



## Seed Germination Modeling of Guar (*Cyamopsis tetragonoloba*), Affected by Temperature and Water Potential: Hydrothermal Time Model

Mohsen Zafarani<sup>1</sup>✉ | Arman Azari<sup>2</sup> 

1. Corresponding Author, Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, Velayat University, Iranshahr, Iran. E-mail: [m.zafarani@velayat.ac.ir](mailto:m.zafarani@velayat.ac.ir)
2. Department of Genetics and Plant Production, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran. E-mail: [armanazari@vru.ac.ir](mailto:armanazari@vru.ac.ir)

### Article Info

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

Received: 10 October 2021

Received in revised form:

26 February 2022

Accepted: 05 April 2022

Published online:

17 December 2022

### ABSTRACT

The present study tries to quantify germination response of Guar (*Cyamopsis tetragonoloba*) to temperature and water potential. Performed in Vali-e-Asr University laboratory in 2020, it is a completely randomized design in a factorial arrangement with four replications. It aims at quantifying the rate of Guar germination in response to temperature, and water potential. The seeds have been germinated at seven temperatures (5, 10, 15, 20, 25, 30, and 35°C) and six water potentials (0, -0.2, -0.4, -0.6, -0.8, and -1 MPa). The results reveal that the Beta function is suitable for describing the response of seed germination temperature, and water potential. Under different water potentials, base, optimum, and maximum temperatures have been 7.3-12°C, 22.1-25.8°C, and 32.2-36°C, respectively. The hydrothermal time parameters are 268.3 bar °C h, -1.103 MPa and, 8.36°C for  $\theta$ HT (hydrothermal time constant). The data obtained from these models can be used to establish and manage guar for cultivation in different areas.

#### Keywords:

Cardinal temperature, germination, hydrothermal time model, temperature, water potential base.

**Cite this article:** Zafarani, M., & Azari, A. (2022). Seed Germination Modeling of Guar (*Cyamopsis tetragonoloba*), Affected by Temperature and Water Potential: Hydrothermal Time Model. *Journal of Crops Improvement*, 24 (4), 1407-1420. DOI: <http://doi.org/10.22059/jci.2022.332131.2624>





## مدل سازی جوانه زنی گوار (*Cyamopsis tetragonoloba*) تحت تأثیر گرادیان دما و پتانسیل آب: مدل زمان دما رطوبتی

محسن زعفرانیه<sup>۱</sup> | آرمان آذری<sup>۲</sup>

۱. نویسنده مسئول، گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولایت ایرانشهر، ایرانشهر، ایران. رایانامه: [m.zafarani@velayat.ac.ir](mailto:m.zafarani@velayat.ac.ir)  
 ۲. گروه ژنتیک و تولید گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر رفسنجان (عج)، رفسنجان، ایران. رایانامه: [armanazari@vru.ac.ir](mailto:armanazari@vru.ac.ir)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

این پژوهش به منظور کمی سازی واکنش سرعت جوانه زنی گیاه گوار (*Cyamopsis tetragonoloba*) نسبت به دما و پتانسیل آب انجام گرفت. بدین منظور، مطالعه ای در آزمایشگاه دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان در سال ۱۳۹۹، آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار به منظور کمی سازی واکنش سرعت جوانه زنی گیاه گوار نسبت دما (تیمارهای دمایی پنج، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه سانتی گراد) و تنش خشکی (پتانسیل آب صفر، ۰/۲-، ۰/۴-، ۰/۶-، ۰/۸-، ۱- مگاپاسگال) انجام شد. نتایج این آزمایش نشان داد که مدل بتا بهترین مدل برای توصیف تأثیر دما و پتانسیل آب بر سرعت جوانه زنی بود. با توجه به پتانسیل های آب مختلف، محدوده دمایی پایه، مطلوب و حداکثر برای جوانه زنی بذر گوار به ترتیب از ۷/۳ تا ۱۲، ۱ تا ۲۲/۱ تا ۲۵/۸ و ۳۲/۲ تا ۳۶ درجه سانتی گراد برآورد شد. ساعت بیولوژیکی مورد نیاز در غلظت های مختلف پتانسیل آب از ۴۳/۲۴ تا ۱۳۶/۳ ساعت متفاوت بود. در مدل زمان دما رطوبتی، ثابت دما رطوبتی، پتانسیل آب پایه و دمایی پایه به ترتیب ۲۶۸/۳ مگاپاسگال درجه سانتی گراد در ساعت، ۱/۱۰۳- مگاپاسگال و ۸/۳۶ درجه سانتی گراد تخمین زده شد. از داده های به دست آمده از این مدل ها می توان برای پیش بینی و مقدار مقاومت این گیاه در برابر تنش خشکی در مرحله جوانه زنی در استقرار و مدیریت بهتر گیاه گوار برای کشت در مناطق مختلف استفاده نمود.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۹/۲۶

### کلیدواژه ها:

پتانسیل آب پایه،

جوانه زنی،

دما،

دمای کاردینال،

مدل زمان دما رطوبتی.

**استناد:** زعفرانیه، م. و آذری، آ. (۱۴۰۱). مدل سازی جوانه زنی گوار (*Cyamopsis tetragonoloba*) تحت تأثیر گرادیان دما و پتانسیل آب: مدل زمان دما رطوبتی. به زراعی کشاورزی، ۳۴ (۴)، ۱۴۰۷-۱۴۲۰. DOI: <http://doi.org/10.22059/jci.2022.332131.2624>



## ۱. مقدمه

گوار (*Cyamopsis tetragonoloba* L) گیاهی یک‌ساله از خانواده Fabaceae است. با توجه به متحمل‌بودن گوار به شرایط شوری و خشکی می‌توان از این گیاه به‌عنوان یک محصول جایگزین با پتانسیل بالقوه در دشت‌های کم‌آب استفاده کرد (Grover *et al.*, 2016). کشور هندوستان ۸۰ درصد سطح زیر کشت گوار را دارا می‌باشد که بعد از هندوستان کشور پاکستان در رده دوم تولید گوار می‌باشد (Yadav *et al.*, 2004). دانه‌های گوار، به‌دلیل وجود "صمغ گوار" در آندوسپرم، اهمیت صنعتی زیادی پیدا کرده است (Rai *et al.*, 2012). گوارگام یک پلی‌ساکارید galactomannan است این پلی‌ساکارید در صنایع به‌عنوان غلیظ‌کننده ژل‌ها استفاده می‌شود، هم‌چنین در صنایع مانند مواد غذایی، کاغذسازی، لوازم آرایشی، رنگ‌سازی، داروسازی کاربرد دارد (Hema & Shalendra, 2014).

واکنش به درجه حرارت بستگی به گونه، رقم، منطقه رشد و مدت زمان بعد از برداشت دارد. به‌عنوان یک قاعده کلی بذره‌های مناطق معتدله در مقایسه با بذره‌های مناطق گرمسیری به درجه حرارت‌های کم‌تری نیاز داشته و گونه‌های وحشی نیاز حرارتی کم‌تری از گیاهان اهلی دارند (Soltani *et al.*, 2006). به‌طور کلی، دماهای کاردینال جوانه‌زنی به ژنتیک، گونه گیاهی و ویژگی‌های اکولوژیک آن گیاه و شرایط اقلیمی که در آن رشد می‌کند بستگی دارد (Sampayo-*et al.*, 2018; Maldonado *et al.*, 2019).

تنش خشکی باعث کاهش درصد جوانه‌زنی و سرعت جوانه‌زنی و در ادامه کاهش طول ریشه‌چه و ساقه‌چه و وزن گیاهچه می‌شود (Sevik & Cetin, 2015; Golzardi *et al.*, 2012). اگر در محیط رشد بذر محدودیت آب وجود داشته باشد ممکن است جوانه‌زنی صورت نگیرد (Chamorro *et al.*, 2017). هم‌چنین گزارش شده است که تنش اسمزی به‌طور معنی‌داری روی درصد و سرعت جوانه‌زنی اثرگذار است، اما به‌طور معمول، سرعت جوانه‌زنی به‌صورت خطی با قابلیت دسترسی به آب افزایش و با کاهش پتانسیل آب کاهش می‌یابد (Grundy *et al.*, 2000). پژوهش‌گران نشان دادند که جوانه‌زنی بذر *Murdannia nudiflora* به‌شدت تحت تأثیر پتانسیل اسمزی قرار گرفته و با منفی‌تر شدن پتانسیل اسمزی درصد جوانه‌زنی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (Ahmad *et al.*, 2015).

استفاده از مدل‌های ریاضی برای توضیح رابطه بین دما و سرعت جوانه‌زنی بذر گیاهان در بسیاری از مطالعات موردتوجه قرار گرفته است (Soltani *et al.*, 2006). واکنش جوانه‌زنی و سبزشدن بذرها به دما و شناخت دماهای کاردینال هر بذر، برای تهیه مدل‌های پیش‌بینی‌کننده جوانه‌زنی و سبزشدن، انتخاب تاریخ کاشت مناسب، غربال‌کردن گونه‌ها و ژنوتیپ‌ها برای تحمل به دماهای پایین یا بالا و تعیین نواحی جغرافیایی که در آنجا گونه‌ها یا ژنوتیپ‌ها بتوانند با موفقیت جوانه بزنند و استقرار یابند، بررسی می‌شود (Tolyat *et al.*, 2014; Fallahi *et al.*, 2015). جوانه‌زنی یک گیاه و سازگاری آن با شرایط محیط از اهمیت بالایی برخوردار بوده و حفظ و بقای گیاه وابستگی زیادی به این مرحله دارد (Rouan *et al.*, 2018). نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داده است که تغییر عوامل محیطی از جمله دما و پتانسیل آب می‌تواند تأثیر زیادی بر رفتار جوانه‌زنی و سبزشدن بذرها داشته باشد (Fallahi *et al.*, 2015).

مدل‌های ریاضی بی‌شماری برای توصیف الگوی جوانه‌زنی در واکنش به دما و پتانسیل آب ارائه شده‌اند (Soltani *et al.*, 2006). برخی از این مدل‌ها، برای پیش‌بینی واکنش جوانه‌زنی تجمعی به‌کار می‌روند و قادر به پیش‌بینی دماهای کاردینال و ضرایب مدل برای مقایسه توده‌های بذری نیز هستند (Baath *et al.*, 2020). مدل‌های دوتکه‌ای، دندان‌مانند، درجه دوم و بتا برای به‌دست‌آوردن رابطه بین سرعت جوانه‌زنی و دما استفاده می‌شود که هر کدام از این مدل‌ها دارای ویژگی‌های مثبت و منفی خود هستند (Fallahi *et al.*, 2015). پژوهش‌گران به‌وسیله این مدل‌ها، دمای پایه، دمای مطلوب و دمای سقف جوانه‌زنی و سبزشدن گیاهان موردنظر را برآورد کردند (Hardegree, 2002).

جهت کمی‌سازی واکنش جوانه‌زنی بذر به عوامل محیطی از مدل‌های مختلفی استفاده شده است و این مدل‌های جوانه‌زنی براساس متغیر مورد مطالعه، به چند گروه تقسیم می‌شوند. به‌طوری‌که اگر فقط از دما استفاده شود، مدل ترمال‌تایم و اگر از رطوبت استفاده شود، مدل هیدروتایم می‌گویند (Kamkar *et al.*, 2012). اگرچه مدل‌های زمان دمایی به‌طور موفقیت‌آمیزی قادر به توصیف رابطه بین سرعت جوانه‌زنی و دما در دماهای پایین‌تر و بالاتر از دمای بهینه بوده‌اند، اما آن‌ها نیز برای ارائه پاسخ فیزیولوژیک مناسب به سؤال‌هایی از قبیل علت کاهش سرعت جوانه‌زنی در دماهای بالاتر از بهینه و ایجاد اختلاف در دماهای سقف ناتوان بوده‌اند. پژوهش‌گران برای پاسخ به این سؤال‌ها و رفع مشکل، مدل زمان رطوبتی را جهت توصیف رابطه بین سرعت جوانه‌زنی و پتانسیل آب استفاده نمودند (Baath *et al.*, 2020).

مدل زمان دمایی و زمان رطوبتی با یکدیگر ترکیب شده‌اند و از مدل زمان دما رطوبتی برای توصیف ترکیب اثر دما و رطوبت بر جوانه‌زنی استفاده شده است (Bradford *et al.*, 1995). فرض اصلی مدل زمان دما رطوبتی این است که، دمای پایه جوانه‌زنی بذری که در کمون نیستند مستقل از پتانسیل آب است و این که پتانسیل آب پایه برای درصد جوانه‌زنی مستقل از دما است (Allen *et al.*, 2000). از مدل زمان دما رطوبتی به‌عنوان ابزاری برای مقایسه واکنش جوانه‌زنی گونه‌های مختلف به رطوبت و دما استفاده می‌شود که، در برخی گونه‌ها برازش مدل مناسب نبود و اگر آنالیز زمان دما رطوبتی برای هر دما به‌طور جداگانه برازش یابد، این برازش می‌تواند بهبود یابد (Alvarado & Bradford, 2002). مقادیر هیدرو زمان دمایی و مقادیر دما و پتانسیل پایه در مدل‌سازی پویایی بانک بذر مورد نیاز هستند (Sester *et al.*, 2008). این پارامترها در پیش‌بینی سبزشدن علف‌های هرز در واکنش به دما و پتانسیل آب که دو عامل اصلی مؤثر بر جوانه‌زنی بذرها می‌باشند، کاربرد دارند.

پارامترهای به‌دست‌آمده از مدل‌های زمان دما رطوبتی در واقع نشان‌دهنده شاخص‌هایی از وضعیت فیزیولوژیک و اکولوژیک توده‌های بذری می‌باشند (Onofri *et al.*, 2018). با توجه به این‌که مطالعات کمی روی گوار برای شناخت نیازهای اکولوژیک و فیزیولوژیک این گیاه صورت گرفته است، این آزمایش‌ها به‌منظور بررسی اثر پتانسیل آبی و دما بر جوانه‌زنی گوار انجام شد.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. مکان و زمان انجام آزمایش

این پژوهش در آزمایشگاه دانشکده کشاورزی دانشگاه ولی‌عصر(عج) رفسنجان به‌اجرا در آمد. بذرها گیاه گوار از شرکت پاکان بذر تهیه شده. این مطالعه به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تکرار انجام شد. عامل اول پتانسیل‌های مختلف آب در شش سطح (صفر، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، ۱- و مگاپاسگال) و عامل دوم شش سطح دما (پنج، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد) بود. پتری‌ها ۲۴ ساعت قبل از شروع آزمایش به‌مدت یک شبانه‌روز در آون در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند تا به‌طور کامل ضدعفونی شوند. سپس ۲۵ عدد از بذر-های گوار ضدعفونی، به پتری‌های استریل حاوی کاغذ صافی واتمن شماره ۱ انتقال یافت و این بذرها روی سطح کاغذ صافی قرار گرفتند (Lemes & Lopes, 2012) و در ژرمیناتور با تیمارهای دمای مختلف با دقت ۰/۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و روش‌نمایی دستگاه ژرمیناتور (پارس آزما- ایران) را به ۱۶ ساعت روز و ۸ ساعت شب تنظیم شد. پتانسیل آب براساس فرمول میشل‌کافمن با استفاده از پلی‌اتیلن گلایکول ۶۰۰۰ (PEG 6000) تهیه و برای تیمار شاهد از آب مقطر استفاده شد (Michel & Kaufman, 1973).

شمارش بذرها جوانه‌زده هر دو ساعت یک‌بار انجام گرفت و تا زمانی که تعداد تجمعی بذرها جوانه‌زده به یک حد

ثابت رسید و یا زمانی که ۱۰۰ درصد جوانه‌زنی حاصل شد به‌طور مرتب و مداوم صورت گرفت. مبنای جوانه‌زنی بذرها، خروج ریشه‌چه از پوسته بذر و قابل رؤیت‌بودن آن با چشم غیرمسلح (طول ریشه‌چه حدود ۲ میلی‌متر) بود. برای محاسبه درصد و سرعت جوانه‌زنی بذور از برنامه جرمین استفاده شد که این برنامه D10، D50 و D90 (مدت زمانی که طول می‌کشد تا جوانه‌زنی به‌ترتیب به ۱۰، ۵۰ و ۹۰ درصد حداکثر خود برسد) را محاسبه می‌کند. این برنامه پارامترهای یادشده را برای هر تکرار و هر تیمار بذری از طریق درون‌یابی (Interpolation) منحنی افزایش جوانه‌زنی در مقابل زمان محاسبه می‌کند.

سرعت جوانه‌زنی (در ساعت) از طریق فرمول زیر محاسبه شد (Covell *et al.*, 1986; Soltani *et al.*, 2006):  
 $R_{50}=f(T) R_{max}$   
 در این رابطه،  $f(T)$  تابع دما است که از صفر در دمای پایه و سقف تا یک در دمای مطلوب تغییر می‌کند و  $R_{max}$  حداکثر سرعت ذاتی جوانه‌زنی در دمای مطلوب است. بنابراین  $1/R_{max}$  حداقل ساعت تا جوانه‌زنی را در دمای مطلوب نشان می‌دهد که همان تعداد ساعت بیولوژیک موردنیاز برای جوانه‌زنی می‌باشد (Torabi *et al.*, 2013).  
 برای کمی‌کردن واکنش سرعت جوانه‌زنی گوار به دما و همچنین تعیین دماهای کاردینال و ساعت فیزیولوژیک موردنیاز برای جوانه‌زنی این گیاه از هر سه مدل دوتکه‌ای، دندان‌مانند و بتا استفاده شد (Piper *et al.*, 1996; Ritchie & NeSmith, 1991; Torabi *et al.*, 2013).

## ۲.۲ مدل دوتکه‌ای

1.  $f(T)=(T - T_b)/(T_o - T_b)$  if  $T_b < T \leq T_o$
2.  $f(T)=(T_c - T)/(T_c - T_o)$  if  $T_o < T < T_c$
3.  $f(T)=0$  if  $T \leq T_b$  or  $T \geq T_c$

در این رابطه،  $T_b$  دمای پایه،  $T_o$  دمای مطلوب،  $T_c$  دمای سقف، و  $T$  دمای متوسط روزانه (دمای مورد آزمایش) می‌باشد.

## ۳.۲ مدل دندان‌مانند

1.  $f(T)=(T - T_b)/(T_{o1} - T_b)$  if  $T_b < T < T_{o1}$
2.  $f(T)=(T_c - T)/(T_c - T_{o2})$  if  $T_{o2} < T < T_c$
3.  $f(T)=1$  if  $T_{o1} \leq T \leq T_{o2}$
4.  $f(T)=0$  if  $T \leq T_b$  or  $T \geq T_c$

در این رابطه،  $T_b$  دمای پایه،  $T_{o1}$  دمای مطلوب تحتانی،  $T_{o2}$  دمای مطلوب فوقانی،  $T_c$  دمای سقف و  $T$  دمای متوسط روزانه (دمای مورد آزمایش) می‌باشد.

## ۴.۲ مدل بتا

1.  $f(T)=((T_c - T)/(T_o - T_b) \times (T - T_b)/(T_o - T_b))^{((T_o - T_b)/(T_c - T_o))}$  if  $T_b < T < T_c$
2.  $f(T)=0$  if  $T \leq T_b$  or  $T \geq T_c$

در این رابطه،  $T_b$  دمای پایه،  $T_o$  دمای مطلوب،  $T_c$  دمای سقف و  $T$  دمای متوسط روزانه (دمای مورد آزمایش) می‌باشد.

تخمین پارامترهای هر مدل با روش مطلوب‌سازی تکراری در نرم‌افزار آماری SAS صورت گرفت. در روش مطلوب‌سازی تکراری با هر بار واردکردن مقادیر اولیه پارامترها، مقادیر آن با روش کم‌ترین توان‌های دوم تخمین‌زده

می‌شود. تغییر مقادیر اولیه تا زمانی انجام می‌گیرد که بهترین برآورد از پارامترها به دست آید. بهترین برآورد پارامترهای مدل براساس خطای معیار کم‌تر پارامترها و جذر میانگین مربعات انحراف کم‌تر رگرسیون مشخص می‌شود. مدل زمان دمایی: زمان رطوبتی مورد نیاز برای جوانه‌زنی توسط رابطه زیر به دست آمد (Bradford, 2002).

$$1. \theta T = (T - T_{b(g)})tg$$

$$2. GRg = 1/tg = (T - T_{b(g)})/\theta T$$

که در آن، GRg سرعت جوانه‌زنی در کسر خاصی از بذرهاى جوانه‌زده،  $\theta T$  ثابت زمان دمایی (درجه سانتی‌گراد در روز) یعنی مقدار دماهای بالاتر از دمای پایه، که برای رسیدن به کسر خاصی از جوانه‌زنی باید به صورت تجمعی جمع شوند،  $T$ ، دمای محیط و  $T_{b(g)}$  دمای پایه (درجه سانتی‌گراد) می‌باشد. علاوه بر این در دماهای بالاتر از دمای بهینه (از دمای بهینه تا دمای سقف) نیز این مدل با اندکی اصلاح قادر به توصیف رابطه بین سرعت جوانه‌زنی و دما می‌باشد (Gummerson, 1996; Bradford, 2002). اگرچه مدل‌های زمان دمایی به طور موفقیت‌آمیزی قادر به توصیف رابطه بین سرعت جوانه‌زنی و دما در دماهای پایین‌تر و بالاتر از دمای بهینه بوده‌اند، اما آن‌ها برای ارائه پاسخ فیزیولوژیک مناسب به سؤالاتی از قبیل علت کاهش سرعت جوانه‌زنی در دماهای بالاتر از دمای بهینه و ایجاد اختلاف در دماهای سقف نیز ناتوان بودند. پژوهش‌گران برای پاسخ به این سؤالات و رفع مشکل در مدل‌های زمان دمایی، مدل مشابهی یعنی مدل زمان رطوبتی را جهت توصیف رابطه بین سرعت جوانه‌زنی و پتانسیل آب به شکل زیر پیشنهاد نمودند (Gummerson, 1996).

$$3. \theta H = (\Psi - \Psi_{b(g)})tg$$

$$4. GRg = 1/tg = (\Psi - \Psi_{b(g)})/\theta H$$

$$5. \text{Probit}(g) = [\Psi - (\theta H/tg) - \Psi_{b(50)}]/\sigma\Psi_{b(50)}$$

که در این روابط، GRg: سرعت جوانه‌زنی در کسر خاصی از بذرهاى جوانه‌زده؛  $\theta H$ : ثابت زمان رطوبتی (مگاپاسگال در روز) یعنی مقدار پتانسیل‌های آب بالاتر از پتانسیل پایه که برای رسیدن به کسر خاصی از جوانه‌زنی باید به صورت تجمعی جمع شوند؛  $\Psi$ : پتانسیل آب محیط؛  $\sigma\Psi_{b(50)}$ : انحراف معیار پتانسیل آب پایه (مگاپاسگال) داخل توده بذر و  $\Psi_{b(50)}$ : پتانسیل آب پایه می‌باشند.

در این مدل، مقادیر پتانسیل آب پایه، کسر خاصی از جمعیت می‌باشد. مقادیر پتانسیل آب پایه برای کسر خاصی از بذرهاى جوانه‌زده در یک توده بذر متفاوت می‌باشد که در اکثر موارد برای توصیف آن، از توزیع نرمال استفاده می‌شود (Gummerson, 1986; Bradford, 2002).

مدل زمان دما رطوبتی که ترکیبی از دو مدل زمان دمایی و زمان رطوبتی می‌باشد، به طور موفقیت‌آمیزی برای کمی‌سازی هم‌زمان اثر دما و پتانسیل آب بر جوانه‌زنی توسط بسیاری از پژوهش‌گران پیشنهاد شد (Bradford, 2002; Soltani *et al.*, 2006).

در دماهای پایین‌تر از دمای بهینه این مدل را می‌توان به شکل زیر توصیف نمود:

$$6. \theta HT = (\Psi - \Psi_{b(g)})(T - T_{b(g)})tg$$

که در آن  $tg$ ، زمان مورد نیاز برای رسیدن به کسر خاصی از جوانه‌زنی در توده بذر جوانه‌زده،  $\theta HT$ ، ثابت زمان دما رطوبتی (مگاپاسگال در درجه سانتی‌گراد در روز)،  $\Psi_{b(g)}$  مقدار پتانسیل آب پایه برای رسیدن به کسر خاصی از جوانه‌زنی،  $T_{b(g)}$  دمای پایه،  $\Psi$  پتانسیل آب و  $T$  دمای محیط اطراف بذر می‌باشد.

داده‌های مدت زمان جوانه‌زنی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و این داده‌ها برای تخمین مدل‌های زمان دمایی، زمان رطوبتی و زمان دما رطوبتی مورد استفاده قرار گرفت. همه این مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۱) و رویه NLIN به داده‌ها برازش داده شدند (Soltani *et al.*, 2010).

### ۳. نتایج و بحث

جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که دما و پتانسیل آب بر روی دماهای کاردینال تأثیر معنی‌داری داشتند (جدول ۱).

جدول ۱. جدول تجزیه واریانس مولفه‌های جوانه‌زنی گوار

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین زمان جوانه‌زنی	درصد جوانه‌زنی
دما (T)	۵	۱۷۶۳**	۲۰۹۲/۳**
پتانسیل آب (W)	۶	۸۷۷۴/۲**	۳۶۰/۶۹**
W*T	۳۰	۳۵۴**	۷۷/۳۸**
خطا (E)	۱۲۶	۳	۰/۲۳
ضریب تغییرات (CV)	-	۳/۶۱	۴/۲۴

\*\*\*، \*\* و ns: به ترتیب معنی‌داری در سطح ۱ و ۵ درصد و غیر معنی‌داری.

در این مطالعه ارتباط بین جوانه‌زنی، دما، پتانسیل آب و زمان لازم برای رسیدن به ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی بر روی سرعت جوانه‌زنی محاسبه شد. برای به‌دست‌آوردن تأثیر دما و پتانسیل آب بر سرعت جوانه‌زنی، از توابع دو تکه‌ای بتا و دندنان مانند استفاده شد.

نتایج تجزیه واریانس نشانگر وجود اختلاف معنی‌دار ( $P < 0.01$ ) در بین تیمارهای پتانسیل آب و دمای جوانه‌زنی برای میانگین زمان جوانه‌زنی بود. به‌طور کلی کاهش پتانسیل آب افزایش میانگین زمان جوانه‌زنی را به‌دنبال داشته است (جدول ۲). در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد بیش‌ترین زمان در سطح پتانسیل ۰/۸ مگاپاسکال مشاهده شد. در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد اختلاف معنی‌داری بین دو سطح اول پتانسیل با شاهد مشاهده نشد. در دمای ۱۵ و ۲۵ و نیز ۲۰ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد بیش‌ترین میانگین زمان جوانه‌زنی به ترتیب در پتانسیل ۰/۶- و ۰/۸- مگاپاسکال و کم‌ترین میانگین زمان جوانه‌زنی در تیمار شاهد در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد در مشاهده شد (۱/۱۳ در روز) که نشانگر بالاترین سرعت جوانه‌زنی در این دما می‌باشد. در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد به علت افزایش دما و پتانسیل آب تا پتانسیل ۰/۴- مگاپاسکال جوانه‌زنی بذور مشاهده شد و بیش‌ترین زمان جوانه‌زنی ۶/۰۸ روز بود.

جدول ۲. اثرهای متقابل درجه حرارت و پتانسیل آب بر میانگین زمان جوانه‌زنی و میانگین درصد جوانه‌بذری گوار (روز)

	پتانسیل آب (Mpa)					دما (°C)	
	صفر	-۰/۲	-۰/۴	-۰/۶	-۰/۸		
	۴/۲۹d	۴/۲۲d	۵/۴۸a	۶/۰۶b	۷/۲۲a	۵	میانگین زمان جوانه‌زنی
	۲/۵۳c	۲/۵۶c	۲/۶۱c	۳/۰۴b	۳/۹۶a	۱۰	
	۲/۴۰c	۲/۶۱b	۲/۶۱b	۲/۷۴b	۳/۰۸a	۱۵	
	۱/۱۷c	۱/۱۳c	۱/۲۱c	۱/۵۴b	۲/۳۰a	۲۰	
	۱/۳۳d	۱/۴۲d	۱/۹۷c	۲/۸۹b	۳/۳۰a	۲۵	
	۱/۸۸e	۲/۳۹d	۳/۰۲c	۳/۱۷b	۴/۰۸a	۳۰	
	۳/۸۸c	۴/۰۹b	۶/۰۸a	-	-	۳۵	درصد جوانه‌زنی
	۲۸/a	٪۲۶ab	٪۲۴b	٪۱۳c	٪۶d	۵	
	٪۷۸a	٪۶۳b	٪۴۲c	٪۲۱d	٪۱۳e	۱۰	
	٪۱۰۰a	٪۱۰۰a	٪۸۳b	٪۶۷c	٪۸d	۱۵	
	٪۱۰۰a	٪۱۰۰a	٪۱۰۰a	٪۷۳b	٪۳۶c	۲۰	
	٪۱۰۰a	٪۱۰۰a	٪۱۰۰a	٪۴۲b	٪۱۰c	۲۵	
	٪۱۰۰a	٪۷۳b	٪۴۲c	٪۱۳d	-	۳۰	
	٪۴۹a	٪۲۱b	٪۳c	-	--	۳۵	

اعداد دارای حداقل یک حرف مشابه در هر ستون از لحاظ آماری معنی‌دار نیستند.

در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد بالاترین درصد جوانه‌زنی در تیمار شاهد مشاهده شد. با کاهش پتانسیل آب درصد جوانه‌زنی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت، به‌طوری‌که در پتانسیل ۱- مگاپاسکال هیچ بذری جوانه نزد در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد نیز بالاترین درصد جوانه‌زنی از نظر عددی در تیمار شاهد مشاهده شد، در دمای ۱۵ سانتی‌گراد در دمای شاهد و ۰/۲- درصد جوانه‌زنی ۱۰۰ درصد جوانه‌زنی و با کاهش پتانسیل آب درصد جوانه‌زنی کاهش یافت. همچنین افزایش دما از ۱۵ به ۲۰ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد افزایش درصد جوانه‌زنی سطوح پتانسیل به همراه داشت. به‌نحوی‌که در دمای ۲۰ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد بین تیمارهای شاهد و سه سطح ۰/۲-، ۰/۴- و ۰/۶- سطح مگاپاسکال اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد که نشان‌دهنده افزایش مقاومت به تنش خشکی در این دماها می‌باشد. در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد بین تیمار شاهد و سطوح دیگر پتانسیل اختلاف معنی‌داری مشاهده شد و بیش‌ترین درصد جوانه‌زنی در تیمار شاهد مشاهده شد. در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد بیش‌ترین درصد جوانه‌زنی در شاهد مشاهده شد که از ۱۰۰ درصد در دمای ۳۰ سانتی‌گراد به ۴۹ درصد در این دما رسید و جوانه‌زنی تا پتانسیل ۰/۴- مگاپاسکال اتفاق افتاد (جدول ۲).

با توجه به جدول (۳) جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) در سه مدل از ۰/۱۰ تا ۰/۵۳ متغیر بود و میانگین RMSE در سه مدل بتا، دو تکه‌ای و دندان مانند به‌ترتیب ۳۱/۸، ۲۸/۴ و ۲۲/۴ بودند که کم‌ترین مقدار میانگین RMSE مربوط به مدل بتا می‌باشد. ضریب تبیین ( $R^2$ ) در سه مدل از ۰/۴۳ تا ۰/۹۶ متغیر بود ولی مقدار میانگین  $R^2$  در مدل بتا نسبت به مدل بتا و مدل دندان مانند بیشتر بود. از آنجاکه بالاترین  $R^2$  و کم‌ترین میانگین RMSE در مدل بتا بود، این مدل برای توصیف مناسب است (جدول ۳).

جدول ۳. جذر میانگین مربعات اشتباه (RMSE)، ضریب تبیین ( $R^2$ ) برای مدل دو تکه‌ای، دندان‌مانند و بتا، توصیف‌کننده ارتباط بین سرعت جوانه‌زنی گوار با دما و پتانسیل آب. ضرایب رگرسیون (a و b) و ضریب همبستگی (r) مربوط به مقادیر ساعات تا جوانه‌زنی مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده

مدل	پتانسیل آب (MPa)	RMSE	$R^2$	a±SE	b±SE	r
دو تکه‌ای	۰	۰/۱۹	۰/۹۲	۰/۲۱±۰/۷۵	۰/۱۹±۰/۰۶	۰/۸۲
	-۰/۲	۰/۲۲	۰/۹۱	۰/۱۸±۰/۱۶	۰/۱۱±۰/۰۸	۰/۷۸
	-۰/۴	۰/۵۳	۰/۷۳	۰/۳۴±۰/۴۷	۰/۷۶±۰/۱۸	۰/۸۳
	-۰/۶	۰/۲۷	۰/۴۳	۰/۲۰±۰/۴۹	۰/۴۳±۰/۱۹	۰/۶۳
	-۰/۸	۰/۳۸	۰/۸۴	۰/۲۱±۰/۳۳	۰/۱۱±۰/۱۱	۰/۴۸
	-۱	-	-	-	-	-
دندان مانند	۰	۰/۳۱	۰/۷۹	۰/۱۹±۰/۳۵	۰/۲۵±۰/۲۸	۰/۸۲
	-۰/۲	۰/۳۷	۰/۸۶	۰/۴۱±۰/۲۸	۰/۱۸±۰/۱۴	۰/۸۷
	-۰/۴	۰/۲۷	۰/۵۳	۰/۲۲±۰/۱۴	۰/۳۷±۰/۵۷	۰/۷۵
	-۰/۶	۰/۱۰	۰/۴۴	۰/۱۹±۰/۱۳	۰/۲۶±۰/۵۲	۰/۵۶
	-۰/۸	۰/۳۶	۰/۶۷	۰/۲۴±۰/۴۶	۰/۱۲±۰/۱۶	۰/۶۳
	-۱	-	-	-	-	-
بتا	۰	۰/۲۳	۰/۹۳	۰/۱۱±۰/۸۹	۰/۸±۰/۳۱	۰/۹۵
	-۰/۲	۰/۱۹	۰/۹۶	۰/۱۴±۰/۶۴	۰/۱۲±۰/۱۷	۰/۹۴
	-۰/۴	۰/۲۰	۰/۸۸	۰/۱۹±۰/۲۷	۰/۵۳±۰/۶۴	۰/۸۲
	-۰/۶	۰/۳۳	۰/۵۷	۰/۲۳±۰/۴۵	۰/۲۲±۰/۵۹	۰/۸۸
	-۰/۸	۰/۱۷	۰/۹۴	۰/۱۸±۰/۱۶	۰/۱۲±۰/۴۳	۰/۴۸
	-۱	-	-	-	-	-



بالاترین ضریب همبستگی ( $r$ ) در مدل بتا نسبت به مدل‌های دوتکه‌ای و دندان‌مانند مشاهده شد. پژوهش‌گران بیان کردند که برای پیش‌بینی جوانه‌زنی گیاه خشخاش (*Papaver somniferum* L.) مدل دوتکه‌ای نسبت به مدل‌های بتا و دندان‌مانند دارای برتری بود (Kamkar *et al.*, 2013). در حالی که در مدل بتا که به‌عنوان مدل برتر در این آزمایش انتخاب شد، با کاهش پتانسیل آب، دمای پایه افزایش یافت. به‌طوری که دمای پایه ( $T_b$ ) در پتانسیل صفر مگاپاسکال برابر با  $7/31$  درجه سانتی‌گراد بود، اما در پتانسیل  $-0/8$  مگاپاسکال به  $12/08$  درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. دامنه تغییرات دما آب پایه در پتانسیل‌های مختلف آب  $5/49$  درجه سانتی‌گراد بود. همچنین در این مدل، دمای مطلوب ( $T_o$ ) از  $25/8$  تا  $22/1$  درجه سانتی‌گراد و دمای حداکثر ( $T_c$ ) از  $36$  تا  $32/2$  درجه در پتانسیل‌های مختلف متغیر بود. ساعت بیولوژیک نیز ( $g_o$ ) در پتانسیل‌های مختلف آب بین  $43/24$  تا  $136/3$  ساعت متغیر بود (جدول ۲). زمانی که پتانسیل آب به  $-0/8$  مگاپاسکال کاهش می‌یابد، دمای پایه از  $7/31$  به  $12/08$ ، مطلوب از  $24/8$  به  $22/4$  و حداکثر از  $36$  به  $32/2$  درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد (جدول ۴).

جدول ۴. تخمین دمای پایه ( $T_b$ )، دمای مطلوب ( $T_o$ ) (دمای مطلوب پایین‌تر و دمای مطلوب بالاتر)، حداکثر دما ( $T_c$ ) و ساعت بیولوژیک ( $g_o$ )، برای جوانه‌زنی گوار با استفاده از مدل‌های دوتکه‌ای، بتا و دندان‌مانند در پتانسیل‌های مختلف آب

نوع مدل	پتانسیل آب (MPa)	دمای کاردینال ( $^{\circ}C$ )		
		$T_b$	$T_o$	$T_c$
دوتکه‌ای	۰	$9/31 \pm 0/43$	۲۵	$36$
	$-0/2$	$11/99 \pm 0/73$	۲۵	$34$
	$-0/4$	$10/06 \pm 0/27$	$23/98 \pm 0/25$	$34/87 \pm 1/59$
	$-0/6$	$11/23 \pm 1/36$	$26/52 \pm 1/38$	$33 \pm 0/24$
	$-0/8$	$12/18 \pm 1/08$	$24/75 \pm 1/68$	$32/5 \pm 0/89$
	-۱	-	-	-
دندان‌مانند	۰	$7/37 \pm 0/65$	۲۵	$35$
	$-0/2$	$8/1 \pm 0/98$	$27/2 \pm 2/01$	$34 \pm 1/88$
	$-0/4$	$8/6 \pm 0/22$	$27 \pm 2/01$	$32 \pm 1/88$
	$-0/6$	$14/6 \pm 0/22$	$20/9 \pm 1/35$	$32/4 \pm 0/74$
	$-0/8$	$11/2 \pm 0/55$	$22/8 \pm 1/37$	$32 \pm 2/8$
	-۱	-	-	-
بتا	۰	$7/31 \pm 0/43$	$24/8 \pm 1$	$36$
	$-0/2$	$8/08 \pm 0/42$	$25/8 \pm 1$	$36$
	$-0/4$	$10/09 \pm 0/38$	$24/6 \pm 1/13$	$36$
	$-0/6$	$11/23 \pm 0/63$	$22/1 \pm 1/02$	$33/1 \pm 1/56$
	$-0/8$	$12/08 \pm 1/22$	$22/4 \pm 0/65$	$32/2 \pm 1/42$
	-۱	-	-	-

نتایج بیانگر میانگین  $\pm$  خطای استاندارد (SE) هستند

برای انتخاب مدل برتر از میان مدل‌های مورد استفاده، از جذر میانگین مربعات انحراف معیار برای زمان جوانه‌زنی، ضریب تبیین، ضریب همبستگی، ضرایب رگرسیون ساده خطی در رابطه زمان (ساعت) تا جوانه‌زنی مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده استفاده شد. هر قدر ضریب تبیین مدل مورد استفاده بزرگ‌تر باشد، درصد بیش‌تری از تغییرات سرعت جوانه‌زنی توسط مدل توجیه می‌شود.

پژوهش‌گران دماهای پایه، بهینه و بیشینه را برای جوانه‌زنی بذرهای گلرنگ به‌ترتیب پنج، ۳۲ و ۴۸ درجه سانتی‌گراد

برآورد کردند (Torabi et al., 2013). همچنین دماهای پایه، بهینه و بیشینه برای بارهنگ به‌ترتیب ۳/۳، ۲۱/۲ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است (Ghaderi-Far et al., 2012).

دماهای پایه، بهینه و بیشینه جوانه‌زنی بذرهاى کوشیا (*Kochia scoparia* L.) را به‌ترتیب ۳/۵، ۲۴ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد محاسبه نمودند. تغییرات در دمای پایه می‌تواند برای غربالگری ژنوتیپ‌ها با سازگاری بهتر با محیط‌های با دما بالا یا پایین استفاده شود که در جوانه‌زنی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Jami Al-Ahmadi & Kafi, 2007). همچنین دمای پایه، بهینه و بیشینه جوانه‌زنی بذرهاى شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum* L.) به‌ترتیب ۰/۴۸، ۲۱/۶ و ۴۶ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی کرده‌اند (Teimori et al., 2021). در گیاه قدومه شیرازی (*Alyssum homolocarpum*) دمای پایه، دمای بهینه و دمای بیشینه به‌ترتیب ۴/۹۶ تا ۶/۳۷، ۱۳/۹۸ تا ۱۵، ۲۸/۷ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی شده است (Zafaranih et al., 2020).

برای هر دمای مشخص‌شده، ضریب  $R^2$  با استفاده از مدل زمان زمان رطوبتی تعیین شد. ضریب  $R^2$  بین ۰/۵۶ تا ۰/۹۶ متغیر بود (جدول ۴). در هر دما، پتانسیل آب پایه ( $\Psi_b$ ) برای جوانه‌زنی بذرها متفاوت بود با افزایش دما از پنج تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد، مقادیر آن شروع به کاهش کرد، اما با افزایش دما از ۲۰ درجه سانتی‌گراد به ۳۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. دامنه تغییرات پتانسیل آب پایه در دمای ۲۰ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد، به‌ترتیب بین ۲/۹۸- تا ۰/۸۹- مگاپاسگال ( تا نوسان داشت (جدول ۳). مقایسه انحراف معیار آب پایه ( $\sigma\Psi_b$ ) برای دماهای آزمایش‌شده نشان داد که جوانه‌زنی در ۱۰ درجه سانتی‌گراد و ۳۵ درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب با مقدار ۰/۲۸ و ۰/۲۴ مگاپاسگال، از یکنواختی بالاتری نسبت به سایر دماها برخوردار است و جوانه‌زنی در ۲۵ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب با ۰/۸۱ و ۰/۷۳ مگاپاسگال، بیش‌ترین پراکندگی را دارد (جدول ۵).

در این مطالعه برای هر پتانسیل آب، مقادیر خاصی از حداقل دما ( $T_b$ ) و ضریب دما رطوبتی ثابت ( $\theta H$ ) به‌دست آمد (جدول ۶).

جدول ۵. برآورد پارامترهای مدل زمان رطوبتی در هشت دمای مختلف که جوانه‌زنی بذر گوار را برای پتانسیل‌های مختلف آب توصیف می‌کند

دما ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Psi_{b(50)}$ (MPa)	$\sigma\Psi_b$	$\theta H$ (MPa h)	$R^2$	GR (%)
۵	-	-	-	-	-
۱۰	-۲/۷۸	۰/۲۸	۹۲/۴۸	۰/۵۶	۵۸/۶۴
۱۵	-۲/۲۳	۰/۳۹	۱۲۶/۹۸	۰/۶۷	۷۲/۹۸
۲۰	-۲/۹۸	۰/۶۵	۱۸۸/۷۲	۰/۹۱	۸۸/۶۹
۲۵	-۱/۶۸	۰/۸۱	۲۶۳/۴۴	۰/۹۶	۹۱/۶۸
۳۰	-۱/۱۸	۰/۷۳	۸۹/۳۸	۰/۹۰	۴۵/۹۲
۳۵	-۰/۸۹	۰/۲۴	۱۴/۲۲	۰/۴۷	۲۳

$\Psi_b$ : پتانسیل آب پایه،  $\sigma\Psi_b$ : انحراف معیار پتانسیل آب پایه،  $\theta H$ : ثابت هیدرو تایم،  $R^2$ : ضریب تبیین، GR: میانگین درصد جوانه‌زنی

جدول ۶. برآورد پارامتر زمان دمایی در شش پتانسیل آب که جوانه‌زنی بذر گوار را برای دماهای مختلف توصیف می‌کند

پتانسیل آب (MPa)	$T_b$	$\theta T$ ( $^{\circ}\text{C h}$ )	RMSE	$R^2$	GP (%)	GR ( $\text{h}^{-1}$ )
۰	۷/۳۱	۳۸۹/۱۳	۳۰/۶۲	۰/۷۸	۹۲	۰/۳۹۸
-۰/۲	۸/۰۸	۶۹۲/۲	۶۹/۶۲	۰/۹۱	۸۸	۰/۱۶۸
-۰/۴	۱۰/۰۹	۹۸۷/۹	۷۸/۳۶	۰/۷۶	۸۳/۵	۰/۰۹۳
-۰/۶	۱۱/۲۳	۱۱۸۸/۴	۷۹/۱۳	۰/۶۴	۶۵/۹	۰/۰۴۹
-۰/۸	۱۲/۰۸	۱۹۷۶/۳	۱۴۱/۶۵	۰/۵۲	۵۳/۳	۰/۰۲۳
-۱	-	-	-	-	-	-

$T_b$ : دمای پایه،  $\theta T$ : ثابت زمان دمایی،  $R^2$ : ضریب تبیین، GP و GR: میانگین درصد جوانه‌زنی و سرعت جوانه‌زنی.

بیش‌ترین دمای پایه با افزایش پتانسیل آب در پتانسیل  $-0/8$  مگاپاسکال، برابر  $12/08$  درجه سانتی‌گراد بود و کم‌ترین دمای پایه در پتانسیل آب صفر، معادل  $7/31$  درجه سانتی‌گراد محاسبه شد. ثابت زمان دمایی ( $\theta T$ ) از  $389/13$  در صفر مگاپاسکال، به  $1976/3$   $^{\circ}\text{C h}$  در  $-0/8$  مگاپاسکال افزایش یافته است. ضریب  $R^2$  ثابت زمان دمایی در پتانسیل  $-0/2$  مگاپاسکال در بالاترین مقدار بود و کم‌ترین این ضریب، در پتانسیل آب  $-1$  مگاپاسکال مشاهده شد. با افزایش پتانسیل آب، درصد جوانه‌زنی و سرعت جوانه‌زنی کاهش یافت. پارامترهای زمان دما رطوبتی برای  $\Psi_b$ ،  $\theta HT$  و  $T_b$  (50) به ترتیب  $268/32$   $^{\circ}\text{C h}$ ،  $268/32$   $\text{MPa}$ ،  $-1/302$   $\text{MPa}$  و  $8/36$   $^{\circ}\text{C}$  بود (جدول ۷).

جدول ۷. برآورد پارامترها از زمان دما رطوبتی در دماهای مختلف و پتانسیل‌های آب

$R^2$	$T_b$	$\Psi_b$ (50)	$\theta HT$
۸۶	۸/۳۶	-۱/۳۰۲	۲۶۸/۳۲

$\theta HT$  ثابت زمان دما رطوبتی (50) پتانسیل پایه.  $T_b$  دمای پایه؛  $R^2$  ضریب تبیین الگوی زمان دما رطوبتی.

پژوهش‌گران در گیاه گلرنگ مقدار زمان دما رطوبتی  $493$  (مگاپاسکال درجه سانتی‌گراد ساعت) پیش‌بینی کرده‌اند (Torabi *et al.*, 2016) و همچنین در گیاه کلزا مقدار زمان دما رطوبتی  $36$  (مگاپاسکال درجه سانتی‌گراد ساعت) پیش‌بینی کرده‌اند (Soltani *et al.*, 2006). در گزارش در گیاه سیب‌زمینی مقدار زمان دما رطوبتی را  $130$  (مگاپاسکال درجه سانتی‌گراد ساعت) پیش‌بینی کردند (Alvarado & Bradford, 2002). در گیاه پیاز مقدار عددی هیدرو زمان دمایی را  $48$  ( $\text{MPa h}^0\text{c}$ ) پیش‌بینی کرده‌اند (Rowse & Finch Savage, 2003). به‌طور کلی از مدل‌های زمان دما رطوبتی برای توصیف عوامل بیولوژیکی و محیطی و مقدار تأثیر این عوامل بر جوانه‌زنی جمعیت بذر استفاده می‌کند (Bradford, 2002). در گیاه شنبلله مقدار عددی هیدرو زمان دمایی را  $264/1$  ( $\text{MPa h}^0\text{c}$ ) پیش‌بینی شده است (Teimori *et al.*, 2021). در گیاه قهوه شیرازی مقدار عددی هیدرو زمان دمایی  $845/12$  ( $\text{MPa h}^0\text{c}$ ) پیش‌بینی کرده‌اند (Zaferanieh *et al.*, 2020).

با توجه خروجی‌های این مدل، در دمای پایه  $8/36$  درجه سانتی‌گراد، میزان زمان دما رطوبتی برابر  $3/302$  مگاپاسکال ساعت درجه سانتی‌گراد می‌باشد که نشان‌دهنده مقاومت به رطوبت‌های پایین در گیاه گوار می‌باشد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

مدل بتا به‌عنوان مدل برتر برای توصیف تأثیر دما بر سرعت جوانه‌زنی شناخته شد و از آن برای تخمین دمای کاردینال استفاده شد. تحت تأثیر پتانسیل مختلف آب، دامنه نوسان دمای پایه، دمای مطلوب و دمای حداکثر به ترتیب از  $7/31$  تا  $12/78$ ،  $24/8$  تا  $21/94$ ،  $36$  تا  $31$  درجه سانتی‌گراد متغیر بود. ساعت بیولوژیک در مدل بتا، با کاهش پتانسیل آب به‌طور خطی افزایش یافت و در دامنه حداقل تا حداکثر پتانسیل آب، ساعت بیولوژیک برای جوانه‌زنی این گیاه از  $148/3$  تا  $43/24$  ساعت تغییرات داشت. براساس نتایج، با کاهش پتانسیل آب، مقدار زمان دمایی و پتانسیل آب پایه افزایش می‌یابد. با افزایش دما از دمای پایه به دمای مطلوب، پتانسیل آب پایه کاهش یافت اما افزایش دما از دمای مطلوب به دمای حداکثر، باعث افزایش پتانسیل آب پایه شد. همچنین نتایج نشان داد هنگامی که با افزایش دما، مقدار زمان رطوبتی کاهش می‌یابد. مقادیر زمان دما رطوبتی تخمین زده‌شده برای دمای پایه، دمای پتانسیل آب پایه و زمان دما رطوبتی به ترتیب  $8/36$  درجه سانتی‌گراد،  $-1/302$   $\text{MPa}$  و  $268/32$   $^{\circ}\text{C h}$  برآورد شد. از داده‌های به‌دست‌آمده از این مدل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که گوار، گیاهی مقاوم به پتانسیل‌های پایین آب و دمای بالا بوده که برای کشت در مناطق خشک و نیمه‌خشک مناسب می‌باشد.

## ۵. تشکر و قدردانی

از زحمات کارکنان و رئیس محترم آزمایشگاه دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان و استاد محترم خانم دکتر بتول مهدوی، تشکر و قدردانی می‌گردد.

## ۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

## ۷. منابع مورد استفاده

- Ahmad, S., Opena, J.L., & Chauhan, B.S. (2015). Seed germination ecology of doveweed (*Murdannia nudiflora*) and its implication for management in dry-seeded rice. *Weed Science*, 63, 491-501. <https://doi.org/10.1614/WS-D-14-00115.1>
- Allen, P.S., Meyer, S.E., & Khan, M.A. (2000). Hydrothermal time as a tool in comparative germination studies. pp. 401-410 in Black, M.; Bradford, K.J.; Vázquez-Ramos, J. (Eds) *Seed biology: Advances and applications*. Wallingford, *CAB International*.
- Alvarado, V., & Bradford, K. J. (2002). A hydrothermal time model explains the cardinal temperatures for seed germination. *Plant Cell and Environment*, 24(8), 1061-1069. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2002.00894.x>
- Baath, G. S., Kakani, V. G., Gowda, P. H., Rocateli, A. C., Northup, B. K., Singh, H., & Katta, J. R. (2020). Guar responses to temperature: Estimation of cardinal temperatures and photosynthetic parameters. *Industrial Crops and Products*, 145, 111940-111949. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111940>
- Bradford, K. J. (2002). Applications of hydrothermal time to quantifying and modelling seed germination and dormancy. *Weed Science*, 50, 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)
- Bradford, K.J. (1995). Water relations in seed germination. pp. 351-396 in Kigel, J.; Galili, G. (Eds) *Seed development and germination*. New York, *Marcel Dekker*.
- Chamorro, D., Luna, B., Ourcival, J. M., Kavgacı, A., Sirca, C., Mouillot, F., & Moreno, J. M. (2017). Germination sensitivity to water stress in four shrubby species across the Mediterranean Basin. *Plant Biology*, 19(1), 23-31. <https://doi.org/10.1111/plb.12450>
- Fallahi, H. R., Mohammadi, M., Aghhavan-Shajari, M., & Ranjbar, F. (2015). Determination of germination cardinal temperatures in two basil (*Ocimum basilicum* L.) cultivars using non-linear regression models. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 2 (4), 140-145. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2015.09.004>
- Ghaderi-Far, F., Alimagham, S. M., Kameli, A. M., & Jamali, M. (2012). *Plantago ovata* Seed germination and emergence as affected by environmental factors and planting depth. *Journal of Plant Production*, 6, 1735-8043. doi=10.1.1.872.1981&rep=rep1&type=pdf
- Golzardi, F., Vazan, S., Moosavinia, H., & Tohidloo, G. (2012). Effects of salt and drought stresses on germination and seedling growth of swallow wort (*Cynanchum acutum* L.). *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4 (21), 4524-4529. doi=10.1.1.1056.3441&rep
- Grover, K., Singla, S., Angadi, S., Begna, S., Schutte, B., & Leeuwen, D. (2016). Growth and yield of guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) genotypes under different planting dates in the semi-arid southern high plains. *American Journal of Plant Sciences*, 7, 1246-1258. <http://dx.doi.org/10.4236/ajps.2016.78120>
- Grundy, A.C., Phelps, K., Reader, R.J., & Burston, S. (2000). Modelling the germination of *Stellaria media* using the concept of hydrothermal time. *New Phytology*, 148, 433-444. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00778.x>

- Gummerson, R. J. (1986). The effect of constant temperatures and osmotic potentials on the germination of sugar beet. *Journal of Experimental Botany*, 37(6), 729-741. <https://doi.org/10.1093/jxb/37.6.729>
- Hardegree, S. P., Jones, T. A., & Vactor, S. S. V. (2002). Variability in Thermal response of Primed and Non-Primed Seeds of Squirreltail [*Elymus elymoides* Raf. Swezey and *Elymus multisetus* JG Smith. ME Jones]. *Annals of Botany*, 89, 311-319.
- Hema, Y., & Shalendra, A. (2014). An analysis of performance of guar crop in india., guar cultivation practices p:17-31 Prepared by CCS National Institute of Agricultural Marketing and Jaipur for United States Department of Agriculture (USDA), *New Delhi*
- Jami Al-Ahmadi, M., & Kafi, M. (2007). Cardinal temperatures for germination of *Kochia scoparia* L. *Journal Arid Environment*, 68, 308-314.
- Kamkar, B., Jami Al-Ahmadi, 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, 192-198.
- Michel, B. E., & Kaufmann, M. R. (1973). The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiology*, 51 (5), 914-920. <https://dx.doi.org/10.1104%2Fpp.51.5.914>
- Onofri, A., Benincasa, P., Mesgaran, M. B., & Ritz, C. (2018). Hydrothermal-time-to-event models for seed germination. *European Journal of Agronomy*, 101: 129-139. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.08.011>
- Piper, E. L., Boote, K. J., Jones, J. W., & Grimm, S. S. (1996). Comparison of two phenology models for predicting flowering and maturity date of soybean. *Crop Science*, 36, 1606–1614. <https://doi.org/10.2135/cropsci1996.0011183X003600060033x>
- Rai, P. S., Dharmatti, P. R., Shashidhar, T. R., Patil, R. V., & Patil, B. R. (2012). Genetic variability studies in clusterbean [*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub]. *Karnataka Journal of Agricultural Sciences*, 25(1), doi=10.1.1.988.3128&rep=rep1&type=pdf
- Ritchie, J. T. (1991). Wheat phasic development. *Modeling Plant and Soil Systems*, 31, 31-54. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr31.c3>
- Rouan, L., Audebert, A., Luquet, D., Roques, S., Dardou, A., & Gozé, E. (2018). Cardinal temperatures variability within a tropical japonica rice diversity panel. *Plant Production Science*, 21 (3), 256-265. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2018.1467733>
- Rowse, H. R., & Finch-Savage, W. E. (2003). Hydrothermal threshold models can describe the germination response of carrot (*Daucus carota*) and onion (*Allium cepa*) seed populations across both sub and supra-optimal temperature. *New Phytology*, 158, 101-108. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00707.x>
- Sampayo-Maldonado, S., Ordoñez-Salanueva, C. A., Mattana, E., Ulian, T., Way, M., Castillo-Lorenzo, E., & Flores-Ortiz, C. M. (2019). Thermal Time and Cardinal Temperatures for Germination of *Cedrela odorata* L. *Forests*, 10 (10), 841-849. <https://doi.org/10.3390/f10100841>
- Sester, M., Tricault, Y., Darmency, H., & Colbach, N. (2008). GeneSys-Beet: A model of the effects of cropping systems on gene flow between sugar beet and weed beet. *Field Crops Res.* 107, 245-256.
- Sevik, H., & Cetin, M. (2015). Effects of water stress on seed germination for select land scape plants. *Polish Journal of Environmental Studies*, 24 (2), 689-693. <https://doi.org/10.15244/pjoes/30119>
- Soltani, A., Robertson, M. J., Torab, B., Yousefi-Daz, M., & Sarparast, R. (2006). Modelling seedling emergence in chickpea as influenced by temperature and sowing depth. *Agricultural and Forest Meteorology*, 138, 156-167. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.04.004>
- Teimori, H., Balouchi, H., Moradi, A., & Soltani, E. (2021). Quantifying seed germination response of deteriorated *Trigonella foenum-graecum* L. seed to temperatures and water potentials: Thermal time, hydrottime and hydrothermal time models. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 20, 100276. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2020.100276>

- Tolyat, M. A., Afshari, R. T., Jahansoz, M. R., Nadjafi, F., & Naghdibadi, H. A. (2014). Determination of cardinal germination temperatures of two ecotypes of *Thymus daenensis* daenensis. *Seed Science and Technology*, 42 (1), 28-35. <https://doi.org/10.15258/sst.2014.42.1.03>
- Torabi, B., Attarzadeh, M., & Soltani, A. (2013). Germination response to temperature in different safflower (*Carthamus tinctorius*) Cultivars. *Seed Technology*, 47-59.
- Yadav, R. S., Hash, C. T., Bidinger, F. R., Devos, K. M., & Howarth, C. J. (2004). Genomic regions associated with grain yield and aspects of postflowering drought tolerance in pearl millet across environments and tester background, *Euphytica* 136, 265-277. DOI: 10.1023/B:EUPH.0000032711.34599.3a
- 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. doi: 10.1016/j.sajb.2020.02.006