

برآورد آستانه‌های دمایی سبز شدن گیاهچه کلزای بهاره در مزرعه

ابوالفضل درخشان^۱، سید عطااله سیادت^{۲*}، عبدالمهدی بخشنده^۳، محمدرضا مرادی تلاوت^۴ و سید بهرام اندرزبان^۵

۱. دکتری زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

۲ و ۳. استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

۴. دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

۵. استادیار، بخش تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات،

آموزش و ترویج کشاورزی

(تاریخ دریافت: ۹۶/۱۲/۱۵ - تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۴/۳۰)

چکیده

پیش‌بینی دقیق سبز شدن گیاهچه در مزرعه، برای عملکرد مناسب مدل‌های رشد، بسیار مهم است. به‌منظور تعیین آستانه‌های پاسخ سبز شدن گیاهچه کلزای بهاره به دما، دو آزمایش مزرعه‌ای تکراری طی سال‌های زراعی ۹۵-۱۳۹۴ و ۹۶-۱۳۹۵ در مزرعه پژوهشی دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان اجرا شد. در این آزمایش‌ها، سبز شدن گیاهچه دو رقم کلزای بهاره (Hyola 401 و ساری گل) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در ۱۵ تاریخ کاشت (به‌عنوان محیط) مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل زمان دمایی بر مبنای تابع توزیع احتمال ویبول توسعه داده شد و آستانه‌های دمایی پاسخ سبز شدن دو رقم کلزا در شرایط مزرعه بر اساس این تابع مدل‌سازی شد. بر اساس پیش‌بینی‌های مدل، دمای پایه (T_b) برای سبز شدن گیاهچه هیبرید Hyola 401 معادل ۵/۸۳ درجه سانتی‌گراد و برای رقم ساری گل معادل ۴/۱۶ درجه سانتی‌گراد برآورد شد. زمان دمایی مورد نیاز برای شروع سبز شدن گیاهچه در دماهای زیر بهینه ($\theta_{T(0)}$) و زمان دمایی مورد نیاز برای تکمیل سبز شدن گیاهچه در دماهای بیشتر از حد بهینه (θ_{Tm}) بدون تفاوت معنی‌دار بین دو رقم به ترتیب ۵۵/۵۱ و ۵/۶۵ درجه سانتی‌گراد روز برآورد شد. دمای بیشینه برای ۵۰ درصد احتمال بازدارندگی گرمایی ($T_{m(50)}$) سبز شدن گیاهچه در هیبرید Hyola 401 و رقم ساری گل به ترتیب ۳۳/۰۲ و ۳۳/۳۰ درجه سانتی‌گراد برآورد شد. همچنین، دمای بهینه برای ۵۰ درصد سبز شدن گیاهچه در مزرعه ($T_{o(50)}$) برای هیبرید Hyola 401 و رقم ساری گل به ترتیب ۳۰/۹۹ و ۳۱/۲۲ درجه سانتی‌گراد تعیین شد.

واژه‌های استقرار گیاهچه؛ توزیع ویبول؛ دماهای بیشتر از حد بهینه و دماهای زیر بهینه.

Estimation of thermal thresholds for seedling emergence of spring canola in the field

Abolfazl Derakhshan¹, Seyed Aatolah Siadat^{2*}, Abdolmehdi Bakhshandeh³, Mohammad Reza Moradi-Telavat⁴ and Seyed Bahram Andarzian⁵

1. Ph.D. in Agronomy, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan

2 and 3. Professor, Department of Plant Production and Genetics Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan

4. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan

5. Assistant Professor, Seed and Plant Improvement Department, Research and Education Center of Agricultural and Natural Resources of Khuzestan, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO)

(Received: March 6, 2018 – Accepted: July 21, 2018)

ABSTRACT

Accurate prediction of seedling emergence in the field is crucial for the performance of growth models. In order to determine thresholds of seedling emergence response to temperature, two replicated field experiments were carried out at Agriculture and Natural Resource University of Khuzestan during 2015-2016 and 2016-2017. In these experiments, seedling emergence of two spring canola cultivars (Hyola 401 and Sarigol) was evaluated in a randomized complete block design with four replications in fifteen planting dates (as environment). Thermal-time model was developed based on the Weibull probability distribution function, and thermal thresholds for seedling emergence response of two spring canola cultivars in field conditions was modeled based on this function. Based on model outputs, the base temperature for seedling emergence (T_b) was estimated to be 5.83 °C in the hybrid Hyola 401 and 4.16 °C in the cultivar Sarigol. The thermal-time required to initiate seedling emergence at sub-optimal temperature range ($\theta_{T(0)}$) and the thermal-time needed to complete seedling emergence at supra-optimal temperature regimes without significant differences between two cultivars was estimated to be 55.51 and 5.65 °C d, respectively. Maximum temperature for the 50% probability of the thermoinhibition of seedling emergence ($T_{m(50)}$) in hybrid Hyola 401 and cultivar Sarigol was estimated to be 33.02 and 33.30 °C, respectively. The optimum temperature for 50% seedling emergence in the field ($T_{o(50)}$) for hybrid Hyola 401 and cultivar Sarigol was determined to be 30.99 and 31.22 °C, respectively.

Keywords: Seedling establishment; Weibull distribution; Sub-optimal temperatures; Supra-optimal temperatures.

* Corresponding author E-mail: seyedatasiadat@asnrkh.ac.ir

مقدمه

سبز شدن گیاهچه به‌طور محتمل مهم‌ترین رویداد فنولوژیکی در چرخه زندگی است که بر رشد، نمو و بهره‌وری یک گیاه زراعی یک‌ساله تأثیر می‌گذارد (Soltani & Sinclair, 2011). ظهور سریع، یکنواخت و کامل گیاهچه‌های قوی در مزرعه می‌تواند با کوتاه کردن زمان از کاشت تا تکمیل پوشش زمین و استقرار ساختار مطلوب سایه‌انداز منجر به افزایش عملکرد دانه شود (Forcella et al., 2006b; Soltani et al., 2000). دقت پیش‌بینی سبز شدن گیاهچه در مزرعه برای عملکرد مناسب مدل‌های رشد نیز بسیار مهم است. همچنین، مدل‌های رقابت گیاه زراعی - علف‌هز ممکن است حساسیت ویژه‌ای به خطاهای مرتبط با نادرستی پیش‌بینی ظهور گیاهچه در مزرعه داشته باشند.

زمان سبز شدن و استقرار گیاهچه یک گیاه زراعی یک‌ساله در مزرعه، تحت تأثیر عوامل زیست‌محیطی (مانند دمای خاک، رطوبت خاک، تراکم خاک و کیفیت هوای خاک)، زیستی (قدرت بذر) و مدیریت زراعی (عمق کاشت بذر) قرار می‌گیرد (Soltani et al., 2006b; Meenken et al., 2016). در میان این عوامل، دمای خاک به‌طور محتمل مهم‌ترین، مجزاترین و قابل تشخیص‌ترین نیروی محرکه مؤثر بر ظهور گیاهچه در مزرعه است (Forcella et al., 2013; Derakhshan et al., 2000). زمان دمایی (Thermal time) خاک را می‌توان به‌طور مستقیم برای پیش‌بینی سبز شدن گیاهچه در مزرعه مورد استفاده قرار داد، زیرا بذره‌های یک گیاه زراعی از نظر ژنتیکی به نسبت همگن هستند و عموماً به‌طور مستقیم در خاک مرطوب و در عمق دقیقی کشت می‌شوند (Forcella et al., 2000). پاسخ سبز شدن گیاهچه در مزرعه به دما را می‌توان بر مبنای سرعت ظهور گیاهچه مدل‌سازی و توسط سه دمای آستانه تعریف نمود: دمای پایه (T_b) که در دماهای کمتر از آن، سبز شدن گیاهچه رخ نمی‌دهد، دمای بهینه (T_0) که در آن بیشترین سرعت و درصد سبز شدن مشاهده می‌شود و دمای بیشینه یا سقف (T_m) که در دماهای بالاتر از آن سبز شدن متوقف می‌شود (Garcia-Huidobro et al., 1982).

مدل‌های ریاضی متعددی برای توصیف اثر دما بر پیشرفت فرآیند نمو توسعه یافته و مورد استفاده قرار گرفته

است (Garcia-Huidobro et al., 1982; Yin et al., 1995; Soltani et al., 2006a; McMaster et al., 2008). Soltani et al. (2006b) سه مدل رگرسیونی دو تکه‌ای، بتا و دندان‌مانند را برای مدل‌سازی زمان سبز شدن گیاهچه نخود (*Cicer arietinum* L.) در مزرعه مقایسه و تابع دندان‌مانند را برای این منظور انتخاب کردند. بر اساس این تابع، سرعت نسبی نمو در T_b یا دماهای کمتر از آن صفر است. سرعت نسبی نمو در پاسخ به افزایش دما از T_b تا دمای بهینه زیرین (T_{01}) به‌طور خطی افزایش و با افزایش بیشتر دما تا دمای بهینه بالایی (T_{02}) ثابت می‌ماند. در دماهای بالاتر از T_{02} ، سرعت نسبی نمو به‌طور خطی کاهش و در T_m یا دماهای بالاتر از آن به صفر می‌رسد (Soltani et al., 2014; Derakhshan et al., 2006b). با این حال، Jame & Cutforth (2004) نشان دادند که منحنی پاسخ سرعت نمو گیاه به دما غیرخطی است. Wang et al. (2009) از مدل بتای اصلاح‌شده برای پیش‌بینی زمان تا ۵۰ درصد سبز شدن گیاهچه گندم (*Triticum aestivum* L.) در مزرعه استفاده کردند. در بسیاری از مدل‌های رشد مانند CERES (Ritchie & Otter, 1985) و APSIM (Keating et al., 2003) فرض شده است که سرعت سبز شدن گیاهچه در دو سوی T_0 به‌صورت خطی به دما وابسته است. اطلاعات دقیقی در مورد پاسخ سبز شدن کلزای بهاره به دما در شرایط مزرعه در دسترس نیست. در این مطالعه، رویکرد جدیدی برای مدل‌سازی سبز شدن دو رقم کلزای بهاره (*Brassica napus* L.) در مزرعه ارائه شد. برای این منظور، مدل زمان دمایی (Garcia-Huidobro et al., 1982) بر مبنای تابع توزیع احتمال ویبول توسعه یافت و آستانه‌های پاسخ سبز شدن دو رقم کلزا به دما در شرایط مزرعه بر اساس این تابع مدل‌سازی شد.

مواد و روش‌ها

دو آزمایش مزرعه‌ای طی سال‌های ۹۵-۱۳۹۴ و ۹۶-۱۳۹۵ در مزرعه پژوهشی دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان واقع در شهر ملاتانی اجرا شد. شهر ملاتانی در ۳۵ کیلومتری شمال شرقی اهواز و در حاشیه شرقی رودخانه کارون با عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۳۶ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۵۳ دقیقه شرقی و

صرف شده (تعداد روز) برای رسیدن سبز شدن تجمعی به زیرجمعیت های ۱۰، ۵۰ و ۹۰ درصد از حداکثر سبز شدن گیاهچه در هر تاریخ کاشت، با درون یابی از منحنی پیشرفت این فرآیند در برابر زمان محاسبه شد (Soltani *et al.*, 2006b). سرعت سبز شدن (R_e)؛ عکس زمان سبز شدن برای هر کسر معین e (t_e) به عنوان تابعی از دما به طور جداگانه برای هر رقم و کسر سبز شدن ترسیم شد و داده ها جهت اجرای رویه های رگرسیون غیرخطی توسط بازرسی بصری به دو گروه دماهای زیر بهینه و بیشتر از حد بهینه تقسیم شدند (Hardegree, 2006). برای هر رقم، چنانچه کل بذرها کشت شده در تاریخ کاشت های مختلف (رژیم های دمایی گوناگون) به عنوان یک جمعیت در نظر گرفته شود، سبز شدن گیاهچه درون این جمعیت به دلیل تنوع پاسخ هر بذر به دما یا تنوع سرعت ظهور گیاهچه در یک تاریخ کاشت معین و کل تاریخ کاشت های مورد ارزیابی از یک تابع توزیع تجمعی (Cumulative distribution function; cdf) تبعیت می کند. در رویکرد زمان دمایی فرض می شود که سرعت سبز شدن گیاهچه برای هر کسر بذری معین e (R_e) با افزایش دما از T_b تا T_0 به طور خطی افزایش و با افزایش بیشتر دما تا T_m به طور خطی کاهش می یابد. در این مطالعه، تنوع زمان سبز شدن گیاهچه در مزرعه برای هر کسر e در دماهای زیر بهینه به عنوان پیامدی از تنوع مقادیر زمان دمایی مورد نیاز برای سبز شدن آن کسر ($\theta_{T(e)}$) و T_b برای سبز شدن گیاهچه کل جمعیت ثابت در نظر گرفته شد. در دماهای بیشتر از حد بهینه، تنوع R_e به عنوان پیامدی از تنوع T_m درون آن جمعیت ($T_{m(e)}$) و زمان دمایی مورد نیاز برای تکمیل سبز شدن گیاهچه (θ_{T_m}) ثابت فرض شد. بنابراین، در دماهای زیر بهینه (Garcia-Huidobro *et al.*, 1982):

$$\theta_{T(e)} = (T - T_b) t_e \quad (1)$$

یا

$$R_e = 1/t_e = (T - T_b) / \theta_{T(e)} \quad (2)$$

در دماهای بیشتر از حد بهینه

$$\theta_{T_m} = (T_{m(e)} - T) t_e \quad (3)$$

یا

$$R_e = 1/t_e = (T_{m(e)} - T) / \theta_{T_m} \quad (4)$$

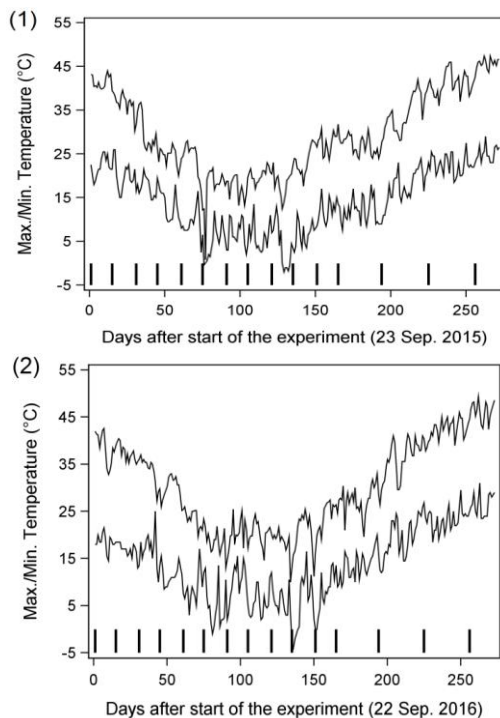
ارتفاع ۲۳ متر از سطح دریا واقع شده است. این دو آزمایش شامل تعدادی تاریخ کاشت متوالی بود که از اول مهر هر سال شروع و تا پایان خرداد سال بعد ادامه یافت. در این آزمایش ها، پاسخ سبز شدن گیاهچه دو رقم کلزای بهاره (هیبرید Hyola 401 و رقم آزادگرده افشان ساری گل) در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با چهار تکرار در ۱۵ تاریخ کاشت (به عنوان محیط) مورد ارزیابی قرار گرفت. تاریخ های کاشت شامل اول مهر، ۱۵ مهر، اول آبان، ۱۵ آبان، اول آذر، ۱۵ آذر، اول دی، ۱۵ دی، اول بهمن، ۱۵ بهمن، اول اسفند، ۱۵ اسفند، ۱۵ فروردین، ۱۵ اردیبهشت و ۱۵ خرداد بود. تاریخ های کاشت انتخاب شده در این آزمایش ها، نشان دهنده تاریخ های کاشت متداول در منطقه نیست، بلکه به منظور ایجاد محیط های مختلف رشدی با رژیم های دمایی گوناگون جهت ارزیابی پاسخ سبز شدن گیاهچه انتخاب شدند. متوسط وزن هزار دانه (\pm خطای استاندارد) هیبرید Hyola 401 معادل $3/75 (\pm 0/11)$ گرم و برای رقم ساری گل $3/35 (\pm 0/05)$ گرم بود. درصد رس، سیلت و شن لایه ۳۰ سانتی متر بالایی خاک محل آزمایش به ترتیب ۴۳، ۴۰ و ۱۷ درصد و وزن مخصوص ظاهری خاک و میزان اسیدیته آن به ترتیب $1/38$ گرم بر سانتی متر مکعب و $7/3$ بود. آزمایش در شرایط آبیاری بهینه انجام شد، به طوری که در طی دوره ارزیابی سبز شدن گیاهچه از وقوع کمبود یا بیش بود آب در کرت های آزمایشی ممانعت شد. هر کرت آزمایشی شامل ۱۲ خط کاشت به طول ۳ متر بود. کشت از نوع مسطح بود و فاصله بین خطوط کاشت ۲۵ سانتی متر در نظر گرفته شد. کاشت بذرها به صورت دستی و در عمق حدود ۱ تا $1/5$ سانتی متری خاک انجام شد. با در نظر گرفتن قوه نامیه بذرها، تعداد ۱۵۰ بذر برای کاشت روی هر خط کاشت در نظر گرفته شد. دو ردیف کناری و ۲۵ سانتی متر ابتدایی و انتهایی هر کرت به عنوان حاشیه در نظر گرفته شد. یک متر طول از هر یک از ۸ خط میانی هر کرت برای تعیین تعداد گیاهچه های ظاهر شده در سطح خاک، علامت گذاری شد. شمارش تعداد گیاهچه های ظاهر شده در سطح خاک به صورت روزانه انجام شد. رؤیت لپه ها در سطح خاک به عنوان معیار سبز شدن گیاهچه در نظر گرفته شد.

درصد سبز شدن تجمعی برای هر رقم و تاریخ کاشت (رژیم دمایی) در هر روز محاسبه گردید. سپس، زمان

به روش بهینه‌سازی پیش‌فرض Dual Quasi-Newton در نرم‌افزار SAS انجام شد.

نتایج و بحث

شرایط دمایی در طی دوره اجرای آزمایش‌های مزرعه‌ای در شکل ۱ ارائه شده است. حداقل دمای محل اجرای آزمایش در سال نخست بین ۲- تا ۲۹ درجه سانتی‌گراد و در سال دوم بین ۴- تا ۳۱ درجه سانتی‌گراد متغیر بود. دمای حداکثر در سال نخست اجرای آزمایش بین ۱۲/۲ تا ۴۷/۴ درجه سانتی‌گراد و در سال دوم بین ۱۰ تا ۴۹/۴ درجه سانتی‌گراد ثبت شد. در طی دوره اجرای آزمایش‌های مزرعه‌ای احتمال وقوع میانگین دمای روزانه کمتر از ۱۰ درجه سانتی‌گراد معادل ۵/۳۳ درصد، برای دماهای متوسط بین ۱۰ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد معادل ۴۰/۹۹ درصد، برای دماهای متوسط بین ۲۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد معادل ۳۱/۲۵ درصد و برای دماهای متوسط بین ۳۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد معادل ۲۲/۴۳ درصد بود.



شکل ۱- دماهای حداقل و حداکثر هوا در طی اجرای آزمایش‌های مزرعه‌ای در سال‌های ۹۵-۱۳۹۴ (۱) و ۹۶-۱۳۹۵ (۲). خطوط عمودی کوتاه تاریخ‌های کاشت را نشان می‌دهد.

Figure 1. Minimum and maximum air temperatures during field experiments in 2015-2016 (1) and 2016-2017 (2). Short vertical lines indicate sowing dates.

در این مطالعه، سبز شدن مشاهده‌شده بر اساس تابع توزیع تجمعی توزیع احتمال ویبول شبیه‌سازی شد. در دماهای زیر بهینه، توزیع تجمعی وارونه (Inverse cumulative distribution; percentage point function; ppf) توزیع احتمال ویبول جهت پیش‌بینی $\theta_{T(e)}$ و cdf این توزیع جهت پیش‌بینی درصد سبز شدن e در مدل زمان دمایی به شرح زیر تعریف می‌شوند:

$$\theta_{T(e)} = \mu + \sigma [-\ln(1-e)]^{\frac{1}{\lambda}} \quad (5)$$

$$e = 1 - \left[\text{EXP} \left(- \left(\frac{(T - T_b) t_e - \mu}{\sigma} \right)^{\lambda} \right) \right] \quad (6)$$

که در این روابط μ ، σ و λ به ترتیب پارامترهای جایگاه (Location)، پراکنش (Scale) و شکل (Shape) توزیع $\theta_{T(e)}$ در دماهای زیر بهینه هستند. پارامتر پراکنش مشابه پارامتر انحراف معیار در توزیع نرمال است و همراه با پارامتر شکل اندازه پراکنش $\theta_{T(e)}$ را برای این توزیع برآورد می‌کند. پارامتر شکل چگونگی خمش منحنی را مشخص می‌کند و به توزیع شکل‌پذیری بالایی می‌دهد (Derakhshan *et al.*, 2018c). در دماهای بیشتر از حد بهینه، cdf و ppf احتمال ویبول برای پیش‌بینی $T_{m(e)}$ و درصد سبز شدن e در مدل زمان دمایی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$T_{m(e)} = \mu + \sigma [-\ln(e)]^{\frac{1}{\lambda}} \quad (7)$$

$$e = \text{EXP} \left(- \left(\frac{\left(T + \left(\frac{\theta_{T_m}}{t_e} \right) - \mu \right)}{\sigma} \right)^{\lambda} \right) \quad (8)$$

که در این روابط μ ، σ و λ به ترتیب پارامترهای جایگاه، پراکنش و شکل توزیع $T_{m(e)}$ در دماهای بیشتر از حد بهینه هستند. از آنجایی که توزیع تجمعی توزیع احتمال ویبول با گذشت زمان در نهایت به ۱ می‌رسد، داده‌های ثبت‌شده برای هر رقم، بر اساس حداکثر درصد سبز شدن مشاهده‌شده برای آن رقم در تاریخ کاشت‌های مختلف نرمالیزه شد (یعنی حداکثر درصد سبز شدن معادل ۱ در نظر گرفته شد) و سپس مدل زمان دمایی به داده‌های دوره‌های زمانی سبز شدن گیاهچه در دماهای مختلف برازش داده شد. برازش مدل با رویه PROC NL MIXED

سبز شدن گیاهچه یکی از ویژگی‌های ثابت هر دو جمعیت بذری مورد مطالعه بود. ما فرض متغیر بودن T_b در داخل جمعیت‌های مطالعه‌شده را مورد ارزیابی قرار دادیم اما دقت برازش مدل با چنین فرضی به میزان قابل توجهی کاهش یافت. هرچند برخی محققین گزارش داده‌اند که T_b ممکن است در داخل جمعیت به‌طور جزئی تغییر کند، اما باید توجه داشت که بسیاری از این مدل‌ها برای گونه‌های غیر زراعی توسعه یافته است (Forcella et al., 2000; Wang et al., 2009; Hardegree, 2006; Chantre et al., 2004). این وضعیت ممکن است به دلیل وجود تنوع ژنتیکی داخل جمعیت‌های غیر زراعی باشد و برای *Setaria viridis* (Wang et al., 1995) و *Eurotia lanata* (Wang et al., 2004) گزارش شده است. مقادیر T_b به دست آمده در این تحقیق بزرگتر از مقادیر گزارش شده توسط Andreucci et al. (2016) برای جوانه‌زنی ارقام زمستانه علوفه‌ای کلم کالی (بین صفر تا ۱ درجه سانتی‌گراد)، کلزا (*B. oleracea* spp. *acephala*) (بین صفر تا ۳ درجه سانتی‌گراد) و شلغم (*B. rapa* spp. *rapa*) (بین ۳ تا ۴ درجه سانتی‌گراد) است. Lakzaei et al. (2017) میزان T_b سبز شدن گیاهچه پنج رقم بهاره کلزا را بر مبنای تابع دوتکه‌ای بین ۳/۴ (رقم زرفام) تا ۵/۱ درجه سانتی‌گراد (هیبرید Hyola 401)، بر مبنای تابع دندان‌مانند بین ۲/۵ (هیبرید Hyola 401) تا ۴/۹ درجه سانتی‌گراد (رقم زرفام) و بر مبنای تابع بتا بین ۴/۲ (هیبرید Hyola 308) تا ۵/۶ درجه سانتی‌گراد (هیبرید Hyola 401) گزارش کردند. Derakhshan et al. (2018c) با برازش هشت مدل جوانه‌زنی-گرمایی به دوره‌های زمانی جوانه‌زنی دو رقم کلزای بهاره RGS003 و ساری گل در پاسخ به یازده دمای ثابت میزان T_b جوانه‌زنی این دو رقم را به ترتیب ۵/۸۴ و ۵/۶۰ درجه سانتی‌گراد گزارش کردند.

بین دو رقم کلزای بهاره از نظر برآورد پارامتر μ توزیع $\theta_{T(e)}$ تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد و برای دو رقم به‌طور متوسط در حدود ۵۵/۵۱ درجه سانتی‌گراد روز به دست آمد (جدول ۱). در دماهای زیر بهینه، این پارامتر زمان دمایی مورد نیاز برای شروع سبز شدن گیاهچه در مزرعه ($\theta_{T(0)}$) را نشان می‌دهد. برآورد σ توزیع $\theta_{T(e)}$ برای رقم ساری گل به‌طور معنی‌داری بزرگ‌تر از برآورد این پارامتر برای هیبرید Hyola 401 بود، اما تفاوتی میان این دو رقم از نظر برآورد

در هر دو سال اجرای آزمایش، هیچ گیاهچه‌ای از بذری کشت شده از هر دو رقم کلزای مورد مطالعه در تاریخ کاشت ۱۵ خرداد سبز نشد. متوسط دمای حداقل و حداکثر روزانه هوا در طی دوره ارزیابی سبز شدن گیاهچه در این تاریخ کاشت در سال نخست به ترتیب ۲۵/۰۱ و ۴۵/۶۵ (به‌طور متوسط ۳۵/۳۳) درجه سانتی‌گراد و در سال دوم به ترتیب ۲۶/۴۴ و ۴۶/۲۶ (به‌طور متوسط ۳۶/۳۵) درجه سانتی‌گراد بود (شکل ۱). داده‌های این تاریخ کاشت در تجزیه آماری مورد استفاده قرار نگرفت. برای رقم ساری گل، کمترین تعداد روز تا ۵۰ درصد سبز شدن گیاهچه در تاریخ‌های کاشت ۱۵ مهر ۱۳۹۴ (۲/۶۶ روز با متوسط دمای روزانه ۳۰/۸۶ درجه سانتی‌گراد)، اول مهر ۱۳۹۴ (۲/۷۰ روز با متوسط دمای روزانه ۳۰/۵۴ درجه سانتی‌گراد) و اول مهر ۱۳۹۵ (۲/۷۹ روز با متوسط دمای روزانه ۲۹/۶۶ درجه سانتی‌گراد) به دست آمد. همچنین، بیشترین تعداد روز تا ۵۰ درصد سبز شدن این رقم (۹/۹۸ روز) مربوط به تاریخ کاشت اول بهمن ۱۳۹۴ (با متوسط دمای روزانه ۱۱/۳۵ درجه سانتی‌گراد) بود. برای هیبرید Hyola 401 نیز کمترین و بیشترین تعداد روز تا ۵۰ درصد سبز شدن به ترتیب در تاریخ‌های کاشت ۱۵ مهر ۲/۷۲ (روز) و اول بهمن ۱۳۹۴ (۱۲/۵۴ روز) به دست آمد. بررسی داده‌های ثبت شده نشان داد که سرعت سبز شدن گیاهچه هر دو رقم کلزا در دمای متوسط ۳۰/۸۶ درجه سانتی‌گراد حداکثر بود و در دماهای کمتر و بیشتر از این حد کاهش یافت. از این رو، این دما به عنوان T_0 فرض و بر این اساس کل داده‌ها به دو گروه زیر بهینه و بیشتر از حد بهینه تقسیم شد. برآورد پارامترهای مربوط به برازش مدل زمان دمایی به داده‌های دوره‌های زمانی سبز شدن گیاهچه هر یک از دو رقم کلزای بهاره در دماهای زیر بهینه در جدول ۱ و برای دماهای بیشتر از حد بهینه در جدول ۲ ارائه شده است. مدل زمان دمایی الگوهای سبز شدن گیاهچه هر دو رقم کلزا در پاسخ به دماهای کمتر و بیشتر از حد بهینه را به درستی پیش‌بینی کرد، به طوری که خطای برازش مدل در دماهای زیر بهینه کمتر از ۸ درصد و برای دماهای بیشتر از حد بهینه کمتر از ۵ درصد بود. T_b سبز شدن گیاهچه رقم ساری گل معادل ۴/۱۶ درجه سانتی‌گراد برآورد شد که به‌طور معنی‌داری کوچک‌تر از T_b به دست آمده برای هیبرید Hyola 401 (۵/۸۳ درجه سانتی‌گراد) بود. دمای پایه برای

داد که توزیع $\theta_{T(e)}$ برای هر دو رقم کلزای بهاره چوله به راست است ($\lambda < 2.6$). بدان معنی که جمعیت بذری دارای ذخایر بزرگ‌تری از بذریایی است که مقادیر $\theta_{T(e)}$ کوچک‌تری دارند و از این رو در دماهای زیر بهینه سریع‌تر در مزرعه ظاهر می‌شوند (شکل ۲).

λ توزیع $\theta_{T(e)}$ مشاهده نشد (جدول ۱؛ شکل ۲). بر این اساس، اندازه پراکنش $\theta_{T(e)}$ برای هیبرید Hyola 401 معادل ۴۲/۸۲ درجه سانتی‌گراد روز و برای رقم ساری‌گل معادل ۴۵/۵۸ درجه سانتی‌گراد روز به دست آمد. واضح است که هرچه اندازه پراکنش $\theta_{T(e)}$ کوچک‌تر باشد یکنواختی سبز شدن گیاهچه در مزرعه بیشتر خواهد بود. پارامتر λ نشان

جدول ۱- برآورد پارامترهای مربوط به برازش مدل زمان دمایی ویبول به داده‌های دوره‌های زمانی سبز شدن گیاهچه دو رقم کلزای بهاره در دماهای زیر بهینه.

Table 1- Estimated parameters for Weibull-based thermal-time model fitted to the seedling emergence time courses of two spring canola cultivars at sub-optimal temperatures.

Cultivar	Model parameters*				RMSE
	T_b (°C)	μ (°C d)	σ (°C d)	λ	
Hyola 401	5.83±0.02	55.61±0.44	18.55±0.46	1.83±0.05	0.0741
Sarigol	4.16±0.04	55.41±0.90	21.86±0.94	2.08±0.11	0.0774

* T_b = دمای پایه برای سبز شدن گیاهچه (درجه سانتی‌گراد)؛ μ = پارامتر جایگاه توزیع زمان دمایی زیر بهینه (درجه سانتی‌گراد روز)؛ σ = انحراف استاندارد توزیع زمان دمایی زیر بهینه (درجه سانتی‌گراد روز)؛ λ = پارامتر شکل توزیع زمان دمایی زیر بهینه؛ RMSE = ریشه میانگین مربعات خطا.

* T_b = Base temperature for seedling emergence (°C); μ = Location parameter of sub-optimal thermal-time distribution (°C d); σ = Standard deviation of sub-optimal thermal-time distribution (°C d); λ = Shape parameter of sub-optimal thermal-time distribution; RMSE = Root Mean Square Error.

جدول ۲- برآورد پارامترهای مربوط به برازش مدل زمان دمایی ویبول به داده‌های دوره‌های زمانی سبز شدن گیاهچه دو رقم کلزای بهاره در دماهای بیشتر از حد بهینه.

Table 2- Estimated parameters for Weibull-based thermal-time model fitted to the seedling emergence time courses of two spring canola cultivars at supra-optimal temperatures.

Cultivar	Model parameters*				RMSE
	θ_{T_m} (°C d)	μ (°C)	σ (°C)	λ	
Hyola 401	5.67±0.16	31.13±0.61	2.05±0.41	4.49±0.19	0.0493
Sarigol	5.63±0.21	31.70±0.43	1.75±0.21	4.04±0.18	0.0498

* θ_{T_m} = زمان دمایی لازم برای تکمیل سبز شدن گیاهچه در دماهای بیشتر از حد بهینه (درجه سانتی‌گراد روز)؛ μ = پارامتر جایگاه توزیع دماهای بیشینه (درجه سانتی‌گراد)؛ σ = انحراف استاندارد توزیع دماهای بیشینه (درجه سانتی‌گراد)؛ λ = پارامتر شکل توزیع دماهای بیشینه؛ RMSE = ریشه میانگین مربعات خطا.

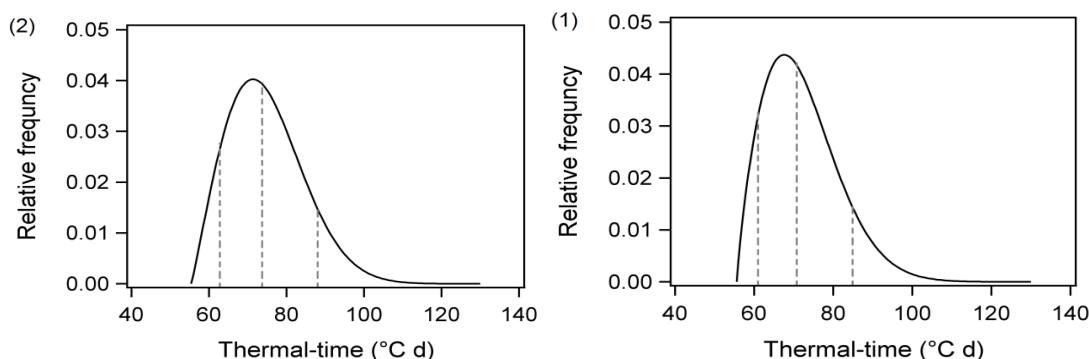
* θ_{T_m} = Thermal-time required to complete seedling emergence at supra-optimal temperatures (°C d); μ = Location parameter of maximum temperatures distribution (°C); σ = Standard deviation of maximum temperatures distribution (°C); λ = Shape parameter of maximum temperatures distribution; RMSE = Root Mean Square Error.

RMSE به دست آمده برای یک چنین مدلی برای هر دو رقم کلزا بیشتر از مقادیر گزارش شده در این مطالعه بود. به طور مشابه، Derakhshan *et al.* (2018a) با ارزیابی رهیافت‌های مختلف زمان دمایی در توصیف جوانه‌زنی سه رقم بهاره کلزا (ساری‌گل، دلگان و RGS003) نشان دادند که وقتی T_b و θ_{T_m} برای کل جمعیت بذری ثابت فرض شد و توزیع نرمال برای توصیف تنوع $\theta_{T(e)}$ در دماهای زیر بهینه و T_m در دماهای بیشتر از حد بهینه بکار رفت، مدل برازش بهتر و

بین دو رقم کلزای بهاره از نظر زمان دمایی مورد نیاز برای تکمیل سبز شدن گیاهچه در دماهای بیشتر از حد بهینه (θ_{T_m}) اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد و برای هر دو به طور متوسط در حدود ۵/۶۵ درجه سانتی‌گراد روز برآورد شد (جدول ۲). در برخی گزارش‌های قبلی θ_{T_m} در داخل جمعیت بذری متغیر فرض شده است (Hardegree, 2006). ما فرض توزیع θ_{T_m} در داخل جمعیت بذری و ثابت بودن T_m برای کل جمعیت را مورد آزمون قرار دادیم، اما مقادیر

دمای بیشینه‌ای که در آن کسر گیاهچه‌های سبز شده برابر ۱ است ($T_{m(1)}$) را نشان می‌دهد (Derakhshan *et al.*, 2018c). بذرها در دماهای فراتر از μ فرآیند بازدارندگی گرمایی نشان می‌دهند، یعنی با افزایش هر واحد دما از این حد سبز شدن گیاهچه کسر معینی از بذرها کشت شده در مزرعه کاهش می‌یابد (Derakhshan *et al.*, 2018b).

دقیق‌تری به داده‌های جوانه‌زنی هر سه رقم کلزا داشت. پارامتر μ توزیع $T_{m(e)}$ برای هیبرید Hyola 401 معادل ۳۱/۱۳ درجه سانتی‌گراد و برای رقم ساری گل معادل ۳۱/۷۰ درجه سانتی‌گراد برآورد شد که با در نظر گرفتن مقادیر خطای استاندارد برآورد اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند. در دماهای بیشتر از حد بهینه، پارامتر μ

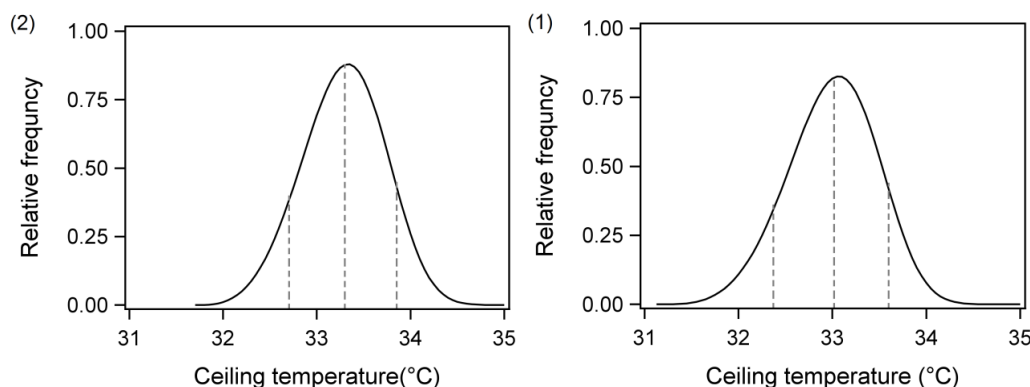


شکل ۲- تابع توزیع احتمال زمان دمایی زیر بهینه پیش‌بینی شده با مدل زمان دمایی ویبول برای سبز شدن گیاهچه دو رقم کلزای بهاره Hyola 401 (۱) و ساری گل (۲). خطوط عمودی از چپ به راست $\theta_{T(10)}$ ، $\theta_{T(50)}$ و $\theta_{T(90)}$ را نشان می‌دهند.

Figure 2- Probability distribution function of the predicted sub-optimal thermal-time with the Weibull-based thermal-time model for seedling emergence of two spring canola cultivars Hyola 401 (1) and Sarigol (2). Vertical lines from left to right shows $\theta_{T(10)}$, $\theta_{T(50)}$ and $\theta_{T(90)}$.

به‌کندی در مزرعه ظاهر می‌شوند. به‌عبارت‌دیگر، دامنه پاسخ سبز شدن این گیاه به دماهای بیشتر از حد بهینه در مقایسه با دماهای زیر بهینه بسیار کوچک‌تر است. به‌طوری‌که، اندازه پراکنش $T_{m(e)}$ برای هیبرید Hyola 401 معادل ۲/۸۹ درجه سانتی‌گراد و برای رقم ساری گل ۲/۵۵ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد (شکل ۳).

بین دو رقم کلزا از نظر برآورد σ و λ توزیع $T_{m(e)}$ اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۲). پارامتر λ نشان داد که توزیع $T_{m(e)}$ برای هر دو رقم کلزای بهاره مورد مطالعه تا حدودی چوله به چپ است ($\lambda > 3.7$; شکل ۳). بدان معنی که هر دو جمعیت مورد مطالعه دارای ذخایر بیشتری از بذرهایی با مقادیر $T_{m(e)}$ بزرگ‌تری هستند و از این‌رو حتی در کمترین دماهای بیشتر از حد بهینه



شکل ۳- تابع توزیع احتمال دماهای بیشینه پیش‌بینی شده با مدل زمان دمایی ویبول برای سبز شدن گیاهچه دو رقم کلزای بهاره Hyola 401 (۱) و ساری گل (۲). خطوط عمودی از راست به چپ $T_{m(10)}$ ، $T_{m(50)}$ و $T_{m(90)}$ را نشان می‌دهند.

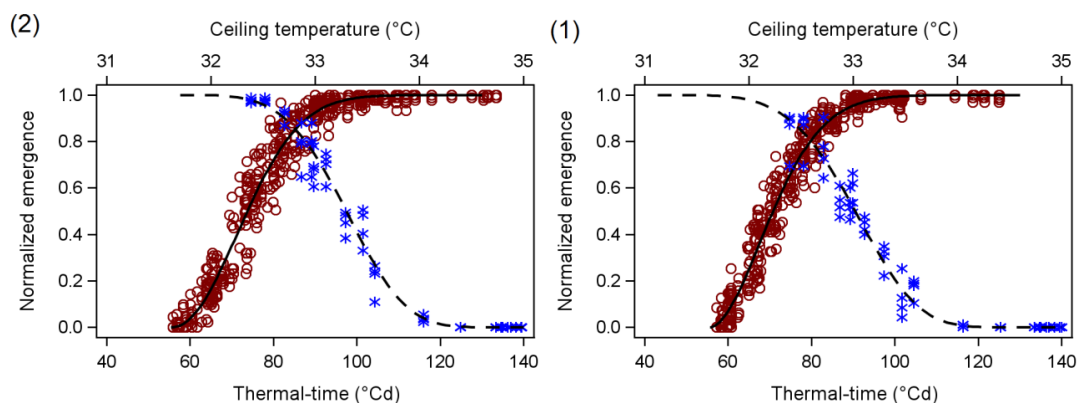
Figure 3- Probability distribution function of the predicted maximum temperatures by the Weibull-based thermal-time model for seedling emergence of two spring canola cultivars Hyola 401 (1) and Sarigol (2). Vertical lines from right to left shows $T_{m(10)}$, $T_{m(50)}$ and $T_{m(90)}$.

درجه سانتی‌گراد تعیین شد (شکل ۵). مقادیر T_0 به‌دست آمده در این مطالعه برای سبز شدن دو رقم بهاره کلزا کمی بالاتر از T_0 گزارش شده برای جوانه‌زنی ارقام زمستانه علوفه‌ای کلم کالی (بین ۲۵ تا ۲۷ درجه سانتی‌گراد)، اما مشابه با گزارش T_0 گزارش شده برای جوانه‌زنی ارقام زمستانه علوفه‌ای شلغم (۳۱ درجه سانتی‌گراد) و کلزا (بین ۲۹ تا ۳۳ درجه سانتی‌گراد) بود (Andreucci *et al.*, 2016). به‌طور مشابه، Derakhshan *et al.* (2018c) $T_{0(10)}$ را $T_{0(50)}$ و $T_{0(90)}$ برای جوانه‌زنی رقم کلزای بهاره RGS003 را به‌ترتیب معادل ۳۲/۶۵، ۳۲/۱۰ و ۳۱/۹۱ درجه سانتی‌گراد و برای جوانه‌زنی رقم ساری‌گل به‌ترتیب معادل ۳۲/۲۷، ۳۱/۹۱ و ۳۱/۸۳ درجه سانتی‌گراد گزارش کردند. Lakzaei *et al.* (2017) میزان T_0 برای سبز شدن گیاهچه ارقام کلزای بهاره در مزرعه را بر مبنای تابع دوتکه‌ای بین ۲۵/۹ تا ۲۶/۸ درجه سانتی‌گراد و بر مبنای تابع بتا بین ۲۶/۴ تا ۲۷/۲ درجه سانتی‌گراد گزارش کردند. همچنین، آن‌ها بر مبنای تابع دندان‌مانند T_{01} برای سبز شدن گیاهچه ارقام بهاره کلزا را بین ۲۱/۶ تا ۲۶/۵ و T_{02} را بین ۲۹/۶ تا ۳۱/۸ درجه سانتی‌گراد گزارش کردند. با این‌حال، این محققین T_m برای سبز شدن گیاهچه را معادل ۴۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفتند (که بر خلاف نتایج به‌دست آمده در اینجا است) و برازش مدل به داده‌ها با یک پارامتر از پیش تعیین شده انجام گرفت که از اعتبار برآورد سایر پارامترها به‌ویژه T_0 کم خواهد کرد (Lakzaei *et al.*, 2017). در مطالعه قبلی نیز Soltani *et al.* (2006b) دمایی بیشینه برای سبز شدن گیاهچه نخود در مزرعه را معادل ۴۰ درجه سانتی‌گراد فرض کردند و این دما را به‌عنوان حد بالایی پاسخ فرآیندهای نموی گیاه نخود به دما معرفی نمودند؛ با این‌حال، مشابه با نتایج به‌دست آمده در این تحقیق Derakhshan *et al.* (2018b) پاسخ بازدارندگی گرمایی جوانه‌زنی شش رقم کلزای بهاره در دماهای بیشتر از حد بهینه را مدل‌سازی و گزارش کردند که ارقام زودرس کلزا در دماهای متوسط ۳۳/۴۳، ۳۴/۰۰ و ۳۴/۴۸ درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب ۱، ۵۰ و ۹۹ درصد بازدارندگی گرمایی جوانه‌زنی نشان دادند. درحالی‌که، بازدارندگی گرمایی موقت جوانه‌زنی در ارقام میان‌رس کلزا در دماهای ۳۳/۴۳، ۳۴/۳۵ و ۳۵/۳۶ درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب به ۱، ۵۰ و ۹۹

رابطه بین زمان دمایی (θ_T) مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده و دمایی بیشینه (T_m) مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده با مدل زمان دمایی ویبول برای کسرهای مختلف سبز شدن گیاهچه (e) هر دو رقم کلزای بهاره در شکل ۴ ارائه شده است. بر اساس توزیع تجمعی وارونه توزیع ویبول، زمان دمایی مورد نیاز در دماهای زیر بهینه برای رسیدن میزان سبز شدن گیاهچه هیبرید Hyola 401 به ۱۰ ($\theta_{T(10)}$)، ۵۰ ($\theta_{T(50)}$) و ۹۰ ($\theta_{T(90)}$) درصد نهایی به‌ترتیب معادل ۶۱/۰۲، ۷۰/۷۸ و ۸۴/۹۰ درجه سانتی‌گراد روز و برای رقم ساری‌گل به‌ترتیب معادل ۶۲/۸۲، ۷۳/۷۴ و ۸۸/۰۷ درجه سانتی‌گراد روز برآورد شد (شکل ۲ و ۴). $\theta_{T(e)}$ شاخصی است از سرعت سبز شدن گیاهچه در سطوح مختلف دماهای زیر بهینه است و هرچه کوچکتر باشد سرعت سبز شدن گیاهچه برای آن رقم بالاتر خواهد بود (Derakhshan *et al.*, 2016). همچنین، بر اساس توزیع تجمعی وارونه توزیع ویبول دمایی بیشینه برای احتمال ۱۰ ($T_{m(10)}$)؛ ۹۰ درصد احتمال بازدارندگی گرمایی سبز شدن گیاهچه، ۵۰ ($T_{m(50)}$)؛ ۵۰ درصد احتمال بازدارندگی گرمایی و ۹۰ درصد ($T_{m(90)}$)؛ ۱۰ درصد احتمال بازدارندگی گرمایی) سبز شدن گیاهچه هیبرید Hyola 401 به‌ترتیب معادل ۳۳/۶۰، ۳۳/۰۲ و ۳۲/۳۷ درجه سانتی‌گراد و برای رقم ساری‌گل به‌ترتیب معادل ۳۳/۸۵، ۳۳/۳۰ و ۳۲/۷۰ درجه سانتی‌گراد برآورد شد (شکل ۳ و ۴). همچنین، سبز شدن گیاهچه هیبرید Hyola 401 در دمای ۳۴/۰۱ درجه سانتی‌گراد و در رقم ساری‌گل در دمای ۳۴/۲۵ درجه سانتی‌گراد به‌طور کامل متوقف شد ($T_{m(0)}$). این ضرایب به‌همراه سایر خروجی‌های مدل زمان دمایی ویبول جهت محاسبه سرعت سبز شدن گیاهچه زیرجمعیت‌های مختلف (روابط ۲ و ۴) استفاده شد (شکل ۵). مقادیر T_0 برای هر دو رقم کلزا در هر زیرجمعیت از طریق محاسبه نقطه قطع توابع پاسخ دمایی زیر بهینه و بیش‌تر از حد بهینه تعیین شد (Hardegee, 2006). مقادیر T_0 محاسبه‌شده برای کسرهای مختلف سبز شدن گیاهچه ثابت نبود. T_0 برای ۱۰ ($T_{0(10)}$)، ۵۰ ($T_{0(50)}$) و ۹۰ درصد ($T_{0(90)}$) سبز شدن گیاهچه رقم Hyola 401 به‌ترتیب معادل ۳۱/۲۳، ۳۰/۹۹ و ۳۰/۷۰ درجه سانتی‌گراد و برای رقم ساری‌گل به‌ترتیب معادل ۳۱/۴۰، ۳۱/۲۲ و ۳۰/۹۸

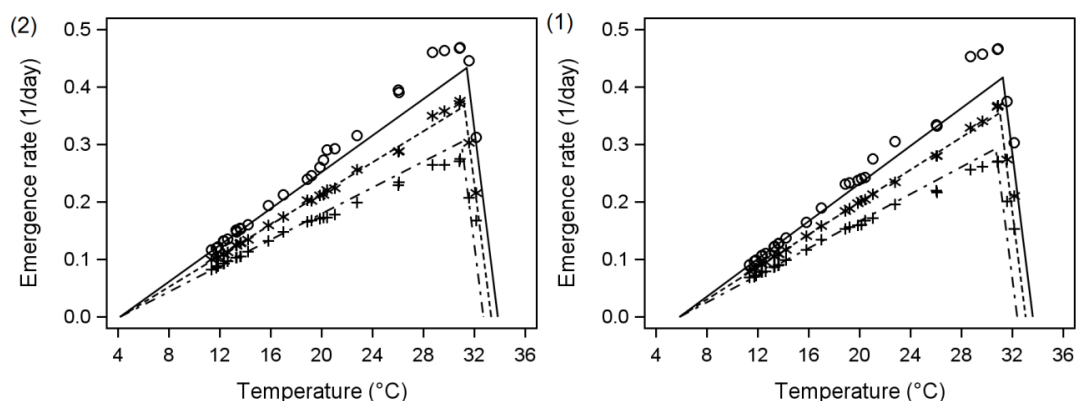
زیرجمعیت‌ها به نحو خاصی تغییر کرد. برای مثال، T_0 در ۱۵ گونه برای کسرهای بزرگتر جوانه‌زنی کوچک‌تر بود (Watt & Bloomberg, 2012). این نوع همبستگی منفی در مورد سبز شدن گیاهچه هر دو رقم کلزای مورد مطالعه در این پژوهش مشاهده شد (شکل ۵).

درصد رسیدن از این‌رو، با توجه به دامنه کوچک پاسخ کلزا به دماهای بیشتر از حد بهینه به‌نظر می‌رسد که در نظر گرفتن دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان حد بالایی پاسخ فرآیندهای نمو این گیاه به دما صحیح نباشد. Watt & Bloomberg (2012) با بررسی پاسخ سرعت جوانه‌زنی به دما گزارش کردند که در ۲۳ مورد از ۲۹ گونه T_0 در میان



شکل ۴- رابطه بین زمان دمایی مشاهده‌شده (○) و پیش‌بینی‌شده (خط) و دمای بیشینه مشاهده‌شده (*) و پیش‌بینی‌شده (خط بریده) با مدل زمان دمایی ویبول برای کسرهای مختلف سبز شدن گیاهچه دو رقم کلزای بهاره Hyola 401 (۱) و ساری گل (۲).

Figure 4- Relationship between the observed (○) and predicted (line) thermal-time and the observed (*) and predicted (dashed line) ceiling temperature with the Weibull-based thermal-time model for different seedling emergence fractions of two spring canola cultivars Hyola 401 (1) and Sarigol (2).



شکل ۵- رابطه بین سرعت سبز شدن مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده و دما برای کسرهای سبز شدن ۱۰ (○)، ۵۰ (*) و ۹۰ (+) درصد در ارقام کلزای Hyola 401 (۱) و ساری گل (۲).

Figure 5- Relationship between the observed and predicted emergence rate and temperature for seedling emergence fractions of 10 (○), 50 (*) and 90% (+) in canola cultivars Hyola 401 (1) and Sarigol (2).

حدودی توانایی بیشتری برای سبز شدن در بستر بذریه‌های سرد داشت. علاوه بر این، این اختلاف‌ها از نظر T_b مطابق با تفاوت‌های کوچک مشاهده‌شده میان دو رقم از نظر T_m بود. مدل زمان دمایی ویبول پویایی سبز شدن گیاهچه دو رقم کلزای بهاره در پاسخ به دماهای زیر بهینه و بیشتر از

هرچند روند کلی پاسخ سبز شدن گیاهچه به دما در شرایط مزرعه در هر دو رقم مورد مطالعه مشترک بود، اما میان این دو از نظر برخی پارامترهای مدل زمان دمایی تفاوت معنی‌داری مشاهده شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، رقم کلزای ساری گل نسبت به رقم Hyola 401 تا

کوتاه‌ترین دوره زمانی ممکن به دست آمد. مدل زمان دمایی ویبول پیش‌بینی می‌کند که سرعت سبز شدن گیاهچه برای کسرهای مختلف جمعیت بذری دماهای بالاتر از T_b به‌طور خطی افزایش می‌یابد. حداکثر سرعت سبز شدن گیاهچه در $T_{o(e)}$ رخ می‌دهد و در دماهای فراتر از این حد به‌طور خطی کاهش می‌یابد. با این حال، کسر گیاهچه‌های سبز شده بین $T_{o(e)}$ و $T_{m(1)}$ ثابت است و افزایش بیشتر دما با کاهش احتمال سبز شدن گیاهچه همراه است. این بازدارندگی گرمایی مشاهده‌شده در دو رقم کلزا می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد انطباقی در نظر گرفته شود. این راهبرد بذرها را قادر می‌سازد تا زمانی که دما تنها چند درجه سانتی‌گراد از حد بهینه فراتر برود، جوانه نزنند و از اینرو تا زمانی که شرایط محیطی تغییر کند قادر به جوانه‌زنی باقی بمانند.

نتیجه‌گیری کلی

در مجموع، مدل زمان دمایی ویبول توصیف خوبی از ویژگی‌های سبز شدن گیاهچه هر دو رقم کلزای بهاره در پاسخ به دما ارائه داد. این مدل آستانه‌های دمایی سبز شدن گیاهچه‌های کلزا در مزرعه مانند دمای پایه برای سبز شدن، کمترین زمان دمایی مورد نیاز برای شروع سبز شدن گیاهچه در مزرعه و کمترین دمای بیشینه برای القاء بازدارندگی گرمایی در این فرآیند نمودی را پیش‌بینی کرد.

حد بهینه را به‌دقت توضیح داد. این مدل نه‌تنها جنبه‌های مفید سایر مدل‌ها (Hardegree, 2006; del Monte *et al.*, 2014) را در بر دارد، بلکه شامل برخی ویژگی‌های بیشتر است. توزیع ویبول به‌دلیل شکل انعطاف‌پذیر آن قادر به مدل‌سازی انواع پاسخ‌های زیستی است (Watt *et al.*, 2007). داده‌های ما نشان داد که $\theta_{T(e)}$ و $T_{m(e)}$ ممکن است اغلب اریب باشند و از این‌رو توزیع انعطاف‌پذیرتری برای پیش‌بینی دقیق دوره‌های زمانی سبز شدن گیاهچه در مزرعه لازم است. این توزیع نسبت به توزیع نرمال برای مدل‌سازی پتانسیل آب پایه بذر در دماهای زیر بهینه (Watt *et al.*, 2010) و بیشتر از حد بهینه (Watt *et al.*, 2011) نیز برتر بود. مدل زمان دمایی ویبول یک مقدار به نسبت کوچک و دقیق θ_T برای شروع فرآیند نمودی (در اینجا سبز شدن گیاهچه در مزرعه) در دماهای زیر بهینه پیش‌بینی می‌کند ($\theta_{T(0)}$). این مدل همچنین برآورد واقع‌گرایانه‌ای از $T_{m(1)}$ ارائه می‌دهد که از مدل زمان دمایی اصلی (توزیع نرمال) قابل استنتاج نیست. این نقاط شروع ($\theta_{T(0)}$ و $T_{m(1)}$) توسط پارامتر مکان مدل زمان دمایی ویبول تعریف می‌شوند. در دماهای بیشتر از حد بهینه پارامتر μ کمترین مقدار $T_{m(e)}$ ممکن در جمعیت بذری را تعیین می‌کند. به‌عبارت دیگر، $T_{m(1)}$ کمترین دمای بیشینه‌ای است که در دماهای بالاتر از آن بذرها بازدارندگی گرمایی نشان می‌دهند. برآورد $T_{m(1)}$ کمی بزرگ‌تر از T_o بود که در آن بیشترین درصد سبز شدن گیاهچه برای هر جمعیت در

REFERENCES

1. Andreucci, M.P., Moot, D.J., Black, A.D. & Sedcole, R. (2016). A comparison of cardinal temperatures estimated by linear and nonlinear models for germination and bulb growth of forage brassicas. *European Journal of Agronomy*, 81, 52–63.
2. Chantre, G.R., Batlla, D., Sabbatini, M.R. & Orioli, G. (2009). Germination parameterization and development of an after-ripening thermal-time model for primary dormancy release of *Lithospermum arvense* seeds. *Annals of Botany*, 103(8), 1291-1301.
3. del Monte, J.P., Aguado, P.L. & Tarquis, A.M. (2014). Thermal time model of *Solanum sarrachoides* germination. *Seed Science Research*, 24(4), 321–330.
4. Derakhshan, A., Bakhshandeh, A., Siadat, S.A., Moradi-Telavat, M.R. & Andarzian, S.B. (2018a). Application of thermal-time concept to modeling oilseed rape (*Brassica napus* L.) seed germination response to temperature. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 16(1), 153-164. (In Farsi)
5. Derakhshan, A., Bakhshandeh, A., Siadat, S.A., Moradi-Telavat, M.R. & Andarzian, S.B. (2018b). Quantification of thermoinhibition response of seed germination in different oilseed rape cultivars. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 11(2), 459-469. (In Farsi)
6. Derakhshan, A., Bakhshandeh, A., Siadat, S.A., Moradi-Telavat, M.R. & Andarzian, S.B. (2018c). Comparison of probability distribution functions in thermal-time models for modeling of spring oilseed rape germination to temperature. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 49(3), 81-98. (In Farsi)
7. Derakhshan, A. & Gherekhloo, J. (2013) Factors affecting *Cyperus difformis* seed germination and seedling emergence. *Planta Daninha*, 31(4), 823–832.
8. Derakhshan, A., Gherekhloo, J., Ribas, A.V. & Rafael, D.P. (2014). Quantitative description of the

- germination of Littleseed Canarygrass (*Phalaris minor*) in response to temperature. *Weed Science*, 62(2), 250–257.
9. Derakhshan, A., Moradi-Telavat, M.R. & Siadat, S.A. (2016). Hydrotime analysis of *Melilotus officinalis*, *Sinapis arvensis* and *Hordeum vulgare* seed germination. *Iranian Journal of Plant Protection*, 30(3), 518-532. (In Farsi)
 10. Forcella, F., Benech Arnold, R.L., Sanchez, R. & Ghersa C.M. (2000). Modeling seedling emergence. *Field Crops Research*, 67(2), 123–139.
 11. Garcia-Huidobro, J., Monteith, J.L. & Squire, G.R. (1982). Time, temperature and germination of pearl millet (*Pennisetum typhoides* S. & H.). I. Constant temperature. *Journal of Experimental Botany*, 33(2), 288–296.
 12. Hardegree, S.P. (2006). Predicting germination response to temperature. III. Model validation under field-variable temperature conditions. *Annals of Botany*, 98(4), 827–834.
 13. Jame, Y.W. & Cutforth, H.W. (2004). Simulating the effects of temperature and seeding depth on germination and emergence of spring wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124(3–4), 207–218.
 14. Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verbug, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn, D.M. & Smith, J.C. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming system simulation. *Agricultural Systems*, 18(3–4), 267–288.
 15. Lakzaei, S., Soltani, A., Zeinali, E., Gaderifar, F. & Jafarnodeh, S. (2017). Quantifying response of seedling emergence to temperature in rapeseed (*Brassica napus* L.) under field conditions. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 19(3), 195–207. (In Farsi)
 16. McMaster, G.S., White, J.W., Hunt, L.A., Jamieson, P.D., Dhillon, S.S. & Ortiz-Monasterio, J.I. (2008). Simulating the influence of vernalization, photoperiod and optimum temperature on wheat developmental rates. *Annals of Botany*, 102(4), 561–569.
 17. Meenken, E.D., Brown, H.E., Triggs, C.M., Brooking, I.R. & Forbes, M. (2016). Phenological response of spring wheat to timing of photoperiod perception: The effect of sowing depth on final leaf number in spring wheat. *European Journal of Agronomy*, 81(1), 72–77.
 18. Ritchie, J.T. & Otter, S. (1985). Description and performance of CERES-Wheat: a user oriented wheat yield model. In: W.O. Willis (Ed), *ARS Wheat Yield Project*. pp. (159–175) Temple, TX: United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
 19. Soltani, A., Hammer, G.L., Torabi, B., Robertson, M.J. & Zeinali, E. (2006a). Modeling chickpea growth and development: phenological development. *Field Crops Research*, 99(1), 1–13.
 20. Soltani, A., Robertson, M.J., Torabi, B., Yousefi-Daz, M. & Sarparast, R. (2006b). Modeling seedling emergence in chickpea as influenced by temperature and sowing depth. *Agricultural and Forest Meteorology*, 138(1–4), 156–167.
 21. Soltani, A. & Sinclair, T.R. (2011). A simple model for chickpea development, growth and yield. *Field Crops Research*, 124(2), 252–260.
 22. Wang, R., Bai, Y. & Tanino, K. (2004). Effect of seed size and sub-zero imbibitions temperature on the thermal time model of winterfat (*Eurotia lanata* (Pursh) Moq.). *Environmental and Experimental Botany*, 51(3), 183–197.
 23. Wang, H., Cutforth, H., McCaig, T., McLeod, G., Brandt, K., Lemke, R., Goddard, T. & Sprout, C. (2009). Predicting the time to 50% seedling emergence in wheat using a Beta model. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 57 (1) 65–71.
 24. Wang, R.L., Wendel, J.L. & Dekker, J.H. (1995). Weedy adaptation in *Setaria* spp. I. Isozyme analysis of genetic diversity and population genetic structure in *Setaria viridis*. *American Journal of Botany*, 82(3), 308–317.
 25. Watt, M. & Bloomberg, M. (2012). Key features of the seed germination response to high temperatures. *New Phytologist*, 196(2), 332–336.
 26. Watt, M.S., Bloomberg, M. & Finch-Savage, W.E. (2011). Development of a hydrothermal time model that accurately characterises how thermoinhibition regulates seed germination. *Plant, Cell & Environment*, 34(5), 870–876.
 27. Watt, M.S., Whitehead, D., Kriticos, D.J., Gous, S.F. & Richardson, B. (2007). Using a process-based model to analyse compensatory growth in response to defoliation: Simulating herbivory by a biological control agent. *Biological Control*, 43(1), 119–129.
 28. Watt, M.S., Xu, V. & Bloomberg, M. (2010). Development of a hydrothermal time seed germination model which uses the Weibull distribution to describe base water potential. *Ecological Modelling*, 221(9), 1267–1272.
 29. Yin, X., Kropff, M.J., McLaren, G. & Visperas, R.M. (1995). A nonlinear model for crop development as a function of temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77(1–2), 1–16.