



دانشگاه گوارن و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی

جلد بیست و چهارم، شماره سوم، ۱۳۹۶

<http://jopp.gau.ac.ir>

تخمین دماهای کاردینال جوانه‌زنی بذر گل مغربی (*Oenothera biennis* L.)

با استفاده از مدل‌های رگرسیون غیر خطی

منوچهر شهبازی^{۱*}، قربانعلی نعمت‌زاده قراخیلی^۲، احد یامچی^۳ و ناصر باقرانی^۴

^۱ دانشجوی دکتری بیوتکنولوژی کشاورزی پژوهشکده ژنتیک و زیست‌فناوری کشاورزی طبرستان

^۲ استاد پژوهشکده ژنتیک و زیست‌فناوری کشاورزی طبرستان

^۳ استادیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

^۴ استادیار مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گلستان

تاریخ دریافت: ۹۵/۳/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۵

چکیده

سابقه و هدف: گل مغربی (*Oenothera biennis* L.) گیاه دارویی مناطق معتدله بوده و بذره‌های آن حاوی ۳۰-۲۰ درصد روغن می‌باشد. جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه از عوامل تعیین‌کننده عملکرد و زمان رسیدگی در گیاهان می‌باشند. توابع دمایی مختلفی برای توصیف واکنش جوانه‌زنی به دما وجود دارد که از میان آن‌ها سه تابع دوتکه‌ای، بتا و دندان‌مانند بیشتر از بقیه مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگرچه تاکنون مطالعات زیادی در زمینه تعیین دماهای کاردینال جوانه‌زنی و تعیین زمان حرارتی مورد نیاز برای سبز شدن تحت تأثیر دما انجام شده است؛ اما اطلاعات زیادی در این زمینه، در مورد گیاه دارویی گل مغربی در ایران وجود ندارد. از این رو، پژوهش حاضر به منظور ارزیابی مدل‌های رگرسیون غیرخطی برای توصیف سرعت جوانه‌زنی بذره‌های گل مغربی نسبت به دما و برآورد دماهای کاردینال جوانه‌زنی بذره‌های این گیاه صورت گرفته است.

مواد و روش‌ها: این آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی در هشت دمای ثابت ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد با چهار تکرار در آزمایشگاه شرکت آریا تیناژن گرگان انجام شد. تعداد ۱۰۰ عدد بذر گل مغربی در پتری‌دیش‌های ۹ سانتی‌متری حاوی دو لایه کاغذ صافی واتمن شماره یک قرار داده شد و با پنج میلی‌لیتر آب مقطر مرطوب شدند. تعداد بذره‌های جوانه‌زده هر ۱۲ ساعت شمارش گردید. برای محاسبه حداکثر سرعت جوانه‌زنی، منحنی پیشرفت جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان ترسیم و زمان لازم برای ۵۰ درصد جوانه‌زنی با استفاده از معادله سیگموئیدی سه پارامتری برآورد گردید. برای تعیین دماهای کاردینال، داده‌های مربوط به حداکثر سرعت جوانه‌زنی به‌عنوان تابع متغیر در برابر درجه حرارت رسم و با استفاده از معادله‌های درجه‌دو، بتا چهار پارامتری، دوتکه‌ای و دندان‌مانند برازش داده شد. معیارهای انتخاب مدل برتر شامل جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مطلق خطا (MAE)، ضریب تبیین تصحیح‌شده ($\text{adjusted } R^2$) و معیار اطلاعات آکائیک و آکائیک تصحیح‌شده (AIC و AICc) بودند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که تأثیر دما بر درصد جوانه‌زنی و زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی (سرعت جوانه‌زنی) در سطح پنج درصد معنی‌دار شد. مقایسه آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا، ضریب تبیین تصحیح‌شده و معیار اطلاعات آکائیک تصحیح‌شده نشان داد که استفاده از تابع دندان‌مانند جهت توصیف واکنش جوانه‌زنی بذر گل مغربی در مقابل دما مناسب‌تر است.

*مسئول مکاتبه: manouchehr.shahbazi@yahoo.com

بر این اساس، دماهای پایه، دامنه دماهای مطلوب و سقف مورد نیاز برای جوانه‌زنی بذرهای گل مغربی به ترتیب ۴/۷، ۲۴/۳ تا ۳۴/۷ و ۴۱/۲ درجه سانتی‌گراد برآورد گردید. تخمین دماهای پایه و سقف بین مدل‌ها متفاوت نبود؛ ولی دمای مطلوب در مدل دوتکه‌ای بیش از سایرین برآورد شد.

نتیجه‌گیری: جوانه‌زنی بذرهای گل مغربی از تابع دندان مانند تبعیت می‌کند و این نشان می‌دهد که بذرهای این گیاه قادر هستند در بازه وسیعی از دماها قدرت جوانه‌زنی خود را حفظ نمایند. در شرایط زراعی، کشت گل مغربی در پاییز و بهار امکان‌پذیر است و این موضوع با رفتار بوم‌شناختی این گیاه در طبیعت نیز مطابقت دارد.

واژه‌های کلیدی: مدل، کمی‌سازی، دمای پایه

مقدمه

مهم‌تر می‌باشد. بنابراین، جوانه‌زنی خوب و مناسب در محدوده وسیعی از شرایط محیطی، برای استقرار گیاهچه ضروری است (۴). دما یکی از عواملی است که از طریق القا خواب در بذر بر ظرفیت جوانه‌زنی و همچنین سرعت جوانه‌زنی بذرهای بدون کمون تأثیر می‌گذارد (۱۵). حداکثر درصد جوانه‌زنی در گیاهان در بازه‌ای از دماها رخ می‌دهد که در پایین‌تر و بالاتر از این دامنه دمایی، درصد جوانه‌زنی کمتر می‌باشد (۲۵). مشخص شده است که گیاهان دارای سه دمای کاردینال شامل پایه، مطلوب و حداکثر یا سقف برای جوانه‌زنی می‌باشند (۱). نجفی و همکاران (۲۰۰۹) رفتار جوانه‌زنی بذرهای ۱۱ گیاه دارویی را مورد بررسی قرار دادند و برای توصیف روند تغییرات جوانه‌زنی در برابر دما از مدل غیرخطی استفاده نمودند (۳۰). بر اساس آزمایش آن‌ها، دماهای پایه، مطلوب و سقف جوانه‌زنی گل مغربی (*Oenothera biennis* L.) به ترتیب ۳/۴، ۲۲/۵ و ۴۲/۵ درجه سانتی‌گراد برآورد گردید. انس‌مینگر و ایکوما (۱۹۸۷) بذرهای گل مغربی (*Oenothera biennis* L.) را در دماهای ثابت ۴ تا ۴۴ درجه قرار دادند. نتایج نشان داد که سرعت جوانه‌زنی در دامنه دمایی ۲۸ تا ۳۲ درجه سانتی‌گراد حداکثر بود (۱۱). تسویوزاکی (۲۰۰۶) بیان می‌دارد که افت جوانه‌زنی بذرهای گل مغربی در دماهای کم‌تر از ۲۷ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود و اکثر بذرهای این گیاه در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد

کشت گیاهان دارویی شاخه مهمی از کشاورزی بوده و منبع اصلی استخراج و تولید مواد اولیه برای ساخت داروهای موجود به‌شمار می‌رود. گل مغربی (*Oenothera biennis* L.) گیاه دارویی مناطق معتدله است و بذرهای آن حاوی ۳۰-۲۰ درصد روغن می‌باشد (۱۳). روغن گل مغربی حاوی اسید چرب بسیار با ارزش گامالینولیک است، به طوری که حدود ۹۰ درصد از فروش جهانی اسید گامالینولیک مربوط به گل مغربی می‌باشد (۱۰). اسید گامالینولیک به‌عنوان ماده واسط در متابولیسم بدن انسان و ساخت پروستاگلاندین‌ها شرکت دارد. همچنین، روغن گل مغربی منبع اولیه اسید گامالینولیک مورد نیاز در صنایع غذایی، دارویی و آرایشی محسوب می‌گردد (۲۰). گل مغربی از شمال آمریکا منشأ گرفته؛ ولی در حال حاضر چین عمده‌ترین تولیدکننده آن محسوب می‌شود (۶). گل مغربی یک‌ساله زمستانه یا دوساله اختیاری است. بذرهای گل مغربی قابلیت جوانه‌زنی در بهار یا پاییز را دارا هستند. گل‌های این گیاه خودگشن بوده؛ ولی دگرگشنی جزئی نیز در آن‌ها گزارش شده است (۳۶).

جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه از عوامل تعیین‌کننده عملکرد و زمان رسیدگی در گیاهان می‌باشند (۴۱). اثرات شرایط نامطلوب در طول دوره جوانه‌زنی و مراحل اولیه رشد گیاه نسبت به سایر مراحل رشد

خلیلی (۲۰۱۳) نیز برای کمی‌سازی واکنش سرعت جوانه‌زنی گیاه جو به دما و پتانسیل آب از مدل‌های رگرسیون غیرخطی استفاده کرد و مدل بتا چهارپارامتری را به‌عنوان مدل برتر معرفی نمود (۲۷). نجفی و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از مدل دوتکه‌ای، دماهای پایه، مطلوب و سقف جوانه‌زنی بذر ماریتغال را به‌ترتیب معادل ۲/۷، ۱۸ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد گزارش نمودند (۳۰). پوررضا و بحرانی (۲۰۱۲) نیز با استفاده از تابع دوتکه‌ای دماهای پایه، مطلوب و سقف برای جوانه‌زنی ماریتغال را به‌ترتیب معادل ۱/۳، ۲۰/۵ و ۴۰/۸ درجه سانتی‌گراد تعیین کردند (۳۲). خلیج و همکاران (۲۰۱۲) برای تخمین دماهای کاردینال کلزا و چهار علف‌هرز خردل وحشی (*Sinapis arvensis*)، خاکشیر (*Decurainia sophia*)، تربچه وحشی (*Raphanus raphanistrum*) و علف‌خسونی (*Phalaris minor*) از مدل‌های دندان‌مانند، بتا چهارپارامتری و دوتکه‌ای استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل دوتکه‌ای نسبت به مدل‌های دیگر واکنش سرعت جوانه‌زنی نسبت به دما را بهتر توصیف می‌کند (۲۶).

اگر چه تاکنون مطالعات زیادی در زمینه تعیین دماهای کاردینال جوانه‌زنی و تعیین زمان حرارتی موردنیاز برای جوانه‌زنی و سبز شدن تحت تأثیر دما انجام شده است؛ اما اطلاعات زیادی در این زمینه، در مورد گیاه دارویی گل مغربی در ایران وجود ندارد. اطلاع دقیق از نحوه جوانه‌زنی بذر گیاهان دارویی به‌منظور استقرار موفق و مطلوب و برای اهلی‌سازی و کشت آن‌ها ضروری است. از این‌رو، پژوهش حاضر به‌منظور ارزیابی مدل‌های رگرسیون غیرخطی برای توصیف سرعت جوانه‌زنی بذرهای گل مغربی نسبت به دما و برآورد دماهای کاردینال جوانه‌زنی این گیاه صورت گرفته است.

ظرف مدت پنج‌روز جوانه‌زنی می‌نمایند (۳۹). ویس (۲۰۰۴) گزارش نمود که بذرهای گل مغربی در شرایط دمایی ۲۰ درجه سانتی‌گراد ظرف مدت ۹/۸ روز و به میزان ۶۷ درصد جوانه‌زنی داشته‌اند (۴۰). تریدجیل (۱۹۸۶) نیز گزارش نمود که در شرایط دمایی ۲۵/۱۵ و ۱۴ ساعت نور، حدود ۷۲ درصد بذرهای گل مغربی جوانه زدند (۳۸). موسوی و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند که بیش‌ترین درصد جوانه‌زنی بذرهای گل مغربی در شرایط دمایی ۲۵/۱۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۶ ساعت نور به میزان ۶۲/۶ درصد بوده است (۲۹). مدل‌های ریاضی متعددی برای توصیف الگوی جوانه‌زنی در واکنش به درجه‌حرارت ارائه شده‌اند (۲۱). برخی از این مدل‌ها قادر به پیش‌بینی دماهای کاردینال جوانه‌زنی می‌باشند. انتخاب مدل مناسب برای کمی‌سازی واکنش سرعت جوانه‌زنی نسبت به دما، در تعیین دقیق دماهای کاردینال بسیار مهم است (۱۸). توابع دمایی مختلفی برای توصیف واکنش جوانه‌زنی به دما وجود دارد که از میان آن‌ها سه تابع دوتکه‌ای، بتا و دندان‌مانند برای بررسی واکنش جوانه‌زنی بذرها به دما بیشتر از بقیه مورد استفاده قرار می‌گیرند (۲۳). حیدری و همکاران (۲۰۱۴) در مطالعه گیاه ماریتغال (*Silybum marianum* L.) با استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی، مدل دوتکه‌ای را به‌عنوان مدل برتر در پیش‌بینی سرعت جوانه‌زنی معرفی کردند (۱۹). در مطالعه دیگری، کامکار و همکاران (۲۰۰۸) برای کمی‌سازی سرعت ظاهر شدن گیاهچه گندم در واکنش به دما، مدل لجستیک را به‌عنوان مدل برتر انتخاب کردند (۲۲). اشراقی‌نژاد و همکاران (۲۰۰۹) برای ارزیابی پاسخ ظاهر شدن گیاهچه سه‌گونه ارزن (*Panicum miliaceum* P.، *Setaria italica*, *galucum*) به دما، از مدل‌های مختلف رگرسیون غیرخطی استفاده کردند (۱۲).

مواد و روش‌ها

شرایط آزمایش: این پژوهش در آزمایشگاه تحقیقاتی شرکت تولید داروهای نوترکیب آریا تینازن گرگان انجام شد. بذره‌های گل مغربی (*Oenothera biennis* L.) موردنیاز آزمایش در پاییز ۱۳۹۴ از مزرعه تحقیقاتی مرکز آموزش کشاورزی کردکوی واقع در ۲۰ کیلومتری غرب شهرستان گرگان در استان گلستان، جمع‌آوری شد. منشا بذرها کشور آلمان بوده و در محل مذکور بازکشت شده بودند. به‌منظور اطمینان از صحت داده‌های به‌دست آمده، کلیه آزمایش‌ها دوبار تکرار شدند و میانگین آن‌ها مورد استفاده قرار گرفت. برای تعیین واکنش جوانه‌زنی بذره‌های گل مغربی به درجه حرارت، آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی در هشت دمای ثابت ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد با چهار تکرار تحت شرایط آزمایشگاهی و در انکوباتور انجام شد. تعداد ۱۰۰ عدد بذر گل مغربی در پتری‌دیش‌های ۹ سانتی‌متری حاوی دو لایه کاغذصافی واتمن شماره یک قرار داده شد و با ۵ میلی‌لیتر آب مقطر مرطوب شدند. برای کاهش تلفات آب از طریق تبخیر، ظروف در پلاستیک شفاف قرار گرفته و در صورت نیاز، کمبود آب آن‌ها جبران می‌شد. شمارش بذره‌های جوانه‌زده هر ۱۲ ساعت انجام شد و معیار جوانه‌زنی، خروج ریشه‌چه به اندازه دو میلی‌متر یا بیشتر در نظر گرفته شد. پایان مرحله جوانه‌زنی، زمانی در نظر گرفته شد که در دو روز متوالی جوانه‌زنی انجام نگرفته باشد. این زمان بسته به سرعت جوانه‌زنی بذرها در تیمارهای مختلف، متفاوت بود.

برای محاسبه حداکثر سرعت جوانه‌زنی، منحنی پیشرفت جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان ترسیم و زمان لازم برای ۵۰ درصد جوانه‌زنی با استفاده از معادله سیگموئیدی سه پارامتری (معادله ۱) برآورد گردید (۲۳).

$$y = \frac{R_{\max}}{1 + e^{-\left(\frac{x - D_{50}}{b}\right)}} \quad \text{(معادله ۱)}$$

در این معادله R_{\max} ، حداکثر درصد جوانه‌زنی تجمعی؛ D_{50} زمان لازم برای رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی (حداکثر سرعت جوانه‌زنی) و b شیب افزایش حداکثر سرعت جوانه‌زنی می‌باشد. با استفاده از معادله ۲ مقادیر D_{10} و D_{90} نیز محاسبه شدند (۳۱).

$$D_{50} = \frac{D_x}{\left(\frac{x}{100-x}\right)^{1/b}} \quad \text{(معادله ۲)}$$

در این معادله مقدار x برای محاسبه D_{90} و D_{10} به ترتیب ۱۰ و ۹۰ باید باشد. مقدار b همان شیب افزایش حداکثر سرعت جوانه‌زنی در معادله ۱ می‌باشد. یکنواختی جوانه‌زنی (معادله ۳) همانند سیدشرفی و سیدشرفی (۲۰۰۹) از تفاضل زمان لازم برای رسیدن به ۱۰ و ۹۰ درصد جوانه‌زنی به دست آمد (۳۴).

$$GU = D_{90} - D_{10} \quad \text{(معادله ۳)}$$

در این معادله GU ، یکنواختی جوانه‌زنی (ساعت)؛ D_{90} و D_{10} به ترتیب زمان لازم برای ۹۰ و ۱۰ درصد جوانه‌زنی می‌باشند. حداکثر سرعت جوانه‌زنی با استفاده از معادله ۴ محاسبه شد (۳۵) که در آن R_{50} حداکثر سرعت جوانه‌زنی و D_{50} زمان لازم برای رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی می‌باشد.

$$R_{50} = \frac{1}{D_{50}} \quad \text{(معادله ۴)}$$

تعیین دماهای کاردینال بر اساس انتخاب مناسب‌ترین مدل: برای تعیین دماهای کاردینال، داده‌های مربوط به حداکثر سرعت جوانه‌زنی به‌عنوان تابع متغیر در برابر درجه حرارت رسم و با استفاده از معادله‌های درجه دو، بتا چهار پارامتری، دوتکه‌ای و دندان مانند برازش داده شد. توابع دمایی از روابط زیر به دست آمدند (۸).

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

$$f(T) = \left(\frac{T_c - T}{T_c - T_{o2}} \right) \quad \text{if } T_{o1} < T < T_{o2} \quad \text{معادله (۷)}$$

$$f(T) = 1 \quad \text{if } T_b < T \text{ or } T > T_{o2}$$

$$f(T) = 0$$

۴- تابع دو تکه‌ای به صورت:

$$f(T) = \left(\frac{T - T_b}{T_o - T_b} \right) \quad \text{if } T_b < T < T_o$$

$$f(T) = \left(\frac{T - T_o}{T_c - T_o} \right) \quad \text{if } T_o < T < T_c \quad \text{معادله (۸)}$$

$$f(T) = 0 \quad \text{if } T_b < T \text{ or } T > T_o$$

کوچکتر نیز نشانه برازش بهتر داده‌ها به مدل‌ها است. در تعیین جذر میانگین مربعات خطا از برازش معادله خطی بین مقادیر مشاهده شده (X) و پیش‌بینی شده (Y) سرعت جوانه‌زنی نسبت به دما استفاده شد. میزان انحراف خط رگرسیون از مبدأ مختصات (a) و تفاوت شیب (b) در مدل‌های مختلف به‌عنوان معیار انتخاب بهترین مدل قرار گرفت. بدیهی است که برای انتخاب مدل برتر بهتر است که مقادیر a و b معنی‌دار نباشند (۴۲).

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \right) \sum (Y_o - Y_p)^2} \quad \text{معادله (۹)}$$

$$MAE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (Y_o - Y_p)} \quad \text{معادله (۱۰)}$$

در این معادله: RMSE، جذر میانگین مربعات خطا؛ MAE، میانگین مطلق خطا؛ Y_o و Y_p ، به ترتیب مقادیر داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده؛ n: تعداد نقاط هستند.

$$AIC = n.Ln\left(\frac{RSS}{n}\right) + 2K \quad \text{معادله (۱۱)}$$

معادله (۱۲)

$$AICc = n.Ln\left(\frac{RSS}{n}\right) + 2K + \frac{2K(K+1)}{n-K-1}$$

(۱) تابع درجه دو به صورت:

$$f(T) = a.T^2 + bT + c \quad \text{معادله (۵)}$$

از حل مشتق معادله ۵ نقطه عطف منحنی درجه دو به دست آمد که نشان‌دهنده دمای بهینه $(T_o = \frac{b}{2a})$ برای حصول حداکثر سرعت جوانه‌زنی است (۳۳).

۲- تابع بتای چهار پارامتری به صورت:

$$f(T) = \frac{1}{f_o} \times \left[\left(\frac{T_c - T}{T_c - T_o} \right) \times \left(\frac{T - T_b}{T_o - T_b} \right) \left(\frac{T_o - T_b}{T_c - T_o} \right) \right]$$

(۳) تابع دندان‌مانند به صورت:

که در این معادله‌ها:

T: دماهای مورد آزمایش؛ T_b ، برآورد دمای پایه؛ T_{o1} ، برآورد دمای مطلوب اول؛ T_{o2} ، برآورد دمای مطلوب دوم؛ T_c ، برآورد دمای سقف؛ f_o ، برآورد حداکثر زمان لازم برای جوانه‌زنی در دمای مطلوب (زمان بیولوژیک)؛ a، b و c ضرایب ثابت هستند.

انتخاب مدل: بهترین برآورد متغیرهای مدل بر اساس جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مطلق خطا (MAE)، ضریب تبیین تصحیح شده (Adjusted R^2) و معیارهای اطلاعات آکائیک (AIC) و اطلاعات آکائیک تصحیح شده (AICc) طبق معادله‌های ۱۱ و ۱۲ انجام گرفت (۵). براساس معیار اطلاعات آکائیک، بهترین مدل دارای کمترین مقدار AICc می‌باشد. در این مورد، رتبه‌بندی مدل‌ها توسط شاخص Δ_i (معادله ۱۳) انجام گرفت. چنانچه Δ_i کمتر از ۱۰ باشد به منزله عدم تفاوت بین مدل‌ها است و در غیر این صورت، کمترین Δ_i نشان‌دهنده بهترین مدل خواهد بود (۸). همچنین، هر قدر که ضریب تبیین تصحیح شده مدل بالاتر باشد، نشان‌دهنده این است که درصد تغییرات سرعت جوانه‌زنی نسبت به دما بیشتر توجیه شده است. جذر میانگین مربعات خطای

$$\Delta_i = AICc - \min AICc \quad (\text{معادله ۱۳})$$

در این معادله‌ها:

AIC، معیار اطلاعات آکائیک؛ AICc، معیار اطلاعات آکائیک تصحیح‌شده؛ n، تعداد نمونه؛ RSS، جمع مربعات خطا و K، تعداد پارامترهای مدل هستند.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

داده‌ها پس از بررسی برقراری مفروضات تجزیه واریانس مورد تجزیه قرار گرفتند. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD انجام شد. توابع رگرسیونی با استفاده از نرم‌افزار Sigmaplot نسخه ۱۳ رسم گردید و برای تجزیه واریانس از نرم‌افزار Statgraphics نسخه ۱۷ استفاده شد.

نتایج و بحث

تأثیر رژیم‌های حرارتی بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذرهای گل مغربی: مقادیر حداکثر درصد و سرعت جوانه‌زنی، زمان لازم برای رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی و یکنواختی جوانه‌زنی بذرهای گل مغربی در رژیم‌های حرارتی مورد آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده است. در دمای پنج درجه سانتی‌گراد، هیچ‌یک از بذرهای جوانه‌زنی نداشتند. افزایش درجه حرارت تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد موجب افزایش تعداد بذرهای جوانه‌زده گردید و بعد از آن نیز تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد به‌طور معنی‌داری افزایش یافت؛ ولی از ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد افزایش جوانه‌زنی معنی‌دار نبود. به هر حال، روند کاهشی این شاخص بعد از این دما ملاحظه شد. حداکثر سرعت جوانه‌زنی نیز به تبعیت از دما افزایش یافت و در ۲۵ درجه سانتی‌گراد به حداکثر رسید. در دماهای ۱۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد، بیشترین زمان برای رسیدن به ۵۰

درصد جوانه‌زنی بذرها صرف شد. ولی در دامنه دمایی ۱۵ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد، این زمان بین ۴۵ تا ۹۹ ساعت بود. شاخص یکنواختی جوانه‌زنی از ۱۰۸ در دمای ۱۰ به ۹ در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. این شاخص در دامنه دمایی ۲۵ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد مشابه بود.

اختلاف در بیشترین درصد جوانه‌زنی و بیشترین سرعت جوانه‌زنی در مطالعه تبریزی و همکاران (۲۰۰۸) نیز روی بذرهای دو توده آویشن (*Thymus transcaspicus*) گزارش شد. آن‌ها بیان نمودند سرعت جوانه‌زنی در واکنش به دماهای مورد مطالعه روندی مشابه با درصد جوانه‌زنی برای هر دو توده بذری داشت؛ اما بالاترین سرعت جوانه‌زنی با بالاترین درصد جوانه‌زنی تطابق نداشت. بالاترین درصد جوانه‌زنی در دمای ۱۵ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد و بیشترین سرعت جوانه‌زنی در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد برای هر دو توده حاصل شد (۳۷). خان و همکاران (۲۰۰۱) نیز بیان می‌دارند که بیشترین درصد جوانه‌زنی معمولاً در دمایی کمتر از بیشترین سرعت جوانه‌زنی حاصل می‌شود (۲۸). از دلایل کاهش درصد و سرعت جوانه‌زنی در دماهای غیرمطلوب می‌توان به کاهش و یا ممانعت از فعالیت آنزیم‌ها و در نتیجه کاهش سرعت فرآیندهای زیستی لازم برای جوانه‌زنی در این دماها اشاره کرد (۲۴). همچنین، کاهش کارایی سوخت و ساز بذرها از دیگر عوامل کاهش سرعت جوانه‌زنی در دماهای بالاتر از دمای مطلوب گزارش شده است (۴۳). برادفورد (۲۰۰۲) نیز بیان داشت که در دماهای بالاتر از مطلوب تا خوردگی پروتئین‌ها، اختلال در غشاها و اثرات متقابل با خشکی وجود دارد (۳).

جدول ۱: شاخص‌های جوانه‌زنی بذرهای گل مغربی در دماهای آزمایش

Table 1. Seed germination indices of evening primrose at experimental temperatures

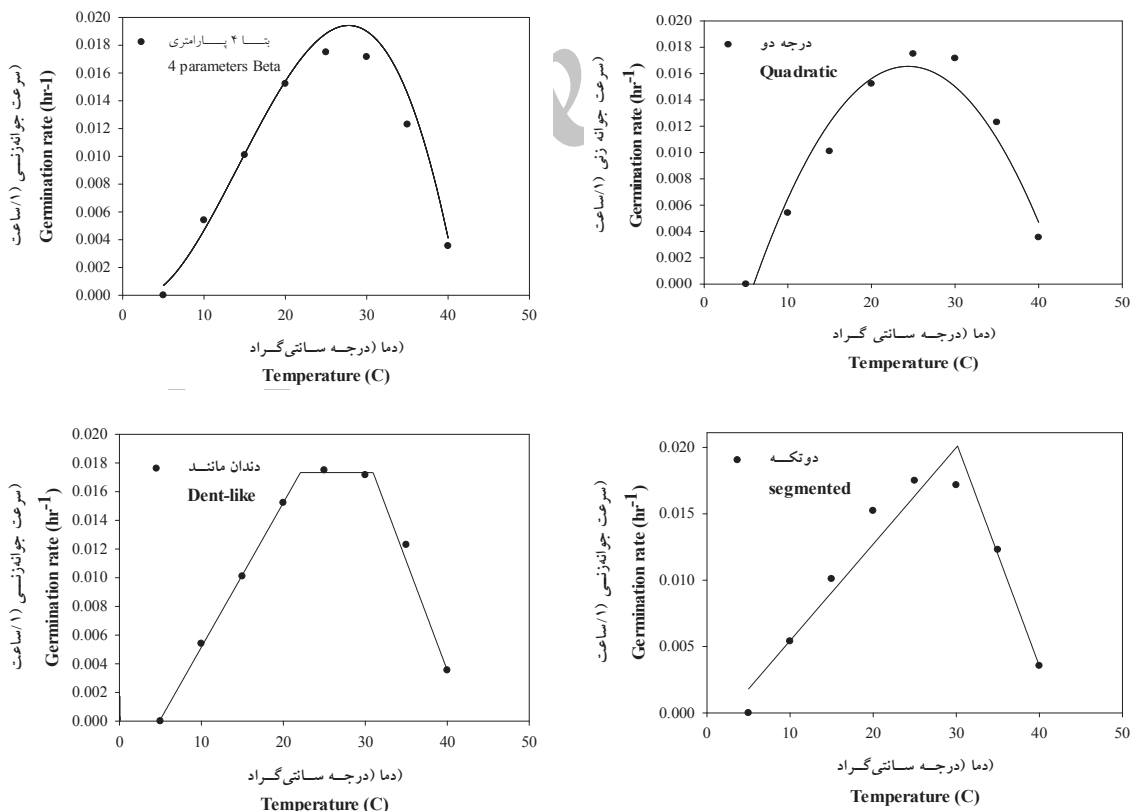
دما Temperature	یکنواختی جوانه‌زنی Germination uniformity	زمان ۵۰ درصد جوانه‌زنی (ساعت) Time to 50 % germination (hr)	حداکثر سرعت جوانه‌زنی (در ساعت) Maximum germination rate (hr ⁻¹)	جوانه‌زنی (درصد) Germination (%)
5	0	0	0	0
10	108	184	0.0054	47
15	85	99	0.0101	64
20	75	65	0.0152	71
25	40	52	0.0193	82
30	49	58	0.0172	69
35	49	45	0.0122	66
40	9	282	0.0035	37
LSD _{0.05}	23	76	0.006	22

دوتکه‌ای، دمای مطلوب به‌طور معنی‌داری بیشتر از دو مدل دیگر برآورد شد. بر همین اساس، زمان زیستی یا حداقل زمان لازم برای جوانه‌زنی در دمای مطلوب (fo) این مدل‌ها به ترتیب ۵/۵، ۴۱/۵ و ۴۲/۳ ساعت به دست آمد که باتوجه به بالاتر بودن دمای مطلوب برآورد شده در مدل دوتکه‌ای، این زمان به‌طور معنی‌داری نسبت به مدل‌های بتا چهار پارامتری و دندان‌مانند بیشتر بوده است. زمان رسیدن به درصد مشخصی از جوانه‌زنی عامل مهمی در واکنش جوانه‌زنی بذرها نسبت به عوامل محیطی و حتی تنش‌های محیطی است. وقتی بذر گیاهی در دمای مناسب جوانه‌زنی قرار نداشته باشد، برای شروع جوانه‌زنی به زمان بیشتری نیاز دارد (۹). نجفی و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از یک مدل دوتکه‌ای دماهای پایه، مطلوب و سقف جوانه‌زنی گل مغربی را به ترتیب ۴/۴، ۲۲/۵ و ۴۲/۵ درجه سانتی‌گراد گزارش نمودند (۳۰). موسوی و همکاران (۲۰۱۲)، ویس (۲۰۰۴) و تریدجیل (۱۹۸۶) نیز دمای مطلوب جوانه‌زنی بذرهای گل مغربی را در بازه دمایی ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد گزارش نموده‌اند که تقریباً مشابه دماهای به دست آمده در این آزمایش می‌باشد (۲۹، ۴۰ و ۳۸). تفاوت اعداد به دست آمده برای دماهای کاردینال می‌تواند به تفاوت منشاء (خاستگاه) بذر و نیز تفاوت روش‌های محاسبه (رگرسیون خطی

دماهای کاردینال بذرهای گل مغربی در مدل‌های مختلف: روند تغییرات سرعت جوانه‌زنی در دماهای مورد آزمایش در مدل‌های درجه دو، بتا چهار پارامتری، دوتکه‌ای و دندان‌مانند در شکل ۱ و مقادیر برآورد شده دماهای کاردینال در جدول ۲ نشان داده شده است. معادله درجه دو قادر به تخمین دماهای پایه و سقف نیست؛ ولی با محاسبه مشتق معادله مربوطه می‌توان نقطه عطف منحنی را که نشان‌دهنده دمای مطلوب جوانه‌زنی است، به دست آورد. این دما در معادله مذکور ۲۴/۵ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد که خیلی نزدیک به مقدار برآورد شده این شاخص توسط سایر مدل‌ها می‌باشد. مدل بتا چهار پارامتری، دماهای پایه، مطلوب و سقف را به ترتیب حدود ۲/۵، ۲۷/۷ و ۴۱/۴ درجه سانتی‌گراد برآورد نمود. همانند این نتیجه، دماهای پایه و سقف جوانه‌زنی بذرهای گل مغربی توسط مدل دوتکه‌ای به ترتیب ۳ و ۴۱/۲ درجه سانتی‌گراد تخمین زده شد؛ ولی دمای مطلوب (با حدود پنج واحد اختلاف) به میزان ۳۲/۹ درجه سانتی‌گراد و بیشتر از حد مورد انتظار پیش‌بینی شد. در مدل دندان‌مانند، دماهای پایه، مطلوب و سقف به ترتیب ۴/۷، ۲۴/۲ تا ۳۴/۷ و ۴۱/۴ درجه سانتی‌گراد برآورد گردید. در مجموع بین دماهای پایه و سقف در مدل‌های بتا چهار پارامتری، دوتکه‌ای و دندان‌مانند تفاوت معنی‌داری وجود نداشت؛ ولی در مدل

کامکار و همکاران (۲۰۱۵) برای کمی‌سازی واکنش سرعت جوانه‌زنی به دما در سه رقم آفتابگردان (*Helianthus annuus*)، مدل دندان‌مانند را معرفی نمودند (۲۴). همین مدل را گنجعلی و همکاران (۲۰۱۱) نیز برای برآورد درجه حرارت‌های کاردینال و زمان حرارتی موردنیاز برای جوانه‌زنی و سبز شدن ژنوتیپ‌های نخود (*Cicer arietinum*) گزارش کردند (۲۰۱۱). دامنه دمای مطلوب برآوردشده در این مدل، با نیازهای بوم‌شناختی گیاه گل‌مغربی در طبیعت مطابقت دارد. در گزارش مشابه، بالندری و همکاران (۲) بیان داشتند که جوانه‌زنی گیاه دارویی کاسنی (*Cichorium intybus*) در دامنه ۳ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد نشانه توانایی بقای این گیاه وحشی در محیط‌های مختلف می‌باشد (۲).

یا غیرخطی) باز گردد (۹). این واقعیت توسط کامکار و همکاران (۲۰۱۲) در خشخاش (*Papaver somniferum*) و سعیدنژاد و همکاران (۲۰۱۲) در زیره‌سبز (*Cuminum cyminum*) نیز مورد تأکید قرار گرفته است (۲۳ و ۳۳). انتخاب مدل مناسب برای کمی‌سازی واکنش سرعت جوانه‌زنی نسبت به دما در تعیین دقیق دماهای کاردینال بسیار پراهمیت است (۱۶). دری و همکاران (۲۰۱۴) مدل دوتکه‌ای را نسبت به سایر مدل‌های رگرسیونی غیرخطی برای توصیف واکنش جوانه‌زنی ماریتیغال نسبت به دما مناسب دانسته است (۹). قادری‌فر و همکاران (۲۰۱۴) بیان می‌دارند که در کدو تخم‌کاغذی (*Cucurbita pepo*) و سیاه‌دانه (*Nigella sativa*) مدل‌های بتا و دندان‌مانند نسبت به مدل‌های دیگر، واکنش سرعت جوانه‌زنی نسبت به دما را بهتر توصیف می‌کند (۱۶).



شکل ۱: روند تغییرات سرعت جوانه‌زنی بذرهای گل مغربی در دماهای مورد آزمایش در مدل‌های درجه دو، بتا چهار پارامتری، دوتکه‌ای و دندان‌مانند.

Figure 1. Trend of evening primrose seed germination rate at examined temperatures in quadratic, four parameters beta, segmented and dent-like models.

جدول ۲: تخمین دماهای کاردینال جوانه‌زنی بذرهای گل مغربی توسط مدل‌های درجه‌دو، بتا چهارپارامتری، دوتکه‌ای و دندان‌مانند

Table 2. Estimation of cardinal temperatures of evening primrose seeds based on quadratic, four parameters beta, segmented and dent like models

مدل Model	دماهای کاردینال (درجه سانتی‌گراد) Cardinal Temperatures (°C)					زمان بیولوژیک (fo) Biological time(hr)
	پایه (Tb) Base temperature	مطلوب (To) Optimum temperature	مطلوب اولیه (To1) Lower optimum temperature	مطلوب ثانویه (To2) Upper optimum temperature	سقف (Tc) Ceiling temperature	
درجه‌دو Quadratic	-	24.5	-	-	-	-
بتا چهارپارامتری Four parameters beta	2.5 (3.08)	27.7 (0.71)	-	-	41.4 (0.49)	51.5 (1.74)
دوتکه‌ای Segmented	3 (1.28)	32.9 (1.72)	-	-	41.2 (1.15)	41.5 (3.17)
دندان‌مانند Dent like	4.7 (1.01)	-	24.3 (1.24)	34.7 (0.82)	41.2 (0.89)	52.3 (1.90)

اعداد داخل پرانتز مقادیر خطای استاندارد (SE) را نشان می‌دهند.

^{fo} حداقل زمان لازم برای جوانه‌زنی در دمای مطلوب (زمان بیولوژیک)

Parenthesis show Standard Error (SE) values.

^{fo} Minimum required time to germination at optimum temperature (Biological time)

به ترتیب عرض از مبدأ خط رگرسیون و شیب خط رگرسیون نسبت به خط ۱:۱ دارای اریب می‌باشند. مدل بتا چهار پارامتری را نیز می‌توان به دلیل معنی‌دار بودن b از مقایسات حذف نمود. ضرایب a و b در مدل‌های دوتکه‌ای و دندان‌مانند معنی‌دار نبودند و در نهایت به دلیل کمتر بودن این مقادیر در مدل دندان‌مانند، مدل مذکور انتخاب گردید. نتایج در خصوص شاخص MAE نیز همانند RMSE بوده و با وجود تفاوت بسیار جزئی مقدار این شاخص در مدل‌های دوتکه‌ای و دندان‌مانند، مدل اخیر به عنوان بهترین توصیف‌کننده واکنش سرعت جوانه‌زنی بذرهای گل مغربی نسبت به دما برگزیده شد. بررسی مقادیر ضریب تبیین تصحیح‌شده نیز همین موضوع را تایید نمود؛ زیرا این مدل ۹۷ درصد از تغییراتی که در سرعت جوانه‌زنی رخ داده بود را به تغییرات دما نسبت داد.

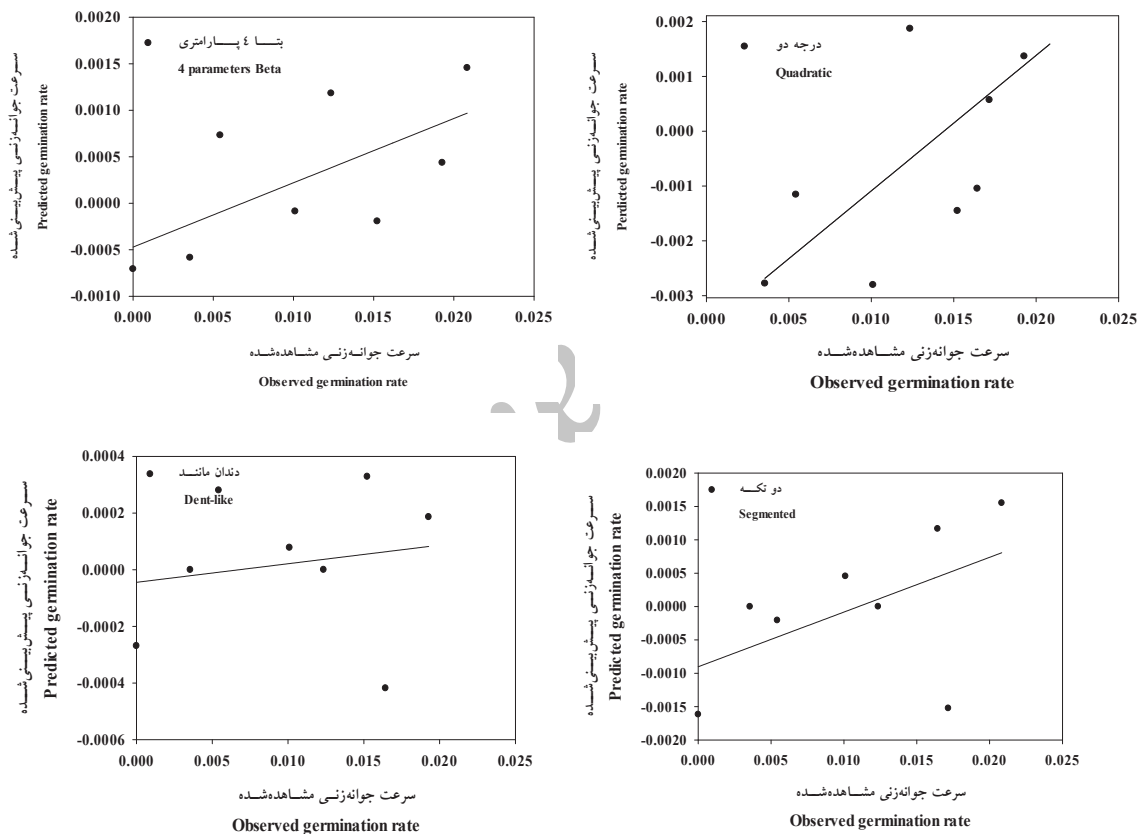
شاخص‌های مبتنی بر خطا به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان معیار انتخاب مدل مورد استفاده قرار می‌گیرند. کامکار و همکاران (۲۴) با توجه به

انتخاب مدل مناسب

شاخص‌های مبتنی بر خطا: شاخص‌های مبتنی بر خطا در بررسی مدل‌های مختلف برای انتخاب مدل برتر شامل مجذور میانگین مربعات انحراف (RMSE) و ضرایب معادله خطی مقادیر پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده سرعت جوانه‌زنی (a و b) مربوط به آن، میانگین مطلق خطا (MAE) و ضریب تبیین تصحیح‌شده (R^2 Adjusted) بودند. مقدار کمتر RMSE در مدل‌های مورد بررسی نشانه کمتر بودن فاصله نقاط پیش‌بینی‌شده از نقاط مشاهده‌شده می‌باشد. براین اساس، مدل‌های درجه‌دو و بتا چهارپارامتری دارای بیشترین RMSE بوده و مدل‌های مناسبی محسوب نمی‌گردند. بین مدل‌های دوتکه‌ای و دندان‌مانند، مدل اخیر دارای مقدار RMSE کمتری بود و با توسل به این شاخص مدل برتر شناخته می‌شود. ضرایب a و b (به ترتیب میزان انحراف خط رگرسیون از مبدا مختصات و میزان اریب از شیب خط ۱:۱) در شکل ۲ و جدول ۳ نشان داده شده است. معنی‌دار بودن این ضرایب در مدل درجه‌دو نشانه این است که

بذرهای این گیاهان به دما است (۲۲). قادری فر و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که در سیاه‌دانه، مدل‌های درجه‌دو، دوتکه‌ای و درجه‌سه به دلیل معنی‌دار بودن ضرایب a و b و همچنین پراکندگی زیاد نقاط در اطراف خط ۱:۱ دارای اریب می‌باشد و به دلیل عدم برازش مناسب، کنار گذاشته شدند. آن‌ها مدل‌های دندان‌مانند، بتا و منحنی در گیاه سیاه‌دانه را به‌عنوان مدل‌های برتر پیشنهاد نمودند (۱۶).

کمتر بودن مقدار RMSE مدل‌های دندان‌مانند و دوتکه‌ای در ارقام آفتابگردان، این مدل را نسبت به مدل بتا انتخاب نمودند. آن‌ها نشان دادند که ضرایب a و b از مدل بتا کمتر و مقدار R^2 (۹۹ درصد) بیشتر بود. خلج و همکاران (۲۰۰۸) بیان داشتند که مدل دوتکه‌ای در کلزا و تمامی علف‌های هرز دارای پارامترهای RMSE کمتر و $Adj. R^2$ بیشتر بوده است که نشانه برتری این مدل در تخمین واکنش جوانه‌زنی



شکل ۲: روند تغییرات حداکثر سرعت جوانه‌زنی مقادیر مشاهده شده در مقابل پیش‌بینی‌شده بذرهای گل مغربی در مدل‌های آزمایش
 Figure 2. Trend of observed maximum germination rate vs. predicted values of evening primrose seeds in the examined models.

جدول ۳: مجذور میانگین مربعات انحراف (RMSE) و ضرایب معادله خطی مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده سرعت جوانه‌زنی (a) و (b) مربوط به آن، میانگین مطلق خطا (MAE) و ضریب تبیین تصحیح شده (Adjusted R²)

Table 3. Root Mean Square Error (RMSE), and linear equation coefficient of predicted maximum germination rate versus observed values (a and b), Mean Absolute Error (MAE) and adjusted regression coefficient (Adjusted R²)

Model	RMSE	a	b	MAE	adjusted R ²
درجه دو Quadratic	0.0380	0.0030 *(0.001)	0.24 *(0.09)	0.0049	88
بتا چهار پارامتری Four parameters beta	0.0024	0.0004 (0.00005)	0.15 *(0.03)	0.00011	91
دوتکه‌ای Segmented	0.0021	0.0009 (0.00001)	0.07 (0.01)	0.0007	89
دندان‌مانند Dent like	0.0018	0.0003 (0.00004)	0.04 (0.015)	0.0008	97

* Significant at 5 % level

* معنی‌دار در سطح احتمال خطای ۵ درصد.

جدول ۴: معیارهای اطلاعات آکائیک (AIC)، آکائیک تصحیح شده (AICc) و مقادیر اختلاف با AICc (Δi)

Table 4. Akaike Information Criteria (AIC), corrected Akaike Information Criteria (AICc) and AICc differences (Δi)

Model	AIC	AICc	Δi
درجه دو Quadratic	-121.3	-108.05	6.25
بتا چهار پارامتری Four parameters beta	-144.3	-114.3	0
دوتکه‌ای Segmented	-185.4	-101.4	12.9
دندان‌مانند Dent like	-131.5	-101.5	12.8

برآورد شده توسط این مدل برای توصیف روند تغییرات سرعت جوانه‌زنی گل مغربی به دما مناسب‌تر می‌باشد. خلج و همکاران (۲۰۱۲) از معیار اطلاعات آکائیک تصحیح شده برای انتخاب مدل تخمین جوانه‌زنی کلزا و چهار غلف‌هرز رایج آن استفاده نمودند. باتوجه به کم‌تر بودن این شاخص در مدل دوتکه‌ای نسبت به دندان‌مانند و بتا از آن برای برازش بهره‌گیری شد (۲۶). درخشان و قرخلو (۲۰۱۵) نیز برای مقایسه مدل‌های هیدروترمال‌تایم جهت مدل‌سازی جوانه‌زنی بذر فالاریس (*Phalaris minor*) از معیار اطلاعات آکائیک تصحیح شده استفاده نمودند و رتبه‌بندی مدل‌ها را با شاخص Δi انجام دادند. با وجود برازش مناسب و مشابه مدل‌های نرمال، ویبول و گامبل، مقدار شاخص آکائیک تصحیح شده نشان داد که

شاخص‌های مبتنی بر تعداد پارامترهای مدل: معیارهای اطلاعات آکائیک (AIC) و آکائیک تصحیح شده (AICc) براساس تعداد پارامترهای موجود در هر مدل برای انتخاب بهترین آن‌ها استفاده می‌شوند. مقادیر AICc در جدول ۴ نشان می‌دهد که کمترین مقدار محاسبه شده (۱۱۴/۳-) مربوط به مدل بتا چهار پارامتری و بیشترین آن مربوط به مدل‌های درجه دو و دوتکه‌ای بوده است. مقدار Δi معلوم می‌سازد که کدام مدل حداکثر اختلاف را با AICc مدل بتا چهار پارامتری دارد. از آن جا که مقدار AICc مدل درجه دو کمتر از ۱۰ شده است، این مدل اختلافی با بتا چهار پارامتری نداشته و قابل قبول نیست. بین مدل‌های دوتکه‌ای و دندان‌مانند، مقدار AICc مربوط به دندان‌مانند کمتر بود و لذا پارامترهای

قرار می‌گیرند. مقایسه آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا، ضریب تبیین تصحیح‌شده و معیار اطلاعات آکائیک تصحیح‌شده نشان داد که استفاده از تابع دندان‌مانند جهت توصیف واکنش جوانه‌زنی بذر گل‌مغربی در مقابل دما مناسب‌تر است. براین‌اساس، دماهای پایه، دامنه دماهای مطلوب و سقف موردنیاز برای جوانه‌زنی بذرهای گل‌مغربی به ترتیب ۴/۷، ۲۴/۳ تا ۳۴/۷ و ۴۱/۲ درجه سانتی‌گراد برآورد گردید. این داده‌ها ثابت نمودند که بذرهای گل‌مغربی قادر هستند در بازه وسیعی از دماها قدرت جوانه‌زنی خود را حفظ نمایند که این موضوع با رفتار بوم‌شناختی این گیاه در طبیعت نیز مطابقت دارد.

مدل‌های هیدروترمال‌تایم گامبل ($AICc=-762/8$) و ویبول ($AICc=-762/8$) از دقت بیشتری نسبت به مدل هیدروترمال‌تایم توسعه‌یافته بر مبنای توزیع نرمال ($AICc=-737/6$) برخوردار بودند. بر مبنای شاخص تفاضل آکائیک تصحیح‌شده، مدل هیدروترمال‌تایم گامبل از بیشترین دقت پیش‌بینی جوانه‌زنی علف هرز فالاریس برخوردار بود (۷).

نتیجه‌گیری کلی

توابع دمایی مختلفی برای توصیف واکنش جوانه‌زنی به دما وجود دارد که از میان آن‌ها سه تابع دوتکه‌ای، بتا و دندان‌مانند بیشتر از بقیه مورد استفاده

منابع

1. Alvarado, V. and Bradford, K.J. 2002. A hydrothermal time model explains the cardinal temperature for seed germination. *Plant Cell Environ.* 25: 1061-1069.
2. Balandari, A., Rezvani Moghaddam, P. and Nassiri Mahallati, M. 2011. Cardinal temperatures for seed germination of *Cichorium pumilum* Jacq. Second Congress of Seed Science and Technology, Mashhad, Iran.
3. Bradford, K.J. 2002. Applications of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. *Weed Sci.* 50: 248-260.
4. Brar, G.S., Gomez, J.F., McMichael, B.L., Matches, A.G. and Taylor, H.M. 1991. Germination of twenty forage legumes as influenced by temperature. *Agron. J.* 83: 173-175.
5. Burnham, K. P. and Anderson D. R. 2002. Model selection and multimodel inference: A practical information-theoretic approach. Springer Verlag, New York.
6. Deng, Y.C., Hua, H.M., Li, J. and Lapinkase, P. 2001. Studies on the cultivation and uses of evening Primrose (*Oenothera* spp.) in China. *Econom. Bot.* 55: 83-92.
7. Derakhshan, A. and Gherekhloo, J. 2015. Comparison of hydrothermal time models to seed germination modeling of *Phalaris minor* on the basis of normal, Weibull and Gumbel distributions. *J. Plant Prod. Res.* 22: 39-58.
8. Derakhshan, A., Gherekhloo, J., Vidal, Ribas, A. and DePrado, R. 2014. Quantitative description of the germination of littleseed canarygrass (*Phalaris minor*) in response to temperature. *Weed Sci.* 62: 250-257.
9. Dorry, M.A., Kamkar, B., Aghdasi, M. and Kamshikamar, E. 2014. Determination of the best model to evaluate germination cardinal temperature of *Silybum marianum* as a medicinal plant. *Iranian J. Seed Sci. Technol.* 3: 189-200.
10. El-Hafid, R., Blade, S.F. and Hoyano, Y. 2002. Seeding and nitrogen fertilizer effects on the performance of borage (*Borago officinalis* L.). *Indust. Crops Prod.* 16:193- 199.
11. Ensminger, P., and Ikuma, H. 1987. Photoinduced seed germination of *Oenothera biennis* L. *Plant Physiol.* 85: 879-884.
12. Eshraghi Nejad, M.E., Kamkar, B. and Soltani, A. 2009. Cardinal temperatures and required biological days from sowing to emergence of three millet species (common, foxtail, pearl millet). *J. Seed Sci. Technol.* 3: 36-43.

13. Fieldsend, A.F. and Morison, J.I.L. 2000. Climatic conditions during seed growth significantly influence oil content and quality in winter and spring evening primrose crops (*Oenothera* spp.). *Indust. Crops Prod.* 12: 137-147.
14. Ganjeali, A., Parsa, M. and Amiri-Deh-Ahmadi, S.R. 2011. Determination of cardinal temperatures and thermal time requirement during germination and emergence of chickpea genotypes (*Cicer arietinum* L.). *Iranian J. Pulses Res.* 2: 97-108.
15. Garcia-Huidobro, J., Monteith, J.L., and Squier, G.R. 1982. Time, temperature and germination of Pearl Millet (*Pennisetum typhoides*). *J. Exp. Bot.* 33: 288-296.
16. Ghaderifar, F., Soltani, A., and Sadeghipour, H.R. 2009. Evaluation of nonlinear regression models in quantifying germination rate of medicinal pumpkin (*Cucurbita pepo* L. subsp. *Pepo*. *Convar. Pepo* var. *styriaca* Greb), borago (*Borago officinalis* L.) and black cumin (*Nigella sativa* L.) to temperature. *J. Plant Prod.* 16: 1-19.
17. Greiner, S. and Kohl, K. 2014. Growing opening primroses (*Oenothera*). *Front. Plant Sci.* 5: 1-12.
18. Hardegree, S. 2006. Predicting germination response to temperature. I. Cardinal temperature models and subpopulation-specific regression. *Ann. Bot.* 97: 1115-1125.
19. Heidari, Z., Kamkar, B., and Masoud Sinaki, J. 2014. Determination of cardinal temperatures of milk thistle (*Silybum marianum* L.) germination. *Adv. Plant Agric. Res.* 1: 1-7.
20. Horrobin, D. F., 1992. Nutritional and medical importance of gamma-linolenic acid. *Prog. Lipid Res.* 31: 163-94.
21. Jam, Y.W. and Cutforth, H. W. 2004. Simulating the effects of temperature and seeding depth on germination and emergence of spring wheat. *J. Agric. Sci. Technol.* 3: 36-43.
22. Kamkar, B., Ahmadi, M., Soltani, A. and Zeinali, E. 2008. Evaluation non-linear regression models to describe a response of wheat emergence rate to temperature. *Seed Sci. Biotech.* 2: 53-57.
23. Kamkar, B., Jami Al-Ahmadi, M., 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. *Indust. Crops Prod.* 35: 192-198.
24. Kamkar, B., Zolfagharnejad, H. and Khalili, N. 2015. Quantifying of germination rate response to temperature of three sunflower varieties using nonlinear regression models. *J. Plant Prod. Res.* 22: 119-136.
25. Kebeab, E. and Murdoch, A.J. 1999. A model of effects of a wider range of constant and alternating temperatures on seed germination of four *Orobanches* species. *Ann. Bot.* 84: 549-557.
26. Khalaj, H., Allahdadi, I., Iran Nejad, H., Akbari, G.A., Min Bashi, M. and Baghestani, M. A. 2012. Using nonlinear regression approach for prediction of cardinal temperature of canola and four common weeds. *J. Agroecol.* 2: 21-33.
27. Khalili, N. 2013. Predicting barley (*Hordeum vulgare* L.) emergence as affected by temperature, moisture and sowing depth. M.Sc. Thesis, Gorgan. Univ. Agric. Sci. Natur. Resour. 60p.
28. Khan, M., Gul, A., and Weber, D.J. 2001. Influence of salinity and temperature on germination of *Kochia scoparia*. *Wetlands Ecol. Manag.* 9: 483-489.
29. Moosavi, S.G., Seghatoleslami, M.J., Jouyban, Z., and Ansarinia, E. 2012. Germination and growth parameters of seedlings of *Oenothera biennis* L. as affected by salinity stress. *Tech. J. Engin. Appl. Sci.* 2: 123-127.
30. Nadjafi, F., Tabrizi, L., Shabahang J., and Mahdavi Damghani A. M. 2009. Cardinal germination temperatures of some medicinal plant species. *Seed Tech.* 31: 156-163.
31. Nielsen, O., Chikoye, D., and Streibig, J. C. 2005. Efficacy and costs of handheld sprayers in the subhumid savanna for cogongrass control. *Weed Technol.* 19: 568-574.
32. Pourreza, J. and Bahrani, A. 2012. Estimating cardinal temperatures of milk thistle (*Silybum marianum*) seed germination. *Am. J. Agric. Environ. Sci.* 12: 1485-1489.

33. Saeidnejad, A., Kafi, M. and Pessarakli, M. 2012. Evaluation of cardinal temperatures and germination seeding depth on germination and emergence of spring wheat. *Agric. Forest Meteorol.* 124: 207-218.
34. Seyyed-Sharifi, R. and Seyyed-Sharifi, R. 2009. The effects of polyethylene glycol on germination and seedling growth of *carthamus* cultivars. *Iranian J. Biol.* 21: 400-410.
35. Soltani, A., Galeshi, S., Zeinali, E. and Latifi, N. 2001. Germination, seed reserve utilization and seedling growth of chickpea as affected by salinity and seed size. *Seed Sci. Technol.* 30: 51-60.
36. Steiner, E. 1956. New aspects of the balanced lethal mechanism in *Oenothera*. *Genet.* 41: 486-500.
37. Tabrizi, L., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M. and Rezvani Moghaddam P. 2008. Germination behaviour of cultivated and natural stands seeds from of Khorasan Thyme (*Thymus transcaspicus* Klokov) with application of regression models. *Iranian J. Field Crops Res.* 5: 249-257.
38. Threadgill, P. 1986. Variations in the biennial life history strategy among fifteen ruderal species in an abandoned gravel pit near London, Ontario. Ph.D. Dissertation, University of Western Ontario, London, Ont. 356 pp.
39. Tsuyuzaki, S. 2006. Survival and changes in germination response of *Rumex obtusifolius*, *Polygonum longisetum* and *Oenothera biennis* during burial at three soil depths. *Amer. J. Environ. Sci.* 2: 74-78.
40. Wees, D. 2004. Stratification and priming may improve seed germination of purple coneflower, blue-flag iris and evening primrose. *Acta Hort.* 39: 391-395.
41. Windauer, L., Altuna, A. and Benech-Arnold, R. 2007. Hydrotime analysis of *Lesquerella fendleri* seed germination responses to priming treatments. *Indust. Crops Prod.* 25: 70-74.
42. Yousefi-Daz, M., Soltani, A., Ghaderi-far, F. and Sarparast, R. 2006. Evaluation of non-linear regression models to describe response of emergence rate to temperature in chickpea. *Agric. Sci. Technol.* 20: 93-102.
43. Zeinali, E., Soltani, A., Galeshi, S. and Sadati, S.J. 2001. Cardinal temperatures, response to temperature and range of thermal tolerance for seed germination in wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *J. Plant Prod.* 3: 23-42.