Iranian Journal of Seed Research, 2024, 10(2): 37-48

Research Article

Evaluation of the generalized linear model to the germination percentage data and its comparison with the square root transformation

Farshid Ghaderi-Far[1], Majid Azimmohseni[2,*], Seyed Hamid Reza Bagheri[3]

Extended abstract

Introduction: In seed research, germination percentage data is the result of counting and has a binomial distribution. Therefore, seed researchers use data transformation, especially square root transformation, to stabilize the variance and normalize the data before performing analysis of variance and comparison of treatments. Despite the use of data transformation, this method has fundamental issues in the structure that misleads the test results. Therefore, it is important to introduce and replace a method that preserves the research assumptions and provides acceptable results for researchers without using data transformation. The use of generalized linear model is an alternative method for analyzing germination data with binomial distribution. In this research, the generalized linear model will be introduced first. Then, the efficiency of this method will be illustrated using simulated and actual germination data.

Materials and Methods: In this research, first the simulated data was generated by the Monte Carlo method. Based on the simulated data, the significance level and the power of test of generalized linear model were computed. Then the actual data related to three experiments including the effect of acidity on germination of wheat varieties, the effect of water stress and salinity on germination of yellow sweet clover seeds, and the effect of alternating temperatures on germination of three lavender populations were used and the results of the generalized linear model were compared with the square root transformation method based on the data of three experiments.

Results: The simulation results showed that the generalized linear model has a high efficiency to preserve the predetermined significance level and a high power in detecting significant differences in germination of the treatments. Moreover, the results of the comparison of the generalized linear model with the square root transformation method illustrated that the generalized linear model had a higher capability to detect significant differences between various treatments, especially in the treatments with unequal seeds in the Petri dish, and in the treatments in which the square root transformation method resulted in no significant difference among treatments, the generalized linear method showed a significant difference.

Conclusions: Generally, the results of this research demonstrated that the generalized linear model can be used as an alternative method to square root transformation in studies on the germination percentage of seeds with binomial distribution, without having the problems of the square root transformation method. Moreover, this model outperforms the square root transformation in detecting significant differences in germination of treatments with fixed and different seeds.

Keywords: Link function, Monte-Carlo, Overdispersion, Power of test, Significance level

Highlights:

1- The generalized linear model was used for the analysis of germination percentage data.
2- The data simulated using the Monte-Carlo method was utilized to examine the significance level and power of the generalized linear model test.
3- The generalized linear model was compared with the square root transformation method during different germination experiments with fixed and different seeds in each Petri dish.

[1] Professor, Department of Agronomy, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran.
[2] Associate Professor, Department of Statistics, Golestan University, Gorgan, Iran.
[3] Graduated of Seed Science and Technology at Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

*Corresponding author, E-mail: m.azim@gu.ac.ir

Received: 2.2.2023; Revised: 30.7.2023;
Accepted: 5.8.2023; Online Published: 26.2.2024

DOR:
DOI: 10.61186/yujs.10.2.37

ISSN: 2383-1480 (On-Line); 2383-1251 (Print)

Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

پژوهش‌های بذر ایران/ سال دهم/ شماره دوم/ ۱۴۰۲/ صفحات: ۴۸-۳۷

مقاله پژوهشی

ارزیابی مدل خطی تعمیم یافته به داده‌های درصد جوانه‌زنی و مقایسه آن با روش تبدیل جذری

فرشید قادری‌فر[۱]، مجید عظیم محسنی[۲،*]، سیدحمیدرضا باقری[۳]

چکیده مبسوط

مقدمه: در تحقیقات بذر، داده‌های درصد جوانه‌زنی حاصل از شمارش بوده و دارای توزیع دوجمله‌ای می‌باشد و از این رو، محققان بذر قبل از انجام تجزیه واریانس و مقایسه تیمارها، برای تثبیت واریانس و نرمال‌سازی داده‌ها از تبدیل داده‌ها به ویژه تبدیل جذری استفاده می‌کنند. با وجود استفاده از تبدیل داده‌ها، این روش ایرادات اساسی در ساختار دارد که نتایج آزمایش را خدشه‌دار می‌کند. از این رو معرفی و جایگزین کردن یک روش که بدون استفاده از تبدیل داده‌ها، فرضیات تحقیق را حفظ کند و نتایج قابل قبولی در اختیار محقق قرار دهد، حائز اهمیت است. استفاده از مدل خطی تعمیم‌یافته به عنوان یک روش جایگزین برای تجزیه و تحلیل داده‌های جوانه‌زنی با توزیع دو جمله‌ای می‌باشد. در این تحقیق، ابتدا مدل خطی تعمیم‌یافته معرفی و سپس بر اساس داده‌های شبیه سازی و داده‌های جوانه‌زنی، به بررسی کارایی آن پرداخته می‌شود.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، ابتدا داده‌های شبیه‌سازی شده با روش مونت کارلو تولید شد. با کمک داده‌های شبیه‌سازی شده، سطح معنی‌داری و توان آزمون برای روش مدل خطی تعمیم‌یافته در حالت‌های مختلف محاسبه شد. سپس از داده‌های واقعی مربوط به ۳ آزمایش شامل اثر اسیدیته بر جوانه‌زنی ارقام گندم، اثر تنش آبی و شوری بر جوانه‌زنی بذرهای شاه افسر و اثر دمای متناوب بر جوانه‌زنی سه جمعیت اسطوخودوس استفاده گردید و نتایج مدل خطی تعمیم‌یافته و روش تبدیل جذری با داده‌های سه آزمایش مورد مقایسه قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج شبیه سازی نشان داد که مدل خطی تعمیم‌یافته کارایی بالایی در حفظ سطح معنی‌داری از پیش تعیین‌شده و توان بالایی در تشخیص اختلافات معنی‌دار جوانه‌زنی بین تیمارها دارد. همچنین نتایج مقایسه مدل خطی تعمیم‌یافته با روش تبدیل جذری بیانگر این مطلب بود که مدل خطی تعمیم‌یافته توان بالاتری در تشخیص اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای مختلف به ویژه در تیمارهای با بذرهای نابرابر در پتری داشت و در تیمارهایی که روش تبدیل جذری عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها را نشان می‌داد، روش خطی تعمیم‌یافته اختلاف معنی‌دار بین تیمارها را نشان داد.

نتیجه‌گیری: به طور کلی، نتایج این تحقیق نشان داد که مدل خطی تعمیم‌یافته می‌تواند به عنوان یک مدل جایگزین با تبدیل جذری در مطالعات مربوط به درصد جوانه‌زنی بذرها که دارای توزیع دوجمله‌ای می‌باشند به کار گرفته شود، بدون اینکه مشکلات مربوط به روش تبدیل جذری را داشته باشد. همچنین، این مدل توانایی و دقت بالاتری نسبت به روش تبدیل جذری در تشخیص اختلافات جوانه‌زنی بین تیمارهای مختلف با بذرهای ثابت و متفاوت دارد.

واژه‌های کلیدی: بیش‌پراکنش، تابع اتصال، توان آزمون، سطح معنی‌داری، مونت کارلو

جنبه‌های نوآوری:

۱- از مدل خطی تعمیم‌یافته در تجزیه و تحلیل داده‌های درصد جوانه‌زنی استفاده شد.

۲- از داده‌های شبیه‌سازی شده با روش مونت کارلو برای بررسی سطح معنی‌داری و توان آزمون مدل خطی تعمیم‌یافته استفاده گردید.

۳- مدل خطی تعمیم‌یافته با روش تبدیل جذری در آزمایش‌های مختلف جوانه‌زنی با بذرهای ثابت و متفاوت در پتری مقایسه شد.

[۱] استاد گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

[۲] دانشیار گروه آمار، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

[۳] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد در رشته علوم و تکنولوژی بذر، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

[*] رایانامه نویسنده مسئول: m.azim@gu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۳؛ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۵/۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۵/۱۴؛ تاریخ انتشار برخط: ۱۴۰۲/۱۲/۷

DOR:

DOI: 10.61186/yujs.10.2.37

شاپا: ۱۴۸۰-۲۳۸۳ (برخط)؛ ۱۲۵۱-۲۳۸۳ (چاپی)

مقدمه

استفاده از تبدیل روی داده‌های حاصل از آزمایشات و مطالعات مختلف در زمینه کشاورزی، با وجود انتقادات فراوان، همچنان توسط بسیاری از محققان انجام می‌شود (دی و پاندیت[1]، ۲۰۲۰). هدف اصلی از تبدیل داده‌ها، تثبیت واریانس داده‌ها و نرمال‌سازی آنها، قبل از مقایسه اصلی تیمارها می‌باشد. بر این اساس، راهکارهای مختلفی به طور تجربی و یا با پشتوانه تئوری در استفاده از توابع مختلف، در سال‌های اخیر ارائه شده است؛ راهکارهایی که گاه گمراه‌کننده، پیچیده و گاهی بدون تاثیر بوده و از این نظر انتقاداتی در زمینه استفاده از آن‌ها بوجود آورده است (ریبیرو-الیویرا[2] و همکاران، ۲۰۱۸).

در علوم بذر نیز استفاده از تبدیل داده‌ها جایگاه بسیار ویژه‌ای دارد. زیرا داده‌های جوانه‌زنی حاصل از شمارش بذرهای جوانه‌زده در طی زمان بوده و در نتیجه از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کند. در این شاخه از علم کشاورزی، تبدیل جذری ($arcsin\sqrt{p}$)، لگاریتمی ($\log(p)$) و تبدیل زاویه‌ای($\sqrt{p}$) از متداول‌ترین روش‌های تبدیل به حساب می‌آیند. در این میان، تبدیل جذری بیش از سایر روش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد زیرا واریانس مشاهدات با استفاده از این روش، به پارامتر بستگی ندارد و واریانس تثبیت شده است (آرنس[3] و همکاران، ۱۹۹۰).

با وجود استفاده گسترده از تبدیل جذری، این روش نیز دارای ایراداتی می‌باشد. اولین ایراد این است که این تبدیل برای درصد جوانه‌زنی نزدیک به صفر و ۱۰۰ درصد، کارایی چندانی ندارد (آرنس و همکاران، ۱۹۹۰؛ وارتون و هوی[4]، ۲۰۱۱). از این‌رو می‌توان گفت استفاده از این تبدیل به ماهیت داده‌ها بستگی داشته و به عنوان یک روش ثابت قابل استفاده نیست. دومین ایراد این است که اگر تعداد بذرها در هر تیمار به هر دلیلی یکسان نباشد، یکنواختی واریانس مخدوش می‌شود. زیرا با اینکه واریانس به پارامتر بستگی ندارد؛ اما همچنان به تعداد بذرها وابسته است (ریبیرو-الیویرا و رانال[5]، ۲۰۱۶؛ مدر[6]، ۲۰۰۷، ۲۰۱۰). ایراد دیگر این است که تجزیه واریانس با پیش فرض توزیع نرمال است. نکته قابل توجه این است که با تبدیل جذری روی داده‌های درصد جوانه‌زنی، داده‌ها از توزیع دوجمله‌ای به توزیع نرمال تبدیل نمی‌شوند، بلکه توزیع درصد جوانه‌زنی با توزیع نرمال تقریب زده می‌شود و طبق قضیه حد مرکزی زمانی این تقریب مناسب است که تعداد بذرها زیاد باشد.

در راستای رفع این ایرادها، راهکارهایی از قبیل تبدیل باکس کاکس[7] (آزبورن[8]، ۲۰۱۰)، تبدیل نمایی جانبی[9] (پیفو[10]، ۲۰۰۳)، آزمون رتبه‌ای[11] و T^2 هتلینگ چند گانه[12] (مدر، ۲۰۱۰) ارائه شده است؛ اما این راهکارها نیز خود دارای ایرادات قابل تاملی می‌باشند. اول اینکه این راهکارها بسیار پیچیده بوده و محققین علوم بذر را در نحوه‌ی استفاده از آن‌ها با چالش جدی مواجه می‌کند (آرنس و همکاران، ۱۹۹۰) و مورد دوم این که این راهکارها در حجم بذرهای نابرابر، کارایی چندانی ندارند (مدر، ۲۰۱۰).

با توجه به مطالب ذکر شده سوال این است که آیا روشی وجود دارد که بدون نیاز به تبدیل داده‌ها در هر شرایطی، قادر به تجزیه و تحلیل داده‌های جوانه‌زنی با درجه اطمینان بالا باشد؟ روش مدل‌های خطی تعمیم یافته، یک روش مطمئن برای تجزیه و تحلیل داده‌های جوانه‌زنی می‌باشد (جاگر[13]، ۲۰۰۸؛ بولکر[14] و همکاران، ۲۰۰۹). در مدل خطی تعمیم یافته تبدیلی بر داده‌های درصد جوانه‌زنی (متغیر پاسخ) انجام نمی‌گیرد بلکه در ساختار مدل و بر میانگین متغیر پاسخ، تابع اتصال[15] لحاظ می‌گردد که از این تابع اتصال در برآورد پارامترها و آزمون‌های مربوط به آن‌ها استفاده می‌شود. این تابع

[1] Dey and Pandit
[2] Ribeiro-Oliveira
[3] Ahrens
[4] Warton and Hui
[5] Ribeiro-Oliveira and Ranal
[6] Moder
[7] Box-Cox
[8] Osborne
[9] Side-exponential
[10] Piepho
[11] Rank-test
[12] T^2 – Hotteling
[13] Jaeger
[14] Bolker
[15] Link function

اتصال شامل تابع اتصال همانی[1]، لوجیت[2] و لگاریتمی[3] لگاریتمی[3] می‌باشد که به ترتیب در توزیع‌های نرمال، دوجمله‌ای و پواسن مورد استفاده قرار می‌گیرند. هرچند کارایی روش مدل خطی تعمیم یافته در مقالات مختلف به اثبات رسیده است (جاگر، ۲۰۰۸؛ بولکر و همکاران، ۲۰۰۹)، اما برای انجام آزمون فرض مقایسه تیمارها از لحاظ درصد جوانه‌زنی از دیدگاه مدل‌های خطی تعمیم یافته مطالعه چندانی صورت نگرفته است. باید توجه داشت که کارایی یک روش در انجام آزمون فرض به شاخص‌های سطح معنی‌داری و همچنین توان آزمون ارتباط دارد (گرینلند[4] و همکاران، ۲۰۱۶). به عبارت دیگر یک روش کارآمد در آزمون فرض باید ابتدا قادر به این باشد که در صورت عدم وجود اختلاف معنی‌دار با احتمال خیلی زیاد آن را تشخیص دهد و از طرفی اگر در بین تیمارها تفاوت معنی‌داری وجود داشت با توان زیاد آن را نشان دهد.

با وجود اینکه این روش توسط برخی محققین پیشنهاد گردیده است، اما بدلیل عدم آشنایی از نحوه کارکرد، این روش چندان مورد استقبال محققین علوم بذر قرار نگرفته است. از این رو در این تحقیق سعی شد نحوه عمل این مدل به همراه یک دستورالعمل ساده برای محققان بذر ارائه شود و این کار با کمک داده‌های شبیه‌سازی شده برای محاسبه سطح معنی‌داری و توان آزمون، و داده‌های واقعی برای بررسی کارایی این آزمون در حالت های مختلف انجام شد.

مواد و روش‌ها

فرم ریاضی مدل خطی تعمیم یافته به صورت زیر می‌باشد:

$$\mu = g(\mu) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \cdots + \beta_k X_k \qquad (1)$$

که در آن تابعی از میانگین متغیر پاسخ μ بر حسب متغیرهای پیش‌بینی کننده X_1 و ... و X_k مدل‌سازی می‌شود و $\beta_i, i = 0, \dots, k$ ضرایب ثابت می‌باشند.

مهم‌ترین مساله، مقایسه تیمارهای مختلف با متغیر پاسخ درصد جوانه‌زنی است. برای بیان این آزمون به صورت یک مدل خطی تعمیم‌یافته بر اساس توزیع دوجمله‌ای با تابع اتصال لوجیت، فرض می‌شود a تیمار وجود دارد. متغیرهای نشانگر $a-1$ و ... و $i=1$ و X_i به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$X_i = \begin{cases} 1 & \text{اگر مشاهده از تیمار } i \text{ ام باشد} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

توجه کنید که اگر همه $a-1$ و ... و $i=1$ و X_i برابر با صفر باشند مشاهده از تیمار a ام خواهد بود. در این صورت می‌توان متوسط درصد بذرهای جوانه‌زده در تیمارهای مختلف (μ) را به صورت یک مدل خطی تعمیم‌یافته بیان کرد:

$$\mu = g(\mu) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \cdots + \beta_{a-1} X_{a-1} \qquad (2)$$

مدل (۲) این امکان را فراهم می‌سازد که مقایسه تیمارها از لحاظ درصد جوانه‌زنی، در قالب یک مدل خطی تعمیم‌یافته مورد بررسی قرار گیرد. از آنجا که تعداد بذرهای جوانه‌زده در هر تیمار دارای توزیع دوجمله‌ای است، در نتیجه از تابع لوجیت $g(\mu) = \log\left(\frac{\mu}{1-\mu}\right)$ در تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده می‌شود.

برای بررسی سطح معنی‌داری و توان آزمون در این مطالعه از داده‌های شبیه‌سازی شده استفاده شد و از داده‌های واقعی برای مقایسه تبدیل جذری با مدل خطی تعمیم‌یافته استفاده شد.

مطالعه شبیه سازی

ازآنجا که در مطالعات جوانه‌زنی درصد جوانه‌زنی بین تیمارهای مختلف متفاوت می‌باشد و در فاصله بین صفر و ۱۰۰ درصد توزیع شده است، ابتدا داده‌های شبیه‌سازی شده بر اساس سناریوهای مختلف برای بررسی مدل‌های خطی تعمیم‌یافته طراحی شد. برای این کار پنج سناریو تعریف شد (آرنس و همکاران، ۱۹۹۰) که شامل سناریو ۱) درصد جوانه‌زنی در همه

[1] Identity
[2] Logit
[3] Logarithmic
[4] Greenland

تیمارها با تعداد بذرهای مختلف در هر پتری کمتر از ۵۰ درصد باشد، سناریو ۲) درصد جوانه‌زنی در همه تیمارها با تعداد بذرهای مختلف در هر پتری بیشتر از ۵۰ درصد باشد، سناریو ۳) درصد جوانه‌زنی همه تیمارها با تعداد بذرهای مختلف در هر پتری در محدوده ۵۰ درصد باشد، سناریو ۴) درصد جوانه‌زنی تیمارها با تعداد بذرهای مختلف در هر پتری نزدیک صفر درصد توزیع شده باشد، و سناریو ۵) درصد جوانه‌زنی با تعداد بذرهای مختلف در هر پتری نزدیک به ۱۰۰ درصد باشد.

برای محاسبه سطح معنی‌داری در هر سناریو، بر اساس الگوریتم زیر و در پنج مرحله انجام گرفت:

مرحله ۱) تیمارها به گونه‌ای طراحی می‌شود که درصد جوانه‌زنی آن‌ها اختلاف چندانی با هم نداشته باشند، مرحله ۲) با تعداد بذرهای مشخص در پتری و درصد جوانه‌زنی هر تیمار، داده‌ها از توزیع دوجمله‌ای به روش مونت کارلو تولید می‌شود، مرحله ۳) بر اساس مدل خطی تعمیم‌یافته آزمون فرض انجام می‌گیرد، مرحله ۴) مرحله دوم و سوم ۱۰۰۰ بار تکرار می‌شود و با سطح از پیش تعیین‌شده ۵ درصد آزمون فرض انجام می‌گردد و مرحله۵) درصد دفعاتی که فرض برابری درصد جوانه‌زنی تیمارها رد می‌شود محاسبه می‌شود که نشان‌دهنده سطح معنی‌داری می‌باشد.

برای محاسبه توان آزمون در هر سناریو بر اساس الگوریتم زیر و در پنج مرحله صورت گرفت:

مرحله ۱) ابتدا تیمارها به گونه‌ای طراحی می‌شود که درصد جوانه‌زنی آنها اختلاف معنی‌داری با هم داشته باشند، مرحله ۲) با تعداد بذرهای مشخص در هر پتری و درصد جوانه‌زنی هر تیمار، مشاهدات از توزیع دوجمله‌ای به روش مونت کارلو تولید می‌شود، مرحله ۳) بر اساس مدل خطی تعمیم‌یافته آزمون فرض انجام می‌گیرد، مرحله ۴) مرحله دوم و سوم ۱۰۰۰ بار تکرار می‌شود و با سطح از پیش تعیین‌شده ۵ درصد آزمون فرض انجام می‌گردد و مرحله ۵) درصد دفعاتی که فرض برابری درصد جوانه‌زنی تیمارها رد می‌شود محاسبه می‌شود که بیانگر توان آزمون می‌باشد. هر چه مقدار توان آزمون به یک نزدیک‌تر باشد، یعنی کارایی مدل در شناسایی اختلاف بین تیمارها کارآمدتر است. توجه کنید که برای محاسبه خطای نوع دوم، کافی است مقادیر توان آزمون از یک کم شود.

مطالعه با داده‌های آزمایشی

در این مطالعه از داده‌های آزمایشات جوانه‌زنی انجام شده در گیاهان گندم (*Triticum aestivum*)، شاه افسر (*Melilotus officinalis*) و اسطوخودوس (*Lavandula stoechas*) در پاسخ به تیمارهای مختلف استفاده شد. کلیه آزمایش‌های جوانه‌زنی در آزمایشگاه تکنولوژی بذر گروه زراعت دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان صورت گرفت.

آزمایش اول: اثرات تیمارهای pH بر درصد جوانه‌زنی ارقام گندم

در این آزمایش اثرات تیمارهای **pH** با سه سطح ۴، ۶ و ۸ بر جوانه‌زنی هفت رقم گندم (کوهدشت، مروارید، لاین ۱۷، آفتاب، کریم، قابوس و گنبد) با سه تکرار ۲۵ تایی بذر در محیط پتری در دمای ۲۰ درجه سلسیوس صورت گرفت. بذرهای جوانه‌زده روزانه تا هفت روز شمارش شد و در پایان آزمایش، تعداد بذرهای جوانه‌زده در هر تیمار تعیین شد.

آزمایش دوم: اثرات تنش آبی و شوری بر درصد جوانه‌زنی بذرهای شاه افسر

در این آزمایش، اثرات تنش آبی و شوری در پنج سطح ۰، ۰/۲-، ۰/۴- ۰/۶- و ۰/۸- مگاپاسکال با پلی‌اتیلن گلیکول ۸۰۰۰ و نمک کلرید سدیم بر جوانه‌زنی بذرهای شاه افسر با سه تکرار ۲۵ تایی بذر در محیط پتری در دمای ۲۰ درجه سلسیوس صورت گرفت. بذرهای جوانه‌زده روزانه تا ۲۰ روز شمارش شد و در پایان آزمایش، تعداد بذرهای جوانه‌زده در هر تیمار تعیین شد.

آزمایش سوم: اثرات دماهای متناوب بر درصد جوانه‌زنی سه جمعیت بذری اسطوخودوس

در این آزمایش، اثرات دماهای متناوب ۵/۱۵، ۱۰/۲۰، ۱۵/۲۵ و ۱۵/۳۰ درجه سلسیوس در نور (با ۱۲ ساعت تاریکی و ۱۲ ساعت نور) و تاریکی مطلق بر

جوانه‌زنی سه جمعیت بذری اسطوخودوس (P1، P2 و P3) با چهار تکرار ۲۵ تایی بذر صورت گرفت. بذرهای جوانه‌زده روزانه تا ۳۰ روز شمارش شد و در پایان آزمایش، تعداد بذرهای جوانه‌زده در هر تیمار تعیین شد. لازم به ذکر است شمارش بذرهای تیمارهای تاریکی در نور سبز صورت می‌گرفت. از آنجا که برخی از بذرهای اسطوخودوس پوک و خالی بودند، در پایان آزمایش، بذرهای پوک و خالی مشخص شد و از کل بذرهای مورد استفاده کسر گردید، در نتیجه در این آزمایش تعداد بذرها در تیمارها و تکرارهای مختلف نابرابر بودند.

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل آماری با نرم افزارهای R و SAS انجام شد. از آنجا که سطح معنی‌داری و توان آزمون به صورت احتمالی بیان می‌شوند، برای تقریب آنها نیاز به تولید متعدد داده‌های تصادفی بود. برای این کار از روش شبیه‌سازی مونت کارلو در نرم افزار R استفاده شد (رابرت[1] و همکاران، ۲۰۱۰). برای برازش مدل خطی تعمیم‌یافته به داده‌های آزمایشی از دستور Genmod و مقایسه داده‌ها پس از تجزیه جذری در نرم افزار SAS صورت گرفت (جانستون[2]، ۱۹۹۳).

نتایج و بحث

نتایج ارزیابی روش مدل تعمیم‌یافته از لحاظ سطح معنی‌داری در سطح ۵ درصد با کمک شبیه سازی مونت کارلو در سناریوهای مختلف برای تعداد بذرهای ثابت (جدول ۱) و متفاوت (جدول ۲) در هر پتری ارائه شده است. در بذرهای ثابت در هر پتری، در تعداد بذر کم (۱۰ بذر در هر پتری) و در مقادیر جوانه‌زنی نزدیک به صفر (سناریو ۴) و ۱۰۰ درصد (سناریو ۵)، مقادیر سطح معنی‌داری از مقدار از پیش تعیین‌شده ۵ درصد فاصله دارد. اما با افزایش تعداد بذر در پتری، مقادیر معنی‌داری در حالت‌های ذکر شده به مقدار ۵ درصد نزدیک می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش تعداد بذر در هر پتری در این دو سناریو، سطح معنی‌داری به مقدار از پیش تعیین‌شده ۵ درصد نزدیک‌تر می‌شود که بیانگر کارایی آزمون می‌باشد. در سایر سناریوها (سناریوهای ۱، ۲ و ۳)، تعداد بذر در پتری تاثیر چندانی در کارایی آزمون نداشت و کارایی آزمون در همه این سه سناریو و تعداد بذرهای مختلف در هر پتری بالا بود. از این رو می‌توان بیان داشت که در دامنه درصد جوانه‌زنی بین ۲۵ تا ۸۰ درصد، تعداد بذر تاثیر چندانی در افزایش یا کاهش کارایی آزمون ندارد.

اما در سناریوهای با بذرهای متفاوت در هر پتری، نتایج سطح معنی‌داری متفاوت از نتایج سطح معنی‌داری بذرهای ثابت در هر پتری بود. در همه سناریوها، در تعداد بذر متفاوت اما کم، مقادیر سطح معنی‌داری از مقدار از پیش تعیین شده ۵ درصد فاصله داشت و با افزایش تعداد بذر اما متفاوت تا حدودی مقادیر معنی‌داری به مقدار ۵ درصد نزدیک شد. اما نکته قابل توجه این است که در سناریوهای ۴ و ۵، حتی با افزایش تعداد بذر در پتری، مقادیر معنی‌داری هنوز هم با سطح پایه ۵ درصد در مقایسه با سه سناریوی دیگر فاصله دارد. به عبارت دیگر می‌توان بیان داشت که زمانی که درصد جوانه‌زنی نزدیک به صفر (سناریوی ۴) و ۱۰۰ (سناریوی ۵) هستند، کارایی آزمون در مقایسه با سه سناریوی دیگر بالا نمی‌باشد.

در جداول ۳ و ۴ نتایج ارزیابی روش مدل تعمیم‌یافته از لحاظ توان آزمون در سطح پایه ۵ درصد با کمک شبیه‌سازی مونت کارلو در سناریوهای مختلف برای تعداد بذرهای ثابت و متفاوت در هر پتری ارائه شده است. نتایج نشان داد که توان آزمون به مقدار جوانه‌زنی بذرها (سناریوهای مختلف) بستگی ندارد اما به تعداد بذرها در هر پتری (چه ثابت و چه متفاوت) وابسته است. به این صورت که هر چه تعداد بذر در هر پتری افزایش یابد، توان آزمون افزایش می‌یابد. همچنین نکته قابل توجه در این بخش این است که با افزایش تعداد بذرها، توان آزمون افزایش می‌یابد؛ حتی اگر درصد

[1] Robert
[2] Janston

جدول ۱. مقادیر سطح معنی‌داری مدل خطی تعمیم‌یافته بر اساس توزیع دوجمله‌ای در سناریوهای مختلف با تعداد بذر ثابت در هر پتری .

Table 1. The significance level values of the generalized linear model based on the binomial distribution in different scenarios with a fixed number of seeds in each Petri dish.

تعداد بذر در هر پتری Number of seeds in each Petri dish	سناریو ۱ (.25,.26,.27) Scenario 1	سناریو ۲ (.79,.80,.81) Scenario 2	سناریو ۳ (.49,.50,.51) Scenario 3	سناریو ۴ (0.01,0.02,0.03) Scenario 4	سناریو ۵ (.97,.98,.99) Scenario 5
10	0.058	0.052	0.059	0.037	0.040
30	0.056	0.049	0.048	0.060	0.059
50	0.049	0.050	0.049	0.058	0.058
100	0.051	0.049	0.049	0.057	0.057

جدول۲. مقادیر سطح معنی‌داری مدل خطی تعمیم‌یافته بر اساس توزیع دوجمله‌ای در سناریوهای مختلف با تعداد بذرهای مختلف در هر پتری.

Table 2. The significance level values of the generalized linear model based on the binomial distribution in different scenarios with different numbers of seeds in each Petri dish.

تعداد بذر در هر پتری Number of seeds in each Petri dish	سناریو ۱ (.25,.26,.27) Scenario 1	سناریو ۲ (.79,.80,.81) Scenario 2	سناریو ۳ (.49,.50,.51) Scenario 3	سناریو ۴ (0.01,0.02,0.03) Scenario 4	سناریو ۵ (.97,.98,.99) Scenario 5
(10,15,20)	0.063	0.057	0.058	0.068	0.067
(30,35,40)	0.056	0.054	0.054	0.065	0.066
(50,55,60)	0.054	0.054	0.053	0.062	0.064
(90, 95,100)	0.053	0.053	0.052	0.060	0.059

جدول ۳- مقادیر توان آزمون مدل خطی تعمیم‌یافته بر اساس توزیع دوجمله‌ای در سناریوهای مختلف با تعداد بذر ثابت در هر پتری.

Table 3. Power values of generalized linear model test based on binomial distribution in different scenarios with fixed number of seeds in each Petri dish.

تعداد بذر در هر پتری Number of seeds in each Petri dish	سناریو ۱ (.25,.35,.45) Scenario 1	سناریو ۲ (.45,.55,.65) Scenario 2	سناریو ۳ (.65,.75,.85) Scenario 3	سناریو ۴ (0.01,0.05,0.10) Scenario 4	سناریو ۵ (.90,.95,.99) Scenario 5
10	0.351	0.345	0.375	0.302	0.337
30	0.753	0.763	0.802	0.735	0.751
50	0.917	0.893	0.923	0.877	0.901
100	0.998	0.997	1	0.965	0.976

جدول ۴- مقادیر توان آزمون مدل خطی تعمیم‌یافته بر اساس توزیع دوجمله‌ای در سناریوهای مختلف با تعداد بذرهای مختلف در هر پتری.

Table 4. Power values of generalized linear model test based on binomial distribution in different scenarios with different numbers of seeds in each Petri dish.

تعداد بذر در هر پتری Number of seeds in each Petri dish	سناریو ۱ (.25,.35,.45) Scenario 1	سناریو ۲ (.45,.55,.65) Scenario 2	سناریو ۳ (.65,.75,.85) Scenario 3	سناریو ۴ (0.01,0.05,0.10) Scenario 4	سناریو ۵ (.90,.95,.99) Scenario 5
(10,15,20)	0.420	0.404	0.522	0.530	0.500
(30,35,40)	0.793	0.763	0.880	0.838	0.830
(50,55,60)	0.928	0.893	0.980	0.954	0.964
(90,95,100)	0.995	0.996	1	0.997	0.996

جوانه‌زنی در تیمارها نزدیک صفر و یا صددرصد باشد. بدین معنی که با افزایش تعداد بذرها در هر پتری می‌توان انتظار داشت که روش مدل خطی تعمیم یافته با توان زیاد قادر به تشخیص اختلاف در تیمارها می‌باشد.

توجه کنید که در این مطالعه شبیه‌سازی، درصد جوانه‌زنی بذرها در تیمارها تفاوت زیادی با هم ندارند و اگر حداقل یک تیمار تفاوت قابل ملاحظه‌ای در درصد جوانه‌زنی با سایر تیمارها داشته باشد، روش مدل خطی تعمیم‌یافته حتی در تعداد بذرهای کم نیز قادر به شناسایی تفاوت معنی‌دار در تیمارها می‌باشد.

در این مطالعه شبیه‌سازی برای بررسی کارایی مدل خطی تعمیم‌یافته، از دو شاخص سطح معنی‌داری یا خطای نوع اول و توان آزمون استفاده شد. در شاخص سطح معنی‌داری، هدف اصلی، محک مدل خطی تعمیم‌یافته از لحاظ قدرت تشخیص عدم معنی‌داری در صورتی که اختلافی بین تیمارها وجود نداشته باشد، است. همان‌طور که در جداول ۱و۲ مشاهده می‌شود در تمامی حالت‌ها (درصدهای جوانه‌زنی و تعداد بذر ثابت و متفاوت) حتی در نمونه‌های کم، خطای فاحشی در سطح معنی‌داری در مقایسه با مقدار از پیش تعیین‌شده وجود نداشت. اما در شاخص توان آزمون، هدف اصلی، محک کارایی مدل خطی تعمیم‌یافته در تشخیص اختلاف در تیمارها زمانی که درصد جوانه‌زنی اختلاف دارند، می‌باشد. در جداول ۳ و۴ توان آزمون با افزایش حجم نمونه افزایش پیدا کرد که سرعت این افزایش بسیار قابل توجه بود. هر چند که اختلاف درصد جوانه‌زنی تیمارهای انتخابی زیاد نبود اما روش مدل خطی تعمیم‌یافته با توان بالا قادر به شناسایی اختلاف معنی‌دار بود. علت توان بالا در شناسایی تفاوت در تیمارها را می‌توان، انتخاب مناسب توزیع پارامتری دوجمله‌ای برای داده‌های جوانه‌زنی و استفاده از تابع درست‌نمایی بیشینه بیان کرد. در صورتی که در روش تجزیه واریانس تفاوت در تیمارها به روش کمترین مربعات خطا و توزیع تقریبی F انجام می‌شود که مطمئنا دقت پایین‌تری خواهد داشت (استروپ[1]، ۲۰۱۳). در مطالعه‌ای با داده‌های شبیه‌سازی بر روی داده‌های حاصل از شمارش مشاهده شد که روش مدل خطی تعمیم‌یافته نسبت به تجزیه واریانس بر اساس تبدیل علاوه بر اینکه خطای نوع اول یا سطح معنی‌داری را با قدرت بیشتری حفظ می‌کند بلکه دارای توان بالاتری نسبت به این روش می‌باشد (استروپ، ۲۰۱۵).

در جدول ۵ واکنش جوانه‌زنی ارقام گندم در پاسخ به تیمارهای اسیدیته ارائه شده است. کلیه ارقام گندم در تیمارهای مختلف از جوانه‌زنی بالایی برخوردار بودند اما از لحاظ معنی‌داری تیمارها بین استفاده از تبدیل جذری و مدل خطی تعمیم‌یافته اختلاف وجود داشت. همان طور که ملاحظه می‌شود در هر سه تیمار اسیدیته بر اساس روش تبدیل جذری، اختلافی بین ارقام گندم وجود نداشت اما با استفاده از روش خطی تعمیم‌یافته بین ارقام در اسیدیته ۴ و ۸ اختلاف معنی‌داری در سطح پنج درصد وجود دارد. به عبارت دیگر با وجود اختلاف کم درصد جوانه‌زنی بین ارقام گندم در اسیدیته‌های مختلف، روش خطی تعمیم‌یافته به خوبی قادر به شناسایی اختلاف معنی‌دار بود. در صورتی که با روش تبدیل جذری اختلافی بین ارقام از لحاظ درصد جوانه‌زنی در اسیدتیه‌های مختلف وجود نداشت.

تنش آبی و شوری تاثیر به سزایی بر جوانه‌زنی بذرهای شاه افسر داشت (جدول ۶). با افزایش پتانسیل آبی و شوری، درصد جوانه‌زنی کاهش یافت که درصد کاهش در تنش آبی بیشتر از تنش شوری بود. در این مطالعه درصد جوانه‌زنی بین تیمارهای مختلف تنش آبی و شوری با هر دو روش تبدیل جذری و روش تعمیم‌یافته خطی معنی‌دار بود و از لحاظ سطح معنی‌داری اختلافی بین این دو روش وجود نداشت.

در جدول ۷ واکنش درصد جوانه‌زنی جمعیت‌های اسطوخودوس به دمای متناوب و شرایط نوری ارائه شده است. همانطور که پیش‌تر بیان شد، در این مطالعه تعداد بذرها در هر پتری با یکدیگر به خاطر وجود بذرهای پوک متفاوت بود و در نتیجه تعداد بذر در هر تکرار در تیمارهای مختلف متفاوت بود. در جمعیت اول (P1) اختلاف معنی‌داری بین دماهای متناوب بر اساس تبدیل جذری در نور و تاریکی وجود نداشت در صورتی که با روش تعمیم‌یافته خطی اختلاف معنی‌داری بین دماها وجود داشت. در جمعیت دوم (P2) بین دماها در نور و تاریکی اختلاف معنی‌داری در سطح ۶ و ۵ درصد وجود داشت در صورتی که با کاربرد روش تعمیم‌یافته خطی اختلاف معنی‌دار در درصد جوانه‌زنی بین تیمارها در نور و تاریکی در سطح پنج درصد و یک درصد وجود داشت. نکته جالب این بود که در جمعیت سوم (P3) در شرایط نوری و تاریکی اختلاف معنی‌داری بین دماها با روش تعمیم‌یافته خطی وجود داشت اما با روش تبدیل جذری تنها در شرایط تاریکی اختلاف معنی‌داری بین دماها از لحاظ درصد جوانه‌زنی مشاهده شد.

نتایج این مطالعه بیانگر کارایی بالاتر مدل خطی تعمیم‌یافته در مقایسه با روش تبدیل جذری در

[1] Stroup

جدول ۵. میانگین درصد جوانه‌زنی ارقام گندم در تیمارهای مختلف اسیدیته و مقایسه معنی‌داری آن‌ها با کمک مدل خطی تعمیم‌یافته و تبدیل جذری.

Table 5. The average germination percentage of wheat varieties in different acidity treatments and their significance comparison based on the generalized linear model and the square root transformation.

Cultivars	ارقام	pH اسیدیته		
		4	6	8
Kuhdash	کوهدشت	0.93 (0.06)	0.98 (0.02)	0.98 (0.02)
Morvarid	مروارید	1 (0.00)	0.98 (0.02)	0.98 (0.02)
Line 17	لاین ۱۷	1 (0.00)	1 (0.00)	1 (0.00)
Aftab	آفتاب	0.99 (0.02)	0.97 (0.02)	0.93 (0.06)
Karim	کریم	0.97 (0.02)	0.97 (0.05)	0.94 (0.06)
Qaboos	قابوس	0.97 (0.02)	0.98 (0.02)	0.98 (0.02)
Gonbad	گنبد	1 (0.00)	1 (0.00)	1 (0.00)
روش تبدیل جذری The square root transformation		0.37	0.85	0.295
مدل خطی تعمیم‌یافته The generalized linear model		0.025	0.75	0.0245

جدول ۶. میانگین نسبت جوانه‌زنی بذرهای شاه افسر در تیمارهای تنش آبی و تنش شوری و مقایسه معنی‌داری آن‌ها با کمک مدل خطی تعمیم یافته و تبدیل جذری.

Table 6. The average germination percentage of yellow sweet clover seeds under water and salinity stress treatment and their significance comparison based on the generalized linear model and the square root transformation.

پتانسیل آب (مگاپاسکال) Water potential (MPa)	Stress تنش	
	Water آبی	Salinity شوری
0	0.97 (0.05)	0.97 (0.05)
-0.2	0.92 (0.04)	0.96 (0.04)
-0.4	0.62 (0.10)	0.75 (0.09)
-0.6	0.16 (0.04)	0.40 (0.04)
-0.8	0.08 (0.04)	0.11 (0.02)
روش تبدیل جذری The square root transformation	<0.001	<0.001
مدل خطی تعمیم‌یافته The generalized linear model	<0.001	<0.001

جدول ۷. میانگین نسبت جوانه‌زنی بذرهای جمعیت‌های مختلف اسطوخودوس (P1، P2 و P3) در دماهای متناوب و مقایسه معنی‌داری آن ها با کمک مدل خطی تعمیم‌یافته و تبدیل جذری.

Table 7. The average germination percentage of seeds in differentl populations (P1, P2, and P3) at alternating temperatures and their significance comparison based on the generalized linear model and the square root transformation.

دمای متناوب Alternating temperatures (^{o}C)	شرایط نوری Light conditions			شرایط تاریکی Dark conditions		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3
(5-15)	1 (0.00)	0.97(0.03)	0.95 (0.06)	0.64 (0.28)	0.94 (0.04)	0.45 (0.27)
(10-20)	0.53 (0.18)	0.95(0.04)	0.71 (0.05)	0.74 (0.05)	0.28 (0.06)	0.22 (0.18)
(15-25)	0.80 (0.13)	0.91(0.03)	0.82 (0.13)	0.25 (0.19)	0.75 (0.12)	0.32 (0.11)
(15-30)	0.96 (0.07)	0.93(0.06)	0.63 (0.19)	0.34 (0.23)	0.32 (0.11)	0.21 (0.13)
روش تبدیل جذری The square root transformation	0.907	0.065	0.132	0.320	0.018	0.025
مدل خطی تعمیم‌یافته The generalized linear model	0.043	0.022	0.027	0.002	<0.0001	0.019

داده‌های درصد جوانه‌زنی در تیمارهای مختلف بود. نکته قابل توجه این است که نباید روش تبدیل جذری را روشی کاملا ناکارامد توصیف کرد، زیرا استفاده نادرست از آن باعث شده که این روش غیرقابل اعتماد به نظر برسد (ریبیرو-الیویرا و همکاران، ۲۰۱۸). استفاده نادرست از تبدیل داده‌ها باعث شده، گاه تفسیر نتایج و متغیرهای حاصل از تبدیل نامفهوم باشند و از این رو انتقادات زیادی را به همراه داشته است (کاروالیو[1] و همکاران، ۲۰۱۸). داده‌های جوانه‌زنی مقادیر پیوسته نیستند بلکه ماهیتا گسسته و از توزیع دوجمله‌ای تبعیت می‌کنند. در نتیجه تبدیل روی آن‌ها و تقریب با توزیع نرمال، خطای زیادی را به تحلیل اعمال می‌کند؛ به خصوص زمانی که تعداد بذر در هر پتری کم باشد. استفاده از توزیع دوجمله‌ای در روش مدل خطی تعمیم‌یافته برای داده‌های جوانه‌زنی سبب می‌شود که نیاز به کنترل فرضیات، آن‌طور که در تجزیه واریانس انجام می‌شود، نباشد و قادر به افزایش توان آزمون در شناسایی تفاوت بین تیمارها به طور قابل توجهی می‌باشد. همچنین در مدل تعمیم‌یافته خطی از توزیع‌های پارامتری استفاده می‌شود که کاملا با توزیع داده‌ها هماهنگ است. این توزیع‌ها که شامل توزیع دوجمله‌ای، پواسن، نرمال و سایر توزیع‌ها، همگی به کلاس خانواده توزیع‌های نمایی[2] تعلق دارند که یک کلاس مهم در نظریه توزیع‌های پارامتری می‌باشد (دابسون و بارنت[3]، ۲۰۱۸).

اهمیت و دقت مدل‌های تعمیم‌یافته خطی در تحلیل داده‌های جوانه‌زنی بر محققین علوم بذر قابل انکار نیست اما عواملی باعث شده که محققین علوم بذر آنطور که باید و شاید از این روش استفاده نکنند. دلیل اول، به استفاده نادرست از روش مدل خطی تعمیم‌یافته برمی‌گردد که در آن فرضیات به درستی کنترل نمی‌شوند و یا از توابع اتصال مناسب استفاده نمی‌شود و به دنبال آن نتایج قابل اعتمادی حاصل نمی‌گردد. دلیل دوم ساختار مدل خطی تعمیم‌یافته می‌باشد که برای محققین پیچیده به نظر می‌رسد. سهولت استفاده از روش تجزیه واریانس و متعاقب آن مقایسات زوجی به روش‌های متعدد باعث شده که استفاده از مدل خطی تعمیم‌یافته و متعاقب آن مقایسات مقید[4] برای تیمارها پیچیده به نظر برسد. اما با افزایش کارایی نرم افزارهای آماری که قادر به جزئی‌ترین تحلیل‌ها می‌باشند این امر در حال حاضر پیچیده به نظر نمی‌رسد و باعث می‌شود که تحلیل‌های قابل اعتمادتر و مستندتری در اختیار محققین و مطالعات آینده مبتنی بر این نتایج قرار گیرد (کاروالیو و همکاران، ۲۰۱۸).

موضوع دیگری که در مقایسه دو روش حائز اهمیت است بحث بیش‌پراکنش[5] در تحلیل می‌باشد. یکی از دلایل وجود بیش‌پراکنش در تحلیل‌ها، وابستگی همزمان میانگین و واریانس مشاهدات به پارامترها است که از چالش‌های مهم در تجزیه واریانس داده‌های جوانه‌زنی می‌باشد (آموریم[6] و همکاران، ۲۰۲۱). از دلایل مهم استفاده از تبدیل‌ها، برطرف کردن این مشکل می‌باشد. ایراد اساسی که در این روش وجود دارد این است که تبدیل جذری وابستگی واریانس به پارامتر درصد جوانه‌زنی را برطرف می‌کند اما وابستگی واریانس به تعداد بذر را در نظر نمی‌گیرد. در نتیجه اگر تعداد بذر در پتری‌ها متفاوت باشد، واریانس مشاهدات متفاوت می‌باشد و به نوعی بیش پراکنش ایجاد می‌شود (وارتون و هوی، ۲۰۱۱؛ سیلشی[7]، ۲۰۱۲؛ ریزاردی[8] و همکاران، ۲۰۱۷). در حالت بیش‌پراکنش، انحراف معیار پارامترها کمتر از مقدار واقعی برآورد شده و در نتیجه تجزیه واریانس و مقایسات زوجی را دچار انحراف می‌کند. اما در مدل خطی تعمیم‌یافته به سبب استفاده از توزیع دوجمله‌ای (شبه دوجمله ای[9]) و با تابع اتصال لوجیت، وابستگی میانگین و واریانس به پارامتر درصد جوانه‌زنی و تعداد نمونه لحاظ شده و در نتیجه این مشکل رفع می‌گردد (آموریم و همکاران، ۲۰۲۱).

[1] Carvalho
[2] Exponential distributions
[3] Dobson and Barnett
[4] Contrasts
[5] Overdispersion
[6] Amorim
[7] Sileshi
[8] Rizzardi
[9] Quasi-Binomial

نتیجه گیری

به طور کلی این مطالعه نشان داد که مدل خطی تعمیم‌یافته از کارایی بالایی از لحاظ سطح معنی‌داری و توان آزمون برخوردار است. همچنین این مدل در مقایسه با روش تبدیل جذری، از دقت بالاتری در تشخیص اختلافات معنی‌دار درصد جوانه‌زنی بین تیمارهای مختلف به ویژه در بذرهای نابرابر در پتری دارد. از این رو به محققان بذر پیشنهاد می‌گردد که در مطالعات مربوط به جوانه‌زنی بذر که داده‌های آن حاصل از شمارش می‌باشد و دارای توزیع دوجمله‌ای می‌باشد، به جای استفاده از تبدیل جذری، از مدل خطی تعمیم یافته استفاده کنند، تا علاوه بر حصول نتایج قابل قبول، از استناد به نتایج نامطمئن روش تبدیل جذری در مطالعات جوانه‌زنی پرهیز گردد.

منابع

Ahrens, W.H., Cox, D.J. and Budhwar, G. 1990. Use of the arcsine and square root transformations for subjectively determined percentage data. Weed Science, 38(4-5): 452-458. https://doi.org/10.1017/S0043174500056824

Amorim, D.J., dos Santos, A.R.P., da Piedade, G.N., de Faria, R.Q., da Silva, E.A.A. and Sartori, M.M.P. 2021. The use of the generalized linear model to assess the speed and uniformity of germination of corn and soybean seeds. Agronomy, 11(3): 588. https://doi.org/10.3390/agronomy11030588

Bolker, B.M., Brooks, M.E., Clark, C.J., Geange, S.W., Poulsen, J.R., Stevens, M.H.H. and White, J.S.S. 2009. Generalized linear mixed models: a practical guide for ecology and evolution. Trends in Ecology and Evolution, 24(3): 127-135. https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.10.008

Carvalho, F.J., Santana, D.G.D. and Araújo, L.B.D. 2018. Why analyze germination experiments using Generalized Linear Models. Journal of Seed Science, 40: 281-287. https://doi.org/10.1590/2317-1545v40n3185259

Dey, P. and Pandit, P. 2020. Relevance of data transformation techniques in weed science. Journal of Research in Weed Science, 3(1): 81-89.

Dobson, A.J. and Barnett, A.G. 2018. An introduction to generalized linear models. Chapman and Hall/CRC.

Greenland, S., Senn, S.J., Rothman, K.J., Carlin, J.B., Poole, C., Goodman, S.N. and Altman, D.G. 2016. Statistical tests, P values, confidence intervals, and power: a guide to misinterpretations. European Journal of Epidemiology, 31: 337-350. https://doi.org/10.1007/s10654-016-0149-3

Jaeger, T.F. 2008. Categorical data analysis: Away from ANOVAs (transformation or not) and towards logit mixed models. Journal of Memory and Language, 59(4): 434-446. https://doi.org/10.1016/j.jml.2007.11.007

Johnston, G. 1993. SAS software to fit the generalized linear model. In SUGI Proceedings (pp. 1-8). SAS Institute Inc., Cary, NC.

Moder, K. 2007. How to keep the type I error rate in ANOVA if variances are heteroscedastic. Austrian Journal of Statistics, 36(3): 179-188. https://doi.org/10.17713/ajs.v36i3.329

Moder, K. 2010. Alternatives to F-test in one-way ANOVA in case of heterogeneity of variances (a simulation study). Psychological Test and Assessment Modeling, 52(4): 343.

Osborne, J. 2010. Improving your data transformations: Applying the Box-Cox transformation. Practical Assessment, Research, and Evaluation, 15(1): 12.

Piepho, H.P. 2003. The folded exponential transformation for proportions. Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician), 52(4): 575-589. https://doi.org/10.1046/j.0039-0526.2003.00509.x

Ribeiro-Oliveira, J.P. and Ranal, M.A. 2016. Sample size in studies on the germination process. Botany, 94(2): 103-115. https://doi.org/10.1139/cjb-2015-0161

Ribeiro-Oliveira, J.P., Santana, D.G.D., Pereira, V.J. and Santos, C.M.D. 2018. Data transformation: an underestimated tool by inappropriate use. Acta Scientiarum. Agronomy, 40. https://doi.org/10.4025/actasciagron.v40i1.35300

Rizzardi, D.A., Contreras-Soto, R.I., Figueiredo, A.S.T., Andrade, C.A.D.B., Santana, R.G. and Scapim, C.A., 2017. Generalized mixed linear modeling approach to analyze nodulation in common bean inbred lines. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 52: 1178-1184. https://doi.org/10.1590/s0100-204x2017001200006

Robert, C.P., Casella, G. and Casella, G. 2010. Introducing Monte Carlo methods with R (Vol. 18). New York: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1576-4

Sileshi, G.W. 2012. A critique of current trends in the statistical analysis of seed germination and viability data. Seed Science Research, 22(3): 145-159. https://doi.org/10.1017/S0960258512000025

Stroup, W.W. 2013. Generalized linear mixed models. CRC Press, Boca Raton, FL.

Stroup, W.W. 2015. Rethinking the analysis of non-normal data in plant and soil science. Agronomy Journal, 107(2): 811-827. https://doi.org/10.2134/agronj2013.0342

Warton, D.I. and Hui, F.K. 2011. The arcsine is asinine: the analysis of proportions in ecology. Ecology, 92(1): 3-10. https://doi.org/10.1890/10-0340.1