



کاربرد مدل‌سازی جوانه‌زنی در واکنش به دما و پتانسیل آب در تحقیقات علوم بذر

الیاس سلطانی^۱، فرشید اکرم قادری^۱ و افشین سلطانی^۲

^۱دانشجوی دکتری زراعت دانشجوی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و
^۲آستاذ گروه زراعت دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

چکیده

دما و رطوبت عوامل ضروری برای جوانه‌زنی بذر هستند. هر دوی این عوامل می‌توانند با هم یا به طور جداگانه بر درصد و سرعت جوانه‌زنی اثر گذارند. مدل‌های مختلفی برای توصیف رابطه دما و جوانه‌زنی بکار رفته است (از جمله مدل‌های ترمال‌تایم). مدل هیدروتایم نیز برای توصیف رابطه بین پتانسیل آب و جوانه‌زنی استفاده شده است. مدل ترمال‌تایم و هیدروتایم با یکدیگر ترکیب شده‌اند و از مدل هیدروترمال‌تایم برای توصیف ترکیب اثر دما و رطوبت بر جوانه‌زنی استفاده شده است. امتیاز این مدل‌ها این است که پارامترهای این مدل‌ها دارای مفاهیم بیولوژیکی هستند. از این رو با استفاده از مدل‌سازی جوانه‌زنی می‌توان اثرات زوال بذر، پرایمینگ بذر و کمون بذر را مورد مطالعه قرار داد. همچنین از این مدل‌ها برای تعیین دماهای کاردینال جوانه‌زنی و سبز شدن، تعیین پتانسیل پایه برای جوانه‌زنی و تعیین زمان جوانه‌زنی و سبز شدن استفاده شده است. با وجود این کاربرد این مدل‌ها در ایران کمتر مشاهده شده است و توصیه می‌شود، این مدل‌ها بیشتر در تحقیقات علوم بذر و به خصوص در واکنش جوانه‌زنی به دما و پتانسیل آب استفاده شود. در این مطالعه سعی شد توضیحاتی راجع به این مدل‌ها و پارامترهای آن‌ها داده شود و مثال‌های از کاربرد آن‌ها در تحقیقات علوم بذر نشان داده شد.

واژه‌های کلیدی: جوانه‌زنی؛ مدل‌سازی؛ ترمال‌تایم؛ هیدروتایم؛ هیدروترمال‌تایم.

مقدمه

جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه از مراحل بحرانی و مهم در چرخه زندگی گیاهان است (وینداور و همکاران، ۲۰۰۷). در تولید گیاهان، استقرار مناسب گیاه تعیین کننده تراکم بوته، یکنواختی و اهداف مدیریتی است. همچنین جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه از عوامل تعیین کننده عملکرد و زمان رسیدگی در گیاهان می‌باشند (بریگز و ایتینفیسو، ۱۹۷۹). تاخیر و استقرار نامناسب گیاهچه از مشکلات مدیریتی مهم در نواحی که گیاهان با تنش‌های خشکی، شوری و دمای پایین مواجه می‌شوند، می‌باشد (لیوینگستون و دی جونگ، ۱۹۹۰). از این رو هر عاملی که از طریق کاهش سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی منجر به استقرار نامناسب و تراکم پایین گیاهچه شود، منجر به کاهش عملکرد می‌گردد. اثرات شرایط نامطلوب در طول دوره جوانه‌زنی و مراحل اولیه رشد گیاه نسبت به سایر مراحل رشد مهم تر است. بنابراین جوانه‌زنی خوب و مناسب تحت محدوده وسیعی از شرایط محیطی برای استقرار گیاهچه ضروری است (برار و همکاران، ۱۹۹۱؛ جاکوپسن و باج، ۱۹۹۸). جوانه‌زنی با جذب آب توسط بذر شروع می‌شود و با طویل شدن محور جنینی و خروج ریشه چه پایان می‌یابد (بیولی، ۱۹۹۷).

جوانه‌زنی یک فرآیند فیزیولوژیک پیچیده است که تحت تاثیر عوامل ژنتیکی و عوامل محیطی قرار می‌گیرد (فولی و فنیمور، ۱۹۹۸؛ میر و پندلتون، ۲۰۰۰). عوامل محیطی تنظیم‌کننده جوانه‌زنی برای بذرهاى بدون کمون شامل دما، آب و اکسیژن می‌شود و برای بذرهاى دارای کمون علاوه بر این عوامل، به نور و محیط‌های شیمیایی نیاز می‌باشد (بیولی و بلاک، ۱۹۹۴؛ باسکین و باسکین، ۲۰۰۱) و در بین این عوامل محیطی برای بذرهاى بدون کمون، دما و رطوبت زمانی که تهویه مناسب باشد، دارای اهمیت بیشتری هستند (برادفورد، ۱۹۹۰؛ ۲۰۰۲). دما و رطوبت می‌توانند با هم یا به طور جداگانه بر درصد و سرعت جوانه‌زنی اثر گذارند (باسکین و باسکین، ۱۹۹۸).

دما یکی از عواملی است که از طریق تنظیم کمون بر ظرفیت جوانه‌زنی و همچنین بر سرعت جوانه‌زنی تاثیر گذار است (گارسیا-هیدوبرو و همکاران، ۱۹۸۲؛ کبراب و ماردوچ، ۲۰۰۰). حداکثر درصد جوانه‌زنی در گیاهان در دامنه‌ای خاصی از دماها رخ می‌دهد و در پایین تر و بالاتر از این دامنه دمایی درصد جوانه‌زنی به طور ناگهانی کاهش می‌یابد (کبراب و ماردوچ، ۲۰۰۰). در سال ۱۸۶۰ مشخص شد که گیاهان دارای سه دمای کاردینال شامل دمای پایه یا حداقل، دمای مطلوب و دمای حداکثر یا سقف برای جوانه‌زنی هستند. دمای پایه و حداکثر دماهایی هستند که به ترتیب در دماهای پایین تر و بالاتر از آن دماها، جوانه‌زنی متوقف می‌شود و دمای مطلوب، دمایی است که در آن مراحل جوانه‌زنی در کوتاه‌ترین زمان ممکن است اتفاق بیفتد، یعنی سرعت جوانه‌زنی در حداکثر است (آلواردو و برادفورد، ۲۰۰۲). بنابراین، بذرها در یک دامنه دمایی تعریف شده جوانه می‌زنند و سرعت جوانه‌زنی به دما وابسته است. سرعت جوانه‌زنی با افزایش دما تا دمای مطلوب جوانه‌زنی افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد. دلایل مختلفی برای کاهش سرعت جوانه‌زنی در دماهای بالاتر از مطلوب ارائه شده است. برادفورد (۲۰۰۲) پیشنهاد داد که در دماهای بالاتر از مطلوب، تاخوردگی پروتیین‌ها، اختلال در غشاءها و اثرات متقابل با خشکی وجود دارد. مکانیسم‌های ممکن دیگر در این کاهش به کاهش کارایی متابولیکی در دماهای بالاتر از مطلوب بر می‌گردد (تیگرسون، ۲۰۰۲).

علاوه بر دما، پتانسیل آب خاک نیز یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی می‌باشد که بر جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه گیاهان تاثیر می‌گذارد (آندا و همکاران، ۱۹۹۴). توانایی جوانه‌زنی بذرها تحت شرایط رطوبتی، شانس استقرار بیشتر گیاه و تراکم بالاتر را در پی دارد که در نتیجه منجر به افزایش عملکرد می‌شود (بالباکی و همکاران، ۱۹۹۹). به طور معمول سرعت جوانه‌زنی به طور خطی به قابلیت دسترسی به آب افزایش می‌یابد (گومرسون، ۱۹۸۶؛ گریک و همکاران، ۲۰۰۴) و درصد جوانه‌زنی با کاهش پتانسیل آب کاهش می‌یابد (گراندی و همکاران، ۲۰۰۰). در مورد اثرات تنش خشکی بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه و همچنین عملکرد در گیاهان مختلف گزارشاتی وجود دارد (هاکل، ۱۹۹۳؛ بالباکی و همکاران، ۱۹۹۹؛ روزالایند و همکاران، ۱۹۹۴) و مطالعات حاکی از آن است که کاهش پتانسیل آب منجر به کاهش یکنواختی، سرعت جوانه‌زنی و عملکرد می‌شود. در تحقیقاتی که منگا (۱۹۸۵) انجام داد بیان داشت که با افزایش تنش خشکی درصد جوانه‌زنی بذور ارزن هندی کاهش یافت. اسوارن و همکاران (۱۹۹۹) و کاران و همکاران (۱۹۸۵) اعلام کردند که با افزایش تنش خشکی در سویا و نخود درصد جوانه‌زنی، رشد گیاهچه و قدرت بذر بطور عموم کاهش می‌یابد. هاگل (۱۹۹۳) گزارش کرد که سرعت و درصد جوانه‌زنی ارقام لوبیا با افزایش تنش خشکی کاهش می‌یابد که درصد کاهش سرعت جوانه‌زنی نسبت به درصد جوانه‌زنی بیشتر بود. بالباکی و همکاران (۱۹۹۹) گزارش کردند که با افزایش تنش خشکی درصد و سرعت جوانه‌زنی ارقام گندم کاهش یافت و حساسیت سرعت جوانه‌زنی به تغییرات تنش خشکی بیشتر از درصد جوانه‌زنی بود.

در مورد اثرات متقابل دما و تنش خشکی بر جوانه‌زنی مطالعاتی در گیاهان مختلف انجام شده است (لیوینگستون و دی جونگ، ۱۹۹۰؛ آندا و پیتر، ۱۹۹۴؛ هاگل، ۱۹۹۳؛ بلومتال و همکاران، ۱۹۹۶). در مطالعه‌ای که آندا و پیتر (۱۹۹۴) بر روی سورگوم انجام دادند گزارش کردند که واکنش درصد سبز شدن این گیاه با افزایش دما در پتانسیل‌های مختلف خشکی متفاوت

است. نامبردگان گزارش کردند که در پتانسیل ۰/۲- مگاپاسکال ما بین دماها از لحاظ درصد سبز شدن تفاوت معنی‌داری وجود ندارد. اما در پتانسیل ۰/۰۴- مگاپاسکال با افزایش دما درصد سبز شدن 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 (۱۹۷۶) 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 ماردوچ (۱۹۹۹) در گل‌جالیز گزارش کرد که بذرها این گیاه در دمای مطلوب در سطوح پایین-تری 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 (آلواردو و برادفورد، ۲۰۰۲؛ روز و فینچ-ساویج، ۲۰۰۳). علاوه بر آن گزارش شده است که روابط بین سرعت جوانه‌زنی و دما می‌تواند به وسیله قابلیت دسترسی به آب تغییر کند (روز و فینچ-ساویج، ۲۰۰۳).

کمی‌سازی واکنش جوانه‌زنی به دما: نوعی از مدل‌های ریاضی برای شرح رابطه بین سرعت جوانه‌زنی و دما استفاده شده است (شفیعی و پرایس، ۲۰۰۱؛ سلطانی و همکاران، ۲۰۰۶). 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 (جام و کاتفورس، ۲۰۰۴؛ هاردی‌گری، ۲۰۰۶؛ هاردی‌گری و وین‌استرال، ۲۰۰۶؛ جامی‌الاحمدی و کافی، ۲۰۰۷).

سلطانی و همکاران (۲۰۰۸) و اکرم قادری و همکاران (۱۳۸۷) از مدل زیر برای کمی‌سازی واکنش جوانه‌زنی به دما استفاده کردند:

$$R50 = f(T) R_{max} \quad (1)$$

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 R_{max} / I حداقل ساعت تا جوانه‌زنی را در دمای مطلوب نشان می‌دهد. توابع دمایی مختلفی برای واکنش جوانه‌زنی به دما وجود دارند. سه تابع دمایی پرکاربردتر برای بررسی واکنش جوانه‌زنی بذرها به دما آزمون شده است (سلطانی و همکاران ۲۰۰۶؛ سلطانی و همکاران، ۲۰۰۸؛ اکرم قادری و همکاران، ۲۰۰۸):

تابع دوتکه‌ای:

$$\begin{aligned} f(T) &= (T - T_b) / (T_o - T_b) & \text{if } T_b < T \leq T_o \\ f(T) &= (T_c - T) / (T_c - T_o) & \text{if } T_o < T < T_c \\ f(T) &= 0 & \text{if } T \leq T_b \text{ or } T \geq T_c \end{aligned} \quad (2)$$

تابع بتا:

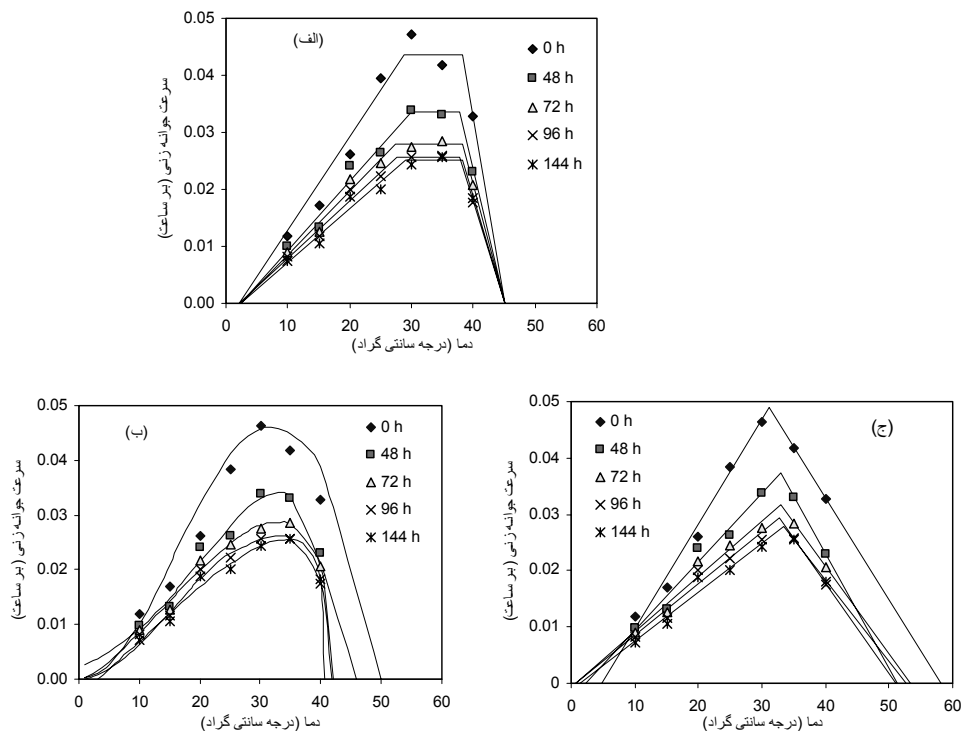
$$f(T) = \left\{ \left[\left(\frac{T - T_b}{T_o - T_b} \right) \left(\frac{T_c - T}{T_c - T_o} \right) \right]^{(T_c - T_o) / (T_o - T_b)} \right\}^\alpha \quad \text{if } T > T_b \text{ and } T < T_c \quad (3)$$

$$f(T) = 0 \quad \text{if } T \leq T_b \text{ or } T \geq T_c$$

تابع دندان مانند:

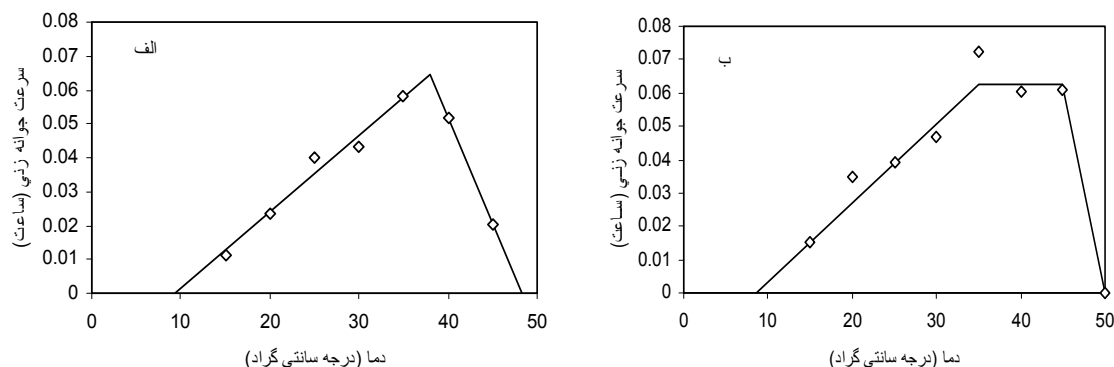
$$\begin{aligned}
 f(T) &= (T - T_b) / (T_{o1} - T_b) & \text{if } T_b < T < T_{o1} \\
 f(T) &= (T_c - T) / (T_c - T_{o2}) & \text{if } T_{o2} < T < T_c \\
 f(T) &= 1 & \text{if } T_{o1} < T < T_{o2} \\
 f(T) &= 0 & \text{if } T \leq T_b \text{ or } T \geq T_c
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

در این روابط T ، دما؛ T_b ، دمای پایه؛ T_o ، دمای مطلوب؛ T_{o1} ، دمای مطلوب پایینی (برای تابع دندان مانند)؛ T_{o2} ، دمای مطلوب بالایی (برای تابع دندان مانند)؛ T_c ، دمای سقف و α پارامتر شکل برای تابع بتا است که انحنای تابع را تعیین می‌کند. سلطانی و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی اثرات زوال بذر بر واکنش جوانه‌زنی به دما در گندم پرداختند. ایشان از معادله (۱) برای توصیف واکنش بذرهای زوال‌یافته به دما استفاده کردند و همچنین سه تابع دمایی دندان مانند، دوتکه‌ای و بتا (معادلات ۲ تا ۴) را بکار بردند (شکل ۱). ایشان در مطالعه خود نشان دادند که بهترین تابع برای توصیف رابطه سرعت جوانه‌زنی و دما تابع دندان مانند بود. همچنین ایشان گزارش کردند که هیچیک از دماهای کاردینال تحت تاثیر زوال بذر قرار نمی‌گیرند ولی سرعت ذاتی جوانه‌زنی با زوال بذر کاهش یافت.



شکل ۱- تابع دندان مانند (الف)، بتا (ب) و سگمتند (ج) که برای توصیف رابطه بین دما و سرعت جوانه‌زنی استفاده شدند. در تیمار بذرهای شاهد، ۴۸، ۷۲، ۹۶ و ۱۴۴ ساعت تسریع پیری (سلطانی و همکاران، ۲۰۰۸).

اکرم قادری و همکاران (۱۳۸۷) اثر پرایمینگ بر واکنش جوانه‌زنی به دما در پنبه را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان نشان دادند پرایمینگ سبب تغییر شکل منحنی واکنش دما به سرعت جوانه زنی بذرهای پنبه گردید. به طوری‌که واکنش سرعت جوانه‌زنی بذرهای شاهد به دما از تابع دوتکه‌ای (معادله ۲) و واکنش بذرهای پرایمینگ‌شده از تابع دندان مانند (معادله ۴) پیروی کرد (شکل ۲). ایشان نشان دادند که پرایمینگ سبب تغییر دماهای کاردینال بذرهای پنبه گردید به طوری که توانست دمای پایه جوانه زنی را حدود ۱ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد. همچنین محدوده تحمل به دماهای بالا را نیز افزایش داد.



شکل ۲. منحنی واکنش به دما برای بذرهای شاهد (الف) و بذرهای پرایمینگ شده (ب) در پنبه (اکرم قادری و همکاران ۱۳۸۷).

برخی محققین نیز از مدل ترمال تایم برای توصیف واکنش جوانه‌زنی به دما استفاده نموده‌اند (بیرهازن و واگن‌ورت، ۱۹۷۴؛ لارسن و همکاران، ۲۰۰۴). 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:

$$\theta_T(g) = (T - T_b)t_g \quad (5)$$

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 (۵) را به صورت زیر بیان کرد (وانگ، ۲۰۰۵):

$$GR = 1/t_g = (T - T_b) / \theta_{T(g)} \quad (6)$$

لارسن و همکاران (۲۰۰۴) از آنالیز پروبیت (معادله ۷) با تغییر T_b برای بدست آوردن بهترین برازش استفاده کردند، به این صورت که همه درصد جوانه‌زنی‌های مشاهده شده در مقیاس پروبیت در مقابل لگاریتم ترمال تایم رگرسیون گرفته شدند:

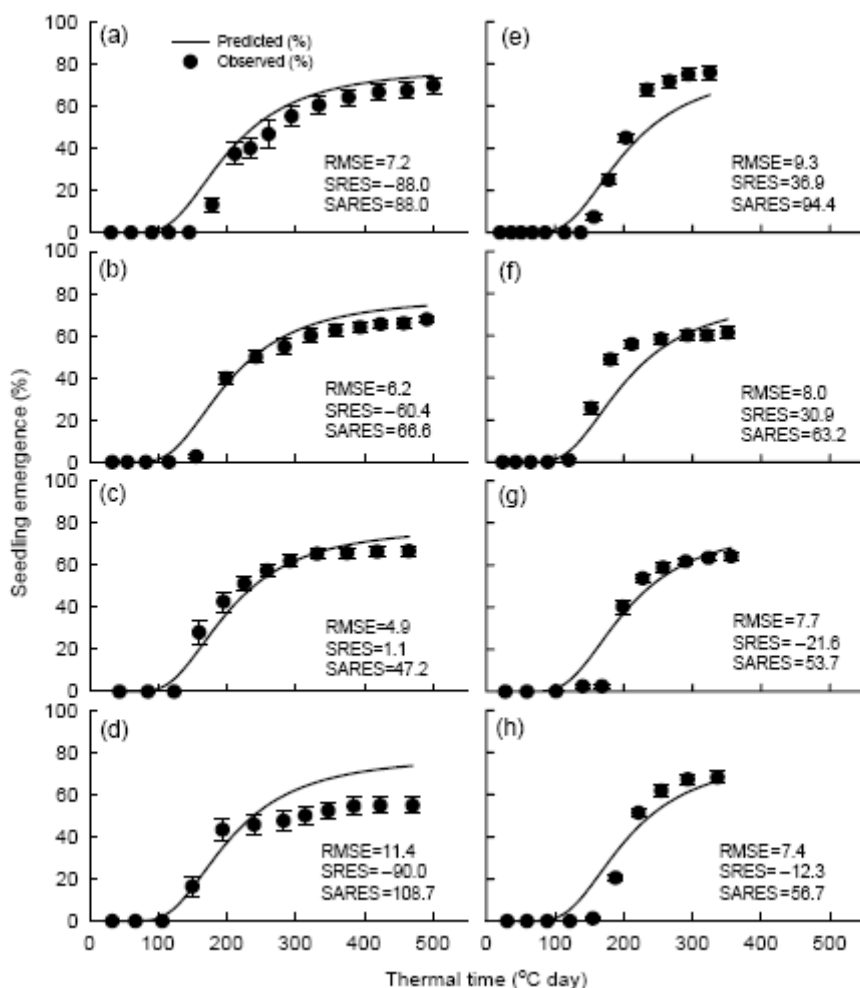
$$probit(g) = \{\log[(T - T_b)t_g] - \log[\theta_T(50)]\} / \sigma_{\theta T} \quad (7)$$

که $probit(g)$ پروبیت تبدیل درصد جوانه‌زنی تجمعی، $\theta_T(50)$ میانگین ترمال تایم برای جوانه‌زنی، و $\sigma_{\theta T}$ انحراف استاندارد در $\log \theta_T$ هستند. زمانی که T_b تخمین زده شد می‌توان همه ترمال تایم‌های جوانه‌زنی (t_g) را در مقیاس ترمال تایم با ضرب کردن در فاکتور $(T - T_b)$ نرمال کرد (لارسن و همکاران، ۲۰۰۴).

کیو و همکاران (۲۰۰۶) از مدل زیر برای تعیین سبزشدن درصد خاصی از بذرها استفاده کردند (شکل ۳) که به صورت زیر بود:

$$emergence(\%) = a(1 - \exp(by))^c \quad (8)$$

در این معادله a حداکثر پارامتر (حداکثر درصد سبزشدن)، b سرعت پارامتر (سرعت سبزشدن)، c شکل پارامتر و y زمان حرارتی برای درصد خاصی از سبزشدن است. کیو و همکاران (۲۰۰۶) از این دو مدل (۵ و ۸) برای پیش‌بینی سبزشدن علف باغ تحت رژیم‌های دمایی متناوب استفاده کردند. ایشان نشان دادند که دمای پایه برای سبزشدن بین ۳/۶ تا ۱/۹-، حداکثر درصد سبزشدن بین ۶۷ تا ۹۱ درصد، سرعت سبزشدن بین ۰/۱۹ تا ۰/۰۵۸ برای دو گونه مورد آزمایش آنها در سه دمای مختلف قرار داشتند. شکل (۳) درصد سبزشدن تجمعی پیش‌بینی شده و مشاهده شده را در آزمایش آنها نشان می‌دهد.



شکل ۳- درصد سبزشدن پیش‌بینی شده و مشاهده شده برای علف باغ (Arctic) در تاریخ کاشت‌های ۳ می (a)، ۱۵ می (b)، ۲۷ می (c)، و ۸ جون (d) ۲۰۰۳؛ ۷ می (e)، ۱۹ می (f)، ۳۱ می (g) و ۱۰ جون (g) ۲۰۰۴ (کیو و همکاران، ۲۰۰۶).

کمی‌سازی واکنش به پتانسیل آب: هیدروتایم مدلی است که الگوی جوانه‌زنی در واکنش به پتانسیل آب در محیط بذر شرح می‌دهد. گومرسون (۱۹۸۶) 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 (۲۰۰۴) و برادفورد و استیل (۲۰۰۴) نشان دادند که، می‌توان رابطه جوانه‌زنی با پتانسیل آب را توسط مدل هیدروتایم (معادله ۹) توصیف کرد:

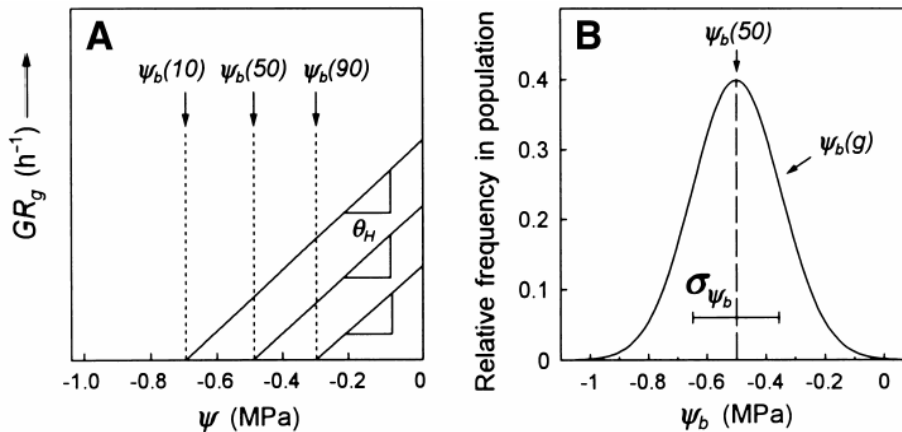
$$\theta_H = (\psi - \psi_b(g))t_g \quad (9)$$

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

برادفورد و استیل (۲۰۰۴) نشان دادند که می‌توان معادله (۹) را به شکل معادله (۱۰) ارائه کرد که رابطه بین پتانسیل آب و سرعت جوانه‌زنی (GR_g) را نشان می‌دهد:

$$GR_g = 1/t_g = [\psi - \psi_b(g)]/\theta_H \quad (10)$$

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 (شکل ۴الف؛ برادفورد و استیل، ۲۰۰۴). اگر این رابطه برای درصد‌های جوانه‌زنی مختلف پلات شوند، یک سری خط‌های 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 (شکل ۴ب؛ برادفورد، ۱۹۹۷؛ برادفورد و استیل، ۲۰۰۴).



شکل ۴- الف- سرعت جوانه‌زنی به عنوان تابعی از پتانسیل آب برای کسرهای جوانه‌زنی مختلف (g). سرعت جوانه‌زنی برای یک کسر خاص به صورت خطی با افزایش پتانسیل آب در بالاتر از مقدار آستانه آن ($\psi_b(g)$) افزایش می‌یابد. شیب این خط برای همه درصد‌های مختلف ثابت و مساوی $1/\theta_H$ است. ب- توزیع نرمال مقادیر ψ_b که با میانگین ($\psi_b(50)$) و انحراف معیار (σ_{ψ_b}) توصیف شده است. نوسان نسبی وقوع یک مقدار پتانسیل پایه خاص با ($\psi_b(g)$) نشان داده شده است (برادفورد، ۱۹۹۷؛ برادفورد و استیل، ۲۰۰۴).

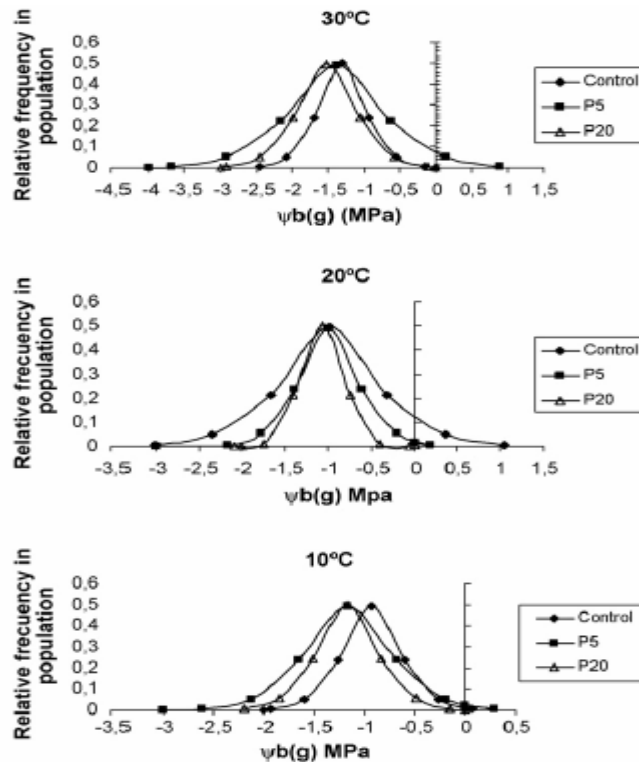
لارسن و همکاران (۲۰۰۴) با فرض این که واریانس پتانسیل پایه در یک توده بذری از توزیع نرمال پیروی می‌کند، روش پروبیت را برای تخمین پارامترها در مدل هیدروتایم به صورت زیر بکار بردند:

$$probit(g) = [\psi - (\theta_H / t_g) - \psi_b(50)] / \sigma_{\psi_b} \quad (10)$$

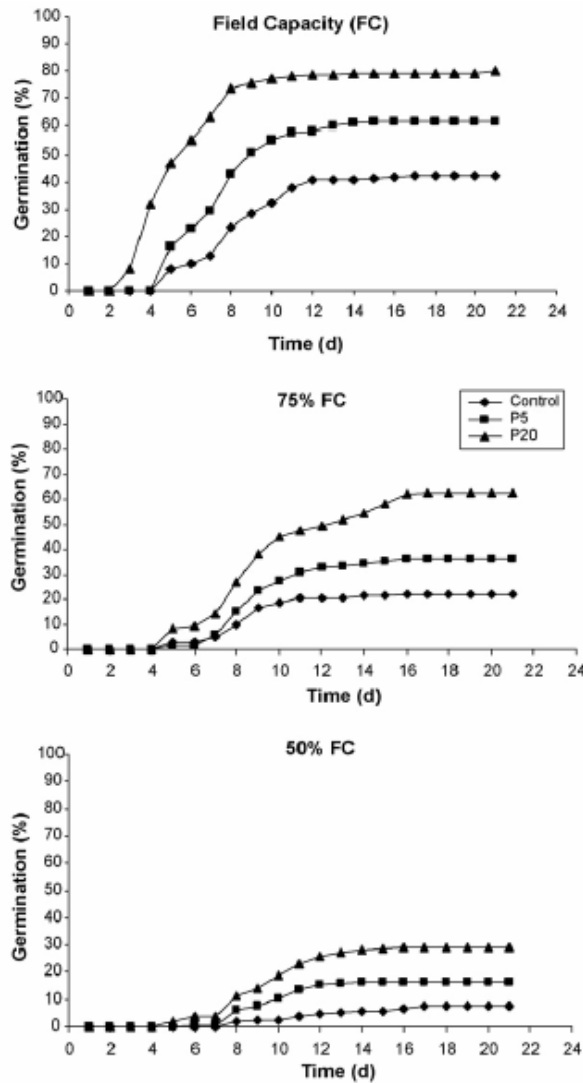
در این روش درصد‌های جوانه‌زنی در مقیاس پروبیت از مقادیر پتانسیل در مقابل $\psi - (\theta_H / t_g)$ رگرسیون شدند، مقادیر θ_H تغییر کردند تا زمانی که بهترین برازش به دست آید. همچنین ایشان برای مقایسه دوره‌های زمانی جوانه‌زنی با مقادیر پتانسیل مختلف به یک مقیاس زمانی معمول، منحنی‌ها در پتانسیل‌های پایین به مقیاس زمانی جوانه‌زنی در پتانسیل صفر مگاپاسکال، با ضرب کردن همه زمان‌های جوانه‌زنی ($t_g(\psi)$) با فاکتور $[1 - (\psi / \psi_b(g))]$ نرمال سازی کردند. این نرمال‌سازی اجازه ارزیابی مدل برای شرح رفتار جوانه‌زنی را می‌دهد. ایشان در نهایت همه داده‌های نرمال‌سازی شده را در مقیاس نرمال‌تایم با استفاده از تخمین دمای پایه در پتانسیل صفر مگاپاسکال نرمال‌سازی کردند.

وین‌داوئر و همکاران (۲۰۰۷) از آنالیز هیدروتایم برای بررسی واکنش جوانه‌زنی بذور *Lesquerella f.* در واکنش به پرایمینگ استفاده کردند. در مطالعه ایشان آنالیز هیدروتایم نشان داد که در دماهای مختلف بذرها پرایمینگ شده در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد بهتر از بذور پرایمینگ شده در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد و شاهد بودند. ایشان نشان دادند که میانگین پتانسیل پایه ($\psi_b(50)$) در دماهای مختلف برای بذرها شاهد بیشترین و برای پرایمینگ شده در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد کمترین بود. یعنی پرایمینگ موجب شد بذرها در پتانسیل پایین‌تری جوانه بزنند (شکل ۵). همچنین هیدروتایم (θ_H)

مورد نیاز برای جوانه‌زنی با پرایمینگ کاهش یافت (شکل ۴). در مقابل یکنواختی جوانه‌زنی (که با $\sigma_{\psi b}$ شرح داده می‌شود) بهبود زیادی با تیمار پرایمینگ نیافت. ایشان نتیجه گیری کردند که احتمالاً بذره‌ای پرایمینگ شده در دمای ۲۰ درجه سانتی-گراد در مزرعه نیز کارکرد بهتری نسبت به بذره‌ای پرایمینگ شده در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد و شاهد خواهد داشت. نتایج کشت آن‌ها در جعبه‌های چوبی حاوی خاک با پتانسیل‌های FC، ۷۵ درصد FC و ۵۰ درصد FC نشان داد که، نتایج آنالیز هیدروتایم با کشت آن‌ها مطابقت دارد (شکل ۶).

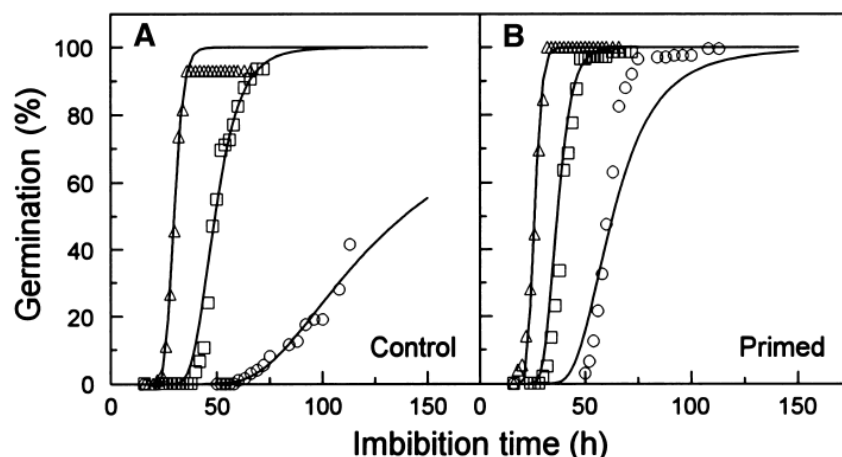


شکل ۵- توزیع پتانسیل پایه بذره‌ای *L. fendleri* در معرض تیمارهای پرایمینگ (Control, P5, P20; and \blacklozenge) در دماهای مختلف (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد) (وین‌داوئر و همکاران، ۲۰۰۷).



شکل ۶- جوانه‌زنی تجمعی بذرهای *L. fendleri* در تیمارهای پرایمینگ مختلف، تحت پتانسیل‌های آب خاک مختلف (وین‌داوئر و همکاران، ۲۰۰۷).

در مطالعه‌ای برادفورد و استیل (۲۰۰۴) از آنالیز هیدروتایم بر روی بذرهای پلیت‌شده کاهو در دو تیمار شاهد و پرایمینگ استفاده کردند، ایشان مشاهده نمودند که بذرهای پرایمینگ شده در مقایسه با بذرهای شاهد سریع‌تر جوانه زدند (شکل ۷)، که این جوانه‌زنی سریع‌تر به علت مقدار $\psi_b(50)$ کمتر برای بذرهای پرایمینگ شده است که منجر به جوانه‌زنی بهتر آن‌ها در پتانسیل‌های پایین‌تر شد (برادفورد و استیل، ۲۰۰۴). در برخی موارد دیگر اثر پرایمینگ بذر در سرعت‌های جوانه‌زنی بیشتر به علت کاهش θ_H و اثر کمتر بر $\psi_b(50)$ بود (داهل و برادفورد، ۱۹۹۰؛ برادفورد و سومساکو، ۱۹۹۴).



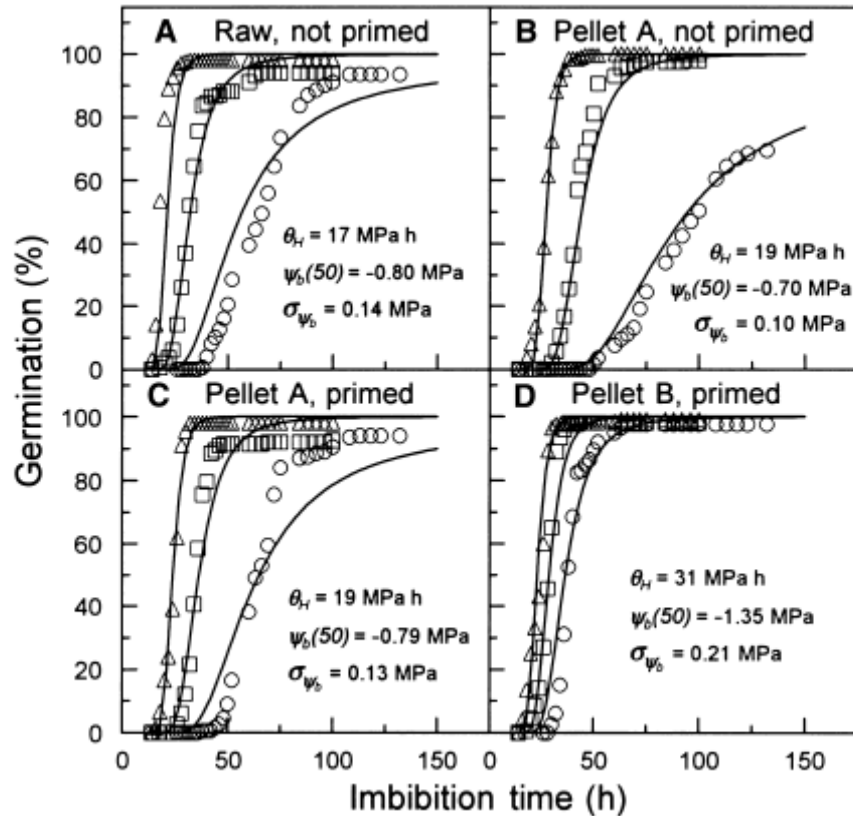
شکل ۷- دوره‌های زمانی جوانه‌زنی هیدروتایم بذرهای کاهو پلیت شده (کنترل) و پلیت شده پرایمینگ شده. بذرها در پتانسیل‌های صفر (مثلث)، ۰/۲۵- (مربع) و ۰/۵ مگاپاسکال (دایره) جوانه زدند. مدل هیدروتایم برای این داده‌ها برازش داده شد و نتایج پارامترها عبارت بودند

از: کنترل، $\sigma_{\psi_b} = 0.08 \text{ MPa}$ و $\psi_b(50) = -0.64 \text{ MPa h}$ ، $\theta_H = 19 \text{ MPa h}$

پرایمینگ شده، $\sigma_{\psi_b} = 0.09 \text{ MPa}$ و $\psi_b(50) = -0.85 \text{ MPa h}$ ، $\theta_H = 22 \text{ MPa h}$

در این مورد اثر عمده پرایمینگ کمتر بودن $\psi_b(50)$ است (برادفورد و استیل، ۲۰۰۴).

آزمایشی با ترکیبات وسیعی از روش‌های پرایمینگ و حبه‌کردن نشان داد که بسته به نوع رقم، توده بذر و تیمارهای خاص بکار رفته، اثر هر سه پارامتر مدل هیدروتایم را می‌توان مشاهده کرد (برادفورد و استیل، ۲۰۰۴). شکل ۸ الف دوره‌های زمانی بذرهای کاهو در تیمار شاهد (حبه و پرایمینگ نشده) را نشان می‌دهد. حبه‌کردن این بذرها بدون پرایمینگ موجب تاخیر در جوانه‌زنی به ویژه در پتانسیل‌های پایین‌تر شدند (شکل ۸ ب). پرایمینگ بذرها بدون حبه‌کردن بر این تاخیر غلبه کرد (شکل ۸ ج). به هر حال ترکیب پرایمینگ و حبه‌کردن بذرها، منجر به جوانه‌زنی خیلی سریع حتی در پایین‌ترین پتانسیل‌ها شد (شکل ۸ د). مقادیر متفاوت پارامترهای هیدروتایم در هر مورد نشان می‌دهد، چگونه این تفاوت می‌تواند انواع مختلفی از کارکرد بذر را در واکنش به تیمارهای مختلف نشان دهد.



شکل ۸- تجزیه هیدروتایم می‌تواند برای آنالیز اثرات مختلف تیمارهای پرایمینگ و فرمول‌های مختلف حبه کردن استفاده کرد. در این مثال بذرهای یک توده کاهو با روش‌های مختلف پرایمینگ و حبه شدند. بذرها در پتانسیل‌های صفر (مثلث)، ۰/۲۵- (مربع) و ۰/۵ مگاپاسکال (دایره) جوانه زدند. جوانه‌زنی بذرهای شاهد در قسمت A نشان داده شده است. قسمت B جوانه‌زنی بذرهای کنترل را بعد از حبه کردن با فرمول A نشان می‌دهد. قسمت C اثر پرایمینگ و به دنبال آن حبه کردن با فرمول A را نشان می‌دهد. پرایمینگ برخی از اثرات حبه کردن را جبران می‌کند. در قسمت D بذرهای با فرمول B پرایمینگ و حبه شدند که کارکرد بهتری نسبت حبه A بعد از پرایمینگ داد (برادفورد و استیل، ۲۰۰۴).

کمی‌سازی واکنش به دما و پتانسیل آب (مدل‌های هیدروترمال‌تایم): مدل ترمال‌تایم و هیدروتایم با یکدیگر ترکیب شده‌اند و از مدل هیدروترمال‌تایم برای توصیف ترکیب اثر دما و رطوبت بر جوانه‌زنی استفاده شده است (گامرسون، ۱۹۸۶؛ برادفورد، ۱۹۹۵؛ آلن و همکاران، ۲۰۰۰). فرض اصلی مدل هیدروترمال‌تایم این است که، دمای پایه برای جوانه‌زنی بذرهایی که در کمون نیستند مستقل از پتانسیل آب است، و این که پتانسیل آب پایه برای درصد جوانه‌زنی مستقل از دما است (برادفورد، ۱۹۹۵). این فرض در برخی مطالعات تغییر کرد (گامرسون، ۱۹۸۶؛ چنگ و برادفورد، ۱۹۹۹؛ گرنیدی و همکاران، ۲۰۰۰)، به طوری که، در برخی موارد پتانسیل آب پایه با تغییر دما تغییر کرد (داهل و برادفورد، ۱۹۹۴؛ آلوارادو و برادفورد، ۲۰۰۲) و همچنین دمای پایه می‌تواند با کاهش پتانسیل آب افزایش یابد (فی‌فیلد و گرگوری، ۱۹۸۹؛ کبراب و ماردوچ، ۱۹۹۹). به هر حال اثر متقابل بین پتانسیل آب و دما معمول نیست. آلن و همکاران (۲۰۰۰) به طور موفقیت آمیزی از مدل هیدروترمال‌تایم 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 هیدروترمال‌تایم 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 (نی و برادفورد، ۱۹۹۲؛ داهل و برادفورد، ۱۹۹۴؛ آلوارادو و برادفورد، ۲۰۰۲). بنابراین، در هنگام استفاده از مدل هیدروترمال‌تایم 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.

وقتی که دما و پتانسیل آب هر دو تغییر کنند، سرعت جوانه‌زنی را می‌توان با ترکیب مقیاس زمانی هیدروترمال بر طبق مدل هیدروترمال تایم شرح داد (گومرسون، ۱۹۸۶؛ برادفورد، ۱۹۹۵). مدل هیدروترمال تایم از ترکیب معادلات (۵) و (۸) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\theta_{HT} = (\psi - \psi_b(g))(T - T_b)t_g \quad (11)$$

که θ_{HT} ثابت هیدروترمال تایم است، یعنی ترکیب ترمال تایم تجمع یافته در دماهای بالاتر از دمای پایه و هیدروترمال تایم تجمع یافته در سطوح پتانسیل بالاتر از پتانسیل پایه. مدل هیدروترمال تایم فرض می‌کند که θ_{HT} و T_b برای همه بذرها در یک توده ثابت هستند، درحالی‌که توزیع $\psi_b(g)$ برای تغییرات در زمان برای جوانه‌زنی بین بذرها خاص محاسبه می‌شود (برادفورد، ۱۹۹۵). این تابع واکنش جوانه‌زنی در دماهای زیر مطلوب و در پتانسیل‌های مختلف آب را به خوبی توصیف می‌کند. آلوارادو و برادفورد (۲۰۰۲) بیان داشتند که در دماهای بالاتر از مطلوب، بین دما و پتانسیل آب اثرات متقابل وجود دارد، بنابراین این تابع در دماهای بالاتر از مطلوب برازش مناسبی ندارد. آلوارا و برادفورد (۲۰۰۲) برای رفع این معضل، تابع زیر را ارائه دادند:

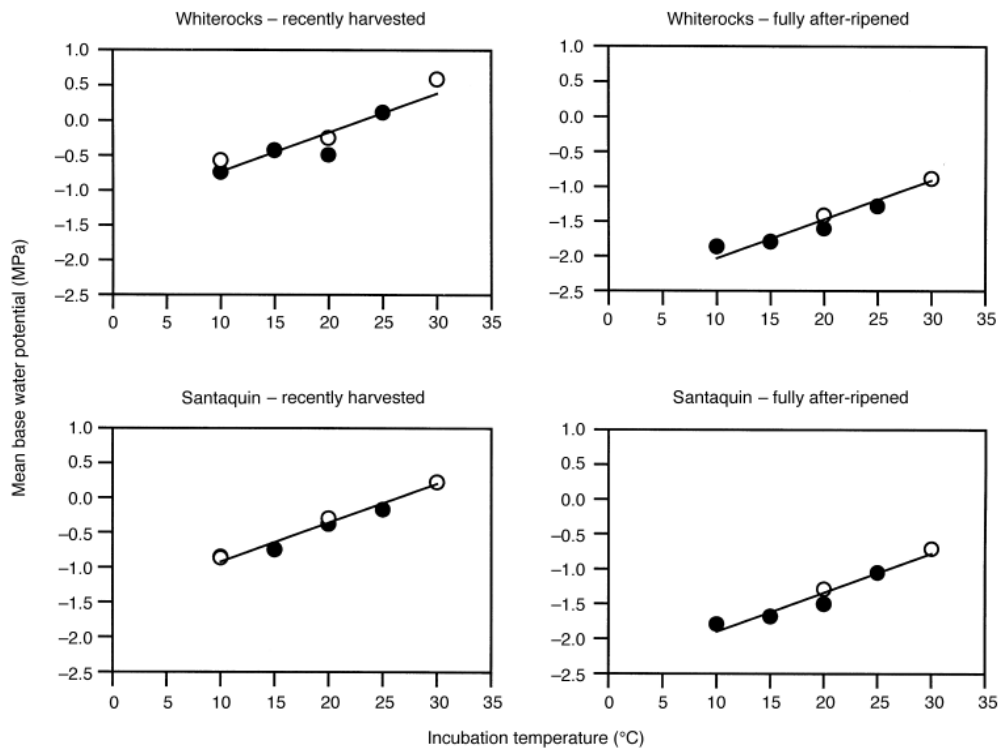
$$\theta_{HT} = \{\psi - \psi_b(g) - [k_T(T - T_0)]\}(T - T_b)t_g \quad (12)$$

که $[k_T(T - T_0)]$ تنها زمانی استفاده می‌شود که دما بیشتر از دمای مطلوب ($T > T_0$) باشد و در این دامنه دمایی مقدار $\psi_b(g)$ برابر با $\psi_b(g)T_0$ می‌باشد و $T - T_b$ معادل با $T_0 - T_b$ می‌باشد. البته لازم به ذکر است که این تابع زمانی استفاده می‌شود که نقطه مطلوب یک نقطه باشد و زمانی که دمای مطلوب دارای دامنه باشد این تابع برازش مناسبی ندارد. با استفاده از دمای پایه تخمین زده شده در پتانسیل صفر مگاپاسکال بر طبق معادله (۵) می‌توان پارامترهای θ_{HT} و $\psi_b(50)$ توسط آنالیز پروبیت تخمین زد:

$$\text{probit}(g) = \left\{ \psi - \theta_{HT} / (T - T_b)t_g - \psi_b(50) \right\} / \sigma_{\psi_b} \quad (13)$$

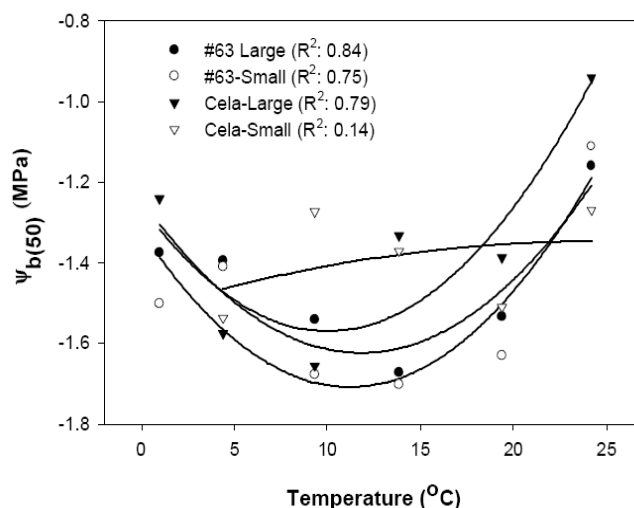
لارسن و همکاران (۲۰۰۴) همه درصدهای جوانه‌زنی در آزمایش خود را در مقابل $\psi - \theta_{HT} / (T - T_b)t_g$ با تغییر مقدار θ_{HT} تا بهترین برازش، رگرسیون گرفتند. لارسن و همکاران (۲۰۰۴) بر اساس روش برادفورد (۱۹۹۵)، زمان تا جوانه‌زنی نرمال شده (t_g) را در سطوح مختلف پتانسیل آب و دما به جزء زمان در پتانسیل صفر مگاپاسکال را با ضرب کردن همه مقادیر t_g در فاکتور $\{1 - [\psi - \psi_b(g)]\}(T - T_b)$ بدست آوردند که اجازه ارزیابی برازش مدل را می‌دهد.

میر و همکاران (۲۰۰۰) از مدل هیدرو ترمال تایم برای مطالعه اثرات دما، از بین رفتن کمون و پرایمینگ در *Elymus elymoides* استفاده کردند. شکل (۹) رابطه بین میانگین پتانسیل آب پایه و دما را برای بذرها تازه برداشت شده و بعد از رسیدگی کامل در دو توده *Elymus elymoides* نشان می‌دهد. مقادیر پتانسیل پایه در هر دما بدون هیچ تناقضی در تاریکی و دمای ثابت نسبت به نور و دمای متناوب بالاتر بود، که نشان‌دهنده تحریک جوانه‌زنی توسط نور یا دمای متناوب است (شکل ۹). به دلیل این که اثر متقابل ترمال تایم و دما معنی‌دار نبود، رابطه بین پتانسیل آب پایه و ترمال تایم در مطالعه آن‌ها بهتر توصیف شد، آن‌چنان‌که یک شیب یکسان و یک دمای پایه برای همه دماها و هر توده بذری به دست آمد. این شیب یکسان میزان کاهش در پتانسیل آب پایه را در هر درجه روز نشان می‌دهد.



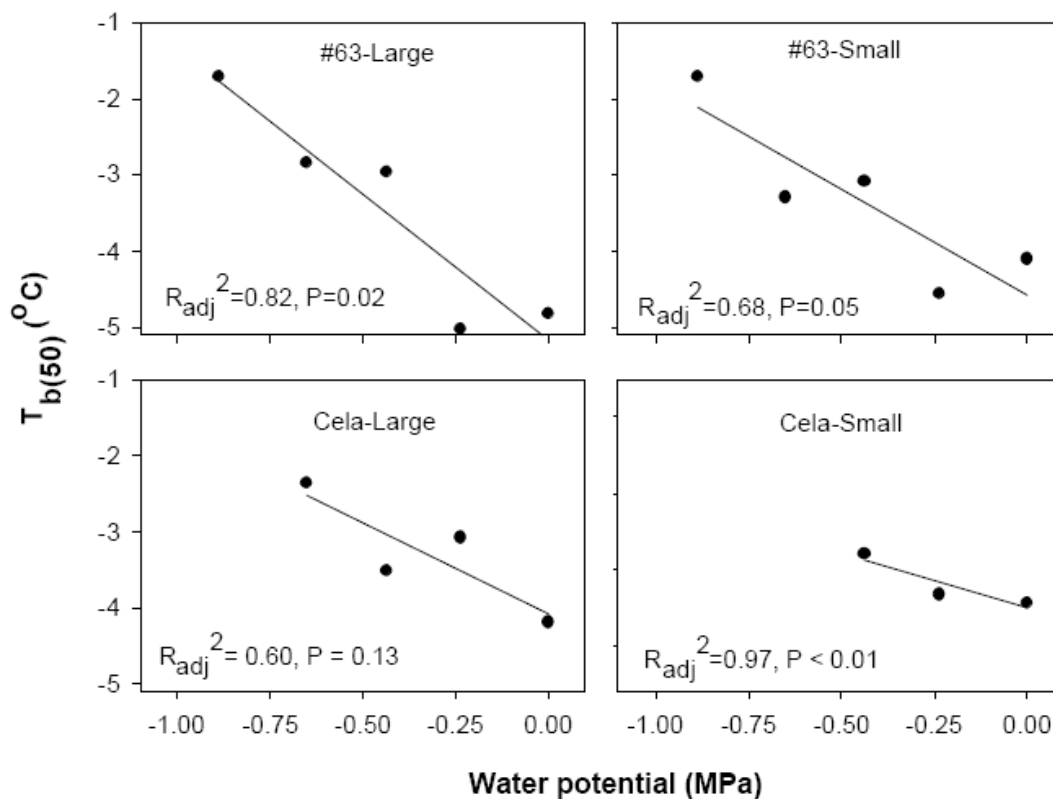
شکل ۹- رابطه بین میانگین پتانسیل آب پایه و دما را برای بذرهای تازه برداشت شده و بعد از رسیدگی کامل در دو توده *Elymus* نشان می‌دهد. دایره‌های تیره دماهای متناوب در نور و دایره‌های روشن دماهای ثابت در تاریکی را نشان می‌دهد (میر و همکاران ۲۰۰۰).

وانگ (۲۰۰۵) در مطالعه خود بر روی دو توده بذر *winterfat* با دو اندازه بذر کوچک و بزرگ از مدل هیدروترمال تایم استفاده کردند. شکل (۱۰) تغییر پتانسیل پایه برای ۵۰ درصد جوانه‌زنی با دما را در تیمارهای ایشان نشان می‌دهد. مقدار پتانسیل پایه در دماهای میانی (۱۰ تا ۱۵ درجه سانتی‌گراد) در کمترین مقدار بود و اختلاف بین پتانسیل‌های پایه بین دماها بیشتر از ۰/۵ مگاپاسکال بود.



شکل ۱۰- تغییر پتانسیل پایه برای ۵۰ درصد جوانه‌زنی با دما را در دو توده بذر *winterfat* با دو اندازه بذر کوچک و بزرگ. مقدار پتانسیل پایه بر اساس رابطه خطی سرعت جوانه‌زنی در مقابل پتانسیل آب در هر دما به دست آمد.

وانگ (۲۰۰۵) نشان داد که دمای پایه برای جوانه‌زنی توده‌های مورد بررسی ایشان به صورت خطی با افزایش پتانسیل آب کاهش یافت. این نشان می‌دهد که دمای پایه در این گیاه به پتانسیل آب وابسته است و قابلیت دسترسی آب بیشتر موجب کاهش دمای پایه می‌شود (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- دمای پایه ($T_{b(50)}$) تحت تأثیر پتانسیل آب قرار می‌گیرد. مقدار دمای پایه توسط رابطه خطی سرعت جوانه‌زنی در مقابل دما در هر پتانسیل آب به دست آمد.

نتیجه‌گیری کلی

به دلیل این که تنش آب در مزرعه اغلب محدودکننده است و آب خاک معمولاً در سطح خاک به طور زیادی تغییر می‌کند، پتانسیل آب اغلب می‌تواند اهمیت برجسته‌ای در زمان سبز شدن داشته باشد. هیدروترمال تایم اجازه پیش‌بینی جوانه‌زنی را در ترکیبی از دما و پتانسیل آب خاک می‌دهد، بنابراین، پتانسیل پیش‌بینی سبز شدن گیاهچه را در مزرعه دارد. از مدل هیدروترمال تایم به طور وسیعی برای پیش‌بینی سبز شدن در مزرعه برای محصولاتی مثل کاهو (برادفورد، ۱۹۹۰)، گوجه‌فرنگی (داهل و برادفورد، ۱۹۹۰) و در علف‌های هرز (گرنیدی و همکاران، ۲۰۰۰؛ کبراب و موردوچ، ۱۹۹۹؛ میر و همکاران، ۲۰۰۰) استفاده شده است. دقت مدل هیدروترمال تایم وابسته به دامنه پتانسیل آبی که بذرها در معرض آن قرار دارند، است. برآزش-های کمی از مدل وقتی که بذرها در پتانسیل‌های پایین جوانه می‌زنند، وجود دارد. از آنجایی که مدل هیدروترمال تایم اخیراً توسعه یافته است، بررسی‌های بیشتری روی گونه‌ها و توده‌های مختلف بذری برای تعیین اعتبار مدل نیاز است. بیشتر مدل-های جوانه‌زنی در شرایط کنترل شده محیطی توسعه یافته‌اند و گزارشات نسبتاً کمی در مورد کاربرد آن‌ها در شرایط مزرعه در دسترس است. مدل‌های جوانه‌زنی می‌توانند برای کمی کردن وابستگی جوانه‌زنی و سبز شدن به دما و پتانسیل آب استفاده شوند. هرچند که سبز شدن در مزرعه توسط اثرات متقابل محیطی پیچیده زیادی تعیین می‌شود، ولی این مدل‌ها تا حد زیادی قادر به ارائه تصویری روشن از سبز شدن در مزرعه هستند. با استفاده از مدل‌سازی جوانه‌زنی می‌توان اثرات زوال بذر،

پرایمینگ 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. با این حال کاربرد این مدل‌ها در ایران کمتر مشاهده شده است و توصیه می‌شود، این مدل‌ها بیشتر در تحقیقات علوم بذر و به خصوص در واکنش جوانه‌زنی به دما و پتانسیل آب استفاده شود.

منابع

- Akramghaderi, F., Soltani, E., Soltani, A. and Miri, A.A. 2008. Effect of priming on response of germination to temperature in cotton. *J. Agri. Sci. Natur. Res.* 15 (3), (Accepted).
- Akramghaderi, F., Soltani, A. and Sadeghipour, H.R. 2008. Cardinal temperature of germination in medical pumpkin (*Cucurbita pepo* conver *pepo* var. *styriaca*), borago (*Borago officinalis* L.) and black cumin (*Nigella sativa* L.). *Asian J. Plant Sci.* (Accepted).
- Anda, A., and Pinter, L. 1994. Sorghum germination and development at influenced by soil temperature and water content. *Agron. J.* 86: 621-624.
- 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.
- Balbaki, R.Z., Zurayk, R.A., Blek, M.M. and Tahouk, S.N. 1999. Germination and seedling development of drought tolerant and susceptible wheat under moisture stress. *Seed.Sci and Technol.* 27:291-302.
- 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., 1997. Seed germination and dormancy. *Plant Cell.* 9: 1055-1066.
- 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. *Scientia Horticulturae* 2, 213–219.
- Blumenthal, M.J., Aston, S.C. and Pearson, C.J. 1996. Effect od 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., and Somasco, O.A. 1994. Water relations of lettuce seed thermoinhibition. I. Priming and endosperm effects on base water potential. *Seed Sci. Research* 4:1–10.
- Bradford, K.J. and Still, D.W. 2004. Applications of Hydrotime Analysis in Seed Testing. *Seed Technology.* 26, 74-85.
- Brar, G.S., Gomez, J.F., McMichael, B.L., Matches, A.G. and Taylor, H.M. 1991. Germination of twenty forage legumes as influenced by temperature. *Agron. J.* 83: 173-175.
- Brigz, K.G., and Aytenfisu, A. 1979. The effects of seeding rate, seeding date and location on grain yield, maturity, protein percentage and protein yield of some spring wheats in central Alberta. *Can. J. Plant Sci.* 59: 1129-1146.
- Cheng, Z. and Bradford, K.J. 1999. Hydrothermal time analysis of tomato seed germination responses to priming treatments. *Journal of Experimental Botany* 50, 89–99.
- Dahal, P. and Bradford, K.J. 1994. Hydrothermal time analysis of tomato seed germination at suboptimal temperature and reduced water potential. *Seed Science Research* 4, 71–80.

- Ellis, R.H., Covell, S., Roberts, E.H. and Summerfield, R.J. 1986. The influence of temperature on seed germination rate in grain legumes. II. Intraspecific variation in chickpea (*Cicer arietinum* L.) at constant temperatures. *Journal of Experimental Botany* 37, 1503–1515.
- 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. *Journal of Experimental Botany* 40, 667–674.
- Garcia-Huidobro, J., Monteith, J.L. and Squier, G.R. 1982. Time, temperature and germination of Pearl Millet (*Pennisetum typhoides*, S & H). *J. Exp. Bot.* 33: 288- 296.
- 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.
- Guerke, W.R., Gutormson, T. Meyer, D., McDonald, M., Mesa, D., Robinson, J.C. and Tekrony, D. 2004. Application of hydrotime analysis in seed testing. *Seed Tech.* 26 (1): 75-85.
- 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.
- Hardegee, 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.
- Jacobsen, S.E., and Bach, A.P. 1998. The influence of temperature on seed germination rate in quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*). *Seed Sci and Technol.* 26: 515-523.
- 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.
- Karan, S., Afria, B. and Singh, K. 1985. Seed germination and seedling growth of chick pea (*Cicer arietinum*) under water stress. *Seed. Res.* 13: 1-9.
- 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.
- Kebreab, E., and Murdoch, A.J. 2000. The effect of water stress on the temperature range for germination of *Orobanches aegyptiaca* seeds. *Seed Sci. Res.* 10: 127-133.
- Larsen I, 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 Science Research.* 14, 35–50.
- Livingston, N.J and De Jong, E. 1990. Matric and osmotic potential effects on seedling emergence at different temperature. *Agron.J.* 82: 995-998.
- Manga., V.K. 1998. Germination response of pearl millet genotypes to simulated drought condition. *Crop.Improv.* 25: 155-158.
- 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., Debaene-Gill, S.B. and Allen, P.S. 2000. Using hydrothermal time concepts to model seed germination response to temperature, dormancy loss, and priming effects in *Elymus elymoides*. *Seed Science Research.* 10, 213–223.
- 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 Physiology* 98, 1057–1068.
- Qiu, J., Bai, Y., Coulman, B. and Romo, J.T. 2006. Using thermal time models to predict seedling emergence of orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.) under alternating temperature regimes. *Seed Science Research.* 16, 261–271.
- Rosalind, A.B., Oosterhuis, D.M. and Mauromoustakos, A. 1994. Growth dynamics of the cotton plant during water-deficit stress. *Agron. J.* 86: 788-795.

- 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.
- 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., Robertson, M.J., Torabi, B., Yousefi-Daz, M. and Sarparast, R. 2006a. Modeling seedling emergence in chickpea as influenced by temperature and sowing depth. *Agric. For. Meteorol.* 138, 156-167.
- Soltani, E., Galeshi, S., Kamkar, B. and Akramghaderi, F. 2008. Modeling Seed Aging Effects on the Response of Germination to Temperature in Wheat. *Seed Sci. biotech.* 2, 32-36.
- Swarn, L., Singh, H., Kapia, R. and Sharma, J. 1999. Seed germination and seedling growth of soybean under different water potentials. *Seed. Res.* 26:131-133.
- Thygerson, T., Harris, J.M., Smith, B.N., Hansen, L.D., Pendleton, R.L. and Booth, D.T. 2002. Metabolic response to temperature for six populations of winterfat (*Eurotia lanata*). *Thermochemica Acta* 394: 211-217.
- Windauer, L., Altuna, A. and Benech-Arnold, R. 2007. Hydrotime analysis of *Lesquerella fendleri* seed germination responses to priming treatments. *Industrial Crops and Products* 25, 70-74.

Applications of germination modeling on the response to temperature and water potential in seed science research

Elias Soltani¹, Farshid Akramghaderi¹ and Afshin Soltani²

¹PhD student, Dept. of Agronomy Gorgan University of Agricultural sciences and Natural Recourses, Iran,

²Professor, Dept. of Agronomy Gorgan University of Agricultural sciences and Natural Recourses, Iran

Abstract

Water and temperature are crucial factors for seed germination. Both factors can, separately or jointly, affect the germination percentage and germination rate. A variety of mathematical functions have been used to describe the relationship between germination and temperature (e.g. thermal time models). A hydrottime model has been also developed to describe the relationship between water potential and germination. The thermal time model and the hydrottime model have been combined into a hydrothermal time model to describe the combined effect of water and temperature on germination. The advantage of these functions is that they have parameters that are meaningful from a biological point of view. Hence, Using of germination modeling can be studied effects of seed aging, seed priming and seed dormancy. Also, germination modeling used to determine cardinal temperatures for germination and emergence, to determine base water potential for germination and to evaluate either time to germination or emergence. Nevertheless, applications of these models not have been seen much in Iran, and it recommends using these models more in seed science research especially in the germination response to temperature and water potential. In this study, tried to get some information about these models and their parameters and presented some examples for their application in seed science research.

Keywords: Germination; Modeling; Thermal time; hydrottime; hydrothermal time.