

The Application of Functional Analysis of Variance in Assessing Germination in Seed Research

Farshid Ghaderi-Far¹ , Majid Azimmohseni² , and Sima Sheikhveisi³ 

1. Professor, Department of Agronomy, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran. Email: farshidghaderifar@gu.ac.ir
2. Corresponding author, Associate Professor, Department of Statistics, Golestan University, Gorgan, Iran. Email: m.azimmohseni@gu.ac.ir
3. Graduated of Statistics, Department of Statistics, Golestan University, Gorgan, Iran. Email: sima.shv.1992@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 10 April 2025
Received in revised form 3 July 2025
Accepted 12 July 2025
Available online 22 September 2025

Keywords:

Functional analysis
Germination index
Monte Carlo
Permutation method
Spline function

ABSTRACT

Objective: This study introduces functional analysis of variance as a method for comparing germination trends under different treatments over a given time interval. This approach not only enables the comparison of treatments over the entire time period but also allows for treatment comparisons at each specific moment in time. Moreover, it identifies critical time points at which the maximum significant difference between treatments occurs, which can serve as novel germination indices.

Method: In this study, real experimental data from four germination studies were analyzed: (1) the effect of temperature on *Nigella sativa* germination, (2) the effect of salinity stress on *Zea mays* seed germination, (3) the comparison of germination among different *Triticum aestivum* cultivars, and (4) the effect of water stress on *Brassica napus* germination. Using spline functions, germination data from these experiments were modeled as a function of time. The results of functional analysis were then used to compare treatments in terms of both germination percentage and germination time across the four experiments.

Results: The results of the functional analysis demonstrated its high efficiency in detecting significant or non-significant differences between treatments throughout the germination period. Furthermore, this method enabled comparisons of germination percentages at any given time point, as well as comparisons of germination times at various germination percentiles, providing detailed insights into the nature of differences among treatments. This approach also facilitated the introduction of new germination indices applicable to different seed types.

Conclusions: Overall, the results of this study indicate that the stepwise functional analysis method introduced here is an effective and precise tool for comparing treatments in germination data. This approach not only enhances treatment comparisons but also provides detailed insights into the nature of differences between treatments. Moreover, it overcomes the limitations associated with using conventional germination indices for treatment comparisons.

Cite this article: Ghaderi-Far, F., Azimmohseni, M., & Sheikhveisi, S. (2025). The application of functional analysis of variance in assessing germination in seed research. *Iranian Journal of Seed Research*, 12(1), 77-96. <http://doi.org/10.61882/yujs.12.1.77>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.61882/yujs.12.1.77>

Publisher: Yasouj University.

Highlights

- Functional analysis was applied to compare treatments in germination percentage data.
- The method enabled treatment comparisons in terms of germination percentage at each moment in time, as well as comparisons of germination times at various percentiles.
- Critical germination times and percentiles at which the maximum differences between treatments occur were introduced as novel germination indices.

Introduction

In seed research, germination data are inherently time-dependent, with the germination percentage recorded over a specific period. Traditional methods for comparing treatments often rely on summary indices such as maximum germination percentage, time to reach various germination percentiles, and germination rate (Haj Seyedhadi and Gonzalez-Andujar, 2009). However, since the germination process is inherently a function of time, relying solely on indices may not fully capture significant differences or similarities across the entire germination period (Romano and Stevanato, 2020). These indices may not fully capture the dynamic nature of germination trends, potentially overlooking significant differences or similarities that occur at specific time points throughout the germination period. To address this limitation, functional analysis of variance is introduced as a novel approach that enables a comprehensive comparison of germination trends under different treatments over the entire time interval, while also allowing for point-wise comparisons at each moment in time. This method not only enhances the accuracy of treatment comparisons but also identifies critical time points at which the maximum significant differences between treatments occur, offering new insights for germination assessment.

Method

This study utilized real experimental data from four distinct germination studies to demonstrate the application of functional ANOVA. The experiments investigated: (1) the effect of temperature on *Nigella sativa* (black cumin seed) germination, (2) the impact of salinity stress on *Zea mays* seed germination, (3) the germination comparison among different *Triticum aestivum* cultivars, and (4) the effect of water stress on *Brassica napus* germination.

Germination data from these experiments were modeled as functions of time using spline smoothing techniques. Functional analysis of variance was then employed to compare treatments in terms of both germination percentage over time and germination timing at various percentiles, providing a detailed and dynamic perspective on treatment effects.

Results

The functional analysis of variance applied to the four germination studies revealed distinct and detailed patterns of treatment effects over time. For each experiment, the method

successfully identified specific time intervals and germination percentiles where significant differences between treatments occurred.

In the study on temperature effects on black seed (*Nigella sativa*), the analysis detected significant differences in germination trends across temperature regimes. Notably, the most substantial divergence among treatments was identified at 87 hours, which corresponded to the 30th germination percentile, rather than at the conventional 50% germination index.

Analysis of salinity stress on corn (*Zea mays*) seeds demonstrated a significant influence of osmotic potential on germination timing. The maximum difference between salinity treatments was observed at 34 hours, aligning with the 33rd germination percentile.

The comparison among different wheat (*Triticum aestivum*) cultivars showed no statistically significant differences in either germination percentage over time or in the timing of germination across percentiles. This result indicated consistent germination behavior among the tested wheat varieties under the experimental conditions.

For canola (*Brassica napus*) under water stress, the functional analysis confirmed significant differences in germination patterns among stress levels. The period of maximum differentiation was identified between 10 and 16 hours. Additionally, a peak difference between treatments was estimated at 38 hours at the 68th percentile.

Across the three experiments where significant treatment effects were found, the method provided precise insights by generating continuous significance profiles over time and across percentiles. These profiles allowed for the precise localization of periods and levels where treatments diverged, offering a more detailed understanding than single-index comparisons.

Conclusions

The findings of this study confirm that functional analysis of variance is a robust and precise method for comparing treatments in germination studies. This approach not only facilitates a holistic evaluation of treatment effects over the entire germination period but also enables detailed point-wise and percentile-based comparisons. By identifying critical time points and germination levels where the maximum differences between treatments occur, the method overcomes the limitations associated with traditional germination indices. Therefore, it is recommended that researchers in seed science adopt functional analysis of variance to enhance the accuracy and depth of treatment comparisons, moving beyond static indices to a more dynamic and informative analysis of germination data.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank anonymous reviewers for their valuable suggestions in manuscript revision.

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

کاربرد تحلیل واریانس تابعی در ارزیابی جوانه‌زنی در تحقیقات بذری

فرشید قادری فر^۱، مجید عظیم محسنی^۲ و سیما شیخ‌ویسی^۳

۱. استاد گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: farshidghaderifar@gu.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه آمار، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران. رایانامه: m.azimmohseni@gu.ac.ir

۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد در گروه آمار، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران. رایانامه: sima.shv.1992@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف: در این مطالعه تحلیل واریانس تابعی برای مقایسه جوانه‌زنی تیمارها در یک بازه زمانی ارائه می‌گردد. در این روش، نه تنها امکان مقایسه تیمارها در کل دوره زمانی قابل انجام می‌باشد، بلکه مقایسه تیمارها در هر لحظه از زمان امکان‌پذیر است. همچنین می‌توان زمان‌های مهم که در آنها تیمارها به حداکثر اختلاف معنی‌دار می‌رسند، مشخص کرد که می‌تواند به عنوان شاخص‌های جوانه‌زنی مورد استفاده قرار گیرد.

روش پژوهش: در این پژوهش، از داده‌های واقعی مربوط به چهار آزمایش شامل اثر دما بر جوانه‌زنی سیاه‌دانه، اثر تنش شوری بر جوانه‌زنی بذرهای ذرت، مقایسه جوانه‌زنی ارقام مختلف گندم و اثر تنش آبی بر جوانه‌زنی گیاه کلزا استفاده گردید و با استفاده از تابع اسپیلاین داده‌های حاصل از جوانه‌زنی در این آزمایش‌های به عنوان تابعی از زمان بیان شد. سپس، نتایج تحلیل تابعی برای مقایسه‌های تیمارها هم از لحاظ میزان جوانه‌زنی و هم از لحاظ زمان جوانه‌زنی در این چهار آزمایش به تفصیل ارائه گردید.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹

کلیدواژه‌ها:

تابع اسپیلاین

تحلیل تابعی

روش جایگشتی

شاخص جوانه‌زنی

مونت کارلو

یافته‌ها: نتایج استفاده از تحلیل تابعی بیانگر کارایی بالای این روش در مشخص‌سازی اختلاف یا عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها در طول دوره زمانی بود. همچنین، مقایسه تیمارها از لحاظ جوانه‌زنی در هر لحظه از زمان و مقایسه زمان جوانه‌زنی در هر صدک جوانه‌زنی اطلاعات دقیقی از نحوه اختلاف بین تیمارها فراهم کرد. این رویکرد امکان معرفی شاخص‌های جدید جوانه‌زنی در بذرهای مختلف را فراهم کرد.

نتیجه‌گیری: به طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که برای مقایسه تیمارها برای داده‌های جوانه‌زنی، تحلیل تابعی گام به گام که در این پژوهش معرفی گردید یک روش کارآمد و دقیق برای مقایسه تیمارها و استخراج جزئیات از نحوه اختلاف بین تیمارها می‌باشد. همچنین این روش محدودیت‌های استفاده از شاخص‌های جوانه‌زنی برای مقایسه تیمارها را مرتفع می‌کند.

جنبه‌های نوآوری:

- از تحلیل تابعی برای مقایسه تیمارها در داده‌های درصد جوانه‌زنی استفاده شد.
- امکان مقایسه تیمارها از لحاظ درصد جوانه‌زنی در هر لحظه از زمان و از لحاظ زمان‌ها در هر صدک جوانه‌زنی فراهم شد.
- زمان و صدک جوانه‌زنی مهم که در آن بیشترین اختلاف بین تیمارها وجود دارد به عنوان شاخص‌های جدید جوانه‌زنی معرفی گردید.

استناد: قادری فر، فرشید؛ عظیم محسنی، مجید؛ و شیخ‌ویسی، سیما (۱۴۰۴). کاربرد تحلیل واریانس تابعی در ارزیابی جوانه‌زنی در تحقیقات بذری. *پژوهش‌های بذری*

<http://doi.org/10.61882/yujs.12.1.77>. ۷۷-۹۶، (۱)۱۲، ایران، ۱۴۰۴.



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه یاسوج.

مقدمه

جوانه‌زنی در بذره‌های بدون خفتگی با جذب آب شروع شده و با خروج ریشه‌چه و ظهور ساختارهای ضروری گیاهچه طبیعی پایان می‌یابد. اگر جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه به خوبی در مزرعه صورت گیرد، در واقع تضمین‌کننده عملکرد نهایی می‌باشد (سمیعی‌دل^۱، ۲۰۲۴). اگر به هر دلیلی درصد و سرعت جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه با مشکل مواجه شود، هم از طریق مستقیم با کاهش تراکم بوته و هم غیرمستقیم از طریق کاهش سرعت رشد گیاهچه، عملکرد نهایی محصول کاهش پیدا می‌کند (خمدی^۲ و همکاران، ۲۰۱۶). به طور کلی، الگوی جوانه‌زنی محموله‌های بذری در طی زمان پس از کاشت از روند سیگموئیدی تبعیت می‌کند. به صورتی که ابتدا تا زمان خاصی جوانه‌زنی رخ نمی‌دهد، سپس جوانه‌زنی به آرامی افزایش می‌یابد؛ سپس جوانه‌زنی به صورت صعودی و خطی افزایش می‌یابد و در انتها جوانه‌زنی به حداکثر مقدار خود می‌رسد و جوانه‌زنی به حالت ثابت در می‌آید. الگوی سیگموئیدی کمک می‌کند که محققان، مولفه‌های جوانه‌زنی از قبیل حداکثر درصد جوانه‌زنی، زمان تا شروع جوانه‌زنی، زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی و یکنواختی جوانه‌زنی را محاسبه کنند و با این مولفه‌ها، اثرات تیمارهای مختلف از قبیل دما، تنش آبی، تنش شوری و اسیدیته را بر جوانه‌زنی بذر مورد نظر را بررسی کنند (پورعلی^۳ و همکاران، ۲۰۱۹؛ حاج سیدهدادی و گونزالز-آنجر^۴، ۲۰۰۹). با کمک این مولفه‌ها، می‌توان واکنش جوانه‌زنی بذرها به این تیمارها را تفسیر کرد. همچنین در مواقعی که بذرها دارای خفتگی بذر باشند، اثرات تیمارهای مختلف رفع خفتگی را بررسی می‌کنند.

نظر به اینکه الگوی جوانه‌زنی بذرها در طی زمان حالت سیگموئیدی (غیرخطی) دارد، به داده‌های درصد جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان مدل‌های پارامتریک غیرخطی از قبیل لجستیک، گامپرتز، هیل و ریچارد برازش می‌دهند (گان^۵ و همکاران، ۱۹۹۶؛ جوسن^۶ و

همکاران، ۲۰۱۰؛ کولباخ و دور^۷، ۲۰۰۳). هر کدام از این مدل‌ها سه الی چهار ضریب دارند که اکثراً دارای مفهوم زیستی می‌باشد و شامل حداکثر درصد جوانه‌زنی، زمان تا شروع جوانه‌زنی و زمان تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی می‌باشد و با کمک این ضرایب اثرات تیمارهای مختلف بر جوانه‌زنی را مقایسه می‌کنند. برازش دقیق این مدل‌ها به نقاط، منجر به برآورد دقیق ضرایب خواهد شد. به عبارت دیگر نقاط درصد جوانه‌زنی در مقابل زمان باید دارای یک الگوی مشخصی باشد تا برازش با دقت بالایی صورت گیرد و منجر به پیش‌بینی دقیق ضرایب گردد (تی اورف و تی اورف^۸، ۲۰۱۷؛ عالی‌مقام^۹ و همکاران، ۲۰۱۳).

این روش سه اشکال اساسی دارد. اول اینکه اگر به هر دلیلی برازش مدل به داده‌ها به خوبی صورت نگیرد، ضرایب مدل نیز به خوبی برآورد نمی‌شود و در نتیجه تفسیر تیمارها به خوبی صورت نمی‌گیرد. دوم اینکه محققان ابتدا به تک تک تیمارها مدل غیرخطی را برازش می‌دهند و تنها بر اساس ضرایب مدل به مقایسه تیمارها می‌پردازند. به عبارت دیگر ابتدا به هر تیمار مدل غیرخطی را برازش می‌دهند؛ سپس ضرایب را استخراج می‌کنند و در آخر ضرایب را با هم مقایسه می‌کنند و نتایج حاصله را تفسیر می‌کنند. این کار زمان زیادی می‌برد به خصوص اگر تیمارها زیاد باشد. نکته آخر اینکه، محققان تنها ضرایب حاصل از مدل را مقایسه و تفسیر می‌کنند، ولی ممکن است تیمارها در ضرایب حاصل از این مدل‌ها با هم تفاوت نداشته باشند و در نقاط دیگر منحنی تفاوت تیمارها آشکار باشد و محققان از آن غافل شده که منجر به تفسیر غلط نتایج می‌شود. با توجه به موارد ذکر شده باید دنبال راهکاری جایگزین برای تجزیه و تحلیل مشاهده‌ها وابسته به زمان در داده‌های جوانه‌زنی بود. یکی از این راهکارها، استفاده از روش ناپارامتریک بر اساس تحلیل تابعی می‌باشد (تالسکا^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۰).

تحلیل تابعی^{۱۱}، تعمیم روش‌های کلاسیک آمار به داده‌هایی است که می‌تواند به صورت توابعی از زمان در

⁶ Joosen⁷ Collbach and Durr⁸ Tjerve and Tjerve⁹ Alimaghani¹⁰ Talska¹¹ Functional analysis¹ Samieadel² Khamadi³ Porali⁴ Haj Seyedhadi and Gonzalez-Andujar⁵ Gan

با وجود اینکه روش تحلیل تابعی در علوم مختلف در مشاهده‌ها وابسته به زمان استفاده می‌شود، اما استفاده از این روش در تجزیه و تحلیل مطالعات جوانه‌زنی که بطور ذاتی تابعی از زمان است، بدلیل پشتوانه ریاضی این تحلیل و عدم آشنایی محققان بذر با این روش و فواید آن چندان مورد توجه محققین علوم بذر قرار نگرفته است. از این رو در این تحقیق سعی شد نحوه عمل این مدل با چند مثال روی جوانه‌زنی گیاهان مختلف ارائه شود، تا محققان بذر بتوانند مفهوم کاربردی این روش را درک کنند و در تحقیقات آینده خود استفاده کنند.

مواد و روش‌ها

جمع‌آوری داده‌های جوانه‌زنی

در این مطالعه برای کاربرد تحلیل تابعی روی داده‌های جوانه‌زنی، از داده‌های آزمایش‌های جوانه‌زنی انجام شده در گیاهان سیاه‌دانه، ذرت، گندم و کلزا استفاده شد. کلیه آزمایش‌ها در آزمایشگاه علوم و تکنولوژی بذر گروه زراعت دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شد. بذره‌های ذرت، گندم و کلزا از مراکز توزیع بذر در شهرستان گرگان در سال ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ تهیه شد و بذر سیاه‌دانه از اکوتیپ‌های کشت‌شده در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در سال ۱۴۰۰ تهیه و آزمایش‌ها در همان سال تهیه بذر انجام شد.

آزمایش اول: اثرات دماهای مختلف بر جوانه‌زنی سیاه‌دانه

در این آزمایش، اثرات دماهای مختلف ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درجه سلسیوس بر جوانه‌زنی بذره‌های سیاه‌دانه اکوتیپ خواف در قالب طرح کاملاً تصادفی مورد مطالعه قرار گرفت. برای این کار ۴ تکرار ۵۰ تایی بذر شمارش و روی کاغذ صافی در داخل پتری شیشه‌ای به قطر ۱۲ سانتی‌متر قرار گرفتند. لازم به ذکر است که قبل از اضافه کردن آب مقطر به پتری‌ها، ابتدا آب مقطر برای هم‌دما شدن به مدت ۲۴ ساعت در دمای مورد نظر قرار گرفتند. سپس آب مقطر به هر پتری اضافه گردید. بذره‌های

نظر گرفته شود. به عبارت دیگر، هر مشاهده در این تحلیل به صورت $x(t)$ می‌باشد و بنابراین روش‌های معمول آماری از قبیل تجزیه واریانس کلاسیک برای تحلیل داده‌های وابسته به زمان قابل استفاده نیست و در سال‌های اخیر تجزیه واریانس تابعی برای این شکل داده‌ها در علوم مختلف از قبیل پزشکی (گرتیس^۱ و همکاران، ۲۰۲۴)، اقتصاد (فوریس کالدیریا^۲ و همکاران، ۲۰۲۱)، هیدرولوژی (لو^۳ و همکاران، ۲۰۲۴)، علوم دامی (کالین^۴ و همکاران، ۲۰۲۲)، علوم زیستی (لنگ و مولر^۵، ۲۰۰۶) و کشاورزی (ماتسوی و موچیدا^۶، ۲۰۲۴) معرفی شده است. مزیت اول روش تجزیه واریانس تابعی در این است که مقایسه تیمارها با توجه به عملکرد کلی داده‌های تابعی در طول زمان انجام می‌گیرد و مقایسه تیمارها منحصر به یک مقطع زمانی در طول آزمایش نمی‌باشد (کوواس^۷ و همکاران، ۲۰۱۰). مزیت دوم این روش این است قادر به تعیین زمان‌هایی است که بیشترین اختلاف بین تیمارها وجود دارد (دلایگل و هال^۸، ۲۰۱۳). مزیت سوم این روش این است که قادر به تجزیه و تحلیل داده‌های تابعی با الگوهای متفاوت در تیمارهای مختلف می‌باشد در حالی که در اکثر روش‌های پارامتری مشاهده‌ها در تیمارها باید دارای الگوی ثابتی باشد. یکی از مهم‌ترین مزایای این روش، امکان درون‌یابی زمانی می‌باشد. به عبارت دیگر در مطالعات که تیمارها وابسته به زمان هستند، محقق در زمان‌های خاصی تیمار مورد نظر را اندازه‌گیری می‌کند (نیپ و لیبیل^۹، ۲۰۲۰). نکته مهم در این است که این اندازه‌گیری در همه دوره‌های آزمایش قابل انجام نمی‌باشد و مقایسه آماری تیمارها در فواصل زمانی مشاهده‌های قابل انجام نمی‌باشد. اما با روش تجزیه تابعی امکان درون‌یابی نقاط در فواصل زمانی مشاهده‌های قابل انجام می‌باشد (رامسای و سیلورمن^{۱۰}، ۲۰۰۵).

¹ Gertheiss

² Foris Caldeira

³ Lu

⁴ Colin

⁵ Leng and Muller

⁶ Matsui and Mochida

⁷ Cuevas

⁸ Delaigle and Hall

⁹ Kneip and Liebl

¹⁰ Ramsay and Silverman

بذر گندم شمارش و روی کاغذ صافی در داخل پتری شیشه‌ای به قطر ۱۲ سانتی‌متر قرار گرفتند. سپس محلول‌های تهیه شده با غلظت‌های مختلف به پتری‌ها اضافه شد و در دمای ۲۰ درجه سلسیوس در انکوباتور قرار گرفتند. بذره‌ای جوانه‌زده بسته به سرعت جوانه‌زنی روزانه ۲ الی ۳ بار شمارش شد. معیار جوانه‌زنی خروج ریشه‌چه به اندازه حداقل دو میلی‌متر یا بیشتر در نظر گرفته شد.

تجزیه و تحلیل آماری

در چهار آزمایش قبلی از تحلیل تابعی استفاده شد که الگوریتم انجام تجزیه واریانس تابعی برای تیمارهای مختلف جوانه‌زنی در چهار گام بیان شد.

گام اول: برازش تابع اسپیلاین^۱ به داده‌های جوانه‌زنی در تیمارهای مختلف

در روش اسپیلاین در هر بازه کوچک زمانی از داده‌ها یک معادله چندجمله‌ای مناسب برازش داده می‌شود و در پایان تابع اسپیلاین در کل بازه زمانی از به هم پیوستن این توابع ایجاد می‌شود. در این گام ابتدا به داده‌های جوانه‌زنی در هر تیمار یک تابع اسپیلاین برازش داده می‌شود که به صورت یک تابع $x_{ij}(t)$ در بازه $[t_1, t_m]$ بیان می‌شود.

گام دوم: انجام تجزیه واریانس تابعی به روش مجانبی بر پایه فرآیندهای نرمال.

این بخش با روش ارائه‌شده توسط کوواس و همکاران (۲۰۱۰) صورت گرفت. در روش مجانبی، آماره v_n بر اساس اختلاف بین تیمارها، که ایده آن برگرفته از تجزیه واریانس کلاسیک است، به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$v_n = \sum_{l < k} n \|\bar{x}_l(t) - \bar{x}_k(t)\|^2$$

که در آن $\bar{x}_k(t)$ و $\bar{x}_l(t)$ میانگین تابعی تیمارهای l و k می‌باشد. همچنین نماد $\|\cdot\|$ بیانگر فاصله تابعی می‌باشد که بر حسب انتگرال در بازه زمانی محاسبه

جوانه‌زده بسته به سرعت جوانه‌زنی روزانه ۲ الی ۳ بار شمارش شد. معیار جوانه‌زنی خروج ریشه‌چه به اندازه یک میلی‌متر یا بیشتر در نظر گرفته شد. شمارش تا زمانی ادامه پیدا کرد که تا هفت روز پشت سرهم جوانه‌زنی رخ ندهد.

آزمایش دوم: اثرات تنش شوری بر جوانه‌زنی

بذره‌ای ذرت

در این آزمایش، اثرات تنش آبی در سه سطح ۰، ۳/۰- و ۶/۰- مگاپاسکال با کلرید سدیم بر جوانه‌زنی بذره‌ای ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ با ۴ تکرار ۵۰ تایی بذر در محیط پتری دیش در دمای ۲۵ درجه سلسیوس صورت گرفت. طرح آماری مورد استفاده طرح کاملاً تصادفی بود. همانند آزمایش قبلی، بذره‌ای جوانه‌زده روزانه ۲ الی ۳ بار بسته به سرعت جوانه‌زنی شمارش شد. در این آزمایش معیار جوانه‌زنی خروج ریشه‌چه به اندازه دو میلی‌متر یا بیشتر در نظر گرفته شد. شمارش تا زمانی ادامه پیدا کرد که تا هفت روز پشت سرهم جوانه‌زنی رخ ندهد.

آزمایش سوم: مقایسه جوانه‌زنی ارقام مختلف گندم

در این آزمایش، واکنش جوانه‌زنی پنج رقم گندم شامل کوه‌دشت، لاین ۱۷، تجن، آفتاب و قابوس (ارقام گندم مورد کاشت در استان گلستان) با ۴ تکرار ۵۰ تایی بذر روی کاغذ صافی در داخل پتری شیشه‌ای به قطر ۱۲ سانتی‌متر در دمای ۲۰ درجه سلسیوس در انکوباتور به صورت طرح کاملاً تصادفی مورد ارزیابی قرار گرفت. شمارش بذره‌ای جوانه‌زده روزانه ۲ الی ۳ بار انجام شده و معیار جوانه‌زنی خروج ریشه‌چه به اندازه دو میلی‌متر یا بیشتر در نظر گرفته شد.

آزمایش چهارم: اثرات تنش آبی بر جوانه‌زنی گیاه

کلزا

در این آزمایش، اثرات تنش آبی در سه سطح ۰، ۴/۰-، ۸/۰- و ۱۲/۰- مگاپاسکال با پلی‌اتیلن گلیکول ۸۰۰۰ بر جوانه‌زنی بذره‌ای کلزا رقم هایولا ۵۰ در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. برای این کار ۴ تکرار ۵۰ تایی

^۱ Spline

گام چهارم: تعیین زمان یا زمان‌های مهم که در آنها بیشترین اختلاف بین تیمارها وجود دارد.

برای تعیین زمان‌های مهم از روش ارائه شده توسط دلایگل و هال (۲۰۱۳) استفاده شد. در این روش زمان‌های مهم رخداد جوانه‌زنی که در آن‌ها بیشترین اختلاف بین تیمارها وجود دارد به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$T_r = \inf_{t(r)} err(t_r)$$

که در آن $err(t_r)$ میزان خطای تجزیه واریانس در لحظه t_r می‌باشد و نماد $\inf$ بیانگر زمانی است که در آن کمترین میزان خطا در طی بازه زمانی وجود دارد. اگر در طی بازه آزمایش چندین نقطه زمانی در تیمارهای مختلف دارای کمترین میزان خطای تجزیه واریانس باشد، تیمارها در زمان‌های مختلف دارای بیشترین اختلاف می‌باشد.

تجزیه و تحلیل آماری الگوریتم در این مطالعه با نرم‌افزار R انجام شد. برای برازش تابع اسپیلاین به داده‌های جوانه‌زنی از دو بسته `fda.usc` و `fda` استفاده شد. تحلیل واریانس تابعی و تعیین زمان‌های مهم با کدنویسی در نرم‌افزار R حاصل گردید.

نتایج و بحث

نتایج تحلیل تابعی بر اساس روش مونت‌کارلو نشان داد که دما بر روند زمانی جوانه‌زنی سیاهدانه تاثیر معنی‌داری دارد و همچنین بین درجه حرارت‌های مختلف از لحاظ زمان وقوع جوانه‌زنی سیاهدانه نیز اختلاف معنی‌دار وجود دارد (جدول ۱). مقدار معنی‌داری مقایسه درصد جوانه‌زنی در هر لحظه از زمان و مقایسه زمان وقوع جوانه‌زنی در هر صدک به روش جایگشتی محاسبه و ترسیم گردید (شکل ۱). همانطور که مشاهده می‌شود در بازه زمانی ۴۵ تا ۱۹۰ ساعت و بازه صدک‌های جوانه‌زنی سیاهدانه از ۱۰ تا ۸۸ درصد، اختلاف معنی‌داری بین دماهای مختلف جوانه‌زنی وجود دارد. همچنین، زمان و صدکی که در آنها بیشترین اختلاف بین تیمارهای دمایی وجود دارد در زمان ۸۷ ساعت و صدک ۳۰ درصد مشاهده شد (شکل ۲).

می‌شود. توزیع مجانبی v_n را می‌توان بر اساس فرایند توزیع نرمال بیان کرد.

با برآورد میانگین و واریانس توزیع نرمال بر اساس مشاهدات تابعی مقدار معنی‌داری آزمون $p - value$ با شبیه‌سازی مونت‌کارلو به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$p - value = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I(v_m > v_n)$$

که در آن $v_m, m = 1, \dots, N$ بر اساس N مرتبه شبیه‌سازی مونت‌کارلو^۱ از توزیع نرمال با میانگین و واریانس محاسبه شده در هر تیمار شبیه‌سازی شده است. همچنین در این معادله I یک تابع نشانگر است به صورتی که اگر $v_m > v_n$ باشد این نشانگر برابر با ۱ است و اگر $v_m \leq v_n$ باشد این نشانگر صفر در نظر گرفته می‌شود.

گام سوم: محاسبه آماره F در هر لحظه از زمان.

این مقایسه زمانی انجام می‌شود که فرض برابری تیمارها در گام دوم رد شده باشد و بین تیمارها اختلاف معنی‌داری در کل بازه زمانی آزمایش وجود دارد (رامسای و سیلورمن، ۲۰۰۵). در این گام تجزیه واریانس معمولی (آماره F) برای مشاهدات تابعی در هر لحظه از زمان صورت می‌گیرد. در نتیجه برای m زمان مجزا، m آماره F محاسبه می‌شود و با مقدار بحرانی مقایسه می‌گردد. برای افزایش دقت در این روش، مقادیر معنی‌داری به روش آزمون ناپارامتری جایگشتی^۲ انجام می‌شود. در روش جایگشتی، با توجه به این که بر اساس فرض صفر اختلافی بین تیمارها وجود ندارد، می‌توان در هر نقطه زمانی، مشاهدات را در تیمارها جابه‌جا کرد. با هر جایگشت می‌توان آماره F را دوباره محاسبه کرد و این کار به دفعات انجام شده و بر اساس آن ناحیه بحرانی برای رد یا قبول فرض صفر را مشخص کرد. اگر مقدار F ای که در ابتدا بدست می‌آید بیشتر از چندک $(1 - \alpha)$ درصد از F های حاصل باشد، فرض صفر رد می‌شود. مزیت این روش شناسایی روند اختلاف بین تیمارها در زمان‌های مختلف می‌باشد.

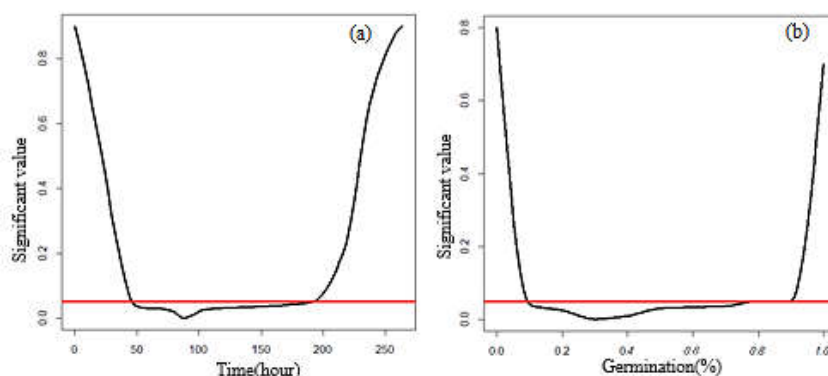
¹ Monte Carlo

² Nonparametric permutation test

جدول ۱- تحلیل واریانس تابعی برای بررسی تاثیر درجه حرارت بر الگوی زمانی جوانه‌زنی و مقایسه زمان‌های وقوع جوانه‌زنی سیاه‌دانه.

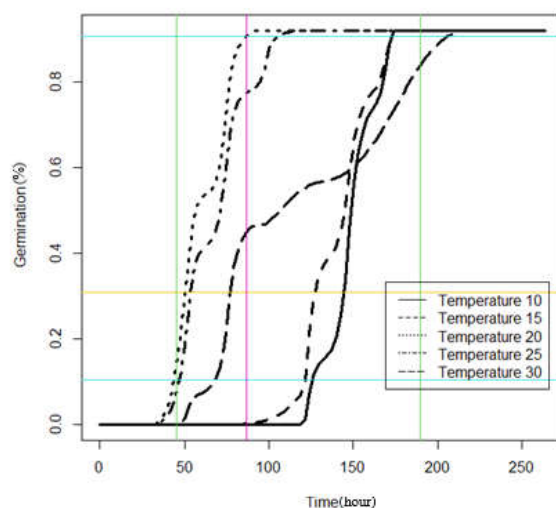
Table 1- Functional analysis of variance to assess the effect of temperature on the temporal pattern of germination and to compare the germination timings of black cumin.

مقدار معنی‌داری Significant value	تحلیل واریانس تابعی Functional analysis of variance
<0.00001	تاثیر درجه حرارت بر الگوی زمانی جوانه‌زنی The effect of temperature on the temporal pattern of germination
<0.00001	مقایسه زمان جوانه‌زنی در درجه حرارت‌های مختلف Comparison of germination time at different temperatures



شکل ۱- مقادیر معنی‌داری مقایسه‌های زمانی جوانه‌زنی سیاه‌دانه (a) و مقایسه زمان در صدک‌های مختلف جوانه‌زنی (b).

Figure 1- Significant values of germination time comparisons for black cumin (a) and comparison of time at different percentiles of germination (b).



شکل ۲- توابع اسپلاین روند جوانه‌زنی گیاه سیاه‌دانه در دماهای مختلف به همراه بازه زمانی جوانه‌زنی (—)، زمان حداکثر اختلاف (—)، بازه

صدک‌های جوانه‌زنی (---)، سطح جوانه‌زنی حداکثر اختلاف (— · —)

Figure 2- Spline functions of germination trends for black cumin at different temperatures along with the germination time interval (—), maximum difference time (—), germination percentile range (— · —), and maximum difference germination level (— · —).

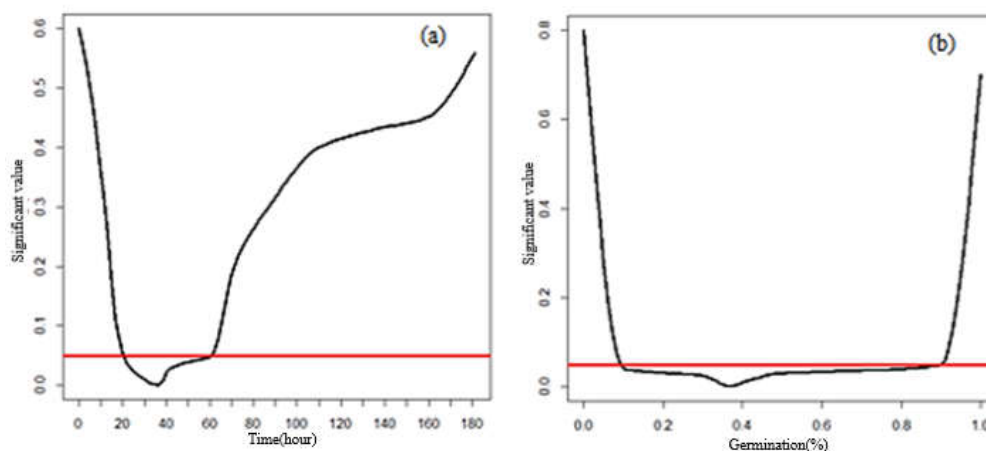
جوانه‌زنی و زمان‌های وقوع جوانه‌زنی نشان داد که بین ارقام گندم در زمان‌ها و صدک‌های مختلف جوانه‌زنی ارقام گندم اختلاف معنی‌داری وجود ندارد و از این رو نیاز به تحلیل‌های واریانس تکمیلی برای نشان‌دادن زمان‌ها و صدک‌های مختلف جوانه‌زنی وجود ندارد (شکل ۵ و ۶). نتایج تحلیل تابعی بر داده‌های جوانه‌زنی کلزا در پاسخ به تنش آبی نشان داد که الگوی جوانه‌زنی بذرهای این گیاه در تیمارهای مختلف اختلاف معنی‌داری دارند (جدول ۲؛ شکل ۷). همانطور که مشاهده می‌شود حداکثر اختلاف در بازه زمانی ۱۶ تا ۱۰۰ ساعت و بازه صدک‌های جوانه‌زنی کلزا از ۱۰ تا ۹۵ درصد بین تنش‌های آبی به ترتیب از لحاظ جوانه‌زنی و زمان وقوع جوانه‌زنی مشاهده شد. همچنین، زمان و صدکی که در آنها بیشترین اختلاف بین تیمارها وجود دارد در زمان ۳۸ ساعت و صدک ۶۸ درصد برآورد شد (شکل ۸).

نتایج تحلیل تابعی نشان داد که تنش شوری بر روند زمانی جوانه‌زنی ذرت تاثیرگذار است و همچنین بین پتانسیل‌های شوری مختلف از لحاظ زمان وقوع جوانه‌زنی ذرت تفاوت معنی‌دار وجود دارد (جدول ۲ و شکل ۳). همانطور که مشاهده می‌شود در بازه زمانی ۲۰ تا ۶۰ ساعت و بازه صدک‌های جوانه‌زنی ذرت از ۱۰ تا ۹۵ درصد بین تیمارهای شوری به ترتیب از لحاظ جوانه‌زنی و زمان وقوع جوانه‌زنی اختلاف معنی‌دار وجود دارد. همچنین، زمان و صدکی که در آنها بیشترین اختلاف بین تیمارها وجود دارد در زمان ۳۴ ساعت و صدک ۳۷ درصد مشاهده شد (شکل ۴). نتایج تحلیل تابعی بر اساس روش مونت‌کارلو نشان داد که بین ارقام گندم در جوانه‌زنی در زمان‌های مختلف و همچنین زمان‌های جوانه‌زنی اختلاف معنی‌داری وجود ندارد (جدول ۳). الگوی برازش تابع اسپلاین به داده‌های جوانه‌زنی و مقدار معنی‌داری درصد

جدول ۲- تحلیل واریانس تابعی برای بررسی تاثیر تنش شوری بر الگوی زمانی جوانه‌زنی و مقایسه زمان‌های وقوع جوانه‌زنی ذرت.

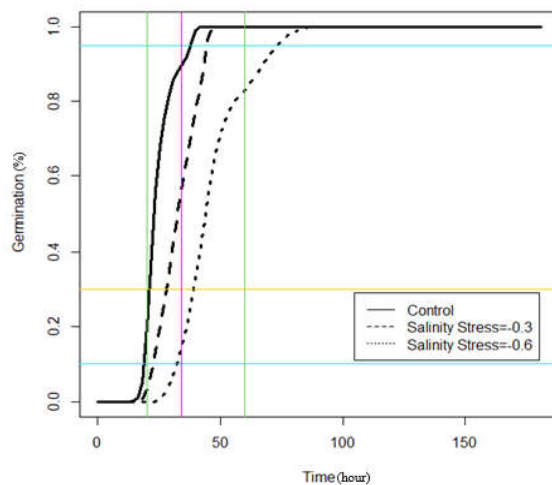
Table 2- Functional analysis of variance to investigate the effect of salinity stress on the temporal pattern of germination and to compare the germination times of corn

مقدار معنی‌داری Significant value	تحلیل واریانس تابعی Functional analysis of variance
<0.00001	تاثیر تنش شوری بر الگوی زمانی جوانه‌زنی The effect of salinity stress on the temporal pattern of germination
<0.00001	مقایسه زمان جوانه‌زنی در تنش‌های شوری مختلف Comparison of germination time under different salinity stresses



شکل ۳- مقادیر معنی‌داری مقایسه‌های زمانی جوانه‌زنی ذرت (a) و مقایسه زمان در صدک‌های مختلف جوانه‌زنی (b).

Figure 3 - Significant values of germination time comparisons for corn (a) and comparison of time at different germination percentiles (b)



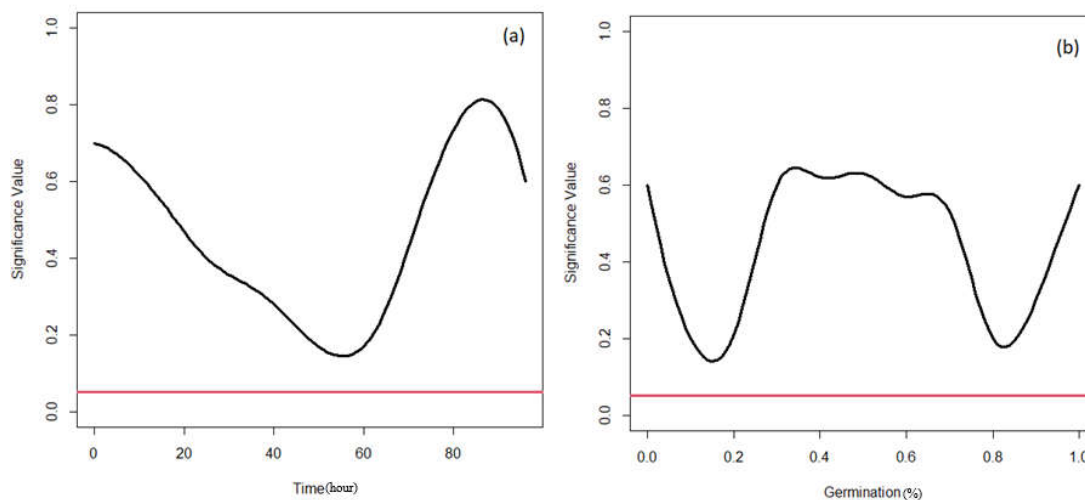
شکل ۴- توابع اسپلاین روند جوانه‌زنی گیاه ذرت در تنش‌های شوری مختلف به همراه بازه زمانی جوانه‌زنی (—)، زمان حداکثر اختلاف (---)، بازه صدک‌های جوانه‌زنی (....) و سطح جوانه‌زنی حداکثر اختلاف (—).

Figure 4- Spline functions of germination trends for corn under different salinity stresses, along with the germination time interval (—), maximum difference time (---), germination percentile range (....), and maximum difference germination level (—).

جدول ۳- تحلیل واریانس تابعی برای مقایسه جوانه‌زنی بر حسب زمان و زمان جوانه‌زنی ارقام مختلف گندم

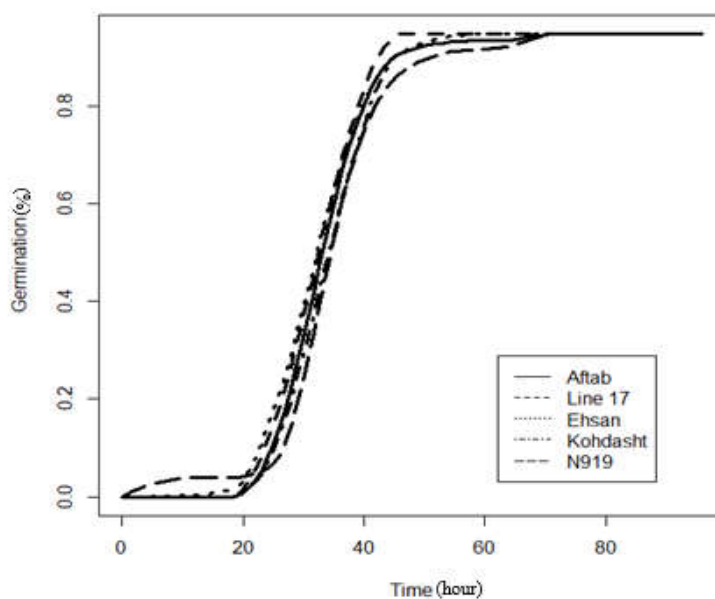
Table 3- Functional analysis of variance for comparing germination based on time and germination times of different wheat varieties

مقدار معنی‌داری Significant value	تحلیل واریانس تابعی Functional analysis of variance
0.13	مقایسه الگوی جوانه‌زنی ارقام گندم از لحاظ جوانه‌زنی Comparison of germination patterns of wheat varieties in terms of germination
0.18	مقایسه الگوی زمانی وقوع جوانه‌زنی ارقام گندم Comparison of the temporal pattern of germination occurrence among wheat varieties



شکل ۵- مقادیر معنی‌داری مقایسه‌های زمانی جوانه‌زنی گندم (a) و مقایسه زمان در صدک‌های مختلف جوانه‌زنی (b).

Figure 5 - Significance values of germination time comparisons for wheat (a) and comparison of times at different germination percentiles (b)



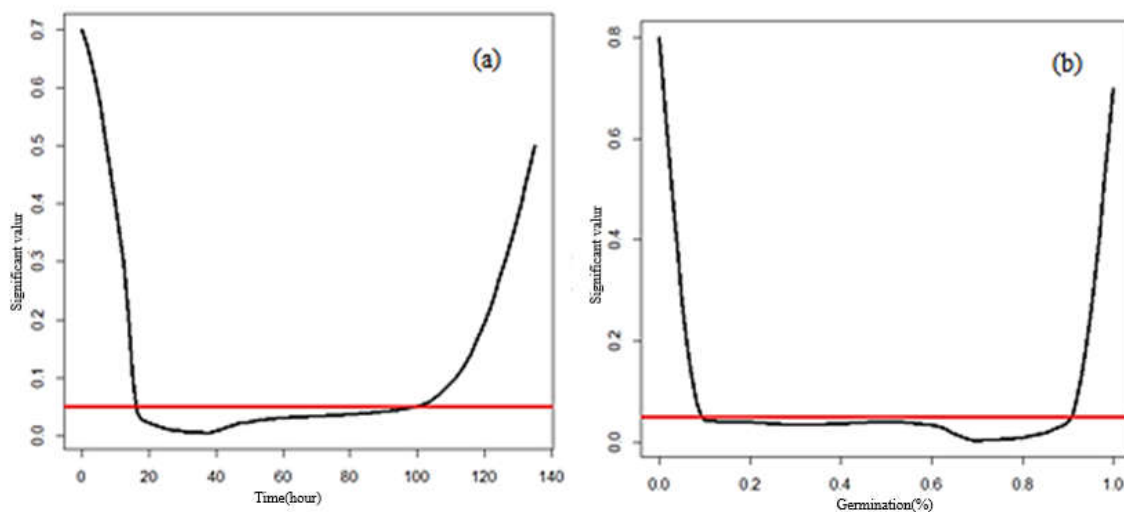
شکل ۶- توابع اسپلاین روند زمانی جوانه‌زنی ارقام گندم

Figure 6 - Spline functions of temporal germination trends for wheat varieties

جدول ۴- تحلیل واریانس تابعی برای بررسی تاثیر تنش آبی بر الگوی زمانی جوانه‌زنی و مقایسه زمان‌های وقوع جوانه‌زنی کلزا.

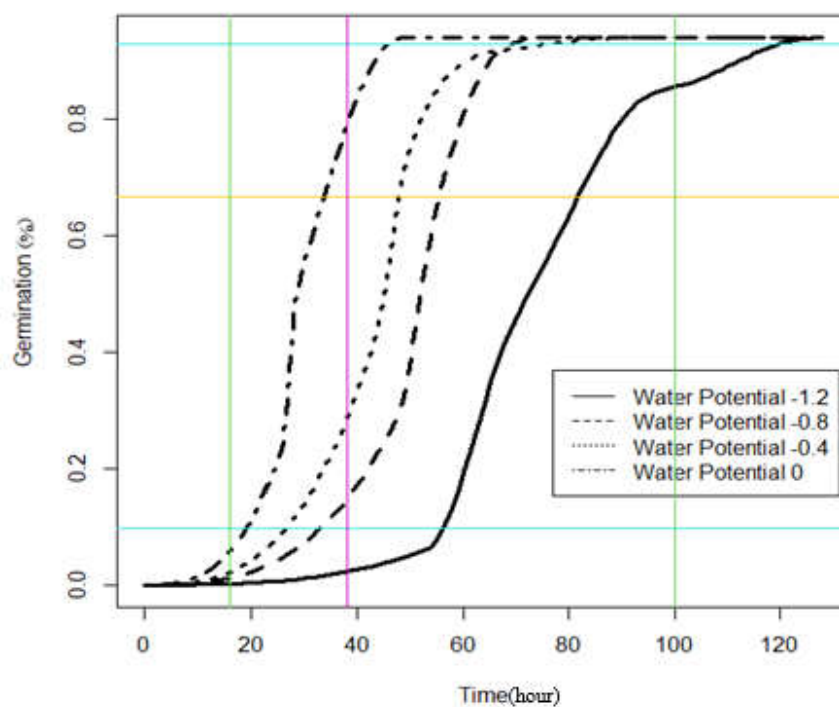
Table 4 - Functional analysis of variance to investigate the effect of water stress on the temporal pattern of germination and compare germination times of canola.

مقدار معنی‌داری Significant value	تحلیل واریانس تابعی Functional analysis of variance
<0.00001	تاثیر تنش آبی بر الگوی زمانی جوانه‌زنی The effect of water stress on the temporal pattern of germination
<0.00001	مقایسه زمان جوانه‌زنی در تنش‌های آبی مختلف Comparison of germination times under different water stress conditions



شکل ۷- مقادیر معنی‌داری مقایسه‌های زمانی جوانه‌زنی کلزا (a) و مقایسه‌های مختلف جوانه‌زنی (b).

Figure 7- Significance values of germination time comparisons for canola (a) and comparison of times at different germination percentiles (b)



شکل ۸- توابع اسپیرالین روند جوانه‌زنی گیاه کلزا در تنش‌های آبی مختلف به همراه بازه زمانی جوانه‌زنی (—)، زمان حداکثر اختلاف (—)، سطح جوانه‌زنی حداکثر اختلاف (—)، و حداکثر اختلاف جوانه‌زنی (—)

Figure 8 - Spline functions of the germination trend of canola under different water stress conditions, along with the germination time interval (—), maximum difference time (—), germination percentiles range (—), and maximum difference germination level (—)

مشاهده نمی‌شود (شکل ۵). در صورتی که در سه آزمایش دیگر فرض صفر رد شد و بیانگر اختلاف معنی‌دار بین تیمارها می‌باشد و محقق ملزم به ادامه تجزیه و تحلیل و مقایسه‌های بعدی می‌باشد (جدول ۱، ۲ و ۴).

نکته دوم، در مطالعات جوانه‌زنی، اکثر محققان به داده‌های درصد جوانه‌زنی تجمعی در مقابل زمان یک مدل غیرخطی برازش می‌دهند و ضرایب مدل را برآورد می‌کنند (لودو^۳ و همکاران، ۲۰۱۸). این مدل‌ها دارای ضرایب ثابتی از قبیل حداکثر درصد جوانه‌زنی، زمان تا ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی و زمان تا شروع جوانه‌زنی می‌باشند (پورعلی و همکاران، ۲۰۱۹). سپس این ضرایب بین تیمارها مقایسه می‌گردد و بر این اساس نحوه تاثیرگذاری تیمارها را بررسی می‌کنند. اما ممکن است تیمارها در این ضرایب اختلاف معنی‌داری نداشته باشند و محقق به آسانی از موضوع صرفه‌نظر کرده و بیان می‌کند که تیمارها بر جوانه‌زنی تاثیر معنی‌داری ندارد. با این کار بخشی از اطلاعات مهم که در آن بخش بین تیمارها اختلاف معنی‌داری وجود دارد را نادیده می‌گیرد. در صورتی که ممکن است این اختلاف در زمان‌های دیگر و صدک‌های دیگر جوانه‌زنی رخ داده باشد. تحلیل تابعی قادر به تعیین و تشخیص دقیق زمان و صدک‌های مهم جوانه‌زنی در طی الگوی جوانه‌زنی می‌باشد. همانطور که در این مطالعه مشاهده می‌شود حداکثر اختلاف در آزمایش سیاه دانه، ذرت و کلزا در زمان تا صدک‌های ۳۰، ۳۷ و ۶۸ درصد حداکثر درصد جوانه‌زنی مشاهده شد (شکل‌های ۱، ۳ و ۷). از این رو برای مقایسه تیمارها در این آزمایش باید این صدک‌های جوانه‌زنی مقایسه گردند.

نکته سوم این است که ضرایب بدست آمده از برازش مدل‌های رگرسیون غیرخطی، در واقع حاصل از درون‌یابی است که ممکن است همراه با خطا باشد. در صورتی که تحلیل تابعی، دقیقاً الگوی داده‌ها را حفظ کرده و به طور دقیق قادر به محاسبه شاخص‌های جوانه‌زنی می‌باشد. همچنین مدل‌های رگرسیون غیرخطی از روش‌های پارامتریک می‌باشند و وابسته به فرضیه‌هایی می‌باشد که داده‌ها باید آن فرضیه‌ها را داشته باشند تا تجزیه و تحلیل

نتایج این مطالعه نشان داد که تحلیل تابعی نه تنها قادر به تجزیه و تحلیل الگوی کلی جوانه‌زنی بذرها در تیمارهای مختلف می‌باشد، بلکه قادر به تعیین بازه‌های زمانی و بازه‌های صدک جوانه‌زنی که در این بازه‌ها اختلاف معنی‌دار بین تیمارها وجود دارد، می‌باشد. یکی از نکات برجسته این تحلیل که بر اساس شکل‌های ۱، ۳ و ۷ حاصل می‌شود زمان و صدکی است که در آنها بیشترین اختلاف معنی‌دار بین تیمارها وجود دارد که نقطه یا نقاط حداقل منحنی یا مقدار معنی‌داری می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، نقاط زمانی با اختلاف حداکثر بین جوانه‌زنی در گیاه سیاه‌دانه در ۷۸ ساعت یعنی در انتهای بازه زمانی آزمایش، در ذرت در ۳۴ ساعت یعنی تقریباً در میانه بازه زمانی آزمایش و در گیاه کلزا در ۳۸ ساعت یعنی در زمان‌های پایین‌تر از میانه بازه زمانی حاصل شده است. در واقع در هیچ کدام از این آزمایش‌ها، بیشترین اختلاف در زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی که یکی از پارامترهای مدل‌های غیرخطی مورد استفاده در برازش داده‌های جوانه‌زنی می‌باشد، مشاهده نشد (شکل‌های ۱، ۳ و ۷).

در استفاده از این روش، چهار نکته قابل توجه و جالب وجود دارد که محققان با در نظر گرفتن آنها می‌توانند درک درست و جامعی از مطالعه خود داشته باشند. نکته اول، اینکه از لحاظ آماری ابتدا باید فرض اولیه معنی‌دار گردد تا در ادامه مقایسه‌های بعدی صورت گیرد (مرکویکا^۱ و همکاران، ۲۰۲۰؛ آگبانگبا^۲ و همکاران، ۲۰۲۴).

در واقع زمانی باید مقایسه‌های بعدی صورت گیرد که فرض اولیه معنی‌دار بودن الگوی زمانی جوانه‌زنی در تیمارهای مختلف رد شود و بین تیمارها در بخش‌هایی از زمان و صدک‌های جوانه‌زنی اختلاف معنی‌دار وجود داشته باشد و پس از آن مقایسه‌های بعدی صورت گیرد. در این مطالعه، بین چهار آزمایش، این مورد در آزمایش سوم در پاسخ جوانه‌زنی ارقام گندم صادق نبود و فرض اولیه رد نگردید (جدول ۳). همانطور که مشاهده می‌شود بین ارقام گندم از لحاظ الگوی جوانه‌زنی اختلافی وجود ندارد و از این رو نیازی به ادامه تجزیه و تحلیل نمی‌باشد، زیرا اختلاف معنی‌داری در هیچ الگوی زمانی در طی آزمایش

¹ Mrkvicka² Angbangba³ Loddo

محاسبه این فرمول‌های تجربی، درصد جوانه‌زنی در تیمارهای مختلف در این زمان مورد مقایسه قرار گیرد.

با وجود اهمیت و کاربرد تحلیل واریانس تابعی در علوم مختلف، تنها دو مطالعه در استفاده از این روش در مطالعات بذر صورت گرفته است (تالسکا و همکاران، ۲۰۲۰؛ جیانینتی^{۱۰}، ۲۰۲۰). تالسکا و همکاران (۲۰۲۰) شاخص جوانه‌زنی پیوسته^{۱۱} که سطح زیر منحنی جوانه‌زنی را به عنوان یک شاخص موثر برای مقایسه تیمارها از لحاظ جوانه‌زنی معرفی کردند. اگرچه این شاخص از شاخص‌های رایج جوانه‌زنی عملکرد بهتری داشته است، اما جزئیات بیشتر در مورد زمان‌های مهم را در اختیار قرار نمی‌دهد. جیانینتی (۲۰۲۰) از مدل خطی آمیخته تعمیم‌یافته^{۱۲} که در آن مشاهده‌های جوانه‌زنی وابسته به زمان در نظر گرفته می‌شود را برای مقایسه تیمارهای جوانه‌زنی پیشنهاد داد. هر چند این روش بسیار موثرتر از مقایسه شاخص‌های جوانه‌زنی برای ارزیابی تیمارها می‌باشد، اما تنها به یک مقایسه کلی از جوانه‌زنی تیمارها در بازه زمانی آزمایش می‌پردازد و مقایسه‌ها در هر لحظه از زمان که منجر به اطلاعات دقیق از الگوی زمانی اختلاف بین تیمارها می‌شود، در این تحلیل امکان‌پذیر نمی‌باشد.

در روش ارائه شده در این مقاله علاوه بر امکان مقایسه تیمارها از لحاظ جوانه‌زنی در کل بازه زمانی، امکان مقایسه تیمارها در هر لحظه از زمان که منجر به تعیین زمان‌های مهم در مقایسه تیمارها می‌شود فراهم می‌کند. همچنین برای اولین بار در این مقاله تحلیل تابعی از دو بعد زمان و صدک جوانه‌زنی مورد استفاده قرار گرفت که یک نگرش نو در مقایسه‌های تیمارها از لحاظ جوانه‌زنی می‌باشد.

نتیجه‌گیری

به طور کلی این مطالعه نشان داد که برای مقایسه تیمارها با داده‌های جوانه‌زنی روش تحلیل واریانس تابعی از کارایی بالایی برخوردار است. همچنین در این روش، امکان مقایسه تیمارها در هر لحظه از زمان و در هر صدک

قابل قبول باشد (گونزالز آنجور^۱ و همکاران، ۲۰۱۶؛ اندرسن^۲، ۲۰۰۹؛ مامانی^۳ و همکاران، ۲۰۲۴).

این فرضیه‌ها شامل ثبات واریانس و همچنین عدم خودهمبستگی بین داده‌ها می‌باشد. در صورتی که محققان بیان داشتند که داده‌های حاصل از جوانه‌زنی دارای خودهمبستگی مثبت می‌باشند و در نتیجه بر فرضیه‌ها آن خدشه وارد می‌گردد (عظیم‌محسنی^۴ و همکاران، ۲۰۲۲ و قادری‌فر و همکاران، ۲۰۲۴) و از این رو استفاده از رگرسیون غیرخطی به عنوان یک روش پارامتریک از لحاظ آماری دارای مشکل می‌باشد. با وجود این اشکال، به دلیل عدم آگاهی محققان بذر از این موضوع، از مدل‌های رگرسیون غیرخطی بر پایه روش پارامتریک در تجزیه و تحلیل داده‌های جوانه‌زنی بارها استفاده شده است. در صورتی که تحلیل تابعی یک روش ناپارامتریک است و به جنس داده‌ها وابسته نیست و مبتنی بر فرضیه‌ها نمی‌باشد و حتی با وجود خدشه‌دار شدن فرضیه‌ها، قادر به انجام دقیق و صحیح تجزیه واریانس و برآورد دقیق پارامترهای لازم می‌باشد (اسماگا^۵، ۲۰۲۰؛ گورکی و اسماگا^۶، ۲۰۱۵).

نکته نهایی این است که در برخی فرمول‌های تجربی جوانه‌زنی از قبیل ارزش جوانه‌زنی^۷ و انرژی جوانه‌زنی^۸، زمان رسیدن به اوج جوانه‌زنی و زمان حداکثر اختلاف بین تیمارها از لحاظ درصد جوانه‌زنی حائز اهمیت است (قادری‌فر و گورزین^۹، ۲۰۱۹). در واقع این زمان به صورت تجربی روز چهارم یا هفتم بسته به نوع بذر در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که ممکن است این دوره زمانی کوتاه‌تر از این دوره و در زمان‌های دیگر رخ دهد. در واقع با استفاده از تحلیل تابعی به راحتی محقق قادر است این زمان را مشخص کند و بر اساس آن انرژی جوانه‌زنی و ارزش جوانه‌زنی را محاسبه کند. در این مطالعه در آزمایش مربوط به جوانه‌زنی سیاه‌دانه، ذرت و کلزا این زمان در ۸۷، ۳۴ و ۳۸ ساعت تعیین شد و پیشنهاد می‌شود برای

¹ Gonzalez-Andujar

² Anderson

³ Mamani

⁴ Azimmohseni

⁵ Smaga

⁶ Górecki and Smaga

⁷ Germination energy

⁸ Germination value

⁹ Gorzin

¹⁰ Gianinetti

¹¹ Continuous germination index

¹² Generalized linear mixed model

زمانی، مقایسه لحظه‌به‌لحظه جوانه‌زنی نیز فراهم گردد. همچنین با به کار بردن روش این مقاله با داده‌های جوانه‌زنی در بذرهای مختلف می‌توان شاخص‌های جوانه‌زنی را در تیمارهای مختلف محاسبه کرد.

جوانه‌زنی وجود دارد. از این رو به محققان بذر پیشنهاد می‌گردد که در مطالعات مربوط به جوانه‌زنی بذر که داده‌های آن به طور ذاتی تابعی از زمان است به جای مقایسه شاخص‌های جوانه‌زنی، از تحلیل واریانس تابعی استفاده کنند تا علاوه بر مقایسه تیمارها در کل بازه

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان به طور مساوی در مفهوم‌سازی مقاله و نگارش پیش‌نویس‌های اولیه و بعدی آن مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

این پژوهش، هیچ کمک مالی خاصی از سوی سازمان‌های تأمین‌کننده اعتبار در بخش‌های عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از داوران محترم بابت پیشنهادات ارزشمندشان در بازبینی مقاله قدردانی کنند.

References

منابع

- Agbangba, C. E., Aide, E. S., Honfo, H., & Kakai, R. G. (2024). On the use of post-hoc tests in environmental and biological sciences: A critical review. *Heliyon*, 10(3), e25312. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25312>
- Alimaghani, S. M., Ghaderi-Far, F., & Rabbani, M. R. (2013). Germination data analysis by using the four-parameter Hill model. *Seed Research*, 3(2), 86–94. [In Persian]
- Andersen, R. (2009). Nonparametric methods for modeling nonlinearity in regression analysis. *Annual Review of Sociology*, 35(1), 67–85. <https://doi.org/10.1146/annurev-soc-070308-120051>
- Azimmohseni, M., Ghaderi-Far, F., Khalafi, M., Sadeghipour, H. R., & Ghezel, M. (2022). Comparison of time to the event and nonlinear regression models in the analysis of germination data. *Iranian Journal of Seed Research*, 9(1), 75–92. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.52547/yujs.9.1.75>
- Colbach, N., & 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/10.1614/0043-1745\(2003\)051\[0708:EOSPAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2003)051[0708:EOSPAS]2.0.CO;2)
- Colin, N., Habit, E., Manosalva, A., Maceda-Veiga, A., & Górski, K. (2022). Taxonomic and functional responses of species-poor riverine fish assemblages to the interplay of human-induced stressors. *Water*, 14(3), 355. <https://doi.org/10.3390/w14030355>
- Cuevas, A., Febrero, M., & Fraiman, R. (2010). An ANOVA test for functional data. *Computational Statistics & Data Analysis*, 47(1), 111–122. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2003.10.021>
- Delaigle, A., & Hall, P. (2013). Classification using censored functional data. *Journal of the American Statistical Association*, 108(504), 1269–1283. <https://doi.org/10.1080/01621459.2013.827982>
- Frois Caldeira, J., Gupta, R., Suleman, M. T., & Torrent, H. S. (2021). Forecasting the term structure of interest rates of the BRICS: Evidence from a nonparametric functional data analysis. *Emerging Markets Finance and Trade*, 57(15), 4312–4329. <https://doi.org/10.1080/1540496X.2019.1706014>
- Gan, Y., Stobbe, E. H., & Njue, C. (1996). Evaluation of selected nonlinear regression models in quantifying seedling emergence rate of spring wheat. *Crop Science*, 36(1), 165–168. <https://doi.org/10.2135/cropsci1996.0011183X003600010030x>
- Gertheiss, J., Rügamer, D., Liew, B. X., & Greven, S. (2024). Functional data analysis: An introduction and recent developments. *Biometrical Journal*, 66(7), 353–371. <https://doi.org/10.1002/bimj.202300134>
- Ghaderi-Far, F., & Gorzin, M. (2019). Applied research in seed technology. Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources. [In Persian]
- Ghaderi-Far, F., Azimmohseni, M., & Bagheri, H. (2024). Evaluation of the generalized linear model to the germination percentage data and its comparison with the square root transformation. *Iranian Journal of Seed Research*, 10(2), 37–48. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.61186/yujs.10.2.37>

- Gianinetti, A. (2020). Basic features of the analysis of germination data with generalized linear mixed models. *Data*, 5(1), 6. <https://doi.org/10.3390/data5010006>
- Gonzalez-Andujar, J. L., Francisco-Fernandez, M., Cao, R., Reyes, M., Urbano, J. M., Forcella, F., & Bastida, F. (2016). A comparative study between nonlinear regression and nonparametric approaches for modelling *Phalaris paradoxa* seedling emergence. *Weed Research*, 56(5), 367–376. <https://doi.org/10.1111/wre.12216>
- Górecki, T., & Smaga, Ł. (2015). A comparison of tests for the one-way ANOVA problem for functional data. *Computational Statistics*, 30(4), 987–1010. <https://doi.org/10.1007/s00180-015-0555-0>
- Haj Seyedhadi, M. R., & 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.2008.07.006>
- Joosen, R. V. L., Kodde, J., Willems, L. A. J., Ligterink, W., Van der Plas, H. W., & 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.2010.04136.x>
- Khamadi, N., Nabipor, M., Roshanfekr, H., & Rahnama, A. (2016). Effect of sowing date and seed priming on emergence and yield and yield components of three bread wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.). *Applied Field Crops Research*, 29(1), 119–125. [In Persian] <https://doi.org/10.22092/aj.2016.109570>
- Kneip, A., & Liebl, D. (2020). On the optimal reconstruction of partially observed functional data. *The Annals of Statistics*, 48(3), 1692–1717. <https://doi.org/10.1214/19-AOS1856>
- Leng, X., & Müller, H. G. (2006). Classification using functional data analysis for temporal gene expression data. *Bioinformatics*, 22(1), 68–76. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bti742>
- Loddo, D., Ghaderi-Far, F., Rastegar, Z., & Masin, R. (2018). Base temperatures for germination of selected weed species in Iran. *Plant Protection Science*, 54(1), 60–66. <https://doi.org/10.17221/158/2016-PPS>
- Lu, M., Hua, J., Yu, Z., & Xu, Y. (2024). Towards transient connectivity of river networks during rainfall events: Insight from hydrological observation and functional data analysis. *Journal of Hydrology*, 637, 131146. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131146>
- Mamani, G. Q., Duarte, M. L., Almeida, L. S. D., & Martins Filho, S. (2024). Non-parametric survival analysis in seed germination of forest species. *Journal of Seed Science*, 46, e202446036. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v46283221>
- Matsui, H., & Mochida, K. (2024). Functional data analysis-based yield modeling in year-round crop cultivation. *Horticulture Research*, 11(7), uhae144. <https://doi.org/10.1093/hr/uhae144>
- Mrkvicka, T., Myllymäki, M., Jilik, M., & Hahn, U. (2020). A one-way ANOVA test for functional data with graphical interpretation. *Kybernetika*, 56(3), 432–458. <https://doi.org/10.14736/kyb-2020-3-0432>

- Porali, F., Ghaderi-Far, F., Soltani, A., & Palevani, 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] <http://dx.doi.org/10.29252/yujs.5.2.1>
- Ramsay, J. O., & Silverman, B. W. (2005). Functional linear models for functional responses. In: *Functional Data Analysis*. Springer Series in Statistics. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/0-387-22751-2_16
- Romano, A., & Stevanato, P. (2020). Germination data analysis by time-to-event approaches. *Plants*, 9(5), 617. <https://doi.org/10.3390/plants9050617>
- Samieadel, S., Eshghizadeh, H. R., Zahedi, M., & Majidi, M. M. (2024). The interaction of planting date and irrigation regime effects on the yield and water use efficiency of Milk Thistle (*Silybum marianum*) ecotypes. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 55(1), 105–121. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2023.361558.655015>
- Smaga, Ł. (2020). A note on repeated measures analysis for functional data. *AStA Advances in Statistical Analysis*, 104(1), 117–139. <https://doi.org/10.1007/s10182-019-00352-6>
- Talská, R., Machalová, J., Smýkal, P., & Hron, K. (2020). A comparison of seed germination coefficients using functional regression. *Applications in Plant Sciences*, 8(8), e11366. <https://doi.org/10.1002/aps3.11366>
- Tjørve, K. M. C., & 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> -