



نشریه تولید گیاهان زراعی  
جلد هفتم، شماره چهارم، زمستان ۹۳  
۲۳-۴۰  
<http://ejcp.gau.ac.ir>



## ارزیابی مدل‌های رگرسیون غیرخطی برای کمی کردن واکنش سرعت جوانه‌زنی گیاه جو به دما و پتانسیل آب

\* نفیسه خلیلی<sup>۱</sup>، افشین سلطانی<sup>۲</sup>، ابراهیم زینلی<sup>۳</sup> و فرشید قادری<sup>فر</sup>

<sup>۱،۲،۳</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، استاد و دانشیار گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ دریافت: ۹۲/۳/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۲/۲

### چکیده

دما و رطوبت از عوامل اصلی جوانه‌زنی بذرها هستند که سرعت جوانه‌زنی بذرهای فاقد کمون را تعیین می‌کنند. به‌منظور کمی‌سازی واکنش سرعت جوانه‌زنی گیاه جو نسبت به دما و رطوبت، جوانه‌زنی این گیاه تحت تأثیر تیمارهای دمایی (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد) و پتانسیل‌های رطوبت (۰، -۲، -۴، -۶ و -۸ بار) در آزمایشگاه تحقیقات بذر دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در سال ۱۳۹۱ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد تأثیر دما، پتانسیل آب و اثر متقابل آن‌ها بر درصد و سرعت جوانه‌زنی معنی‌دار است. با ارزیابی چهار مدل رگرسیون غیرخطی شامل مدل دوتکه‌ای، دندان مانند، بتای اصلی و بتای تغییر یافته، مدل بتای اصلی به‌عنوان مدل برتر انتخاب شد. دماهای کاردینال به‌دست آمده با استفاده از مدل برتر عبارت بودند از دمای پایه ۰/۹- درجه سانتی‌گراد، دمای مطلوب ۲۷/۵ درجه سانتی‌گراد و دمای سقف ۳۵/۷ درجه سانتی‌گراد همچنین تعداد ساعت بیولوژیک جوانه‌زنی در پتانسیل صفر ۲۳/۴ ساعت بود. دماهای کاردینال جوانه‌زنی به‌طور معنی‌دار تحت تأثیر پتانسیل آب قرار نگرفت اما تعداد ساعت بیولوژیک جوانه‌زنی به ازای کاهش یک بار پتانسیل آب، ۲/۶ ساعت بر بار افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل آب، دماهای کاردینال، سرعت جوانه‌زنی

\* مسئول مکاتبه: [Khalili.nafise@yahoo.com](mailto:Khalili.nafise@yahoo.com)

## مقدمه

جو یکی از مهم‌ترین گیاهان زراعی است که در کشور بعد از گندم در رتبه دوم سطح زیر کشت قرار دارد. طبق آمار فائو در سال ۲۰۱۰ تولید آن در دنیا ۱۲۳/۷ میلیون تن بوده و ایران با تولید ۳/۲ میلیون تن جو در رتبه دوازدهم دنیا قرار دارد. این در حالی است که در سال ۲۰۰۰ تولید آن در کشور ۱/۷ میلیون تن بوده که نشان دهنده افزایش ۱۰۰ درصدی تولید در یک دهه گذشته می‌باشد. با این وجود اطلاعات زیادی در ارتباط با واکنش جوانه‌زنی آن به دما، پتانسیل آب، دماهای کاردینال و دیگر پارامترهای جوانه‌زنی وجود ندارد. جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه از مراحل بحرانی و مهم در چرخه زندگی گیاهان است (وینداور و همکاران، ۲۰۰۷). جوانه‌زنی یک فرآیند فیزیولوژیک پیچیده است که تحت تأثیر عوامل ژنتیکی و محیطی قرار می‌گیرد (فولی و فنیمور، ۱۹۹۸؛ میر و پندلتن، ۲۰۰۰). جوانه‌زنی با جذب آب توسط بذر شروع می‌شود و با طول شدن محور جنینی و خروج ریشه‌چه پایان می‌یابد (بیولی، ۱۹۹۷).

پیش‌بینی زمان سبز شدن، انتخاب تاریخ کاشت مناسب و استقرار سریع و کامل گیاهچه‌ها لازمه یک زراعت موفق است و از آنجایی که این موارد به شدت تحت تأثیر عوامل محیطی مانند دما و رطوبت خاک قرار می‌گیرد بنابراین درک اساسی از سبز شدن و عوامل محیطی مؤثر بر آن در گیاهان زراعی ضروری می‌باشد (یانوکسی و همکاران، ۲۰۰۰؛ سفلدت و همکاران، ۲۰۰۲). سبز شدن سریع و یکنواخت، استقرار کامل گیاهچه‌های قوی (اجزای سبز شدن) می‌تواند به پوشیده شدن سریع سطح زمین و در نتیجه به افزایش عملکرد منتهی شود (سلطانی و همکاران، ۲۰۰۱). همچنین استقرار پوشش گیاهی کافی برای افزایش قدرت رقابت گیاه زراعی با علف‌های هرز ضروری است (سلطانی و همکاران، ۲۰۰۱). از این‌رو، هر عاملی که از طریق کاهش سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی منجر به استقرار نامناسب و تراکم پایین گیاهچه شود، منجر به کاهش عملکرد خواهد شد. اثرات شرایط نامطلوب در طول دوره جوانه‌زنی و مراحل اولیه رشد گیاه نسبت به سایر مراحل رشد مهم‌تر 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).

در بین عوامل محیطی در صورتی‌که تهویه مناسب باشد، برای بذره‌های بدون کمون، دما و رطوبت دارای اهمیت بیشتری هستند (برادفورد، ۲۰۰۲). دما یکی از عواملی است که از طریق تنظیم کمون بر ظرفیت جوانه‌زنی و همچنین بر سرعت جوانه‌زنی بذره‌های بدون کمون تأثیر می‌گذارد (کبراب و

ماردوچ، ۲۰۰۰). دما و رطوبت می‌توانند با هم یا به‌طور جداگانه بر درصد و سرعت جوانه‌زنی اثر گذارند (باسکین و باسکین، ۲۰۰۱). گیاهان دارای سه دمای کاردینال شامل دمای پایه یا حداقل، دمای مطلوب و دمای حداکثر یا سقف برای جوانه‌زنی هستند. دماهای پایه و حداکثر دماهایی هستند که به‌ترتیب در دماهای پایین‌تر و بالاتر از آن دماها، جوانه‌زنی متوقف می‌شود و دمای مطلوب، دمایی است که در آن مراحل جوانه‌زنی در کوتاه‌ترین زمان ممکن 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 (اکرم قادری و همکاران، ۲۰۰۸).

علاوه بر دما، پتانسیل آب خاک نیز یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی است که بر جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه تأثیر می‌گذارد (آندا و پینتر، ۱۹۹۴). توانایی جوانه‌زنی بذرها در شرایط رطوبتی متفاوت، شانس استقرار بیشتر گیاه و تراکم بالاتر را در پی دارد، که می‌تواند به افزایش عملکرد منجر شود (بالباکی و همکاران، ۱۹۹۹). به‌طور معمول، درصد جوانه‌زنی با بهبود قابلیت دسترسی به آب به‌صورت خطی افزایش می‌یابد (گریک و همکاران، ۲۰۰۴) و سرعت جوانه‌زنی با کاهش پتانسیل آب کاهش می‌یابد (گراندی و همکاران، ۲۰۰۰).

انواعی از توابع 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 مانند دماهای کاردینال و سرعت ذاتی جوانه‌زنی و سبز شدن هستند. بنابراین، برخی از محققین از این مدل‌ها برای به‌دست آوردن دماهای کاردینال یعنی دمای پایه، دمای مطلوب و دمای سقف استفاده کرده‌اند (جام و کاتفورس، ۲۰۰۴؛ هاردیگری، ۲۰۰۶). توابع دمایی مختلفی برای توصیف واکنش جوانه‌زنی به دما وجود دارد که از میان آن‌ها سه تابع دوتکه‌ای، بتا و دندان مانند برای بررسی واکنش جوانه‌زنی بذرها به دما بیشتر از بقیه مورد استفاده قرار گرفته‌اند (سلطانی و همکاران، ۲۰۰۶؛ سلطانی و همکاران، ۲۰۰۸؛ اکرم قادری، ۲۰۰۸).

انتخاب مدل مناسب برای کمی‌سازی واکنش سرعت جوانه‌زنی نسبت به دما، در تعیین دقیق دماهای کاردینال بسیار مهم است. کامکار و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه گیاه خشخاش با استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی مدل دوتکه‌ای را به‌عنوان مدل برتر در پیش‌بینی سرعت جوانه‌زنی معرفی کردند. آن‌ها همچنین در مطالعه کمی‌سازی سرعت سبز شدن گندم در واکنش به دما با استفاده از

مدل‌های رگرسیون غیرخطی مدل لجستیک را به‌عنوان مدل برتر انتخاب کردند (کامکار و همکاران، ۲۰۰۸). زینلی و سلطانی (۲۰۱۰) با بررسی جوانه‌زنی در دامنه دمایی ثابت ۵ تا ۳۴ درجه سانتی‌گراد، دماهای کاردینال برای جوانه‌زنی ۱۲ رقم گندم را به‌دست آوردند. همچنین، بخشنده و همکاران (۲۰۱۱) از مدل‌های هیدروتایم، ترمال‌تایم و هیدرو ترمال‌تایم در کمی‌سازی اثر متقابل دما و پتانسیل آب در دو گیاه گاو پنبه و سویا استفاده کردند.

### مواد و روش‌ها

این تحقیق در سال ۱۳۹۱ در آزمایشگاه تحقیقات بذر دانشکده علوم زراعی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان بر روی گیاه جو رقم ماهور انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل دما در هفت سطح (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۳۵ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد) و پتانسیل آب در پنج سطح (۰، -۲، -۴، -۶ و -۸ بار)، به‌صورت تجزیه مرکب در مکان با چهار تکرار انجام شد. به‌طوری که دما به‌عنوان محیط و پتانسیل آب به‌عنوان تیمار داخل محیط در نظر گرفته شد. تیمارهای دمایی توسط انکوباتور، با دقت ۰/۵ درجه سانتی‌گراد تأمین گردید. پتانسیل‌های آب با استفاده از پلی‌اتیلن گلیکول ۸۰۰۰ (PEG 8000) و بر اساس معادله (۱) تهیه شدند (میچل، ۱۹۸۳).

$$\psi = 1.29[\text{PEG}]^2 T - 140[\text{PEG}]^2 - 4[\text{PEG}] \quad (1)$$

که  $\psi$ ، پتانسیل اسمزی موردنظر؛  $T$ ، دما و  $\text{PEG}$ ، مقدار پلی‌اتیلن گلیکول موردنیاز می‌باشند.

برای هر یک از چهار تکرار ۵۰ عدد بذر جو رقم ماهور انتخاب شد. بذرها با قرار گرفتن در محلول وایتکس ۱۰ درصد به‌مدت ۵ دقیقه ضدعفونی شده و پس از شستشو با آب مقطر بر روی یک لایه کاغذ صافی، داخل پتری‌دیش قرار داده شد. کاغذ صافی مورد استفاده برای هر تیمار، قبلاً توسط محلول‌های پلی‌اتیلن گلیکول ۸۰۰۰ با پتانسیل‌های آب ۰، -۲، -۴، -۶ و -۸ بار خیسانده شده بودند و برای تیمار شاهد از آب مقطر استفاده شد. پتری‌دیش‌ها داخل ۷ انکوباتور با دماهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۳۵ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. شمارش بذرهای جوانه زده هر روز دو بار صورت گرفت. در هر بار بذرهای جوانه‌زده از محیط جوانه‌زنی خارج شدند. معیار جوانه‌زنی خروج ریشه‌چه به اندازه

۲ میلی‌متر یا بیشتر بود (سلطانی و همکاران، ۲۰۰۱). در طول آزمایش در صورت نیاز، به تیمارها آب مقطر (شاهد) یا محلول‌های تهیه شده اضافه شد.

در کلیه تیمارهای دمایی، برای هر تکرار منحنی پیشرفت جوانه‌زنی در مقابل زمان (ساعت) ترسیم و زمان لازم برای ۵۰ درصد ( $D_{50}$ ) جوانه‌زنی از طریق درون‌یابی برآورد گردید. همچنین سرعت جوانه‌زنی (در ساعت) با استفاده از فرمول (۲) محاسبه شد (سلطانی و همکاران، ۲۰۰۸).

$$R_{50} = 1/D_{50} \quad (2)$$

که در آن  $R_{50}$  سرعت جوانه‌زنی و  $D_{50}$  زمانی است که طول می‌کشد تا جوانه‌زنی به ۵۰ درصد حداکثر خود برسد.

درصد جوانه‌زنی با تقسیم تعداد بذرهای جوانه‌زده به کل تعداد بذرهای مورد استفاده ضرب در صد به دست آمد. محاسبات موردنیاز با استفاده از برنامه Germin انجام شد (سلطانی و مداح، ۲۰۱۰). برای کمی‌سازی واکنش سرعت جوانه‌زنی به دما و تعیین دماهای کاردینال از مدل زیر استفاده شد (سلطانی و همکاران، ۲۰۰۸):

$$R_{50} = f(T)/G_0 \quad (3)$$

که در آن  $G_0$  حداقل ساعت تا جوانه‌زنی در دمای مطلوب است بنابراین  $1/G_0$  حداکثر سرعت جوانه‌زنی را نشان می‌دهد و  $f(T)$  تابع دما است که بین صفر (در دمای پایه) و یک (در دمای مطلوب) تغییر می‌کند و از روابط زیر به دست می‌آید:

۱- تابع بتای اصلی<sup>۱</sup> با علامت اختصاری (B) که معادله آن به صورت زیر است:

$$f(T) = [(T - T_b / T_o - T_b) * (T_c - T / T_c - T_b)^{(T_c - T_o / T_o - T_b)}]^\alpha \quad (4)$$

۲- تابع بتای تغییر یافته<sup>۲</sup> با علامت اختصاری (Bm) که معادله آن به صورت زیر است (یان و هانت، ۱۹۹۹):

$$f(T) = ((T_c - T) / (T_c - T_o)) * ((T - T_b) / (T_o - T_b))^{(T_o - T_b) / (T_c - T_o)} \quad (5)$$

1- Beta Original

2- Beta Modified

تفاوت این تابع نسبت به تابع بتای اصلی، جایگزینی ضریب  $\alpha$  با  $(T_o - T_b)/(T_c - T_o)$  است. همچنین، در این مطالعه  $T_c$  و  $T_b$  ثابت فرض شدند.  
 ۳- تابع دندان مانند<sup>۱</sup> با علامت اختصاری (D) که معادله آن به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} f(T) &= (T - T_b)/(T_{o1} - T_b) && \text{اگر } T_b < T \leq T_{o1} \\ f(T) &= (T_c - T)/(T_c - T_{o2}) && \text{اگر } T_{o2} < T \leq T_c \\ f(T) &= 1 && \text{اگر } T_{o1} < T \leq T_{o2} \\ f(T) &= 0 && \text{اگر } T \leq T_b \text{ or } T \geq T_c \end{aligned} \quad (6)$$

۴- تابع دو تکه ای<sup>۲</sup> با علامت اختصاری (S) که معادله آن به صورت زیر است (سلطانی و همکاران، ۲۰۰۶):

$$\begin{aligned} f(T) &= (T - T_b)/(T_o - T_b) && \text{اگر } T_b < T \leq T_o \\ f(T) &= [1 - (T - T_o)/(T_c - T_o)] && \text{اگر } T_o < T \leq T_c \\ f(T) &= 0 && \text{اگر } T \leq T_b \text{ or } T \geq T_c \end{aligned} \quad (7)$$

در این توابع  $T_b$  دمای پایه،  $T_{o1}$  دمای مطلوب تحتانی،  $T_{o2}$  دمای مطلوب فوقانی،  $T_o$  دمای مطلوب،  $T_c$  دمای سقف،  $f_o$  و  $a$  ضریب ثابت و  $T$  دمای متوسط روزانه (دمای مورد آزمایش) می باشد.

تخمین پارامترهای هر مدل با روش مطلوب سازی تکراری به کمک رویه PROCNLIN نرم افزار SAS صورت گرفت (سلطانی و همکاران، ۲۰۰۷). در روش مطلوب سازی تکراری با هر بار وارد کردن مقادیر اولیه پارامترها، مقادیر نهایی آن با روش کمترین توان های دوم تخمین زده می شود. تغییر مقادیر اولیه تا زمانی انجام می گیرد که بهترین برآورد از پارامترها به دست آید. بهترین برآورد پارامترهای مدل بر اساس خطای معیار (SE) کمتر پارامترها و جذر میانگین مربعات انحراف (RMSE) کمتر رگرسیون مشخص می شود (اکرم قادری، ۲۰۰۸). برای انتخاب مدل برتر از میان مدل-

1- Dent-like  
 2- Segmented

های مورد استفاده، از جذر میانگین مربعات انحرافات (RMSE) برای زمان جوانه‌زنی، ضریب تبیین ( $R^2$ )، ضریب همبستگی (r)، ضرایب رگرسیون ساده خطی (a و b) در رابطه زمان (ساعت) تا جوانه‌زنی مشاهده شده و پیش‌بینی شده استفاده شد. هر چقدر ضریب تبیین ( $R^2$ ) مدل استفاده شده بالاتر باشد نشان دهنده این است که مدل درصد تغییرات سرعت جوانه‌زنی را بیشتر توجیه می‌کند. ضرایب a و b به ترتیب نشان دهنده میزان انحراف خط رگرسیون از مبدأ مختصات و میزان اریب خط رگرسیون از خط ۱:۱ است. مقدار عددی ضرایب a و b توسط نرم‌افزار SAS تعیین شد. معنی‌داری ضریب a توسط نرم‌افزار SAS و معنی‌داری ضریب b با تعیین حدود اطمینان بررسی شد. معنی‌داری ضریب a به این معنا است که عرض از مبدأ خط رگرسیون از عرض از مبدأ خط ۱:۱ اریبی دارد. معنی‌داری ضریب b به این معنا است که شیب خط رگرسیون از شیب خط ۱:۱ فاصله دارد و خط رگرسیون نسبت به خط ۱:۱ دارای اریب است (احمدی و همکاران، ۲۰۱۰). هر چه پراکنش نقاط در اطراف خط یک به یک کمتر باشد نشانه کارایی بالاتر مدل است. با توجه به این معیارها مدل برتر، به‌منظور توصیف سرعت جوانه‌زنی نسبت به دما در پتانسیل‌های مختلف آب، برای تعیین دماهای کاردینال جوانه‌زنی استفاده می‌شود. آنالیز درصد جوانه‌زنی تحت تأثیر دما و پتانسیل آب با استفاده از برنامه SAS، انجام شد.

### نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس درصد جوانه‌زنی (Gp)، سرعت جوانه‌زنی در ۵۰ درصد جوانه‌زنی ( $R_{50}$ )، زمان رسیدن به ۱۰ درصد ( $D_{10}$ )، ۵۰ درصد ( $D_{50}$ ) و ۹۰ درصد ( $D_{90}$ ) جوانه‌زنی نشان داد که تأثیر دما، پتانسیل آب و اثرات متقابل دما و پتانسیل آب بر پارامترهای ذکر شده در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). در همه دماها با کاهش پتانسیل آب، حداکثر درصد جوانه‌زنی کاهش و زمان رسیدن به آن افزایش یافت اما میزان این تغییرات در همه دماها یکسان نبود به طوری که با افزایش دما تا دمای مطلوب میزان تغییرات کاهش یافته و در دمای مطلوب به حداقل خود می‌رسد و سپس با افزایش دما این تغییرات افزایش می‌یابند به طوری که در هر پتانسیل آب با افزایش دما از ۵ به ۲۵ درجه سانتی‌گراد، زمان رسیدن به حداکثر درصد جوانه‌زنی کاهش و سپس با ادامه افزایش دما از ۲۵ به ۳۵ درجه سانتی‌گراد، افزایش یافت (شکل ۱). همچنین با کاهش پتانسیل آب، درصد و سرعت جوانه‌زنی

کاهش یافت. با افزایش دما تا دمای مطلوب درصد و سرعت جوانه‌زنی افزایش و بعد از آن کاهش یافت، اما حساسیت این مؤلفه‌ها به پتانسیل آب بیشتر از دما بود. حساسیت درصد جوانه‌زنی به دما کمتر از سرعت جوانه‌زنی بود. به طوری که در دامنه گسترده‌تری از دماها درصد جوانه‌زنی ثابت بود، اما با کاهش پتانسیل آب، دامنه‌ای از دماها که در آن حداکثر جوانه‌زنی رخ می‌دهد کاهش یافت. کاهش سرعت جوانه‌زنی با کاهش پتانسیل آب به دلیل جذب سخت‌تر و کندتر آب توسط بذر در شرایط تنش خشکی می‌باشد. این نتیجه قبلاً در ارقام مختلف پنبه توسط گالشی و همکاران (۲۰۰۵) و در گندم توسط بالباکی و همکاران (۱۹۹۹) گزارش شده است. همچنین بیان شده است که انعقاد پروتئین و اختلال در کار غشاها از جمله عواملی هستند که باعث کاهش سرعت جوانه‌زنی بذرها در دماهای بالاتر از دمای مطلوب می‌شوند (برادفورد، ۲۰۰۲). تیگرسون و همکاران (۲۰۰۲) نیز کاهش کارایی متابولیکی بذرها را از دیگر عوامل کاهش سرعت جوانه‌زنی در دماهای بالاتر از دمای مطلوب گزارش کردند.

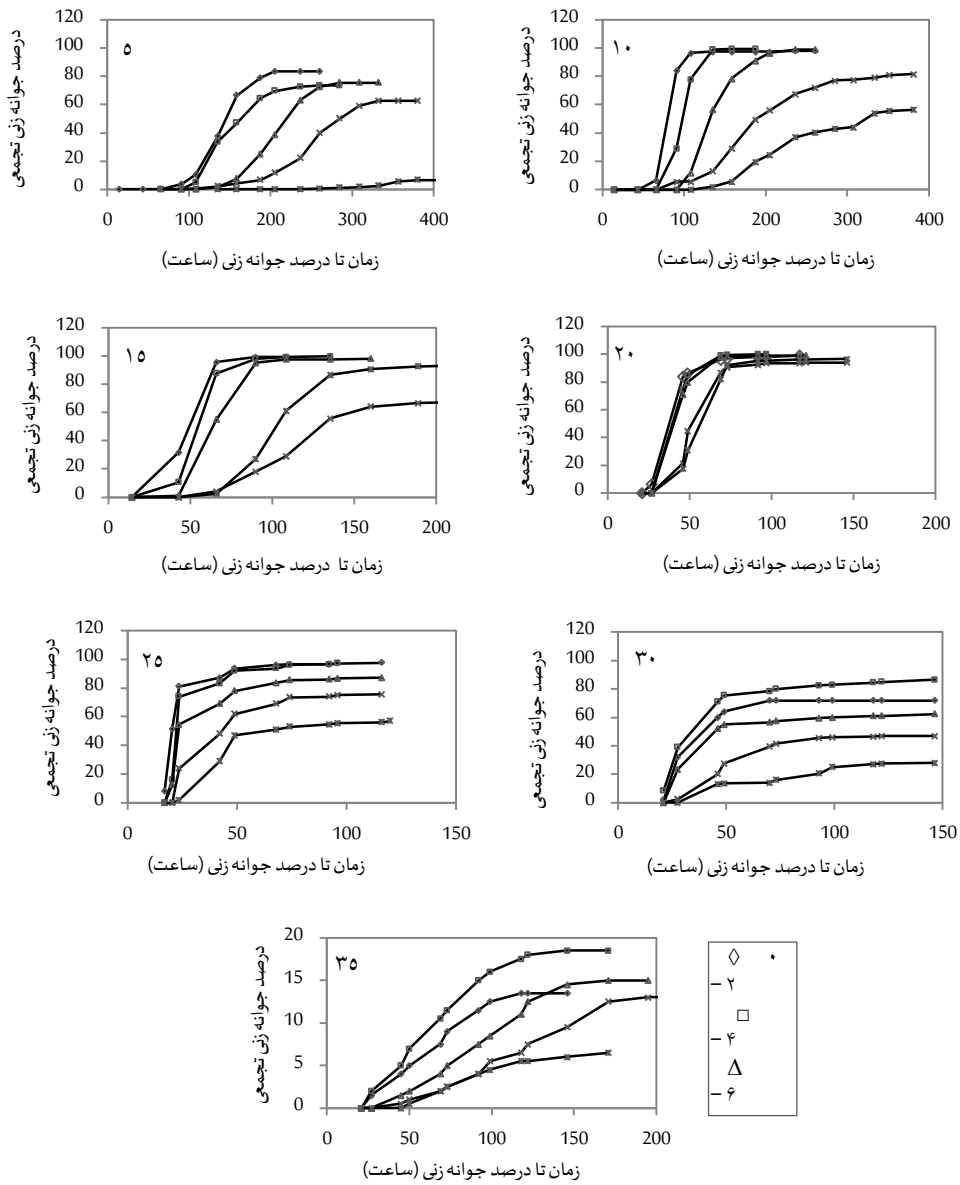
جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس درصد جوانه‌زنی (Gp)، سرعت جوانه‌زنی در ۵۰ درصد جوانه‌زنی (R<sub>50</sub>), زمان رسیدن به ۱۰ درصد (D<sub>10</sub>), ۵۰ درصد (D<sub>50</sub>) و ۹۰ درصد (D<sub>90</sub>) جوانه‌زنی.

D <sub>90</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>10</sub>	Gp	R <sub>50</sub>	df	منابع تغییر
۲۵۰/۴**	۴۲۰/۰**	۶۲۲/۸**	۱۴۴/۶**	۲۳۳/۸**	۶	دما (T)
۱/۱۶ <sup>ns</sup>	۰/۹۷ <sup>ns</sup>	۱/۰ <sup>ns</sup>	۱/۲ <sup>ns</sup>	۰/۷۸ <sup>ns</sup>	۲۱	تکرار داخل دما (E <sub>1</sub> )
۱۱۳/۹**	۱۱۳/۱**	۱۱۳/۵**	۵۸/۰**	۴۹/۳**	۴	پتانسیل آب (W)
۱۸/۴**	۲۲/۰**	۱۵/۲**	۶/۷**	۶/۶**	۲۴	اثر متقابل (W*T)
۳۵۲/۶	۲۱۰/۷	۶۵/۲	۹۶/۱	۰/۰۰۰۰۱	۸۴	خطا (E <sub>2</sub> )

\*\* و \* به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد را نشان می‌دهد. برای خطا مقادیر میانگین مربعات و برای دیگر منابع تغییر مقادیر F آورده شده است.

در مدل‌های بتای اصلی و دو تکه‌ای دمای پایه، دمای مطلوب، دمای سقف و ساعت بیولوژیک جوانه‌زنی با استفاده از مدل برآورد می‌شود اما مدل دندان مانند دامنه دماهای مطلوب (از دمای مطلوب تحتانی تا دمای مطلوب فوقانی) برآورد می‌کند. این در حالی است که با استفاده از مدل بتای تغییر یافته، تنها پارامترهای دمای مطلوب و ساعت بیولوژیک جوانه‌زنی برآورد می‌شود.





شکل ۱- درصد جوانه‌زنی تجمعی در دامنه‌ای از پتانسیل‌های آب در دماهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد در برابر زمان تا درصد جوانه‌زنی بر حسب ساعت (اعداد کنار شکل مربوط به پتانسیل آب بر حسب بار است).

معیارهای موردنظر در مقایسه مدل‌های مختلف برای انتخاب مدل برتر در توصیف سرعت جوانه‌زنی به دما در پتانسیل‌های مختلف آب شامل مجذور میانگین مربعات انحراف (RMSE)، ضریب تبیین ( $R^2$ )، ضرایب رگرسیون (a و b) و رابطه زمان (ساعت) تا جوانه‌زنی مشاهده شده و پیش‌بینی شده است (جدول ۲).

با مقایسه معیارهای تعیین مدل برتر مشاهده شد که ضریب رگرسیون a (میزان انحراف خط رگرسیون از مبدأ مختصات) در مدل بتای اصلی در پتانسیل‌های صفر و ۲- بار در سطح ۵ درصد، در مدل بتای تغییر یافته در پتانسیل‌های ۴- و ۶- بار در سطح ۱ درصد و در مدل‌های دندان مانند و دو تکه‌ای در پتانسیل‌های ۲-، ۴-، ۶- و ۸- بار در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود و ضریب b (میزان اریب خط رگرسیون از خط ۱:۱) در مدل بتای اصلی در همه پتانسیل‌ها به‌جز پتانسیل ۶- بار، در مدل بتای تغییر یافته در پتانسیل‌های ۲-، ۴- و ۶- بار و در مدل‌های دندان مانند و دو تکه‌ای در همه پتانسیل‌ها در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۲-۴). همچنین ضریب تبیین ( $R^2$ ) در مدل‌های بتای اصلی و دندان مانند به‌طور متوسط ۹۱/۴ درصد، در مدل دو تکه‌ای ۹۰ درصد و در مدل بتای تغییر یافته ۸۵/۴ درصد بود (جدول ۲).

از طرفی مجذور میانگین مربعات انحراف (RMSE) برای زمان جوانه‌زنی و ضریب تغییرات (CV) در مدل بتای اصلی و بتای تغییر یافته تقریباً برابر و به‌ترتیب ۱۲/۵ ساعت و ۲۱ بود و این دو پارامتر، در دو مدل دندان مانند و دو تکه‌ای تقریباً مشابه و به‌ترتیب ۹ ساعت و ۱۵ بود (جدول ۲). همچنین مشاهده شد که پراکندگی نقاط در اطراف خط یک به یک، در مدل بتای اصلی کمتر از دیگر مدل‌ها است. به‌دلیل فاصله زیاد نقاط مربوط به دمای ۵ درجه سانتی‌گراد در اطراف خط یک به یک که نشان می‌دهد مدل‌های مورد استفاده برازش خیلی دقیقی از سرعت جوانه‌زنی در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد نداشته‌اند لذا در برازش خط رگرسیون از این نقاط استفاده نشد (شکل ۳).

با در نظر گرفتن موارد ذکر شده، به‌نظر می‌رسد مدل بتای اصلی در مقایسه با مدل‌های بتای تغییر یافته، دندان مانند و دو تکه‌ای برازش بهتری از داده‌ها دارد و به‌عنوان مدل برتر انتخاب شد (شکل ۲). آرنولد (۱۹۵۹، به نقل از هاردیگری، ۲۰۰۶) بیان می‌کند معیار مناسب برای تعیین برازش مدل در جوانه‌زنی، زمان تا جوانه‌زنی است که مقدار جزئی خطای مدل در تعیین سرعت جوانه‌زنی، اشتباه به نسبت خیلی بزرگتری در زمان تا جوانه‌زنی در دماهای پایین ایجاد می‌کند. کامکار و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه گیاه خشخاش با استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی مدل دو تکه‌ای را به‌عنوان مدل برتر

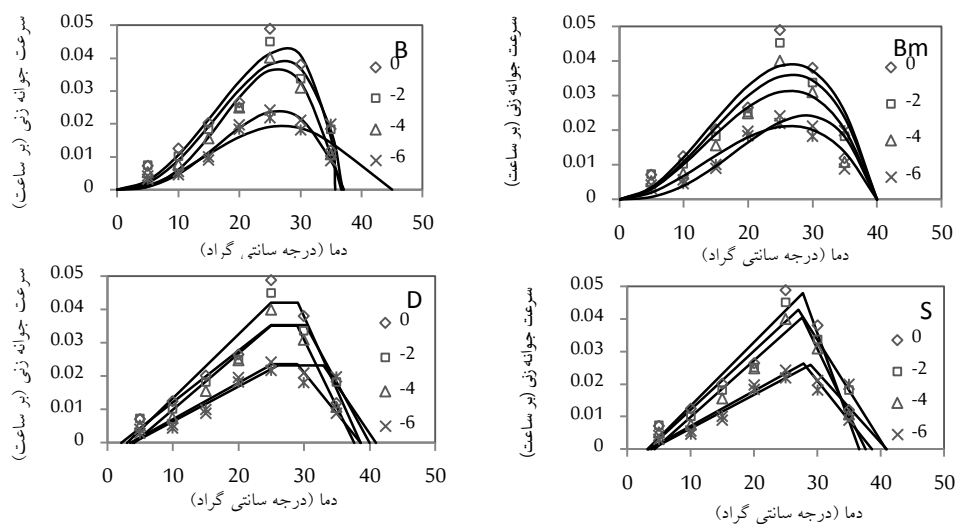
## نفیسه خلیلی و همکاران

در پیش‌بینی سرعت جوانه‌زنی معرفی کردند. اکرم قادری (۲۰۰۸) در ارزیابی مدل‌های رگرسیون غیرخطی در کمی‌سازی سرعت جوانه‌زنی سه گیاه دارویی کدو تخم کاغذی، سیاه‌دانه و گاو زبان به دما به این نتیجه رسیدند که مدل دندان مانند نسبت به مدل‌های دیگر، واکنش سرعت جوانه‌زنی به دما را بهتر توصیف می‌کنند و از این مدل و پارامترهای برآورد شده از آن (دمای پایه، دمای مطلوب و دمای سقف) می‌توان در پیش‌بینی زمان جوانه‌زنی و سبز شدن استفاده کرد.

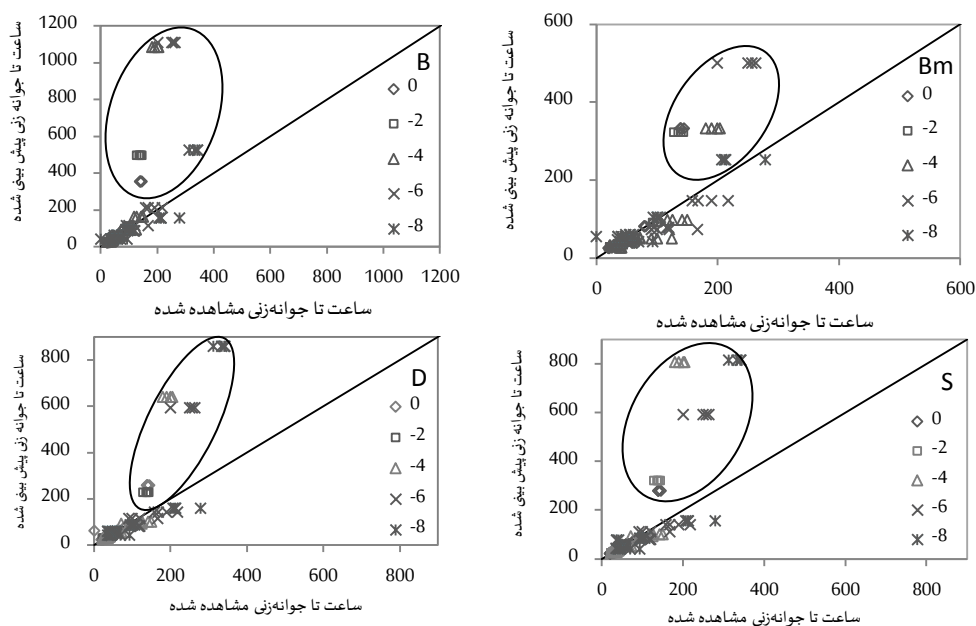
جدول ۲- جذر میانگین مربعات اشتباه (RMSE)، ضریب تغییرات (CV)، ضریب تبیین ( $R^2$ ) و ضرایب رگرسیون (a و b) برای مدل‌های مختلف رگرسیونی در پتانسیل‌های مختلف آب (RMSE مربوط به زمان جوانه‌زنی و بر حسب ساعت می‌باشد).

b ± SE	a ± SE	$R^2$	CV	RMSE	W
مدل بتا اصلی					
۱/۳** ± ۰/۰۶	-۸/۱* ± ۳/۲۵	۰/۹۴	۱۵/۳۲	۶/۴۹	۰
۱/۱** ± ۰/۰۵	-۷/۶* ± ۲/۸۵	۰/۹۶	۱۴/۰۲	۶/۲۲	-۲
۱/۱* ± ۰/۰۷	-۷/۵ ± ۶/۰۱	۰/۹۱	۲۹/۴۷	۱۵/۲۹	-۴
۱/۰ ± ۰/۰۸	-۲/۳ ± ۹/۵۴	۰/۸۵	۳۰/۸۵	۲۳/۳۶	-۶
۰/۵** ± ۰/۰۳	۲۳/۷ ± ۴/۴۵	۰/۹۱	۱۷/۵۵	۱۲/۸۳	-۸
مدل بتا تغییر یافته					
۰/۸ ± ۰/۰۸	۲/۶ ± ۴/۴۲	۰/۸۱	۲۰/۸۷	۸/۸۴	۰
۰/۸** ± ۰/۰۴	۲/۶ ± ۲/۵۵	۰/۹۴	۱۲/۵۵	۵/۵۷	-۲
۰/۵** ± ۰/۰۵	۱۷/۳** ± ۴/۱۸	۰/۷۹	۲۰/۵۱	۱۰/۶۴	-۴
۰/۵** ± ۰/۰۵	۲۲/۱** ± ۶/۱۹	۰/۸۱	۲۰/۰۴	۱۵/۱۷	-۶
۱/۰ ± ۰/۰۶	-۱/۵ ± ۷/۴۸	۰/۹۲	۲۹/۴۹	۲۱/۵۶	-۸
مدل دو تکه‌ای					
۰/۹** ± ۰/۰۳	۱/۳ ± ۱/۹۴	۰/۹۶	۹/۱۴	۳/۸۷	۰
۰/۷** ± ۰/۰۳	۷/۱** ± ۱/۸۰	۰/۹۶	۸/۸۴	۳/۹۲	-۲
۰/۶** ± ۰/۰۵	۱۱/۸** ± ۳/۸۷	۰/۸۹	۱۸/۹۶	۹/۸۴	-۴
۰/۶** ± ۰/۰۵	۲۱/۹** ± ۵/۷۷	۰/۸۶	۱۸/۶۶	۱۴/۱۳	-۶
۰/۵** ± ۰/۰۵	۳۰/۲** ± ۵/۸۵	۰/۸۳	۲۳/۰۶	۱۶/۸۶	-۸
مدل دندان مانند					
۰/۸** ± ۰/۰۳	۲/۰ ± ۱/۸۸	۰/۹۶	۸/۸۸	۳/۷۶	۰
۰/۷** ± ۰/۰۳	۹/۴** ± ۱/۶۹	۰/۹۶	۸/۲۹	۳/۶۸	-۲
۰/۶۸** ± ۰/۰۴	۱۲/۷** ± ۳/۷۸	۰/۸۹	۱۸/۵۴	۹/۶۲	-۴
۰/۶۲** ± ۰/۰۵	۲۱/۹** ± ۵/۷۷	۰/۸۶	۱۸/۶۶	۱۴/۱۳	-۶
۰/۵۶** ± ۰/۰۴	۲۵/۰** ± ۴/۵۲	۰/۹۰	۱۷/۸۰	۱۳/۰۱	-۸

\* و \*\* در a نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار با صفر و در b نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار با ۱ است.



شکل ۲- رابطه سرعت جوانه زنی با دما در پتانسیل‌های مختلف آب با استفاده از مدل‌های بتای اصلی (B)، بتای تغییر یافته (B<sub>m</sub>)، دندان مانند (D) و دو تکه‌ای (S) (اعداد داخل شکل‌ها مربوط به پتانسیل آب بر حسب بار است).



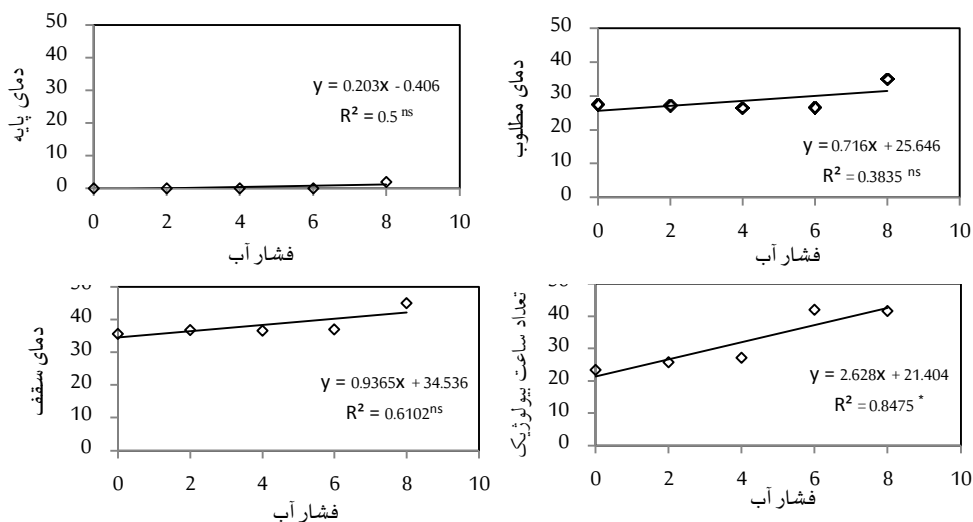
شکل ۳- زمان (ساعت) تا جوانه زنی پیش بینی شده با استفاده از توابع بتای اصلی (B)، بتای تغییر یافته (B<sub>m</sub>)، دندان مانند (D) و دو- تکه‌ای (S) در برابر مقادیر مشاهده شده در پتانسیل‌های مختلف آب (اعداد داخل شکل‌ها مربوط به پتانسیل آب بر حسب بار است و نقاط داخل بیضی مربوط به دمای ۵ درجه سانتی گراد است که در برازش خط مورد استفاده قرار نگرفتند).

## نفیسه خلیلی و همکاران

با کاهش پتانسیل آب، دماهای کاردینال شامل دمای پایه، دمای سقف و دمای مطلوب (دمای مطلوب تحتانی و فوقانی در مدل دندان مانند) به طور معنی دار، تحت تأثیر پتانسیل آب قرار نگرفتند. در مدل بتای اصلی که به عنوان مدل برتر انتخاب شد در ۵۰ درصد جوانه زنی در پتانسیل شاهد آب دمای پایه برابر با ۰/۹- درجه سانتی گراد، دمای مطلوب ۲۷/۵ درجه سانتی گراد و دمای سقف ۳۵/۷ درجه سانتی گراد برآورد شد (جدول ۳ و شکل ۴).

جدول ۳- برآورد ضریب ثابت  $a$  (برای مدل بتا)، دمای پایه ( $T_b$ )، دمای مطلوب ( $T_o$ )، دمای مطلوب تحتانی ( $T_{o1}$ )، دمای مطلوب فوقانی ( $T_{o2}$ )، دمای سقف ( $T_c$ ) تعداد ساعت بیولوژیک ( $F_o$ ) برای ۵۰ درصد جوانه زنی با استفاده از مدل های رگرسیونی مختلف در پتانسیل های مختلف آب.

مدل	W	a	$T_b$	$T_o$	$T_c$	$F_o$
بتا اصلی	۰	$۲/۰ \pm ۰/۳۹$	$-۰/۹ \pm ۱/۳۳$	$۲۷/۵ \pm ۱/۰۷$	$۳۵/۷ \pm ۰/۷۸$	$۲۳/۴ \pm ۰/۹۸$
-۲	-۲	$۲/۳ \pm ۰/۴۸$	$-۰/۸ \pm ۱/۳۴$	$۲۷/۱ \pm ۱/۰۳$	$۳۶/۸ \pm ۱/۷۰$	$۲۵/۶ \pm ۱/۱۰$
-۴	-۴	$۳/۰ \pm ۰/۵۸$	$-۰/۷ \pm ۱/۴۰$	$۲۶/۴ \pm ۰/۷۶$	$۳۶/۶ \pm ۱/۲۷$	$۲۷/۱ \pm ۱/۱۹$
-۶	-۶	$۲/۷ \pm ۰/۴۸$	$-۰/۵ \pm ۱/۱۸$	$۲۶/۴ \pm ۰/۷۵$	$۳۷/۱ \pm ۱/۴۵$	$۴۱/۸ \pm ۱/۵۸$
-۸	-۸	$۱/۲ \pm ۰/۵۲$	$۲/۸ \pm ۱/۳۹$	$۳۵/۰ \pm ۰$	$۴۵/۰ \pm ۰$	$۴۱/۵ \pm ۲/۴۲$
بتا تغییر یافته						
۰	۰	-	-	$۲۶/۷ \pm ۰/۶۶$	-	$۲۵/۶ \pm ۱/۲۱$
-۲	-۲	-	-	$۲۶/۸ \pm ۰/۵۸$	-	$۲۷/۷ \pm ۱/۱۷$
-۴	-۴	-	-	$۲۶/۵ \pm ۰/۸۱$	-	$۳۱/۸ \pm ۱/۸۲$
-۶	-۶	-	-	$۲۶/۵ \pm ۰/۶۵$	-	$۴۷/۱ \pm ۲/۱۶$
-۸	-۸	-	-	$۲۹/۰ \pm ۰/۷۱$	-	$۴۱/۳ \pm ۲/۵۹$
دو تکه ای						
۰	۰	-	$۳/۱ \pm ۱/۰۰$	$۲۷/۷ \pm ۰/۶۳$	$۳۸/۶ \pm ۱/۰۷$	$۲۰/۸ \pm ۰/۷۷$
-۲	-۲	-	$۳/۲ \pm ۱/۰۰$	$۲۷/۰ \pm ۰/۸۱$	$۴۰/۸ \pm ۱/۶۷$	$۲۳/۳ \pm ۰/۹۵$
-۴	-۴	-	$۴/۲ \pm ۱/۰۲$	$۲۷/۶ \pm ۰/۶۸$	$۳۷/۶ \pm ۰/۸۸$	$۲۴/۶ \pm ۱/۰۶$
-۶	-۶	-	$۳/۴ \pm ۱/۰۶$	$۲۷/۸ \pm ۰/۶۷$	$۳۸/۶ \pm ۱/۰۲$	$۳۷/۸ \pm ۱/۵۲$
-۸	-۸	-	$۳/۸ \pm ۲/۴۷$	$۲۸/۹ \pm ۱/۳۳$	$۴۱/۰ \pm ۰$	$۳۸/۵ \pm ۳/۳۵$
دندان مانند		$T_b$	$T_{o1}$	$T_{o2}$	$T_c$	$F_o$
۰	$۲/۹ \pm ۱/۰۴$	$۲۵/۰ \pm ۰/۹۱$	$۲۹/۰ \pm ۰/۶۱$	$۳۸/۶ \pm ۱/۰۹$	$۲۳/۸ \pm ۰$	۰
-۲	$۲/۱ \pm ۱/۶۱$	$۲۵/۰ \pm ۲/۱۶$	$۳۰/۲ \pm ۱/۳۵$	$۴۰/۰ \pm ۰$	$۲۸/۳ \pm ۱/۳۴$	-۲
-۴	$۴/۰ \pm ۱/۰۸$	$۲۵/۰ \pm ۱/۰۲$	$۲۸/۹ \pm ۰/۶۸$	$۳۷/۶ \pm ۰/۹۰$	$۲۸/۴ \pm ۰$	-۴
-۶	$۳/۴ \pm ۱/۰۶$	$۲۵/۱ \pm ۰/۹۷$	$۲۹/۰ \pm ۰/۶۶$	$۳۸/۶ \pm ۱/۰۲$	$۴۲/۴ \pm ۰$	-۶
-۸	$۳/۸ \pm ۱/۷۳$	$۲۶/۰ \pm ۰$	$۳۳/۰ \pm ۰$	$۴۱/۰ \pm ۰$	$۴۳/۰ \pm ۰$	-۸



شکل ۴- تأثیر فشار آب (بار) بر دمای پایه، مطلوب و دمای سقف بر حسب درجه سانتی‌گراد و تعداد ساعت بیولوژیک برای ۵۰ درصد جوانه‌زنی برآورد شده با استفاده از مدل بتای اصلی.

### نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد دما و پتانسیل آب بر مؤلفه‌های جوانه‌زنی گیاه جو تأثیر معنی‌داری داشت. با کاهش پتانسیل آب، درصد و سرعت جوانه‌زنی کاهش یافت. با افزایش دما تا دمای مطلوب درصد و سرعت جوانه‌زنی افزایش و بعد از آن کاهش یافت، اما حساسیت این مؤلفه‌ها به پتانسیل آب بیشتر از دما بود. حساسیت درصد جوانه‌زنی به دما کمتر از سرعت جوانه‌زنی بود. به‌طوری که در دامنه گسترده‌تری از دماها درصد جوانه‌زنی ثابت بود، اما با کاهش پتانسیل آب، دامنه‌ای از دماها که در آن حداکثر جوانه‌زنی رخ می‌دهد کاهش یافت.

مدل بتای اصلی از بین مدل‌های مورد ارزیابی به‌عنوان مدل برتر در کمی‌سازی واکنش سرعت جوانه‌زنی به دما انتخاب شد. دماهای کاردینال در این گیاه تحت تأثیر پتانسیل آب قرار نگرفتند و دمای پایه ۰/۹- درجه سانتی‌گراد، دمای مطلوب ۲۷/۵ درجه سانتی‌گراد و دمای سقف ۳۵/۷ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد. تعداد ساعت بیولوژیک تا جوانه‌زنی با کاهش پتانسیل آب به‌طور خطی

افزایش یافت به طوری که مقدار آن در پتانسیل صفر ۲۳/۴ ساعت بود و به ازای هر یک بار کاهش پتانسیل آب، ۲/۶ ساعت بر بار افزایش یافت.

برای این که بتوانیم جوانه زنی و سبز شدن بذر در مزرعه را پیش بینی کنیم می توان از توابع یافت شده در این مطالعه استفاده کرد. نحوه عمل به این ترتیب خواهد بود که در هر روز پس از کاشت بر اساس پتانسیل آب و خاک، دماهای کاردینال و روز بیولوژیک مورد نیاز برای جوانه زنی تصحیح می شود سپس با کمک این پارامترهای تصحیح شده سرعت جوانه زنی و سبز شدن به عنوان تابعی از دما محاسبه می گردد. البته برای این منظور نیاز است که توابع این مطالعه همراه یک مدل موازنه آب و خاک استفاده شوند. مدل موازنه آب و خاک مقدار آب و خاک در هر لایه را محاسبه می کند و از روی مقدار آب و خاک، پتانسیل آب و خاک قابل محاسبه خواهد بود.

#### منابع

1. Ahmadi, M., Kamkar, B., Soltani, A., and Zeinali, E. 2010. Evaluation of non-Linear regression models to predict stem elongation rate of wheat ((Tajan cultivar) in response to temperature and Photoperiod. J. Plant Prod., 2: 4. 39-54.
2. Akram-Ghadery, F. 2008. The study of seed quality development, germination, longevity and deterioration in some medicinal plants: medicinal pumpkin (*Cucurbita pepo. Convar. var. styriaca*), cumin blank (*Nigella sativa L.*) and borago (*Borago officinalis L.*). Ph.D. Thesis, Gorgan. Univ. Agric. Sci. Nat. Res., 180p.
3. Alvarado, V., and Bradford, K.J. 2002. A hydrothermal time model explains the cardinal temperatures for seed germination. Plant Cell Environ. 25: 1061-1069.
4. Anda, A., and Pinter, L. 1994. Sorghum germination and development as influenced by soil temperature and water content. Agron. J., 86: 621-624.
5. Bakhshandeh, E., Ghadiryan, R., Galeshi, S., and Soltani, E. 2011. Modelling the effects water stress and temperature on seed germination of soybean (*Glycine max L.*) and Velvetleaf (*Abutilon theophrasti med*). J. Plant Prod., 18:1.
6. 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. Technol., 27: 291-302.
7. Baskin, C.C., and Baskin, J.M. 2001. Seeds: Ecology, Biogeography, and Evolution of Dormancy and Germination. Academic Press, San Diego, California. 666p.
8. Bewley, J.D. 1997. Seed germination and dormancy. Plant Cell. 9:1055-1066.

9. 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. *Agr. J.*, 83: 173-175.
10. Brodford, K.J. 2002. Applications of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. *Weed Sci.*, 50:248-260.
11. Foley, M.E., and Fennimore, S.A. 1998. Genetic basis for seed dormancy. *Seed Sci. Res.*, 8: 173-179.
12. Galeshi, S., Farzaneh, S., and Soltani, A. 2005. Investigation of drought tolerance at seedling stage in forty genotypes of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Seed and plant.*, 21: 1. 65-79.
13. Grundy, A.C., Phelps, K., Reader, R.J., and Burston, S. 2000. Modeling the germination of *Stellaria media* using the concept of hydrothermal time. *New Phytol.*, 148: 433-444.
14. Guerke, W.R., Gutormson, T., Meyer, D., Mc Donald, M., Mesa, J.C., Robinson, J.C., and Tekrony, D. 2004. Application of hydrotime analysis in seed testing. *Seed Technol.*, 26: 1. 75-85.
15. Hardegree, S.P. 2006. Predicting germination response to temperature. I. Cardinal temperature models and subpopulation-specific regression. *Ann. Bot.*, 97: 1115-1125.
16. Iannucci, A., Difonoz, N., and Martiniello, P. 2000. Temperature requirement for seed germination in for annual clovers grown under tow irrigation treatments. *Seed Sci. Technol.*, 28: 59-66.
17. Jacobsen, S.E., and Bach, A.P. 1998. The influence of temperature on seed germination rate in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). *Seed Sci. Technol.*, 26: 515-523.
18. Jame, Y.W., and Cutforth, H.W. 2004. Simulating the effects of temperature and seeding depth on germination and emergence of spring wheat. *Agric. Forest.*
19. Kamkar, B., Jami Al-Ahmadi, M., and Mahdavi-Damghani, A. 2011. Quantification of the cardinal temperatures and thermal time requirement of opium poppy (*Papaver somniferum* L.) seeds germinate using non-linear regression models. *Ind. Crop. Prod.*, 35: 192-198.
20. Kamkar, B., Ahmadi, M., Soltani, A., and Zeinali, E. 2008. Evaluating non-linear regression models to describe response of wheat emergence rate to temperature. *Seed Sci. Technol.*, 2: 53-57.
21. Kebreab, E., and Murdoch, A.J. 2000. The effect of water stress on the temperature range for germination of *Orobanchis aegyptiaca* seeds. *Seed Sci. Res.*, 10: 127-133.
22. Meyer, S.E., and Pendleton, R.L. 2000. Genetic regulation of seed dormancy in *Purshia tridentata* (Rosaceae). *Ann. Bot.*, 85: 521-529.



23. Michel, B.E. 1983. Evaluation of water potential of solution of polyethylene glycol 8000 both in absence and presence of other solutes. *Plant Physiol.*, 72: 66-70.
24. Seefeldt, S.S., Kidwell, K.K., and Waller, J.E. 2002. Base growth temperature, germination rate and growth response of contemporary spring wheat cultivars from the USA Pacific North West. *Field Crop Res.*, 75: 47-52.
25. Shafii, B., and Price, W.J. 2001. Estimation of cardinal temperatures in germination data analysis. *J. Agr. Bio. Environ. Statis.*, 6: 356-366.
26. Soltani, A., and Maddah, V. 2010. Simple Applied Programs for Education and research in Agronomy. Issa Press, Iran. 80p.
27. Soltani, A., Robertson, M.J., Torabi, B., Yousefi-Daz, M., and Sarparast, R. 2006. Modeling seedling emergence in chickpea as influenced by temperature and sowing depth. *Agr. Forest Meteorol.*, 138: 156-167.
28. Soltani, A., Zeinali, E., Galeshi, S., and Latifi, N. 2001. Genetic variation for and interrelationships among seed vigor traits in wheat from the caspian sea coast of Iran. *Seed Sci. Technol.*, 29: 653-662.
29. Soltani, E., Akram-Ghaderi, F., and Soltani, A. 2008. Applications of germination modeling on the response to temperature and water potential in seed Science Research. 1<sup>st</sup> National Conference of Seed Sciences and Technology in Iran. Gorgan, Iran. 445p.
30. Soltani, A., Ghaderi-Far, F. and Soltani, E. 2008. Application of germination in response to temperature and water potential in seed Science Research the first National Conference Sciences and Technology of sedds. Gorgan, Iran, 12-13 November.
31. Soltani, A., Robertson, M.J., Torbati, B., Yousefi, M., and Sarparast, R. 2006. Modeliny seedling emergence in chickpea as affected by temperature and sowing depth. *Agr. Forest Meterol.*, 138:156-167.
31. 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*). *Thermochimica Acta.* 394: 211-217.
32. Windauer, L., Altuna, A., and Benech-Arnold, R. 2007. Hydrottime analysis of *Lesquerella fendleri* seed germination responses to priming treatments. *Indust. Crop Prod.*, 25: 70-74.
33. Zeinali, E., Soltani, A., Galeshi, S., and Sadati, S.J. 2010. Cardinal temperatures, response to temperature and range of thermal tolerance for seed germination in wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *J. Plant Prod.*, 3(3): 23-42.



## Evaluation of nonlinear regression models to quantify barley germination rate response to temperature and water potential

N. Khalili<sup>1\*</sup>, A. Soltani<sup>2</sup>, E. Zeinali<sup>3</sup> and F. Ghaderi far<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>M.Sc. Graduate, Professor, Associate Prof., Dept. of Agronomy, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Received: 20-6-2013 ; Accepted: 22-4-2014

### Abstract

Temperature and moisture are the main effect on seed germination, which are determine the rate of germination of non-dormant seeds. In order to quantifying the germination-rate of barley (*Hordeum vulgare* L.) in response to temperature and water potential, germination of this crop was investigated as affected by temperature (5, 10, 15, 20, 25, 30 and 35 °C) and water potential (0, -2, -4, -6 and -8 bar) at the Seed Technology Laboratory, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources. Results showed that the temperatures, the water potentials and their interactions were significantly influenced germination rate and percentage of barley. In this work it has been compared four non-linear regression models (original beta, 3-piece segmented, 2-piece segmented and modified beta) to describe the cardinal temperatures for the germination of barley. The original beta model was selected as the best model to predict germination rate. Based on the model outputs, the base, the optimum, and the maximum temperatures for germination of barley were estimated as -0.9, 27.5 C and 35.7 °C, respectively. The biological hours for germination at zero water potential was 23.4 h. Cardinal temperatures were not influenced by water potentials. However, the numbers of biological hours for germination increased 2.6 h/bar by decrease each bar of water potential.

**Keywords:** Germination rate, Cardinal temperature, Water potential

---

\*Corresponding author: [Khalili.nafise@yahoo.com](mailto:Khalili.nafise@yahoo.com)