

## مقاله پژوهشی

کمی‌سازی پاسخ جوانه‌زنی غده اویارسلام ارغوانی (*Cyperus rotundus*) به دما با استفاده از مدل‌های زمان دماییسجاد میجانی<sup>۱</sup>، مهدی راستگو<sup>۱\*</sup>، علی قنبری<sup>۱</sup>، مهدی نصیری محلاتی<sup>۱</sup>

چکیده مبسوط

مقدمه: اویارسلام ارغوانی، (*Cyperus rotundus* L.) یکی از علف‌های هرز مشکل ساز در سراسر دنیا است که به خصوص در مناطق گرمسیر و نیمه گرمسیر گسترش دارد. غده‌ها، اصلی‌ترین اندام رویشی برای افزونش آن می‌باشند، در حالی که بذر آن قابلیت جوانه‌زنی بسیار پایینی دارد. از این رو، بررسی رفتار جوانه‌زنی غده‌ها در تقابل با عوامل محیطی برای اطلاع از زمان جوانه‌زنی و سبز شدن آن مورد توجه می‌باشد. جوانه‌زنی غده، نیز به نوبه خود در میان عوامل محیطی تحت تأثیر دما قرار دارد. مدل‌های ریاضی متعددی برای توصیف الگوی جوانه‌زنی بذر در واکنش به درجه حرارت ارائه شده‌اند که به مدل‌های زمان دمایی شناخته می‌شوند. با توجه به اهمیت مدل‌سازی در پیش‌بینی ظهور اندام‌های رویشی جهت بهبود روش‌های مهاری، در تحقیق حاضر پاسخ جوانه‌زنی غده‌های اویارسلام ارغوانی به دما بوسیله مدل‌های مختلف زمان دمایی مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها: آزمایش در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار در محیط دستگاه ژرمیناتور انجام شد. بدین منظور در هر تکرار، ۱۵ غده داخل پتری ۲۰ سانتی متری روی یک کاغذ صافی قرار داده و سپس ۱۰۰ میلی‌لیتر آب اضافه شد. این آزمایش به‌طور جداگانه برای دماهای ثابت ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سلسیوس و در تاریکی مطلق انجام شد. شمارش جوانه‌زنی غده‌ها به مدت ۳۰ روز مورد بررسی قرار گرفت. برای تحلیل مدل‌سازی داده‌ها، پنج مدل زمان دمایی بر پایه توزیع‌های آماری نرمال، وایبل، گامبل، لجستیک و لگ لجستیک مورد ارزیابی قرار گرفت. برای ارزیابی مدل‌ها از شاخص‌های  $R^2$ ، RMSE، RMSE% و AICc استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که مدل‌های زمان دمایی، پاسخ جوانه‌زنی غده‌های اویارسلام ارغوانی به دما را با دقت بالا ( $R^2=0.95$ ) پیش‌بینی کردند. مقایسه مدل‌ها بر اساس مقادیر AICc، حاکی از برتری معنی‌دار مدل گامبل نسبت به سایر مدل‌ها بود. بر اساس این شاخص، بین مدل‌های لجستیک و لگ لجستیک با نرمال تفاوتی وجود نداشت. در میان مدل‌ها، وایبل نامناسب‌ترین مدل شناخته شد. مدل‌های مختلف جوانه‌زنی نهایی ( $G_{max}$ ) را بین ۰/۹۳ تا ۰/۹۴ (۹۳ تا ۹۴ درصد) برآورد کرده‌اند. دمای پایه توسط مدل‌های مختلف بین ۷/۱۰ تا ۷/۴۷ درجه سلسیوس برآورد شد. در بین مدل‌ها، مدل بر پایه توزیع گامبل، چوله به راست بودن زمان دمایی و دمای بیشینه را اثبات کرد. بر اساس مدل گامبل، فراسنجه‌های زمان دمایی ( $\theta T_{(g)}$ ) لازم برای رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی ( $\theta T_{(50)}$ ) معادل ۱۲۳/۸ درجه سلسیوس روز و بیشینه دما برای جوانه‌زنی با احتمال ۵۰ درصد ( $T_{c(50)}$ ) معادل ۴۶/۱۰ درجه سلسیوس برآورد شد.

نتیجه‌گیری: در بین مدل‌های زمان دمایی، مدل گامبل برتر بود. همچنین، چوله به راست بودن زمان دمایی و دمای بیشینه توسط مدل گامبل اثبات شد. فراسنجه‌های حاصل از مدل گامبل قابل استفاده برای پیش‌بینی جوانه‌زنی غده‌های اویارسلام ارغوانی می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: اندام رویشی، توزیع گامبل، دماهای کاردینال، مدل‌سازی

جنبه‌های نوآوری:

- ۱- مدل‌های زمان دمایی برای پیش‌بینی جوانه‌زنی غده اویارسلام ارغوانی ارزیابی گردید.
- ۲- مدل زمان دمایی بر پایه توزیع گامبل نسبت به توزیع نرمال برتر بود.
- ۳- توزیع زمان دمایی و دمای بیشینه جوانه‌زنی غده اویارسلام ارغوانی به راست چوله داشت.

<sup>۱</sup> گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

## مقدمه

اویارسلام ارغوانی (*Cyperus rotundus* L.) یکی از علف‌های هرز چندساله فراگیر در مناطق گرمسیر و نیمه گرمسیر می‌باشد، و جزء ده علف هرز مشکل‌ساز دنیا طبقه‌بندی شده است (هولم<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۷۷). زمان از بین بردن علف‌های هرز تحت تأثیر زمان نسبی سبز شدن علف‌های هرز و گیاه زراعی قرار دارد (کوزنس<sup>۲</sup> و همکاران، ۱۹۸۷؛ آیکمن<sup>۳</sup> و همکاران، سینگ<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۷). افزایش کسب دانش بر عواملی که ظهور اندام‌های رویشی را تنظیم می‌کنند نه تنها به پیش‌بینی زمان ظهور کمک می‌کند، بلکه بهبود روش‌های مهاری را نیز در پی دارد (هولت و اورکات<sup>۵</sup>، ۱۹۹۶؛ فاوریلی<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). جهت اتخاذ روش‌های مدیریتی مؤثر، درک آگاهی از زمان دقیق جوانه‌زنی و در نتیجه سبز شدن علف‌های هرز به واسطه بهره‌گیری از مدل‌سازی در حال افزایش می‌باشد (گرانیدی<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۰؛ گونزالز-آندوخار<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۶).

غده‌ها، به عنوان اصلی‌ترین اندام رویشی اویارسلام ارغوانی، نقش مهمی در افزونش (تکثیر) آن بازی می‌کنند (سیریواردانا و نیشیموتو<sup>۹</sup>، ۱۹۸۷)، و استقرار گیاهچه‌های جوان به‌طور عمده با تکیه بر فرآیند جوانه‌زنی غده می‌باشد که این نیز به نوبه خود در میان عوامل محیطی تحت تأثیر دما قرار دارد (نیشیموتو<sup>۱۰</sup>، ۲۰۰۱؛ لاتی<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۱). نتایج تحقیق‌ها حاکی از آن است که اویارسلام ارغوانی، بذره‌های زنده بسیار کمی تولید می‌کند و همچنین قابلیت جوانه‌زنی آنها نیز بسیار پایین می‌باشد (تولن و کیلی<sup>۱۲</sup>، ۱۹۷۹). از این رو، رفتار جوانه‌زنی غده‌ها در تقابل با عوامل محیطی برای

اطلاع از زمان جوانه‌زنی و سبز شدن آن مورد توجه می‌باشد.

تأثیر دما بر فنولوژی گیاهان تحت عنوان دماهای کاردینال (اصلی) شناخته شده می‌باشد. دماهای کاردینال شامل دمای کمینه ( $T_b$ ) (کمتر از آن جوانه‌زنی صورت نمی‌گیرد)، دمای بهینه ( $T_o$ ) (بیشترین سرعت جوانه‌زنی در کوتاهترین زمان رخ می‌دهد) و دمای بیشینه ( $T_m$ ) (بیشتر از آن جوانه‌زنی رخ نمی‌دهد) هستند، که برای ارائه مدل پیش‌بینی جوانه‌زنی بذرها در گونه‌های گیاهی مورد نیاز می‌باشند (آلواردو و برادفورد<sup>۱۳</sup>، ۲۰۰۲). اندام‌های رویشی (غده، ریزوم، استولن و...) همانند بذر برای جوانه‌زنی به حداقل دما یا دمای کمینه ( $T_{base}$ ) مختص به خود لازم دارند. در مورد تأثیر دما بر جوانه‌زنی اندام‌های رویشی علف‌های هرز چندساله نیز مطالعاتی انجام شده است. نتایج نشان داده است که دما تأثیر تحریک‌کننده بر جوانه‌زنی ریزوم قیاق (*Sorghum halepense*) دارد و دمای پایه جوانه‌زنی آن برای جمعیت‌های مختلف بین ۸ تا ۱۰ درجه سلسیوس برآورد شده است (لودو<sup>۱۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۲). مطالعات نشان داده است که دمای پایه جوانه‌زنی غده اویارسلام ارغوانی ۹/۹۰ تا ۱۱/۴۰ درجه سلسیوس می‌باشد (هولت و اورکات، ۱۹۹۶). همچنین، دمای کمینه جوانه‌زنی ریزوم قمیش (*Arundo donax* L.)، ۷/۷۱ درجه سلسیوس گزارش شده است (گرانزی و آستین موس<sup>۱۵</sup>، ۲۰۰۹).

برای توصیف الگوی جوانه‌زنی مدل‌های ریاضی متعددی در واکنش به درجه حرارت ارزیابی شده‌اند. برخی از آنها برای پیش‌بینی واکنش جوانه‌زنی تجمعی بکار می‌روند و درجه حرارت‌های کاردینال و ضرایب مدل را پیش‌بینی می‌کنند (هاردیگری<sup>۱۶</sup>، ۲۰۰۶؛ آستین موس<sup>۱۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۰). در بین جمعیت بذرها، در صورت متفاوت بودن نیاز زمان دمایی، باید زمان دمایی جوانه‌زنی هر درصد خاص از جوانه‌زنی

<sup>1</sup> Holm<sup>2</sup> Cousens<sup>3</sup> Aikman<sup>4</sup> Singh<sup>5</sup> Holt and Orcutt<sup>6</sup> Favrelière<sup>7</sup> Grundy<sup>8</sup> González-Andújar<sup>9</sup> Siriwardana and Nishimoto<sup>10</sup> Nishimoto<sup>11</sup> Lati<sup>12</sup> Thullen and Keeley<sup>13</sup> Alvarado and Bradford<sup>14</sup> Loddo<sup>15</sup> Graziani and Steinmaus<sup>16</sup> Hardegree<sup>17</sup> Steinmaus

روش و نتیجه بحث ارائه شده است. از آنجاییکه غده اندام اصلی جوانه‌زنی و افزونش اویارسلام ارغوانی می‌باشد و بذر نقش بسیار ناچیزی دارد، برای اولین بار پاسخ جوانه‌زنی غده به جای بذر در تقابل با دما بوسیله مدل‌های زمان دمایی مورد بررسی قرار گرفته است.

### مواد و روش‌ها

#### جمع‌آوری و مشخصات غده‌ها

ابتدا غده‌ها تا عمق ۷۰ سانتی‌متری از مزرعه دانشگاه فردوسی مشهد (36° 16' N, 59° 36' E) جمع‌آوری شدند. سپس غده‌ها از هر گونه خاک پاکسازی و ریشه و ریزوم متصل به غده‌ها جدا و دو هفته قبل از آزمایش در یخچال با دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شدند. نتایج حاکی از آن است که نگهداری کوتاه مدت ۴ روز تا ۲ هفته غده‌های اویارسلام ارغوانی در دمای ۳ تا ۴ درجه سلسیوس موجب شکسته شدن خواب آنها می‌شود (دور و هرشنهورن<sup>۵</sup>، ۲۰۱۳؛ تومبلسون و کومیدهل<sup>۶</sup>، ۱۹۶۲) و همچنین مانع از دست رفتن رطوبت غده‌ها می‌شود. رنگ غده‌های مورد استفاده قهوه‌ای تیره و متوسط وزن آنها  $0.83 \pm 0.17$  گرم بود.

#### شرایط انجام آزمایش

این آزمایش در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با ۳ تکرار در محیط دستگاه ژرمیناتور مورد بررسی قرار گرفت. به این صورت که هر تکرار (پتری)، در قفسه (بلوک) جداگانه قرار گرفت. بدین منظور در هر تکرار، ۱۵ غده داخل پتری ۲۰ سانتی‌متری روی یک کاغذ صافی قرار داده و سپس ۱۰۰ میلی لیتر آب اضافه شد. این آزمایش به‌طور جداگانه برای دماهای ثابت ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سلسیوس و در تاریکی مطلق انجام شد. جوانه‌زنی غده‌ها هر روز شمارش شد و رویش نیم میلی‌متر جوانه روی غده ملاک جوانه‌زنی بود. از آنجاییکه چندین جوانه روی هر غده فعال می‌شود در این آزمایش نخستین جوانه فعال شده روی هر غده مد نظر بود. شمارش جوانه زنی و مدت زمان آزمایش به

برآورد شود (گارسیا-هویدوبرو<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۸۲). از طریق قرار دادن زمان رسیدن به درصد خاصی از جوانه‌زنی (به عنوان مثال ۵۰ درصد جوانه‌زنی) در مقابل دما و برون یابی در نقطه‌ای که سرعت جوانه‌زنی متوقف می‌شود، دمای کمینه و بیشینه تخمین زده می‌شوند که از لحاظ آماری معتبر نیست، زیرا برون یابی در خارج از محدوده داده‌های آزمایشی است. برای تجزیه و تحلیل زمان‌های جوانه‌زنی در دماهای زیر حد بهینه به منظور تخمین مقادیر دمای کمینه ( $T_b$ ) و زمان دمایی ( $\theta_{T(g)}$ )، روش‌های وابسته به جمعیت (آنالیز پروبیت) مورد استفاده قرار می‌گیرند (برادفورد<sup>۲</sup>، ۲۰۰۲). بر این اساس این مدل با افزایش دما، سرعت جوانه‌زنی تا رسیدن به دمای بهینه افزایش می‌یابد. سرعت جوانه‌زنی در دماهای بالاتر از دمای بهینه، تا رسیدن به دمای بیشینه به صورت خطی کاهش و پس از آن جوانه‌زنی متوقف می‌شود. شیب این کاهش برای همه زیر جمعیت‌های یک جمعیت، یکسان است ولی دارای عرض از مبدأ (دمای بیشینه) متفاوتی در محور دما، خواهند بود. با استفاده از آنالیز پروبیت می‌توان پراکنش مقادیر دمای بیشینه را برای زیر جمعیت‌های مختلف، مشخص کرد (برادفورد، ۲۰۰۲). مطالعات حاکی از آن است که دمای بیشینه زیر جمعیت‌های مختلف یک جمعیت بذر، متفاوت می‌باشد، اما زمان دمایی ثابت می‌باشد (الیس<sup>۳</sup> و (الیس<sup>۳</sup> و همکاران، ۱۹۸۶).

اطلاع از زمان رویش اندام‌های رویشی علف‌های هرز چندساله، استفاده از روش‌های تلفیقی را در جهت برنامه‌ریزی برای مدیریت مؤثر میسر می‌کند. از این رو، بهره‌گیری از معادله‌های ریاضی (مدل‌سازی) جهت پیش بینی جوانه‌زنی و سبز شدن علف‌های هرز می‌تواند به متولیان و متخصصان این امر کمک شایانی داشته باشد. در کاربرد این مدل‌ها فرض نرمال بودن توزیع زمان دمایی و دمای بیشینه وجود دارد. در حالی که تحقیق اخیر نشان می‌دهد که سایر توزیع‌های آماری نسبت به مدل نرمال برتری دارند (درخشان<sup>۴</sup> و همکاران ۲۰۱۸). اطلاعات کامل در مورد این مدل‌ها در بخش مواد و

<sup>1</sup> Garcia-Huidobro

<sup>2</sup> Bradford

<sup>3</sup> Ellis

<sup>4</sup> Derakhshan

<sup>5</sup> Dor and Hershenhorn

<sup>6</sup> Tumbleson, and Kommedahl

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \frac{-x^2}{e^2} dt \quad \text{رابطه ۳:}$$

در دماهای بیشتر از حد بهینه، توزیع تجمعی وارونه و تابع توزیع تجمعی توزیع نرمال برای پیش‌بینی  $T_{c(g)}$  و درصد جوانه‌زنی  $g$  در به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$T_{c(g)} = T_{c(50)} + \sigma_2 \cdot \text{probit}(G_{\max} - g) \quad \text{رابطه ۴:}$$

رابطه ۵:  $g = G_{\max} - (\Phi[\frac{((T + (\frac{\theta T_c}{t_g})) - T_{c(50)})}{\sigma_1}])$  دمای بیشینه برای مهار ۵۰ درصدی جوانه‌زنی جمعیت غده (میانگین، میانه یا مد توزیع  $T_{c(g)}$  جمعیت غده‌ها ( $\sigma_2$ ، انحراف معیار توزیع نرمال فراسنجه پراکنش توزیع  $T_{c(g)}$ ) می‌باشند.

## ۲- مدل جوانه‌زنی دمایی بر پایه توزیع لجستیک

کاربرد پذیری توزیع لجستیک در مدل زمان دمایی در دماهای زیر حد بهینه، به صورت زیر می‌باشد:

$$\theta_{T(g)} = \theta_{T(50)} + \sigma_1 \cdot \ln(\frac{G_{\max} \times g}{1 - (G_{\max} \times g)}) \quad \text{رابطه ۶:}$$

رابطه ۷:  $g = G_{\max} [1 + \exp(-(\frac{(T - T_b)t_g - \theta_{T(50)}}{\sigma_1}))]^{-1}$  در دماهای بیشتر از حد بهینه، به شرح زیر می‌باشد:

$$T_{c(g)} = T_{c(50)} + \sigma_2 \cdot \ln(\frac{G_{\max} - g}{1 - (G_{\max} - g)}) \quad \text{رابطه ۸:}$$

$$g = G_{\max} - (1 + \exp(-(\frac{((T + (\frac{\theta T_c}{t_g})) - T_{c(50)})}{\sigma_2})))^{-1} \quad \text{رابطه ۹:}$$

## ۳- مدل جوانه‌زنی دمایی بر پایه توزیع وایبل

در دماهای زیر حد بهینه، توزیع تجمعی وارونه توزیع وایبل برای پیش‌بینی  $\theta_{T(g)}$  و تابع توزیع تجمعی این توزیع برای پیش‌بینی درصد جوانه‌زنی  $g$  در مدل جوانه‌زنی دمایی به شرح زیر می‌باشد:

$$\theta_{T(g)} = \mu_1 + \sigma_1 \cdot [-\ln(1 - (G_{\max} \times g))]^{\frac{1}{\lambda_1}} \quad \text{رابطه ۱۰:}$$

$$g = G_{\max} [1 - \exp(-(\frac{(T - T_b)t_g - \mu_1}{\sigma_1})^{\lambda_1})] \quad \text{رابطه ۱۱:}$$

در این رابطه‌ها  $\mu_1$ ،  $\sigma_1$  و  $\lambda_1$  به ترتیب فراسنجه‌های جایگاه، پراکنش و شکل توزیع  $\theta_{T(g)}$  در دماهای زیر حد بهینه هستند. فراسنجه پراکنش همسان فراسنجه انحراف معیار در توزیع نرمال است و همراه با فراسنجه

مدت ۳۰ روز انجام می‌شود. غده‌های مرده (بر اساس تجربه، غده‌های آلوده به قارچ مرده هستند)، از محاسبات حذف و جوانه‌زنی نهایی بر اساس تعداد غده زنده محاسبه شد.

## تحلیل مدل سازی جوانه‌زنی غده‌های اویارسلام ارغوانی

مدل جوانه‌زنی زمان‌دمایی توسعه یافته مبتنی بر پنج تابع توزیع احتمال به داده‌های جوانه‌زنی تجمعی غده‌های اویارسلام ارغوانی برازش داده شده است (درخشان و همکاران، ۲۰۱۸). برای برازش رویه‌های رگرسیون غیر خطی، داده‌ها به دو گروه دماهای زیر حد بهینه و بیشتر از بهینه تقسیم شدند (کوول<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۸۶؛ هاردیگری ۲۰۰۶؛ درخشان و همکاران، ۲۰۱۸). در زیر، مدل‌های مربوطه شرح داده شده‌اند.

### ۱- مدل جوانه‌زنی دمایی بر پایه توزیع نرمال

در این مدل زمان دمایی، برای پیش‌بینی  $\theta_{T(g)}$  از توزیع تجمعی وارونه<sup>۲</sup> و توزیع احتمال نرمال برای پیش‌بینی کسر یا درصد معینی از کل جمعیت غده‌های جوانه‌زده ( $g$ ) در دماهای زیر حد بهینه از تابع توزیع تجمعی<sup>۳</sup> به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\theta_{T(g)} = \theta_{T(50)} + \sigma_1 \cdot \text{probit}(G_{\max} \times g) \quad \text{رابطه ۱:}$$

$$g = G_{\max} (\Phi[\frac{(T - T_b)t_g - \theta_{T(50)}}{\sigma_1}]) \quad \text{رابطه ۲:}$$

در روابط بالا  $\theta_{T(50)}$  زمان دمایی زیر حد بهینه برای جوانه‌زنی ۵۰ درصد از جمعیت غده‌ای،  $\sigma_1$  انحراف معیار توزیع نرمال (فراسنجه پراکنش توزیع  $\theta_{T(g)}$  و  $G_{\max}$ ، بیشترین جوانه‌زنی پیش‌بینی شده،  $\text{probit}(g)$ : تبدیل پروبیت یا توزیع تجمعی وارونه برای توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و خطای استاندارد یک و  $\Phi$ : تبدیل لاپلاس انتگرال یا تابع توزیع تجمعی برای توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و خطای استاندارد یک است:

<sup>۱</sup> Covell

<sup>۲</sup> Inverse cumulative distribution; percentage point function; ppf

<sup>۳</sup> Cumulative distribution function; cdf

همچنین دو مدل جوانه‌زنی دمایی بر پایه توزیع نرمال معکوس و لگ نرمال نیز برآزش داده شدند (درخشان و همکاران، ۲۰۱۶) ولی به‌خاطر برآزش نامناسب از ذکر معادلات و نتایج آنها خودداری شد. با استفاده از ضرایب به دست آمده از مدل جوانه‌زنی دمایی گامبل، سرعت جوانه‌زنی ( $GR_g$ ) برای زیر جمعیت‌های مختلف (رابطه‌های ۲۲ و ۲۳) محاسبه شد (شکل ۳).

در دماهای زیر حد بهینه،  $\theta_{T(g)}$  با رابطه ۲۲ محاسبه می‌شود:

$$GR_g = 1/t_g = (T - T_b)/\theta_{T(g)} \quad \text{رابطه ۲۲}$$

در دماهای بیشتر از حد بهینه  $\theta_{Tc}$  با استفاده از رابطه ۲۳ محاسبه می‌شود:

$$GR_g = 1/t_g = (T_{c(g)} - T)/\theta_{Tc} \quad \text{رابطه ۲۳}$$

$GR_g$  برای هر کسر جوانه‌زنی، با استفاده از دو خط راست قابل توصیف می‌باشد. شیب این دو خط معادل  $\theta_{T(g)}$  و  $\theta_{Tc}$  است و محل تقاطع آنها به عنوان دمای بهینه محسوب می‌شود. همچنین، دو نقطه‌ای که در آن  $GR_g$  برابر صفر می‌شود به ترتیب به عنوان دمای کمینه کل جمعیت بذری و دمای بیشینه کسر جوانه‌زنی معین  $g$  جمعیت بذری ( $T_{c(g)}$ ) تعریف می‌شوند (کوول و همکاران، ۱۹۸۶؛ آلیس و همکاران، ۱۹۸۶).

برآزش مدل‌های مذکور به داده‌های تجمعی غده‌های اویارسلام ارغوانی با استفاده از نرم افزار SAS و با رویه NLMIXED و به روش بهینه‌سازی پیش فرض Dual Quasi-Newton برآزش داده شدند. در این آزمایش برای افزایش دقت مدل و پیش‌بینی بهتر فراسنجه‌ها، داده‌ها با استفاده از روش بوت استرپ<sup>۳</sup> با ۱۰۰ تکرار شبیه‌سازی شدند و سپس مدل‌های مختلف برآزش داده شد. برای مقایسه مدل‌ها جهت بررسی صحت و کارآمد بودن و داشتن اختلاف معنی‌داری بین آنها، شاخص‌های متفاوتی مانند ضریب تبیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۴</sup>، ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده<sup>۵</sup> و شاخص آکائیک تصحیح شده<sup>۶</sup> (AICc) مورد بررسی قرار گرفت.

شکل اندازه پراکنش  $\theta_{T(g)}$  را برای این توزیع برآورد می‌کند. فراسنجه شکل چگونگی خمش منحنی را مشخص می‌کند و با توزیع شکل پذیری بالایی می‌دهد (مسگران<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۳: درخشان<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۶) در دماهای بیشتر از حد بهینه، توزیع تجمعی وارونه و تابع توزیع تجمعی توزیع احتمال وایبل برای پیش‌بینی  $T_{c(g)}$  و درصد جوانه‌زنی  $g$  به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$T_{c(g)} = \mu_2 + \sigma_2 \cdot \left[ -\ln(1 - (G_{\max} - g)) \right]^{1/\lambda_2} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$g = G_{\max} - \left[ 1 - \exp\left(-\left(\frac{(T - T_b)/t_g - \mu_2}{\sigma_2}\right)^{\lambda_2}\right) \right] \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$\mu_2$ ،  $\sigma_2$  و  $\lambda_2$  به ترتیب فراسنجه‌های جایگاه، پراکنش و شکل توزیع  $T_{c(g)}$  در دماهای بیشتر از حد بهینه هستند.

#### ۴- مدل جوانه‌زنی دمایی بر پایه توزیع گامبل

مدل زمان دمایی مبتنی بر توزیع گامبل برای دماهای زیر حد بهینه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\theta_{T(g)} = \mu_1 + \sigma_1 \cdot \left[ \ln\left(\ln\left(\frac{1}{G_{\max} - g}\right)\right) \right] \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$g = G_{\max} \left[ \exp\left[-\exp\left(-\left(\frac{(T - T_b)t_g - \mu_1}{\sigma_1}\right)\right)\right] \right] \quad \text{رابطه ۱۵}$$

در دماهای بیشتر از حد بهینه، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$T_{c(g)} = \mu_2 + \sigma_2 \cdot \left[ \ln\left(\ln\left(\frac{1}{G_{\max} - g}\right)\right) \right] \quad \text{رابطه ۱۶}$$

$$g = G_{\max} - \left[ \exp\left[-\exp\left(-\left(\frac{(T - T_b)/t_g - \mu_2}{\sigma_2}\right)\right)\right] \right] \quad \text{رابطه ۱۷}$$

#### ۵- مدل جوانه‌زنی دمایی بر پایه توزیع لگ لجستیک

برای دماهای زیر حد بهینه، مدل زمان دمایی لگ لجستیک به صورت زیر بیان می‌شود:

$$T_{(g)} = \mu_1 + \sigma_1 \cdot \left( \frac{G_{\max} - g}{1 - (G_{\max} - g)} \right)^{1/\lambda_1} \quad \text{رابطه ۱۸}$$

$$g = G_{\max} \left[ \left( 1 + \left( \frac{\sigma_1}{(T - T_b)t_g - \mu_1} \right)^{\lambda_1} \right)^{-1} \right] \quad \text{رابطه ۱۹}$$

برای دماهای بیشتر از حد بهینه،

$$T_{c(g)} = \mu_2 + \sigma_2 \cdot \left( \frac{G_{\max} - g}{1 - (G_{\max} - g)} \right)^{1/\lambda_2} \quad \text{رابطه ۲۰}$$

$$g = G_{\max} - \left[ \left( 1 + \left( \frac{\sigma_2}{(T - T_b)/t_g - \mu_2} \right)^{\lambda_2} \right)^{-1} \right] \quad \text{رابطه ۲۱}$$

<sup>3</sup> Bootstrapping

<sup>4</sup> RMSE= Root Mean Square

<sup>5</sup> Normalized root-mean-square error or RMSE%

<sup>6</sup> Corrected AIC or AICc

<sup>1</sup> Mesgaran

<sup>2</sup> Derakhshan

حاکمی از آن می‌باشد که مدل‌های گامبل و لگ لجستیک با خطای کمتری روند جوانه‌زنی را پیش‌بینی کرده‌اند. در صورتیکه بر اساس مقادیر  $AIC_c$ ، مدل گامبل برآزش بهتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد. همچنین مقایسه بر اساس  $\Delta i$  (کمتر از ۲) نشان می‌دهد که اختلاف معنی‌داری با سایر مدل‌ها دارد. بر اساس این شاخص، بین مدل‌های لجستیک و لگ لجستیک با نرمال تفاوتی وجود ندارد. در میان مدل‌ها، وایبل نامناسب‌ترین مدل شناخته شد. مدل‌های مختلف، جوانه‌زنی نهایی ( $G_{max}$ ) را بین ۰/۹۳ تا ۰/۹۴ (۹۳ تا ۹۴ درصد) برآورد کرده‌اند (جدول ۱).

تخمین دمای پایه اختلاف چندانی ندارد و توسط مدل‌های مختلف بین ۷/۱۰ تا ۷/۴۷ درجه سلسیوس برآورد شد (جدول ۱). فراسنجه  $\mu_1$  توسط مدل‌های لگ لجستیک، وایبل و گامبل به ترتیب ۱۲/۵۲، ۳۱/۵۱ و ۱۰۵/۸۰ درجه سلسیوس روز برآورد شده است (جدول ۱). در همه توزیع‌های آماری (به غیر از گامبل)، فراسنجه  $\mu_1$  نقطه برخورد منحنی تجمعی با محور ایکس یا مقداری از ایکس که توزیع تجمعی برای آن ایکس یا مقادیر کمتر از آن صفر است را نشان می‌دهد (مسگران و همکاران، ۲۰۱۳: درخشان و همکاران، ۲۰۱۶). از این رو، فراسنجه  $\mu_1$  بر اساس این نوع توزیع‌ها، کمینه زمان دمایی لازم برای شروع جوانه‌زنی ( $\theta T(0)$ ) یا زمان درنگ می‌باشد (درخشان و همکاران، ۲۰۱۸). اگر  $\theta T(g)$  از تابع توزیع گامبل پیروی کند، کسر غده‌های جوانه زده در  $\theta T(g) = \mu_1$  حدود ۰/۳۶ از جوانه‌زنی بیشینه ( $0/36 \times G_{max}$ ) می‌باشد (درخشان و همکاران، ۲۰۱۸). در واقع، در مدل زمان دمایی بر اساس گامبل، فراسنجه  $\mu_1$  همان مقدار مُد (mode) توزیع  $\theta T(g)$  را نشان می‌دهد (درخشان و همکاران، ۲۰۱۶). مقدار  $\mu_1$  تخمین زده مبتنی بر مدل‌های لگ لجستیک و گاما برای کلزای بهاره رقم (RGS003) به ترتیب ۱۱۰/۳۸ و ۳۴۲/۹۹ درجه سلسیوس ساعت بود (درخشان و همکاران، ۲۰۱۸). مدل‌های زمان دمایی مختلف فراسنجه  $\sigma_1$  را بین ۲۵/۶۹ (توزیع لجستیک) تا ۱۱۲/۱۰ (توزیع وایبل) برآورد کردند. در نتایج درخشان و همکاران (۲۰۱۸) این فراسنجه توسط مدل‌های مختلف زمان دمایی، از ۵/۴۴ (لگ نرمال) تا ۲۳۹/۳۷

ریشه میانگین مربعات خطا به صورت رابطه ۲۴ بیان می‌شود (مایر و بولتر<sup>۱</sup>، ۱۹۹۳):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs} - X_{model})^2}{n}} \quad \text{رابطه ۲۴}$$

$X_{obs}$  مقادیر مشاهده شده و  $X_{model}$  مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل می‌باشند.

ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده بیانگر نرمال کردن  $RMSE$  نسبت به میانگین داده‌های مشاهده می‌باشند ( $\overline{X_{obs}}$ ) (شرباکوف<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۳). مقادیر بین ۰-۱۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۳۰ و بیشتر از ۳۰ به ترتیب بیانگر پیش‌بینی عالی، خوب، متوسط و ضعیف می‌باشند (آرایا<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۷).

رابطه ۲۵:  $NRMSE = \left(\frac{RMSE}{X_{obs}}\right) * 100$   
شاخص آکائیک تصحیح شده ( $AIC_c$ ) از طریق رابطه ۲۶ محاسبه شد (بورنهام و آندرسون<sup>۴</sup>، ۲۰۰۲؛ آکائیک<sup>۵</sup>، ۱۹۷۴).

رابطه ۲۶:  $AIC_c = n * \ln\left(\frac{RSS}{n}\right) + 2k + \left(\frac{2k * (k+1)}{n-k-1}\right)$   
 $K$ : تعداد فراسنجه مدل،  $n$ : تعداد مشاهدات و  $RSS$ : مجموع مربعات خطا می‌باشند. مقادیر کمتر  $AIC_c$  (منفی‌تر) بیانگر مدل مناسب‌تر می‌باشد.  $\Delta i$  شاخصی برای رتبه بندی مدل‌ها می‌باشد. اگر کمتر از ۲ باشد هیچ تفاوتی بین مدل‌ها نمی‌باشد (بورنهام و آندرسون، ۲۰۰۲).  $\min AIC_c$  متعلق به مدلی است که کمترین مقدار  $AIC_c$  را دارد.

رابطه ۲۷:  $\Delta i = AIC_c - \min AIC_c$

## نتایج و بحث

مدل‌های زمان دمایی مبتنی بر توزیع‌های آماری مختلف به روند جوانه‌زنی تجمعی غده‌های اویارسلام ارغوانی تحت دماهای مختلف حاکمی برآزش داده شد. ارزیابی فراسنجه‌ها حاکمی از آن می‌باشد که دقت مدل‌ها متفاوت می‌باشد (جدول ۱). مقایسه بر پایه  $R^2$  نشان می‌دهد که همه مدل‌ها برآزش مناسبی (بیشتر از ۰/۹۵) دارند؛ اما مقایسه مدل‌ها بر اساس  $RMSE$  و  $RMSE\%$

<sup>1</sup> Mayer and Bulter

<sup>2</sup> Shcherbakov

<sup>3</sup> Araya

<sup>4</sup> Burnham and Anderson

<sup>5</sup> Akaike

فراسنجه  $\mu_2$  بیانگر دمای بیشینه‌ای است که درصد جوانه‌زنی غده‌ها در آن همان جوانه‌زنی نهایی ( $G_{max}$ ) می‌باشد و در دماهای بیش از آن جوانه‌زنی غده‌ها متوقف می‌شود.

(لگ لجستیک) درجه سلسیوس ساعت تخمین زده شد. پیش‌بینی فراسنجه  $\lambda_1$  توسط مدل‌های وایبل و لگ لجستیک به ترتیب  $3/17$  و  $4/04$  می‌باشد (جدول ۱). مدل‌های مبتنی بر اساس توزیع لجستیک و نرمال، پراکنش  $\theta T(g)$  را بر حسب اندازه  $\sigma_1$  و توزیع گامیل بر حسب اندازه هر دو فراسنجه  $\sigma_1$  و  $\lambda_1$  تعیین می‌کند (درخشان و همکاران، ۲۰۱۸).

$\theta T_{(50)}$  یا زمان دمایی لازم برای جوانه‌زنی نصف غده‌ها توسط مدل نرمال و لجستیک برآورد نزدیکی داشت و حدود  $123/71$  و  $124/10$  درجه سلسیوس روز بود. مدل‌های مختلف زمان دمایی نیز در برآورد بعضی فراسنجه‌های مرتبط با دماهای بالاتر از بهینه تفاوت نشان دادند (جدول ۱).  $\theta T_c$  (همان زمان دمایی که برای اتمام جوانه‌زنی غده‌ها در دماهای بالاتر از بهینه لازم است) توسط مدل‌های مختلف اختلاف معنی داری نداشت و بین  $59/88$  (توزیع لگ لجستیک) تا  $60/85$  (توزیع وایبل) درجه سلسیوس روز برآورد شد. در تحقیق دیگر، این فراسنجه برای کلزای بهاره رقم (RGS003) توسط مدل‌های مختلف اختلاف نداشت و حدود  $28/72$  درجه سلسیوس ساعت تخمین زده شد (درخشان و همکاران ۲۰۱۶).  $T_{c(50)}$  یا دمایی که در آن نیمی از غده‌ها (۵۰ درصد) جوانه‌زنی خود را از دست می‌دهند توسط دو مدل نرمال و لجستیک برآورد ( $44/77$  و  $44/55$  درجه سلسیوس) یکسانی داشت؛ به عبارت دیگر، این دمای بیشینه‌ای می‌باشد که باعث بازدارندگی از جوانه‌زنی نیمی از غده‌ها (۵۰ درصد) از جوانه‌زنی نهایی ( $G_{max}$ ) می‌شود. این فراسنجه توسط دو مدل نرمال و لجستیک برای کلزای بهاره رقم (RGS003)  $34/44$  درجه سلسیوس گزارش شده است (درخشان و همکاران، ۲۰۱۸). بیشترین مقدار فراسنجه  $\mu_2$  ( $41/95$  درجه سلسیوس) توسط مدل گامیل برآورد شد که همسو با نتایج درخشان و همکاران (۲۰۱۸) می‌باشد. در دماهای بالاتر از بهینه،  $\mu_2$  در مدل گامیل مد توزیع  $T_{c(g)}$  یا همان دمای بیشینه می‌باشد که  $64$  درصد غده‌های جوانه زده‌اند (درخشان و همکاران، ۲۰۱۸). این فراسنجه بر اساس توزیع‌های آماری لگ لجستیک و وایبل به ترتیب  $28/19$  و  $33/04$  درجه سلسیوس تخمین زده شده‌اند. در این توزیع‌های آماری

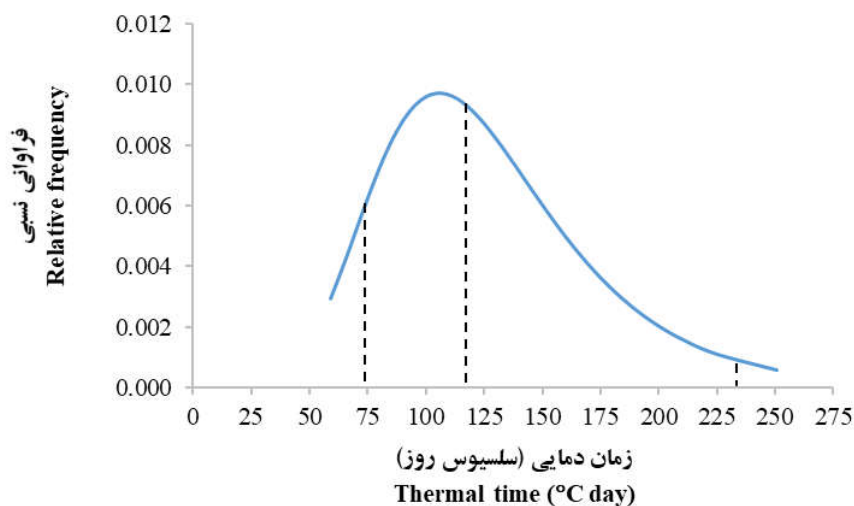
جدول ۱. برازش مدل‌های مختلف زمان دمایی بر روند جوانه‌زنی تجزیه غده‌ای اویارسلام ارغوانی تحت دماهای ثابت و نیکویی برازش حاصل از آنها. بیشینه جوانه‌زنی ( $G_{max}$ )، دمای کمینه ( $T_b$ )، کمینه زمان دمایی لازم برای جوانه‌زنی ۵۰ درصد از جمعیت غده‌ها در دماهای زیر بهینه ( $\theta_{T50}$ )، زمان دمایی که برای اتمام جوانه‌زنی غده‌ها در دماهای بالاتر از بهینه ( $\theta(T_c)$ ) فراسجده، جایگاه توزیع زمان دمایی زیر حد بهینه ( $\mu_1$ )، پراکنش یا انحراف استاندارد توزیع زمان دمایی زیر حد بهینه ( $\sigma_1$ )، شکل توزیع زمان دمایی زیر حد بهینه ( $\lambda_1$ )، دمای که در آن نیمی از غده‌ها (۵۰ درصد) جوانه‌زنی خود را از دست می‌دهند ( $T_{50}$ )، جایگاه توزیع دماهای بیشینه ( $\mu_2$ )، شکل توزیع دماهای بیشینه ( $\lambda_2$ )، ضریب تغییرات، RMSE، ریشه میانگین مربعات غده، NRMSE، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده یا  $\Delta i$  ضرایب آکایک تصحیح شده،  $\Delta i$  شاخص رتبه دهی مدل‌ها کمتر از ۲ به معنی عدم تفاوت بین مدل‌ها می‌باشد. مقادیر بدون پراکنش خطای استاندارد میانگین‌ها می‌باشد.

**Table 1.** Thermal-time models fitted to sprouting time courses of purple nutsedge tubers against constant temperatures and goodness of fit criteria. Maximum temperature ( $G_{max}$ ), minimum temperature ( $T_b$ ), thermal-time required for 50% germination of seed population at sub-optimal temperatures, Thermal-time required to complete germination at supra-optimal temperatures ( $\theta(T_c)$  (°C h); Location parameter of sub-optimal thermal-time distribution ( $\mu_1$ ) (°C h); Standard deviation of sub-optimal thermal-time distribution ( $\sigma_1$ ) (°C h); Shape parameter of sub-optimal thermal-time distribution ( $\lambda_1$ ); Maximum temperature to inhibit 50% germination of seed population ( $T_{50}$ ) (°C); Location parameter of maximum temperatures distribution ( $\mu_2$ ) (°C); Standard deviation of maximum temperatures distribution ( $\sigma_2$ ) (°C); Shape parameter of maximum temperatures distribution ( $\lambda_2$ ); RMSE=Root Mean Square Error; NRMSE=Normalized Root Mean Square Error (RMSE%); AICc= Akaike Information Criteria;  $\Delta i$ = an index for ranking the models,  $\Delta i < 2$  means no difference between two models, the values in parenthesis are the standard error of the means.

فراسجده‌ها (Parameters)

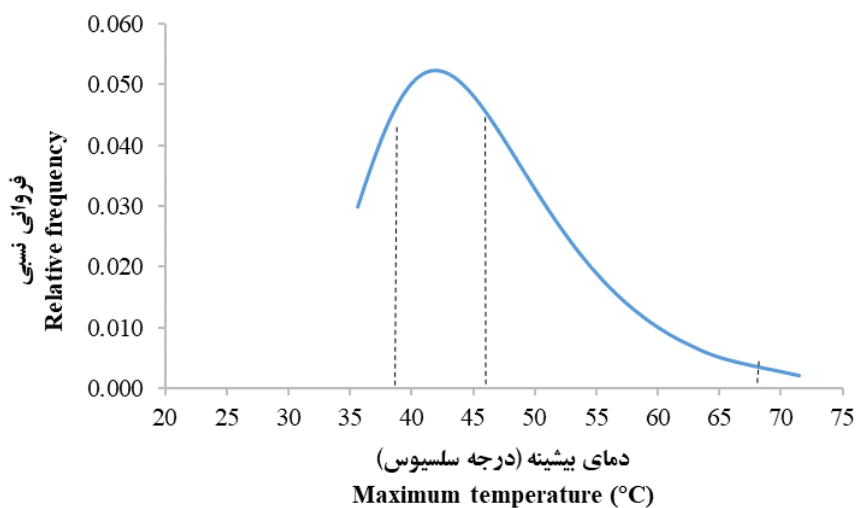
Model	$G_{max}$	$T_b$ (°C)	(Suboptimal temperatures)					(Supraoptimal temperatures)					(Goodness of fit)				
			$\mu_1$ (°C d)	$\sigma_1$ (°C d)	$\theta_{T50}$ (°C d)	$\lambda_1$	$\theta T_c$ (°C d)	$T_{50}$ (°C d)	$\mu_2$ (°C)	$\sigma_2$ (°C)	$\lambda_2$	RMSE	RMSE%	AICc	$\Delta i$	$R^2$	
نرمال Normal	0.93 ±0.0008	7.24 ±0.034	-	42.84 ±0.25	124.1 ±0.45	-	60.12 ±0.56	44.77 ±0.10	-	6.95 ±0.073	-	0.076	12.50	-1204.72	3.41	0.956	
لجستیک Logistic	0.93 ±0.0013	7.28 ±0.034	-	25.69 ±0.16	122.71 ±0.46	-	60.76 ±0.059	44.75 ±0.11	-	4.14 ±0.046	-	0.077	12.50	-1203.39	4.74	0.950	
لگ لجستیک Log logistic	0.93 ±0.0008	7.47 ±0.034	12.52 ±2.78	105.12 ±2.86	-	4.04 ±0.11	59.88 ±0.55	-	28.19 ±0.33	16.52 ±0.32	2.92 ±0.074	0.074	11.98	-1203.97	4.16	0.954	
وایبل Weibull	0.94 ±0.001	7.10 ±0.035	31.51 ±2.91	112.1 ±3.0057	-	3.17 ±0.098	60.85 ±0.64	-	33.04 ±0.13	14.778 ±0.169	1.50 ±0.025	0.081	13.25	-1194.70	13.42	0.950	
گامبل Gumbel	0.93 ±0.0008	7.36 ±0.034	105.8 ±0.39	37.83 ±0.23	-	-	60.41 ±0.53	-	41.95 ±0.07	7.02 ±0.067	-	0.072	11.75	-1208.13	-	0.956	





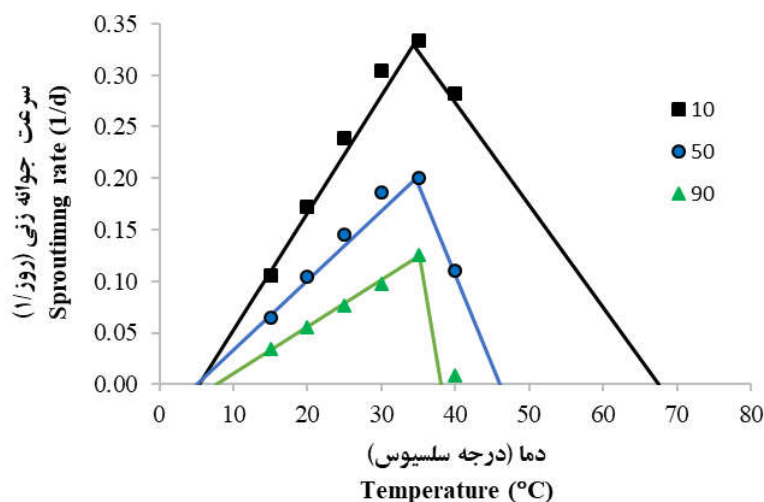
شکل ۱. تابع توزیع احتمال زمان دمایی برآورد شده زیر دمای بهینه بر اساس توزیع گامبل برای غده‌های اویارسلام ارغوانی. خطوط عمودی از چپ به راست  $(\theta T_{(90)})$  و  $(\theta T_{(50)})$  و  $(\theta T_{(10)})$  می‌باشد.

**Fig. 1.** Probability distribution function of the predicted sub-optimal thermal-time based on the Log-Normal distribution temperatures based on the Gumble distribution for purple nutsedge tubers. Vertical lines from left to right shows  $\theta T_{(10)}$ ,  $\theta T_{(50)}$  and  $\theta T_{(90)}$ .



شکل ۲. تابع توزیع احتمال دماهای بیشینه ( $T_c$ ) برآورد شده بر اساس توزیع گامبل برای غده‌های اویارسلام ارغوانی. خطوط عمودی از چپ به راست  $T_{c(10)}$ ،  $T_{c(50)}$  و  $T_{c(90)}$  می‌باشد.

**Fig. 2.** Probability distribution function of the predicted maximum temperatures ( $T_c$ ) based on the Gumble distribution for purple nutsedge tubers. Vertical lines from right to left shows,  $T_{c(10)}$ ,  $T_{c(50)}$  and  $T_{c(90)}$ .



شکل ۳. سرعت جوانه‌زنی مشاهده شده (نمادها) و پیش‌بینی شده توسط مدل (خطوط) غده‌های اویارسلام ارغوانی تحت دماهای مختلف برای کسرهای ۱۰، ۵۰ و ۹۰ درصد جوانه‌زنی.

**Fig. 3.** Observed (symbols) and predicted (lines) sprouting rate for purple nutsedge tubers for fractions, 10 (GR10), 50 (GR50) and 90% (GR90).

زمان دمایی کمتر، درصد بیشتری از بذر یا غده جوانه می‌زنند. مقایسه رفتار جوانه‌زنی اندام‌های رویشی مانند غده و همچنین ریزوم قمیش حاکی از آن است که این اندام‌های رویشی علی‌رغم بزرگتر بودن و داشتن مواد ذخیره‌ای، به‌واسطه نیاز به زمان دمایی بیشتر از سرعت جوانه‌زنی کمتری نسبت به بذر (درخشان و همکاران، ۲۰۱۸) برخوردار هستند. تابع توزیع احتمال دماهای بیشینه برآورد شده بر اساس توزیع گامبل برای غده‌های اویارسلام ارغوانی در شکل ۲ ارائه شده است. بیشینه دما برای جوانه‌زنی با احتمال ۱۰ درصد ( $T_c(10)$ )؛ ۹۰ درصد بازدارندگی دمایی جوانه‌زنی، ۵۰ درصد ( $T_c(50)$ )؛ ۵۰ درصد بازدارندگی دمایی جوانه‌زنی، و ۹۰ درصد ( $T_c(90)$ )؛ ۱۰ درصد بازدارندگی دمایی جوانه‌زنی، از جوانه‌زنی نهایی به ترتیب معادل ۶۷/۸۳، ۴۶/۱۰ و ۳۸/۰۵ درجه سلسیوس می‌باشد. همانطور از نتایج مشخص است، توزیع زمان دمایی زیر دمای بهینه (شکل ۱) و توزیع دماهای بیشینه (شکل ۲) جمعیت غده‌های اویارسلام ارغوانی بر اساس توزیع گامبل دارای چولگی به راست می‌باشند. علاوه بر این، در مدل زمان دمایی بر پایه وایبل اگر فراسنجه ۸ بالاتر از ۲/۶ باشد نشان از چولگی به راست بودن توزیع داده‌هاست (مسگران و

در نتایج درخشان و همکاران (۲۰۱۸) فراسنجه ۲۱۸ برای کلزای بهاره رقم (RGS003) بسته به توزیع‌های مختلف بکار رفته بین ۳۳/۱۲ تا ۳۳/۴۵ درجه سلسیوس برآورد شد. فراسنجه  $\sigma_2$  بر اساس توزیع‌های مختلف بین ۴/۱۴ (مدل لجستیک) تا ۱۶/۵۲ (مدل لگ لجستیک) درجه سلسیوس و فراسنجه  $\lambda_2$  برای مدل‌های لگ لجستیک و وایبل به ترتیب ۲/۹۲ و ۱/۵۰ برآورد شدند (جدول ۱). تابع توزیع احتمال زمان دمایی برآورد شده توسط مدل گامبل برای جوانه‌زنی غده‌های اویارسلام ارغوانی در دماهای کمتر از دمای بهینه در شکل ۱ نشان داده شده است. به این صورت که زمان دمایی ( $\theta T_{(g)}$ ) لازم برای رسیدن به ۱۰ ( $\theta T_{(10)}$ )، ۵۰ ( $\theta T_{(50)}$ ) و ۹۰ ( $\theta T_{(90)}$ ) درصد جوانه‌زنی نسبت به جوانه‌زنی نهایی ( $G_{max}$ ) به ترتیب معادل ۷۵/۴۶، ۱۲۳/۸۴ و ۲۳۵/۰۸ درجه سلسیوس روز نیاز می‌باشد. زمان دمایی لازم برای ۵۰ درصد جوانه‌زنی ریزوم و رشد گیاه قمیش تا مرحله ۹ برگی آن به ترتیب ۹۴ و ۱۲۹ درجه سلسیوس در روز تحت شرایط مزرعه‌ای برآورد شده است (گرازیانی و آستین موس، ۲۰۰۹). زمان دمایی ( $\theta T_{(g)}$ ) به عنوان یک شاخص از سرعت جوانه‌زنی در دماهای زیر دمای بهینه بوده و هرچه کمتر باشد سرعت جوانه‌زنی افزایش می‌یابد (درخشان و همکاران، ۲۰۱۶). بدین معنی که با

### نتیجه‌گیری

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که مدل‌های زمان دمایی توسعه یافته برای پیش‌بینی جوانه‌زنی بذر قادر هستند پاسخ جوانه‌زنی غده‌های اویارسلام ارغوانی به دما را نیز با دقت بالا ( $R^2=0/95$ ) پیش‌بینی کنند. مدل‌های مختلف جوانه‌زنی نهایی ( $G_{max}$ ) را بین  $0/93$  تا  $0/94$  (۹۳ تا ۹۴ درصد) برآورد کرده‌اند. دمای پایه توسط مدل‌های مختلف بین  $7/10$  تا  $7/47$  درجه سلسیوس برآورد شد. از طرف دیگر، در بین مدل‌ها، مدل بر پایه توزیع گامبل، چوله به راست بودن زمان دمایی و دمای بیشینه را اثبات کرد. فراسنجه‌های حاصل از مدل گامبل قابل استفاده برای پیش‌بینی جوانه‌زنی غده‌های اویارسلام ارغوانی می‌باشند. از آنجاییکه غده‌های اویارسلام ارغوانی از عمق‌های زیاد (تا ۳۰ سانتی‌متر) نیز قابلیت سبز شدن دارند (مشاهده نگارنده)، مقایسه مدل‌های زمان دمایی در شرایط مزرعه از عمق‌های مختلف، ارزیابی دقیق‌تری از سبز شدن آنها در شرایط طبیعی در اختیار می‌گذارد.

### سپاسگزاری

بدین وسیله از دانشگاه فردوسی مشهد جهت حمایت مالی از این تحقیق به شماره ۳/۳۳۴۳۲ قدردانی می‌شود.

همکاران، ۲۰۱۳؛ وات<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۰؛ درخشان و همکاران، ۲۰۱۶. در این آزمایش، این فراسنجه برای زمان دمایی زیر دمای بهینه بالاتر از  $2/6$  می‌باشد اما در مورد دماهای بیشینه کمتر می‌باشد (جدول ۱). همانند نتایج تحقیق حاضر، چوله به راست بودن هر دو فراسنجه برای بذرهای کلزا در برازش مدل لگ نرمال نیز گزارش شده است (درخشان و همکاران، ۲۰۱۸). چولگی به راست زمان دمایی حاکی از آن است که جمعیت بذری (غده) دارای بذرهایی با مقدار زمان دمایی بسیار کمتری می‌باشد که در دماهای زیر بهینه با سرعت بالایی جوانه می‌زنند (درخشان و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین برای دماهای بیشینه چولگی به راست بیانگر این می‌باشد که این جمعیت‌های بذری (غده) دارای بذرهایی با دمای بیشینه بسیار کمتری برای جوانه‌زنی می‌باشند (درخشان و همکاران، ۲۰۱۸). به‌خاطر اینکه اختلاف دمایی بین محیط آبنوشی و دمای بیشینه بر سرعت و درصد جوانه‌زنی کارا می‌باشد، کسر بیشتری از جمعیت‌های بذری (غده) در دماهای بیشتر از بهینه قابلیت جوانه‌زنی دارند و بازدارندگی دمایی بخش مشخصی از این جمعیت‌ها در دمای بالاتری اتفاق می‌افتد (درخشان و همکاران، ۲۰۱۸). با استفاده از ضرایب حاصل از مدل جوانه‌زنی دمایی گامبل سرعت جوانه‌زنی برای زیر جمعیت‌های مختلف (رابطه‌های ۲۲ و ۲۳) محاسبه شد (شکل ۳). مقادیر دمای بهینه برای هر زیر جمعیت از طریق محاسبه نقطه تماس تابع‌های پاسخ دمایی زیر و بیشتر از بهینه تعیین شد (دومار و همکاران، ۱۹۹۰). دمای بهینه مربوط به زیر جمعیت‌های ۱۰، ۵۰ و ۹۰ درصد جوانه‌زنی غده‌های اویارسلام ارغوانی به ترتیب  $34/30$ ،  $34/63$  و  $35/08$  درجه سلسیوس محاسبه شد که روند افزایشی دارد؛ اما در تحقیق دیگر دمای بهینه برای زیر جمعیت‌های مختلف (از ۱۰ تا ۹۵ درصد جوانه‌زنی) روند کاهشی از  $32/83$  تا  $31/81$  درجه سلسیوس نشان داد (درخشان و همکاران، ۲۰۱۸).

<sup>1</sup> Watt

<sup>2</sup> Dumur

## منابع

- Aikman, D.P., Benjamin, L.R., Bond, W. and Mead, A. 1995. Use of a simple mechanistic model to simulate weed and crop growth. In: Proceedings of the Brighton Crop Protection Conference - Weeds. Farnham, UK: British Crop Protection Council, 906-910.
- Akaike, H. 1974. A new look at the statistical model identification. IEEE Transactions on Automatic Control, 19(6):716-723. <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>
- Alvarado, V. and Bradford, K.J. 2002. A hydrothermal time model explains the cardinal temperatures for seed germination. Plant, Cell and Environment, 25(8): 1061-1069. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2002.00894.x>
- Araya, A., Kisekka, I., Gowda, P.H. and Vara Prasad, P.V. 2017. Evaluation of water-limited cropping systems in a semi-arid climate using DSSAT-CSM. Agricultural Systems, 150: 86-98. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.10.007>
- Bradford, K.J. 2002. Application of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. Weed Science, 50(2): 248-260. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2002\)050\[0248:AOHTTQ\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2002)050[0248:AOHTTQ]2.0.CO;2)
- Burnham, K.P. and Anderson, D.R. 2002. Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information Theoretic Approach. Springer, New York, USA. p.488.
- Cousens, R., Brain, P., O'Donovan, J.T. and O'Sullivan, P.A. 1987. The use of biologically realistic equations to describe the effects of weed density and relative time of emergence on crop yield. Weed Science, 35: 720-725. <https://doi.org/10.1017/S0043174500060872>
- Covell, S., Ellis, R. H., Roberts, E.H. and Summerfield, R.J. 1986. The influence of temperature on seed germination rate in grain legumes. I. A comparison of chickpea, lentil, soybean and cowpea at constant temperatures. Journal of Experimental Botany, 37(10): 1503-1515. <https://doi.org/10.1093/jxb/37.10.1503>
- Derakhshan, A., Bakhshandeh, A., Moradi-Telavat, M.R., Siadat, S.A. and Andarzian, B. 2018. Comparison of probability distribution functions in thermal-time models for modeling of spring oilseed rape germination to temperature. Iranian Journal of Field Crop Science, 49(3): 83-98. [In Persian with English Summary].
- Derakhshan, A., Moradi-Telavat, M.R. and Siadat, S.A. 2016. Hydrottime analysis of *Melilotus officinalis*, *Sinapis arvensis* and *Hordeum vulgare* seed germination. Iranian Journal of Plant Protection, 30(3): 518-532. [In Persian with English Summary].
- Dor, E. and Hershenhorn, J. 2013. Effect of low temperature on purple nutsedge (*Cyperus rotundus*) reproductive biology. Weed Science, 61: 239-243. <https://doi.org/10.1614/WS-D-12-00061.1>
- Dumur, D., Pilbeam, C.J. and Craigon, J. 1990. Use of the weibull function to calculate cardinal temperatures in faba bean. Journal of Experimental Botany, 41(11): 1423-1430. <https://doi.org/10.1093/jxb/41.11.1423>
- Ellis, R.H., Covell, S., Roberts, E.H. and Summerfield, R.J. 1986. The influence of temperature on seed germination rate in grain legumes. II. Interspecific variation in chickpea (*Cicer arietinum* L.) at constant temperature. Journal of Experimental Botany, 37: 1503-1515. <https://doi.org/10.1093/jxb/37.10.1503>
- Favrelière, E., Ronceux, A., Pernel J. and Meynard J.M. 2020. Nonchemical control of a perennial weed, *Cirsium arvense*, in arable cropping systems. A review. Agronomy for Sustainable Development, 40(4): 1-17. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00635-2>
- Garcia-Huidobro, J., Monteith, J.L., and Squire, G.R. 1982. Time, temperature and germination of Pearl Millet (*Pennisetum typhoides* S. & H.) I. constant temperature. Journal of Experimental Botany, 33: 288-296. <https://doi.org/10.1093/jxb/33.2.288>

- Gonzalez- andujar, J.L., Chantre, G.R., Morvillo, C., Blanco, A. and Forcella, F. 2016. Predicting field weed emergence with empirical models and soft computing techniques. *Weed Research*, 56: 415-423. <https://doi.org/10.1111/wre.12223>
- Graziani, A. and Steinmaus, S.J. 2009. Hydrothermal and thermal time models for the invasive grass, *Arundo donax*. *Aquatic Botany*, 90(1): 78-84. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2008.06.003>
- Grundy, A.C., Phelps, K., Reader, R.J. and Burston, S. 2000. Modelling the germination of *Stellaria media* using the concept of hydrothermal time. *New Phytologist*, 148(3): 433-444. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00778.x>
- Hardegree, S.P. 2006. Predicting germination response to temperature. I. Cardinal-temperature models and subpopulation-specific regression. *Annals of Botany*, 97(6): 1115-1125. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl071>
- Holm, L.R.G., Plucknett, D.L., Pancho, J.V. and Herberger, J.P. 1977. *The World's Worst Weeds. Distribution and Biology*. University, Press Hawaii, Honolulu.
- Holt, J.S. and Orcutt, D.R. 1996. Temperature thresholds for bud sprouting in perennial weeds and seed germination in cotton. *Weed Science*, 44(3): 523-533. <https://doi.org/10.1017/S0043174500094285>
- Lati, R.N., Filin, S. and Eizenberg, H. 2011. Temperature- and radiation-based models for predicting spatial growth of purple nutsedge (*Cyperus rotundus*). *Weed Science*, 59(4): 476-482. <https://doi.org/10.1614/WS-D-11-00007.1>
- Loddo, D., Masin, R., Otto, S., Zanin, G. 2011. Estimation of base temperature for *Sorghum halepense* rhizome sprouting. *Weed Research*, 50: 10-11. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2011.00886.x>
- Mayer, D.G. and Butler, D.G. 1993. Statistical validation. *Ecological Modeling*, 68: 21-32. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(93\)90105-2](https://doi.org/10.1016/0304-3800(93)90105-2)
- Mesgaran, M.B., Mashhadi, H.R., Alizadeh, H., Hunt, J., Young, K.R. and Cousens, R.D. 2013. Importance of distribution function selection for hydrothermal time models of seed germination. *Weed Research*, 53(2): 89-101. <https://doi.org/10.1111/wre.12008>
- Nishimoto, R.K. 2001. Purple nutsedge tuber sprouting. *Weed Biology and Management*, 1: 203-208. <https://doi.org/10.1046/j.1445-6664.2001.00037.x>
- Shcherbakov, M.V., Brebels, A., Shcherbakova, N.L., Tyukov, A.P., Janovsky, T.A. and evich Kamaev, V.A. 2013. A survey of forecast error measures. *World Applied Sciences Journal*, 24: 171-176.
- Singh, M., Bhullar, M.S. and Chauhan, B.S. 2017. Relative time of weed and crop emergence is crucial for managing weed seed production: A study under an aerobic rice system. *Crop Protection*, 99: 33-38. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.05.013>
- Siriwardana, G. and Nishimoto, R.K. 1987. Propagules of purple nutsedge (*Cyperus rotundus*) in soil. *Weed Technology*, 1: 217-220. <https://doi.org/10.1017/S0890037X00029560>
- Steinmaus, S.J., Prather, T.S. and Holt, J.S. 2000. Estimation of base temperatures for nine weed species. *Journal of Experimental Botany*, 51: 275-286. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.343.275>
- Thullen, R.J. and Keeley, P.E. 1979. Seed production and germination in *Cyperus esculentus* and *C. rotundus*. *Weed Science*, 27(5): 502-505. <https://doi.org/10.1017/S0043174500044489>
- Tumbleson, M.E. and Kommedahl, T. 1962. Factors affecting dormancy in tubers of *Cyperus esculentus*. *Botanical Gazette*, 123(3): 186-190. <https://doi.org/10.1086/336148>
- 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(9): 1267-1272. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.01.017>

## Research Article

**Quantification of Tuber Sprouting of Purple Nutsedge (*Cyperus rotundus*) Response Against Temperature Using Thermal Time Models**Sajjad Mijani <sup>1</sup>, Mehdi Rastgoo <sup>1,\*</sup>, Ali Ghanbari <sup>1</sup>, Mehdi Nasiri Mahallati <sup>1</sup>**Extended abstract**

**Introduction:** Purple nutsedge (*Cyperus rotundus* L.) is one of the problematic weeds worldwide prevalent in tropical and subtropical regions. Tubers are major tools through which purple nutsedge is propagated, whereas its seeds have a low ability to germinate. Therefore, evaluation of the response of tubers against environmental agents is great of importance to know the germination and emergence time. Germination, in turn, is mostly affected by temperature, among other environmental factors. Various models that are recognized as the Thermal Time model have been introduced to describe the seed germination pattern against temperature. Since predicting the emergence of reproductive organs through the modeling is great of importance for improving the control strategies; the present study was carried out to investigate the response of tuber sprouting of purple nutsedge (*Cyperus rotundus*) against temperature using thermal time models.

**Material and methods:** The experiment was carried out as a randomized complete block design with three replications in a germinator. Each replicate was placed on a separate shelf. For each replicate, 15 tubers were placed inside a 20 cm Petri dish on a filter paper and then 100 ml of water was added. The experiment was performed separately for constant temperatures of 10, 15, 20, 25, 30, 35, and 40 °C in absolute darkness. To analyze the data as modeling, five thermal time models were evaluated based on the statistical distributions of normal, Weibull, Gumble, logistic and log logistic. Indices such as  $R^2$ , RMSE, RMSE%, and AICc were used to evaluate the models.

**Results:** The results showed that all models predicted the germination response of purple nutsedge tuber with high accuracy ( $R^2 = 0.95$ ). A comparison of models based on AICc values showed significant superiority of the Gumble model over other models. According to this index, there was no difference between logistic and log logistic models with normal. Among the models, Weibull was identified as the most inappropriate model. Different models estimated the final germination (Gmax) between 0.93 to 0.94 (93 to 94%). The base temperature was estimated through different models from 7.10 to 7.47 °C. Among the models, the model based on the Gumble distribution proved the skew to the right of the thermal time and Tm. According to the Gumble model, the thermal time parameters required to reach 50% germination ( $\theta T(50)$ ) equals 123.8 °C day and the maximum temperature for germination at 50% probability ( $T_c(50)$ ) was estimated to be 46.10 °C.

**Conclusion:** the thermal time model based on the Gumble probability distribution was most plausible among the models. Also, a distributed right skewness related to the thermal time and Tm was proved through the Gumble model. The parameters obtained from the Gumble model can be used to predict the sprouting of purple nutsedge tubers.

**Keywords:** Vegetative organs, Gumble distribution, Cardinal temperatures, Modelling

**Highlights:**

- 1- Thermal time models were evaluated for prediction of tuber sprouting of purple nutsedge.
- 2- The thermal time model based on the Gumble distribution was superior over the normal distribution.
- 3- Thermal time and Tm for tuber sprouting of purple nutsedge were distributed as right skewness.

<sup>1</sup> Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture-Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.23831251.1400.8.1.5.9>

\* Corresponding author, E-mail: [m.rastgoo@um.ac.ir](mailto:m.rastgoo@um.ac.ir)

(Received: 25.04.2020; Accepted: 20.12.2020)

DOI: 10.52547/yujs.8.1.123



CrossMark