

مقاله پژوهشی

کمی سازی پاسخ‌های جوانه‌زنی بذر دو ژنوتیپ کتان دانه‌ای (*Linum usitatissimum*) به دمافاطمه قربان نژاد^۱، محسن زواره^{۲*}، فرزاد شریف زاده^۳

چکیده مبسوط

مقدمه: کتان (*Linum usitatissimum* L.) گیاهی چند منظوره است که برای دانه، روغن و الیاف آن کشت می‌شود. در شرایط رطوبتی مناسب، دما به عنوان یک عامل محیطی موثر می‌تواند بر جوانه‌زنی و سبز شدن این گیاه اثر بگذارد. از این رو، شناخت دماهای کاردینال آن می‌تواند به کشاورزان در پیش‌بینی موفقیت‌آمیز جوانه‌زنی، سبز شدن و حتی عملکرد بذر و به پژوهشگران در ایجاد ژنوتیپ‌های متحمل به دماهای بالا کمک کند. لذا، پژوهش حاضر با هدف تعیین محدوده دمایی جوانه‌زنی و دماهای کاردینال جوانه‌زنی بذر دو ژنوتیپ دانه‌ای کتان طراحی و اجرا شد.

مواد و روش‌ها: به منظور کمی‌سازی واکنش جوانه‌زنی دو ژنوتیپ کتان دانه روغنی (ژنوتیپ گلچین و لاین ۲۸۶) به نه دما (۳، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سلسیوس)، آزمایشی به صورت کرت‌های یک بار خرد شده در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار انجام شد. در این آزمایش، از سه مدل رگرسیونی غیرخطی (بتا، دو تکه‌ای و دندان مانند) برای برازش داده‌ها استفاده شد و با استفاده از شاخص اطلاعات آکائیک (AIC)، شاخص اطلاعات آکائیک اصلاح شده (AICc) و Δi مدل برتر گزینش شد. یافته‌ها: یافته‌های این آزمایش در مورد لاین ۲۸۶ نشان داد که مدل بتا با داشتن شاخص اطلاعات آکائیک ($AIC = -3/96$) و شاخص آکائیک تصحیح شده ($AICc = -89/61$) کمتر و $\Delta i = 0$ از توانایی بالاتری در تخمین دماهای کاردینال برخوردار است. لذا، با استفاده از این مدل، دمای پایه، بهینه، بیشینه و تعداد ساعت زیستی لاین ۲۸۶ به ترتیب ۷/۱۸، ۲۴/۲۲، ۴۰/۱۶ درجه سلسیوس و ۱۹/۲۵ ساعت تخمین زده شد. در ژنوتیپ گلچین، مدل بتا با داشتن شاخص اطلاعات آکائیک ($AIC = -3/89$) و شاخص آکائیک تصحیح شده ($AICc = -89/083$) کمتر، برازش بهتری نسبت به دو مدل دیگر داشت. با این حال، با در نظر گرفتن Δi که در مدل‌های بتا، دو تکه و دندان مانند به ترتیب برابر ۰، ۱/۶۱ و ۴/۴۹ بود، مشاهده شد که دو مدل بتا و دو تکه در تخمین دماهای کاردینال ژنوتیپ گلچین از دقت یکسانی برخوردارند. این یافته‌ها نشان داد که دامنه دمای مناسب برای جوانه‌زنی ژنوتیپ گلچین ۳/۸-۲۳/۸۵ درجه سلسیوس است. در این ژنوتیپ محدوده ساعت زیستی تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی از ۱۶/۴۲ تا ۱۹/۷۷ ساعت متغیر بود.

نتیجه‌گیری: در کل، با توجه به یافته‌های این آزمایش می‌توان از مدل بتا برای پیش‌بینی زمان تا جوانه‌زنی لاین ۲۸۶ و از هر یک از دو مدل، مدل بتا و دو تکه‌ای برای پیش‌بینی زمان تا جوانه‌زنی ژنوتیپ گلچین در شرایط مطلوب رطوبتی بستر جوانه‌زنی استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: دمای کاردینال، سرعت جوانه‌زنی، کتان بذری، مدل رگرسیونی

جنبه‌های نوآوری

۱- مدل‌های مناسبی برای پیش‌بینی خوب درصد جوانه‌زنی بذر دو ژنوتیپ کتان دانه‌ای (ژنوتیپ گلچین و لاین ۲۸۶) در پاسخ به دما معرفی شد.

۲- دماهای کاردینال دو ژنوتیپ بذر کتان دانه‌ای (ژنوتیپ گلچین و لاین ۲۸۶) تعیین شد.

^۱ دانشجوی دکتری زراعت، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه

گیلان

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.23831251.1402.10.1.9.7>

^۲ دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده علوم کشاورزی،

دانشگاه گیلان

^۳ دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، پردیس کشاورزی و منابع

طبیعی دانشگاه تهران



مقدمه

کتان با نام علمی (*Linum usitatissimum* L.) گیاهی چند منظوره است که در بسیاری از مناطق معتدل دنیا با هدف دستیابی به روغن، الیاف و دانه کشت می‌شود (حسن زمان^۱، ۲۰۱۹؛ میرت و هسلوپ-هریسون^۲، ۲۰۱۸). روغن این گیاه سرشار از اسیدهای چرب غیر اشباع، آلفا-اسید لینولئیک (یک اسید چرب امگا ۳) و آنتی اکسیدان‌های مختلف است و به همین دلیل کاربردهای خوراکی، دارویی و صنعتی گوناگونی دارد (ژانگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۶؛ کلاین^۴ و همکاران، ۲۰۱۷).

جوانه‌زنی، به عنوان یک فرآیند فیزیولوژیک پیچیده، از مراحل کلیدی چرخه زندگی گیاهان است که تحت تاثیر ژنتیک بذر و محیط جوانه‌زنی آن قرار می‌گیرد (فولی و فنیمور^۵، ۱۹۹۸؛ شفیع و پرایس^۶، ۲۰۰۱؛ لیو^۷ و همکاران، ۲۰۱۹). از میان عوامل محیطی موثر بر جوانه‌زنی، دما و رطوبت (وینداور^۸ و همکاران، ۲۰۰۷) و برهمکنش آنها اهمیت بسیار زیادی دارند به طوری که در شرایط رطوبتی مناسب، دما به عنوان عامل محدود کننده جوانه‌زنی شناخته می‌شود. بنابراین، چگونگی تاثیر این عوامل بر جوانه‌زنی بذر و استفاده از بازه دمایی-رطوبتی مناسب برای کشت بذرها سبب می‌شود که بیشترین جوانه‌زنی، سبز شدن و استقرار بوته‌ها در مزرعه رخ داده و دستیابی به عملکرد بالاتر امکان‌پذیر شود (آلوارادو و بردفورد^۹، ۲۰۰۲؛ گارسیا-هویدوبرو^{۱۰} و همکاران، ۱۹۸۲). با پذیرش تاثیر دما بر جوانه‌زنی بذر، در سال ۱۸۶۰ میلادی سه دمای کمینه، بهینه و بیشینه معرفی شد. دمای کمینه (T_b)^{۱۱} و بیشینه (T_c)^{۱۲} به ترتیب کمترین و بیشترین دماهایی

هستند که در آن امکان جوانه‌زنی وجود دارد در حالی که دمای بهینه (T_o)^{۱۳} دمایی است که در آن جوانه‌زنی با بیشترین سرعت انجام می‌گیرد (آلوارادو و بردفورد، ۲۰۰۲؛ بردفورد^{۱۴}، ۲۰۰۲). این مقادیر که با توجه به جنس، گونه، رقم و حتی اکوتیپ گیاهان تغییر می‌کند، در بازه دمایی صفر و ۵۰ درجه سلسیوس گزارش شده‌است (کاردول^{۱۵}، ۱۹۸۴).

پژوهش‌ها نشان داده است که با افزایش دمای محیط جوانه‌زنی از مقدار دمای کمینه (T_b) تا دمای بهینه (T_o)، جوانه‌زنی به صورت خطی افزایش می‌یابد و چنانچه دما از مقدار بهینه (T_o) فراتر رفته و به دمای بیشینه (T_c) نزدیک شود، از جوانه‌زنی کاسته خواهد شد. از طرفی، با فراتر رفتن دما از مقدار بیشینه (T_c)، جوانه‌زنی بازداری می‌شود (شفیعی و پرایس، ۲۰۰۱). پژوهشگران برای توصیف این واکنش‌ها و در واقع برای بررسی واکنش جوانه‌زنی بذر به دما از مدل‌های ریاضی بهره می‌برند. با توجه به این که پارامترهای مورد استفاده در این مدل‌ها از نظر زیستی مفهوم مشخصی دارند، از این رو، می‌توانند به خوبی برای کمی‌سازی پاسخ جوانه‌زنی به دما استفاده شوند (هاردگر و وینسترال^{۱۶}، ۲۰۰۶). در این مدل‌ها، برای محاسبه و کمی‌سازی دماهای کاردینال جوانه‌زنی از ویژگی سرعت جوانه‌زنی استفاده می‌شود که ناشی از اهمیت سرعت جوانه‌زنی در بنیه بذر و استقرار گیاهان است (مک ویلیام^{۱۷}، ۱۹۷۰).

از میان مدل‌های ریاضی موجود، مدل‌های غیرخطی دو تکه^{۱۸}، بتا^{۱۹} و دندان مانند^{۲۰} در توصیف واکنش سرعت جوانه‌زنی به دما و تعیین دماهای کاردینال گیاهان بارها استفاده شده‌اند. برای نمونه، جیم و کاتفورس^{۲۱} (۲۰۰۴) با استفاده از مدل بتا، دماهای پایه، بهینه و بیشینه گندم را به ترتیب برابر صفر، ۳۰ و

¹³ Optimum temperature¹⁴ Bradford¹⁵ Cardwell¹⁶ Hardegree and Winstral¹⁷ McWilliam¹⁸ Segmented¹⁹ Beta²⁰ Dent-like²¹ Jame and Cutforth¹ Hasanuzzaman² Mhret and Heslop-Harrison³ Zhang⁴ Klein⁵ Foley and Fennimore⁶ Shafii and Price⁷ Liu⁸ Windauer⁹ Alvarado and Bradford¹⁰ Garcia-Huidobro¹¹ Base temperature¹² Ceiling temperature

ضریب تعیین بالاتر (در کتان قهوه‌ای و طلایی به ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۹۷) به عنوان بهترین مدل برای تعیین دماهای کاردینال جوانه‌زنی بذر کتان (کتان قهوه‌ای و طلایی) معرفی کردند. بر این اساس، دمای پایه، بهینه زیرین، بهینه فوقانی و بیشینه به ترتیب ۹/۱، ۲۰/۲، ۲۷/۳ و ۴۰/۳ درجه سلسیوس تخمین زده شد. در سال‌های اخیر، کشت گیاه کتان به دلیل نیاز و اهمیت آن در صنایع مختلف رو به افزایش است که این موضوع ضرورت تعیین درست تاریخ کشت و در نتیجه ضرورت تعیین دماهای کاردینال ارقام مختلف را مشخص می‌کند. در نتیجه این پژوهش با هدف بررسی دامنه دمایی جوانه‌زنی بذر دو ژنوتیپ کتان و تعیین دماهای کاردینال جوانه‌زنی آنها طراحی و اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال ۱۴۰۰ در آزمایشگاه زراعت دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان به صورت کرت‌های یک بار خرد شده در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار انجام شد. در این آزمایش نه سطح دمای محیط جوانه‌زنی (۳، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سلسیوس) به عنوان فاکتور اصلی و دو ژنوتیپ کتان دانه روغنی (ژنوتیپ گلچین و لاین ۲۸۶) به عنوان فاکتور فرعی در نظر گرفته شدند. در آغاز آزمایش، بذره‌های کتان با محلول هیپوکلریت سدیم ۵ درصد به مدت ۳ دقیقه ضدعفونی و سپس سه بار با آب مقطر شسته شدند. از بذره‌های ضدعفونی شده ۳۰ بذر انتخاب و با فاصله یکسان روی کاغذ صافی موجود در پتری‌های ۹ سانتی‌متری گذاشته شدند. به هر پتری ۳ سی‌سی آب افزوده شده و سپس به ژرمیناتورهای با دما ثابت مورد نظر منتقل شدند. شمارش بذره‌های جوانه زده، ۱۲ ساعت پس از آغاز آزمایش و به صورت روزانه تا ۷ روز ادامه یافت. پیدایش ریشه‌چه‌هایی با طول حداقل دو میلی‌متر به عنوان نماد جوانه‌زنی در نظر گرفته شد. برای محاسبه سرعت جوانه‌زنی (بر حسب تعداد بذر جوانه زده در هر روز) از رابطه ۱ استفاده شد (مایگورا^{۱۰}، ۱۹۶۲):

۴۰ درجه سلسیوس اعلام کردند. در پژوهش دیگری برای تعیین دمای کاردینال زیره سیاه از چهار مدل رگرسیونی دوتکه، بتا بتا تغییر یافته و دندان مانند و هشت دمای ثابت (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سلسیوس) استفاده شد؛ یافته‌های این آزمایش نشان داد که مدل بتا با ثبت بیشترین ضریب تعیین^۱ (۰/۹۸) و کمترین جذر میانگین مربعات خطا^۲ (۰/۰۰۴) و شاخص آکائیک اصلاح شده^۳ (۱۹/۱۷) مدل برتر بوده است که با استفاده از آن؛ دماهای پایه، بهینه، بیشینه به ترتیب ۰/۱، ۱۹/۲ و ۳۵ درجه سلسیوس گزارش شد (سواعدی^۴ و همکاران، ۲۰۱۹). سلطانی^۵ و همکاران (۲۰۰۶) در گزارشی اعلام کردند که مدل دندان مانند در مقایسه با دو مدل دو تکه و بتا به دلیل داشتن خطای استاندارد^۶ کمتر، از توانایی بالاتری در تخمین دماهای کاردینال جوانه‌زنی بذر نخود برخوردار است. بر این اساس، در پژوهش آن‌ها دمای پایه، بهینه تحتانی، بهینه فوقانی و بیشینه به ترتیب ۴/۵، ۲۰/۲، ۲۹/۳ و ۴۰ درجه سلسیوس تخمین شد. یافته‌های کامکار^۷ و همکاران (۲۰۱۲) نشان داد که در گیاه خشخاش بر خلاف گندم و نخود، مدل دو تکه (ضریب تعیین برابر با ۰/۹۲ و ضریب تغییرات^۸ برابر با ۱/۶-۳۶ درصد) در پیش‌بینی سرعت جوانه‌زنی در دماهای مختلف بهتر بوده است. بررسی‌های مشابهی روی بذره‌های کتان نیز گزارش شده است. برای نمونه سورشجانی^۹ و همکاران (۲۰۱۹) برای تعیین دمای کاردینال دو نوع کتان (کتان قهوه‌ای و طلایی) از سه مدل بتا، دو تکه و دندان مانند استفاده کردند و در پژوهش خود مدل دندان مانند را به دلیل داشتن جذر میانگین مربعات خطا (در کتان قهوه‌ای و طلایی به ترتیب ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۲) و ضریب تغییرات (در کتان قهوه‌ای و طلایی به ترتیب ۶/۵ و ۱۲/۹) کمتر و نیز

^۱ Coefficient of determination

^۲ Root mean square error

^۳ Corrected Akaike Information Criterion

^۴ Savaedi

^۵ Soltani

^۶ standard error

^۷ Kamkar

^۸ Coefficient of variation

^۹ Karimzadeh Soureshjani

^{۱۰} Maguire

برای ارزیابی و تعیین نیکویی برازش مدل‌های مختلف از شاخص‌های آماری ضریب تبیین اصلاح شده^۶ شده^۶ (R^2_{Adj})، (رابطه ۴)، ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) (رابطه ۵) و ضریب تغییرات (CV) (رابطه ۶) استفاده شد:

$$R^2_{Adj} = 1 - \frac{SSR}{SST} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right) \sum (Y_o - Y_p)^2} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$CV = \frac{\sqrt{MSE}}{\bar{X}} \times 100 \quad \text{رابطه ۶}$$

که در آن‌ها، SSR مجموع مربعات رگرسیون، SST مجموع مربعات کل، n تعداد مشاهدات، Y_o مقادیر مشاهده شده، Y_p مقادیر پیش‌بینی شده، MSE میانگین مربعات خطا و \bar{X} میانگین مشاهدات است. RMSE و CV کوچکتر و R^2 نزدیک‌تر به یک بیانگر برازش بهتر مدل به داده‌ها است. در کنار این معیارها، ضرایب رگرسیون خطی ساده بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده (ضرایب a و b) نیز در ارزیابی مدل‌های مورد استفاده مورد بررسی قرار گرفت. به این معنی که، معنی‌دار شدن هر یک از ضرایب a یا b بیانگر بالا بودن خطای مدل در پیش‌بینی آن است. به بیان دیگر، معنی‌دار شدن ضریب a به عدم تطابق عرض از مبدا خط رگرسیون با عرض از مبدا خط ۱:۱ دلالت دارد. از سوی دیگر، معنی‌دار شدن ضریب b نیز به این معناست که شیب خط رگرسیون با خط ۱:۱ مطابقت ندارد و خط رگرسیون نسبت به خط ۱:۱ دارای اریب است (سلطانی و همکاران، ۲۰۰۶).

برای انتخاب بهترین مدل نیز از شاخص آکائیک^۷ (AIC) (آکائیک^۸، ۱۹۷۴) (رابطه ۷) و شاخص آکائیک تصحیح‌شده (AICc) (رابطه ۸) استفاده شد (بورنهام و اندرسون^۹، ۲۰۰۲):

$$AIC = n \cdot \ln\left(\frac{RSS}{n}\right) + 2k \quad \text{رابطه ۷}$$

$$AICc = n \cdot \ln\left(\frac{RSS}{n}\right) + 2k + \left(\frac{2k(k+1)}{n-k-1}\right) \quad \text{رابطه ۸}$$

$$RS = \sum_{i=1}^n \frac{Si}{Di} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن، Si تعداد بذر جوانه‌زده در هر روز و Di تعداد روز پس از آغاز آزمایش است. کمی‌سازی سرعت جوانه‌زنی نسبت به دما و تعیین دماهای کاردینال و تعداد ساعات لازم برای جوانه‌زنی با استفاده از سه مدل بتا^۱ (ین و همکاران، ۱۹۹۵) (رابطه ۲)، دو تکه (ریچی و و نسمت^۲، ۱۹۹۱) (رابطه ۳) و دندان مانند (پایپر^۳ و همکاران، ۱۹۹۶) (رابطه ۴) و با استفاده از نرم افزار سیگماپلات ۱۱ (Systat Software, San Jose, CA) و بر اساس روش مطلوب‌سازی تکرار انجام شد:

رابطه ۲

$$f(t) = \left[\frac{(T-T_b)}{(T_o-T_b)} \right] \left[\frac{(T_c-T_o)}{(T_o-T_b)} \right]^c$$

رابطه ۳

$$f(x) = \frac{(T-T_b)}{(T_o-T_b)} \quad \text{اگر} \quad T_b < T < T_o$$

$$f(t) = \left[1 - \left(\frac{T-T_b}{T_c-T_o} \right) \right] \quad \text{اگر} \quad T_o < T < T_c$$

$$f(t) = 0 \quad \text{اگر} \quad T > T_c \quad \text{یا} \quad T < T_b$$

رابطه ۴

$$f(t) = \left(\frac{T-T_b}{T_{o1}-T_b} \right) \quad \text{اگر} \quad T_b < T \leq T_{o1}$$

$$f(t) = \left(\frac{T_c-T}{T_c-T_{o2}} \right) \quad \text{اگر} \quad T_{o2} < T \leq T_c$$

$$f(T) = 1 \quad \text{اگر} \quad T_{o1} < T \leq T_{o2}$$

$$f(T) = 0 \quad \text{اگر} \quad T \leq T_b \quad \text{یا} \quad T \geq T_c$$

که در آن‌ها، T، دما (درجه سلسیوس) و T_b ، T_o ، T_c ، T_{o1} و T_{o2} به ترتیب دمای پایه، دمای بهینه، دمای بیشینه، دمای مطلوب پایینی^۴ (برای تابع دندان مانند)، دمای مطلوب بالایی^۵ (برای تابع دندان مانند) و C پارامتر شکل تابع بتا هستند.

^۱ Yin

^۲ Ritchie and Nesmith

^۳ Piper

^۴ Lower limit of optimum temperature

^۵ Upper limit of optimum temperature

^۶ Adjusted Coefficient of Determination

^۷ Akaike Information Criterion

^۸ Akaike

^۹ Burnham and Anderson

افزایش دما از ۲۵ به ۳۰ و ۳۵ درجه سلسیوس واکنش منفی نشان داد و درصد جوانه‌زنی آن به صورت معنی‌داری کاهش یافته (به ترتیب ۵/۲۶ و ۲۶/۳۱ درصد) و روندی کاهشی به خود گرفت (شکل ۱-ب). از این رو می‌توان بهترین بازه دمایی برای جوانه‌زنی لاین ۲۸۶ و ژنوتیپ گلچین را به ترتیب ۱۰-۲۵ و ۱۰-۲۵ درجه سلسیوس بیان کرد (شکل ۱-الف و ب).

کاهش درصد جوانه‌زنی در دمای بالاتر از مقدار بهینه را می‌توان به تجزیه پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و نیز تاثیر منفی دماهای بالا بر کارکرد غشاهای زیستی نسبت داد (بردفورد، ۲۰۰۲). عدم جوانه‌زنی بذرها در دماهای پایین می‌تواند ناشی از اختلال در کارکرد غشاهای، کاهش متابولیسم سلولی و نیز نبود پتانسیل تغییرپذیری آنزیم‌ها باشد (بن هوم^۱، ۲۰۰۰؛ کاردول، ۱۹۸۴).

در این پژوهش، سرعت جوانه‌زنی در مقایسه با درصد جوانه‌زنی واکنش بیشتری نسبت به دما نشان داد. در لاین ۲۸۶، بیشترین سرعت جوانه‌زنی (۰/۰۵۳) تعداد در ساعت) در دمای ۲۰ درجه سلسیوس ثبت شد (شکل ۲-الف). در حالی که در ژنوتیپ گلچین بیشترین سرعت جوانه‌زنی (۰/۰۵۳) تعداد در ساعت) در دمای ۲۵ درجه سلسیوس دیده‌شد که این افزایش سرعت جوانه‌زنی موجب کاهش زمان جوانه‌زنی آن شد (شکل ۲-ب). به بیان دیگر، اگر چه دو ژنوتیپ مورد آزمایش از نظر سرعت جوانه‌زنی از توانایی یکسانی برخوردار بودند، اما واکنش آن‌ها نسبت به دما به طور معنی‌داری متفاوت و برای لاین ۲۸۶ در بازه دمایی بین ۲۰ تا ۴۰ درجه سلسیوس و برای ژنوتیپ گلچین در بازه دمایی ۲۵ تا ۴۰ درجه سلسیوس کاهشی بود (شکل ۲-الف و ب). این تفاوت می‌تواند به ژنتیک دو گیاه برگردد.

که در آنها، RSS مجموع مربعات باقی‌مانده، n تعداد نمونه و K تعداد پارامترهای مدل مورد نظر است. بر این اساس، بهترین مدل در مقایسه با سایر مدل‌ها، مدلی است که کمترین مقدار محاسبه شده AICc را داشته باشد. رتبه‌بندی مدل‌ها نیز با استفاده از شاخص Δi (رابطه ۹) صورت گرفت (بورنهام و اندرسون، ۲۰۰۲):

$$\Delta i = AICc - \min AICc \quad \text{رابطه ۹}$$

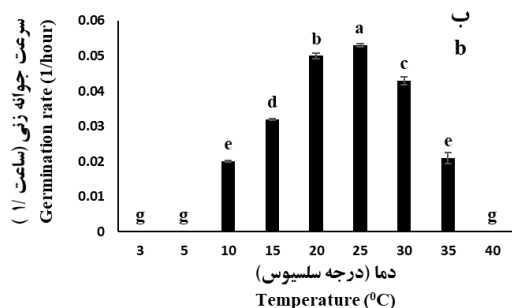
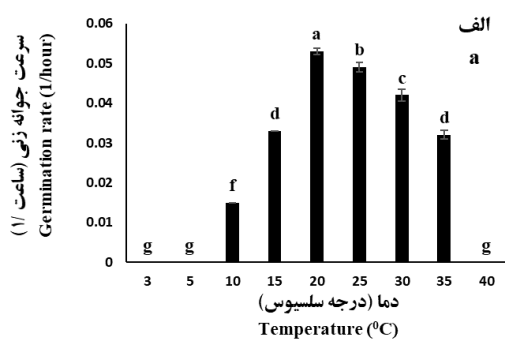
که در آن $\min AICc$ کمترین مقدار AICc محاسبه‌شده از بین مدل‌ها است و در واقع به مدلی تعلق دارد که بهترین برازش را نشان داده‌است. اگر $\Delta i < 2$ به این معنی است که در برازش مدل‌ها هیچ گونه تفاوتی وجود ندارد و مدلی با AICc بزرگ‌تر نیز برازش خوبی خواهد داشت و به عنوان مدل مناسب در نظر گرفته می‌شود. اما در صورتی که $\Delta i > 2$ باشد، مدل با AICc بزرگ‌تر به عنوان مدل مناسب محسوب نمی‌شود و رد خواهد شد. در نهایت، تجزیه واریانس و مقایسه میانگین داده‌ها برای تعیین اثر دماهای مختلف بر درصد و سرعت جوانه‌زنی با استفاده از نرم افزار SAS نسخه ۹/۴ انجام شد. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن استفاده شد.

نتایج و بحث

درصد و سرعت جوانه‌زنی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که برهمکنش ژنوتیپ × دما تاثیر بسیار معنی‌داری بر درصد و سرعت جوانه‌زنی داشته‌است (جدول ۱). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که جوانه‌زنی هر دو ژنوتیپ مورد آزمایش (لاین ۲۸۶ و ژنوتیپ گلچین) در دماهای سه، پنج و ۴۰ درجه سلسیوس متوقف شده‌است (شکل ۱-الف و ب). در لاین ۲۸۶، افزایش دما از پنج به ده درجه سلسیوس جوانه‌زنی را به طور معنی‌داری (۱۰۰ درصد) افزایش داد (شکل ۱-الف)؛ این افزایش جوانه‌زنی تا دمای ۳۵ درجه سلسیوس به صورت ثابت باقی‌مانده و سپس در دمای ۴۰ درجه سلسیوس کاملاً متوقف شد به طوری که جوانه‌زنی به صفر رسید (شکل ۱-الف). چنین واکنشی در ژنوتیپ گلچین نیز به ثبت رسید (شکل ۱-ب). با این حال، این ژنوتیپ در مقایسه با لاین ۲۸۶ نسبت به

¹ Bonhomme



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف دما بر سرعت جوانه‌زنی: الف) لاین ۲۸۶ و ب) و ژنوتیپ گلچین.

Figure 2- Mean comparison for the effect of different temperatures on seed germination rate of: a, Line 286 and b, Golchin genotype.

تخمین دمای کاردینال

در مدل‌های دو تکه، تغییرات سرعت جوانه‌زنی نسبت به دما به صورت دو خط جداگانه رسم می‌شود. در نتیجه، دمای بهینه (T_0) یا نقطه‌ای که در آن سرعت جوانه‌زنی به بیشترین مقدار خود می‌رسد، در نقطه تلاقی دو خط رگرسیون، دمای پایه به عنوان عرض از مبدا و دمای بیشینه بالاتر از دمای بهینه قرار می‌گیرد (کول^۱ و همکاران، ۱۹۸۶؛ ویز و بینینگ^۲، ۱۹۸۷). در مدل دندان مانند، سرعت جوانه‌زنی به صورت خطی تا دمای بهینه اولیه افزایش می‌یابد و سپس تا دمای بهینه ثانویه به صورت ثابت باقی می‌ماند و در صورت افزایش دما از مقدار بهینه فوقانی، سرعت جوانه‌زنی به صورت خطی کاهش می‌یابد (پرمون^۳ و همکاران، ۲۰۱۵). در مدل پتا، که یکی از پرکاربردترین مدل‌های رگسیونی در

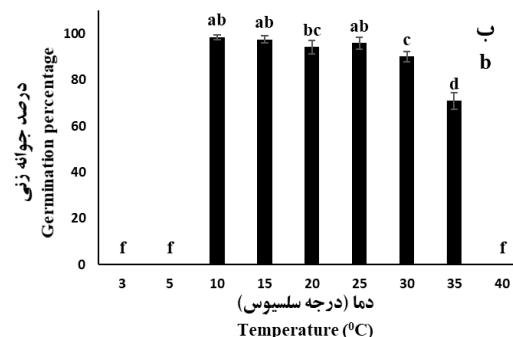
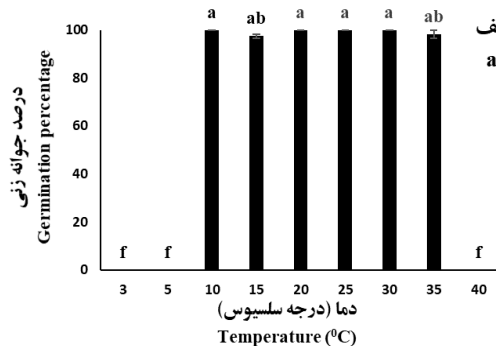
جدول ۱- تجزیه واریانس اثر دماهای مختلف بر ویژگی‌های جوانه‌زنی دو ژنوتیپ کتان دانه روغنی.

Table 1- Analysis of variance for the effect of different temperatures on germination characteristics of two linseed genotypes.

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی Df	میانگین مربعات Mean square	
		درصد جوانه‌زنی Germination percentage	سرعت جوانه‌زنی Germination rate
دما Temperature	8	17760.45 **	0.003 **
تکرار×دما Rep× Temp	27	12.19	0.000
ژنوتیپ Genotypes	1	370.52 **	0.000 ^{ns}
دما×ژنوتیپ Temp× Gen	8	198.64 **	0.000 **
خطا Error	27	7.87	0.000
ضریب تغییرات (%)		4.38	6.47

** معنی‌داری در سطح ۱٪ می‌باشد و ns عدم معنی‌داری را نشان می‌دهد.

** Significant at 1% level and ^{ns} non-significant.



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف دما بر درصد جوانه‌زنی: الف) لاین ۲۸۶ و ب) ژنوتیپ گلچین.

Figure 1- Mean comparison for the effect of different temperatures on seed germination percentage of: a, Line 286 and b, Golchin genotype.

¹ Covell

² Wiese and Binning

³ Parmoon

ترتیب ۲۷/۳-۲۰/۲ و ۲۵-۲۰ درجه سلسیوس اعلام کردند. دمای بهینه‌ی ۲۲/۱ درجه سلسیوس هم برای کتان گزارش شده‌است (کورت^۵، ۲۰۱۲).

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که مدل بتا و دندان مانند از توانایی یکسانی در تخمین دمای بیشینه در ژنوتیپ گلچین و لاین ۲۸۶ برخوردار هستند، زیرا اختلاف مقادیر تخمین شده با این مدل‌ها کمتر از یک درجه سلسیوس است. در ژنوتیپ گلچین، بیشینه دمای تخمین شده با مدل بتا و دندان مانند به ترتیب ۳۹/۶۹ و ۳۹/۹۷ درجه سلسیوس و در لاین ۲۸۶ به ترتیب ۴۰/۱۶ و ۴۰/۰۳ درجه سلسیوس بود. با این حال مدل دو تکه در تخمین دمای بیشینه رفتار متفاوتی داشت و بیشینه‌ی دمای ژنوتیپ گلچین و لاین ۲۸۶ را به ترتیب ۴۰/۶۵ و ۴۲/۲۱ درجه سلسیوس تخمین کرد (جدول ۲ و شکل ۳). در همین راستا، ویرهوف^۶ (۱۹۴۰) در گزارشی بیشینه‌ی دمای جوانه‌زنی کتان را از ۳۷/۵ تا ۴۱ درجه سلسیوس گزارش کرد.

ساعت زیستی، به عنوان بیشترین سرعت ذاتی جوانه‌زنی در دمای بهینه در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر، این مفهوم، کوتاه‌ترین زمان تا رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی را بیان می‌کند (سلطانی و همکاران، ۲۰۰۸). در این آزمایش شمار ساعت زیستی برای رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی در ژنوتیپ گلچین توسط مدل‌های بتا، دو تکه و دندان مانند به ترتیب ۱۹/۷۷، ۱۶/۴۲ و ۱۸/۸۳ ساعت تخمین زده شد. این در حالیست که تعداد ساعت زیستی تخمین زده شده در لاین ۲۸۶ توسط مدل‌های بتا، دو تکه و دندان مانند به ترتیب ۱۹/۲۵، ۱۶/۴۴ و ۲۱/۰۹ ساعت بود (جدول ۲ و شکل ۲). سورشجانی و همکاران (۲۰۱۹) اما تعداد ساعت زیستی تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی بذر کتان (کتان قهوه‌ای و طلایی) را حدود ۳۲/۷ ساعت به دست آوردند که ناشی از تفاوت ژنوتیپ‌ها است.

توصیف الگوهای سیگموئیدی نامتقارن است، دمای بهینه (T_0) بر تخمین دمای پایه و بیشینه تاثیر گذار است (ین و همکاران، ۲۰۰۳؛ آندروچی^۱ و همکاران، ۲۰۱۶) و از این رو انتخاب درست آن تاثیر مستقیمی بر تخمین دمای پایه و بیشینه دارد (یان و هانت^۲، ۱۹۹۹). در جدول ۲ نتایج مربوط به کمی‌سازی سرعت جوانه‌زنی با استفاده از مدل‌های بتا، دو تکه‌ای و دندان مانند در پاسخ به دما و تخمین دماهای پایه، بهینه و بیشینه و همچنین، شمار ساعت زیستی برای رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی ارائه شده است. بر این اساس در ژنوتیپ گلچین، دمای پایه تخمین شده با استفاده از مدل بتا، دو تکه و دندان مانند به ترتیب ۵/۵۵، ۳/۸ و ۳/۸ درجه سلسیوس و در لاین ۲۸۶ به ترتیب ۷/۱۸، ۴/۳۲ و ۴/۱۶ درجه سلسیوس بود (جدول ۲ و شکل ۳). از طرفی، با توجه به این نتایج می‌توان دریافت که دمای پایه تخمین شده (در هر سه مدل دو تکه، بتا و دندان مانند) در دو ژنوتیپ مورد مطالعه تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند. با این حال، برخلاف نتایج این آزمایش، وید^۳ و همکاران (۱۹۹۳) در گزارشی اعلام کردند که ژنوتیپ‌های مختلف سورگوم از دمای پایه متفاوتی برخوردار هستند.

در این پژوهش، دمای بهینه جوانه‌زنی در توابع بتا و دو تکه در ژنوتیپ گلچین به ترتیب برابر با ۲۳/۸۱ و ۲۳/۸۵ درجه سلسیوس و در لاین ۲۸۶ به ترتیب ۲۴/۲۲ و ۲۳/۱۵ درجه سلسیوس بود (جدول ۲ و شکل ۲). دمای مطلوب پایین و بالا برای تابع دندان مانند در ژنوتیپ گلچین به ترتیب ۲۱/۲۵ و ۲۷/۸۵ درجه سلسیوس و در لاین ۲۸۶ به ترتیب ۲۰ و ۳۲/۵۹ درجه سلسیوس به دست آمد (جدول ۲ و شکل ۳). گزارش‌های پیشین، دمای بهینه جوانه‌زنی کتان را نزدیک به ۲۸ درجه سلسیوس ارایه کرده‌اند (کاردول، ۱۹۸۴) که می‌تواند با توجه به کیفیت بذر، نوع ژنوتیپ و طول دوره جوانه‌زنی تغییر کند. برای نمونه، سورشجانی و همکاران (۲۰۱۹) و حسینی‌پور^۴ و همکاران (۲۰۲۰) در گزارش‌های مجزایی، گستره دمای بهینه کتان را به

¹ Andreucci

² Yan and Hunt

³ Wade

⁴ Hosseinipour

⁵ Kurt

⁶ Veerhoff

قربان نژاد و همکاران: کمی سازی پاسخ‌های جوانه‌زنی بذر دو ژنوتیپ کتان دانه‌ای...

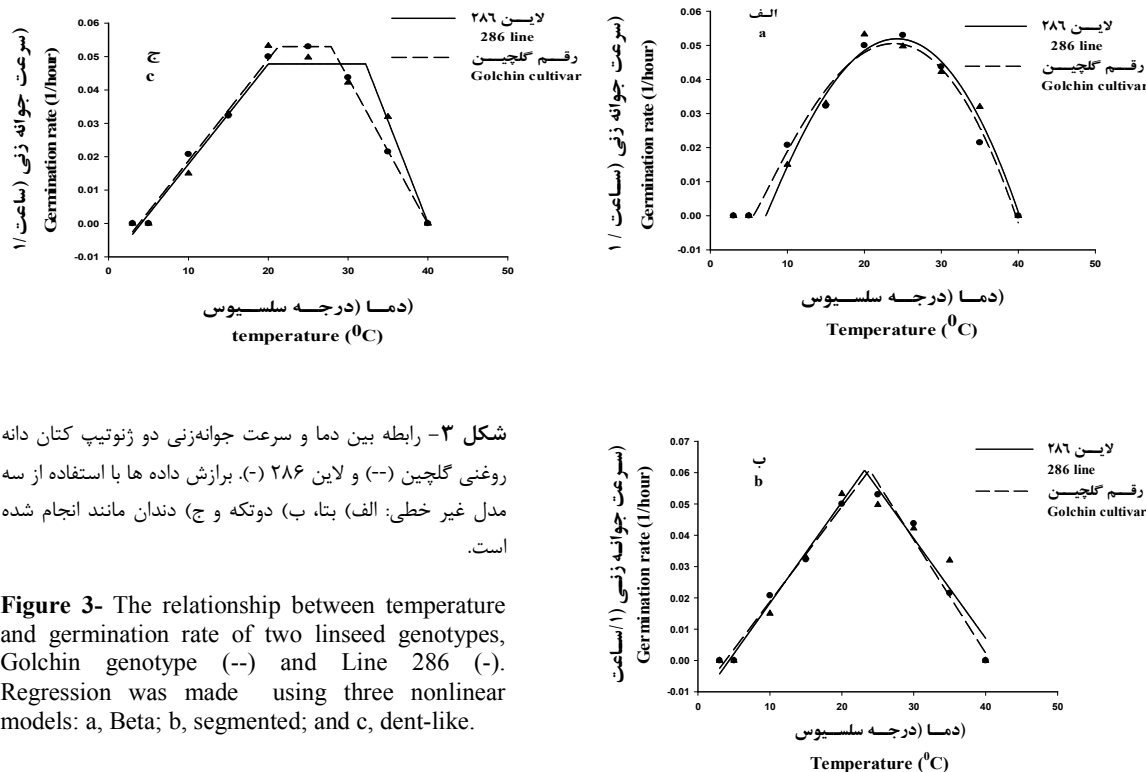
جدول ۲ - تخمین دماهای کاردینال و ساعات زیستی در جوانه‌زنی دو ژنوتیپ کتان دانه روغنی (ژنوتیپ گلچین و لاین ۲۸۶) با استفاده از سه مدل غیر خطی بتا، دوتکه و دندان مانند.

Table 2- Estimation of cardinal temperatures and biological hours of germination in two linseed genotypes (Golchin genotype and Line 286) using three nonlinear models (beta, segmented, and dent-like).

پارامتر Parameter	مدل Model					
	بتا Beta		دوتکه segmented		دندان مانند dent-like	
	ژنوتیپ گلچین Golchin genotype	لاین ۲۸۶ Line 286	ژنوتیپ گلچین Golchin genotype	لاین ۲۸۶ Line 286	ژنوتیپ گلچین Golchin genotype	لاین ۲۸۶ Line 286
$T_b(^{\circ}\text{C})$	5.55 ± 1.25	7.18 ± 1.55	3.8 ± 0.83	4.32 ± 1.27	3.8 ± 0.55	4.07 ± 1.03
$T_o(^{\circ}\text{C})$	23.81 ± 0.76	24.22 ± 0.86	23.85 ± 0.8	23.15 ± 1.41	-	-
$T_{o1} (^{\circ}\text{C})$	-	-	-	-	21.25 ± 1.13	20 ± 1.86
$T_{o2} (^{\circ}\text{C})$	-	-	-	-	27.85 ± 0.9	32.21 ± 1.4
$T_c(^{\circ}\text{C})$	39.69 ± 0.47	40.16 ± 0.5	40.65 ± 0.93	42.21 ± 2.04	39.97 ± 0.53	40.03 ± 0.78
$F_o(\text{h})$	19.77 ± 0.77	19.25 ± 0.72	16.42 ± 0.73	16.44 ± 1.22	18.86 ± 0.91	21.92 ± 1.48

$T_b, T_o, T_{o1}, T_{o2}, T_c$ و F_o به ترتیب دمای پایه، دمای بهینه، دمای بهینه زیرین، دمای بهینه فوقانی، دمای بیشینه و تعداد ساعات زیستی

$T_b, T_o, T_{o1}, T_{o2}, T_c$, and F_o are the base temperature, optimum temperature, the lower limit of optimum temperature, the upper limit of optimum temperature, ceiling temperature, and biological hours, respectively



شکل ۳ - رابطه بین دما و سرعت جوانه‌زنی دو ژنوتیپ کتان دانه روغنی گلچین (--) و لاین ۲۸۶ (-). برازش داده‌ها با استفاده از سه مدل غیر خطی: الف) بتا، ب) دوتکه و ج) دندان مانند انجام شده است.

Figure 3- The relationship between temperature and germination rate of two linseed genotypes, Golchin genotype (--) and Line 286 (-). Regression was made using three nonlinear models: a, Beta; b, segmented; and c, dent-like.

ارزیابی مدل‌های رگرسیونی

مدل‌هایی گزینش شدند که بخش بیشتری از تغییرات را توجیه کرده (یعنی R^2 بالاتر) و در همان حال ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تغییرات (CV) کوچکتری هم داشتند. در نهایت معیار انتخاب مدل یا مدل‌های برتر شاخص آکائیک (AIC)، شاخص آکائیک اصلاح شده (AICc) و شاخص Δi در نظر گرفته شد.

بر این اساس، در لاین ۲۸۶، مدل بتا در مقایسه با دو مدل دو تکه و دندان مانند به لحاظ داشتن ضریب تعیین تصحیح شده ($\text{Adj}R^2 = 0.96$) بالاتر و ریشه دوم میانگین مربعات خطا ($\text{RMSE} = 0.003$)، ضریب تغییرات ($\text{CV} = 13.57$) کمتر، دقت بالاتری را در پیش‌بینی سرعت جوانه‌زنی در دماهای مختلف نشان داد. از طرفی، شاخص آکائیک (AIC)، شاخص آکائیک اصلاح شده (AICc) نیز در این مدل نیز به ترتیب ۳/۹۶ و ۸۹/۶۱- به دست آمد که در مقایسه با دو مدل دیگر از مقدار کمتری برخوردار بود.

نیکویی برازش مدل‌های رگرسیونی بتا، دوتکه و دندان مانند بر پایه مقادیر ضرایب رگرسیون خطی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده (ضرایب a و b)، ضریب تبیین اصلاح‌شده ($\text{Adj}R^2$)، ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تغییرات (CV)، شاخص آکائیک (AIC)، شاخص آکائیک تصحیح‌شده (AICc) و شاخص Δi برای دو ژنوتیپ کتان (ژنوتیپ گلچین و لاین ۲۸۶) سنجیده‌شد که این مقادیر در جدول ۳ ارائه شده‌است. در این پژوهش، انتخاب مدل مناسب با رعایت دو شرط انجام شد. بدین ترتیب که نخست مدل‌هایی انتخاب شدند که پیش‌بینی آن‌ها بدون اریب بوده و یا به بیان دیگر مقادیر a و b آن‌ها به ترتیب با مقدار صفر و یک اختلاف معنی‌دار نداشت. این شرط در تمامی مدل‌های مورد مطالعه برقرار بود (جدول ۳). در گام پسین، از بین مدل‌های منتخب گام نخست، مدل یا

جدول ۳ - تخمین پارامترهای برازش سه مدل غیرخطی بتا، دوتکه و دندان مانند بر سرعت جوانه‌زنی دو ژنوتیپ کتان دانه روغنی گلچین و لاین ۲۸۶

Table 3- Parameter estimation of three nonlinear models (beta, segmented, and dent-like) fitted to germination rate of two linseed genotypes, Golchin and Line 286.

مدل	بتا		دوتکه		دندان مانند	
Model	Beta		segmented		dent-like	
پارامتر	ژنوتیپ گلچین	لاین ۲۸۶	ژنوتیپ گلچین	لاین ۲۸۶	ژنوتیپ گلچین	لاین ۲۸۶
Parameter	Golchin genotype	Line 286	Golchin genotype	Line 286	Golchin genotype	Line 286
a	0.001±0.001	0.0002±0.001	- 0.000±0.001	0.000±0.002	- 0.000±0.000	0.001±0.001
b	0.97±0.04	0.99±0.04	1±0.042	0.97±0.07	1±0.01	0.95±0.05
AdjR²	0.96	0.96	0.96	0.91	0.98	0.95
RMSE	0.003	0.003	0.003	0.006	0.002	0.004
CV	14.27	13.57	15.6	25.97	10.51	19.07
AIC	-3.89	-3.96	-3.71	-2.71	-2.73	-1.49
AICc	-89.083	-89.61	-87.42	-78.42	-84.55	-73.5
	0	0	1.61	11.19	4.49	16.18

a و b = ضرایب رگرسیون خطی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده، $\text{Adj}R^2$ = ضریب تبیین اصلاح‌شده، RMSE = ریشه دوم میانگین مربعات خطا، CV = ضریب تغییرات، AIC = شاخص آکائیک، AICc = شاخص آکائیک تصحیح‌شده و Δi = تفاوت AICc

a and b = Linear regression coefficients between predicted and observed values, $\text{Adj}R^2$ = Adjusted coefficient of determination, RMSE = Root Mean of Squares of Error, AIC = Akaike Information Criterion, AICc = Corrected Akaike Information Criterion, Δi = AICc differences.

بنابراین، می‌توان گفت که مدل بتا می‌تواند به عنوان مدل برتر در پیش‌بینی سرعت جوانه‌زنی لاین ۲۸۶ در دماهای مختلف در نظر گرفته شود. این موضوع با بررسی شاخص Δi نیز تایید شد (جدول ۳). زیرا، مقدار شاخص Δi در دو مدل دو تکه و دندان مانند به ترتیب ۱۱/۱۹ و ۱۶/۱۸ به دست آمد و به دلیل آن که مقادیر به دست آمده بیش از ۱۰ بود، بنابراین مدل بتا، اختلاف معنی‌داری به لحاظ دقت برازش با دو مدل دیگر (دندان مانند و دو تکه) نشان داد (جدول ۳).

در ژنوتیپ گلچین، بیشترین ضریب تعیین اصلاح شده ($\text{Adj}R^2 = 0/98$) و کمترین ریشه دوم میانگین مربعات خطا ($\text{RMSE} = 0/002$) و ضریب تغییرات ($\text{CV} = 10/51$) به مدل دندان مانند تعلق داشت. با این حال، کمترین شاخص آکائیک ($\text{AIC} = -3/89$) و شاخص آکائیک اصلاح شده ($\text{AICc} = -89/083$) در برازش با مدل بتا به دست آمد که در مقایسه با دو مدل دو تکه ($\text{AIC} = -3/71$ $\text{AICc} = -87/42$) و دندان مانند ($\text{AIC} = -2/73$ $\text{AICc} = -84/55$) کمتر بود. از طرفی، با در نظر گرفتن شاخص Δi می‌توان دریافت که اختلافی در دقت برازش مدل بتا و دو تکه برای ژنوتیپ گلچین وجود ندارد. زیرا، مقدار Δi در مدل دو تکه برابر با ۱/۶۱ است و از مقدار بحرانی (۲) کمتر است (بورنهام و اندرسون، ۲۰۰۲). بنابراین، می‌توان بیان کرد که مدل‌های بتا و دو تکه از توانایی یکسانی در کمی‌سازی دمای کاردینال جوانه‌زنی برای ژنوتیپ گلچین برخوردارند (جدول ۳).

در بسیاری از پیش‌بینی‌های صورت گرفته در بخش کشاورزی، برای انتخاب مدل برتر و نیز رتبه‌بندی مدل‌ها، از معیار اطلاعات آکائیک (AIC) استفاده می‌شود اما در صورت کم بودن تعداد مشاهدات، توصیه بر آن است که شاخص اطلاعات آکائیک اصلاح شده (AICc) مد نظر قرار داده شود (آکپا و آنیوآنا^۱، ۲۰۰۱). در همین راستا پرمون و همکاران (۲۰۱۵)، شاخص آکائیک اصلاح شده (AICc) را به عنوان معیار اصلی انتخاب مدل برتر در ارزیابی مدل‌های رگرسیونی مورد استفاده در پژوهش خود (دو تکه، بتا، بتا تغییر یافته و دندان مانند) در نظر گرفتند و گزارش کردند مدل بتا در

مقایسه با سه مدل دیگر، با داشتن شاخص آکائیک اصلاح شده ($-276/97$) کمتر از توانایی بالاتری در کمی‌سازی دماهای مختلف کاردینال خار مریم برخوردار است. در گزارش دیگری نیز به منظور ارزیابی مدل‌های مورد استفاده (دو تکه، بتا، بتای تغییر یافته و دندان مانند) برای تعیین دماهای کاردینال جوانه‌زنی عدس و نیز برای تعیین مدل قابل اعتماد، از شاخص آکائیک اصلاح شده (AICc) استفاده شد و بر مبنای این معیار، مدل بتا با ثبت کمترین مقدار شاخص آکائیک اصلاح شده ($-232/97$) در مقایسه با سه مدل دیگر به عنوان مدل برتر و دقیق تر معرفی شد (صفاهانی^۲ و همکاران، ۲۰۱۷). با این حال، مامدی^۳ و همکاران (۲۰۱۷) بر مبنای معیار شاخص آکائیک (AIC) دقت مدل‌های مورد استفاده در پژوهش خود (دندان مانند، دو تکه، بتا و بتاتغییر یافته) را تعیین کردند. بر اساس یافته‌های این پژوهشگران مدل‌های بتا و دندان مانند به ترتیب در ژنوتیپ Santamaria و Titicaca (ارقام کینوا) از دقت و اطمینان بالاتری برخوردار بودند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش از سه مدل بتا، دو تکه و دندان مانند برای کمی‌سازی و تعیین دماهای کاردینال جوانه‌زنی دو ژنوتیپ کتان (ژنوتیپ گلچین و لاین ۲۸۶) استفاده شد. نتایج نشان داد که با توجه به ژنوتیپ مورد مطالعه، مدل‌های رگرسیونی بتا، دو تکه و دندان مانند، توانایی و دقت متفاوتی را در تعیین دماهای کاردینال جوانه‌زنی نشان دادند. در لاین ۲۸۶، مدل بتا با داشتن کمترین شاخص آکائیک ($-3/96$) و شاخص آکائیک اصلاح‌شده ($-89/61$) در مقایسه با دو مدل دو تکه و دندان مانند از دقت بالاتر و معنی‌داری برای پیش‌بینی سرعت جوانه‌زنی در پاسخ به دماهای مختلف برخوردار بود. بنابراین، با استفاده از این مدل، دماهای پایه، بهینه، بیشینه و همچنین، تعداد ساعت زیستی به ترتیب ۷/۱۸، ۲۴/۲۲، ۴۰/۱۶ درجه سلسیوس و ۱۹/۲۵ ساعت تخمین شد. با این حال، در ژنوتیپ گلچین واکنش متفاوتی مشاهده شد. در این ژنوتیپ، و با بررسی

² Safahani

³ Mamed

¹ Akpa and Unuabonah

این ژنوتیپ بین ۳/۸ تا ۲۳/۸۵ درجه سلسیوس تخمین شد.

بنابراین، در کل می‌توان پیشنهاد کرد که برای تعیین دماهای کاردینال لاین ۲۸۶ از مدل بتا و برای ژنوتیپ گلچین می‌توان از هر یک از دو مدل بتا و دو تکه استفاده کرد تا در ترکیب با داده‌های هواشناسی محل کشت و کار ژنوتیپ‌های مذکور بتوان بهترین زمان کاشت آنها را برای رسیدن به بیشترین جوانه‌زنی و استقرار بوته و احتمالاً عملکرد دانه به دست آورد.

شاخص آکائیک اصلاح شده (AICc) و Δi مشخص شد که دو مدل بتا و دو تکه از توانایی یکسانی در تخمین دماهای کاردینال جوانه‌زنی برخوردارند. در ژنوتیپ گلچین، اگرچه مدل بتا با ثبت کمترین شاخص آکائیک (۳/۸۹-) و شاخص آکائیک اصلاح شده (۸۹/۰۸۳-) خطای کمتری نشان داد، اما با بررسی شاخص Δi در مدل دو تکه (۱/۶۱) مشخص شد که تفاوت معنی‌داری به لحاظ دقت برازش بین این دو مدل وجود ندارد. در نتیجه با استفاده از این دو مدل، گستره دمای جوانه‌زنی

منابع

- Akaike, H. 1974. A new look at the statistical model identification. IEEE Transactions on Automatic Control, 19(6):716-723. <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>.
- Akpa, O. M., and Unuabonah, E. I. 2011. Small-sample corrected Akaike information criterion: an appropriate statistical tool for ranking of adsorption isotherm models. Desalination, 272(1-3): 20-26. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.12.057>.
- Alvarado, V., and Bradford, K. 2002. A hydrothermal time model explains the cardinal temperatures for seed germination. Plant, Cell and Environment, 25(8): 1061-1069. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2002.00894.x>.
- Andreucci, M., Moot, D. J., Black, A., and 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. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.08.010>.
- Bonhomme, R. 2000. Bases and limits to using 'degree. day' units. European Journal of Agronomy, 13(1): 1-10. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00058-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00058-7).
- Bradford, K. J. 2002. Applications of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. Weed Science, 50(2): 248-260. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2002\)050\[0248:AOHTTQ\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2002)050[0248:AOHTTQ]2.0.CO;2).
- Burnham, K. P., and Anderson, D. R. 2002. Model Selection and Multimodel Inference: A practical information-theoretic approach. Springer, New York, USA. p.488.
- Cardwell, V. B. 1984. Seed germination and crop production. In M. B. Teaser (Ed.), Physiological basis of crop growth and development (pp. 53-92). Madison, WI: ASA. <https://doi.org/10.2135/1984.physiologicalbasis.c3>.
- Covell, S., Ellis, R., Roberts, E., and Summerfield, R. 1986. The influence of temperature on seed germination rate in grain legumes: I. A comparison of chickpea, lentil, soybean and cowpea at constant temperatures. Journal of Experimental Botany, 37(10): 1503-1515. <https://doi.org/10.1093/jxb/37.10.1503>.
- Foley, M. E., and Fennimore, S. A. 1998. Genetic basis for seed dormancy. Seed Science Research, 8(2): 173-182. <https://doi.org/10.1017/S0960258500004086>.
- Garcia-Huidobro, J., Monteith, J., and Squire, G. 1982. Time, temperature and germination of pearl millet (*Pennisetum typhoides* S. & H.) I. Constant temperature. Journal of Experimental Botany, 33(2): 288-296. <https://doi.org/10.1093/jxb/33.2.288>.

- Hardegree, S. P., and Winstral, A. H. 2006. Predicting germination response to temperature. II. Three-dimensional regression, statistical gridding and iterative-probit optimization using measured and interpolated-subpopulation data. *Annals of Botany*, 98(2): 403-410. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl112>
- Hasanuzzaman, M. 2019. *Agronomic crops*. Springer, Singapore. pp 455-459. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9783-8_21.
- Hoseinipoor, A., Yadavi, A.R., balouchi, H.R., and Moradi, A. 2020. The effect of water potential and deterioration on some indices of germination and biochemical of linseed (*Linum usitatissimum* Var. Norman) seed at different temperatures. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 9(2): 19-33. [In Persian with English Summary]. <https://dx.doi.org/10.22034/ijssst.2019.123144.1225>.
- Jame, Y., and Cutforth, H. 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. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.01.012>.
- Kamkar, B., Al-Alahmadi, M. J., Mahdavi-Damghani, A., and Villalobos, F. J. 2012. Quantification of the cardinal temperatures and thermal time requirement of opium poppy (*Papaver somniferum* L.) seeds to germinate using non-linear regression models. *Industrial Crops and Products*, 35(1): 192-198. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.06.033>.
- Klein, J., Zikeli, S., Claupen, W., and Gruber, S. 2017. Linseed (*Linum usitatissimum*) as an oil crop in organic farming: abiotic impacts on seed ingredients and yield. *Organic Agriculture*, 7(1-19): 1-19. <https://doi.org/10.1007/s13165-016-0146-6>.
- Kurt, O. 2012. A predictive model for the effects of temperature on the germination period of flax seeds (*Linum usitatissimum* L.). *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 36: 654-658. <http://dx.doi.org/10.3906/tar-1202-13>.
- Liu, J., Hasanuzzaman, M., Wen, H., Zhang, J., Peng, T., Sun, H., and Zhao, Q. 2019. High temperature and drought stress cause abscisic acid and reactive oxygen species accumulation and suppress seed germination growth in rice. *Protoplasma*, 256: 1217-1227. <https://doi.org/10.1007/s00709-019-01354-6>.
- Maguire, J.D. 1962. Speed of germination, aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science*, 2: 176-177.
- Mamedei, A., Tavakkol Afshari, R., and Oveisi, M. 2017. Cardinal temperatures for seed germination of three quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 48(89-100): 89-100. [In Persian with English Summary] <https://dx.doi.org/10.22059/ijfcs.2017.206204.654106>.
- McWilliam, J., Clements, R., and Dowling, P. 1970. Some factors influencing the germination and early seedling development of pasture plants. *Australian Journal of Agricultural Research*, 21(1): 19-32. <https://doi.org/10.1071/AR9700019>.
- Mhired, W. N., and Heslop-Harrison, J. S. 2018. Biodiversity in Ethiopian linseed (*Linum usitatissimum* L.): molecular characterization of landraces and some wild species. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 65: 1603-1614. <https://doi.org/10.1007/s10722-018-0636-3>.
- Parmoon, G., Moosavi, S. A., Akbari, H., and Ebadi, A. 2015. Quantifying cardinal temperatures and thermal time required for germination of *Silybum marianum* seed. *The Crop Journal*, 3(2): 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2014.11.003>.
- Piper, E. L., Boote, K. J., Jones, J. W., and Grimm, S. S. 1996. Comparison of two phenology models for predicting flowering and maturity date of soybean. *Crop Science*, 36(6): 1606-1614. <https://doi.org/10.2135/cropsci1996.0011183X003600060033x>.

- Ritchie, J. T., and Nesmith, D. S. 1991. Temperature and crop development. Modeling Plant and Soil Systems, 31: 5-29. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr31.c2>.
- Safahani, A. r., Kamakar, B., and Nabizadeh, A. 2017. Cardinal temperatures and thermal time required for emergence of lentil (*Lens culinaris* Medik). Legume Research-An International Journal, 40(2): 291-298. <http://10.0.73.117/lr.v0i0.7301>.
- Savaedi, Z., Parmoon, G., Moosavi, S .A., and Bakhshande, A. 2019. The role of light and Gibberellic Acid on cardinal temperatures and thermal time required for germination of Charnushka (*Nigella sativa*) seed. Industrial Crops and Products, 132: 140-149. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.025>.
- Shafii, B., and Price, W. J. 2001. Estimation of cardinal temperatures in germination data analysis. Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics, 6(3): 356-366. <https://doi.org/10.1198/108571101317096569>.
- Soltani, A., Robertson, M., Torabi, B., Yousefi-Daz, M., and Sarparast, R. 2006. Modelling seedling emergence in chickpea as influenced by temperature and sowing depth. Agricultural and Forest Meteorology, 138(1-4): 156-167. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.04.004>.
- Soltani, E., Galeshi, S., Kamkar, B., and Akramghaderi, F. 2008. Modeling seed aging effects on the response of germination to temperature in wheat. Seed Science and Biotechnology, 2(1): 32-36.
- Soureshjani, H. K., Bahador, M., Tadayon, M., and Dehkordi, A. G. 2019. Modelling seed germination and seedling emergence of flax and sesame as affected by temperature, soil bulk density, and sowing depth. Industrial Crops and Products, 141: 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111770>.
- Veerhoff, O. 1940. Time and temperature relations of germinating flax. American Journal of Botany, 27(4):225-231. <https://doi.org/10.2307/2436884>.
- Wade, L., Hammer, G., and Davey, M. 1993. Response of germination to temperature amongst diverse sorghum hybrids. Field Crops Research, 31(3-4): 295-308. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(93\)90068-X](https://doi.org/10.1016/0378-4290(93)90068-X).
- Wiese, A. M., and Binning, L. K. 1987. Calculating the threshold temperature of development for weeds. Weed Science, 35(2): 177-179. <https://doi.org/10.1017/S0043174500079017>.
- Windauer, L., Altuna, A., and Benech-Arnold, R. 2007. Hydrotime analysis of *Lesquerella fendleri* seed germination responses to priming treatments. Industrial Crops and Products, 25(1):70-74. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2006.07.004>.
- Yan, W., and Hunt, L. 1999. An equation for modelling the temperature response of plants using only the cardinal temperatures. Annals of Botany, 84(5): 607-614. <https://doi.org/10.1006/anbo.1999.0955>.
- Yin, X., Goudriaan, J., Lantinga, E. A., Vos, J., and Spiertz, H. J. 2003. A flexible sigmoid function of determinate growth. Annals of Botany, 91(3): 361-371. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg029>.
- Yin, X., Kropff, M. J., McLaren, G., and Visperas, R. M. 1995. A nonlinear model for crop development as a function of temperature. Agricultural and Forest Meteorology, 77(1-2): 1-16. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02236-Q](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02236-Q).
- Zhang, J., Xie, Y., Dang, Z., Wang, L., Li, W., Zhao, W., Zhao, L., and Dang, Z. 2016. Oil content and fatty acid components of oilseed flax under different environments in China. Agronomy Journal, 108(1): 365-372. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0224>.

Research Article

Quantifying the seed germination responses of two linseeds (*Linum usitatissimum*) genotypes to temperatureFatemeh Ghorbannezhad¹, Mohsen Zavareh^{2*}, Farzad Sharifzadeh³**Extended abstract**

Introduction: Linseed (*Linum usitatissimum* L.) is a multipurpose crop and is cultivated to obtain oil, fiber, and seeds. Under optimal moisture conditions, the temperature is considered an environmental factor affecting the germination of this crop. Hence, knowing the cardinal temperatures can help farmers to predict the successful germination, emergence, and even yield of linseed and help scientists to develop new cultivars that are more tolerant to high temperatures. Therefore, this study was performed to determine the temperature range and the cardinal temperatures of germination in two linseed genotypes.

Material and methods: The germination response of two linseed genotypes (Golchin genotype and Line 286) to nine temperatures (3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, and 40 Celsius degrees) was quantified in a CRD based split-plot experiment with four replications. For this purpose, three nonlinear regression models (beta, segmented, and dent-like) were used to fit to the data and select the superior model. The superior model was selected using the Akaike information index (AIC), the modified Akaike index (AICc), and Δi .

Results: Findings showed that the beta model had the best performance in estimating the line 286 cardinal temperatures according to its lower AIC (-3.96), AICc (-89.61), and Δi (0). Accordingly, the base, optimum, and maximum temperature as well as the number of biological hours estimated by this model for Line 286 were 7.18, 24.22, 40.16 Celsius degrees, and 19.25 hours, respectively. In the Golchin genotype, the beta model with the lowest AIC=-3.89 and AICc= -89.083 fitted better compared with the other models. Nonetheless, considering Δi for beta which was respectively 0, 1.61, and 4.49 for beta, segmented, and dent-like model, Beta and segmented models had a similar accuracy in estimation of cardinal temperatures for Golchin genotype. These findings represent that the suitable temperature range for germination of the Golchin genotype is 3.8- 23.85 Celsius degrees and the range of biological hours to 50% of germination varied from 16.42 to 19.77 hours.

Conclusion: Overall, according to the results of this study, it is possible to predict the time to germination under optimal moisture conditions using the beta model for Line 286 and one of the two beta and segmented models for the Golchin genotype.

Keywords: *Linseed, Germination rate, Regression model, Cardinal temperature*

Highlights:

1. A suitable model was developed for a suitable prediction of the seed germination percentage of two linseed genotypes (Golchin genotype and Line 286).
2. The cardinal temperatures for two linseed genotypes (Golchin genotype and Line 286) were determined.

¹ Ph.D. student of Agronomy, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.

² Associate Professor, Department of Agronomy & Plant Breeding, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.

³ Associate Professor, Department of Agronomy & Plant Breeding, College of Agricultural and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran.

