



Modelling oilseed camelina response to water stress

Mansure Bayram¹, Mehdi Homaei^{2✉}, Ali Mokhtasi Bidgoli³

1. Department of Irrigation and Drainage, College of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran email:

mansure.bayram@modares.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Mining and Environmental Engineering, College of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. email: mhomaei@modares.ac.ir

3. Department of Agronomy, College of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email:

mokhtassi@modares.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: June. 9, 2022

Revised: Sep. 5, 2022

Accepted: Dec. 24, 2022

Published online: Jan. 22, 2022

Keywords:

Germination,
Oil seed,
Seed vigor,
Threshold value,
Water stress.

ABSTRACT

Water stress is one of the dominant stresses limiting crop growth and yield, particularly in arid and semi-arid regions. The best strategy to deal with water stress is choosing a water-tolerant plant based on reliable screening methods such as polyethylene glycol (PEG). To evaluate different predictive models and quantitatively investigate camelina response to drought stress during the germination stage, an experiment was conducted in a completely randomized design with three replications. Water stress treatments included six matric potentials of PEG6000: 0 (control, without stress), 3000, 6000, 9000, 12000, 15000, 18000 cm. Germination indicators were calculated using the SeedCalc package in R software and MATLAB was used for programming and models fitting. Water stress models including Feddes et al. (F), van Genuchten (VG), Dirksen and Augustijn (DA) and Homaei (H) were assessed and compared afterwards. Data analysis was performed using SAS software (V. 9.4). The threshold values under germination rate (GSI), mean seedling length (M-SL), mean root-to-stem ratio (Razao) and seed vigor (SV-S)) were then obtained for the control, 6000, 3000 and 3000 cm, respectively. According to these four germination indices, the camelina is very tolerant to water stress. In all four indicators of GSI, M-SL, SV-S and Razao, the H model presented the best performance. The highest values of GSI, Razao, M-SL, stem and root length were obtained at matric potentials of control, 3000, 6000, 3000 and 6000 cm, respectively, indicating the suitability of camelina cultivation in areas under water shortage.

Cite this article: Bayram, M., Homaei, M., & Mokhtasi Bidgoli, A. (2023) Modelling oilseed camelina response to water stress, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (11), 2597-2611. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.344203.669290>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.344203.669290>



مدل سازی پاسخ گیاه دانه روغنی کاملینا به تنش آبی

منصوره بایرام^۱، مهدی همائی^۲✉، علی مختصی بیدگلی^۳۱. گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، ایمیل: mansure.bayram@modares.ac.ir۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی معدن و محیط زیست، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، ایمیل: mhomaee@modares.ac.ir۳. گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، ایمیل: mokhtassi@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	تنش آبی یکی از مهم ترین تنش های محدودکننده رشد و عملکرد گیاهان به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک است. بهترین راهکار برای مواجهه با تنش آبی، انتخاب گیاه سازگار به کم آبی است که بر پایه روش های مطمئن غربالگری از جمله پلی اتیلن گلایکول (PEG) صورت می گیرد. در این پژوهش به منظور ارزیابی مدل های تخمین گر و بررسی کمی پاسخ کاملینا به سطوح آبی در مرحله جوانه زنی، مدل های کم آبی فدس و همکاران (F)، ون گنوختن (VG)، دیرکسن و آگوستین (DA) و همایی (H) با هم مقایسه شدند. تجزیه و تحلیل داده ها با استفاده از نرم افزار SAS انجام شد. آزمایش ها در قالب طرح کاملاً تصادفی در پتری دیش در سال ۱۳۹۸ با سه تکرار در دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. تیمارهای آبی شامل شش پتانسیل ماتریک ۰ (شاهد بدون تنش)، ۳۰۰۰، ۶۰۰۰، ۹۰۰۰، ۱۲۰۰۰، ۱۵۰۰۰ و ۱۸۰۰۰ سانتی متر بودند. پارامترهای جوانه زنی با استفاده از بسته SeedCalc در نرم افزار R محاسبه و از MATLAB برای کد نویسی و برازش مدل ها استفاده شد. حد آستانه تحمل به کم آبی شاخص های سرعت جوانه زنی (GSI)، میانگین طول گیاهچه (M-SL)، میانگین نسبت ریشه چه به ساقه چه (Razao) و بنیه بذر (SV-S) به ترتیب در تیمارهای شاهد، ۶۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۳۰۰۰ سانتی متر بدست آمد. بر پایه پتانسیل های بدست آمده برای هر چهار شاخص جوانه زنی مورد بررسی، کاملینا گیاهی بسیار مقاوم به کم آبی است. در هر چهار شاخص M-SL، GSI، SV-S و Razao مدل H به دلیل RMSE کوچک تر و EF بزرگ تر عملکرد بهتری ارائه داد. بیشترین مقدار پارامترهای GSI، Razao، M-SL، طول ساقه چه و طول ریشه چه به ترتیب در پتانسیل های شاهد، ۳۰۰۰، ۶۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۶۰۰۰ سانتی متر بدست آمد که نشان دهنده مناسب بودن کشت کاملینا در مناطق تحت تنش آبی می باشد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۳/۱۹	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۶/۱۴	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۳	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۱/۱	
واژه های کلیدی:	
بنیه بذر،	
جوانه زنی،	
حد آستانه کاهش،	
تنش آبی،	
دانه روغنی.	

استناد: بایرام؛ منصوره، همائی؛ مهدی، مختصی بیدگلی؛ علی، (۱۴۰۱). مدل سازی پاسخ گیاه دانه روغنی کاملینا به تنش آبی، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۱۱)،

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.344203.669290> ۲۵۹۷-۲۶۱۱

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.344203.669290>

مقدمه

تنش آبی از مهم‌ترین تنش‌های غیر زنده‌ی محدود کننده‌ی رشد و عملکرد گیاهان به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (Fahad *et al.*, 2017). FAO (2018) نیز میزان تنش آبی در ایران را در سال ۲۰۱۴، ۹۰ درصد گزارش کرده است. دلایل کمبود آب در گیاه شامل بارش کم، شوری، دماهای زیاد و پایین (Arbona *et al.*, 2013)، تقاضای بالا برای آب در یک دوره معین و یا کیفیت پایین آب موجود می باشد (Rockström *et al.*, 2009). این تنش هنگامی رخ می‌دهد که سرعت تعرق گیاه بیش از سرعت جذب آب توسط ریشه باشد (Filipović, 2020). این تنش، اثراتی منفی بر کمیّت و کیفیت رشد و همچنین عملکرد گیاه دارد (Nezhadahmadi *et al.*, 2013). از سوی دیگر، جوانه‌زنی بذرها محدود به مقدار آب قابل دسترس است و با کاهش پتانسیل آب در خاک، جوانه‌زنی نیز کاهش می‌یابد (Tobe *et al.*, 2001).

جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه از مراحل بحرانی در چرخه‌ی زندگی گیاه است. استقرار موفق گیاه، نه تنها وابسته به جوانه‌زنی سریع و یکنواخت بذر است؛ بلکه به توانایی جوانه‌زنی بذر تحت شرایط تنش نیز بستگی دارد (Windauer *et al.*, 2007). بر پایه‌ی یافته‌های پژوهشگران، بذرهایی که جوانه‌زنی مناسبی داشته باشند، در مراحل بعدی رشد، گیاهانی با بنیه بهتر تولید می‌کنند (Opoku *et al.*, 1996)؛ بنابراین جوانه زدن و استقرار مناسب گیاهچه، اصولاً یکی از عوامل تعیین کننده عملکرد گیاهان زراعی به شمار می‌آید (Chaves 2002 *et al.*).

شاخص‌های جوانه‌زنی از جمله درصد جوانه‌زنی و شاخص بنیه بذر، معیار بسیار مهمی در تشخیص تحمل گیاهان به تنش است (Bybordí, 2010). بر پایه‌ی برخی مطالعات، تنش آبی موجب کاهش درصد و سرعت جوانه‌زنی (Warwick & Francis, 2006; Sanchez *et al.*, 2014)؛ و نیز افزایش زمان جوانه‌زنی (Dai *et al.*, 2009) می‌شود. سرعت جوانه‌زنی به منظور ارزیابی تحمل به تنش آبی کاربرد دارد (Dhanda *et al.*, 2004). بنیه بذر، ظهور یکنواخت و سریع تحت دامنه‌ی وسیعی از شرایط تنش‌زا که به طور معمول بذرها در محیط مزرعه با آن‌ها مواجه می‌شوند را فراهم می‌کند (ISTA, 2019).

دانه‌های روغنی پس از غلات، دومین ذخایر غذایی جهان را تشکیل می‌دهند (Miladinović *et al.*, 2019). کاملینا دارای خواص منحصر به فردی در مقایسه با سایر گیاهان دانه روغنی است. این ویژگی‌ها شامل نیاز آبی بسیار کمتر و سازگاری بیشتر با شرایط نامساعد محیطی می‌باشد (Li & Sun, 2015). سطح زیر کشت این گیاه در سال ۲۰۱۷ توسط انجمن تجارت آزاد اروپا در حدود ۱۷/۲ میلیون هکتار گزارش شده است (van Slyke *et al.*, 2019). برنامه‌ی بهبود بیوماس گیاهی (BCAP)^۱ نیز تولید کاملینا در اوایل سال ۲۰۱۲ را با سطح زیر کشت ۲۰۲۳۴ هکتار در کشور آمریکا و چند کشور غربی به عنوان هدف خود معرفی کرده است (USEPA, 2013). دانه‌ی این گیاه حاوی ۳۷-۴۷ درصد روغن، ۴۵-۵۰ درصد پروتئین و ۱۷-۱۲ درصد فیبر می‌باشد (Sarv, 2016). روغن کاملینا در صنایع مختلف از جمله تغذیه، آرایشی، بهداشتی، دارویی و سوخت زیستی کاربرد دارد (Waraich *et al.*, 2013).

یکی از ویژگی‌های اصلی گیاه کاملینا تحمل کم‌آبی است (Hunsaker *et al.*, 2013). در مطالعه‌ای که Čanak *et al.* (2020) پیرامون کاملینا انجام دادند، دریافتند که کاملینا در مرحله‌ی جوانه‌زنی، سطح متوسط تنش (۴ بار) را بدون کاهش جوانه‌زنی تحمل کرده و در سطح ۱۲ بار و با گذشت ۱۰ روز از جوانه‌زنی، درصد جوانه‌زنی آن به ۷۵ درصد می‌رسد.

با توجه به نیاز آبی پایین کاملینا نسبت به سایر دانه‌های روغنی، کمبود آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک و همچنین تأمین ۹۰ درصد روغن مورد نیاز کشور از طریق واردات، ارزیابی کمی پاسخ کاملینا به تنش آبی از اهمیت به سزایی برخوردار است. همچنین شایان ذکر است که کشت کاملینا به تازگی در ایران انجام شده و تاکنون پژوهشی در این زمینه صورت نگرفته است. هدف از این پژوهش، محاسبه‌ی شاخص‌های جوانه‌زنی، بررسی اثر تنش آبی بر این شاخص‌ها، تعیین حد آستانه‌ی تحمل به آبی، برازش مدل‌های خطی و غیرخطی تنش آبی بر شاخص‌ها، ارزیابی کارایی مدل‌های تخمین گر و انتخاب بهترین مدل بود.

تئوری مدل

معادله کلی جریان، مقدار جذب آب توسط ریشه، تابع کاهش و شکل عمومی مدل‌های کلان توسط Homaei *et al.*, 2002a به صورت مشروح ارائه شده است.

مدل‌هایی چند برای بیان کمی تابع کاهش ($\alpha(h)$) وابسته به بار فشاری توسط پژوهشگرانی چون van Feddes *et al.* (1978)، Genuchten (1987)، Dirksen & Augustijn (1988) و Homae (1999) پیشنهاد شده است. در تابع کاهش، α جذب نسبی آب توسط ریشه گیاه و تابعی از پتانسیل ماتریک (h) است، مدل $\alpha(h)$ ارائه شده توسط Feddes *et al.* (1978) (F) شکل عمومی مدل‌های کلان است که کل دامنه‌ی پتانسیلی را در نظر می‌گیرد از آنجا که این مدل در بسیاری از کاربردها موفق بوده، از عمومیت بیشتری برخوردار است. این مدل در رابطه (۱) ارائه گردید.

$$\alpha(h) = \frac{h - h_4}{h_3 - h_4} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن h پتانسیل ماتریک خاک، h_3 مقدار حد آستانه و h_4 پتانسیل ماتریک در نقطه پژمردگی برحسب سانتی‌متر است. از آنجا که خطی بودن رابطه α و h در دامنه‌ای از رطوبت خاک مورد تردید است، van Genuchten (1987) (VG) مدلی غیرخطی ارائه شده در رابطه (۲) را پیشنهاد کرد:

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}}\right)^p} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن، h_{50} مقدار پتانسیل ماتریکی است که موجب کاهش ۵۰ درصد عملکرد می‌شود (برحسب سانتی‌متر)، و P نیز ضریبی تجربی و بی بعد می‌باشد که به نوع گیاه، خاک و اقلیم بستگی دارد.

همچنین Dirksen *et al.* (1993) و Dirksen & Augustijn (1988) (DA) با تعدیل معادله (۲) نسبت به پتانسیل ماتریک در

آستانه کاهش که همان h^* است، مدل زیر را ارائه دادند:

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + ((h^* - h)/(h^* - h_{50}))^p} \quad \text{رابطه (۳)}$$

این مدل نسبت به مدل‌های قبلی، دقت بیشتری در شبیه‌سازی واکنش گیاه به تنش آبی دارد، لیکن مهم‌ترین محدودیت آن، به دست آوردن h_{50} است. بدین جهت Homae (1999) (H) مقدار h_{max} را جایگزین h_{50} نمودند و مدل غیرخطی زیر را پیشنهاد نمودند:

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + (1 - \alpha_0)/\alpha_0 [(h^* - h)/(h^* - h_{max})]^p} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن h_{max} حد آستانه دوم تابع کاهش و برحسب سانتی‌متر است که پس از آن، تغییر h تأثیری بر تعرق نسبی ندارد و α_0

تعرق نسبی در h_{max} است؛ آن‌ها همچنین برای تعیین توان p رابطه زیر را پیشنهاد کردند:

$$P = \frac{h_{max}}{h_{max} - h^*} \quad \text{رابطه (۵)}$$

مواد و روش‌ها

این آزمایش به منظور ارزیابی کمی مدل‌های مختلف تخمین‌گر و بررسی تأثیر تنش کم‌آبی بر شاخص‌های جوانه‌زنی کاملینا، در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در سال ۱۳۹۸ در دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. برای تهیه‌ی تیمارها در تنش آبی از پلی‌اتیلن گلاکول ۶۰۰۰ (PEG, MW=6000) بر اساس معادله (۶) (Michel Burly & Kaufmann, 1973) استفاده شد:

$$\phi = -(1.18 \times 10^{-2})C - (1.18 \times 10^{-4})C^2 + (2.67 \times 10^{-4})CT + (8.39 \times 10^{-7})C^2T \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در آن ϕ پتانسیل آبی ناشی از PEG ۶۰۰۰، C غلظت برحسب گرم در لیتر و T دما برحسب سانتی‌گراد است.

تیمارها شامل شش پتانسیل اسمزی ۰ (شاهد بدون تنش)، ۳۰۰۰، ۶۰۰۰، ۹۰۰۰، ۱۲۰۰۰، ۱۵۰۰۰، ۱۸۰۰۰ سانتی‌متر بودند. از آنجایی که پتانسیل اسمزی ناشی از PEG موجب اعمال تنش کم‌آبی می‌گردد، بنابراین برای مدل‌سازی بایستی از مدل‌های کم‌آبی استفاده کرد و در نتیجه از این پتانسیل در مدل‌ها استفاده شد.

ابتدا بذرها با استفاده از محلول هیپوکلریت سدیم ۵ درصد به مدت دو دقیقه ضدعفونی و سه بار با آب مقطر شستشو شدند. تعداد ۲۵ عدد بذر درون هر پتری‌دیش دارای کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ قرار گرفتند. به هر پتری‌دیش، ۱۰ میلی‌لیتر از محلول‌های تهیه شده با غلظت مشخص با استفاده از پلی‌اتیلن گلاکول برای تیمارها اضافه شد. پس از اعمال تیمارها، درب ظروف به طور کامل بسته شد و پتری‌دیش‌ها در ژرمیناتور در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷ روز قرار گرفتند (Anonymous, 2014). شمارش بذرها هر ۲۴ ساعت

و به مدت هفت روز انجام گرفت. معیار بذور جوانه‌زده، خروج ریشه‌چه به اندازه یک میلی‌متر بود. اندازه‌گیری طول ریشه‌چه و ساقه‌چه نیز روزانه با خط کش میلی‌متری صورت گرفت.

به منظور برآورد پارامترهای جوانه‌زنی از بسته SeedCalc (Silva et al., 2019) در نرم‌افزار R استفاده شد. بسته SeedCalc در نرم‌افزار R، یک نرم‌افزار تحلیل آماری قدرتمند در تحقیقات بذر است. داده‌های ورودی شامل تعداد دانه‌های جوانه‌زده در روز، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه است و نرم‌افزار قادر است درصد، سرعت و زمان جوانه‌زنی و نیز بنیه بذر را محاسبه کند. پارامترهای جوانه‌زنی محاسباتی به شرح زیر است:

درصد جوانه‌زنی نهایی (FGP^۱) (ISTA, 2015)، متوسط زمان جوانه‌زنی (MGT^۲) (Labouriau, 1983) و سرعت جوانه‌زنی (GSI^۳) (Maguire, 1962) به ترتیب بر پایه روابط (۷)، (۸) و (۹) محاسبه شدند:

$$FGP = (n/N) \times 100 \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$MGT = \sum_{i=1}^k n_i t_i / \sum_{i=1}^k n_i \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$GSI = \sum_{i=1}^k (n_i / t_i) \quad \text{رابطه (۹)}$$

که در آن‌ها، n تعداد بذر جوانه‌زده، N تعداد کل بذرها، n_i تعداد بذر جوانه‌زده (غیرتجمعی) در روز، t_i زمان از شروع جوانه‌زنی برحسب روز تا مشاهده i ام است.

میانگین طول گیاهچه (M-SL^۴) (Nakagawa et al., 1999)، میانگین نسبت ریشه‌چه به ساقه‌چه (Razao^۵) (Benincasa, 2003) و بنیه بذر (SV-S^۶) (Sako et al., 2001) نیز از روابط زیر بدست آمدند:

$$M - SL = \frac{\sum_{i=1}^k (SL)}{n} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$Razao = \frac{\sum_{i=1}^k (RRA)}{n} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$SV-S = (Growth \times w_g) + (Uniformity \times w_u) \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

که در آن‌ها SL، n و RRA به ترتیب طول هر گیاهچه برحسب سانتی‌متر، تعداد گیاهچه‌های مورد بررسی و نسبت بین ریشه‌چه و ساقه‌چه هر گیاهچه است؛ Growth شاخص رشد، Uniformity شاخص یکنواختی و w_g و w_u پارامتر وزن‌دهی شاخص رشد و یکنواختی هستند.

شاخص بنیه بذر شامل پارامترهای رشد و یکنواختی است. از آنجا که یکنواختی جزء شاخص بنیه است، بذر مرده‌ی یکنواخت می‌تواند یکنواختی ۱۰۰۰ داشته باشد و شاخص بنیه نسبتاً بالایی به دست آورد که این ایراد توسط Sako et al. (2001) با به کار بردن یکنواختی در فرمول بنیه بذر رفع گردید تا یکنواختی بذور مرده، صفر در نظر گرفته شود.

در این پژوهش، برازش و کدنویسی مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام شد. روال بهینه‌سازی مناسب مدل‌های برازشی بر داده‌های اندازه‌گیری شده با تغییر مکرر در پارامترهای مدل بر اساس کاهش RMSE^۷ و حداقل مجموع مربعات خطا بین داده‌های پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده انجام گردید. مجموع مربعات خطا (SSR^۸) و آماره‌های ارزیابی کارایی مدل از جمله جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، کارایی مدل (EF^۹)، ماکزیمم خطا (ME^{۱۰}) و ضریب خطای تجمعی (CRM^{۱۱}) به صورت زیر محاسبه شد:

۱ Final germination percentage

۲ Mean germination time

۳ Germination speed index

۴ Mean seedling length

5 Mean of the root/shoot ratio

6 Seed Vigor - SeedCalc

7 The root-mean-square error

8 The sum of the squared residuals

9 The modeling efficiency

10 The maximum error

11 The coefficient of residuals mass

$$SSR = \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{رابطه ۱۵}$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad \text{رابطه ۱۶}$$

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n \quad \text{رابطه ۱۷}$$

که در آن‌ها O_i مقادیر اندازه‌گیری شده، P_i مقادیر شبیه‌سازی شده، \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n تعداد نمونه‌ها است (Homaei *et al.*, 2002). تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS (Ver. 9.4) و مقایسه میانگین‌ها به روش LSD انجام شد. پیش از تجزیه واریانس، نرمال بودن توزیع باقیمانده‌ها با استفاده از روش کولموگروف اسمیرنوف بررسی شد.

نتایج و بحث

مدل‌سازی شاخص‌های GSI، SV-S، M-SL و Razao

مقادیر اندازه‌گیری شده (Exp) و تخمین زده شده (Opt) پتانسیل شاخص‌های GSI، SV-S، M-SL و Razao تحت تنش آبی بر مبنای مدل‌های مختلف تخمین‌گر تنش آبی در جدول (۱) ارائه شده‌اند. بر پایه‌ی داده‌های ارائه شده در این جدول، حد آستانه‌ی تحمل به تنش آبی شاخص‌های GSI، SV-S، M-SL و Razao به ترتیب برای تیمارهای شاهد (صفر)، ۳۰۰۰، ۶۰۰۰ و ۳۰۰۰ سانتی‌متر مشاهده شد. افزون بر حد آستانه‌ی کاهش تحمل به تنش آبی ارائه شده در جدول (۱)، مقادیر h_{50} و h_{max} نیز نقش مهمی در تعیین تحمل به تنش آبی دارند؛ چرا که هر چه این شاخص‌ها در سطوح آبی بالاتری رخ دهند، نشان از مقاومت بیشتر کاملینا به تنش آبی است. مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی h_{50} برای شاخص‌های GSI، SV-S، M-SL و Razao به ترتیب برابر با ۱۹۱۵۰، ۲۱۵۶۰، ۱۲۱۱۵ و ۹۲۵۰ سانتی‌متر است. مقادیر h_{max} نیز برای این شاخص‌ها به ترتیب برابر با ۲۸۵۷۵، ۳۰۸۱۱، ۱۵۳۷۸ و ۱۲۳۴۵ سانتی‌متر به دست آمد. پتانسیل‌های مورد بررسی برای شاخص SV-S مقدار بالایی نسبت به سایر شاخص‌ها دارند که قابلیت تولید گیاهچه‌ی قوی کاملینا و قابلیت استقرار در مزرعه در سطوح بسیار بالایی از تنش آبی را نشان می‌دهد. شاخص‌های M-SL و Razao حساسیت گیاه به تنش آبی و عکس‌العمل آن را مشخص می‌کنند. شاخص‌های GSI و SV-S نیز به ترتیب امکان استقرار و تولید گیاهچه قوی را نشان می‌دهد و از اهمیت بیشتری نسبت به دو شاخص M-SL و Razao برخوردارند. به طور کلی بر اساس پتانسیل‌های به دست آمده برای هر چهار شاخص، کاملینا بسیار مقاوم به تنش آبی است. هنگامی که واریته مقاوم در معرض تنش آبی قرار می‌گیرد، می‌تواند فشار اسمزی را در سلول خود تنظیم کند. این توانایی باعث جوانه زدن بذر و رشد آن می‌شود. همچنین در شرایط تنش آبی، گیاه می‌تواند فشار اسمزی را با سنتز و تجمع مواد نیمه آلی تنظیم کند (Shahverdikandi *et al.*, 2011).

پارامترهای محاسبه شده برای ارزیابی کارایی مدل‌های مختلف تخمین‌گر برآزش یافته بر شاخص‌های GSI، SV-S، M-SL و Razao تحت تنش آبی در جدول (۲) ارائه شده است. بر پایه‌ی داده‌های ارائه شده در این جدول، مقادیر متوسط RMSE مدل‌های تنش آبی برآزش یافته بر شاخص GSI در مدل F برابر با ۰/۰۳۱ و در سایر مدل‌ها برابر با ۰/۰۳۰۵ به دست آمد. RMSE برای شاخص SV-S در مدل‌های F، VG، DA و H به ترتیب برابر با ۰/۰۰۶، ۰/۰۵۱، ۰/۰۴۷ و ۰/۰۴۷ حاصل شد. مقادیر متوسط RMSE به دست آمده از برآزش مدل‌های تخمین‌گر بر شاخص M-SL توسط مدل‌های F، VG، DA و H به ترتیب برابر با ۰/۱۱، ۰/۰۲۲، ۰/۰۱۹ و ۰/۰۱۷ می‌باشد؛ و RMSE مدل‌های برآزش یافته بر شاخص Razao نیز توسط مدل F برابر با ۰/۰۸۸ و در سایر مدل‌ها برابر با ۰/۰۸۶ به دست آمد. R^2 برای شاخص‌های GSI، SV-S، M-SL و Razao به ترتیب در محدوده‌ی ۰/۹۳۹ - ۰/۹۳۴، ۰/۸۵ - ۰/۹۹۶، ۰/۸۴۶ - ۰/۹۳۶ قرار دارد. هر چه مقادیر EF و ME نزدیک به صفر باشد، کارایی مدل بهتر است. مقدار کمینه EF برای شاخص‌های GSI، SV-S، M-SL و Razao به ترتیب توسط مدل‌های غیرخطی از جمله H، VG و F به دست آمد. مقدار منفی EF در شاخص‌های GSI و SV-S توسط مدل F به دست آمد که نشان می‌دهد پیش‌بینی صورت گرفته بر پایه‌ی این مدل‌ها نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده،

برآورد خوبی محسوب نمی‌شود. مقدار کمینه ME برای شاخص‌های GSI، M-SL و Razao به ترتیب توسط مدل‌های F، H و غیرخطی به دست آمد. حداقل مقدار ME برای شاخص‌های SV-S نیز توسط مدل‌های DA و H حاصل شد.

جدول ۱. مقادیر اندازه‌گیری شده (Exp) و تخمین زده شده (Opt) پتانسیل شاخص‌های GSI، SV-S، M-SL و Razao تحت تنش آبی بر مبنای مدل‌های مختلف تخمین‌گر

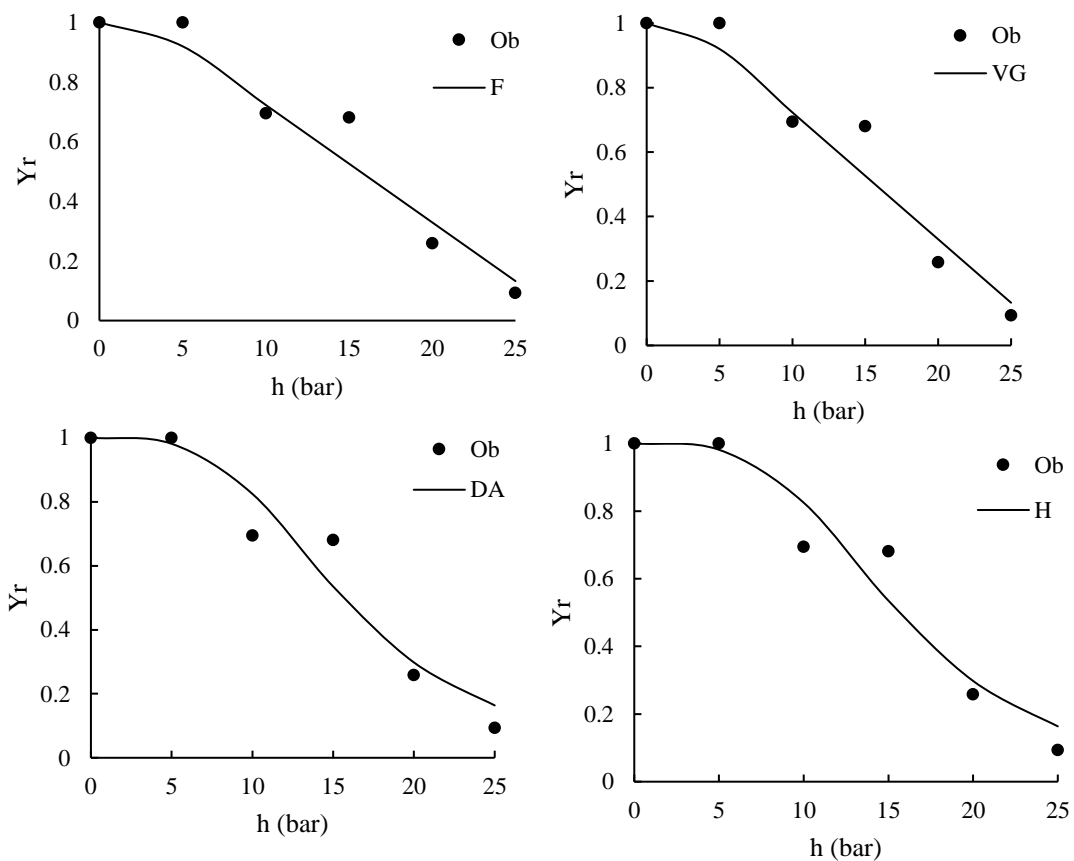
مدل	پارامتر	GSI		SV-S		M-SL		Razao	
		مقدار اندازه‌گیری شده	مقدار تخمین زده شده	مقدار اندازه‌گیری شده	مقدار تخمین زده شده	مقدار اندازه‌گیری شده	مقدار تخمین زده شده	مقدار اندازه‌گیری شده	مقدار تخمین زده شده
F	h*	۳۰۹	۳۰۹	۲۰۰	۲۰۰	۳۰۹۳	۳۰۹۳	۳۰۰۰	۱۸۱۳
	h ₄	۳۸۰۰	۳۸۹۹۰	۳۲۳۰۰	۴۰۰۶۰	۱۹۱۷۲	۲۳۱۹۵	۱۶۵۵۶	۱۷۳۵۴
VG	h ₅₀	۱۹۱۵۰	۲۷۰۲۰	۲۱۵۶۰	۲۱۵۶۰	۱۲۱۱۵	۱۲۴۷۳	۹۲۵۰	۹۵۵۶
	P	۱/۰۲	۱/۰۵۳	۱/۰۸	۱/۲۳	۲/۰۲	۵	۱/۵	۳/۴۶۹
DA	h*	۳۰۹	۱۰	۳۰۰۰	۱۰۰۰	۳۵۰۰	۳۵۰۰	۳۰۰۰	۱۰۰
	h ₅₀	۱۹۱۵۰	۲۷۹۶۰	۲۱۵۶۰	۱۹۴۰۰	۱۲۱۱۵	۱۲۴۶۷	۹۲۵۰	۹۵۵۳
H	h _{max}	۲۸۵۸۰	۲۸۵۸۰	۳۰۸۱۰	۳۸۶۴۰	۱۵۳۷۸	۱۵۰۰۶	۱۲۳۴۵	۱۲۳۲۰
	α ₀	۰/۲۵	۰/۴۸۵	۰/۲۵	۰/۲۸	۰/۲۵	۰/۲۸۹	۰/۲۵	۰/۲۹۳
	h*	۳۰۹	۱۰	۳۰۰۰	۱۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۲۰۰
	P	۱/۰۱	۱/۰۵۳	۱/۱۱	۱/۳	۱/۶۶	۴/۷۴۲	۱/۳۳	۳/۳۹

بر پایه مقادیر CRM به دست آمده برای شاخص‌ها در جدول (۲)، مقادیر تخمین زده شده توسط مدل F در شاخص GSI و مدل‌های غیرخطی در شاخص‌های SV-S و M-SL کمتر از مقادیر اندازه‌گیری است و در واقع این مدل‌ها تمایل به کم‌برآوردی دارند. در حالی که سایر مدل‌ها گرایش به بیش برآوردی داشتند. همه مدل‌ها نتایج بسیار مناسب و رضایت بخشی ارائه دادند. در شاخص GSI مدل‌های غیر خطی و در شاخص‌های M-SL و Razao نیز مدل H به دلیل RMSE کوچک‌تر و EF بزرگ‌تر عملکرد بهتری داشتند. در شاخص SV-S نیز مدل‌های غیر خطی DA و H عملکرد مناسبی ارائه دادند. مدلی از بین این مدل‌ها مناسب‌تر خواهد بود که پارامترهای آن کاملاً مشخص و تعریف شده باشد و همچنین به راحتی قابل اندازه‌گیری باشد. به همین دلیل مدل H بهترین عملکرد را در تخمین هر چهار شاخص ارائه داد.

جدول ۲. پارامترهای محاسبه شده برای ارزیابی کارایی مدل‌های برازش یافته بر شاخص‌های GSI، SV-S، M-SL و Razao تحت تنش آبی بر مبنای مدل‌های مختلف تخمین‌گر

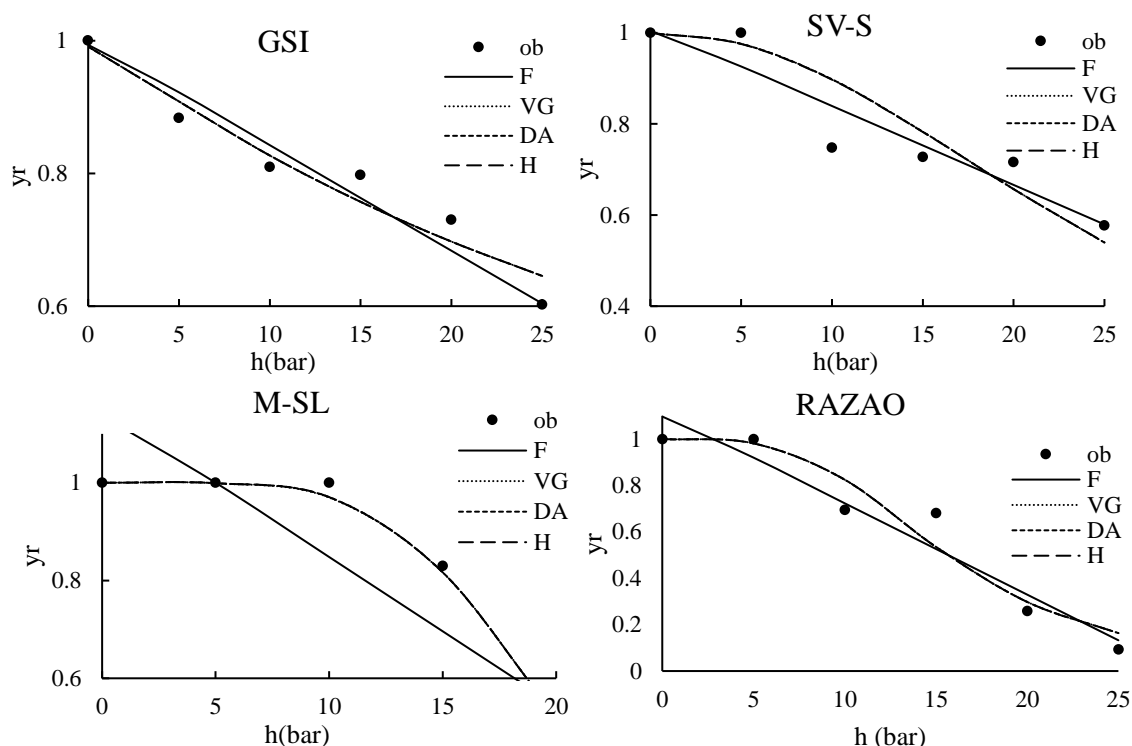
شاخص	پارامتر/ معادله	RMSE	R ²	SSR	EF	ME	CRM
GSI	F	۰/۰۳۱	۰/۹۳۴	۰/۰۰۶	-۰/۱۸۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳
	VG	۰/۰۳۰۵	۰/۹۳۹	۰/۰۰۶	۰/۰۶۴	۰/۰۴۳	-۶/۹۴×۱۰ ^{-۴}
	DA	۰/۰۳۰۵	۰/۹۳۹	۰/۰۰۶	۰/۰۶۴	۰/۰۴۳	-۷/۱۵×۱۰ ^{-۴}
	H	۰/۰۳۰۵	۰/۹۳۹	۰/۰۰۶	۰/۰۶۴	۰/۰۴۳	-۶/۹۹×۱۰ ^{-۴}
SV-S	F	۰/۰۰۶	۰/۸۵	۰/۰۲۲	-۰/۱۸	۰/۰۰۹	-۰/۰۲۴
	VG	۰/۰۵۱	۰/۸۹	۰/۰۱۶	۰/۲۲	۰/۰۱۷	۰/۰۰۴
	DA	۰/۰۴۷	۰/۹	۰/۰۱۵	۰/۱۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳
	H	۰/۰۴۷	۰/۹	۰/۰۱۵	۰/۱۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳
M-SL	F	۰/۱۱	۰/۸۴۶	۰/۰۷۲	-۰/۱۵۴	۰/۰۹۵	-۱/۲۹×۱۰ ^{-۶}
	VG	۰/۰۲۲	۰/۹۹۴	۰/۰۰۳	۰/۰۱۳	۰/۰۲۷	۰/۰۰۸
	DA	۰/۰۱۹	۰/۹۹۵	۰/۰۰۳	۰/۰۳۳	۰/۰۲۲	۰/۰۱
	H	۰/۰۱۷	۰/۹۹۶	۰/۰۰۲	۰/۰۱۷	۰/۰۲	۰/۰۰۸
Razao	F	۰/۰۸۸	۰/۹۳۳	۰/۰۴۷	-۰/۰۶۷	۰/۰۳۹	-۴/۵۵×۱۰ ^{-۴}
	VG	۰/۰۸۶	۰/۹۳۶	۰/۰۴۵	۰/۰۹۹	۰/۰۷	-۰/۰۲
	DA	۰/۰۸۶	۰/۹۳۶	۰/۰۴۵	۰/۰۹۹	۰/۰۷	-۰/۰۲
	H	۰/۰۸۶	۰/۹۳۶	۰/۰۴۵	۰/۰۹۹	۰/۰۷	-۰/۰۲

مدل‌های مختلف تخمین‌گر برازش یافته بر داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی Razaو در شکل (۱) ارائه شده است. نسبت ریشه‌چه به ساقه‌چه شاخص مهمی در ارزیابی سلامت گیاه است و به عنوان شاخص بیان‌کننده‌ی مقدار حساسیت گیاه به تنش مورد توجه قرار گرفته است (Agathokleous *et al.*, 2019). بر پایه‌ی این شکل، مدل‌های غیرخطی عملکرد بهتری نسبت به مدل خطی برای تخمین داده‌های اندازه‌گیری شده دارند که علت آن سیگموئیدی بودن شکل منحنی و پایین بودن پتانسیل حد آستانه است. عملکرد بهتر مدل F نسبت به سایر مدل‌ها نیز در شکل قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، Razaو تا پتانسیل ۳۰۰۰ سانتی‌متر افزایش یافته و پس از آن کاهش یافته است. همچنین Razaو در پتانسیل‌های ۹۲۵۰ و ۱۲۳۴۵ سانتی‌متر به ترتیب به ۵۰ و ۲۵ درصد رسیده است؛ بنابراین با افزایش تنش آبی، Razaو تا حد آستانه افزایش و سپس کاهش یافته است. Kaydan & Yagmur (2008) نیز دریافتند که Razaو با افزایش تنش آبی افزایش می‌یابد. همچنین حد آستانه تحمل به تنش آبی شاخص Razaو بر اساس شکل برابر با ۳۰۰۰ سانتی‌متر و کاهش ۵۰ درصدی آن در پتانسیل ۹۰۰۰ سانتی‌متر مشاهده شد. به طور کلی با توجه به شکل، عملکرد مناسب همه‌ی مدل‌ها به خصوص مدل‌های غیر خطی مشخص است.



شکل ۱. مدل‌های مختلف تخمین‌گر برازش یافته بر شاخص Razaو

در شکل (۲) مدل‌های مختلف تخمین‌گر برازش یافته بر داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی شاخص‌های SV-S، GSI، M-SL و Razaو مشاهده می‌شود. با توجه به شکل می‌توان به عملکرد مناسب مدل‌های غیرخطی به ویژه مدل H پی برد. طبق شکل ۵۰ درصد کاهش شاخص‌های SV-S، GSI، M-SL و Razaو به ترتیب در پتانسیل‌های ۱۹۱۵۳، ۱۲۵۶۰، ۱۲۱۱۵ و ۹۲۵۰ سانتی‌متر قابل مشاهده است. همچنین حد آستانه دوم کاهش که شاخص‌های SV-S، GSI، M-SL و Razaو به ۲۵ درصد ماکزیمم مقدار این شاخص‌ها می‌رسد در پتانسیل‌های ۲۸۵۷۵، ۳۰۸۱۱، ۱۵۳۷۸ و ۱۲۳۴۵ سانتی‌متر رخ داده است. در شاخص GSI، مدل F و در شاخص‌های SV-S، M-SL و Razaو، مدل H بهترین عملکرد را داشتند. تشخیص بهترین مدل در شاخص‌های GSI و Razaو از شکل میسر نیست و باید بر مبنای آماره‌های ارزیابی کارایی مدل‌های تخمین‌گر ارائه شده در جدول (۲) انجام شود.



شکل ۲. مدل‌های مختلف تخمین‌گر برازش یافته بر مقدار نسبی شاخص‌های GSI، SV-S، M-SL و RAZAO تحت تنش آبی

تجزیه و تحلیل آماری اثر سطوح شوری بر ویژگی‌های جوانه‌زنی

نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر مقادیر مختلف تنش آبی بر ویژگی‌های جوانه‌زنی کاملینا در جدول (۳)، ارائه شده است. بر پایه‌ی نتایج ارائه شده در این جدول، اثر تنش آبی بر GSI، Razao، M-SL، بنیه بذر و طول ساقه‌چه در سطح احتمال آماری ۱ درصد و بر طول ریشه‌چه در سطح احتمال آماری ۵ درصد معنی‌دار شد. همچنین تنش آبی بر MGT اثر معنی‌داری نداشت. به دلیل اینکه در این پژوهش FGP برابر با ۱۰۰ درصد است، امکان بررسی آن فراهم نشد. طبق نتایج میرزایی (۱۳۸۸) تنش آبی بر درصد جوانه‌زنی در رقم کلزا اثر معنی‌داری نداشت. در پژوهشی که Channaoui *et al.* (2017) بر رقم ۵ کلزا انجام دادند، سرعت جوانه‌زنی به طور معنی‌داری در سطح یک درصد کاهش یافت. همچنین تنش آبی موجب افزایش متوسط زمان جوانه‌زنی در کلزا گردید (Rezayian *et al.*, 2018). Shahverdikandi *et al.* (2011) پژوهشی پیرامون اثر سطوح آبی (۰، ۴۰۰۰ و ۹۰۰۰ سانتی‌متر) بر جوانه‌زنی کانولا انجام دادند و بیان کردند تنش آبی اثر معنی‌داری بر سرعت جوانه‌زنی دارد. طبق نتیجه‌ی Channaoui *et al.* (2017)، GSI با افزایش سطح تنش آبی، کاهش و MGT افزایش یافت. همچنین تنش آبی به طور معنی‌داری موجب کاهش سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه، ساقه‌چه و طول گیاهچه گردید (Heshmat *et al.*, 2011). اثر تنش آبی بر جوانه‌زنی کلزا توسط Channaoui *et al.* (2019) مورد بررسی قرار گرفت و بیان کردند که اثر تنش آبی بر طول ساقه‌چه در سطح آماری یک درصد معنی‌دار است. کلزا در مواجهه با تنش آبی، بیشتر به توسعه ریشه‌چه نسبت به ساقه‌چه می‌پردازد. کاهش رشد ساقه‌چه در زنده ماندن گیاهچه‌ها اثر مثبتی دارد؛ چرا که رشد آهسته ساقه‌چه سبب مصرف کمتر آب و کاهش تعرق می‌شود (Zeng *et al.*, 2009).

جدول ۳. تجزیه واریانس اثر مقادیر مختلف تنش آبی بر ویژگی‌های جوانه‌زنی کاملینا

منابع تغییر (Sov)	درجه آزادی (df)	GSI	MGT	Razao	M-Total	بنیه بذر	طول ساقه‌چه	طول ریشه‌چه
واحد	-	(بذر در روز)	روز	-	(سانتی‌متر)	-	(سانتی‌متر)	(سانتی‌متر)
میانگین مربعات								
تنش آبی	۵	۱۰/۶۸۸ ^{ns}	۰/۳۹۱ ^{ns}	۰/۰۸۵ ^{**}	۱/۰۷۱ ^{**}	۱۱۰۰/۶۴۸ ^{**}	۱/۲۵ ^{**}	۳/۵۱ [*]
خطای آزمایش	۱۲	۳/۶۷۴	۰/۲۵۷	۰/۰۱۰	۰/۰۷۸	۲۱۰/۴۱۰	۰/۰۵۱	۱/۰۴
ضریب تغییرات (درصد)	-	۱۷/۰۳۲	۲۰/۴۲۵	۳۵/۱۹۰	۱۷/۳۵۶	۱۱/۲۲۳	۲۱/۰۷	۳۳/۵

** و * به ترتیب معنی‌داری در سطح آماری ۱ و ۵ درصد و همچنین ns عدم معنی‌داری در سطح آماری ۵ درصد



نتایج حاصل از مقایسه میانگین شاخص‌های جوانه‌زنی در جدول (۴) ارائه شده است. طبق نتایج ارائه شده در این جدول، GSI در محدودی ۱۴-۸/۴۳۳ قرار دارد. بیشترین مقدار GSI در تیمار شاهد و کمترین مقدار آن در پتانسیل ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر به دست آمد. سرعت جوانه‌زنی از شاخص‌های مهم ارزیابی مقاومت به تنش آبی در مرحله جوانه‌زنی است، زیرا اگر سرعت جوانه‌زنی زیاد باشد، بذر امکان بیشتری برای استقرار دارد (Dutt et al., 1982). کاهش GSI با کاهش جذب آب در مرحله‌ی آبیگری و تورژانس ارتباط دارد (Bybordi & Tabatabaei, 2009). همچنین آن را می‌توان ناشی از تأخیر در انتقال مواد غذایی و سنتز پروتئین‌ها در جنین دانست (Kaydan & Yagmur, 2008). طبق نتایج میرزایی (۱۳۸۸) در تیمارهای شاهد، ۵۰۰۰، ۳۰۰۰، ۷۰۰۰ و ۹۰۰۰ سانتی‌متر، سرعت جوانه‌زنی رقم هایولا ۴۰۱ به ترتیب برابر با ۱۰، ۱۰، ۷، ۰ و ۰ به دست آمد؛ و در رقم OKP، برابر با ۱۴، ۱۳، ۱۰، ۰ و ۰ می‌باشد. در نهایت، سرعت جوانه‌زنی ارقام کلزای مورد مطالعه‌ی ایشان در تنش ۹۰۰۰ سانتی‌متر به صفر رسید. این در حالی است که سرعت جوانه‌زنی کاملینا در ۱۸۰۰۰ سانتی‌متر به صفر رسیده است که نشان می‌دهد تحمل کاملینا به تنش آبی بسیار بیشتر از کلزا می‌باشد. در رقم Sarigol مورد مطالعه‌ی (Rezayian et al., 2018) نیز سرعت جوانه‌زنی در محدوده‌ی ۱۲-۸ بذر در روز قرار دارد. در پژوهش Shahverdikandi et al. (2011) ماکزیمم سرعت جوانه‌زنی (۷/۸۳) در تیمار شاهد و مینیمم آن معادل ۰/۸۴ در ۹۰۰۰ سانتی‌متر به دست آمد. محققان اثر تنش آبی بر جوانه‌زنی ژنوتیپ‌های گلرنگ را مورد بررسی قرار داده و گزارش کردند که کاهش جذب بر اثر تنش، موجب کاهش سرعت جوانه‌زنی می‌گردد (Maleki et al., 2015).

بر پایه‌ی جدول (۴) پارامترهای M-SL, Razaو طول ساقچه‌چه و طول ریشه‌چه در کاملینا به ترتیب در محدوده‌ی ۰/۵۱۴-۰/۰۴۸، ۲/۳۶۴-۰/۷۰۲، ۱/۸۶۸-۰/۲۶۷ و ۱/۶۶۳-۴/۶۶۷ سانتی‌متر قرار دارند. پارامترهای M-SL, Razaو طول ساقچه‌چه، طول ریشه‌چه با افزایش تنش آبی کاهش یافتند. با این حال، وجود تنش متوسط آبی می‌تواند این پارامترها را بهبود بخشد. لیکن بیشترین مقدار آن‌ها به ترتیب در سطوح آبی ۳۰۰۰، ۶۰۰۰ و ۳۰۰۰ سانتی‌متر حاصل شد که نشان می‌دهد کاملینا برای کشت در محیط‌های تحت تنش آبی مناسب است. به عقیده بسیاری از محققان، طول ساقچه‌چه در کلزا، در مقایسه با طول ریشه‌چه، بیشتر تحت تأثیر تنش قرار می‌گیرد (Keshta et al., 1999) که کاهش آن در گیاهچه‌های کلزا (Channaoui et al., 2017)، آفتابگردان (Manivannan et al., 2007) و لوبیا (Turkan et al., 2005) با اعمال تنش آبی مشاهده شد. در حالی که در پژوهش محققان ذکر شده، افزایش طول ریشه‌چه در تنش آبی، نشان از مقاومت گیاه به تنش است. در مطالعه‌ی Channaoui et al. (2017)، طول ریشه‌چه تا ۵۰۰۰ سانتی‌متر افزایش و سپس کاهش یافته است و همچنین طول ساقچه‌چه کاهش یافته است. در حالی که در پژوهش حاضر هم طول ریشه‌چه (۶۰۰۰ سانتی‌متر) و هم طول ساقچه‌چه (۳۰۰۰ سانتی‌متر) تا سطح مشخصی از تنش آبی افزایش و سپس کاهش یافته است. این افزایش طول ساقچه‌چه در سطح کمتری از تنش آبی نسبت به طول ریشه‌چه مشاهده شد. رشد ریشه‌چه در شرایط تنش آبی می‌تواند عامل مؤثری باشد تا گیاه رطوبت موجود را به راحتی جذب کند (Zhang et al., 2012). رشد ریشه‌چه در مراحل اولیه تنش آبی، به دلیل حساسیت کمتر به تنش و به منظور جذب بیشتر آب، بالاتر بود؛ اما با افزایش سطح آبی و منفی‌تر شدن پتانسیل و در نتیجه کاهش جذب آب توسط بذر، کاهش ترشح هورمون‌ها و فعالیت آنزیم‌ها، اختلال در رشد ریشه‌چه و ساقچه‌چه به وجود آمد. از آنجایی که تقسیم و بزرگ شدن سلول‌ها نیاز به آب دارد، در اثر تنش و کمبود آب، تقسیم و رشد سلول‌ها کاهش یافته و منجر به کاهش رشد گیاه می‌گردد (Bangar et al., 2019). به طور کلی با اعمال تنش آبی، شیب پتانسیل آب بین بذر و محیط غذایی کاهش یافته و این امر سبب بروز اشکال در انتقال مواد غذایی و سنتز پروتئین‌ها در جنین‌های در حال جوانه‌زنی می‌گردد و لذا جوانه‌زنی را با مشکل مواجه می‌سازد (Yagmur & Kaydan, 2008).

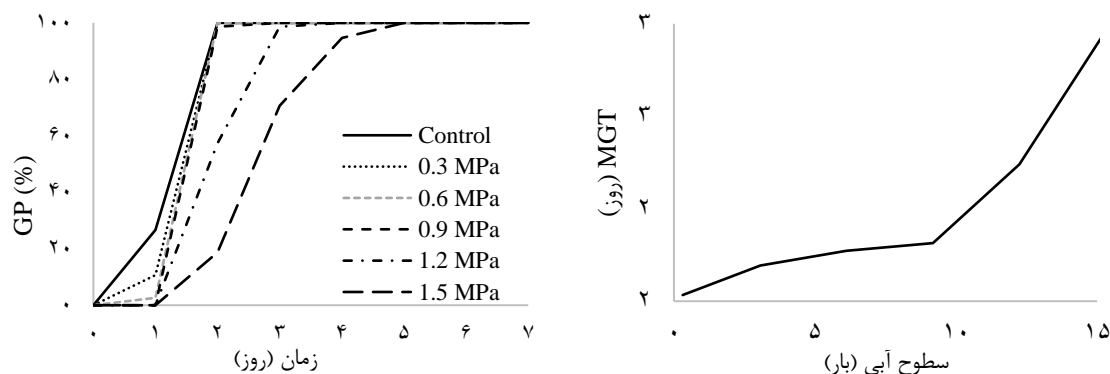
طبق نتایج ارائه شده در جدول (۴)، SV-S در محدوده‌ی ۱۶۶/۸۳-۱۱۱/۶۶ به دست آمد. ماکزیمم شاخص SV-S در پتانسیل ۳۰۰۰ سانتی‌متر و حداقل مقدار آن در تیمار ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر بدست آمد. رشد ریشه‌چه می‌تواند معیاری برای ارزیابی بنیه بذر باشد، زیرا اگر گیاهچه نتواند یک سیستم ریشه‌ای قوی ایجاد کند، امکان بقای آن به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد (Makawi et al., 1999). از سوی دیگر شاخص بنیه بذر در شناسایی میزان جوانه‌زنی بذر در مزرعه نقش دارد. با توجه به شاخص بنیه بذر و صد درصد بودن جوانه‌زنی نهایی در تمام سطوح تنش آبی می‌توان این گیاه را در سطح مزرعه، مقاوم به تنش آبی دانست. تنش آبی با کاهش پتانسیل آب در خاک موجب کاهش جذب آب توسط گیاه برای شروع فرایند جوانه‌زنی می‌شود (Almansouri et al., 2001) که متعاقباً منجر به افزایش MGT، کاهش GSI و بنیه بذر خواهد شد.

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر تنش آبی بر ویژگی های جوانه زنی کاملینا

تیمار	GSI	Razao	M-SL	بنیه بذر	طول ساقچه	طول ریشه چه
واحد	(بذر در روز)	-	(سانتی متر)	-	(سانتی متر)	(سانتی متر)
شاهد	۱۴a	۰/۲۸۸abc	۱/۵۷۹cb	۱۲۶/۹۶b	۱/۲۶۷b	۲/۷۳۳ab
۰/۳ MPa	۱۲/۳۶۷ab	۰/۵۱۴a	۱/۸۶۴ab	۱۶۶/۸۳a	۱/۸۶۷a	۲/۵۳۳ab
۰/۶ MPa	۱۱/۳۳۳ab	۰/۳۵۷ab	۲/۳۶۴a	۱۲۲/۲۲b	۰/۳۶۷c	۴/۶۶۷a
۰/۹ MPa	۱۱/۱۶۷ab	۰/۳۵ab	۱/۹۶۲ab	۱۲۳/۲۵b	۰/۴۳۳c	۳/۹۳۳ab
۱/۲ MPa	۱۰/۲۲۲ab	۰/۱۳۳bc	۱/۱۶cd	۱۲۴/۵۸b	۰/۴۳۳c	۲/۷۶۷ab
۱/۵ MPa	۸/۴۳۳b	۰/۰۴۸c	۰/۷۰۲d	۱۱۱/۶۶b	۰/۲۶۷c	۱/۶۳۳b
۱/۸ MPa

در هر ستون میانگین ها با حروف مشترک به روش LSD اختلاف معنی داری با یکدیگر ندارند. در این جدول، GSI = شاخص سرعت جوانه زنی، Razao = میانگین نسبت ریشه چه به ساقچه، M-SL = میانگین طول گیاهچه می باشد.

طبق شکل (۳) FGP در تمام سطوح آبی نهایتاً با تأخیر ۳ روزه در سطوح آبی ۱۲۰۰۰ سانتی متر و بالاتر به ۱۰۰ درصد رسید. محدوده تغییرات MGT در تنش آبی برابر با ۳/۱۶ - ۱/۷۳ روز است. شیب آن در ابتدای تنش تا حد آستانه کند است و با افزایش سطوح آبی، شیب آن افزایش یافته است. در سطح آبی ۱۸۰۰۰ سانتی متر هیچ جوانه زنی ای رخ نداد و مقدار پارامترهای جوانه زنی از جمله زمان جوانه زنی صفر است. (Channaoui et al., 2017) بیان کردند که ۵ رقم کلزا در مرحله جوانه زنی، تنش آبی تا ۹۰۰۰ سانتی متر را تحمل می کنند؛ لیکن از ۱۱۰۰۰ سانتی متر به بعد هیچ جوانه زنی رخ نمی دهد. (Kaya et al., 2003) دریافتند که هیچ یک از بذرها آفتابگردان نمی توانند در ۱۲۰۰۰ سانتی متر جوانه بزنند، این ممکن است به دلیل تغییر آنزیم ها و هورمون های موجود در بذر (Botía et al., 1998) یا اختلالات متابولیکی ناشی از استرس و تولید انواع اکسیژن فعال (Almas et al., 2013) باشد. در نتیجه می توان دریافت مقاومت کاملینا به تنش آبی در این مرحله از رشد بیش از کلزا و آفتابگردان است.



شکل ۳. درصد جوانه زنی (GP) و MGT تحت سطوح آبی

نتیجه گیری

تنش آبی یکی از مخرب ترین تنش های محیطی به شمار می آید (Khalvandi et al., 2021). همه مناطق کشاورزی به نوعی تنش آبی را تجربه می کنند و برخی مناطق، فصول خشک قابل پیش بینی و غیر قابل پیش بینی خواهند داشت (Wood, 2007). بررسی پاسخ کاملینا به تنش آبی و تعیین مقدار تحمل آن ضروری است. به طور خلاصه، نتایج بدست آمده در این پژوهش نشان می دهد که مدل های غیرخطی بهترین دقت را برای تخمین شاخص های جوانه زنی تحت تنش آبی دارند. حد آستانه تحمل به تنش آبی شاخص های GSI، M-SL، Razao و SV-S به ترتیب برای تیمارهای شاهد، ۶۰۰۰ و ۳۰۰۰ سانتی متر به دست آمد. براساس پتانسیل های به دست آمده برای هر چهار شاخص جوانه زنی مورد بررسی در این پژوهش، کاملینا به تنش آبی مقاوم است. همچنین این گیاه، تحمل بسیار بیشتری نسبت به کلزا و آفتابگردان در برابر تنش آبی دارد. همچنین طول ریشه تا سطح آبی ۶۰۰۰ سانتی متر افزایش یافته است که یک ویژگی بسیار مهم برای گیاهان برای مقابله با محیط های تحت تنش آبی است. در هر چهار شاخص GSI، M-SL، Razao و SV-S مدل H عملکرد بهتری ارائه داد. این مدل غیرخطی به دلیل اینکه پارامترهای آن کاملاً مشخص و تعریف شده اند و نیز به راحتی قابل اندازه گیری می باشند،



برای تخمین شاخص‌های جوانه‌زنی کاملینا در تنش آبی توصیه می‌شود. با توجه به کم آب‌خواه بودن کاملینا و مقاومت زیاد آن به تنش آبی در مرحله‌ی جوانه‌زنی، کشت این گیاه در مناطق خشک و نیمه خشک توصیه و می‌تواند راهکاری برای برون رفت از واردات دانه‌های روغنی به کشور باشد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Agathokleous, E., Belz, R. G., Kitao, M., Koike, T., & Calabrese, E. J. (2019). Does the root to shoot ratio show a hormetic response to stress? An ecological and environmental perspective. *Journal of Forestry Research*, 30(5), 1569-1580.
- Almansouri, M., Kinet, J. M., & Lutts, S. (2001). Effect of salt and osmotic stresses on germination in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *Plant and soil*, 231(2), 243-254.
- Almas, D. E., Bagherikia, S., & Mashaki, K. M. (2013). Effects of Salt and Water Stresses on Germination and Seedling Growth of *Artemisia vulgaris* L. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 6(11), 762.
- Anonymous. (2014). International rules for seed testing. Seed Science and Technology 24: 1- 335 (supplement). *International Seed Testing Association (ISTA)*, Zurich, Switzerland. (Handbook)
- Arbona, V., Manzi, M., Ollas, C. D., & Gómez-Cadenas, A. (2013). Metabolomics as a tool to investigate abiotic stress tolerance in plants. *International journal of molecular sciences*, 14(3), 4885-4911.
- Awan SA, Khan I, Rizwan M, Zhang X, Brestic M, Khan A, et al. Exogenous abscisic acid and jasmonic acid restrain polyethylene glycol-induced drought by improving the growth and antioxidative enzyme activities in pearl millet. *Physiol Plant*. 2021;172: 809–819. pmid:33094486.
- Bangar, P., Chaudhury, A., Tiwari, B., Kumar, S., Kumari, R., & Bhat, K. V. (2019). Morphophysiological and biochemical response of mungbean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] varieties at different developmental stages under drought stress. *Turkish Journal of Biology*, 43(1), 58-69.
- Benincasa, M. M. P. (2003). Departamento de biologia aplicada à agropecuária. *Análise de crescimento de plantas (noções básicas)*. FCAV-UNESP: Jaboticabal, 02-06.
- Botía, P., Carvajal, M., Cerdá, A., & Martínez, V. (1998). Response of eight *Cucumis melo* cultivars to salinity during germination and early vegetative growth. *Agronomie*, 18(8-9), 503-513.
- Bybordi, A. (2010). The influence of salt stress on seed germination, growth and yield of canola cultivars. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 38(1), 128-133.
- Bybordi, A., & Tabatabaei, J. (2009). Effect of salinity stress on germination and seedling properties in canola cultivars (*Brassica napus* L.). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 37(2), 71-76.
- Čanak, P., Jeromela, A. M., Vujošević, B., Kiproviski, B., Mitrović, B., Alberghini, B., ... & Zanetti, F. (2020). Is Drought Stress Tolerance Affected by Biotypes and Seed Size in the Emerging Oilseed Crop *Camelina*?. *Agronomy*, 10(12), 1856.
- Channaoui, S., El Idrissi, I. S., Mazouz, H., & Nabloussi, A. (2019). Reaction of some rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes to different drought stress levels during germination and seedling growth stages. *OCL*, 26, 23.
- Channaoui, S., El Kahkahi, R., Charafi, J., Mazouz, H., El Fechtali, M., & Nabloussi, A. (2017). Germination and seedling growth of a set of rapeseed (*Brassica napus*) varieties under drought stress conditions. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 2(1), 238696.
- Chaves, M. M., Pereira, J. S., Maroco, J., Rodrigues, M. L., Ricardo, C. P. P., Osório, M. L., ... & Pinheiro, C. (2002). How plants cope with water stress in the field? Photosynthesis and growth. *Annals of botany*, 89(7), 907-916.
- Cheong, Y. H., Kim, K. N., Pandey, G. K., Gupta, R., Grant, J. J., & Luan, S. (2003). CBL1, a calcium sensor that differentially regulates salt, drought, and cold responses in *Arabidopsis*. *The Plant Cell*, 15(8), 1833-1845.
- Dai, J., Huff, D. R., & Schlossberg, M. J. (2009). Salinity effects on seed germination and vegetative growth of greens-type *Poa annua* relative to other cool-season turfgrass species. *Crop science*, 49(2), 696-703.
- Dhanda, S. S., Sethi, G. S., & Behl, R. K. (2004). Indices of drought tolerance in wheat genotypes at early stages of plant growth. *Journal of agronomy and crop science*, 190(1), 6-12.
- Dirksen, C., & Augustijn, D. C. M. (1988). Root water uptake function for nonuniform pressure and osmotic potentials. In *Agronomy Abstracts* (p. 182).
- Dirksen, C., Kool, J. B., Koorevaar, P., & Van Genuchten, M. T. (1993). HYSWASOR—simulation model of

- hysteretic water and solute transport in the root zone. In *Water flow and solute transport in soils* (pp. 99-122). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Fahad, S., Bajwa, A.A., Nazir, U., Anjum, S.A., Farooq, A., Zohaib, A., Sadia, S., Nasim, W., Adkins, S., Saud, S., & Ihsan, M.Z., (2017). Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options. *Frontiers in plant science*, 8, 1147.
- FAO. 2018. Progress on level of water stress - Global baseline for SDG 6 Indicator 6.4.2. Rome. *FAO/UN-Water*. 58 pp. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J., & Zaradny, H. (1978). Simulation of field water use and crop yield. *Simulation of field water use and crop yield*.
- Filipović, A. (2020). Water plant and soil relation under stress situations. *Soil Moisture Importance*, 73.
- Heshmat, O., Saeed, H. A., & Fardin, K. (2011). The improvement of seed germination traits in canola (*Brassica napus* L.) as affected by saline and drought stress. *Journal of Agricultural Technology*, 7(3), 611-622.
- Homaei, M. (1999). Root water uptake under non-uniform transient salinity and water stress. Wageningen University and Research.
- Homaei, M., Dirksen, C., & Feddes, R. A. (2002a). Simulation of root water uptake: I. Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. *Agricultural Water Management*, 57(2), 89-109.
- Homaei, M., Feddes, R. A., & Dirksen, C. (2002b). Simulation of root water uptake: II. Non-uniform transient water stress using different reduction functions. *Agricultural water management*, 57(2), 111-126.
- Hunsaker, D.J., French, A.N. and Thorp, K.R., 2013. Camelina water use and seed yield response to irrigation scheduling in an arid environment. *Irrigation Science*, 31(5), pp.911-929.
- ISTA. (2015). The germination test. In: International rules for seed testing. Zurich, Switzerland: In *International Seed Testing Association* (pp. 5-16).
- ISTA. (2019). Rules for testing seeds. International Seed Testing Association (ISTA), Zurich, Switzerland.
- Jyoti, B., & Yadav, S. K. (2012). Comparative study on biochemical parameters and antioxidant enzymes in a drought tolerant and a sensitive variety of horsegram (*Macrotyloma uniflorum*) under drought stress. *American Journal of Plant Physiology*, 7(1), 17-29.
- Kaya, M. D., Ipek, A., & ÖZTÜRK, A. (2003). Effects of different soil salinity levels on germination and seedling growth of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 27(4), 221-227.
- Kaydan, D., & Yagmur, M. (2008). Germination, seedling growth and relative water content of shoot in different seed sizes of triticale under osmotic stress of water and NaCl. *African Journal of Biotechnology*, 7(16), 2862-2868.
- Keshta, M. M., Hammad, K. M., & Sorour, W. A. I. (1999). Evaluation of rapeseed genotypes in saline soil. In *Proceedings of the 10th International Rape Seed Congress*. Canberra, Australia. 253-258.
- Khalvandi, M., Siosemardeh, A., Roohi, E., & Keramati, S. (2021). Salicylic acid alleviated the effect of drought stress on photosynthetic characteristics and leaf protein pattern in winter wheat. *Heliyon*, 7(1), e05908.
- Labouriau, L. G. (1983). Uma nova linha de pesquisa na fisiologia da germinação das sementes. In *Anais do XXXIV Congresso Nacional de Botânica*. SBB, Porto Alegre (pp. 11-50).
- Li, Y., & Sun, X. S. (2015). Camelina oil derivatives and adhesion properties. *Industrial Crops and Products*, 73, 73-80.
- Maguire, J. D. (1962). Speed of germination—Aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor 1. *Crop science*, 2(2), 176-177.
- Makkawi, M., El Balla, M., Bishaw, Z., & VAN GASTEL, A. G. (1999). The relationship between seed vigour tests and field emergence in lentil (*Lens culinaris* Medikus). *Seed science and technology*, 27(2), 657-668.
- Manivannan, P., Jaleel, C. A., Somasundaram, R., & Panneerselvam, R. (2008). Osmoregulation and antioxidant metabolism in drought-stressed *Helianthus annuus* under triadimefon drenching. *Comptes Rendus Biologies*, 331(6), 418-425.
- Mesgaran, M. B., Madani, K., Hashemi, H., & Azadi, P. (2017). Iran's land suitability for agriculture. *Scientific reports*, 7(1), 1-12.
- Michel, B. E., & Kaufmann, M. R. (1973). The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant physiology*, 51(5), 914-916.
- Miladinović, D., Vollmann, J., Molinero-Ruiz, L., & Torres, M. (2019). Advances in Oil Crops Research—Classical and New Approaches to Achieve Sustainable Productivity. *Frontiers in Plant Science*, 10, 791.



- Mirzaee, M., Moeini, A., & Ghanati, F. (2010). Effect of drought Stress on Germination and Seedling Growth in some Canola (*Brassica napus* L.) Cultivars. Master Thesis, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University (In farsi).
- Mousa, M. M. N., Balouchi, H., & Attarzadeh, M. (2015). Effect of seed priming on some germination traits and seedling growth of safflower under drought stress. *Iranian Journal of Seed Research*, 2(1).
- Muscolo A., Sidari M., Anastasi U., Santonoceto C., Maggio A. Effect of PEG-induced drought stress on seed germination of four lentil genotypes. *Journal of Plant Interactions*. 9: 354-363.
- Nakagawa, J., Krzyzanowski, F.C., Vieira, R.D., & França-Neto, J.B. (1999). *Testes de vigor baseados no desempenho das plântulas*. In: Krzyzanowski, Fc; Vieira, Rd; França Neto, Jb Vigor de sementes: conceitos e testes. *Londrina: Abrates*, 9-13.
- Nezhadahmadi, A., Prodhon, Z. H., & Faruq, G. (2013). Drought tolerance in wheat. *The Scientific World Journal*.
- Opoku, G., Davies, F. M., Zetina, E. V., & Gamble, E. E. (1996). Relationship between seed vigour and yield of white beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Plant Varieties and Seeds*.
- Ranjbarfordoei A., Samson R., Van Damme P., Lemeur R. Effects of Drought Stress Induced by Polyethylene Glycol on Pigment Content and Photosynthetic Gas Exchange of Pistacia Khinjuk and P. Mutica. *Photosynthetica*.38:443-447.
- Rezayian, M., Niknam, V., & Ebrahimzadeh, H. (2018). Effects of drought stress on the seedling growth, development, and metabolic activity in different cultivars of canola. *Soil Science and Plant Nutrition*, 64(3), 360-369.
- Rockström, J., Falkenmark, M., Karlberg, L., Hoff, H., Rost, S., & Gerten, D. (2009). Future water availability for global food production: The potential of green water for increasing resilience to global change. *Water resources research*, 45(7).
- Sako, Y., McDonald, M. B., Fujimura, K., Evans, A. F., & Bennett, M. A. (2001). A system for automated seed vigour assessment. *Seed science and technology*, 29(3), 625-636.
- Sanchez, P. L., Chen, M. K., Pessaraki, M., Hill, H. J., Gore, M. A., & Jenks, M. A. (2014). Effects of temperature and salinity on germination of non-pelleted and pelleted guayule (*Parthenium argentatum* A. Gray) seeds. *Industrial Crops and Products*, 55, 90-96.
- Sarv, V. (2017). A comparative study of camelina, canola and hemp seed processing and products (Doctoral dissertation, University of Toronto (Canada)).
- Shahverdikandi, M. A., Tobeh, A., Godehkahriz, S. J., & Rastegar, Z. (2011). The study of germination index of canola cultivars for drought resistance. *Int. J. Agron. Plant Prod*, 2(3), 89-95.
- Silva, L. J. D., Medeiros, A. D. D., & Oliveira, A. M. S. (2019). SeedCalc, a new automated R software tool for germination and seedling length data processing. *Journal of Seed Science*, 41, 250-257.
- Tobe, K., Zhang, L., Qiu, G. Y., Shimizu, H., & Omasa, K. (2001). Characteristics of seed germination in five non-halophytic Chinese desert shrub species. *Journal of Arid Environments*, 47(2), 191-201.
- Türkan, I., Bor, M., Özdemir, F., & Koca, H. (2005). Differential responses of lipid peroxidation and antioxidants in the leaves of drought-tolerant *P. acutifolius* Gray and drought-sensitive *P. vulgaris* L. subjected to polyethylene glycol mediated water stress. *Plant Science*, 168(1), 223-231.
- USEPA. (2013). Regulation of Fuels and Fuel Additives: 2012 Renewable Fuel Standards; Final Rule. *Federal Register*, 78(158), 49794-830.
- van Genuchten, M. Th. (1987). A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Research Report, *U. S. Salinity Lab*. Riverside CA.
- van Slyke, T. (2019). Fields of Dreams: Scenarios to Produce Selected Biomass and Renewable Jet Fuels that Fulfill European Union Sustainability Criteria.
- Verslues, P.E. and E.A. Bray, 2004. LWR1 and LWR2 are required for osmoregulation and osmotic adjustment in *Arabidopsis*. *Plant Physiol.*, 136: 2831-2842.
- Waraich, E. A., Ahmed, Z., Ahmad, R., Ashraf, M. Y., Naeem, M. S., & Rengel, Z. (2013). 'Camelina sativa', a climate proof crop, has high nutritive value and multiple-uses: A review. *Australian Journal of Crop Science*, 7(10), 1551-1559.
- Warwick, S. I., & Francis, A. (2006). The biology of invasive alien plants in Canada. 6. *Berteroa incana* (L.) DC. *Canadian journal of plant science*, 86(4), 1297-1309.
- Windauer, L., Altuna, A., & Benech-Arnold, R. (2007). Hydrotime analysis of *Lesquerella fendleri* seed germination responses to priming treatments. *Industrial Crops and Products*, 25(1), 70-74.
- Wood, A. J. (2007). Eco-physiological adaptations to limited water environments. *Plant abiotic stress*, 1.
- Zarei, L., Farshadfar, E., Haghparast, R., Rajabi, R., & Badieh, M. M. S. (2007). Evaluation of some indirect traits and indices to identify drought tolerance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Asian Journal of*

Plant Sciences.

Zeng, Y. J., Wang, Y. R., & Zhang, J. M. (2010). Is reduced seed germination due to water limitation a special survival strategy used by xerophytes in arid dunes?. *Journal of Arid Environments*, 74(4), 508-511.

Zhang, H., Sun, X., & Dai, M. (2021). Improving crop drought resistance with plant growth regulators and rhizobacteria: Mechanisms, applications, and perspectives. *Plant Communications*, 100228.