



به زراعی کشاورزی

دوره ۱۷ ■ شماره ۱ ■ بهار ۱۳۹۴
صفحه‌های ۲۴۰-۲۲۹

کمی سازی واکنش سرعت جوانه‌زنی گیاه دارویی مرزه به دما و پتانسیل آب با استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی

امیرحسین خدابخش^۱، بهنام کامکار^{۲*} و نفیسه خلیلی^۱

۱ و ۳. کارشناس ارشد، گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۲. دانشیار، گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۰۳

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۳/۰۲/۰۲

چکیده

این تحقیق به منظور کمی سازی واکنش سرعت جوانه‌زنی گیاه دارویی مرزه (*Satureja hortensis* L.) نسبت به دما و پتانسیل آب انجام گرفت. بدین منظور، جوانه‌زنی این گیاه تحت تأثیر تیمارهای دمایی (۱۲، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۳۷ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد) و پتانسیل‌های آب (صفر، ۰/۱-، ۰/۳-، ۰/۵- و ۰/۷- مگاپاسکال) در آزمایشگاه تحقیقات بذر دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در سال ۱۳۹۲ بررسی شد. نتایج نشان داد تأثیر دما، پتانسیل آب و اثر متقابل آنها بر حداکثر درصد جوانه‌زنی، سرعت در ۵۰ درصد جوانه‌زنی و زمان رسیدن به ۱۰، ۵۰ و ۹۰ درصد جوانه‌زنی معنادار بود. همچنین با کاهش پتانسیل آب، درصد و سرعت جوانه‌زنی کاهش یافت. با افزایش دما تا دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد درصد و سرعت جوانه‌زنی افزایش و پس از آن کاهش یافت. با ارزیابی سه مدل رگرسیون غیرخطی شامل مدل دوتکه‌ای، دندان‌مانند و بتا، مدل بتا به عنوان مدل برتر انتخاب و دماهای پایه، مطلوب و سقف به ترتیب ۷/۵۶، ۲۳/۹۸ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد و زمان بیولوژیک جوانه‌زنی در پتانسیل صفر (تیمار شاهد) ۹۱/۱۷ ساعت برآورد شد. دماهای کاردینال جوانه‌زنی به‌طور معنادار تحت تأثیر پتانسیل آب قرار نگرفت، اما زمان بیولوژیک جوانه‌زنی به ازای کاهش یک مگاپاسکال پتانسیل آب، ۱۷/۶۴ ساعت افزایش یافت.

کلیدواژه‌ها: دماهای کاردینال، زمان بیولوژیک، مدل بتا، مدل دندان‌مانند، مدل دوتکه‌ای.

۱. مقدمه

مرزه^۱ گیاهی یکساله و علفی متعلق به خانواده نعنایان است که به عنوان گیاه دارویی در ایران استفاده می‌شود. جوانه‌زنی بذر به خصوص در زمان رویارویی با تنش‌های محیطی یکی از بحرانی‌ترین مراحل زندگی گیاهان است [۳۸]. جوانه‌زنی فرایند فیزیولوژیک پیچیده‌ای است که تحت تأثیر عوامل ژنتیکی و محیطی قرار می‌گیرد [۲۷، ۱۷]. دما و پتانسیل آب می‌توانند با هم یا جداگانه بر درصد و سرعت جوانه‌زنی اثر بگذارند [۱۱]. تأثیرات دما بر رشدونمو گیاه مبنای مدل‌هایی است که برای پیش‌بینی زمان‌بندی جوانه‌زنی استفاده می‌شود [۱۲]. جوانه‌زنی بذر هر گیاه در گستره دمایی خاصی صورت می‌گیرد که تحت عنوان دماهای کاردینال پیشنهاد شده است [۱۲]. در این گستره، دماهای کمینه، بهینه و بیشینه قرار دارند که برای ارائه مدل‌های پیش‌بینی جوانه‌زنی لازم‌اند [۳۱]. سرعت نمو گیاه با افزایش دما بین دمای پایه تا دمای مطلوب افزایش و نیز با افزایش بیشتر دما بین دمای مطلوب و دمای سقف، کاهش می‌یابد [۹]. همچنین سرعت جوانه‌زنی با افزایش دما تا دمای مطلوب، افزایش و بعد از آن، کاهش می‌یابد [۲۶]. به‌طور معمول، درصد جوانه‌زنی با بهبود قابلیت دسترسی به آب به‌صورت خطی افزایش [۱۹] و سرعت جوانه‌زنی با کاهش پتانسیل آب کاهش می‌یابد [۱۸].

اثرهای شرایط نامطلوب در طول دوره جوانه‌زنی و مراحل اولیه رشد گیاه نسبت به دیگر مراحل رشد مهم‌تر است. بنابراین، جوانه‌زنی خوب و مناسب تحت محدوده وسیعی از شرایط محیطی برای استقرار گیاهچه ضروری است [۲۱، ۱۳]. مدل‌های ریاضی متعددی برای توصیف الگوی جوانه‌زنی در واکنش به دما و پتانسیل آب ارائه شده‌اند [۱۵]. برخی از این مدل‌ها، برای پیش‌بینی واکنش جوانه‌زنی تجمعی به‌کار می‌روند و قادر به پیش‌بینی

دماهای کاردینال و ضرایب مدل برای مقایسه توده‌های بذری نیز هستند [۲۰]. از این میان، سه تابع دو تکه‌ای، بتا و دندان‌مانند برای بررسی واکنش جوانه‌زنی بذرها به دما بیشتر از بقیه استفاده شده‌اند [۳۴، ۲۵، ۱۶]. در مطالعات اخیر، کمی‌سازی سرعت جوانه‌زنی در واکنش به دما و تنش خشکی با استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی در جو و گندم بررسی و دماهای کاردینال این گیاهان برآورد شد [۵، ۸]. همچنین در تحقیقات درباره گیاه خشخاش، از مدل‌های رگرسیون غیرخطی در پیش‌بینی سرعت جوانه‌زنی استفاده شده است [۲۵]. در کمی‌سازی سرعت سبز شدن گندم در واکنش به دما هم با استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی مدل لجستیک، مدل برتر معرفی شده است [۲۴]. برای ارزیابی پاسخ سبز شدن ارزن دم‌روباهی به دما نیز از مدل‌های مختلف رگرسیون غیرخطی استفاده شده است [۱]. در مطالعه‌ای دیگر، با ارزیابی مدل‌های رگرسیون غیرخطی در کمی‌سازی سرعت جوانه‌زنی سه گیاه دارویی کدو تخم‌کاغذی، سیاه‌دانه و گاوزبان به دما از مدل‌های دندان‌مانند، دو تکه‌ای و بتا استفاده و پارامترهای جوانه‌زنی (دمای پایه، دمای مطلوب، دمای سقف و روز بیولوژیک) این گیاهان تعیین شده است [۲].

با توجه به اینکه در سال‌های اخیر مصرف گیاهان دارویی در دنیا افزایش یافته است، سطح زیرکشت این گیاهان نیز رو به افزایش است. مطالعات زراعی کمی درباره جوانه‌زنی گیاه مرزه صورت گرفته است که از جمله می‌توان به ارزیابی تأثیر پرایمینگ بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه در دماهای مختلف تحت تنش آب بر مرزه خوزستانی اشاره کرد [۶]. با توجه به اینکه اطلاعات زیادی درباره واکنش جوانه‌زنی این گیاه به عوامل محیطی، دماهای کاردینال و دیگر پارامترهای جوانه‌زنی وجود ندارد، هدف پژوهش حاضر، کمی‌سازی واکنش سرعت جوانه‌زنی گیاه دارویی مرزه به دما و پتانسیل آب با استفاده

1. *Satureja hortensis* L.

از مدل های رگرسیون غیرخطی و برآورد دماهای کاردینال جوانه زنی این گیاه است.

۲. مواد و روش ها

این تحقیق در آزمایشگاه تحقیقات بذر دانشکده علوم زراعی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در سال ۱۳۹۲ بر روی گیاه مرزه انجام گرفت. تیمارهای آزمایشی شامل دما در هفت سطح (۱۲، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۳۷ و ۴۰ درجه سانتی گراد) و پتانسیل آب در پنج سطح (صفر، -۰/۱، -۰/۳، -۰/۵، -۰/۷ و -۰/۹ مگاپاسکال) بود و تحقیق به صورت تجزیه مرکب در مکان با سه تکرار انجام گرفت، به طوری که دما به عنوان محیط و پتانسیل آب به عنوان تیمار داخل محیط در نظر گرفته شد. تیمارهای دمایی توسط انکوباتور، با دقت ۰/۵ درجه سانتی گراد تأمین شد. پتانسیل های آب با استفاده از پلی اتیلن گلیکول^۱ ۸۰۰۰ و براساس معادله ۱ تهیه شد [۲۸]:

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

در این رابطه، Ψ پتانسیل اسمزی مورد نظر؛ T دما؛ و PEG مقدار پلی اتیلن گلیکول مورد نیازند.

برای هر تکرار، ۵۰ بذر گیاه مرزه انتخاب شد. بذور با قرار گرفتن در محلول وایتکس ۱۰ درصد به مدت ۵ دقیقه ضد عفونی شده و پس از شست و شو با آب مقطر بر روی یک لایه کاغذ صافی، داخل پتری دیش قرار داده شدند. کاغذ صافی مورد استفاده برای هر تیمار، پیشتر توسط محلول های پلی اتیلن گلیکول ۸۰۰۰، با پتانسیل های آب -۰/۱، -۰/۳، -۰/۵، -۰/۷ و -۰/۹ مگاپاسکال خیسانده شده بودند و برای تیمار شاهد از آب مقطر استفاده شد. پتری دیش ها داخل هفت انکوباتور با دماهای ۱۲، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۳۷ و ۴۰ درجه سانتی گراد قرار گرفتند. شمارش بذور جوانه زده بسته به دمای مورد استفاده، در بازه های زمانی

متفاوت انجام گرفت و هر بار بذورهای جوانه زده از محیط جوانه زنی خارج شدند. بدیهی است که در دماهای نزدیک تر به دمای بهینه بازه زمانی شمارش، کوتاه تر است. معیار جوانه زنی خروج ریشه چه به اندازه ۲ میلی متر یا بیشتر بود. پایان شمارش زمانی بود که در طی ۴۸ ساعت متوالی هیچ بذری جوانه نزنند یا اینکه همه بذور جوانه بزنند. در طول آزمایش در صورت نیاز، به تیمارها آب مقطر (تیمار شاهد) یا محلول های تهیه شده اضافه شد.

درصد، سرعت و زمان جوانه زنی با استفاده از نرم افزار جی اس-۲۰۱۱ انجام گرفت [۲۳]. این نرم افزار تابع لجستیک را به داده های جوانه زنی در برابر دما برازش داده و از طریق درون یابی محاسبات لازم را انجام می دهد. در همه تیمارهای دمایی، برای هر تکرار منحنی پیشرفت جوانه زنی در مقابل زمان (ساعت) ترسیم و زمان لازم برای رسیدن به ۵۰ درصد حداکثر جوانه زنی از طریق درون یابی برآورد شد. همچنین سرعت جوانه زنی (در ساعت) با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد [۳۴]:

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

در این رابطه، R_{50} سرعت جوانه زنی؛ و D_{50} زمانی است که طول می کشد تا جوانه زنی به ۵۰ درصد حداکثر خود برسد.

برای تعیین دماهای کاردینال و زمان بیولوژیک جوانه زنی نیز از رابطه زیر استفاده شد [۳۳]:

$$1/e = f(T)/f_0 \quad (3)$$

در این رابطه، $1/e$ سرعت جوانه زنی؛ و f_0 زمان بیولوژیک مورد نیاز برای جوانه زنی است. زمان بیولوژیک جوانه زنی عبارت است از زمان لازم برای جوانه زنی در شرایط دمای مطلوب و $f(T)$ تابع دماست که بین صفر (در دمای پایه) و یک (در دمای مطلوب) تغییر می کند. توابع دمایی از روابط زیر به دست می آید:

مقادیر اولیه تا زمانی انجام می‌گیرد که بهترین برآورد از پارامترها به دست آید. بهترین برآورد پارامترهای مدل بر اساس خطای معیار کمتر پارامترها و جذر میانگین مربعات انحراف کمتر رگرسیون مشخص می‌شود [۲]. برای انتخاب مدل برتر از میان مدل‌های مورد استفاده، از جذر میانگین مربعات انحرافات برای زمان جوانه‌زنی، ضریب تبیین، ضریب همبستگی، ضرایب رگرسیون ساده خطی در رابطه زمان (ساعت) تا جوانه‌زنی مشاهده شده و پیش‌بینی شده استفاده شد. هر قدر ضریب تبیین مدل مورد استفاده بزرگ‌تر باشد، مدل، درصد تغییرات سرعت جوانه‌زنی را بیشتر توجیه می‌کند. ضرایب a و b به ترتیب نشان‌دهنده میزان انحراف خط رگرسیون از مبدأ مختصات و میزان اریب خط رگرسیون از خط یک به یک است. مقدار عددی ضرایب a و b با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS تعیین شد. معناداری ضریب a توسط نرم‌افزار آماری SAS و معناداری ضریب b با تعیین حدود اطمینان بررسی شد. معناداری ضریب a به این معناست که عرض از مبدأ خط رگرسیون از عرض از مبدأ خط یک به یک اریبی دارد. معناداری ضریب b به این معناست که شیب خط رگرسیون از شیب خط یک به یک فاصله دارد و خط رگرسیون نسبت به خط یک به یک دارای اریب است [۹]. پراکنش کمتر نقاط در اطراف خط یک به یک، نشانه کارایی بیشتر مدل است. با توجه به این معیارها، به منظور توصیف سرعت جوانه‌زنی گیاه مرزه نسبت به دما، مدل برتر برای تعیین دماهای کاردینال جوانه‌زنی تعیین شد.

۳. نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس درصد جوانه‌زنی، سرعت در ۵۰ درصد جوانه‌زنی، و زمان رسیدن به ۱۰، ۵۰ و ۹۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی نشان داد که تأثیر دما، پتانسیل آب و تأثیرات متقابل دما و پتانسیل آب بر پارامترهای ذکر شده در

۱. تابع بتا^۱ با علامت اختصاری B که معادله آن به صورت زیر است [۳۹]:

$$f(T) = \frac{((T_c - T_o) / (T_o - T_b))^a}{((T - T_b) / (T_o - T_b)) \times ((T_c - T) / (T_c - T_b))} \quad (4)$$

در این رابطه، T_b دمای پایه؛ T_o دمای مطلوب؛ T_c دمای سقف؛ a ضریب ثابت؛ و T دمای متوسط روزانه (دمای مورد آزمایش) است.

۲. تابع دندان‌مانند^۲ با علامت اختصاری D که معادله آن به صورت زیر است [۳۰]:

$$f(T) = (T - T_b) / (T_{o1} - T_b) \quad \text{اگر } T_b < T < T_{o1}$$

$$f(T) = (T_c - T) / (T_c - T_{o2}) \quad \text{اگر } T_{o2} < T < T_c$$

$$f(T) = 1 \quad \text{اگر } T_{o1} \leq T \leq T_{o2}$$

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

در این رابطه، T_b دمای پایه؛ T_{o1} دمای مطلوب تحتانی؛ T_{o2} دمای مطلوب فوقانی؛ T_c دمای سقف؛ و T دمای متوسط روزانه (دمای مورد آزمایش) است.

۳. تابع دو تکه‌ای^۳ با علامت اختصاری S که معادله آن به صورت زیر است [۳۵]:

$$f(T) = (T - T_b) / (T_o - T_b) \quad \text{اگر } T_b < T < T_o$$

$$f(T) = 1 - (T - T_o) / (T_c - T_o) \quad \text{اگر } T_o \leq T < T_c$$

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

در این رابطه، T_b دمای پایه؛ T_o دمای مطلوب؛ T_c دمای سقف؛ و T دمای متوسط روزانه (دمای مورد آزمایش) است.

تخمین پارامترهای هر مدل با روش مطلوب‌سازی تکراری با استفاده از رویه PROCNLIN در نرم‌افزار آماری SAS صورت گرفت. در روش مطلوب‌سازی تکراری با هر بار وارد کردن مقادیر اولیه پارامترها، مقادیر نهایی آن با روش کمترین توان‌های دوم تخمین زده می‌شود. تغییر

1. Beta Original
2. Dent-like
3. Segmented

که با افزایش دما تا دمای مطلوب، فعالیت آنزیم‌ها و به تبع آن کارایی واکنش‌های آنزیمی افزایش می‌یابد که این امر بهبود درصد و سرعت جوانه‌زنی را به دنبال دارد. از طرف دیگر، درجه حرارت‌های خیلی کم و خیلی زیاد نیز موجب غیرفعال شدن برخی آنزیم‌ها و کاهش سرعت این واکنش‌ها و در نتیجه کاهش درصد جوانه‌زنی می‌شود [۲۲]. در دماهای کم، فعالیت متابولیکی به طور نسبی کاهش می‌یابد و واکنش‌های گیاهی نمی‌توانند در گیاه انجام گیرند و از طرفی، دماهای زیاد برای مدت زمان طولانی موجب تخریب پروتئین‌ها و در نهایت از بین رفتن بذر می‌شوند [۲۹]. انعقاد پروتئین و اختلال در کار غشاها از جمله عواملی است که موجب کاهش سرعت جوانه‌زنی بذور در دماهای بیشتر از دمای مطلوب می‌شوند [۱۴]. کاهش کارایی متابولیکی بذور نیز از دیگر عوامل کاهش سرعت جوانه‌زنی در دماهای بیشتر از دمای مطلوب مشاهده شده است [۳۶]. همچنین کاهش سرعت جوانه‌زنی با کاهش پتانسیل آب به دلیل جذب سخت‌تر و کندتر آب توسط بذر در شرایط تنش خشکی است. این نتیجه پیشتر در ارقام مختلف پنبه [۷] و در گندم [۱۰] گزارش شده است. همچنین در گندم، دماهای زیاد و کم از طریق تغییر مقدار آبسزیک اسید و حساسیت جنین به آن، بر جوانه‌زنی بذر و گیاهچه‌ها اثر منفی می‌گذارد [۳۷].

سطح ۱ درصد معنادار بود (جدول ۱). 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. در همه دماها با کاهش پتانسیل آب، حداکثر درصد جوانه‌زنی کاهش و زمان رسیدن به آن افزایش یافت، اما این تغییرات در همه دماها یکسان نبود، به طوری که با افزایش دما تا دمای مطلوب (۲۰ درجه سانتی‌گراد)، تغییرات کاهش یافت و در دمای مطلوب به حداقل خود رسید و سپس با افزایش دما این تغییرات افزایش یافت؛ به طوری که در پتانسیل‌های مختلف آب با افزایش دما از ۱۲ به ۲۰ درجه سانتی‌گراد، زمان رسیدن به حداکثر درصد جوانه‌زنی کاهش و سپس با ادامه افزایش دما از ۲۰ به ۳۷ درجه سانتی‌گراد، افزایش یافت. 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 (شکل ۱).

سرعت جوانه‌زنی نسبت به درصد جوانه‌زنی شاخص حساس‌تری از دماست [۳۲]. واکنش متفاوت مرحله جوانه‌زنی به درجه حرارت‌های مختلف به این دلیل است

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس درصد جوانه‌زنی (G_{max})، سرعت در ۵۰ درصد جوانه‌زنی (R_{50})، زمان رسیدن به ۱۰ (D_{10})، ۵۰ (D_{50}) و ۹۰ (D_{90}) درصد حداکثر جوانه‌زنی

منابع تغییرات	DF	G_{max}	R_{50}	DF	D_{10}	D_{50}	D_{90}
دما (T)	۷	۲۰۷۰/۴۸**	۷۱۷/۷۵**	۶	۱۰۹/۶۳**	۳۰۷/۷۴**	۳۸۸/۹۱**
تکرار داخل دما (E_1)	۱۶	۰/۷۰ ^{ns}	۰/۸۱ ^{ns}	۱۴	۱/۲۹ ^{ns}	۰/۶۵ ^{ns}	۱/۲۴ ^{ns}
پتانسیل آب (W)	۴	۱۱۲۷/۸۷**	۸۲۳/۹۵**	۴	۴۵۷/۳۱**	۸۶۵/۶۱**	۴۲۷/۲۷**
اثر متقابل ($W \times T$)	۲۸	۵۸/۳۷**	۳۸/۵۳**	۲۱	۳۸/۳۷**	۸۳/۶۱**	۲۹/۸۳**
خطا (E_2)	۶۴	۷/۹۰	۰/۰۰۰۰۰۰۱	۵۰	۱۶۵/۵۵	۸۲/۷۴	۶۸/۰۲
CV	-	۵/۵۳	۷/۷۴	-	۸/۵۴	۴/۳۹	۲/۹۲

** و * به ترتیب معناداری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد. برای خطا، مقادیر میانگین مربعات و برای دیگر منابع، تغییر مقادیر F آورده شده است.

مدل دندان مانند و دوتکه‌ای در پتانسیل صفر (تیمار شاهد) در سطح ۱ درصد معنادار و در مدل بتا در همه پتانسیل‌ها غیرمعنادار بود و مقدار عددی آن نیز نسبت به دو مدل دیگر به یک نزدیک‌تر بود (جدول ۲). به طور کلی، ضریب تبیین در مدل بتا در پتانسیل‌های مختلف بیشتر از مدل‌های دندان مانند و دوتکه‌ای بود. از طرف دیگر، مجذور میانگین مربعات انحراف برای زمان جوانه‌زنی و ضریب تغییرات در مدل بتا در مقایسه با مدل‌های دندان مانند و دوتکه‌ای برای پتانسیل‌های مختلف آب کوچک‌تر بود (جدول ۲). همچنین پراکندگی نقاط در اطراف خط یک به یک، در مدل بتا کمتر از مدل‌های دندان مانند و دوتکه‌ای است (شکل ۳).

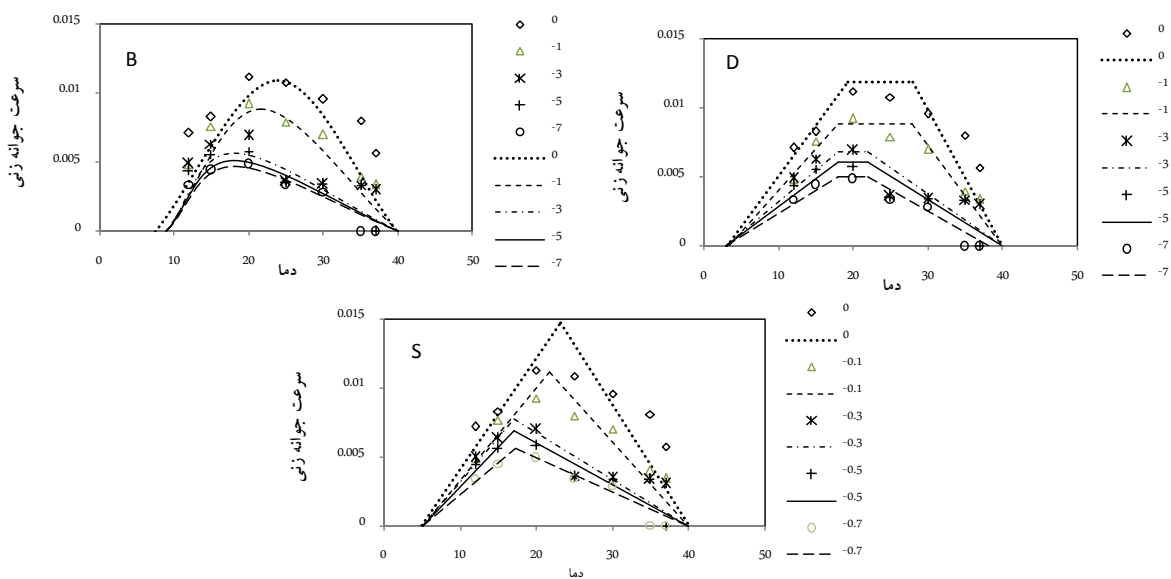
مجذور میانگین مربعات انحراف، ضریب تبیین، ضرایب رگرسیون و رابطه‌ی زمان (ساعت) تا جوانه‌زنی مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده معیارهای مورد بررسی در مقایسه مدل‌های استفاده‌شده برای انتخاب مدل برتر در توصیف سرعت جوانه‌زنی به دما در پتانسیل‌های مختلف آب است (جدول ۲). با مقایسه این معیارها مشاهده شد که ضریب رگرسیون a (میزان انحراف خط رگرسیون از مبدأ مختصات) در مدل‌های دندان مانند و دوتکه‌ای در پتانسیل‌های صفر (شاهد) و منفی یک مگاپاسکال در سطح ۱ درصد و همچنین در مدل دوتکه‌ای در پتانسیل‌های ۰/۳- و ۰/۷- مگاپاسکال در سطح ۵ درصد معنادار و در مدل بتا در همه پتانسیل‌ها غیرمعنادار بود. همچنین ضریب b (میزان اریب خط رگرسیون از خط یک به یک) در دو

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 برحسب ساعت و SE خطای استاندارد است)

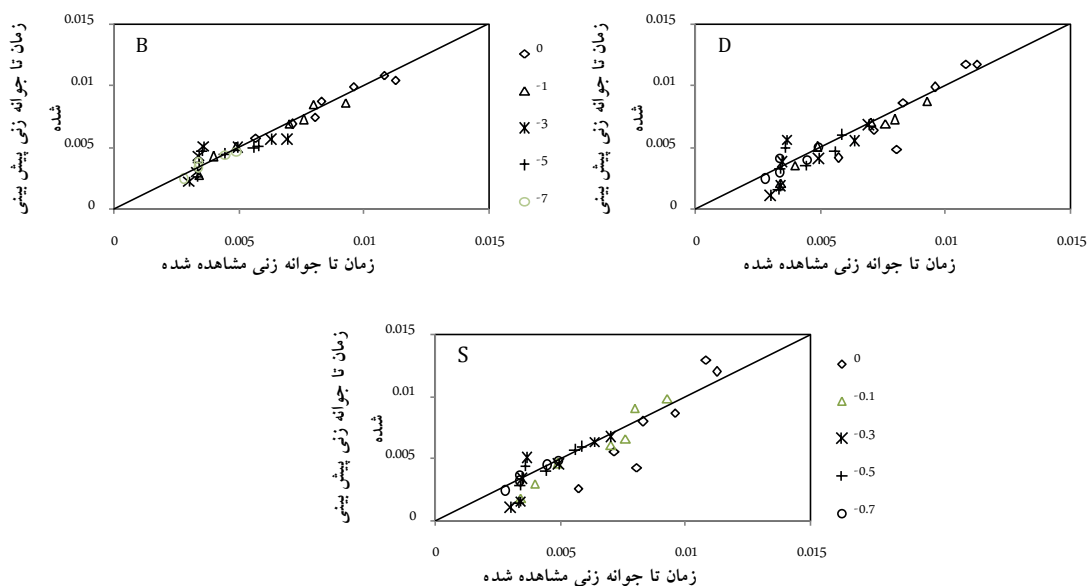
مدل	W	RMSE	CV	R^2	$a \pm SE$	$b \pm SE$
	۰	۸/۰۲	۶/۶۵	۰/۹۲	۱۰/۹۳ ± ۷/۵۸	۰/۹۰ ± ۰/۰۶
	-۰/۱	۲۶/۱۱	۱۴/۲۴	۰/۹۰	-۲۰/۰۸ ± ۱۶/۵۱	۱/۱۲ ± ۰/۰۸
بتا	-۰/۳	۵۸/۸۲	۲۴/۱۵	۰/۵۷	۱۶/۱۵ ± ۴۷/۲۱	۰/۹۳ ± ۰/۱۸
	-۰/۵	۴۴/۹۶	۱۸/۷۱	۰/۴۷	۵۸/۵۷ ± ۴۹/۴۳	۰/۷۵ ± ۰/۱۹
	-۰/۷	۲۴/۹۸	۹/۰۵	۰/۸۶	-۱۸/۹۶ ± ۳۳/۱۳	۱/۰۷ ± ۰/۱۱
	۰	۳۷/۶۲	۲۴/۵۲	۰/۸۱	-۱۶۸/۳۷** ± ۳۵/۵۸	۲/۶۵** ± ۰/۲۸
	-۰/۱	۴۴/۳۱	۲۱/۸۱	۰/۸۶	-۸۵/۸۷** ± ۲۸/۰۲	۱/۶۰ ± ۰/۱۴
دندان مانند	-۰/۳	۱۸۲/۰۶	۵۳/۰۹	۰/۵۰	-۲۷۴/۱۲ ± ۱۴۶/۱۳	۲/۵۴ ± ۰/۵۷
	-۰/۵	۱۱۸/۶۱	۴۱/۲۵	۰/۳۹	-۱۱۷/۱۱ ± ۱۳۰/۴۱	۱/۶۷ ± ۰/۵۲
	-۰/۷	۳۵/۱۶	۱۲/۴۴	۰/۷۷	-۲۴/۶۸ ± ۴۶/۶۳	۱/۱۱ ± ۰/۱۶
	۰	۴۱/۱۹	۲۴/۴۴	۰/۸۴	-۲۱۵/۹۰** ± ۳۸/۹۷	۳/۱۷** ± ۰/۳۱
	-۰/۱	۵۳/۲۰	۲۳/۱۶	۰/۸۸	-۱۴۵/۲۴** ± ۳۳/۶۴	۲/۰۸ ± ۰/۱۷
دوتکه‌ای	-۰/۳	۲۰۳/۰۳	۵۴/۸۵	۰/۵۵	-۳۸۶/۶۹* ± ۱۶۲/۹۷	۳/۱۲* ± ۰/۶۴
	-۰/۵	۱۳۲/۷۷	۴۳/۸۴	۰/۴۷	-۲۳۹/۵۹ ± ۱۴۵/۹۸	۲/۲۴ ± ۰/۵۹
	-۰/۷	۲۱/۹۰	۷/۷۴	۰/۹۲	-۷۳/۵۲* ± ۲۹/۰۵	۱/۲۹ ± ۰/۱۰

* و **: در a نشان‌دهنده اختلاف معنادار با صفر و در b نشان‌دهنده اختلاف معنادار با یک است.

کمی سازی واکنش سرعت جوانه زنی گیاه دارویی مرزه به دما و پتانسیل آب با استفاده از مدل های رگرسیون غیرخطی



شکل ۲. رابطه سرعت جوانه زنی با دما (برحسب درجه سانتی گراد) در پتانسیل های مختلف آب (برحسب مگاپاسکال) با استفاده از مدل های بتا (B)، دندان مانند (D) و دوتکه ای (S)



شکل ۳. زمان (برحسب ساعت) تا جوانه زنی پیش بینی شده با استفاده از توابع بتا (B)، دندان مانند (D) و دوتکه ای (S) در برابر مقادیر مشاهده شده در پتانسیل های مختلف آب (برحسب مگاپاسکال)

شد (شکل ۲). در مطالعات دیگر نیز با استفاده از مدل های رگرسیون غیرخطی در کمی سازی سرعت جوانه زنی در گیاه دارویی خشخاش مدل دوتکه ای [۲۵]، در کدو

با در نظر گرفتن موارد ذکر شده، به نظر می رسد مدل بتا در مقایسه با مدل های دندان مانند و دو تکه ای برازش بهتری از داده ها دارد، بنابراین به عنوان مدل برتر انتخاب

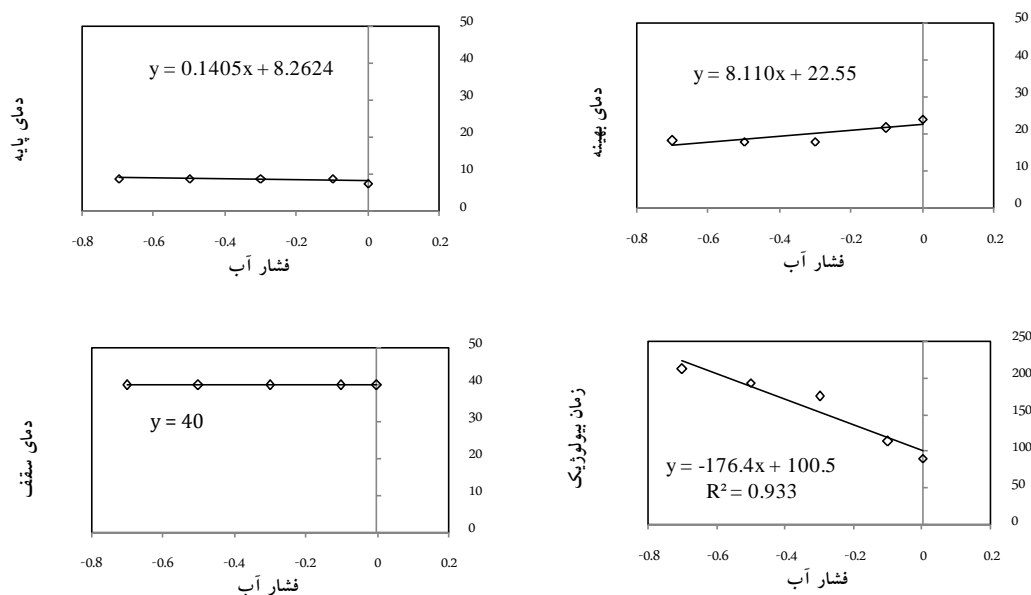
کاردینال شامل دمای پایه، دمای سقف و دمای مطلوب به‌طور معناداری تحت تأثیر پتانسیل آب قرار نگرفتند؛ اما اثر کاهش پتانسیل آب بر زمان بیولوژیک جوانه‌زنی در سطح ۱ درصد معنادار بود و با کاهش پتانسیل آب به‌طور خطی افزایش یافت، به‌طوری که به ازای کاهش ۰/۱ مگاپاسکال پتانسیل آب زمان بیولوژیک جوانه‌زنی ۱۷/۶۴ ساعت افزایش یافت (شکل ۴).

تخم‌کاغذی، سیاه‌دانه، گاوزبان و رازیانه مدل دندان‌مانند [۱، ۴] و در ماریتیغال مدل بتا [۳] مدل برتر معرفی شدند. در مدل بتا که به‌عنوان مدل برتر انتخاب شد، در ۵۰ درصد جوانه‌زنی در پتانسیل آب صفر (تیمار شاهد) دمای پایه برابر با ۷/۵۶ درجه سانتی‌گراد، دمای مطلوب ۲۳/۹۸ درجه سانتی‌گراد، دمای سقف ۴۰ درجه سانتی‌گراد و زمان بیولوژیک جوانه‌زنی ۹۱/۱۷ ساعت برآورد شد (جدول ۳). همچنین مشاهده شد که با کاهش پتانسیل آب، دماهای

جدول ۳. برآورد ضریب a ، دمای پایه (T_b)، دمای مطلوب (T_o)، دمای مطلوب تحتانی (T_{o1})، دمای مطلوب فوقانی (T_{o2})، دمای سقف (T_c) (برحسب درجه سانتی‌گراد) و زمان بیولوژیک (F_o) برای ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی (برحسب ساعت) با استفاده از مدل‌های رگرسیونی در پتانسیل‌های مختلف آب (برحسب مگاپاسکال)

مدل	W	a	T_b	T_o	T_c	F_o
	۰	۰/۵۹ ± ۰/۲۴	۷/۵۶ ± ۳/۱۱	۲۳/۹۸ ± ۰/۸۸	۴۰/۰۰ ± ۰	۹۱/۱۷ ± ۲/۰۱
	-۰/۱	۰/۶۲ ± ۰/۰۶	۹/۰۰ ± ۰	۲۱/۶۷ ± ۰/۴۴	۴۰/۰۰ ± ۰	۱۱۳/۳ ± ۳/۳۱
بتا	-۰/۳	۰/۲۳ ± ۰/۰۵	۹/۰۰ ± ۰	۱۸/۰۰ ± ۰	۴۰/۰۰ ± ۰	۱۷۴/۷ ± ۱۰/۱۴
	-۰/۵	۰/۲۴ ± ۰/۰۶	۹/۰۰ ± ۰	۱۸/۰۰ ± ۰	۴۰/۰۰ ± ۰	۱۹۳/۸ ± ۱۰/۰۳
	-۰/۷	۰/۵۹ ± ۰/۰۸	۹/۰۰ ± ۰	۱۸/۱۶ ± ۰/۳۷	۴۰/۰۰ ± ۰	۲۱۲/۱ ± ۶/۱۴
	۰	-	۵/۰۰ ± ۰	۲۳/۲۴ ± ۱/۰۷	۴۰/۰۰ ± ۰	۶۷/۸۹ ± ۴/۴۵
	-۰/۱	-	۵/۰۰ ± ۰	۲۱/۷۵ ± ۰/۸۳	۴۰/۰۰ ± ۰	۸۹/۵۳ ± ۶/۳۹
دوتکه‌ای	-۰/۳	-	۵/۰۰ ± ۰	۱۷/۰۰ ± ۰	۴۰/۰۰ ± ۰	۱۲۸/۵ ± ۷/۱۸
	-۰/۵	-	۵/۰۰ ± ۰	۱۷/۰۰ ± ۰	۴۰/۰۰ ± ۰	۱۴۵/۴ ± ۷/۳۳
	-۰/۷	-	۵/۰۰ ± ۰	۱۷/۱۷ ± ۰/۲۷	۴۰/۰۰ ± ۰	۱۷۹/۱ ± ۳/۱۰
مدل	T_b	T_{o1}	T_{o2}	T_c	F_o	
	۳/۰۰ ± ۰	۱۹/۳۱ ± ۱/۵۹	۲۸/۰۰ ± ۰	۴۰/۰۰ ± ۰	۸۴/۰۹ ± ۰	
	۳/۴۷ ± ۱/۹۶	۱۸/۰۰ ± ۰	۲۸/۰۰ ± ۰	۴۰/۰۰ ± ۰	۱۱۳/۲ ± ۳/۵۸	
دندان‌مانند	۳/۰۰ ± ۰	۱۸/۰۰ ± ۰	۲۲/۰۰ ± ۰	۴۰/۰۰ ± ۰	۱۴۵/۳ ± ۹/۱۹	
	۳/۰۰ ± ۰	۱۸/۰۰ ± ۰	۲۲/۰۰ ± ۰	۴۰/۰۰ ± ۰	۱۶۴/۰ ± ۹/۵۳	
	۳/۰۰ ± ۰	۱۸/۰۰ ± ۰	۲۲/۰۰ ± ۰	۳۸/۲۳ ± ۱/۸۳	۱۹۸/۶ ± ۶/۹۱	

کمی سازی واکنش سرعت جوانه زنی گیاه دارویی مرزه به دما و پتانسیل آب با استفاده از مدل های رگرسیون غیرخطی



شکل ۴. تأثیر فشار آب (برحسب مگاپاسکال) بر دمای پایه (◇)، مطلوب (□)، و دمای سقف (Δ) (برحسب درجه سانتی گراد) و زمان بیولوژیک برای ۵۰ درصد حداکثر جوانه زنی برآوردشده (برحسب ساعت) با استفاده از مدل بتا

۴. نتیجه گیری

براساس نتایج پژوهش حاضر، مدل بتا، مدل برتر در کمی سازی واکنش سرعت جوانه زنی گیاه مرزه به دما و پتانسیل آب تعیین شد. دماهای کاردینال جوانه زنی در گیاه مرزه تحت تأثیر پتانسیل آب قرار نگرفتند، اما زمان بیولوژیک جوانه زنی با کاهش پتانسیل آب به طور خطی افزایش یافت. براساس مدل برتر، دمای پایه ۷/۵۶، دمای مطلوب ۲۳/۹۸ و دمای سقف ۴۰ درجه سانتی گراد برآورد شدند. زمان بیولوژیک جوانه زنی در پتانسیل صفر (تیمار شاهد)، ۹۱/۱۷ ساعت بود و به ازای هر ۰/۱ مگاپاسکال کاهش پتانسیل آب، ۱۷/۶۴ ساعت افزایش یافت. دما و پتانسیل آب بر مؤلفه های جوانه زنی گیاه دارویی مرزه تأثیر معناداری داشتند. با کاهش پتانسیل آب، درصد و سرعت جوانه زنی کاهش یافت. با افزایش دما تا دمای مطلوب، درصد و سرعت جوانه زنی افزایش و بعد از آن کاهش یافت، اما حساسیت این مؤلفه ها به پتانسیل آب بیشتر از دما بود. همچنین حساسیت درصد جوانه زنی به دما کمتر از

سرعت جوانه زنی بود. مدل معرفی شده و ضرایب برآوردشده در مدلسازی واکنش جوانه زنی و سبز شدن گیاه بسیار ارزشمندند و امکان کمی سازی این مراحل را فراهم می آورند.

منابع

۱. اشراقی نژاد م، کامکار ب و سلطانی ا (۱۳۸۹) برآورد دماهای کاردینال برای مدلسازی روز تا سبز شدن در ارزن دم روباهی. اولین کنفرانس بین المللی مدلسازی گیاه، آب، خاک و هوا: ۱۱۲-۱۰۱.
۲. اکرم قادری ف (۱۳۸۷) مطالعه نمو کیفیت بذر، جوانه زنی، طول عمر و زوال بذر در برخی گیاهان دارویی: کدو تخم کاغذی (*Cucurbita pepo. convar.*) (var. *styriaca*)، سیاه دانه (*Nigella sativa L.*) و گاوزبان (*Borago officinalis L.*). دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. رساله دکتری.

10. Balbaki RZ, Zurayk RA, Blek MM and Tahouk SN (1999) Germination and seedling development of drought tolerant and susceptible wheat under moisture stress. *Seed Science and Technology*. 27: 291-302.
11. Baskin CC and Baskin JM (2001) Seeds ecology, biogeography and evolution of dormancy and germination. Academic Press, San Diego, California. 666.
12. Bewley JD (1997) Seed germination and dormancy. *Plant Cell*. 9: 1055-1066.
13. Brar GS, Gomez JF, McMichael BL, Matches AG and Taylor HM (1991) Germination of twenty forage legumes as influenced by temperature. *Agronomy*. 83: 173-175.
14. Brodford KJ (2002) Applications of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. *Weed Science*. 50: 248-260.
15. Covell S, Ellis R, Roberts E and Summerfield R (1986) The influence of temperature on seed germination rate in grain legumes. *Experimental Botany*. 37: 705-715.
16. Derakhshan A, Gherekhloo J, Vidal R and De Prado R (2014) Quantitative Description of the Germination of Littleseed Canarygrass (*Phalaris minor*) in Response to Temperature. *Weed Science*. 62(2): 250-257.
17. Foley ME and Fennimore SA (1998) Genetic basis for seed dormancy. *Seed Science Research*. 8: 173-179.
18. Grundy AC, Phelps K, Reader RJ and Burston S (2000) Modeling the germination of *Stellaria media* using the concept of hydrothermal time. *New Phytology*. 148: 433-444. Guerke WR, Gutormson T, Meyer D, McDonald M, Mesa JC, Robinson J and Tekrony D (2004) Application of hydrottime analysis in seed testing. *Seed Technology*. 26(1): 75-85.
۳. حیدری ز (۱۳۹۲) تعیین دماهای کاردینال و زمان حرارتی لازم برای جوانه‌زنی بذور ماریتیغال با استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی. دانشگاه آزاد اسلامی واحد دامغان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد.
۴. حیدری ز (۱۳۹۲) تعیین دماهای کاردینال و زمان حرارتی لازم برای جوانه‌زنی بذور رازیانه با استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی. دانشگاه آزاد اسلامی واحد دامغان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد.
۵. خلیلی ن (۱۳۹۱) پیش‌بینی سبز شدن گیاه جو (*Hordeum vulgare* L.) در واکنش به دما، پتانسیل آب و عمق کاشت. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد.
۶. عیسوند ح، شرفی ا و اسماعیلی ا (۱۳۹۱) بررسی اثرهای هیدرو و اسموپرایمینگ در دماهای مختلف بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه مرزۀ خوزستانی (*Satureja khuzistanica* Jamzad) تحت تنش پتانسیل آبی. تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران. ۲: ۳۴۳-۳۵۷.
۷. گالشی س، فرزانه س، سلطانی ا و رضایی ج (۱۳۸۵) ارزیابی واکنش چهل ژنوتیپ پنبه به تنش خشکی در مرحله جوانه‌زنی. علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۳: ۴۲-۵۷.
۸. نودری‌نژاد م، زینلی ا، سلطانی ا، سلطانی ا و کامکار ب (۱۳۹۲) کمی‌سازی واکنش جوانه‌زنی گندم در واکنش به دما و پتانسیل آب. تولید گیاهان زراعی. ۶(۴): ۱۱۷-۱۳۵.
9. 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. *Plant Production*. 2(4): 39-54.

19. Hardegree SP (2006) Predicting germination response to temperature I. Cardinal temperature models and subpopulation-specific regression. *Annals of Botany*. 97: 1115-1125.
20. Jacobsen SE and Bach AP (1998) The influence of temperature on seed germination rate in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). *Seed Science and Technology*. 26: 515-523.
21. Jalilian A, Mazaheri D, Taval afshar R, Rahimian R, Abdollahian H and Gohari J (2004) Evaluation of basic temperature and germination trend for monogerm sugar beet at different temperature. *Sugar Beet*. 20(2): 97-112.
22. Kamkar B (2011) GS_2011. A pocket software to calculate germination and emergence indices. GUASNR.
23. 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 Science and Biotechnology*. 2: 53-57.
24. Kamkar B, Jami Al-Ahmadi M, Mahdavi Damghani A and Villalobos F (2012) Quantification of the cardinal temperatures and thermal time requirement of opium poppy *Papaver somniferum* L. seeds germinate using non-linear regression models. *Industrial Crops and Products*. 35: 192-198.
25. Kebreab E and Murdoch AJ (2000) The effect of water stress on the temperature range for germination of *Orobanches aegyptiaca* seeds. *Seed Science Research*. 10: 127-133.
26. Meyer SE and Pendleton RL (2000) Genetic regulation of seed dormancy in *Purshia tridentata* Rosaceae. *Annals of Botany*. 85: 521-529.
27. Michel BE (1983) Evaluation of water potential of solution of polyethylene glycol 8000 both in absence and presence of other solutes. *Plant Physiology*. 72: 66-70.
28. Okuzanya O (1980) Germination and growth of *Celosia cristata* L. under light and temperature regimes. *American Journal of Botany*. 67: 854-858.
29. Piper EL, Boote KJ, Jones JW and Grimm SS (1996) Comparison of two phenology models for predicting flowering and maturity date of soybean. *Crop Science*. 36: 1606-1614.
30. Ramin A (1997) The influence of temperature on germination taree irani. *Seed Science and Technology*. 25: 419-426.
31. Schimpf D, Filnt D and Palmbland I (1977) Representation of germination curves with the logistic function. *Annual of Botany*. 41: 1357-1360.
32. Soltani A, Robertson M, Torabi B, Yousefi-Daz M and Sarparast R (2006) Modeling seedling emergence in chickpea as influenced by temperature and sowing depth. *Agriculture For Meteorology*. 138: 156-167.
33. 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 Science and Technology*. 29: 653-662.
34. Tan DKY, Wearing AH, Rickert KG and Birch CJ (1997) A systems approach to developing model that predicts crop ontogeny and maturity in broccoli in south-east Queensland. In: Wollin, A.S., Rickert, K.G. (Eds.), *Third Australia and New Zealand Systems Conference Proceedings Linking People, Nature, Business and Technology*. The University of Queensland, Gatton, Pp. 179-187.
35. Thygerson T, Harris JM, Smith BN, Hansen LD, Pendleton RL and Booth DT (2002) Metabolic response to temperature for six populations of

- winterfat (*Eurotia lanata*). *Thermochimica Acta*. 394: 211-217.
36. Ueno K (2003) Effect of Temperature During of Immature Seed Germination. *Seed Science and Thechnology*. (31): 587-595.
37. 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.
38. Yin X, Kropff MJ, McLaren G and Visperas RM (1995) A nonlinear model for crop development as a function of temperature. *Agric Forest Meterol*. 77: 1-16.