



(مقاله کوتاه)

ارزیابی مدل‌های رگرسیونی برای توصیف واکنش جوانه‌زنی به دما در عدس (*Lens culinaris Medik*)

سمانه رهبان^۱، قربانعلی رسام^{۲*}، بنیامین ترابی^۳ و اصغر خوشنود یزدی^۲

چکیده

این تحقیق با هدف تعیین دماهای کاردینال و ساعت بیولوژیک مورد نیاز برای جوانه‌زنی عدس با استفاده از مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی انجام گرفت. برای این منظور آزمایشی در اتاقک رشد به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار اجرا گردید. سه رقم عدس شامل گچساران، کیمیا و بیله‌سوار تحت هفت دمای ثابت ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه سلسیوس تیمارهای آزمایش را تشکیل دادند. رابطه بین سرعت جوانه‌زنی و دما با استفاده از مدل‌های بتا، دندان مانند و دوتکه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. برای انتخاب مدل برتر از میان مدل‌های مختلف از شاخص‌های آماری جذر میانگین مربع انحرافات (RMSD)، ضریب تبیین (R^2)، ضریب تغییرات (CV) و ضرایب رگرسیون ساده خطی (a و b) استفاده شد. نتایج برازش مدل‌ها نشان داد که واکنش جوانه‌زنی عدس به دما به وسیله تابع دوتکه‌ای نسبت به سایر مدل‌ها بهتر توصیف گردید. با استفاده از مدل دوتکه‌ای دمای پایه ارقام از ۰/۸۹ تا ۱/۲۳ درجه سلسیوس، دمای مطلوب از ۲۳/۴۱ تا ۲۶/۹۴ درجه سلسیوس و دمای سقف از ۳۵/۱۵ تا ۴۵ درجه سلسیوس برآورد گردید. مقایسه پارامترهای برآورده شده با استفاده از مفهوم حدود اطمینان در سطح احتمال ۹۵ درصد نشان داد که به لحاظ دمای پایه اختلاف معنی‌داری بین ارقام عدس وجود نداشت ولی از نظر دمای مطلوب و دمای سقف اختلاف بین ارقام معنی‌دار بود. تعداد ساعت بیولوژیک مورد نیاز برای جوانه‌زنی بذر ارقام از ۲۵/۴۳ تا ۳۱/۳۷ ساعت متغیر بود و از این نظر اختلاف معنی‌داری بین آنها وجود داشت. اطلاعات حاصل از این تحقیق می‌تواند در پیش‌بینی جوانه‌زنی ارقام عدس استفاده گردد.

واژگان کلیدی: جوانه‌زنی، دما، عدس، مدل‌های ریاضی.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده کشاورزی شیروان، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- عضو هیات علمی دانشکده کشاورزی شیروان، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- عضو هیات علمی دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولیعصر رفسنجان

* (نگارنده‌ی مسئول)

تاریخ دریافت: ۹۲/۴/۱۵

تاریخ پذیرش: ۹۳/۴/۱۱

rassam@um.ac.ir

مقدمه

جوانه‌زنی از مراحل حساس و مهم در چرخه زندگی گیاهان به‌شمار می‌رود (Windauer *et al.*, 2007). این مرحله حساس با جذب آب توسط بذر شروع شده و با طویل شدن محور جنینی و خروج ریشه‌چه به پایان می‌رسد. کاهش یا تاخیر در جوانه‌زنی با استقرار ضعیف و تراکم پایین گیاهچه همراه می‌باشد. استقرار نامناسب و کاهش تراکم گیاهچه نیز از طریق کاهش قدرت رقابت گیاه زارعی با گیاهان هرز، جذب کمتر نور در جامعه گیاهی، تشدید تبخیر از سطح خاک و هدررفت آب سبب محدودیت شدید در عملکرد گیاهان زارعی خواهد شد (Rebetzke and Richards, 1999; Soltani and Galeshi, 2002). بنابراین، جوانه‌زنی کامل و مناسب در محدوده‌ای وسیع از شرایط محیطی برای استقرار گیاهچه ضروری می‌باشد (Jacobsen and Bach, 1998). فرآیند جوانه‌زنی تحت کنترل عوامل ژنتیکی، هورمونی و محیطی است (Meyer and Pendleton, 2000). در صورتی که رطوبت و اکسیژن در حد کفایت فراهم باشند، درصد و سرعت جوانه‌زنی بذره‌ای بدون کمون تنها تحت تاثیر دما می‌باشد (Mwale *et al.*, 1994).

حداکثر درصد جوانه‌زنی در گیاهان در دامنه‌ی خاصی از دماها رخ می‌دهد و در پایین‌تر و بالاتر از این دامنه دمایی درصد جوانه‌زنی به طور ناگهانی کاهش می‌یابد (Kebreab and Murdoch, 1999). گیاهان دارای سه دمای کاردینال شامل دمای پایه یا حداقل، دمای مطلوب و دمای حداکثر یا سقف برای جوانه‌زنی هستند. دمای پایه و حداکثر دماهایی هستند که به ترتیب در دماهای پایین‌تر و بالاتر از آن دماها، جوانه‌زنی متوقف می‌شود و دمای مطلوب دمایی است که در آن جوانه‌زنی در کوتاه‌ترین زمان ممکن روی می‌دهد، یعنی سرعت جوانه‌زنی در

حداکثر مقدار می‌باشد (Alvarado and Bradford, 2002). سرعت جوانه‌زنی با افزایش دما تا دمای مطلوب جوانه‌زنی افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد (Soltani *et al.*, 2008). جلیلیان و همکاران (Jalilian *et al.*, 2004) گزارش نمودند که دماهای کاردینال وابسته به گونه گیاهی بوده و ممکن است اختلاف بین ارقام در درون گونه‌ها نیز مشاهده گردد.

درک واکنش جوانه‌زنی بذر نسبت به دما و تخمین دماهای کاردینال به منظور طراحی مدل‌های پیش‌بینی کننده جوانه‌زنی و سبز شدن گیاهچه، انتخاب تاریخ کاشت مناسب، ساخت مدل‌های نمو فنولوژیک، غربال کردن ارقام برای تحمل به دماهای پایین و بالا و تعیین نواحی جغرافیایی که در آنجا گونه‌ها یا ارقام بتوانند با موفقیت جوانه بزنند و استقرار یابند، مفید است (Madakadze *et al.*, 2001; Jame and Cutforth, 2004).

برای توصیف الگوی جوانه‌زنی در واکنش به دما، مدل‌های ریاضی متعددی ارایه شده است (Covell *et al.*, 1986; Ellis *et al.*, 1986). در این میان مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی به‌واسطه دقت زیاد در برآورد دماهای کاردینال و ارایه پارامترهایی با مفهوم فیزیولوژیک از اهمیت به‌سزایی برخوردار هستند (Soltani *et al.*, 2008). مدل دندان‌مانند و بتا برای مدل‌سازی سبز شدن نخود نسبت به دما استفاده شده بود (Soltani *et al.*, 2006). کمی‌سازی سرعت سبز شدن نخود نسبت به دما با توابع بتا، درجه دوم و تابع منحنی نیز انجام شده بود (Jame *et al.*, 2006; Yousefi-Daz *et al.*, 2004; and Cutforth, 2004). از مدل بتا برای بررسی رابطه بین سرعت جوانه‌زنی گندم و دما استفاده گردید (Addae and Pearson, 1992). در آفتابگردان (Mwale *et al.*, 1994)، تره ایرانی (Ramin, 1997)، نخود (Ellis *et al.*, 1986) و شبدر زیرزمینی (Akram-Ghadri *et al.*, 2001)

دما به عنوان عامل اصلی در ۷ سطح دمایی ثابت ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه سلسیوس و رقم به عنوان عامل فرعی شامل سه رقم کیمیا، بیله سوار و گچساران عدس بود. وزن هزار دانه سه رقم کیمیا، بیله سوار و گچساران به ترتیب معادل ۴۲، ۵۳ و ۵۵ گرم می‌باشد. برای هر تکرار، ۵۰ عدد بذر سالم از ارقام مورد نظر انتخاب و با محلول هیپوکلریت سدیم ۱۰ درصد به مدت ۴۵ ثانیه کاملاً ضد عفونی شدند. بذرها بعد از چند بار شستشو با آب مقطر داخل پتری‌دیش‌های ۹ سانتی‌متری که کف آنها با کاغذ صافی واتمن شماره ۲ پوشیده شده بود، قرار گرفتند. در ادامه به پتری‌ها به اندازه ۷ میلی‌لیتر آب مقطر افزوده شد و سپس به اتاقک رشد با دمای مورد نظر منتقل شدند. بازدید از پتری‌دیش‌ها هر ۸ ساعت یکبار انجام شد. در زمان شمارش، بذوری جوانه‌زده تلقی شدند که طول ریشه‌چه آنها ۲ میلی‌متر یا بیشتر بود. در طول آزمایش نیز در صورت نیاز آب مقطر به پتری‌دیش‌ها اضافه گردید.

در پایان آزمایش برای هر تکرار منحنی پیشرفت جوانه‌زنی در مقابل زمان (ساعت) ترسیم و زمان لازم برای رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی از طریق درون‌یابی برآورد گردید. سرعت جوانه‌زنی در R_{50} ، معادل معکوس زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی در نظر گرفته شد (Soltani et al., 2006).

برای کمی‌سازی واکنش جوانه‌زنی به دما و تعیین دماهای کاردینال از مدل زیر استفاده شد:

$$R_{50} = f(T)/g_0 \quad \text{معادله (۱)}$$

که در آن R_{50} سرعت جوانه‌زنی، $f(T)$ تابع دما که مقدار آن بین صفر تا یک است و g_0 تعداد ساعت بیولوژیک مورد نیاز برای جوانه‌زنی می‌باشد. پارامتر g_0 در حقیقت نشان‌دهنده حداقل ساعت مورد نیاز برای جوانه‌زنی در دمایی مطلوب است و بنابراین $1/g_0$

مدل‌های دوتکه‌ای مورد استفاده قرار گرفت. در آویشن خراسانی نشان داده شد که در مقایسه با خطوط متقاطع، مدل ۵- پارامتری بتا بهترین برازش را برای جوانه‌زنی بذره‌های توده طبیعی دارد (Tabrizi et al., 2007). در توصیف واکنش سبزشدن ارقام کلزا به دما نتیجه گرفته شد که سه مدل بتا، دو تکه‌ای و منحنی نسبت به سایر مدل‌ها از کارایی بیشتری برخوردار بودند (Jafari et al., 2011). دماهای کاردینال جوانه‌زنی در ژنوتیپ‌های نخود با استفاده از مدل دندان‌مانند برآورد گردید (Ganjeali et al., 2011).

عدس (*Lens culinaris* Medik.) به‌عنوان مهم‌ترین حبوبات تحت کشت در کشور محسوب شده به‌طوری که بعد از نخود بیشترین سطح زیر کشت حبوبات را به خود اختصاص داده است (Bagheri et al., 1998). این گیاه با دارا بودن ۲۳ تا ۳۲ درصد پروتئین دارای ارزش غذایی زیادی می‌باشد. علاوه بر این به‌واسطه توانایی تثبیت نیتروژن نقش ویژه‌ای در حاصلخیزی خاک برای کشت‌های بعدی دارد. در ایران کشت عدس اغلب در مناطق خشک و نیمه خشک کشور و به صورت دیم انجام می‌گیرد. در این مناطق درجه حرارت در زمان کاشت از مهم‌ترین عوامل مؤثر در جوانه‌زنی و سبزشدن به شمار می‌رود. بنابراین، تحقیق حاضر با هدف برآورد دماهای کاردینال و انتخاب مدل برتر جوانه‌زنی در سه رقم گچساران، کیمیا و بیله‌سوار با استفاده از مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در سال ۱۳۹۱ در آزمایشگاه تحقیقات بذر دانشکده کشاورزی شیروان انجام شد. آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در اتاقک رشد (مدل گروک) با دقت ± 0.5 درجه سلسیوس اجرا گردید.

مطلوب، T_c دمای سقف، T متوسط دمای هوا (دمای مورد آزمایش) و a پارامتری است که میزان انحنای تابع بتا را نشان می‌دهد.

توابع درجه دوم، درجه سوم و منحنی توابع (Hammer *et al.*, 1989) نیز به داده‌ها برازش داده شد اما از آنجایی که تابع بتا این توابع را نیز پوشش می‌داد بنابراین نتایج مربوط به آنها آورده نشده است. برآورد پارامترهای هر تابع با روش مطلوب سازی تکراری به کمک رویه NLIN نرم افزار SAS ver. 9.1 صورت گرفت. در این روش با هر بار وارد کردن مقادیر اولیه پارامترها، مقادیر نهایی آن با روش کمترین توان‌های دوم تخمین زده می‌شود. تغییر مقادیر اولیه تا زمانی انجام گرفت که بهترین برآورد از پارامترها بدست آید. بهترین برآورد از پارامترهای مدل بر اساس SE (خطای معیار) کمتر پارامترها و RMSE (جذر میانگین مربعات اشتباه) کمتر تجزیه رگرسیون مشخص شد. برای انتخاب مدل برتر از میان مدل‌های مختلف از شاخص‌های آماری شامل RMSD (جذر میانگین مربع انحرافات)، R^2 (ضریب تبیین)، CV (ضریب تغییرات) و مقایسه ضرایب رگرسیون ساده خطی (a و b) با صفر و یک استفاده شد. برای محاسبه RMSD از معادله زیر استفاده شد:

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum(O_i - S_i)^2}{(n-1)}} \quad (5) \text{ معادله}$$

که در آن n تعداد جفت مقادیر مورد استفاده در محاسبه، S_i مقدار پیش‌بینی شده و O_i مقدار مشاهده یا اندازه‌گیری شده است. در بین ارقام، برای مقایسه پارامترهای برآورده شده توسط مدل برتر از حدود اطمینان ۹۵ درصد استفاده گردید (Rezaei and Soltani, 2007).

حداکثر سرعت جوانه‌زنی در دمای مطلوب را نشان می‌دهد. از سه تابع زیر به عنوان تابع دمایی در معادله (۱) استفاده گردید (Soltani *et al.*, 2006).

۱- تابع دندان مانند^۱ با علامت اختصاری (D) که معادله آن به صورت زیر است:

$$T_b < T < T_{O1} \quad (2) \text{ معادله}$$

$$f(T) = \frac{(T - T_b)}{(T_{O1} - T_b)} \quad \text{اگر}$$

$$f(T) = \frac{(T_c - T)}{(T_c - T_{O2})} \quad \text{اگر } T_{O2} < T < T_c$$

$$= T - T_b \text{ or } T - T_c = 1 \quad \text{اگر } T_{O1} < T < T_{O2}$$

۲- تابع دو تکه ای^۲ با علامت اختصاری (S) که

معادله آن به صورت زیر است:

$$T_b < T < T_o \quad (3) \text{ معادله}$$

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

$$T_o < T < T_c$$

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

$$= T - T_b \text{ or } T - T_c$$

۳- تابع بتا^۳ با علامت اختصاری (B) که معادله

آن به صورت زیر است:

$$(4) \text{ معادله}$$

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

که در این توابع T_b دمای پایه، T_{O1} دمای

مطلوب تحتانی، T_{O2} دمای مطلوب فوقانی، T_o دمای

۱- Dent-like

۲- Segmented

۳-Beta

نتایج و بحث

در این مطالعه از سه مدل دوتکه‌ای، دندان‌مانند و بتا برای کمی‌سازی واکنش سرعت جوانه‌زنی ارقام مختلف عدس در پاسخ به دما استفاده شد (شکل ۱، ۲ و ۳). مدل‌های دوتکه‌ای و بتا برای جوانه‌زنی فقط یک نقطه مطلوب دارند ولی در مدل دندان‌مانند دامنه‌ای از دمای مطلوب برای جوانه‌زنی وجود دارد که در این دامنه سرعت جوانه‌زنی در حداکثر مقدار خود می‌باشد. حد پایین و حد بالا این دامنه به ترتیب دمای مطلوب تحتانی و دمای مطلوب فوقانی خوانده می‌شود (Soltani *et al.*, 2006; Akram-Ghadri *et al.*, 2008; Torabi and Soltani, 2012).

شاخص‌های آماری مربوط به برازش مدل‌ها بر داده‌های جوانه‌زنی در جدول (۱) ارائه شده است. تعداد ساعت تا جوانه‌زنی پیش‌بینی شده در مقابل تعداد ساعت تا جوانه‌زنی مشاهده شده نیز در شکل (۴) نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد پیش‌بینی بر پایه تابع بتا دارای انحرافات معنی‌داری برای هر سه رقم می‌باشد که به وسیله معنی‌دار شدن ضرایب a و b در رگرسیون خطی بین تعداد ساعت تا جوانه‌زنی مشاهده شده و ساعت تا جوانه‌زنی پیش‌بینی شده نشان داده شده است (جدول ۱). با این وجود برای توابع دوتکه‌ای و دندان‌مانند هیچ‌گونه انحرافی وجود نداشت. ضرایب a و b به ترتیب بیانگر مقدار انحراف خط رگرسیون از مبدا مختصات و مقدار اریب خط رگرسیون از خط ۱:۱ می‌باشد (شکل ۴). معنی‌دار بودن ضریب a بدین مفهوم است که عرض از مبدا خط رگرسیون با عرض از مبدا خط ۱:۱ مطابقت ندارد و مفهوم معنی‌داری ضریب b این است که شیب خط رگرسیون با شیب خط ۱:۱ مطابقت ندارد به عبارتی خط رگرسیون نسبت به خط ۱:۱ دارای اریب می‌باشد (Soltani *et al.*, 2006; Akram-Ghadri *et al.*, 2008; Torabi and Soltani, 2012).

انحراف معنی‌دار، RMSD زیاد (بین ۴ تا ۱۴ ساعت) و بیشتر بودن ضریب تغییرات (بین ۶ تا ۲۱ درصد) برای تابع بتا نشان داد که این تابع جهت استفاده در مدل‌سازی جوانه‌زنی بذره‌های عدس مناسب نیست. بنابراین، این مدل کنار گذاشته شد و به ارزیابی دو مدل دندان‌مانند و دوتکه‌ای پرداخته شد. دو مدل دندان‌مانند و دوتکه‌ای در بسیاری از شاخص‌های آماری نظیر مقادیر $RMSE$ ، R^2 و CV به خصوص برای دو رقم کیمیا و بیله سوار مشابه بودند. با این وجود در رقم گچساران مدل دوتکه‌ای کارایی بیشتری نشان داد. از طرفی برازش دو مدل به داده‌های سرعت جوانه‌زنی در مقابل دما، حاکی از توصیف بهتر مدل دوتکه‌ای نسبت به مدل دندان‌مانند می‌باشد (شکل ۱، ۲ و ۳). بدین ترتیب مدل نهایی و برتر، مدل دوتکه‌ای بود. برای این‌که مقایسه‌ای بین مدل‌ها انجام گیرد پارامترهای برآورده شده با هر سه مدل ارائه شده است (جدول ۱). مقدار $RMSE$ در مدل برتر دوتکه‌ای بین ۲ تا ۹ ساعت متغیر بود که ۳ تا ۱۳ درصد میانگین سرعت جوانه‌زنی مشاهده شده می‌باشد. در بسیاری از تحقیقات مدل دوتکه‌ای به عنوان مدلی مناسب برای توصیف رابطه دما و فرآیندهای رشد نظیر جوانه‌زنی و سبز شدن شناخته شده است. برای مثال، در ذرت (Olsen *et al.*, 1993)، آفتابگردان (Mwale *et al.*, 1994)، تره ایرانی (Ramin, 1997)، نخود (Ellis *et al.*, 1986; Covell *et al.*, 1986)، شبدر زیرزمینی (Akram-Ghadri *et al.*, 2001)، بقولات (Robertson *et al.*, 2002)، باقلا (Ajam Norouzi *et al.*, 2007) و کلزا (Jafari *et al.*, 2011) از این تابع استفاده شده است.

با این وجود از مدل‌هایی متفاوت با مدل دوتکه‌ای نیز برای توصیف اثر دما بر رشد و نمو گیاهان استفاده شده است. در بررسی روی نخود، دو

ژنوتیپ‌های مختلف نخود با یکدیگر و با مجموع ارقام مشاهده نکردند. آنها دمای پایه برای جوانه‌زنی ژنوتیپ‌های مختلف نخود را بین ۰/۵- تا ۰/۵ درجه و برای مجموع ژنوتیپ‌ها دمای پایه صفر درجه سلسیوس را گزارش کردند. در مطالعه بر روی برخی دیگر از گیاهان خانواده حبوبات مانند نخود (Soltani *et al.*, 2006) و باقلا (Ajam Norouzi *et al.*, 2007) نیز تفاوت معنی‌داری بین ارقام مورد آزمایش به لحاظ دمای پایه سبز شدن گزارش نشد. البته تحقیقاتی نیز به تنوع در دمای پایه ارقام مورد مطالعه تاکید نموده‌اند.

ویژیل و همکاران (Vigil *et al.*, 1997) نشان دادند که بین دمای پایه در پنج رقم کانولا تنوع وجود دارد. آنها اظهار داشتند دمای پایه برای پنج رقم کانولا بین ۰/۴۴ تا ۱/۲۰ درجه سلسیوس و برای مجموع ارقام ۰/۹ درجه سلسیوس می‌باشد و بین ارقام از نظر دمای پایه اختلاف معنی‌دار وجود دارد. همچنین، در آفتابگردان (Mwale *et al.*, 1994)، سورگوم (Wade *et al.*, 1993) و برخی گراس‌های گرمادوست (Madakadze *et al.*, 2001) تنوع ژنتیکی برای دمای پایه گزارش شده است. دمای مطلوب برآورده شده با مدل برتر دوتکه‌ای برای ارقام گچساران، کیمیا و بیله‌سوار به ترتیب ۲۶/۹۴، ۲۳/۴۱ و ۲۳/۶۰ درجه سلسیوس تعیین شد (جدول ۲). استفاده از حدود اطمینان ۹۵ درصد نشان داد که بین دو رقم کیمیا و بیله‌سوار اختلاف معنی‌داری در دمای مطلوب برآورده شده وجود ندارد ولی هر دو رقم اختلاف معنی‌داری را با رقم گچساران نشان می‌دهند (جدول ۲). در مطالعه کوول و همکاران (Covell *et al.*, 1986) دمای مطلوب برای جوانه‌زنی عدس بین ۲۴/۰ تا ۲۴/۴ تخمین زده شد که در محدوده دمای مطلوب برآورده شده در این مطالعه قرار دارد. در تطابق با نتایج این مطالعه عجم‌نوروزی و همکاران

تابع بتا و دندان مانند مناسب‌ترین مدل‌ها برای توصیف واکنش سبز شدن نخود به دما معرفی شدند (Soltani *et al.*, 2006). از بین شش مدل برازش داده شده به داده‌های جوانه‌زنی کدو تخم کاغذی، تابع بتا به عنوان بهترین تابع شناخته شد (Akram-Ghadri *et al.*, 2008). تابع بتا در مطالعات دیگری نیز مدل برتر معرفی شده بود (Yin *et al.*, 1995; Jame and Cutforth, 2004). تخمین دماهای کاردینال و ساعت بیولوژیک مورد نیاز برای جوانه‌زنی در جدول (۲) ارائه شده است. علاوه بر تابع برتر دوتکه‌ای، تخمین‌های حاصل از برازش دو تابع بتا و دندان مانند نیز جهت مقایسه نشان داده شده است. مطابق تابع دوتکه‌ای دمای پایه برای ارقام گچساران، کیمیا و بیله‌سوار به ترتیب ۰/۸۹، ۱/۱۳ و ۱/۲۳ درجه سلسیوس برآورد گردید (جدول ۲). بر اساس مفهوم حدود اطمینان در سطح احتمال ۹۵ درصد اختلاف معنی‌داری به لحاظ دمای پایه بین ارقام وجود نداشت. دمای پایه به عنوان یک صفت پایدار و ثابت در ارقام زراعی گزارش شده است (Oliver and Annandale, 1998). برازش مدل دوتکه‌ای بر داده‌های ترکیب شده سه رقم (مجموع ارقام)، دمای پایه یک درجه سلسیوس را برآورد نمود که با دمای پایه هیچ یک از ارقام اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۲). این نشان می‌دهد که برای اهداف عملی دمای پایه یک درجه سلسیوس برای این ارقام قابل استفاده است. در مطالعه کوول و همکاران (Covell *et al.*, 1986) دمای پایه جوانه‌زنی عدس ۲/۵ درجه سلسیوس برآورد گردید که خارج از محدوده دماهای پایه برآورد شده در این مطالعه است. این اختلاف ممکن است به دلیل اختلاف در ارقام مورد مطالعه باشد. هم‌راستا با نتیجه این تحقیق، عدم تنوع ژنتیکی برای دمای پایه در مطالعات دیگری نیز به اثبات رسیده است. الیس و همکاران (Ellis *et al.*, 1986) اختلاف معنی‌داری را بین دمای پایه جوانه‌زنی

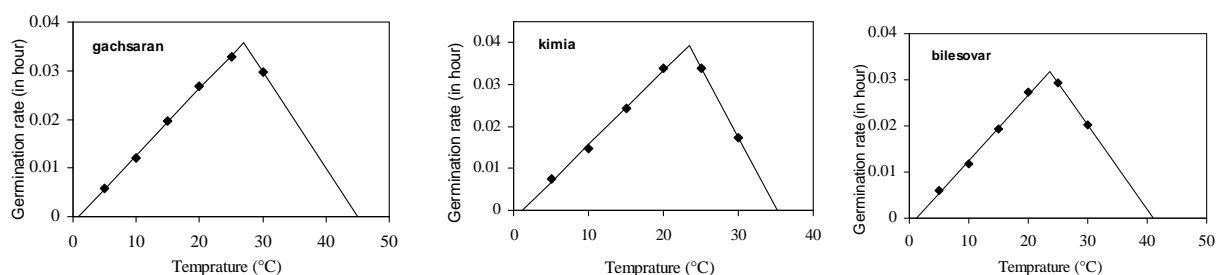
نظر بین تمامی ارقام اختلاف معنی داری وجود دارد به نحوی که مقدار آن برای ارقام گچساران، کیمیا و بیله سوار به ترتیب ۲۷/۹۲، ۲۵/۴۳ و ۳۱/۳۷ ساعت بود (جدول ۲). به نظر می رسد کوچک بودن بذره‌های رقم کیمیا دلیل سرعت جوانه زنی بیشتر آن باشد زیرا در بذره‌های کوچک نسبت سطح به حجم زیادتر می باشد. افزایش این نسبت سبب افزایش سرعت جذب آب و تسریع در جوانه زنی می گردد (Copeland and McDonald, 1995).

در تحقیق بر روی باقلا مشخص گردید که از نظر تعداد روزهای بیولوژیک مورد نیاز سبز شدن بین ارقام مورد بررسی اختلاف معنی دار وجود دارد (Ajam Norouzi et al., 2007). در مطالعه اکرم قادری و همکاران (Akram-Ghadri et al., 2008) تعداد ساعت بیولوژیک برای جوانه زنی بذر کدو تخم کاغذی ۱۹ ساعت گزارش گردید. تعداد روز بیولوژیک لازم از کاشت تا سبز شدن ارقام ارزن ۳/۵۷ تا ۵/۵۴ روز (Eshraghi Nejad et al., 2009) و نخود ۶ روز (Soltani et al., 2006) گزارش شده بود.

نتیجه گیری کلی

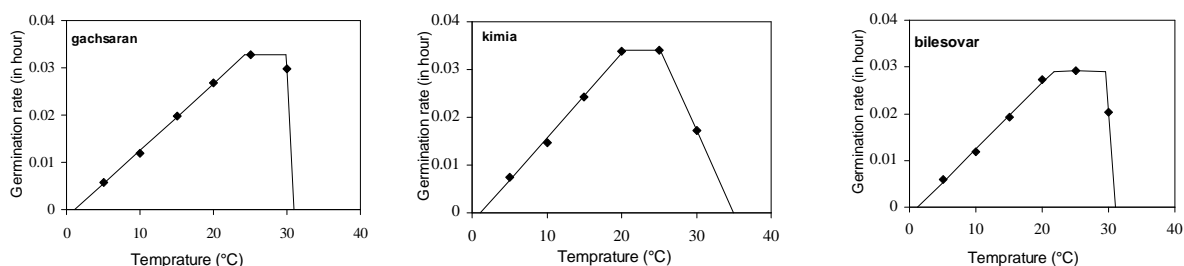
نتایج این تحقیق نشان داد که واکنش جوانه زنی ارقام مورد مطالعه عدس به دما با استفاده از تابع دوتکه‌ای به بهترین شکل قابل توصیف است. بنابراین، از این مدل و پارامترهای حاصل از آن می توان در پیش بینی جوانه زنی بذر این ارقام استفاده نمود. بین ارقام به لحاظ دمای پایه اختلاف معنی داری مشاهده نشد که نشان از پایداری این صفت می باشد. با این وجود، ارقام به لحاظ دمای مطلوب، دمای سقف و تعداد ساعت بیولوژیک لازم برای جوانه زنی اختلاف زیادی نشان دادند.

(Ajam Norouzi et al., 2007) نیز اختلاف معنی داری را در دمای پایه ارقام باقلا گزارش نمودند. همچنین دمای بهینه سبز شدن ارقام نخود در گرگان ۲۰ تا ۲۹ درجه سلسیوس گزارش شد (Soltani et al., 2006). با استفاده از رگرسیون خطی دمای مطلوب برای جوانه زنی ارقام مختلف لوبیای معمولی بین ۲۰ تا ۲۶ درجه سلسیوس (Ellis et al., 1987) و نخود ۲۷ تا ۴۰ درجه سلسیوس (Ellis et al., 1986) برآورد گردید. دمای مطلوب ارقام کلزا به کمک توابع رگرسیونی غیرخطی بین ۲۰ تا ۲۵ درجه سلسیوس گزارش شد (Jafari et al., 2011). در مطالعه کامکار و همکاران (Kamkar et al., 2006) دمای مطلوب ارقام ارزن ۳۷ تا ۴۲/۲ درجه سلسیوس تعیین گردید. در مدل برتر دو تکه‌ای دمای سقف برای ارقام گچساران و بیله سوار به ترتیب در دمای ۴۵ درجه و ۴۱ درجه سلسیوس ثابت فرض شد (جدول ۲). این امر به دلیل فراوانی کمتر دماهای بالاتر از ۳۰ درجه سلسیوس در تحقیق است. برای برآورد دماهای کاردینال در نخود (Soltani et al., 2006; Ganjeali et al., 2011) و باقلا (Ajam Norouzi et al., 2007) نیز دمای سقف به ترتیب در ۴۰ و ۳۵ درجه سلسیوس ثابت گردید. با این حال دمای سقف برآورده شده برای رقم کیمیا و مجموع ارقام به ترتیب ۳۵/۱۵ و ۴۱/۶۹ درجه سلسیوس بود. در مطالعه‌ای که بر روی کدو تخم کاغذی انجام گرفت دمای سقف معادل ۴۵ درجه سلسیوس برآورد شد (Akram-Ghadri et al., 2008). استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی دمای سقف را برای ارقام ارزن ۴۵ تا ۴۸ درجه سلسیوس (Kamkar et al., 2006) و برای ارقام کلزا بین ۳۶ تا ۳۷/۱۹ (Jafari et al., 2011) برآورد کرده بودند. برآورد ساعت بیولوژیک مورد نیاز برای جوانه زنی توسط مدل دوتکه‌ای نشان داد که از این



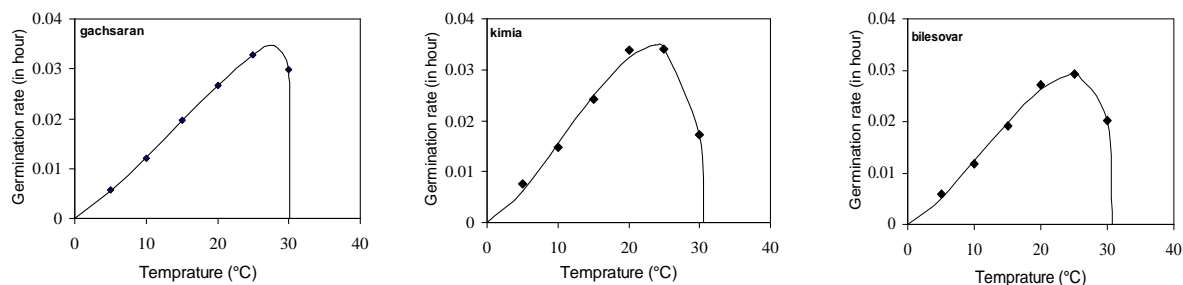
شکل ۱- برازش مدل دو تکه‌ای برای توصیف واکنش سرعت جوانه‌زنی به دما در سه رقم عدس

Figure 1- Fitting of segmented models to describe response of germination rate to temperature in three lentil cultivars



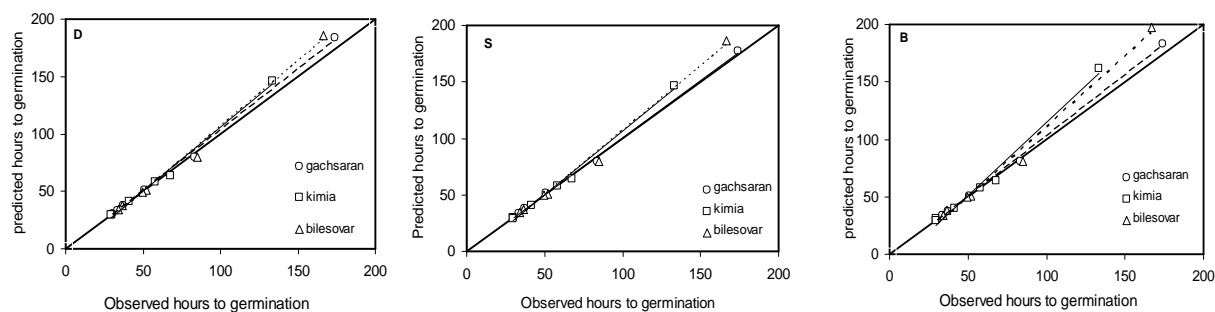
شکل ۲- برازش مدل دندان‌مانند برای توصیف واکنش سرعت جوانه‌زنی به دما در سه رقم عدس

Figure 2- Fitting of dent-like model for description response of germination rate to temperature in three lentil cultivars.



شکل ۳- برازش مدل بتا برای توصیف واکنش سرعت جوانه‌زنی به دما در سه رقم عدس

Figure 3- Fitting of beta model for description response of germination rate to temperature in three lentil cultivars.



شکل ۴- ساعت تا جوانه‌زنی پیش بینی شده در مقابل مشاهده شده در سه رقم عدس با استفاده از توابع دوتکه‌ای (S)، دندان‌مانند (D) و بتا (B) که توصیف کننده واکنش سرعت جوانه‌زنی به دما هستند. خط تیره نشان‌دهنده خط ۱:۱ می‌باشد. خط رگرسیون هر یک از توابع نیز نشان داده شده است.

Figure 4- Predicted vs. observed hours to germination in three lentil cultivars using (S) segmented, (D) dent-like and (B) beta functions to describe response of germination rate to temperature. The solid line is a 1:1 line. Regression lines of functions are also indicated.

جدول ۱- جذر میانگین مربع انحرافات (RMSD)، ضریب تغییرات (CV) و ضریب تبیین (R^2) برای مدل‌های مختلف توصیف کننده رابطه سرعت جوانه‌زنی با دما در سه رقم عدس و ضرایب رگرسیون (a و b) برای رابطه بین سرعت جوانه‌زنی مشاهده شده و نیز برآورد شده‌اند

Table 1- Root mean square of deviation (RMSD), coefficient of variation (CV) and coefficient of determination (R^2) for the relationship between germination rate (R_{50}) and temperature in three lentil cultivars described by various functions. Regression coefficients (a and b) for the relationship between observed and predicted times to emergence are also indicated.

	RMSD	R^2	CV	a± S.E.	b± S.E.
مدل دو تکه ای					
Segmented model					
گچساران Gachsaran	2.15	0.99	3.15	-0.97 ±1.493	1.02±0.017
کیمیا Kimia	6.15	0.99	10.27	-5.75±3.122	1.10±0.05
بیلہ سوار Bilesovar	8.98	0.99	12.7	-7.54±4.109	1.10±0.05
مدل دندان مانند					
Dent-Like model					
گچساران Gachsaran	4.56	0.99	6.68	-3.14±2.113	1.06±0.03
کیمیا Kimia	6.15	0.99	10.27	-5.75±3.122	1.10±0.05
بیلہ سوار Bilesovar	8.98	0.99	12.7	-7.58±4.111	1.10±0.05
مدل بتا					
Beta model					
گچساران Gachsaran	4.07	0.99	5.97	-2.81±1.692	1.05±0.019*
کیمیا Kimia	12.81	0.99	21.39	-12.06±5.185*	1.27±0.074*
بیلہ سوار Bilesovar	13.96	0.99	19.76	-11.80±5.26*	1.23±0.062*

جدول ۲- برآورد دمای پایه (T_b)، دمای مطلوب (T_o)، دمای سقف (T_c)، دمای مطلوب تحتانی (T_{o1})، دمای مطلوب فوقانی (T_{o2})، ضریب شکل () و تعداد ساعت بیولوژیک (g_0) مورد نیاز برای جوانه زنی سه رقم عدس با مدل‌های دو تکه ای، بتا و دندان مانند.

Table 2- Estimate of base temperature (T_b , °C), optimum temperature (T_o , °C), Ceiling temperature (T_c , °C), lower optimum temperature, (T_{o1} , °C), upper optimum temperature (T_{o2} , °C), shape parameter () and minimum physiological day requirement (g_0), for emergence of three lentil genotypes using segmented, beta and dent-like models.

مدل دو تکه‌ای					
Segmented model	T_c	T_o	T_b		g_0
گچساران Gachsaran	45±0	26.94±0.23	0.89±0.37		27.92±0.29
کیمیا Kimia	35.15±0.59	23.41±0.30	1.13±0.56		25.43±0.48
بیلہ سوار Bilesovar	41±0	23.6±0.29	1.23±0.53		31.37±0.49
مجموع ارقام Total	41.69±0.37	23.71±0.37	0.96±0.37		29.01±0.37
مدل بتا					
Beta model	T_c	T_o	T_b		e_0
گچساران Gachsaran	30.18±0.25	27.97±0.51	0	1.2±0.06	28.89±0.80
کیمیا Kimia	30.55±0.64	23.78±1.11	0	1.46±0.24	28.74±1
بیلہ سوار Bilesovar	30.72±0.97	25.17±1.21	0	1.38±0.22	33.79±1.33
مجموع ارقام Total	30.52±0.75	25.54±1.89	0	1.31±0.19	30.91±1.19
مدل دندان‌مانند					
Dent-Like	T_c	T_{o2}	T_{o1}	T_b	e_0
گچساران Gachsaran	31±0	29.89±0.02	24.29±0.48	1.14±0.35	30.53±0.41
کیمیا Gachsaran	35±0	25.14±0.56	20.4±0.65	1.13±0.56	29.41±0.75
بیلہ سوار Gachsaran	31±0	29.55±0.07	21.75±0.80	1.23±0.65	34.19±0.96
مجموع ارقام Total	35±0	27.86±0.32	22.08±0.76	0.96±0.62	31.25±0.79

References

منابع مورد استفاده

- Addae, P.C., and C.J. Pearson. 1992. Thermal requirements for germination and seedling growth of wheat. *Australian Journal of Agricultural Research*. 43: 585-594.
- Ajam Norouzi, H., A. Soltani, E. Majidi, and M. Homaei. 2007. Modeling response of emergence to temperature in faba bean under field condition. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*. 14(4): 100-111. (In Persian).
- Akram ghaderi, A., A. Soltani, and H.R. Sadeghipour. 2008. Evaluation of nonlinear regression models in quantifying germination rate of medicinal pumpkin (*Cucurbita pepo*. convar. *pepo* var. *styriaca*). In: Abstract Book of the 1rd Iranian Seed Science and Technology Symposium, November 13-14, 2008. Gorgan. (In Persian).
- Akram-Ghadri, F., S. Galeshi, S.J. Sadati, and A. Kashiri. 2001. Determination of cardinal temperature in *Trifolium aubterraneum* L. *Journal of Pajouhesh and Sazandegi*. 53: 36-39. (In Persian).
- Alvarado, V., and K.J. Bradford. 2002. A hydrothermal time model explains the cardinal temperatures for seed germination. *Plant Cell Environ*. 25: 1061-1069.
- Bagheri, A., M. Goldani, and Hassanzadeh, M. 1998. Agronomy and plant breeding of lentil (translation). Mashhad University Jahad Publications. 284 Pp. (In Persian).
- Copeland, L.O. and M.B. McDonald. 1995. Principles of seed science and technology. Chapman and Hall, New York. 409 Pp.
- Covell, S., R.H. Ellis, E.H. Roberts., and R.J. Summerfield. 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.
- Ellis, R.H., G. Simon, and S. Covell. 1987. The influence of temperature on seed germination rate in grain legumes. III. A comparison of five faba bean genotypes at constant temperatures using a new screen method. *Journal of Experimental Botany*. 38: 1033-1043.
- Ellis, R.H., S. Covell, E.H. Roberts, and R.J. Summerfield. 1986. The influence of temperature on seed germination rate in grain legumes. II. Intraspecific variation in chickpea (*Cicer arietinum* L.) at constant temperatures. *Journal of Experimental Botany*. 37: 1503- 1515.
- Eshraghi Nejad, M., B. Kamkar, and A. Soltani. 2009. Cardinal temperatures and required biological days from sowing to emergence of three millet species (common, foxtail, pearl millet). *Journal of Agricultural Science and Technology*. 3(12): 36-43.
- Ganjeali, A., M. Parsa, and S.R. Amiri-Deh-Ahmadi. 2011. Determination of cardinal temperatures and thermal time requirement during germination and emergence of chickpea genotypes (*Cicer arietinum* L.). *Iranian Journal of Pulses Research*. 2(2): 97-108. (In Persian).
- Hammer, G.L., R.L. Vaderlip, G. Gibson, L.J. Wade, R.G. Henzell, D.R. Younger, J. Warren, and A.B. Dale. 1989. Genotype by environment interaction in grain sorghum. II. Effects of temperature and photoperiod on ontogeny. *Crop Science*. 29: 376-384.
- Jacobsen, S.E., and A.P. Bach. 1998. The influence of temperature on seed germination rate in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). *Seed Science and Technology*. 26: 515-523.
- Jafari, N., M. Esphehni, and A. Sabori. 2011. Evaluation of nonlinear regression models for description of seedling appearance rate of three canola cultivars to temperature. *Journal of Iranian Crop Sciences*. 42 (4): 857-868.

- Jalilian, A., D. Mazaheri, R. Tavakkol Afshari, H. Rahimian, M. Abdollahian Nighabi, and J. Ghohari. 2004. Estimation of base temperature, germination and seedling emergence in different temperatures in monogerm sugar beet genotypes. *Journal of Sugar Beet*. 20(2): 97-112. (In Persian).
- Jame, Y.W., and H.W. Cutforth. 2004. Simulating the effects of temperature and seeding depth on germination and emergence of spring wheat. *Agriculture and Forest Meteorology*. 124: 207-218.
- Kamkar, B., A. Koocheki, M. Nassiri Mahallati, and P. Rezvani Moghaddam. 2006. Cardinal temperature for germination in three millet species (*Panicum miliaceum*, *Pennisetum glaucum* and *Setaria italica*). *Asian Journal of Plant Science*. 5: 316-319.
- Kebreab, E., and A.J. Murdoch. 1999. A model of effects of a wider range of constant and alternating temperatures on seed germination of four Orobanches species. *Annal of Botany*. 84: 549-557.
- Madakadze, I.C., B. Prithiviraj, K.A. Stewart, P.R. Peterson, B.E. Coulman, and D.L. Smith. 2001. Variation in base temperatures for germination in warm season grasses. *Seed Science and Technology*. 29: 31-38.
- Meyer, S.E., and R.L. Pendleton. 2000. Genetic regulation of seed dormancy in *Purshia tridentate* (*Rosaceae*). *Annal of Botany*. 85: 521-529.
- Mwale, S.S., S.N. Azam-Ali, J.A. Dark, R.G. Bradley, and M.R. Chatha. 1994. Effect of temperature on the germination of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Seed Science and Technology*. 22: 565-572.
- Oliver, F.C., and J.G. Annandale. 1998. Thermal time requirements for the development of green pea (*Pisum sativum*L.). *Field Crops Research*. 56: 301-307.
- Olsen, J.K., C.R. McMahan, and G.L. Hammer. 1993. Prediction of sweet corn phenology in subtropical environments. *Agronomy Journal*. 85: 410-415.
- Ramin, A.A. 1997. The influence of temperature on germination taree irani. *Seed Science and Technology*. 25:419-426.
- Rebetzke, G.L., and R.A. Richards. 1999. Genetic improvement of early vigor in wheat. *Australian Journal of Agricultural Research*. 50: 291-301.
- Rezaei, A. and A. Soltani. 2007. An Introduction to Applied Regression Analysis. Isfahan University of Technology Press, Isfahan, Iran. 303Pp. (In Persian).
- Robertson, M.J., P.S. Carberry, N.I. Huth, J.E. Turpin, M.E. Probert, P.L. Poulton, M. Bell, G.C. Wright, S.J. Yeates, and R.B. Brinsmead. 2002. Simulation of growth and development of diverse legume species in APSIM. *Australian Journal of Agricultural Research*. 53: 429-446.
- Soltani, A., and S. Galeshi. 2002. Importance of rapid canopy closure for wheat production in a temperate sub-humid environment: experimentation and simulation. *Field Crops Research*. 77: 17-30.
- Soltani, A., M.J. Robertson, B. Torabi, M. Yousefi-Daz, and R. Sarparast. 2006. Modelling seedling emergence in chickpea as influenced by temperature and sowing depth. *Field Crops Research*. 138: 156-167.
- Soltani, E., F. Akramghaderi, and A. Soltani. 2008. Applications of germination modeling on the response to temperature and water potential in seed science research. In: Abstract Book of the

1rd Iranian Seed Science and Technology Symposium, November 13-14, 2008. Gorgan. (In Persian).

- Tabrizi, L., A. Koocheki, M. Nasiri Mahalati, and P. Rezvani. 2007. Germination behavior of cultivated and natural stand seeds of Khorasan thyme (*Thymus transcaspicus* Klokov) with application of regression models. *Iranian Journal of Field Crops Research*. 5:249-257. (In Persian).
- Torabi, B., and A. Soltani. 2012. Quantifying of chickpea emergence response to temperature. *Journal of Crop Production and Processing*. 6: 109-119. (In Persian).
- Vigil, M.F., R.L. Anderson, and W.E. Beard. 1997. Base temperature and growing degree hour requirements for the emergence of canola. *Crop Science*. 37: 844-849.
- Wade, L.J., G.L. Hammer, and M.A. Davey. 1993. Response of germination to temperature amongst diverse sorghum hybrids. *Field Crops Research*. 31: 295-308.
- Windauer, L., A. Altuna, and R. Benech-Arnold. 2007. Hydrotime analysis of *Lesquerella fendleri* seed germination responses to priming treatments. *Industrial Crops and Products*. 25: 70-74.
- Yin, X., M.J. Kropff, G. McLaren, and R.M. Visperas. 1995. A non-linear model for crop development as a function of temperature. *Agriculture and Forest Meteorology*. 77: 1-16.
- Yousefi-Daz, M., A. Soltani, F. Akram ghaderi, and R. Sarparast. 2006. Evaluation of non-linear regression models to describe response of emergence rate to temperature in chickpea. *Agriculture Science and Technology*. 20(1): 93-102.

Short Article

Evaluation of Linear and Nonlinear Regression Models to Describe Response of Germination to Temperature in Lentil (*Lens culinaris* Medik.)

Rahban, S.¹, Gh. Rassam^{2*}, B. Torabi³, and A. Khoshnood Yazdi²

Received: July 2013, Accepted: 2 July 2014

Abstract

This study was carried out to determine the requirements of cardinal temperatures and biological hours for germination of lentil by using different linear and nonlinear regression models. To do this, a split plot experiment based on randomized completely design with four replications was conducted in germinator. Experimental treatments were three lentil cultivars (Gacgsaran, Kimia and Bilehsovar) under seven fixed temperature regimes (5, 10, 15, 20, 25, 30 and 35°C). Beta, Dent-like and Segmented models were applied to evaluate the relationship between germination rate and temperature. Root mean square deviation (RMSD), coefficient of determination (R^2), coefficients of variation (CV) and linear regression coefficients (a, b) were used to detect the perfect model. Results of fitting the models indicated that the response of lentil germination to temperature is best described by a segmented function. Cardinal temperatures estimated by this model were 0.89 to 1.23°C for base temperature, 23.41 to 26.94°C for optimum temperature and 35.15 to 45°C for ceiling temperature. Significant difference in base temperature among cultivars was not observed, but cultivars had significant difference in optimum and ceiling temperatures. Biological hour's requirement for germination ranged between 25.43 to 31.37 hours. The quantitative information provided by this research can be used in prediction of germination of lentil cultivars.

Key words: Lentil, Simulation, Germination, Temperature.

¹- M.Sc. Student, Faculty of Agriculture of Shirvan, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

²- Staff member, Faculty of Agriculture of Shirvan, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

³- Staff member, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

* *Corresponding Author:* rassam@um.ac.ir