

مدل هیدروتایم: معرفی و کاربرد آن در تحقیقات بذر

سید مجید عالی‌مقام^۱، فرشید قادری‌فر^{۲*}

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد آگرواکولوژی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان؛
۲. دانشیار گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۲/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۷/۱۸

چکیده

جوانه‌زنی اولین و مهم‌ترین مرحله نمو در گیاه است که تحت تأثیر عوامل ژنتیکی و محیطی قرار می‌گیرد. مدل هیدروتایم رابطه درصد و سرعت جوانه‌زنی با پتانسیل آب را توصیف می‌کند. این مدل سرعت پیشروی جوانه‌زنی (θ_H)، یکنواختی جوانه‌زنی (σ_{ψ_b}) و میزان مقاومت به شرایط تنش خشکی ($\psi_{b(50)}$) را کمی می‌سازد. این شاخص‌ها در تعیین قدرت توده‌ها یا ارقام بذر، بررسی کمون در بذر و بررسی اثر تیمارهای بهبود دهنده قدرت بذر (مانند تیمار پرایمینگ، اثر هورمون‌های آبسزیک و یا جیبرلیک اسید) کاربرد دارند. مدل هیدروتایم بین محققان ایرانی به خوبی شناخته شده نیست. این مطالعه با هدف معرفی و کاربرد مدل هیدروتایم در تجزیه داده‌های جوانه‌زنی صورت گرفت. برای این کار از داده‌های جوانه‌زنی سه گیاه شاه‌افسر (*Melilotus officinalis*)، چاودار (*Secale cereale*) و گندم (*Triticum aestivum*) در واکنش به تنش خشکی استفاده شد. ضریب θ_H سرعت ذاتی جوانه‌زنی را، که بین گونه‌ها و یا مراحل مختلف فیزیولوژیکی متفاوت است، کمی می‌کند. شاخص $\psi_{b(50)}$ میانگین مقاومت به شرایط تنش در جمعیت را نشان می‌دهد. در جمعیتی که مقدار $\psi_{b(50)}$ بیشتر (مثبت‌تر) باشد در آن جمعیت نسبت به جمعیتی که دارای $\psi_{b(50)}$ کمتر (منفی‌تر) باشد، جوانه‌زنی در پتانسیل‌های بیشتر (تنش کمتر) متوقف می‌شود و در یک جمعیت بذری مقدار کمتر و بیشتر این شاخص به ترتیب با القا و خارج شدن از کمون در ارتباط است. ضریب σ_{ψ_b} تخمین کمی از یکنواختی جوانه‌زنی در جمعیت بذری است. بطوریکه مقدار بیشتر σ_{ψ_b} بیانگر پراکندگی بیشتری بین اولین و آخرین بذر جوانه‌زده است.

واژه‌های کلیدی: سرعت جوانه‌زنی، مدل هیدروتایم، مقاومت به خشکی، یکنواختی جوانه‌زنی.

مقدمه

جوانه‌زنی بذر و استقرار گیاهچه از مراحل بحرانی و مهم در چرخه زندگی گیاهان می‌باشند (Windauer et al., 2007). جوانه‌زنی اولین و مهم‌ترین مرحله نمو در گیاه است که تحت تأثیر عوامل ژنتیکی و محیطی قرار می‌گیرد (Meyer and Pendleton., 2000) و یکی از معیارهای مهم برای بقای گیاهان است. جوانه‌زنی بذر تحت تأثیر عواملی محیطی مانند نور، دما، رطوبت و اسیدیته قرار می‌گیرد (Chachalis and Reddy., 2000). برای جوانه‌زنی بذرهای بدون کمون از بین عوامل محیطی، فراهمی آب دارای اهمیت زیادی می‌باشد (Bradford, 1990; Bradford, 2002) و بر روی درصد و سرعت جوانه‌زنی تأثیرگذار می‌باشد (Larsen et al., 2004; Benech-Arnold and Sanchez, 1995,

جوانه‌زنی بذر و استقرار گیاهچه از مراحل بحرانی و مهم در چرخه زندگی گیاهان می‌باشند (Windauer et al., 2007). جوانه‌زنی اولین و مهم‌ترین مرحله نمو در گیاه است که تحت تأثیر عوامل ژنتیکی و محیطی قرار می‌گیرد (Meyer and Pendleton., 2000) و یکی از معیارهای مهم برای بقای گیاهان است. جوانه‌زنی بذر تحت تأثیر عواملی محیطی مانند نور، دما، رطوبت و اسیدیته قرار می‌گیرد (Chachalis and Reddy., 2000). برای جوانه‌زنی بذرهای بدون کمون از بین عوامل محیطی، فراهمی آب دارای اهمیت زیادی می‌باشد (Bradford, 1990; Bradford, 2002) و بر روی درصد و سرعت جوانه‌زنی تأثیرگذار می‌باشد (Larsen et al., 2004; Benech-Arnold and Sanchez, 1995,

امروزه محققین برای پیش‌بینی صحیح از جوانه‌زنی و سبز شدن گیاهان از مدل‌های جوانه‌زنی بهره می‌برند. مدل‌های ریاضی که پاسخ جوانه‌زنی به شرایط آبی را پیش‌بینی می‌کنند در حال گسترش هستند. یکی از این مدل‌ها که حساسیت جوانه‌زنی بذر به تنش خشکی را تعیین می‌کند، مدل هیدروتایم می‌باشد (Gummerson, 2005).

امروزه محققین برای پیش‌بینی صحیح از جوانه‌زنی و سبز شدن گیاهان از مدل‌های جوانه‌زنی بهره می‌برند. مدل‌های ریاضی که پاسخ جوانه‌زنی به شرایط آبی را پیش‌بینی می‌کنند در حال گسترش هستند. یکی از این مدل‌ها که حساسیت جوانه‌زنی بذر به تنش خشکی را تعیین می‌کند، مدل هیدروتایم می‌باشد (Gummerson, 2005).

گامرسون (Gummerson, 1986) گزارش کرد که شیب رابطه بین سرعت جوانه‌زنی و پتانسیل آب برای صدک‌های مختلف جوانه‌زنی یکسان است (شکل ۱). در یک دمای ثابت مقدار هیدروتایم برای یک توده بذری ثابت است (Kebreab and Murdoch., 1999). بر طبق معادله (۲)، با توجه به ثابت بودن ضریب هیدروتایم در یک توده بذری، عاملی که باعث تغییر سرعت جوانه‌زنی برای صدک‌های مختلف یک توده بذری می‌شود تفاوت پتانسیل آب پایه بذور در آن توده بذری است (Gummerson, 1986; Bradford, 1990; Dahal and Bradford, 1990). در مدل هیدروتایم فرض بر این است که توزیع پتانسیل پایه در یک جمعیت بذری دارای توزیعی نرمال است (Bradford, 1990; Dahal and Bradford, 1990; Watt et al, 2010).

در توزیع پتانسیل پایه در یک جمعیت مقدار پتانسیل پایه برای ۵۰ درصد جوانه‌زنی ($\psi_{b(50)}$) به عنوان میانگین جمعیت پتانسیل پایه و $\sigma_{\psi b}$ به عنوان انحراف معیار توزیع مقادیر پتانسیل پایه برای صدک‌های مختلف در جمعیت بذری است (Bradford, 1990; Kebreab and Murdoch, 1999; Watt et al., 2010). (شکل ۲).

(Bradford, 1990) و برادفورد و سوماسکو (Bradford and Somasco., 1994) گسترش پیدا کرد. این مدل به شرح زیر است:

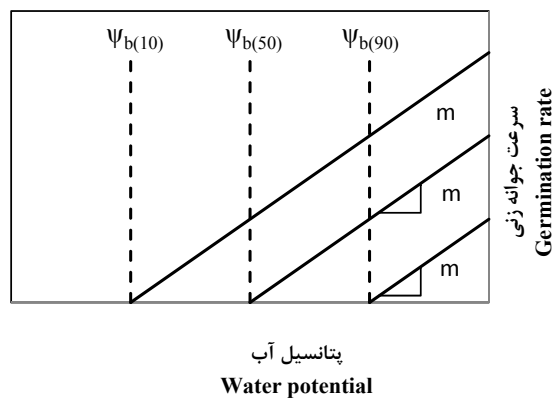
$$\theta_H = (\psi - \psi_{b(g)}) \times t_g \quad [1]$$

که در این معادله θ_H ضریب هیدروتایم بر حسب مگاپاسکال ساعت؛ ψ پتانسیل آب بر حسب مگاپاسکال؛ $\psi_{b(g)}$: پتانسیل آب پایه برای صدک g جوانه‌زنی بر حسب مگاپاسکال؛ t_g زمان جوانه‌زنی g درصد از بذور بر حسب ساعت را نشان می‌دهند.

با بازنویسی معادله (۱) رابطه زیر به دست می‌آید:

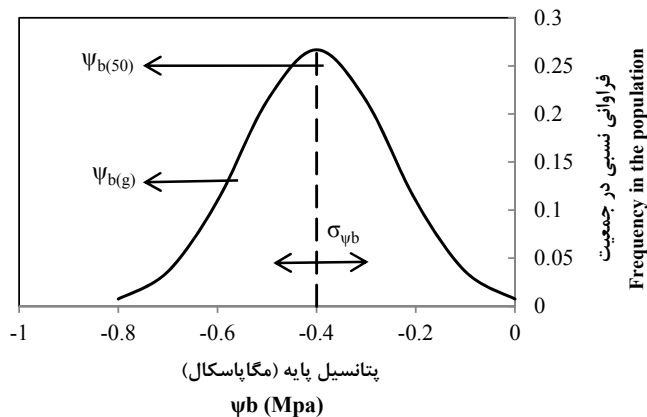
$$\psi_{b(g)} = \psi - \frac{\theta_H}{t_g} \quad [2]$$

بر اساس مدل هیدروتایم (معادله ۲)، در یک جمعیت بذری سرعت جوانه‌زنی ($1/t_g$) برای صدک‌های مختلف جوانه‌زنی (g) با پتانسیل آب (ψ) رابطه خطی دارد که در این معادله شیب خط برابر معکوس ضریب هیدروتایم و عرض از مبدا خط برابر منفی نسبت پتانسیل پایه بر ضریب هیدروتایم می‌باشد (شکل ۱).



شکل ۱. رابطه بین سرعت جوانه‌زنی برای صدک‌های مختلف با پتانسیل بستر بذری (در این رابطه در تمامی صدک‌ها، شیب خطوط (m) ثابت و برابر معکوس هیدروتایم می‌باشد (معادله ۱ و ۲)).

Fig. 1. Germination rates ($GRg = 1/tg$) as a function of ψ for different germination fractions (g). The slope (m) is constant for all fractions and is equal to $1/\theta_H$.



شکل ۲. توزیع نرمال مقادیر پتانسیل پایه در یک توده بذر. شکل منحنی توسط دو پارامتر میانگین ($\psi_{b(50)}$) و انحراف معیار ($\sigma_{\psi b}$) تعیین می‌شود.

Fig2. Normal distribution of ψ_b values in a seed lot, characterized by the mean [$\psi_{b(50)}$] and standard deviation ($\sigma_{\psi b}$).

از یک نرم‌افزار آماری مانند SAS و از طریق یک برنامه غیرخطی می‌توان ضرایب هیدروتایم را برای داده‌های جوانه‌زنی تحت تیمار سطوح خشکی مختلف برآورد کرد. با توجه به کاربرد گسترده از مدل هیدروتایم در تحقیقات مربوط به جوانه‌زنی و سبز شدن بذور به نظر می‌رسد استفاده از این مدل می‌تواند نتایج کاربردی را حاصل کند. با توجه به اهمیت این مدل در مطالعات جوانه‌زنی مقالات لاتین متعددی در رابطه با این مدل چاپ شده است، اما در مقالات داخل کشور به استفاده از این مدل کمتر توجه شده است. علت عدم استفاده از این مدل در بین محققان داخل به دلیل عدم شناخت کافی محققان از این مدل و ناآشنا بودن با روش تجزیه این مدل می‌باشد. از این رو در این مطالعه سعی شده است مدل هیدروتایم به صورت کاربردی توضیح داده شود و نحوه استفاده از خروجی مدل بر روی سه گیاه شاه‌افسر، چاودار و گندم بیان گردد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در آزمایشگاه تکنولوژی بذر دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شد. گیاهان مورد مطالعه شامل شاه‌افسر^۱، چاودار^۳ و گندم^۴ بودند. سطوح

با توجه به نرمال بودن توزیع مقادیر پتانسیل پایه در جمعیت بذر داریم (معادله ۳):

$$\text{probit}(g) = \frac{\psi_{b(g)} - \psi_{b(50)}}{\sigma_{\psi b}} \quad [3]$$

در معادله (۳)، $\text{probit}(g)$ یا همان واحد احتمال^۱، معکوس معادله توزیع نرمال استاندارد است که در واقع از روی فراوانی تجمعی یک عامل (در اینجا نسبت جوانه‌زنی تجمعی= g) در یک جمعیت با توزیع نرمال، مقدار Z را برای توزیع نرمال استاندارد برآورد می‌کند. با بازنویسی معادله (۲) داریم:

$$\psi_{b(g)} = \psi - \frac{\theta_H}{t_g} \quad [4]$$

با جایگزاری معادله (۴) در داخل معادله (۳) داریم:

$$\text{probit}(g) = \frac{\{\psi - \frac{\theta_H}{t_g}\} - \psi_{b(50)}}{\sigma_{\psi b}} \quad [5]$$

معادله (۵) به عنوان معادله کلیدی و کاربردی برای تخمین ضرایب هیدروتایم محسوب می‌شود که با داشتن مقدار پتانسیل آب (ψ)، زمان جوانه‌زنی (t_g) برای هر صدک و درصد تجمعی جوانه‌زنی در زمان t به راحتی و با استفاده

2. *Melilotus officinalis*
3. *Secale cereale*
4. *Triticum aestivum*

1. Probability unit (probit)

داشت که در یک جمعیت نرمال استاندارد برای فراوانی صفر و ۱۰۰ درصد، Z به ترتیب برابر منفی و مثبت بی‌نهایت است که از نظر ریاضی این مقادیر مبهم می‌باشند. بنابراین در تجزیه جوانه‌زنی تیمارهایی که درصد جوانه‌زنی آنها صفر بود، از مطالعه حذف شد و تیمارهایی که درصد جوانه‌زنی آن برابر ۱۰۰ بود، با عدد ۹۹ درصد جایگذاری شد. همچنین در صورتی که برای هر تیمار درصد جوانه‌زنی جمعیتی تکراری وجود داشت، مقادیر تکراری مربوط به زمان‌های بیشتر حذف شدند و فقط درصدی که در کوچکترین زمان اتفاق افتاده بود در تجزیه داده‌ها آورده شد.

با توجه به اینکه مقادیر $\Psi_{b(50)}$ و $\sigma_{\psi b}$ به ترتیب به عنوان میانگین و انحراف معیار در توزیع پتانسیل پایه محسوب می‌شوند، نمودار زنگوله‌ای شکل پراکنش مقادیر پتانسیل پایه در جمعیت برای هر گیاه با استفاده از معادله توزیع نرمال به صورت جداگانه رسم شد. برای رسم نمودار نرمال در نرم‌افزار اکسل از تابع NORMDIST استفاده شد. برای استفاده از این تابع به مقادیر فرضی پتانسیل پایه برای صدک‌های جوانه‌زنی $(\Psi_{b(g)})$ ، میانگین پتانسیل پایه جمعیت برای ۵۰ درصد جوانه‌زنی $(\Psi_{b(50)})$ و انحراف معیار پتانسیل پایه جمعیت $(\sigma_{\psi b})$ نیاز است. که این مقادیر از طریق نرم‌افزار SAS و با استفاده از معادله (۵) برای هر گیاه برآورد شدند.

با توجه به برآورد انحراف معیار و میانگین از معادله (۵) برای هر گیاه و نرمال بودن توزیع مقادیر پتانسیل پایه در جمعیت، برای پیش‌بینی مقادیر پتانسیل پایه برای صدک مورد نظر از جوانه‌زنی $(\Psi_{b(g)})$ ، از معکوس تابع نرمال استفاده شد. برای انجام این کار در نرم‌افزار اکسل از تابع NORMINV استفاده شد.

برای محاسبه مقادیر واقعی پتانسیل پایه برای هر صدک از جوانه‌زنی $(\Psi_{b(g)})$ و برای هر سطح خشکی از معادله (۴) استفاده شد. با توجه به توزیع نرمال مقادیر پتانسیل پایه و با در دست داشتن مقادیر واقعی برای پتانسیل پایه برای هر صدک (مقادیر حاصل از معادله ۴) با محاسبه فراوانی هر پتانسیل پایه در تابع نرمال می‌توان مقادیر درصد جوانه‌زنی در زمان t را از مدل هیدروتایم برآورد کرد. برای محاسبه مقادیر فراوانی در یک توزیع نرمال در نرم‌افزار اکسل از تابع NORMSDIST استفاده می‌شود. در نهایت با رسم نمودار یک به یک برای مقادیر

تیمار خشکی برای دو گیاه شاه‌افسر و چاودار شامل صفر، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، ۱، ۱/۲، ۱/۴، ۱/۶، ۱/۸، ۲- و ۲/۲- مگاپاسکال بود. سطوح خشکی اعمال شده برای گیاه گندم صفر، ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹، ۱/۲، ۱/۵- و ۱/۸- مگاپاسکال بود. برای تهیه سطوح مختلف خشکی از پلی‌اتیلن‌گلیکول ۶۰۰۰ استفاده شد (Michel and Kaufmann, 1973).

بذور گیاه شاه‌افسر دارای کمون بودند. برای شکستن کمون بذره‌های این گیاه از اسید سولفوریک ۹۹ درصد استفاده شد. بذره‌های این گیاه پس از خارج‌سازی از غلاف به مدت ۲۰ دقیقه در داخل اسید قرار داده شد (Ahmadi, and Akram-ghaderi., 2008). پس از خارج‌سازی از اسید بذور با آب مقطر شسته شدند و در محیط آزمایشگاه خشکانده شدند.

پس از تهیه محلول‌های پتانسیل آب، ۳ تکرار ۵۰ تایی از بذور هر گیاه در ظروف پتری‌دیش قرار داده شد. مقدار مساوی از هر محلول (۶ میلی‌لیتر) در تیمارهای مربوطه ریخته شد و در نهایت نمونه‌ها در انکوباتور و در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. با شروع جوانه‌زنی در هر روز در ۳ نوبت با فاصله زمانی ۴ ساعت و با کاهش سرعت جوانه‌زنی ۲ نوبت در صبح و عصر بذور جوانه‌زده شمارش شدند تا زمانی که تعداد بذور جوانه‌زده در ۳ نوبت شمارش ثابت شد. بذور جوانه‌زده شده پس از شمارش دور ریخته شدند. معیار جوانه‌زنی خروج ریشه‌چه به طول ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

برای برآورد ضرایب هیدروتایم از معادله (۵) استفاده شد. برای استفاده از این معادله در هر تیمار، نسبت جمعیتی جوانه‌زنی (g) در هر دفعه شمارش (t_g) از روی نتایج حاصل از شمارش روزانه بذور جوانه‌زده به دست آمد. در هر یک از سطوح خشکی به صورت مجزا از داده‌های مربوط به نسبت‌های جمعیتی جوانه‌زنی تابع probit گرفته شد؛ برای محاسبه probit در نرم‌افزار اکسل ۲۰۰۷ از تابع probit NORMINV استفاده شد. پس از محاسبه تابع probit برای داده‌های نسبت جمعیتی جوانه‌زنی، تمامی داده‌های تیمارهای خشکی مربوط به هر گیاه به صورت جداگانه وارد نرم‌افزار SAS شد. با استفاده از معادله (۵) و برنامه غیرخطی (procnlin) در نرم‌افزار SAS، ضرایب θ_H ، $\Psi_{b(50)}$ و $\sigma_{\psi b}$ تخمین زده شدند (یک مثال کلی برای برنامه SAS در ضمیمه آورده شده است)؛ باید این نکته را در نظر

بذور در جمعیت است (Bradford, and Still, 2004). هر چه مقدار عددی این ضریب کوچکتر باشد بیانگر یکنواختی بیشتر جوانه‌زنی است. مقایسه ضریب $\sigma_{\psi b}$ برای سه گیاه مورد مطالعه نشان داد یکنواختی جوانه‌زنی در گیاه شاه‌افسر ($\sigma_{\psi b}=0/28$) نسبت به دو گیاه گندم ($\sigma_{\psi b}=0/4$) و چاودار ($\sigma_{\psi b}=1/07$) بیشتر بود که این اختلاف در حدود اطمینان ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). کمترین یکنواختی جوانه‌زنی در گیاه چاودار مشاهده شد که با گندم در حدود اطمینان ۱ درصد اختلاف معنی‌داری داشت (جدول ۱).

سومین خروجی مدل هیدروتایم ضریب هیدروتایم (θ_H) نام دارد. این ضریب شاخصی از سرعت جوانه‌زنی در سطوح خشکی است. واحد این ضریب مگاپاسکال ساعت (یا مگاپاسکال روز) است (در این مطالعه واحد هیدروتایم مگاپاسکال ساعت در نظر گرفته شده است). یعنی هر چه مقدار عددی هیدروتایم کوچکتر باشد بیانگر بیشتر بودن سرعت جوانه‌زنی است.

در این مطالعه کمترین ضریب هیدروتایم با مقدار ۱۲/۲۵ مگاپاسکال ساعت در گیاه شاه‌افسر مشاهده شد. اختلاف ضریب هیدروتایم در گیاه شاه‌افسر نسبت به گیاه گندم و چاودار در حدود اطمینان ۱ درصد معنی‌دار بود. کوچکتر بودن مقدار عددی ضریب هیدروتایم در شاه‌افسر نشان می‌دهد در پتانسیل‌هایی که هر سه گیاه شاه‌افسر، چاودار و گندم توانایی جوانه‌زنی دارند گیاه شاه‌افسر در صورت برطرف شدن کمون می‌تواند با سرعت بالاتری جوانه بزند. ضریب هیدروتایم بین گیاه گندم و چاودار اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۱) و نشان از سرعت جوانه‌زنی یکسان در این دو گیاه است.

ارزیابی مدل هیدروتایم

برای ارزیابی مدل از نمودار یک به یک استفاده شد. برای به کارگیری این نمودار نیاز به مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده است. برای به دست آوردن مقادیر واقعی پتانسیل پایه برای صدک‌های مختلف ($\psi_{b(g)}$)، از معادله (۴) استفاده شد و در نهایت مقادیر واقعی پتانسیل پایه برای هر صدک و در هر پتانسیل برای زمان‌های مختلف جوانه‌زنی برآورد شد. با توجه به اینکه مقادیر پتانسیل پایه در یک جمعیت با میانگین ($\psi_{b(50)}$) و انحراف معیار ($\sigma_{\psi b}$) دارای توزیع نرمال است (Bradford, 1997) (شکل ۳)، با در

واقعی و محاسبه شده جوانه‌زنی حاصل از مدل هیدروتایم، مدل از لحاظ پیش‌بینی درصد جوانه‌زنی مورد ارزیابی قرار گرفت.

با توجه با اینکه مدل هیدروتایم حاصل مجموعه‌ای از داده‌های جوانه‌زنی در سطوح مختلف خشکی می‌باشد. برای رسم یک شکل واحد حاصل از این مدل جهت نشان دادن درصد جوانه‌زنی تجمعی در سطوح مختلف خشکی در مقابل زمان، باید زمان در سطوح مختلف خشکی نرمال شود. به منظور نرمال کردن زمان از معادله ۶ استفاده می‌شود (برادفورد، ۱۹۹۰).

$$t_{g(0)} = \left(1 - \left(\frac{\psi}{\psi_{b(g)}}\right)\right) \times t_g \quad [6]$$

در رابطه (۶)، $t_{g(0)}$: زمان جوانه‌زنی در آب مقطر (بر حسب ساعت)؛ ψ : پتانسیل آب (بر حسب مگاپاسکال)؛ $\psi_{b(g)}$: پتانسیل پایه برای صدک g (بر حسب مگاپاسکال)؛ t_g : زمان جوانه‌زنی صدک g (بر حسب ساعت) می‌باشند.

نتایج و بحث

نتایج مدل هیدروتایم برای جوانه‌زنی بذور سه گیاه مورد مطالعه در سطوح مختلف خشکی در جدول (۱) ارائه شده است. مقادیر پتانسیل پایه برای ۵۰ درصد جوانه‌زنی ($\psi_{b(50)}$) نشان دهنده سطحی از پتانسیل است که در مقادیر کمتر از این پتانسیل درصد جوانه‌زنی بذور به طور حتم کمتر از ۵۰ درصد خواهد بود (برادفورد و استیل، ۲۰۰۴). بنابراین زمانی که مقدار $\psi_{b(50)}$ منفی‌تر است، بیان‌گر توانایی بیشتر برای مقاومت مرحله جوانه‌زنی در مقابل خشکی می‌باشد. $\psi_{b(50)}$ برای گیاه شاه‌افسر نسبت به دو گیاه گندم و چاودار بیشتر بود. در گیاه شاه‌افسر $\psi_{b(50)}$ برابر $-0/47$ - مگاپاسکال بدست آمد. مقدار این ضریب در گیاه شاه‌افسر نسبت به دو گیاه چاودار و گندم از نظر آماری در حدود اطمینان ۱ درصد اختلاف معنی‌داری داشت (جدول ۱). دو گیاه گندم و چاودار از نظر ضریب $\psi_{b(50)}$ در حدود اطمینان ۱ درصد اختلاف معنی‌داری نداشتند (جدول ۱). نتایج مقایسه ضریب $\psi_{b(50)}$ حاصل از مدل هیدروتایم می‌تواند به خوبی در شناسایی گونه‌های حساس و مقاوم به خشکی کاربرد داشته باشد.

ضریب انحراف توزیع پتانسیل پایه در جمعیت ($\sigma_{\psi b}$)، ضریب دیگری است که از خروجی‌های مدل هیدروتایم است. این ضریب نشان‌دهنده میزان یکنواختی جوانه‌زنی

دست داشتن فراوانی پتانسیل پایه در هر زمان از جوانه‌زنی (نسبت تجمعی جوانه‌زنی ثبت شده برای هر سطح از خشکی) و با استفاده از معکوس تابع نرمال می‌توان مقادیر پتانسیل پایه در هر فراوانی را به دست آورد.

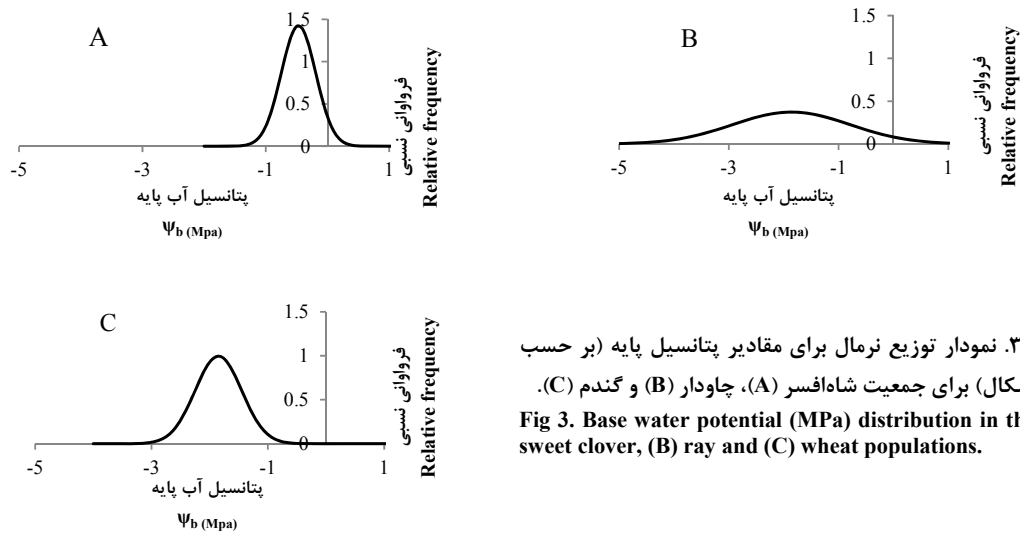
جدول ۱. ضرایب مدل هیدروتایم شامل $\psi_{b(50)}$: پتانسیل پایه برای $g=50$ (بر حسب مگاپاسکال); σ_{ψ_b} : انحراف معیار توزیع پتانسیل پایه در جمعیت; θ_H : هیدروتایم (بر حسب مگاپاسکال ساعت) و خطای استاندارد ضرایب (SE) برای سه گیاه مورد مطالعه.

Table 1. Hydrotime model parameters from the three studied plants. θ_H is the hydrotime constant (MPa h); $\psi_{b(50)}$ is the 50 percent germination base water potential (MPa); standard deviation of base water potential distribution in the population (σ_{ψ_b}); parameters standard error (SE).

Plant	گیاه	درجه آزادی خطای رگرسیون* Regression error df	$\theta_H \pm SE$	$\sigma_{\psi_b} \pm SE$	$\psi_{b(50)} \pm SE$
Sweet Clover	شاه‌افسر	115	12.25±1.5	0.28±0.02	-0.47±0.03
Rye	چاودار	202	68.96±4.5	1.07±0.07	-1.86±0.07
Wheat	گندم	92	61.7±3.52	0.40±0.03	-1.85±0.07

* t استیودنت دوطرفه برای درجه آزادی ۱۱۵، ۲۰۲ و ۹۲ و حدود اطمینان ۹۵ درصد به ترتیب برابر با ۱/۹۸، ۱/۹۷ و ۱/۹۸ است.

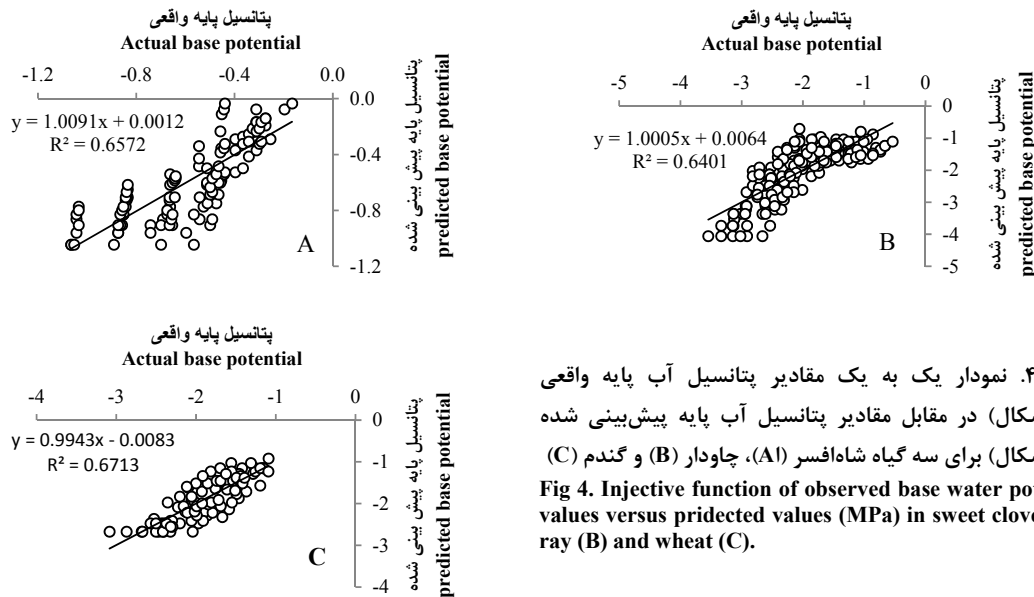
Two-sided student t for the degree of freedom equal 115, 202 and 92 and the 95% confidence interval is respectively 1.98, 1.97 and 1.98



شکل ۳. نمودار توزیع نرمال برای مقادیر پتانسیل پایه (بر حسب مگاپاسکال) برای جمعیت شاه‌افسر (A)، چاودار (B) و گندم (C).
Fig 3. Base water potential (MPa) distribution in the (A) sweet clover, (B) ray and (C) wheat populations.

RMSE برای بررسی دقت نمودار یک به یک در جدول (۲) ارائه داده شده است.

با قرار دادن مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده پتانسیل پایه در نمودار یک به یک، در هر سه گیاه مورد مطالعه ضرایب نمودار یک به یک قابل قبول بود (شکل ۴). مقادیر R^2 و



شکل ۴. نمودار یک به یک مقادیر پتانسیل آب پایه واقعی (مگا پاسکال) در مقابل مقادیر پتانسیل آب پایه پیش‌بینی شده (مگا پاسکال) برای سه گیاه شاه‌افسر (A)، چاودار (B) و گندم (C).
Fig 4. Injective function of observed base water potential values versus predicted values (MPa) in sweet clover (A), ray (B) and wheat (C).

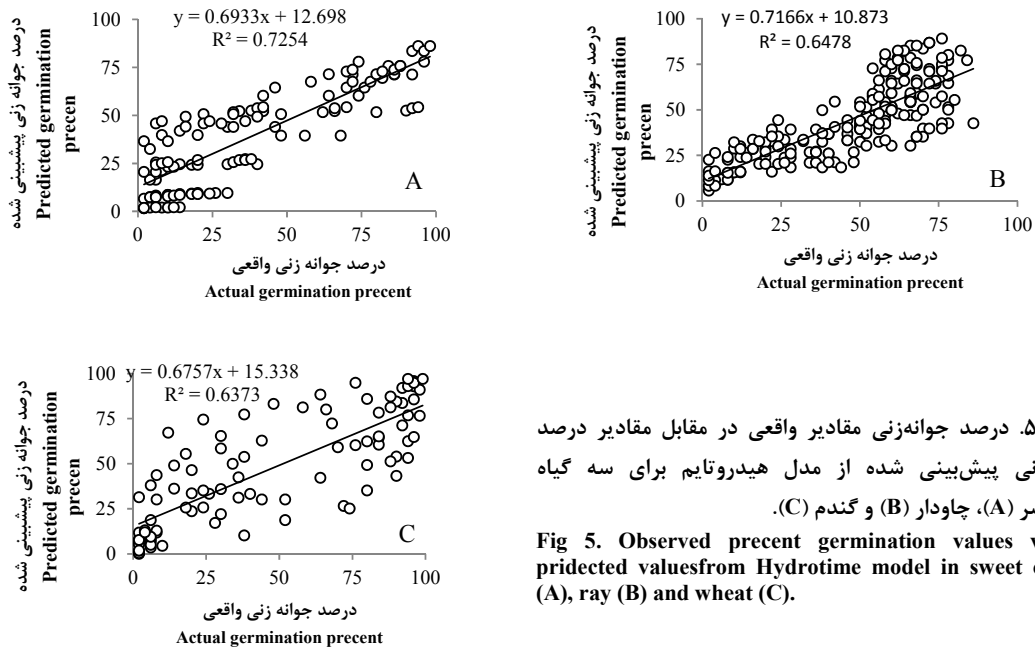
جوانه‌زنی را برآورد می‌کند. با در اختیار داشتن مقادیر واقعی درصد جوانه‌زنی جمع‌ی حاصل از شمارش بذور جوانه‌زده در زمان‌های مختلف و در پتانسیل‌های خشکی مختلف و محاسبه درصد جوانه‌زنی از طریق معکوس توزیع نرمال استاندارد می‌توان نمودار یک به یک درصد جوانه‌زنی برای ارزیابی مدل هیدروتایم را مورد بررسی قرار داد (شکل ۵). ضرایب R^2 و RMSE مربوط به نمودار پیش‌بینی درصد جوانه‌زنی در جدول (۲) ارائه شده است که در هر سه گیاه مورد مطالعه از مقادیر قابل قبولی برخوردار هستند و مدل هیدروتایم توانسته به خوبی درصد جوانه‌زنی این سه گیاه را تحت شرایط تنش پیش‌بینی کند.

مدل هیدروتایم توانایی پیش‌بینی درصد جوانه‌زنی در پتانسیل‌ها و زمان‌های مختلف را نیز دارا است. برای پیش‌بینی درصد جوانه‌زنی می‌توان از معادله (۵) استفاده کرد. در صورتی که ضرایب هیدروتایم برآورد شود و در معادله (۵) قرار داده شوند. با استفاده از این معادله مقادیر $probit(g)$ برای زمان‌های دلخواه جوانه‌زنی (t_g) برآورد می‌شود. با توجه به اینکه در تابع نرمال استاندارد Z همان $probit(g)$ است. می‌توان با در اختیار داشتن مقادیر $probit(g)$ (همان مقادیر Z) و با استفاده از تابع معکوس توزیع نرمال استاندارد فراوانی هر یک از مقادیر Z را برای هر پتانسیل و زمان‌های دلخواه پیش‌بینی کرد. فراوانی Z حاصل از تابع معکوس نرمال استاندارد در واقع مقدار درصد

جدول ۲. مقادیر RMSE، RMD و R^2 برای نمودار یک به یک درصد جوانه‌زنی واقعی در برابر درصد جوانه‌زنی پیش‌بینی‌شده و پتانسیل پایه واقعی در برابر پتانسیل پایه پیش‌بینی‌شده در سه گیاه شاه‌افسر، چاودار و گندم.

Table 2. RMSE, RMD and R^2 values in injective function model for observed germination versus predicted germination in hydrotim model and observed water base potential values versus predicted values (MPa) in sweet clover, ray and wheat

Plant	گیاه	پتانسیل پایه Base potential			درصد جوانه‌زنی Germination percent		
		RMSE	RMD	R^2	RMSE	RMD	R^2
Sweet Clover	شاه‌افسر	0.17	0.71	0.64	16.1	2.80	0.72
Rye	چاودار	0.48	0.26	0.67	14.1	4.77	0.65
Wheat	گندم	0.29	0.13	0.66	21.6	0.02	0.64



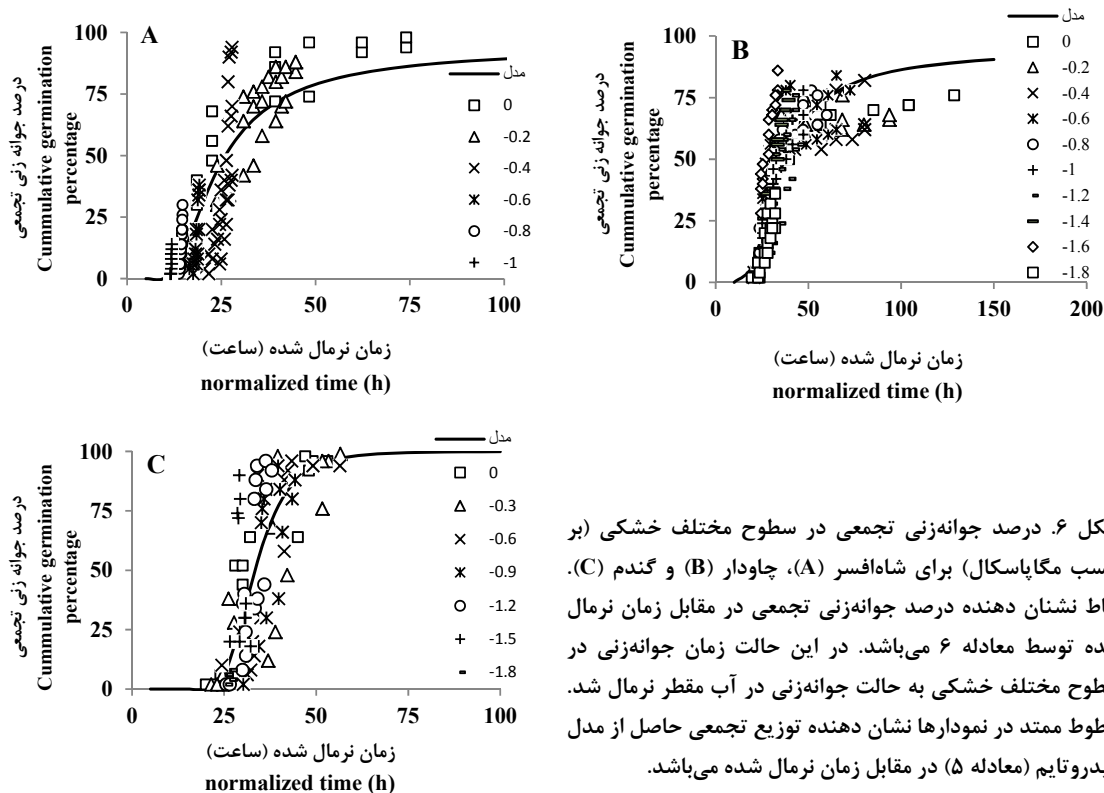
شکل ۵. درصد جوانه‌زنی مقادیر واقعی در مقابل مقادیر درصد جوانه‌زنی پیش‌بینی شده از مدل هیدروتایم برای سه گیاه شاه‌افسر (A)، چاودار (B) و گندم (C).

Fig 5. Observed percent germination values versus predicted values from Hydrotim model in sweet clover (A), ray (B) and wheat (C).

این موضوع از طریق ارتباط بین توزیع مقادیر منفی‌تر پتانسیل آب پایه با زمانیکه جوانه‌زنی تحریک می‌شود (افزایش GA، کاهش ABA) و ارتباط توزیع مقادیر مثبت‌تر پتانسیل آب پایه با عوامل بازدارنده جوانه‌زنی (دماهای بالاتر از دمای سقف) حاصل می‌شود. بر طبق این رهیافت هارت و پنج-آرنولد (Huarte and Bencch- Arnold., 2005) در یک بررسی برای مقایسه اثر دماهای متناوب بر روی جوانه‌زنی با دماهای ثابت گزارش کردند که قرارگیری بذور در دماهای متناوب باعث منفی‌تر شدن جمعیت بذور نسبت به حالتی می‌شود که بذور در دمای ثابت قرار می‌گیرند. این به آن معنی است که در دماهای متناوب نسبت به دمای ثابت باعث رشد جنین می‌شود و در ضمن منجر به افزایش مقاومت جوانه‌زنی به خشکی می‌شود. وینداور و همکاران (Windauer et al., 2007) برای بررسی اثر پرایمینگ بر جوانه‌زنی لسکورلا (*Lesquerella fendleri*) از مدل هیدروتایم استفاده کرد. در نهایت ایشان در این تحقیق با توجه به تغییرات ضرایب هیدروتایم گزارش کردند تیمار پرایمینگ باعث بهبود شرایط جوانه‌زنی و افزایش تحمل به خشکی در گیاه لسکورلا شد. برادفورد و استیل (Bradford and Still., 2004) با استفاده از مدل هیدروتایم توده‌های قوی و ضعیف کلم را شناسایی کردند.

در گیاه چاودار کمترین خطا ($RMSE=14/1$) برای پیش‌بینی درصد جوانه‌زنی تجمعی توسط مدل هیدروتایم مشاهده شد. در شکل ۶ روند درصد جوانه‌زنی تجمعی حاصل از مدل هیدروتایم برای هر یک از سطوح خشکی به صورت جداگانه رسم شده است. بررسی روند درصد تجمعی در مقابل زمان برای گیاه چاودار نشان می‌دهد مدل هیدروتایم می‌تواند در پیش‌بینی درصد جوانه‌زنی تجمعی گیاهان در سطوح خشکی مختلف مورد استفاده قرار گیرد. در سطوح خشکی بالا به دلیل سرعت پایین جوانه‌زنی، در آزمایشگاه شمارش‌ها با فاصله زمانی بیشتری انجام شد. صورتی که بذرها دقیقاً در زمان جوانه‌زنی شمارش شوند، خطای محاسبات در مدل هیدروتایم کاهش خواهد یافت و دقت پیش‌بینی توسط مدل بیشتر خواهد بود.

استیل و برادفورد (Still and Bradford., 1998) از مدل هیدروتایم برای کمی‌سازی کیفیت بذور کلزا در طی نمو استفاده کردند. ایشان با بهره‌گیری از مدل هیدروتایم پتانسیل جوانه‌زنی در مراحل مختلف نمو را مورد مطالعه قرار دادند و زمان مناسب برداشت از نظر بیولوژی در گیاه کلزا را تعیین کردند. استفاده از مدل هیدروتایم امکان توصیف واکنش جوانه‌زنی به عوامل تحریک کننده و یا بازدارنده جوانه‌زنی مانند ABA، GA، اتیلن و دماهای بالاتر از دمای مطلوب را فراهم می‌کند (Huarte, 2006).



شکل ۶. درصد جوانه‌زنی تجمعی در سطوح مختلف خشکی (بر حسب مگاپاسکال) برای شاه‌افسر (A)، چاودار (B) و گندم (C). نقاط نشان دهنده درصد جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان نرمال شده توسط معادله ۶ می‌باشد. در این حالت زمان جوانه‌زنی در سطوح مختلف خشکی به حالت جوانه‌زنی در آب مقطر نرمال شد. خطوط ممتد در نمودارها نشان دهنده توزیع تجمعی حاصل از مدل هیدروتایم (معادله ۵) در مقابل زمان نرمال شده می‌باشد.

Fig 6. Cumulative germination at different MPa for sweet clover (A), ray (B) and wheat (C) seeds, normalized to the time-courses of the corresponding seed in water. The symbols are the observed time points normalized according to equation 6. The solid curves are the germination time courses in water ($t_{g(0)}$) predicted from cumulative normal distributions of the equation 5.

$(\Psi_{b(50)} = -1/85)$ نسبت به شاه‌افسر $(\Psi_{b(50)} = -0/47)$ مقاوم‌تر بودند.

پیش‌بینی درصد جوانه‌زنی در شرایط تنش خشکی برای هر سه گیاه مورد مطالعه از نظر آماری قابل قبول بود. ارزیابی مدل هیدروتایم برای تعیین درصد جوانه‌زنی نشان داد که می‌توان از خروجی مدل برای پیش‌بینی درصد جوانه‌زنی در شرایط تنش خشکی نیز استفاده کرد. با توجه به شاخص‌هایی که از مدل هیدروتایم به دست می‌آید، این مدل در برنامه‌های اصلاحی می‌تواند کمک زیادی به اصلاح‌گران برای شناسایی بذور با کارایی بالا و دارای مقاومت به شرایط تحت شرایط تنش داشته باشد. علاوه بر استفاده از مدل هیدروتایم در بخش اصلاح، از این مدل می‌توان جهت مدیریت و کنترل بهتر علف‌های هرز استفاده کرد.

نتیجه‌گیری

خروجی مدل هیدروتایم می‌تواند برخی از شاخص‌های کیفیت بذر در ارتباط با میزان مقاومت به خشکی، سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی در بذور را تعیین کند. در این مطالعه داده‌های جوانه‌زنی سه گیاه شاه‌افسر، چاودار و گندم در سطوح مختلف خشکی استفاده از مدل هیدروتایم به صورت نوین تجزیه شد. نتایج خروجی مدل نشان داد که سرعت جوانه‌زنی در شرایط تنش خشکی در گیاه شاه‌افسر $(\theta_H = 12/25)$ نسبت به دو گیاه چاودار $(\theta_H = 68/96)$ و گندم $(\theta_H = 61/7)$ بیشتر بود. این در حالی بود که یکنواختی جوانه‌زنی برای شاه‌افسر $(\sigma_{\Psi_b} = 0/28)$ و گندم $(\sigma_{\Psi_b} = 0/4)$ بیشتر از چاودار $(\sigma_{\Psi_b} = 1/07)$ به دست آمد. از نظر مقاومت به خشکی چاودار $(\Psi_{b(50)} = -1/86)$ و گندم

منابع

- Ahmadi, A., Akramghaderi, F., 2008. Effects of chemicalscarification on dormancy and germination *Melilotus affinalis* L.(lam). In: Iranian Conference of Crop Science, Karaj. p. 364.
- Balbaki, R.Z., Zurayk, R.A., Bleik, M.M., Tahouk, S.N., 1999. Germination and seedling development of drought tolerant and susceptible wheat undermoisture stress. *Seed Science and Technology*. 27, 291-302.
- Benech-Arnold, R.L., Sanchez, R.A., 1995. Modeling weed seed germination. In: Kigel, J., Galili, G., (eds.), *Seed development and germination*. New York: Marcel Dekker. 545-566pp.
- Bradford, K.J., 1990. A water relation analysis of seed germination rates. *Plant Physiology*. 94, 840-849.
- Bradford, K.J., 1997. The hydrotime concept in seed germination and dormancy, pp 349-360. In: Ellis, R.H., Black, M., Murdoch, A.J., Hong, T.D. (eds.), *Basic. Applied Aspect. Seed Biology*, Boston, Kluwer Academic Publishers.
- Bradford, K.J., 2002. Application of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. *Weed Science*. 50, 248-260.
- Bradford, K.J., Somasco, O.A., 1994. Water relations of lettuce seed thermoinhibition. I. Priming and endosperm effects on base water potential. *Seed Science Research*. 4, 1-10.
- Bradford, K.J., Still, D.W., 2004. Application of hydrotime analysis in seed testing. *Seed Technology*. 26, 74-85.
- Chachalis, D., Reddy, K.N., 2000. Factors affecting *Campsis radicans* seed germination and seedling emergence. *Weed Science*. 48, 212-216.
- Dahal, P., Bradford, K.J., 1990. Effects of priming and endosperm integrity on seed germination rates of tomato genotypes. II. Germination at reduced water potential. *Journal of Experimental Botany*. 41, 1441-1453.
- 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.
- Huarte, R.H., 2006. Hydrotime analysis of the effect of fluctuating temperatures on seed germination in several non-cultivated species. *Seed Science and Technology*. 34, 533-547.
- Huarte, H.R. Benech-Arnold, R.L., 2005. Incubation under fluctuating temperatures reduces mean basewater potential for seed germination in several non-cultivated species. *Seed Science Research*. 15, 89-97.
- Hucl, P. 1993. Effect of temperature and moisture stress on the germination of diverse common bean genotypes. *Canadian Journal of Plant Science*. 73, 697-702.
- Kebreab, K., Murdoch, A.J., 1999. Modeling the effects of water stress and temperature on germination rate of *Orobancha aegyptiaca* seeds. *Journal of Experimental Botany*. 50, 655-664.
- Larsen, S.U., Bailly, C., Côme, D., Corbineau, F., 2004. Use of the hydrothermal time model to analysis interacting effects of water and temperature on germination of three grass species. *Seed Science Research*. 14, 35-50.
- Meyer, S.E., Pendleton, R.L., 2000. Genetic regulation of seed dormancy in *Purshia tridentate* (Rosaceae). *Annals of Botany*. 85, 521-529.
- Michel, B.E., Kaufmann, M.R., 1973. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiology*. 51, 914-916.
- Springer, T.L., 2005. Germination and early seedling growth of chaffy-seeded grasses at negative water potentials. *Crop Science*. 45, 2075-2080.
- Still, D.W., Bradford, K.J., 1998. Using hydrotime and ABA-time models to quantify seed quality of brassicas during development. *Journal of American Society of Horticultural Science*. 123, 692-699.
- Watt, M.S., Xu, V., 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.
- Windauer, L., Altuna, A., Benech-Arnold, R., 2007. Hydrotime analysis of *Lesquerella fendleri* seed germination responses to priming treatments. *Industrial Crops Products*. 25, 70-74.

Windauer, L., Martinez, J., Rapoport, D., Wassner, D., Benech-Arnold, R., 2011. Germination responses to temperature and water potential in *Jatropha curcas* seeds: a

hydrotime model explains the difference between dormancy expression and dormancy induction at different incubation temperature. *Annals of Botany*.109, 265-273.

ضمیمه

(در برنامه SAS حروف لاتین باید توسط حروف انگلیسی جایگزین شوند تا مدل اجرا شود)

```

data Hydrottime;
input Time Potential Rep Germination;
tg=time;
ψ=Potential;
FG=Germination/100;
y=probit (FG) ;
cards;
18.5 0 1 14
22.5 0 1 48
48.25 0 1 74
74 0 1 94
18.5 0 2 30
22.5 0 2 56
39.25 0 2 92
48.25 0 2 96
18.5 0 3 40
22.5 0 3 68
74 0 3 98
39.25 -0.2 1 30
74 -0.2 1 46
86.25 -0.2 1 58
123.5 -0.2 1 70
165.5 -0.2 1 84
39.25 -0.2 2 46
62.25 -0.2 2 74
39.25 -0.2 3 32
110.75 -0.2 3 80
165.5 -0.2 3 88
123.5 -0.4 1 6
188.5 -0.4 1 22
310.25 -0.4 1 42
62.25 -0.4 2 4
188.5 -0.4 2 32
310.25 -0.4 2 70
48.25 -0.4 3 6
123.5 -0.4 3 28
188.5 -0.4 3 48
212.5 -0.4 3 80
310.25 -0.4 3 94
proc nlin;
parms θH=10 ψb(50)=-1 σψb=0.3;
model y=(ψ - (θH /tg) -ψb(50))/σψb;
run;

```

