

مدل‌سازی جوانه‌زنی کلزای خودرو تحت تأثیر دما و پتانسیل آب: مدل هیدروترمال تایم affected by temperature and water Seed germination modeling of volunteer canola as potential: hydrothermal time model

الیاس سلطانی^۱، مصطفی اویسی^{۱*}، افشین سلطانی^۲، سراله گالشی^۲، فرشید قادری‌فر^۲، ابراهیم زینلی^۲

چکیده:

در این تحقیق مدل‌سازی جوانه‌زنی کلزای خودرو به‌خوبی انجام شد. برای توصیف واکنش سرعت جوانه‌زنی به دما از تابع سگمنتد استفاده شد. با توجه به مدل سگمنتد، دمای پایه کلزای خودرو در پتانسیل آب صفر حدود ۲/۷۳ درجه سانتی‌گراد بود و با کاهش پتانسیل آب دمای پایه به تدریج افزایش یافت و در پتانسیل آب ۰/۸- مگاپاسکال به حدود ۶/۷ درجه سانتی‌گراد رسید. ضرایب تبیین مدل هیدروترمال تایم برای دماهای زیر و فوق مطلوب به ترتیب ۰/۹۴ و ۰/۹۶ بود که حاکی از توصیف خوب مدل در پیش‌بینی جوانه‌زنی کلزای خودرو در واکنش به دما و پتانسیل آب است. ثابت هیدروترمال تایم در دمای زیرمطلوب (۳۶/۲ مگاپاسکال در درجه روز) کمتر از دماهای فوق مطلوب (۴۲/۹ مگاپاسکال در درجه روز) بود. پارامترها و روابطی که در این مقاله به دست آمدند می‌توانند در مدل‌های شبیه‌سازی پویایی بانک بذر یا برای ساخت یک مدل جدید استفاده شوند. همچنین نتایج این تحقیق می‌تواند برای مطالعات آبی در مورد بیولوژی و اکولوژی کلزای خودرو مفید باشد.

واژه‌های کلیدی: علف هرز، دماهای کاردینال، پتانسیل پایه جوانه‌زنی، بانک بذر.

مقدمه

شکوفایی میوه پس از رسیدگی و خشک‌شدن است و به همین دلیل ریزش زیادی دارد. از طرفی بذور کلزا فاقد رکود اولیه هستند، ولی چنانچه وارد خاک شوند دچار رکود ثانویه (کمون

کلزا (*Brassica napus*) یک گیاه زراعی دانه روغنی است که امروزه کشت آن به‌شدت گسترش یافته است. یک ویژگی نامطلوب در کلزا که حتی در ارقام اصلاح‌شده نیز باقی مانده است،

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۹/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۸/۲۰

- ۱- استادیار گروه علوم زراعی و اصلاح نباتات، دانشگاه تهران پردیس ابوریحان
- ۲- عضو هیئت علمی گروه زراعت دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

*- نویسنده مسئول Email: moveisi@ut.ac.ir

و محیط‌های شیمیایی نیاز می‌باشد (Bewley & Black, 1994; Baskin & Baskin, 2001) در بین این عوامل محیطی برای بذرهای بدون کمون، دما و رطوبت زمانی که تهویه مناسب باشد، دارای اهمیت بیشتری هستند (Bradford, 2004; Bradford & Still, 1990). دما و رطوبت می‌توانند با هم یا به طور جداگانه بر درصد و سرعت جوانه‌زنی اثر گذارند (Bloomberg *et al.*, 2009). نوعی از مدل‌های ریاضی برای شرح رابطه بین سرعت جوانه‌زنی و دما استفاده شده است (Shafii & Price, 2001; Soltani *et al.*, 2006). امتیاز این توابع این است که پارامترهای این مدل‌ها دارای مفهوم بیولوژیکی هستند، مانند دماهای کاردینال و سرعت ذاتی جوانه‌زنی و سبز شدن. بنابراین برخی از محققین از این مدل‌ها برای به دست آوردن دماهای کاردینال یعنی دمای پایه، دمای مطلوب و دمای سقف استفاده کرده‌اند (Jame & Hardegree, 2006; Cutforth, 2004; Hardegree & Winstral, 2006; Jami Al-Ahmadi & Kafi, 2007).

برخی محققین نیز از مدل ترمال‌تایم برای توصیف واکنش جوانه‌زنی به دما استفاده نموده‌اند (Bierhuizen & Wagenvoort, 1974; Larsen *et al.*, 2004). بر طبق این مدل، ترمال-تایم برای جوانه‌زنی $\theta_T(g)$ (بر حسب درجه روز) برای یک درصد جوانه‌زنی خاص (g) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\theta_T(g) = (T - T_b)t_g \quad (1)$$

می‌شوند. در نتیجه در فصل زراعی بعدی نیز مشکل‌ساز خواهند بود (Soltani *et al.*, 2011). کلزای خودرو به عنوان علف‌هرز، معمولاً در مزارعی نظیر گندم و سویا در منطقه گرگان مشاهده می‌شود (Soltani *et al.*, 2011). ریزش زیاد دانه این گیاه می‌تواند منجر به کاهش عملکرد و افزایش ذخیره بانک بذر شود. مطالعات نشان داده است که میانگین هدررفت دانه کلزا در زمان برداشت تقریباً ۶ درصد است که معادل ۳۶۰۰ بذر در مترمربع یا ۱۰۷ کیلوگرم در هکتار خواهد بود (Gulden *et al.*, 2003). مقدار بذر مصرفی کلزا در هنگام کاشت حدود ۵ کیلوگرم در هکتار است، بنابراین مقدار بذری که در مزرعه ریزش می‌کند ۲۰ برابر مقدار بذر مصرفی در هنگام کاشت است که با این افزایش در بانک بذر می‌تواند در هنگام برداشت کلزای خودرو به‌آسانی استقرار یابد (Lawson & Friesen, 2006). دلایل افزایش کلزای خودرو در سیستم‌های زراعی (۱) استفاده از ارقام اصلاح ژنتیکی‌شده، (۲) استفاده از ارقام کلزای مقاوم به علف‌کش و (۳) افزایش سطح زیرکشت سالانه کلزا گزارش شده است (Lawson & Friesen, 2006).

جوانه‌زنی یک فرآیند فیزیولوژیک پیچیده است که تحت تأثیر عوامل ژنتیکی و عوامل محیطی قرار می‌گیرد (Foley & Fennimore, 2000; Meyer & Pendleton, 1998). عوامل محیطی تنظیم‌کننده جوانه‌زنی برای بذرهای بدون کمون شامل دما، آب و اکسیژن می‌شود و برای بذرهای دارای کمون علاوه بر این عوامل، به نور

متناسب با ψ کاهش می‌یابد و به $\psi_b(g)$ نزدیک می‌شود.

برادفورد و استیل (Bradford & Still, 2004) نشان دادند که می‌توان معادله (۴) را به شکل معادله (۵) ارائه کرد که رابطه بین پتانسیل آب و سرعت جوانه‌زنی (GR_g) را نشان می‌دهد:

$$GR_g = 1/t_g = [\psi - \psi_b(g)]/\theta_H \quad (۴)$$

بنابراین قرار دادن سرعت جوانه‌زنی در برابر پتانسیل آب، خطی مستقیم با شیب $1/\theta_H$ می‌دهد که عرض از مبدا آن روی محور پتانسیل آب مساوی با $\psi_b(g)$ است (Bradford & Still, 2004). اگر این رابطه برای درصدهای جوانه‌زنی مختلف پلات شوند، یک سری خطوط موازی با شیب یکسان ($1/\theta_H$) ولی عرض از مبدا متفاوت ($\psi_b(g)$) ایجاد می‌شود. بنابراین، نوسان نسبی یک مقدار معین ψ_b در جمعیت بذری منحنی زنگوله‌ای نرمال است، که می‌تواند با میانگین ($\psi_b(50)$) و انحراف معیار (σ_{ψ_b}) تعریف شود (Bradford, 1997; Bradford & Still, 2004).

مدل ترمال‌تایم و هیدروتایم با یکدیگر ترکیب شده‌اند و از مدل هیدروترمال‌تایم برای توصیف ترکیب اثر دما و رطوبت بر جوانه‌زنی استفاده شده است (Gummerson, 1986; Bradford, 1995; Allen et al., 2000). فرض اصلی مدل هیدروترمال‌تایم این است که، دمای پایه برای جوانه‌زنی بذرهایی که در کمون نیستند مستقل از

که T دمای واقعی، T_b دمای پایه برای جوانه‌زنی و t_g زمان برای جوانه‌زنی درصدی خاص از بذرها است. از آنجایی که سرعت جوانه‌زنی (GR) عکس زمان تا خروج ریشه‌چه درصد خاصی از جمعیت است می‌توان معادله (۲) را به صورت زیر بیان کرد (Bradford & Still, 2004):

$$GR = 1/t_g = (T - T_b)/\theta_{t(g)} \quad (۲)$$

هیدروتایم^۱ مدلی است که الگوی جوانه‌زنی در واکنش به پتانسیل آب در محیط بذر شرح می‌دهد. گومرسون (Gummerson, 1986) نشان داد که، زمان برای جوانه‌زنی به بزرگی اختلاف بین پتانسیل آب بذر با محیط آن و آستانه پتانسیل فیزیولوژیکی برای خروج ریشه‌چه (ψ_b) بستگی دارد. لارسن و همکاران (Larsen et al., 2004) و برادفورد و استیل (Bradford & Still, 2004) نشان دادند که، می‌توان رابطه جوانه‌زنی با پتانسیل آب را توسط مدل هیدروتایم (معادله ۴) توصیف کرد:

$$\theta_H = (\psi - \psi_b(g))t_g \quad (۳)$$

که در این رابطه θ_H ثابت هیدروتایم، ψ پتانسیل واقعی بذر، $\psi_b(g)$ پتانسیل پایه یا آستانه برای جوانه‌زنی کسر خاصی از بذور (g) و t_g زمان برای خروج ریشه‌چه کسر خاصی از بذور هستند. اگر θ_H ثابت باشد t_g به طور

^۱ Hydrottime

در پیش‌بینی سبزشدن علف‌های هرز در واکنش به دما و پتانسیل آب که دو عامل اصلی مؤثر بر جوانه‌زنی بذرهای بدون کمون هستند، کاربرد دارند. با توجه به محدود بودن اطلاعات در این زمینه، هدف از این آزمایش تعیین دماهای کاردینال، پتانسیل پایه، مقادیر ترمال تایم، هیدروتایم و هیدروترمال تایم برای گونه کلزای خودرو بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در آزمایشگاه تکنولوژی بذر گروه زراعت دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شد. این آزمایشگاه مجهز به ۷ دستگاه انکوباتور بود. بنابراین، در این آزمایش همه تیمارهای دمایی همزمان و در آبان ماه ۱۳۸۹ آغاز شدند. بذور کلزای خودرو و خردل وحشی آنچنان که در فصل دوم اشاره شد، تهیه شدند. ۴ تکرار ۵۰ بذری از کلزای خودرو در دامنه دمایی ۵ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد در ترکیب با پتانسیل آب صفر، ۰/۲-، ۰/۴-، ۰/۶- و ۰/۸- مگاپاسکال مورد آزمون جوانه‌زنی قرار گرفتند. برای ایجاد پتانسیل‌های آب مختلف از پلی‌اتیلن گلاکول ۸۰۰۰ استفاده شد. ۲۴ ساعت قبل از شروع آزمایش کاغذ صافی‌ها در محلول‌های مختلف تولیدشده قرار داده شدند.

بازدید بذرها هر روز دو بار صورت می‌گرفت و معیار بذور جوانه زده خروج ریشه چه به اندازه ۲ میلی‌متر یا بیشتر بود (ISTA, 2009). در طول آزمایش در صورت نیاز محلول مربوطه به ظرف‌های پتری اضافه شد. برای محاسبه درصد و سرعت جوانه‌زنی بذور از

پتانسیل آب است، و این که پتانسیل آب پایه برای درصد جوانه‌زنی مستقل از دما است (Bradford, 1995). این فرض در برخی مطالعات تغییر کرد (Gummerson, 1986; Cheng & Bradford, 1999; Grundy, *et al.*, 2000)، به طوری که، در برخی موارد پتانسیل آب پایه با تغییر دما تغییر کرد (Dahal & Bradford, 1994; Alvarado & Bradford, 2002) و همچنین دمای پایه می‌تواند با کاهش پتانسیل آب افزایش یابد (Fyfield & Gregory, 1989; Kebreab & Murdoch, 1999). به هر حال اثر متقابل بین پتانسیل آب و دما معمول نیست. آلن و همکاران (Allen *et al.*, 2000) به طور موفقیت آمیزی از مدل هیدروترمال تایم به عنوان ابزاری برای مقایسه واکنش جوانه‌زنی گونه‌های مختلف به رطوبت و دما استفاده کردند. ایشان ذکر کردند که، در برخی گونه‌ها برازش مدل مناسب نبود و اگر آنالیز هیدروترمال تایم برای هر دما به طور جداگانه برازش یابد، این برازش می‌تواند بهبود یابد. مطالعات دیگری نیز نشان داده است که پارامترهای هیدروتایم ممکن است با دما تغییر یابند (Ni & Bradford, 1992; Dahal & Bradford, 1994; Alvarado & Bradford, 2002). بنابراین، در هنگام استفاده از مدل هیدروترمال تایم در مطالعات جوانه‌زنی مقایسه‌ای باید به امکان اثرات متقابل دما و رطوبت بر جوانه‌زنی توجه شود، و قابلیت کاربرد مدل باید برای هر گونه ارزیابی شود.

مقادیر هیدروترمال تایم و مقادیر دما و پتانسیل پایه در مدلسازی پویایی بانک بذر مورد نیاز هستند (Sester *et al.*, 2007). این پارامترها

(Soltani *et al.*, 2006; Soltani *et al.*, 2008a)

تابع سگمنت^۲:

$$f(T) = \frac{(T - T_b) / (T_o - T_b)}{\text{if } T_b < T \leq T_o} \quad (3)$$

$$f(T) = \frac{(T_c - T) / (T_c - T_o)}{\text{if } T_o < T < T_c}$$

$$\text{if } f(T) = 0$$

$$T \leq T_b \text{ or } T \geq T_c$$

در این روابط T ، دما؛ T_b ، دمای پایه؛ T_o ، دمای مطلوب و T_c ، دمای سقف است. پارامترها با استفاده از رگرسیون غیر خطی (سرعت جوانه-زنی به عنوان y و دما به عنوان x) و روش کمترین توان‌های دوم با رویه NLIN محاسبه شدند.

مدل ترمال تایم (TT) در دماهای زیر (۴) و فوق (۵) مطلوب به داده‌ها برازش داده شدند (Bradford, 2002):

$$TT_{sub} = (T - T_b) t_g \quad (4)$$

$$TT_{supra} = (T_c - T) t_g \quad (5)$$

که T دمای محیط، T_b و T_c دمای پایه و دمای سقف هستند و t_g زمان تا جوانه‌زنی برای g . مدل هیدروتایم که به داده‌ها برازش داده شد به صورت زیر بود (Gummerson, 1986; Bradford, 1990; Bradford, 2002):

$$HT = (\psi - \psi_{b(g)}) t_g \quad (6)$$

برنامه Germin (Soltani & Madah, 2010) استفاده شد که این برنامه D10 (یعنی مدت زمانی که طول می‌کشد تا جوانه زنی به ۱۰ درصد حداکثر خود برسد)، D50 (یعنی مدت زمانی که طول می‌کشد تا جوانه زنی به ۵۰ درصد حداکثر خود برسد) و D90 (مدت زمانی که طول می‌کشد تا جوانه زنی به ۹۰ درصد حداکثر خود برسد) را محاسبه می‌کند. این برنامه این پارامتر را برای هر تکرار و هر تیمار بذری از طریق درونیابی^۱ منحنی افزایش جوانه زنی در مقابل زمان محاسبه می‌کند. سرعت جوانه زنی (در ساعت) از طریق فرمول زیر محاسبه شد (Soltani *et al.*, 2001; 2002):

$$R50 = 1/D50 \quad (1)$$

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

$$R50 = f(T) R_{max} \quad (2)$$

در این رابطه $f(T)$ تابع دما است که از صفر در دمای پایه و سقف تا ۱ در دمای مطلوب تغییر می‌کند، R_{max} حداکثر سرعت ذاتی جوانه‌زنی در دمای مطلوب است. بنابراین I/R_{max} حداقل ساعت تا جوانه‌زنی را در دمای مطلوب نشان می‌دهد. تابع دمایی سگمنتد برای بررسی واکنش جوانه‌زنی بذرهای کلزای خودرو آزمون شد

². Segmented

¹- Interpolation

نتایج و بحث

سرعت و درصد جوانه‌زنی به شدت تحت تأثیر پتانسیل آب و دما قرار گرفتند (شکل ۱). تخمین دماهای کاردینال و R_{max} در جدول (۱) نشان داده شده‌اند؛ دمای پایه بین ۲/۷ تا ۶/۷ درجه سانتی‌گراد بود، دمای مطلوب بین ۲۰/۶ تا ۲۷ درجه سانتی‌گراد تغییر کرد و دمای سقف بین ۳۳/۳ تا ۴۲ درجه سانتی‌گراد بود. ترمال تایم برای ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی در دماهای زیر مطلوب از ۲۹/۵ درجه سانتی‌گراد بر روز (در پتانسیل آب صفر مگاپاسکال) به ۵۷/۹ درجه سانتی‌گراد بر روز (در پتانسیل آب ۰/۸- مگاپاسکال) افزایش یافت (جدول ۱). در دماهای فوق مطلوب ترمال تایم برای ۵۰ درصد جوانه‌زنی بین ۱۶ تا ۲۲ درجه سانتی‌گراد روز تغییر داشت. مقادیر ضریب تبیین از ۰/۹۱ تا ۰/۹۷ در دماهای زیرمطلوب و از ۰/۹۸ تا ۰/۹۹ برای دماهای فوق مطلوب تغییر داشت. این مقادیر ضریب تبیین حاکی از برازش خوب مدل ترمال تایم برای توصیف سرعت جوانه‌زنی به دما در پتانسیل‌های آب مختلف است.

۱. درصد جوانه‌زنی تجمعی و مدل هیدروتایم برازش داده شده به داده‌ها برای هر دما به صورت جداگانه در شکل (۱) نشان داده شده است. زمان تا جوانه‌زنی پیش‌بینی شده در پتانسیل‌های آب مختلف به خوبی به داده‌های واقعی برازش داده شدند. به طوریکه مقادیر ضریب تبیین برای این برازش‌ها بین ۰/۹۸ تا ۰/۹۹ تغییر داشت (جدول ۲). مقادیر پیش‌بینی شده پتانسیل پایه و انحراف معیار پتانسیل پایه که نشان دهنده یکنواختی

که در این رابطه HT ثابت هیدروتایم (مگاپاسکال در روز)، ψ پتانسیل آب محیط (مگاپاسکال)، $\psi_b(g)$ پتانسیل پایه برای جوانه‌زنی کسری از جمعیت بذور (g) و t_g زمان (روز) برای جوانه‌زنی g.

هنگامی که بذور در دمای زیرمطلوب قرار داشته باشند و پتانسیل آب تغییر کند، سرعت جوانه‌زنی را می‌توان براساس مدل هیدروترمال تایم (HTT) به صورت زیر توصیف کرد (Gummerson, 1986; Bradford, 1990; Bradford, 2002):

$$HTT = (\psi - \psi_{b(g)}) (T - T_b) t_g \quad (7)$$

که در این رابطه HTT ثابت هیدروترمال تایم (مگاپاسکال بر درجه روز) است یعنی ترکیبی از ترمال تایم تجمعی در دماهای بالاتر از دمای پایه و هیدروتایم تجمعی در پتانسیل‌های بالاتر از پتانسیل پایه.

برای دماهای فوق مطلوب معادله ۷ به صورت پایین اصلاح شد (Alvarado & Bradford, 2002; Bradford, 2002; Rowse & Finch-Savage, 2003):

$$HTT = \left\{ \psi - [\psi_{b(g)} + [k_T(T - T_o)]] \right\} (T_o - T_b) t_g \quad (8)$$

که در این رابطه k_T ثابت مدل است (شیب خط پتانسیل پایه در مقابل دما در دماهای بیشتر از دمای مطلوب) و $\psi_b(g)$ مقدار پتانسیل پایه در دمای مطلوب است. همه این مدل‌ها با استفاده از SAS و رویه nlin به داده‌ها برازش داده شدند.

داشت (جدول ۲). کمترین مقدار پتانسیل پایه و بیشترین مقدار هیدروتایم در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. پتانسیل پایه از ۳/۱- مگاپاسکال در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد به ۰/۷۶- مگاپاسکال در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. ثابت هیدروتایم نیز از ۳۷/۳ مگاپاسکال بر روز در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد به ۱/۳ مگاپاسکال بر روز در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت.

پارامترهای مربوط به مدل هیدروترمال تایم در دماهای زیر و فوق مطلوب در جدول (۳) نشان داده شده است. مقادیر ضریب تبیین برای دماهای زیر و فوق مطلوب به ترتیب ۰/۹۴ و ۰/۹۶ بودند که نشان‌دهنده این است که مدل بخش اعظمی از تغییرات را در دامنه‌ای از دماها و پتانسیل‌های آب پوشش می‌دهد. مقادیر هیدروترمال تایم در دماهای زیرمطلوب کمتر از دماهای فوق مطلوب بود (جدول ۳). براساس این مدل بذور کلزای خودرو در دماهای زیرمطلوب برای جوانه‌زنی خود به ۳۶/۲ مگاپاسکال درجه روز و در دماهای فوق مطلوب به حدود ۴۳ مگاپاسکال درجه روز نیاز دارند. در مورد اثرات متقابل دما و تنش خشکی بر جوانه‌زنی مطالعاتی در گیاهان مختلف انجام شده است (Livingston & Jong, 1990; Anda & Pinter, 1994; Hucl, 1993; Blumenthal et al., 1996). در مطالعه‌ای که آندا و پینتر (Anda & Pinter, 1994) بر روی سورگوم انجام دادند گزارش کردند که واکنش درصد سبزشدن این گیاه با افزایش دما در پتانسیل‌های مختلف خشکی متفاوت است.

جوانه‌زنی است، و هیدروتایم برای ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی بین دماهای مختلف تفاوت داشت (جدول ۲-۵). کمترین مقدار پتانسیل پایه و بیشترین مقدار هیدروتایم در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. پتانسیل پایه از ۳/۱- مگاپاسکال در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد به ۰/۷۶- مگاپاسکال در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. ثابت هیدروتایم نیز از ۳۷/۳ مگاپاسکال بر روز در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد به ۱/۳ مگاپاسکال بر روز در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت.

در دماهای فوق مطلوب ترمال تایم برای ۵۰ درصد جوانه‌زنی بین ۱۶ تا ۲۲ درجه سانتی‌گراد روز تغییر داشت. مقادیر ضریب تبیین از ۰/۹۱ تا ۰/۹۷ در دماهای زیرمطلوب و از ۰/۹۸ تا ۰/۹۹ برای دماهای فوق مطلوب تغییر داشت. این مقادیر ضریب تبیین حاکی از برازش خوب مدل ترمال تایم برای توصیف سرعت جوانه‌زنی به دما در پتانسیل‌های آب مختلف است.

درصد جوانه‌زنی جمععی و مدل هیدروتایم برازش داده شده به داده‌ها برای هر دما به صورت جداگانه در شکل (۱) نشان داده شده است. زمان تا جوانه‌زنی پیش‌بینی شده در پتانسیل‌های آب مختلف به‌خوبی به داده‌های واقعی برازش داده شدند. به طوریکه مقادیر ضریب تبیین برای این برازش‌ها بین ۰/۹۸ تا ۰/۹۹ تغییر داشت (جدول ۲). مقادیر پیش‌بینی شده پتانسیل پایه و انحراف معیار پتانسیل پایه که نشان دهنده یکنواختی جوانه‌زنی است، و هیدروتایم برای ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی بین دماهای مختلف تفاوت

می‌تواند به وسیله قابلیت دسترسی به آب تغییر کند (Rowse & Finch-Savage, 2003).

تحقیقات مختلفی برای تعیین ضرایب هیدروترمال تایم در گیاهان مختلف صورت گرفته است. برای مثال: لارسن و همکاران (Larsen *et al.*, 2004) نشان دادند که ضرایب هیدروترمال تایم در ارقام مختلف فسکیو قرمز، چچم و علف کنتاکی به ترتیب حدود ۸۴، ۶۵ و ۲۶۸ مگاپاسکال درجه روز بود. وات و همکاران (Watt *et al.*, 2010) نشان دادند که ثابت هیدروترمال تایم برای دو گونه *Pinus radiata* و *Buddleja davidii* به ترتیب حدود ۱۶۵ و ۱۰۵ مگاپاسکال درجه روز بود. آلواردو و برادفورد (Alvarado & Bradford, 2002) گزارش نمودند که ثابت هیدروترمال تایم برای سیب‌زمینی در دماهای زیرمطلوب و فوق‌مطلوب به ترتیب ۲۰۹۰ و ۱۳۰ مگاپاسکال درجه ساعت بود. بلومبرگ و همکاران (Bloomberg *et al.*, 2009) با سه روش مختلف مدل هیدروترمال تایم را برای *Pinus radiata* برازش دادند و نشان دادند که با روش‌های مختلف ضریب هیدروترمال تایم بین ۱۴۹ تا ۱۷۶ مگاپاسکال درجه روز تغییر کرد. رز و فینچ‌ساواج (Rowse & Finch-Savage, 2003) مقادیر هیدروترمال تایم را برای هویج و پیاز به ترتیب حدود ۴۸ و ۴۷ مگاپاسکال درجه روز به دست آوردند. تاکنون هیچ تحقیقی در مورد مدل هیدروترمال تایم برای این گونه صورت نگرفته است، ولی اسکویری (Squire, 1999) نشان داد که دمای پایه برای سبزشدن کلزا حدود ۱- درجه سانتی‌گراد است.

نامبردگان گزارش کردند که در پتانسیل ۰/۲- مگاپاسکال بین دماها از لحاظ درصد سبز شدن تفاوت معنی‌داری وجود ندارد. اما در پتانسیل ۰/۰۴- مگاپاسکال با افزایش دما درصد سبزشدن به طور خطی افزایش یافت که به ازای هر درجه افزایش دما از ۹ تا ۱۶ درجه سانتی‌گراد، درصد افزایش سبز شدن سورگوم در پتانسیل ۰/۰۴- مگاپاسکال ۴/۲ درصد و در پتانسیل ۰/۲- مگاپاسکال ۰/۶۴ درصد بود. همچنین نامبردگان بیان داشتند که در پتانسیل ۰/۰۴- مگاپاسکال، بذرها در دمای ۱۶ درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد ۸ روز دیرتر سبز شدند. در مطالعه‌ای دیگر بر روی علف بام (*Downy brome*)، ماسی (Masse, 1976) گزارش کرد که شرایط مطلوب دمایی و رطوبتی برای جوانه‌زنی این گیاه بین ۱۵ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد و ۰/۰۳- تا ۰/۴- مگاپاسکال می‌باشد. عوامل محیطی اغلب در تنظیم جوانه‌زنی بذرها با یکدیگر اثر متقابل دارند. برای مثال کبراب و مردوخ (Kebreab & Murdoch, 1999) در گل‌جالیز گزارش کرد که بذرها در دمای مطلوب در سطوح پایین‌تری از پتانسیل آب جوانه می‌زنند. همچنین گزارش شده است که پتانسیل آب پایه برای جوانه‌زنی بذرها گیاهان زراعی با افزایش دما در بالاتر از دمای مطلوب افزایش می‌یابد (Alvarado & Bradford, 2002; Rowse & Finch-Savage, 2003). علاوه بر آن گزارش شده است که روابط بین سرعت جوانه‌زنی و دما

۵ درجه سانتی‌گراد حدود ۳۷ مگاپاسکال بر روز بود و با افزایش دما کاهش نشان داد. ضرایب هیدروترمال تایم نیز برای این گونه تعیین شدند که به ترتیب در دماهای زیر و فوق مطلوب عبارت از ۳۶ و ۴۳ مگاپاسکال درجه روز بودند.

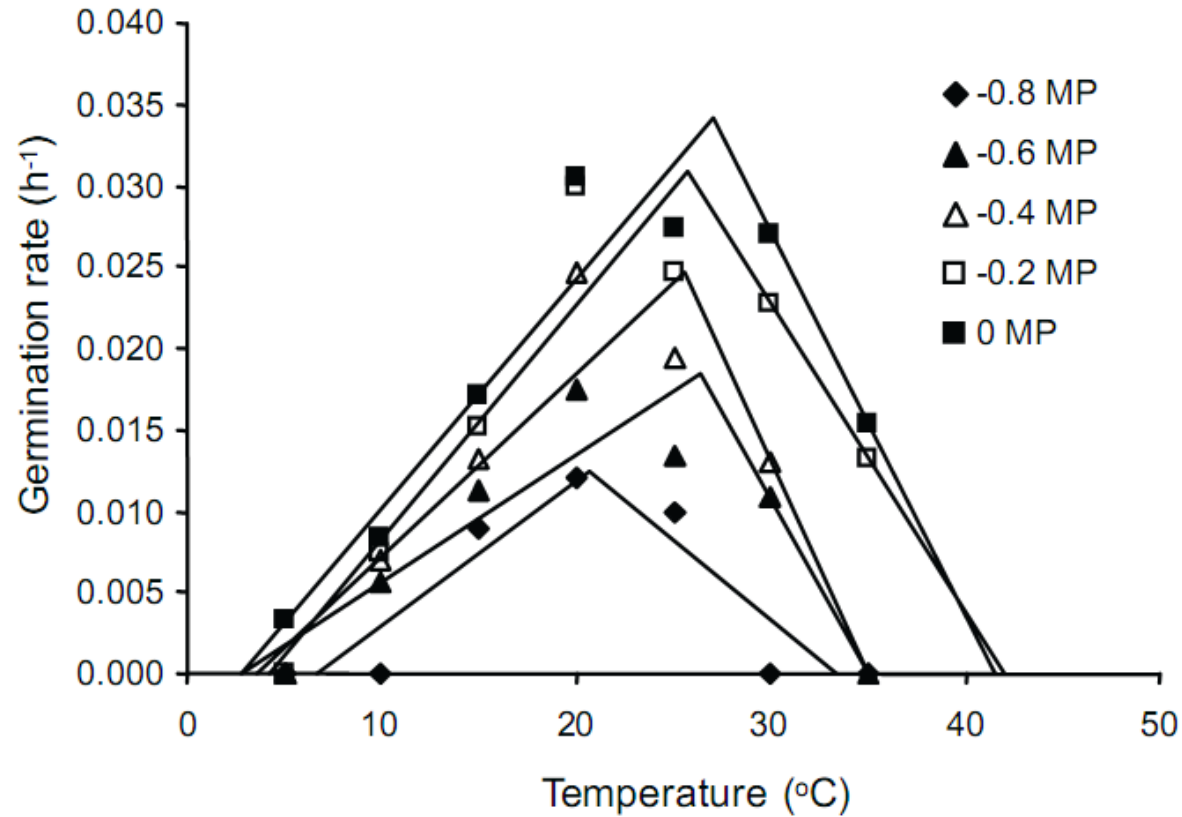
امتیاز مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق در این است که پارامترهای این مدل‌ها دارای مفاهیم بیولوژیکی هستند. با استفاده از مدل‌سازی جوانه‌زنی می‌توان اثرات زوال بذر، پرابمینگ بذر و کمون بذر را مورد مطالعه قرار داد. همچنین از این مدل‌ها برای تعیین دماهای کاردینال جوانه‌زنی و سبزشدن، تعیین پتانسیل پایه برای جوانه‌زنی و تعیین زمان جوانه‌زنی و سبزشدن استفاده شده است (Soltani *et al.*, 2008b). سلطان‌ی و همکاران (Soltani *et al.*, 2008b) گزارش نمودند که کاربرد این مدل‌ها در ایران کمتر مشاهده شده است و می‌توان از این مدل‌ها بیشتر در تحقیقات علوم بذر و به خصوص در واکنش جوانه‌زنی به دما و پتانسیل آب استفاده نمود. از طرفی پارامترهای به دست آمده در این تحقیق برای مدل‌های پیش‌بینی پویایی بانک بذر (نظیر مدل‌های GeneSys) (Sester *et al.*, 2007) و ALOMYSYS (Colbach *et al.*, 2006) مورد نیاز هستند.

این در حالی بود که مارشال و اسکویری (Marshall & Squire, 1996) با استفاده از رگرسیون غیرخطی برای ۳ گونه کلزا نشان دادند که دمای پایه برای جوانه‌زنی حدود ۳ درجه سانتی‌گراد است.

نتیجه‌گیری

بذرهای کلزای خودرو در دمای پایه کمتر از ۲/۷ درجه سانتی‌گراد قادر به جوانه‌زنی نبودند و تنش خشکی توانست دمای پایه برای جوانه‌زنی را تا حدود ۷ درجه سانتی‌گراد افزایش دهد. دمای مطلوب برای جوانه‌زنی کلزای خودرو حدود ۲۵ درجه سانتی‌گراد بود و در خشکی شدید ۰/۸- مگاپاسکال دمای مطلوب به حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. دمای سقف کلزای خودرو حدود ۴۰ درجه سانتی‌گراد بود و با کاهش پتانسیل آب تا ۰/۸- مگاپاسکال به حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. ترمال تایم مورد نیاز برای جوانه‌زنی کلزای خودرو در دماهای زیر و فوق مطلوب به ترتیب حدود ۳۰ و ۱۸ درجه سانتی‌گراد بر درجه روز بود. در دماهای زیرمطلوب کاهش پتانسیل آب موجب افزایش ترمال تایم برای جوانه‌زنی شد ولی در دماهای فوق مطلوب این تغییر کمتر بود. میانگین پتانسیل پایه برای جوانه‌زنی کلزای خودرو در دماهای مختلف حدود ۱/۲- مگاپاسکال بود. کمترین پتانسیل پایه برای جوانه‌زنی این گونه در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد (۳/۱- مگاپاسکال) و بیشترین پتانسیل پایه برای جوانه‌زنی در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد (۰/۸- مگاپاسکال) حاصل شد. هیدروتایم برای جوانه‌زنی کلزای خودرو در دمای

"مدل سازی جوانه زنی کلزای خودرو تحت تأثیر دما و پتانسیل آب ..."



شکل ۱- تابع دمایی سگمتند مورد استفاده برای توصیف سرعت جوانه زنی کلزای خودرو در مقابل دما در دامنه‌ای از پتانسیل‌های آب مختلف. نقاط داده‌های واقعی و خطوط مدل را نشان می‌دهند.

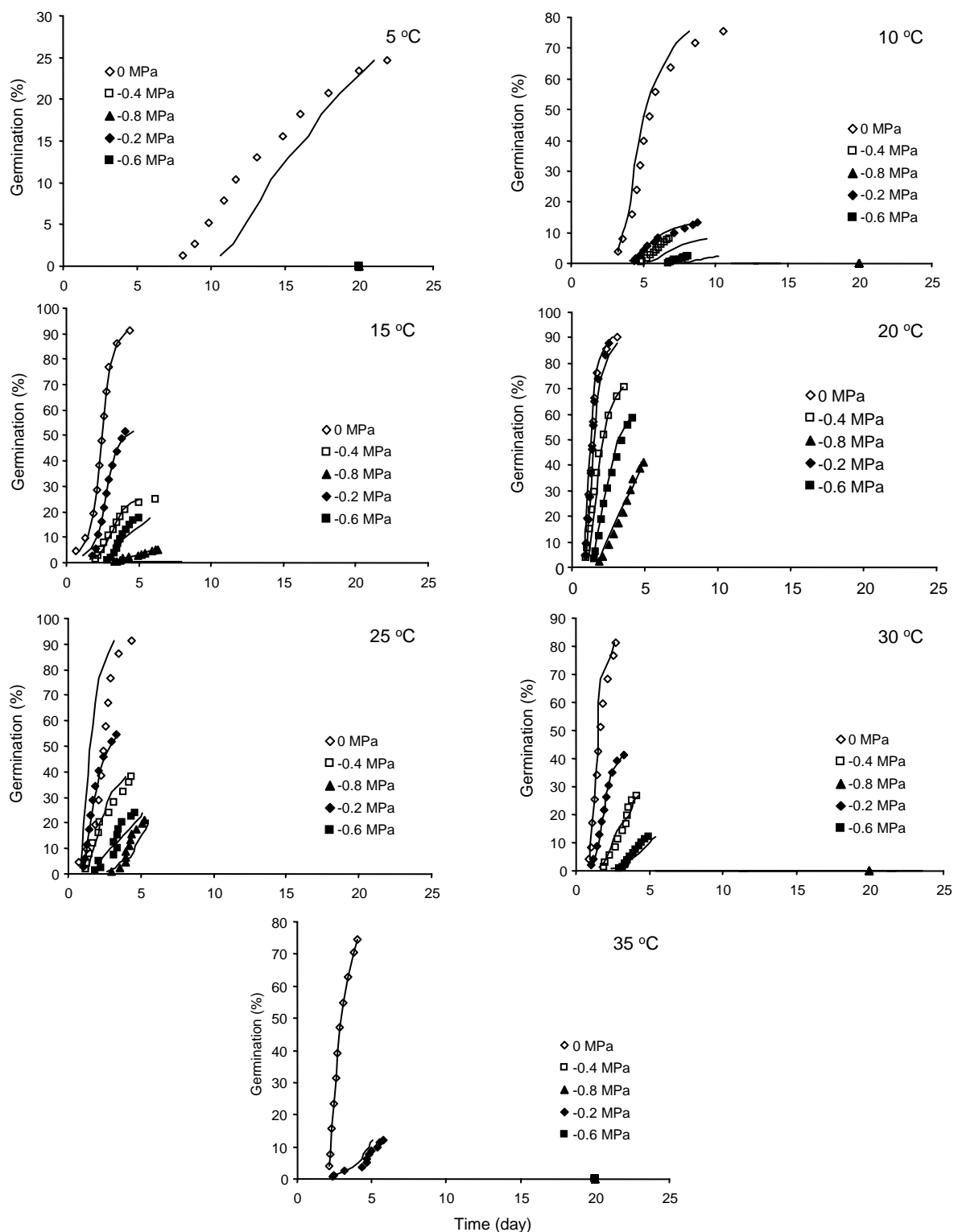
germination rate (per h). The lines show segmented function used to describe the response of Figure 1 - Effect of temperature and water potential on germination rate to temperature in the range of water potentials.

جدول ۱ - تخمین پارامترهای مدل ترمال تایم در توصیف جوانه‌زنی بذر کلزای خودرو در دامنه‌ای از پتانسیل آب (مگاپاسکال). در هر پتانسیل آب بذرها در دماهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد مورد آزمون جوانه‌زنی قرار گرفتند. T_b ، T_o و T_c دماهای پایه، مطلوب و سقف (درجه سانتی‌گراد) هستند؛ R_{max} حداکثر سرعت ذاتی جوانه‌زنی است (بر حسب ساعت)؛ $GR(\%)$ میانگین درصد جوانه‌زنی در هر پتانسیل آب؛ R^2 ضریب تبیین، $TT(50)$ ترمال تایم برای ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی (درجه سانتی‌گراد روز) که در دماهای فوق (supra) و زیر (sub) مطلوب نشان داده شده است. لازم به ذکر است دماهای فوق مطلوب ۳۰ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شدند.

Table 1 - Parameter estimates of the thermal time model, describing seed germination of volunteer oilseed rape at a range of water potentials. At each water potential, seeds were germinated at 5, 10, 15, 20, 25, 30, and 35 oC. T_b , T_o , and T_c are the base, optimum and ceiling temperatures (oC); R_{max} is inherent maximum rate of germination (L h⁻¹); Final (%) is mean germination percentage at each water potential; R^2 is the coefficient of determination of the regression thermal time model; $TT(50)$ o C day is thermal time for 50% of maximum germination in sub and supra-optimal temperatures.

Water potential (MPa)	T_b	T_o	T_c	R_{max}	Sub-optimal			Supra-optimal		
					Final (%)	$TT(50)$	R^2	Final (%)	$TT(50)$	R^2
0	2.73 ± 2.780	26.98 ± 2.239	41.48 ± 4.898	0.0342 ± 0.00371	77.2 ± 6.20	29.54 ± 1.162	0.97	83.5 ± 3.67	17.67 ± 0.291	0.99
-0.2	4.26 ± 2.938	25.71 ± 3.426	41.95 ± 7.558	0.0308 ± 0.00517	54.6 ± 7.30	28.98 ± 1.666	0.95	28.0 ± 6.78	21.97 ± 1.114	0.98
-0.4	3.56 ± 3.482	25.52 ± 2.769	35.00 ± 1.766	0.0246 ± 0.00388	37.8 ± 6.40	36.51 ± 2.296	0.94	31.0 ± 5.26	16.14 ± 0.139	0.99
-0.6	2.71 ± 4.016	26.46 ± 2.408	35.00 ± 1.608	0.0184 ± 0.00276	25.3 ± 5.90	52.78 ± 5.90	0.93	11.0 ± 3.70	18.04 ± 1.341	0.98
-0.8	6.68 ± 2.522	20.66 ± 2.812	33.33 ± 2.363	0.0125 ± 0.00260	22.8 ± 5.21	22.8 ± 5.21	0.91	0	-	-

"مدل‌سازی جوانه‌زنی کلزای خودرو تحت تأثیر دما و پتانسیل آب ..."



شکل ۲. جوانه‌زنی تجمعی بذور کلزای خودرو که در دامنه‌ای از پتانسیل آب و دماهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد مورد آزمون جوانه‌زنی قرار گرفته بودند. علائم درصد جوانه‌زنی مشاهده شده و خطوط جوانه‌زنی تجمعی پیش‌بینی شده با مدل هیدروتایم بر اساس پارامترهای جدول ۵-۲ را نشان می‌دهد.

Figure 2 - Germination time courses for oilseed rape seeds germinated at a range of water potentials and at 5, 10, 15, 20, 25, 30 and 35 °C. The symbols indicate the interpolation of observed germination data and the lines indicate the germination time courses predicted by the hydrotime model, based on parameter estimates in Table 2.

جدول ۲- تخمین پارامترهای مدل هیدروتایم در ۷ دمای مختلف که جوانه‌زنی بذر کلزای خودرو را در دامنه‌ای از پتانسیل‌های آب شرح می‌دهد. $\psi_{b(50)}$ میانگین پتانسیل پایه؛ σ_{ψ_b} انحراف معیار پتانسیل آب پایه؛ $HT_{(50)}$ ثابت هیدروتایم برای ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی؛ R^2 ضریب تبیین؛ $GR(\%)$ میانگین درصد جوانه‌زنی برای هر دما.

Table 2 - Parameter estimates of the hydrotime model at seven germination temperatures describing seed germination of volunteer oilseed rape at a range of water potentials. $\psi_{b(50)}$ is the median base water potential; σ_{ψ_b} is the standard deviation in base water potential; $HT_{(50)}$ is the hydrotime constant; R^2 is the coefficient of determination of the regression hydrotime model; Final (%) is the mean germination percentage at each temperature

Temperature (°C)	$\psi_{b(50)}$	σ_{ψ_b}	$HT_{(50)}$	R^2	Final (%)
5	-3.11	2.56	37.31 ± 21.543	0.98	5.20 ± 5.200
10	-1.50	0.59	5.85 ± 1.436	0.98	20.90 ± 14.850
15	-1.64	0.40	4.05 ± 0.068	0.99	40.10 ± 16.116
20	-1.42	0.19	1.68 ± 0.230	0.99	73.33 ± 9.679
25	-1.30	0.23	1.80 ± 0.118	0.99	46.80 ± 12.398
30	-0.97	0.11	1.35 ± 0.129	0.99	34.53 ± 15.340
35	-0.76	0.46	2.22 ± 0.673	0.98	18.20 ± 15.268

جدول ۳- تخمین پارامترهای مدل هیدروترمال تایم که جوانه‌زنی بذر کلزای خودرو را در دامنه‌ای پتانسیل آب و دما توصیف می‌کند. T_b و T_o دمای پایه و مطلوب؛ $\psi_{b(50)}$ پتانسیل پایه برای جوانه‌زنی؛ $\psi_{b(50)o}$ پتانسیل پایه برای جوانه‌زنی در دمای مطلوب؛ k_T ثابت مدل است (شیب خط پتانسیل پایه در مقابل دما در دماهای بیشتر از دمای مطلوب)؛ $HTT_{(50)}$ ثابت هیدروترمال تایم؛ R^2 ضریب تبیین.

Table 3 - Parameter estimates of the hydrothermal time model, describing seed germination of volunteer oilseed rape, at the ranges of temperatures and water potentials. T_b and T_o are the base and optimum temperatures; $\psi_{b(50)}$ is the median base water potential; $\psi_{b(50)o}$ is the value of the $\psi_{b(g)}$ at T_o ; k_T is a constant (the slope of the $\psi_{b(g)}$ versus T line when $T > T_o$); $HTT_{(50)}$ is the hydrothermal time constant; R^2 is the coefficient of determination of the hydrothermal time model

Parameter	Sub-optimal	Supra-optimal
T_b (°C)	3.79 ± 0.151	3.38 ± 0.144
T_o (°C)	-	26.23 ± 0.127
$\psi_{b(50)}$ (MPa)	-1.43 ± 0.033	-
$\psi_{b(50)o}$ (MPa)	-	-1.23 ± 0.129
k_T	-	0.042
$HTT_{(50)}$ (MPa day)	36.21 ± 1.006	42.93 ± 6.56
R^2	0.94	0.96

Reference

فهرست منابع

- Allen, P.S., Meyer, S.E. and 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., and Bradford, K.J. 2002. A hydrothermal time model explains the cardinal temperatures for seed germination. Plant Cell Environ. 25: 1061-1069.

- Anda, A., and Pinter, L.** 1994. Sorghum germination and development at influenced by soil temperature and water content. *Agron. J.* 86: 621-624.
- Baskin, C.C., and Baskin, J.M.** 2001. Seeds: ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination. Academic Press, San Diego, California, pp. 666.
- Bewley, J.D., and Black, M.** 1994. Seeds: Physiology of Development and Germination. New York: Plenum Press, pp. 445.
- Bierhuizen, J.F. and Wagenvoort, W.A.** 1974. Some aspects of seed germination in vegetables. 1. The determination and application of heat sums and minimum temperature for germination. *Sci. Horti.* 2, 213-219.
- Bloomberg, M., Sedcole, J.R., Mason, E.G. and Buchan, G.** 2009. Hydrothermal time germination models for radiata pine (*Pinus radiata* D. Don). *Seed Sci. Res.* 19, 171-182.
- Blumenthal, M.J., Aston, S.C. and Pearson, C.J.** 1996. Effect of temperature and moisture potential on germination and emergence in *Lotus sp.* *Aust. J. Agric. Res.* 47: 1119-1130.
- Bradford, K.J.** 1990. A water relation analysis of seed germination rates. *Plant Physiol.* 94: 840-849.
- 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.
- Bradford, K.J.** 1997. The hydrotime concept in seed germination and dormancy. Pages 349-360 in R. H. Ellis, M. Black, A. J. Murdoch and T. D. Hong, eds. *Basic and Applied Aspects of Seed Biology*. Boston, Kluwer Academic Publishers.
- Bradford, K.J.** 2002. Applications of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. *Weed Sci.* 50, 248-260.
- Bradford, K.J. and Still, D.W.** 2004. Applications of Hydrotime Analysis in Seed Testing. *Seed Tech.* 26, 74-85.
- Cheng, Z. and Bradford, K.J.** 1999. Hydrothermal time analysis of tomato seed germination responses to priming treatments. *J. Exp. Bot.* 50, 89-99.
- Colbach, N., Durr, C., Roger-Estrade, J., Chauvel, B. and Caneill, J.** 2006. AlomySys: Modelling black-grass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) germination and emergence, in interaction with seed characteristics, tillage and soil climate I. Construction. *Europ. J. Agron.* 24, 95-112.
- Dahal, P. and Bradford, K.J.** 1994. Hydrothermal time analysis of tomato seed germination at suboptimal temperature and reduced water potential. *Seed Sci. Res.* 4, 71-80.
- Foley, M.E., and Fennimore, S.A.** 1998. Genetic basis for seed dormancy. *Seed Sci. Res.* 8: 173-179.
- Fyfield, T.P. and Gregory, P.J.** 1989. Effects of temperature and water potential on germination, radicle elongation and emergence of mungbean. *J. Exp. Bot.* 40, 667-674.
- Grundy, A.C., Phelps, K., Reader, R.J. and Burston, S.** 2000. Modelling the germination of *Stellaria media* using the concept of hydrothermal time. *New Phytol.* 148: 433-444.
- Gulden, R.H., Shirliffe, S.J. and Thomas, A.G.** 2003. Harvest losses of canola (*Brassica napus*) cause large seed bank inputs. *Weed Sci.* 51: 83-86.
- Gummerson, R.J.** 1986. The effect of constant temperature and osmotic potential on the germination of sugar beet. *J. Exp. Bot.* 37: 729-714.
- Hardegee, S. P.,** 2006. Predicting germination response to temperature. I. Cardinal temperature models and subpopulation-specific regression. *Ann. Bot.* 97, 1115-1125.

- Hardegree, S.P. and Winstral, A.H.** 2006. Predicting Germination Response to Temperature. II. Three-dimensional Regression, Statistical Gridding and Iterative-probit Optimization Using Measured and Interpolated-subpopulation Data. *Ann. Bot.* 98, 403–410.
- Hucl, P.** 1993. Effect of temperature and moisture stress on the germination of diverse common bean genotypes. *Can. J. Plant. Sci.* 73: 697-702.
- ISTA.** 2009. International rules for seed testing. International Seed Testing Association (ISTA). Edition 2009.
- Jame, Y.W. and Cutforth, H.W.,** 2004. Simulating the effects of temperature and seeding depth on germination and emergence of spring wheat. *Agric. For. Meteorol.* 124, 207-218.
- Jami Al-Ahmadi, M. and Kafi, M.,** 2007. Cardinal temperatures for germination of *Kochia scoparia* (L.). *J. Arid Environ.* 68, 308–314.
- Kebreab, E., and Murdoch, A.J.** 1999. A model of effects of a wider range of constant and alternating temperatures on seed germination of four *Orobanches* species. *Ann. Bot.* 84: 549-557.
- Larsen, S.U., Bailly, C., Côme, D. and Corbineau, F.** 2004. Use of the hydrothermal time model to analyse interacting effects of water and temperature on germination of three grass species. *Seed Sci. Res.* 14, 35–50.
- Lawson, A.N. and Friesen, L.F.** 2006. Emergence timing of volunteer canola in spring wheat fields in Manitoba. *Weed Sci.* 54:873–882.
- Livingston, N.J and De Jong, E.** 1990. Matric and osmotic potential effects on seedling emergence at different temperature. *Agron. J.* 82: 995-998.
- Marshall, B. and Squire, G.R.** 1996. Non-linearity in rate-temperature relations of germination in oilseed rape. *J. Exp. Bot.* 47: 1369-1375.
- Massee, T.W.** 1976. Downy brome control in dryland winter wheat with stubble-mulch fallow and seeding management. *Agron. J.* 68: 952-955.
- Meyer, S.E., and Pendleton, R.L.** 2000. Genetic regulation of seed dormancy in *Purshia tridentata* (Rosaceae). *Ann. Bot.* 85: 521-529.
- Ni, B.R. and Bradford, K.J.** 1992. Quantitative models characterizing seed germination responses to abscisic acid and osmoticum. *Plant Physiol.* 98, 1057–1068.
- Rowse, H.R., and 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 Phytol.* 158: 101-108.
- Sester, M., Dürr, C., Darmency, H. Colbach, N.** 2007. Modelling the effects of cropping systems on the seed bank dynamics and the emergence of weed beet. *Eco. Model.* 204: 47–58
- Sester, M., Tricault, Y., Darmency, H. and 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.
- Shafii, B. and Price, W. J.** 2001. Estimation of cardinal temperatures in germination data analysis. *J. Agric., Bio. Environ. Statis.* 6, 356-366.
- Soltani, A., Gaeshi, S., Zeinali, E. and Latifi, N.** 2002. Germination, seed reserve utilization and seedling growth of chickpea as affected by salinity and seed size. *Seed Sci. Technol.* 30: 51-60
- Soltani, A., Madah, V.** 2010. Simple, applied programs for education and research in agronomy.

Shahid Behshti University, Agroecology press.

- Soltani, A., Robertson, M.J., Torabi, B., Yousefi-Daz, M. and Sarparast, R.** 2006. Modeling seedling emergence in chickpea as influenced by temperature and sowing depth. *Agric. For. Meteorol.* 138, 156-167.
- Soltani, A., Zeinali, E., Galeshi, S., and Latifi, N.** 2001. Genetic variation for and interrelationships among seed vigor traits in wheat from the Caspian Sea Coast of Iran. *Seed Sci. Technol.* 29: 653-662.
- Soltani, E., Akramghaderi, F., and Soltani, A.** 2008b. Applications of germination modeling on the response to temperature and water potential in seed science research. 1st Seed Science and Technology, 13 and 14 Nov. Gorgan, Iran
- Soltani, E., Galeshi, S., Kamkar, B. and Akramghaderi, F.** 2008a. Modeling seed aging effects on the response of germination to temperature in wheat. *Seed Sci. Biotech.* 2, 32-36.
- Soltani, E., Soltani, A., Galeshi, S., Ghaderi-Far, F. and Zeinali, E.** 2011. Quantifying seed production by volunteer canola (*Brassica napus* L.) and *Sinapis arvensis*. *Planta Daninha.* v. 29, n. 3, p. 489-497
- Squire, G.R.** 1999. Temperature and heterogeneity of emergence time in oilseed rape. *Ann. Appl. Biol.*, 135:439-447.
- Watt, M.S., Xu, V. and Bloomberg, M.** 2010. Development of a hydrothermal time seed germination model which uses the Weibull distribution to describe base water potential. *Eco. Model.* 221, 1267-1272.