

مقاله پژوهشی

مقایسه مدل‌های زمان تا رویداد و رگرسیون غیرخطی در تجزیه و تحلیل داده‌های جوانه

زنی

مجید عظیم محسنی^{۱*}، فرشید قادری فر^۲، مهناز خلفی^۱، حمیدرضا صادقی‌پور^۳، مرضیه قزل^۴

چکیده مبسوط

مقدمه: امروزه مطالعات گسترده‌ای در زمینه اثر تیمارهای مختلف بر جوانه‌زنی بذرها در گیاهان زراعی، باغی و غیره انجام می‌شود. روش‌های مختلفی برای محاسبه پارامترهای مربوط به جوانه‌زنی ارائه گردیده است که استفاده از رگرسیون غیرخطی متداول‌تر است. هر چند که در سال‌های اخیر مدل‌های مختلفی برای این روش معرفی گردیده است، اما ایرادات اساسی در ساختار و نتایج آن باعث شده تا محققین به دنبال روش‌هایی با دقت و صحت بالاتر باشند. هدف از این پژوهش معرفی مدل زمان تا رویداد و مقایسه کارایی آن در شرایط و آزمایش‌های مختلف با مدل رگرسیون غیرخطی می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش از مشاهدات مربوط به ۴ آزمایش اثر سیانید پتاسیم بر جوانه‌زنی بذرهای گردو، اثر تنش شوری بر جوانه‌زنی بذرهای گندم، اثر تنش خشکی بر جوانه‌زنی بذرهای ذرت و اثر دما بر جوانه‌زنی بذرهای پنبه استفاده گردید. روش‌های رگرسیون غیرخطی و زمان تا رویداد بر پایه مدل گامپرتز به مشاهدات برآزش داده شد و به کمک روش مونت‌کارلو نتایج این دو مدل مورد ارزیابی قرار گرفت.

یافته‌ها: بر پایه شاخص‌های ضریب تعیین و میانگین مربعات خطا هر دو روش برآزش مناسبی به مشاهدات داشتند. هر چند که پارامترهای جوانه‌زنی بذرها در هر دو مدل تقریباً برابر برآورد شد، اما انحراف معیار پارامترها در رگرسیون غیرخطی به مراتب کمتر از مشابه آنها در روش زمان تا رویداد بود، به جز در مواردی که بذرهای جوانه‌نزده در انتهای بازه زمانی آزمایش وجود نداشت که در این حالت نتایج کاملاً یکسان بود. روش مونت‌کارلو نتایج حاصل از مدل زمان تا رویداد را مورد تأیید قرار داد و کم‌برآوردی روش رگرسیون غیرخطی را در برآورد انحراف معیار پارامترها آشکار کرد.

نتیجه‌گیری: به طور کلی، نتایج این تحقیق نشان داد که مدل زمان تا رویداد می‌تواند به عنوان یک مدل مناسب در مطالعات مربوط به جوانه‌زنی بذرها در شرایط و تیمارهای مختلف به کار گرفته شود. این مدل نه تنها برآوردهای دقیقی برای پارامترهای مربوط به جوانه‌زنی ارائه می‌دهد بلکه انحراف معیار پارامترها که نقش تعیین‌کننده‌ای در استنباط آماری در مورد پارامترها دارد را با دقت بالا برآورد می‌کند. وجود بسته *drc* در نرم افزار R باعث شده که امکان برآزش مدل‌های مختلف زمان تا رویداد پارامتری فراهم گردد.

واژه‌های کلیدی: مدل رگرسیون غیرخطی، مدل زمان تا رویداد، جوانه‌زنی بذرها، روش مونت‌کارلو

جنبه‌های نوآوری:

- ۱- از مدل زمان تا رویداد پارامتری در برآورد پارامترهای جوانه‌زنی بذرها استفاده می‌گردد.
- ۲- روش زمان تا رویداد و رگرسیون غیرخطی در آزمایش‌های مختلف جوانه‌زنی بذرها مقایسه گردید.
- ۳- از روش مونت‌کارلو برای بررسی صحت نتایج روش‌های به کار رفته استفاده شد.

^۱ استادیار گروه آمار، دانشگاه گلستان

^۲ دانشیار گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

^۳ دانشیار گروه زیست‌شناسی، دانشگاه گلستان

^۴ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد در رشته آمار، دانشگاه گلستان



مقدمه

امروزه مطالعات در زمینه علوم بذر در حال افزایش می‌باشد و محققان زیادی در جنبه‌های مختلف علوم بذر در حال تحقیق و بررسی هستند. در این نوع تحقیقات، جهت مقایسه تأثیر تیمارهای مورد نظر و در نهایت تشریح نتایج آزمون‌ها از برخی مولفه‌های جوانه‌زنی شامل درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، یکنواختی جوانه‌زنی و زمان تا شروع صدک‌های مختلف جوانه‌زنی استفاده می‌شود. محققان برای تخمین این مولفه‌ها از روش‌های مختلف از جمله برازش مدل‌های رگرسیون غیرخطی به داده‌های درصد جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان استفاده می‌کنند. مدل لجستیک، گامپرتز، ریچارد، ویبول و هیل از مدل‌های رایج در این نوع مطالعات می‌باشند. این مدل‌ها دارای ۲ الی ۴ ضریب می‌باشند که برخی از این ضرایب دارای مفهوم زیستی بوده و به عنوان شاخص‌های کلیدی در فرآیند جوانه‌زنی محسوب می‌شوند (پورعلی^۱ و همکاران، ۲۰۱۹؛ الکاسبی^۲ و همکاران، ۲۰۰۸). از مهمترین شاخص‌های برآورد شده از این ضرایب می‌توان به حداکثر درصد جوانه‌زنی، زمان تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی و زمان تا شروع جوانه‌زنی اشاره کرد (لاوسن^۳ و همکاران، ۲۰۰۶، کولباخ و دور^۴، ۲۰۰۳؛ پورعلی و همکاران، ۲۰۱۹؛ لودو^۵ و همکاران، ۲۰۱۸؛ الکاسبی و همکاران، ۲۰۰۸، تی اورف و تی اورف^۶، ۲۰۱۷). علاوه بر این محققان زیادی از این مدل‌ها در پیش‌بینی جوانه‌زنی و سبز شدن بذرهای گیاهان مختلف استفاده کرده‌اند که هر کدام از آنها دارای نتایج درخور توجهی می‌باشند (حاج سیدهادی و گونزالز^۷، ۲۰۰۹؛ سوسا^۸ و همکاران، ۲۰۱۴).

به طور معمول در آزمایش‌های جوانه‌زنی تعداد مشخصی از بذر (۲۵ تا ۱۰۰ بذر) در بستر مناسب جوانه زنی (ظروف پتری، حوله کاغذی و یا شن) کشت می‌شوند و بعد از اعمال تیمارهای مختلف مانند سطوح

مختلف خشکی، شوری و غیره در محیط انکوباتور در دمای مناسب یا دماهای مختلف قرار می‌گیرند. سپس در زمان‌های مختلف بسته به سرعت جوانه‌زنی، تعداد بذرهای جوانه‌زده در هر زمان شمارش شده و از بستر کشت خارج می‌شود. جوانه‌زنی تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که طی چندین روز متوالی جوانه‌زنی مشاهده نشود و پس از آن آزمایش متوقف می‌گردد. سپس مدل‌های رگرسیون غیرخطی به داده‌های درصد جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان برازش داده می‌شود و در نهایت مولفه‌های جوانه‌زنی با کمک نرم افزارهای آماری از جمله SAS، R، Sigma plot و غیره تجزیه و تحلیل خواهد شد (پورنیک^۹ و همکاران، ۲۰۱۹؛ گورزین^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۰).

با وجود استفاده گسترده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی در مطالعات جوانه‌زنی، ایراداتی بر استفاده از این روش در این نوع مطالعات وجود دارد. ایراد اول اینکه در آزمایش‌های جوانه‌زنی مشاهدات تکراری از یک تعدادی از بذر در یک بستر کشت وجود دارد و تعداد بذرهای جوانه زده در ظروف پتری در یک زمان مستقل از بذرهای جوانه‌زده تا پیش از آن زمان نخواهد بود و در نتیجه از نظر آماری منجر به خودهمبستگی^{۱۱} مثبت بین باقیمانده‌ها (انحراف بین مقادیر واقعی با مقادیر پیش‌بینی شده) در مقادیر متوالی زمانی می‌گردد. اما از لحاظ تئوری آماری زمانی از مدل‌های رگرسیون غیرخطی می‌توان استفاده کرد که باقیمانده‌ها با هم همبستگی نداشته باشند. نظر به این که در این روش باقیمانده‌ها با هم همبستگی مثبت دارد، فرضیه آماری این روش خدشه‌دار می‌گردد و در نتیجه اطلاعات بدست آمده از این مدل‌های رگرسیون غیرخطی نامناسب می‌باشد و شاید بتوان گفت اطلاعات درستی در اختیار قرار نمی‌دهد (مکنایر^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۲).

ایراد دوم این است که وقتی از مدل‌های رگرسیون غیرخطی و ضرایب حاصل از آن برای مقایسه تیمارها استفاده می‌شود، مشاهده می‌شود که انحراف معیار محاسبه شده با این مدل‌ها بسیار کوچک و کم می‌باشد.

¹ Porali

² El-Kassaby

³ Lawson

⁴ Collbach and Durr

⁵ Loddo

⁶ Tjørve. and Tjørve

⁷ Haj SeyedHadi and Gonzalez

⁸ Sousa

⁹ Pournik

¹⁰ Gorzin

¹¹ Autocorrelation

¹² McNair

کند، مورد استفاده قرار گرفته است. در سال‌های اخیر این موضوع مورد توجه سایر علوم از جمله علوم زیستی و کشاورزی قرار گرفته است به خصوص زمانی که به روند رشد و یا جوانه‌زنی به عنوان یک زمان تا رویداد نگریسته می‌شود (انوفری و همکاران، ۲۰۱۸، ریتزه و همکاران، ۲۰۱۰). استفاده از تحلیل زمان تا رویداد برای مطالعه جوانه‌زنی سه امکان را فراهم می‌سازد. اول اینکه به هر واحد آزمایشی در بازه زمانی مطالعاتی می‌توان یک تابع بقا برازش داد و این پدیده را در طول زمان مطالعه کرد و نه فقط در مقاطع زمانی خاص. دوم اینکه بذرهایی که در بازه زمانی مورد مطالعه جوانه نزنده‌اند به عنوان داده‌های سانسور شده در تحلیل در نظر گرفته می‌شود که باعث کاهش قابل توجه آریبی نتایج می‌شود. سوم اینکه در این روش امکان مقایسه توابع بقا در تیمارهای مختلف فراهم است و می‌توان تیمارها را بر اساس اتفاقات در زمان برای آنها و در کل بازه زمانی مقایسه کرد (ریتزه و همکاران، ۲۰۱۳؛ انوفری و همکاران، ۲۰۱۸).

نظر به اینکه در ایران مطالعات زیادی در زمینه بذر در حال انجام می‌باشد و محققان از مدل‌های رگرسیون غیرخطی در تفسیر نتایج استفاده می‌کنند و از معایب این روش آگاه نیستند، معرفی و نحوه استفاده و کاربرد روش تحلیل بقا یا زمان تا رویداد حائز اهمیت می‌باشد. از این رو در این مطالعه این مدل به زبان ساده تشریح می‌گردد تا نحوه عمل این مدل قابل درک گردد. در ادامه با ذکر مثال‌هایی نحوه تجزیه و تحلیل این مدل ارائه خواهد شد تا محققان بذر بتوانند از این مدل‌ها در تجزیه و تحلیل داده‌های خود استفاده کنند. در پایان نیز نتایج این مدل با مدل رگرسیون غیرخطی مقایسه خواهد شد تا اختلافات موجود در دو روش روشن گردد.

مواد و روش‌ها

جمع‌آوری داده‌های جوانه‌زنی

در این مطالعه از داده‌های آزمایش‌های جوانه‌زنی انجام شده در گیاهان گندم (ربانی^۷، ۲۰۱۳)، پنبه (پورعلی^۸، ۲۰۱۵)، ذرت (کرمی^۱، ۲۰۱۶) و گردو

در واقع این روش‌ها منجر به کم برآوردی در انحراف معیاری می‌شود که ممکن است نتایج حدود اطمینان، آزمون t و مقدار p را منحرف کند و ممکن است برای مقایسه تیمارها نامناسب و گمراه‌کننده باشد (ریتزه^۱ و همکاران، ۲۰۱۳). ایراد سوم این است که آزمایش‌های جوانه‌زنی معمولاً در یک محدوده زمانی مشخص انجام می‌گیرد و در برخی موارد در انتهای آزمایش همه بذرها جوانه نمی‌زنند. این عدم جوانه‌زنی اگر به دلیل مرده بودن بذرها باشد، مشکلی خاصی نداشته و با کم کردن تعداد بذرها مرده از تعداد کل بذرها اولیه می‌توان تجزیه و تحلیل را بر اساس تعداد بذرها زنده انجام داد. اما اگر عدم جوانه‌زنی به دلیل وجود کمون در بذرها باشد، به این سادگی نمی‌توان این کار را انجام داد؛ زیرا ممکن است محقق زمان آزمایش را کوتاه در نظر گرفته و به بذرها فرصت کافی برای جوانه‌زنی را نداده باشد و یا اینکه اساساً بذرها نیاز به شکستن کمون بذر داشته‌اند ولی محقق به آن توجه نکرده است. بنابراین در این گونه موارد اطلاعات کافی از بذرها جوانه‌زنده اما زنده در پایان آزمایش در اختیار محقق قرار نخواهد گرفت. این داده‌ها در واقع نوعی داده سانسور شده هستند که اگر در تجزیه و تحلیل در نظر گرفته نشود، ممکن است نتایج را دچار اشکال کند (انوفری^۲ و همکاران، ۲۰۱۸).

ایرادات وارد شده در مورد استفاده از رگرسیون غیرخطی در برازش درصد جوانه‌زنی در مقابل زمان ممکن است در همه مطالعات دیده نشود؛ اما معرفی یک روش مناسب که این معایب را نداشته باشد و محققان بتوانند در حالت‌های مختلف از آن استفاده کنند، بسیار مهم است. یکی از مهمترین کاندیدا، روش مدل زمان تا رویداد^۳ یا تحلیل بقا^۴ می‌باشد (هوپلیک^۵ و همکاران، ۲۰۲۰؛ رومانو و استوانتو^۶، ۲۰۲۰). تحلیل بقا و یا تحلیل زمان تا رویداد معمولاً در مباحث پزشکی که در آن بقای یک بیمار پس از تیماردهی مشخص، مورد توجه است و یا در صنعت وقتی طول عمر یک قطعه اهمیت پیدا می

¹ Ritz

² Onofri

³ Time to event model

⁴ Survival analysis

⁵ Humplik

⁶ Romano and Stevanato

⁷ Rabani

⁸ Porlali

جوانه‌زنی روانه ۲ الی ۳ بار شمارش شد. معیار جوانه زنی خروج ریشه‌چه به اندازه دو میلی متر یا بیشتر در نظر گرفته شد.

آزمایش سوم: اثرات تنش خشکی بر جوانه‌زنی بذرهای ذرت

در این آزمایش، اثرات تنش خشکی در سه سطح صفر، $-0/6$ و $-1/2$ - مگاپاسکال با پلی اتیلن گلیکول ۸۰۰۰ (برند شارلو) بر جوانه‌زنی بذرهای ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ با ۴ تکرار ۵۰ تایی بذر در محیط ظروف پتری ۱۲ سانتی‌متر در دمای ۲۵ درجه سلسیوس صورت گرفت. قبل از انجام آزمون جوانه‌زنی بذرهای ذرت با هیپوکلریت ۱ درصد به مدت ۱۵ دقیقه ضدعفونی شدند. همانند آزمایش قبلی، بذرهای جوانه زده روزانه ۲ الی ۳ بار بسته به سرعت جوانه‌زنی شمارش شد. شمارش تا زمانی ادامه پیدا کرد که تا هفت روز پشت سرهم جوانه‌زنی رخ ندهد.

آزمایش چهارم: اثرات دماهای مختلف بر جوانه‌زنی بذرهای پنبه

در این آزمایش، اثرات دماهای مختلف ۱۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سلسیوس بر جوانه‌زنی بذرهای پنبه رقم ساحل با ۴ تکرار ۵۰ تایی بذر در محیط حوله کاغذی در دمای ۲۵ درجه سلسیوس صورت گرفت. لازم به ذکر است که بذرهای پنبه دارای کرک می‌باشند. بنابراین قبل از انجام آزمایش جوانه‌زنی، کرک‌زدایی با اسید سولفوریک ۹۸ درصد به مدت ۳۰ ثانیه صورت گرفت (پورعلی، ۲۰۱۵). سپس بذرهای کرک‌زدایی شده (دلینته) با آب فراوان شسته شدند تا اثرات باقیمانده اسید از روی آنها پاک شود. شمارش بذرهای جوانه‌زده همانند بذرهای گندم و ذرت در دو آزمایش قبلی صورت گرفت.

تجزیه و تحلیل آماری

در این مقاله برای مطالعه جوانه‌زنی بذرها در طول زمان از دو روش رگرسیون غیر خطی و تجزیه و تحلیل زمان تا رویداد پارامتری استفاده شد.

فرض کنید مطالعه در یک بازه زمانی $[t_0, t_n]$ صورت گرفته باشد و $t_0 = 0 < t_1 < \dots < t_n$

(مصطفی‌لو^۱، ۲۰۱۱) در پاسخ به تیمارهای مختلف استفاده شد. آزمایش‌های جوانه‌زنی گندم، پنبه و ذرت در آزمایشگاه تکنولوژی بذر گروه زراعت دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و آزمایش جوانه‌زنی بذرهای گردو در گروه زیست‌شناسی دانشگاه گلستان صورت گرفت.

آزمایش اول: اثرات سیانید پتاسیم بر جوانه‌زنی بذرهای گردو

از آنجا که سیانید پتاسیم به عنوان یکی از تیمارهای رفع کمون و افزایش جوانه‌زنی شناخته می‌شود، در این بخش، اثرات تیمارهای مختلف سیانید پتاسیم بر رفع کمون و جوانه‌زنی بذرهای گردو مطالعه شد. در این آزمایش ابتدا بذرهای گردو به مدت صفر، ۸ و ۱۲ ساعت با سیانید پتاسیم آب‌نوشی شدند و سپس توسط محلول هیپوکلریت سدیم ۰/۵ درصد به مدت ۱۵ دقیقه سترون سطحی شدند. برای از بین رفتن سیانید باقیمانده روی پوسته بذرها شست‌وشو شده و آزمون جوانه‌زنی روی بذرهای تیمار شده در محیط کشت‌شن با سه تکرار ۲۴ تایی بذر در دمای ۲۷ درجه سلسیوس صورت گرفت. شمارش بذرهای جوانه‌زده روزانه تا ۳۶ روز انجام شد. خروج ریشه‌چه به اندازه دو میلی‌متر یا بیشتر به عنوان معیار جوانه‌زنی در نظر گرفته شد.

آزمایش دوم: اثرات تنش شوری بر جوانه‌زنی بذرهای گندم

در این آزمایش، اثرات تنش شوری در سه سطح صفر، ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی مولار با نمک کلریت سدیم بر جوانه‌زنی بذرهای گندم رقم کوه‌دشت انجام شد. قبل از آزمایش بذرهای گندم با هیپوکلرید سدیم ۱ درصد به مدت ۱۵ دقیقه ضدعفونی شدند. سپس ۳ تکرار ۵۰ تایی بذر گندم شمارش و روی کاغذ صافی در داخل پتری شیشه‌ای به قطر ۱۲ سانتی‌متر قرار گرفتند. محلول‌های تهیه شده با غلظت‌های مختلف به ظروف پتری اضافه شد و در دمای ۲۰ درجه سلسیوس در انکوباتور قرار گرفتند. بذرهای جوانه‌زده بسته به سرعت

¹ Karami

² Mostafalou

بازه زمانی مطالعاتی $[t_0, t_n]$ به عنوان مشاهدات سانسور شده در تحلیل در نظر گرفته می‌شوند.

مطابق با هر مدل رگرسیون غیرخطی می‌توان یک مدل زمان تا رویداد پارامتری تعریف کرد. مطابق با مدل گامپرتز ارائه شده در مدل (۱)، مدل زمان تا رویداد عبارت است از

$$Y'(t) = \begin{cases} G_{max} \exp(-\exp(-k(t-t_{50}))) & t_0 \leq t \leq t_n \\ (1-G_{max}) & t_n < t < \infty \end{cases} \quad (2)$$

که در آن برای $t \in [t_j, t_{j+1}]$ درصد بذره‌های جوانه‌زده در این بازه زمانی را نشان می‌دهد. جمله اضافی مدل (۲) تضمین کننده این است که بذرهایی که در بازه زمانی $[t_0, t_n]$ جوانه نزده، سرانجام در زمانی خارج از این فاصله یعنی (t_n, ∞) جوانه خواهد زد. برآورد پارامترها در این حالت معمولاً با بیشینه کردن

$$\sum_{j=1}^n n_j \log(Y'(t_j) - Y'(t_{j-1})) \quad (3)$$

حاصل می‌شود که $Y'(t_j) - Y'(t_{j-1})$ درصد بذره‌های جوانه زده بر حسب مدل در بازه $[t_{j-1}, t_j]$ و n_j تعداد مشاهداتی بذره‌های جوانه‌زده در بازه $[t_{j-1}, t_j]$ را نشان می‌دهد.

آماده‌سازی داده‌ها

در این بخش نحوه آماده‌سازی مشاهدات جوانه‌زنی بذرها را برای مدل‌سازی در رگرسیون غیرخطی و زمان تا رویداد شرح داده می‌شود. فرض کنید در مجموع m بذر در یک واحد آزمایشی مورد استفاده قرار گرفته است و m_j تعداد مشاهداتی بذره‌های جوانه‌زده در بازه $[t_{j-1}, t_j]$ باشد.

نحوه ثبت داده‌ها در مدل رگرسیون غیرخطی

نحوه ثبت مشاهدات برای آماده‌سازی برازش مدل رگرسیون غیرخطی در جدول (۱) ارائه شده است. همانطور که در این جدول مشخص است، درصد تجمعی بذرها در انتهای هر بازه به عنوان متغیر پاسخ ثبت می‌شود. در نتیجه نقاط انتهایی بازه‌ها به عنوان متغیر پیش‌بینی‌کننده و درصد تجمعی در نقاط انتهایی به عنوان

زمان‌هایی باشند که در آن میزان جوانه‌زنی ثبت گردیده است. توجه کنید که فواصل زمانی می‌تواند یکسان و یا غیر یکسان انتخاب شوند.

نحوه برازش مدل رگرسیون غیرخطی به داده‌های جوانه‌زنی

در دیدگاه رگرسیون غیرخطی بر حسب زمان، فرض می‌شود متغیر پاسخ $Y(t)$ درصد تجمعی جوانه زنی تا زمان مشخص t باشد. مدل‌های رگرسیونی متعددی برای تبیین رابطه بین درصد تجمعی جوانه‌زنی بر حسب زمان معرفی گردیده است که در این مقاله از مدل گامپرتز استفاده می‌شود

$$Y(t) = G_{max} \exp(-\exp(-k(t-t_{50}))) \quad t_0 \leq t \leq t_n \quad (1)$$

که G_{max} مقدار حداکثر جوانه‌زنی در بازه زمانی $[t_0, t_n]$ و t_{50} زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی حداکثر می‌باشد. علاوه بر آن، پارامتر k پارامتر شکل این مدل می‌باشد. روش کلی برآورد پارامترهای مدل (۱) روش کمترین مربعات خطا بر اساس مشاهدات $(t_i, Y(t_i))$ ، $i = 0, \dots, n$ می‌باشد. اما از آنجا که این مدل‌ها غیرخطی هستند برای برآورد پارامترها نمی‌توان مانند مدل‌های خطی فرمولی مشخص کرد و به همین دلیل از روش‌های عددی برای برآورد پارامترها استفاده می‌شود.

نحوه برازش مدل پارامتری زمان تا رویداد

جوانه‌زنی بذرها در طول زمان را می‌توان به عنوان زمان تا رویداد در نظر گرفت و بر اساس مدل‌های این رویکرد مورد تجزیه و تحلیل قرار داد.

مطالعات زمان تا رویداد به سه دسته پارامتری، نیمه پارامتری و ناپارامتری تقسیم می‌شوند که در این مقاله به روش پارامتری آن پرداخته می‌شود.

تفاوت‌های عمده مدل پارامتری زمان تا رویداد و مدل رگرسیون غیرخطی در نحوه ثبت داده‌ها و در نظرگرفتن بذره‌های جوانه زده به عنوان مشاهدات سانسور شده در تحلیل می‌باشد. در این رویکرد تعداد بذره‌های جوانه‌زده در هر بازه زمانی به عنوان متغیر پاسخ در نظر گرفته می‌شود. همچنین بذره‌های جوانه‌زده در

شود، ثبت می‌شود. در نهایت تعداد بذرهاى جوانه‌نزده در بازه زمانی مطالعاتی $[t_0, t_n]$ که تعداد آن m می‌باشد به عنوان مشاهدات سانسور شده و یا بذرهایی که پتانسیل جوانه‌زنی دارند اما در بازه زمانی مطالعاتی این اتفاق رخ نداده، در تحلیل و برآورد پارامترها مشارکت می‌کنند.

متغیر پاسخ در رگرسیون غیرخطی در نظر گرفته می‌شوند.

نحوه ثبت داده‌ها در مدل زمان تا رویداد

جدول (۲) نحوه ثبت مشاهدات را در تحلیل زمان تا رویداد نشان می‌دهد. همانطور که در جدول (۲) مشخص است در انتهای هر بازه زمانی، تعداد بذرهاى جوانه‌زده که با عنوان رویداد در زمان در نظر گرفته می‌

جدول ۱. نحوه ثبت مشاهدات در مدل رگرسیون غیرخطی

Table 1. The method of recording observations in nonlinear regression model

زمان	متغیر پاسخ
t_1	$\frac{m_1}{m}$
t_2	$\frac{m_1 + m_2}{m}$
\vdots	\vdots
t_n	$\frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{m}$

جدول ۲. نحوه ثبت مشاهدات در مدل زمان تا رویداد

Table 2. The method of recording observations in time to event model

شروع بازه زمانی	انتهای بازه زمانی	متغیر پاسخ
t_0	t_1	m_1
t_1	t_2	m_2
\vdots	\vdots	\vdots
t_{n-1}	t_n	m_n
t_n	∞	$m - \sum_{i=1}^n m_i$

این روش یکی از شیوه‌های مرسوم باز نمونه‌گیری^۱ برای شبیه‌سازی از مدل برای بررسی صحت و دقت

استفاده از روش مونت‌کارلو برای محاسبه دقیق انحراف معیار پارامترهای مدل

¹ Resampling

برازش مدل‌های رگرسیون غیرخطی و زمان تا رویداد و رسم شکل‌ها در نرم‌افزار R 4.0.2 و در بسته **drc** انجام گرفت. اجرای روش مونت‌کارلو برای مدل‌ها، با کدنویسی در نرم‌افزار R و بر اساس الگوریتم ارائه شده در بخش قبل انجام گرفت.

نتایج

در شکل ۱ اثرات تیمار سیانید پتاسیم بر رفع کمون و جوانه‌زنی بذرهای گردو با کمک مدل‌های رگرسیون غیرخطی و زمان تا رویداد ارائه شده است. با افزایش زمان قرارگیری در معرض تیمار سیانید پتاسیم، کمون بذرهای گردو رفع و درصد جوانه‌زنی افزایش یافت. در جدول ۳ برآورد پارامترهای مدل‌های رگرسیون غیرخطی و زمان تا رویداد به همراه معیارهای آماری برای مقایسه بهتر مدل‌ها ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود G_{max} که نشان‌دهنده حداکثر درصد جوانه‌زنی است در مدل‌های غیرخطی و زمان تا رویداد در تیمارهای مختلف مشابه می‌باشد. دو پارامتر دیگر مدل شامل T_{50} و k که نشان‌دهنده زمان تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی و سرعت جوانه‌زنی می‌باشند، نیز در هر دو مدل مشابه بود و اختلاف چندانی مشاهده نشد. ضریب تبیین و مجذور میانگین مربعات خطای دو مدل نزدیک به هم برآورد شد. ضریب تبیین مدل بالای ۰/۹۸ برآورد شد که نشان‌دهنده برازش بسیار خوب مدل به داده‌های جوانه‌زنی بذرهای گردو در تیمارهای مختلف سیانید می‌باشد. نکته قابل توجه در این بخش، انحراف معیار (SE) پارامترهای این دو مدل می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود در همه تیمارها، انحراف معیار در برآورد پارامترهای G_{max} ، T_{50} و k در مدل زمان تا رویداد بزرگتر از رگرسیون غیرخطی می‌باشد و بسته به پارامتر، این بزرگی نزدیک به دو الی سه برابر و گاهی تا ۱۰ برابر می‌باشد و این الگو در کلیه تیمارها مشاهده می‌شود.

در شکل ۲ برازش مدل‌های رگرسیون غیرخطی و زمان تا رویداد به داده‌های درصد جوانه‌زنی تجمعی بذرهای گندم در مقابل زمان در پاسخ به تیمارهای شوری ارائه شده است. با افزایش تنش شوری درصد جوانه‌زنی و همچنین سرعت جوانه‌زنی (معکوس زمان

نتایج می‌باشد. از آنجا که فقدان بعضی از شرایط لازم در مدل‌سازی، شامل وابستگی در مشاهدات، وجود داده‌های پرت و ثابت نبودن واریانس باعث انحراف شدید در نتایج می‌شود، استفاده از روش مونت‌کارلو می‌تواند برای کنترل صحت نتایج بسیار سودمند باشد. الگوریتم روش مونت‌کارلو به صورت زیر خلاصه می‌شود:

گام اول: به مقادیر برازش‌شده (\hat{Y}) از مدل (چه رگرسیون غیرخطی و چه زمان تا رویداد) مقادیری تصادفی (ε) اضافه شده و به عنوان مقادیر متغیر پاسخ در مدل در نظر گرفته می‌شود.

گام دوم: برآورد پارامترهای مدل با مقادیر گام اول به عنوان متغیر پاسخ بدست می‌آید.

گام سوم: گام اول و دوم k مرتبه تکرار می‌شود (در این مقاله ۱۰۰ بار تکرار می‌شود).

گام چهارم: بر اساس مقادیر پارامترها در k گام، استنباط آماری برای پارامترها صورت می‌گیرد.

نکته قابل توجه در استفاده از این روش این است که برای تولید مقادیر تصادفی ε در گام اول می‌توان بر اساس توزیع خطاهای مدل عمل کرد که می‌تواند توزیع نرمال و یا هر توزیع دیگری باشد. در صورت عدم توانایی در شناسایی توزیع، می‌توان از توزیع تجربی مقادیر خطا برای تولید مقادیر تصادفی ε استفاده کرد. همچنین، بعد از اجرای الگوریتم مونت‌کارلو به تعداد دفعات زیاد، برای هر پارامتر مدل مقادیر متعددی برآوردگر حاصل می‌شود که می‌توان بر اساس آنها توزیع برآوردگر آن پارامتر را تعیین کرد و استنباط آماری در مورد پارامتر مورد نظر را انجام داد. استنباط آماری برای یک پارامتر بر اساس روش مونت‌کارلو شامل محاسبه اریبی برآوردگر پارامتر، محاسبه میانگین مربعات خطا، محاسبه انحراف معیار پارامتر و همچنین تعیین فاصله اطمینان و انجام آزمون فرض برای آن پارامتر مدل می‌باشد. از آنجا که الگوریتم به تعداد زیاد انجام می‌شود می‌توان ادعا کرد که نتایج حاصل از این روش به درستی پارامترهای مدل را ارزیابی و صحت و دقت آنها را اندازه‌گیری می‌کنند.

روش تجزیه و تحلیل در نرم‌افزار R

چندان تحت تأثیر دما قرار نگرفتند؛ اما T_{50} و k تحت تأثیر دما قرار گرفتند. با افزایش دما از ۱۵ به ۴۰ درجه سلسیوس، زمان تا T_{50} و G_{max} در دو مدل مذکور، بزرگ‌تر بودن برآورد این پارامترها در مدل زمان تا رویداد در مقایسه با مدل رگرسیون غیرخطی و همچنین بزرگ‌تر بودن انحراف معیار برآوردگر این پارامترها در مدل زمان تا رویداد در مقایسه با رگرسیون غیرخطی می‌باشد (جدول ۶). درصد بزرگی انحراف معیار در برآوردگر پارامتر T_{50} در مقایسه با دو پارامتر دیگر در مدل زمان تا رویداد بیشتر از رگرسیون غیرخطی بود، به طوری که این بزرگی در بعضی از پارامترها به ۷ برابر هم رسید.

در شکل‌های ۵ تا ۸ انحراف معیار برآورد شده برای T_{50} با روش مونت‌کارلو در مقایسه با دو روش رگرسیون غیرخطی و زمان تا رویداد در تیمارهای مختلف ارائه شده است. در کلیه تیمارها مقدار عددی انحراف معیار شبیه‌سازی شده با روش مونت‌کارلو نزدیک به انحراف معیار برآورد شده با مدل زمان تا رویداد بود و انحراف معیار برآورد شده با مدل رگرسیون غیرخطی کوچک‌تر از مدل زمان تا رویداد و روش مونت‌کارلو بود.

بحث

مدل زمان تا رویداد در مقایسه با مدل رگرسیون غیرخطی دارای مزایا و برتری می‌باشد؛ اما با وجود این برتری، هنوز اکثر محققان قادر به استفاده از این مدل در تحقیقات در زمینه بذر نمی‌باشند. علت این امر را می‌توان در دو مورد دید. اول اینکه، محققان اطلاعی از مدل زمان تا رویداد ندارند. دوم اینکه، با وجود اطلاع از این مدل، نحوه استفاده از این مدل و مزایای استفاده از این مدل در مقایسه با مدل‌های رگرسیون غیرخطی را نمی‌دانند. اسکات و جونز^۱ (۱۹۸۲) و هانتز^۲ و همکاران (۱۹۸۴) جزء اولین کسانی بودند که از این روش برای تجزیه و تحلیل داده‌های جوانه‌زنی استفاده کردند.

تا T_{50} کاهش یافت که درصد کاهش در سرعت جوانه‌زنی بیشتر از درصد جوانه‌زنی بود. همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، پارامترهای مدل رگرسیون غیرخطی و زمان تا رویداد شامل G_{max} ، T_{50} و k در هر دو مدل اختلاف چندانی با هم نداشتند. همچنین هر دو مدل از برازش بسیار خوبی به داده‌های درصد جوانه زنی بذرهای گندم در مقابل زمان برخوردار بودند (ضریب تبیین بالای ۰/۹۹). همانند آزمایش قبل در این آزمایش نیز، انحراف معیار در پارامترهای مدل زمان تا رویداد بیشتر از مدل رگرسیون غیرخطی بود. این بزرگی حتی در بعضی از پارامترها به ۱۰ برابر هم رسید.

در شکل ۳ اثرات پتانسیل آب بر جوانه‌زنی بذرهای ذرت با کمک مدل‌های رگرسیون غیرخطی و زمان تا رویداد ارائه شده است. درصد جوانه‌زنی در پتانسیل آب شاهد و ۰/۶- مگاپاسکال اختلافی نداشتند و درصد جوانه‌زنی نزدیک ۱۰۰ درصد بود؛ اما با افزایش پتانسیل آب از ۰/۶- مگاپاسکال به ۱/۲- مگاپاسکال، درصد جوانه زنی کاهش و به ۴۸ درصد رسید.

در جدول ۵ پارامترهای مدل رگرسیون غیرخطی و زمان تا رویداد به داده‌های درصد جوانه‌زنی ذرت ارائه شده است. اثرات پتانسیل آب بر T_{50} و k بیشتر از درصد جوانه‌زنی بود، به طوری که با افزایش پتانسیل آب از صفر به ۱/۲- مگاپاسکال T_{50} افزایش و k به صورت خطی کاهش یافت. این بیانگر حساسیت بیشتر پارامترهای T_{50} و k به تنش خشکی نسبت به G_{max} می‌باشد. از لحاظ هر سه پارامتر، مدل رگرسیون غیرخطی و زمان تا رویداد تفاوتی با هم نداشتند. اما؛ جالب این بود که انحراف معیار پارامترهای G_{max} ، T_{50} و k در تیمار شاهد و ۰/۶- مگاپاسکال در مدل رگرسیون غیرخطی و زمان تا رویداد کاملاً مشابه هم بود؛ اما در تیمار ۱/۲- مگاپاسکال همانند آزمایش‌های قبلی، انحراف معیار پارامترها در مدل زمان تا رویداد بزرگ‌تر از رگرسیون غیرخطی بود (جدول ۵).

همانند آزمایش‌های قبلی، مدل رگرسیون غیرخطی و زمان تا رویداد برازش مناسبی به داده‌های درصد جوانه‌زنی بذرهای پنبه در مقابل زمان در دماهای مختلف داشتند (شکل ۴؛ ضریب تبیین بالای بین ۰/۹۷-۰/۹۹؛ جدول ۶). درصد جوانه‌زنی بذرهای پنبه

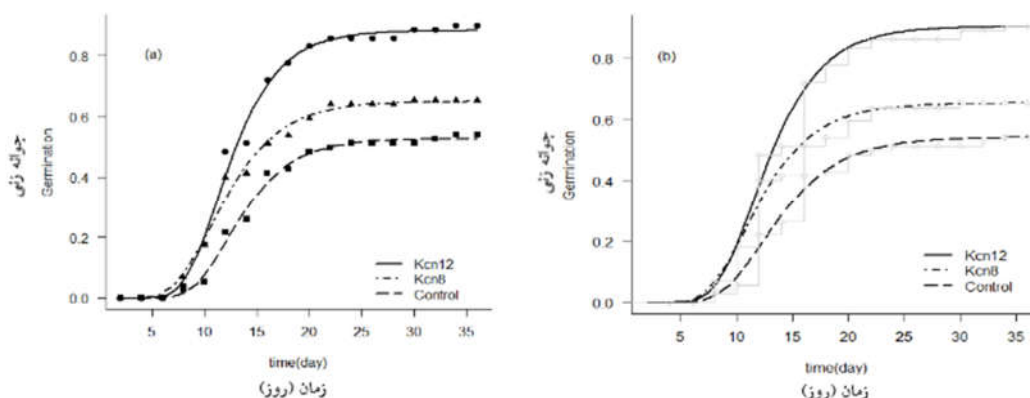
¹ Scott and Jones

² Hunter

جدول ۳. برازش رگرسیون غیرخطی و زمان تا رویداد بر پایه مدل گامپرتز به داده‌های درصد جوانه‌زنی گردو در پاسخ به سطوح مختلف سیانید پتاسیم (اعداد داخل پرانتز انحراف معیار پارامترها می‌باشد).

Table 3. Fitting of nonlinear and time to event based on Gompertz model for walnut seeds germination in response to different levels of Potassium cyanide (The numbers in parentheses are the standard error of parameters).

تیمار	رگرسیون غیرخطی بر پایه مدل گامپرتز					زمان تا رویداد بر پایه مدل گامپرتز				
	Nonlinear regression based on Gompertz model					Time to event based on Gompertz model				
	G_{max}	T_{50}	k	R^2	RMSE	G_{max}	T_{50}	k	R^2	RMSE
کنترل	0.531 (0.009)	12.185 (0.193)	-0.291 (0.023)	0.999	0.002	0.540 (0.102)	12.340 (0.886)	-0.279 (0.060)	0.999	0.002
KCN (۸ ساعت)	0.651 (0.009)	10.643 (0.212)	-0.281 (0.023)	0.999	0.003	0.652 (0.097)	10.790 (0.907)	-0.290 (0.064)	0.999	0.004
KCN (۱۲ ساعت)	0.882 (0.011)	11.213 (0.186)	-0.311 (0.024)	0.981	0.048	0.901 (0.060)	11.480 (0.768)	-0.299 (0.054)	0.984	0.047



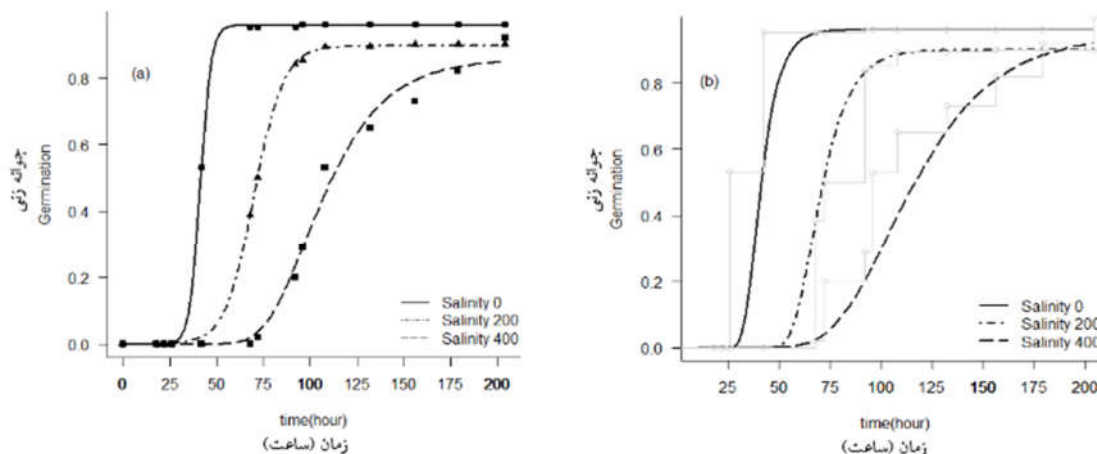
شکل ۱. درصد جوانه‌زنی بذرهای گردو در پاسخ به سطوح مختلف سیانید پتاسیم: رگرسیون غیرخطی بر مبنای مدل گامپرتز (a)، زمان تا رویداد بر مبنای مدل گامپرتز (b)

Fig. 1. Walnut seeds germination rate in response to different levels of Potassium cyanide: (a) nonlinear regression based on Gompertz model, (b) time to event based on Gompertz model

جدول ۴. برازش رگرسیون غیرخطی و زمان تا رویداد بر پایه مدل گامپرتز به داده‌های درصد جوانه‌زنی گندم در پاسخ به سطوح مختلف تنش شوری. (اعداد داخل پرانتز انحراف معیار پارامترها می‌باشد).

Table 4. Fitting of nonlinear and time to event methods based on Gompertz model for wheat seeds germination in response to different levels of salinity (The numbers in parentheses are the standard error of parameters).

شوری (میلی مولار)	رگرسیون غیرخطی بر پایه مدل گامپرتز					زمان تا رویداد بر پایه مدل گامپرتز				
	Nonlinear regression based on Gompertz model					Time to event based on Gompertz model				
	G_{max}	T_{50}	k	R^2	RMSE	G_{max}	T_{50}	k	R^2	RMSE
0	0.959 (0.001)	38.813 (0.192)	-0.167 (0.010)	0.999	0.002	0.961 (0.028)	38.694 (0.486)	-0.158 (0.039)	0.999	0.002
200	0.901 (0.001)	66.501 (0.123)	-0.101 (0.002)	0.999	0.003	0.899 (0.043)	66.362 (1.095)	-0.099 (0.019)	0.999	0.004
400	0.857 (0.036)	97.891 (2.078)	-0.044 (0.007)	0.981	0.048	0.846 (0.044)	103.96 (4.643)	-0.036 (0.055)	0.984	0.047



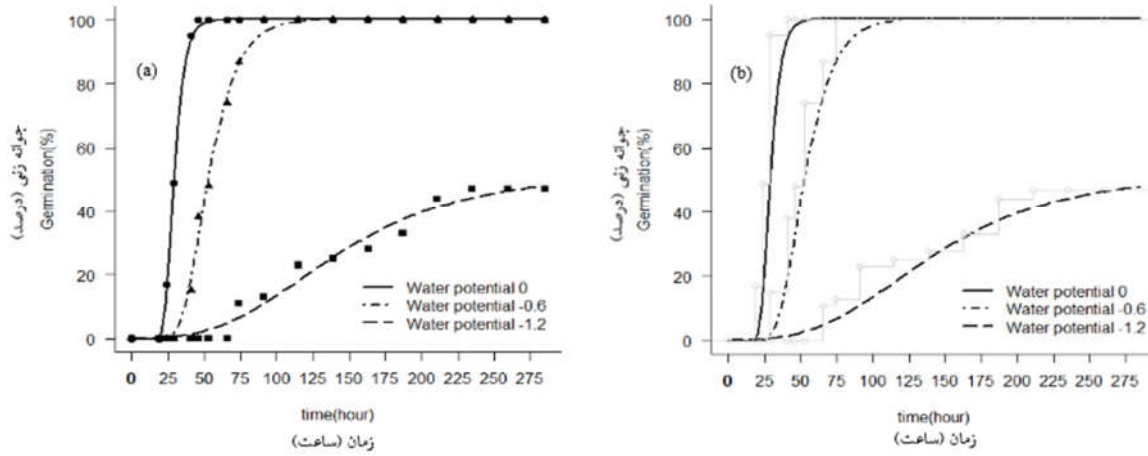
شکل ۲. درصد جوانه‌زنی بذرهای گندم در پاسخ به سطوح مختلف تنش شوری: رگرسیون غیرخطی بر مبنای مدل گامپرتز (a)، زمان تا رویداد بر مبنای مدل گامپرتز (b)

Fig. 2. Wheat seeds germination rate in response to different levels of salinity: (a) nonlinear regression based on Gompertz model, (b) time to event based on Gompertz model

جدول ۵. برازش رگرسیون غیرخطی و مدل زمان تا رویداد بر پایه مدل گامپرتز به داده‌های درصد جوانه‌زنی ذرت در پاسخ به سطوح مختلف تنش خشکی. (اعداد داخل پرانتز انحراف معیار پارامترها می‌باشد).

Table 5. Fitting of nonlinear and time to event methods based on Gompertz model for corn seeds germination in response to different levels of water potential (The numbers in parentheses are the standard error of parameters).

خشکی (مگاپاسکال)	رگرسیون غیرخطی بر پایه مدل گامپرتز Nonlinear regression based on Gompertz model					زمان تا رویداد بر پایه مدل گامپرتز Time to event based on Gompertz model				
	G_{max}	T_{50}	k	R^2	RMSE	G_{max}	T_{50}	k	R^2	RMSE
0	0.999 (0.229)	27.118 (0.092)	-0.197 (0.005)	0.999	0.748	0.999 (0.229)	27.118 (0.092)	-0.197 (0.005)	0.999	0.748
-0.6	0.999 (0.884)	48.043 (0.536)	-0.074 (0.004)	0.997	2.222	0.999 (0.884)	48.043 (0.536)	-0.074 (0.004)	0.997	2.222
-1.2	0.510 (0.417)	116.96(1.467)	-0.016 (0.002)	0.976	2.757	0.511 (0.744)	117.27 (3.463)	-0.018 (0.008)	0.981	0.260



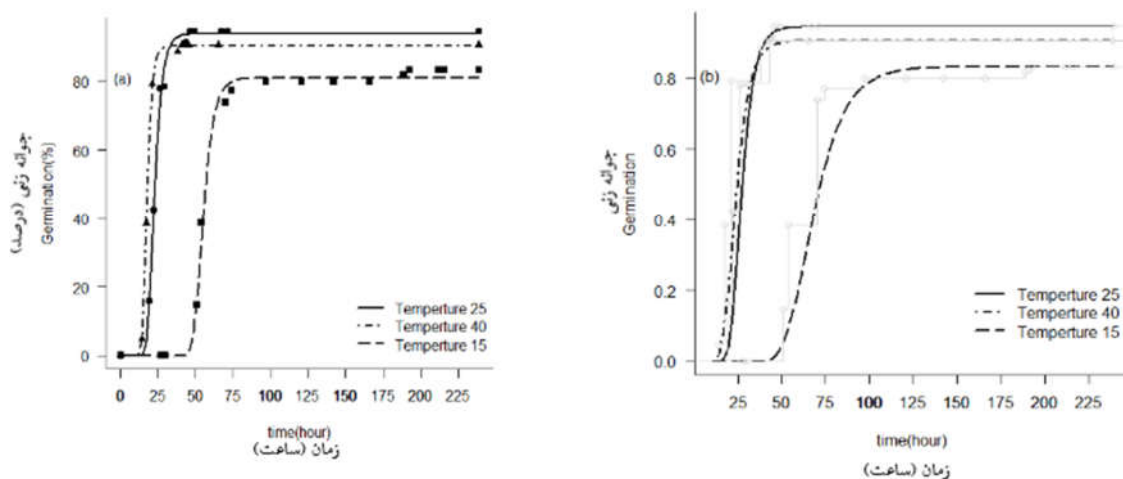
شکل ۳. درصد جوانه‌زنی بذرهای ذرت در پاسخ به سطوح مختلف تنش خشکی: رگرسیون غیرخطی بر مبنای مدل گامپرتز (a)، زمان تا رویداد بر مبنای مدل گامپرتز (b)

Fig. 3. Corn seeds germination rate in response to different levels of water potential: (a) nonlinear regression based on Gompertz model, (b) time to event based on Gompertz model

جدول ۶. برازش رگرسیون غیرخطی و زمان تا رویداد بر پایه مدل گامپرتز به داده‌های درصد جوانه‌زنی پنبه در پاسخ به سطوح مختلف دما. (اعداد داخل پرانتز انحراف معیار پارامترها می‌باشد).

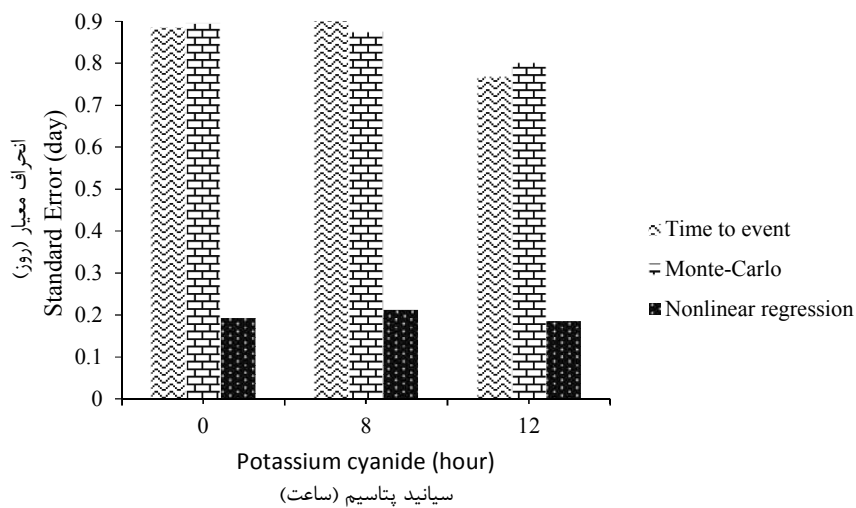
Table 6. Fitting of nonlinear and time to event methods based on Gompertz model for cotton seeds germination in response to different levels of temperature (The numbers in parentheses are the standard error of parameters).

دما (سلسیوس)	رگرسیون غیرخطی بر پایه مدل گامپرتز Nonlinear regression based on Gompertz model					زمان تا رویداد بر پایه مدل گامپرتز Time to event based on Gompertz model				
	G_{max}	T_{50}	k	R^2	RMSE	G_{max}	T_{50}	k	R^2	RMSE
15	0.809 (0.887)	53.105 (0.369)	-0.208 (0.059)	0.995	2.129	0.833 (0.952)	57.607 (2.030)	-0.181 (0.080)	0.977	0.580
25	0.938 (0.650)	21.304 (0.225)	-0.279 (0.021)	0.994	2.432	0.946 (0.843)	25.045 (0.869)	-0.260 (0.055)	0.973	0.720
40	0.903 (0.402)	16.592 (0.060)	-0.446 (0.017)	0.999	0.744	0.926 (0.541)	21.681 (0.498)	-0.388 (0.057)	0.989	0.440



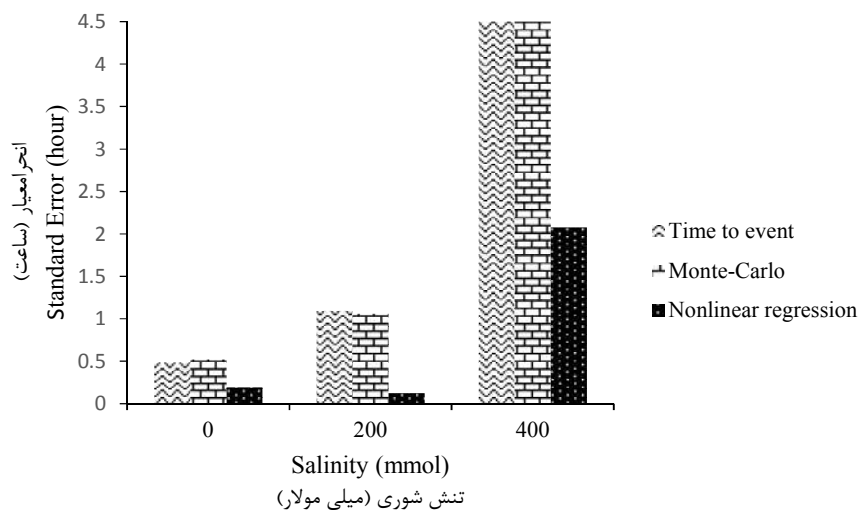
شکل ۴. درصد جوانه‌زنی بذرهای پنبه در پاسخ به سطوح مختلف دما: رگرسیون غیرخطی بر مبنای مدل گامپرتز (a)، زمان تا رویداد بر مبنای مدل گامپرتز (b)

Fig. 4. Cotton seeds germination rate in response to different levels of temperature: (a) nonlinear regression based on Gompertz model, (b) time to event based on Gompertz model

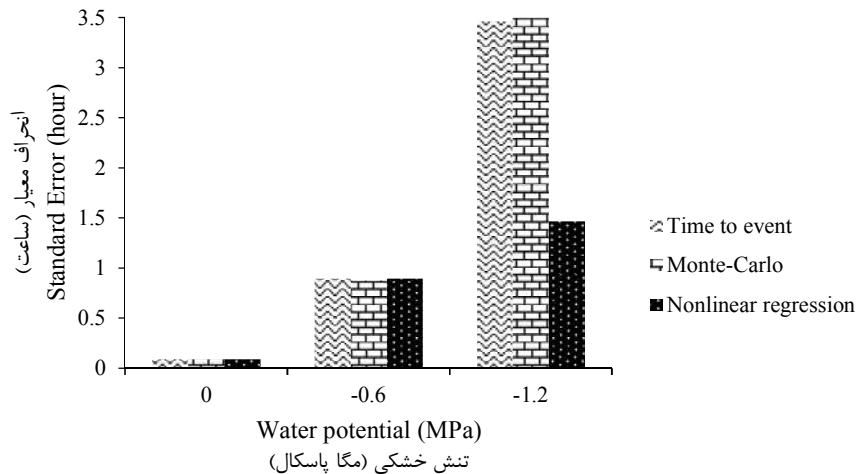


شکل ۵. مقایسه انحراف معیار پارامتر T_{50} در تیمارهای مختلف سیانید پتاسیم (کنترل، ۸ و ۱۲ ساعت) در جوانه‌زنی بذرهای گردو

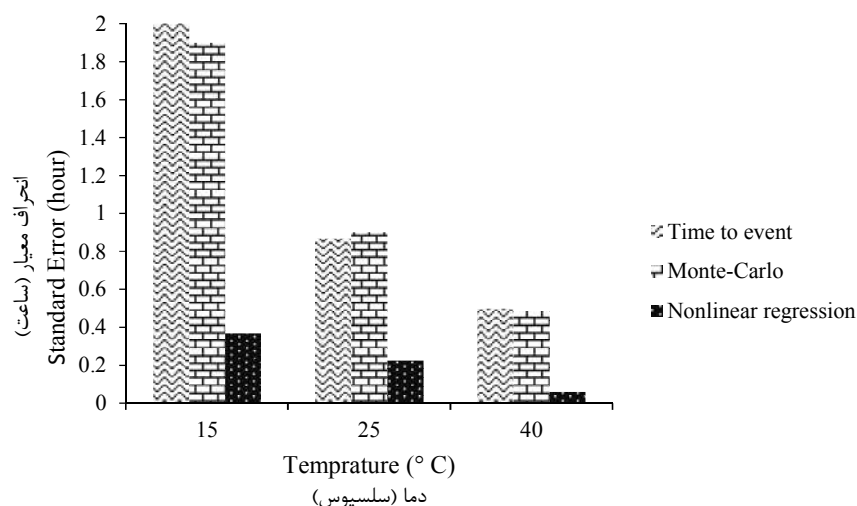
Fig. 5. Comparison of standard error of T_{50} of walnut seeds germination under different treatments (control, 8 and 12 hours) of Potassium cyanide



شکل ۶. مقایسه انحراف معیار پارامتر T_{50} در تیمارهای مختلف تنش شوری در جوانه‌زنی بذرهای گندم
Fig. 6. Comparison of standard error of T_{50} of wheat seeds germination under different treatments of salinity



شکل ۷. مقایسه انحراف معیار پارامتر T_{50} در تیمارهای مختلف تنش خشکی در جوانه‌زنی بذرهای ذرت
Fig. 7. Comparison of standard error of T_{50} corn of seeds germination under different tr treatments of water potential



شکل ۸. مقایسه انحراف معیار پارامتر T_{50} در تیمارهای مختلف دما در جوانه‌زنی بذرهای پنبه

Fig. 8. Comparison of standard error of T_{50} of cotton seeds germination under different treatments of temperature

داده‌های جوانه‌زنی پنبه که ضرایب مدل زمان تا رویداد کمی بیشتر بود؛ به عبارت دیگر مدل زمان تا رویداد و رگرسیون غیرخطی دارای برازش مشابه و همچنین پارامترهای مشابه می‌باشند. اختلاف اساسی در این دو مدل را می‌توان اختلاف قابل توجه در خطای استاندارد پارامترها برشمرد. در اکثر تیمارها، خطای استاندارد پارامترهای G_{max} ، T_{50} و k در رگرسیون غیرخطی به طور قابل توجهی از مقادیر برآورد شده در مدل زمان تا رویداد کمتر بود. به عبارت دیگر، خطای استاندارد پارامترهای مدل زمان تا رویداد بزرگتر از رگرسیون غیرخطی می‌باشد، به طوری که این بزرگی در برخی تیمارها تا ده برابر هم رسید. در مطالعه‌ای ریتزه و همکاران (۲۰۱۳) که مدل زمان تا رویداد را بر پایه مدل لجستیک انجام دادند، بیان داشتند که خطای استاندارد برآورد پارامترهای زمان تا رویداد بزرگتر از مدل رگرسیون غیرخطی بود. در تحقیق حاضر مدل پایه استفاده شده برای تجزیه و تحلیل زمان تا رویداد، مدل گامپرتز بود و خطای استاندارد پارامترهای مدل زمان تا رویداد نیز بیشتر از رگرسیون غیرخطی بود. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که پایه مدل استفاده شده تأثیر چندانی در خطای استاندارد مدل زمان تا رویداد ندارد و محقق هر مدلی شامل لجستیک، گامپرتز، هیل و یا ویبول را استفاده کند، خطای استاندارد برآورد

در ادامه انوفری^۱ و همکاران (۲۰۱۰) مقاله‌ای با عنوان یک تجزیه و تحلیل جدید برای تجزیه داده‌های جوانه‌زنی در بذر علف‌های هرز چاپ کردند و این روش را به عنوان یک روش جدید برای تجزیه و تحلیل داده‌های جوانه‌زنی معرفی کردند. به دنبال آن مکنایر و همکاران (۲۰۱۲) و ریتزه و همکاران (۲۰۱۳) با چاپ مقالات خود به معایب روش‌های رگرسیون غیرخطی و مزایای مدل زمان تا رویداد پرداختند. از آن تاریخ به بعد، استفاده از مدل زمان تا رویداد بین محققان بذری افزایش یافت و محققان از مدل زمان تا رویداد در تجزیه و تحلیل داده‌های خود استفاده می‌کنند (گریستا^۲ و همکاران، ۲۰۱۱؛ کریستادو^۳ و همکاران، ۲۰۱۹).

این تحقیق به خوبی کارایی و مزیت مدل زمان تا رویداد را در مقایسه با مدل‌های رگرسیون غیرخطی در آزمایش‌های مختلف روی بذرهای گردو، گندم، ذرت و پنبه را نشان داد. همانطور که در جدول ۴ ارائه شده است هر دو مدل بر اساس ضریب تبیین و مجذور میانگین مربعات خطا از دقت بالایی برخوردار بودند. همچنین برآورد پارامترهای مدل‌ها شامل T_{50} ، G_{max} و k در کلیه تیمارها تا حدودی مشابه هم بود (به جز در

¹ Onofri

² Gresta

³ Cristaudo

استاندارد پارامتر T50 با سه روش رگرسیون غیرخطی، زمان تا رویداد و مونت کارلو برای تیمارهای مختلف ارائه گردید. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار عددی خطای استاندارد مدل زمان تا رویداد مشابه و نزدیک به نتیجه روش مونت کارلو می‌باشد و مقدار عددی خطای استاندارد رگرسیون غیرخطی کوچک‌تر از روش مونت کارلو می‌باشد. پس می‌توان نتیجه‌گیری کرد مقدار خطای استاندارد برآورد شده توسط مدل زمان تا رویداد به واقعیت نزدیک است. در مورد سایر پارامترهای مدل نیز همین نتیجه حاصل شد که به دلیل اختصار نتایج آن گزارش نشد.

نتیجه‌گیری

به طور کلی این تحقیق نشان داد که نتایج مدل زمان تا رویداد نسبت به مدل‌های رگرسیون غیرخطی از دقت بالاتری برخوردار است و برخی نواقص موجود در مدل‌های رگرسیون غیرخطی شامل وجود خود همبستگی در متغیر پاسخ بدلیل استفاده از مقادیر تجمعی درصد جوانه‌زنی، عدم در نظر گرفتن داده‌های سانسور شده در تجزیه و تحلیل داده‌های جوانه‌زنی و برآورد نادرست انحراف معیار پارامترهای مدل، در مدل زمان تا رویداد رفع می‌گردد. این مدل با به کارگیری رویداد جوانه‌زنی به طور مجزا در هر بازه زمانی در تحلیل، در نظر گرفتن بذره‌های جوانه‌زنده به عنوان مشاهدات سانسور شده، استفاده از بازه زمانی در مدل‌سازی و نه یک زمان مشخص و استفاده از توزیع آماری دقیق (توزیع چندجمله‌ای) و در نتیجه استفاده از تابع درست‌نمایی در برآورد پارامترهای مدل و انحراف معیار آنها، قادر به رفع مشکلات و نواقص مدل‌های رگرسیون غیرخطی می‌باشد؛ بنابراین به محققان بذر توصیه می‌گردد که برای تجزیه و تحلیل داده‌های جوانه‌زنی و سبز شدن تجمعی در مقابل زمان و برآورد پارامترهای آن برای توصیف دقیق و درست داده‌های آزمایش‌های خود، از مدل زمان تا رویداد استفاده کنند. شاید استفاده از این مدل در ابتدا برای محققان کمی دشوار باشد، اما با مطالعه دقیق این مقاله قادر به استفاده از این روش می‌باشند و در صورت برخورد با مشکلی در حین تجزیه و تحلیل داده‌ها، می‌توانند با

پارامترهای مدل زمان تا رویداد بزرگتر از مدل رگرسیون غیرخطی می‌باشد.

نکته قابل توجه دیگر در این تحقیق مشابه بودن خطای استاندارد در داده‌های جوانه‌زنی بذره‌های ذرت در پاسخ به تنش خشکی بود. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود در تیمار شاهد و پتانسیل آب ۰/۳- مگاپاسکال، پارامترهای هر دو مدل و همچنین خطای استاندارد برآورد پارامترهای هر دو مدل مشابه بود. علت این امر را می‌توان در جوانه‌زنی ۱۰۰ درصد بذرها در این دو تیمار جستجو کرد. همانطور که پیشتر بیان شد، مدل زمان تا رویداد بر اساس داده‌های سانسور شده و تعداد بذره‌های جوانه‌زنده عمل می‌کند. از آنجا که در این دو تیمار، درصد جوانه‌زنی به حداکثر مقدار خود یعنی ۱۰۰ درصد رسید، در نتیجه مشاهدات سانسور شده و به عبارت دیگر بذره‌های جوانه‌زنده وجود نداشت. از این رو می‌توان بیان داشت که زمانی که در تیماری، درصد جوانه‌زنی به ۱۰۰ درصد برسد، پارامترها و خطای استاندارد برآورد پارامترها در هر دو مدل مشابه می‌باشد. حال ممکن است برای محققان این سؤال پیش بیاید که آیا خطای استاندارد مدل زمان تا رویداد به واقعیت نزدیک‌تر است یا مدل رگرسیون غیرخطی. برای پاسخ به این سؤال از روش مونت کارلو استفاده شد. پشتوانه این روش قانون ضعیف اعداد بزرگ است که از قضایای اصلی آمار و احتمال می‌باشد (روبنشتاین و کروس^۱، ۲۰۱۶). این پشتوانه علمی باعث شده در بسیاری از مسائل از جمله مدل‌سازی که به نوعی یک مساله بهینه‌سازی می‌باشد، از این روش استفاده گردد. در این روش بر مبنای اطلاعات پایه که از آن مدل در اختیار است، داده‌های شبیه‌سازی شده تولید می‌شود و این عمل بارها تکرار می‌گردد. این روش زمانی که داده‌های مشاهداتی وجود نداشته باشد و یا مشاهدات توانایی برآورد ویژگی‌هایی از پارامترهای مدل که نیاز به تکرار دارد و تنها بر اساس یک دسته مشاهدات، نمی‌توان آنها را ارزیابی کرد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. اطمینان به نتایج این روش باعث شده در بسیاری از علوم کاربردی و از جمله علوم بذر از آن استفاده گردد (اونوفری و همکاران، ۲۰۱۴). در شکل ۵ خطای

¹ Rubinstein and Kroese

مولفان مقاله مکاتبه کنند و از آنها راهنمایی و کمک بخواهند.

منابع

- Collbach, N. and Durr, C. 2003. Effects of seed production and storage conditions on blackgrass (*Alopecurus myosuroides*) germination and shoot elongation. *Weed Science*, 51: 708-718. <https://doi.org/10.1614/P2002-051>
- Cristaudo, A., Catara, S., Mingo, A., Restuccia, A. and Onofri, A. 2019. Temperature and storage time strongly affect the germination success of perennial *Euphorbia* species in Mediterranean regions. *Ecology and Evolution*, 9: 10984-10999. <https://doi.org/10.1002/ece3.5535>
- El-Kassaby, Y.A., Moss, I., Kolotelo, D. and Stoehr, M. 2008. Seed germination: Mathematical representation and parameters extraction. *Forest Science*, 54(1): 220-227.
- Gorzin, M., Ghaderi-Far, F., Sadeghipour, H.R. and Zeinali, E. 2020. Induced thermo-dormancy in rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars by sub-and supra-optimal temperatures. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40(5): 1-14. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10266-2>
- Gresta, F., Avola, G., Onofri, A., Anastasi, U. and Cristaudo, A. 2011. When does hard coat impose dormancy in legume seeds Lotus and Scorpiurus case study. *Crop Science*, 51(4): 1739-1747. <https://doi.org/10.2135/cropsci2010.12.0700>
- 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>
- Humplík, J.F., Dostál, J., Ugena, L., Spíchal, L., De Diego, N., Vencálek, O. and Fürst, T. 2020. Bayesian approach for analysis of time-to-event data in plant biology. *Plant Methods*, 16(1): 1-7. <https://doi.org/10.1186/s13007-020-0554-1>
- Hunter, E. A., Glasbey, C. A., and Naylor, R. E. 1984. The analysis of data from germination tests. *Journal of Agricultural Science*, 102: 207- 213. <https://doi.org/10.1017/S0021859600041642>
- Karami, H. 2016. An alternative model to quantifying corn seed germination to temperature and water potential. M.Sc. dissertation, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran. [In Persian with English Summary].
- 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., Ghaderi-Far, F., Rastegar, Z. and Masin, R. 2018. Base temperatures for germination of selected weed species in Iran. *Plant Protection Science*, 54: 60-66. <https://doi.org/10.17221/92/2016-PPS>
- McNair, J.N., Sunkara, A. and Frobish, D. 2012. How to analyze seed germination data using statistical time-to-event analysis: non-parametric and semi-parametric methods. *Seed Science Research*, 22(2): 77-95. <https://doi.org/10.1017/S0960258511000547>
- Mostafalou, M. 2011. Effect of nitric oxide, cyanide and moist chilling on the alleviation of dormancy in Persian walnut kernels. M.Sc. dissertation, Faculty of Biology, Golestan University, Iran. [In Persian with English Summary].
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.08.011>
- Onofri, A., Gresta, F. and Tei, F. 2010. A new method for the analysis of germination and emergence data of weed species. *Weed Research*, 50(3): 187-198. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2010.00776.x>

- Onofri, A., Mesgaran, M.B., Neve, P. and Cousens, R.D. 2014. Experimental design and parameter estimation for threshold models in seed germination. *Weed Research*, 54(5): 425-435. <https://doi.org/10.1111/wre.12095>
- Porlali, F. 2015. Modeling the effect of temperature on germination of cotton varieties: the different methods accuracy's comparison of germination rate calculation to determine cardinal temperatures. M.Sc. dissertation, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran. [In Persian with English Summary].
- Porlali, F., Ghaderi Far, F., Soltani, E., Pahlevani, M.H. 2019. Comparison of different models for determining time up to 50% maximum germination: a case study of cottonseeds (*Gossypium hirsutum*). *Iranian Journal of Seed Research*, 5(2): 1-13. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.29252/yujrs.5.2.1>
- Pournik, S., Abbasi-Rostami, M., Sadeghipour, H.R. and Ghaderi-Far, F. 2019. True lipases beside phospholipases contribute to walnut kernel viability loss during controlled deterioration and natural aging. *Environmental and Experimental Botany*, 164: 71-83. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.04.016>
- Rabani, R. 2013. Seed vigor tests for predicting seedling emergence of wheat seed lots in field. M.Sc. dissertation, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran. [In Persian with English Summary].
- Ritz, C., Pipper, C., Yndgaard, F., Fredlund, K. and Steinrucken, G. 2010. Modelling flowering of plants using time-to-event methods. *European Society for Agronomy*, 32: 155-161. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.10.002>
- Ritz, C., Pipper, C.B. and Streibig, J.C. 2013. Analysis of germination data from agricultural experiments. *European Society for Agronomy*, 45: 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.10.003>
- Romano, A. and Stevanato, P. 2020. Germination data analysis by time-to-event approaches. *Plants*, 9(5): 617-617. <https://doi.org/10.3390/plants9050617>
- Rubinstein, R.Y. and Kroese, D.P. 2016. Simulation and the Monte Carlo method (Vol. 10). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118631980>
- Scott, S.J. and Jones, R.A. 1982. Low temperature seed germination of *Lycopersicon* species evaluated by survival analysis. *Euphytica*, 31(3): 869-883. <https://doi.org/10.1007/BF00039227>
- 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: 2016-2021. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20131341>
- Tjørve, K.M.C. and Tjørve, E. 2017. A proposed family of unified models for sigmoidal growth. *Ecological Modelling*, 359: 117-127. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.05.008>

Research Article

Comparison of time to the event and nonlinear regression models in the analysis of germination data**Majid Azimmohseni^{1,*}, Farshid Ghaderi-Far², Mahnaz Khalafi¹
Hamid Reza Sadeghipour³, Marzieh Ghezel⁴****Extended abstract**

Introduction: Numerous studies are being carried out nowadays to reveal the effects of different treatments on the germination of seeds from various crops. Various methods are used to calculate the parameters related to germination, among which the nonlinear regression is the most common. Although different models have been introduced for this method, serious problems in its structure and results motivated researchers to investigate alternative approaches with higher accuracy and precision. The main purpose of the present research is to introduce the time-to-event model and compare its reliability with nonlinear regression in experiments carried out under different conditions.

Materials and Methods: The results of four different experiments were used in this study, including the effect of Potassium cyanide on walnut seed germination, the effect of salinity on wheat seed germination, the effect of water potential on corn seed germination, and the effect of temperature on cotton seed germination. The nonlinear regression and time-to-event methods were fitted to the observed data based on the Gompertz model. The obtained standard errors from the two models were further assessed using the Monte Carlo method.

Results: Both methods fitted well to the observed data according to the MSE and R^2 criteria. Although the germination parameters were approximately identical in both models, the standard error of parameters in nonlinear regression was significantly less than those of time to event method except for the experiments in which all tested seeds germinated within the time frame of study so that in the latter case the results were identical. The Monte-Carlo method confirmed the results of the time-to-event model and reveals the underestimation of the nonlinear regression method in estimating the standard error of parameters.

Conclusions: Overall, the results of this research showed that the time-to-event model can be utilized as a suitable model in seed germination studies under different conditions and treatments. This model, not only provides precise estimates of the germination parameters but also provides the precise standard error of parameters that have important roles in making inferences for parameters. The *drc* package in R software enables researchers to fit the different time-to-event models.

Keywords: *Monte-Carlo method, Nonlinear regression model, Seeds germination, Time-to-event model*

Highlights:

- 1- Time to the event model is used in the estimation of seed germination parameters.
- 2- Time-to-event and nonlinear regression methods were compared in different seed germination experiments.
- 3- The Monte-Carlo method was used to investigate the accuracy of the results of the used methods.

¹ Assistant Professor, Department of Statistics, Golestan University, Gorgan, Iran

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

³ Associate Professor, Department of Biology, Golestan University, Gorgan, Iran

⁴ Former M.Sc. Student in Statistics, Golestan University, Gorgan, Iran

