

مقایسه مدل‌های مختلف جهت تعیین زمان تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی: مطالعه موردی روی بذرهای پنبه (*Gossypium hirsutum*)

فرناز پورعلی^۱، فرشید قادری‌فر^{۲*}، الیاس سلطانی^۳، محمد هادی پهلوانی^۴

چکیده مبسوط

مقدمه: سرعت جوانه‌زنی یکی از مهم‌ترین شاخص‌های جوانه‌زنی می‌باشد که در اکثر مطالعات برای مقایسه اثرات تیمارهای مختلف بر جوانه‌زنی بذرها استفاده می‌شود. محققان برای محاسبه سرعت جوانه‌زنی از معکوس زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی ($1/D_{50}$) استفاده می‌کنند. یکی از روش‌های محاسبه زمان تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی (D_{50})، استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی از قبیل لجستیک، گامپرتز، ریچارد، ویبول و هیل می‌باشد. همچنین برای محاسبه این پارامتر از مدل‌های تجربی ساده از قبیل مدل ارائه شده توسط فاروق و همکاران و الیس و روبرتز استفاده می‌شود. حال سوالی که پیش می‌آید این است که کدامیک از این روش‌ها پیش‌بینی دقیقی از D_{50} در اختیار محقق قرار می‌دهد. هدف از این تحقیق محاسبه D_{50} با روش‌های مختلف در جوانه‌زنی بذرهای پنبه می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در این آزمایش، بذرهای پنبه در سه دمای ۱۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد در سه تکرار قرار گرفتند و بذرهای جوانه‌زده روزانه چندین بار شمارش شد. برای محاسبه D_{50} از چندین مدل رگرسیون غیرخطی شامل مدل‌های گامپرتز، لجستیک، هیل (چهار پارامتره)، ریچارد و ویبول استفاده شد. همچنین، برای محاسبه سرعت جوانه‌زنی از مدل‌های ارائه شده توسط فاروق و همکاران و الیس و روبرتز استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که کلیه مدل‌های رگرسیون غیرخطی برازش مناسبی به داده‌های جوانه‌زنی داشتند، اما مدل‌های لجستیک، هیل و ویبول نسبت به سایر مدل‌ها پیش‌بینی بهتری در برآورد D_{50} داشتند. همچنین، D_{50} محاسبه شده توسط مدل فاروق مشابه مقدار برآورد شده توسط مدل‌های رگرسیون غیرخطی بود؛ اما مقدار برآورد شده توسط مدل آلیس و روبرتز بیشتر از مقدار برآورد شده از سایر مدل‌ها بود.

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی، نتایج این تحقیق نشان داد که برای محاسبه D_{50} می‌توان از مدل‌های رگرسیون غیرخطی استفاده کرد. در این تحقیق مدل‌های لجستیک، هیل و ویبول برازش خوبی به داده‌های درصد جوانه‌زنی تجمعی بذرهای پنبه در مقابل زمان در دماهای مختلف داشتند. این مدل‌ها دارای ضرایبی می‌باشند که دارای مفهوم زیستی شامل حداکثر درصد جوانه‌زنی، زمان تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی و زمان تا شروع جوانه‌زنی می‌باشند. همچنین، زمانی که محقق تنها به دنبال اندازه‌گیری D_{50} باشد و علاوه بر این با نرم‌افزارهای آماری آشنا نباشد، می‌تواند از فرمول تجربی ارائه شده در این مقاله استفاده کند.

واژه‌های کلیدی: سرعت جوانه‌زنی، قدرت بذر، مدل رگرسیون غیرخطی.

جنبه‌های نوآوری:

- ۱- محاسبه زمان تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی با روش‌های مختلف در بذرهای پنبه.
- ۲- استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی در محاسبه زمان تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی در بذرهای پنبه.
- ۳- معرفی روش مناسب به عنوان روش دقیق‌تر و بهتر جهت محاسبه زمان تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی در بذرهای پنبه.

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد در رشته زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی <http://dorl.net/dor/20.1001.1.23831251.1397.5.2.9.4>

<http://dx.doi.org/10.29252/yujs.5.2.1>



CrossMark

* رایانامه نویسنده مسئول: farshidghaderifar@gau.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۰۶)

مقدمه

امروزه مطالعات زیادی در زمینه بررسی اثر تیمارهای مختلف از قبیل شوری، خشکی، دما، پرایمینگ، انبارداری، تیمارهای رفع کمون و غیره بر قابلیت جوانه‌زنی بذرهای گیاهان زراعی، باغی، مرتعی، جنگلی و علف‌های هرز انجام می‌شود. در این نوع تحقیقات از برخی مولفه‌های جوانه‌زنی و قدرت بذر شامل درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، یکنواختی جوانه‌زنی، زمان تا شروع جوانه‌زنی، انرژی جوانه‌زنی و شاخص‌های قدرت بذر جهت مقایسه تأثیر تیمارهای مورد نظر و در نهایت تشریح نتایج آزمون‌ها استفاده می‌شود (قادری‌فر^۱ و همکاران، ۲۰۱۲؛ کینز^۲ و همکاران، ۲۰۱۱؛ لو^۳ و همکاران، ۲۰۱۵؛ میسین^۴ و همکاران، ۲۰۱۷).

سرعت جوانه‌زنی یکی از مهم‌ترین شاخص‌های جوانه‌زنی می‌باشد که در اکثر تحقیقات برای تشخیص تیمار تأثیرگذار بر جوانه‌زنی بذر گیاه مورد نظر استفاده می‌شود. به‌طور کلی، بذرهایی که دارای سرعت جوانه‌زنی بالاتری هستند، در مزرعه سریع‌تر استقرار پیدا می‌کنند و بوته‌های حاصل از آن‌ها نیز رشد اولیه سریع‌تری خواهند داشت. این رشد اولیه و استقرار سریع‌تر باعث دریافت تشعشع خورشیدی بیشتر و در نهایت افزایش عملکرد می‌شود (سلطانی^۵ و همکاران، ۲۰۰۱؛ سلطانی و گالشی^۶، ۲۰۰۲؛ گان^۷ و همکاران، ۱۹۹۶). همچنین، رشد اولیه سریع‌تر و بسته‌شدن زودتر کانوپی در مراحل اولیه رشد گیاه باعث کاهش نفوذ نور به زیر کانوپی شده و قابلیت رقابت گیاهان زراعی با علف‌های هرز را افزایش می‌دهد (ریپتسکی و ریچاردز^۸، ۱۹۹۹). از طرفی، سرعت جوانه‌زنی به‌عنوان یکی از آزمون‌های قدرت بذر در مطالعات قدرت بذر معرفی شده است و از این آزمون

برای تعیین محموله‌های بذری با قدرت بالا استفاده می‌شود (مأوی^۹ و همکاران، ۲۰۱۶).

از روش‌های مختلفی برای تعیین سرعت جوانه‌زنی استفاده می‌شود (فاروق^{۱۰} و همکاران، ۲۰۰۴؛ ماگوئر^{۱۱}، ۱۹۶۲؛ الیس و روبرتز^{۱۲}، ۱۹۸۰؛ طهماسبی^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۵). فاروق و همکاران (۲۰۰۴) از یک فرمول تجربی ساده، زمان تا ۵۰ درصد حداکثر درصد جوانه‌زنی (D_{50}) را محاسبه کردند و با معکوس آن ($1/D_{50}$)، سرعت جوانه‌زنی بذرهای ذرت را در تیمارهای مختلف دمایی مقایسه کردند. ماگوئر (۱۹۶۲) نیز فرمول ساده و تجربه‌ای برای محاسبه سرعت جوانه‌زنی بذرهای ارائه دادند. سلطانی و همکاران (۲۰۰۲) از فرمول دیگری برای محاسبه سرعت جوانه‌زنی استفاده کردند. نامبردگان زمان تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی را با درون یابی خطی محاسبه کردند و با معکوس آن سرعت جوانه‌زنی را محاسبه کردند. الیس و روبرتز (۱۹۸۰) فرمول میانگین زمان جوانه‌زنی را به‌عنوان شاخصی از سرعت جوانه‌زنی معرفی کردند.

اکثر محققان برای محاسبه سرعت جوانه‌زنی از معکوس زمان تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی ($1/D_{50}$) استفاده می‌کنند (گالیندز^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۶؛ قادری‌فر و سلطانی، ۲۰۱۵؛ فاروق و همکاران، ۲۰۰۴). در واقع این شاخص نشان‌دهنده مدت زمانی است که طول می‌کشد تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی رخ دهد؛ بنابراین، هر چه این زمان کوتاه‌تر باشد، سرعت جوانه‌زنی نیز بالاتر خواهد بود.

یکی از روش‌های محاسبه D_{50} ، استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی می‌باشد (لودو^{۱۵} و همکاران، ۲۰۱۸). به‌طور کلی، درصد جوانه‌زنی تجمعی بذرهای طی زمان از یک منحنی سیگموئیدی تبعیت می‌کند (حاج سیدهادی و گونزالز-آنجر^{۱۶}، ۲۰۰۹). منحنی با یک مرحله تأخیری در جوانه‌زنی شروع می‌شود که در این مرحله جوانه‌زنی

⁹ Mavi

¹⁰ Farooq

¹¹ Maguire

¹² Ellis and Roberts

¹³ Tahmasbi

¹⁴ Galindez

¹⁵ Loddo

¹⁶ Haj SeyedHadi and Gonzalez-Andujar

¹ Ghaderi-Far

² Kibinza

³ Lu

⁴ Masin

⁵ Soltani

⁶ Galeshi

⁷ Gan

⁸ Rebetzke and Richards

شامل درصد و سرعت جوانه‌زنی برای تأثیر تیمارهای مختلف بر جوانه‌زنی بذرهای مختلف استفاده شد. حال سوالی که پیش می‌آید این است که کدامیک از این روش‌ها پیش‌بینی دقیقی از سرعت جوانه‌زنی در اختیار محقق قرار می‌دهد، زیرا برآورد غلط و ناصحیح سرعت جوانه‌زنی، منجر به تفسیر غلط نتایج از آزمایش‌ها و به‌دنبال آن نتیجه‌گیری‌های غلط در کارهای تحقیقاتی می‌گردد. از این رو محاسبه دقیق سرعت جوانه‌زنی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. با توجه به موارد بیان شده، هدف از این تحقیق محاسبه سرعت جوانه‌زنی با روش‌های مختلف، مقایسه این روش‌ها و معرفی روش مناسب برای تخمین این مؤلفه مهم و پرکاربرد در جوانه‌زنی بذرهای پنبه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در آزمایشگاه تحقیقات بذر گروه زراعت دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان صورت گرفت. در این تحقیق از بذرهای پنبه رقم ساحل استفاده شد. بذرهای این رقم از موسسه تحقیقات پنبه کشور تهیه شد. قبل از شروع آزمایش، ابتدا کرک‌های پنبه با اسید سولفوریک غلیظ، کرک‌زدایی شد. پس از کرک‌زدایی، بذرها با آب فراوان شسته شدند تا بقایای اسید روی بذرهای باقی نماند. پس از شستشو، بذرهای آزمایشگاه قرار داده شدند تا خشک شوند. پس از خشک شدن، بذرهای تا شروع آزمایش در یخچال با دمای ۸ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

جوانه‌زنی بذرهای در سه دمای ۱۵ (دمای پایین برای جوانه‌زنی بذرهای پنبه)، ۲۵ (دمای مطلوب برای جوانه‌زنی پنبه) و ۴۰ (دمای بالا برای جوانه‌زنی بذرهای پنبه) درجه سانتی‌گراد انجام شد. برای این کار ۳ تکرار ۵۰ تایی بذر شمارش و در حوله کاغذی مرطوب به ابعاد ۳۰×۴۵ سانتی‌متر قرار گرفتند. سپس، حوله‌های کاغذی حاوی بذر در دماهای ۱۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. پس از شروع آزمایش، شمارش بذرهای جوانه‌زده روزانه ۲ الی ۳ بار صورت گرفت و بذرهای جوانه‌زده از حوله کاغذی برداشته شدند. معیار جوانه‌زنی خروج ریشه چه به اندازه ۲ میلی‌متر یا بیشتر بود.

صفر می‌باشد. این مرحله بسته به عوامل ژنتیکی و محیطی حاکم طی آزمایش جوانه‌زنی متفاوت می‌باشد. پس از این مرحله، مرحله‌نمایی جوانه‌زنی شروع می‌شود و بذرهای در انتهای این مرحله به حداکثر درصد جوانه‌زنی می‌رسند. پس از این مرحله، منحنی شکل ثابت به خود می‌گیرد و دیگر به جوانه‌زنی محموله بذری اضافه نمی‌شود. مدل‌هایی از قبیل لجستیک، گامپرتز، ریچارد و هیل را می‌توان به این منحنی سیگموئیدی برازش داد (گان و همکاران، ۱۹۹۶؛ جوسن^۱ و همکاران، ۲۰۱۰؛ لودو و همکاران، ۲۰۱۲؛ کولباخ و دور^۲، ۲۰۰۳). این مدل‌ها دارای ۲ الی ۴ ضریب می‌باشند که برخی از این ضرایب دارای مفهوم زیستی می‌باشد که از میان آن‌ها می‌توان به حداکثر درصد جوانه‌زنی، زمان تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی و زمان تا شروع جوانه‌زنی اشاره کرد (تی اورف و تی اورف^۳، ۲۰۱۷؛ الکاسبی^۴ و همکاران، ۲۰۰۸). الکاسبی و همکاران (۲۰۰۸) مدل چهار پارامتره هیل را برای توصیف جوانه‌زنی بذرهای در مقابل زمان پیشنهاد کردند. جوسن و همکاران (۲۰۱۰) از این مدل در توصیف درصد جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان در بذرهای آرابیدوپسیس استفاده کردند و درصد حداکثر جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، زمان تا شروع جوانه‌زنی و یکنواختی جوانه‌زنی را با این مدل محاسبه کردند. در مطالعه دیگر، قادری فر و همکاران (۲۰۱۲) از مدل لجستیک سه پارامتره برای توصیف جوانه‌زنی در بذرهای اسفرزه استفاده کردند و درصد و سرعت جوانه‌زنی را در تیمارهای مختلف بذرهای این گیاه محاسبه کردند. کولباخ و دور (۲۰۰۳) از یک مدل ویبول برای توصیف جوانه‌زنی بذرهای یک گونه علف‌هرز طی انبارداری استفاده کردند و مولفه‌های درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی و زمان تا شروع جوانه‌زنی را با این مدل محاسبه کردند. در مطالعه‌ای دیگر، حاج سیدهدادی و گونزالز-آنجر (۲۰۰۹) از مدل‌های لجستیک و گامپرتز در پیش‌بینی سبز شدن چندین گونه علف‌هرز استفاده کردند. در همه این مطالعات، برای مقایسه تیمارها از شاخص‌های آماری و ضرایب ارائه شده توسط این مدل‌ها

¹ Joosen

² Collbach and Durr

³ Tjørve and Tjørve

⁴ El-Kassaby

در این فرمول n_i تعداد بذرهاى جوانه زده در روز i ام، d_i روز i ام پس از آغاز آزمون و i روز اول، دوم، سوم و غیره پس از آغاز آزمون می‌باشد.
 D_{50} به دست آمده توسط مدل‌های مختلف با D_{50} محاسبه شده با مدل‌های تجربی با یکدیگر مقایسه شدند. مقایسه D_{50} توسط خطای معیار (SE) با نرم افزار آماری SAS انجام شد.

نتایج و بحث

برای کمی‌سازی واکنش درصد جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان در سه دما از مدل‌های گامپرتز، لجستیک (سه مدل)، هیل، ریچارد و ویبول استفاده شد (شکل ۱). این مدل‌ها از مدل‌های رایج در کمی‌سازی جوانه‌زنی است که در پیش‌بینی جوانه‌زنی بذرها طی زمان استفاده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود الگوی جوانه‌زنی بذرها در هر سه دما از یک روند سیگموئیدی تبعیت می‌کند و همه مدل‌ها به داده‌ها برازش مناسبی دارند.

برای انتخاب مدل مناسب‌تر از شاخص‌های ضریب تبیین، ضریب تبیین اصلاح شده، جذر میانگین مربعات خطا و ضریب آکائیک استفاده شد (جدول ۲). همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود همه مدل‌ها از ضریب تبیین بالایی برخوردار بودند (بالای ۹۹ درصد) که بیانگر برازش مناسب همه مدل‌ها به داده‌ها است. براساس شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا دو مدل گامپرتز و ریچارد در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد، دارای کمترین مقدار خطا در مقایسه با مدل‌های دیگر بودند. این مقدار در دمای ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد در مدل‌های گامپرتز و لجستیک ۳ کمتر از سایر مدل‌ها بود. به عبارت دیگر هر چه مقدار عددی آن کمتر باشد، مدل از دقت بالاتری در پیش‌بینی جوانه‌زنی تجمعی بذرها برخوردار می‌باشد. به طور کلی کلیه مدل‌ها به داده‌های درصد جوانه‌زنی برازش مناسبی داشتند، ولی از لحاظ پارامترهای آماری بیان شده دارای تفاوت بودند و برخی از مدل‌ها دارای دقت بیشتری بودند؛ اما این اختلاف چندان چشمگیر نبود و شاید بتوان از آن چشم‌پوشی کرد.

برای محاسبه زمان تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی از فرمول‌های رگرسیون غیرخطی و مدل‌های تجربی ساده استفاده شد. در این مطالعه از ۷ مدل رگرسیون غیرخطی کاربرد (جدول ۱) برای توصیف درصد جوانه زنی تجمعی بذرهاى پنبه در مقابل زمان در سه دما استفاده شد. برای محاسبه D_{50} توسط مدل‌های رگرسیون غیرخطی، ابتدا به داده‌های درصد جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان (ساعت) در هر دو دما، این مدل‌ها برازش داده شد. برازش مدل‌ها در نرم افزار آماری SAS با کمک رویه DUD انجام شد (سلطانی، ۲۰۰۷). برای برتری این مدل‌ها در پیش‌بینی جوانه‌زنی از شاخص‌های آماری از قبیل ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص آکائیک (AIC) استفاده شد.

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SSM}$$

$$RMSE = \sqrt{MSE}$$

$$AIC = N \times \ln\left(\frac{SSE}{N}\right) + 2 \times K$$

در این فرمول‌ها SSE مجموع مربعات خطا، SSM مجموع مربعات مدل، MSE میانگین مربعات خطا، N تعداد مشاهدات، K تعداد ضرایب مدل می‌باشد. همچنین، زمان تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی (D_{50}) با کمک مدل تجربی ارائه شده توسط فاروق و همکاران (۲۰۰۴) محاسبه شد:

$$D_{50} = t_i + \left[\frac{\frac{N}{2} - n_i}{n_j - n_i} \right] \times (t_j - t_i)$$

که در این فرمول نیز n_i و n_j به ترتیب، تعداد تجمعی بذرهاى جوانه‌زده به وسیله شمارش در زمان‌های t_i و t_j هستند (زمانی که: $n_i < \frac{N}{2} < n_j$) باشد؛ و N همان تعداد نهایی بذرهاى جوانه‌زده در آزمون می‌باشد.

میانگین زمان جوانه‌زنی (MGT) نیز با مدل ارائه شده توسط لیس و روبرتز (۱۹۸۰) محاسبه شد:

$$MGT = \frac{\sum d_i n_i}{\sum n_i}$$

جدول ۱- مدل‌های رگرسیون غیرخطی استفاده شده برای محاسبه زمان تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه زنی در بذرهای پنبه

Table 1. Non-linear regression models for calculating time up to 50% maximum germination at cottonseeds

گان و همکاران (۱۹۹۶)	$Y = G_{max} * (\exp(-\exp(-k * (X - D_{50}))))$	۱. مدل گامپرتز (Gompertze)
الکاسبی و همکاران (۲۰۰۸)	$Y = Y_0 + \frac{a * X^b}{D_{50}^b + X^b}$	۲. مدل هیل (Hill)
دالکوئیست ^۱ و همکاران (۲۰۰۷)	$Y = \frac{G_{max}}{(1 + \exp(-b * (X - D_{50})))}$	۳. مدل لجستیک ۱ (Logestic1)
هاسیسالیه‌وگلو ^۲ و همکاران (۱۹۹۹)	$Y = a + \frac{G_{max}}{1 + \exp(-b * (X - D_{50}))}$	۴. مدل لجستیک ۲ (Logestic2)
لاوسن ^۳ و همکاران (۲۰۰۶)	$Y = c + \frac{a}{(1 + (\frac{X}{D_{50}})^b)}$	۵. مدل لجستیک ۳ (Logestic3)
چنگ و گوردن ^۴ (۲۰۰۰)	$Y = G_{max} * (1 + \exp(-k * (X - D_{50})))^{-1/b}$	۶. مدل ریچارد (Richard)
کولباخ و دور (۲۰۰۳)	$Y = G_{max} * (1 - \exp(-\log(2) * (\frac{X - X_0}{D_{50} - X_0})^b))$	۷. مدل ویبول (Weibull)

در این مدل‌ها، Y درصد جوانه زنی، G_{max} حداکثر درصد جوانه زنی، D_{50} زمان تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه زنی، X_0 زمان تا شروع جوانه زنی و Y_0 عرض از مبدا محور Y می‌باشد و a ، b ، c و k ضرایب این مدل‌ها می‌باشد که به تنهایی مفهوم زیستی در مطالعات جوانه زنی ندارند.

جدول ۲- ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب آکائیک (AIC) برای مدل‌های مختلف رگرسیون غیرخطی برازش داده شده به درصد جوانه زنی بذرهای پنبه در مقابل زمان در سه دمای ۱۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد.

Table 2. Coefficient of determination (R^2), the root of the mean square error (RMSE) and akaike information criterion (AIC) for different non-linear regression models fitted to germination percentage of cottonseeds versus time at three temperatures of 15, 25 and 40 °C.

AIC			RMSE			R^2			نام مدل (Model name)
40	25	15	40	25	15	40	25	15	
-0.84	15.75	19.34	0.473	3.673	2.892	0.99	0.99	0.99	گامپرتز (Gompertze)
1.25	16.39	18.84	0.714	4.267	2.910	0.99	0.99	0.99	هیل (Hill)
4.40	17.84	19.70	1.004	4.670	2.974	0.99	0.99	0.99	لجستیک ۱ (Logestic1)
5.47	19.71	21.63	0.98	4.970	3.080	0.99	0.99	0.99	لجستیک ۲ (Logestic2)
-0.49	16.53	20.84	0.481	3.780	3.038	0.99	0.99	0.99	لجستیک ۳ (Logestic3)
6.39	19.84	21.17	1.00	4.67	2.86	0.99	0.99	0.99	ریچاردز (Richard)
-0.22	17.03	23.07	0.500	4.000	3.570	0.99	0.99	0.99	ویبول (Weibull)

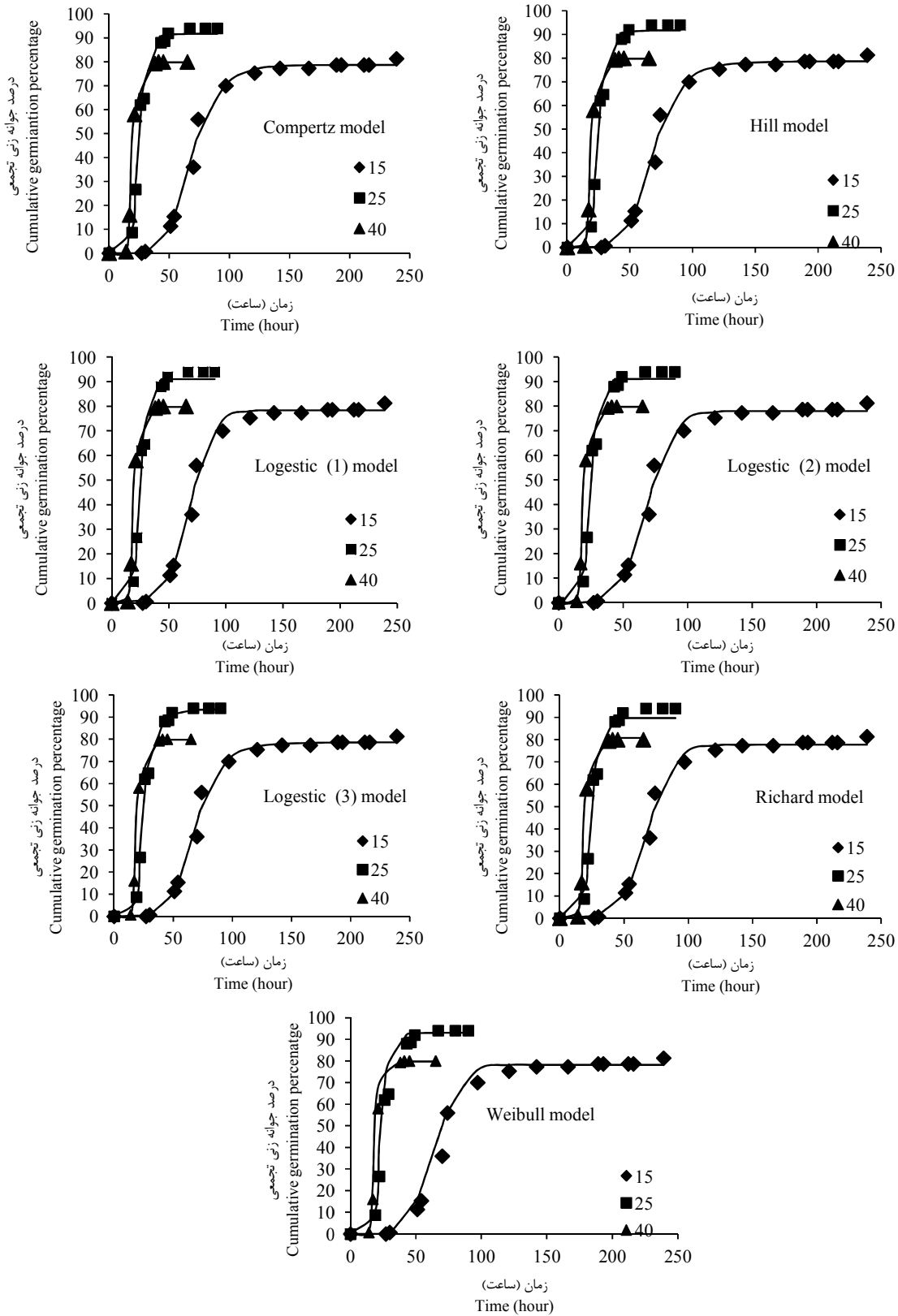
¹ Dahlquist

² Hacisalihoglu

³ Lawson

⁴ Cheng and Gordon

پورعلی و همکاران: مقایسه مدل‌های مختلف جهت تعیین زمان تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی...



شکل ۱- برازش مدل‌های مختلف رگرسیون غیرخطی به داده‌های درصد جوانه‌زنی بذرهای پنبه در سه دمای ۱۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد.
Figure 1. The fitting of nonlinear regression models germination percentage of cottonseeds at three temperatures of 15, 25 and 40 °C.

جدول ۳- پارامترهای برآورد شده برای درصد جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان در بذرهای پنبه توسط مدل‌های مختلف رگرسیون غیرخطی در سه دمای ۱۵، ۲۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد.

Table 3. Estimated parameters for cumulative germination percentage versus time in cottonseeds by different nonlinear regression models at three temperatures of 15, 25 and 45 °C.

(15°C) درجه سانتی‌گراد								نام مدل (Model name)
y_0	x_0	K	c	b	a	D_{50}	G_{max}	
-	-	0.0631±0.006	-	-	-	62.1±0.99	78.6±1.0*	گامپرتز (Gompertz)
0	-	-	-	6.32±0.61	-	68.3±1.07	78.7±1.1	هیل (Hill)
-	-	-	-	0.102±0.01	-	68.7±1.01	78.0±1.0	لجستیک ۱ (Logistic1)
-	-	-	-	0.099±0.01	-0.76±2.08	68.4±1.26	78.8±2.4	لجستیک ۲ (Logistic2)
-	-	-	0.26±2.22	-6.37±0.76	78.43±2.61	68.4±1.36	-	لجستیک ۳ (Logistic3)
-	-	0.1022±0.010	-	1.016±0.0129	-	68.6±0.97	79.0±1.0	ریچارد (Richard)
-	27.0±22.1	-	-	2.53±1.45	-	69.7±1.61	78.2.73±1.3	ویبول (Weibull)
(25°C) درجه سانتی‌گراد								
y_0	x_0	k	c	b	a	D_{50}	G_{max}	
-	-	0.212±0.023	-	-	-	22.73±0.35	91.7±1.7	گامپرتز (Gompertz)
0	-	-	-	7.40±0.97	-	24.58±0.45	91.8±2.0	هیل (Hill)
-	-	-	-	0.313±0.047	-	24.71±0.47	91.1±2.1	لجستیک ۱ (Logistic1)
-	-	-	-	0.304±0.05	-1.99±4.87	24.54±0.66	93.3±5.4	لجستیک ۲ (Logistic2)
-	-	-	40.27±48.5	-4.81±1.49	133.9±50.14	21.43±3.40	-	لجستیک ۳ (Logistic3)
-	-	0.313±0.044	-	1.03±0.024	-	24.71±0.47	92.5±2.1	ریچارد (Richard)
-	18.04±0.9	-	-	1.12±0.27	-	24.29±0.51	93.0±2.5	ویبول (Weibull)
(40°C) درجه سانتی‌گراد								
y_0	x_0	k	c	b	a	D_{50}	G_{max}	
-	-	0.403±0.008	-	-	-	18.16±0.04	79.8±0.2	گامپرتز (Gompertz)
0	-	-	-	11.34±0.33	-	19.24±0.06	79.7±0.4	هیل (Hill)
-	-	-	-	0.610±0.024	-	19.36±0.09	79.7±0.5	لجستیک ۱ (Logistic1)
-	-	-	-	0.595±0.027	-0.912±0.84	19.30±0.10	80.6±1.0	لجستیک ۲ (Logistic2)
-	-	-	1.66±0.71	-10.84±0.29	81.43±0.76	19.14±0.06	-	لجستیک ۳ (Logistic3)
-	-	0.610±0.024	-	1.00±0.006	-	19.36±0.86	80.9±0.5	ریچارد (Richard)
-	12.25±0.9	-	-	2.87±0.41	-	19.28±0.06	79.7±0.2	ویبول (Weibull)

G_{max} حداکثر درصد جوانه‌زنی؛ D_{50} زمان تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی؛ a, b, c, k و y_0 پارامترهای مدل‌ها می‌باشد که بیانگر شکل و شیب منحنی جوانه‌زنی می‌باشد، x_0 زمان تا شروع جوانه‌زنی می‌باشد. * انحراف معیار خطا برای هر پارامتر می‌باشد.

G_{max} is maximum germination percentage; D_{50} is time up to 50% maximum germination; a, b, c, k , and y_0 are the model parameters representing the shape and slope of the germination curve, x_0 is time until the start of germination. *. The Standard error is considered for each parameter.

همکاران (۱۹۹۱) از مدل‌های لجستیک، گامپرتز، ریچارد و ویبول در پیش‌بینی جوانه‌زنی بذرها استفاده کردند و بر اساس شاخص‌های آماری (جذر میانگین مربعات خطا)، مدل مناسب برای پیش‌بینی جوانه‌زنی را مدل ویبول معرفی کردند. به‌طور کلی در انتخاب یک مدل مناسب باید به دو مورد زیر توجه کرد. اول این‌که مدل باید دارای انعطاف‌پذیری بالایی باشد و برازش مناسبی به داده‌ها در

در مطالعه سوسا^۱ و همکاران (۲۰۱۴) از دو مدل لجستیک و گامپرتز در پیش‌بینی جوانه‌زنی بذرهای قهوه استفاده کردند و بیان داشتند که مدل گامپرتز از دقت بالاتری در پیش‌بینی جوانه‌زنی بذرهای قهوه در مقایسه با مدل لجستیک بر اساس ضریب آکائیک و ضریب تبیین تصحیح شده داشت. در مطالعه‌ای دیگر شفیی^۲ و

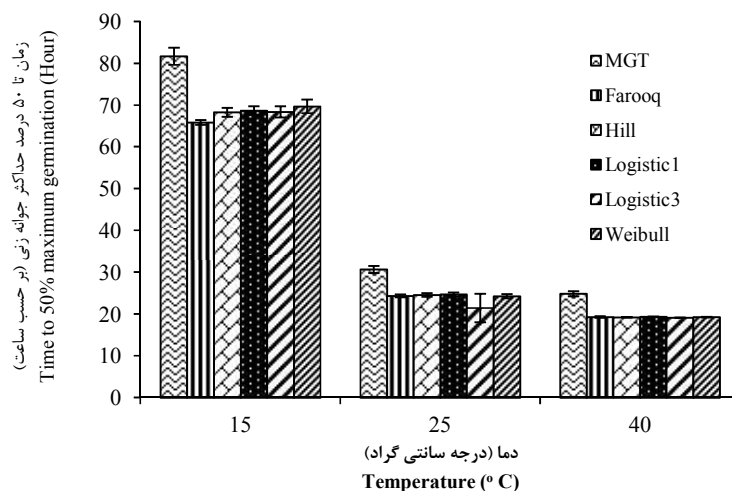
¹ Sousa
² Shafii

سانتی‌گراد، مدل گامپرتز در مقایسه با سایر مدل‌ها همانند مدل لجستیک ۳، برآورد کمتری در محاسبه D_{50} داشت. در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد نیز مقدار D_{50} برآورد شده توسط مدل‌ها از ۱۸/۱۶ تا ۱۹/۳۶ ساعت متغیر بود. همانند دو دمای دیگر کمترین مقدار برآورد شده D_{50} توسط مدل گامپرتز صورت گرفت. در واقع می‌توان گفت D_{50} محاسبه شده توسط مدل گامپرتز، زمان تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی را نشان نمی‌دهد. سوسا و همکاران (۲۰۱۴) بیان داشتند که در مدل گامپرتز، D_{50} نشان‌دهنده زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی نمی‌باشد بلکه نشان‌دهنده تقریباً ۳۷ درصد حداکثر جوانه‌زنی می‌باشد و می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در مدل گامپرتز نمی‌توان از این ضریب به عنوان زمان تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی استفاده کرد و این شاخص نشان‌دهنده زمان تا ۳۷ درصد حداکثر جوانه‌زنی (D_{37}) می‌باشد؛ بنابراین، می‌توان گفت با وجودی که همه مدل‌ها برازش مناسبی به داده‌ها داشتند، ولی از لحاظ برآورد D_{50} بین تیمارها اختلاف وجود داشت و در این بین مدل‌های لجستیک ۱، ۳، مدل چهار پارامتره هیل و ویبول در برآورد D_{50} از دقت بالاتری برخوردار بودند.

برخی از محققان با کمک این مدل‌ها، نرم افزارهایی تهیه کردند که با کمک این نرم‌افزارها کلیه مولفه‌های جوانه‌زنی از قبیل حداکثر درصد جوانه‌زنی، زمان تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی، زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی، زمان تا شروع جوانه‌زنی و یکنواختی جوانه‌زنی را محاسبه می‌کنند (سلطانی و همکاران، ۲۰۱۳؛ جیسون و همکاران، ۲۰۱۰). یکی از این نرم افزارها، Germinator می‌باشد که در گروه بذر دانشگاه واگنینگن ساخته شده است (جیسون و همکاران، ۲۰۱۰). در این نرم افزار از مدل چهار پارامتره هیل استفاده می‌شود و با وارد کردن داده‌های درصد جوانه‌زنی تجمعی در این برنامه، علاوه بر رسم نمودار درصد جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان و برازش مدل هیل، سایر مولفه‌های جوانه‌زنی ذکر شده را محاسبه می‌کند. همچنین این نرم افزار قادر به مقایسه میانگین مولفه‌های جوانه‌زنی اندازه‌گیری شده می‌باشد. همچنین، نرم‌افزار دیگر $Germin^{V2}$ می‌باشد (سلطانی و

تیمارهای مختلف داشته باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود کلیه مدل‌ها از انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار بودند و در سه دمای مختلف برازش مناسبی داشتند. دوم این که پارامترهای مدل دارای مفهوم زیستی باشند و محقق در صورت برازش یکسان در مدل‌های مختلف، مدلی را انتخاب کند که دارای پارامترهای زیستی بیشتری باشد و از این پارامترها در تفسیر نتایج خود استفاده کند. در این مدل‌ها، G_{max} ، D_{50} و X_0 دارای مفهوم زیستی هستند که به ترتیب نشان‌دهنده حداکثر درصد جوانه‌زنی، زمان تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی و زمان تا شروع جوانه‌زنی می‌باشد. همه مدل‌ها دارای دو پارامتر G_{max} و D_{50} بودند (به استثنای مدل لجستیک ۳) و تنها مدل ویبول علاوه بر این دو پارامتر دارای، پارامتر زمان تا شروع جوانه‌زنی (X_0) نیز بود. در مدل لجستیک ۳، پارامتر حداکثر درصد جوانه‌زنی به‌طور مستقیم برآورد نمی‌شود و با تقریب ضریب a از c قابل محاسبه است؛ بنابراین، اگر محقق به دنبال برآورد هر سه پارامتر جوانه‌زنی است، باید از مدل ویبول استفاده کند و یا اگر به دنبال محاسبه دو پارامتر G_{max} و D_{50} باشد می‌تواند از همه مدل‌ها استفاده کند.

در جدول ۳ ضرایب مدل‌های مختلف در هر سه دما ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در دمای ۱۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد میان مدل‌ها از لحاظ حداکثر درصد جوانه‌زنی اختلاف چندانی وجود ندارد و به‌طور میانگین درصد جوانه‌زنی در دمای ۱۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۷۸، ۹۲ و ۸۰ درصد بود. از لحاظ D_{50} (به‌عنوان شاخصی از سرعت جوانه‌زنی) میان مدل‌های مختلف در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد، اختلاف معنی‌داری وجود داشت. D_{50} در این دما از ۶۲/۱ تا ۶۹/۷ ساعت متغیر بود و اختلاف بین برآورد مدل‌ها در این دما ۷/۶ ساعت بود. در این دما کمترین مقدار D_{50} توسط مدل گامپرتز برآورد شد و سایر مدل‌ها در برآورد این پارامتر مشابه بودند. D_{50} برآورد شده در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در مدل‌های مختلف نیز اختلاف معنی‌داری با هم داشتند و D_{50} در این دما از ۲۱/۴۳ تا ۲۴/۷۱ ساعت متغیر بود. اختلاف بین برآورد مدل‌ها در این دما ۳/۲۷ ساعت بود. همانند دمای ۱۵ درجه



شکل ۲- مقایسه زمان تا ۵۰ درصد حداکثر درصد جوانه‌زنی با استفاده از مدل‌های مختلف

Figure 2. Time comparison up to 50% maximum germination using different models

شده توسط سایر مدل‌ها می‌باشد. در واقع میانگین زمان جوانه‌زنی محاسبه شده توسط مدل الیس و روبرتز (۱۹۸۰) معادل زمان تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی نمی‌باشد و در واقع از این شاخص نمی‌توان به‌عنوان شاخصی از D_{50} استفاده کرد. در مطالعه‌ای که سلطانی و همکاران (۲۰۱۵) انجام دادند بیان داشتند که میانگین زمان جوانه‌زنی معادل D_{50} نمی‌باشد و نمی‌توان از آن به‌عنوان زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی استفاده کرد.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، نتایج این تحقیق نشان داد که برای محاسبه D_{50} می‌توان از مدل‌های رگرسیون غیرخطی استفاده کرد. در این تحقیق مدل‌های لجستیک، هیل، ریچارد و ویبول برازش خوبی به داده‌های درصد جوانه‌زنی تجمعی بذرهای پنبه در مقابل زمان در دماهای مختلف داشتند. این مدل‌ها دارای ضرایبی می‌باشند که دارای مفهوم زیستی هستند و حداکثر درصد جوانه‌زنی (G_{max})، زمان تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی (D_{50}) و زمان تا شروع جوانه‌زنی (X_0) را در اختیار محقق قرار می‌دهند. همچنین، زمانی که محقق تنها به دنبال اندازه‌گیری D_{50} باشد و علاوه بر این با نرم‌افزارهای آماری آشنا نباشد، می‌تواند از فرمول تجربی ارائه شده در این مقاله استفاده کند.

همکاران، ۲۰۱۳). این نرم افزار نیز همانند Germinator قادر به محاسبه مؤلفه‌های جوانه‌زنی از قبیل حداکثر درصد جوانه‌زنی، زمان تا شروع جوانه‌زنی، یکنواختی جوانه‌زنی و سرعت جوانه‌زنی می‌باشد. محاسبه این پارامترها در این نرم افزار توسط مدل ریچارد صورت می‌گیرد؛ بنابراین، افرادی که با نرم افزارهای آماری برای تجزیه مدل‌های رگرسیون غیرخطی ناآشنا باشند، به راحتی می‌توانند از این نرم افزارها استفاده کنند.

برخی محققان برای محاسبه D_{50} از مدل ساده تجربی از قبیل مدل ارائه شده توسط فاروق و همکاران (۲۰۰۴) و الیس و روبرتز (۱۹۸۰) استفاده می‌کنند (جعفر^۱ و همکاران، ۲۰۱۲؛ بیلی^۲ و همکاران، ۲۰۰۰). در شکل ۲ مقادیر D_{50} محاسبه شده توسط این دو به همراه D_{50} محاسبه شده از مدل‌های لجستیک ۱، ۳، مدل چهار پارامتره هیل و ویبول در سه دما ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار D_{50} محاسبه شده توسط مدل ارائه شده توسط فاروق و همکاران (۲۰۰۴) مشابه مقدار برآورد شده توسط مدل‌های رگرسیون غیرخطی می‌باشد اما مقدار D_{50} برآورد شده توسط مدل الیس و روبرتز (۱۹۸۰) متفاوت از سایر مدل‌ها می‌باشد و از نظر عددی بزرگ‌تر از مقدار برآورد

¹ Jafar

² Bailly

منابع

- Bailly, C., Benamar, A., Corbineau, F., and Côme, D. 2000. Antioxidant systems in sunflower (*Helianthus annuus* L.) seeds as affected by priming. *Seed Science Research*, 10: 35-42. <https://doi.org/10.1017/S0960258500000040>
- Cheng, C., and Gordon, I.L. 2000. The Richards function and quantitative analysis of germination and dormancy in meadow foam (*Limnanthes alba*). *Seed Science Research*, 10: 265-277. <https://doi.org/10.1017/S0960258500000295>
- Collbach, N., and Durr, C. 2003. Effects of seed production and storage conditions on black grass (*Alopecurus myosuroides*) germination and shoot elongation. *Weed Science*, 51(5): 708-718. <https://doi.org/10.1614/P2002-051>
- Dahlquist, R.M., Prather, T.S., and Stapleton, J.J. 2007. Time and temperature requirements for weed seed thermal death. *Weed Science*, 55(6): 619-655. <https://doi.org/10.1614/WS-04-178.1>
- El-Kassaby, Y.A., Moss, I., Kolotelo, D., and Stoehr, M. 2008. Seed germination: Mathematical representation and parameters extraction. *Forest Science*, 54: 220-227.
- Ellis, R.H., and Roberts, E.H. 1980. *Seed Production*. Butterworths, London. 605-635.
- Farooq, M., Basra, S.M.A., Hafeez, K., and Warriach, E.A. 2004. Influence of high and low temperature treatments on the seed germination and seedling vigor of coarse and fine rice. *International Rice Research Notes*, 29: 69-71.
- Galindez, G., Seal, C.E., Daws, M.I., Lindow, L., Ortega-Baes, P. and Pritchard, H.W. 2016. Alternative temperature combined with darkness resets base temperature for germination (T_b) in photoblastic seeds of *Lippia* and *Aloysia* (Verbenaceae). *Plant Biology*, 19: 41-45. <https://doi.org/10.1111/plb.12449>
- Gan, Y., Stobbe, E.H., and Njue, C. 1996. Evaluation of selected nonlinear regression models in quantifying seedling emergence rate of spring wheat. *Crop Science*, 36: 165-168. <https://doi.org/10.2135/cropsci1996.0011183X003600010029x>
- Ghaderi-Far, F., Alimagham, S.M., Kameli, A.M., and Jamali, M. 2012. Isabgol (*Plantago ovata* Forsk) seed germination and emergence as affected by environmental factors and planting depth. *International Journal of Plant Production*, 6: 185-194.
- Ghaderi-Far, F., and Soltani, E. 2015. Evaluation of seed germination in sesame genotypes in response to temperature: determination of cardinal temperatures and thermal tolerance. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 46: 473-483 [In Persian with English Summary].
- Hacisalihoglu, G., Taylor, A.G., Paine, D.H., Hilderbrand, M.B., and Khan, A.A. 1999. Embryo elongation and germination rates as sensitive indicators of lettuce seed quality: Priming and aging studies. *Hortscience*, 34(7): 1240-1243. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.34.7.1240>
- Haj SeyedHadi, M.R., and Gonzalez-Andujar, J.L. 2009. Comparison of fitting weed seedling emergence models with nonlinear regression and genetic algorithm. *Computers and Electronics in Agriculture*, 65(1): 19-25. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.07.005>
- Jafar, M.Z., Farooq, M., Cheema, M.A., Afzal, I., Basra, S. M.A., Wahid, M. A., Aziz, T., and Shahid, M. 2012. Improving the performance of wheat by seed priming under saline conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 198(1): 38-45. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2011.00485.x>
- Joosen, R.V.L., Kodde, J., Willems, L.A.J., Ligterink, W., Van der Plas, H.W., and Hilhorst, H.W.M. 2010. Germinator: a software package for high-throughput scoring and curve fitting of Arabidopsis seed germination. *The Plant Journal*, 62(1): 148-159. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2009.04116.x>

- Kibinza, S., Bazin, J., Bailly, C., Farrant, J.M., Francoise Corbineau, F., and El-Maarouf-Bouteau, H. 2011. Catalase is a key enzyme in seed recovery from ageing during priming. *Plant Science*, 181(3): 309-315. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.06.003>
- Lawson, A.N., Van Acker, R.C., and Friesen, L.F. 2006. Emergence timing of volunteer canola in spring wheat fields in Manitoba. *Weed Science*, 54: 873-882. <https://doi.org/10.1614/WS-05-169.1.1>
- Loddo, D., Masin, R., Otto, S., and Zanin, G. 2012. Estimation of base temperature for *Sorghum halepense* rhizome sprouting. *Weed Research*, 52(1): 42-49. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2011.00886.x>
- Loddo, D., Ghaderi-Far, F., Rastegar, Z., and Masin, R. 2018. Base temperatures for germination of selected weed species in Iran. *Plant Protection Science*, 54(1): 60-66.
- Lu, J.J., Zhou, Y.M., Tan, D.Y., Baskin, C.C., and Baskin, J.M. 2015. Seed dormancy in six cold desert Brassicaceae species with indehiscent fruits. *Seed Science Research*, 25(3): 276-285. <https://doi.org/10.1017/S0960258515000215>
- Maguire, J.D. 1962. Speed of germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science*, 2(2): 176-177. <https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x>
- Masin, R. Onofri, A., Gasparini, V., and Zanin, G. 2017. Can alternating temperatures be used to estimate base temperature for seed germination?. *Weed Research*, 57(6): 390-398. <https://doi.org/10.1111/wre.12270>
- Mavi, K., Powell, A.A., and Matthews, S. 2016. Rate of radicle emergence and leakage of electrolytes provide quick predictions of percentage normal seedlings in standard germination tests of radish (*Raphanus sativus*). *Seed Science and Technology*, 17: 393-409. <https://doi.org/10.15258/sst.2016.44.2.12>
- Rebetzke, G.J., and Richards, R.A. 1999. Genetic improvement of early vigor in wheat. *Australian Journal of Agricultural Research*, 50: 291-301. <https://doi.org/10.1071/A98125>
- Shafii, B., Price, W.J., Swensen, J. B., and Murray, G. A. 1991. Nonlinear estimation of growth curve models for germination data analysis," in Proceedings of the 1991 Kansas State University Conference on Applied Statistics in Agriculture, Milliken, G.A., and Schwenke, J.R. (eds.), Manhattan, KS: Kansas State University, 19-42. <https://doi.org/10.4148/2475-7772.1415>
- Soltani, A. 2007. Application of SAS in statistical analysis. Second edition., Jihad-e-Daneshgahi Mashhad Press, Mashhad, Iran, 182 p. [In Persian].
- Soltani, A., and Galeshi, S. 2002. Importance of rapid canopy closure for wheat production in a temperate sub-humid environment: experimentation and simulation. *Field Crops Research*, 77(1): 17-30. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(02\)00045-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00045-X)
- Soltani, A., Galeshi, S., Zeinali, E., and Latifi, N. 2002. Germination, seed reserve utilization and seedling growth of chickpea as affected by salinity and seed size. *Seed Science and Technology*, 30(1): 51-60.
- 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.
- Soltani, E., Ghaderi-Far, F., Baskin, C.C., and Baskin, J.M. 2015. Problems with using mean germination time to calculate rate of seed germination. *Australian Journal of Botany*, 63(8): 631-635. <https://doi.org/10.1071/BT15133>

- Soltani, E., Soltani, A., and Oveisi, M. 2013. Modeling seed aging effect on wheat seedling emergence in drought stress: Optimizing germin program to predict emergence pattern. *Crops Improvement*, 15: 147-160 [In Persian with English Summary].
- Sousa, I.F., Neto, J.E.K., Muniz, J.A., Guimarães, R.M., Savian, T.V., and Muniz, F.M. 2014. Fitting nonlinear autoregressive models to describe coffee seed germination. *Ciência Rural*, 44(11): 2016-2021. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20131341>
- Tahmasbi, B., Ghaderi-Far., F., Sadeghipour, H.R., and Galeshi, S. 2015. Impacts of accelerated aging on germination parameters, fatty acids and lipid hydroperoxides of sunflower (*Helianthus annuus* L.) seeds. *Journal of Plant Process and Function*, 4: 73-83 [In Persian with English Summary].
- Tjørve, K.M.C., and Tjørve, E. 2017. A proposed family of Unified models for sigmoidal growth. *Ecological Modeling*, 359: 117-127. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.05.008>

Comparison of Different Models for Determining Time up to 50% Maximum Germination: A Case Study of Cottonseeds (*Gossypium hirsutum*)

Farnaz Porali¹, Farshid Ghaderi-Far^{2,*}, Elias Soltani³, Mohhamad Hadi Pahlevani⁴

Extended abstract

Introduction: Germination speed is one of the most important germination indices, used in most studies to compare the effects of different treatments on seed germination. Researchers use the reverse time up to 50% maximum germination (1/D50) to calculate the germination rate. One of the methods used for calculating the D50 is the utilization of nonlinear regression models such as Logistic, Gompertz, Richard, Weibull and Hill. In addition, for the purpose of calculating this parameter, simple empirical models such as the model presented by Farooq et al. and Ellis and Roberts are used. The question which arises is which of these methods has more precision predicting D50. The purpose of this study was to calculate D50, using different methods in seed germination of cotton.

Material and Methods: In this experiment, cottonseeds were placed at three temperatures of 15, 25 and 40°C with three replications, and germinated seeds were counted daily several times. To calculate D50, several nonlinear regression models including Gompertze, Logistic, Hill (the four-parameter), Richard and Weibull models were used. Moreover, for the purpose of calculating D50, the models presented by Farooq et al. and Ellis and Roberts were used.

Results: The results showed that all nonlinear regression models exhibited suitable fit to germination data. However, logistic, Hill and Weibull showed better predictability of D50, compared with other models. Besides, D50 calculated by the Farooq model was similar to that estimated by nonlinear regression models, whereas D50 estimated by the Ellis and Roberts model was higher than that estimated by other models.

Conclusions: The results of this study showed that both non-linear regression models and the model developed by Farooq could be used to calculate D50 of cottonseed. In general, the results of this study showed that nonlinear regression models could be used to calculate D50. In this research, Logistic, Hill, and Weibull showed good fit for cumulative seed germination data of cotton seeds versus time at different temperatures. These models have coefficients that have a biological concept that includes maximum germination percentage, time to 50% maximum germination and time to start germination. Moreover, when researchers only seek to measure D50 and are not familiar with the statistical software, they can use the empirical formula presented in this research.

Keywords: Germination rate, Seed vigor, Nonlinear regression model.

Highlights:

- 1- Calculating D50 in cottonseeds, using different methods.
- 2- Using nonlinear regression models to calculate D50 in cottonseeds.
- 3- Developing a proper method which is more accurate, and better lends itself to calculating D50 of cottonseeds.

¹ Former M.Sc. Student in Agronomy, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran <http://dorl.net/dor/20.1001.1.23831251.1397.5.2.9.4>

² Associate Professor, Department of Agronomy, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran

<http://dx.doi.org/10.29252/yujs.5.2.1>

³ Assistant Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding Sciences, Tehran University, Tehran, Iran

⁴ Associate Professor, Department of Plant Breeding, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran



*Corresponding author, E-mail address:

farshidghaderifar@gau.ac.ir

(Received: 28.04.2018; Accepted: 28.10.2018)