



دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی جاپق

نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی
جلد بیست و دوم، شماره یکم، ۱۳۹۴
<http://jopp.gau.ac.ir>

مقایسه مدل‌های هیدروترمال تایم جهت مدل‌سازی جوانه‌زنی بذر فالاریس بر مبنای توزیع‌های نرمال، ویبول و گامبل

***ابوالفضل درخشان^۱ و جاوید قرخلو^۲**

^۱دانشجوی دکتری زراعت، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان
^۲استادیار گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۵/۲۷

چکیده

مدل‌های هیدروترمال تایم بطور گسترده‌ای برای توصیف پاسخ جوانه‌زنی بذر به دما و پتانسیل آب بکار می‌روند. در این مطالعه، سه مدل هیدروترمال تایم توسعه یافته بر مبنای توزیع‌های آماری مختلف (نرمال، ویبول و گامبل) برای توصیف جوانه‌زنی بذر فالاریس (*Phalaris minor*) مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل‌های هیدروترمال تایم گامبل ($AICc = -762/8$) و ویبول ($AICc = -762/6$) از دقت پیش‌بینی بیشتری در قیاس با مدل هیدروترمال تایم نرمال ($AICc = -737/6$) برخوردار بودند. با این وجود، اختلاف معنی‌داری بین مقدار ثابت هیدروترمال تایم، دمای پایه و میانه پتانسیل آب پایه ($\Psi_{b(50)}$) برآورد شده برای جوانه‌زنی بذر فالاریس با هر سه مدل هیدروترمال تایم وجود نداشت و به ترتیب در حدود ۱۰۰۰ مگاپاسکال درجه سانتی‌گراد ساعت، ۴/۲ درجه سانتی‌گراد و ۱- مگاپاسکال برآورد شد. بر اساس مدل هیدروترمال تایم ویبول، آستانه پتانسیل آب برای شروع جوانه‌زنی ($\Psi_{b(0)}$) معادل ۱/۵- مگاپاسکال بدست آمد. همچنین، توزیع پتانسیل آب پایه جوانه‌زنی بذرها چوله به راست بود ($\lambda = 1/57$). با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری توزیع ویبول، امکان تعیین چولگی توزیع پتانسیل آب پایه و برآورد آستانه پتانسیل آب برای شروع جوانه‌زنی می‌توان از این مدل بطور گسترده برای پیش‌بینی جوانه‌زنی بذر استفاده کرد.

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

*نویسنده مسئول: derakhshan.abo@gmail.com

مقدمه

جوانه‌زنی با جذب آب توسط بذر (آبنوشی) آغاز می‌شود و با ظهور محور جنینی (به‌طور معمول ریشه‌چه) از میان ساختارهای احاطه‌کننده آن به پایان می‌رسد (بیولی و همکاران، ۲۰۱۳). آب مهم‌ترین عامل زیست‌محیطی مورد نیاز برای جوانه‌زنی بذر است. به‌طوری‌که، بذرهای دارای یک پتانسیل آب پایه (ψ_b) می‌باشند که در پتانسیل‌های کمتر (منفی‌تر) از آن، بستر بذر برای جوانه‌زنی خیلی خشک می‌شود (فنج-ساوج و همکاران، ۱۹۹۸). بعد از آب، دما مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده جوانه‌زنی بذر است (بیولی و همکاران، ۲۰۱۳). دما از سه طریق جوانه‌زنی بذر را در مزرعه کنترل می‌کند: (۱) با تعیین ظرفیت و سرعت جوانه‌زنی بذرهای فاقد کمون^۱، (۲) از طریق حذف کمون اولیه و یا ثانویه و (۳) القاء کمون ثانویه (بیولی و همکاران، ۲۰۱۳). حتی بذرهای فاقد کمون دارای آستانه‌های دمایی هستند که فراتر از آن جوانه‌زنی متوقف می‌شود. دمای پایه (T_b)، دمایی است که بستر بذر برای جوانه‌زنی خیلی سرد می‌شود و دمای بیشینه (T_m)، دمایی است که در آن بستر بذر خیلی گرم شده و جوانه‌زنی متوقف می‌شود (درخشان و همکاران، ۲۰۱۴). تحت شرایط مطلوب بستر بذر، بذرها به سرعت جوانه می‌زنند. چنانچه شرایط بستر بذر بسوی مقادیر آستانه (ψ_b ، T_b و T_m) پیش رود، جوانه‌زنی بذرهای خیلی کند می‌شود. علاوه بر این، حتی زمانی‌که همه بذرهای در شرایط یکسانی باشند، سرعت جوانه‌زنی در داخل جمعیت بذری متفاوت است.

گومرسون (۱۹۸۶) پیشنهاد داد که اثرات دما و پتانسیل آب بر سرعت جوانه‌زنی را می‌توان در واحد هیدروترمال تایم ترکیب نمود. در مدل هیدروترمال تایم، زمان جوانه‌زنی به عنوان تابعی از مقادیر پتانسیل‌های آب و دماهای فراتر از یک مقدار آستانه یا پایه (ψ_b و T_b) که کمتر از آن جوانه‌زنی متوقف خواهد شد، در نظر گرفته می‌شود (معادله ۱).

$$t_g = \frac{\theta_{HT}}{[(\psi - \psi_{b(g)})(T - T_b)]} \quad \text{معادله (۱)}$$

بنابراین:

$$\psi_{b(g)} = \psi - \frac{\theta_{HT}}{(T - T_b)t_g} \quad \text{معادله (۲)}$$

که در معادلات ۱ و ۲، t_g زمان تا جوانه‌زنی کسر g جمعیت بذری برحسب ساعت (h)؛ θ_{HT} ثابت هیدروترمال تایم برحسب مگاپاسکال درجه سانتی‌گراد ساعت ($MPa \text{ } ^\circ C \text{ h}$) و $\psi_{b(g)}$ پتانسیل

آب پایه برای g آمین درصد جوانه‌زنی برحسب مگاپاسکال (MPa) می‌باشند. θ_{HT} و T_b برای هر جمعیت بذری یک مقدار منحصر به فرد و مقدار $\Psi_{b(g)}$ برحسب توزیع فراوانی متفاوت است (وات و همکاران، ۲۰۱۱؛ بیولی و همکاران، ۲۰۱۳؛ مسگران و همکاران، ۲۰۱۳). فرض بر این است که تنها پتانسیل آب پایه (Ψ_b) با g تغییر می‌کند، به طوری که توزیع زمان جوانه‌زنی در یک جمعیت بذری توسط توزیع $\Psi_{b(g)}$ تعیین می‌شود (بیولی و همکاران، ۲۰۱۳). 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 (کیریاب و موردادک، ۱۹۹۹؛ بلومبرگ و همکاران، ۲۰۰۹).

$$\Psi_{b(g)} = \Psi_{b(50)} + \text{probit}(g) \sigma_{\Psi_b} \quad \text{معادله (۳)}$$

که $\Psi_{b(50)}$ پنجاهمین درصد توزیع پتانسیل آب پایه و 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. بطور معمول، مدل هیدروترمال تایم با جایگزین کردن سمت راست معادله (۳) بجای $\Psi_{b(g)}$ در معادله (۱) و مرتب کردن معادله حاصل بر حسب پروبیت به داده‌های جوانه‌زنی برازش داده می‌شود (معادله ۴).

$$\text{probit}(g) = \frac{\Psi \left\{ \frac{\theta_{HT}}{(T-T_b)g} \right\} - \Psi_{b(50)}}{\sigma_{\Psi_b}} \quad \text{معادله (۴)}$$

با وجود استفاده گسترده از مدل‌های هیدروترمال تایم برای شبیه‌سازی جوانه‌زنی، تحقیقات اندکی فرض نرمال بودن توزیع $\Psi_{b(g)}$ را به‌طور منتقدانه بررسی کرده‌اند. در این راستا، وات و همکاران (۲۰۱۰ و ۲۰۱۱) گزارش کردند که مدل هیدروترمال تایم توسعه یافته بر مبنای توزیع ویبول دقت بیشتر و اریب کمتری در قیاس با مدل هیدروترمال تایم مبتنی بر توزیع نرمال داشت. همچنین مسگران و همکاران (۲۰۱۳) 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 سه گونه از چهار گونه مورد مطالعه، توزیع نرمال نامناسب‌ترین گزینه در تجزیه هیدروتایم جوانه‌زنی بذر بود.

با استفاده از توزیع ویبول می‌توان $\Psi_{b(g)}$ را در محدوده دمایی کمتر از مطلوب با درصد نقطه^۱ (یا تابع توزیع تجمعی معکوس^۲) مدل‌سازی کرد (وات و همکاران، ۲۰۱۰).

1- Percent point function (ppf)

2- Inverse cumulative distribution function

$$\Psi_{b(g)} = \mu + \sigma (-\ln(1-g))^{\frac{1}{\lambda}} \quad \text{معادله (۵)}$$

که پارامتر μ ، مکان کمترین مقدار $\Psi_{b(g)}$ (یعنی $\Psi_{b(0)}$)؛ λ ، پارامتر شکل و σ ، پارامتر مقیاس می‌باشند. همچنین، با استفاده از توزیع ویبول می‌توان درصد جوانه‌زنی را توسط تابع توزیع تجمعی مدل‌سازی کرد (مسگران و همکاران، ۲۰۱۳).

$$g = 1 - \exp \left[- \left(\frac{(\Psi_{b(g)} - \mu)^{\lambda}}{\sigma} \right)^{\lambda} \right] \quad \text{معادله (۶)}$$

و با جایگزینی سمت راست معادله ۲ بجای $\Psi_{b(g)}$:

$$g = 1 - \left[\exp \left(- \left(\frac{\left(\Psi - \left\{ \frac{\theta_{HT}}{[(T-T_b)g]} \right\} - \mu \right)^{\lambda}}{\sigma} \right)^{\lambda} \right) \right] \quad \text{معادله (۷)}$$

بطور مشابه، با استفاده از توزیع گامبل نیز می‌توان $\Psi_{b(g)}$ را با تابع درصد نقطه و درصد جوانه‌زنی را توسط تابع توزیع تجمعی مدل‌سازی کرد.

$$\Psi_{b(g)} = \mu - \sigma \left[\ln \left(\ln \left(\frac{1}{g} \right) \right) \right] \quad \text{معادله (۸)}$$

$$g = \exp \left(- \exp \left(- \left(\frac{\Psi - \left\{ \frac{\theta_{HT}}{[(T-T_b)g]} \right\} - \mu}{\sigma} \right)^{\lambda} \right) \right) \quad \text{معادله (۹)}$$

که μ ، متغیر مکان و معادل با مد پتانسیل آب پایه جمعیت بذری است و σ ، پارامتر مقیاس می‌باشد. چنانچه $\Psi_{b(g)}$ از توزیع گامبل پیروی کند، در $\Psi_{b(g)} = \mu$ ، کسر بذرهاى جوانه‌زده تقریباً معادل ۰/۳۶۶ خواهد بود (در توزیع نرمال، $\Psi_{b(g)} = \mu$ برابر با میانه و معادل ۰/۵ است).

این مطالعه با هدف برآزش و مقایسه مدل‌های هیدروترمال تایم توسعه یافته بر مبنای توزیع‌های نرمال، ویبول و گامبل به داده‌های جوانه‌زنی بذرهاى فالاریس (*Phalaris minor Retz.*) در محدوده‌ای از پتانسیل‌های آب در دامنه دمایی کمتر از مطلوب انجام شد.

مواد و روش‌ها

آزمایش در سال ۱۳۹۱ در آزمایشگاه تکنولوژی بذر دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شد. بذرهاى فالاریس در سال ۱۳۹۱ از مزارع گندم اطراف شهرستان گرگان جمع‌آوری شدند. بذرها در پاکت‌های کاغذی ذخیره و تا زمان شروع آزمایش در دمای اتاق نگهداری شدند. پیش از شروع آزمایش از روش خراش‌دهی شیمیایی (غوطه‌وری بذرها در اسید سولفوریک ۹۸ درصد به

مدت دو دقیقه) و سپس شستشوی کامل بذرها با آب جاری و آب مقطر برای رفع کمون بذره‌های فالاریس استفاده شد.

آزمون جوانه‌زنی فالاریس در دامنه دمایی بین ۱۰ تا ۳۵ با فواصل ۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. برای توصیف اثر کاهش پتانسیل آب بر جوانه‌زنی بذر علف‌هرز فالاریس در هر دما از محلول‌های اسمزی با غلظت‌های ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و مگاپاسکال استفاده شد. محلول‌های اسمزی با استفاده از پلی‌اتیلن گلیکول ۸۰۰۰ و بر اساس معادله ۱۰ تهیه شدند (میشل، ۱۹۸۳).

$$\psi = 1.29[\text{PEG}]^2 T - 140[\text{PEG}]^2 - 4[\text{PEG}] \quad (10)$$

که ψ ، پتانسیل اسمزی مورد نظر بر حسب مگاپاسکال؛ T ، دما بر حسب درجه سانتی‌گراد و PEG ، مقدار پلی‌اتیلن گلیکول مورد نیاز می‌باشند.

آزمایش با ۴ تکرار انجام شد و هر پتری دیش به منزله یک تکرار در نظر گرفته شد. پنجاه بذر روی کاغذ صافی واتمن شماره یک در پتری دیش پلاستیکی ۹ سانتی‌متری قرار گرفت و سپس کاغذ صافی با ۵ میلی‌لیتر آب مقطر و یا محلول‌های اسمزی مرطوب شدند. برای کاهش تلفات آب از طریق تبخیر، پتری دیش‌ها با پارافیلیم پیچیده شدند و آبیاری پتری دیش‌ها در صورت نیاز انجام شد. تعداد بذور جوانه‌زده هر ۱۲ ساعت به مدت ۲۱ روز شمارش شد. بذوری که ریشه‌چه آنها به اندازه ۲ میلی‌متر خارج شده بود، جوانه‌زده در نظر گرفته شدند (درخشان و همکاران، ۲۰۱۴).

با برازش مدل دو تکه‌ای به داده‌های سرعت جوانه‌زنی فالاریس در برابر دما، دماهای پایه، مطلوب و بیشینه برای جوانه‌زنی این علف‌هرز به ترتیب معادل ۳/۴، ۲۸/۲ و ۳۸/۹ درجه سانتی‌گراد برآورد شد (نتایج نشان داده نشده است). از این رو، مدل‌های هیدروترمال تایم تنها به داده‌های جوانه‌زنی بذر این گیاه در دماهای کمتر از مطلوب (دماهای ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد) برازش داده شد.

برازش مدل‌های هیدروترمال تایم نرمال (معادله ۴)، ویبول (معادله ۷) و گامبل (معادله ۹) به داده‌های جوانه‌زنی تجمعی فالاریس با استفاده از نرم افزار SAS و با رویه PROC NL MIXED و به روش بهینه‌سازی پیش فرض Dual Quasi-Newton در این نرم افزار انجام شد (SAS, 2009). برای ارزیابی برازش مدل‌ها از شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE^1) و برای انتخاب بهترین تابع توزیع از شاخص آکائیک تصحیح شده (AICc^2) استفاده شد (برنهام و اندرسون، ۲۰۰۲).

1- Root Mean of Squares of Error

2- Akaike Information Criterion

$$AIC = n \cdot \ln\left(\frac{RSS}{n}\right) + 2k \quad \text{معادله (۱۱)}$$

$$AICc = n \cdot \ln\left(\frac{RSS}{n}\right) + 2k + \left(\frac{2k(k+1)}{n-k-1}\right) \quad \text{معادله (۱۲)}$$

که RSS جمع مربعات باقیمانده؛ n تعداد نمونه و k تعداد متغیرهای مدل مورد نظر می‌باشد. بهترین مدل در مقایسه مدل‌ها، مدلی است که کمترین میزان $AICc$ محاسبه شده را داشته باشد. رتبه‌بندی مدل‌ها نیز با استفاده از شاخص Δ_i (معادله ۱۳) انجام شد.

$$\Delta_i = AICc - \min AICc \quad \text{معادله (۱۳)}$$

که $\min AICc$ کمترین مقدار $AICc$ محاسبه شده از بین مدل‌ها است و در واقع متعلق به مدلی است که بهترین برازش را نشان داده است. اگر $\Delta_i < 10$ باشد به مفهوم عدم اختلاف در برازش مدل‌هاست و مدل با $AICc$ بزرگ‌تر نیز برازش خوبی ارائه خواهد داد و این مدل مناسب است. در صورتی که $\Delta_i > 10$ باشد مدل با $AICc$ بزرگ‌تر، مناسب نبوده و برازش خوبی ارائه نخواهد داد (برنهام و اندرسون، ۲۰۰۲).

نتایج و بحث

متغیرهای برآورد شده با مدل‌های هیدروترمال تایم نرمال، ویبول و گامبل به داده‌های جوانه‌زنی بذرها، علف‌هرز فالاریس در دماهای کمتر از مطلوب در جدول ۱ ارائه شده است. مقدار $RMSE$ نشان داد که بین مدل‌های هیدروترمال تایم توسعه یافته بر مبنای توزیع‌های آماری مختلف از نظر برازش اختلاف معنی‌داری وجود نداشت، به طوری که مقدار ریشه میانگین مربعات خطا برای هر سه مدل در حدود ۱۱ درصد برآورد شد (جدول ۱). با وجود برازش مناسب و مشابه هر سه مدل، مقدار شاخص آکائیک تصحیح شده نشان داد که مدل‌های هیدروترمال تایم گامبل ($AICc = -762/8$) و ویبول ($AICc = -762/6$) از دقت بیشتری نسبت به مدل هیدروترمال تایم توسعه یافته بر مبنای توزیع نرمال ($AICc = -737/6$) برخوردار بودند و از این‌رو، متغیرهای برآورد شده با این دو مدل از اطمینان بیشتری برخوردار بود (جدول ۱). همچنین، بر مبنای شاخص تفاضل آکائیک تصحیح شده، مدل هیدروترمال تایم گامبل از بیشترین دقت پیش‌بینی جوانه‌زنی علف‌هرز فالاریس برخوردار بود. با این

وجود، اختلاف معنی‌داری بین دقت پیش‌بینی این مدل با مدل هیدروترمال تایم توسعه یافته بر مبنای توزیع ویبول ($\Delta i = 0.2$) وجود نداشت.

برازش مدل‌های هیدروترمال تایم به داده‌های جوانه‌زنی بذر علف‌هرز فالاریس در دماهای کمتر از مطلوب بر مبنای سه توزیع نرمال، ویبول و گامبل در شکل ۱ نشان داده شده است. جوانه‌زنی فالاریس در پتانسیل‌های آب -0.6 و -0.8 مگاپاسکال در دماهای 20 و 25 درجه سانتی‌گراد با هر سه مدل هیدروترمال تایم جوانه‌زنی بیشتر از مقدار واقعی برآورد شد (شکل ۱). علاوه بر این، جوانه‌زنی پیش‌بینی شده با استفاده از توزیع نرمال پتانسیل آب پایه، اریب بیشتری در مقایسه با توزیع‌های گامبل و ویبول $\Psi_{b(g)}$ داشت. این پیش‌بینی اریب با استفاده از توزیع نرمال در نمودار باقی‌مانده جوانه‌زنی در مقابل کسر جوانه‌زنی واقعی آشکار است (شکل ۲).

اختلاف معنی‌داری بین مقدار ثابت هیدروترمال تایم برآورد شده با هر سه مدل هیدروترمال تایم وجود نداشت و برای هر سه مدل در حدود 1000 مگاپاسکال درجه سانتی‌گراد ساعت برآورد شد (جدول ۱). همچنین، اختلاف معنی‌داری بین دمای پایه برآورد شده با مدل‌های هیدروترمال تایم توسعه یافته بر مبنای توزیع‌های آماری مختلف وجود نداشت و بر مبنای هر سه مدل در حدود $4/2$ درجه سانتی‌گراد برآورد شد (جدول ۱). بر مبنای مدل هیدروترمال تایم نرمال، مقدار $\Psi_{b(50)}$ معادل -1 مگاپاسکال برآورد شد. با معادل در نظر گرفتن مقدار $\Psi_{b(50)}$ با مقدار میانه پتانسیل آب پایه برآورد شده با مدل‌های هیدروترمال تایم ویبول $(\text{Median} = \mu + \sigma(\ln(2))^{\frac{1}{\lambda}} = -1.04)$ و گامبل $(\text{Median} = \mu - \sigma \cdot \ln(\ln(2)) = -1.03)$ می‌توان اظهار داشت که مقدار برآورد شده این متغیر با هر سه مدل هیدروترمال تایم مشابه بوده است. در واقع، پارامتر μ در توزیع ویبول، پتانسیل اسمزی که در آن احتمال جوانه‌زنی صفر است (یا پتانسیل اسمزی که جوانه‌زنی از پتانسیل‌های مثبت‌تر از آن آغاز می‌شود؛ $\Psi_{b(0)}$)، را برآورد می‌کند. این متغیر برآورد واقع‌بینانه‌ای از $\Psi_{b(0)}$ فراهم می‌آورد که از توزیع‌های نرمال و گامبل قابل استنتاج نیست.

وقتی مقدار متغیر شکل (λ) بین $2/6$ تا $3/7$ باشد، توزیع ویبول به‌طور کامل متقارن بوده و نزدیک به توزیع نرمال است. چنانچه مقدار متغیر شکل کوچکتر یا بزرگتر از این مقادیر باشد، توزیع به‌ترتیب چوله به راست یا چپ خواهد بود (وات و همکاران، ۲۰۱۱). برای علف‌هرز فالاریس، متغیر شکل در توزیع ویبول ($\lambda = 1/57$) کوچکتر از $2/6$ بود و از این رو میانگین بزرگتر از مد و در نتیجه توزیع

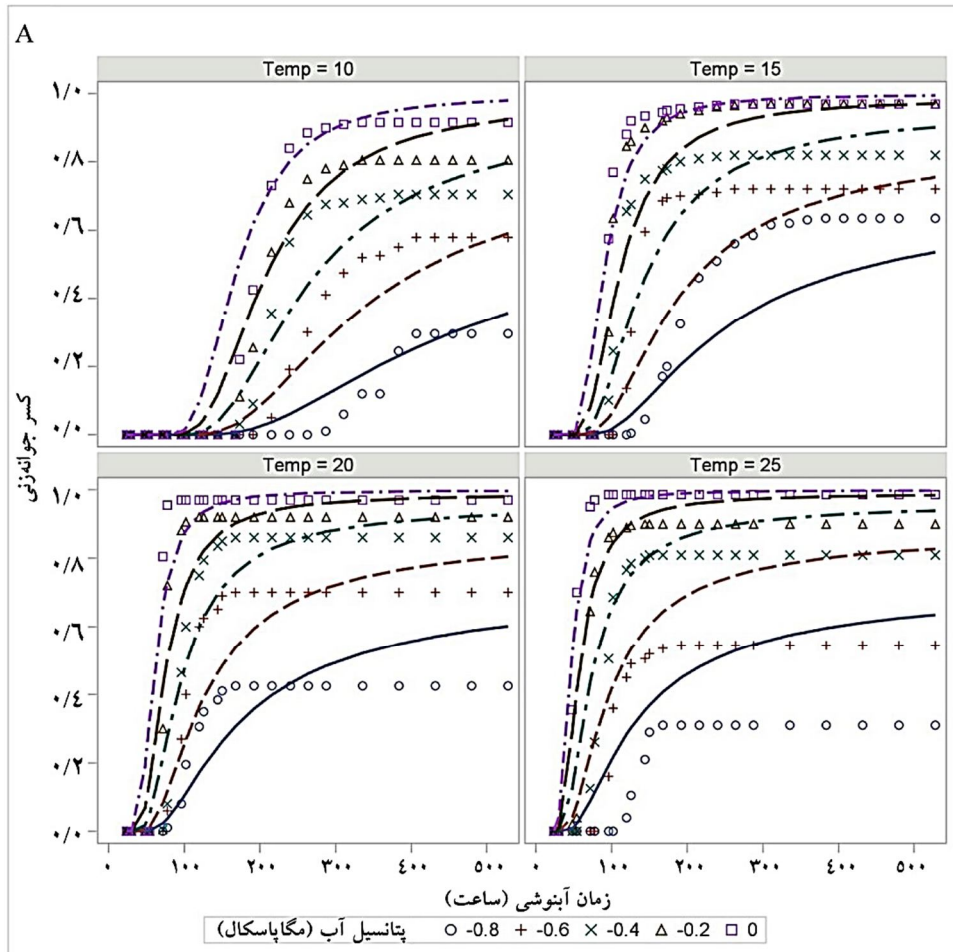
پتانسیل آب پایه چوله به راست بود. چولگی توزیع پتانسیل آب پایه به راست دارای پیامدهای زیست‌محیطی مهمی است، زیرا به معنای آن است که بخش اعظم بذره‌های یک جمعیت بذری دارای مقادیر پتانسیل آب پایه بالاتری می‌باشند و از اینرو حتی تحت شرایط مطلوب نیز به کندی جوانه خواهند زد (وات و همکاران، ۲۰۱۰).

پتانسیل آب پایه پیش‌بینی شده با مدل‌های هیدروترمال تایم توسعه یافته بر مبنای توزیع‌های نرمال، ویبول و گامبل برای درصد‌های مختلف جوانه‌زنی فالاریس در شکل ۳ ارائه شده است. آنچه از نمودار پتانسیل آب پایه پیش‌بینی شده در برابر جوانه‌زنی مشاهده شده به خوبی قابل مشاهده است، جوانه‌زنی سریع‌تر بذره‌های دارای کمترین پتانسیل آب (منفی‌ترین) و مثبت‌تر شدن پتانسیل آب پایه بذره‌هایی با جوانه‌زنی کندتر می‌باشد.

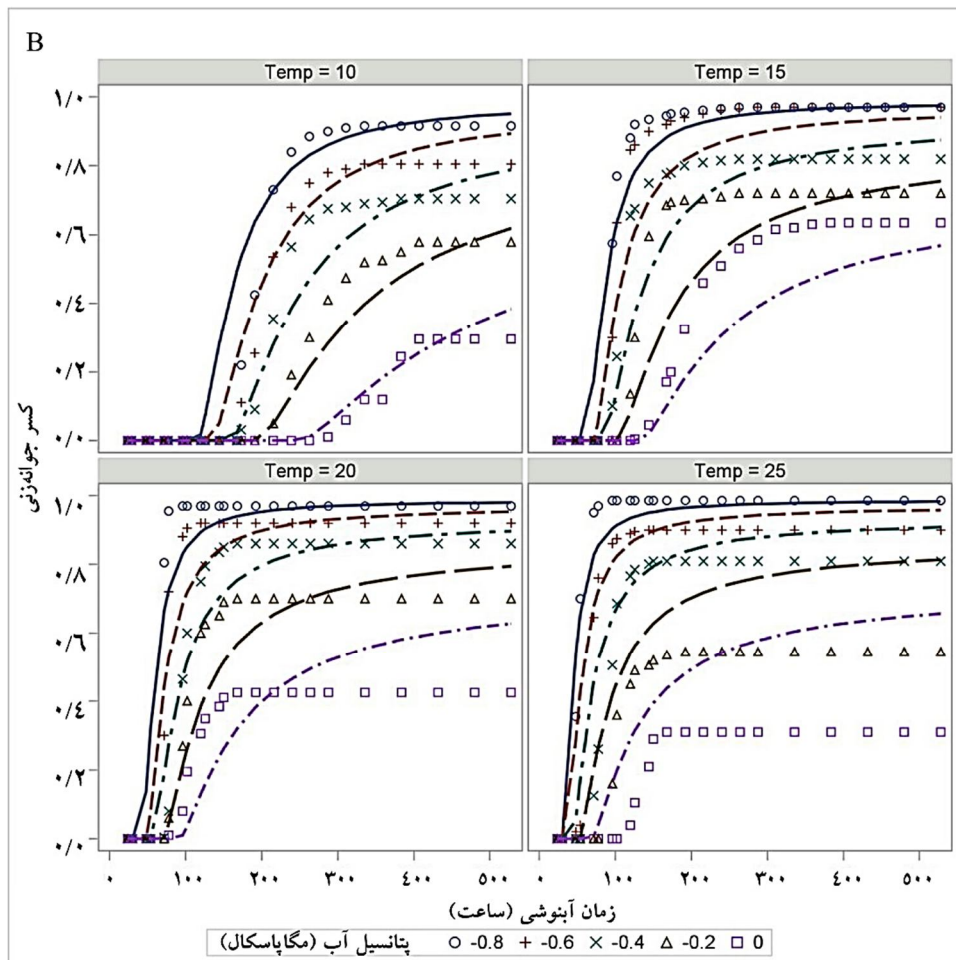
جدول ۱- متغیرهای برآورد شده برای سه توزیع آماری مورد استفاده در مدل‌سازی هیدروترمال تایم جوانه‌زنی بذر فالاریس.

AICc	RMSE	σ	λ	μ	θ_{HT}	σ_{ψ_b}	$\Psi_{b(50)}$	T_b	توزیع*
-۷۳۷/۶	۰/۱۱۴۶	-	-	-	۹۷۹/۳۴±۹۸/۹	۰/۳۳±۰/۰۱	-۱/۰۰±۰/۰۲	۴/۳۳±۰/۲۵	نرمال
-۷۶۲/۶	۰/۱۱۱۵	۰/۵۸±۰/۰۵	۱/۵۷±۰/۱۶	۱/۴۹±۰/۰۵	۱۰۰۰/۰۱±۳۹/۱	-	-	۴/۲۵±۰/۲۴	ویبول
-۷۶۲/۸	۰/۱۱۱۸	۰/۲۸±۰/۰۱	-	۱/۱۳±۰/۰۲	۱۰۰۰/۴۱±۳۸/۳	-	-	۴/۲۴±۰/۲۴	گامبل

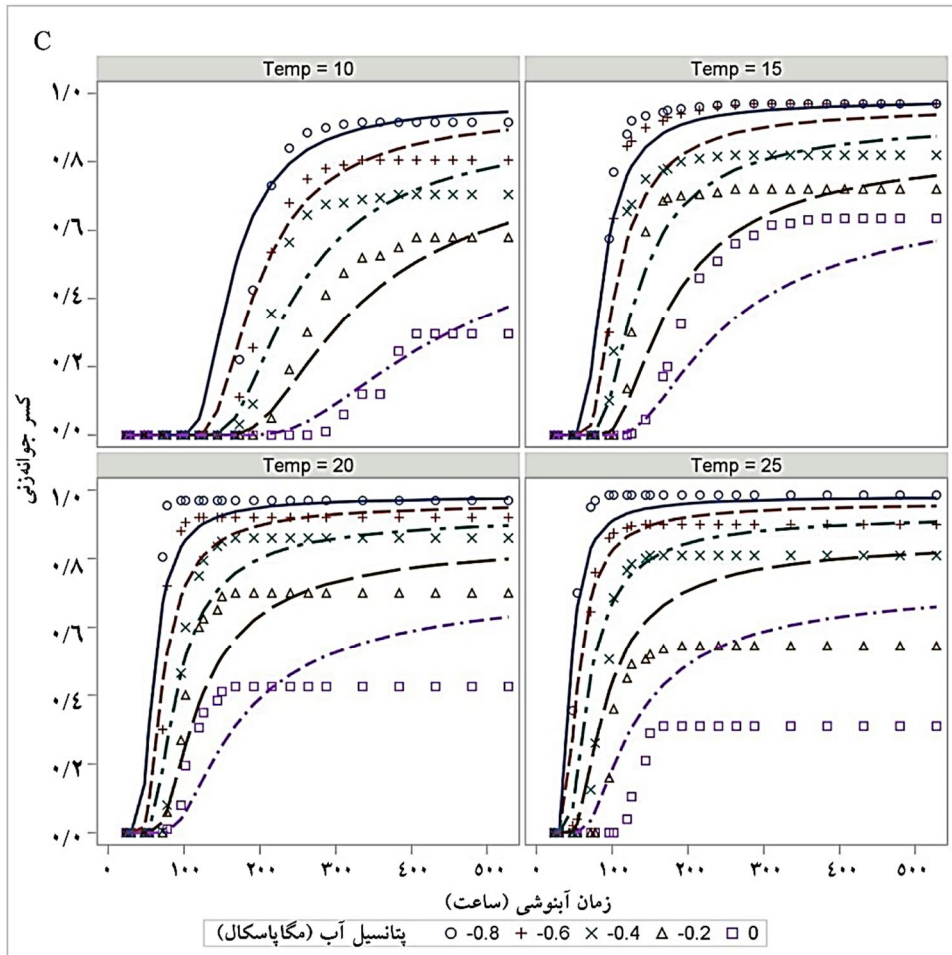
* T_b ، دمای پایه (درجه سانتی‌گراد)؛ $\Psi_{b(50)}$ ، میانگین (میان یا مد) پتانسیل آب پایه برای توزیع نرمال (مگاپاسکال)؛ σ_{ψ_b} ، انحراف استاندارد مقادیر ψ_b در جمعیت برای توزیع نرمال (مگاپاسکال)؛ θ_{HT} ، ثابت هیدروترمال تایم (مگاپاسکال درجه سانتی‌گراد ساعت)؛ μ ، متغیر مکان در مدل‌های هیدروترمال تایم ویبول و گامبل (مگاپاسکال)؛ λ ، متغیر شکل در مدل هیدروترمال تایم ویبول و σ ، متغیرهای مقیاس در مدل‌های هیدروترمال تایم ویبول و گامبل.



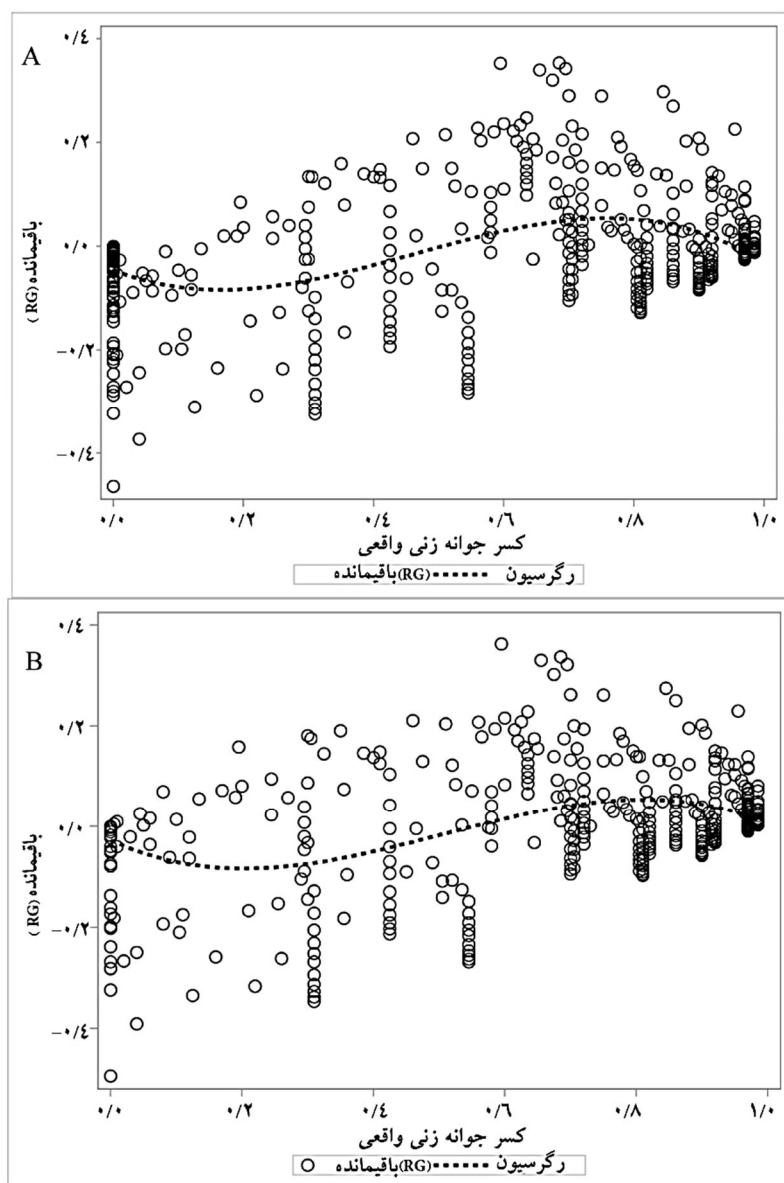
شکل ۱- مدل‌های هیدروترمال تایم برازش داده شده به داده‌های جوانه‌زنی بذرهای علف‌هرز فالاریس در دماهای زیر مطلوب بر مبنای توزیع‌های نرمال (A)، ویبول (B) و گامبل (C). نمادها مقادیر جوانه‌زنی مشاهده شده و خطوط مقادیر پیش‌بینی شده با مدل‌ها را نشان می‌دهند.



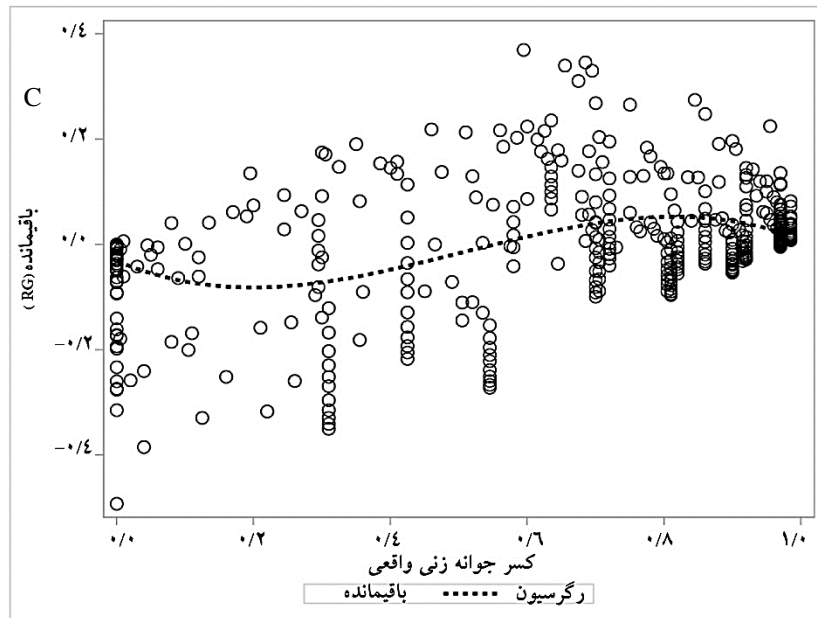
ادامه شکل ۱- مدل‌های هیدروترمال تایم برازش داده شده به داده‌های جوانه‌زنی بذرهاى علف‌هرز فالاریس در دماهای زیر مطلوب بر مبنای توزیع‌های نرمال (A)، ویبول (B) و گامبل (C). نمادها مقادیر جوانه‌زنی مشاهده شده و خطوط مقادیر پیش‌بینی شده با مدل‌ها را نشان می‌دهند.



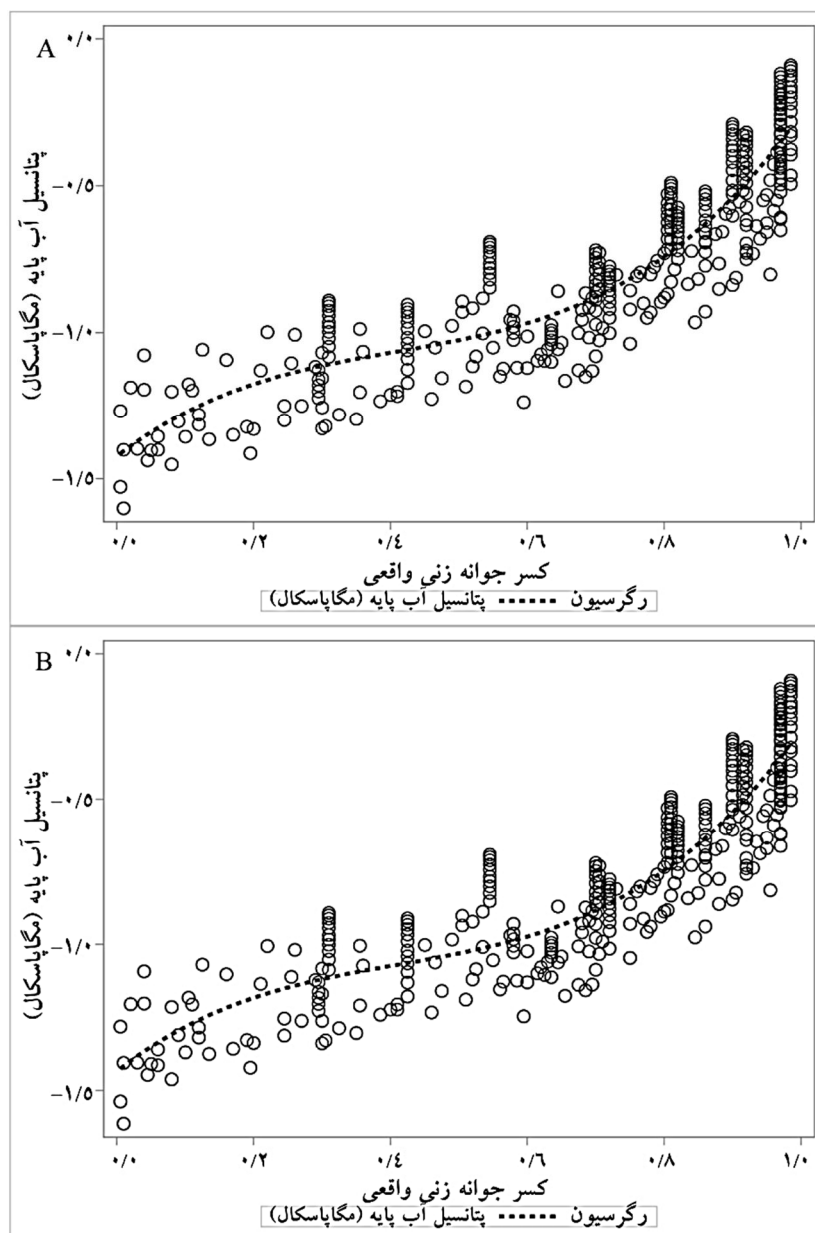
ادامه شکل ۱- مدل‌های هیدروترمال تایم برازش داده شده به داده‌های جوانه‌زنی بذرهای علف‌هرز فالاریس در دماهای زیر مطلوب بر مبنای توزیع‌های نرمال (A)، ویبول (B) و گامبل (C). نمادها مقادیر جوانه‌زنی مشاهده شده و خطوط مقادیر پیش‌بینی شده با مدل‌ها را نشان می‌دهند.



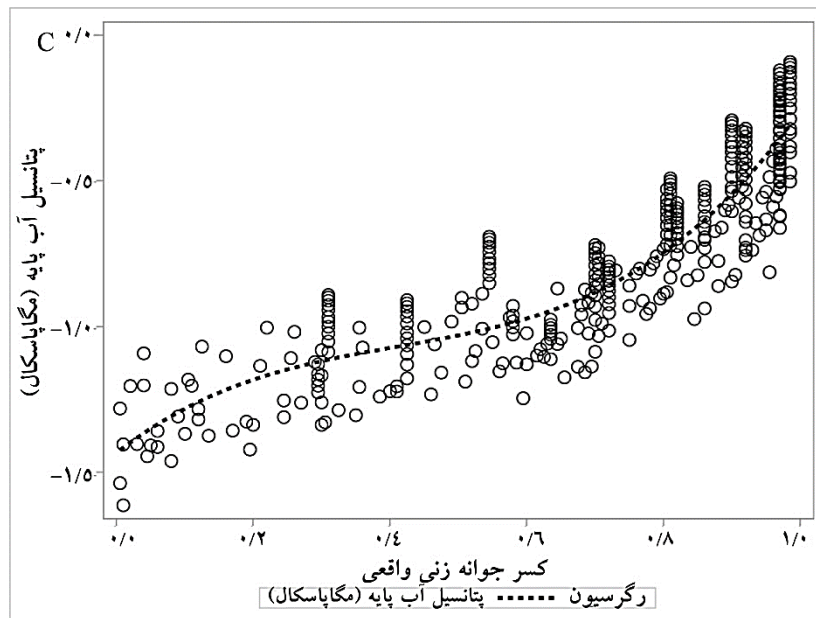
شکل ۲- رابطه بین باقی مانده جوانه زنی و کسر جوانه زنی واقعی فالاریس با استفاده از مدل‌های هیدروترمال تایم توسعه یافته بر مبنای توزیع‌های نرمال (A)، ویبول (B) و گامبل (C). برای تجسم بهتر روند، معادله کوپیک (مکعبی) چند جمله‌ای به داده‌های باقی مانده جوانه زنی برازش داده شد (خطوط خط چین).



ادامه شکل ۲- رابطه بین باقی مانده جوانه زنی و کسر جوانه زنی واقعی فالاریس با استفاده از مدل های هیدروترمال تایم توسعه یافته بر مبنای توزیع های نرمال (A)، ویبول (B) و گامبل (C). برای تجسم بهتر روند، معادله کوپیک (مکعبی) چند جمله ای به داده های باقی مانده جوانه زنی برازش داده شد (خطوط خط چین).



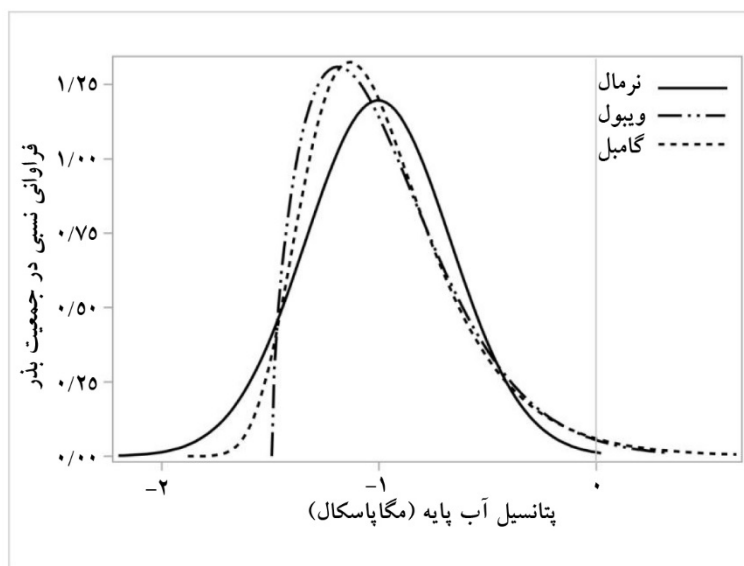
شکل ۳- رابطه بین پتانسیل آب پایه پیش‌بینی شده فالاریس با مدل‌های هیدروترمال تایم توسعه یافته بر مبنای توزیع‌های نرمال (A)، ویبول (B) و گامبل (C) و جوانه‌زنی تجمعی مشاهده شده. برای تجسم بهتر روند، معادله کوپیک (مکعبی) به داده‌های باقی‌مانده جوانه‌زنی برازش داده شد (خطوط خط چین).



ادامه شکل ۳- رابطه بین پتانسیل آب پایه پیش‌بینی شده فالاریس با مدل‌های هیدروترمال تایم توسعه یافته بر مبنای توزیع‌های نرمال (A)، ویبول (B) و گامبل (C) و جوانه‌زنی تجمعی مشاهده شده. برای تجسم بهتر روند، معادله کوئیک (مکعبی) به داده‌های باقی‌مانده جوانه‌زنی برازش داده شد (خطوط خط چین).

تابع توزیع احتمال پتانسیل آب پایه پیش‌بینی شده فالاریس با مدل‌های هیدروترمال تایم توسعه یافته بر مبنای توزیع‌های نرمال، ویبول و گامبل در شکل ۴ ارائه شده است. برای رفع کمون بذره‌های فالاریس از روش خراش‌دهی شیمیایی با اسید سولفوریک ۹۸ درصد استفاده شد. مشاهده می‌شود که فراوانی بذره‌های فاقد جوانه‌زنی (بذره‌های دارای پتانسیل آب پایه بیشتر از صفر) بسیار ناچیز بوده و در واقع این روش به خوبی منجر به رفع کمون بذره‌های علف‌هرز فالاریس شده است. چولگی توزیع ویبول به راست نیز در این شکل به خوبی قابل مشاهده است. همچنین، برآورد واقع بینانه توزیع ویبول پتانسیل آب پایه در این شکل به خوبی قابل مشاهده است. پارامتر μ در توزیع ویبول معادل پتانسیل اسمزی است که در آن جوانه‌زنی وجود ندارد و در واقع نقطه شروع جوانه‌زنی را نشان می‌دهد. در مدل هیدروترمال تایم نرمال و گامبل این پارامتر قابل برآورد نیست و حتی پتانسیل آب پایه پیش‌بینی شده با این مدل‌ها برای بخشی از جمعیت بذری بسیار کمتر از مقدار پارامتر μ توزیع

ویبول است. در مقابل توزیع ویبول، در توزیع نرمال وقتی درصد جوانه‌زنی به صفر نزدیک می‌شود، پتانسیل آب پایه به سمت منفی بی‌نهایت میل می‌کند.



شکل ۴- تابع توزیع احتمال پتانسیل آب پایه پیش‌بینی شده فالاریس با مدل‌های هیدروترمال تایم توسعه یافته بر مبنای توزیع‌های نرمال، ویبول و گامبل.

دما و پتانسیل آب دو عامل زیست‌محیطی اولیه تنظیم‌کننده جوانه‌زنی بذر می‌باشند (بیولی و همکاران، ۲۰۱۳). مدل‌های هیدروترمال تایم بطور گسترده‌ای برای توصیف جوانه‌زنی جمعیت‌های بذری در پاسخ به این دو عامل مورد استفاده قرار می‌گیرند (فنج-ساوج و همکاران، ۱۹۹۸؛ کبریاب و موردک، ۱۹۹۹؛ گروندی و همکاران، ۲۰۰۰؛ آلواردو و بردفورد، ۲۰۰۲؛ بلومبرگ و همکاران، ۲۰۰۹). در این مطالعه، از سه مدل هیدروترمال تایم نرمال، ویبول و گامبل برای توصیف دوره زمانی جوانه‌زنی بذر علف‌هرز فالاریس استفاده شد. متغیرهای برآورد شده با مدل هیدروترمال تایم ویبول نشان داد که توزیع پتانسیل آب پایه چوله به راست می‌باشد. جوانه‌زنی پیش‌بینی شده با مدل‌های هیدروترمال تایم توسعه یافته بر مبنای توزیع‌های نامتقارن گامبل و ویبول از دقت بیشتری در مقایسه با مدل هیدروترمال تایم توسعه یافته بر مبنای توزیع متقارن نرمال برخوردار بودند. از این رو، 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 گیرد، منجر به توصیف ضعیف داده‌ها و پیش‌بینی‌ها خواهد شد. بنابراین، پیش از استفاده از مدل هیدروترمال تایم، توزیع پتانسیل آب پایه در یک نمونه بذری باید مورد بررسی قرار گیرد و یک توزیع آماری مناسب انتخاب شود. مدل‌های هیدروترمال تایم به عنوان تابعی از متغیرهای اقلیمی جهت مدل‌سازی جوانه‌زنی گیاهان زراعی و علف‌های هرز مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مورد علف‌های هرز، آن دسته از مدل‌هایی که برهم‌کنش‌های پویایی گونه‌ها با محیط را مورد بررسی قرار می‌دهند تنها برای چند گونه غالب نظیر *Alopecurus myosuroides* Huds. در مدل *AlomySys* توسعه یافته است (کلباش و همکاران، ۲۰۰۶). این مدل‌ها بایستی به فلور گسترده‌تری از علف‌های هرز توسعه داده شوند تا اثرات محیط و سایر عوامل (مانند عملیات زراعی) بر جوانه‌زنی علف‌های هرز، زمان سبز شدن و پویایی جوامع علف‌های هرز در طولانی مدت قابل درک و پیش‌بینی باشد. این امر مستلزم برآورد دمای پایه و پتانسیل آب پایه برای جوانه‌زنی هر یک از گونه‌های هرز است. با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری توزیع و بیول، امکان تعیین چولگی توزیع پتانسیل آب پایه و برآورد آستانه پتانسیل آب برای شروع جوانه‌زنی می‌توان از این مدل به‌طور گسترده برای پیش‌بینی جوانه‌زنی بذر در پاسخ به دما و پتانسیل آب استفاده کرد.

منابع

1. Alvarado, V., and Bradford, K.J. 2002. A hydrothermal time model explains the cardinal temperatures for seed germination. *Plant Cell Environ.* 25:1061–1069
2. Bewley, J.D., Bradford, K.J., Hilhorst, H.W.M., and Monogaki, H. 2013. *Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy*. Third Edition, Springer, NY, 392p.
3. 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.
4. Burnham, K.P., and Anderson, D.R. 2002. *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach*. Springer, New York, USA, 488p.
5. Colbach, N., Dürr, C., Roger-Estrade, J., Chauvel, B., and Caneill, J. 2006. *ALOMYSYS: modelling blackgrass (Alopecurus myosuroides Huds.) germination and emergence, in interaction with seed characteristics, tillage and soil climate*. I. Construction. *Eur. J. Agric.* 24:95–112.

6. Derakhshan, A., Gherekhloo, J., Ribas, A.V., and Rafael, D.P. 2014. Quantitative description of the germination of Little seed Canarygrass (*Phalaris minor*) in response to temperature. *Weed Sci.* 62:250-257.
7. 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 Phytol.* 139:505-516.
8. 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.
9. Gummerson, R.J. 1986. The effect of constant temperatures and osmotic potentials on the germination of sugar beet. *J. Exp. Botan.* 37: 729-741.
10. Kebreab, E., and Murdoch, A.J. 1999. Modelling the effects of water stress and temperature on germination rate of *Orobancha aegyptiaca* seeds. *J. Exp. Bot.* 50:655-664.
11. 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 Res.* 53:89-101
12. 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 Physiol.* 72:66-70.
13. 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. *Ecol. Modell.* 221:1267-1272.
14. 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 Environ.* 34:870-876.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. Plant Prod. Res. Vol. 22 (1), 2015

<http://jopp.gau.ac.ir>

Comparison of hydrothermal time models to seed germination modeling of *Phalaris minor* on the basis of Normal, Weibull and Gumbel distributions

*A. Derakhshan¹ and J. Gherekhloo²

¹Ph.D. Student in Agronomy, Khouzestan Ramin Agriculture and Natural Resources University, ²Associate Prof., Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Accepted: 10-1-2014 ; Received: 8-18-2014

Abstract

The hydrothermal time models have been widely applied to describe the germination responses of seeds to temperature and water potential. In this study, three hydrothermal time models developed on the basis of different statistical distributions (Normal, Weibull and Gumbel) were compared to describe the *Phalaris minor* seed germination. Results showed that Gumbel (AICc=-762.8) and Weibull (AICc=-762.6) hydrothermal time models more accurately predicted *P. minor* germination than Normal (AICc=-737.6) hydrothermal time model. However, there was no significant difference among values of predicted hydrothermal time constant, base temperature and median base water potential ($\psi_{b(50)}$) for germination of *P. minor* using all three models and were estimated to be 1000 MPa °C h, 4.2°C and -1 MPa, respectively. Based on the Weibull hydrothermal time model, water potential threshold for the onset of germination ($\psi_{b(0)}$) was equal to -1.5 MPa. Also, the distribution of base water potential for germination was right skewed ($\lambda=1.57$). Weibull hydrothermal time model can be widely used to predict seed germination by considering the flexibility of distribution, the possibility of determining the base water potential distribution skewness and estimation of water potential threshold for the onset of germination.

Keywords: Normal distribution; Base water potential; Hydrottime model

*Corresponding author; derakhshan.abo@gmail.com

