

مقاله علمی-پژوهشی

مدل سازی زمان جوانه زنی علف هرز وایه گل سفید (*Ammi majus* L.) در واکنش به دما

محمد رضا مرادی تلاوت^{۱*} - سید عطاالله سیادت^۲ - ابوالفضل درخشان^۳ - صمد صفرخانزاده^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۰۵

چکیده

مدل های مبتنی بر جمعیت، ابزارهای مفیدی برای توصیف رفتار جوانه زنی بذرها در پاسخ به دما هستند. در این مطالعه، دقت پیش بینی رهیافت های مختلف زمان گرمایی جهت مدل سازی دوره های زمانی پیشرفت جوانه زنی علف هرز وایه گل سفید در واکنش به دما ارزیابی شد. آزمون جوانه زنی در هشت دمای ثابت ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰، ۲۴، ۲۸، ۳۲ و ۳۶ درجه سانتی گراد انجام شد. مقادیر RMSE و AIC نشان داد که وقتی T_b (دمای پایه) و θ_{T_m} (نیاز زمان گرمایی برای تکمیل جوانه زنی در دماهای بیشتر از بهینه (T_o)) برای کل جمعیت بذری ثابت بود و توزیع نرمال برای توصیف تنوع $\theta_{T(g)}$ (نیاز زمان گرمایی برای تکمیل جوانه زنی هر کسر بذری معین در دماهای بین T_o و T_b) و $T_m(g)$ (دمای بیشینه T_m) برای بازدارندگی گرمایی جوانه زنی کسر معین 1-g در دماهای بین T_o و T_m) بکار رفت، مدل برازش دقیق تری به داده ها ارائه داد. بر اساس این رویکرد، T_b و θ_{T_m} برای این گیاه به ترتیب معادل ۱/۰۶ درجه سانتی گراد و ۱۱۵۵/۴۱ درجه سانتی گراد ساعت برآورد شد. مقادیر θ_T و T_m برای کسر ۵۰ درصد $\theta_{T(50)}$ و $T_m(50)$ به ترتیب معادل ۲۷۰۸/۶۲ درجه سانتی گراد ساعت و ۳۴/۵۵ درجه سانتی گراد تعیین شد. مقدار T_o برای کسرهای مختلف جوانه زنی ($T_o(g)$) ثابت نبود و برای کسر ۵۰ درصد $T_o(50)$ معادل ۲۴/۵۱ درجه سانتی گراد به دست آمد. پارامترهای برآورد شده در این مطالعه می تواند برای ساخت مدل های پیش بینی کننده الگوی رویش علف هرز وایه گل سفید در مزرعه استفاده شود.

واژه های کلیدی: تابع توزیع تجمعی، توزیع تجمعی وارونه، توزیع نرمال، دمای بیشینه، دمای پایه

مقدمه

جوانه زنی با روند خاصی تغییر کند (۷، ۱۶ و ۲۴). رویکردهای گوناگونی برای آنالیز کمی اثر دما بر پیشرفت جوانه زنی در طی زمان و برآورد آستانه های گرمایی برای این مرحله نمودی استفاده شده است که به طور کلی به دو دسته طبقه بندی می شود: روش های مبتنی بر رگرسیون غیرخطی (۱۰، ۱۵ و ۲۱) و روش های مبتنی بر جمعیت (۵، ۸ و ۱۴). در روش های مبتنی بر رگرسیون غیرخطی، سرعت جوانه زنی (GR) در هر رژیم دمایی ابتدا برای یک کسر یا درصد معین g (یعنی GR_g) محاسبه می شود. سپس، پاسخ GR_g به دما به عنوان یک تابع غیرخطی توصیف خواهد شد. این رویکرد به طور گسترده ای برای تعیین دماهای کاردینال جوانه زنی بذر گیاهان زراعی (۱۳ و ۱۵) و علف های هرز (۱۰) استفاده شده است. با این حال، این روش معایبی دارد که با برخی فرض های مدل زمان گرمایی در تناقض است. برای مثال، آستانه های بحرانی جوانه زنی در این روش بدون در نظر گرفتن درصد نهایی جوانه زنی در رژیم های دمایی گوناگون و تنها با برازش توابع غیرخطی به داده های GR در مقابل دما برآورد می شود. از طرفی، آستانه های T_m و T_b در این رویکرد از طریق برون یابی خط رگرسیونی در محل برخورد با محور x (یعنی متغیر مستقل دما) برآورد خواهند شد. به طور نمونه،

دما بعد از رطوبت اصلی ترین نیروی محرکه مؤثر بر جوانه زنی بذر است (۱). دماهای پایه (T_b)، بهینه (T_o) و بیشینه (T_m) دامنه ای از این عامل زیست محیطی را مشخص می کنند که در آن بذرها یک گونه خاص قادر به جوانه زنی هستند (۸ و ۲۱). آستانه های بحرانی T_m و T_b دماهایی هستند که در زیر و بالای این دو بذرها قادر به جوانه زنی نیستند، در حالی که در T_o حداکثر درصد جوانه زنی در کوتاه ترین زمان ممکن به دست می آید (۲۵). گستره دمایی پاسخ جوانه زنی بذرها ممکن است به میزان خواب بذر بستگی داشته باشد (۹). همچنین، آستانه T_o برحسب سرعت جوانه زنی ممکن است متفاوت از T_o محاسبه شده برای درصد نهایی جوانه زنی باشد (۱۰، ۱۶ و ۲۰). علاوه بر این، T_o در برخی گونه ها ممکن است در میان کسرهای مختلف

۱ و ۲- به ترتیب دانشیار و استاد گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

*- نویسنده مسئول: (Email: moraditelavat@asnrukh.ac.ir)

۳ و ۴- به ترتیب دکتری و کارشناسی ارشد زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

$$GR_g = \frac{1}{t_g} = (T_{m(g)} - T) / \theta_{T_m} \quad (۴)$$

برای هر کسر g جمعیت بذری، رابطه بین GR و GR و GR می توان با دو خط توضیح داد. شیب این دو خط به عنوان $\theta_{T(g)}$ و θ_{T_m} و نقطه تقاطع آن ها به عنوان T_o تعریف می شود (۱). همچنین، دو نقطه ای که در آن GR_g صفر می شود به ترتیب معادل T_m و T_b کسر جوانه زنی g جمعیت (یعنی $T_{m(g)}$) هستند (۱ و ۲).

رویکرد مبتنی بر جمعیت به طور گسترده ای برای مدل سازی پاسخ جوانه زنی (۶ و ۷ و ۱۷)، خواب بذر (۴ و ۶) و سبز شدن گیاهچه در مزرعه (۱۱ و ۱۲) استفاده شده است. با این وجود، فرض های این رویکرد در مورد جوانه زنی بذر برخی گونه های گیاهی به ویژه علف های هرز صادق نیست. برای مثال، تنوع GR در میان کسرهای بذری علف هرز سنگ دانه (*Lithospermum arvense* L.) در دماهای کمتر و بیشتر از T_o به ترتیب به دلیل تنوع T_m و T_b در داخل این جمعیت بذری بود (۴). همچنین، تنوع زمان جوانه زنی میان کسرهای بذری گونه های چچم یک ساله (*Lolium multiflorum* Lam.) و چندساله (*Lolium perenne* L.) در دماهای بین T_o و T_b به دلیل تنوع T_b درون جمعیت های مطالعه شده بود (۲۲).

وایه گل سفید (*Ammi majus* L.) گیاهی یک ساله پاییزه متعلق به خانواده Apiaceae است. بذر این گیاه ماده ای بنام گزانتوتوکسین دارد که دارای خواص دارویی است. در حال حاضر، مطالعاتی بر روی این گیاه برای درمان و معالجه بیماری های سرطان و ایدز آغاز شده است (۱۹). وایه گل سفید در بیشتر مناطق ایران با آب و هوای گرم و معتدل انتشار دارد و به عنوان یکی از علف های هرز مهم مزارع گندم، جو و کلزا مطرح است. با این حال، هیچ گزارشی در مورد آستانه های پاسخ جوانه زنی این گیاه به دما در منابع موجود نیست. بنابراین، در این مطالعه فرضیه های مدل زمان گرمایی (رویکرد مبتنی بر جمعیت) در مورد جوانه زنی بذر علف هرز وایه گل سفید (*Ammi majus* L.) آزمون و پس از انتخاب بهترین فرض ها، زمان جوانه زنی این گیاه در واکنش به دما مدل سازی شد.

گیاه وایه گل سفید به این دلیل انتخاب شد که هیچ گزارشی در مورد آستانه های پاسخ جوانه زنی این گونه به دما در منابع موجود نبود.

مواد و روش ها

آزمایش در سال ۱۳۹۶ در آزمایشگاه تکنولوژی بذر دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان اجرا شد. بذرهای علف هرز وایه گل سفید در بهار سال ۱۳۹۳ از حاشیه مزارع گندم شهر ملائانی جمع آوری شد. بذرها در پاکت های کاغذی ذخیره و تا زمان شروع آزمایش در دمای اتاق نگهداری شد. در این مطالعه، پاسخ جوانه زنی بذر علف هرز وایه گل سفید به دماهای ثابت ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰، ۲۴، ۲۸،

چنانچه تابع غیرخطی به داده های GR کسر ۵۰ درصد برآزش داده شود ممکن است به دلیل آنکه T_m از طریق برون یابی تعیین می شود مقدار بزرگ تری از T_m واقعی که در آن ۵۰ درصد از حداکثر جوانه زنی (در تمام رژیم های دمایی نه یک دمای خاص) متوقف و ۵۰ درصد دیگر آن رخ خواهد داد (یعنی $T_{m(50)}$) را نشان دهد. عکس این مورد ممکن است در خصوص برآورد آستانه T_b صادق باشد. علاوه بر این، برآورد دماهای کاردینال با توابع غیرخطی به شدت به نوع تابع استفاده شده و پارامتر تعیین کننده شکل منحنی در آن بستگی دارد. برای مثال، قادری فر و همکاران (۱۳) با مقایسه توابع غیرخطی گوناگون آستانه T_b برای جوانه زنی بذر کدو تخم کاغذی (*Cucurbita pepo* L.) را بین $-۳/۲۵$ (تابع بتا) و $۸/۹۰$ درجه سانتی گراد (تابع درجه سوم) و برای بذر براگو (*Borago officinalis* L.) بین $-۶/۳۱$ (تابع بتا) و $۶/۲۸$ درجه سانتی گراد (تابع درجه دوم) برآورد کردند. به عبارتی در مطالعه ایشان برآورد T_b بسته به نوع تابع بین ۱۲-۱۰ واحد متغیر بود (۱۳). در مقابل، مدل های مبتنی بر جمعیت به همه داده های مربوط به پیشرفت جوانه زنی در طی زمان در تمام رژیم های دمایی برآزش داده می شود (نه به طور جداگانه) و آستانه های دمایی برای جوانه زنی با در نظر گرفتن هردوی سرعت و درصد نهایی جوانه زنی بذرها در تمام رژیم های دمایی برآورد می شود (۷، ۸، ۱۷ و ۲۰).

در برخی مدل های مبتنی بر جمعیت فرض می شود که GR_g با افزایش دما از T_b تا T_o به طور خطی افزایش و با افزایش بیشتر دما تا T_m به طور خطی کاهش می یابد (۸ و ۱۴). در این رویکرد، تنوع زمان جوانه زنی برای هر کسر g جمعیت بذری در دماهای بین T_o و T_b به عنوان پیامدی از تنوع مقادیر زمان گرمایی مورد نیاز برای تکمیل جوانه زنی آن کسر ($\theta_{T(g)}$) در نظر گرفته می شود. در این حالت، T_b برای کل جمعیت بذری ثابت فرض خواهد شد (۱ و ۲). در دماهای بیشتر از T_o ، تنوع GR_g در میان کسرهای بذری از تنوع T_m در داخل جمعیت ($T_{m(g)}$) ناشی می شود، حال آنکه زمان گرمایی مورد نیاز برای تکمیل جوانه زنی همه بذرها (θ_{T_m}) ثابت فرض خواهد شد (۱ و ۲). بر مبنای این رویکرد، در دماهای بین T_o و T_b ،

$$\theta_{T(g)} = (T - T_b) t_g \quad (۱)$$

از آنجاکه GR_g عکس زمان جوانه زنی کسر g جمعیت بذری (t_g)

است، بنابراین:

$$GR_g = \frac{1}{t_g} = (T - T_b) / \theta_{T(g)} \quad (۲)$$

در دماهای بیشتر از T_m ،

$$\theta_{T_m} = (T_{m(g)} - T) t_g \quad (۳)$$

از این رو

در $\theta_{Tm(g)}$ در دماهای بین T_o و T_m با استفاده از تابع توزیع احتمال نرمال توصیف شد. برحسب این رویکرد، پیشرفت جوانه زنی در طی زمان در دماهای بین T_o و T_b با استفاده از رابطه زیر پیش بینی شد:

$$p(\theta_{T(g)}) = \Phi \left[\frac{\theta_{T(g)} - \theta_{T(50)}}{\sigma_{\theta_T}} \right] \quad (5)$$

که در این رابطه p ، نسبت جوانه زنی بذرها در هر θ_T معین؛ Φ ، تبدیل لاپلاس انتگرال یا تابع توزیع تجمعی برای توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و خطای استاندارد یک؛ $\theta_{T(50)}$ ، میانگین توزیع نرمال (زمان گرمایی مورد نیاز برای جوانه زنی ۵۰ درصد از جمعیت بذری در دماهای کمتر از T_o) و σ_{θ_T} ، انحراف استاندارد توزیع نرمال (اندازه پراکنش توزیع $\theta_{T(g)}$) است. در دماهای بین T_o و T_m ، پیشرفت دوره های زمانی جوانه زنی با رابطه (۶) پیش بینی شد:

$$p(\theta_{Tm(g)}) = \Phi \left[\frac{\theta_{Tm(g)} - \theta_{Tm(50)}}{\sigma_{\theta_{Tm}}} \right] \quad (6)$$

که در این رابطه p ، نسبت جوانه زنی بذرها در هر θ_{Tm} معین؛ $\theta_{Tm(50)}$ ، میانگین توزیع نرمال (زمان گرمایی مورد نیاز برای جوانه زنی ۵۰ درصد از جمعیت بذری در دماهای بین T_o و T_m) و $\sigma_{\theta_{Tm}}$ ، انحراف استاندارد توزیع نرمال (اندازه پراکنش توزیع $\theta_{Tm(g)}$) است. در این روابط Φ به صورت زیر تعریف می شود:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (7)$$

مدل (۲). در این مدل T_b و θ_{Tm} برای کل جمعیت بذری ثابت فرض شد. درحالی که، تنوع زمان جوانه زنی در دماهای بین T_o و T_b به تنوع $\theta_{T(g)}$ و تنوع زمان جوانه زنی در دماهای بین T_o و T_m به تنوع $T_{m(g)}$ نسبت داده شد. از این رو، تنوع هردوی $\theta_{T(g)}$ و $T_{m(g)}$ با استفاده از تابع توزیع احتمال نرمال توصیف شد. در این رویکرد، پیشرفت جوانه زنی در طی زمان در دماهای بین T_o و T_b با استفاده از رابطه (۵) و در دماهای بین T_o و T_m با استفاده از رابطه (۸) پیش بینی شد:

$$p(T_{m(g)}) = 1 - \left[\Phi \left(\frac{T_{m(g)} - T_{m(50)}}{\sigma_{T_m}} \right) \right] \quad (8)$$

که در این رابطه p ، نسبت جوانه زنی بذرها در هر T_m معین؛ $T_{m(50)}$ ، میانگین توزیع نرمال (دمایی که در آن ۵۰ درصد از جمعیت بذری بازدارندگی گرمایی جوانه زنی نشان می دهد) و σ_{T_m} ، انحراف استاندارد توزیع نرمال (اندازه پراکنش توزیع $T_{m(g)}$) است.

مدل (۳). در این مدل θ_T و T_m برای کل جمعیت بذری ثابت فرض شد. درحالی که، تنوع $T_{b(g)}$ در دماهای بین T_o و T_b و تنوع $\theta_{Tm(g)}$ در دماهای بین T_o و T_m برحسب توزیع نرمال توصیف شد. در این رویکرد، پیشرفت جوانه زنی در طی زمان در دماهای بین T_o و T_b با استفاده از رابطه (۹) پیش بینی شد:

۳۲ و $36 (\pm 2/0)$ درجه سانتی گراد مورد ارزیابی قرار گرفت. این رژیم های دمایی هم دماهای کمتر و هم دماهای بیشتر از حد بهینه برای جوانه زنی این گونه را پوشش می داد. پیش از اجرای آزمایش، سطح بذرها با محلول ۰/۵ درصد سدیم هیپوکلریت به مدت ۲۰ ثانیه ضد عفونی و سپس با آب مقطر شستشو داده شد. آزمون جوانه زنی در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار اجرا شد. در هر تکرار آزمایش، ۵۰ بذر روی دولا به کاغذ صافی واتمن شماره یک در داخل پتری دیش پلاستیکی ۹ سانتی متری قرار گرفت و سپس کاغذهای صافی با ۷ میلی لیتر آب مقطر مرطوب شدند. جهت کاهش تلفات آب از طریق تبخیر در دماهای بالا، درب پتری دیش ها با پارافیلیم پوشانده شد. به منظور هم دمایی آب مقطر با دمای انکوباتور، آب مقطر ۲۴ ساعت قبل از شروع آزمایش در انکوباتور قرار گرفت. بذرهایی که ریشه چه آن ها به اندازه ۲ میلی متر یا بیشتر خارج شده بود، جوانه زده در نظر گرفته شدند. تعداد بذرهایی جوانه زده روزانه دومرتبه تا زمان توقف جوانه زنی در هر رژیم دمایی (زمانی که ۵ روز متوالی هیچ جوانه زنی در آن دما رخ نداد) شمارش شد.

داده های جوانه زنی تجمعی (برحسب کسر از ۱) در مقابل زمان تجمعی (برحسب ساعت) در رژیم های دمایی گوناگون برای تجزیه آماری استفاده شد. زمان تا رسیدن جوانه زنی تجمعی به کسرهای ۰/۲، t_{20} ، t_{50} ، t_{80} از مقادیر جوانه زنی مشاهده شده در هر رژیم دمایی با درون یابی از منحنی پیشرفت این فرآیند در برابر زمان تجمعی محاسبه شد (۲۰). برای این منظور، از رویکرد زمان-رویداد^۱ در برنامه نرم افزاری R و بسته drc استفاده شد (۲۰). سپس، داده های GR_g مشاهده شده (عکس t_g) به عنوان تابعی از دما به طور جداگانه برای هر کسر جوانه زنی (۰/۲، ۰/۵ و ۰/۸) ترسیم و بر این اساس رژیم های دمایی کمتر و بیشتر از حد بهینه توسط بازرسی بصری تفکیک شد (۴، ۸، ۱۴ و ۱۷). جوانه زنی بذرها درون یک جمعیت بذری به دلیل تنوع پاسخ هر بذر به دما (یا تنوع زمان جوانه زنی در میان بذرها در یک دمای ثابت و کل دماهای آزمایش) از یک تابع توزیع تجمعی^۲ دو جمله ای^۳ تبعیت می کند. از این رو، جوانه زنی مشاهده شده بر اساس تابع توزیع تجمعی نرمال برحسب قضیه حد مرکزی^۴ شبیه سازی شد (۴). با ترکیب فرض های رویکرد زمان گرمایی چهار مدل جوانه زنی-گرمایی به دست آمد که با مقایسه آن ها زمان جوانه زنی وا به گل سفید در پاسخ به دما مدل سازی شد:

مدل (۱). در این مدل T_b و T_m برای کل جمعیت بذری ثابت فرض شد. درحالی که، تنوع $\theta_{T(g)}$ در دماهای بین T_o و T_b و تنوع

- 1- Event-time
- 2- Cumulative distribution function
- 3- Binomial
- 4- Central limit theorem

تجمعی علف‌هرز وایه گل سفید در دماهای ثابت مختلف در جدول ۱ ارائه شده است. در مدل‌های (۱) و (۲) مقدار T_b برای کل جمعیت بذری ثابت در نظر گرفته و برآورد شد (۱/۰۶ درجه سانتی‌گراد) و تنوع زمان جوانه‌زنی میان کسرهای بذری با استفاده از دو پارامتر $\theta_{T(50)}$ (۲۷۰۸/۶۲ درجه سانتی‌گراد ساعت) و $\sigma_{\theta T}$ (۵۳۶/۴۹ درجه سانتی‌گراد ساعت) توصیف شد. با استفاده از تابع نقطه درصد^۴ (یا توزیع تجمعی وارونه^۵) توزیع احتمال نرمال و این دو پارامتر (و یا پارامترهای دیگر بسته به نوع فرض انتخاب‌شده در مدل جوانه‌زنی-گرمایی) می‌توان ویژگی‌های رفتار جوانه‌زنی بذرهای این گیاه در پاسخ به دما را به‌طور کامل توضیح داد. تابع چگالی احتمال^۶ زمان گرمایی مورد نیاز برای تکمیل جوانه‌زنی کسرهای مختلف بذری در دماهای بین T_o و T_b در شکل ۱ ارائه شده است. در اینجا، علاوه بر کسر ۵۰ درصد، مقدار θ_T برای کسرهای ۲۰ و ۸۰ درصد جوانه‌زنی نیز تعیین شد و به ترتیب معادل ۲۲۵۷/۱۰ و ۳۱۶۰/۱۴ درجه سانتی‌گراد ساعت به دست آمد (شکل ۱).

در مدل‌های (۳) و (۴) مقدار زمان گرمایی مورد نیاز برای تکمیل جوانه‌زنی بذرهای بین T_o و T_b ثابت بود و معادل ۲۶۷۲/۶۷ درجه سانتی‌گراد ساعت برآورد شد (جدول ۱). با استفاده از تابع توزیع تجمعی وارونه و برآورد پارامترهای میانگین و انحراف معیار توزیع T_b در داخل جمعیت بذری (جدول ۱)، مقادیر $T_{b(20)}$ ، $T_{b(50)}$ و $T_{b(80)}$ برای جوانه‌زنی علف‌هرز وایه گل سفید به ترتیب معادل ۱/۰۰، ۰/۷۰، ۲/۷۱ و ۲/۷۱ درجه سانتی‌گراد تعیین شد (شکل ۱). در اینجا، مقدار $T_{b(80)}$ (به‌عنوان مثال) این مفهوم را می‌رساند که در دمای ۲/۷۱ درجه سانتی‌گراد ۸۰ درصد (یعنی g درصد) از جمعیت بذری قادر به جوانه‌زنی و ۲۰ درصد آن فاقد جوانه‌زنی است. این رویکرد، یعنی عدم ثبات و تنوع T_b در داخل جمعیت بذری در چندین مطالعه گزارش شده است (۱۲، ۱۴ و ۲۳).

مشابه با رویکرد مبتنی بر رگرسیون غیرخطی، در مدل‌های (۱) و (۳) مقدار T_m برای کل بذرهای جمعیت ثابت در نظر گرفته شد. بر اساس این دو مدل، مقدار T_m برای جوانه‌زنی بذر علف‌هرز وایه گل سفید معادل $۳۶/۰۱ \pm ۰/۱۷$ درجه سانتی‌گراد برآورد شد (جدول ۱). توزیع زمان جوانه‌زنی میان کسرهای بذری در این رویکرد نتیجه تنوع $\theta_{Tm(g)}$ در دماهای بین T_o و T_m است که گستردگی آن توسط پارامتر $\sigma_{\theta Tm}$ تعیین می‌شود. بر اساس تابع توزیع تجمعی وارونه توزیع احتمال نرمال، زمان گرمایی مورد نیاز برای تکمیل جوانه‌زنی در دماهای بین T_o و T_m برای کسرهای بذری ۰/۲، ۰/۵ و ۰/۸ به ترتیب معادل ۱۰۰۷/۲۶، ۱۳۸۲/۷۰ و ۱۷۵۸/۱۴- درجه سانتی‌گراد ساعت تعیین

$$p(T_{b(g)}) = \Phi \left[\frac{T_{b(g)} - T_{b(50)}}{\sigma_{T_b}} \right] \quad (۹)$$

که در این رابطه p ، نسبت جوانه‌زنی بذرهای در هر T_b معین؛ $T_{b(50)}$ میانگین توزیع نرمال (دمایی که در آن جوانه‌زنی ۵۰ درصد از جمعیت بذری متوقف می‌شود) و σ_{T_b} انحراف استاندارد توزیع نرمال (اندازه پراکنش توزیع $T_{b(g)}$) است. در این رویکرد، دوره‌های زمانی پیشرفت جوانه‌زنی در دماهای بین T_o و T_m با استفاده از رابطه (۶) پیش‌بینی شد.

مدل (۴). در این مدل θ_T و θ_{Tm} برای کل جمعیت بذری ثابت فرض شد. درحالی‌که، تنوع $T_{b(g)}$ در دماهای بین T_o و T_b و تنوع $T_{m(g)}$ در دماهای بین T_o و T_m برحسب توزیع نرمال توصیف شد. در این مدل، پیشرفت جوانه‌زنی در طی زمان در دماهای بین T_o و T_b با استفاده از رابطه (۹) و در دماهای بین T_o و T_m با استفاده از رابطه (۸) پیش‌بینی شد.

برازش مدل‌های جوانه‌زنی-گرمایی به داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS و رویه PROC NLMIXED و به روش بهینه‌سازی پیش‌فرض Dual Quasi-Newton انجام شد. برای ارزیابی برازش مدل‌ها از شاخص ریشه میانگین مربعات خطا^(۱) (RMSE) و برای انتخاب بهترین تابع توزیع از شاخص آکائیک (AIC^(۲)) استفاده شد (۳).

$$AIC = n \cdot \ln \left(\frac{RSS}{n} \right) + 2K \quad (۱۰)$$

که RSS ^(۳) جمع مربعات باقیمانده؛ n ، تعداد نمونه و k ، تعداد پارامترهای مدل مورد نظر است. بهترین مدل در مقایسه مدل‌ها، مدلی است که کمترین میزان AIC محاسبه‌شده را دارا باشد.

نتایج و بحث

درصد نهایی جوانه‌زنی بذر علف‌هرز وایه گل سفید تحت تأثیر دماهای بین ۸ تا ۲۴ درجه سانتی‌گراد قرار نگرفت؛ متوسط جوانه‌زنی در این دماها در حدود $۹۱/۳۰ \pm ۱/۴۱$ درصد بود. جوانه‌زنی نهایی این گیاه در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد به $۵۴/۳۵ \pm ۲/۳۵$ درصد و در دمای ۳۲ درجه سانتی‌گراد به $۱۵/۷۶ \pm ۱/۸۶$ درصد رسید و در نهایت در دمای ۳۶ درجه سانتی‌گراد به‌طور کامل متوقف شد. بنابراین، داده‌های دمای ۳۶ درجه سانتی‌گراد در تجزیه آماری استفاده نشد. پارامترهای برآورد شده با برازش مدل‌های به‌دست‌آمده از ترکیب فرض‌های رویکرد زمان گرمایی به داده‌های دوره‌های زمانی جوانه‌زنی

4- Percentage point function
5- Inverse cumulative distribution
6- Probability density function

1- Root Mean of Squares of Error
2- Akaike Information Criterion
3- Residual Sum of Square

درصد (روابط (۲) و (۴)) استفاده شد (شکل ۲). همچنین، مقادیر T_o برای هر زیرجمعیت از طریق محاسبه نقطه قطع توابع پاسخ دمایی کمتر و بیشتر از بهینه تعیین شد (۸ و ۱۴). بر این اساس، مقدار T_o برای کسرهای ۲۰ ($T_{o(20)}$)، ۵۰ ($T_{o(50)}$) و ۸۰ درصد ($T_{o(80)}$) جوانه زنی بر مبنای مدل (۱) به ترتیب معادل ۲۵/۲۰، ۲۴/۱۶ و ۲۳/۴۸ درجه سانتی گراد و بر مبنای مدل (۲) به ترتیب معادل ۲۴/۵۱ و ۲۳/۷۱ درجه سانتی گراد به دست آمد. همچنین، مقادیر $T_{o(20)}$ ، $T_{o(50)}$ و $T_{o(80)}$ بر مبنای مدل (۳) به ترتیب معادل ۲۵/۹۴، ۲۴/۰۴ و ۲۲/۸۱ درجه سانتی گراد و بر مبنای مدل (۴) به ترتیب معادل ۲۵/۵۹، ۲۴/۴۰ و ۲۳/۱۸ درجه سانتی گراد تعیین شد.

شد (شکل ۱). در مدل های (۲) و (۴)، زمان گرمایی مورد نیاز برای تکمیل جوانه زنی بذرها در دماهای بین T_o و T_m ثابت و معادل ۱۱۵۵/۴۱ درجه سانتی گراد ساعت برآورد شد (جدول ۱). بر اساس این رویکرد، دمای بیشینه برای ۲۰ ($T_{m(20)}$)، ۵۰ ($T_{m(50)}$) و ۸۰ درصد ($T_{m(80)}$) جوانه زنی یا به عبارتی T_m برای ۸۰، ۵۰ و ۲۰ درصد بازدارندگی گرمایی جوانه زنی به ترتیب معادل ۳۷/۰۳، ۳۴/۵۵ و ۳۲/۰۶ درجه سانتی گراد ساعت تعیین شد (شکل ۱).

خروجی های به دست آمده از برازش مدل های جوانه زنی-گرمایی به داده های پیشرفت جوانه زنی علف هرز وایه گل سفید در طی زمان در دماهای گوناگون (جدول ۱) برای محاسبه سرعت جوانه زنی پیش بینی شده برای زیرجمعیت های ۲۰ ($GR_{(20)}$)، ۵۰ ($GR_{(50)}$) و ۸۰ ($GR_{(80)}$)

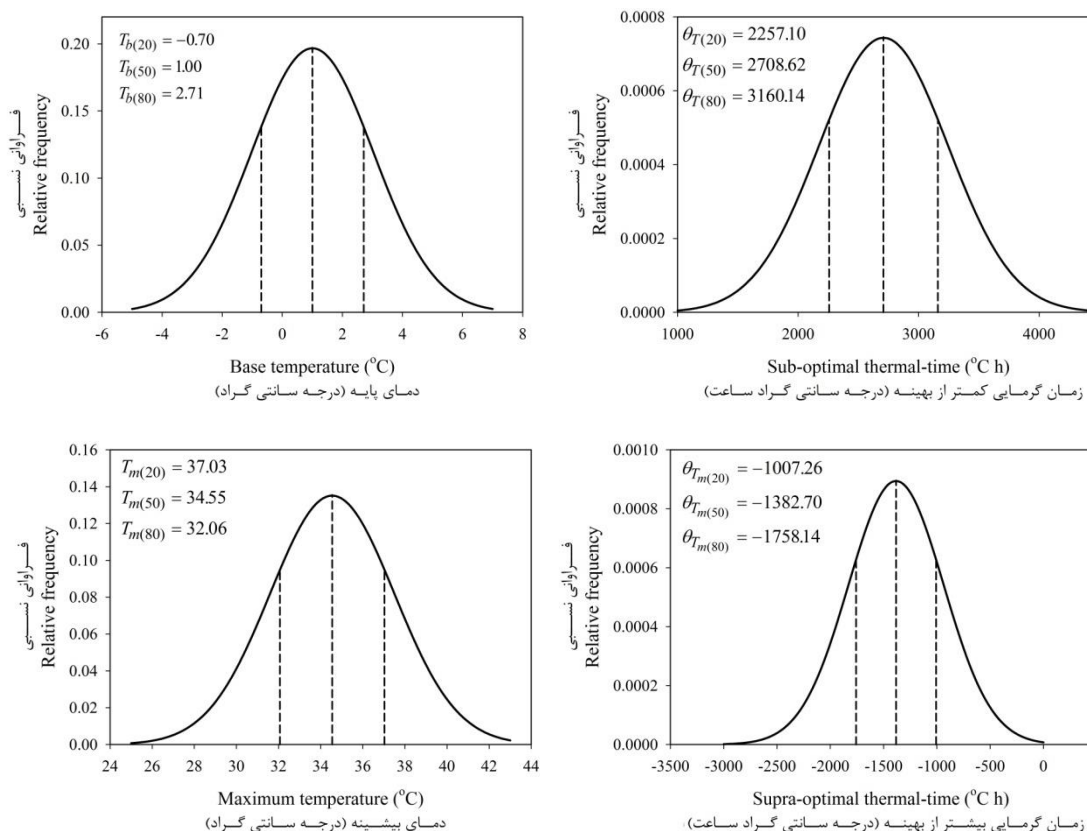
جدول ۱- برآورد پارامترهای مربوط به مدل های مختلف جوانه زنی-گرمایی برازش داده شده به دوره های زمانی جوانه زنی وایه گل سفید (*Ammi majus* L.) در دامنه ای از دماهای ثابت

Figure 1- Parameters estimates for different thermal-germination models fitted to germination time courses of bishop's weed (*Ammi majus* L.) across a range of constant temperatures

| پارامترها* Parameters | برآوردها Estimates | | | |
|-----------------------------|-----------------------|------------------|------------------|------------------|
| | مدل ۱ Model 1 | مدل ۲ Model 2 | مدل ۳ Model 3 | مدل ۴ Model 4 |
| T_b (°C) | 1.06±0.08 | 1.06±0.08 | - | - |
| $\theta_{T(50)}$ (°C h) | 2708.62±24.17 | 2708.62±24.17 | - | - |
| $\sigma_{\theta T}$ (°C h) | 536.49±12.48 | 536.49±12.48 | - | - |
| θ_T (°C h) | - | - | 2672.67±24.78 | 2672.67±24.78 |
| $T_{b(50)}$ (°C) | - | - | 1.00±0.09 | 1.00±0.09 |
| σ_{Tb} (°C) | - | - | 2.03±0.06 | 2.03±0.06 |
| T_m (°C) | 36.01±0.17 | - | 36.01±0.17 | - |
| $\theta_{Tm(50)}$ (°C h) | -1382.70±28.66 | - | -1382.70±28.66 | - |
| $\sigma_{\theta Tm}$ (°C h) | 446.09±13.14 | - | 446.09±13.14 | - |
| θ_{Tm} (°C h) | - | 1155.41±26.10 | - | 1155.41±26.10 |
| $T_{m(50)}$ (°C) | - | 34.55±0.18 | - | 34.55±0.18 |
| σ_{Tm} (°C) | - | 2.95±0.08 | - | 2.95±0.08 |
| RMSE | 0.0632 | 0.0596 | 0.0677 | 0.0644 |
| AIC | -1876 | -1959 | -1780 | -1851 |

* T_b = دمای پایه تمام بذرها در جمعیت (درجه سانتی گراد)؛ $\theta_{T(50)}$ = زمان گرمایی مورد نیاز برای ۵۰ درصد تکمیل جوانه زنی جمعیت بذری در دماهای بین پایه و بهینه (درجه سانتی گراد ساعت)؛ $\sigma_{\theta T}$ = انحراف استاندارد توزیع نرمال زمان گرمایی در دماهای کمتر از بهینه (درجه سانتی گراد ساعت)؛ θ_T = زمان گرمایی لازم برای تکمیل جوانه زنی در دماهای بین پایه و بهینه (درجه سانتی گراد ساعت)؛ $T_{b(50)}$ = دمای پایه برای ۵۰ درصد جوانه زنی جمعیت بذری (درجه سانتی گراد)؛ σ_{Tb} = انحراف استاندارد توزیع نرمال دمای پایه در داخل جمعیت بذری (درجه سانتی گراد)؛ T_m = دمای بیشینه تمام بذرها در جمعیت (درجه سانتی گراد)؛ $\theta_{Tm(50)}$ = زمان گرمایی مورد نیاز برای ۵۰ درصد تکمیل جوانه زنی در دماهای بیشتر از حد بهینه (درجه سانتی گراد ساعت)؛ $\sigma_{\theta Tm}$ = انحراف استاندارد توزیع نرمال زمان گرمایی بیشتر از حد بهینه (درجه سانتی گراد ساعت)؛ θ_{Tm} = زمان گرمایی لازم برای تکمیل جوانه زنی در دماهای بیشتر از بهینه (درجه سانتی گراد ساعت)؛ $T_{m(50)}$ = دمای بیشینه مورد نیاز برای ۵۰ درصد ممانعت از جوانه زنی در دماهای بین بهینه و بیشینه (درجه سانتی گراد)؛ σ_{Tm} = انحراف استاندارد توزیع نرمال دمای بیشینه جمعیت بذری (درجه سانتی گراد).

* T_b = Base temperature for all seeds in the population (°C); $\theta_{T(50)}$ = Thermal-time required to complete 50% germination in the seed population at temperatures between the T_b and the optimum temperature or T_o (°C h); $\sigma_{\theta T}$ = Standard deviation of the normal distribution of sub-optimal thermal-time (°C h); θ_T = Thermal-time required to complete germination at temperatures between the T_b and the T_o (°C h); $T_{b(50)}$ = Base temperature for 50% germination of the seed population (°C); σ_{Tb} = Standard deviation of the normal distribution of base temperatures in seed population (°C); T_m = Maximum temperature for all seeds in the population (°C); $\theta_{Tm(50)}$ = Thermal-time required for 50% germination at supra-optimal temperatures (°C h); $\sigma_{\theta Tm}$ = Standard deviation of the normal distribution of supra-optimal thermal-time (°C h); θ_{Tm} = Thermal-time required to complete germination at supra-optimal temperatures (°C h); $T_{m(50)}$ = Maximum temperature for 50% inhibition of germination at temperatures between the T_b and the T_m (°C); σ_{Tm} = Standard deviation of the normal distribution of maximum temperatures in the seed population (°C).



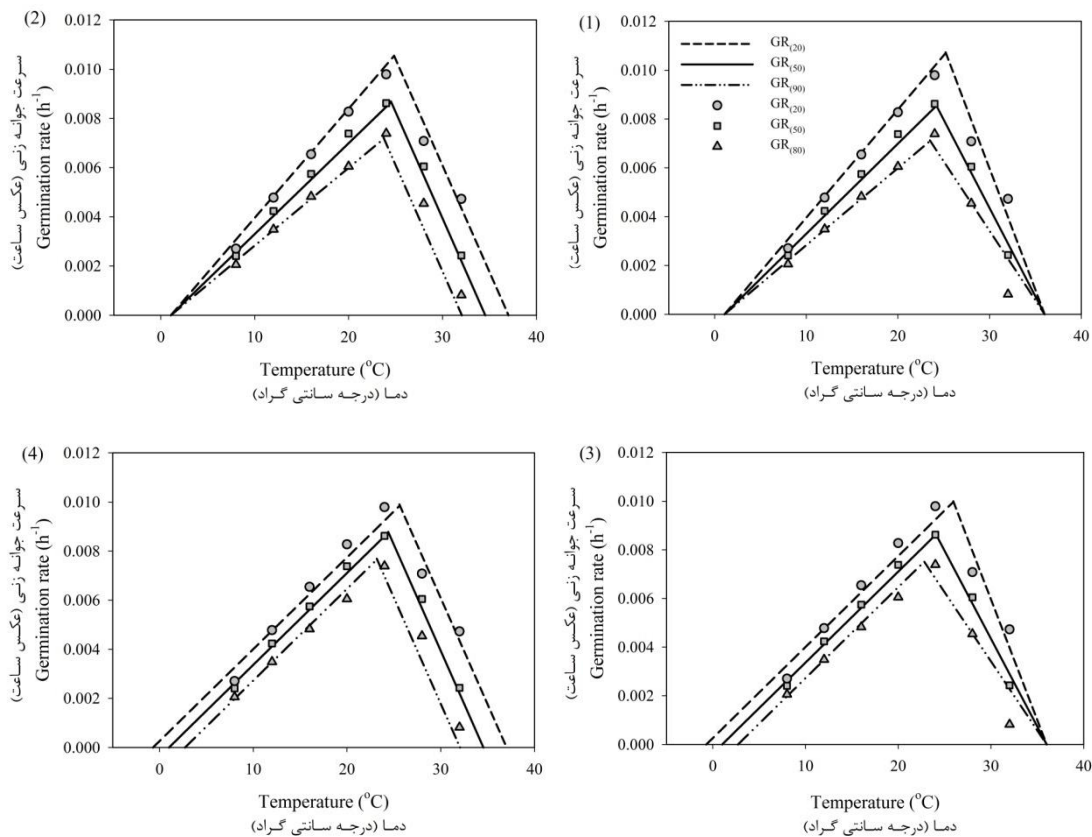
شکل ۱- تابع چگالی احتمال مقادیر پیش‌بینی شده زمان گرمایی کمتر از بهینه، دمای پایه، زمان گرمایی بیشتر از بهینه و دمای بیشینه با مدل‌های جوانه‌زنی-گرمایی مختلف

خطوط عمودی از چپ به راست مربوط به کسرهای ۲۰، ۵۰ و ۸۰ درصد جوانه‌زنی هستند.

Figure 1- Probability density function of the predicted sub-optimal thermal-time, base temperature, supra-optimal thermal-time, and maximum temperature for the different thermal-germination model
Vertical lines from left to right show fractions of 20, 50 and 80% of germination.

مشاهده شده و پیش‌بینی شده، $\theta_{Tm(g)}$ مشاهده شده و پیش‌بینی شده و $T_{m(g)}$ مشاهده شده و پیش‌بینی شده برای جوانه‌زنی علف‌هرز و اوبه گل سفید بر مبنای مدل‌های جوانه‌زنی-گرمایی مختلف در شکل ۳ ارائه شده است. واضح است که هرچه مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده به هم نزدیک‌تر باشند، آن مدل توانسته توصیف بهتری از رفتار جوانه‌زنی بذرها در پاسخ به دما ارائه دهد. بر اساس نتایج مشاهده شده، فرض ثابت بودن T_b و متنوع بودن θ_T در میان کسرهای مختلف جوانه‌زنی نسبت به فرض معکوس آن یعنی ثابت بودن θ_T و متنوع بودن T_b در داخل جمعیت بذری توانست توصیف بهتری از رفتار جوانه‌زنی بذرهای علف‌هرز و اوبه گل سفید در دماهای بین T_o و T_b ارائه دهد (شکل ۳). همچنین، در دامنه دمایی بین T_o و T_m رابطه نزدیک‌تری بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده $T_{m(g)}$ در قیاس با $\theta_{Tm(g)}$ وجود داشت (شکل ۳).

این نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که مقدار T_o به‌دست‌آمده با هر یک از چهار مدل جوانه‌زنی-گرمایی برای زیرجمعیت‌های مختلف ثابت نبود؛ برای کسرهای بزرگ‌تر جوانه‌زنی کوچک‌تر بود (شکل ۲). در این راستا، وات و بلومبرگ (۲۴) در یک مقاله مروری به بررسی پاسخ GR به دما در گونه‌های گیاهی مختلف پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که در ۲۳ مورد از ۲۹ گونه بررسی شده T_o در میان کسرهای بذری به نحو خاصی تغییر کرد. به‌عنوان مثال، T_o در ۱۵ گونه برای کسرهای بزرگ‌تر بذری کوچک‌تر بود (۲۴). درخشان و همکاران (۸) نیز یک چنین همبستگی منفی برای سه رقم از پنج رقم کلزای بهاره مطالعه شده در پژوهش خود مشاهده کردند؛ یعنی T_o برای کسرهای کوچک‌تر (بذرهایی که سریع‌تر جوانه می‌زنند) در دماهای بالاتری در مقایسه با کسرهای بزرگ‌تر بذری رخ داد. روابط بین مقادیر $\theta_{T(g)}$ مشاهده شده و پیش‌بینی شده، $T_{b(g)}$



شکل ۲- رابطه بین مقادیر سرعت جوانه زنی مشاهده شده (نمادها) و پیش بینی شده (خطوط) با مدل های (۱)، (۲)، (۳) و (۴) و دما برای کسرهای ۲۰ (GR₍₂₀₎)، ۵۰ (GR₍₅₀₎) و ۸۰ درصد (GR₍₈₀₎) جوانه زنی علف هرز وا به گل سفید

Figure 2- The relation between observed (symbols) and predicted germination rates (lines) by models (1), (2), (3) and (4) and temperature for fractions 20 (GR₍₂₀₎), 50 (GR₍₅₀₎) and 80% (GR₍₈₀₎) germination in bishop's weed (*Ammi majus* L.)

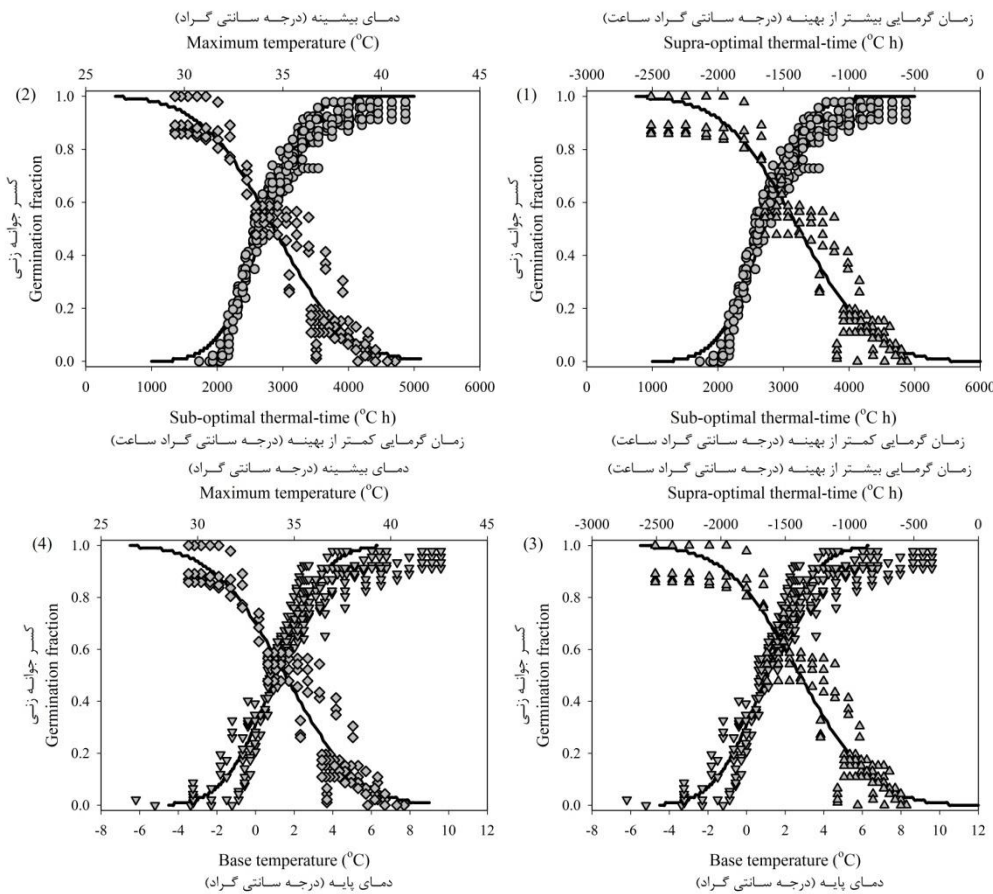
جمعیت بذری ثابت فرض شد (مدل جوانه زنی- گرمایی ۳؛ جدول ۱). بر اساس نتایج مشاهده شده در اینجا، دقیق ترین رهیافت زمان گرمایی برای مدل سازی زمان جوانه زنی علف هرز وا به گل سفید در پاسخ به دماهای ثابت با فرض توزیع احتمال نرمال برای هردوی زمان گرمایی کمتر از بهینه و دماهای بیشینه برای جوانه زنی آمد. بر مبنای این رویکرد، یک آستانه دمایی حداقل برای جوانه زنی کل بذرها جمعیت مطالعه شده وجود داشت. درحالی که در دماهای بین T_m و T_o یک مقدار ثابت زمان گرمایی برای تکمیل جوانه زنی بذرها لازم بود، جوانه زنی هر کسر بذری معین از جمعیت مطالعه شده در دماهای بین T_o و T_b به تجمع واحدهای معین زمان گرمایی بستگی داشت. بر اساس نتایج به دست آمده، احتمال جوانه زنی هر کسر بذری معین از جمعیت مطالعه شده نتیجه ترکیب دو توزیع نرمال تجمعی برای هردوی زمان گرمایی کمتر از بهینه و دماهای بیشینه بود.

مشابه با نتایج به دست آمده در اینجا، درخشان و همکاران (۸) تنوع زمان جوانه زنی میان کسرهای بذری پنج رقم کلزای بهاره را به

رابطه بین کسر جوانه زنی مشاهده شده و برازش داده شده با مدل های جوانه زنی- گرمایی مختلف در شکل ۴ ارائه شده است. هرچند که پراکندگی نقاط در اطراف خط ۱:۱ برای داده های مربوط به مدل جوانه زنی- گرمایی (۲) نسبت به سایرین اندکی کمتر بود، اما شیب رگرسیون ساده خطی برازش داده شده به داده های تمام مدل های جوانه زنی- گرمایی متفاوت از ۱ بود (شکل ۴). این بدان معنی است که این نوع ارزیابی معیار مناسبی برای مقایسه و تشخیص مناسب ترین توابع و مدل ها نیست. به هر حال، معیارهای ارزیابی نکویی برازش (RMSE و AIC؛ جدول ۱) امکان رتبه بندی مدل ها از نظر دقت برازش را فراهم آورد. بر اساس این معیارها، وقتی T_b و θ_{Tm} برای کل جمعیت بذری ثابت فرض شد و توزیع نرمال برای توصیف تنوع $\theta_{T(g)}$ (در دامنه دمایی بین T_o و T_b) و $T_{m(g)}$ (در دامنه دمایی بین T_m و T_o) به کار رفت، مدل برازش بهتر و دقیق تری به داده های جوانه زنی علف هرز وا به گل سفید داشت (مدل جوانه زنی- گرمایی ۲؛ جدول ۱). برعکس، بیشترین مقادیر RMSE و AIC زمانی به دست آمد که هردوی θ_T و T_m برای کل

سنگدانه به دما استفاده شده است. در عوض، هاردگری (۱۴) و وانگ و همکاران (۲۳) این گونه فرض کردند که گونه‌های مرتعی و علف‌های هرز به دلیل ناهمگونی شرایط محیطی در دوره بلوغ بذرها روی گیاه مادری و همچنین تنوع ژنتیکی گسترده در داخل جمعیت‌های بذری آن‌ها دارای T_b متفاوتی هستند و بر این اساس تنوع زمان جوانه‌زنی در میان کسرهای بذری را بدون آزمون فرض‌ها و مقایسه مدل‌های زمان گرمایی به تنوع T_b آن‌ها نسبت دادند.

تنوع $T_{m(g)}$ و $\theta_{T(g)}$ در داخل این جمعیت‌ها نسبت دادند و بر این اساس الگوهای جوانه‌زنی ارقام کلزا در پاسخ به دما را با استفاده از تابع توزیع احتمال ویبول مدل‌سازی کردند. برعکس، گزارش‌هایی در منابع موجود است که در آن‌ها از فرضیه‌های متفاوتی برای توصیف تنوع زمان جوانه‌زنی در میان کسرهای بذری در پاسخ به دما استفاده شده است (مانند: ۴، ۱۴ و ۲۳). در این میان، تنها در مطالعه چنتر و همکاران (۴) از معیارهای نکویی برازش برای انتخاب بهترین فرض‌ها جهت مدل‌سازی پاسخ جوانه‌زنی و خواب بذر علف‌هرز



شکل ۳- روابط بین مقادیر زمان گرمایی کمتر از بهینه مشاهده شده (دایره) و پیش‌بینی شده، دمای پایه مشاهده شده (مثلث رو به پایین) و پیش‌بینی شده، زمان گرمایی بیشتر از بهینه مشاهده شده (مثلث رو به بالا) و پیش‌بینی شده و دمای بیشینه مشاهده شده (لوزی) و پیش‌بینی شده برای کسرهای مختلف جوانه‌زنی علف‌هرز وایه گل سفید بر مبنای مدل‌های جوانه‌زنی-گرمایی (۱)، (۲)، (۳) و (۴)

Figure 3- Relationships between observed (circle) and predicted values of sub-optimal thermal-time, observed (triangle down) and predicted values of base temperature, observed (triangle up) and predicted values of supra-optimal thermal-time, and observed (diamond) and predicted values of maximum temperature for different germination fractions of bishop's weed (*Ammi majus* L.) based on the thermal-germination models (1), (2), (3) and (4)

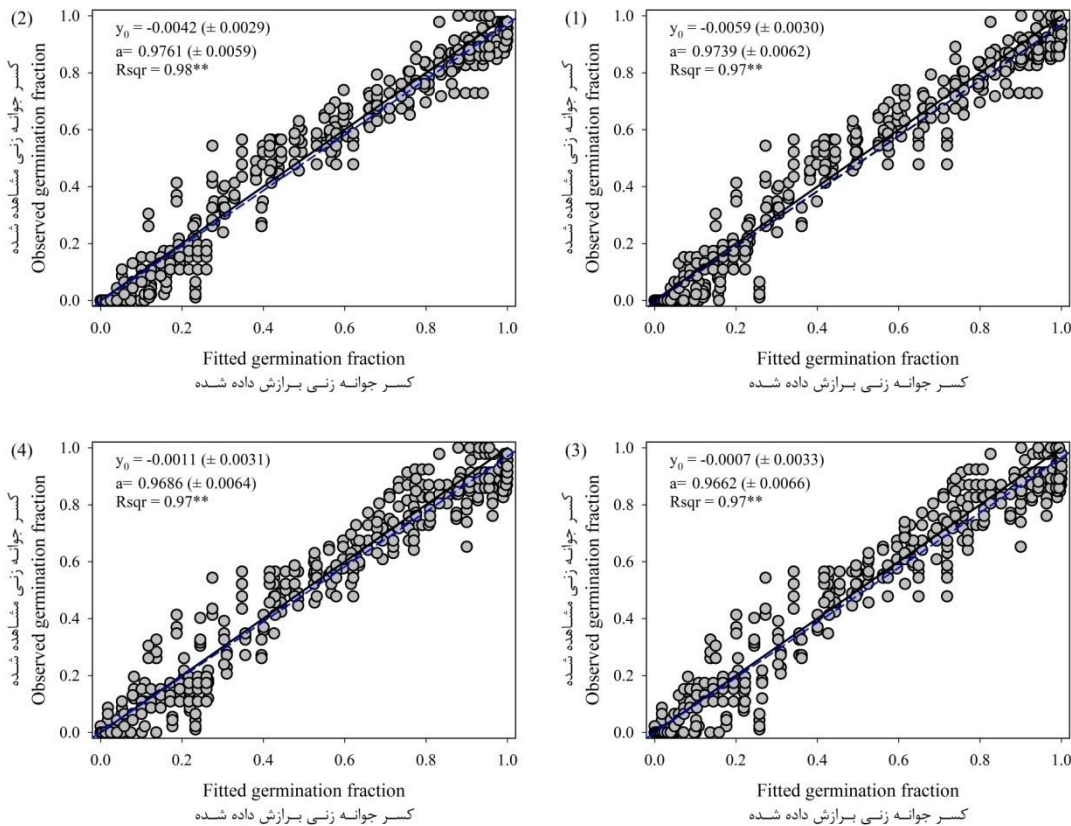
توضیح داد. بازدارندگی گرمایی جوانه‌زنی در این گیاه در دامنه دمایی به نسبت بزرگی رخ داد. بر مبنای توزیع تجمعی وارونه توزیع احتمال نرمال، تنها در دماهای بالاتر از ۲۵/۴۳ درجه سانتی‌گراد (یعنی $T_{m(1)}$) احتمال وقوع بازدارندگی گرمایی جوانه‌زنی در بذرهای این گیاه وجود

مدل جوانه‌زنی-گرمایی ارائه شده در اینجا برخی ویژگی‌های انطباقی^۱ پاسخ جوانه‌زنی علف‌هرز وایه گل سفید به دمای محیط را

1- Adaptive

مطلوب نشود قادر به حیات و جوانه زنی باقی بماند. پاسخ بازدارندگی گرمایی جوانه زنی بذر اغلب با چرخه زندگی سالانه متداول در اقلیم های مدیترانه ای با زمستان های مرطوب و تابستان های خشک در ارتباط است (۱۸). در این مناطق، جوانه زنی بذرهایی که در اوایل تابستان ریزش می کنند تا فرارسیدن دماهای خنک تر و بارش های مطمئن تر فصل پاییز به تأخیر می افتد (۶). بنابراین، این پاسخ بازدارندگی جوانه زنی نوعی تطبیق پذیری اکولوژیکی محسوب می شود و می تواند به بقاء بذر این علف هرز تحت شرایط متغیر دمای خاک در طی فصل تابستان و ظهور آن در فصل پاییز کمک کند.

داشت. یعنی، با افزایش هر واحد دما از این حد ممکن است از جوانه زنی بذر و سبز شدن گیاهچه کسری از جمعیت موجود در بانک بذر این گیاه در خاک ممانعت شود. این ممانعت ممکن است به صورت بازدارندگی گرمایی موقت (Thermoinhibition) و یا به صورت خواب گرمایی (Thermodormancy) رخ دهد (۶). هر یک از این دو نوع بازدارندگی گرمایی جوانه زنی می توانند برای گیاه به عنوان یک راهبرد انطباقی در نظر گرفته شوند. این راهبرد بذرها را قادر می سازد تا هنگامی که دما از حد بهینه فراتر رفت، جوانه زنی نداشته باشند و از این رو تا زمانی که شرایط محیطی برای جوانه زنی و رشد بعدی آنها



شکل ۴- کسر جوانه زنی مشاهده شده (نمادها) در مقابل مقادیر پیش بینی شده با برازش مدل های جوانه زنی-گرمایی (۱)، (۲)، (۳) و (۴) به داده های پیشرفت جوانه زنی بذر وا به گل سفید در طی زمان در رژیم های دمایی گوناگون
خط توپر نشان دهنده خط ۱:۱ و خط بریده بریده مربوط به برازش رگرسیون ساده خطی به داده ها است.

Figure 4- Observed germination fraction (symbols) versus predicted values by the fitting of thermal-germination models (1), (2), (3) and (4) to data of bishop's weed (*Ammi majus* L.) seed germination progress over time in various temperature regimes
The solid line represents 1:1 line and dashed line show simple linear regression fitted to data.

دوره های زمانی جوانه زنی علف هرز وا به گل سفید در پاسخ به دماهای ثابت داشت. پس از این رویکرد، مدل های جوانه زنی-گرمایی (۱) و (۴) برازش نسبتاً مناسبی به داده های جوانه زنی این گونه علف هرز ارائه دادند. این بدان معنی است که چنانچه حتی فرض شود تنوع

در مجموع، ارزیابی فرض های رویکرد زمان گرمایی نشان داد که وقتی T_b و θ_{Tm} برای کل جمعیت بذری ثابت فرض شد و توزیع نرمال برای توصیف تنوع $\theta_{T(g)}$ در دماهای بین T_o و T_b و تنوع $T_{m(g)}$ در دماهای بیشتر از T_o بکار رفت، مدل برازش بهتر و دقیق تری به

تا خروج ریشه‌چه از بذر آن را در اختیار قرار می‌دهد. برای پیش‌بینی دقیق سبز شدن این گیاه می‌توان زمان گرمایی مورد نیاز برای طی شدن این مرحله نموی را به مقدار لازم برای رشد طولی محور زیر لپه از هر سانتی‌متر از عمق خاک اضافه کرد.

زمان جوانه‌زنی در داخل جمعیت بذری گونه‌های علف‌هرز ناشی از تنوع T_b در میان بذرهای آن هاست، مدل جوانه‌زنی-گرمایی (۴) می‌تواند توصیف نسبتاً خوبی از این رفتار ارائه دهد. به‌هرحال، آستانه‌های گرمایی که در این مطالعه برای علف‌هرز وایه گل‌سفید تعیین شد مقادیر اولیه مورد نیاز برای پیش‌بینی زمان از شروع آبنوشی

منابع

- 1- Bewley J.D., Bradford K.J., Hilhorst H.W.M., and Nonogaki H. 2013. Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy. Springer, New York.
- 2- Bradford K.J. 2002. Applications of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. Weed Science 50: 248–260.
- 3- Burnham K.P., and Anderson D.R. 2002. Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach. Springer, New York.
- 4- Chantre G.R., Batlla D., Sabbatini M.R., and Orioli G. 2009. Germination parameterization and development of an after-ripening thermal-time model for primary dormancy release of *Lithospermum arvense* seeds. Annals of Botany 103: 1291–1301.
- 5- Derakhshan A., Bakhshandeh A., Siadat S.A., Moradi-Telavat M.R., and Andarzian S.B. 2018a. Application of thermal-time concept to modeling oilseed rape (*Brassica napus* L.) seed germination response to temperature. Iranian Journal of Field Crops Research 16: 153–164. (In Persian with English abstract)
- 6- Derakhshan A., Bakhshandeh A., Siadat S.A., Moradi-Telavat M.R., and Andarzian S.B. 2018b. Quantification of thermoinhibition response of seed germination in different oilseed rape cultivars. Environmental Stresses in Crop Sciences 11: 459–469. (In Persian with English abstract)
- 7- Derakhshan A., Bakhshandeh A., Siadat S.A., Moradi-Telavat M.R., and Andarzian S.B. 2018c. Comparison of probability distribution functions in thermal-time models for modeling of spring oilseed rape germination to temperature. Iranian Journal of Field Crop Science 41: 81–98. (In Persian with English abstract)
- 8- Derakhshan A., Bakhshandeh A., Siadat S.A., Moradi-Telavat M.R., and Andarzian S.B. 2018d. Quantifying the germination response of spring canola (*Brassica napus* L.) to temperature. Industrial Crops and Products 122: 195–201.
- 9- Derakhshan A., and Gherekhloo J. 2014. Study on some ecological aspects of Cutleaf groundcherry (*Physalis angulata* L.) seed germination and dormancy. Journal of Plant Protection 28: 416–424. (In Persian with English abstract)
- 10- Derakhshan A., Gherekhloo J., Ribas A.V., and Rafael D.P. 2014. Quantitative description of the germination of Littleseed Canarygrass (*Phalaris minor*) in response to temperature. Weed Science 62: 250–257.
- 11- Derakhshan A., Siadat S.A., Bakhshandeh A., Moradi-Telavat M.R., and Andarzian S.B. 2019. Estimation of thermal thresholds for seedling emergence of spring canola in the field. Iranian Journal of Field Crop Science 50: 59–69.
- 12- Forcella F., Benech Arnold R.L., Sanchez R., and Ghera C.M. 2000. Modeling seedling emergence. Field Crops Research 67: 123–139.
- 13- Ghaderi-Far F., Soltani A., and Sadeghipour H.R. 2009. Evaluation of nonlinear regression models in quantifying germination rate of medicinal pumpkin (*Cucurbita pepo* L. subsp. *Pepo*. *Convar.* *Pepo* var. *styriaca* Greb), borago (*Borago officinalis* L.) and black cumin (*Nigella sativa* L.) to temperature. Journal of Plant Production 16: 1–19. (In Persian with English abstract)
- 14- Hardegee S.P. 2006. Predicting germination response to temperature. III. Model validation under field-variable temperature conditions. Annals of Botany 98: 827–834.
- 15- Kamkar B., Jami Al-Alahmadi M., Mahdavi-Damghani A., and Villalobos F.J. 2012. Quantification of the cardinal temperatures and thermal time requirement of opium poppy (*Papaver somniferum* L.) seeds to germinate using non-linear regression models. Industrial Crops and Products 35: 192–198.
- 16- Mesgaran M.B., Onofri A., Rahimian Mashhadi H.R., and Cousens R.D. 2017. Water availability shifts the optimal temperatures for seed germination: A modelling approach. Ecological Modelling 351: 87–95.
- 17- Mesgaran M.B., Rahimian Mashhadi H.R., Alizadeh H., Ohadi S., and Zare A. 2014. Modeling the germination responses of wild barley (*Hordeum spontaneum*) and littleseed canary grass (*Phalaris minor*) to temperature. Iranian Journal of Weed Science 9: 105–118. (In Persian with English abstract)
- 18- Nascimento W.M., Huber D.J., and Cantliffe D.J. 2013. Carrot seed germination and respiration at high temperature in response to seed maturity and priming. Seed Science and Technology 41: 164–169.
- 19- Nemati F., Eslami Jadidi B., and Talebi darabi M. 2013. Cytotoxicity effects of bishops flower (*Ammi majus*)

- extract on the cancer cell lines Hela and MCF-7. *Journal of Animal Biology* 5: 59–67.
- 20- Onofri A., Benincasa P., Mesgaran M.B., and Ritz C. 2018. Hydrothermal-time-to-event models for seed germination. *European Journal of Agronomy* 101: 129–139.
- 21- Soltani A., Robertson M.J., Torabi B., Yousefi-Daz M., and Sarparast R. 2006. Modelling seedling emergence in chickpea as influenced by temperature and sowing depth. *Agricultural and Forest Meteorology* 138: 156–167.
- 22- Zhang H., McGill C.R., Irving L.J., Kemp P.D., and Zhou D. 2012. A modified thermal time model to predict germination rate of ryegrass and tall fescue at constant temperatures. *Crop Science* 53: 240–249.
- 23- Wang R., Bai Y., and Tanino K. 2004. Effect of seed size and sub-zero imbibitions temperature on the thermal time model of winterfat (*Eurotia lanata* (Pursh) Moq.). *Environmental and Experimental Botany* 51: 183–197.
- 24- Watt M., and Bloomberg M. 2012. Key features of the seed germination response to high temperatures. *New Phytologist* 196: 332–336.
- 25- Watt M.S., Xu V., and Bloomberg M. 2010. Development of a hydrothermal time seed germination model which uses the Weibull distribution to describe base water potential. *Ecological Modelling* 221: 1267–1272.

Modeling the Germination Timing of Bishop's Weed (*Ammi majus* L.) in Response to Temperature

M.R. Moradi-Telavat^{1*} - S.A. Siadat² - A. Derakhshan³ - S. Safarkhanzadeh⁴

Received: 31-07-2019

Accepted: 24-02-2020

Introduction: After moisture, temperature is the main driving force affecting seed germination. Population-based models are useful tools for describing and predicting germination in relation to time and temperature. These models estimate the thermal thresholds for seed germination, taking into account both the speed and final percentage of germination in different temperature regimes. The population-based approach has been widely used to model the thermal response of various plant processes such as germination and dormancy of seeds as well as seedling emergence in the field. However, the assumptions of this approach on the germination of seeds of some plant species, especially weeds, are not always correct. Therefore, in this research, the accuracy of prediction of different thermal-time approaches for modeling the germination time courses of bishop's weed (*Ammi majus* L.) in response to constant temperature regimes was evaluated. Bishop's weed was selected because there are no reports regarding the germination response thresholds of this species to temperature in the scientific resources.

Materials and Methods: Experiment was conducted at the Seed Technology Laboratory of Agricultural and Natural Resources University of Khuzestan in November 2017. In this study, germination response of bishop's weed was evaluated at different constant temperatures. The seeds of bishop's weed were collected from the margins of several wheat fields at the time of their natural dispersal in June 2014. The seeds of bishop's weed were incubated in the dark using incubators with controlled environments at eight constant temperatures of 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32 and 36 °C with a range of ± 0.2 °C. These temperature regimes cover both the sub- and supra-optimal temperature ranges. The trial was performed in a completely randomized design with four replications. The germinated seeds (criterion, radicle protrusion of > 2 mm) were counted and removed at frequent time intervals. The event-time approach (package drc in R environment software) was applied to determine the time taken for cumulative germination to reach subpopulation percentiles of 20, 50 and 80% of maximum in each temperature regimes. Experimentally obtained cumulative-germination curves were used to perform a non-linear regression procedure to assess the relative accuracy of different thermal-germination models in predicting germination response under constant incubation temperatures. Assessment of goodness-of-fit was performed by the Akaike information criterion (AIC).

Results and Discussion: The values of RMSE and AIC showed that the model had better and more accurate fit to bishop's weed germination data when the T_b (base temperature) and θ_{T_m} (thermal-time required to complete germination at temperatures greater than optimal (T_o)) were assumed to be constant for the whole seed population, and Normal distribution was used to describe the variation in $\theta_{T(g)}$ (thermal-time required to complete the germination of each given seed fraction at a temperatures between the T_b and T_o) and $T_{m(g)}$ (maximum temperature (T_m) for seed thermo-inhibition of given fraction g at temperatures between the T_o and T_m). Based on this approach, the T_b and θ_{T_m} for this plant were estimated to be 1.06 °C and 1155.41 °C h, respectively. The values of θ_T and T_m for seed fraction of 50% ($\theta_{T(50)}$ and $T_{m(50)}$) were determined as 2708.62 °C h and 34.55 °C, respectively. The value of T_o was not constant for different germination fractions ($T_{o(g)}$), and for fraction 50% ($T_{o(50)}$) was determined to be 24.51 °C. Thermal-time analysis is considered by many researchers to have physiologically and ecologically relevant parameters and, in its standard form, provides several useful indices of seed germination behavior in response to temperature. Despite its popularity, the generality of its assumptions has not been examined systematically. If these assumptions do not hold, at least approximately, in a particular situation, misleading interpretations can easily arise. The thermal-germination model presented here explained some of the adaptive characteristics of the germination response of bishop's weed to ambient temperature. Seed thermo-inhibition in this weed species occurred at temperatures beyond 25.43 °C. In other words, the seeds of bishop's weed do not germinate when temperature will exceed this limit and thus remaining capable of

1 and 2- Associate Professor and Professor, Department of Plant Production and Genetics Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, respectively.

(*- Corresponding Author Email: moraditelavat@asnrukh.ac.ir)

3 and 4- Ph.D. and M.Sc. in Agronomy, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, respectively.

germinating until the environmental conditions change.

Conclusion: In summary, in this study, the thermal thresholds for seed germination of bishop's weed were identified. Our results showed that the T_b was constant for the whole seed population. The thermal-germination model described here gave an acceptable explanation of the observed seed germination patterns. Almost all the concepts and mathematical models described in this study can be applied to modeling seedling emergence in the field.

Keywords: Base temperature, Cumulative distribution function, Inverse cumulative distribution, Maximum temperature, Normal distribution