

مدل‌سازی جوانه‌زنی بذر کرچک (*Ricinus communis* L.) با استفاده از

مدل هیدروترمال تایم توسعه یافته بر مبنای توزیع ویبول

حامد اکبری^۱ - ابوالفضل درخشان^{۲*} - بهنام کامکار^۳ - سید محمد علی مدرس ثانوی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۷/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۸/۲۶

چکیده

دما و پتانسیل آب دو عامل محیطی اولیه تنظیم‌کننده جوانه‌زنی بذر می‌باشند. جوانه‌زنی یک جمعیت بذری در پاسخ به دما و پتانسیل آب با استفاده از مدل هیدروترمال تایم توصیف می‌شود. هدف از این مطالعه، برازش و مقایسه دو مدل هیدروترمال تایم نرمال و ویبول به داده‌های جوانه‌زنی یک توده بذری کرچک (*Ricinus communis* L.) بود. جوانه‌زنی بذور کرچک در محدوده‌ای از پتانسیل‌های آب (صفر، ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹ - مگاپاسکال) در دامنه دمایی کمتر از مطلوب (از ۱۰ تا ۳۵ با فواصل ۵ درجه سانتی‌گراد) مورد آزمون قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل هیدروترمال تایم ویبول، برازش (RMSE=8.07%) و دقت (AIC=-5801) بیشتری در مقایسه با مدل هیدروترمال تایم نرمال به داده‌های جوانه‌زنی بذرهای کرچک داشت. براساس مدل هیدروترمال تایم ویبول، دمای پایه برای جوانه‌زنی بذرهای کرچک معادل ۸/۸۶ درجه سانتی‌گراد و ثابت هیدروترمال تایم معادل ۸۳۳/۱۰ مگاپاسکال درجه سانتی‌گراد ساعت برآورد شد. همچنین، پتانسیل آب پایه برای شروع جوانه‌زنی معادل ۱/۷۱ - مگاپاسکال به دست آمد. پارامتر شکل در مدل هیدروترمال تایم ویبول حاکی از نامتقارن بودن داده‌های پتانسیل آب پایه و چولگی توزیع به راست بود. این نتایج برخلاف فرض نرمال بودن توزیع پتانسیل آب پایه در یک جمعیت بذری است. بنابراین، پیش از استفاده از مدل هیدروترمال تایم، توزیع پتانسیل آب پایه در یک نمونه بذری باید مورد بررسی قرار گیرد و یک معادله مناسب انتخاب شود.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل آب پایه، توزیع نرمال، مدل هیدروترمال

مقدمه

جوانه‌زنی بذر فرآیند فیزیولوژیکی پیچیده‌ای است که در بذرهای فاقد خواب به‌طور عمده توسط دما (T) و پتانسیل آب (ψ) بستر بذر تعیین می‌شود. این دو عامل در مدل‌های هیدروترمال تایم به‌طور موفقیت آمیزی برای توصیف دوره زمانی وقوع جوانه‌زنی در طیف گسترده‌ای از گونه‌های گیاهی ترکیب شده‌اند (۶ و ۱۱). در دماهای بین دمای پایه (T_b) و دمای مطلوب (T_o)، زمان جوانه‌زنی به‌عنوان تابعی از مقادیر پتانسیل‌های آب و دماهای فراتر از یک مقدار آستانه یا پایه (T_b, ψ_b) که کمتر از آن جوانه‌زنی متوقف خواهد شد، در نظر گرفته می‌شود (۶). توزیع زمان جوانه‌زنی در مدل هیدروترمال تایم را

می‌توان به‌صورت معادله (۱) بیان کرد (۶ و ۹):

$$t_g = \frac{\theta_{HT}}{[(\psi - \psi_{b(g)}) (T - T_b)]} \quad (1)$$

و در نتیجه:

$$\psi_{b(g)} = \psi - \frac{\theta_{HT}}{(T - T_b) t_g} \quad (2)$$

که در این مدل، t_g، زمان تا جوانه‌زنی g امین درصد توزیع زمان جوانه‌زنی برحسب ساعت (h)؛ θ_{HT}، ثابت هیدروترمال تایم برحسب مگاپاسکال درجه سانتی‌گراد ساعت (MPa °C h) و ψ_{b(g)}، پتانسیل آب پایه برای g امین درصد جوانه‌زنی برحسب مگاپاسکال (MPa) می‌باشند. اصطلاح g در اینجا به کسر یا درصد معینی از کل جمعیت بذری اشاره دارد و براساس تعداد بذرهای جوانه‌زده تحت شرایط خاصی محاسبه می‌شود. θ_{HT} و T_b برای هر جمعیت بذری یک مقدار منحصر به فرد و مقدار ψ_{b(g)} برحسب توزیع فراوانی متفاوت است (۶ و ۱۱). فرض بر این است که تنها پتانسیل آب پایه (ψ_b) با g تغییر

۱- دانشجوی دکتری زراعت دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشجوی دکتری زراعت دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین

۳- عضو هیأت علمی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۴- استاد دانشگاه تربیت مدرس

*- نویسنده مسئول: (Email: derakhshan.abo@gmail.com)

به جای $\Psi_{b(g)}$ و نیز معادله (۶) به جای σ در مدل هیدروترمال تایم دماهای کمتر از مطلوب (معادله ۵)، معادله زیر به دست می‌آید.

$$g=1-\left[\exp\left(-\left(\frac{\left(\Psi-\left\{\frac{\theta_H T}{(T-T_b)\theta_g}\right\}-\mu\right)}{\alpha+\beta(T-T_b)+\gamma(T-T_b)^2}\right)^2\right)\right] \quad (7)$$

در این مطالعه، با استفاده از داده‌های جوانه‌زنی بذور کرچک در محدوده‌ای از پتانسیل‌های آب در دماهای کمتر از مطلوب کارایی توزیع‌های نرمال و ویبول در برآورد $\Psi_{b(g)}$ مورد مقایسه قرار گرفت. پارامترهای مدل هیدروترمال تایم براساس این دو توزیع آماری برآورد و از نظر دقت و برازش اعتبارسنجی شد.

مواد و روش‌ها

آزمایش در سال ۱۳۹۰ در آزمایشگاه تکنولوژی بذر دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شد. بذرهایی کرچک (توده اهواز) در همین سال از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه شدند. قابلیت حیات بذرهایی کرچک (*Ricinus communis* L.) طی آزمون جوانه‌زنی استاندارد در حدود ۹۸ درصد تعیین شد. آزمون جوانه‌زنی با چهار تکرار انجام شد و در هر تکرار، پنجاه بذر بین سه عدد کاغذ حوله‌ای به ابعاد ۳۰ در ۴۵ سانتی‌متر (دو عدد در زیر و یک عدد روی بذرها) پیچیده شدند و سپس با ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر و یا محلول‌هایی با پتانسیل اسمزی ۰/۳، -۰/۶ و -۰/۹ مگاپاسکال مرطوب شدند. برای جلوگیری از کاهش رطوبت، حوله‌های کاغذی درون پلاستیک قرار داده شدند. آزمون جوانه‌زنی در انکوباتورهایی با دماهای ثابت ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. محلول‌های اسمزی با استفاده از پلی‌اتیلن گلایکول ۸۰۰۰ و براساس معادله (۸) تهیه شدند (۱۲).

$$\Psi=1.29[PEG]^2 T-140[PEG]^2-4[PEG] \quad (8)$$

در این معادله، Ψ ، پتانسیل اسمزی مورد نظر؛ T ، دما و PEG ، مقدار پلی اتیلن گلایکول مورد نیاز به ازاء هر میلی‌لیتر آب مقطر برای رسیدن به غلظت مورد نظر می‌باشند. تعداد بذرهایی جوانه‌زده هر ۱۲ ساعت به مدت ۱۴ روز شمارش شدند. بذرهایی که ریشه‌چه آنها به اندازه دو میلی‌متر یا بیشتر خارج شده بود، جوانه‌زده در نظر گرفته شدند.

از مدل هیدروترمال تایم با استفاده از توزیع‌های نرمال (معادله ۹) و ویبول (معادله ۱۰) برای برآورد پتانسیل آب پایه و ثابت هیدروترمال (θ_H) در هر دما استفاده شد.

$$\text{probit}(g)=\frac{\Psi-\left(\frac{\theta_H}{T_b}\right)-\Psi_{b(50)}}{\sigma\psi_b} \quad (9)$$

می‌کند، به طوری که توزیع زمان جوانه‌زنی در یک جمعیت بذری توسط توزیع $\Psi_{b(g)}$ تعیین می‌شود (۱۵). در بیشتر مطالعات پیشین فرض بر این بوده که پتانسیل آب پایه در یک جمعیت بذری از یک توزیع نرمال (معادله ۳) با میانگین $\Psi_{b(50)}$ و انحراف استاندارد σ_{ψ_b} تبعیت می‌کند (۴ و ۱۰).

$$\Psi_{b(g)}=\Psi_{b(50)}+\text{probit}(g)\sigma_{\psi_b} \quad (3)$$

که $\Psi_{b(g)}$ ، پنجاهمین درصد توزیع پتانسیل آب پایه σ_{ψ_b} ، انحراف استاندارد مقادیر Ψ_b در جمعیت می‌باشند. $\text{probit}(g)$ تابع پروبیت است که متغیر نرمال استاندارد (Z) را در یک جمعیت دارای توزیع نرمال برای احتمال تجمعی معینی (g) محاسبه می‌کند. مدل هیدروترمال تایم در دماهای کمتر از مطلوب به طور معمول با جایگزین کردن سمت راست معادله (۳) به جای $\Psi_{b(g)}$ در معادله (۱) و مرتب کردن معادله حاصل بر حسب پروبیت به داده‌های جوانه‌زنی برازش داده می‌شود (معادله ۴).

$$\text{probit}(g)=\frac{\Psi-\left\{\frac{\theta_H T}{(T-T_b)\theta_g}\right\}-\Psi_{b(50)}}{\sigma_{\psi_b}} \quad (4)$$

با وجود استفاده گسترده از مدل‌های هیدروترمال تایم برای شبیه‌سازی جوانه‌زنی، تحقیقات اندکی فرض نرمال بودن توزیع $\Psi_{b(g)}$ را به طور منتقدانه بررسی کرده‌اند. در این راستا، وات و همکاران (۱۵) و ۱۶ گزارش کردند که استفاده از توزیع ویبول در مدل هیدروترمال تایم منجر به دقت بیشتر و اریب کمتری در قیاس با توزیع نرمال شد. همچنین مسگران و همکاران (۱۱) هشت توزیع آماری مختلف را برای توصیف تنوع نسبی پتانسیل آب پایه بذر چهار گونه گیاهی مورد مقایسه قرار دادند. آنها گزارش کردند که در میان توزیع‌های آماری مورد مقایسه، توزیع نرمال می‌تواند نامناسب‌ترین گزینه در تجزیه هیدروترمال جوانه‌زنی بذر باشد.

با استفاده از توزیع ویبول می‌توان درصد جوانه‌زنی در دماهای کمتر از مطلوب را توسط تابع توزیع تجمعی^۱ (معادله ۵) مدل‌سازی کرد (۱۱ و ۱۵).

$$g=1-\exp\left[-\left(\frac{(\Psi_b-\mu)}{\sigma}\right)^2\right] \quad (5)$$

که پارامتر μ ، مکان کمترین مقدار $\Psi_{b(g)}$ (یعنی $\Psi_{b(0)}$)؛ λ ، پارامتر شکل و σ ، پارامتر مقیاس می‌باشند. معادله ریاضی پارامتر σ در مدل هیدروترمال تایم ویبول به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sigma=\alpha+\beta(T-T_b)+\gamma(T-T_b)^2 \quad (6)$$

که α ، β و γ ضرایب معادله می‌باشند. با جایگزینی معادله (۲)

1- Cumulative distribution function

بذر به‌سوی مقادیر آستانه (Ψ_b و T_b) نزدیک شود، بذرها خیلی آهسته جوانه می‌زنند. کاهش سرعت جوانه‌زنی با کاهش دما تا حدی مرتبط با کاهش سرعت آنبوشتی بذرها در دماهای پایین است (۳).

برازش مدل هیدروترمال تایم به داده‌های جوانه‌زنی بذور کرچک در دماهای کمتر از مطلوب بر مبنای دو توزیع نرمال و ویبول در شکل ۲ و پارامترهای مدل‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. مقدار RMSE نشان داد که مدل هیدروترمال تایم ویبول ($RMSE=8.07$) در قیاس با مدل هیدروترمال تایم نرمال ($RMSE=14.42\%$) از برازش بهتری به داده‌های جوانه‌زنی کرچک برخوردار است (جدول ۱). علاوه بر برازش بهتر مدل هیدروترمال تایم ویبول، مقدار AIC نشان داد که این مدل ($AIC=-5801$) همچنین از دقت بیشتری نسبت به مدل هیدروترمال تایم نرمال ($AIC=-601.2$) برخوردار می‌باشد (جدول ۱). علاوه بر این، جوانه‌زنی پیش‌بینی شده با استفاده از توزیع نرمال پتانسیل آب پایه از اریب بیشتری در مقایسه با توزیع ویبول پتانسیل آب پایه برخوردار بود. این پیش‌بینی اریب با استفاده از توزیع نرمال به‌خوبی در شکل‌های جوانه‌زنی واقعی در برابر کسر جوانه‌زنی پیش‌بینی شده و نیز نمودار باقیمانده جوانه‌زنی در مقابل کسر جوانه‌زنی واقعی آشکار است (شکل ۳). به داده‌های کسر جوانه‌زنی واقعی در برابر کسر جوانه‌زنی پیش‌بینی شده یک معادله خطی و به داده‌های باقیمانده جوانه‌زنی در مقابل کسر جوانه‌زنی واقعی یک معادله درجه دوم برازش داده شد (شکل ۳). ضریب تبیین (R^2) به‌دست آمده برای کسر جوانه‌زنی واقعی در برابر پیش‌بینی شده با استفاده از توزیع نرمال $\Psi_{b(g)}$ معادل 0.84 و با استفاده از توزیع ویبول $\Psi_{b(g)}$ معادل 0.96 بود. همچنین مقدار R^2 باقیمانده جوانه‌زنی در مقابل کسر جوانه‌زنی واقعی با استفاده از توزیع‌های نرمال و ویبول به‌ترتیب معادل 0.3 و 0.40 به‌دست آمد. مقدار پتانسیل آب پایه برای همه کسرهای جوانه‌زنی و نیز باقیمانده پتانسیل آب پایه در مقابل جوانه‌زنی در شکل ۴ نشان داده شده است. نمودار باقیمانده پتانسیل آب پایه در مقابل جوانه‌زنی نیز به‌خوبی پیش‌بینی اریب توزیع نرمال $\Psi_{b(g)}$ در مقایسه با توزیع ویبول $\Psi_{b(g)}$ را نشان می‌دهد (شکل ۴). مقدار R^2 معادله درجه دوم برازش داده شده به داده‌های باقیمانده توزیع‌های نرمال و ویبول به‌ترتیب معادل 0.35 و 0.53 به‌دست آمد.

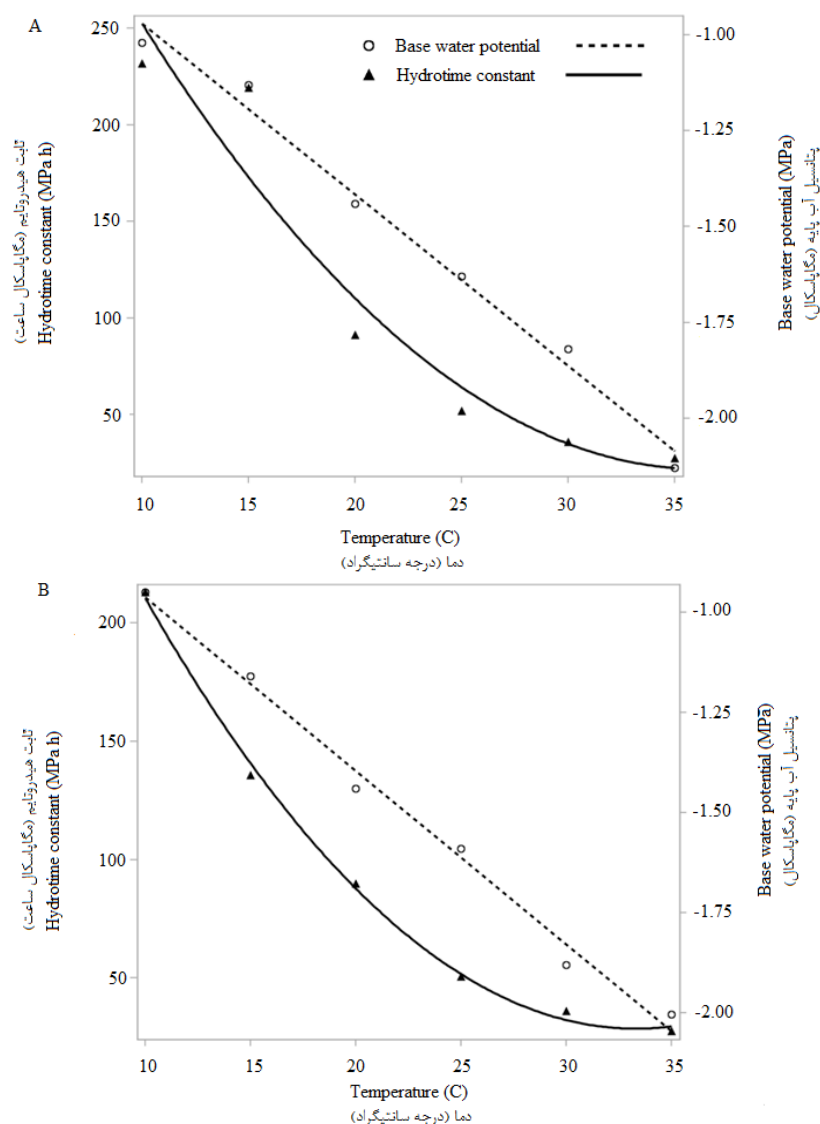
براساس مدل هیدروترمال تایم ویبول، دمای پایه برای جوانه‌زنی بذور کرچک معادل $8/86$ درجه سانتی‌گراد و ثابت هیدروترمال تایم معادل $833/10$ مگاپاسکال درجه سانتی‌گراد ساعت برآورد شد (جدول ۱). همچنین، پتانسیل آب پایه برای شروع جوانه‌زنی براساس این توزیع معادل $1/71$ مگاپاسکال برآورد شد. پارامتر شکل ($\lambda < 2/60$) نشان داد که توزیع پتانسیل آب پایه چوله به راست است (جدول ۱).

$$g = 1 - \left[\exp \left(- \left(\frac{\Psi - \left(\frac{\Psi_b}{T_b} \right) - \mu}{\sigma} \right)^{\lambda} \right) \right] \quad (10)$$

مدل‌های هیدروترمال تایم نیز براساس توزیع‌های نرمال (معادله ۴) و ویبول (معادله ۷) به داده‌های جوانه‌زنی کرچک در پاسخ به اثر متقابل دما و پتانسیل اسمزی برازش داده شد. تجزیه داده‌ها با استفاده از نرم افزار SAS و با رویه PROC NLMIXED و به روش بهینه‌سازی پیش فرض Dual Quasi-Newton در این نرم افزار انجام شد (۱۴). برای انتخاب بهترین تابع توزیع از نظر دقت از شاخص آکائیک (AIC^1) و (γ) و بهترین برازش مدل از ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE^2$) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. بهترین مدل در مقایسه مدل‌ها، مدلی است که کمترین میزان AIC محاسبه شده را داشته باشد.

نتایج و بحث

روند تغییرات پتانسیل آب پایه و ثابت هیدروتایم به‌عنوان تابعی از دما بر مبنای دو توزیع نرمال و ویبول در شکل ۱ نشان داده شده است. در دامنه دمایی کمتر از مطلوب، با افزایش دما و براساس هر دو توزیع نرمال و ویبول، پتانسیل آب پایه برای جوانه‌زنی بذور کرچک با تابعیت از یک معادله خطی کاهش یافت. مقدار پتانسیل آب پایه برآورد شده ($\Psi_{b(50)}$) بر مبنای توزیع نرمال (معادله ۹) از $-2/13$ مگاپاسکال در دمای 35 درجه سانتی‌گراد به $-1/02$ مگاپاسکال در دمای 10 درجه سانتی‌گراد و بر مبنای توزیع ویبول ($\Psi_{b(50)}$ معادله ۱۰) از $-2/01$ مگاپاسکال در دمای 35 درجه سانتی‌گراد به $-0/95$ مگاپاسکال در دمای 10 درجه سانتی‌گراد رسید. به‌طور عکس و با تابعیت از یک معادله درجه دوم، مقدار ثابت هیدروتایم با افزایش دما کاهش یافت. براساس تابع توزیع نرمال، مقدار ثابت هیدروتایم از $231/57$ مگاپاسکال ساعت در دمای 10 درجه سانتی‌گراد به $27/51$ مگاپاسکال ساعت در دمای 35 درجه سانتی‌گراد رسید. همچنین براساس توزیع ویبول، ثابت هیدروتایم از 213 مگاپاسکال ساعت در دمای 10 درجه سانتی‌گراد به $27/43$ مگاپاسکال ساعت در دمای 35 درجه سانتی‌گراد کاهش یافت (شکل ۱). کاهش مقدار پتانسیل آب پایه، نیاز به دسترسی بیشتر به آب برای جوانه‌زنی در دماهای پایین‌تر و کاهش ثابت هیدروتایم، افزایش سرعت جوانه‌زنی با افزایش دما را نشان می‌دهد. سرعت جوانه‌زنی در دمای بهینه بیشترین بوده و با افزایش/کاهش دما کاهش می‌یابد. به‌طورکلی، چنانچه شرایط بستر



شکل ۱- تغییر پتانسیل آب پایه و ثابت هیدروتایم به‌عنوان تابعی از دما بر مبنای مدل هیدروتایم نرمال (A) و ویبول (B) برای جوانه‌زنی بذر کرچک در پاسخ به کاهش پتانسیل آب

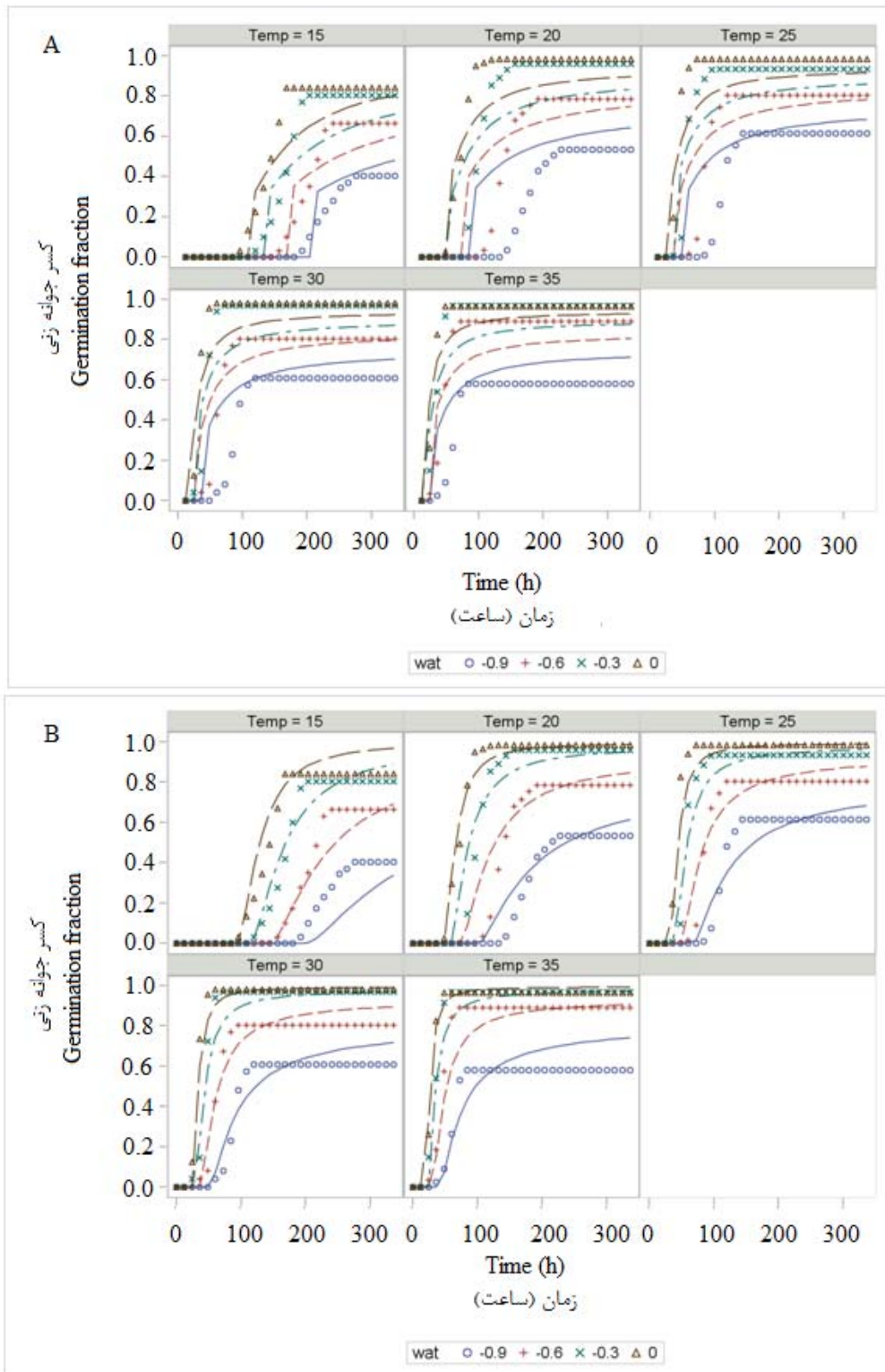
Figure 1- Changes in base water potential and hydrotime constant as a function of temperature for seed germination of *Ricinus communis* in response to reduced water potential based on Normal (A) and Weibull (B) hydrotime model

جدول ۱- پارامترهای مدل هیدروتایم برازش داده شده به داده‌های جوانه‌زنی کرچک بر مبنای توزیع‌های نرمال و ویبول

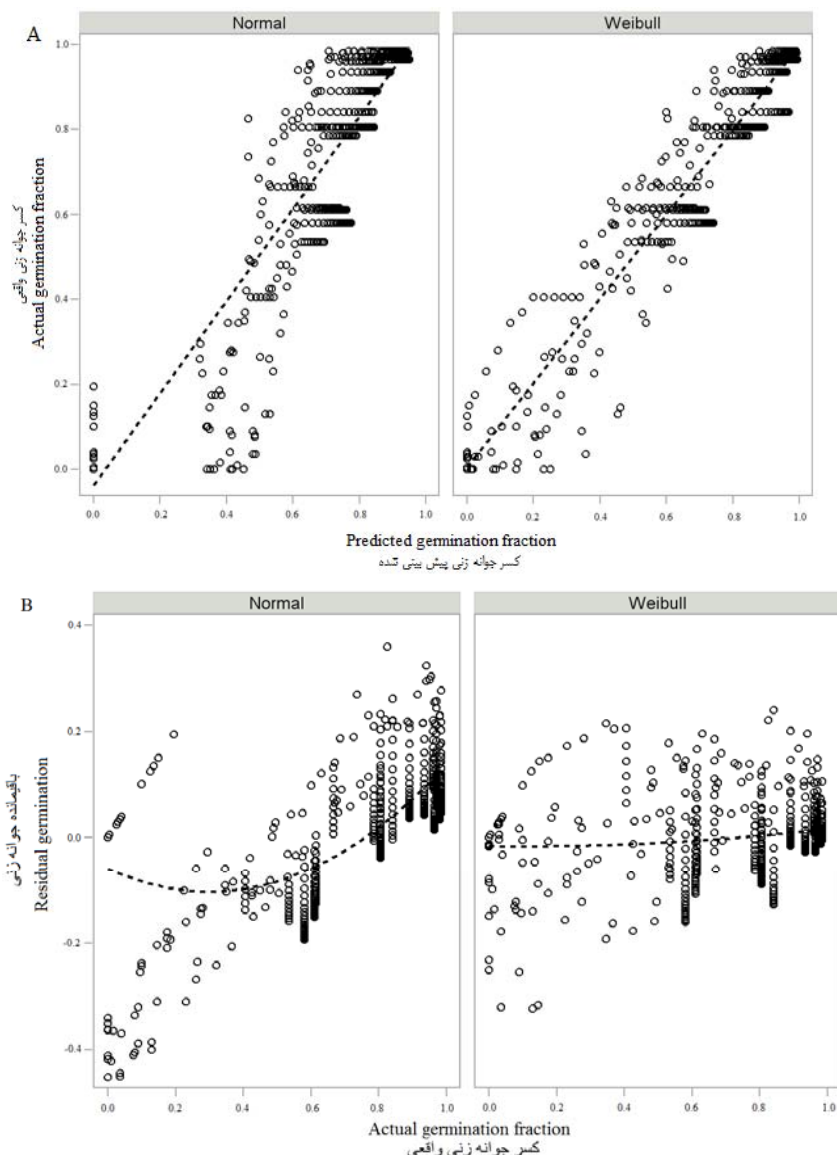
Table 1- Parameter estimates for the fitted hydrothermal time model to germination data of *Ricinus communis* based on Normal and Weibull distributions

Distribution*	Model parameters									Model statistics	
	T _b (°C)	Ψ _{b(50)} (MPa)	σ _{Ψ_b} (MPa)	θ _{HT} (MPa °C h)	μ (MPa)	λ	α	β	γ	RMSE	AIC
Normal	9.28 ± 0.27	-2.04 ± 0.01	0.46 ± 0.04	903.32 ± 73.10	-	-	-	-	-	0.1442	601.2
Weibull	8.86 ± 0.07	-	-	833.10 ± 0.01	-1.71 ± 0.03	1.59 ± 0.07	0.54 ± 0.03	0.005 ± 0.002	0.0001 ± 0.00008	0.0807	-5081

* T_b: دمای پایه؛ Ψ_{b(50)}: پنجاهمین درصد توزیع پتانسیل آب پایه برای توزیع نرمال؛ σ_{Ψ_b}: انحراف استاندارد مقادیر Ψ_b در جمعیت برای توزیع نرمال؛ θ_{HT}: ثابت هیدروتایم؛ μ: پارامتر مکان در مدل ویبول؛ λ: پارامتر شکل در مدل ویبول؛ α، β، و γ: پارامترهای مقیاس در مدل ویبول



شکل ۲- مدل هیدروترمال تایم برازش داده شده به داده‌های جوانه‌زنی کرچک بر مبنای توزیع‌های نرمال (A) و ویبول (B)
 Figure 2- The fitted hydrothermal time model to germination data of *Ricinus communis* based on Normal (A) and Weibull (B) distributions

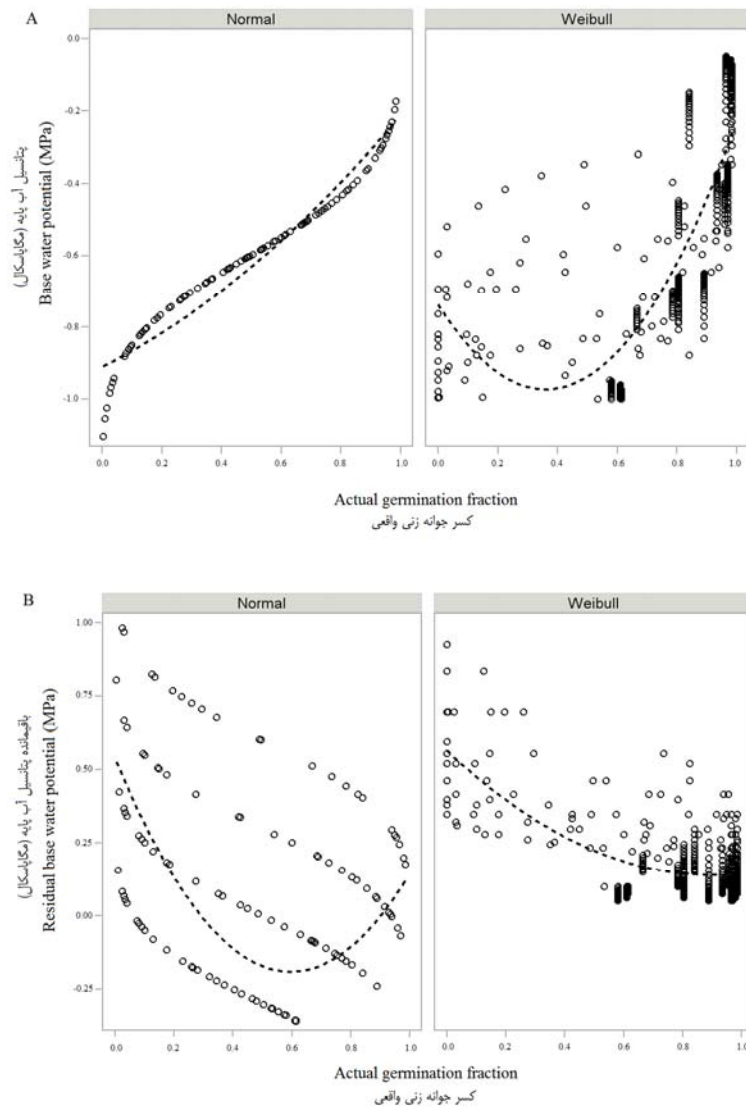


شکل ۳- رابطه بین کسر جوانه‌زنی واقعی و پیش‌بینی شده (A) و باقیمانده جوانه‌زنی و کسر جوانه‌زنی واقعی (B)
 Figure 3- Relationship between actual and predicted germination fraction (A) and residual germination and actual germination fraction (B)

مقادیر ψ_b ($\sigma_{b(g)}$)، میانگین پتانسیل آب پایه جمعیت بذری ($\psi_{b(50)}$) به همراه دمای پایه (T_b) و ثابت هیدروترمال تایم (θ_{HT}) توصیف کاملی از رفتار جوانه‌زنی یک جمعیت بذری در اختیار قرار می‌دهد (۵ و ۶). با این وجود، برازش توزیع فراوانی نرمال به داده‌هایی که دارای چولگی به راست یا چپ می‌باشند (داده‌های نامتقارن)، منجر به اریب در پیش‌بینی‌های زمان تا جوانه‌زنی خواهد شد. مدل هیدروترمال تایم ویبول نیز پارامترهای T_b و θ_{HT} را دارا می‌باشد، اما برخلاف توزیع نرمال در این توزیع میانگین $\psi_{b(g)}$ لزوماً برابر با میانه ($\psi_{b(50)}$) و یا مد نخواهد بود (در توزیع نرمال میانگین، میانه و مد برابر می‌باشند). میانگین (M) و مد (Mo) در توزیع ویبول با استفاده از معادلات زیر قابل محاسبه می‌باشند (۱۵).

چولگی توزیع پتانسیل آب پایه به راست دارای پیامدهای اکولوژیکی مهمی است، زیرا به این معناست که بخش اعظم بذری یک جمعیت بذری دارای مقادیر پتانسیل آب پایه مثبت‌تری بوده و از این رو حتی تحت شرایط مطلوب بستر بذری نیز به کندی جوانه خواهند زد (۱۵).

در مدل هیدروترمال تایم فرض بر این است که زمان، سرعت و درصد جوانه‌زنی بذری در یک دمای ثابت توسط بزرگی اختلاف بین پتانسیل آب بستر بذری و پتانسیل آب پایه درصد معینی از جمعیت بذری کنترل می‌شود (۲، ۴ و ۱۰). در بیشتر مطالعات پیشین توزیع پتانسیل آب پایه در جمعیت بذری نرمال فرض شده است (۱ و ۱۳). یکی از مزایای این فرض آن است که پارامترهای انحراف استاندارد



شکل ۴- رابطه بین پتانسیل آب پایه در مقابل کسر جوانه‌زنی واقعی (A) و باقیمانده پتانسیل آب پایه در مقابل جوانه‌زنی واقعی (B)
 Figure 3- Relationship between base water potential and actual germination fraction (A) and residual base water potential and actual germination fraction (B)

پتانسیل اسمزی که در آن احتمال جوانه‌زنی صفر است (یا پتانسیل اسمزی که از آن جوانه‌زنی آغاز می‌شود)، را مشخص می‌سازد. این پارامتر برآورد واقع‌بینانه‌ای از $\psi_{b(0)}$ فراهم می‌آورد که از توزیع نرمال قابل استنتاج نیست.

نتیجه‌گیری

در مجموع، به نظر می‌رسد که حداقل در مورد برخی داده‌ها (داده‌های نامتقارن) فرض توزیع نرمال به وضوح نامناسب بوده و چنانچه در مدل‌های هیدروتایم و هیدروترمال تایم مورد استفاده قرار

$$M = \mu + \sigma \Gamma\left(\frac{1+\lambda}{\lambda}\right) \quad (11)$$

$$M_0 = \mu + \sigma (\ln(2))^{\frac{1}{\lambda}} \quad (12)$$

نتایج این مطالعه نشان داد که توزیع ویبول در قیاس با توزیع نرمال ممکن است برای مدل‌سازی پتانسیل آب پایه مناسب‌تر باشد. استفاده از توزیع ویبول یک مقدار دقیق برای شروع جوانه‌زنی ($\psi_{b(0)}$) در اختیار قرار می‌دهد. در مقابل، در توزیع نرمال وقتی درصد جوانه‌زنی به صفر نزدیک می‌شود، پتانسیل آب پایه به منفی بی‌نهایت می‌رسد (۱۶). به عبارت دیگر، پارامتر مکان (μ) در توزیع ویبول،

یک توزیع آماری مناسب انتخاب شود. پارامتر شکل در توزیع ویبول (λ) انعطاف‌پذیری زیادی به آن می‌دهد. از این رو می‌تواند باعث پیش‌بینی‌ها و برآوردهای دقیق‌تری در مقایسه با توزیع متقارن نرمال شود.

گیرد، منجر به توصیف ضعیف داده‌ها و پیش‌بینی‌ها خواهد شد. در این مطالعه، پارامتر شکل در مدل هیدروترمال تایم ویبول حاکی از نامتقارن بودن داده‌ها و چولگی توزیع به راست بود. این نتایج برخلاف فرض نرمال بودن توزیع پتانسیل آب پایه در یک جمعیت بذری است (۲، ۸ و ۱۰). بنابراین، پیش از استفاده از مدل هیدروترمال تایم، توزیع پتانسیل آب پایه در یک نمونه بذری باید مورد بررسی قرار گیرد و

References

- Allen, P. S., Meyer, S. E., and Khan, M. A. 2000. Hydrothermal time as a tool in comparative germination studies. p. 401-410. In M. Black et al. (ed.) Seed Biology: Advances and Applications. CAB International, Wallingford, UK.
- Alvarado, V., and Bradford, K. J. 2002. A hydrothermal time model explains the cardinal temperatures for seed germination. *Plant, Cell and Environment* 25: 1061-1069.
- Bewley, J. D., and Black, M. 1994. *Seeds: Physiology of Development and Germination*. New York: Plenum Press.
- Bloomberg, M., Sedcole, J. R., Mason, E. G., and Buchan, G. 2009. Hydrothermal time germination models for Radiata pine (*Pinus radiata* D. Don). *Seed Science Research* 19: 171-182.
- Bradford, K. J. 1990. A water relations analysis of seed germination rates. *Plant Physiology* 94: 840-849.
- Bradford, K. J. 2002. Applications of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. *Weed Science* 50: 248-260.
- Burnham, K. P., and Anderson, D. R. 2002. *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach*. Springer, New York, USA. p. 488.
- Finch-Savage, W. E., Steckel, J. R. A., and Phelps, K. 1998. Germination and post-germination growth to carrot seedling emergence: predictive threshold models and sources of variation between sowing occasions. *New Phytologist* 139: 505-516.
- Gummerson, R. J. 1986. The effect of constant temperatures and osmotic potentials on the germination of sugar beet. *Journal of Experimental Botany* 37: 729-741.
- Kebreab, E., and Murdoch, A. J. 1999. Modelling the effects of water stress and temperature on germination rate of *Orobanche aegyptiaca* seeds. *Journal of Experimental Botany* 50: 655-664.
- Mesgaran, M. B., Mashhadi, H. R., Alizadeh, H., Hunt, J., Young, K. R., and Cousens, R. D. 2013. Importance of distribution function selection for hydrothermal time models of seed germination. *Weed Research* 53: 89-101.
- Michel, B. E. 1983. Evaluation of the water potentials of solutions of polyethylene glycol 8000 both in the absence and presence of other solutes. *Plant Physiology* 72: 66-70.
- 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 temperatures. *New Phytologist* 158: 101-108.
- SAS. 2009. *SAS/STAT 9.2 User's Guide*. SAS Institute, Cary, NC, USA.
- Watt, M. S., Bloomberg, M., and Finch-savage, W. E. 2011. Development of a hydrothermal time model that accurately characterises how thermoinhibition regulates seed germination. *Plant, Cell and Environment* 34: 870-876.
- 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. *Ecological Modelling* 221: 1267-1272.

Modeling Seed Germination of *Ricinus communis* Using Hydrothermal Time Model Developed on the Basis of Weibull Distribution

H. Akbari¹- A. Derakhshan^{2*}- B. Kamkar³- S. A. M. Modares Sanavi⁴

Received: 17-10-2013

Accepted: 17-11-2014

Introduction

Temperature and water potential are two of the most important environmental factors regulating the seed germination. The germination response of a population of seeds to temperature and water potential can be described on the basis of hydrothermal time (HTT) model. Regardless of the wide use of HTT models to simulate germination, little research has critically examined the assumption that the base water potential within these models is normally distributed. An alternative to the normal distribution that can fit a range of distribution types is the Weibull distribution. Using germination data of Castor bean (*Ricinus communis* L.) over a range of water potential and sub-optimal temperature, we compared the utility of the normal and Weibull distribution in estimating base water potential (Ψ_b). The accuracy of their respective HTT models in predicting germination percentage across the sub-optimal temperature range was also examined.

Materials and Methods

Castor bean seed germination was tested across a range of water potential (0, -0.3, -0.6 and -0.9 MPa) at the sub-optimal range of temperature (ranging from 10 to 35 °C, with 5 °C intervals). Osmotic solutions were prepared by dissolving polyethylene glycol 8000 in distilled water according to the Michel (1983) equation for a given temperature. Seed germination was tested on 4 replicates of 50 seeds in moist paper towels in the incubator. The HTT models, based on the normal and Weibull distributions were fitted to data from all combinations of temperatures and water potentials using the PROC NL MIXED procedure in SAS.

Results and Discussion

Based on both normal and Weibull distribution functions, hydrotime constant and base water potential for castor bean seed germination were declined by increasing the temperature. Reducing the values of base water potential showed the greater need to water uptake for germination at lower temperatures and reducing hydrotime constant indicated an increase in germination rate by increasing the temperature. Compared with hydrothermal time model based on the normal distribution, Weibull hydrothermal time model gave a better fit (RMSE=8.07%) and more accurate (AIC=-5801) to seed germination data of castor bean. Based on Weibull hydrothermal time model, base temperature and hydrothermal time constant were estimated to be 8.86 °C and 833/10 MPa h, respectively. The osmotic potential from which the germination begins was (μ) -1.71 MPa. The shape parameter (λ) of the Weibull hydrothermal time model implied asymmetry of base water potential data and skewness of distribution to the right. A right-skewed distribution of $\Psi_{b(g)}$ has important ecological implications, as it means that the seed population have a greater reserve of seeds with very high values of $\Psi_{b(g)}$ and are therefore slow in germination, even under optimal conditions. The HTT model assumes that the timing, rate and percentage of seed germination for a constant temperature to be controlled by the difference between water potential of the seedbed and the Ψ_b for a given percentile ($\Psi_{b(g)}$). Most previous studies have assumed that $\Psi_{b(g)}$ is normally distributed. Our results suggested that the Weibull distribution may be more suitable than the normal distribution for seed germination modeling of castor bean. Similar to the normal distribution model the parameters of the Weibull HTT model can be readily interpreted to yield information about the frequency distribution of population for $\Psi_{b(g)}$, enabling comparison of the germination behaviors in different seed populations. The location parameter of Weibull HTT model (μ) specifies the lowest $\Psi_{b(g)}$ possible value in the population ($(\Psi_{b(0)})$) that cannot be derived from normal HTT model. The median (M) and mode (Mo) can be readily determined by

1- Ph.D. student in Agronomy, Department of Agronomy, Tarbiat Modares University

2- Ph.D. student in Agronomy, Khouzestan Ramin Agriculture and Natural Resources University

3- Associated Professor, Department of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

4- Professor, Department of Agronomy, Tarbiat Modares University

(* - Corresponding Author Email: derakhshan.abo@gmail.com)

equations of $M = \mu + \sigma \Gamma\left(\frac{1+\lambda}{\lambda}\right)$ and $M = \mu + \sigma \Gamma\left(\frac{1+\lambda}{\lambda}\right)$, respectively, from the μ , scale (σ) and λ parameters. The median specifies the value of $\Psi_{b(50)}$ for the population and the mode will specify the location of the peak of the probability distribution function for $\Psi_{b(g)}$. Another advantage of the Weibull distribution in this application is that it can approximate a range of $\Psi_{b(g)}$ distributions through changing the shape parameter.

Conclusions

Results of this research were in contrast with the assumption of a normal distribution of base water potential of a seed population. Hence, before using a hydrothermal time model for predictions the distribution of base water potential within a seed sample should be examined and an appropriate equation be selected. Due to the flexibility of the Weibull distribution, this model provides a useful method for predicting germination and determining the distribution of base water potential.

Keywords: Base water potential, Hydrotime model, Normal distribution