به‌زراعی کشاورزی
دوره ۱۸ ■ شماره ۴ ■ زمستان ۱۳۹۵
صفحه‌های ۸۹۲-۸۸۱

مدل‌سازی جوانه‌زنی بذر بادرنجبویه تحت تأثیر دما و پتانسیل آب: مدل هیدروترمال تایم

الهام نوذرپور[۱]، رضا توکل افشاری[۲*]، الیاس سلطانی[۳]، ناصر مجنون حسینی[۴]

۱. فارغ التحصیل کارشناسی‌ارشد علوم و تکنولوژی بذر، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۲. استاد گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۳. استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران
۴. استاد گروه زراعت و اصلاح نباتات، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

تاریخ وصول مقاله:۱۳۹۴/۰۹/۰۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۲۹

چکیده

این آزمایش به منظور بررسی واکنش سرعت جوانه‌زنی بذر بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L.) نسبت به دما و پتانسیل آب صورت گرفت. بذرها در دماهای ۲۰، ۲۳، ۲۵، ۲۷، ۳۰ و ۳۲ درجه سانتی‌گراد و پتانسیل‌های خشکی صفر، ۰/۲-، ۰/۴-، ۰/۶- و ۰/۸- مگاپاسکال در ۳ تکرار در انکوباتور قرار داده شدند. این آزمایش در آزمایشگاه بذر پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، در سال ۱۳۹۳ انجام شد. داده‌ها با استفاده از طرح آماری تجزیه مرکب در قالب طرح کاملاً تصادفی در چند مکان آنالیز شدند. مدل دوتکه‌ای جهت تعیین دماهای کاردینال استفاده شد. دمای پایه، دمای مطلوب و دمای سقف برای جوانه‌زنی بذر بادرنجبویه در شرایط عدم تنش خشکی به‌ترتیب ۱۷/۳۰، ۳۰/۹ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمدند. با کاهش پتانسیل آب دمای پایه به‌تدریج افزایش یافت و در پتانسیل آب ۰/۸- مگاپاسکال به ۲۱/۲۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. دمای مطلوب با کاهش پتانسیل آب به ۰/۶- مگاپاسکال به حدود ۲۸ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. بذرهای بادرنجبویه در دماهای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد در هیچ سطح رطوبتی جوانه نزدند. مقدار ضریب تبیین برای مدل هیدروترمال تایم ۰/۵۵ بود. مقدار هیدروترمال تایم ۷۱/۴۱ مگاپاسگال درجه روز بود که براساس این مدل بذرهای بادرنجبویه برای جوانه‌زنی به ۱۷/۴۱ مگاپاسگال درجه روز نیاز دارند. نتایج این پژوهش می‌تواند برای مطالعات آتی در مورد بیولوژی و اکولوژی بذر گیاه بادرنجبویه مفید باشد.

کلیدواژه‌ها: بادرنجبویه، جوانه‌زنی، دماهای کاردینال، مدل دوتکه‌ای، هیدروترمال تایم

* نویسنده مسئول Email: tavakkol@ut.ac.ir

مقدمه

جوانه زنی بذر و استقرار گیاهچه از مراحل بحرانی و مهم در چرخه زندگی گیاهان می‌باشد [۲۰ و ۲۸]. جوانه زنی بذر یک فرآیند پیچیده فیزیولوژیک است که تحت تأثیر بسیاری از عوامل محیطی نظیر دما، پتانسیل آب، نور، نیترات، دود و سایر فاکتورها قرار می‌گیرد [۱۳، ۱۶، ۲۰ و ۲۶]. دما و پتانسیل آب از اولین تنظیم‌کننده‌های جوانه‌زنی بذر هستند [۱۶ و ۲۶]. در شرایط طبیعی بذرهایی که دارای کمون هستند، توسط الگوهای فصلی کنترل می شوند و این الگوهای فصلی افزایش بقاء بذر را در پی دارند. تأخیر و استقرار نامناسب از معضلات مهم در نواحی است که گیاهان با تنش‌های محیطی مانند تنش خشکی، شوری و دمای پایین مواجه هستند [۱۴]. دما تأثیر اولیه روی خواب و جوانه‌زنی بذرها دارد. پاسخ جوانه زنی بذرها به دما از طریق دماهای کاردینال مشخص می شود [۱۱]: الف) دمای پایه (T_b) که در آن سرعت جوانه زنی صفر است، ب) دمای مطلوب (T_o) که در آن بالاترین سرعت جوانه‌زنی مشاهده می‌شود و ج) دمای سقف (T_c) که در آن سرعت جوانه‌زنی صفر است. درجه حرارت می تواند درصد و سرعت جوانه زنی را از طریق تأثیر زوال، کاهش خواب و کلیه فرآیندهای جوانه زنی تحت تأثیر قرار دهد [۱۴]. علاوه بر دما، پتانسیل آب نیز یکی از عوامل اصلی فعال‌کننده جوانه‌زنی است که قابلیت دسترسی به آب با کاهش پتانسیل اسمزی خاک کاهش می‌یابد [۳ و ۱۶]. پتانسیل اسمزی، تأثیر مستقیمی بر سرعت جذب آب و درنتیجه سرعت جوانه‌زنی گیاه دارد [۱۷].

دما و رطوبت می‌توانند با هم یا به‌طور جداگانه بر درصد و سرعت جوانه‌زنی تأثیر بگذارند. نوعی از مدل‌های ریاضی برای شرح رابطه بین سرعت جوانه زنی و دما روی گیاهان سیاه دانه[1] و گاوزبان[2] [۱]، اسفرزه[3] [۴]، کلزای خودرو [۶] و خردل وحشی [۷] استفاده شده است. امتیاز این توابع این است که پارامترهای این مدل ها دارای مفهوم بیولوژیک مانند دماهای کاردینال و سرعت ذاتی جوانه زنی و سبز شدن هستند. بنابراین، از این روش ها برای به دست آوردن دماهای کاردینال (دماهای پایه، مطلوب و سقف) استفاده شد [۳، ۶، ۷ ، ۹ و ۱۶]. دمای پایه، مطلوب و سقف کلزای خودرو با استفاده از تابع دوتکه‌ای به ترتیب ۲/۷، ۲۵ و ۳۰ درجه سانتی گراد بود [۶]. صفات توده های بذری را می‌توان توسط مدل‌های ترمال تایم و هیدروتایم تجزیه و تحلیل کرد [۱۷]. از مدل‌های ریاضی برای شرح رابطه بین سرعت جوانه‌زنی و دما استفاده می‌شود [۲۳]. دمای زیر مطلوب (بین T_b تا T_o) با استفاده از مدل ترمال تایم زیر مشخص می‌شود (رابطه ۱):

$$\theta_T(g) = (T - T_b)t_g \qquad (۱)$$

در این رابطه، θ_T ثابت ترمال تایم در دمای زیر مطلوب، T دمای پایه برای جوانه زنی، T_b دمای پایه برای جوانه‌زنی و t_g زمان برای جوانه‌زنی درصد خاصی از بذرهاست. مدل های مشابهی برای توصیف جوانه زنی در دمای فوق مطلوب (بین T_o و T_c) گزارش شده است. برای دمای فوق مطلوب مدل زیر پیشنهاد شد [۱۹]:

$$\theta_2(g) = (T_c(g) - T)t_g \qquad (۲)$$

در این رابطه، θ_2 ثابت ترمال تایم در دمای فوق مطلوب است. این مدل توصیف نسبتاً مناسبی برای جوانه‌زنی در دمای فوق مطلوب ارائه داد، اما توضیح فیزیولوژیکی برای این نوع پاسخ (کاهش سرعت جوانه‌زنی) ارائه نمی‌دهد. رفتار جوانه‌زنی بذر در دمای فوق مطلوب به دلیل حساسیت جوانه زنی بذر به پتانسیل آب است [۱۱]. مدل هیدروتایم ارتباط بین پتانسیل آب و

1 . *Nigella sativa* L.
2 . *Borago officinalis* L.
3 . *Plantago psyllium*

سرعت جوانه‌زنی را توصیف می‌کند. ثابت هیدروتایم به صورت زیر معرفی شد [۱۷]:

$$\theta_H = (\psi - \psi_b(g))t_g \qquad (۳)$$

در این رابطه، θ_H ثابت هیدروتایم، ψ پتانسیل واقعی بذر، $\psi_b(g)$ پتانسیل پایه یا آستانه برای جوانه‌زنی کسر خاصی از بذرها (g) و t_g زمان برای خروج ریشه‌چه کسر خاصی از بذرها هستند. زمانی که θ_H ثابت باشد، میزان t_g به طور متناسب با ψ کاهش می یابد و به $\psi_b(g)$ نزدیک می‌شود. این مدل می‌تواند مدت زمان جوانه‌زنی را طی کاهش پتانسیل نشان دهد و همزمان کاهش سرعت جوانه‌زنی و کاهش درصدی پتانسیل را محاسبه می‌کند [۱۷]. مدل‌های ترمال تایم و هیدروتایم با هم ترکیب شده‌اند و از مدل هیدروترمال تایم برای توصیف ترکیب اثر دما و رطوبت بر جوانه‌زنی استفاده شد [۱۷، ۲۲ و ۲۳].

$$\theta_{HT} = (\psi - \psi_{b(g)})(T - T_b)t_g \qquad (۴)$$

در این رابطه، θ_{HT} ثابت هیدروترمال تایم می باشد [۱۷]. از مدل هیدروترمال تایم برای مقایسه واکنش جوانه‌زنی گونه‌های مختلفی به دما و رطوبت آب استفاده شده است [۳، ۵، ۶، ۱۶، ۲۵ و ۲۶]. پس از کمی سازی ترکیب اثر دما و رطوبت، پتانسیل پایه جوانه‌زنی کلزای خودرو ۱/۴۳- و مقدار هیدروترمال تایم برای دماهای زیر و فوق مطلوب به‌ترتیب ۳۶/۲ و ۴۲/۹ مگاپاسکال در درجه روز بود [۶]. دمای پایه جوانه‌زنی برای گاوپنبه، ارقام ویلیامز و دی پی ایکس به ترتیب ۳/۹، ۰/۳ و ۵/۲ درجه سانتی‌گراد، پتانسیل پایه برای هر ۳ گیاه ۰/۹- مگاپاسکال و مقدار هیدروترمال تایم به‌ترتیب ۲۶/۷، ۲۶/۵ و ۲۷/۳ مگاپاسکال در درجه روز مشاهده شد [۳]. گیاهان دارویی مخازن غنی از مواد مؤثره اساسی بسیاری از داروها می‌باشند. گیاه بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L.) از تیره نعناعیان است و سرزمین اصلی آن نواحی مدیترانه می‌باشد. این گونه گیاهی علفی چندساله و دارای خاصیت آنتی اکسیدانی است و ترکیبات معطر خاص موجود در اسانس آن در صنایع دارویی، بهداشتی و غذایی کاربرد فراوانی دارد. بادرنجبویه سازگاری نسبتاً خوب با شرایط آب و هوایی ایران دارد [۲]. باتوجه به اینکه اطلاعات زیادی در مورد اثرات متقابل دما و پتانسیل آب بر جوانه‌زنی بادرنجبویه وجود نداشت، لذا هدف از انجام پژوهش حاضر، تعیین دماهای کاردینال، پتانسیل پایه، مقادیر ترمال تایم، هیدروتایم و هیدروترمال تایم برای گیاه دارویی بادرنجبویه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به منظور بررسی اثر دما و پتانسیل آب بر جوانه‌زنی بذر گیاه دارویی بادرنجبویه در آزمایشگاه بذر پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران (عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۹ دقیقه شرقی)، در سال ۱۳۹۳ انجام گرفت. همه تیمارهای دمایی همزمان و در اسفند ۱۳۹۳ آغاز شدند. ۳ تکرار ۵۰ بذری از بادرنجبویه در دامنه دمایی ۵ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد در ترکیب با پتانسیل آب صفر (شاهد)، ۰/۲-، ۰/۴-، ۰/۶- و ۰/۸- مگاپاسکال مورد آزمون جوانه‌زنی قرار گرفتند. طرح آماری به صورت تجزیه مرکب در قالب طرح کاملاً تصادفی در چند مکان بود که در آن هر دما به عنوان یک مکان متفاوت درنظر گرفته شد، به‌طوری‌که در هر انکوباتور یک دما اعمال گردید و به عنوان یک مکان لحاظ گردید. در هر انکوباتور از طرح پایه کاملاً تصادفی با ۳ تکرار استفاده شد. بنابراین، در هر ژرمیناتور ۱۵ پتری دیش استفاده شد. سطوح مختلف تنش خشکی از طریق حل کردن مقادیر مشخصی پلی اتیلن گلایکول (۶۰۰۰) در آب مقطر برای ایجاد پتانسیل براساس فرمول ارائه شده توسط میچل و کافمن ایجاد شدند [۲۱]. در این آزمایش، از آب مقطر برای ایجاد شرایط بدون تنش

(شاهد) استفاده شد. ۲۴ ساعت پیش از شروع آزمایش کاغذهای صافی در محلول های مختلف تولید شده قرار داده شدند.

پیش از شروع آزمایش، بستر بذر (کاغذ واتمن) در اتوکلاو در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲ ساعت استریل شد. ۵۰ عدد بذر به مدت یک دقیقه با محلول هیپوکلرید سدیم ۱۰ درصد ضدعفونی شده و پس از شستشو با آب مقطر، به روی کاغذ صافی در داخل پتری دیش ها منتقل شدند. برای تیمارهای خشکی مقادیر ۹ میلی‌لیتر از هر محلول به هر پتری‌دیش اضافه شد. سپس، ۱۵ عدد پتری‌دیش به هر ژرمیناتور با دماهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۳، ۲۵، ۲۷، ۳۰، ۳۲ و ۳۵ درجه سانتی گراد و شرایط کامل روشنایی منتقل شد. شمارش بذرهای جوانه زده از ۲۴ ساعت پس از کشت تا ۲۱ روز پس از آن در یک ساعت مشخص انجام شد و شمارش تا ۲۱ روز پس از کشت ادامه داشت [۱۸]. ملاک جوانه‌زنی، خروج ریشه‌چه حداقل ۲ میلی متری بود. برای محاسبه درصد و سرعت جوانه‌زنی بذرها از برنامه Germin استفاده شد [۸] که این برنامه D_{10} (یعنی مدت زمانی که طول می‌کشد تا جوانه‌زنی به ۱۰ درصد برسد) و D_{20} (یعنی مدت زمانی‌که طول می‌کشد تا جوانه‌زنی به ۲۰ درصد برسد) را محاسبه می‌کند. این برنامه پارامترهای یاد شده را برای هر تکرار و هر تیمار بذری از طریق درون‌یابی[1] منحنی افزایش جوانه‌زنی در مقابل زمان محاسبه می‌کند. سرعت جوانه زنی (در ساعت) از طریق فرمول (۱) محاسبه شد [۸]. از مدل (۲) برای کمی‌سازی واکنش سرعت جوانه‌زنی به دما استفاده شد [۲۴]:

$$R_{20} = 1/D_{20} \qquad (۱)$$

$$R_{20} = f(T)R_{max} \qquad (۲)$$

در این رابطه، f(T) تابع دما می باشد که از صفر در دمای پایه و سقف تا یک در دمای مطلوب تغییر می‌کند، R_{max} حداکثر سرعت ذاتی جوانه‌زنی در دمای مطلوب است. بنابراین، $1/R_{max}$ حداقل ساعت تا جوانه زنی را در دمای مطلوب نشان می‌دهد. تابع دمایی دوتکه‌ای[2] با علامت اختصاری (S) برای بررسی واکنش جوانه زنی بذرهای بادرنجبویه به دما در پتانسیل های مختلف به داده‌ها برازش داده شد [۱۶، ۲۳ و ۲۴].

$$f(T) = (T - T_b) / (T_o - T_b) \qquad \text{if } T_b < T \le T_o \qquad (۳)$$

$$f(T) = (T_c - T) / (T_c - T_o) \qquad \text{if } T_o < T < T_c$$

$$f(T) = 0 \qquad \text{if } T \le T_b \text{ or } T \ge T_c$$

در این رابطه، T دما، T_b دمای پایه، T_oدمای مطلوب، T_c دمای سقف برحسب درجه سانتی‌گراد می‌باشد. پارامترها با استفاده از رگرسیون غیرخطی (سرعت جوانه زنی به عنوان y و دما به عنوان x) و روش کمترین توان های دوم با رویه NLIN در نرم افزار آماری SAS محاسبه شدند. مدل ترمال تایم[3] (TT) در دماهای زیر (۴) و فوق (۵) مطلوب به داده‌ها برازش داده شد [۱۴].

$$TT_{sub} = (T - T_b)t_g \qquad (۴)$$

$$TT_{supra} = (T_c - T)t_g \qquad (۵)$$

در این رابطه ها، T دمای محیط، T_b وT_c دماهای پایه و سقف هستند و t_g زمان تا جوانه زنی برای g است که g درصد خاصی از جوانه‌زنی می‌باشد. مدل هیدروتایم[4] که به داده‌ها برازش داده شد، به صورت زیر می‌باشد [۱۴]:

$$HT = (\psi - \psi_{b(g)})t_g \qquad (۶)$$

$$GR_{(g)} = 1/t_g = (\psi - \psi_b(g)) / \theta_H \qquad (۷)$$

در رابطه (۷)، θ_H ثابت هیدروتایم (مگاپاسکال در روز)، ψ پتانسیل آب محیط (مگاپاسکال)، $\psi_{b(g)}$ پتانسیل پایه برای جوانه‌زنی کسری از جمعیت بذرها (g) و tg

1 - Interpolation

2 . Segmented
3 . Termal Time
4 . Hydrotime

زمان (روز) برای جوانه‌زنی g می باشد. با این فرضیه که تنوع پتانسیل پایه در توده بذری دارای توزیع نرمال می‌باشد، پارامترهای هیدروتایم با استفاده از مدل پروبیت (۸) برآورد شدند [۱۵، ۱۶، ۱۹ و ۲۶] که در این رابطه $\psi_b(50)$ پتانسیل پایه برای جوانه زنی ۵۰ درصد بذرها و $\sigma_{\psi b}$ انحراف معیار پتانسیل آب پایه می‌باشند.

$$\text{probit}(g) = [\psi - (\theta_H / tg) - \psi_b(50)] / \sigma_{\psi b} \qquad (۸)$$

$$\text{probit}(g) = \{[\psi - \theta_{HT} / (T - T_b)t_g] - \psi_b(50)\} / \sigma_{\psi b} \qquad (۹)$$

مدل هیدروترمال تایم[1] از رابطه (۹) به دست آمد [۱۵]. در این رابطه، θ_{HT} ثابت هیدروترمال تایم می‌باشد. همه این مدل‌ها با استفاده از نرم افزار Excel به داده‌ها برازش داده شدند و برای رسم نمودارها و جدول ها نیز از همین نرم‌افزار استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج به‌دست آمده واکنش سرعت جوانه‌زنی بذر بادرنجبویه در مقابل دما را برای هر پتانسیل آب به‌طور جداگانه نشان می‌دهد (شکل ۱). سرعت و درصد جوانه‌زنی نیز به شدت تحت تأثیر دما و پتانسیل آب قرار گرفتند. بیشترین و کمترین سرعت جوانه زنی در دمای ۳۰ و ۲۰ درجه سانتی گراد مشاهده شد و به ترتیب ۰/۰۲۴۲ و ۰/۰۰۱۶ بود. شایان ذکر است که در دماهای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد هیچ‌یک از بذرها در هیچ سطح رطوبتی جوانه نزدند. دماهای ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه سانتی گراد کمتر از دمای پایه بادرنجبویه بوده و بنابراین هیچ جوانه‌زنی در این دماها مشاهده نشد. در واقع بذرها در دماهای کمتر از دمای پایه و یا بیشتر از دمای سقف هیچ جوانه زنی نخواهند داشت [۱۴]. تخمین دماهای کاردینال و R_{max} با استفاده از مدل دوتکه ای در جدول (۱) نشان داده شده است. باتوجه به مدل دوتکه ای دمای پایه بادرنجبویه در پتانسیل آب صفر حدود ۱۷/۳۰ درجه سانتی‌گراد بود و با کاهش پتانسیل آب دمای پایه به تدریج افزایش یافت و در پتانسیل آب ۰/۸- مگاپاسکال به حدود ۲۱/۱۵ درجه سانتی گراد رسید. تغییرات مشاهده شده در دمای مطلوب نسبت به تغییر پتانسیل آب کمتر از دمای پایه بود و در دامنه ای از پتانسیل های آب بین ۲۸/۱ تا ۳۰/۹۴ درجه سانتی گراد تغییر داشت (جدول ۱). دمای سقف با کاهش پتانسیل آب از صفر تا ۰/۶- مگاپاسکال تغییر معنی‌داری نداشت، ولی کاهش بیشتر پتانسیل آب از ۰/۶- به ۰/۸- مگاپاسکال موجب کمی افزایش در دمای سقف از ۳۵ به ۳۷ درجه سانتی‌گراد شد. حداکثر سرعت ذاتی جوانه‌زنی با کاهش پتانسیل آب به‌طور کاملاً معنی‌داری کاهش یافت و از حدود ۰/۰۲۵۵ (بر ساعت) در شرایط عدم تنش خشکی به حدود ۰/۰۰۴۸۷ (بر ساعت) در تنش خشکی ۰/۸- مگاپاسکال کاهش یافت (جدول ۱).

مدل ترمال تایم به خوبی قادر به پیش‌بینی جوانه‌زنی بذر بادرنجبویه بود، به‌طوری‌که مقادیر ضریب تبیین در دماهای زیرمطلوب بین ۰/۷۱ تا ۰/۹۹ و در دماهای فوق‌مطلوب برابر ۰/۹۹ بود. ترمال تایم در دماهای زیرمطلوب با کاهش پتانسیل آب تا ۰/۴- مگاپاسکال، تغییر معنی‌داری نداشت، ولی کاهش بیشتر پتانسیل آب تا ۰/۸- مگاپاسکال منجر به افزایش شدید ترمال تایم تا حدود ۵۸ درجه سانتی‌گراد در روز شد. در دماهای زیرمطلوب درصد جوانه‌زنی بذرها به سرعت کاهش یافت و از مقدار ۷۰ به ۲۹ درصد رسید (جدول ۱). در دماهای فوق‌مطلوب با کاهش پتانسیل آب ترمال تایم به‌طور معنی‌داری تغییر کرد و از ۶/۶ درجه سانتی‌گراد در روز (در پتانسیل آب صفر مگاپاسکال) به ۳۰/۲ درجه سانتی گراد در روز (در پتانسیل آب ۰/۸- مگاپاسکال) رسید. درصد جوانه‌زنی در دماهای فوق‌مطلوب برای بادرنجبویه بیشتر از درصد جوانه‌زنی در دماهای زیرمطلوب با پتانسیل آب یکسان بود (جدول ۱).

1 . Hydrotermal Time Model

جدول ۱ . تخمین پارامترهای مدل ترمال تایم در توصیف جوانه‌زنی بذر بادرنجبویه در دامنه‌ای از پتانسیل آب (مگاپاسکال) در هر پتانسیل آب بذرها در دماهای ۲۰، ۲۳، ۲۵، ۲۷، ۳۰ و ۳۲ درجه سانتی‌گراد مورد آزمون جوانه‌زنی قرار گرفتند.

پتانسیل آب (MPa)	T_b (°C)	T_o (°C)	T_C (°C)	R_{max} (per h)	دماهای زیر مطلوب				دماهای فوق مطلوب			
					GR (%)	TT(50) (°C day)	R^2	GR (%)	TT(50) (°C day)	R^2
۰	۱۷/۳۰ ± ۰/۴۱۰	۳۰/۹۴ ± ۰/۱۴۱	۳۵/۰۰ ± ۰/۱۱	۰/۰۲۵۵ ± ۰/۰۰۰۵۳۱	۷۰/۷ ± ۱۲/۷	۲۲/۳ ± ۰/۶۶	۰/۹۷	۹۰/۷ ± ۰/۰۰۰۱	۶/۶ ± ۰/۰۰۰۰۰۸	۰/۹۹
-۰/۲	۱۹/۶۳ ± ۰/۸۲۹	۲۸/۵۰ ± ۰/۶۳۶	۳۵/۷۲ ± ۰/۸	۰/۰۱۸۵ ± ۰/۰۰۱۴۶	۵۲/۵ ± ۱۸/۰۷	۲۰/۱ ± ۲/۰۸	۰/۹۹	۸۱/۷ ± ۱	۱۶/۰۵ ± ۴/۹	۰/۹۹
-۰/۴	۲۰/۹۰ ± ۰/۵۵۵	۲۸/۱۰ ± ۰/۶۲۶	۳۵/۵۸ ± ۰/۸۴	۰/۰۱۳۳ ± ۰/۰۰۱۱۴	۵۲/۹ ± ۱۹/۲	۲۲/۳ ± ۴/۷	۰/۹۹	۶۸ ± ۸/۱	۲۳/۳ ± ۵/۹	۰/۹۹
-۰/۶	۲۱/۰۰ ± ۰/۵۳۶	۲۸/۱۴ ± ۰/۶۱۰	۳۵/۴۵ ± ۰/۷۹	۰/۰۱۰۱ ± ۰/۰۰۰۸۵۴	۵۸/۳ ± ۱/۷	۲۹/۱ ± ۵/۷	۰/۹۹	۴۵/۳ ± ۲/۷	۳۰/۰۷ ± ۶/۱	۰/۹۹
-۰/۸	۲۱/۲۵ ± ۱/۵۲۶	۲۹/۶۴ ± ۱/۶۱۷	۳۷/۰۹ ± ۲/۸۳	۰/۰۰۴۸۷ ± ۰/۰۰۱۰۲	۲۹ ± ۲/۹	۵۸/۱ ± ۱۱/۷	۰/۷۱	-	-	-

T_o، T_b و T_c دماهای پایه، مطلوب و سقف (درجه سانتی‌گراد) هستند، R_{max} حداکثر سرعت ذاتی جوانه‌زنی است (برحسب ساعت)، GR (%) میانگین درصد جوانه‌زنی در هر پتانسیل آب، R_2 ضریب تبیین، $TT_{(50)}$ ترمال تایم برای ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی (درجه سانتی‌گراد روز) که در دماهای فوق (supra) و زیر (Sub) مطلوب نشان داده شده است.

شکل ۱ . تابع دمایی دوتکه‌ای مورد استفاده برای توصیف سرعت جوانه‌زنی بادرنجبویه در مقابل دما در دامنه‌ای از پتانسیل‌های آب مختلف (مگاپاسکال). نقاط داده‌های واقعی و خطوط مدل را نشان می‌دهند.

مدل ترمال تایم به خوبی قادر به پیش‌بینی جوانه‌زنی بذر بادرنجبویه بود، به‌طوری‌که مقادیر ضریب تبیین در دماهای زیرمطلوب بین ۰/۷۱ تا ۰/۹۹ و در دماهای فوق‌مطلوب برابر ۰/۹۹ بود. ترمال تایم در دماهای زیرمطلوب با کاهش پتانسیل آب تا ۰/۴- مگاپاسکال، تغییر معنی‌داری نداشت، ولی کاهش بیشتر پتانسیل آب تا ۰/۸- مگاپاسکال منجر به افزایش شدید ترمال تایم تا حدود ۵۸ درجه سانتی‌گراد در روز شد. در دماهای زیرمطلوب درصد جوانه‌زنی بذرها به سرعت کاهش یافت و از مقدار ۷۰ به ۲۹ درصد رسید (جدول ۱). در دماهای فوق‌مطلوب با کاهش پتانسیل آب ترمال تایم به‌طور معنی‌داری تغییر کرد و از ۶/۶ درجه سانتی‌گراد در روز (در پتانسیل آب صفر مگاپاسکال) به ۳۰/۲ درجه سانتی گراد در روز (در پتانسیل آب ۰/۸- مگاپاسکال) رسید. درصد جوانه‌زنی در دماهای فوق‌مطلوب برای بادرنجبویه بیشتر از درصد جوانه‌زنی در دماهای زیرمطلوب با پتانسیل آب یکسان بود (جدول ۱).

درصد جوانه‌زنی تجمعی و مدل هیدروتایم برازش داده شده به داده ها برای هر دما به صورت جداگانه در شکل (۲) نشان داده شده است. زمان تا جوانه‌زنی پیش‌بینی شده در پتانسیل‌های آب مختلف تقریباً به خوبی به داده‌های واقعی برازش داده شدند و مقادیر ضریب تبیین برای این برازش‌ها بین ۰/۷۶ تا ۰/۹۵ تغییر داشت (جدول ۲). مقادیر پیش بینی شده پتانسیل پایه و انحراف معیار پتانسیل پایه و هیدروتایم برای ۵۰ درصد حداکثر جوانه‌زنی بین دماهای مختلف تفاوت داشت (جدول ۲). پتانسیل پایه برای جوانه زنی بین دماهای مختلف متغیر بود، مقدار پتانسیل پایه برای جوانه‌زنی بذر بادرنجبویه بین ۰/۰۸۸ مگاپاسکال (دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد) تا ۰/۷۰۴- مگاپاسکال (دمای ۳۲ درجه سانتی گراد) تغییر داشت. ثابت هیدروتایم با افزایش دما از ۲۰ به ۳۲ درجه سانتی‌گراد از ۱۹/۲۵ به ۴۷/۴۷ مگاپاسکال در روز افزایش یافت (جدول ۲). کمترین مقدار پتانسیل پایه در دمای ۲۷ و بیشترین مقدار هیدروتایم در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد.

شکل ۲ . جوانه‌زنی تجمعی بذرهای بادرنجبویه که در دامنه‌ای از پتانسیل آب و دماهای ۲۰، ۲۳، ۲۵، ۲۷، ۳۰ و ۳۲ درجه سانتی‌گراد مورد آزمون جوانه‌زنی قرار گرفته بودند. علایم درصد جوانه‌زنی مشاهده شده است و خطوط جوانه‌زنی تجمعی پیش‌بینی شده با مدل هیدروتایم براساس پارامترهای جدول (۲) را نشان می‌دهد.

درصد جوانه زنی بادرنجبویه با افزایش دما از ۲۰ تا ۲۷ درجه سانتی‌گراد افزایش معنی‌داری داشت و بین ۸ تا ۶۶ درصد تغییر داشت و با افزایش دما از ۲۷ به ۳۲ درجه سانتی‌گراد، درصد جوانه‌زنی به ۶۲ درصد کاهش یافت (جدول ۲ و شکل ۲). پارامترهای مدل هیدروترمال تایم در جدول (۳) نشان داده شده است. مقدار ضریب تبیین برای مدل هیدروترمال تایم ۰/۵۵ بود. مقدار هیدروترمال ۷۱/۴۱ مگاپاسگال درجه روز بود که براساس این مدل، بذرهای بادرنجبویه برای جوانه‌زنی به ۷۱/۴۱ مگاپاسگال درجه روز نیاز دارند.

جدول ۲ . تخمین پارامترهای مدل هیدروتایم در ۶ دما (۲۰، ۲۳، ۲۵، ۲۷، ۳۰ و ۳۲ درجه سانتی‌گراد) که جوانه‌زنی بذر بادرنجبویه را در دامنه‌ای از پتانسیل‌های آب شرح می‌دهد.

دما (^{o}C)	$\Psi_{b(50)}$ (MPa)	$\sigma_{\psi b}$	$HT_{(50)}$ (MPa.day)	R^2	GR (%)
۲۰	۰/۰۸۸	۰/۲۰۲	۱۹/۲۵	۰/۹۱	۱۱/۱۳ ± ۷/۹
۲۳	−۰/۱۹۷	۰/۲۹۱	۳۹/۰۰	۰/۹۴	۳۷/۱ ± ۱۲/۳
۲۵	−۰/۶۹۶	۰/۳۳۱	۵۸/۲۵	۰/۹۵	۵۵/۷ ± ۱۳/۴
۲۷	−۰/۷۸۱	۰/۳۵۸	۵۵/۷۲	۰/۸۹	۶۶/۷ ± ۱۰/۰۶
۳۰	−۰/۶۴۹	۰/۳۲۰	۵۳/۰۹	۰/۹۳	۵۳/۹ ± ۱۴/۱
۳۲	−۰/۷۰۴	۰/۳۸۸	۴۷/۴۷	۰/۷۶	۶۲/۶۸ ± ۱۰/۴

$\Psi_{b(50)}$ میانگین پتانسیل آب پایه، $\sigma_{\psi b}$ انحراف معیار پتانسیل آب پایه، $HT_{(50)}$ ثابت هیدروتایم برای 50 درصد حداکثر جوانه‌زنی، R^2 ضریب تبیین و GR(%) میانگین درصد جوانه‌زنی برای هر دما.

جدول ۳ . تخمین پارامترهای مدل هیدروترمال تایم که جوانه‌زنی بذر بادرنجبویه را در دامنه‌ای از پتانسیل آب و دما توصیف می‌کند.

HTT (MPa° day)	$\Psi_{b(50)}$ (MPa)	$\sigma_{\psi b}$	R^2	GR (%)
۷۱/۴۱	**−۰/۶۲۵۳**	**۰/۴۵۰**	**۰/۵۵**	**۴۳/۲۰**

$\Psi_{b(50)}$ میانگین پتانسیل آب پایه، $\sigma_{\psi b}$ انحراف معیار پتانسیل آب پایه، R^2 ضریب تبیین، GR(%) میانگین درصد جوانه‌زنی برای هر دما و رطوبت، HTT(50) (ثابت هیدروترمال تایم.

پژوهش‌های مختلفی در مورد اثرات متقابل دما و پتانسیل آب بر جوانه زنی در گیاهان مختلف صورت گرفته است. بذرهای خردل وحشی (*Sinapis arvensis* L.) در دمای پایه کمتر از ۲/۸− درجه سانتی‌گراد قادر به جوانه‌زنی نبوده و تنش خشکی دمای پایه برای جوانه زنی را تا حدود ۱ درجه سانتی گراد افزایش داد [۷]. دمای پایه بذرهای کلزای خودرو ۲/۷ درجه سانتی‌گراد بود و تنش خشکی توانست دمای پایه برای جوانه زنی را تا حدود ۷ درجه سانتی‌گراد افزایش دهد. دمای مطلوب برای جوانه‌زنی این گیاه حدود ۲۵ درجه سانتی‌گراد بود و در خشکی شدید ۰/۸− مگاپاسکال به حدود ۲۰ درجه سانتی گراد کاهش یافت [۶]. ثابت هیدروتایم تنوع گسترده‌ای بین توده‌های بذری پنبه داشت و بین ۱۴/۷ تا ۱۰۵/۵ مگاپاسکال درجه ساعت بود [۲۶].

دلایل مختلفی برای کاهش سرعت و درصد جوانه‌زنی در دماهای بالاتر از مطلوب ارائه شده است. پیشنهاد شده است که در دماهای بالاتر از مطلوب، تاخوردگی پروتئین‌ها، اختلال در غشاءها و اثرات متقابل با خشکی وجود دارد [۱۴]. مکانیسم‌های ممکن دیگر در این کاهش به کاهش کارایی متابولیکی در دماهای بالاتر از مطلوب

برمی‌گردد [۲۹]. رشد گیاهچه در مرحله جوانه زنی دارای دو مرحله متابولیکی مجزاست: ۱ - هیدرولیز آنزیمی مواد ذخیره ای و تولید قندهای ساده، اسیدهای آمینه، اسیدهای چرب، مواد معدنی و ATP و ۲ - تولید انرژی و سنتز بافت های جدید (گیاهچه) با استفاده از مواد هیدرولیز شده، در طی مرحله اول آنزیم‌های هیدرولیتیک نظیر آلفا و بتاآمیلاز، ریبونوکلئاز، اندوبتاگلوکاناز، هیدرولاز و فسافاتاز عمل می کنند [۲۲ و ۲۳]. به نظر می رسد در جوانه‌زنی تحت تنش خشکی به دلیل افت پتانسیل اسمزی، فرآیند جذب آب مختل شده و در ادامه نیز فعالیت آنزیم آلفاآمیلاز بازداری می‌شود [۱۰]. وقوع تنش خشکی در مرحله جوانه‌زنی فعالیت برخی آنزیم های پروتئولیتیکی شبه تریپسینی که در تجزیه و هیدرولیز پروتئین‌ها و پلی‌ساکاریدها دخیل‌اند، بازداری می شود [۱۲] و احتمالاً این امر یکی از دلایل کاهش جوانه‌زنی تحت آن شرایط می‌باشد.

تحقیقات مختلفی برای تعیین ضریب هیدروترمال تایم در گیاهان مختلف صورت گرفته است. ثابت هیدروترمال تایم در کلزای خودرو در دمای زیرمطلوب ۲/۷۶ و در دماهای فوق مطلوب ۴/۹۲ مگاپاسکال در درجه روز بود و میزان ضریب تبیین نسبتاً بالا بوده و بین ۰/۹۶-۰/۹۴ گزارش شد [۶]. ثابت هیدروترمال تایم برای سیب‌زمینی در دماهای زیرمطلوب و فوق‌مطلوب به‌ترتیب ۲۰۹۰ و ۱۳۰ مگاپاسکال درجه ساعت گزارش شد [۱۱]. ضرایب هیدروترمال تایم برای خردل وحشی در دماهای زیر و فوق مطلوب به ترتیب ۲۰۷ و ۲۷۳ مگاپاسکال درجه روز بود [۷]. در مطالعه‌ای روی دو گونه گوجه فرنگی مشاهده شد که در هر دو گونه با افزایش پتانسیل آب ثابت هیدروترمال تایم کاهش می‌یابد و از ۲۸۷ به ۲۷ مگاپاسکال درجه ساعت می رسد [۱۵]. مقدار هیدروترمال تایم برای گاو پنبه و سویا ارقام ویلیامز و دیپایکس به‌ترتیب ۲۶/۵، ۲۶/۷ و ۲۷/۳ مگاپاسکال در درجه سانتی‌گراد در روز گزارش شد [۳].

نتیجه‌گیری

تاکنون تحقیقی در مورد مدل هیدروترمال تایم بادرنجبویه صورت نگرفته است. بذرهای بادرنجبویه در دمای پایه کمتر از ۱۷/۳۰ درجه سانتی‌گراد قادر به جوانه‌زنی نبودند و تنش خشکی دمای پایه برای جوانه‌زنی را تا حدود ۲۱/۲۵ درجه سانتی‌گراد افزایش داد. دمای مطلوب برای جوانه‌زنی بادرنجبویه تحت تنش خشکی حدود ۲۸ درجه سانتی گراد بود، درحالی که در پتانسیل شاهد ۳۰ درجه سانتی گراد بود. دمای سقف بادرنجبویه حدود ۳۵ درجه سانتی‌گراد بود و تحت تأثیر تنش خشکی قرار نگرفت. در دماهای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد هیچ‌یک از بذرها در هیچ سطح رطوبتی جوانه نزدند. دماهای ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه سانتی گراد کمتر از دمای پایه بادرنجبویه بوده و بنابراین هیچ جوانه زنی در این دماها مشاهده نشد. میانگین ترمال تایم موردنیاز برای جوانه زنی بادرنجبویه در دماهای زیر و فوق‌مطلوب به ترتیب حدود ۳۰ و ۱۹ درجه سانتی‌گراد بر درجه روز بود. میانگین پتانسیل پایه برای جوانه‌زنی بادرنجبویه در دماهای مختلف حدود ۰/۶۲- مگاپاسکال بود. کمترین پتانسیل پایه برای جوانه زنی بادرنجبویه در دمای ۲۷ درجه سانتی‌گراد (۰/۷۸۱- مگاپاسکال) و بیشترین پتانسیل پایه برای جوانه‌زنی بادرنجبویه در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد (۰/۰۸۸ مگاپاسکال) حاصل شد. هیدروتایم برای جوانه‌زنی این گونه در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد حدود ۱۹/۲۵ مگاپاسکال در روز بود و با افزایش دما تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد حدود ۵۸/۲۵ مگاپاسکال در روز افزایش یافت، اما با افزایش دما از ۲۵ به ۳۲ درجه سانتی گراد ثابت هیدروتایم کاهش (۴۷/۴۷ مگاپاسکال در روز) یافت. ضریب هیدروترمال تایم نیز برای بادرنجبویه تعیین شد که برابر با ۷۱/۴۱ مگاپاسکال درجه روز بود.

منابع

۱. اکرم قادری ف (۱۳۸۷) مطالعه نمو کیفیت بذر، جوانه‌زنی، طول عمر و زوال بذر در برخی گیاهان دارویی: کدو تخم‌کاغذی (*Cucurbita pepo. convar.* var. *styriaca*)، سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.) و گاوزبان (*Borago officinalis* L.). دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. گرگان. رساله دکتری.

۲. امیدبیگی (۱۳۹۲) تولید و فرآوری گیاهان دارویی. جلد سوم، انتشارات به نشر، مشهد. ۴۰۰ ص.

۳. بخشنده ا، غدیریان ر، گالشی س و سلطانی ا (۱۳۹۰) مدل‌سازی جوانه‌زنی سویا (*Glycine max* L.) و گاوپنبه (*Abutilion thephrasti med.*) در واکنش به اثرات متقابل دما و پتانسیل آب. پژوهش های تولید گیاهی. ۱۸(۲): ۴۸-۲۹.

۴. تبریزی ل، نصیری محلاتی م و کوچکی ع (۱۳۸۳) ارزیابی درجه حرارت‌های حداقل، بهینه و حداکثر جوانه‌زنی اسفرزه و پسیلیوم. پژوهش‌های زراعی ایران. ۲(۲): ۱۵۰-۱۴۳.

۵. سلطانی ا (۱۳۹۰) اکولوژی بانک بذر کلزای خودرو و خردل وحشی: تولید بذر، توزیع عمودی، تغییرات فصلی کمون، جوانه‌زنی و سبز شدن. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. گرگان. رساله دکتری.

۶. سلطانی ا، اویسی م، سلطانی ا، گالشی س، قادری فر ف و زینلی ا (۱۳۹۳) مدل‌سازی جوانه‌زنی کلزای خودرو تحت تأثیر دما و پتانسیل آب: مدل هیدروترمال تایم. پژوهش علف‌های هرز. ۶(۱): ۳۸-۲۳.

۷. سلطانی ا، سلطانی ا، گالشی س، قادری‌فر ف و زینلی ا (۱۳۹۲) مدل‌سازی جوانه‌زنی خردل وحشی تحت تأثیر دما و پتانسیل آب: مدل هیدروترمال تایم. پژوهش‌های تولید گیاهی. ۲۰(۱): ۳۴-۱۹.

۸. سلطانی ا، سلطانی ا و اویسی م (۱۳۹۲) مدل سازی اثر زوال بذر بر سبز شدن گندم در تنش خشکی: بهینه‌ساز برنامه Germin در پیش‌بینی الگوی سبز شدن. به‌زراعی. ۱۵(۲): ۱۶۰-۱۴۷.

۹. نوذری نژاد م، زینلی ا، سلطانی ا، سلطانی ا و کامکار ب (۱۳۹۲) کمی سازی واکنش جوانه‌زنی گندم در واکنش به دما و پتانسیل آب. تولید گیاهان زراعی. ۶(۴): ۱۱۷-۱۳۵.

10. Afzal I (2005) Seed enhancements to induced salt tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.). Agricultural University of Faisalabad, Pakistan, Ph.D. Dissertation.

11. Alvarado V and Bradford KJ (2002) A hydrothermal time model explains the cardinal temperatures for seed germination. Plant, Cell and Environment. 25(8): 1061-1069.

12. Ashraf M and Rauf H (2001) Inducing salt tolerate in maize (*Zea mays* L.) throght seed priming with chloride salts: growth and ion transport at early growth stages. Acta Physiologiae Plantarum. 23: 407-414.

13. Baskin CC and Baskin JM (2001) Seeds: ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination. Academic Press, San Diego, California, 666p.

14. Bradford KJ (2002) Applications of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. Weed Science. 50(2): 248-260.

15. Dahal P and Bradford KJ (1994) Hydrothermal time analysis of tomato seed germination at suboptimal temperature and reduced water potential. Seed Science Reseach. 4(2): 71-80.

16. Farzane S and Soltani E (2011) Relationship between hydrotime parameters and seed vigor in sugar beet. Seed Science and Biotechnology. 5(1): 7-10.

17. Gummerson RJ (1986) The effect of constant temperature and osmotic potential on the germination of sugar beet. Journal of Experimental Botany. 37(6): 729-714.

18. International Seed Testing Association (ISTA) (2009) Handbook of Vigor Test Methods. 3th Ed. Zurich, Switzerland.

19. Larsen SU, Bailly C, Come D and Corbineau F (2004) Use of the hydrothermal time model to analyse interacting effects of water and temperature on germination of three grass species. Seed Science Research. 14(1): 35-50.

20. Mesgaran MB, Mashhadi HR, Alizadeh H, Hunt J, Young KR and Cousens RC (2013) Importance of distribution function selection for hydrothermal time models of seed germination. Weed Research. 53: 89-101.

21. Michel BE and Kaufmann MR (1973) The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. Plant Physiology. 51(5): 914-916.

22. Soltani A, Galeshi S, Zeinali E and Latifi N (2002) Germination, seed reserve utilization and seedling growth of chickpea as affected by salinity and seed size. Seed Science and Technology. 30: 51-60.

23. Soltani A, Robertson MJ, Torabi B, Yousefi-Daz M and Sarparast R (2006) Modeling seedling emergence in chickpea as influenced by temperature and sowing depth. Agricultural and Forest Meteorology. 138: 156-167.

24. Soltani E, Galeshi S, Kamkar B and Akramghaderi F (2008) Modeling Seed Aging Effects on the Response of Germination to Temperature in Wheat. Seed Science and Biotech. 2(1): 32-36.

25. Soltani E, Soltani A, Galeshi S, Ghaderi-Far F and Zeinali E (2013) Seed bank modelling of volunteer oil seed rape: from seeds fate in the soil to seedling emergence. Planta Daninha. 31: 267-279.

26. Soltani E and Farzaneh S (2014) Hydrotime analysis for determination of seed vigour in cotton. Seed Science and Technology. 42(2): 260-273.

27. Thygerson T, Harris JM, Smith BN, Hansen LD, Pendleton RL and Booth DT (2002) Metabolic response to temperature for six populations of winterfat (*Eurotia lanata*). Thermochimica Acta. 394: 211-217.

28. Windauer LB, Altuna A and Benech-Arnold RL (2007) Hydrotime analysis of *Lesquerella fendleri* seed germination responses to priming treatments. Industrial Crops and Products. 25(1): 70-74.