۳/۸	۳	۲۲/۵۷	-	-	-	۰/۹	۸/۳	۰/۸۹
van Genuchten	-	۳	۱۸/۶۵	-	-	-	۱/۷۱	۹/۱۳	۰/۸۸
Maas & Hoffman	۳/۲	۳	-	-	۰/۰۳۶	-	-	۸/۳۴	۰/۸۸

خطا ($RMSE$) نیز بیانگر دقت نسبی مدل‌های چهارگانه فوق است. بنابراین، در این مرحله تمام مدل‌های مذکور (با اندکی اختلاف) قابل توصیه و قابل به‌کارگیری هستند، اما مهم‌ترین نکته در انتخاب یک مدل، افزون بر مشخصه‌های

مقادیر هدایت الکتریکی مندرج در جدول بر مبنای EC عصاره اشباع خاک است. جدول ۳ نشان می‌دهد که ضرایب تبیین (R^2) مدل‌های چهارگانه فوق به طور نسبی در یک دامنه قرار دارند. استفاده از آماره ریشه میانگین مربعات

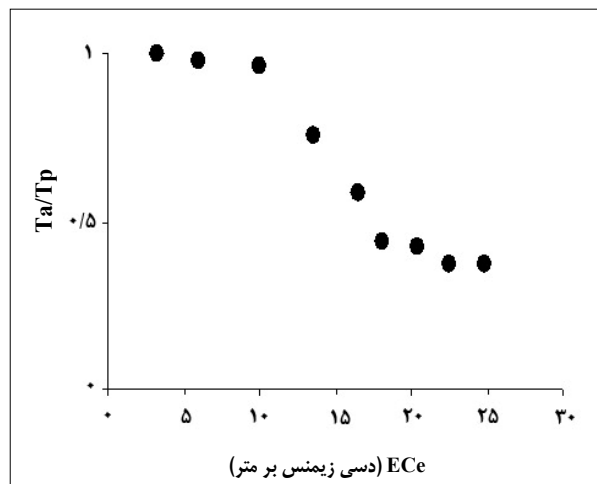
مدل‌سازی واکنش کلزا به شوری طی دوره ...

مرحله روزت در سطوح مختلف شوری عصاره اشباع خاک (EC_e) نشان می‌دهد. در این شکل ۳ می‌بینیم که تا شوری حدود ۵/۵ دسی‌زیمنس بر متر، تعرق نسبی گیاه کاهش نداشته اما از آن پس با افزایش شوری تعرق کاهش می‌یابد تا آن حد که در شوری حدود ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر به نصف تقلیل یافته است. حد آستانه تحمل شوری کلزا، هنگامی که شوری خاک از ابتدا تا پایان دوره رشد ثابت باشد، بر اساس یافته‌های مس و هافمن (Maas & Hoffman, 1977)، ۱۱ دسی‌زیمنس بر متر است، حال آنکه پژوهش حاضر نشان داد که آستانه کاهش عملکرد کلزا در مرحله روزت ۵/۵ دسی‌زیمنس بر متر است.

آماری، کم‌بودن پارامترهای مورد نیاز و سهل‌الوصول بودن دستیابی به آنهاست. به دست آوردن مقدار EC_{50} در مدل ۶ و EC_{max} در مدل ۹، دشوار و مقدار آن برای گیاهان مختلف متفاوت است. افزون بر آن، پارامتر p در دو مدل ۶ و ۷ تعریف نشده است و به همین دلیل مدل خطی مس و هافمن (Maas & Hoffman, 1977) در این مرحله مناسب‌ترین مدل شناخته شد.

مرحله روزت

در این مرحله از رشد، گلدان‌ها روزانه توزین شدند و تعرق هر یک محاسبه شد. شکل ۳ تعرق نسبی کلزا را در



شکل ۳- تعرق نسبی گیاه کلزا در مرحله روزت به عنوان تابعی از شوری عصاره اشباع خاک

هستند. برآزش برآورده شده توسط مدل‌های مختلف نسبت به تعرق نسبی اندازه‌گیری شده در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس این شکل، آستانه کاهش برآورد شده توسط مدل خطی مس و هافمن (Maas & Hoffman, 1977) حدود ۵/۳ دسی‌زیمنس بر متر است در حالی که مدل‌های غیرخطی آستانه بالاتری را ارائه می‌کنند.

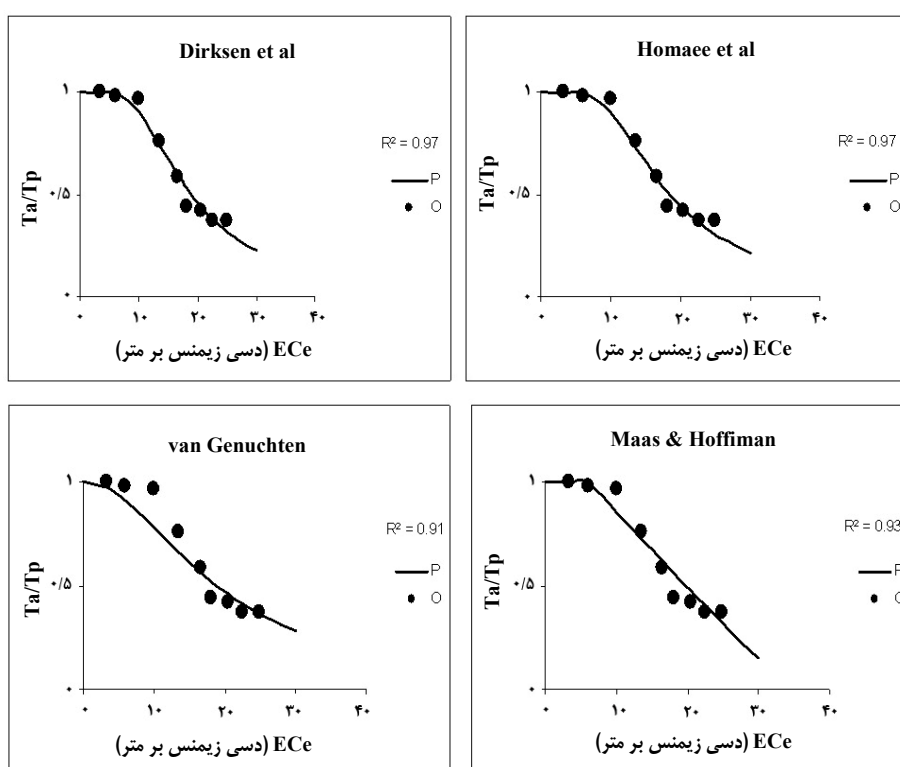
با برآزش مدل‌های مختلف بر داده‌های اندازه‌گیری شده، پارامترهای مختلف هر یک از مدل‌ها، برآورد و در جدول ۴ ارائه شده است. در این جدول، EC_o ، EC_m ، Pp به ترتیب آستانه تحمل به شوری برآورد شده گیاه کلزا در مرحله روزت، آستانه تحمل به شوری اندازه‌گیری شده توسط مدل، و P برآورد شده توسط مدل

جدول ۴- پارامترهای مدل‌های مختلف که توسط معادلات ۵، ۶، ۷ و ۹ برآورد شده است

معادلات	EC ₀	EC _m	EC ₅₀	EC _{max}	b	α	P _p	R ²
Homaee <i>et al</i>	۵/۷	۵/۵	-	۲۶/۰۸	-	۰/۲۸	۲	۰/۹۷
Dirksen <i>et al</i>	۵/۸	۵/۵	۱۸/۶۳	-	-	-	۲	۰/۹۷
van Genuchten	-	۵/۵	۱۸/۸۵	-	-	-	۳/۱	۰/۹۱
Maas & Hoffman	۵/۳	۵/۵	-	-	۰/۰۳۵۴	-	-	۰/۹۳

همایی و همکاران (Homaee *et al.*, 2002b)، نسبت به مدل ون گنوختن و هافمن (van Genuchten & Hoffman, 1984) به دلیل پارامترهای ورودی بیشتر و پیچیدگی زیادتر، واجد ضرایب تبیین بالاتری شده‌اند و توانسته‌اند عملکرد نسبی گیاه را دقیق‌تر پیش‌بینی کنند.

همان‌طور که از شکل ۴ و ضرایب تبیین (R²) ارائه‌شده در جدول ۴ برمی‌آید، مدل‌های غیرخطی نسبت به مدل ساده و خطی مس و هافمن (Maas & Hoffman, 1977)، برازش بهتری بر داده‌های اندازه‌گیری شده دارند. در بین مدل‌های غیرخطی نیز دو مدل دیرکسن و همکاران (Dirksen *et al.*, 1993)،



شکل ۴- تعرق نسبی گیاهچه‌های کلزای اندازه‌گیری شده و برآوردشده با معادلات ۵، ۶، ۷ و ۹

بنابراین، برای انتخاب مناسب‌ترین مدل برآوردی در این مرحله، با کمک آماره‌های ذکرشده بهترین مدل تعیین شد. جدول ۵ مقادیر این آماره‌ها را برای مدل‌های مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۵- آماره‌های محاسبه‌شده برای مقایسه معادلات مختلف در مرحله ریزش

مدل	RMSE	CD	EF	ME	CRM	R ²
Homae et al	۶/۲	۱/۰۷	۰/۹۷	۰/۰۸	۰/۰۰۸	۰/۹۷
Dirksen et al	۷/۵	۱/۰۴	۰/۹۷	۰/۰۹	۰/۱۰۹	۰/۹۷
vanGenuchten	۱۱/۳	۱/۰۸	۰/۹۱	۰/۱۶	۰/۲۱۵	۰/۹۱
Maas & Hoffman	۱۰/۴۴	۱/۰۷	۰/۹۳	۰/۱۳	-۰/۰۲۶۸	۰/۹۳

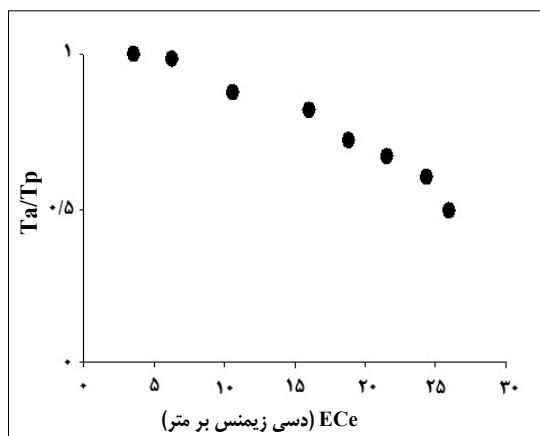
تا شوری حدود ۳ دسی‌زیمنس بر متر کاهش ندارد ولی با افزایش شوری تعرق نسبی کاهش یافته و در شوری حدود ۲۶ دسی‌زیمنس بر متر به کمترین مقدار خود رسیده است. شکل ۶، برازش مدل‌ها را بر داده‌های اندازه‌گیری‌شده در مرحله ساقه‌رفتن نشان می‌دهد. حروف O و P به ترتیب بیانگر داده‌های مشاهده‌شده (Observed) و پیش‌بینی‌شده با مدل (Predicted) هستند. این شکل نشان می‌دهد که مقادیر برآوردشده تعرق نسبی بوته‌ها با مدل‌های مختلف، به ویژه در مدل‌های غیر خطی، با مقادیر اندازه‌گیری‌شده مطابقت دارد. با برازش مدل‌های مختلف مورد بررسی در این پژوهش بر داده‌های به‌دست آمده، پارامترهای مختلف هر یک از مدل‌ها برآورد و در جدول ۶ ارائه شده است.

بر اساس این جدول، آستانه کاهش برآوردشده با مدل خطی مس و هافمن (Maas & Hoffman, 1977) حدود ۵/۲ است در حالی که مدل‌های غیر خطی آستانه پایین‌تری ارائه می‌دهند.

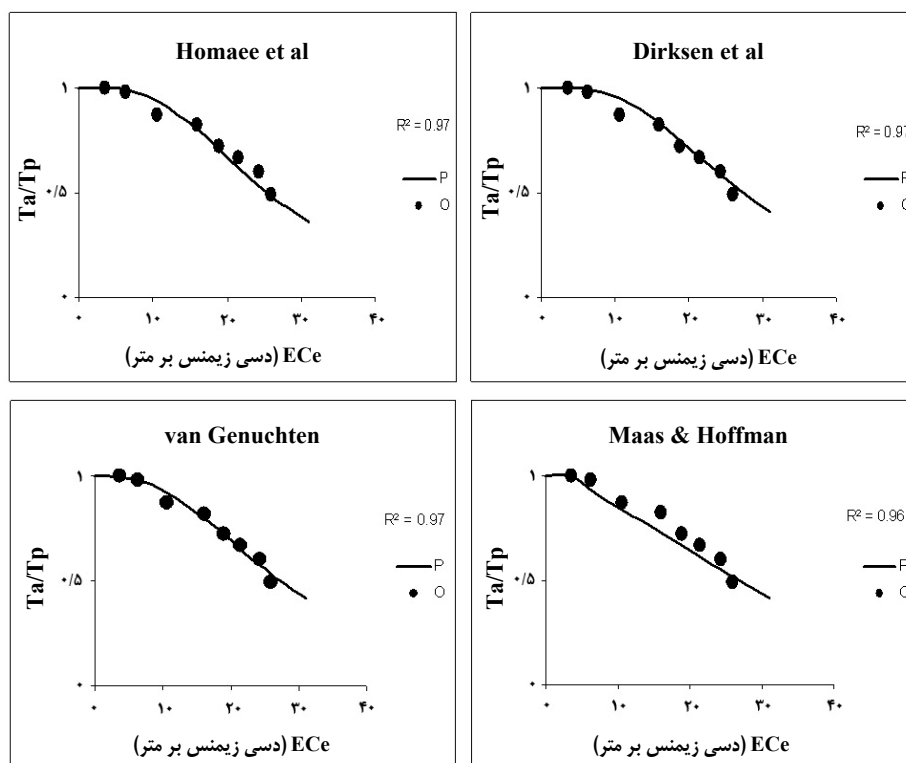
این جدول نشان می‌دهد که به رغم یکسان بودن مقادیر ضریب تبیین (R²) و کارایی (EF) برای هر دو مدل دیرکسن و همکاران (Dirksen et al., 1993) و همایی و همکاران (Homae et al., 2002b) مقدار RMSE و ME برای مدل همایی و همکاران (Homae et al., 2002b) کمتر از مدل دیرکسن و همکاران (Dirksen et al., 1993) است که مزیت نسبی این مدل را نسبت به مدل (Dirksen et al., 1993) نشان می‌دهد. بنابراین، در این مرحله مدل همایی و همکاران (Homae et al., 2002b) مناسب‌ترین مدل شناخته شد.

مرحله ساقه رفتن

در این مرحله از رشد، تعرق نسبی کلزا در سطوح مختلف شوری اندازه‌گیری شد. شکل ۵، تعرق نسبی کلزا را در مرحله ساقه‌رفتن در سطوح مختلف شوری عصاره اشباع خاک (ECe) نشان می‌دهد. در این شکل می‌بینیم که تعرق نسبی کلزا در این مرحله



شکل ۵- تعرق نسبی گیاه کلزا در مرحله ساقه رفتن به عنوان تابعی از شوری عصاره اشباع خاک



شکل ۶- تعرق نسبی گیاهچه‌های کلزای اندازه‌گیری و برآوردشده با معادلات ۵، ۶، ۷، و ۹

جدول ۶- پارامترهای مدل‌های مختلف که با معادلات ۵، ۶، ۷، و ۹ برآورد شده‌اند

معادلات	EC ₀	EC _m	EC ₅₀	EC _{max}	b	α	P _p	R ²
Homaee <i>et al</i>	۳	۴	-	۱۸/۵۹	-	۰/۷۲	۲	۰/۹۷
Dirksen <i>et al</i>	۳	۴	۲۸/۱	-	-	-	۲	۰/۹۷
van Genuchten	-	۴	۲۷/۳	-	-	-	۲/۶	۰/۹۷
Maas & Hoffman	۵/۲	۴	-	-	۰/۰۲۱	-	-	۰/۹۶

ارائه دهند. بنابراین، با کمک آماره‌های ذکر شده می‌توان به ارزیابی صحیحی از میزان کارایی هر مدل دست یافت و مناسب‌ترین مدل را انتخاب کرد. جدول ۷ مقادیر این آماره‌ها را برای مدل‌های مختلف نشان می‌دهد.

از جدول ۶ برمی‌آید که ضریب تبیین (R²) مدل مس و هافمن (Maas & Hoffman, 1977) کمتر از ضرایب تبیین سه معادله دیگر (معادلات ۶، ۷، و ۹) است. به عبارت دیگر، مدل‌های غیرخطی در این مرحله توانسته‌اند برازش بهتری

جدول ۷- آماره‌های محاسبه شده برای مقایسه معادلات مختلف در مرحله ساقه‌رفتن

مدل	RMSE	CD	EF	ME	CRM	R ²
Homaee <i>et al</i>	۳/۴	۱/۰۳	۰/۹۸	۰/۰۵	-۰/۰۰۰۵۹	۰/۹۷
Dirksen <i>et al</i>	۳/۴	۱/۰۳	۰/۹۸	۰/۰۵	-۰/۰۰۰۵۹	۰/۹۷
van Genuchten	۳/۴	۱/۰۰	۰/۹۸	۰/۰۴۶	-۰/۰۰۰۵۹	۰/۹۷
Maas & Hoffman	۳/۹۸	۱/۰۴	۰/۹۷	۰/۰۶	-۰/۰۰۰۵۹	۰/۹۶

از این ویژگی برخوردار است و بنابراین در مرحله ساقه‌رفتن، این مدل مناسب‌تر شناخته شد.

نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده نشان داد که کلزا در مرحله گیاهچه به شوری بسیار حساس است و در شوری‌های آب آبیاری بالاتر از ۷ دسی‌زیمنس بر متر گیاهچه‌ها تماماً از

با توجه به اینکه کارایی (EF) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در هر سه مدل دیرکسن و همکاران (Dirksen *et al.*, 1993)، همایی و همکاران (Homaee *et al.*, 2002b)، ون گنوختن و هافمن (van Genuchten & Hoffman, 1984) برابرند، مدلی مناسب‌تر است که پارامترهای ورودی آن سهل‌الوصول‌تر باشد. مدل همایی و همکاران (Homaee *et al.*, 2002b)

دست آمده برای تعیین مناسب‌ترین مدل نشان داد که دو مدل دیرکسن و همکاران (Dirksen *et al.*, 1993)، همایی و همکاران (Homaee *et al.*, 2002b) ضریب تبیین (R^2) و کارایی (EF) یکسانی دارند، ولی ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای مدل همایی و همکاران (Homaee *et al.*, 2002b) کمتر است. به همین دلیل، این مدل برای این مرحله پیشنهاد شد. آستانه کاهش برآورد شده برای کلزا در این مرحله، با این مدل حدود ۵/۷ دسی‌زیمنس بر متر به دست آمد.

در مرحله ساقه‌رفتن، مدل‌های غیرخطی نسبت به مدل خطی برآورد بهتری داشتند. تمام مدل‌های غیرخطی با دقت یکسانی توانستند عملکرد نسبی را برآورد کنند. بنابراین، مناسب‌ترین مدل آن است که پارامترهایش کاملاً مشخص و تعریف شده باشد و بتوان به راحتی آن را اندازه‌گیری کرد. بر این اساس در مرحله ساقه‌رفتن، مدل همایی و همکاران (Homaee *et al.*, 2002b) مناسب‌ترین مدل شناخته شد. آستانه کاهش در این مرحله ۴ دسی‌زیمنس بر متر به دست آمد که از عدد برآورد شده با مدل همایی و همکاران (Homaee *et al.*, 2002b) (که ۳ دسی‌زیمنس بر متر است) بیشتر و از آستانه ارائه شده با مس و همکاران (Maas & Hoffman, 1977) (که ۱۱ دسی‌زیمنس بر متر است) کمتر بود. در این تحقیق مشخص شد که کلزا در مراحل مختلف دوره رشد رویشی خود به تنش شوری حساسیت‌های متفاوتی دارد. بدین ترتیب که مرحله گیاهچه حساسترین و مرحله روزت، مقاوم‌ترین مرحله به تنش شوری است.

بین می‌روند و عملکرد نسبی به صفر می‌رسد. آستانه کاهش شوری برای این مرحله حدود ۳ دسی‌زیمنس بر متر به دست آمد در حالی که حد آستانه تحمل شوری کلزا، هنگامی که شوری خاک از ابتدا تا پایان دوره رشد ثابت باشد، بر اساس یافته‌های مس و هافمن (Maas & Hoffman, 1977) برابر ۱۱ دسی‌زیمنس بر متر است. در این مرحله، تمام مدل‌ها (با اندکی اختلاف) قابل توصیه و قابل به‌کارگیری هستند ولی با توجه به کم‌بودن پارامترهای مورد نیاز و سهل‌الوصول بودن پارامترهای مدل خطی مس و هافمن (Maas & Hoffman, 1977)، این مدل در این مرحله مناسب شناخته شد. آستانه تحمل به شوری برآورد شده با مدل فوق در این مرحله ۳/۲ دسی‌زیمنس بر متر است.

در مرحله روزت، تعلق نسبی گیاه تا شوری حدود ۵/۵ دسی‌زیمنس بر متر کاهش نداشت. اما از آن به بعد با افزایش شوری، تعلق گیاه کاهش یافت و در شوری حدود ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر به نصف رسید. آستانه کاهش اندازه‌گیری شده برای کلزا در مرحله روزت حدود ۵/۵ دسی‌زیمنس بر متر به دست آمد. مدل‌های غیرخطی نسبت به مدل ساده و خطی مس و هافمن (Maas & Hoffman, 1977)، توانستند برآورد رضایت‌بخشی بر داده‌های اندازه‌گیری شده ارائه دهند. از مدل‌های غیر خطی نیز دو مدل دیرکسن و همکاران (Dirksen *et al.*, 1993) و همایی و همکاران (Homaee *et al.*, 2002b) نسبت به مدل ون گنوختن و هافمن (van Genuchten & Hoffman, 1984)، ضرایب تبیین بالاتری دارند و توانستند عملکرد نسبی گیاه را دقیق‌تر پیش‌بینی کنند. محاسبه و ارزیابی آماره‌های به

مراجع

- Azizi, M., Soltani, A. and Khavari Khorasani, S. 1999. *Canola; physiology, agronomy and biotechnology*. Jihad-e-University pub. Mashhad. Iran. (in Farsi)
- Banaee, 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 Farsi)
- Carvajal, M., del Amor, F. M., Fernandez-Ballester, G., Martinez, V. and Cerda, A. 1998. Time course of solute accumulation and water relation in muskmelon plants exposed to salt during different growth stages. *Plant Sci.* 138, 103-112.
- Chartzoulakis, K. and Klapaki, G. 2000. Response of two greenhouse pepper hybrids to NaCl salinity during different growth stages. *Scientia Hort.* 86, 247-260
- Childs, S. W. and Hanks, R. J. 1975. Model of soil salinity effects on crop growth. *Soil Sci. Soc. Am. Pro.* 39, 617-622.
- De Wit, C. T. 1958. *Transpiration and Crop Yields*. Verslagen van Landbouwkundige Onderzoekingen, No. 64.6. Wageningen. The Netherlands.
- Dirksen, C. and Augustijn, D. C. 1988. Root Water Uptake Function for Nonuniform Pressure and Osmotic Potential. In: *Agronomy Abstract*. ASA. Madison, WI.
- Dirksen, C., Kool, J. B., Koorevaar, P. and van Genuchten, M. Th. 1993. HYSWASOR- Simulation Model of Hysteretic Water and Solute Transport in the Root Zone. Russo, D. and Dagan, G. (Eds.). *Water Flow and Solute Transport in Soils*. Springer Verlage. N. Y.
- Feddes, R. A., Kowalik, P. and Zarandy, H. 1978. *Simulation of Field Water Use and Crop Yield*. Pudoc. Wageningen. The Netherlands.
- Francois L. E. 1994. Growth, seed yield, and oil content of canola grown under saline conditions. *Agron. J.* 86, 233-237.
- Francois, L. E. and Bernstein, L. 1964. Salt tolerance of safflower. *Agron. J.* 56, 38-40.
- Hamdy, A., Sardo, V. and Farrag Ghanem, K. A. 2005. Saline water in supplemental irrigation of wheat and barley under rainfed agriculture. *Agric. Water Manag.* 78, 122-127.
- Homaei, M. 2002. *Plant response to salinity*. Iranian National Committee on Irrigation and Drainage. Pub. No. 58. Tehran. Iran.
- Homaei, M. and Feddes, R. A. 1999. Water Uptake Under Non-Uniform Transient Salinity and Water Stress. In: Feyen, J. and Wiyono, K. (Eds.). *Wageningen Press*. Wageningen. The Netherlands.

- Homaei, M. and Feddes, R. A. 2001. Quantification of Water Extraction Under Salinity and Drought. In: Horst, W. J. (Eds.). Plant Nutrition-Food Security and Sustainability of Agro-Ecosystems.
- Homaei, M. and Feddes, R. A. 2002. Modeling the sink term under variable soil water osmotic and pressure heads. 14th International Conference on Computational Methods in Water Resources. Delft. The Netherlands.
- 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 Manag.* 57, 89-109.
- Homaei, M., Feddes, R. A. and Dirksen, C. 2002b. Simulation of root water uptake. II. Non-uniform transient water stress using different reduction functions. *Agricultural Water Manag.* 57,111-126.
- Homaei, M., Feddes, R. A. and Dirksen, C. 2002c. Simulation of root water uptake. III. non-uniform transient combined salinity and water stress. *Agricultural Water Manag.* 57,127-144.
- Homaei, M., Feddes, R. A. and Dirksen, C. 2002d. A macroscopic water extraction model for non-uniform transient salinity and water stress. *J. Soil Sci. Soc. Am.* 66, 1764-1772.
- Kaddah, M. T. and Ghowail, S. I. 1964. Salinity effects on growth of corn at different stage of development. *Agron. J.* 56, 214-217.
- Keshta, M. M., Hammad, M. and Sorour, W. A. I. 1999. Evaluation of rapeseed genotype in saline soil. Proceeding of the 10th International Rapeseed Congress. Canberra. Australia.
- Kingsbury, R. W., Epstein, E. and Percy, R. W. 1984. Physiological response to salinity in selected lines of wheat. *Plant Physiol.* 74, 417-423.
- Lutts, S., Kinet, J. M. and Bouharmont, J. 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.
- Maas, E. V. and Hoffman, G. J., 1977. Crop salt tolerance-current assessment. *J. Irrig. Drain. Div.* 103, 115-134.
- Maas, E. V. and Poss J. A. 1989. Salt sensitivity of cowpea at various growth stages. *Irrig. Sci.* 10, 313-320.
- Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics.* 1, 318-333.
- Saadat, S. 2006. Modeling plants response to salinity under different growth stages. Ph.D. Thesis. Tarbiat Modares University. Tehran. Iran. (in Farsi)
- Steppuhn, H. and Wall, K. G. 1997. Grain yields from spring-sown Canadian wheat are grown in saline rooting media. *Canadian J. of Plant Sci.* 77, 63-68.

مدل سازی واکنش کلزا به شوری طی دوره ...

- Szaboles, I. 1994. Soils and Salinization. In: Pessaraki, M. (Ed.). Handbook of Plant and Crop Stress. Marcel Dekker. N. Y.
- van Genuchten, M. Th. 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 (*Tetragonia tetragonioides*, 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. J. Iranian Agric. Sci. 33, 137-145. (in Farsi)



Modeling Canola Response to Salinity on Vegetative Growth Stages

V. R. Jalali*, M. Homaei and K. Mirnia

* Corresponding Author: M.Sc. Graduate, Tarbiat Modares University, P. O. Box: 14155-4838, Tehran, Iran. E-mail: v_jalali@modares.ac.ir

The sensitivity of plants to salinity varies during growth season. Most plants are resistant at the germination stage, but at the seedling or earlier growth stages become more sensitive to salinity. Their tolerance usually increases with age. The salt tolerance of different plants has been extensively studied; however, the results have either been qualitative or expressed as average values of root zone salinity for the whole growth season. Thus, developing appropriate models for quantitative characterization of plant response to salinity at different growth stages is essential. Consequently, canola, a plant of high economic value, was selected for this study. Three vegetative stages for canola (seedling, rosette, bud) are recognized. A greenhouse study was conducted in a natural saline loamy sand soil, using salinity treatments comprising one non-saline water (tap water) and eight natural saline waters of 3-17 dS.m⁻¹. Canola plants were irrigated with tap water before the desired stage and then the salinity treatments were applied. Maas and Hoffman (1977), van Genuchten and Hoffman (1984), Dirksen *et al.*, (1993), and Homaei *et al.*, (2002b) models were used to predict relative seedling number and relative transpiration (T_a/T_p). To compare the models and their efficiency, the maximum error, root mean square error, coefficient of determination, modeling efficiency and coefficient of residual Maas were calculated. Results indicate that the Maas and Hoffman (1977) model provides a reasonable prediction at the seedling stage while the Homaei *et al.* (2002b) model provides better predictions at the rosette and bud growth stages.

Key Words: Canola, Modeling, Salinity, Threshold Value, Vegetative Stage