



علوم و تحقیقات بذر ایران

سال دوازدهم / شماره سوم / ۱۴۰۴ (۱۱ - ۱)

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22124/jms.2025.9455



کاربرد مدل مساحت مثلث در پیش‌بینی ضریب هیدروتایم: کمی‌سازی جوانه‌زنی بذر آویشن شیرازی (*Zataria multiflora* Boiss.) در پاسخ به پتانسیل‌های رطوبتی

نفیسه خلیلی^۱، محمدرضا جهانسوز^{۲*}، مصطفی اویسی^۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۲۲

چکیده

شناخت نیاز رطوبتی جوانه‌زنی بذر در پیش‌بینی پراکندگی اکولوژیک و نیز برنامه‌های زراعی‌سازی گونه‌های دارویی ضروری است. در این مطالعه، جوانه‌زنی بذر آویشن شیرازی در پاسخ به سطوح پتانسیل اسمزی (۰، -۰/۲، -۰/۴، -۰/۶، -۰/۸ و -۱- مگاپاسکال) آزمون شد و شمارش جوانه‌زنی روزانه برای ۲۱ روز انجام شد. مدل مساحت مثلث (TAM)، برای تخمین مقادیر هیدروتایم مورد استفاده قرار گرفت. سپس مدل ویبول به مقادیر هیدروتایم برازش داده و میزان جوانه‌زنی تجمعی پیش‌بینی شد. مدل هیدروتایم بردفورد نیز برای پیش‌بینی جوانه‌زنی تجمعی و به منظور مقایسه با کارایی مدل مساحت مثلث مورد استفاده قرار گرفت. براساس نتایج ارزیابی مدل‌ها، مدل TAM با ضریب تبیین (R^2) برابر با ۰/۹۲ و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر با ۰/۱۱ و ضریب آیکائیک ۳۳۱۷-، نسبت به مدل بردفورد با R^2 برابر ۰/۹۰ و RMSE برابر با ۰/۱۴ و ضریب آیکائیک ۳۰۴۷-، از کارایی و دقت بالاتری در پیش‌بینی جوانه‌زنی بذر آویشن شیرازی برخوردار بود. تخمین پارامترهای مدل TAM حاکی از حداکثر جوانه‌زنی ۸۱ درصد، میزان پتانسیل رطوبتی پایه ۰/۸۱- و پتانسیل بهینه ۰/۰۰۳ مگاپاسکال بود. در مقابل پیش‌بینی میانگین پتانسیل پایه توسط مدل بردفورد به میزان ۰/۶۶- و با انحراف معیار ۰/۱۶ پیش‌بینی شد. در مجموع، مدل TAM، با پارامترهای کاربردی در تخمین نیازهای رطوبتی بذر، همچون رطوبت پایه، بهینه و حداکثر جوانه‌زنی بذرها و در عین حال پیش‌بینی دقیق‌تر و با اریب بسیار کم، کارایی مناسبی در مدل‌سازی جوانه‌زنی آویشن شیرازی در پاسخ به سطوح رطوبتی نشان داد. دقت و عملکرد مناسب مدل TAM، حاکی از ظرفیت آن در تخمین پارامترهای رطوبتی جوانه‌زنی گونه‌ها می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آویشن شیرازی، تنش آبی، جوانه‌زنی بذر، مدل مساحت مثلث

۱- دانشجوی دکتری اکولوژی گیاهان زراعی، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران. nafisekhalili@ut.ac.ir

۲- استاد، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران. jahansuz@ut.ac.ir

۳- دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران. moveisi@ut.ac.ir

*نویسنده مسئول: jahansuz@ut.ac.ir

مقدمه

جوانه‌زنی بذر مرحله‌ای از چرخه زندگی گیاه است که به‌طور مستقیم تحت تأثیر وضعیت رطوبتی محیط قرار دارد. جذب آب شرط لازم برای آغاز فرایندهای فیزیولوژیکی مرتبط با جوانه‌زنی است و کاهش پتانسیل آب خاک می‌تواند با محدود کردن این فرایند، موجب کاهش سرعت یا درصد جوانه‌زنی شود (Bareke, 2018). از دیدگاه اکوفیزیولوژیکی، پاسخ بذرها به پتانسیل‌های مختلف آب، یکی از عوامل مؤثر در استقرار گیاهچه و پراکنش گونه‌ها در محیط‌های طبیعی به شمار می‌رود (Bradford, 2017). در نظام‌های زراعی نیز، رابطه بین پتانسیل آب خاک و جوانه‌زنی بذر، بر یکنواختی سبز شدن و موفقیت استقرار اولیه گیاه اثرگذار است (Mirtayebi et al., 2021).

در مطالعات اکولوژیکی و زراعی، مدل هیدروتایم امکان توصیف کمی رابطه بین پتانسیل آب محیط و زمان جوانه‌زنی را فراهم می‌کند و از این طریق می‌توان حساسیت جوانه‌زنی گونه‌ها یا جمعیت‌های بذری را نسبت به کاهش رطوبت مقایسه کرد (Behboud et al., 2024). پارامترهای این مدل، به‌ویژه پتانسیل آب پایه جوانه‌زنی، شاخصی از حد آستانه تحمل بذرها به کمبود آب بوده و می‌توان از آن برای تحلیل تفاوت‌های بین گونه‌ها، جمعیت‌ها یا توده‌های بذری در پاسخ به شرایط تنش آبی استفاده کرد (Pill, 2020). کاربرد مدل هیدروتایم عمدتاً معطوف به پیش‌بینی روند زمانی جوانه‌زنی در شرایط رطوبتی مختلف است، به‌گونه‌ای که این مدل امکان برآورد زمان شروع، سرعت و یکنواختی سبز شدن را تحت تنش آبی فراهم می‌کند. این ویژگی، استفاده از مدل را برای مقایسه توده‌های بذری از نظر توان استقرار اولیه و بهبود تصمیم‌گیری در مدیریت زمان و شرایط کاشت در محیط‌های با محدودیت رطوبتی امکان‌پذیر می‌سازد (Piri et al., 2021).

یکی از مدل‌های رایج هیدروتایم، مدل بردفورد است (Bradford, 2017). این مدل مبتنی بر زمان است و برای توصیف و پیش‌بینی جوانه‌زنی بذرها در سطوح مختلف پتانسیل آب توسعه داده شده است. مبنای اصلی این مدل آن است که جوانه‌زنی هر بذر تنها زمانی آغاز می‌شود که پتانسیل آب محیط از یک مقدار آستانه‌ای مشخص، موسوم به پتانسیل آب پایه جوانه‌زنی، بیشتر باشد. این پتانسیل آب پایه حداقل وضعیت رطوبتی لازم برای آغاز جوانه‌زنی را بیان

می‌کند و در سطح یک جمعیت بذری، بین بذرها متفاوت است. در این مدل فرض می‌شود که پتانسیل آب پایه در جمعیت بذرها از یک توزیع نرمال پیروی می‌کند، در حالی که ضریب هیدروتایم، به‌عنوان پارامتری ثابت برای جمعیت، بیانگر میزان زمان لازم برای تجمع اثر آب در فرایند جوانه‌زنی است. بر اساس این مدل، زمان لازم برای جوانه‌زنی یک درصد مشخص از بذرها، تابعی خطی از اختلاف بین پتانسیل آب محیط و پتانسیل آب پایه آن درصد از جمعیت است. هرچه پتانسیل آب محیط کاهش یابد و به مقدار پایه نزدیک‌تر شود، زمان جوانه‌زنی افزایش یافته و در صورت منفی‌تر شدن از پتانسیل آب پایه، جوانه‌زنی متوقف می‌شود. با توجه به سادگی، تعداد پارامترهای محدود و توان پیش‌بینی، مدل بردفورد به‌طور گسترده برای تحلیل پاسخ جوانه‌زنی به تنش آبی، مقایسه بنیه توده‌های بذری و ارزیابی توان استقرار اولیه گیاهان مورد استفاده قرار گیرد (Maleki et al., 2023). در عین حال این مدل، محدودیت‌هایی نیز دارد. مدل هیدروتایم بردفورد در شرایطی که پتانسیل آب محیط بسیار منفی است و درصد جوانه‌زنی نزدیک به صفر می‌باشد، دقت پیش‌بینی پایینی دارد (Oveisi et al., 2025). در این شرایط، مدل، مقادیر پتانسیل آب پایه و زمان جوانه‌زنی را بیش از مقادیر مشاهده‌شده تخمین می‌زند؛ به‌عبارت دیگر، هنگامی که جوانه‌زنی بسیار کم است، مدل نمی‌تواند افت واقعی درصد جوانه‌زنی را به درستی توصیف کند و نتایج پیش‌بینی‌شده اغلب بیشتر از داده‌های تجربی است (Oveisi et al., 2025). این ضعف به‌خصوص زمانی آشکار می‌شود که مدل برای پیش‌بینی جوانه‌زنی نزدیک به حد توقف کامل آب (Ψ_b) نزدیک به Ψ_b به کار رود، زیرا فرض خطی بودن تجمع هیدروتایم در چنین شرایطی ممکن است نقض شود. همچنین فرض توزیع نرمال برای پتانسیل آب پایه جوانه‌زنی در جمعیت بذرها در موارد متعدد صادق نیست که برآزش مدل و برآورد پارامترها را تحت تأثیر قرار دهد. برخی مطالعات نشان داده‌اند که توزیع‌های جایگزین (مثل ویبول یا گامبل) گاهی برآزش بهتری ارائه می‌دهند (Piri et al., 2021).

فرض مهم دیگر در مدل بردفورد که در بسیاری موارد صادق نیست ثبات ضریب هیدروتایم در جمعیت است (Oveisi et al., 2025). اینکه سرعت جوانه‌زنی کسرهای مختلف از جمعیت با تغییر رطوبت محیط با شبی یکسان

کننده در استقرار این گیاه دارد. هدف این مطالعه عبارت است از (۱) کمی‌سازی و پیش‌بینی پاسخ گونه آویشن شیرازی در پاسخ به پتانسیل‌های رطوبتی، (۲) توسعه و ارزیابی مدل هیدروتایم مبتنی بر مساحت مثلث (Triangle Area Model; TAM) برای کمی‌سازی روند جوانه‌زنی بذر آویشن شیرازی، (۳) مقایسه عملکرد مدل مساحت مثلث با مدل هیدروتایم بردفورد در پیش‌بینی جوانه‌زنی، (۴) بررسی اهمیت بیولوژیکی پارامترهای این مدل در تعیین رفتار جمعیت بذری و (۵) تخمین پارامترهای کلیدی جوانه‌زنی بذر آویشن شیرازی در پاسخ به تغییرات پتانسیل آب محیط است. نتایج این مطالعه می‌تواند پایه‌ای برای پیش‌بینی استقرار اولیه گیاه، بهینه‌سازی مدیریت کاشت و بررسی سازگاری گونه‌های دارویی با محدودیت‌های رطوبتی فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

به منظور مطالعه واکنش جوانه‌زنی بذر آویشن شیرازی به سطوح مختلف پتانسیل اسمزی، آزمایشی بر پایه طرح کاملاً تصادفی در سال ۱۴۰۴، در آزمایشگاه تکنولوژی بذر دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران طراحی شد. بذرهاى آویشن شیرازی مرکز تحقیقات کشاورزی استان فارس در سال ۱۴۰۴ تهیه و در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد در شرایط خشک نگهداری شدند. آزمون جوانه‌زنی با سه تکرار انجام شد. در هر تکرار، ۵۰ بذر در پتری‌دیش‌های شیشه‌ای با قطر ۹ سانتی‌متر قرار گرفت و درون هر پتری دیش ۵ میلی‌لیتر آب مقطر (تیمار شاهد) و محلول‌های با پتانسیل اسمزی ۰/۲-، ۰/۴-، ۰/۶-، ۰/۸- و ۱- مگاپاسکال ریخته شد. محلول‌ها با استفاده از پلی‌اتیلن گلاایکول ۶۰۰۰ (ساخت شرکت مرک آلمان) ساخته و برای به دست آوردن فشار اسمزی از رابطه زیر استفاده شد (Michel and Kaufmann, 1973).

در این فرمول Ψ_s میزان فشار اسمزی بر حسب مگاپاسکال، C میزان مصرف PEG بر حسب گرم بر کیلوگرم آب و T دمای آزمایش بر حسب درجه سانتیگراد است.

$$\Psi_s = - (1.8 \times 10 - 2) C - (1.8 \times 10 - 4) C^2 + (2.67 \times 10 - 4) CT + (8.39 \times 10 - 7) C^2 T$$

برای جلوگیری از کاهش رطوبت در طول دوره، پتری‌ها درون پلاستیک قرار داده شد و سپس در ژرمیناتور با دمای

تغییر کند بطور متعده نقض شده است. مدل مساحت مثلث بر مبنای اصلاح فرض دوم یعنی ثابت بودن ضریب هیدروتایم عمل می‌کند (Oveisi et al., 2024). این مدل فرض می‌کند که مقادیر هیدروتایم لازم برای جوانه‌زنی با مساحت یک مثلث قائم الزویه قابل تخمین است. قاعده مثلث، در مؤلفه رطوبت به اختلاف پتانسیل آب محیط از پتانسیل آب پایه ($\Psi - \Psi_b$) در طول زمان مرتبط است و ارتفاع مثلث، حداکثر میزان جوانه‌زنی ممکن در زمان قرارگیری در پتانسیل رطوبتی است. مساحت مثلث، مقادیر تجمعی هیدروتایم را بازتاب می‌دهد. هر چه پتانسیل رطوبتی از مقدار بهینه دور و به پتانسیل پایه نزدیک شود ارتفاع مثلث و در نتیجه مساحت مثلث کاهش می‌یابد. پیش‌بینی مناسب جوانه‌زنی تجمعی با مقادیر مساحت مثلث، در مدل‌های دمایی نشان داده شده است.

در این مطالعه، توان مدل هیدروتایم با رهیافت مساحت مثلث در گونه آویشن شیرازی (*Zataria multiflora* Boiss.) بررسی شد. آویشن شیرازی از خانواده نعناعیان (*Lamiaceae*)، یک گیاه دارویی بومی مناطق کوهستانی و نیمه‌خشک ایران است. این گونه چندساله و با ساقه‌های منشعب شناخته می‌شود و ارتفاع آن معمولاً بین ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر متغیر است. برگ‌ها کوچک، بیضی شکل و دارای رایحه معطر بوده و گل‌ها به صورت مجتمع در محور برگ‌ها ظاهر می‌شوند (Fatemi et al., 2012). از نظر دارویی، آویشن شیرازی به دلیل داشتن ترکیبات فنولی فعال مانند تیمول و کارواکرول، دارای خواص ضد میکروبی، ضد التهابی و ضد اسپاسم است و در طب سنتی ایران برای درمان اختلالات تنفسی، عفونت‌های ریوی، سوءهاضمه و تسکین اسپاسم عضلانی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Fatemi et al., 2012). همچنین اسانس‌های استخراج‌شده از برگ و گل آن به‌طور گسترده در صنایع غذایی و دارویی به عنوان ماده نگهدارنده و افزودنی طعم‌دهنده کاربرد دارند (Fatemi et al., 2012). در این مطالعه، توان مدل هیدروتایم با رهیافت مساحت مثلث در گونه آویشن شیرازی بررسی شد. با توجه به سازگاری آویشن شیرازی به شرایط خشک و نیمه‌خشک و توانایی تحمل کاهش نسبی رطوبت خاک، پاسخ جوانه‌زنی و استقرار این گیاه به پتانسیل‌های رطوبتی نقشی تعیین

جوانه‌زنی در پتانسیل‌های مختلف، کسری از حداکثر جوانه‌زنی بذرها (G_{max}) در پتانسیل بهینه در نظر گرفته می‌شود. وتر مثلث برای مقادیر مختلف پتانسیل رطوبتی از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Oveisi et al., 2024):
رابطه (۲)

$$HA_g = HA \cdot \max \left(0, 1 - \frac{|\psi_{opt}| - |wb|}{|\psi_b|} \right)$$

میزان ظرفیت حداکثر جوانه‌زنی تجمعی بذرها در هر پتانسیل رطوبتی از رابطه زیر تخمین زده می‌شود:
رابطه (۳)

$$G(\psi) = HA_g \cdot G_{max}$$

مقادیر هیدروتایم تجمعی $TA(\psi)$ عبارت است از (Oveisi et al., 2024):
رابطه (۴)

$$TTA(\psi) = 0, \quad \text{if } wb < \Psi_b$$

$$TTA(\psi) = G(\psi) \cdot (|\Psi| - |wb|) \cdot 0.5 \cdot t \quad \text{if } \Psi_b < wb < \Psi_{opt}$$

$$TTA(\psi) = G_{max} \cdot |\Psi_b| \cdot 0.5 \cdot t, \quad \text{if } wb > \Psi_{opt}$$

که t زمان شمارش جوانه‌زنی است. براین مبنای، اگر میزان رطوبت کمتر از پتانسیل پایه باشد آنگاه مقدار هیدروتایم صفر است و اگر بیش از پتانسیل بهینه باشد مقدار هیدروتایم در حداکثر میزان خود برای بازه رطوبتی بهینه محاسبه می‌شود.

جوانه‌زنی تجمعی تحت اثر پتانسیل رطوبتی در طول زمان شمارش جوانه‌زنی از رابطه ویبول (اصلاح شده) با فرمول زیر محاسبه می‌شود (Oveisi et al., 2025):

$$G(t, \psi) = \begin{cases} 0, & TTA \leq T_0 \\ TTA \left[1 - \exp \left(- \left(\max \left(0, \frac{TTA - T_0}{\mu} \right)^\beta \right) \right) \right], & TTA > T_0 \end{cases} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SSG} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (p - o)^2}{n - 1}} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$AIC = n \times \ln(SSR/n) + 2k \quad \text{رابطه (۸)}$$

در این مدل‌ها، SSE (مجموع مربعات خطا) و SSG (مجموع مربعات کل) به کار رفته‌اند. در اینجا، P نشان‌دهنده

۲۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۱ روز قرار گرفت. شمارش جوانه‌زنی بذرها به صورت روزانه انجام و در نرم افزار اکسل (Excel) ورژن ۲۰۱۳ ثبت شد. معیار جوانه‌زنی بذرها، خروج ریشه‌چه به اندازه ۲ میلی‌متر یا بیشتر بود (Balouchi et al., 2023). داده‌های حاصل از جوانه‌زنی مورد تجزیه و تحلیل آماری و مقایسه قرار گرفت و نمودارها با استفاده از نرم‌افزار JMP (نسخه ۲۰۱۸) ترسیم شدند.
ماهیت و توسعه مدل: مفهوم اصلی حاکم بر این مدل، بهره‌گیری از مساحت مثلث قائم‌الزاویه به‌عنوان یک ابزار هندسی برای محاسبه کمی هیدروتایم است. در این مدل دو فرض عمده در نظر گرفته می‌شود: (۱) مقادیر هیدروتایم که تعیین‌کننده میزان جوانه‌زنی است در سطوح رطوبتی مختلف می‌باشد، متفاوت است. (۲) بیشترین مساحت مثلث مربوط می‌شود به پتانسیل آب بهینه که لزوماً برابر با پتانسیل صفر نیست و بر اساس اندازه و خصوصیات مورفولوژیکی بذرها می‌تواند در پتانسیل‌های بیشتر (منفی‌تر) نسبت به پتانسیل صفر اتفاق بیفتد. بر همین اساس به جای یک رابطه خطی که مقدار جوانه‌زنی در آن با افزایش رطوبت با یک شیب ثابت تغییر می‌کند امکان برآزش یک رابطه دو-تکه‌ای خطی در مدل پیش‌بینی می‌شود که در صورت تفاوت معنی‌دار پتانسیل بهینه (Ψ_{opt}) از پتانسیل صفر، بخش اول رابطه با افزایش رطوبت از پتانسیل پایه (Ψ_b) به صورت خطی افزایش می‌یابد ولی پس از رسیدن به پتانسیل بهینه، بصورت خط صاف و برابر با حداکثر جوانه‌زنی جلو می‌رود.

پارامتر HA ، عبارت است از پارامتر زاویه وتر مثلث که نقطه زمان صفر شمارش جوانه‌زنی را به حداکثر جوانه‌زنی در پتانسیل رطوبتی مشخص وصل می‌کند. حداکثر

که در آن T_0 عبارت است از آستانه حداقلی مقدار هیدروتایم برای شروع جوانه‌زنی، μ نشان‌دهنده مقدار استاندارد نرخ جوانه‌زنی و β به عنوان ثابت تنظیم‌کننده منحنی در نظر گرفته می‌شود.

ارزیابی مدل: برای دقت و برآزش مدل‌ها، از شاخص‌های ضرایب تبیین (R^2)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و ضریب آیکائیک (AIC) استفاده شد.

از پتانسیل صفر تا $0/2$ ، مقادیر بهینه هیدروتایم تجمعی به دست آمد ولی با کاهش بیشتر پتانسیل آب از $0/2$ تا -1 مگاپاسکال، کاهش پیوسته ارتفاع و مساحت مثلث‌ها مشاهده شد. این کاهش نشان‌دهنده افت شدید نرخ تجمع هیدروتایم و در نهایت توقف کامل آن در پتانسیل -1 مگاپاسکال است. در این سطح، مساحت مثلث‌ها عملاً به صفر می‌رسد، که بیانگر ناتوانی بذرها در آغاز یا تداوم فرآیند جوانه‌زنی تحت تنش شدید کم‌آبی است. از دیدگاه فیزیولوژیک، کاهش پتانسیل آبی محیط موجب کاهش شدید شیب پتانسیل آب بین بذر و محیط شده و در نتیجه جذب آب به‌شدت محدود می‌گردد. این وضعیت باعث کاهش تورژانس سلولی، اختلال در بازشدن دیواره‌های سلولی، مهار فعال‌سازی آنزیم‌ها و تأخیر یا توقف فرآیندهای کلیدی متابولیسم اولیه می‌شود. افزون بر این، کمبود آب انتقال و جابه‌جایی ذخایر غذایی (نشاسته، پروتئین‌ها و لیپیدها) از آندوسپرم یا بافت‌های ذخیره‌ای به جنین را مختل کرده و رشد اولیه جنین را محدود می‌سازد (Bradford, 2017). همچنین، تنش کم‌آبی می‌تواند مستقیماً بر یکپارچگی غشاهای سلولی اثر منفی گذاشته و فرآیندهای حیاتی نظیر سنتز پروتئین و تقسیم سلولی را مهار کند (Piri et al., 2018). این مجموعه سازوکارها کاهش شدید هیدروتایم تجمعی در پتانسیل‌های منفی‌تر را به‌خوبی توجیه می‌کند.

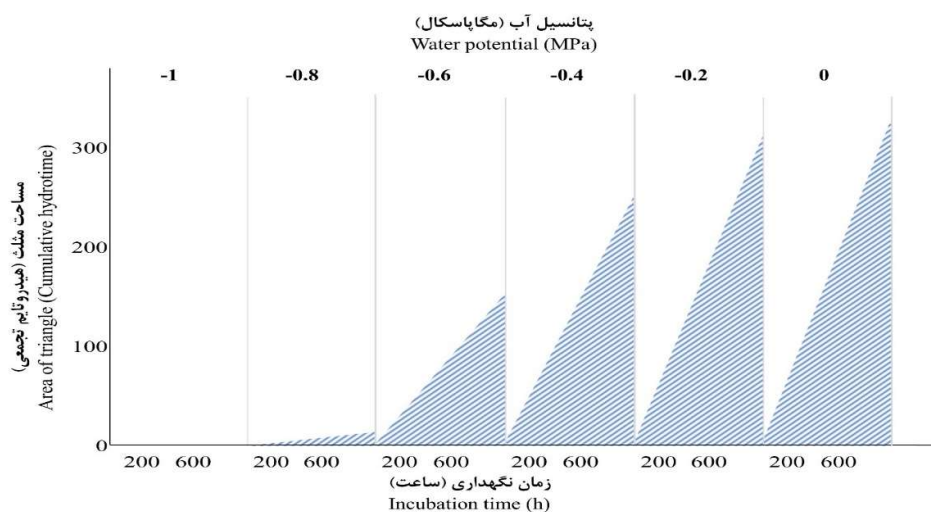
مقدار پیش‌بینی شده جوانه‌زنی با استفاده از مدل و O نشان دهنده مقدار واقعی مشاهده شده است، همچنین n تعداد مشاهدات را نشان می‌دهد. علاوه بر این، SSR به مجموع مربعات باقی‌مانده اشاره دارد، n تعداد نمونه‌ها و K تعداد پارامترهای مدل مورد بررسی است. جهت برازش روابط ۱، ۲ و ۳ به داده‌های به‌دست‌آمده از این تحقیق، از نرم‌افزار R استفاده شد و نمودارها با استفاده از نرم‌افزار JMP (نسخه ۲۰۱۸) ترسیم شدند.

نتایج و بحث

الگوی تغییرات هیدروتایم تجمعی در پاسخ به

پتانسیل آب

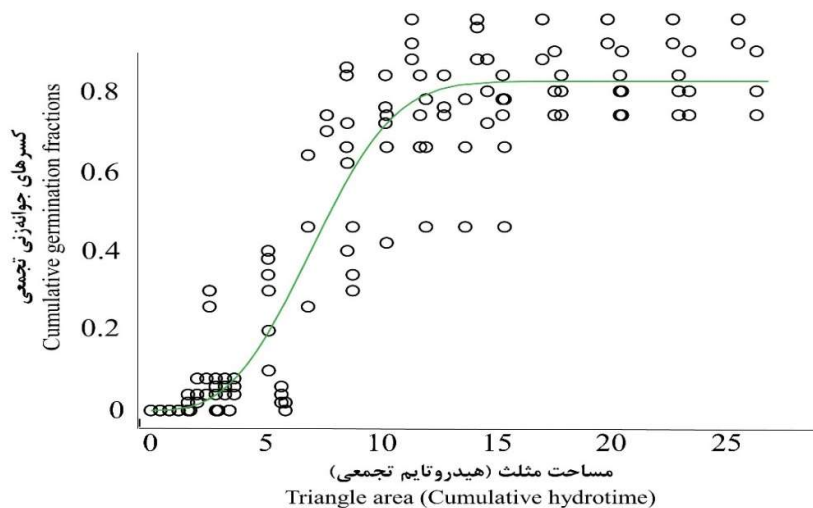
مطابق با شکل ۱، هیدروتایم تجمعی در مدل TAM به‌صورت مساحت تجمعی مثلث‌های قائم‌الزاویه‌ای تعریف می‌شود که در طول زمان جوانه‌زنی و در سطوح مختلف پتانسیل آب تشکیل می‌گردند. در هر سطح از پتانسیل آب، تشکیل یک مثلث قائم‌الزاویه با شیب مشخص نشان‌دهنده نرخ تجمع هیدروتایم در آن شرایط رطوبتی است. تفاوت‌های مشاهده شده در شیب، ارتفاع و در نهایت مساحت این مثلث‌ها بیانگر تغییر در پاسخ فیزیولوژیک بذرها به مقادیر آب می‌باشد. در پتانسیل‌های آبی نزدیک به صفر، افزایش تدریجی ارتفاع و مساحت مثلث‌ها نشان می‌دهد که بذرها قادر به جذب مؤثر آب بوده و فرآیندهای متابولیکی مرتبط با جوانه‌زنی با کمترین محدودیت انجام می‌شوند.



شکل ۱- تغییرات مساحت مثلث (هیدروتایم تجمعی) در طول زمان جوانه‌زنی تجمعی در بذر آویشن شیرازی
Figure 1. Changes in the area of triangle (Cummulative hydrotime) over germination time in *Zataria multiflora* Seeds

بالا نشان می‌دهد که هیدروتایم تجمعی محاسبه شده در مساحت مثلث‌ها، یک شاخص زیستی معنادار برای توصیف دینامیک جوانه‌زنی تحت شرایط مختلف رطوبتی محسوب می‌شود (Oveisi et al., 2024).

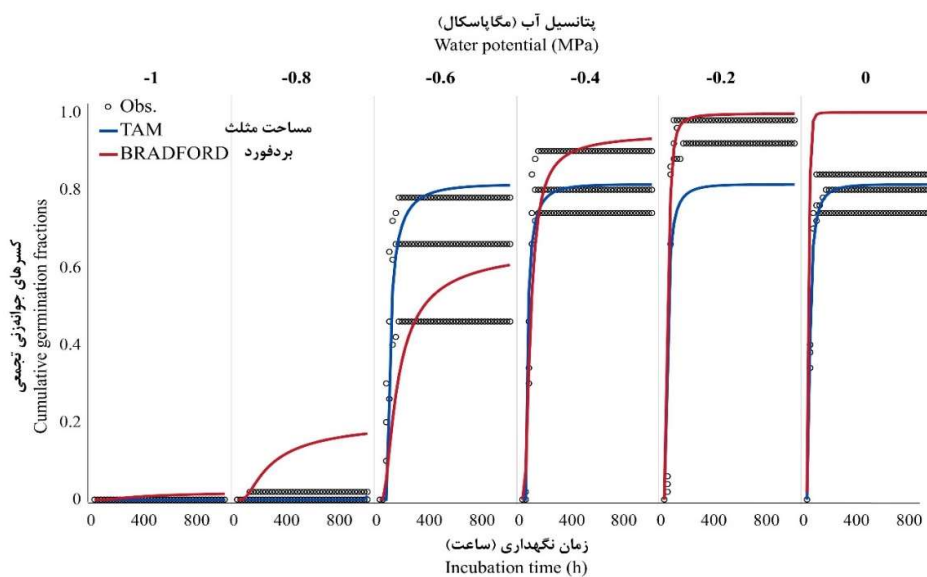
نتایج شکل ۲ نشان‌دهنده ارتباط بسیار قوی بین هیدروتایم تجمعی و کسرهای جوانه‌زنی تجمعی است. همبستگی بالای این دو متغیر ($R^2 = 0.92$) بیانگر آن است که مدل TAM قادر است فرآیند جوانه‌زنی را به‌عنوان یک پدیده تجمعی به خوبی پیش‌بینی نماید. این همبستگی



شکل ۲- تغییرات مساحت مثلث (هیدروتایم تجمعی) و کسرهای جوانه‌زنی تجمعی در بذر آویشن شیرازی
Figure 2. Changes in triangle area (Cumulative Hydrotime) and cumulative germination fractions in *Zataria multiflora* Seeds

پتانسیل‌های آبی کمتر منفی (شرایط نزدیک به بهینه)، هر دو مدل عملکرد نسبتاً مشابهی دارند. اما با حرکت به سمت پتانسیل‌های منفی‌تر و نزدیک شدن به پتانسیل آب پایه، اختلاف عملکرد دو مدل آشکارتر می‌شود.

بر اساس شکل ۳، هر دو مدل TAM و بردفورد توانایی مناسبی در برازش داده‌های جوانه‌زنی تجمعی در طول زمان دارند؛ با این حال، تفاوت‌های قابل توجهی در رفتار این دو مدل در سطوح مختلف پتانسیل آب مشاهده می‌شود. در



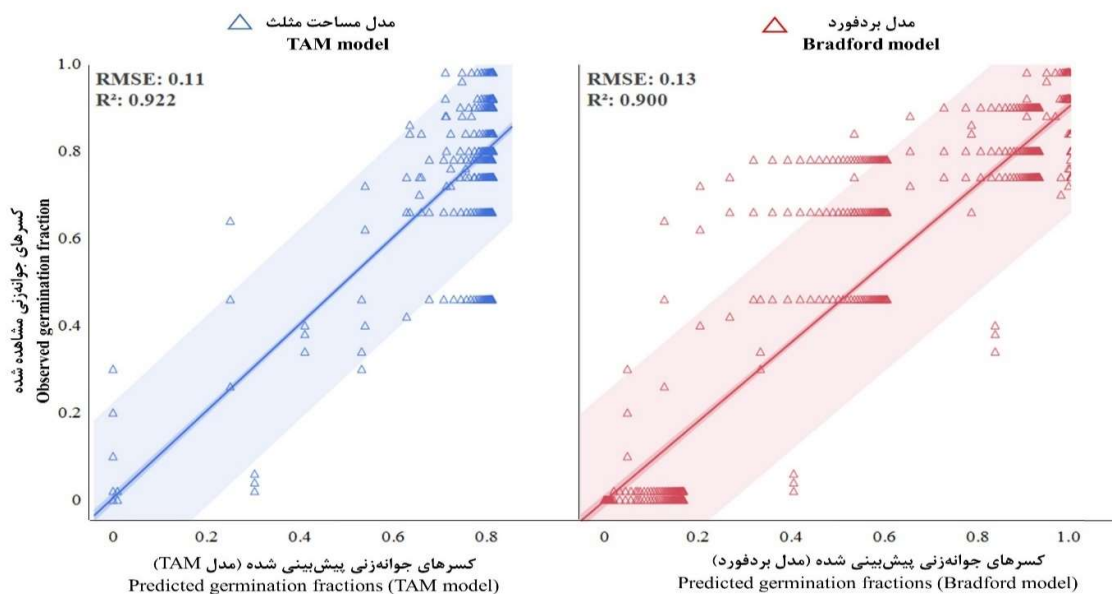
شکل ۳- تغییرات کسر جوانه‌زنی تجمعی بذر آویشن شیرازی تحت تأثیر پتانسیل‌های مختلف رطوبتی در طول زمان با استفاده از مدل مساحت مثلث و مدل بردفورد.

Figure 3. Changes in cumulative germination fractions of *Zataria multiflora* seeds under different water potentials over time using TAM model and Bradford model.

مقایسه عملکرد مدل TAM و مدل بردفورد

نتایج شکل ۴ این تفاوت را به صورت کمی تأیید می‌کند. نزدیکی نقاط داده به خط یک‌به‌یک ($Y = X$) در مدل TAM، همراه با مقدار R^2 بالاتر (۰/۹۲) و RMSE کمتر (۰/۱۱)، نشان‌دهنده دقت و پایداری بالاتر این مدل است. در مقابل، مدل بردفورد با R^2 برابر ۰/۹۰ و RMSE برابر با ۰/۱۴ از دقت کمتری برخوردار است. این اختلاف به‌ویژه در پیش‌بینی رفتار بذرها تحت تنش رطوبتی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، جایی که پیش‌بینی دقیق آستانه‌های تحمل برای مدیریت زراعی و اکولوژیک حیاتی است (Oveisi et al., 2025).

مدل TAM در این شرایط، برازش دقیق‌تری نسبت به مدل بردفورد نشان داد. این موضوع حاکی از آن است که مدل TAM حساسیت بیشتری به تغییرات رطوبتی داشته و قادر است کاهش تدریجی سرعت و میزان جوانه‌زنی را در شرایط تنش آبی بهتر شبیه‌سازی کند. در مقابل، مدل بردفورد در برخی سطوح پتانسیل اسمزی، تمایل به بیش‌برآورد یا کم‌برآورد کسرهای جوانه‌زنی دارد که می‌تواند ناشی از ساختار پارامتری ساده‌تر و عدم لحاظ مستقیم مفهوم هیدروتایم تجمعی باشد (Oveisi et al., 2025).



شکل ۴- کسرهای جوانه‌زنی مشاهده‌شده با مقادیر پیش‌بینی‌شده برای بذر آویشن شیرازی: مدل مساحت مثلث و مدل بردفورد.

Figure 4. Correlation between observed germination fractions and model-predicted values for *Zataria multiflora* seeds: TAM model and Bradford model.

همچنین، پتانسیل آب بهینه جوانه‌زنی برابر با ۰/۰۰۳ مگاپاسکال تعیین شد که شرایطی را نشان می‌دهد که در آن بیشینه کارایی جذب آب و بیشترین نرخ جوانه‌زنی حاصل می‌شود. این مقدار می‌تواند به‌عنوان شاخصی کاربردی برای تعیین شرایط بهینه استقرار گیاهچه در برنامه‌های کشت و مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار گیرد. بازه پتانسیل آب بهینه از صفر تا ۰/۲- مگاپاسکال حاکی از حفظ توانایی جذب آب و آغاز فرآیند متابولیکی

تفسیر زیستی پارامترهای برآوردشده

بر اساس نتایج مدل TAM، پتانسیل آب پایه برای ۵۰ درصد جوانه‌زنی بذر آویشن شیرازی برابر با ۰/۸۱- مگاپاسکال برآورد شد. این مقدار نشان‌دهنده حداقل پتانسیل آب مورد نیاز برای آغاز جوانه‌زنی است و بیانگر آستانه تحمل این گونه به تنش آبی در مرحله جوانه‌زنی می‌باشد. وجود چنین آستانه‌ای نشان می‌دهد که پایین‌تر از این مقدار، حتی با گذشت زمان طولانی، انرژی هیدرولیکی کافی برای فعال‌سازی فرآیندهای جوانه‌زنی فراهم نمی‌شود.

جدول ۱- برآورد پارامترها برای جوانه‌زنی بذر آویشن شیرازی تحت تأثیر پتانسیل رطوبتی با استفاده از مدل TAM و بردفورد.

Table 1. Parameter estimates for the germination of *Zataria multiflora* seed affected by water potential using the TAM and Bradford model

پارامتر (Parameter)	مدل (Model)	
	مدل مساحت مثلث (TAM)	بردفورد (Bradford)
کسر جوانه‌زنی حداکثر Gm	0.81	-
ارتفاع مثلث HA	0.99	-
پتانسیل آب پایه WP base	-0.81	-
پتانسیل آب بهینه WP optimum	0.0003	-
Theta (θ)	-	24.35
μ	-	-0.66
σ	-	0.16
R ²	0.92	0.90
RMSE	0.11	0.14
شاخص آیکائیک (AIC)	-3317	-3047

نتیجه‌گیری کلی

به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که رویکرد مدل TAM نسبت به مدل بردفورد از قابلیت تخمین مناسب‌تری در بازه‌های مختلف رطوبتی بذر جوانه‌زده آویشن شیرازی دارا می‌باشد. این مدل، پارامترهای موثری را برای تشریح جوانه‌زنی در جمعیت ارائه می‌دهد همانند حداکثر جوانه‌زنی، شیب کاهش جوانه‌زنی حداکثر تحت اثر کاهش رطوبت و فاز تاخیری عدم جوانه‌زنی بذر در آزمون جوانه‌زنی که در مقایسه پارامترهای جوانه‌زنی کاربرد مهمی دارد. گونه آویشن شیرازی اگرچه در مقایسه با گونه‌های متحمل به خشکی، نیاز به رطوبت بیشتری برای آغاز جوانه‌زنی دارد ولی می‌تواند جوانه‌زنی بهینه خود را در بازه‌ای از پتانسیل‌های منفی، بدون کاهش حفظ نماید.

تشکر و قدردانی

انجام این پژوهش با حمایت مالی معاونت تحقیقات، علوم و فناوری سپاه، اداره علم و فناوری، موسسه آموزشی و تحقیقاتی صنایع دفاع در قالب طرح جهادی انجام شد که بدینوسیله نویسنده مسئول مراتب قدردانی خود را ابراز می‌دارد.

جوانه‌زنی در بذرهای آویشن شیرازی در تنش‌های اندک تا متوسط است. تحمل تنش رطوبتی جوانه در گیاهان دارویی که بصورت وحشی در عرصه‌های طبیعی رشد می‌کنند از گیاهان زراعی اغلب بیشتر است (Dürr *et al.*, 2015) که نشانگر ظرفیت این گونه‌ها برای کشت در مناطق خشک و نیز در شرایط خشک ناشی از تغییرات اقلیم باشد.

در مدل بردفورد، مقدار نسبتاً بالای پارامتر θ (۴۳/۱۲ ساعت) نشان می‌دهد که جمعیت بذرهای آویشن شیرازی برای تکمیل فرآیند جوانه‌زنی به زمان قابل توجهی نیاز دارند. این ویژگی می‌تواند بازتابی از تنظیمات فیزیولوژیک مرتبط با سرعت جذب آب، فعال‌سازی آنزیم‌ها و رشد جنین باشد. پارامتر μ با مقدار $-0/66$ بیانگر چولگی توزیع زمانی جوانه‌زنی به سمت مقادیر کمتر است، به این معنا که بخشی از بذرها زودتر از میانگین جوانه می‌زنند. این ناهمگنی زمانی که توسط مقدار نسبتاً بالای σ (۰/۱۶) نیز تأیید می‌شود، نشان‌دهنده تنوع در پاسخ بذرها به شرایط محیطی است.

چنین پراکندگی زمانی در جوانه‌زنی یک راهبرد اکولوژیک مهم محسوب می‌شود که از طریق پخش ریسک، احتمال نابودی کامل جمعیت را در مواجهه با تنش‌های محیطی غیرقابل پیش‌بینی کاهش می‌دهد (Yar *et al.*, 2024). این راهبرد به‌ویژه برای گونه‌هایی که در زیستگاه‌های خشک و نیمه‌خشک رشد می‌کنند، اهمیت بالایی دارد.

منابع

- Balouchi, H., Soltani Khankahdani, V., Moradi, A., Gholamhoseini, M., Piri, R., Heydari, S. Z., 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), p. 1936. DOI:[10.3390/agriculture13101936](https://doi.org/10.3390/agriculture13101936) (**Journal**)
- Balouchi, H., Soltani Khankahdani, V., Piri, R., Moradi, A., Gholamhoseini, M., Heydari, S.Z., Ahmed, L.Q., Escobar-Gutiérrez, A.J. and Dedicova, B. 2025. Deciphering the Germination Behavior of Sesame Cultivars: The Interplay of Hydrothermal Time Model Parameters and Seed Fatty Acid Profiles. *Plants*, 14(22): p.3422. DOI: [10.3390/plants14223422](https://doi.org/10.3390/plants14223422) (**Journal**)
- Bareke, T. 2018. Biology of seed development and germination physiology. *Advances in Plants & Agriculture Research*, 8(4): 336-346. DOI:[10.15406/apar.2018.08.00335](https://doi.org/10.15406/apar.2018.08.00335) (**Journal**)
- Behboud, R., Moradi, A., Piri, R., Dedicova, B., Fazeli-Nasab, B. and Ghorbanpour, M. 2024. Sweet corn (*Zea mays* L.) seed performance enhanced under drought stress by chitosan and minerals coating. *BMC Plant Biology*, 24(1): 1-17. DOI: [10.1186/s12870-024-05704-2](https://doi.org/10.1186/s12870-024-05704-2) (**Journal**)
- Bello, P. and Bradford, K. J. 2016. Single-seed oxygen consumption measurements and population-based threshold models link respiration and germination rates under diverse conditions. *Seed Science Research*, 26(3): 199-221. DOI: [10.1017/S0960258516000179](https://doi.org/10.1017/S0960258516000179) (**Journal**)
- Bradford, K.J. 2017. Water relations in seed germination. In *Seed development and germination* (pp. 351-396). Routledge. DOI: [10.1201/9780203740071-13](https://doi.org/10.1201/9780203740071-13) (**Journal**)
- Dürr, C., Dickie, J.B., Yang, X.Y. and Pritchard, H.W. 2015. Ranges of critical temperature and water potential values for the germination of species worldwide: contribution to a seed trait database. *Agricultural and Forest Meteorology*, 200: 222-232. DOI: [10.1016/j.agrformet.2014.09.024](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.09.024) (**Journal**)
- Fatemi, F., Asri, Y., Rasool, I. and Alipoor, S. 2012. Chemical composition and antioxidant propertice of *Zataria multiflora* extracts. *Pharmaceutical Biology*, 50: 232-238. DOI: [10.3109/13880209.2011.596208](https://doi.org/10.3109/13880209.2011.596208) (**Journal**)
- Khan, J., Ullah, S., Shah, S., Sadaf, Khan, S. and Sulaiman, 2023. Modeling the upshots of induced temperature and water stress on germination and seedlings length of radish (*Raphanus sativus* L.) via hydrothermal time model. *Vegetos*, 36(3): 939-949. DOI: [10.1007/s42535-022-00490-4](https://doi.org/10.1007/s42535-022-00490-4) (**Journal**)
- Klupczyńska, E.A. and Pawłowski, T.A. 2021. Regulation of seed dormancy and germination mechanisms in a changing environment. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(3): p.1357. DOI: [10.3390/ijms22031357](https://doi.org/10.3390/ijms22031357) (**Journal**)
- Maleki, K.; Soltani, E.; Oveisi, M.; Gonzalez-Andujar, J.L. A Model for Changes in Germination Synchrony and Its Implements to Study Weed Population Dynamics: A Case Study of Brassicaceae. *Plants* 2023, 12, 233. <https://doi.org/10.3390/plants12020233> (**Journal**)
- Michel, B. E. and M. R. Kaufmann.1973. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiology*, 51: 914-916. DOI: [10.1104/pp.51.5.914](https://doi.org/10.1104/pp.51.5.914) (**Journal**)
- Mirtayebi, M., Bostani, A., Diyanat, M. and Azadi, A. 2021. Effect of application of potassium nanofertilizer on mother plant on seed germination components and initial growth of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) seedling under water stress. *Journal of Seed Research*, 11(2), 40-53. (In Persian) (**Journal**) DOI: [10.30495/JSR.2022.1942613.1224](https://doi.org/10.30495/JSR.2022.1942613.1224) (In Persian)(**Journal**)
- 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. DOI: [10.22099/IAR.2021.39039.1417](https://doi.org/10.22099/IAR.2021.39039.1417) (In Persian)(**Journal**)
- Nezafat, M.H., Naderi, R., Taghvaei, M., Edalat, M., Tahmasebi, A. and Egan, T.P. 2025. Modeling Germination Dynamics and Drought Stress Tolerance in Sorghum Genotypes: Role of Priming and Hydrotime Analysis. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1-16. DOI:[10.1080/00103624.2025.2514164](https://doi.org/10.1080/00103624.2025.2514164) (**Journal**)
- Oveisi, M., Alizadeh, H., Lorestani, S. A., Esmaili, A., Sadeghnejad, N., Piri, R., Gonzalez-Andujar, J. L. and Müller-Schärer, H. 2024. Triangle area model (TAM) for predicting germination: An approach to enhance hydrothermal time model applications. *Current Plant Biology*, 39: 1-15. DOI:[10.1016/j.cpb.2024.100356](https://doi.org/10.1016/j.cpb.2024.100356) (**Journal**)

- Oveisi, M., Amani, M., Pishyar, A., Piri, R., Alizadeh, H., Müller-Schärer, H. and Baskin, C.C., 2025. Modelling the Effects of Warmer, Drier Winters on Dormancy Release and Germination in Summer Annual Weeds. *Weed Research*, 65(6): p.e70047. DOI: [10.1111/wre.70047](https://doi.org/10.1111/wre.70047) (**Journal**)
- Patanè, C., Saita, A., Tubeileh, A., Cosentino, S.L. and Cavallaro, V. 2016. Modeling seed germination of unprimed and primed seeds of sweet sorghum under PEG-induced water stress through the hydrotime analysis. *Acta Physiologiae Plantarum*, 38(5): p.115. DOI: [10.1007/s11738-016-2135-5](https://doi.org/10.1007/s11738-016-2135-5) (**Journal**)
- Pill, W.G., 2020. Low water potential and presowing germination treatments to improve seed quality. In *Seed quality* (pp. 319-359). CRC Press. DOI: [10.4324/9781003075226-10](https://doi.org/10.4324/9781003075226-10) (**Journal**)
- Piri, R., Moradi, A., Salehi, A. and Balouchi, H.R., 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*, 9:11-26. DOI: [10.22034/ijst.2019.109182.1054](https://doi.org/10.22034/ijst.2019.109182.1054) (In Persian)(**Journal**)
- Rosero, A., Granda, L., Berdugo-Cely, J.A., Šamajová, O., Šamaj, J. and Cerkal, R., 2020. A dual strategy of breeding for drought tolerance and introducing drought-tolerant, underutilized crops into production systems to enhance their resilience to water deficiency. *Plants*, 9(10): p.1263. DOI: [10.3390/plants9101263](https://doi.org/10.3390/plants9101263) (**Journal**)
- Yar, A., Ullah, R., Khan, M.N., Iqbal, M., Ercisli, S., Kaplan, A., Olana, D.D., Javed, M.A., Mohamed, E.I., Baowidan, S. and Harakeh, S. 2024. Unveiling the germination patterns of *Alternaria porri* (Ellis) by using regression analysis and hydrothermal time modeling. *Scientific Reports*, 14(1): p.25694. (**Journal**)



Application of the triangle area model in predicting hydrotime coefficient: Quantifying seed germination of shirazi thyme (*Zataria multiflora* Boiss.) in response to moisture potentials

Nafiseh Khalili¹, MohammadReza Jahansooz^{*2}, Mostafa Oveisi³

Received: October 14, 2025

Accepted: December 21, 2025

Abstract

Understanding the moisture requirements of seed germination is essential for predicting ecological distribution and for the domestication and cultivation of medicinal plant species. In this study, germination of Shirazi thyme (*Zataria multiflora*) seeds was evaluated under different osmotic potential levels (0, -0.2, -0.4, -0.6, -0.8, and -1 MPa), and germination was recorded daily for 21 days. The Triangle Area Model (TAM) was used to estimate hydrotime parameters. Subsequently, the Weibull model was fitted to the hydrotime data to predict cumulative germination. Bradford's hydrotime model was also applied to predict cumulative germination and to compare its performance with that of TAM. Based on the model evaluation results, the TAM model, with a coefficient of determination (R^2) of 0.92, a Root Mean Square Error (RMSE) of 0.11, and an Akaike Information Criterion (AIC) of -3317, demonstrated higher efficiency and accuracy in predicting the seed germination of *Zataria multiflora* compared to the Bradford model, which had an R^2 of 0.90, an RMSE of 0.14, and an AIC of -3047. The parameter estimates of the TAM model indicated a maximum germination percentage of 81%, a base water potential of -0.81 MPa, and an optimal water potential of 0.0003 MPa. In contrast, the Bradford model predicted a mean base water potential of -0.66 MPa with a standard deviation of 0.16. Overall, TAM, through its practical parameters for estimating seed moisture requirements such as base and optimal water potentials and maximum germination provided more accurate predictions with minimal bias and demonstrated strong performance in modeling germination responses of Shirazi thyme to varying moisture levels. The satisfactory accuracy and robustness of TAM highlight its potential for estimating germination moisture parameters in plant species.

Keywords: Seed Germination; Triangle Area Model (TAM); Water Stress; *Zataria multiflora*

How to cite this article

Khalili, N., Jahansooz, M.R. and Oveisi, M. 2025. Application of the triangle area model in predicting hydrotime coefficient: Quantifying seed germination of shirazi thyme (*Zataria multiflora* Boiss.) in response to moisture potentials. Iranian Journal of Seed Science and Research, 12(3): 1-11. (In Persian)(Journal) DOI: [10.22124/jms.2025.9455](https://doi.org/10.22124/jms.2025.9455)

COPYRIGHTS

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to the Iranian Journal of Seed Science and Research

The content of this article is distributed under Iranian Journal of Seed Science and Research open access policy and the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY4.0) License. For more information, please visit <http://jms.guilan.ac.ir/>

1. Ph.D Student of Crop Ecology, Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. nafisekhalili@ut.ac.ir

2. Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. jahansuz@ut.ac.ir

3. Associate Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. moveisi@ut.ac.ir

*Corresponding author: jahansuz@ut.ac.ir