

Original article

Germination response of faba bean (*Vicia faba* L.) genotypes to temperature: An assessment of temperature tolerance

Entesar Ghari-Arab¹, Benjamin Torabi^{2*}, Fatemeh Sheikh³, Elias Soltani⁴, Asieh Siahmarguee⁵

1. M.Sc. Graduate of Seed Science and Technology, Department of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

2. Professor, Department of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

3. Associate Professor, Department of Horticulture Crops Research, Agricultural Research and Education and Natural Resource Center of Golestan province, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Gorgan, Iran

4. Associate Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding Sciences, Abureyhan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran

5. Associate Professor, Department of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Received 1 June 2025; Revised 22 July 2025; Accepted 27 July 2025

Extended abstract

Introduction

Research on faba bean genotypes in Iran is important for understanding germination characteristics and seedling emergence. It is also important to evaluate the genetic diversity among faba bean genotypes and their responses to different stress factors. Therefore, the objectives of this study were to: (1) assess cumulative germination across various temperatures; (2) determine cardinal temperatures; and (3) evaluate the tolerance of faba bean genotypes to low and high temperatures during the seed germination stage.

Materials and methods

This study evaluated the germination characteristics of 20 faba bean genotypes at six temperatures (5, 10, 15, 20, 25, and 30 °C), with three replications. Faba bean seeds were placed on paper towels (45 × 30 cm) soaked in distilled water using the sandwich method, with three replicates of 25 seeds each arranged in five linear rows. Germinated seeds were counted daily at each temperature. A quadratic function was used to describe the relationship between temperature and germination percentage and to estimate the cardinal temperatures for germination. Additionally, a segmented function was used to characterize the relationship between temperature and germination rate and to estimate the cardinal temperatures for germination. To calculate the heat CTRI (H-CTRI) for each genotype, the ratios of the cardinal temperature values for germination percentage (GP) and germination rate (R50) of each genotype to the corresponding maximum cardinal temperature values observed among all genotypes were summed. This calculation allowed the faba bean genotypes to be classified into different temperature tolerance groups. In contrast, the cold CTRI (C-CTRI) was determined by summing the ratios of the minimum values of the cardinal temperatures observed among all genotypes to the corresponding values of each genotype.

Results and discussion

The results showed that the cardinal temperatures for germination percentage ranged from -3.0 to 1.7 °C for the base temperature (Tb), 15.6 to 18.6 °C for the optimum temperature (To), and 33.2 to 38.4 °C

* Corresponding author: Benjamin Torabi; E-Mail: ben_torabi@yahoo.com

for the ceiling temperature (T_c). These cardinal temperatures were estimated using a mathematical model describing the relationship between germination percentage and temperature. Similarly, the cardinal temperatures for germination rate were estimated using a segmented function. The base temperature (T_b) ranged from 1.2 to 5.2 °C, the optimum temperature (T_o) from 23.0 to 26.1 °C, and the ceiling temperature (T_c) from 31.8 to 36.7 °C. Additionally, H-CTRI values ranged from 2.8 for GF-20 and 2.9 for GF-95 to 4.5 for GF-21. C-CTRI values ranged from 3.0 for GF-21 to 8.0 for GF-12. The genotypes were classified into different temperature-tolerance categories based on their CTRI values. Notably, a strong positive correlation was found between heat tolerance (H-CTRI) and base temperature, whereas a significant negative correlation was observed between cold tolerance (C-CTRI) and base temperature. Interestingly, genotypes with higher H-CTRI values tended to have lower C-CTRI values. This suggests that genotypes with greater heat tolerance may have lower tolerance to cold temperatures.

Conclusion

This study improves our understanding of how faba bean genotypes respond to temperature changes, which is essential for crop performance under climate change. The findings reveal that different genotypes have specific temperature requirements for optimal germination, indicating genetic diversity that could contribute to enhanced production. By considering cardinal temperatures and CTRI values, breeders and farmers can select genotypes that are best suited to their climatic conditions, thereby optimizing yield. Further studies on the physiological and molecular mechanisms underlying these responses will support the development of faba bean genotypes with improved temperature tolerance. Overall, the findings highlight the importance of breeding programs and crop management practices that consider temperature responses, ultimately contributing to food security and crop resilience under a changing climate.

Keywords: Cardinal temperatures, Cold stress, Germination rate, Genetic variability, Heat stress

واکنش جوانه‌زنی ژنوتیپ‌های باقلا (*Vicia faba* L.) به دما: ارزیابی تحمل به دما

انتصار قاری‌عرب^۱، بنیامین ترابی^{۲*}، فاطمه شیخ^۳، الیاس سلطانی^۴، آسیه سیاهمرگویی^۵

۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد علوم و تکنولوژی بذر، گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان
۲. استاد، گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان
۳. دانشیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان
۴. دانشیار، گروه علوم زراعت و اصلاح نباتات، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران
۵. دانشیار، گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان

مشخصات مقاله	چکیده
واژه‌های کلیدی:	در این مطالعه، تأثیر دما بر مؤلفه‌های جوانه‌زنی و ویژگی‌های سبزشدن در ۲۰ ژنوتیپ باقلا (<i>Vicia faba</i> L.) مورد بررسی قرار گرفت. بررسی روند تغییرات درصد جوانه‌زنی با استفاده از مدل درجه دوم نشان داد درصد جوانه‌زنی به طور قابل توجهی بین ژنوتیپ‌ها متفاوت بود و تحت تأثیر دما قرار گرفت، به طوری که درصد جوانه‌زنی در دماهای پایین‌تر از حد مطلوب افزایش و در دماهای بالاتر از حد مطلوب کاهش یافت. این تحقیق دماهای کاردینال (دمای پایه، مطلوب و سقف) برای درصد جوانه‌زنی را مشخص کرد که شامل دمای پایه (Tb) بین ۳/۰- تا ۱/۷ درجه سانتیگراد، دمای مطلوب (To) بین ۱۵/۶ تا ۱۸/۶ درجه سانتیگراد و دمای سقف (Tc) بین ۳۳/۲ تا ۳۸/۴ درجه سانتیگراد بود. همچنین، در این مطالعه، دماهای کاردینال برای سرعت جوانه‌زنی با استفاده از یک تابع دوتکه‌ای تخمین زده شد. دمای پایه بین ۱/۲ تا ۵/۲ درجه سانتیگراد، دمای مطلوب بین ۲۳/۰ تا ۲۶/۱ درجه سانتیگراد و دمای سقف بین ۳۱/۸ تا ۳۶/۷ درجه سانتیگراد بود. علاوه بر این، ژنوتیپ‌ها بر اساس تحمل دمایی خود که با مقادیر CTRI تعیین شد، در گروه‌های مختلف دسته‌بندی شدند. به طور قابل توجه، همبستگی مثبت قوی بین تحمل به گرما (H-) و CTRI و دمای پایه مشاهده شد، درحالی‌که همبستگی منفی معنی‌داری بین تحمل به سرما (C-CTRI) و دمای پایه وجود داشت. این مطالعه اطلاعات ضروری برای انتخاب ژنوتیپ‌های باقلا با تحمل دمایی مناسب را فراهم می‌کند و به تصمیم‌گیری‌های اصلاحی و کشت در شرایط آب‌وهوایی مختلف کمک می‌کند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۳۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۵	

مقدمه

گزارش شده آن ۲۱۷۶/۲ کیلوگرم در هکتار است (FAO, 2019). ایران از نظر کشت و تولید باقلا در رتبه دوازدهم جهانی قرار دارد. باقلا عمدتاً در استان‌های خوزستان، لرستان، اصفهان، کاشان، گلستان و مازندران کشت می‌شود (Sheikh and Feyzbakhsh, 2019).

تحقیق در مورد ژنوتیپ‌های باقلا در ایران برای درک مؤلفه‌های جوانه‌زنی و ویژگی‌های ظهور گیاهچه بسیار مهم است. همچنین ارزیابی تنوع ژنتیکی نمونه‌های باقلا و پاسخ

گیاه باقلا (*Vicia faba* L.) سرشار از پروتئین و منبع خوبی از مواد مغذی است. این گیاه به طور کارآمد نیتروژن اتمسفری را تثبیت می‌کند و به سیستم‌های کشاورزی پایدار کمک می‌کند (Sheikh et al., 2021). سطح زیر کشت جهانی باقلا حدود ۲۴۶۳۹۶۶ هکتار است که حدود ۴/۸ میلیون تن دانه تولید می‌کند. میانگین عملکرد دانه باقلا در سطح جهانی حدود ۱۹۶۴/۳ کیلوگرم در هکتار است (FAO, 2019). در ایران، سطح زیر کشت باقلا ۳۰۰۰۰ هکتار است و عملکرد

درک سازگاری گیاهان با مناطق مختلف کشاورزی - اکولوژیکی نیازمند شناسایی دماهای کاردینال برای جوانه‌زنی است (Torabi et al., 2013). دماهای کاردینال شامل دمای پایه که زیر آن سرعت جوانه‌زنی صفر است، دمای مطلوب که در آن سرعت جوانه‌زنی حداکثر است، و دمای سقف که بالاتر از آن سرعت جوانه‌زنی صفر می‌شود، است (Torabi et al., 2020; Zaferanieh et al., 2020). کمی‌سازی پاسخ جوانه‌زنی نسبت به دما و تخمین دماهای کاردینال و ساعات بیولوژیک (حداقل ساعات تحت دماهای مناسب) به شناسایی و غربالگری توده‌های بومی مقاوم به دما کمک می‌کند و می‌تواند مناطق جغرافیایی مناسبی را برای جوانه‌زنی و استقرار آنها شناسایی نماید (Sousaraei et al., 2021).

باتوجه به وجود ژنوتیپ‌های مختلف مورد مطالعه در این تحقیق، انتظار می‌رود که واکنش‌ها و سازگاری‌های جوانه‌زنی میان ژنوتیپ‌های مختلف به دما متفاوت باشد؛ بنابراین، اهداف این تحقیق عبارت‌اند از: (۱) ارزیابی روند جوانه‌زنی تجمعی در دماهای متفاوت؛ (۲) تخمین دماهای کاردینال برای سرعت و درصد جوانه‌زنی؛ و (۳) ارزیابی تحمل به دماهای پایین و بالا در ژنوتیپ‌های مختلف باقلا.

مواد و روش‌ها

این تحقیق روی ویژگی‌های جوانه‌زنی ۲۰ ژنوتیپ باقلا در ۶ سطح دمایی (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درجه سانتیگراد) با سه تکرار به صورت آزمایش اسپلیت پلات (عامل اصلی دما و عامل فرعی ژنوتیپ) در آزمایشگاه بذر دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در سال ۱۴۰۱ انجام شد. بذره‌های باقلا مورد استفاده در این مطالعه از ژرم پلاسما باقلا در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان تهیه شد. ویژگی‌های ژنوتیپ‌های مورد مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است.

آزمایش جوانه‌زنی مطابق با قوانین استاندارد انجمن بین‌المللی آزمون بذر ($ISTA^1$) انجام شد. بذرها در شش سطح دمای ثابت (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درجه سانتیگراد) مورد آزمایش قرار گرفتند. برای شروع آزمایش، بذرها به مدت یک دقیقه با محلول یک درصد هیپوکلریت سدیم ضد عفونی شدند. سپس بذره‌های باقلا در سه تکرار و هر تکرار شامل ۲۵ بذر، در پنج ردیف خطی روی حوله کاغذی (ابعاد ۴۵ × ۳۰)

آنها به عوامل تنش‌زا مختلف نیز حائز اهمیت است. این تحقیق به بهبود عملکرد و پایداری کشت باقلا در سیستم‌های کشت ایران کمک خواهد کرد (Damalas, et al., 2019; Karkanis et al., 2018). علاوه بر این، مطالعه واکنش متقابل بین ژنوتیپ‌ها و محیط، درک ارزشمندی را برای انتخاب ژنوتیپ‌های مناسب برای شرایط محیطی خاص و درک جنبه‌های تغذیه‌ای ژنوتیپ‌های مختلف فراهم خواهد کرد (Choi et al., 2023). بررسی واکنش‌های جوانه‌زنی برای غربالگری تحمل گیاه به دماهای شدید، شناسایی مناطق جغرافیایی مناسب برای جوانه‌زنی و استقرار موفق، و توسعه مدل‌های پیش‌بینی رشد و عملکرد گیاه ضروری است (Torabi, et al., 2013; Torabi, et al., 2015).

مطالعه ژنوتیپ‌های باقلا در ایران می‌تواند سهم قابل توجهی در امنیت غذایی داشته باشد. اولاً، ارزیابی تحمل آنها به خشکی می‌تواند به شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم کمک کند که در شرایط کم‌آبی رشد کرده و محصولات پایدار و پربازدهی را در مواجهه با تغییرات اقلیمی تضمین کنند. ثانیاً، تنوع ژنتیکی جمعیت‌های باقلا در ایران می‌تواند به عنوان منبع ارزشمندی برای برنامه‌های اصلاحی باشد که هدف آنها توسعه ارقام پربازده و مقاوم به تنش است که در مقیاس محلی و جهانی مفید خواهد بود. در نهایت، درک تعامل بین ژنوتیپ‌ها و محیط و شناسایی ژنوتیپ‌هایی با ویژگی‌های مطلوب مانند پتانسیل عملکرد بالا و نیز مقاوم به تنش، می‌تواند منجر به توسعه ارقام سازگار و پربازده باقلا در مناطق مختلف اکولوژیکی شود و در نهایت امنیت غذایی را بهبود بخشد.

رشد و نمو گیاهان در فضای باز همواره تحت تأثیر تنش‌های غیرزیستی محیطی قرار دارد. برخی از این عوامل تنش‌زا از یک منطقه به منطقه دیگر و از فصلی به فصل دیگر تغییر می‌کنند، درحالی‌که عوامل دیگری مانند دما ممکن است نوسانات روزانه غیرقابل پیش‌بینی و گذرا داشته باشد (Rodriguez et al., 2020). دما به عنوان یک عامل کلیدی، به ویژه در شرایطی که سایر عوامل محیطی از جمله بارندگی مناسب در پاییز، زمستان و اوایل بهار (Masin et al., 2017) یا آبیاری پیش از کاشت محدودکننده نیستند، نقش حیاتی ایفا می‌کند (Torabi et al., 2020)؛ بنابراین، بررسی تأثیر دما بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌های باقلا ضروری است.

که با آب مقطر خیس شده بود، قرار داده شدند. حوله کاغذی به روش ساندویچ تازه شد تا رطوبت حفظ شود و بذرها در کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شدند تا از تبخیر رطوبت جلوگیری شود. بذرهاى جوانه‌زده شده به‌صورت روزانه در دماهای مختلف شمارش شدند.

از تابع درجه دوم برای تعیین دماهای کاردینال برای درصد جوانه‌زنی استفاده شد. مشتق‌گیری از تابع درجه دوم این امکان را می‌دهد تا دمای مطلوب برای دستیابی به حداکثر درصد جوانه‌زنی هر رقم را تعیین شود. علاوه بر این، با برابر قراردادن مقدار تابع برابر صفر، دمای پایه و سقف برای درصد جوانه‌زنی تخمین زده شد.

Table 1. Traits of the tested faba bean genotypes

Code کد	Name نام	Source منبع	Maturity duration دوره رسیدگی	Seed size اندازه بذر	Origin منشأ
GF-180	F8/7093/06 - A	Collection	Late	Medium	ICARDA
GF-288	FLIP03-069FB	Collection	Late	Medium	ICARDA
GF-145	line F6 latt/440/08	Collection	Late	Medium	ICARDA
GF-290	Lattakia 2	Collection	Late	Medium	ICARDA
GF-296	Hudiba 93	Collection	Late	Medium	ICARDA
GF-257	S 2008,034	Collection	Late	Medium	ICARDA
GF-12	ILB 3621	Collection	Late	Large	ICARDA
GF-292	line 1/46	Collection	Late	Medium	ICARDA
GF-332	Yahya	Collection	Late	Medium	ICARDA
GF-256	S 2008,033	Collection	Late	Medium	ICARDA
GF-21	Histal	FITO seed Co.	Intermediate	Large	Spain
GF-22	Luz de Otono	FITO seed Co.	Early	Large	Spain
GF-523	ILB1269× ILB 4720	Hybridization	Intermediate	Large	Iran
GF-519	ILB1269×New momomoth	Hybridization	Intermediate	Large	Iran
GF-520	ILB1269× Giant	Hybridization	Intermediate	Large	Iran
GF-525	ILB1269× 98 264-1	Hybridization	Intermediate	Large	Iran
GF-517	ILB1269× ILB 1270	Hybridization	Intermediate	Large	Iran
GF-95	Mahta	Introduction	Intermediate	Medium	Iran
GF-1	Feyz	Hybridization	Early	Large	Iran
GF-20	Barkat	Introduction	Intermediate	Large	Iran

جدول ۱. ویژگی‌های ژنوتیپ‌های باقلای مورد آزمایش

تابع دمایی دوتکه‌ای به‌صورت زیر استفاده شد (Torabi et al., 2013):

$$f(T) = \frac{(T - T_b)}{(T_o - T_b)} \quad \text{if } T_b < T \leq T_o \quad [2]$$

$$f(T) = \frac{(T_c - T)}{(T_c - T_o)} \quad \text{if } T_o < T < T_c \quad [3]$$

$$f(T) = 0 \quad \text{if } T \leq T_b \text{ or } T \geq T_c \quad [4]$$

در اینجا T دمای جوانه‌زنی، T_b دمای پایه، T_o دمای مطلوب و T_c دمای سقف است.

برای تخمین پارامترها، از روش حداقل مربعات و تحلیل رگرسیون غیرخطی (با R50 به‌عنوان متغیر وابسته و T به‌عنوان متغیر مستقل) با استفاده از نرم‌افزار سیستم تحلیل آماری SAS استفاده شد (SAS, 2011).

از برنامه Germin برای تخمین زمان لازم برای رسیدن به ۵۰ درصد از تعداد کل بذرها (T50) در هر تکرار استفاده شد. این تخمین با درون‌یابی از منحنی پیشرفت جوانه‌زنی در مقابل زمان انجام شد (Soltani et al., 2013). سرعت جوانه‌زنی (R50, h⁻¹) با استفاده از فرمول R50 = 1/T50 محاسبه شد. مدل جوانه‌زنی که تنها اثر دما را بر سرعت جوانه‌زنی در نظر می‌گیرد، با معادله زیر نشان داده می‌شود (Torabi et al., 2013):

$$R50 = f(T) / g_0 \quad [1]$$

در این معادله، R50 نشان‌دهنده سرعت جوانه‌زنی (در روز) برای ۵۰ درصد جوانه‌زنی است. تابع دما، f(T)، بین صفر تا ۱ متغیر است. نیاز ساعات بیولوژیکی برای دستیابی به ۵۰ درصد جوانه‌زنی با g₀ نشان داده می‌شود. g₀ حداقل تعداد ساعات لازم برای ۵۰ درصد جوانه‌زنی در دمای مطلوب را نشان می‌دهد و معکوس g₀ نشان‌دهنده حداکثر سرعت جوانه‌زنی (R_{max}) است.

تمام ژنوتیپ‌ها جمع زده می‌شود. این محاسبه امکان طبقه‌بندی ژنوتیپ‌های باقلا را به گروه‌های مختلف تحمل دما فراهم می‌کند. از طرف دیگر، شاخص CTRI سرما (-C) با جمع‌زنی نسبت حداقل مقدار دماهای کاردینال در بین تمام ژنوتیپ‌ها به مقدار یک ژنوتیپ خاص تعیین شد (Sousaraei et al., 2021):

$$H-CTRI = \left(\frac{GP T_{bS}}{GP T_{bMAX}} + \frac{GP T_{oS}}{GP T_{oMAX}} + \frac{GP T_{cS}}{GP T_{cMAX}} + \frac{R50 T_{bS}}{R50 T_{bMAX}} + \frac{R50 T_{oS}}{R50 T_{oMAX}} + \frac{R50 T_{cS}}{R50 T_{cMAX}} \right) \quad [5]$$

$$C-CTRI = \left(\frac{GP T_{bMIN}}{GP T_{bS}} + \frac{GP T_{oMIN}}{GP T_{oS}} + \frac{GP T_{cMIN}}{GP T_{cS}} + \frac{R50 T_{bMIN}}{R50 T_{bS}} + \frac{R50 T_{oMIN}}{R50 T_{oS}} + \frac{R50 T_{cMIN}}{R50 T_{cS}} \right) \quad [6]$$

جدول ۲. تخمین درصد جوانه‌زنی (GP)، دمای پایه (Tb, °C)، دمای مطلوب (To, °C) و دمای سقف (Tc, °C) برای ۲۰ ژنوتیپ باقلا با استفاده از تابع درجه دوم

Table 2. Estimates of germination percentage (GP), base temperature (Tb, °C), optimum temperature (To, °C), and ceiling temperature (Tc, °C) for 20 faba bean genotypes using the quadratic function

Code	GP	Tb	To	Tc
GF-180	96	1.9	17.9	37.5
GF-288	96	-2.7	17.8	38.2
GF-145	100	-1.8	17.5	36.9
GF-290	96	-1.4	17.3	35.9
GF-296	95	-1.5	17.1	35.7
GF-257	94	-1.5	17.1	35.7
GF-12	90	-1.1	18.0	36.5
GF-292	90	-1.4	17.0	35.5
GF-332	96	-2.9	17.8	38.4
GF-256	96	-1.4	18.2	37.7
GF-21	90	-0.8	16.5	33.7
GF-22	96	-1.9	16.5	34.9
GF-523	96	-1.1	17.9	36.9
GF-519	96	-0.2	18.6	37.5
GF-520	96	-0.2	18.6	37.3
GF-525	96	0.6	16.9	33.6
GF-517	96	-1.8	15.7	33.3
GF-95	96	-2.7	16.0	34.7
GF-1	96	-2.2	15.6	37.6
GF-20	96	-3.0	17.7	34.2

واکنش سرعت جوانه‌زنی به دما

تابع دوتکه‌ای به طور مؤثر رابطه بین سرعت جوانه‌زنی و دما را برای ژنوتیپ‌های مختلف توصیف کرد (شکل ۲). سرعت جوانه‌زنی در دماهای پایین‌تر از دمای مطلوب به طور مداوم

دسته‌بندی ژنوتیپ‌های باقلا بر اساس پاسخ جوانه‌زنی آنها به دما با استفاده از شاخص پاسخ تجمعی دما ($CTRI^1$) انجام شد. این شاخص به تعیین اینکه آیا یک ژنوتیپ به سرما یا گرما مقاوم است کمک می‌کند. برای محاسبه شاخص CTRI گرما (H-CTRI) برای هر ژنوتیپ، نسبت دماهای کاردینال برای درصد جوانه‌زنی (GP) و سرعت جوانه‌زنی (R50) یک ژنوتیپ خاص به حداکثر دمای کاردینال مشاهده شده در بین

در اینجا Tb، To و Tc دماهای کاردینال برای GP و R50 هستند. MAX و MIN به ترتیب نشان‌دهنده حداکثر و حداقل دماهای کاردینال مشاهده شده در بین تمام ارقام هستند، درحالی‌که S نشان‌دهنده دماهای کاردینال یک رقم خاص است.

نتایج و بحث

پاسخ درصد جوانه‌زنی به دما

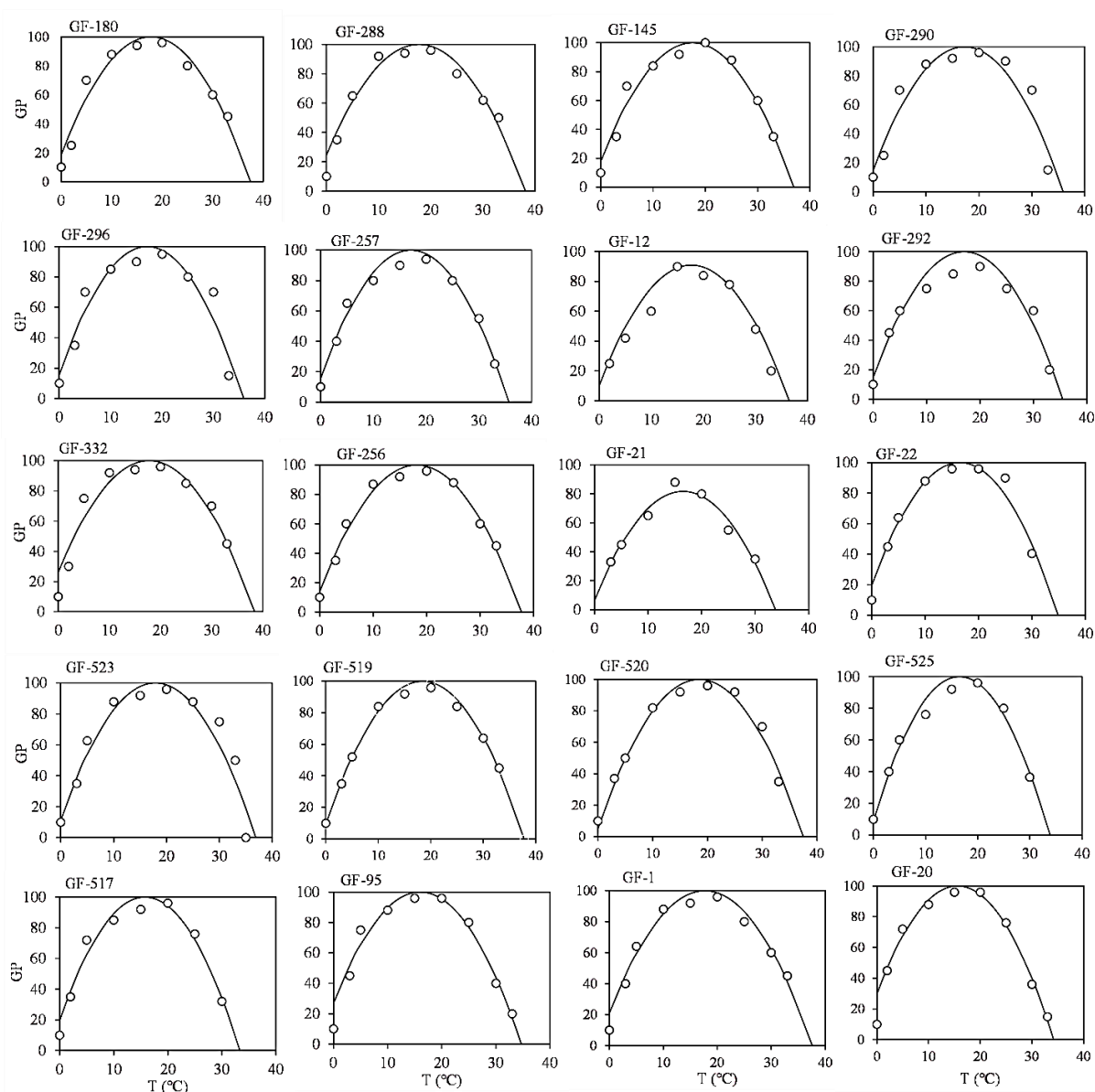
بر اساس یافته‌های ما، درصد جوانه‌زنی در بین ژنوتیپ‌های مختلف متفاوت بود و از ۹۰ تا ۱۰۰ درصد متغیر بود. بیشتر ژنوتیپ‌ها ۹۶ درصد جوانه‌زنی داشتند. ژنوتیپ GF-145 بالاترین درصد جوانه‌زنی (۱۰۰ درصد) را داشت، درحالی‌که ژنوتیپ‌های GF-21، GF-12 و GF-292 کمترین درصد جوانه‌زنی (۹۰ درصد) را نشان دادند (جدول ۲).

تغییرات درصد جوانه‌زنی (GP) در مقابل دما به طور دقیق توسط تابع درجه دوم توصیف شد (شکل ۱). درصد جوانه‌زنی در دماهای پایین‌تر و بالاتر از دمای مطلوب کاهش یافت. نتایج نشان داد که دماهای کاردینال برای درصد جوانه‌زنی در بین ارقام مختلف متفاوت بود (جدول ۲). دمای پایه از ۳- درجه سانتیگراد برای GF-20 تا ۱۷/۷ درجه سانتیگراد برای GF-20 متغیر بود. مقدار دمای مطلوب از ۱۵/۶ درجه سانتیگراد برای GF-1 تا ۱۸/۶ درجه سانتیگراد برای GF-519 و GF-520 متغیر بود. مقدار دمای سقف نیز از ۳۳/۲ درجه سانتیگراد برای GF-21 تا ۳۸/۴ درجه سانتیگراد برای GF-332 متفاوت بود.

1. cumulative temperature response index

افزایش یافت، درحالی که در دماهای بالاتر از دمای مطلوب برای تمام ژنوتیپ‌ها کاهش نشان داد. شکل ۲ این روند را نشان می‌دهد. علاوه بر این، جدول ۳ تخمین‌هایی از دماهای کاردینال و ساعات بیولوژیکی لازم برای جوانه‌زنی ژنوتیپ‌ها

را ارائه می‌دهد. بر اساس تحلیل‌ها، دمای پایه، دمای مطلوب و دمای سقف برای این ژنوتیپ‌ها به ترتیب $1/2$ تا $5/2$ درجه سانتیگراد، $23/0$ تا $26/1$ درجه سانتیگراد و $31/8$ تا $36/7$ درجه سانتیگراد تخمین زده شد (جدول ۳).



شکل ۱. تابع مورد استفاده برای توصیف واکنش درصد جوانه‌زنی در برابر دما برای ژنوتیپ‌های مختلف باقلا

Fig. 1. Function used to describe the response of germination percentage to temperature for different faba bean genotypes

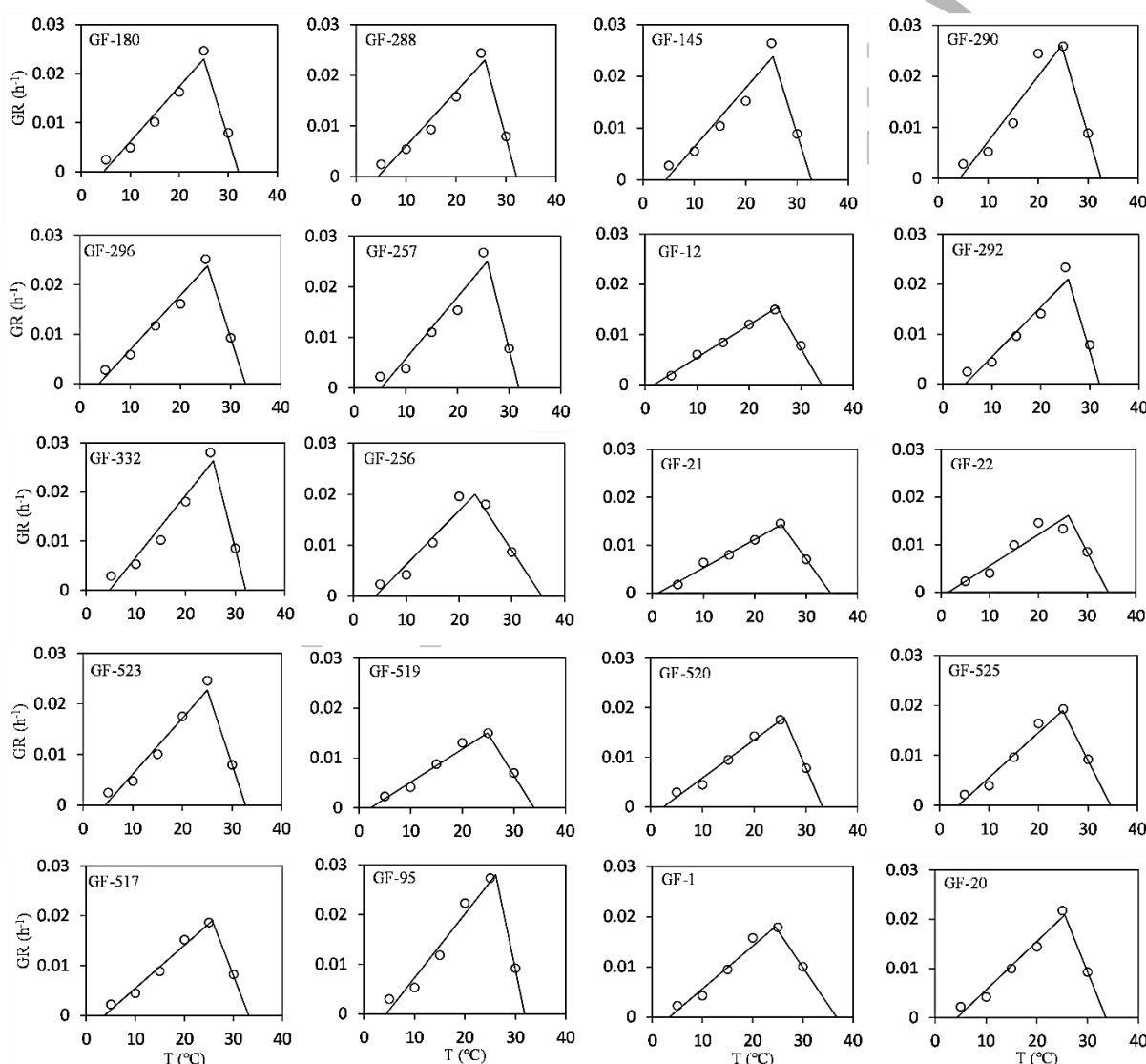
دمای پایه برای ژنوتیپ‌های GF-12 و GF-21 به ترتیب $1/2$ و $1/7$ درجه سانتیگراد تخمین زده شد که کمترین مقدار در بین ژنوتیپ‌ها بود. از طرف دیگر، ژنوتیپ GF-257 بالاترین دمای پایه را داشت. باین حال، بیشتر ژنوتیپ‌ها دمای پایه‌ای در محدوده تقریبی $4/0$ تا $4/7$ درجه سانتیگراد نشان دادند. اگرچه تفاوت‌هایی در دمای پایه ژنوتیپ‌های مختلف

مشاهده شد، اما با در نظر گرفتن خطای استاندارد (SE) هر دمای پایه، نتایج نشان داد که تفاوت آماری معنی‌داری در دمای پایه بین ژنوتیپ‌ها وجود ندارد. دمای مطلوب تخمین زده شده برای ژنوتیپ‌ها در محدوده $23/0$ تا $26/1$ درجه سانتیگراد بود (جدول ۳). کمترین دمای مطلوب برای ژنوتیپ GF-256 مشاهده شد، درحالی که

شده برای ژنوتیپ‌های مختلف در محدوده ۳۱/۹ تا ۳۶/۷ درجه سانتیگراد بود (جدول ۳). ژنوتیپ GF-95 کمترین دمای سقف را داشت، درحالی‌که ژنوتیپ GF-1 بالاترین مقدار را نشان داد. باین‌حال، بیشتر ژنوتیپ‌ها دمای سقفی در محدوده ۳۲ تا ۳۵ درجه سانتیگراد داشتند. باوجوداین تفاوت‌ها، با درنظرگرفتن خطای استاندارد (SE) هر تخمین دمای سقف، نتایج نشان داد که تفاوت آماری معنی‌داری در دمای سقف بین ژنوتیپ‌ها وجود ندارد.

بالاترین دمای مطلوب برای ژنوتیپ‌های GF-22 و GF-95 تخمین زده شد. باین‌حال، بیشتر ژنوتیپ‌ها دمای مطلوبی در محدوده ۲۵/۰ تا ۲۶/۰ درجه سانتیگراد نشان دادند. تغییراتی در دمای مطلوب در بین ژنوتیپ‌های مختلف مشاهده شد، اما با درنظرگرفتن خطای استاندارد (SE) هر دمای مطلوب، نتایج نشان داد که تفاوت آماری معنی‌داری در دمای مطلوب بین ژنوتیپ‌ها وجود ندارد.

بر اساس تحلیل‌های ما، تنوع در دمای سقف بین ژنوتیپ‌های مختلف مشاهده شد. دمای سقف تخمین زده



شکل ۲. تابع مورد استفاده برای توصیف واکنش سرعت جوانه‌زنی به دما برای ژنوتیپ‌های مختلف باقلا

Fig. 2. Function used to describe the response of germination rate to temperature for different faba bean genotypes

به طور خاص، مقادیر شاخص CTRI گرما (H-CTRI) و شاخص CTRI سرما (C-CTRI) برای هر ژنوتیپ تخمین زده شد. این مقادیر بینش‌هایی در مورد چگونگی واکنش

شاخص پاسخ تجمعی دما (CTRI)

ژنوتیپ‌ها با استفاده از شاخص‌های پاسخ تجمعی دما (CTRI)، برای درک واکنش آن‌ها به دما، طبقه‌بندی شدند.

علاوه بر این، ما رابطه مثبت معنی‌داری بین H-CTRI و دمای پایه برای سرعت جوانه‌زنی ۵۰ درصد تعداد کل بذرها (TbR50) مشاهده کردیم. این بدان معنی است که ژنوتیپ‌هایی با دمای پایه بالاتر، مقادیر H-CTRI بالاتری داشتند که نشان‌دهنده تحمل بیشتر به دماهای بالا بود ($P < 0.05$; شکل ۴). برعکس، رابطه منفی معنی‌داری بین C-CTRI و دمای پایه وجود داشت. ژنوتیپ‌هایی با دمای پایه پایین‌تر، تحمل بیشتری به دماهای پایین نشان دادند ($P < 0.05$; شکل ۳). این یافته‌ها اهمیت درک شاخص‌های پاسخ تجمعی دما (CTRI) را در طبقه‌بندی ژنوتیپ‌ها و ارزیابی تحمل آن‌ها به شرایط دمایی مختلف برجسته می‌کند. با شناسایی ژنوتیپ‌هایی که پاسخ‌های دمایی خاصی دارند، می‌توانیم تصمیمات آگاهانه‌ای در مورد کشت و مدیریت آن‌ها در محیط‌های مختلف اتخاذ کرد.

بحث

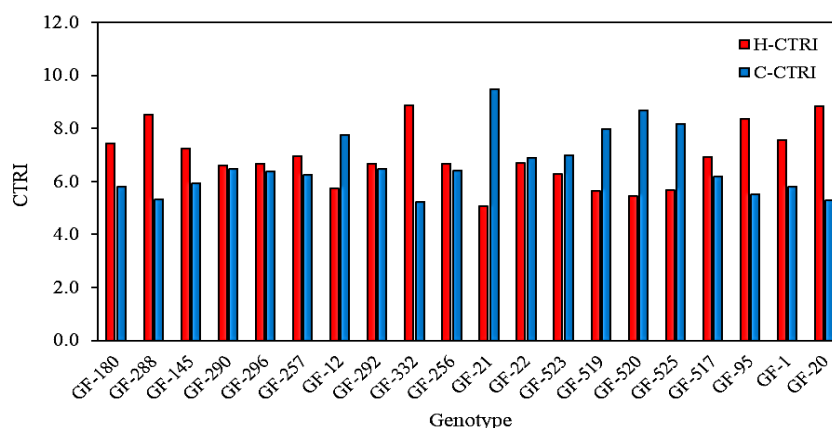
بر اساس یافته‌های ما، تمام ژنوتیپ‌ها روندی یکسان در درصد جوانه‌زنی نشان می‌دهند. درصد جوانه‌زنی در محدوده دمایی متوسط، نسبتاً پایدار باقی می‌ماند. با این حال، هنگامی که دما به زیر ۱۰ درجه سانتیگراد می‌رسد یا از حدود ۲۵ درجه سانتیگراد فراتر می‌رود، کاهش قابل‌توجهی در درصد جوانه‌زنی مشاهده می‌شود. یافته‌هایی در مورد محصولات مختلف نیز گزارش شده‌اند که حداکثر درصد جوانه‌زنی در محدوده دمایی ۱۰ تا ۳۰ درجه سانتیگراد رخ می‌دهد (Hardegree, 2006). این موضوع با نتایج ما هم‌خوانی دارد و از ثبات این روند در بین ژنوتیپ‌های مختلف حمایت می‌کند. درصد جوانه‌زنی محصولات مناطق معتدل تحت تأثیر دما قرار می‌گیرد. تحقیقات نشان می‌دهند که دمای مطلوب برای جوانه‌زنی در بین گونه‌های مختلف متفاوت است و سرعت جوانه‌زنی در این محدوده مطلوب سریع‌تر است. به عنوان مثال، اگر دما از این محدوده مطلوب منحرف شود، درصد جوانه‌زنی ممکن است کاهش یابد. علاوه بر این، مشاهده شده است که دمای گرم در طول جوانه‌زنی می‌تواند درصد جوانه‌زنی را به میزان قابل‌توجهی افزایش دهد (Notarnicola et al., 2023). با این حال، مهم است که توجه داشته باشیم دمای بیش از حد بالا یا پایین برای جوانه‌زنی بذر مفید نیست و هر گونه گیاهی دمای مطلوب خاصی برای جوانه‌زنی دارد که در آن حداکثر تعداد بذرها جوانه می‌زند؛

ژنوتیپ‌های مختلف به تغییرات دما ارائه می‌دهند. در مورد مقادیر H-CTRI، تفاوت‌هایی بین ژنوتیپ‌ها مشاهده شد. ژنوتیپ GF-21 بالاترین مقدار H-CTRI (۴/۵) را داشت که نشان‌دهنده تحمل بیشتر به گرما بود. از طرف دیگر، ژنوتیپ‌های GF-20 و GF-95 کمترین مقادیر H-CTRI (۲/۸ و ۲/۹) را داشتند که نشان‌دهنده تحمل کمتر به گرما بود (شکل ۳). به طور مشابه، مقادیر C-CTRI نیز در بین ژنوتیپ‌ها متفاوت بود. محدوده مقادیر C-CTRI بین ۳/۰ برای GF-21 تا ۸/۰ برای GF-12 بود. این نشان می‌دهد که ژنوتیپ‌های مختلف سطوح متفاوتی از تحمل به دماهای پایین را دارند. جالب اینجاست که نتایج ما نشان داد ژنوتیپ‌هایی که مقادیر H-CTRI بالاتری داشتند، تمایل به مقادیر C-CTRI پایین‌تری داشتند (شکل ۳). این نشان می‌دهد که ژنوتیپ‌هایی که تحمل بیشتری به گرما دارند، ممکن است تحمل کمتری به سرما داشته باشند.

جدول ۳. تخمین‌های دمای پایه (T_b , °C)، دمای مطلوب (T_o , °C) و دمای سقف (T_c , °C) برای سرعت جوانه‌زنی، و نیاز ساعت بیولوژیک برای جوانه‌زنی (ساعت go) در ۲۰ ژنوتیپ باقلا با استفاده از تابع درجه دوم

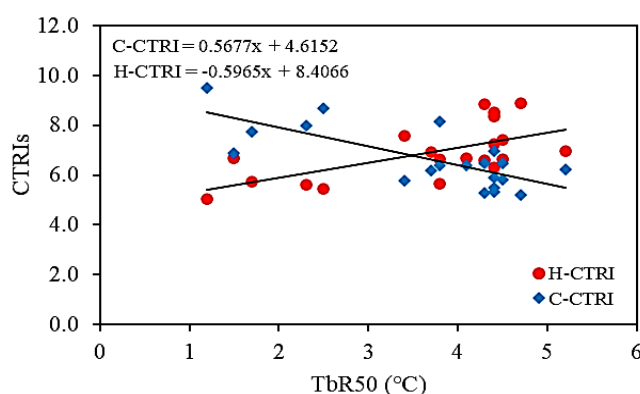
Table 3. Estimates of base temperature (T_b , °C), optimum temperature (T_o , °C) and ceiling temperature (T_c , °C) for germination rate, and biological hours' requirement (go, hours) for germination in 20 faba bean genotypes described by the segmented function

Code	Tb	Tp	Tc	Go
GF-180	4.5 ± 1.40	25.9 ± 1.40	32.1 ± 1.06	42
GF-288	4.4 ± 1.60	25.8 ± 1.63	32.1 ± 1.22	43
GF-145	4.4 ± 1.94	25.3 ± 1.92	32.8 ± 1.80	42
GF-290	4.3 ± 2.00	24.7 ± 1.00	32.6 ± 1.60	38
GF-296	3.8 ± 1.37	25.4 ± 1.30	33.0 ± 1.25	42
GF-257	5.2 ± 1.80	25.8 ± 2.00	31.9 ± 1.35	40
GF-12	1.7 ± 0.68	25.4 ± 0.53	34.0 ± 0.67	65
GF-292	4.5 ± 1.70	25.6 ± 1.70	32.4 ± 1.40	38
GF-332	4.7 ± 1.74	25.6 ± 1.80	32.1 ± 1.32	38
GF-256	4.1 ± 1.80	23.0 ± 1.50	35.7 ± 3.10	50
GF-21	1.2 ± 1.06	25.2 ± 0.77	34.6 ± 1.03	70
GF-22	1.4 ± 3.16	26.1 ± 2.73	34.3 ± 3.81	62
GF-523	4.4 ± 1.36	25.0 ± 0.64	32.7 ± 1.10	44
GF-519	2.3 ± 1.38	24.9 ± 1.10	33.9 ± 3.30	66
GF-520	2.5 ± 1.20	25.8 ± 1.10	33.2 ± 1.10	55
GF-525	3.8 ± 1.30	24.9 ± 0.70	34.6 ± 1.60	52
GF-517	3.7 ± 1.10	25.7 ± 1.10	33.1 ± 1.10	51
GF-95	4.4 ± 1.40	26.1 ± 1.50	31.8 ± 0.90	35
GF-1	3.4 ± 1.30	25.5 ± 0.80	36.7 ± 2.30	55
GF-20	4.3 ± 1.30	25.5 ± 1.30	33.6 ± 1.51	48



شکل ۳. طبقه‌بندی ۲۰ ژنوتیپ باقلا بر اساس شاخص‌های پاسخ تجمعی دما (CTRI). ستون‌های قرمز و آبی به ترتیب مقادیر CTRI برای H (گرما) و C (سرما) را نشان می‌دهند. ژنوتیپ‌های سازگار با شرایط گرما و سرما به ترتیب H-CTRI و C-CTRI بالاتری داشتند.

Fig. 3. Classification of 20 faba bean genotypes based on cumulative temperature response indices (CTRI). The red and blue columns indicate values of H (Heat) and C (Cold)-CTRI, respectively. Adapted genotypes to heat and cold conditions had a higher H-CTRI and C-CTRI, respectively.



شکل ۴. رابطه بین شاخص‌های پاسخ تجمعی دما به گرما و سرما (H-CTRI و C-CTRI) با دمای پایه برای سرعت جوانه‌زنی ۵۰ درصد از کل تعداد بذر (TbR50)

Fig. 4. The relationship between the heat and cold cumulative temperature response indices (H-CTRI and C-CTRI) with the base temperature for the germination rate of 50% of the total seeds number (TbR50)

درجه سانتیگراد برای سبزشدن باقلا هم‌خوانی دارد (Ajam Norouzi and Vazin, 2011). قادری و همکاران (Ghaderi et al., 2008) گزارش کردند که دمای پایه جوانه‌زنی سه گیاه دارویی بین ۵/۰ تا ۵/۹ درجه سانتیگراد است. استرک و همکاران (Streck et al., 2005) نیز از دمای پایه ۵ درجه سانتیگراد برای تخمین سرعت ظهور برگ در گلرنگ استفاده کردند. آنها این دما را انتخاب کردند، زیرا هیچ مقدار گزارش‌شده‌ای برای گلرنگ وجود نداشت و تجربه قبلی آنها نشان می‌داد که گلرنگ در بهار رشد خوبی دارد، اما در زمستان و تابستان رشد مناسبی ندارد. شایان‌ذکر است که

بنابراین، روند درصد جوانه‌زنی در دماهای مختلف برای محصولات مناطق معتدل به‌طور کلی نشان می‌دهد که با نزدیک‌شدن دما به محدوده مطلوب، درصد جوانه‌زنی افزایش می‌یابد و سپس در دماهای بالاتر یا پایین‌تر کاهش می‌یابد (Hardegree, 2006).

دمای پایه ۱/۲ تا ۵/۲ درجه سانتیگراد که در این مطالعه یافت شد، در محدوده گزارش‌شده برای مراحل رشد بیشتر محصولات مناطق معتدل قرار دارد (Torabi, et al., 2013; Torabi, et al., 2015; Torabi et al., 2016; Trudgill, et al., 2000; Kamkar et al., 2012). به‌عنوان مثال، دمای پایه تخمین زده شده در این مطالعه با دمای پایه ۱/۰ تا ۱/۶

محصولات زمستانه معمولاً دمای پایه‌ای نزدیک به صفر درجه سانتیگراد دارند، درحالی‌که محصولات تابستانه دمای پایه‌ای حدود ۱۰ درجه سانتیگراد دارند (Streck et al., 2003; Streck et al., 2005). دمای پایه نقش حیاتی در جوانه‌زنی و رشد محصولات دارد. این دما به طور قابل‌توجهی بر رشد و عملکرد کلی محصولات تأثیر می‌گذارد. درک مقادیر دمای پایه برای محصولات مختلف برای پیش‌بینی سرعت جوانه‌زنی و پاسخ رشد و عملکرد محصولات ضروری است. این درک باتوجه‌به تغییرات الگوهای آب‌وهوایی و تحولات در شیوه‌های کشاورزی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. با دانستن مقادیر دمای پایه برای محصولات خاص، کشاورزان و محققان می‌توانند تصمیمات آگاهانه‌ای در مورد زمان کاشت، راهبردهای مدیریت محصول و بهینه‌سازی تولید محصول در شرایط محیطی مختلف اتخاذ کنند.

بر اساس اطلاعات ارائه‌شده در این مطالعه، دمای مطلوب ۲۳/۰ تا ۲۶/۱ درجه سانتیگراد در این مطالعه با نیازهای دمایی محصولات مناطق معتدل هم‌خوانی دارد. دمای مطلوب برای جوانه‌زنی محصولات بسته به گونه متفاوت است. به‌طورکلی، محصولات فصل خنک بهترین جوانه‌زنی را در دمای ۲۳ تا ۳۰ درجه سانتیگراد دارند (Malek et al., 2020; Karimzadeh Soureshjani et al., 2019; Hardegree, 2006). یک مطالعه گزارش کرد که دمای مطلوب برای ارقام مختلف گیاه باقلا بین ۲۵/۰ تا ۲۸/۸ درجه سانتیگراد است (Ajam Norouzi and Vazin, 2011). درک دمای مطلوب برای جوانه‌زنی برای دستیابی به بالاترین سرعت جوانه‌زنی و اطمینان از استقرار موفق محصولات ضروری است. با درک دمای مطلوب برای جوانه‌زنی، کشاورزان می‌توانند شرایط ایده‌آل را برای تسریع و یکنواخت‌سازی جوانه‌زنی فراهم کنند. این دانش به آن‌ها اجازه می‌دهد تا زمان کاشت را تنظیم کرده و اقدامات کنترل دمای مناسب، مانند استفاده از سیستم‌های گرمایشی یا سرمایشی، را برای اطمینان از سرعت جوانه‌زنی مطلوب انجام دهند.

بر اساس اطلاعات ارائه‌شده، می‌توان استنباط کرد که ژنوتیپ‌های باقلای مورد استفاده در این مطالعه دارای دمای سقف ۳۱/۷ تا ۳۶/۷ درجه سانتیگراد هستند که با محصولات سازگار با مناطق معتدل هم‌خوانی دارد. دمای سقف تخمین زده شده در این مطالعه با دمای سقف ۳۵ درجه سانتیگراد برای سبزشدن باقلا هم‌خوانی دارد (Ajam Norouzi and Vazin, 2011). دمای سقف جوانه‌زنی برای محصولات

مختلف بسته به محصول خاص و سازگاری آن با محدوده‌های دمایی متفاوت است (Hardegree, 2006). دمای سقف تخمین زده شده در این مطالعه با دمای سقف ۳۳/۹ تا ۳۴/۴ درجه سانتیگراد برای جوانه‌زنی کلزا هم‌خوانی دارد (Derakhshan et al., 2018). علاوه بر این، پارمون و همکاران (Parmoon et al., 2005) گزارش کردند که گیاه خارمیم دارای دمای سقف ۳۴/۳ درجه سانتیگراد برای جوانه‌زنی است.

علاوه بر این، دانش نیازهای دمایی در طول چرخه رشد به بهینه‌سازی عملکرد محصول کمک می‌کند و منجر به بهبود عملکرد و کیفیت می‌شود. بر اساس این یافته‌ها، می‌توان استنباط کرد که ارقام باقلای مورد استفاده در این مطالعه دارای نیازهای دمایی هستند که به آن‌ها اجازه می‌دهد در مناطق معتدل به طور رضایت‌بخشی جوانه بزنند و مستقر شوند. این اطلاعات برای کشاورزان و محققان ارزشمند است، زیرا به آن‌ها کمک می‌کند تا ارقام مناسب باقلا را برای مناطق و آب‌وهوایی مختلف انتخاب کنند. با در نظر گرفتن نیازهای دمایی، کشاورزان می‌توانند سرعت جوانه‌زنی را بهینه کرده و استقرار موفق باقلا را در مناطق معتدل تضمین کنند.

در مطالعه‌ای روی ارقام فلفل زینتی، مقادیر CTRI برای طبقه‌بندی ارقام از نظر تحمل به گرما و سرما، از حساس تا متحمل، استفاده شد (Gajanayake et al., 2011). رابطه بین تحمل به گرما و CTRI در محصولات مختلف مورد مطالعه قرار گرفته و روابط معنی‌داری بین دمای هوای سالانه بلندمدت و CTRI‌ها یافت شده است که نشان‌دهنده سازگاری با شرایط محیطی است (Guan et al., 2020; Seepaul et al., 2011; Sousaraei et al., 2021). بنابراین، CTRI ابزاری ارزشمند برای غربالگری و شناسایی ارقام مناسب برای شرایط دمایی خاص است که باتوجه‌به تأثیر بالقوه تغییرات آب‌وهوایی بر تولید محصول اهمیت دارد (Gajanayake et al., 2011). رابطه بین تحمل به گرما و سرما بر اساس CTRI در محصولات مختلفی مانند سویچ‌گراس، کلزا و گوجه‌فرنگی مورد مطالعه قرار گرفته است (Seepaul et al., 2011; Farzaneh et al., 2014; Sousaraei et al., 2021). بنابراین، CTRI نقش مهمی در ارزیابی تحمل دمایی محصولات دارد که برای برنامه‌های اصلاحی و شیوه‌های کشاورزی ضروری است.

برخلاف موجودات متحرک، گیاهان بدون توانایی جابه‌جایی یا تغییر محیط خود، سازگاری حاصل می‌کنند.

بالین حال، از طریق فرایند تکامل، آن‌ها سازوکارهای مختلفی برای بقا و حفظ عملکرد بهینه توسعه داده‌اند (Nievola et al., 2017). این سازوکارها شامل راهبردهای مقاومت، تحمل و اجتناب هستند که تغییرات مورفولوژیکی، تنظیمات فیزیولوژیکی، تغییرات بیوشیمیایی و تغییرات در بیان ژن را تحریک می‌کنند که ممکن است به نسل‌های آینده منتقل شوند (Kazemi Shahandashti et al., 2013).

گیاهان توانایی قابل توجهی برای توسعه سازوکارهای خاص در پاسخ به انواع مختلف تنش، چه ناشی از موجودات زنده و چه عوامل غیرزنده، دارند. این سازوکارها در نهایت منجر به ایجاد صفات جدیدی می‌شوند که می‌توانند توانایی گیاه را برای مقابله با تنش افزایش دهند. یکی از عوامل کلیدی که این سازگاری‌ها را هدایت می‌کند، تغییرات در بیان ژن است. هنگامی که گیاهان در معرض تنش قرار می‌گیرند، ژن‌های آن‌ها به طور فردی یا در ترکیب با ژن‌های دیگر تغییر می‌کنند. این تغییرات در بیان ژن می‌توانند انعطاف‌پذیری کوتاه‌مدتی در نحوه عملکرد ژن‌ها تحت شرایط تنش ایجاد کنند (Nazari et al., 2012; Xu et al., 2018).

بنابراین، تولید ژنوتیپ‌های جدید توسط اصلاح‌گران برای توسعه گیاهان با تحمل بیشتر به شرایط تنش دمایی بالا یا پایین ضروری است. با درک سازوکارهای سازگاری گیاهان و نقش بیان ژن، اصلاح‌گران می‌توانند گیاهان را با صفات مطلوب تولید کنند. این فرایند به طور قابل توجهی به مقاومت و بقای گیاهان در محیط‌های چالش‌برانگیز کمک می‌کند. اصلاح‌گران از طریق تخصص خود، می‌توانند انواع گیاهانی را ایجاد کنند که تحمل بهتری به دمای شدید نشان می‌دهند و

به آن‌ها اجازه می‌دهند حتی در شرایط تنش زنده بمانند. با استفاده از قدرت تنوع ژنتیکی و اصلاح انتخابی، اصلاح‌گران نقش حیاتی در تضمین موفقیت و پایداری گیاهان در محیط‌های چالش‌برانگیز ایفا می‌کنند.

نتیجه‌گیری نهایی

این پژوهش دانش ما را درباره چگونگی واکنش ژنوتیپ‌های باقلا به تغییرات دما گسترش می‌دهد، موضوعی که برای عملکرد محصول در مواجهه با تغییرات آب‌وهوایی حیاتی است. مطالعه نشان داد که ژنوتیپ‌های مختلف باقلا نیازهای دمایی متفاوتی برای جوانه‌زنی بهینه دارند که نشان‌دهنده تنوع ژنتیکی قابل توجهی است و می‌توان از آن برای بهبود تولید استفاده کرد. با تمرکز بر دماهای کاردینال (دمای پایه، مطلوب و سقف) و مقادیر CTRI، اصلاح‌گران و کشاورزان ابزارهای جدیدی برای انتخاب ژنوتیپ‌های سازگار با شرایط آب‌وهوایی خاص خود در اختیار دارند تا استقرار و عملکرد محصول را بهینه کنند. ادامه تحقیقات درباره مبانی فیزیولوژیکی و مولکولی این واکنش‌ها، توانایی انتخاب و اصلاح ارقام باقلا با ویژگی‌های مطلوب مانند تحمل دمایی را افزایش خواهد داد. به عنوان بخشی از یک راهبرد گسترده‌تر برای کشاورزی پایدار، یافته‌های این مطالعه بر اهمیت برنامه‌های اصلاحی و روش‌های کشت که واکنش‌های دمایی را در نظر می‌گیرند، تأکید می‌کند. این امر در نهایت به بهبود امنیت غذایی و تاب‌آوری در شرایط آب‌وهوایی متغیر کمک خواهد کرد.

منابع

- Ajam Norouzi, H., Vazin, F., 2011. Modelling of the faba bean (*Vicia faba* L.) sprouting reaction to temperature in farm condition. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 39, 179–85.
<https://doi.org/10.15835/nbha3926198>
- Alves, S., Khazaei, H., Link, W., Torres, A.M., O'Sullivan, D.M., Andersen, S.U., 2023. Genetic analysis of global faba bean diversity, agronomic traits and selection signatures. *Theoretical and Applied Genetics*. 136, 114.
<https://doi.org/10.1007/s00122-023-04360-8>
- Choi, Y.M., Yoon, H., Shin, M.J., Lee, S., Yi, J. Y., Jeon, Y.A., Wang, X., Kebede, T.D., 2023. Nutrient levels, bioactive metabolite contents, and antioxidant capacities of faba beans as affected by dehulling. *Foods*. 12, 4063.
<https://doi.org/10.3390/foods12224063>
- Damalas, C.A., Koutroubas, S.D., Fotiadis, S., 2019. Hydro-priming effects on seed germination and field performance of faba bean in spring sowing. *Agriculture (Switzerland)*. 9, 201.
<https://doi.org/10.3390/agriculture9090201>

- Derakhshan, A., Bakhshandeh, A., Siadat, S.A., Moradi-Telavat, M.R., Andarzian, S.B., 2018. Quantifying the germination response of spring canola (*Brassica napus* L.) to temperature. *Industrial Crops and Products*. 122, 195–201. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.05.075>
- FAO (Food and Agriculture Organization), 2019. FAOSTAT Statistical Database of the United Nations Food and Agriculture Organization (FAO) statistical division. Rome.
- Farzaneh, S., Soltani, E., Zeinali, E., Ghaderi-Far, F., 2014. Screening oilseed rape germination for thermotolerance using a laboratory-based method. *Seed Technology*. 36, 15–27. <https://doi.org/10.15258/SST.2014.42.2.14>
- Gajanayake, B., Trader, B.W., Reddy, K.R., Harkess, R.L., 2011. Screening ornamental pepper cultivars for temperature tolerance using pollen and physiological parameters. *HortScience*. 46, 878–84. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.46.6.878>
- Ghaderi, F.A., Soltani, A., Sadeghipour, H.R., 2008. Cardinal temperatures of germination in medicinal pumpkin (*Cucurbita pepo* convar. *Pepo* Var. *Styriaca*), borago (*Borago officinalis* L.) and black cumin (*Nigella sativa* L.). *Asian Journal of Plant Sciences*. 7, 574–78. <https://doi.org/10.3923/ajps.2008.574.578>
- Guan, X., Ramaswamy, H., Zhang, B., Lin, B., Hou, L., Wang, S., 2020. Germination rate of watermelon seeds as affected by temperature, moisture content and heating rate. *ASABE 2020 Annual International Meeting*. 272, 109528. <https://doi.org/10.13031/aim.202000523>
- Hardegree, S.P., 2006. Predicting germination response to temperature. I. Cardinal-temperature models and subpopulation-specific regression. *Annals of Botany*. 97, 1115–25. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl071>
- Kamkar, B., Jami Al-Alahmadi, M., Mahdavi-Damghani, A., Villalobos, F.J., 2012. Quantification of the cardinal temperatures and thermal time requirement of opium poppy (*Papaver Somniferum* L.) seeds to germinate using non-linear regression models. *Industrial Crops and Products*. 35, 192–98. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.06.033>
- Karimzadeh Soureshjani, H., Bahador, M., Tadayon, M. R., Ghorbani Dehkordi, A., 2019. Modelling seed germination and seedling emergence of flax and sesame as affected by temperature, soil bulk density, and sowing depth. *Industrial Crops and Products*. 141, 111770. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111770>
- Karkanis, A., Ntatsi, G., Lepse, L., Fernández, J. A., Vågen, I. M., Rewald, B., Alsiņa, I., Kronberga, A., Balliu, A., Olle, M., Bodner, G., Dubova, L., Rosa, E., Savvas, D., 2018. Faba bean cultivation – revealing novel managing practices for more sustainable and competitive European cropping systems. *Frontiers in Plant Science*. 9, 1115. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01115>
- Kazemi Shahandashti, S.S., Maali Amiri, R., Zeinali, H., Ramezani, S.S., 2013. Change in membrane fatty acid compositions and cold-induced responses in chickpea. *Molecular Biology Reports*. 40, 893–903. <https://doi.org/10.1007/s11033-012-2130-x>
- Malek, M., Hamidi, S., Ghaderi-Far, F., Gorzin, M., Pahlavani, M.H., Esmaeilzadeh Moghaddam, M., 2020. Quantification of temperature effects on germination and induction of secondary dormancy in barley cultivars. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 13, 995–1007. [In Persian with English summary]. <https://doi.org/10.22077/escs.2020.2218.1561>
- Masin, R., Onofri, A., Gasparini, V., Zanin, G., 2017. Can alternating temperatures be used to estimate base temperature for seed germination? *Weed Research*. 57, 390–398. <https://doi.org/10.1111/wre.12270>
- Nazari, M., Amiri, R.M., Mehraban, F.H., Khaneghah, H. Z., 2012. Change in antioxidant responses against oxidative damage in black chickpea following cold acclimation. *Russian Journal of Plant Physiology*. 59, 183–89. <https://doi.org/10.1134/S102144371201013X>
- Nievol, C. C., Carvalho, C. P., Carvalho, V., Rodrigues, E., 2017. Rapid responses of plants to temperature changes. *Temperature*. 4(4), 371–405. <https://doi.org/10.1080/23328940.2017.1377812>
- Notarnicola, R.F., Nicotra, A.B., Kruuk, L.E.B., Arnold, P.A., 2023. Effects of warming temperatures on germination responses and trade-offs between seed traits in an Alpine plant. *Journal of Ecology*. 111, 62–76. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.14014>
- Parmoon, G., Moosavi, S. A., Akbari, H., Ebadi, A., 2015. Quantifying cardinal temperatures

- and thermal time required for germination of *Silybum marianum* seed. *Crop Journal*. 3, 145–51. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2014.11.003>
- Rodriguez, S., Kruk, B.C., Satorre, E.H., 2020. Modelling *Chloris virgata* germination and emergence under different temperature and light quality conditions. *Weed Research*. 60, 287–296. <https://doi.org/10.1111/wre.12427>
- SAS, 2011. STAT 9.3 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Seepaul, R., Macoon, B., Reddy, K. R., Baldwin, B., 2011. Switchgrass (*Panicum virgatum* L.) intraspecific variation and thermotolerance classification using in vitro seed germination assay. *American Journal of Plant Sciences*. 2, 134–47. <https://doi.org/10.4236/ajps.2011.22015>
- Sheikh, F., Feyzbakhsh, M. T., 2019. Fababean, (*Vicia faba* L.) Planting, Cropping, Harvesting. Nashre, Amoozesh, Keshavarzi. Agricultural Research, Education and Extension Organization, Iran. 94 pp. [In Persian].
- Sheikh, F., Sharifi, P., Asteraki, H., Miri, K., Sekhavat, R., 2021. Evaluation stability of seed yield of faba bean (*Vicia faba* L.) genotypes by parametric and non-parametric methods. *Journal of Crop Production*. 14, 125-144. [In Persian with English summary]. <https://doi.org/10.22069/ejcp.2022.18908.2411>
- Soltani, E., Soltani, A., Oveisi, M., 2013. Modeling seed aging effect on wheat seedling emergence in drought stress: Optimizing Germin program to predict emergence pattern. *Journal of Crops Improvement*. 15, 147-160. [In Persian with English summary]. <https://doi.org/10.22059/jci.2013.36106>
- Sousaraei, N., Torabi, B., Mashaieki, K., Soltani, E., Mousavizadeh, S. J., 2021. Variation of seed germination response to temperature in tomato landraces: An adaptation strategy to environmental conditions. *Scientia Horticulturae*. 281, 109987. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109987>
- Streck, N.A., Bellé, R.A., Rocha, E.K., da Schuh, M., 2005. Estimating leaf appearance rate and phyllochron in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Ciência Rural*. 35, 1448–50. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782005000600036>
- Streck, N.A., Weiss, A., Xue, Q.K., Baenziger, P.S., 2003. Incorporating a chronology response into the prediction of leaf appearance rate in winter wheat. *Annals of Botany*. 92, 181–90. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg121>
- Torabi, B., Adibniya, M., Rahimi, A., 2015. Seedling emergence response to temperature in safflower: measurements and modeling. *International Journal of Plant Production*. 9, 393–412. <https://doi.org/10.22069/ijpp.2015.2223>
- Torabi, B., Archontoulis, S.V., Hoogenboom, G., 2020. A New function for prediction of biological processes response to temperature. *International Journal of Plant Production*. 14, 9–22. <https://doi.org/10.1007/s42106-019-00063-7>
- Torabi, B., Attarzadeh, M., Soltani, A., 2013. Germination response to temperature in different safflower (*Carthamus tinctorius*) cultivars. *Seed Technology*. 35, 47–59.
- Torabi, B., Soltani, E., Archontoulis, S. V., Rabii, A., 2016. Temperature and water potential effects on *Carthamus tinctorius* L. seed germination: measurements and modeling using hydrothermal and multiplicative approaches. *Brazilian Journal of Botany*. 39, 427–36. <https://doi.org/10.1007/s40415-015-0243-x>
- Trudgill, D. L., Squire, G. R., Thompson, K., 2000. A thermal time basis for comparing the germination requirements of some British herbaceous plants. *New Phytologist*. 145, 107–14. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00554.x>
- Xu, F., Kuo, T., Rosli, Y., Liu, M.S., Wu, L., Chen, L.F.O., Fletcher, J.C., Sung, Z.R., Pu, L., 2018. Trithorax group proteins act together with a polycomb group protein to maintain chromatin integrity for epigenetic silencing during seed germination in *Arabidopsis*. *Molecular Plant*. 11, 659–77. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2018.01.010>
- Zaferanieh, M., Mahdavi, B., Torabi, B., 2020. Effect of temperature and water potential on *Alyssum homolocarpum* seed germination: Quantification of the cardinal temperatures and using hydro thermal time. *South African Journal of Botany*. 131, 259–266. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.02.006>