

مقاله پژوهشی

کمی‌سازی جوانه‌زنی بذر دیلار (*Fagopyrum esculentum*) با استفاده از مدل‌های

رگرسیونی و زمان‌دمایی

میثم میری^۱، محمدرضا عامریان^{۲*}، محسن عدالت^۳، مهدی برادران فیروزآبادی^۴، حسن مکاریان^۵

چکیده مبسوط

مقدمه: جوانه‌زنی اولین و مهم‌ترین مرحله استقرار و متعاقب آن رقابت موفقیت‌آمیز به شمار می‌رود که متأثر از عوامل ژنتیکی و محیطی است. از بین عوامل محیطی مؤثر بر جوانه‌زنی، دما و نور مهم‌ترین عوامل هستند. با استفاده از مدل‌های مختلف می‌توان پاسخ جوانه‌زنی بذر به دما را کمی‌سازی کرد؛ بنابراین، این تحقیق به منظور بررسی اثر دما بر جوانه‌زنی و کمی‌سازی پاسخ جوانه‌زنی بذر دیلار (*Fagopyrum esculentum* Moenc.) به دما با استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی و مدل زمان‌دمایی به اجرا درآمد.

مواد و روش‌ها: بذرها در چهار تکرار ۲۵ بذری تحت ۸ تیمار دمایی ثابت (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سلسیوس) مورد آزمون جوانه‌زنی قرار گرفتند. با استفاده از مدل لجستیک سه پارامتره، جوانه‌زنی بذر دیلار به سطوح مختلف دما کمی‌سازی شد و درصد و زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی به‌دست آمد. جهت کمی‌سازی واکنش سرعت جوانه‌زنی بذر دیلار به دما از ۴ مدل رگرسیون غیرخطی و مدل زمان‌دمایی استفاده شد. جهت مقایسه مدل‌ها و تعیین مناسب‌ترین مدل از شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R^2)، ضریب تغییرات (CV) و خطای استاندارد (SE) برای سرعت جوانه‌زنی مشاهده شده در مقابل سرعت جوانه‌زنی پیش‌بینی شده استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که دما علاوه بر درصد جوانه‌زنی بر طول گیاهچه، درصد گیاهچه طبیعی، بنیه بذر و سرعت جوانه‌زنی نیز اثر گذار بود. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش دما تا دمای ۲۰ و ۲۵ درجه سلسیوس شاخص‌های جوانه‌زنی افزایش یافت. در مقایسه ۳ مدل استفاده شده با توجه به پارامترهای SE ، R^2 ، CV ، $RMSE$ مناسب‌ترین مدل جهت تخمین دماهای کاردینال دیلار مدل دندان مانند بود. نتایج استفاده از مدل زمان‌دمایی نشان داد که دمای پایه بذر دیلار ۴/۰۱ درجه سلسیوس و ضریب زمان‌دمایی ۱۲۴۲/۶ ساعت درجه سلسیوس بود.

نتیجه‌گیری: استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی (دو تکه‌ای، دندان مانند و بتا) و مدل زمان‌دمایی جهت کمی‌سازی پاسخ جوانه‌زنی بذر دیلار در دماهای مختلف دارای نتایج قابل قبولی بود. بنابراین با استفاده از خروجی این مدل‌ها در دماهای مختلف می‌توان سرعت جوانه‌زنی و درصد جوانه‌زنی را پیش‌بینی نمود.

واژه‌های کلیدی: بنیه بذر، درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، مدل‌سازی

جنبه‌های نوآوری:

۱- بهترین دما برای جوانه‌زنی بذر دیلار ۲۰ تا ۲۵ درجه سلسیوس است.

۲- مناسب‌ترین مدل جهت تعیین دماهای کاردینال دیلار دندان مانند تعیین شد.



^۱ دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی، دانشکده کشاورزی،

دانشگاه صنعتی شاهرود

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

صنعتی شاهرود

^۳ دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه

شیراز

* رایانامه نویسنده مسئول: amerian@shahroodut.ac.ir

مقدمه

را کمی‌سازی نمود و در این پژوهش نتایج نشان داد که مدل دوتکه‌ای مناسب‌ترین مدل بود و تیمار زوال بذر به‌طور معنی‌داری بر دماهای کاردینال بذر گندم اثر معنی‌داری داشت. با استفاده از مدل دو تکه‌ای دماهای پایه، مطلوب و بیشینه برای گیاه خرفه (*Portulaca*) به‌ترتیب ۱۱/۸، ۳۵ و ۴۹/۳ درجه سلسیوس گزارش شده است (پورتوسی^۸ و همکاران، ۲۰۰۸). در آزمایش دیگر که توسط قادری‌فر^۹ و همکاران (۲۰۰۹) بر سه گونه کدو تخم‌کاغذی (*Cucurbita pepo* L.)، گاوزبان (*Nigella*) و سیاه دانه (*Borago officinalis* L.) (sativa L.) انجام شد، با استفاده از توابع مختلف از قبیل بتا، دندان مانند، دوتکه‌ای، منحنی، معادلات درجه دوم و سوم دماهای کاردینال برای این سه گونه دارویی برآورد شد که با توجه به گونه گیاهی مناسب‌ترین مدل برای هر گونه گیاهی متفاوت بود. دمای پایه، مطلوب و سقف کلزای خودرو با استفاده از تابع دوتکه‌ای به ترتیب ۲/۷، ۲۵ و ۳۰ درجه سلسیوس بود (سلطانی و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین درخشان^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از چهار مدل غیرخطی دماهای کاردینال برای اویارسلام بذری را محاسبه کردند. از مدل‌های رگرسیون غیرخطی برای کمی‌سازی واکنش جوانه‌زنی به درجه حرارت توسط سایر محققین نیز استفاده شده است (کامکار^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۱؛ درخشان و همکاران، ۲۰۱۳). علاوه بر مدل‌های رگرسیون غیرخطی جهت پیش‌بینی جوانه‌زنی در برابر دما می‌توان از مدل زمان‌دمایی استفاده کرد. زمان‌دمایی، پارامتر مناسب ریاضی است که جهت مدل کردن درصد جوانه‌زنی در پاسخ به دما استفاده می‌شود (برادفورد، ۲۰۰۲؛ آلواردو و برادفورد، ۲۰۰۲).

از مدل زمان‌دمایی جهت پیش‌بینی جوانه‌زنی بذر تاج ریزی پرزدار (*Solanum sarrachoides*) در پاسخ به دماهای زیر مطلوب و پیش‌بینی رویش علف باغ (*Dactylis glomerata* L.) در دمای متناوب استفاده شده است (کیو^{۱۲} و همکاران، ۲۰۰۷). ایزگیردو^۱ و

جوانه‌زنی فرآیندی فیزیولوژیکی است که با جذب آب شروع شده و با خروج ریشه‌چه از پوشش بذر کامل می‌شود، بنابراین زمان جوانه‌زنی حدفاصل بین ورود آب به داخل بذر تا خروج ریشه‌چه از پوشش بذر می‌باشد (برادفورد^۱، ۲۰۰۲). آغاز جوانه‌زنی مشروط به وجود سه عامل رطوبت کافی، درجه حرارت و اکسیژن می‌باشد که دو عامل اول از اهمیت بیشتری برخوردارند زیرا بر واکنش‌های بیوشیمیایی اثر گذار هستند (انصاری^۲، ۲۰۱۷). درجه حرارت یک نکته مهم در جذب آب بذر است که سرعت جوانه‌زنی بذر را تحت تأثیر قرار می‌دهد (قادری‌فر و سلطانی^۳، ۲۰۱۵). سرعت رشد جوانه‌زنی بر رشد سریع گیاهچه اثر گذار است، همچنین گیاهچه‌هایی که سرعت رشد بالاتری داشته و زودتر ظاهر می‌شوند بر گیاهچه‌هایی که بعد ظاهر می‌شوند غالب می‌گردند و این اختلاف با گذشت زمان بیشتر می‌شود (لک و ایوانز^۴، ۲۰۰۳). طیف وسیعی از دماها بر جوانه‌زنی تأثیر می‌گذارد، در سال ۱۸۶۰ مشخص شد که گیاهان دارای سه نقطه حرارتی ویژه، یعنی دمای کمینه (پایه)، دمای بیشینه (در زیر و بالاتر از آن جوانه‌زنی متوقف می‌شود) و دمای بهینه با بالاترین سرعت جوانه‌زنی می‌باشد (آلواردو و برادفورد^۵، ۲۰۰۲). مشخص شده است که دما تا حد بهینه موجب افزایش درصد جوانه‌زنی می‌شود، اما افزایش بیش از حد بهینه درصد جوانه‌زنی را کاهش می‌دهد (برادفورد، ۲۰۰۲؛ سلطانی^۶ و همکاران، ۲۰۰۶).

انواع مختلفی از مدل‌های ریاضی برای شرح بین سرعت جوانه‌زنی و دما وجود دارد (سلطانی و همکاران، ۲۰۰۸). از مدل رگرسیون غیرخطی برای کمی‌سازی واکنش جوانه‌زنی و رویش بذرهای گیاهان در مقابل دما استفاده شده است (هاردگری^۷، ۲۰۰۶). به‌عنوان مثال سلطانی و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی پاسخ جوانه‌زنی بذر زوال یافته گندم

¹ Bradford

² Ansari

³ Ghaderi-Far and Soltani

⁴ Lack and Evans

⁵ Alvarado and Bradford

⁶ Soltani

⁷ Hardegee

⁸ Portoosi

⁹ Ghaderi-Far

¹⁰ Derakhshan

¹¹ Kamkar

¹² Qiu

۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سلسیوس) مورد آزمون جوانه‌زنی قرار گرفت. بذرها به مدت ۲ دقیقه با هیپوکلریت سدیم ۱ درصد ضدعفونی سطحی شده و سپس ۳ مرتبه با آب مقطر شستشو شدند. بذرها ۴ تکرار ۲۵ بذری به پتری ۱۰ سانتی‌متری با ۲ لایه کاغذ صافی منتقل شدند. به هر پتری ۵ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه و به دماهای مشخص شده منتقل شدند. بازدید بذرها هر روز دو بار انجام و معیار جوانه‌زنی خروج ریشه‌چه به اندازه ۲ میلی‌متر یا بیشتر بود (ایستا^۶، ۲۰۰۸). در طول آزمایش و در صورت نیاز آب مقطر به ظرف‌های پتری اضافه شد. در پایان آزمایش شاخص‌های درصد و سرعت جوانه‌زنی، طول گیاهچه و بنیه بذر اندازه‌گیری شد.

برای توجیه روند تغییرات مربوط به درصد جوانه‌زنی در مقابل دما از تابع لجستیک (رابطه ۱) استفاده شد (کامکار و همکاران، ۲۰۱۱):

$$y - G_{max} / (1 + \exp(a(t/b))) \quad (1)$$

G_{max} ؛ حداکثر درصد جوانه‌زنی، b ؛ زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی و a ؛ ضریب رابطه است.

سرعت جوانه‌زنی (در ساعت) از معکوس کردن زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی برحسب جمعیت با استفاده از درون‌یابی در هر دما و تیمار پیش‌اندازی بذر به‌دست آمد. از آنجایی که زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی محاسبه شده توسط تابع‌های سیگموئیدی براساس جوانه‌زنی نهایی می‌باشد؛ استفاده از این پارامتر جهت محاسبه سرعت جوانه‌زنی صحیح نیست، بنابراین با استفاده از ضرایب به‌دست آمده جوانه‌زنی رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی جمعیت محاسبه و سرعت جوانه‌زنی بر این اساس برآورد شد (انصاری و همکاران، ۲۰۱۶). برای کمی‌سازی واکنش جوانه‌زنی به دما و تعیین دماهای کاردینال از مدل‌های دو تکه‌ای، دندان مانند و بتای اصلی و بتای تغییر یافته استفاده شد (جدول ۱). تخمین پارامترهای هر مدل با روش مطلوب‌سازی تکراری به کمک نرم‌افزار سیگماپلات ۱۱ صورت گرفت. در روش مطلوب‌سازی تکراری با هر بار وارد کردن مقادیر اولیه پارامترها، مقادیر نهایی آن با روش کمترین توان‌های دوم تخمین زده می‌شود. تغییر مقادیر اولیه تا زمانی

همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از مدل گامپرتز، زمان‌دمایی مورد نیاز برای رویش بذر شقایق (*Papaver rhoeas* L.) را پیش‌بینی کردند. اطلاع دقیق از نحوه جوانه‌زنی بذر گیاهان دارویی به منظور استقرار موفق و مطلوب و برای اهلی‌سازی و کشت آنها به ویژه این که اطلاعات نسبتاً کمی از این گیاهان وجود دارد ضروری است (دری^۲ و همکاران، ۲۰۱۵).

دیپلار (*Fagopyrum esculentum* Moenc.) یکی از قدیمی‌ترین محصولات خوراکی در آسیا است، این محصول در قرن هجدهم و نوزدهم غذای بسیار پرطرفداری بود و در قرن بیستم به دلیل رقابت با گندم کشت این محصول کاهش یافت، این در حالی است که با توجه به ارزش بالای تغذیه‌ای و خواص دارویی این گیاه در سال‌های اخیر کشت این محصول روند افزایشی را نشان می‌دهد (کاوی^۳ و همکاران، ۲۰۰۹). زادگاه این گیاه در ایران اردبیل می‌باشد. همچنین برخی مطالعات نشان داده‌اند که دیپلار به دلیل سازگاری اکولوژیکی بالا می‌تواند در مناطق گسترده‌ای کشت و کار شود (مونتگومری^۴، ۲۰۰۹).

دیپلار به دلیل دارا بودن سطوح بالای اسیدهای آمینه ضروری، مواد معدنی، ویتامین‌های گروه B و آنتی‌اکسیدان‌ها ممکن است با تغییر آب و هوا در آینده، جایگزین مناسبی برای غلات، خوراک دام و انسان محسوب شود (لینه و هالاس^۵، ۲۰۱۶). تا کنون اطلاعاتی در مورد اثر دما بر جوانه‌زنی دیپلار وجود نداشت، لذا هدف از این مطالعه تعیین درصد جوانه‌زنی بذر دیپلار و جوانه‌زنی در دماهای مختلف و تشریح فرایند فوق به صورت ریاضی با استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی و مدل زمان‌دمایی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال ۱۳۹۸ در آزمایشگاه گروه زراعت دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز انجام شد. بذرهای دیپلار تحت ۸ تیمار دمایی ثابت (۵، ۱۰، ۱۵،

¹ Izquierdo

² Dori

³ Cawoy

⁴ Montgomery

⁵ Linh and Halas

⁶ ISTA

شود (کاول و همکاران^۳، ۱۹۸۶؛ گارکیا-هودیبرو^۴ و همکاران، ۱۹۸۲). در نهایت تجزیه داده‌ها با استفاده از نرم افزار SAS انجام و نمودارها با استفاده از نرم افزار Excel رسم شد.

نتایج و بحث

اثر دما بر شاخص‌های جوانه‌زنی دیلار

نتایج مقایسه میانگین اثر دماهای مختلف بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر دیلار نشان داد که اثر دما بر درصد جوانه‌زنی، درصد گیاهچه‌های طبیعی، طول گیاهچه و شاخص طولی بنیه بذر در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین اثر دما بر درصد جوانه‌زنی نشان داد که بالاترین درصد جوانه‌زنی با میانگین‌های ۸۴ و ۸۰ درصد به ترتیب مربوط به دماهای ۲۰ و ۲۵ درجه سلسیوس بود (شکل ۱ الف، A)، به‌طورکلی نتایج نشان داد که درصد جوانه‌زنی با افزایش دما از ۵ تا ۲۵ درجه سلسیوس روندی افزایشی را نشان داد و در دماهای بالاتر از ۲۵ درجه سلسیوس درصد جوانه‌زنی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. مقایسه میانگین اثر دما بر طول گیاهچه نشان داد که دما به‌طور معنی‌داری روی طول گیاهچه اثر گذار بود و بالاترین طول گیاهچه با میانگین ۱۶ سانتی‌متر مربوط به دمای ۲۰ درجه سلسیوس بود ولی با دمای ۲۵ درجه سلسیوس اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۱ ب، B). نتایج نشان داد که بالاترین درصد گیاهچه طبیعی مربوط به دمای ۲۰ و ۲۵ درجه سلسیوس بود و در دماهای بالاتر و پایین‌تر از آن به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (شکل ۱ ج، C). بالاترین شاخص طولی بنیه بذر با میانگین ۱۳۴۴/۴۷ مربوط به دمای ۲۰ درجه سلسیوس بود ولی با دمای ۲۵ درجه سلسیوس اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۱ د، D). گزارش‌های مختلف حاکی از آن است که دما به‌طور معنی‌داری سبب کاهش در شاخص‌های جوانه‌زنی خواهد شد (انصاری و همکاران، ۲۰۱۶؛ پاتده^۵ و همکاران، ۲۰۱۱). کاهش درصد و سرعت جوانه‌زنی در

انجام گرفت که بهترین برآورد از پارمترها به‌دست آمد. بهترین برآورد پارمترهای مدل براساس اشتباه آزمایشی کمتر پارمترها و جذر میانگین مربعات خطای^۱ کمتر رگرسیون و با استفاده از میزان آریبی خط رگرسیون داده‌های شبیه‌سازی شده از خط یک به یک مشخص شد. در نهایت جهت مقایسه ضرایب به‌دست آمده توسط مدل‌های استفاده شده در این پژوهش از خطای استاندارد محاسبه شده توسط مدل استفاده شد. در نهایت جهت مقایسه ضرایب به‌دست آمده توسط مدل‌های استفاده شده در این پژوهش به جای استفاده از تجزیه واریانس داده‌ها از خطای استاندارد محاسبه شده توسط مدل استفاده شد. بعد از محاسبه دماهای کاردینال و جهت برآورد ضرایب زمان‌دمایی برای دماها تا دمای مطلوب (۳۰ درجه سلسیوس) از رابطه ۶ استفاده شد. برای استفاده از این رابطه برای هر تیمار دمایی (دمای ۵ تا ۲۰ درجه سلسیوس)، نسبت تجمعی جوانه‌زنی (g) در هر دفعه شمارش (t_g) از روی نتایج حاصل از شمارش روزانه بذرهای جوانه‌زده به‌دست آمد. با استفاده از رابطه ۶ و رویه رگرسیون غیرخطی (PROC NLIN) در نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۲)، ضرایب مدل زمان‌دمایی تخمین زده شد.

در نهایت با استفاده از ضرایب به‌دست آمده، درصد جوانه‌زنی برای هر تیمار دمایی پیش‌بینی شد و با رسم نمودار یک به یک برای مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده جوانه‌زنی حاصل از مدل زمان‌دمایی، مدل از لحاظ پیش‌بینی درصد جوانه‌زنی مورد ارزیابی قرار گرفت.

رابطه ۶:

$$\text{probit}(g) = (1/\sigma_{\theta T}) * \log((T - T_b)tg) - \log(\theta_{T(50)})/\sigma_{\theta T}$$

probit(g)، تبدیل پروبیت g درصد جوانه‌زنی تجمعی، $\theta_{T(50)}$ ، زمان‌دمایی برای ۵۰ درصد جوانه‌زنی (متوسط زمان‌دمایی جوانه‌زنی) و $\sigma_{\theta T}$ ، خطای استاندارد θT برای تک بذرها در جمعیت می‌باشد (دل‌مونت و دورادو^۲ (۲۰۱۱)، زمانیکه T_b تخمین زده شد، زمان‌دمایی تا t(g) جوانه‌زنی می‌تواند برای بازه زمان‌دمایی توسط این پارامتر ضرب در $(T - T_b)$ نرمال

³ Covell

⁴ Garcia-Huidobro

⁵ Patade

¹ RMSE

² Del Monte and Dorado

جدول ۱. معادلات مدل‌های دو تکه‌ای، دندان مانند، بتا اصلی و بتای تغییر یافته برازش داده شده به سرعت جوانه‌زنی در دماهای مختلف.

Table 1. Equations of dent-like, segmented, original Beta and modified Beta models fitted to the germination rate at different temperatures.

فرمول Formula	رابطه Equation	منبع Reference
$f(T) = (T - T_b) / (T_{o1} - T_b)$ if $T_b < T \leq T_{o1}$ $f(T) = (T_c - T) / (T_c - T_{o2})$ if $T_{o2} < T \leq T_c$ $f(T) = 1$ if $T_{o1} < T \leq T_{o2}$ $f(T) = 0$ if $T \leq T_b$ or $T \geq T_c$	دندان مانند (۲) Dent-like	(پیپر ^۱ و همکاران، ۱۹۹۶)
$f(T) = (T - T_b) / (T_o - T_b)$ if $T_b < T \leq T_o$ $f(T) = [1 - (T - T_o) / (T_c - T_o)]$ if $T_o < T \leq T_c$ $f(T) = 0$ if $T \leq T_b$ or $T \geq T_c$	دو تکه‌ای (۳) Segmented	(سلطانی ^۲ و همکاران، ۲۰۰۶)
$f(T) = ((T_c - T) / (T_c - T_o)) \times ((T - T_b) / (T_o - T_b))^{(T_o - T_b) / (T_c - T_o)}$	بتا تغییر یافته (۴) Modified Beta	(ین ^۳ و همکاران، ۱۹۹۵)
$f(T) = [(T - T_b) / (T_o - T_b)] \times (T_c - T) / (T_c - T_b) \times (T_c - T_o) / (T_o - T_b)]^a$	بتا اصلی (۵) Original Beta	(ین و همکاران، ۱۹۹۵)

T_b دمای پایه، T_{o1} دمای مطلوب تحتانی، T_{o2} دمای مطلوب فوقانی، T_o دمای مطلوب، T_c دمای بیشینه، a ضریب ثابت و T دما (دمای مورد آزمایش) می‌باشد).

(T_b is the base temperature, T_{o1} is the Lower optimum temperature, T_{o2} is the Upper optimum temperature, T_o is the optimum temperature, T_c is the Ceiling temperature, a is the constant coefficient and T is the temperature (temperature tested)).

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر درجه حرارت بر شاخص‌های مختلف جوانه‌زنی بذر دیلار

Table 2. Analysis of variance for the effect of temperature on *Fagopyrum esculentum* Moenc. seed germination indices

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات (Mean squares)			
		درصد جوانه‌زنی Germination rate	درصد گیاهچه‌های طبیعی Normal seedling percentage	طول گیاهچه Seedling length	شاخص طولی بنیه گیاهچه Seedling length vigor index
دما (Temperature)	7	2788.50**	2243.14**	166.68**	1154156.36**
اشتباه آزمایشی (Error)	24	89.50	164.33	1.28	17561.72
ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of Variation (%)		17.08	28.97	16.08	25.67

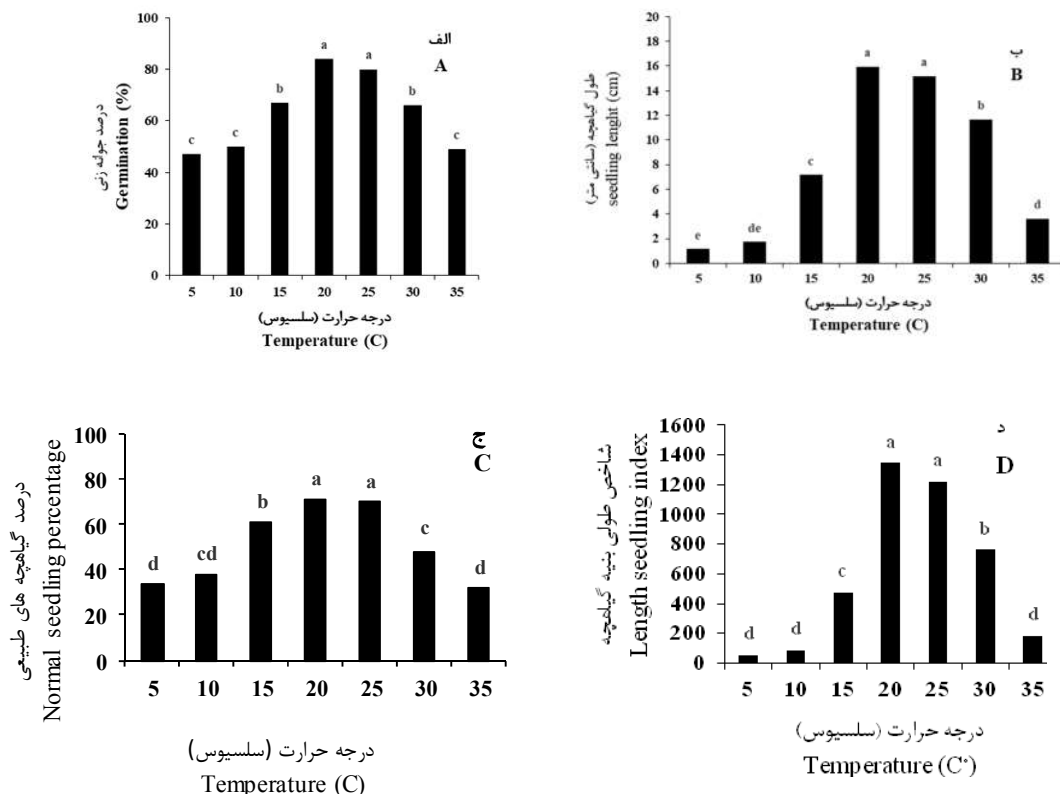
** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.

** : Significant at 0.01 probability level

¹ Piper

² Soltani

³ Yin



شکل ۱. شاخص‌های مربوط به جوانه‌زنی دیلار تحت تأثیر دما

Fig. 1. Indices related to *Fagopyrum esculentum* Moenc germination as affected by temperature

تعیین دمای کاردینال بذر دیلار با استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی

به داده‌های درصد جوانه‌زنی تجمعی بذر دیلار برای هر دما تابع لجستیک برازش داده شد (شکل ۲). نتایج برازش مدل لجستیک به درصد جوانه‌زنی تجمعی در جدول ۳ گزارش شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، حداکثر درصد جوانه‌زنی در دماهای ۲۰ و ۲۵ درجه سلسیوس به ترتیب با میانگین ۸۲/۴۱ و ۸۲/۸۷ درصد دارای بالاترین درصد جوانه‌زنی بودند و در دماهای بالاتر و پایین‌تر از این دما کاهش یافت (جدول ۳). کمترین زمان رسیدن به دهک‌های مختلف جوانه‌زنی مربوط به دماهای ۳۰ و ۳۵ درجه سلسیوس بود (جدول ۳).

با استفاده از درون‌یابی مدل لجستیک، زمان رسیدن به دهک‌های ۱۰ و ۳۰ درصد جوانه‌زنی در دماهای ۳۰ و ۳۵ درجه سلسیوس و برای دهک ۵۰ درصد جوانه‌زنی

بذر دیلار در دماهای بالاتر و پایین‌تر از حد مطلوب در این پژوهش می‌تواند به دلیل اختلال در جذب آب در این دماها و همچنین زوال بذر در دماهای بالاتر از حد مطلوب باشد. به طور کلی با محاسبه دهک‌های مختلف می‌توان زمان‌های مختلف رویش را پیش‌بینی کرد، به عنوان مثال با محاسبه زمان رسیدن به ۱۰ درصد می‌توان شروع جوانه‌زنی را برای هر بذر پیش‌بینی کرد. به‌طور کلی با توجه به نتایج این پژوهش مشخص شد که صفات اندازه‌گیری شده تا دماهای ۲۰ و ۲۵ درجه سلسیوس افزایش یافت و بعد از آن روند کاهشی را نشان داد. چنین نتایجی در دیگر گیاهان توسط بسیاری از محققین نیز گزارش شده است (قادری‌فر و همکاران، ۲۰۰۹؛ کاوه^۱ و همکاران، ۲۰۱۱).

¹ Cave

نمودند. دامور^۷ و همکاران (۱۹۹۰) و درخشان و همکاران (۲۰۱۳) از مدل ویبول برای محاسبه D_{50} و در نهایت سرعت جوانه‌زنی استفاده نمودند.

جهت تعیین دماهای کاردینال بذر دیلار به داده‌های سرعت جوانه‌زنی مدل‌های رگرسیون غیرخطی مختلفی برازش داده شد (شکل ۴) و با استفاده از این مدل‌ها، دمای پایه، دمای مطلوب و دمای بیشینه برای زمان رسیدن به دهک‌های مختلف جوانه‌زنی به دست آمد (جدول ۴). نتایج نشان داد که دمای پایه برای دهک‌های مختلف و با استفاده از مدل دوتکه‌ای، دندان مانند، بتای اصلی و بتای تغییر یافته به ترتیب بین ۴/۶ تا ۶/۳، ۴/۹۳ تا ۶/۳، ۴/۲۳- تا ۵ و ۵ درجه سلسیوس متغیر بود. دمای مطلوب برای دهک‌های مختلف و با استفاده از مدل دوتکه‌ای، بتای اصلی و بتای تغییر یافته به ترتیب بین ۲۷/۸۴ تا ۳۴/۴۵، ۲۶/۸۱ تا ۳۲/۴۲ و ۲۵ تا ۳۰/۳۷ درجه سلسیوس متغیر بود.

در دمای ۲۵ درجه سلسیوس کمترین مقادیر بودند که نشان دهنده حداکثر سرعت جوانه‌زنی در این بازه دمایی می‌باشد، در دماهای بالاتر از این محدوده مدت زمان رسیدن به دهک‌های مختلف افزایش یافته که نشان‌دهنده کاهش سرعت جوانه‌زنی می‌باشد (جدول ۴).

نتایج به‌خوبی نشان داد که بذر دیلار تحت دامنه وسیعی از دماها قادر به جوانه‌زنی می‌باشد. در بسیاری از گونه‌های گیاهی نظیر *Polypogon fugax* (ویو^۱ و همکاران، ۲۰۱۵) و *S. rostratum* وی^۲ و همکاران، (۲۰۰۹) گزارش شده است که برای جوانه‌زنی به حد آستانه دمایی نیاز دارند و در دامنه محدودی از دماها قادر به جوانه‌زنی هستند، این درحالی است که جوانه‌زنی گونه‌هایی شبیه *Bromus japonicas* (لی^۳ و همکاران، ۲۰۱۵)، *Gomphrena perennis* (آکوستا^۴ و همکاران، ۲۰۱۲)، و *Urena lobata* (ونگ^۵ و همکاران، ۲۰۰۹) و پنیرک (انصاری و همکاران، ۲۰۱۶) در دامنه وسیعی از دماها اتفاق می‌افتد. توانایی بالای بذر دیلار در جوانه‌زنی تحت دامنه وسیعی از دماها نشان داد که دما عامل محدود کننده جوانه‌زنی این گیاه در مناطق مختلف نمی‌باشد.

جهت تعیین دماهای کاردینال باید در ابتدا سرعت جوانه‌زنی محاسبه شود که برای دماها و پتانسیل‌های مختلف زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی جمعیت با استفاده از مدل لجستیک ۳ پارامتره محاسبه شد (جدول ۳). در این راستا کامکار و همکاران، (۲۰۱۱) برای برآورد D_{50} از مدل لجستیک استفاده کردند.

علاوه بر مدل لجستیکی از سایر مدل‌های سیگموئیدی جهت کمی‌سازی پاسخ جوانه‌زنی به زمان جهت برآورد زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی و محاسبه سرعت جوانه‌زنی نیز استفاده شده است (انصاری و همکاران، ۲۰۱۶). شفی و پرایس^۶ (۲۰۱۱)، از مدل سیگموئیدی ۳ پارامتره جهت برآورد D_{50} استفاده

¹ Wu

² Wei

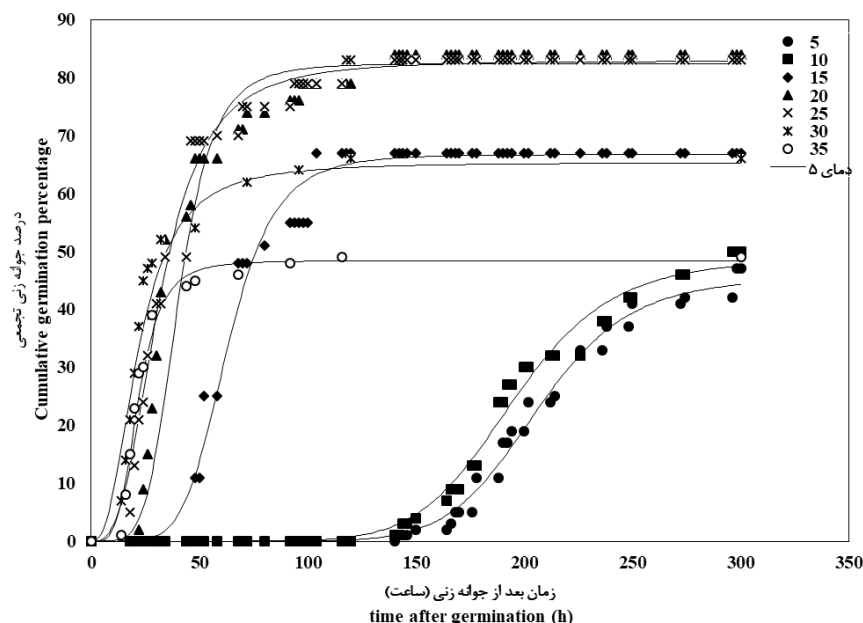
³ Li

⁴ Acosta

⁵ Wang

⁶ Shafii and Price

⁷ Dumur



شکل ۲. روند تغییرات درصد جوانه‌زنی تجمعی در برابر زمان در دماهای مختلف در بذر دیلار
Fig. 2. Changes in the cumulative germination percentage versus time at different temperatures for *Fagopyrum esculentum* Moenc seeds

جدول ۳. ضرایب برآورد شده مدل لجستیک برای دماهای مختلف می‌باشد.

Table 3. Estimated coefficients of logistics model for different temperatures.

دما (درجه سلسیوس) Temperature (°C)	a	b	X ₀	r	R ²	Adj R ²
5	45.43	-9.707	206.11	0.99	0.99	0.99
10	48.70	-8.56	195.11	0.99	0.99	0.99
15	66.71	-5.80	62.97	0.99	0.99	0.99
20	82.41	-5.01	40.19	0.99	0.99	0.99
25	82.88	-2.99	31.47	0.99	0.98	0.98
30	65.33	-2.51	21.68	0.98	0.95	0.95
35	48.38	-4.05	21.74	0.99	0.99	0.98

مقادیر داخل پرانتز مقادیر خطای استاندارد (se) را نشان می‌دهد.

Values in parenthesis represent standard error (se).

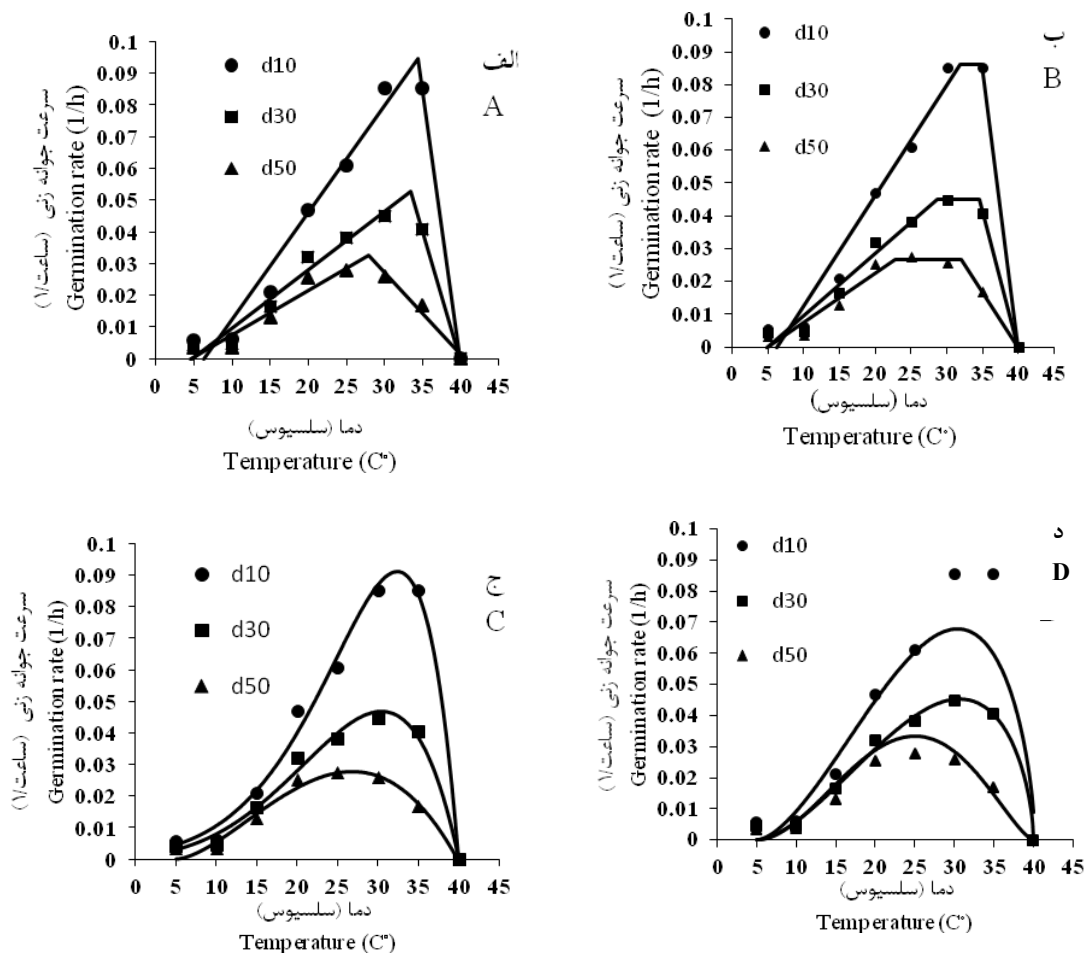
جدول ۴. زمان رسیدن به دهک‌های مختلف جوانه‌زنی و پیش‌بینی حداکثر جوانه‌زنی بذر دیلار استفاده از مدل لجستیکی سه پارامتره

Table 4. Time to reach different deciles of germination and prediction of maximum germination of *Fagopyrum esculentum* Moenc using three-parameter logistics model

دما (C)	D ₁₀ (h)	D ₃₀ (h)	D ₅₀ (h)
5	177.18	231.32	292.03
10	162.42	214.92	275.62
15	47.57	60.70	77.10
20	21.32	31.17	39.37
25	16.40	26.25	36.09
30	11.71	22.26	38.67
35	11.71	24.60	59.76
40	0	0	0

D نشان دهنده زمان تا رسیدن به دهک‌های مختلف

D indicates the time to reach different deciles



شکل ۳. رابطه بین دما و سرعت جوانه‌زنی برای درصدهای مختلف جوانه‌زنی بذر دیلار براساس مدل‌های دوتکه‌ای (الف)، دندان مانند (ب)، بتا تغییر یافته (ج) و بتا اصلی (د)

Fig. 3. The relationship between temperature and germination rate for different germination percentages of *Fagopyrum esculentum* Moenc seeds using dent-like (A), segmented (B), modified Beta (C), original Beta (D) models

از مدل‌های رگرسیون غیرخطی جهت کمی‌سازی واکنش جوانه‌زنی و رویش بذرهای گیاهان در مقابل دما استفاده شده است (হারدگری، ۲۰۰۶؛ سلطانی و همکاران، ۲۰۰۸). به‌عنوان مثال با استفاده از مدل دوتکه‌ای دماهای کاردینال پایه، مطلوب و بیشینه برای گیاه خرفه به ترتیب ۱۱/۸، ۳۵ و ۳/۴۹ درجه‌سلسیوس گزارش شده است (پورطوسی و همکاران، ۲۰۰۸). در آزمایش دیگر که توسط قادری‌فر و همکاران (۲۰۰۹) بر روی سه گونه از گیاهان دارویی انجام شد، با استفاده از توابع مختلف از قبیل توابع بتا، دندان مانند، دوتکه‌ای، منحنی، معادلات درجه دوم و سوم دماهای کاردینال

دمای مطلوب تحتانی و فوقانی برای دهک‌های مختلف و با استفاده از مدل دندان مانند به ترتیب بین ۲۲/۷۴ تا ۳۱/۸۸ و ۳۱/۹۹ تا ۳۴/۹۵ درجه سلسیوس متغیر بود. دمای بیشینه برای دهک‌های مختلف و با استفاده از مدل دوتکه‌ای، دندان مانند، بتای اصلی و بتای تغییر یافته برای تمامی دهک‌ها ۴۰ درجه سلسیوس برآورد شد (جدول ۴). تعداد ساعات بیولوژیکی دمای پایه برای دهک‌های مختلف و با استفاده از مدل دوتکه‌ای، دندان مانند، بتای اصلی و بتای تغییر یافته به ترتیب بین ۱۰/۵۶ تا ۳۰/۵۸، ۱۱/۶۱ تا ۳۷/۳۳، ۱۰/۹۹ تا ۳۵/۹۱ و ۱۴/۷۲ تا ۳۰ درجه سلسیوس متغیر بود (جدول ۴).

به مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده جوانه‌زنی بود که با استفاده از مدل با توزیع نرمال جوانه‌زنی پیش‌بینی شده محاسبه شد و نمودار یک به یک رسم شد (شکل ۵). در نهایت با استفاده از خروجی مدل استفاده شده پیش‌بینی جوانه‌زنی تجمعی برای دماهای مختلف با رسم شکل نشان داده شد (شکل ۶).

در پژوهش حاضر مشخص شد که مدل زمان‌دمایی جهت پیش‌بینی جوانه‌زنی بذر دیلار از دقت نسبتاً خوبی برخوردار بود ولی در مقایسه با مدل‌های رگرسیون غیرخطی از دقت پایین‌تری برخوردار بود. در این راستا انصاری (۲۰۱۷) جهت کمی‌سازی پاسخ جوانه‌زنی بذر پنیرک به دما و سطوح مختلف رطوبتی از مدل‌های رگرسیون غیرخطی و مدل زمان‌دمایی استفاده نمودند، در ادامه نشان دادند که استفاده از هر دو گروه مدل‌ها جهت پیش‌بینی جوانه‌زنی از دقت نسبتاً خوبی برخوردار بودند اما در مجموع استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی نسبت به مدل زمان‌دمایی از دقت بالاتری برخوردار بود؛ و بیان داشتند به دلیل پیچیده‌تر بودن مدل زمان‌دمایی محققان می‌توانند از مدل‌های رگرسیون غیرخطی جهت پیش‌بینی جوانه‌زنی استفاده نمایند.

دلمونت و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از مدل زمان‌دمایی پاسخ جوانه‌زنی بذر *Solanum sarrachoides* به دما را کمی‌سازی کردند، دمای پایه و زمان حرارتی مورد نیاز برای جوانه‌زنی را در تیمارهای مختلف شکست کمون این بذر مورد بررسی قرار دادند. ایزگیدرو و همکاران (۲۰۰۹) جهت کمی‌سازی سبزشدن بذر شقایق و پیش‌بینی سبزشدن به جای استفاده از مدل با توزیع نرمال جهت برآورد زمان‌دمایی مورد نیاز برای سبزشدن از مدل گامپرتز استفاده کردند و دقت بالای این مدل جهت پیش‌بینی سبزشدن را تأیید کردند.

برای این سه گونه دارویی برآورد شد که با توجه به گونه گیاهی بهترین مدل برای هر گونه گیاهی متفاوت بود.

همچنین سایر محققین با استفاده از مدل‌های رگرسیونی غیرخطی دماهای کاردینال برای تعدادی دیگر از گیاهان محاسبه کردند و برای مقایسه مدل‌ها از RMSE، CV و شاخص آکائیک (AICc) استفاده کردند (کامکار و همکاران، ۲۰۱۱؛ درخشان و همکاران، ۲۰۱۳).

نمودار خط ۱:۱ سرعت جوانه‌زنی برای رسیدن دهک‌های مختلف جوانه‌زنی مشاهده در مقابل سرعت جوانه‌زنی پیش‌بینی شده در شکل ۴ گزارش شده است. در جدول ۴؛ RMSE، CV و ضرایب رگرسیون a و b نشان داده شده‌اند که RMSE و CV پائین نشان دهنده دقت بالاتر در مدل می‌باشد.

با توجه به پارامترهای ذکر شده و نمودار خط ۱:۱ (شکل ۴) سرعت جوانه‌زنی برای رسیدن به دهک‌های جوانه‌زنی مناسب‌ترین مدل جهت تخمین دماهای کاردینال دیلار را می‌توان مدل دندان مانند و بتای تغییر یافته گزارش کرد. به‌طور کلی هر چه RMSE و CV در مدل‌ها پایین‌تر باشد نشان دهنده دقت بالاتر مدل نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشد؛ و هر چه SE مربوط به تخمین دماهای کاردینال کمتر باشد مدل از دقت بالاتری برخوردار است بنابراین به دلیل مقدار بالای SE برای مدل بتا (جدول ۵) می‌توان از بین دو مدل دندان مانند و بتای تغییر یافته، مدل دندان مانند را به‌عنوان مناسب‌ترین مدل گزارش کرد.

مدل زمان‌دمایی

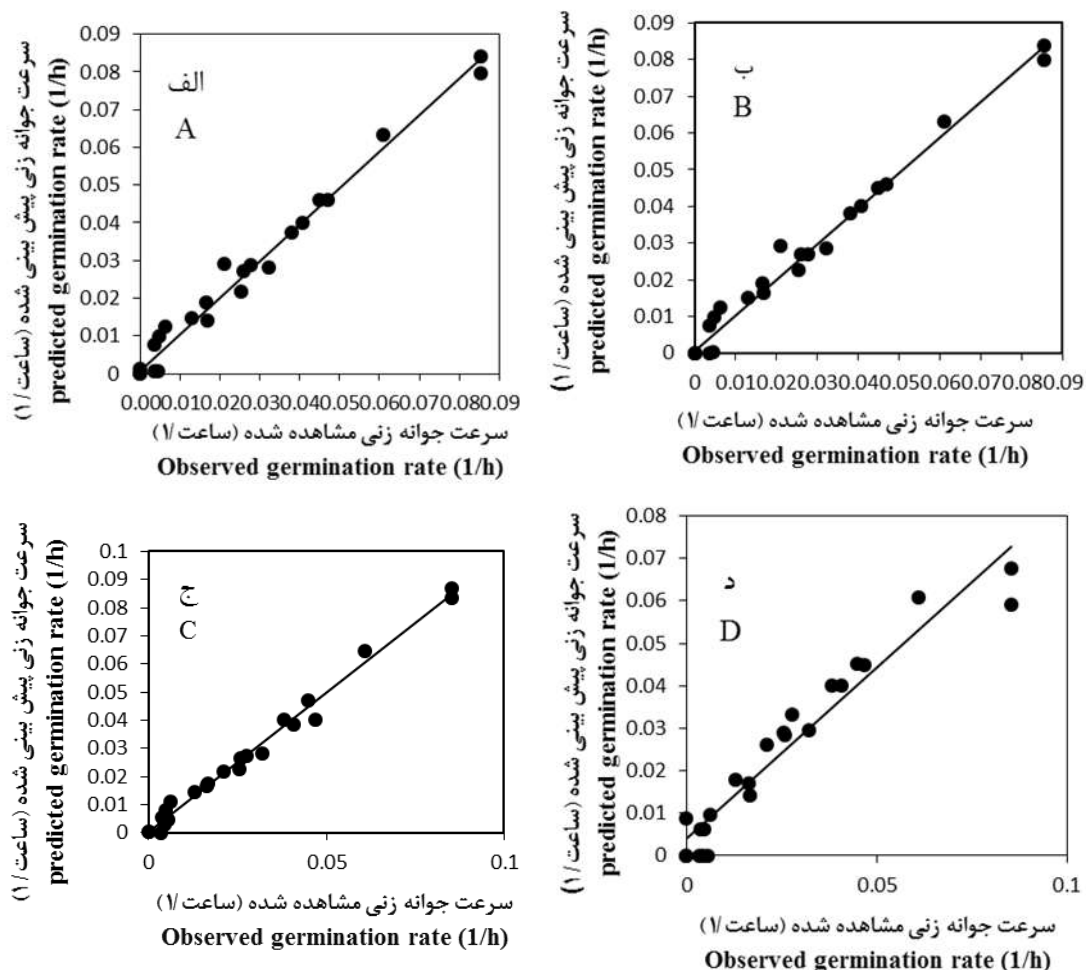
با استفاده از مدل زمان‌دمایی بر پایه توزیع نرمال پاسخ جوانه‌زنی بذرهای دیلار به دما کمی‌سازی شد (جدول ۶). نتایج نشان داد که دمای پایه محاسبه شده توسط مدل زمان‌دمایی ۴/۰۱ درجه سلسیوس بود (جدول ۶). ضریب زمان‌دمایی با استفاده از مدل لوگ زمان‌دمایی ۱۲۴۲/۶ ساعت درجه سلسیوس به دست آمد (جدول ۶). ضریب انحراف توزیع دمای پایه در جمعیت ۰/۷۶ و ضریب تبیین (R^2) ۰/۷۵ بود (جدول ۶). برای ارزیابی مدل برای بذرهای دیلار از نمودار یک به یک استفاده شد (شکل ۵). برای به کارگیری این نمودار نیاز

جدول ۵. برآورد دمای پایه (T_b)، دمای بهینه (T_o)، دمای بهینه تحتانی (T_{o1})، دمای بهینه فوقانی (T_{o2})، دمای بیشینه (T_c)، (بر حسب درجه سلسیوس)، ضریب ثابت (B) و تعداد ساعات زمینی (F_o) (بر حسب ساعت) با استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی برای بذر دایار تحت شرایط پتانسیل آب صفر مگاریاسکال

Table 5. Estimated base temperature (T_b), optimum temperature (T_o), maximum temperature (T_c), lower of optimum temperature (T_{o1}), upper limit of optimum temperature (T_{o2}), ($^{\circ}C$) Fixed coefficient (α), minimum time to reach a given percentile (F_o), (hour) using non-linear regression models for *Fagopyrum esculentum* Moenc seeds under 0 MPa water potential conditions

Model	پارامترهای اصلی			پارامترهای تغییر یافته			دندان مانند			دوگانه‌ای		
	T_{50}	T_{30}	T_{10}	T_{50}	T_{30}	T_{10}	T_{50}	T_{30}	T_{10}	T_{50}	T_{30}	T_{10}
ضرایب												
t_b	5 (19.81)	5 (6.88)	5 (27.38)	5 (4.33)	-1.16 (1.44)	-4.23 (4.53)	4.95 (2.06)	4.93 (1.55)	6.30 (1.20)	4.60 (2.02)	4.64 (1.62)	6.30 (1.56)
t_o	25 (2.62)	30.64 (1.05)	30.37 (4.20)	26.81 (1.06)	30.45 (0.70)	32.42 (0.050)	-	-	-	27.84 (1.33)	33.52 (1.64)	34.45 (1.54)
T_{o1}	-	-	-	-	-	-	22.74 (1.09)	28.57 (1.31)	31.88 (1.11)	-	-	-
T_{o2}	-	-	-	-	-	-	31.99 (1.04)	34.47 (0.83)	34.95 (1.04)	-	-	-
t_c	40 (1.71)	40 (0.001)	40 (1.43)	40 (0.51)	40 (0.26)	40 (0.14)	40	40	40	40	40	40
α	2 (5.65)	1.67 (1.10)	1.67 (4.51)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
f_o	30 (4.23)	22.09 (1.25)	14.72 (3.31)	35.91 (1.98)	21.31 (0.95)	10.99 (0.40)	37.33 (3.63)	22.26 (2.24)	11.61 (5.86)	30.58 (2.43)	19.00 (1.08)	10.56 (0.67)
a	1.15	1.02	0.72	0.99	0.98	0.98	0.95	0.96	0.96	0.94	0.96	0.96
b	0.0007	0.0009	0.006	0.0003	0.0005	0.0008	0.0007	0.0006	0.001	0.0008	0.0007	0.0012
R2	0.955	0.988	0.931	0.972	0.981	0.990	0.953	0.973	0.972	0.940	0.972	0.972
RMSE	0.002	0.002	0.010	0.002	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.004	0.003	0.006
CV%	17.65	9.58	25.85	14.00	11.76	9.81	14.13	14.21	12.47	20.49	14.57	16.47

a, b, R², RMSE, and CV Regression coefficients, coefficient of determination, root mean square error and coefficient of variation for the 1: 1 line, respectively.
 a, b, R², RMSE, and CV Regression coefficients, coefficient of determination, root mean square error and coefficient of variation for the 1: 1 line, respectively.



شکل ۴. سرعت جوانه‌زنی مشاهده شده در مقابل سرعت جوانه‌زنی پیش‌بینی شده بذر دیلار با استفاده از مدل‌های دو تکه‌ای (الف)، دندان مانند (ب)، بتای تغییر یافته (ج) و بتای اصلی (د)

Fig. 4. Observed versus predicted germination rate of *Fagopyrum esculentum* Moenc using dent-like (A), segmented (B), modified Beta (C), original Beta (D) models

(کامکار و همکاران، ۲۰۱۱؛ درخشان و همکاران، ۲۰۱۳؛ انصاری و همکاران، ۲۰۱۶). در کمی‌سازی پاسخ جوانه‌زنی بذرها به دما با استفاده از مدل‌های غیرخطی شبیه مدل‌های دندان مانند، دو تکه‌ای و بتا از شاخص سرعت جوانه‌زنی در برابر دما استفاده می‌شود، اما در مدل زمان‌دمایی از داده‌های مربوط به درصد جوانه‌زنی تجمعی برای هر دما استفاده می‌شود، از این‌رو استفاده از مدل زمان‌دمایی به دلیل استفاده از درصد جوانه‌زنی به صورت تجمعی جهت کمی‌سازی پاسخ جوانه‌زنی برای بذرها با جوانه‌زنی بالا ممکن است مناسب‌تر باشد که نیاز به بررسی‌های مفصل‌تری می‌باشد (انصاری، ۲۰۱۷).

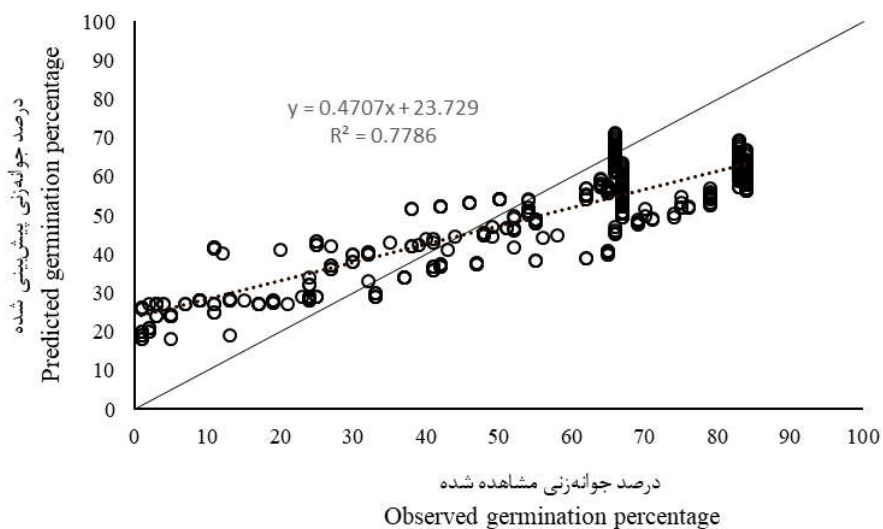
نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش درجه حرارت ضریب زمان‌دمایی کاهش یافت، در این راستا نتایج تحقیق گارکیا-هیودبرو و همکاران (۱۹۸۲) نشان داد که با افزایش درجه حرارت، ثابت زمان‌دمایی مورد نیاز برای جوانه‌زنی کاهش خواهد یافت. به‌طور کلی کاهش در ثابت زمان‌دمایی برای جوانه‌زنی در دماهای بالا به دلیل تأمین شدن سریع‌تر درجه حرارت مورد نیاز برای رسیدن به حداکثر جوانه‌زنی می‌باشد.

علاوه بر مدل زمان‌دمایی جهت کمی‌سازی پاسخ جوانه‌زنی بذرها به دما از مدل‌های غیرخطی از جمله مدل‌های دندان مانند، بتا و دو تکه‌ای استفاده شده است

جدول ۶. ضرایب برآورد شده مدل زمان‌دمایی با استفاده از توزیع لوگ نرمال. θ_T ، T_b و $\sigma_{\theta T}$ به ترتیب نشان دهنده ضریب زمان‌دمایی، دمای پایه و ضریب انحراف توزیع لوگ زمان‌دمایی برای جمعیت بذر دیلار

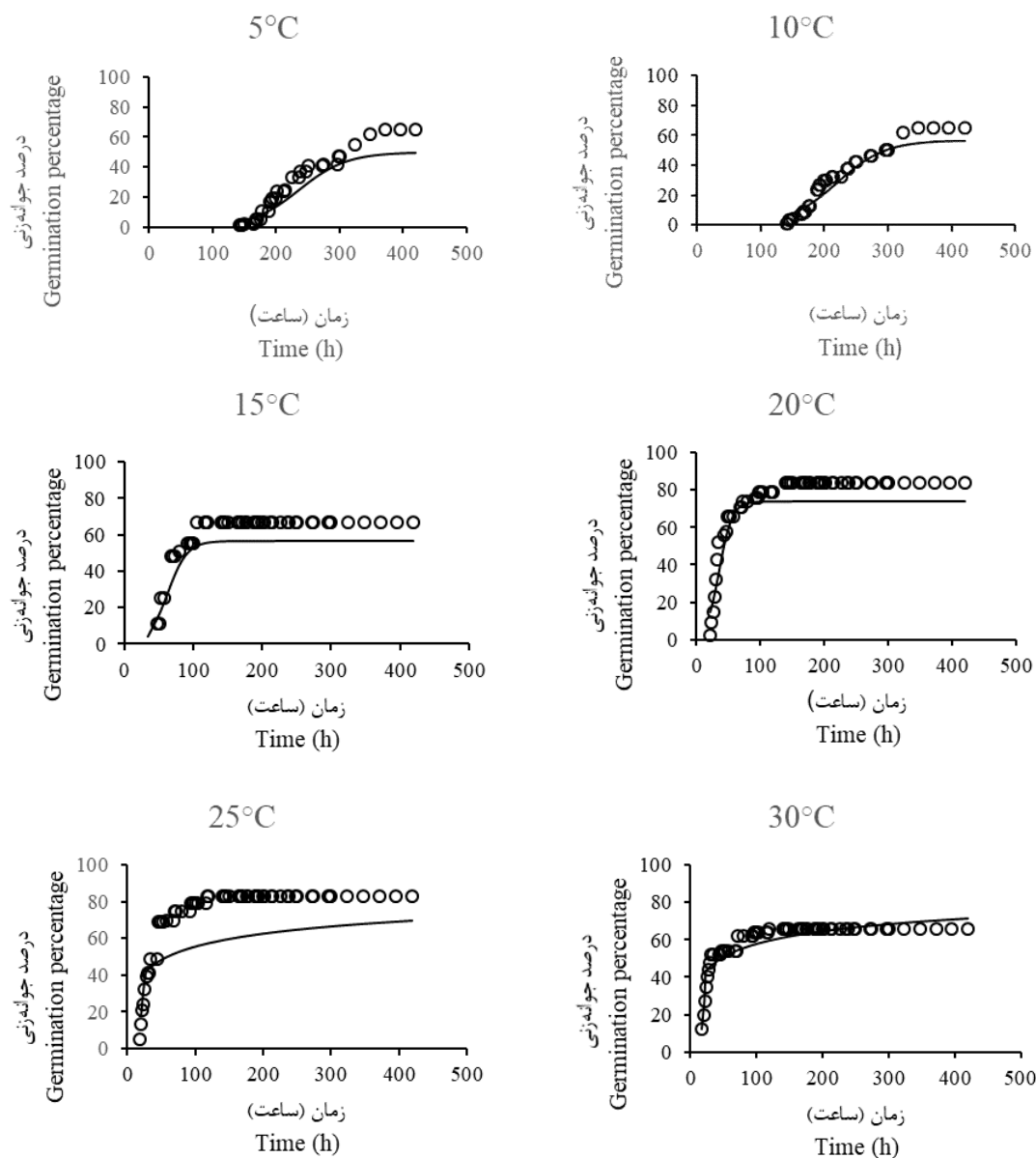
Table 6. Estimated parameters for thermal time model using the log-normal model. θ_T , T_b and $\sigma_{\theta T}$ indicate the thermal time constant, base temperature and standard deviation in *Fagopyrum esculentum* population, respectively

مدل (Model)	دمای پایه (درجه سلسیوس) T_b	ضریب زمان‌دمایی (۵۰٪) ($h^{\circ}C$) $\theta_{T(50\%)}$	$\sigma_{\theta T}$	R^2
لوگ نرمال (Log normal)	4.01 (0.01)	1242.6 (315.76)	0.76 (0.05)	0.75



شکل ۵. مقادیر پیش‌بینی شده درصد جوانه‌زنی از مدل زمان‌دمایی (توزیع نرمال) در مقابل درصد جوانه‌زنی مشاهده شده برای بذر دیلار

Fig. 5. Predicted versus observed germination percentage values from the thermal time model (normal distribution) for *Fagopyrum esculentum* Moenc seeds



شکل ۶. جوانه‌زنی تجمعی در دماهای ۵ تا ۳۰ درجه سلسیوس بذر دیلار علاوه درصد جوانه‌زنی مشاهده و خطوط درصد جوانه‌زنی پیش‌بینی شده با مدل زمان‌دمایی است.

Fig. 6. Cumulative germination at constant temperatures of 5-30 °C for *Fagopyrum esculentum* Moenc seeds. The circles and lines are observed and thermal-time predicted germination percentages, respectively.

نتیجه‌گیری

تخمین دماهای کاردینال دیلار مدل دندان مانند و بتای تغییر یافته بود؛ اما به دلیل بالا بودن اشتباه آزمایشی برای دمای پایه و تخمین منفی دمای پایه در مدل بتای تغییر یافته می‌توان از بین دو مدل دندان مانند و بتای تغییر یافته، مدل دندان مانند را به عنوان بهترین مدل گزارش کرد. همچنین نتایج استفاده از مدل زمان‌دمایی

نتایج نشان داد که با افزایش و کاهش دما به بالاتر یا پایین‌تر از دمای مطلوب، سرعت و درصد جوانه‌زنی بذر دیلار به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. در مقایسه ۴ مدل استفاده شده با توجه به پارامترهای RMSE، CV، SE و نمودار خط ۱:۱ مناسب‌ترین مدل جهت

نشان داد که استفاده از این مدل پیش‌بینی به نسبت خوبی از جوانه‌زنی بذر گندم سیاه داشت. از آنجایی که استفاده از مدل زمان‌دمایی تا حدودی سخت و پیچیده می‌باشد از اینرو استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی به‌نظر جهت پیش‌بینی جوانه‌زنی بذر دیلار مناسب‌تر باشد؛ بنابراین با استفاده از مدل دندان مانند و پارامترهای تخمین زده شده می‌توان از این مدل در تهیه و ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی جوانه‌زنی این بذر استفاده کرد.

منابع

- Acosta, J.M., Bentivegna, D.J., Panigo, E.S., Dellaferrera, I. and Pereta, M.G. 2012. Factors affecting seed germination and emergence of *Gomphrena perennis*. Weed Research, 53(1): 69-75. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2012.00954.x>
- Alvarado, V. and Bradford, K.J. 2002. A hydrothermal time model explains the cardinal temperatures for seed germination. Plant, Cell & Environment 25(8): 1061-1069. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2002.00894.x>
- Ansari, O. 2017. Quantification of *Malva sylvestris* L. germination response to environmental factors and land suitability assessment for its presence in GIS media. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Ph.D. in Seed Science and Technology at Agronomy. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.
- Ansari, O., Gherekhloo, J., Kamkar, B. and Ghaderi-Far, F. 2016. Breaking seed dormancy and determining cardinal temperatures for *Malva sylvestris* using nonlinear regression. Seed Science and Technology, 44(3): 1-14. <https://doi.org/10.15258/sst.2016.44.3.05>
- Bradford, K.J. 2002. Application 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)
- Cave, R.L., Brich, C.J., Hammmer, G.L., Erwin, J.E. and Johnston, M.E. 2011. Cardinal temperatures and thermal time for seed germination of *Brunonia australis* (Goodeniaceae) and *calandrinia* sp. (Portulacaceae). HortScience, 45(5): 753-758. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.46.5.753>
- Cawoy, V., Ledent, J.F., Kinet, J.M. and Jacquemart, A.L. 2009. Floral biology of common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench). The European Journal of Plant Science and Biotechnology, 3(1): 1-9.
- Covell, S., Ellis, R.H., Roberts, E.H., and Summerfield, R.J. 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: 705-715. <https://doi.org/10.1093/jxb/37.5.705>
- Del Monte, J.P. and Dorado, J. 2011. Effects of light conditions and after-ripening time on seed dormancy loss of *Bromus diandrus* Roth. Weed Research 51(6): 581-590. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2011.00882.x>
- Del Monte, J.P., Aguado, P.L. and Tarquis, A.M. 2014. Thermal time model of *Solanum sarrachoides* germination. Seed Science Research, 24(4): 321-330. <https://doi.org/10.1017/S0960258514000221>
- Derakhshan, A., Gherekhloo, J., Parvar, E., 2011, Estimation of cardinal temperatures and thermal time requirement for *Cyperus difformis* seed germination. Iranian Journal of Weed Science, 9(1): 27-38. [In Persian with English Summary].
- Derakhshan, A., Gherekhloo, J., Vidal, R.B. and De Prado, R. 2013. Quantitative description of the germination of littleseed canarygrass (*Phalaris minor*) in response to temperature. Weed Science, 62(2): 250-257. <https://doi.org/10.1614/WS-D-13-00055.1>

- Dori, M., Kamkar, B., Aghdasi, M., Kamshi- Kamr, E. 2015. Determination of the best model to evaluate germination cardinal temperature of *Silybum marianum* as a medicinal plant, Iran Journal of Seed Science and Technology, 3(2): 189-200. [In Persian with English Summary].
- Dumur, D., Pilbeam, C.J. and Craigon, J. 1990. Use of the Weibull function to calculate cardinal temperatures in faba bean. Journal of Experimental Botany, 41(11): 1423-1430. <https://doi.org/10.1093/jxb/41.11.1423>
- Garcia-Huidobro, J., Monteith, J.L. and Squier, G.R. 1982. Time temperature and germination of pearl millet (*Pennisetum typhoides*, S. & H.) I. Journal of Experimental Botany, 33: 288-296. <https://doi.org/10.1093/jxb/33.2.288>
- Ghaderi-Far, F., Soltani, A. and Sedeghipour 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. Journal of Plant Production, 16(4): 1-19. [In Persian with English Summary].
- Ghaderi-Far, F. and Soltani, E. 2015. Evaluation of sesame cultivars germination on response to temperature: determination of cardinal temperatures and thermal tolerance. Journal of Crop Sciences, 46(3): 473-483. [In Persian with English Summary].
- Hardegree, S.P. 2006. Predicting germination response to temperature. I. Cardinal-temperature models and subpopulation-specific regression. Annals of Botany, 97(6): 1115-1125. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl071>
- ISTA, 2008. The international rules for seed testing. International Seed testing Association, 138p.
- Izquierdo, J., Gonzalez-Andujar, J., Bastida, F., Lezaun, J.A. and Sanchezdel Arco, M.J. 2009. A Thermal time model to predict corn poppy (*Papaver rhoeas*) emergence in cereal fields. Weed Science, 57(6): 660-664. <https://doi.org/10.1614/WS-09-043.1>
- Kamkar, B., Daneshmand, A.R., Ghooshchi, F., Shiranirad, A.H. and Langeroudi, A.S. 2011. The effects of irrigation regimes and nitrogen rates on some agronomic traits of canola under a semiarid environment. Agricultural Water Management, 98(6): 1005-1012. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.01.009>
- Kamkar, B., Jami Al-Ahmadi, M. and Mahdavi-Damghani, A. 2011. Quantification of the cardinal temperatures and thermal time requirement of opium poppy (*Papaver somniferum* L.) seeds germinate using non-linear regression models. Industrial Crops and Products, 35(1): 192-198. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.06.033>
- Lack A.J. and Evans, D.E. 2003. Biologia roślin. Cykl- krótkie wykłady. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Li, Q., Tan, J., Li, W., Yuan, G., Du, L., Ma, S. and Wang, J. 2015. Effects of environmental factors on seed germination and emergence of Japanese brome (*Bromus japonicus*). Weed Science, 63: 641-649. <https://doi.org/10.1614/WS-D-14-00131.1>
- Linh, N.T.N. and Halas, V. 2016. Buckwheat as valuable feed and food resource. Nova Journal of Medical and Biological Sciences, 3(4): 1-6. <https://doi.org/10.20286/nova-jmbs-030459>
- Montgomery, J. 2009. The Potential of Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*) as a forage for dairy herds in central Alberta. Agriculture and Agri-Food Canada; Agricultural, Food and Nutritional Science. M.Sc. thesis, Department of Agricultural, Food, and Nutritional Science, University of Alberta, Acharya, Surya, 178p.
- Patade, V.Y., Maya, K. and Zakwan, A. 2011. Seed priming mediated germination improvement and tolerance to subsequent exposure to cold and salt stress in capsicum. Research Journal of Seed Science, 4(3): 125 -136. <https://doi.org/10.3923/rjss.2011.125.136>

- 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>
- Portoosi, M., Rash Mohasel, M. and Izadi, E. 2008. Germination characteristics and cardinal temperatures of lambsquarter, purselane and crabgrass. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 6(2): 205-261. [In Persian with English Summary].
- Qiu, J., Bai, Y., Colman, B. and Romo, J.T. 2007. Using thermal time models to predict seedling emergence of orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.) under alternating temperature regimes. *Seed Science Research*, 16(4): 261-271. <https://doi.org/10.1017/SSR2006258>
- Shafii, B. and Price, W.J. 2001. Estimation of cardinal temperatures in germination data analysis. *Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics*, 6: 356-366. <https://doi.org/10.1198/108571101317096569>
- Soltani, A., Oveisi, M., Soltani, A., Galeshi, S., Ghaderifar, F. and Zeinali, E. 2014. affected by temperature and water Seed germination modeling of volunteer canola as potential: hydrothermal time model. *Weed Research Journal*, 6(1): 23-38.
- Soltani, A., Robertson, M.J., 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): 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.
- Wang, J., Ferrell, J., MacDonald, G. and Sellers, B. 2009. Factors Affecting Seed Germination of Cadillo (*Urena lobata*). *Weed Science*, 57: 31-35. <https://doi.org/10.1614/WS-08-092.1>
- Wei, S., Zhang, C., Li, X., Cui, H., Huang, H., Sui, B., Meng, Q. and Zhang, H. 2009. Factors affecting Buffalobur (*Solanum rostratum*) seed germination and seedling emergence. *Weed Science*, 57: 521-525. <https://doi.org/10.1614/WE-09-054.1>
- Wu, X., Li, J., Xu, H. and Dong, L. 2015. Factors affecting seed germination and seedling emergence of Asia Minor bluegrass (*Polypogon fugax*). *Weed Science*, 63: 440-447. <https://doi.org/10.1614/WS-D-14-00093.1>
- 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): 1-16. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02236-Q](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02236-Q)

Research Article

Quantifying the Germination of *Fagopyrum esculentum* Moenc. Using Regression and Thermal-Time Models**Meysam Miri¹, Mohammdreza Amerian^{2,*}, Mohsen Edalat³, Miehdi Baradaran Firouzabadi², Hasan Makarian²****Extended Abstract**

Introduction: Germination is considered the first and most important stage of establishment and consequently, successful competition which is influenced by genetic and environmental factors. Among the environmental factors influencing the germination, temperature and light are the most important ones. Using different models, the germination response of seeds to temperature can be quantified; therefore, this study was performed to investigate the effect of temperature on germination and to quantify the germination response of Buckwheat seed (*Fagopyrum esculentum* Moenc) to temperature using nonlinear regression models and thermal-time model.

Materials and methods: The seeds were germinated in 4 replications of 25 seeds under 8 constant temperature treatments (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40 ° C). Using a three-parameter logistic model, Buckwheat seed germination was quantified at different temperature levels and the percentage and time to reach 50% germination were obtained. Four nonlinear regression models and a thermal-time model were used to quantify the response of Buckwheat seed germination rate to temperature. To compare the models and determine the most appropriate model, the root mean square error index (RMSE), coefficient of determination (R^2), coefficient of variation (CV) and standard error (SE) were used for the observed germination rate versus the predicted germination rate.

Results: The results indicated that temperature affected the seedling length, normal seedling percentage, seed vigor and the germination rate as well as germination percentage. Also, the results showed that germination characteristics increased with increasing temperature up to 20 and 25 °C. Comparison of the three models based on the root mean square error (RMSE) of germination time, the coefficient of determination (R^2), CV and SE, the best model to determine the cardinal temperatures of *Fagopyrum esculentum* was the dent-like model. The results of thermal-time model showed that the base temperature of *Fagopyrum esculentum* seeds was 4.01 ° C and the thermal-time coefficient was 1242.6 h° C.

Conclusion: Utilization of non-linear regression models (segmented, dent-like and beta) and thermal-time model to quantify the germination response of *Fagopyrum esculentum* response to different temperatures led to acceptable results. Therefore, germination rate and percentage may be predicted using the outputs of these models at different temperatures.

Keywords: Germination percentage, Germination rate, Modeling, Seed vigor

Highlights:

- 1- The best temperature for *Fagopyrum esculentum* Moenc. seed germination is 20-25 Celsius.
- 2- The dent-like model was determined the most appropriate model for estimating the cardinal temperatures of Buckwheat.

¹ Ph.D. Student of Agronomy Crop Physiology, Faculty of Agriculture, Shahroud University of Technology, Shahroud, Iran

² Associate professor of Agronomy, Faculty of Agriculture, Shahroud University of Technology, Shahroud, Iran

³ Associate professor of Agronomy, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

* Corresponding author, E-mail: amerian@shahroodut.ac.ir

