

Research Article

Comparative analysis of seed germination in *Thymus daenensis* and *T. vulgaris* under water potential stress using hydrotime modelZahra Rezaei¹, Zeynab Roein², Atefeh Sabouri^{3,*}, Somayeh Hajinia⁴

Extended abstract

Introduction: Seed germination and seedling establishment are the most sensitive stages in the life cycle of a plant. Among the environmental factors, water potential is an important factor affecting the seed germination of various plants. This research aims to evaluate the effects of water potential on germination indices and quantify the effect of water potential the germination responses of *Thymus* medicinal plant seeds.

Materials and Methods: A factorial experiment was carried out in the form of a completely randomized design with four replications at the laboratories of the Department of Agronomy and Plant Breeding, Ilam University in the winter of 2023. The factors of the experiment included two types of *Thymus* (*Thymus daenensis* and *T. vulgaris*) and water potential stress induced by polyethylene glycol (PEG-6000) at six levels (0, -0.1, -0.3, -0.5, -0.7, and -0.9 MPa).

Results: The results showed as the water potential decreased to -0.1, -0.3, -0.5, and -0.7 MPa, seed germination percentage respectively went down by 8.43, 43.26, 61.80, and 88.76% in *T. daenensis* and 19.74, 44.08, 61.18 and 92.76% in *T. vulgaris* compared with water potential stress-free conditions. Also, *T. vulgaris* did not germinate at a water potential of -0.9 MPa, whereas some seeds of the *T. daenensis* plant germinated under this condition. The highest germination rate in both *T. daenensis* and *T. vulgaris* species was observed under stress-free conditions, and there was significant difference between the species. Four statistical distributions including normal, logistic, log-logistic, and Gumbel, were compared to quantify the germination response of *Thymus* to water potential. In order to evaluate the models, corrected Akaike information criterion (AICc), the coefficient of determination (R^2_{adj}), and root mean square error (RMSE) were used. The lowest AICc index values for *T. daenensis* were associated with the log-logistic and logistic distributions (-2012 and -2006), and the Gumbel distribution (-1665) in *T. vulgaris*, suggesting the superior distributions for quantifying *Thymus*'s response to water potential. Estimation of parameters related to the hydrotime model showed that *T. daenensis* species had a lower hydrotime constant value (θ_H) (23.91 MPa hour⁻¹) compared with *T. vulgaris* (28.06 MPa hour⁻¹), which indicated a higher germination rate in *T. daenensis*. The value of $\psi_{b(50)}$ in *T. daenensis* (-0.455 MPa) was lower than that of *T. vulgaris* (-0.388 MPa). Therefore, based on the results, *T. daenensis* showed a greater ability to tolerate drought during the germination stage.

Conclusions: In general, the results showed that the effects of water potential stress on the germination components of *T. vulgaris* were greater than those of *T. daenensis*, and according to the parameters of the hydrotime model, *T. daenensis* was more tolerant than *T. vulgaris*.

Keywords: Gumbel distribution, Hydrotime constant, Logistic distribution, Log-logistic distribution, Water potential

Highlights:

1. The best distribution in the hydrotime model was determined for predicting *Thymus daenensis* and *Thymus vulgaris* seed germination under water potential stress conditions.
2. The threshold level of water potential stress causing a significant decrease in the germination components of *Thymus daenensis* and *Thymus vulgaris* was determined.
3. Based on the hydrotime model, *Thymus* species was determined to be more tolerant to water potential stress during germination.

¹ Graduated M.Sc., Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran.

² Associate Professor, Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran.

³ Associate Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.

⁴ Visiting Teacher, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran.

*Corresponding author, E-mail: a.sabouri@guilan.ac.ir

Received: 22.4.2024; Revised: 19.6.2024;

Accepted: 22.6.2024; Online Published: 21.9.2024

DOI: [10.61186/yujs.11.1.145](https://doi.org/10.61186/yujs.11.1.145)



CrossMark

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/>).

مقاله پژوهشی

تحلیل مقایسه‌ای جوانه‌زنی بذر در آویشن دنايي (*Thymus daenensis*) و آویشن باغي (*Thymus vulgaris*) نسبت به تنش پتانسیل آبی با استفاده از مدل زمان‌رطوبتیزهرا رضائی^۱، زینب روئین^۲، عاطفه صبوری^۳، سمیه حاجی‌نیا^۴

چکیده مبسوط

مقدمه: جوانه‌زنی بذر و استقرار گیاهچه از حساس‌ترین مراحل در چرخه زندگی گیاه هستند. از بین عوامل محیطی، پتانسیل آبی یک عامل مهم تأثیرگذار در جوانه‌زنی بذر گیاهان مختلف است. این پژوهش به منظور ارزیابی اثرات پتانسیل آب بر شاخص‌های جوانه‌زنی و کمی‌سازی اثر پتانسیل آب بر پاسخ‌های جوانه‌زنی بذرهای گیاه دارویی آویشن انجام گرفت.

مواد و روش‌ها: آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با چهار تکرار در آزمایشگاه گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشگاه ایلام در زمستان سال ۱۴۰۱ اجرا شد. فاکتورهای آزمایش شامل دو گونه آویشن (آویشن دنايي و آویشن باغي) و سطوح تنش پتانسیل آبی حاصل از پلی‌اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ در شش سطح (صفر، -۰/۱، -۰/۳، -۰/۵، -۰/۷ و -۰/۹ مگاپاسکال) بودند. یافته‌ها: نتایج نشان داد با کاهش پتانسیل آب به -۰/۱، -۰/۳، -۰/۵ و -۰/۷ مگاپاسکال در مقایسه با عدم تنش پتانسیل آبی، جوانه‌زنی بذر در آویشن دنايي به ترتیب ۸/۴۳، ۴۳/۲۶، ۶۱/۸۰ و ۸۸/۷۶ درصد و در آویشن باغي به ترتیب ۱۹/۷۴، ۴۴/۰۸، ۶۱/۱۸ و ۹۲/۷۶ درصد کاهش یافت. همچنین آویشن باغي در پتانسیل آب -۰/۹ مگاپاسکال، قادر به جوانه‌زنی نبود، در صورتی که تعدادی از بذرهای آویشن دنايي توانستند در این پتانسیل جوانه بزنند. بیشترین سرعت جوانه‌زنی هر دو گونه آویشن دنايي و آویشن باغي تحت شرایط عدم تنش مشاهده شد که بین آن‌ها تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. چهار توزیع شامل نرمال، لجستیک، لوگ‌لجستیک و گامبل برای کمی‌سازی پاسخ جوانه‌زنی بذر آویشن نسبت به پتانسیل آب مورد مقایسه قرار گرفتند. به منظور ارزیابی مناسب‌ترین برازش از بین توزیع‌های همگرا شده، از شاخص‌های آکائیک تصحیح شده (AICc)، ضریب تبیین تعدیل شده (R^2_{adj}) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. پایین‌ترین مقدار شاخص AICc در گیاهان آویشن دنايي به ترتیب به توزیع‌های لوگ‌لجستیک و لجستیک (-۲۰۱۲ و -۲۰۰۶)، و در آویشن باغي به توزیع گامبل (-۱۶۶۵) اختصاص یافت که معرف مدل‌های برتر برای کمی کردن واکنش آن گونه به پتانسیل آب است. برآورد فراسنجه‌های توزیع‌های مدل زمان‌رطوبتی نشان داد، از لحاظ ثابت زمان‌رطوبتی (θ_H)، گونه آویشن دنايي (۲۳/۹۱ مگاپاسکال بر ساعت) در مقایسه با آویشن باغي (۲۸/۰۶ مگاپاسکال بر ساعت) مقدار ثابت زمان‌رطوبتی (θ_H) کمتری به خود اختصاص داد که بیانگر سرعت جوانه‌زنی بیشتر در آویشن دنايي بود. مقدار $\Psi_h(50)$ در آویشن دنايي (-۰/۴۵۵ مگاپاسکال) کمتر از مقدار آن در آویشن باغي (-۰/۳۸۸ مگاپاسکال) به دست آمد؛ لذا بر اساس نتایج، آویشن دنايي توانایی بیشتری برای تحمل به تنش پتانسیل آبی در مرحله جوانه‌زنی نشان داد.

نتیجه‌گیری: به طور کلی نتایج نشان داد، اثرات تنش پتانسیل آبی بر مؤلفه‌های جوانه‌زنی گونه آویشن باغي بیش از آویشن دنايي بود و بر اساس فراسنجه‌های مدل زمان‌رطوبتی، آویشن دنايي نسبت به آویشن باغي متحمل‌تر بود.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل آب، توزیع لجستیک، توزیع لوگ‌لجستیک، توزیع گامبل، ثابت زمان رطوبتی

جنبه‌های نوآوری:

- ۱- مناسب‌ترین توزیع در مدل زمان رطوبتی برای پیش‌بینی جوانه‌زنی بذر آویشن دنايي و باغي در شرایط تنش پتانسیل آبی تعیین شد.
- ۲- آستانه سطح تنش پتانسیل آبی ایجادکننده کاهش معنی‌دار در مؤلفه‌های جوانه‌زنی آویشن دنايي و باغي تعیین شد.
- ۳- بر اساس مدل زمان رطوبتی، گونه آویشن متحمل‌تر نسبت به تنش پتانسیل آبی در مرحله جوانه‌زنی تعیین شد.

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گیاهان دارویی، گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی،

دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.

^۲ دانشیار گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.^۳ دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت،

ایران.

^۴ مدرس مدعو گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام،

ایلام، ایران.

DOI: 10.61186/yujs.11.1.145



CrossMark

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

*رایانامه نویسنده مسئول: a.sabouri@guilan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲/۳؛ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۳/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۴/۲؛ تاریخ انتشار برخط: ۱۴۰۳/۴/۳۱

مقدمه

خشکی یکی از مهمترین و مخرب‌ترین تنش‌های غیرزنده مؤثر بر تولید گیاهان است (پیری^۹ و همکاران، ۲۰۱۸). طبق برآوردهای انجام شده حدود ۲۶ درصد از زمین‌های قابل کشت دنیا در مناطق خشک قرار دارند (فائو^{۱۰}، ۲۰۱۶).

در سطح گیاه، تغییرات در الگوهای آب و هوایی ممکن است تأثیرات قابل‌توجهی بر عملکردهای بوم‌شناسی مانند رفتار جوانه‌زنی داشته باشد (گرمر^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۰). کشاورزان و تولیدکنندگان بذر برای اطمینان از جوانه‌زنی سریع و یکنواخت و جوانه‌زنی گیاهچه‌ها به بذرهای با کیفیت نیاز دارند و هر عاملی که در این فرآیندها اختلال ایجاد کند در آینده باعث استقرار ضعیف توده و کاهش تراکم بوته می‌شود (تاتاری^{۱۲} و همکاران، ۲۰۲۰). جوانه‌زنی بذر و استقرار گیاهچه حساس‌ترین مراحل در چرخه زندگی گیاه هستند (حسینی‌مقدم^{۱۳} و همکاران، ۲۰۲۴). از بین عوامل محیطی، دما و پتانسیل آبی دو عامل مهم بر الگوهای جوانه‌زنی بذر در گیاهان مختلف هستند (شاه^{۱۴} و همکاران، ۲۰۲۱). از آنجایی که جوانه‌زنی تحت تأثیر عوامل محیطی بسیاری نظیر دما و رطوبت قرار می‌گیرد، در نظام‌های پیچیده تولید محصولات، پیش‌بینی مراحل توسعه از قبیل جوانه‌زنی و سبز شدن توسط مدل‌های شبیه‌سازی ضروری است (ترابی^{۱۵} و همکاران، ۲۰۱۶؛ سلطانی و سینکلر^{۱۶}، ۲۰۱۲).

کمی کردن رفتار جوانه‌زنی بذر در برابر شرایط محیطی متغیر می‌تواند به‌عنوان ابزار مفیدی برای مطالعه‌های بوم‌شناسی بذر استفاده شود (صابرعلی و علی‌اکبرخانی^{۱۷}، ۲۰۲۰). پتانسیل آب یک عامل مهم برای جوانه‌زنی موفق است. مدل زمان‌رطوبتی می‌تواند به کمی‌کردن پاسخ جوانه‌زنی بذر به پتانسیل آب کمک کند (صبوری^{۱۸} و همکاران، ۲۰۲۰؛ بلوچی^۱ و همکاران،

تنش شوری یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزنده است نعنایان^۱ یکی از بزرگ‌ترین خانواده‌های گیاهی هستند که در سراسر جهان و به‌ویژه نواحی مرطوب و مدیترانه‌ای تنوع زیستی بسیاری دارند. جنس آویشن^۲ دارای ۲۱۵ گونه گیاهی چند ساله، با بوته‌های کوچک معطر در سراسر جهان است. در ایران ۱۴ گونه از این جنس در فلور ایرانیکا ثبت شده است که رقم آویشن دنايي^۳ و آویشن باغی^۴ از جمله آن‌ها می‌باشند (قاسمی‌پیرلوپی^۵ و همکاران، ۲۰۱۵). آویشن باغی، گیاهی چند ساله، بوته‌ای، پوششی، نیمه‌همیشه سبز و بومی منطقه اروپا و مدیترانه بوده و از قدرت سازگاری محیطی گسترده‌ای برخوردار است (استال بیسکاپ و سائز^۶، ۲۰۰۲). آویشن دنايي گیاهی علفی و چند ساله که از ساقه‌های متعدد و پرپشت تشکیل شده و ارتفاع آن به ۳۰-۲۵ سانتی‌متر می‌رسد. سرشاخه گل‌دار جزء دارویی مورد استفاده است. شاخه گل‌دار و برگ‌دار گیاهان جمع شده در فصل تابستان دارای بوی معطر، طعم تند، تلخ و کافور مانند است که برای اهداف درمانی کاربرد دارد (کریمی^۷ و همکاران، ۲۰۱۰). تحمل شرایط سخت محیطی مانند کم‌آبی، خشکی، سرما و قابلیت تولید در زمین‌های کم‌بازده، نشان‌دهنده اهمیت تولید این گیاه به لحاظ بوم‌شناسی است. امکان گسترش تولید و صادرات در راستای اقتصاد مقاومتی، آویشن را در زمره یکی از با اهمیت‌ترین گیاهان دارویی قرار داده است (عباس‌زاده^۸ و همکاران، ۲۰۱۸).

با وجود پتانسیل بالای این گیاهان دارویی ارزشمند، هنوز فرآیند تجاری‌سازی آنها انجام نشده است. یکی از مهم‌ترین موانع توسعه کاشت گیاهان دارویی و عدم تمایل به کاشت آن، استقرار و غیریکنواختی آن‌ها در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور به‌ویژه در شرایط تنش‌های محیطی نظیر خشکی است. تنش

⁹ Piri

¹⁰ FAO

¹¹ Gremer

¹² Tatari

¹³ Hosseini-Moghaddam

¹⁴ Shah

¹⁵ Torabi

¹⁶ Soltani and Sinclair

¹⁷ Saberali and Shirmohamadi-Aliakbarkhani

¹⁸ Sabouri

¹ Lamiaceae

² *Thymus*

³ *T. daenensis*

⁴ *T. vulgaris* L.

⁵ Ghasemi Pirbalouti

⁶ Stahl-Biskup and Saez

⁷ Karimi

⁸ Abbas Zadeh

پتانسیل‌های آب کاهش‌یافته جلوگیری کرد. مقادیر کم $\Psi_{b(50)}$ با جوانه‌زنی سریع و بالا بودن (مثبت‌تر بودن) نشان می‌دهد که جوانه‌زنی در شرایط خشک انجام نمی‌شود. همچنین بر اساس نتایج بررسی آنها، جوانه‌زنی سریع پس از بارندگی توانست منجر به استقرار خوب زینان و استفاده از دوره‌های مرطوب کوتاه در محیط‌های خشک و نیمه خشک شود (فرح‌نیا^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۷). رومانو و براوی^{۱۲} (۲۰۲۱) توصیف کمی جوانه‌زنی دو ژن‌نمود^{۱۳} تره‌فرنگی^{۱۴} را در سطوح مختلف پتانسیل آب توسط فراسنجه‌های^{۱۵} مدل زمان‌رطوبتی به دست آمده از تجزیه پروبیت پیش‌بینی کردند. مدل زمان‌رطوبتی داده‌ها را با دقت کلی برای هر دو ژن‌نمود، با R^2 از ۰/۸۶ تا ۰/۹۳ برازش داد. همچنین آنها بیان کردند که مقدار فراسنجه $\Psi_{b(50)}$ در ژن‌نمود *Lungo della Riviera* کمتر از ژن‌نمود *Monstrueux de Carentan* است که نشان‌دهنده تحمل بهتر این ژن‌نمود نسبت به پتانسیل آبی می‌باشد. در مطالعه دیگری رفتار جوانه‌زنی گیاه دارویی منداب^{۱۶} در پاسخ به پتانسیل آب و نوسانات دما بررسی و نتایج نشان داد بیشینه مقدار ثابت زمان‌رطوبتی (θ_H) در دمای ۱۰ درجه سلسیوس به‌دست آمد. با استفاده از مدل زمان-رطوبتی، پتانسیل آب پایه در ۵۰ درصد جوانه‌زنی ($\Psi_{b(50)}$) به میزان ۰/۱۸- مگاپاسکال و مقدار پتانسیل آب پایه (Ψ_b) ۰/۱۳- مگاپاسکال برآورد شد. شاخص‌های جوانه‌زنی مانند درصد جوانه‌زنی نهایی، قدرت و سرعت جوانه‌زنی در بذرهایی که در دمای ۳۰ درجه سلسیوس با پتانسیل آب صفر رشد کرده بودند، بیشتر بود. در نتیجه کاهش پتانسیل آب در تمام دماها، باعث به تعویق افتادن جوانه‌زنی یا متوقف شدن آن شد (خان^{۱۷} و همکاران، ۲۰۲۲).

رفتار جوانه‌زنی بذر گیاه دارویی بادرنجبویه^{۱۸} در شش پتانسیل آب در محلول PEG (صفر، ۰/۲-، ۰/۴-،

۲۰۲۳). این مدل سرعت پیشروی جوانه‌زنی، یکنواختی جوانه‌زنی و میزان تحمل به شرایط تنش خشکی را کمی می‌سازد (عالی‌مقام و قادری‌فر^۱، ۲۰۱۴). با توجه به شاخص‌هایی که از مدل زمان‌رطوبتی به‌دست می‌آید، این مدل در برنامه‌های اصلاحی می‌تواند کمک زیادی به به‌نژادگران برای شناسایی بذرها با کارایی بالا و دارای تحمل به شرایط تنش داشته باشد (عالی‌مقام و قادری‌فر، ۲۰۱۴). به‌طور معمول، از توزیع نرمال برای نشان دادن تنوع نسبی پتانسیل آب پایه بذرهایی یک جمعیت معین استفاده می‌شود (درخشان^۳ و همکاران، ۲۰۱۴). در توزیع نرمال میانگین مشاهده‌ها متقارن است، به‌طوری‌که، میانگین این توزیع با میانه و مد آن برابر می‌باشد. این توزیع مدل مناسبی برای متغیرهایی که دارای چولگی زیادی نسبت به میانگین مشاهدات هستند، نیست (درخشان و مرادی‌تلاوت^۴، ۲۰۱۶). مسگران^۵ و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که در بسیاری از گیاهان، توزیع نرمال می‌تواند مناسب‌ترین تابع در مدل‌های زمان رطوبتی نباشد و سایر توابع ممکن است پیش‌بینی‌های دقیق‌تری نسبت به توزیع نرمال داشته باشند. آنها با مقایسه هشت تابع توزیع احتمال برای آفتاب‌پرست اروپایی^۶، علف‌قناری^۷ و جودره^۸ نشان دادند که، توزیع آنها دارای چولگی به راست بوده و توزیع لوگ‌لجستیک را به‌عنوان مناسب‌ترین تابع معرفی کردند.

در پژوهشی کمی‌سازی جوانه‌زنی بذر ۲۰ بوم‌گونه^۹ گیاه دارویی زینان^{۱۰} در رابطه با پتانسیل آب با استفاده از مدل زمان‌رطوبتی ارزیابی شد. نتایج خروجی مدل نشان داد که، مقادیر برآورده شده ثابت زمان‌رطوبتی (θ_H)، میانگین پتانسیل آب پایه ($\Psi_{b(50)}$) و یکنواختی جوانه‌زنی Ψ_b برای بوم‌گونه‌ها متفاوت بودند. مقادیر بالای $\Psi_{b(50)}$ و θ_H پایین با سرعت جوانه‌زنی سریع در شرایط مرطوب همراه است، اما از جوانه‌زنی در

¹ Balouchi

² Alimaghmand Ghaderi-Far

³ Derakhshan

⁴ Derakhshan and Moradi-Telavat

⁵ Mesgaran

⁶ *Heliotropium europaeum*

⁷ *Phalaris minor*

⁸ *Hordeum spontaneum*

⁹ Ecotype

¹⁰ *Trachyspermum ammi* L.

¹¹ Farahinia

¹² Romano and Bravi

¹³ Genotype

¹⁴ *Allium ampeloprasum* L.

¹⁵ Parameter

¹⁶ *Eruca vesicaria* L.

¹⁷ Khan

¹⁸ *Mellisa officinalis*

استفاده شد. مقدار پودر پلی اتیلن گلیکول مورد نیاز برای پتانسیل‌های آبی ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷، ۰/۹ و ۰/۱۰ مگاپاسکال به ترتیب ۰/۷۹، ۱۵۱/۴، ۲۰۲/۲، ۲۴۳/۴ و ۲۷۹/۳ گرم در لیتر مطابق روش میشل و کافمن^۱ (۱۹۷۳)، با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد.

رابطه ۱:

$$\phi_s = -C(1.18 \times 10^{-2}) - C^2(1.18 \times 10^{-4}) + CT \\ (2.67 \times 10^{-4}) + C^2T(8.39 \times 10^{-7})$$

در این رابطه ϕ_s : پتانسیل آبی (بار)؛ C: غلظت (گرم بر لیتر)؛ T: دما (درجه سلسیوس) است. برای اجرای این آزمایش از پتری‌های پلاستیکی با قطر هشت سانتی‌متر استفاده شد. بذره‌های آویشن با محلول هیپوکلریت سدیم دو درصد به مدت پنج دقیقه سترون شدند و سپس با آب مقطر شست‌وشو داده شدند تا اثرات هیپوکلریت سدیم از بین برود. ابتدا داخل هر پتری کاغذ صافی قرار داده شد و مطابق تیمارهای تنش پتانسیل آبی به آن پنج میلی‌لیتر از محلول پلی‌اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ اضافه شد. تعداد ۵۰ بذر سالم در هر پتری به عنوان یک واحد آزمایشی قرار داده شد و پتری‌ها به دستگاه انکوباتور با دمای ۲۵ درجه سلسیوس منتقل شدند (آل‌ابراهیم^۲ و همکاران، ۲۰۰۵). بازدید از پتری‌ها در صبح و عصر انجام می‌گرفت و تعداد بذره‌های جوانه زده در هر پتری به صورت روزانه شمارش می‌شد. بازه زمانی اجرای آزمایش ۱۴ روز بود (شمارش بذرها تا زمان تثبیت تعداد بذره‌های جوانه زده به مدت دو روز ادامه یافت) و معیار فرآیند جوانه‌زنی خروج حداقل دو میلی‌متر طول ریشه‌چه بود (ویلنبرگ^۳ و همکاران، ۲۰۰۵).

شاخص بنیه گیاهچه با استفاده از رابطه ۲ به دست آمد (عبدالباکی و اندرسون^۴، ۱۹۷۳).

$$VI = \frac{Ls \times Gp}{100} \quad \text{رابطه ۲:}$$

در این رابطه VI شاخص بنیه گیاهچه Ls و GP به ترتیب متوسط طول گیاهچه (طول ریشه‌چه و طول ساقه‌چه) و درصد جوانه‌زنی هستند.

۰/۶، ۰/۸ و ۱- مگاپاسکال) با استفاده از مدل زمان رطوبتی و پنج تابع توزیع نرمال، گامبل، ویبول، لجستیک و لوگ‌لجستیک بررسی شد. نتایج نشان داد که، توزیع لجستیک مناسب‌ترین برازش با بالاترین R^2 تصحیح شده است. ثابت زمان رطوبتی (θH) ۴۹/۸ مگاپاسکال ساعت برآورد شد. بر اساس نتایج مدل‌سازی زمان رطوبتی می‌تواند به پیش‌بینی جوانه‌زنی و ظهور بذر بادرنجیویه در خاک در شرایط تنش پتانسیل آبی کمک کند (صبوری و همکاران، ۲۰۲۰).

با توجه به اینکه در سال‌های اخیر مصرف گیاهان دارویی در سطح جهان افزایش یافته است، سطح زیر کشت این گیاهان نیز در حال افزایش است. تکمیل و گردآوری اطلاعات رفتارهای اکوفیزیولوژیکی این گیاهان یک ضرورت است، در حالی که اطلاعات اولیه به‌ویژه نیازهای بوم‌شناسی گیاهان دارویی به‌خوبی مورد مطالعه قرار نگرفته است و همچنین در تحقیقاتی که فراسنجه محور هستند، مانند تحقیقات مدل‌سازی محصول، کمبود این اطلاعات وجود دارد. این مطالعه به‌منظور بررسی واکنش جوانه‌زنی بذر دو گونه مختلف آویشن، به‌عنوان گیاهان مهم دارویی، معطر، واجد پاداکسیدان و سازگار با اقلیم ایران در واکنش به پتانسیل آب با استفاده از مدل زمان رطوبتی طراحی شد.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی و طرح آزمایشی

به‌منظور ارزیابی پاسخ جوانه‌زنی بذر آویشن به تنش پتانسیل آبی با غلظت‌های مختلف پلی‌اتیلن گلیکول آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با چهار تکرار در آزمایشگاه گروه زراعت و اصلاح‌نباتات دانشگاه ایلام در زمستان سال ۱۴۰۱ طراحی و اجرا گردید. فاکتورهای آزمایش شامل دو گونه آویشن (آویشن دناپی و آویشن باغی) و سطوح تنش پتانسیل آبی در شش سطح شامل صفر، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹- مگاپاسکال بودند.

بذر گونه‌های آویشن از پاکان بذر اصفهان تهیه گردید. در این پژوهش از پودر کریستاله پلی‌اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ (شرکت مرک آلمان) برای تهیه محلول‌های آبی با سطوح پتانسیل آبی مختلف مورد نظر

¹ Michel and Kaufman

² Alebrahim

³ Willenborg

⁴ Abdul-Baki and Anderson

رابطه ۶: $\Psi_{b(g)} = \Psi_{b(50)} + \text{probit}(g) \sigma_{\Psi b}$

رابطه ۷: $\Psi_{b(g)} = \Psi - \left(\frac{\theta_H}{t_g}\right)$

رابطه ۸: $\text{Probit}(g) = \frac{\left\{ \Psi - \left(\frac{\theta_H}{t_g}\right) \right\} - \Psi_{b(50)}}{\sigma_{\Psi b}}$

در این معادله $\text{Probit}(g)$ تابع پروبیت^۲ برای داده‌های درصد جوانه‌زنی تجمعی، φ معرف پتانسیل آب پایه بر حسب مگاپاسکال، θ_H ثابت زمان رطوبتی بر حسب مگاپاسکال ساعت، t_g زمان لازم برای جوانه‌زنی g درصد از بذرها بر حسب ساعت، $\Psi_{b(50)}$ پتانسیل پایه برای ۵۰ درصد جوانه‌زنی بر حسب مگاپاسکال، $\sigma_{\varphi b}$ انحراف معیار توزیع پتانسیل پایه برای درصدهای مختلف جوانه‌زنی در جمعیت بذرها بر حسب مگاپاسکال می‌باشد که این ضریب بیانگر یکنواختی جوانه‌زنی می‌باشد (گومرسون، ۱۹۸۶).

علاوه بر توزیع نرمال، از چهار توزیع دیگر شامل لجستیک، لوگ لجستیک، گامبل و ویبول برای توصیف سرعت جوانه‌زنی روی داده‌ها استفاده شد. با توجه به اینکه توزیع ویبول در هیچکدام از گونه‌ها همگرا نشد از تشریح رابطه آن صرف‌نظر می‌شود.

توزیع لجستیک^۳ جهت پیش‌بینی درصد جوانه‌زنی (g) در مدل زمان رطوبتی بر اساس رابطه ۹ محاسبه گردید (مسگران و همکاران، ۲۰۱۳).

$$g = \frac{1}{1 + \exp\left(-\left(\frac{\left(\Psi - \left(\frac{\theta_H}{t_g}\right) - \mu\right)}{\sigma}\right)\right)} \quad \text{رابطه ۹:}$$

توزیع لوگ لجستیک^۴ توزیع احتمال یک متغیر تصادفی است که لگاریتم آن دارای توزیع لجستیک است و این توزیع دارای چولگی به راست بوده است. مدل زمان رطوبتی برای این توزیع به صورت رابطه ۱۰ است (مسگران و همکاران، ۲۰۱۳).

پس از پایان فرآیند جوانه‌زنی برای بررسی شاخص‌های رشد گیاهچه‌ها از هر پتری ۱۰ گیاهچه به صورت تصادفی انتخاب شدند. طول ریشه‌چه و طول ساقه‌چه با استفاده از خط‌کش بر حسب سانتی‌متر تعیین گردید. وزن خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه نیز با استفاده از ترازوی با دقت ۰/۰۰۰۱ اندازه‌گیری شد. ابتدا نمونه‌ها در آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک و سپس اقدام به اندازه‌گیری وزن خشک نمونه‌ها شد.

معرفی مدل‌های زمان رطوبتی

برای کمی‌سازی پاسخ درصد جوانه‌زنی نسبت به پتانسیل‌های مختلف آبی از مدل زمان رطوبتی (رابطه ۳) استفاده شد (گومرسون^۱، ۱۹۸۶).

رابطه ۳: $\theta_H = [\Psi - \Psi_{b(50)}] t_g$

θ_H : ثابت زمان رطوبتی (مگاپاسکال در ساعت) مورد نیاز جهت درصد مشخصی از جوانه‌زنی؛ φ : پتانسیل واقعی (مگاپاسکال) که جوانه‌زنی بذر در آن رخ می‌دهد، φ_b معرف پتانسیل آب پایه که در آن جوانه‌زنی به مقدار صفر درصد کاهش یافته است و t_g زمان (ساعت) لازم برای جوانه‌زنی g درصد از بذرها می‌باشد. در نهایت جهت محاسبه پتانسیل پایه مطابق رابطه ۴ برآورد شد.

رابطه ۴: $\Psi_{b(g)} = \Psi - \left(\frac{\theta_H}{t_g}\right)$

پژوهش‌های مختلف گزارش داده‌اند که سرعت جوانه‌زنی (GRg) مطابق رابطه ۵ با عکس زمان برای خروج ریشه‌چه کسر خاصی از بذور (t_g)، به مقدار اختلاف میان پتانسیل واقعی بذر (Ψ) و پتانسیل پایه برای خروج ریشه صدک g ($\Psi_{b(g)}$) و ثابت زمان رطوبتی (θ_H) بستگی دارد (گومرسون، ۱۹۸۶).

رابطه ۵: $GRg = \frac{1}{t_g} = \frac{[\Psi - \Psi_{b(g)}]}{\theta_H}$

مطابق این پژوهش‌ها، مشاهده شد که متغیر پتانسیل آب پایه ($\Psi_{b(g)}$) در یک محموله بذری می‌تواند از توزیع نرمال پیروی کند که دارای انحراف معیار $\sigma_{\Psi b}$ و میانگین ($\Psi_{b(50)}$) است. بر اساس روابط ۶ الی ۸ جهت برآورد فراسنجه‌ها در مدل زمان رطوبتی با توزیع نرمال و رابطه پروبیت استفاده شد (گومرسون، ۱۹۸۶).

² Probit probability distribution

³ Logistic probability distribution

⁴ Loglogistic probability distribution

¹ Gummerson

$$R_{Adj}^2 = 1 - \frac{SS_{residuals}}{SS_{total\ corrected}} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

که در این معادله k و n به ترتیب تعداد مشاهدات و تعداد فراسنجه‌های مدل است. $SS_{total\ corrected}$ و $SS_{residuals}$ به ترتیب مجموع مربعات کل تصحیح شده و مجموع مربعات خطا هستند. R_{Adj}^2 معیاری از توانایی پیش‌بینی مدل را است که هر چه به یک نزدیک‌تر باشد معرف برازش بهتر مدل نسبت به داده‌ها است. $RMSE$ میانگین مربعات ریشه خطا^۲ است. شاخصی که اختلاف نسبی بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده را نشان می‌دهد و توصیفی از قابلیت پیش‌بینی مدل است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه ۱۵}$$

در این معادله X_i : درصد جوانه‌زنی تجمعی مشاهده شده، y_i : درصد جوانه‌زنی تجمعی مورد انتظار (پیش‌بینی شده) و n تعداد مشاهدات است. هر چه مقدار $RMSE$ کمتر باشد نشان‌دهنده آن است که مدل برازش مناسب‌تری داشته است.

شاخص آکائیک تصحیح شده AIC_c طبق رابطه ۱۶ استفاده شد (برنهام و اندرسون، ۲۰۰۲).

$$AIC_c = n \cdot \ln \left(\frac{SS_{residuals}}{n} \right) + 2k + \frac{2k(k+1)}{n-k-1} \quad \text{رابطه ۱۶}$$

$$\Delta_i = AIC_c - \min AIC_c \quad \text{رابطه ۱۷}$$

در رابطه ۱۶، K تعداد فراسنجه‌های توزیع، n تعداد مشاهدات و $SS_{residuals}$ مجموع مربعات خطا می‌باشد. در مقایسه بین توزیع‌ها هر کدام که مقدار AIC_c کمتر یا منفی‌تری داشته باشند به‌عنوان توزیع برتر معرفی می‌شود و طبق رابطه ۱۷، توزیعی که Δ_i پایین‌تر از ۱۰ داشته باشد نشان می‌دهد که با برترین توزیع (با حداقل AIC_c) اختلاف غیرمعنی‌داری دارد و به همراه آن، جزء مناسب‌ترین توزیع‌ها است (برنهام و اندرسون، ۲۰۰۲).

شایان ذکر است قبل از انجام تجزیه‌های آماری، ابتدا داده‌های آزمایش از نظر فرضیات تجزیه واریانس از جمله نرمال بودن خطاهای آزمایشی با استفاده از

$$g = \frac{1}{1 + \left(\frac{\left(\psi - \left(\frac{\theta_H}{tg} \right) - \mu \right)}{\sigma} \right)^{-\lambda}} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

در این معادلات، μ و σ به ترتیب بیانگر مقیاس منحنی و مکان است.

مدل زمان‌رطوبتی مبتنی بر توزیع گامبل^۱ برای پیش‌بینی درصد جوانه‌زنی (g) به‌صورت رابطه ۱۱ ارائه شده است (مسگران و همکاران، ۲۰۱۳).

$$g = \exp \left[- \exp \left(- \left(\frac{\left(\psi - \left(\frac{\theta_H}{tg} \right) - \mu \right)}{\sigma} \right) \right) \right]$$

در توزیع نرمال فراسنجه مکان (μ) که مساوی میانه و مد است، برابر با $\phi b(50)$ می‌باشد. در توزیع لجستیک همانند توزیع نرمال، متقارن می‌باشد و μ مساوی $\phi b(50)$ می‌باشد. اما در توزیع لوگ لجستیک، گامبل که متقارن نیستند جهت برآورد $\phi b(50)$ و $\phi b(g)$ از روابط ۱۲ و ۱۳ استفاده شد (مسگران و همکاران، ۲۰۱۳؛ صبوری و همکاران، ۲۰۲۰).

رابطه ۱۲:

$$\psi_b(g) = \mu + \sigma \cdot (g/(1-g))^{(1/\lambda)} \rightarrow$$

$$\psi_b(50) = \mu + \sigma \cdot (1)^{\frac{1}{\lambda}} = \mu + \sigma$$

رابطه ۱۳:

$$\psi_b(g) = \mu - \sigma \cdot [\ln(\ln(1/g))] \rightarrow$$

$$\psi_b(50) = \mu - \sigma [\ln(\ln(2))]$$

در نهایت برای ارزیابی توزیع‌ها، و تعیین مناسب‌ترین توزیع از ضریب تعیین تعدیل شده R_{Adj}^2 (رابطه ۱۴)، ریشه میانگین مربعات خطا $RSME$ (رابطه ۱۵) و شاخص آکائیک تصحیح شده AIC_c (رابطه ۱۶) استفاده شد.

^۲ Root Mean Square Error

^۳ Burnham and Anderson

^۱ Gumbel probability distribution

مطابق انتظار، تنش پتانسیل آبی باعث کاهش درصد جوانه‌زنی بذر آویشن شد. بیشترین درصد جوانه‌زنی بذر (۸۹ درصد) در گونه آویشن دنیایی تحت شرایط عدم تنش پتانسیل آبی به‌دست آمد. آویشن باغی در پتانسیل آب ۰/۹- مگاپاسکال قادر به جوانه‌زنی نبود، در صورتی‌که تعدادی از بذرهای آویشن دنیایی در این پتانسیل توانستند جوانه بزنند. با کاهش پتانسیل آب به ۰/۱-، ۰/۳-، ۰/۵- و ۰/۷- مگاپاسکال در مقایسه با شاهد (عدم تنش پتانسیل آبی)، درصد جوانه‌زنی بذر در آویشن دنیایی به‌ترتیب ۸/۴۳، ۴۳/۲۶، ۶۱/۸۰ و ۸۸/۷۶ درصد و در آویشن باغی به‌ترتیب ۱۹/۷۴، ۴۴/۰۸، ۶۱/۱۸ و ۹۲/۷۶ درصد کاهش یافت (شکل ۱).

نرم‌افزار SAS Var 9.4 بررسی شدند. تجزیه واریانس و سپس مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد با استفاده از نرم‌افزار SAS Var 9.4 انجام شد. از برنامه غیرخطی Proc nlin در نرم‌افزار SAS برای برازش توزیع‌های زمان‌رطوبتی استفاده شد

نتایج و بحث

درصد جوانه‌زنی بذر

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثرات تنش پتانسیل آبی، گونه و اثرات متقابل آن‌ها (تنش پتانسیل آبی × گونه) بر درصد جوانه‌زنی بذر آویشن در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱).

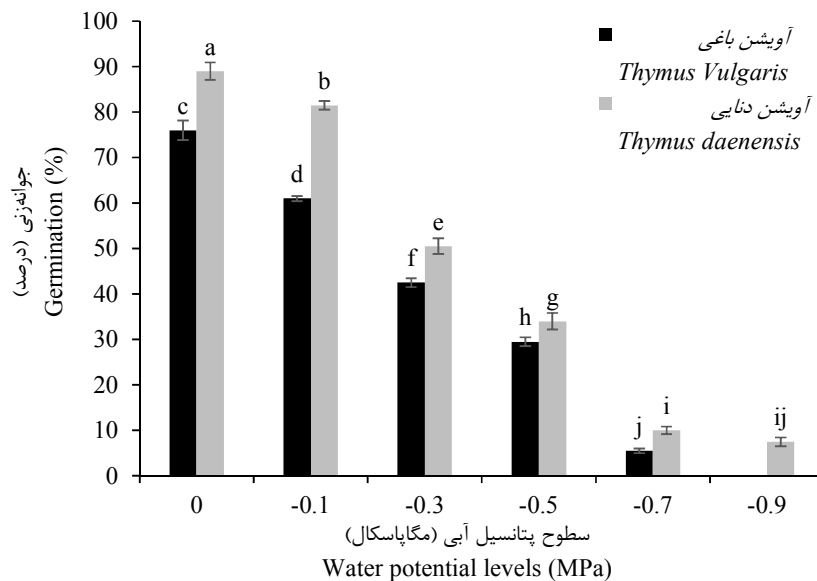
جدول ۱. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر تنش پتانسیل آبی بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر در دو گونه آویشن

Table 1. Analysis of variance (mean square) for effect of water potential stress on seed germination indices in two *Thymus* species

منابع تغییرات Source of variation	df	درجه آزادی Germination percentage	درصد جوانه‌زنی Vigor index	شاخص بنیه Plumule length	طول ساقچه Radicle length	طول ریشه‌چه Plumule dry weight	وزن خشک ساقچه Radicle dry weight
تنش پتانسیل آبی Water potential stress (WS)	5	8392.33**	55.896**	23.071**	8.227**	0.0001533**	0.0000172**
گونه Species (S)	1	1121.33**	10.754**	10.453**	2.566**	0.0000217**	0.0000099**
تنش پتانسیل آبی × گونه (WS) × (S)	5	75.73**	0.961**	0.523 ^{ns}	0.151 ^{ns}	0.0000013 ^{ns}	0.0000039**
خطای آزمایش Error	36	6.50	0.178	0.234	0.147	0.0000008	0.00000052
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)	-	6.28	15.66	15.87	21.52	12.39	24.29

** : معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

** : Significant at 1% probability level



شکل ۱. اثر تنش پتانسیل آبی بر درصد جوانه‌زنی بذر دو گونه آویشن

Figure 1. Effect of water potential stress on seed germination percentage of two *Thymus* species

پتانسیل آبی بالا، ممکن است موجب مهار سازوکارهایی شود که باعث خروج ریشه از پوشش بذر می‌گردد و سرانجام موجب تأخیر در جوانه‌زنی بذر گردد (چاناوی^۴ و همکاران، ۲۰۱۹). به‌طور کلی یکی از دلایل اصلی کاهش جوانه‌زنی در تنش پتانسیل آبی برآورده نشدن رطوبت مورد نیاز بذر و جذب کمتر آب می‌باشد. از سوی دیگر، آنزیم‌های ضروری و مواد اندوخته شده برای جنین در حال رشد، جوانه‌زنی بذر را مهار می‌کند. مقدار آب، یکی از عوامل محیطی تعیین‌کننده برای کاشت بذر محسوب می‌شود که نقش مهمی در مهار درصد و سرعت جوانه‌زنی بذر دارد. علاوه بر این، اندامک‌های موجود در سلول‌های بذر برای عملکرد مناسب خود نیازمند به آب هستند. در نتیجه، خشکی به‌عنوان مهمترین عامل تعیین‌کننده در استقرار موفق یا غیرموفق گیاه است (صالحی‌سلمی^۵، ۲۰۲۲).

اوهزیزی^۶ و همکاران (۲۰۲۳) بیان کردند که کاربرد محلول پلی اتیلن گلیکول در سطوح مختلف باعث کاهش شاخص‌های جوانه‌زنی دو جمعیت آویشن^۷ شد. به‌طوری‌که مهار جوانه‌زنی برای جمعیت‌های

جوانه‌زنی بذر یک فرآیند فیزیولوژیکی پیچیده در نمو گیاهان است که با برانگیختن آبخاری از واکنش‌های زیستی و بیوشیمیایی رشد یک گیاهچه را شروع می‌کند (پودل^۱ و همکاران، ۲۰۱۹). با افزایش تنش پتانسیل آبی میزان درصد جوانه‌زنی بذرها کاهش یافت. کاهش فرآیند جوانه‌زنی در اثر تنش پتانسیل آبی می‌تواند به کاهش جذب آب توسط بذرها مرتبط باشد. استفاده از محلول پلی اتیلن گلیکول جهت اعمال تنش پتانسیل آبی یا خشکی فیزیولوژیکی، به‌دلیل ویسکوزیته بالای محلول می‌تواند به‌عنوان یک مانع برای تبادل گازها (محدودیت اکسیژن) عمل کند و همانند کمبود آب منجر به کاهش جوانه‌زنی شود (پیچند^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). تنش پتانسیل آبی با تأثیر بر فرآیندهای هیدرولیز ذخیره بذر، شروع فعالیت آنزیم‌ها و کاهش رشد جنین منجر به جوانه‌زنی ضعیف می‌شود (سلیمان^۳ و همکاران، ۲۰۲۲). در چنین شرایطی می‌توان کاهش رشد را به اختلالات متابولیکی مثل هیدرولیز تدریجی ترکیبات ذخیره شده در آندوسپرم یا لپه و همچنین انتقال آهسته‌تر مواد هیدرولیز شده ترکیبات ذخیره در آندوسپرم نسبت داد. علاوه بر این فقدان هیدراتاسیون بذر به‌دلیل تنش

⁴ Channaoui

⁵ Salehi Salmi

⁶ Ouahzizi

⁷ *Thymus atlanticus*

¹ Poudel

² Pichand

³ Suliman

جدول ۲. مقایسه میانگین اثرات تنش پتانسیل آبی بر شاخص بنیه و وزن خشک ریشه‌چه بذر دو گونه آویشن
Table 2. Effects of water potential stress on vigor index and radicle dry weight of two *Thymus* species

گونه	سطوح پتانسیل آبی (مگاپاسکال)	شاخص بنیه	وزن خشک ریشه‌چه (گرم)
Species	Water potential levels (MPa)	Vigor index	Radicle dry weight (g)
<i>Thymus vulgaris</i>	0.0	5.58 ^c	0.0042 ^a
	-0.1	4.35 ^d	0.0043 ^a
	-0.3	2.41 ^f	0.0037 ^a
	-0.5	0.91 ^h	0.0019 ^{bc}
	-0.7	0.09 ⁱ	0.0009 ^{cd}
	-0.9	0.00 ⁱ	0.0000 ^d
<i>Thymus daenensis</i>	0.0	7.00 ^a	0.0043 ^a
	-0.1	6.30 ^b	0.0043 ^a
	-0.3	3.58 ^e	0.0039 ^a
	-0.5	1.61 ^g	0.0025 ^b
	-0.7	0.36 ^{hi}	0.0046 ^a
	-0.9	0.17 ⁱ	0.0010 ^{cd}

در هر ستون حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون مقایسه میانگین حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

In each column, the common letters have no significant difference based on the least significant difference (LSD) mean comparison test at the 5% probability level.

کاهش شاخص بنیه گیاهچه هر دو گونه آویشن دناپی و آویشن باغی شد. در پتانسیل آب -0.3 مگاپاسکال شاخص بنیه گیاهچه آویشن دناپی $48/87$ درصد و شاخص بنیه گیاهچه آویشن باغی $56/73$ درصد در مقایسه با عدم تنش پتانسیل آبی کاهش یافتند. تحت شرایط تنش پتانسیل آبی پتانسیل‌های آب (-0.5 ، -0.7 و -0.9 مگاپاسکال) بین دو آویشن باغی و آویشن دناپی از نظر شاخص بنیه گیاهچه تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۲).

شاخص بنیه علاوه بر تعیین درصد بذرهای زنده، توانایی بذر را برای تولید گیاهچه‌های معمولی در شرایط تنش ارزیابی می‌کند. این یک فراسنجه مهم است که باید برای رسیدن به آگاهی در مورد عملکرد بذر در شرایط مزرعه مورد ارزیابی قرارگیرد (پتال و همکاران، ۲۰۲۳). از طرفی تنش خشکی از طریق تنفس سلولی بر روند تولید مولکول آدنوزین تری فسفات یا ATP (منبع انرژی) و نیز فرایند پاسخ‌های سنتز نشاسته تأثیر می‌گذارد و منجر به کاهش درصد و سرعت جوانه‌زنی می‌شود که در نهایت موجب کاهش شاخص بنیه گیاهچه می‌گردد (کی‌روش^۴ و همکاران، ۲۰۱۹). مطابق با یافته‌های این پژوهش، اوهزیزی و همکاران

Saghro و Tizi n¹Telghemt به ترتیب در -0.6 و -0.9 مگاپاسکال ثبت شد و نشان می‌دهد جمعیت Saghro قادر به تحمل بیشتر در مقابله با تنش خشکی بود. یافته‌های سنه‌کوری^۱ و همکاران (۲۰۲۱) نشان داد که افزایش تنش پتانسیل آبی (منفی‌تر) در هر دما باعث کاهش درصد جوانه‌زنی و میانگین سرعت جوانه‌زنی بذر کاملینا در مقایسه با شاهد می‌شود. همچنین جوانه‌زنی بذر سورگوم^۲ و شنبلیله در شرایط تنش خشکی به ترتیب به میزان ۳۸ و ۲۵ درصد کاهش پیدا کردند. این کاهش را می‌توان به تنش پتانسیل آبی نسبت داد که موجب کاهش جذب آب، اختلال متابولیک در فعالیت‌های آنزیمی و همچنین عدم تعادل هورمونی می‌شود (پتال^۳ و همکاران، ۲۰۲۳).

شاخص بنیه گیاهچه

شاخص بنیه گیاهچه تحت تأثیر گونه، تنش پتانسیل آبی و اثرات متقابل آنها در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۱). بیشترین شاخص بنیه گیاهچه (۷) در آویشن دناپی تحت شرایط عدم تنش پتانسیل آبی مشاهده شد. تنش پتانسیل آبی باعث

¹ Sanehkooi

² *Sorghum bicolor*

³ Patel

⁴ Queiroz

طول ساقه‌چه

پتانسیل آب ۰/۱ - مگاپاسکال بر طول ساقه‌چه آویشن تأثیر معنی‌داری نداشت؛ اما پتانسیل آب ۰/۵ - مگاپاسکال طول ساقه‌چه آویشن در مقایسه با عدم تنش پتانسیل آبی ۴۹/۵۰ درصد کاهش داد (جدول ۳). طول ساقه‌چه آویشن دنیایی در مقایسه با آویشن باغی ۳۶/۱۳ درصد بیشتر بود (جدول ۳). از نشانه‌های اولیه جوانه‌زنی بازیابی فعالیت‌های حیاتی مانند رونویسی، ترجمه و ترمیم DNA و به‌دنبال آن افزایش طولی و تقسیم سلولی است (شاه و همکاران، ۲۰۱۹). وجود تنش خشکی تأثیر منفی بر فرایندهای جوانه‌زنی، کارایی فتوسنتز، جذب مواد معدنی و طویل شدن ساقه در گیاه دارد (بتول^۴ و همکاران، ۲۰۲۲). کاهش جذب آب توسط بذر در شرایط تنش پتانسیل آبی ممکن است موجب کاهش یا عدم انتقال مواد غذایی از بافت‌های ذخیره‌ای بذر به جنین شود و در نتیجه طول ساقه‌چه کاهش پیدا کند (حسینی^۵ و همکاران، ۲۰۲۰).

به‌طورکلی با منفی‌تر شدن پتانسیل آبی و افزایش شدت تنش از میزان طول ساقه‌چه هر دو گیاه در تمام سطوح تنش پتانسیل آبی کاسته شد. هم‌راستا با نتایج این پژوهش، گورزی^۶ و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که با افزایش تنش خشکی حاصل از محلول پلی اتیلن گلیکول، جوانه‌زنی بذر از صفر به ۰/۹ - مگاپاسکال، طول ساقه‌چه به طور معنی‌داری در گیاهچه استویا^۷ کاهش پیدا کرد. در بررسی دیگری، تنش خشکی باعث کاهش طول ریشه‌چه و ساقه‌چه در گیاهچه‌های شنبلیله و سورگوم شد. طول ریشه‌چه برای سورگوم و شنبلیله به‌ترتیب به ۹۲ و ۷۳ درصد تحت تنش خشکی در مقایسه با گیاهچه‌های بدون تنش کاهش یافت. همچنین طول ساقه‌چه برای این دو گیاه به‌ترتیب در شرایط تنش خشکی القایی ۹۳ و ۵۳ درصد کاهش یافت. کاهش طول ساقه‌چه در شرایط تنش خشکی ممکن است به‌دلیل ممانعت از فرآیندهایی مانند تقسیم سلولی، بزرگ شدن و تمایز مرتبط با کمبود آب باشد (پتال و همکاران، ۲۰۲۳).

(۲۰۲۳) دریافتند که افزایش غلظت محلول پلی اتیلن گلیکول منجر به کاهش معنی‌دار شاخص بنیه گیاهچه دو جمعیت آویشن شد.

تنش‌های زیست‌محیطی مانند خشکی به گیاهان در هنگام جوانه‌زنی آسیب می‌رساند همچنین به عملکرد کمی و کیفی آنها صدمه وارد می‌کند و باعث ضعف و ناهمگنی در رشد گیاه می‌شود. کمبود آب نه تنها بر جوانه‌زنی بذر تأثیر می‌گذارد، بلکه میانگین زمان جوانه‌زنی را نیز افزایش می‌دهد (شاه رجیبان^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). در پتانسیل‌های آبی پایین‌تر، جوانه‌زنی سریع‌تر یک راهبرد برای استقرار گیاهچه در نظر گرفته شده که می‌تواند رقابت را در سال‌هایی که میزان بارندگی کمتر از حد متوسط یا دارای بارش نامنظم است، کاهش دهد (یوسفی^۲ و همکاران، ۲۰۲۰).

همسو با یافته‌های این پژوهش، اوهریزی و همکاران (۲۰۲۳) دریافتند که افزایش غلظت محلول پلی اتیلن گلیکول منجر به افزایش معنی‌دار میانگین زمان جوانه‌زنی دو جمعیت آویشن شده است. در نتایج به‌دست آمده از پژوهش موسوی^۳ و همکاران (۲۰۲۱) تنش خشکی تأثیر منفی بر درصد جوانه‌زنی و شاخص‌های رشدی سه رقم گلرنگ داشت. همچنین با کاهش پتانسیل آب میانگین زمان جوانه‌زنی رقم فرمان نسبت به دو رقم پدیده و اصفهان افزایش بیشتری نشان داد. میانگین زمان جوانه‌زنی شاخصی از سرعت جوانه‌زنی است و پایین بودن آن نشان‌دهنده جوانه‌زنی سریع‌تر بذر است.

شاخص‌های رشدی آویشن

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثرات تنش پتانسیل آبی و گونه بر طول ساقه‌چه، طول ریشه‌چه، وزن خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه آویشن در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌داری داشت. همچنین اثرات متقابل تنش پتانسیل آبی × گونه بر وزن خشک ریشه‌چه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱).

⁴ Batool

⁵ Hosseini

⁶ Gorzi

⁷ *Stevia rebaudiana*

¹ Shahrajabian

² Yousefi

³ Mosavi

جدول ۳. اثرات تنش پتانسیل آبی و گونه بر شاخص‌های رشد آویشن

Table 3. Effects of water potential stress and species on *Thymus* plant growth indices

وزن خشک ساقه‌چه (گرم)	طول ریشه‌چه (سانتی‌متر)	طول ساقه‌چه (سانتی‌متر)	سطوح پتانسیل آبی (مگاپاسکال)
Plumule dry weight (g)	Radicle length (cm)	Plumule length (cm)	Water potential levels (MPa)
0.0122 ^a	2.77 ^a	4.84 ^a	0
0.0109 ^b	2.80 ^a	4.64 ^a	-0.1
0.0093 ^c	2.35 ^b	4.03 ^b	-0.3
0.0058 ^d	1.437 ^c	2.46 ^c	-0.5
0.0030 ^e	1.01 ^d	1.58 ^d	-0.7
0.0014 ^f	0.334 ^e	0.76 ^e	-0.9
گونه			
Species (S)			
0.0064375 ^b	1.554 ^b	2.58 ^b	آویشن باغی
<i>Thymus vulgaris</i>			
0.0077833 ^a	2.017 ^a	3.52 ^a	آویشن دناپی
<i>Thymus daenensis</i>			

در هر ستون حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون مقایسه میانگین حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد هستند. In each column, the common letters have no significant difference based on the least significant difference (LSD) mean comparison test at the 5% probability level.

طول ریشه‌چه

پتانسیل آب ۰/۱ - مگاپاسکال بر طول ریشه‌چه آویشن تأثیری نداشت به طوری که با تیمار عدم تنش پتانسیل آبی در یک گروه آماری قرار داشتند؛ اما تحت پتانسیل آب ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷، ۰/۹ و ۰/۹ مگاپاسکال طول ریشه‌چه آویشن به ترتیب ۱۵/۳۱، ۴۸/۲۰، ۵۱/۸۰ و ۸۷/۸۴ درصد کاهش یافت (جدول ۳). طول ریشه‌چه آویشن دناپی در مقایسه با طول ریشه‌چه آویشن باغی ۲۹/۷۵ درصد بیشتر بود (جدول ۳).

کاهش طول ریشه تحت تنش خشکی می‌تواند به دلیل کاهش جذب آب و تأخیر در جابه‌جایی کربوهیدرات‌ها باشد (سلیمان^۱ و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین کمبود شدید آب منجر به مهار روند تقسیم سلولی، ازدیاد طولی و گسترش سلولی می‌شود و در نتیجه باعث کاهش ارتفاع گیاه، کاهش گسترش ساقه و تکثیر ریشه می‌شود (مارتندان^۲ و همکاران، ۲۰۲۰).

وزن خشک ساقه‌چه و ریشه‌چه

در آویشن باغی پتانسیل‌های آب ۰/۱ - و ۰/۳ - مگاپاسکال بر وزن خشک ریشه‌چه آویشن تأثیر معنی‌دار نداشت به طوری که با تیمار عدم تنش پتانسیل آبی در یک گروه آماری قرار داشتند؛ اما تحت پتانسیل آب ۰/۵ - مگاپاسکال، وزن خشک ریشه‌چه آویشن ۴۷/۴۹

درصد کاهش یافت. در آویشن دناپی پتانسیل آب ۰/۹ - مگاپاسکال باعث کاهش وزن خشک ریشه‌چه شد (جدول ۲). بیشترین وزن خشک (۰/۱۲ گرم در بوته) ساقه‌چه آویشن در تیمار شاهد (عدم تنش پتانسیل آبی) به دست آمد. پتانسیل آب ۰/۵ - مگاپاسکال کمترین مقدار وزن خشک ساقه‌چه آویشن را به خود اختصاص داد (جدول ۳). وزن خشک ساقه‌چه آویشن دناپی در مقایسه با آویشن باغی به ترتیب ۱۰/۹۶ و ۹/۸۹ درصد بیشتر بود (جدول ۳).

کاهش وزن خشک ریشه‌چه یکی از رخدادهای متداول است که در بیشتر گیاهان در شرایط تنش خشکی رخ می‌دهد. احتمالاً یکی از علل کاهش وزن ریشه‌چه در پتانسیل‌های آب کمتر، تحرک کم مواد غذایی و انتقال کمتر آن‌ها از لپه به محور جنینی است. از طرفی عامل‌هایی که سرعت رشد محور جنینی را تحت تأثیر قرار می‌دهند، می‌توانند بر تحرک مواد غذایی و انتقال آن‌ها از لپه‌ها به محور جنینی تأثیر بگذارند (سبک‌دست^۳ و همکاران، ۲۰۱۸).

در گیاه *Tanacetum cineraiifolium* بیشینه وزن تر و خشک ریشه‌چه به ترتیب ۵۹/۱۶ و ۳/۳۸ میلی‌گرم برای تیمار شاهد ثبت شد و حداقل مقدار برای وزن خشک و تر ریشه با کاربرد محلول پلی اتیلن

¹ Seleiman

² Marthandan

³ Sabokdast

پس از برازش پنج توزیع آماری مختلف نرمال، لجستیک، لوگ‌لجستیک، گامبل و ویبول روی داده‌های جوانه‌زنی آویشن دناپی، چهار توزیع از پنج توزیع برای گونه آویشن دناپی و سه توزیع گامبل، لجستیک و نرمال (پروبیبت) برای گونه آویشن باغی همگرا شدند. توزیع ویبول در هیچ کدام از گونه‌ها همگرا نشد. اطلاعات و فراسنجه‌های برآورد شده بر اساس این توزیع‌ها، در جدول ۴ ارائه شده است.

مقایسه توزیع‌های مختلف در تجزیه مدل‌سازی زمان‌رطوبتی به محققین این امکان را می‌دهد که بهترین توزیعی که پاسخ جوانه‌زنی را تحت پتانسیل‌های آب متفاوت از لحاظ ریاضی توصیف می‌کند، شناسایی کنند. در مطالعات پایه‌ای نیز بر اهمیت انتخاب توزیع-های آماری مناسب برای توصیف زمان جوانه‌زنی در شرایط مختلف تاکید شده است (بردفورد^۵، ۲۰۰۲؛ الیس^۶ و همکاران، ۱۹۸۶). هر چقدر تعیین مناسب‌ترین توزیع دقیق‌تر انجام شود، برآورد فراسنجه‌های مدل زمان رطوبتی بر پایه آن توزیع، دقیق‌تر خواهد بود. در مطالعه حاضر، شناسایی مناسب‌ترین برازش با استفاده از چهار توزیع مذکور از شاخص‌های آکائیک تصحیح شده (AICc)، ضریب تبیین تعدیل شده (R^2_{adj}) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) به‌عنوان شاخص‌های رگرسیون غیرخطی استفاده شد. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، پایین‌ترین مقدار شاخص AICc در آویشن دناپی برای توزیع لوگ‌لجستیک (۲۰۱۲/۱۷-) و پس از آن برای توزیع لجستیک (۲۰۰۶/۶۶-) به‌دست آمد. بالاترین مقادیر (R^2_{adj} / ۰/۹۷۶) و کمترین مقادیر (RMSE / ۰/۰۵) نیز به این دو توزیع اختصاص یافت. بر اساس شاخص Δi پیشنهاد شده توسط برنهام و اندرسون (۲۰۰۲)، با توجه به اینکه Δi (تفاوت بین AICc توزیع لجستیک و توزیع دارای حداقل AICc یعنی توزیع لوگ‌لجستیک به‌عنوان مناسب‌ترین توزیع) کمتر از ۱۰ می‌باشد (برنهام و اندرسون، ۲۰۰۲)، بنابراین این دو توزیع با اختلاف غیرمعنی‌دار از هم به‌عنوان برترین توزیع در توجیه روند جوانه‌زنی در طی زمان تحت تیمار

گلیکول در سطح ۱- بار به‌دست آمد، ضمن اینکه بین شاهد و تیمار ۱- بار تفاوت معنی‌داری وجود داشت (شاه رجبیان و همکاران، ۲۰۲۰).

رشد گیاهان در درجه اول از طریق فرآیندهای تقسیم سلولی، بزرگ شدن و تمایز انجام می‌شود. تنش خشکی فرایند میتوز و افزایش طول سلول را مختل می‌کند و در نهایت منجر به کاهش رشد و استقرار ضعیف گیاهیچه می‌شود (فهد^۱ و همکاران، ۲۰۱۷). تنش خشکی موجب کاهش فعالیت هیستون کیناز و تقسیم سلولی شده و در نتیجه انتقال چرخه سلولی را محدود می‌کند که این امر موجب کاهش قابل‌توجه تولید سلول‌های جدید می‌شود (کی^۲ و همکاران، ۲۰۲۳). هنگامی که گیاهان کمبود آب داشته باشند، میزان استفاده از آب و رشد کاهش یافته، برگ‌ها پژمرده شده در نتیجه وزن تر و خشک کاهش می‌یابد. علاوه بر این، تنش خشکی منجر به ایجاد تغییراتی در ساختار غشا و نفوذپذیری می‌شود. تغییرات ساختاری فرآیندهای متابولیک را مختل می‌کند، فتوسنتز را مهار کرده، تنفس را کند می‌کند، پروتئین‌ها را تجزیه می‌کند، تجمع پرولین را افزایش می‌دهد، متابولیسم اسید نوکلئیک را مختل می‌کند و مسیرهای متابولیسم هورمون را تغییر می‌دهد، که در نهایت منجر به کاهش بازده می‌شود (لی^۳ و همکاران، ۲۰۲۰). هم راستا با نتایج این پژوهش، کاهش اولیه در زیست‌توده گیاهی به‌دلیل خشکی ناشی از محلول پلی اتیلن گلیکول در بسیاری از گیاهان از جمله انیسون^۴ (حسینی و همکاران، ۲۰۲۰) گزارش شده است.

مدل زمان رطوبتی (زمان - رطوبتی)

برازش مدل زمان‌رطوبتی با استفاده از پنج توزیع ریاضی نرمال، لجستیک، لوگ‌لجستیک، گامبل و ویبول روی داده‌های جوانه‌زنی بذر هر دو گونه گیاه دارویی آویشن دناپی، آویشن باغی انجام شد. نتایج برازش توزیع‌های همگرا برای هر گیاه به‌طور مجزا در جدول ۴ ارائه شده است.

¹ Fahad

² Qi

³ Li

⁴ *Pimpinella anisum*

⁵ Bradford

⁶ Ellis

جدول ۴- فراسنجه‌های برآورد شده مدل زمان‌رطوبتی جوانه‌زنی بذر با استفاده از توزیع‌های مختلف در دو گونه آویشن

Table 4. Estimated parameters of the hydrotime model for seed germination using different distributions in two *Thymus* species

گیاه	توزیع	ثابت زمان رطوبتی (مگاپاسکال بر ساعت): $\theta_H \pm SE$ (MPa h)	پتانسیل پایه برای ۵۰ درصد جوانه‌زنی (مگاپاسکال) $\psi_{b(50)} \pm SE$ (MPa)	انحراف معیار توزیع پتانسیل پایه (مگاپاسکال) $\sigma_{\psi b} \pm SE$ (MPa)	معیار شکل $\lambda \pm SE$	ضریب تبیین مربعیات خطا RMSE	تعیین شده توزیع R^2 adj	شاخص آکائیک تصحیح شده AICc
آویشن دنیایی <i>Thymus daenensis</i>	گامبل Gumbel	24.94±0.653	-0.479±0.006	0.243±0.004	-	0.051	0.975	-1995.35
	لوگ لجستیک Log logistic	23.91±0.648	-0.455±0.124	0.142±0.003	13.89±4.643	0.050	0.976	-2012.17
	لجستیک Logistic	23.47±0.651	-0.444±0.006	0.159±0.003	-	0.050	0.976	-2006.66
	پروبیٹ Probit	24.60±1.094	-0.457±0.008	0.278±0.004	-	0.228	0.951	-1355.55
آویشن باغی <i>Thymus vulgaris</i>	گامبل Gumbel	28.06±0.885	-0.388±0.007	0.321±0.006	-	0.051	0.963	-1665.02
	لوگ لجستیک Log logistic	25.99±1.040	-0.354±0.008	0.199±0.004	-	0.057	0.954	-1646.43
	لجستیک Logistic	22.14±1.339	-0.332±0.010	0.309±0.006	-	0.215	0.931	-1290.86

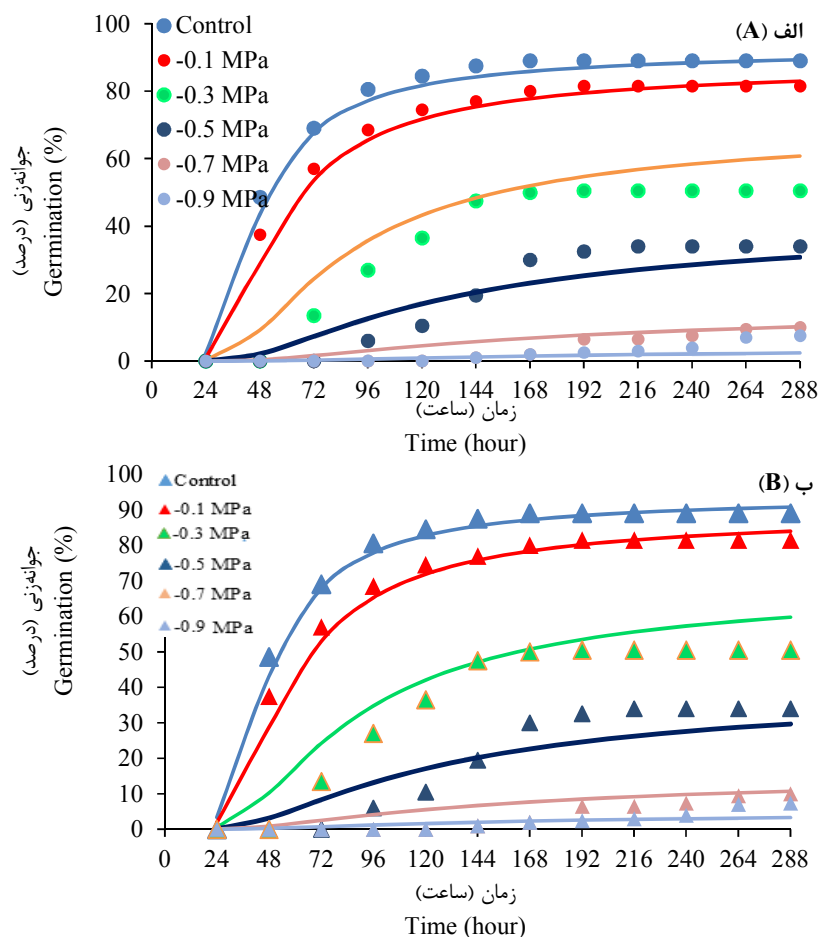
SE: خطای استاندارد

سرعت جوانه‌زنی است و بین گونه‌ها و ارقام مختلف متفاوت است (کاردوسو و بیانکونی^۱، ۲۰۱۳). فراسنجه بعدی $\sigma_{\psi b}$ یعنی انحراف معیار توزیع پتانسیل پایه است. در مدل زمان‌رطوبتی این فراسنجه بیانگر میزان یکنواختی جوانه‌زنی بذر را در جمعیت است و هر چقدر مقدار عددی آن کوچک‌تر باشد بیانگر یکنواختی بیشتر جوانه‌زنی است (عالی‌مقام و قادری‌فر، ۲۰۱۴). در این آزمایش $\sigma_{\psi b}$ بر اساس توزیع لوگ‌لجستیک و لجستیک به ترتیب برابر با ۰/۱۴۲ و ۰/۱۵۹ مگاپاسکال برآورد شد که نشان می‌دهد بذرها یکنواختی در آویشن دنیایی در این آزمایش از یکنواختی مناسبی در جوانه‌زنی برخوردار بودند (جدول ۴). در مطالعه‌ای از پنج توزیع (نرمال، ویبول، گامبل، لجستیک و لوگ‌لجستیک) در مدل زمان حرارتی در ماه‌های مختلف برای داده‌های جوانه‌زنی ۱۵ گونه شبدر استفاده شد.

تنش پتانسیل آبی، تعیین می‌شوند. بالا بودن R^2 adj برای توزیع‌های تعیین شده نشان‌دهنده قدرت بالای این توزیع‌ها در برآورد مقادیر فراسنجه‌ها و پیش‌بینی درصد جوانه‌زنی است (جدول ۴). بر اساس نتایج توزیع لوگ‌لجستیک و لجستیک (به‌عنوان برترین توزیع‌ها برای آویشن دنیایی)، فراسنجه $\psi_{b(50)}$ به ترتیب ۰/۴۴۴- و ۰/۴۵۵- مگاپاسکال برآورد شده است. مقدار این فراسنجه نشان‌دهنده سطحی از پتانسیل است که در مقادیر کمتر از این پتانسیل، درصد جوانه‌زنی بذر کمتر از ۵۰ درصد خواهد بود؛ بعبارت دیگر هر چقدر مقدار $\psi_{b(50)}$ برای گیاهی مقدار منفی‌تری باشد، بیانگر توانایی بیشتر بذرها آن گیاه برای تحمل تنش خشکی در مرحله جوانه‌زنی است (جدول ۴).

ثابت زمان رطوبتی (θ_H) به‌عنوان فراسنجه دیگری است که از مدل زمان‌رطوبتی قابل برآورد است، برای آویشن دنیایی بر اساس توزیع لوگ‌لجستیک و لجستیک به ترتیب ۲۳/۹۱ و ۲۳/۴۷ مگاپاسکال بر ساعت به‌دست آمد. این ضریب شاخصی از سرعت جوانه‌زنی در سطوح خشکی است (جدول ۴). یعنی هر چقدر مقدار عددی ثابت زمان رطوبتی کوچک‌تر باشد، بیانگر بیشتر بودن

¹ Cardoso and Bianconi



شکل ۲. جوانه‌زنی تجمعی بذرهای آویشن دناپی در دامنه‌ای از پتانسیل‌های آب بر اساس توزیع لوگ لجستیک (الف) و لجستیک (ب) داده‌های مشاهده شده با علائم نشان داده شدند و خطوط به‌وسیله مدل زمان‌رطوبتی بر اساس توزیع لوگ‌لجستیک (الف) و لجستیک (ب) پیش‌بینی شده است.

Figure 2. Cumulative germination of *Thymus daenensis* seeds in a range of water potentials based on log-logistic (A) and logistic (B) distributions.

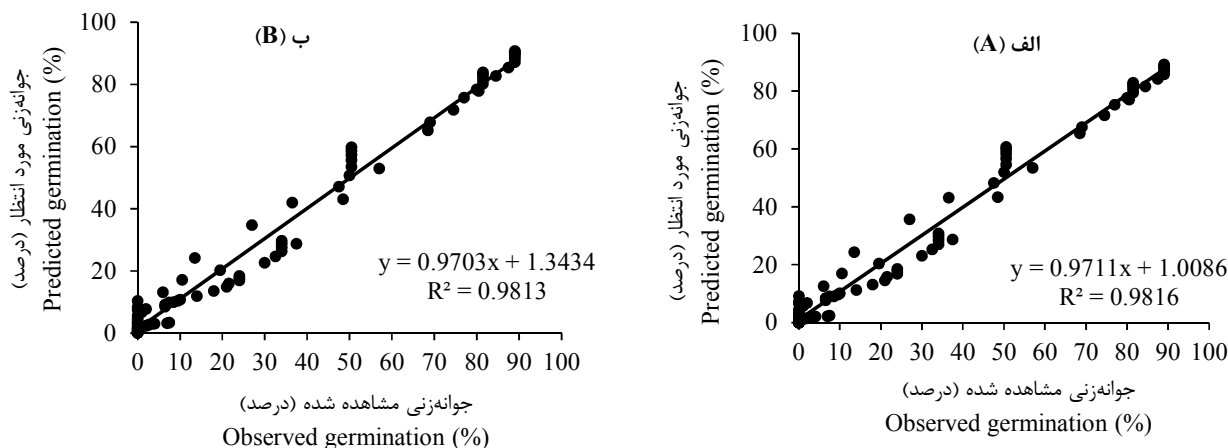
The observed data are shown with symbols, and the lines are predicted by the hydrotime model based on log-logistic (a) and logistic (b) distributions.

نمودار رگرسیون یک به یک بین درصد جوانه‌زنی مشاهده شده در مقابل درصد جوانه‌زنی پیش‌بینی شده بر اساس مدل زمان‌رطوبتی با توزیع لوگ‌لجستیک و لجستیک در شکل ۳ الف و ب نشان داده شده است. بر اساس رگرسیون یک به یک، ضریب تبیین بیش از ۰/۹۸ به‌دست آمد که بیانگر قدرت بالای مدل برازش‌شده در پیش‌بینی و برآورد فراسنجه‌ها است.

نتایج نشان داد که توزیع لوگ‌لجستیک مناسب‌ترین برازش را برای روند جوانه‌زنی همه گونه‌های آزمایش شده به جز *Trifolium repens* و *Elymus nutans* ارائه می‌کند (چن^۱ و همکاران، ۲۰۲۱).

نمودار جوانه‌زنی تجمعی بذرهای آویشن دناپی در دامنه‌ای از پتانسیل‌های آب بر اساس داده‌های مشاهده شده و داده‌های پیش‌بینی شده بر اساس توزیع لوگ‌لجستیک و لجستیک در شکل‌های ۲ الف و ب ارائه شده است.

¹ Chen



شکل ۳. رگرسیون ۱:۱ بین درصد جوانه‌زنی مشاهده شده در مقابل درصد جوانه‌زنی مورد انتظار بر اساس مدل زمان‌رطوبتی با توزیع لوگ لجستیک (الف) و توزیع لجستیک (ب) در آویشن دناایی

Figure 3. The 1:1 regression between observed versus predicted germination percentage based on the hydrotime model with log-logistic distribution (A) and logistic distribution (B) in *Thymus daenensis*

مقایسه آویشن دناایی و باغی از لحاظ فراسنجه های زمان‌رطوبتی

در مقایسه مقادیر $\Psi_{b(50)}$ ، برای آویشن دناایی و باغی، با توجه به اینکه مقدار آن در آویشن دناایی (-۰/۴۵۵) کمتر از مقدار آن در آویشن باغی (-۰/۳۸۸) به دست آمد لذا می‌توان نتیجه گرفت، آویشن دناایی توانایی بیشتری را برای تحمل به خشکی در مرحله جوانه‌زنی نشان می‌دهد. از لحاظ ثابت زمان‌رطوبتی (θ_H) نیز با توجه به مقدار عددی کوچک‌تر این شاخص در آویشن دناایی (۲۳/۹۱ مگاپاسکال بر ساعت) نسبت به باغی (۲۸/۰۶ مگاپاسکال بر ساعت)، نشان‌دهنده این است که آویشن دناایی واجد سرعت جوانه‌زنی بیشتری است (جدول ۴).

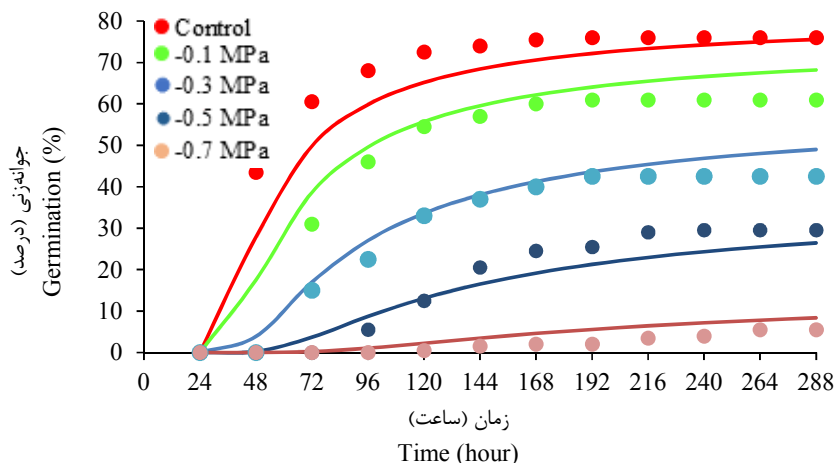
بسیاری از محققین فراسنجه $\Psi_{b(50)}$ را به عنوان معیاری برای انتخاب رقم برای تحمل به خشکی با پتانسیل آب پایه پایین پیشنهاد کردند. موسوی و همکاران (۲۰۲۱) تفاوت قابل‌توجهی را بین $\Psi_{b(50)}$ ارقام مختلف گلرنگ در نوسانات دما مشاهده کردند. در دمای ۲۰ درجه سلیسیوس رقم فرمان نسبت به رقم پدیده و اصفهان دارای، $\Psi_{b(50)}$ منفی‌تر برابر $-۱/۹۰۸$ مگاپاسکال بود.

برای داده‌های جوانه‌زنی بذرهای آویشن باغی با توجه به خروجی مدل‌های زمان‌رطوبتی سه توزیع نرمال، گامبل و لجستیک همگرا و برازش قابل قبولی را نشان دادند. اطلاعات و فراسنجه‌های برآورد شده بر اساس این توزیع‌ها، در جدول ۴ بیان شده است. مطابق نتایج، توزیع گامبل بین توزیع‌های همگرا از لحاظ شاخص‌های ارزیابی برترین بود، به طوری که بالاترین R^2_{adj} ، $0/۹۶۳$ ، کمترین RMSE، $0/۰۵۱$ و منفی‌ترین شاخص $AICc$ $-۱۶۶۵/۰۲$ مربوط به این توزیع بود. از آنجایی که Δi این توزیع با توزیع‌های لجستیک و نرمال بیش از ۱۰ است (برنهام و اندرسون، ۲۰۰۲)، اختلاف معنی‌داری وجود داشت. بنابراین توزیع گامبل را می‌توان توزیع برتر نسبت به توزیع‌های نرمال و لجستیک در نظر گرفت.

بر اساس نتایج توزیع گامبل به‌عنوان مناسب‌ترین توزیع، مقدار فراسنجه‌های θ_H ، $\Psi_{b(50)}$ و $\sigma_{\Psi b}$ به ترتیب معادل $۲۸/۰۶$ ، $-۰/۳۸۸$ و $۰/۳۲۱$ برآورد شد (جدول ۴).

نمودار جوانه‌زنی تجمعی و رگرسیون خطی یک به یک بذور آویشن باغی بر اساس توزیع گامبل در شکل ۴ و ۵ ارائه شده است. مطابق انتظار بالاترین ضریب تبیین تعدیل شده (۰/۹۷) به توزیع گامبل اختصاص دارد.

بر اساس رگرسیون یک به یک (شکل ۵)، ضریب تبیین بیش از ۰/۹۷ نشان‌دهنده قدرت بالای توزیع گامبل در پیش‌بینی و برآورد فراسنجه‌ها است.

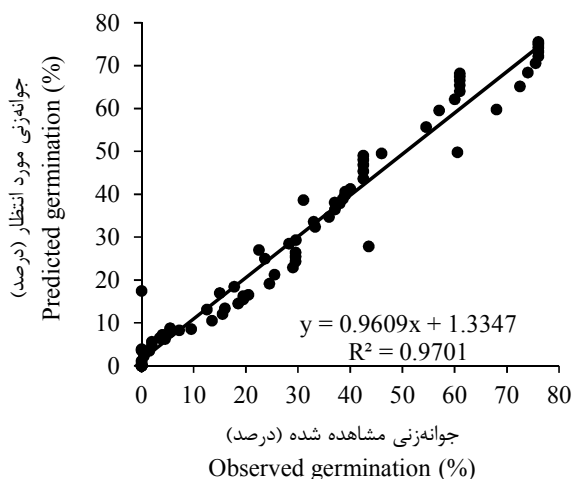


شکل ۴. جوانه‌زنی تجمعی بذرهای آویشن باغی در دامنه‌ای از پتانسیل‌های آب بر اساس توزیع گامبل

داده‌های مشاهده شده با علائم نشان داده شدند و خطوط به‌وسیله مدل زمان‌رطوبتی بر اساس توزیع گامبل پیش‌بینی شده است.

Figure 4. Cumulative germination of *Thymus vulgaris* seeds in a range of water potentials based on Gumbel distributions.

The observed data were shown with symbols, and the lines were predicted by the hydrotime model based on Gumbel distributions.



شکل ۵. رگرسیون ۱:۱ بین درصد جوانه‌زنی مشاهده شده در مقابل درصد جوانه‌زنی مورد انتظار بر اساس مدل زمان‌رطوبتی با توزیع گامبل در آویشن باغی

Figure 5. The 1:1 regression between observed versus predicted germination percentage based on the hydrotime model with Gumbel in *Thymus vulgaris*

در نظر گرفتن شرایط مختلف محیطی، دو ژن‌نمود Hayola 401 و لاین ۲۸۵ متحمل‌تر از سایر ژن‌نمودها ظاهر شدند. همچنین در پژوهش کافارو^۲ و همکاران (۲۰۲۳)، از مدل زمان‌رطوبتی برای شناسایی متحمل‌ترین ژن‌نمود کرچک^۳ استفاده کردند. آنها بر اساس نتایج تجزیه مدل زمان‌رطوبتی دو ژن‌نمود C1019 و C857 را با کمترین مقدار $\psi/b(50)$ (بترتیب ۱/۳۹- و

این محققان تنوع ژنتیکی در جوانه‌زنی بذر ارقام یک گونه را به‌عنوان ابزاری ارزشمند برای بررسی سازوکارهای تحمل به خشکی پیشنهاد کردند. سلطانی^۱ و همکاران (۲۰۱۷)، بر اساس فراسنجه‌های برآورد شده از مدل زمان‌رطوبتی، ژن‌نمودهای متحمل‌تر کلزا در مرحله جوانه‌زنی نسبت به تنش‌های غیرزیستی را شناسایی کردند. بر اساس نتایج مطالعه آنها، با

² Cafaro

³ Castor

¹ Soltani

در آزمایش حاضر، چهار توزیع ریاضی مختلف نرمال، لجستیک، لوگ‌لجستیک و گامبل روی داده‌های جوانه‌زنی آویشن دناپی و سه توزیع نرمال، لجستیک، و گامبل برای آویشن باغی همگرا شدند و برازش قابل قبولی را نشان دادند. مناسب‌ترین توزیع در آویشن دناپی توزیع لوگ‌لجستیک به همراه توزیع لجستیک و در آویشن باغی توزیع گامبل بودند. بر اساس نتایج و بر مبنای شاخص $W_b(50)$ آویشن دناپی نسبت به آویشن باغی توانایی بیشتری برای تحمل به تنش پتانسیل آبی در مرحله جوانه‌زنی دارد.

۱/۲۳- مگاپاسکال) به عنوان متحمل‌ترین ژن‌نمود های کرچک مورد مطالعه معرفی کردند. پژوهش آنها توانایی مدل زمان‌رطوبتی برای شناسایی ژن‌نمود های متحمل را تأیید نمود.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج نشان داد تنش پتانسیل آبی باعث کاهش درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه، وزن خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه هر دو گونه آویشن شد. گونه آویشن دناپی تا پتانسیل آب ۰/۹- مگاپاسکال قادر به جوانه‌زنی بود؛ در صورتی که بذرهای آویشن باغی در این پتانسیل قادر به جوانه‌زنی نبودند.

منابع

- Abbas Zadeh, B., Sefidkon, F., Sharifi Ashoor Abadi, E., Mirza, M., Naderi, M., Layegh Haghghi, M. and Naderi, B. 2018. Economical production of *Thymus daenensis* L. with proper nutrition. *Iran Nature*, 3(3): 22-31. [In Persian]. <https://doi.org/10.22092/irn.2018.116780>
- Abdul-Baki, A.A. and Anderson, J.D. 1973. Vigour determination of soybean seed by multiple criteria. *Crop Science*, 13(6): 630-633. <https://doi.org/10.2135/cropsci1973.0011183X001300060013x>
- Alebrahim, M. T., Sabaghnia, N., Ebadi, A. and Moheboldini, M. 2005. Study of drought and salinity stress on germination of common thyme (*Thymus vulgaris*). *Journal of Research in Agricultural Science*, 1: 13-19.
- Alimagham, S.M. and Ghaderi-Far, F. 2014. Hydrotim model: introduction and application of this model in seed researches. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 7(1): 41-52. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/escs.2014.154>
- Balouchi, H., Soltani Khankahdani, V., Moradi, A., Gholamhoseini, M., Piri, R., Heydari, S.Z. and Dedicova, B. 2023. Seed fatty acid changes germination response to temperature and water potentials in six sesame (*Sesamum indicum* L.) cultivars: Estimating the cardinal temperatures. *Agriculture*, 13(10): 1-17. <https://doi.org/10.3390/agriculture13101936>
- Batool, M., El-Badri, A.M., Hassan, M.U., Haiyun, Y., Chunyun, W., Zhenkun, Y. and Zhou, G. 2022. Drought stress in Brassica napus: effects, tolerance mechanisms, and management strategies. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(345): 1-25. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00344-021-10542-9>
- Bradford, K. J. 2002. Applications of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. *Weed Science*, 50(2): 248-260. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2002\)050\[0248:AOHTTQ\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2002)050[0248:AOHTTQ]2.0.CO;2)
- Burnham, K.P. and Anderson, D.R. 2002. Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach. Springer Verlag. New York, USA. 488p.
- Cafaro, V.; Alexopoulou, E.; Cosentino, S.L.; Patanè, C. 2023. Assessment of germination response to salinity stress in castor through the hydrotim model. *Agronomy*, 13: 2783. <https://doi.org/10.3390/agronomy13112783>
- Cardoso, V.J.M. and Bianconi, A. 2013. Hydrotim model can describe the response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seeds to temperature and reduced water potential. *Acta*

- Scientiarum. Biological Sciences, 35(2): 255-261. <http://dx.doi.org/10.4025/actasciobiolsci.v35i2.15393>
- Channaoui, S., El Idrissi, I.S., Mazouz, H. and Nabloussi, A. 2019. Reaction of some rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes to different drought stress levels during germination and seedling growth stages. *Oilseeds & Fats Crops and Lipids*, 26: 23. <https://doi.org/10.1051/ocl/2019020>
- Chen, D., Chen, X., Wang, J., Zhang, Z., Wang, Y., Jia, C. and Hu, X. 2021. Estimation of thermal time model parameters for seed germination in 15 species: the importance of distribution function. *Seed Science Research*, 31(2): 83-98. <http://dx.doi.org/10.1017/S0960258521000040>
- Derakhshan A., Akbari H. and Gherekhloo J. 2014. Hydrotime modeling of *Phalaris minor*, *Amaranthus retroflexus* and *A. blitoides* seed germination. *Iranian Journal of Seed Sciences and Research*, 1(1): 82-95. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.24763780.1393.1.1.6.6>
- Derakhshan, A. and Moradi-Telavat, M. R. 2016. Hydrotime analysis of yellow Sweetclover (*Melilotus officinalis* (L.) Lam.), wild Mustard (*Sinapis arvensis* L.) and Barley (*Hordeum vulgare* L.) seed germination. *Journal of Iranian Plant Protection Research*, 30(3): 518-532. <https://doi.org/10.22067/jpp.v30i3.48232>
- Ellis, R. H., Covell, S., Roberts, E. H., and Summerfield, R. J. 1986. The influence of temperature on seed germination rate in grain legumes: II. Intraspecific variation in chickpea (*Cicer arietinum* L.) at constant temperatures. *Journal of Experimental Botany*, 37(10): 1503-1515. <https://doi.org/10.1093/jxb/37.10.1503>
- Fahad, S., Bajwa, A.A., Nazir, U., Anjum, S.A., Farooq, A., Zohaib, A., Sadia, S., Nasim, W., Adkins, S., Saud, S., Ihsan, M., Alharby, H., Wu, C., Wang, D. and Huang, J. 2017. Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options. *Frontiers in plant science*, 1147. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147>
- FAO. 2016. (Food and Agricultural Organization). <http://faostat.Fao.Org>.
- Farahinia, P., Sadat-Noori, S.A., Mortazavian, M.M., Soltani, E. and Foghi, B. 2017. Hydrotime model analysis of *Trachyspermum ammi* (L.) Sprague seed germination. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 5: 88-91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jarmap.2017.04.004>
- Ghasemi Pirbalouti, A., Emami Bistghani, Z. and Malekpoor, F. 2015. An overview on genus *Thymus*. *Journal of Medicinal Herbs*, 6(2): 93-100.
- Gorzi, A., Omidi, H. and Bostani, A. 2020. Effect of stevia (*Stevia rebaudiana*) seed priming treatments with salicylic acid, iron, and zinc on some germination traits and photosynthetic pigments under drought stress. *Iranian Journal of Seed Research*, 6(2): 125-135. [In Persian]. <http://dx.doi.org/10.29252/yujs.6.2.125>
- Gremer, J.R., Chiono, A., Suglia, E., Bontrager, M., Okafor, L. and Schmitt, J. 2020. Variation in the seasonal germination niche across an elevational gradient: the role of germination cueing in current and future climates. *American Journal of Botany*, 107(2): 350-363. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1425>
- Gummerson, R.J. 1986. The effect of constant temperatures and osmotic potentials on the germination of sugar beet. *Journal of Experimental Botany*, 37(6): 729-741. <https://doi.org/10.1093/jxb/37.6.729>
- Hosseini, A., Salehi, Moradi, A. and Balouchi H. 2020. The effects of bio priming on some germination indices of *Pimpinella anisum* L., Faridan accession under drought stresses. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 9(1): 1-13. [In Persian]. <https://doi.org/10.22034/jjst.2020.114533.1109>
- Hosseini-Moghaddam, M., Moradi, A., Piri, R., Glick, B.R., Fazeli-Nasab, B. and Sayyed, R.Z. 2024. Seed coating with minerals and plant growth-promoting bacteria enhances drought tolerance in fennel (*Foeniculum vulgare* L.). *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 58: 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103202>

- Karimi, A., Ghasemi Pirbalouti, A., Malekpoor, F., Yousefi, M. and Golparvar, A. R. 2010. Evaluation of ecotype and chemotype diversity of *Thymus daenensis* Celak. on Isfahan and Chaharmahal va Bakhtiari provinces. *Journal of Medicinal Herbs*, 1(3): 1-10.
- Khan, S., Ullah, A., Ullah, S., Saleem, M.H., Okla, M.K., Al-Hashimi, A., Chen, Y. and Ali, S. 2022. Quantifying temperature and osmotic stress impact on seed germination rate and seedling growth of *eruca sativa* mill. via hydrothermal time model. *Life*, 12(3): 400. <https://doi.org/10.3390/life12030400>
- Li, W., Wang, Y., Zhang, Y., Wang, R., Guo, Z. and Xie, Z. 2020. Impacts of drought stress on the morphology, physiology, and sugar content of Lanzhou lily (*Lilium davidii* var.) unicolor. *Acta Physiologiae Plantarum*, 42: 1-11. <https://doi.org/10.1007/s11738-020-03115-y>
- Marthandan, V., Geetha, R., Kumutha, K., Renganathan, V.G., Karthikeyan, A. and Ramalingam, J. 2020. Seed priming: a feasible strategy to enhance drought tolerance in crop plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(21): 8258. <https://doi.org/10.3390/ijms21218258>
- Mesgaran, M.B., Mashhadi, H.R., Alizadeh, H., Hunt, J., Young, K.R. and Cousens, R.D. 2013. Importance of distribution function selection for hydrothermal time models of seed germination. *Weed Research*, 53: 89-101. <https://doi.org/10.1111/wre.12008>
- Michel, B.E., and Kaufmann, M.R. 1973. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiology*, 51(5): 914-6. <https://doi:10.1104/pp.51.5.914>
- Mosavi, S.M., Bijanzadeh, E., Zinati, Z. and Nazari, L. 2021. Seed germination prediction of osmotic-stressed safflower (*Carthamus tinctorius* L.) at different temperatures using hydrotime analysis. *Iran Agricultural Research*, 40(1): 83-92. <https://doi.org/10.22099/IAR.2021.39039.1417>
- Ouahzizi, B., Elbouny, H., Sellam, K., Alem, C. and Bakali, A. H. 2023. Effects of temperature, provenance, drought stress and salinity on seed germination response and early seedling stage of *Thymus atlanticus* (Ball) Roussine. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 34: 100482. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2023.100482>
- Patel, F.Y., Patel, A. and Shah, N.J. 2023. Osmo-priming with a novel actives Carrabiitol® alleviates abiotic stresses in Sorghum and Fenugreek: effect on seed germination and seedling growth. *Agricultural Science Digest*. 43(6): 741-750. <https://doi.org/10.18805/ag.D-5771>
- Pichand, M., Dianati Tilaki, G.A. and Sadati, E. 2021. Effects of hydropriming and drought stress on germination traits and seedling growth of *Cymbopogon olivieri*. *Journal of Range and Watershed Management*, 74(2): 323-338. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2021.300708.1487>
- Piri, R., Moradi, A., Salehi, A. and Balouchi, H. 2021. Effect of seed biological pretreatments on germination and seedling growth of cumin (*Cuminum cyminum* L.) under drought stress. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 9(4): 11-26. [In Persian]. <https://doi.org/10.22034/ijssst.2019.109182.1054>
- Poudel, R., Finnie, S. and Rose, D. J. 2019. Effects of wheat kernel germination time and drying temperature on compositional and end-use properties of the resulting whole wheat flour. *Journal of Cereal Science*, 86: 33-40. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.01.004>
- Qi, Y., Ma, L., Ghani, M.I., Peng, Q., Fan, R., Hu, X. and Chen, X. 2023. Effects of drought stress induced by hypertonic polyethylene glycol (PEG-6000) on *Passiflora edulis* sims physiological properties. *Plants*, 12(12): 2296. <https://doi.org/10.3390/plants12122296>
- Queiroz, M.S., Oliveira, C.E., Steiner, F., Zuffo, A.M., Zoz, T., Vendruscolo, E.P., Silva, M.V., Mello, B.F.F.R., Cabra, R.C. and Menis, F.T. 2019. Drought stresses on seed germination and early growth of maize and sorghum. *Journal of Agricultural Science*, 11(2): 310-318. <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v11n2p310>

- Romano, A. and Bravi, R. 2021. Hydrottime model to evaluate the effects of a set of priming agents on seed germination of two leek cultivars under water stress. *Seed Science and Technology*, 49(2): 159-174. <https://doi.org/10.15258/sst.2021.49.2.07>
- Saberali, S.F. and Shirmohamadi-Aliakbarkhani, Z. 2020. Quantifying seed germination response of melon (*Cucumis melo* L.) to temperature and water potential: Thermal time, hydrottime and hydrothermal time models. *South African Journal of Botany*, 130: 240-249. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.12.024>
- Sabokdast, M., Salehi, F. and Rezaizadeh, A. 2018. Effect of drought-induced stress by PEG6000 on physiological and morphological traits of Lentil (*Lens culinaris*) seed germination in order to selection of drought tolerant genotypes. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 49(3): 39-47. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/ijfes.2017.227940.654287>
- Sabouri, A., Azizi, H. and Nonavar, M. 2020. Hydrottime model analysis of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) using different distribution functions. *South African Journal of Botany*, 135: 158-163. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.08.032>
- Salehi Salmi, M. 2022. Comparison of germination indices and alpha-amylase activity of four tropical turf grass species in response to drought and salinity stresses. *Iranian Journal of Seed Sciences and Research*, 9(4): 41-57. [In Persian]. <https://doi.org/10.22124/jms.2023.6170>
- Sanekhoori, F.H., Pirdashti, H. and Bakhshandeh, E. 2021. Quantifying water stress and temperature effects on camelina (*Camelina sativa* L.) seed germination. *Environmental and Experimental Botany*, 186: 104450. <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2021.104450>
- Seleiman, M.F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H.H. and Battaglia, M. L. 2021. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10(2): 259-284. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>
- Shah, S., Ullah, S., Ali, S., Khan, A., Ali, M. and Hassan, S. 2021. Using mathematical models to evaluate germination rate and seedlings length of chickpea seed (*Cicer arietinum* L.) to osmotic stress at cardinal temperatures. *PLoS One*, 16(12): e0260990. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260990>
- Shah, T., Latif, S., Khan, H., Munsif, F. and Nie, L. 2019. Ascorbic acid priming enhances seed germination and seedling growth of winter wheat under low temperature due to late sowing in Pakistan. *Agronomy*, 9(11): 757-767. <https://doi.org/10.3390/agronomy9110757>
- Shahrajabian, M.H., Khoshkham, M., Zandi, P., Sun, W. and Cheng, Q. 2020. The influence of temperatures on germination and seedling growth of pyrethrum (*Tanacetum cinerariifolium*) under drought stress. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 8(1): 29-39. <http://dx.doi.org/10.33945/SAMI/IJABBR.2020.1.4>
- Soltani, A. and Maddah, V. 2010. Simple applications for agriculture education and research. *Agroecology Association, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran* 80 p. [In Persian].
- Soltani, A. and Sinclair, T.R. 2012. *Modeling Physiology of Crop Development, Growth and Yield*. CABI, Wallingford. 322p.
- Soltani, E., Adeli, R., Akbari, G.A. Ramshini, H 2017. Application of hydrottime model to predict early vigour of rapeseed (*Brassica napus* L.) under abiotic stresses. *Acta Physiologiae Plantarum*, 39: 252 <https://doi.org/10.1007/s11738-017-2552-0>
- Stahl-Biskup, E. and Saez, F., 2002. *Thyme: the genus Thymus*. London: Taylor & Francis. 348p.
- Suliman, M.S.E., Elradi, S.B.M., Zhou, G., Nimir, N.E.A., Zhu, G. and Ali, A.Y.A. 2022. Seeds primed with 5-aminolevulinic acid mitigated temperature and drought stresses of wheat at germination and early seedling growth. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 82(1): 111-123. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392022000100111>
- Tatari, S., Ghaderi-Far, F., Yamchi, A., Siahmarguee, A., Shayanfar, A. and Baskin, C. C. 2020. Application of the hydrottime model to assess seed priming effects on the germination of

- rapeseed (*Brassica napus* L.) in response to water stress. *Botany*, 98: 283-291. <https://doi.org/10.1139/cjb-2019-0192>
- Torabi, B., Soltani, E., Archontoulis, S.V. and Rabii, A. 2016. Temperature and water potential effects on *Carthamus tinctorius* L. seed germination: measurements and modeling using hydrothermal and multiplicative approaches. *Brazilian Journal of Botany*, 39: 427-436. <https://doi.org/10.1007/s40415-015-0243-x>
- Willenborg, C.J., Wildeman, J.C., Miller, A.K., Rossnagel, B.G. and Shirliffe, S.J. 2005. Oat germination characteristics differ among genotypes, seed sizes, and osmotic potentials. *Crop Science*, 45(5): 2023-2029. <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.0722>
- Yousefi, A.R., Rashidi, S., Moradi, P. and Mastinu, A. 2020. Germination and seedling growth responses of *Zygophyllum fabago*, *Salsola kali* L. and *Atriplex canescens* to PEG-induced drought stress. *Environments*, 7(12): 107-117. <https://doi.org/10.3390/environments7120107>