

کاربرد مدل هیدروترمال تایم جهت تعیین دماهای کاردینال جوانه‌زنی در گیاهان (مطالعه موردی؛ گاوپنبه (*Abutilon theophrasti med.*))

اسماعیل یساری^۱، موسی میری^۲، صادق آتشی^۳، محسن جمالی^۴*

۱. استادیار گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.
۲. مربی مرکز تحقیقات علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
۳. کارشناس گروه علوم باغبانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
۴. دانشجوی دکتری آگرواکولوژی دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۱/۲۷)

چکیده

به منظور ارزیابی توانایی مدل هیدروترمال تایم برای توصیف جوانه‌زنی در گیاه گاوپنبه مطالعه‌ای تحت شرایط مختلف دمایی و رطوبتی اجرا شد. بدین منظور، آزمایشی در هشت سطح دمایی (۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۳۷، ۴۰ و ۴۲ درجه سانتی گراد) و پنج سطح پتانسیل آب (صفر، -۰/۱۸، -۰/۳۶، -۰/۵۴ و -۰/۷۲ مگاپاسکال) انجام شد. درصد و سرعت جوانه‌زنی به طور معنی‌داری تحت تأثیر پتانسیل آب قرار گرفتند. مدل هیدروترمال تایم مقدار دماهای پایه، بهینه و سقف برای این گیاه و در شرایط مطلوب رطوبتی (صفر مگاپاسکال) را به ترتیب ۱۱/۸، ۳۵/۴ و ۴۵/۲ درجه سانتی گراد تعیین نمود. ثابت هیدروترمال تایم از دمای پایه تا دمای بهینه کاهش یافت و در دماهای بالاتر از دمای بهینه مقدار آن ثابت (۲۴ مگاپاسکال در ساعت) باقی ماند. در دماهای بالاتر از دمای بهینه، مقدار پتانسیل آب پایه به طور خطی افزایش یافت. شیب رابطه خطی بین پتانسیل پایه و دماهای بالاتر از دمای بهینه برابر ۰/۱۰۱۱ مگاپاسکال در درجه سانتی گراد در ساعت برآورد گردید (یعنی به ازای افزایش یک درجه دما بالای دمای بهینه مقدار پتانسیل پایه برابر با ۰/۱۰۱۱ مگاپاسکال در درجه سانتی گراد در ساعت کاهش خواهد یافت). پتانسیل آب پایه در دماهای پایین‌تر از دمای بهینه تقریباً ثابت و معادل -۰/۹۱ مگاپاسکال تعیین شد. به طور کلی، با استفاده از مدل هیدروترمال تایم به سادگی می‌توان پاسخ جوانه‌زنی گاوپنبه را در کلیه شرایط دمایی و رطوبتی به طور دقیق کمی‌سازی نمود.

کلیدواژه‌ها: جوانه‌زنی، دما، رطوبت، گاوپنبه، مدل هیدروترمال تایم

Application of hydrothermal time model to determine the cardinal temperatures for seed germination in crops (A case study; velvetleaf (*Abutilon theophrasti med.*))

E. Yasari¹, M. Miri², S. Atashi³, M. Jamali⁴

1. Department of Agricultural Sciences, Payame Noor University, Tehran, Iran.
 2. Department of Agronomy, Gorgan Agricultural Sciences and Natural Sciences Research Center, Gorgan, Iran.
 3. Department of Horticultural Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
 4. Department of Agro-Ecology, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
- (Received: Oct. 16, 2016 – Accepted: Apr. 16, 2017)

Abstract

This study was evaluated the ability of a hydrothermal time model (HTT) to describe the kinetics of seed germination in crops and also to determine the cardinal temperatures for germination (as a case study; velvetleaf). For this purpose, the experiment was carried out at eight constant temperature regimes (T ; 15, 20, 25, 30, 35, 37, 40 and 42°C) at each of the following water potential (ψ_s ; 0, -0.18, -0.36, -0.54 and -0.72 MPa; using PEG 6000). The results indicated that ψ influenced germination rate and germination percentage ($P < 0.0001$). For this seed lot, cardinal temperatures were 11.8°C for T_b , 35.4°C for T_o and 45.2°C for T_c in the control (0 MPa) treatment. There was a decrease in hydrotime constant (θH) when T was increased to T_o and then remained constant at supra-optimal T_s (24 MPa h⁻¹). At the T_s above T_o , $\psi_{b(50)}$ values increased linearly with T . The k_T value (the slope of the relationship between $\psi_{b(50)}$ and T exceeds T_o) of this seed lot was calculated as 0.1011 MPa°C h⁻¹. Moreover, the $\psi_{b(50)}$ was estimated to be -0.91 MPa based on this model. Our results show that when the HTT model is applied, it can accurately describe germination response of velvetleaf around T_s and ψ_s .

Keywords: Germination, hydrothermal time model, temperature, velvetleaf, water potential.

* Email: m.jamali67@yahoo.com

(Bewley *et al.*, 2013; Atashi *et al.*, 2015)

$$\theta T_{(g)} = (T - T_b)t_g \quad (۱)$$

یا

$$GR_g = 1/t_g = (T - T_b)/\theta T_{(g)} \quad (۲)$$

که در آن، GR_g ، سرعت جوانه‌زنی در کسر خاصی از بذرهاى جوانه‌زده، $\theta T_{(g)}$ ، ثابت ترمال‌تایم (درجه سانتی‌گراد در روز) یعنی مقدار دماهای بالاتر از دمای پایه، که برای رسیدن به کسر خاصی از جوانه‌زنی باید به صورت تجمعی جمع شوند، T ، دمای محیط و T_b دمای پایه (درجه سانتی‌گراد) می‌باشند. علاوه بر این، در دماهای بالاتر از دمای بهینه (از دمای بهینه تا دمای سقف) نیز این مدل با اندکی اصلاح قادر به توصیف رابطه بین سرعت جوانه‌زنی و دما می‌باشد (Atashi *et al.*, 2015). کلیه پارامترها و روش‌های استفاده از این مدل‌ها به طور کامل توسط برادفورد توضیح داده شده است (Bradford, 2002). اگرچه مدل‌های ترمال‌تایم به طور موفقیت‌آمیزی قادر به توصیف رابطه بین سرعت جوانه‌زنی و دما در دماهای پایین‌تر و بالاتر از دمای بهینه بوده‌اند، اما آن‌ها برای ارائه پاسخ فیزیولوژیکی مناسب به سوالاتی از قبیل علت کاهش سرعت جوانه‌زنی در دماهای بالاتر از دمای بهینه و ایجاد اختلاف در دماهای سقف نیز ناتوان بودند. محققین برای پاسخ به این سوالات و رفع مشکل در مدل‌های ترمال‌تایم، مدل مشابه‌ای یعنی مدل هیدروتایم را جهت توصیف رابطه بین سرعت جوانه‌زنی و پتانسیل آب به شکل زیر پیشنهاد نمودند (Bewley *et al.*, 2013; Bradford and Still, 2004; Gummerson, 1986).

$$\theta H = (\psi - \psi_{b(g)})t_g \quad (۳)$$

یا

$$GR_g = 1/t_g = (\psi - \psi_{b(g)})/\theta H \quad (۴)$$

یا

$$\text{Probit}(g) = [\psi - (\theta H/t_g) - \psi_{b(50)}]/\sigma_{\psi b} \quad (۵)$$

مقدمه

جوانه‌زنی بذر فرایندی پیچیده و از جمله مراحل مهم در چرخه زندگی گیاهان محسوب می‌شود (Wang, 2005). به طور فیزیولوژیکی، رشد و خروج جنین از پوشش بذر را جوانه‌زنی می‌نامند (Bradford, 2002). این مرحله از رشد در توده‌های بذری بدون خواب تحت تأثیر عواملی همچون دما، رطوبت و اکسیژن می‌باشد (Bewley *et al.*, 2013). دما به عنوان اولین عامل شناخته شده‌ای است که ظرفیت جوانه‌زنی را در بذرهاى بدون خواب تحت تأثیر قرار می‌دهد (Alvarado and Bradford, 2002). به طور کلی، تمامی فرایندهای زیستی تحت تأثیر دما قرار دارند که می‌توان آن‌ها را توسط دماهای کاردینال به راحتی توصیف نمود، دماهای کاردینال عبارتند از دمای پایه (T_b)، حداقل دمای که جوانه‌زنی در آن اتفاق می‌افتد، دمای بهینه (T_o)، دما و یا دماهای که در آن سرعت جوانه‌زنی حداکثر مقدار است و دمای سقف (T_c)، حداکثر دمایی که در بالاتر از آن جوانه‌زنی متوقف خواهد شد (Atashi *et al.*, 2015; Bakhshandeh *et al.*, 2013; Bakhshandeh *et al.*, 2015). تا به امروز از مدل‌های ریاضی مختلفی از جمله دو تکه‌ای، دندان مانند، درجه دوم و بتا به طور گسترده برای کمی‌سازی رابطه بین سرعت جوانه‌زنی و دما استفاده شد که هر کدام دارای نقاط ضعف و قوت خاص خود بودند (Alvarado and Bradford, 2002; Atashi *et al.*, 2015; Atashi *et al.*, 2014; Bakhshandeh *et al.*, 2015; Bakhshandeh *et al.*, 2013; Gummerson, 1986; Kebreab and Murdoch, 1999; Rowse *et al.*, 2003; Watt *et al.*, 2010; Watt *et al.*, 2011). علاوه بر این، در چند دهه اخیر از مدل ترمال‌تایم برای کمی‌سازی تأثیر دما بر جوانه‌زنی گیاهان در شرایط آزمایشگاهی و یا مزرعه‌ای استفاده شده است (Gummerson, 1986; Kebreab and Murdoch, 1999). در دماهای پایین‌تر از دمای بهینه (از دمای پایه تا دمای بهینه) این مدل را می‌توان به شکل زیر نوشت (Bradford, 2002;)

برهمکنش بین دما و پتانسیل آب، مدل هیدروترمال تایم (معادله ۶) نتوانست کاهش سرعت جوانه زنی در دماهای بالاتر از دمای بهینه را به خوبی پیش بینی نماید (Watt *et al.*, 2010). برای رفع این مشکل برادفورد مدل هیدروترمال تایم (معادله ۶) را به شکل زیر اصلاح نمودند (Bradford, 2002):

$$\theta HT = [\psi - \psi_{b(g)} - (k_T(T - T_o))] / (T_o - T_b)t_g \quad (۷)$$

یا

$$\text{Probit}(g) = [\psi - k_T(T - T_o) - \theta H / (T - T_b)t_g - \psi_{b(50)}] / \sigma_{\psi b} \quad (۸)$$

که در آن k_T ، عددی ثابت (نشان دهنده شیب رابطه خطی بین پتانسیل آب پایه و دما در دماهای بالاتر از دمای بهینه می باشد)، T_o ، دمای بهینه و $\sigma_{\psi b}$ ، انحراف معیار از پتانسیل آب پایه در توده بذری جوانه زده می باشند. در زمان خطی بودن رابطه بین پتانسیل آب پایه و دما این مدل (معادله ۷) به طور دقیق می تواند جهت توصیف پاسخ جوانه زنی به دماهای بالاتر از دمای بهینه مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت، به کمک مدل های هیدروترمال تایم (معادله های ۶ و ۷) به راحتی می توان پاسخ جوانه زنی توده های بذری را در کلیه دماها و پتانسیل های آب برآورد نمود. کلیه پارامترها و روش های استفاده از این مدل به طور کامل توسط برادفورد توضیح داده شده است (Bradford, 2002).

پارامترهای به دست آمده از مدل های هیدروترمال تایم در واقع نشان دهنده شاخص هایی از وضعیت فیزیولوژیکی و اکولوژیکی توده های بذری می باشند (Allen, 2003; Bradford and Still, 2004; Wang, 2005). تا به امروز از این مدل به طور گسترده برای مطالعه و کمی سازی تأثیر شرایط مختلف محیطی بر جوانه زنی گیاهان مختلف استفاده شد که به عنوان مثال می توان به مطالعات بر روی کاهو (Bradford, 1990)، سیب زمینی (Alvarado and Rowse and Finch, 2002)، هویج و پیاز (Savage, 2003)، هندوانه (Bakhshandeh, 2015)، کدو

که در آن، GR_g ، سرعت جوانه زنی در کسر خاصی از بذرهای جوانه زده، θH ، ثابت هیدروترمال (مگاپاسکال در روز) یعنی مقدار پتانسیل های آب بالاتر از پتانسیل پایه که برای رسیدن به کسر خاصی از جوانه زنی باید به صورت جمعی جمع شوند، ψ ، پتانسیل آب محیط، $\sigma_{\psi b}$ ، انحراف معیار پتانسیل آب پایه (مگاپاسکال) داخل توده بذر و $\psi_{b(g)}$ ، پتانسیل آب پایه کسر خاصی از جمعیت می باشند. در این مدل، مقادیر پتانسیل آب پایه برای کسر خاصی از بذرهای جوانه زده در یک توده بذر متفاوت بوده که در اکثر موارد برای توصیف آن از توزیع نرمال استفاده می شود (Bradford, 2002). البته، تنها کاربرد توزیع نرمال در این مدل ضروری نبوده و از مدل های دیگر می توان استفاده نمود (Bakhshandeh *et al.*, 2015; Derakhshan and Gherekhloo, 2015; Mesgaran *et al.*, 2013). استفاده از مدل هیدروترمال به طور کامل توسط برادفورد توضیح داده شده است (Bradford, 2002).

مدل هیدروترمال تایم که ترکیبی از دو مدل ترمال تایم و هیدروترمال می باشد، به طور موفقیت آمیزی برای کمی سازی همزمان اثر دما و پتانسیل آب بر جوانه زنی توسط بسیاری از محققین پیشنهاد گردید (Gummerson, 1986; Bradford, 1995; Bewley *et al.*, 2013; Alvarado and Bradford, 2002). در دماهای پایین تر از دمای بهینه این مدل را می توان به شکل زیر توصیف نمود:

$$\theta HT = (\psi - \psi_{b(g)})(T - T_b)t_g \quad (۶)$$

که در آن t_g ، زمان مورد نیاز برای رسیدن به کسر خاصی از جوانه زنی در توده بذری جوانه زده، θHT ، ثابت هیدروترمال تایم (مگاپاسکال در درجه سانتی گراد در روز)، $\psi_{b(g)}$ ، مقدار پتانسیل آب پایه برای رسیدن به کسر خاصی از جوانه زنی، T_b ، دمای پایه، ψ ، پتانسیل آب و T ، دمای محیط اطراف بذر می باشند. در این مدل، مقدار هیدروترمال تایم و دمای پایه ثابت فرض شده و تنها مقدار پتانسیل آب پایه برای کسر خاصی از جوانه زنی متغیر می باشد (Gummerson, 1986). به هر حال، به خاطر ایجاد

۴ درجه سانتی گراد) و در شرایط تاریکی نگهداری شدند. برای شکستن خواب بذره‌های گاوپنبه از روش خراش دهی پوسته بذر توسط سنباده (با درجه زبری ۱۰۰) به مدت هفت دقیقه و تیمار اسید سولفوریک ۹۸ درصد به مدت ۲۵ دقیقه به صورت ترکیبی استفاده شد (اطلاعات شخصی منتشر نشده)، سپس بذور چندین بار توسط آب مقطر شستشو داده شدند. پس از شکستن خواب، جوانه‌زنی بذور گاوپنبه به بیش از ۹۳ درصد رسید.

هر واحد آزمایشی شامل یک پتری‌دیش به قطر ۱۰ سانتی‌متر بود که در آن ۵۰ عدد بذر گاوپنبه بر روی دو حوله کاغذی در زیر و یک حوله کاغذی در روی قرار داده شدند. پتری‌دیش‌ها در طول دوره آزمایش به طور تصادفی داخل انکوباتور و در محیط تاریک قرار گرفتند و تنها برای شمارش به مدت کمتر از چند دقیقه از دستگاه خارج می‌شدند. شمارش بذور جوانه‌زده بسته به دمای مورد استفاده، چند بار در روز انجام شد و در هر بار شمارش جهت جلوگیری از ایجاد خطا بذره‌های جوانه‌زده از پتری‌دیش‌ها خارج شدند. بدیهی است که در دماهای نزدیک‌تر به دمای بهینه؛ بازه زمانی شمارش، کم‌تر بود. در طول آزمایش و در صورت نیاز، به پتری‌دیش‌ها آب مقطر و یا محلول‌های مورد نظر اضافه شد. معیار جوانه‌زنی خروج ریشه‌چه به اندازه دو میلی‌متر یا بیشتر بود. خاتمه شمارش زمانی در نظر گرفته شد که در طی ۴۸ ساعت متوالی هیچ بذری جوانه ن‌زد.

داده‌های آزمایشی با استفاده از روش آنالیز پروبیت پیشنهاد شده توسط آلواردو و برادفورد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند (Alvarado and Bradford, 2002). بعد از برازش مدل‌ها، پارامترهای مربوط به مدل‌های ترمال‌تایم، هیدروتایم و هیدروترمال‌تایم محاسبه شدند. برآوردها برای محاسبه زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی در هر تکرار (پتری‌دیش) با استفاده از روش پیشنهاد شده توسط کب‌راب و ماردوچ تخمین‌زده شد (Kebreab and Murdoch, 1999). سرعت جوانه‌زنی از طریق معکوس زمان تا رسیدن به ۵۰ درصد کسر بذره‌های

(Atashi, 2015) و گونه‌های علفی از قبیل *Bromus diandrus* Roth (García, 2013) اشاره نمود. گاوپنبه (*Abutilon theophrasti* med.) به عنوان یکی از مهم‌ترین علف‌های هرز تابستانه در زمین‌های زراعی ایران و جهان به ویژه در مزارع سویا، آفتابگردان، ذرت و پنبه به شمار می‌رود. این گیاه از طریق رقابت برای دریافت منابع مشترک همچون عناصر غذایی، رطوبت خاک و نیز سایه‌اندازی موجب کاهش قابل توجه عملکرد گیاهان زراعی خواهد شد. در نتیجه، اجرای مطالعات پایه‌ایی در مراحل اولیه رشد و نمو جهت دستیابی به اطلاعات دقیق در خصوص عکس‌العمل این گیاه به شرایط مختلف محیطی به‌ویژه در مرحله جوانه‌زنی ضروری می‌باشد. بنابراین، هدف از این مطالعه معرفی، کاربرد و ارزیابی توانایی مدل هیدروترمال‌تایم برای توصیف پاسخ جوانه‌زنی در گیاهان (گاوپنبه به عنوان مطالعه موردی) تحت شرایط مختلف دمایی و رطوبتی و تعیین دماهای کاردینال جوانه‌زنی بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار در گروه علوم کشاورزی دانشگاه پیام نور استان مازندران واحد ساری انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل دما در هشت سطح ثابت (۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۳۷، ۴۰ و ۴۲ درجه سانتی‌گراد) و پتانسیل آب در پنج سطح (صفر، ۰/۱۸، -۰/۳۶، -۰/۵۴ و -۰/۷۲ - مگاپاسکال) بود. تیمارهای دمایی توسط انکوباتور، با دقت ۰/۵ درجه سانتی‌گراد تأمین شد. همچنین، سطوح مختلف پتانسیل آب به کمک فرمول پیشنهاد شده توسط میشل و کافمن و با استفاده از پلی‌اتیلن‌گلیکول ۶۰۰۰ تهیه شدند (Michel and Kaufmann, 1973). بذور گاوپنبه از مزرعه تحقیقاتی دانشگاه پیام نور ساری جمع‌آوری شدند. بذور پس از جمع‌آوری در داخل کیسه پلاستیکی قرار گرفته و تا قبل از شروع آزمایش در داخل یخچال (دمای

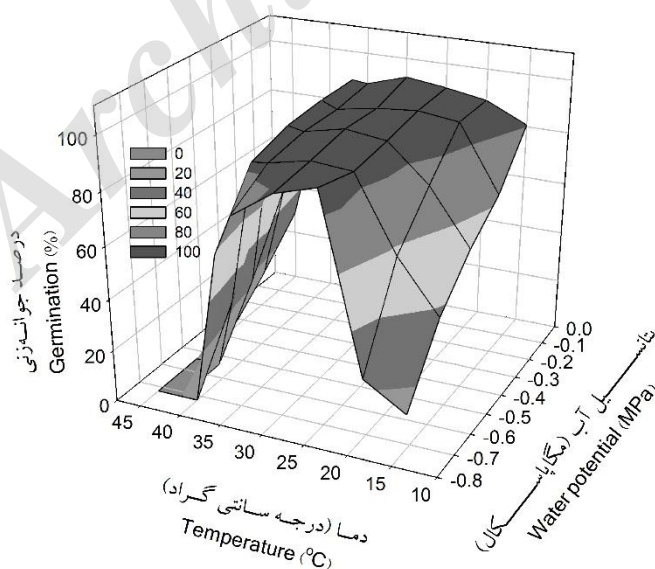
حداکثر درصد جوانه‌زنی (بیش از ۸۰ درصد) در دماهای بین ۲۵ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد مشاهده گردید (شکل ۱). نتایج نشان داد که با افزایش دما از ۱۵ درجه سانتی‌گراد به سمت دمای بهینه (۳۵/۴ درجه سانتی‌گراد) نیز هر دو درصد و سرعت جوانه‌زنی تا رسیدن به یک مقدار حداکثر افزایش یافتند و سپس با افزایش دما (بالتر از دمای بهینه) مقدار هر دو پارامتر کاهش یافت (شکل ۲). علاوه بر این، در هر یک از پتانسیل‌های آب، با افزایش فاصله از دما بهینه هر دو سرعت و درصد جوانه‌زنی کاهش یافتند که این کاهش در پتانسیل‌های آب منفی‌تر بیشتر بود (شکل ۱). در نتیجه، پاسخ جوانه‌زنی گاوپنبه به تغییرات پتانسیل آب بیشتر از دما می‌باشد. نتایج به دست آمده در این مطالعه با نتایج بسیاری از محققین و در گیاهان مختلف مطابقت داشت (Bewley, 2013; Bakhshandeh et al., 2015; Atashi et al., 2014; Bakhshandeh and Gholamhossieni, 2018). این محققین گزارش نمودند که هر دو درصد و سرعت جوانه‌زنی با کاهش پتانسیل آب، کاهش خواهند یافت.

جوانه‌زده محاسبه شد ($R_{50} = 1/D_{50}$). برآزش همه مدل‌ها با روش مطلوب‌سازی تکراری به کمک رویه PROCNLIN در نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹/۴ و برنامه اکسل ۲۰۱۳ صورت گرفت. در روش مطلوب‌سازی تکراری با هر بار وارد کردن مقادیر اولیه پارامترها، مقادیر نهایی آن با روش کمترین توان‌های دوم تخمین زده می‌شود. تغییر مقادیر اولیه تا زمانی انجام می‌گیرد که بهترین برآورد از پارامترها به دست آید. ترسیم شکل‌ها به کمک نرم‌افزار سیگماپلات نسخه ۱۱ انجام شد.

نتایج و بحث

پاسخ جوانه‌زنی گاوپنبه به پتانسیل آب و دما

نتایج نشان داد که حداکثر درصد جوانه‌زنی به طور معنی‌داری تحت تأثیر پتانسیل آب، دما و برهمکنش آن‌ها قرار گرفت ($P < 0/0001$). کاهش پتانسیل آب (منفی‌تر شدن) و دماهای کمتر از ۲۵ درجه سانتی‌گراد و بیشتر از ۳۵ درجه سانتی‌گراد موجب کاهش حداکثر درصد جوانه‌زنی شد (شکل ۱). در سطوح مختلف پتانسیل آب،

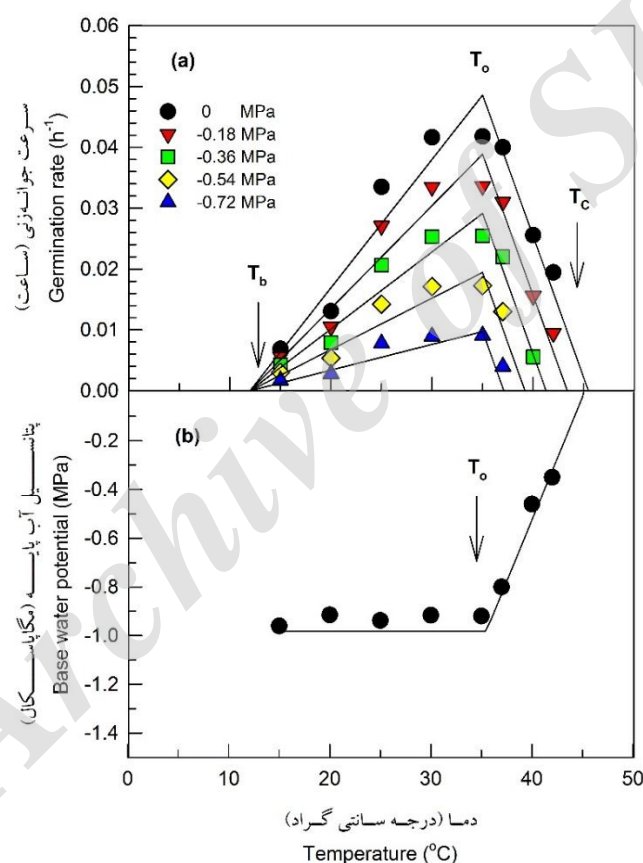


شکل ۱. اثر پتانسیل آب و دما بر حداکثر درصد جوانه‌زنی گیاه گاوپنبه (*Abutilon theophrasti med.*)

Figure 1. Effect of water potential and temperature on the maximum seed germination (%) of velvetleaf (*Abutilon theophrasti med.*)

افزایش یافت (جدول ۱). نتایج مشابهی نیز در گیاهانی از قبیل گوجه‌فرنگی، سیب‌زمینی و هندوانه توسط محققین دیگر گزارش شد (Bakhshandeh *et al.*, 2015; Alvarado and Bradford, 2002; Dahal and Bradford, 1994). پس از برآزش مدل هیدروتایم، مقدار انحراف معیار در کلیه دماها نسبتاً ثابت بود که این امر نشان‌دهنده ثبات و یکنواختی جوانه‌زنی گاوپنبه در تمامی دماهای مورد مطالعه می‌باشد (جدول ۱).

نتایج حاکی از آن بود که مدل هیدروتایم به خوبی و با ضریب تبیین بالاتر از ۰/۸۳ توانست واکنش جوانه‌زنی گاوپنبه را در هر یک از دماهای ثابت و پتانسیل‌های مختلف آب توصیف نماید (جدول ۱). مقدار ثابت هیدروتایم در دماهای بالاتر از دمای بهینه ثابت و برابر ۲۴ مگاپاسکال در ساعت برآورد گردید. اما این مقدار در دماهای پایین‌تر از دمای بهینه ثابت نبوده و با کاهش دما مقدار آن از ۲۴ مگاپاسکال در ساعت در دمای بهینه به ۱۴۰ مگاپاسکال در ساعت در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد



شکل ۲- (الف) اثرات پتانسیل آب و دما بر سرعت جوانه‌زنی گاوپنبه و تعیین دماهای کاردینال جوانه‌زنی این گیاه در آب (صفر مگاپاسکال). نقاط نشان‌دهنده داده‌های واقعی و خطوط نشان‌دهنده برآزش مدل هیدروتایم بر اساس پارامترهای ارائه‌شده در جدول ۲-الف می‌باشد. (ب) اثر دما بر پتانسیل آب پایه جوانه‌زنی گاوپنبه. نقاط نشان‌دهنده پتانسیل آب پایه تخمین زده شده توسط مدل هیدروتایم بر اساس پارامترهای ارائه‌شده در جدول ۲-ب می‌باشد. T_b، T_o و T_c به ترتیب دمای پایه، بهینه و سقف می‌باشند. b نشان‌دهنده شیب رابطه خطی بین پتانسیل آب پایه و دما در دماهای بالاتر از دمای بهینه می‌باشد.

Figure 2. (A) The effect of water potential and temperature on the germination rate of velvetleaf seeds and determination of cardinal temperatures for germination of *Abutilion thephrasti* med. seeds in water (0 MPa). The symbols are the actual data and lines are drawn after fitting the hydrothermal time model using the presented parameters in Table 1B and D. (B) The Effect of temperature on base water potential for velvetleaf seed germination. The points are estimated base water potential after fitting the hydrotime model based on presented parameters in Table 1A and C. T_b, T_o and T_c are the base, optimum and maximum temperatures, respectively. b is the linear slope of the relationship between base water potential and temperatures exceeds optimum temperature.

جدول ۱. پارامترهای تخمین زده شده توسط مدل هیدروتایم در مرحله جوانه زنی گاوپنبه (*Abutilon theophrasti* med.) تحت تأثیر پتانسیل های مختلف آب در هر دما

Table 1. Estimated parameter values by the hydrotime model during seed germination stage of velvetleaf (*Abutilon theophrasti* med.) under different water potentials in each temperature

ضریب تبیین R ²	انحراف معیار (مگاپاسکال) $\sigma_{\psi b}$ (MPa)	پتانسیل پایه تا ۵۰ درصد جوانه زنی (مگاپاسکال) $\psi_{b(50)}$ (MPa)	ثابت هیدروتایم (مگاپاسکال ساعت) θH (MPa h ⁻¹)	دما (درجه سانتی گراد) T(°C)
0.95	0.351	-0.944	140	15
0.93	0.340	-0.919	70	20
0.92	0.482	-0.948	30	25
0.89	0.380	-0.966	24	30
0.90	0.379	-0.991	24	35
0.86	0.333	-0.869	24	37
0.87	0.366	-0.563	24	40
0.83	0.307	-0.285	24	42

به طور کلی، بعد از برازش مدل هیدروترمال تایم مقدار دماهای پایه، بهینه و سقف گاوپنبه در پتانسیل آب صفر به ترتیب برابر ۱۱/۸، ۳۵/۴ و ۴۵/۲ درجه سانتی گراد برآورد گردید (شکل ۲ الف و جدول ۲). به طور مشابه، محققین دیگر در آزمایشی جداگانه مقدار دمای بهینه گاوپنبه را در حدود ۳۵ درجه سانتی گراد گزارش نمودند (Sadeghloo *et al.*, 2013). علاوه بر این، دمای پایه برآورد شده در این مطالعه حدود ۶ درجه سانتی گراد بیشتر و دمای سقف آن حدود ۳ درجه سانتی گراد کمتر از نتایج گزارش شده توسط دیگر محققین بود (Sadeghloo *et al.*, 2013). این محققین دمای پایه و سقف گاوپنبه را به ترتیب ۵ و ۴۸ درجه سانتی گراد گزارش کردند.

تجزیه هیدروترمال تایم

پتانسیل آب پایه تا رسیدن به ۵۰ درصد جوانه زنی تحت تأثیر دما قرار گرفت و کمترین پتانسیل پایه در دمای بهینه یعنی ۳۵/۴ درجه سانتی گراد مشاهده شد (۰/۹۱- مگاپاسکال) (جدول ۲). بر خلاف نتایج این مطالعه، محققین دیگر مقدار پتانسیل آب پایه در دمای بهینه گاوپنبه را کمی پایین تر و برابر ۰/۶۰- مگاپاسکال گزارش نمودند (Sadeghloo *et al.*, 2013). نتایج همچنین نشان

به هر حال از پارامتر ثابت هیدروتایم می توان به عنوان شاخصی برای تعیین کیفیت فیزیولوژیکی و قدرت بذری در یک توده بذر استفاده نمود (Dahal and Bradford, 1990). به عنوان مثال، در یک گونه مرتعی گزارش شد که بذرهای درشت تر نسبت به بذرهای ریزتر به ثابت هیدروتایم کمتری برای جوانه زنی نیاز دارند به خصوص در دماهای پایین تر از دمای بهینه که نشان دهنده جوانه زنی سریعتر بذرهای درشت تر در دماهای پایین می باشد (Wang, 2005).

تعیین دماهای کاردینال

برای تعیین دماهای کاردینال گاوپنبه با استفاده از مدل هیدروترمال تایم، بذرها در پتانسیل های مختلف آب قرار گرفته و سرعت تا رسیدن به ۵۰ درصد جوانه زنی در هر یک از پتانسیل های محاسبه شد. با ترسیم سرعت جوانه زنی در مقابل دما می توان دماهای کاردینال برای هر یک از پتانسیل های آب را برآورد نمود. نتایج نشان داد که در دماهای پایین تر از دمای بهینه رابطه بین سرعت جوانه زنی و دما در همه پتانسیل های مورد مطالعه خطی بود و این خطوط در نقطه ای مشترک بر روی محور ایکس (دمای ۱۱/۸ درجه سانتی گراد) بهم برخورد نمودند که نشان دهنده دمای پایه گیاه گاوپنبه می باشد (شکل ۲ الف).

۲). با ادامه دادن شیب خط (برون یابی) مقدار پتانسیل پایه در دمای ۴۵/۲ درجه سانتی گراد و در پتانسیل آب صفر مگاپاسکال به صفر رسید که این نقطه به عنوان دمای سقف (حداکثر دمایی که بالاتر از آن جوانه زنی متوقف خواهد شد) در نظر گرفته شد (شکل ۲ب).

داد که با افزایش دما از دمای بهینه تا ۴۲ درجه سانتی گراد مقدار پتانسیل پایه به طور خطی و با سرعتی معادل ۰/۱۰۱۱ مگاپاسکال درجه سانتی گراد ساعت افزایش (مثبت تر شدن) یافت، تا اینکه مقدار آن در دمای ۴۲ درجه سانتی گراد به ۰/۲۸- مگاپاسکال رسید (جدول ۱ و

جدول ۲. پارامترهای تخمین زده شده توسط مدل هیدروترمال تایم در مرحله جوانه زنی گاوپنبه (*Abutilon theophrasti med.*) تحت تأثیر پتانسیل های آب و دماهای مختلف

Table 2. Estimated parameter values by the hydrothermal time model during seed germination stage of velvetleaf (*Abutilon theophrasti med.*) under different water potentials and temperatures

ضریب تبیین R ²	دمای پایه T _b (درجه سانتی گراد) (°C)	انحراف معیار (مگاپاسکال) σ _{ψb} (MPa)	پتانسیل پایه تا ۵۰ درصد جوانه زنی (مگاپاسکال) ψ _{b(50)} (MPa)	ثابت		
				هیدروترمال تایم (مگاپاسکال درجه سانتی گراد ساعت) (MPa °C h ⁻¹)	دما (درجه سانتی گراد) T(°C)	
0.85	11.8	0.381	-0.910	447	15-35 (الف)	
ضریب تبیین R ²	ضریب ثابت [†] (MPa °C h ⁻¹) k _T	دمای بهینه (درجه سانتی گراد) T _o (°C)	انحراف معیار (مگاپاسکال) σ _{ψb} (MPa)	پتانسیل پایه تا ۵۰ درصد جوانه زنی (مگاپاسکال) ψ _{b(50)} (MPa)	ثابت هیدرو تایم	
					(مگاپاسکال ساعت) θH(MPa h ⁻¹)	دما (درجه سانتی گراد) T(°C)
0.84	0.1011	35.4	-0.910	17.8	37-42 (ب)	

[†] ضریب ثابت (k_T) نشان دهنده شیب رابطه خطی بین پتانسیل آب پایه و دما در دماهای بالاتر از دمای بهینه می باشد.

k_T is the linear slop of the relationship between base water potential and temperature above optimum temperature (35.4 °C).

پتانسیل آب پایه در دماهای پایین تر از دمای بهینه را در گیاهان مختلف گزارش نمودند (Zhang et al., 2012; Wang, 2005; Kebreab and Murdoch, 1999). در دماهای بالاتر از دمای بهینه، مقدار دمای سقف تحت تأثیر پتانسیل آب قرار گرفت و با افزایش پتانسیل آب از صفر (۴۵/۲ درجه سانتی گراد) به ۰/۷۲- مگاپاسکال (۳۷ درجه سانتی گراد) مقدار دمای سقف کاهش یافت و اختلاف بین آن ها از لحاظ آماری معنی دار بود (شکل ۲الف). این فرایند نشان دهنده کاهش سرعت جوانه زنی در دماهای بالاتر از دمای بهینه می باشد. نتایج همچنین نشان داد که اختلاف در دماهای سقف (وابسته به پتانسیل های آب مختلف) از توزیع نرمال پیروی می کند (شکل ۲الف).

این نتایج با نتایج بسیاری از محققین دیگر مطابقت داشت (Alvarado and Bradford, 2002; Bakhshandeh et al., 2015; Bakhshandeh et al., 2017; Atashi et al., 2014; Dahal and Bradford, 1990; Rowse and Finch-Savage, 2003; Watt et al., 2010). آن ها پس از بررسی واکنش جوانه زنی گیاهانی از قبیل گوجه فرنگی، سیب زمینی، هویج، پیاز، کدو و هندوانه به تغییرات دما و پتانسیل آب گزارش کردند که کمترین پتانسیل پایه در این گیاهان در محدوده دمای بهینه مشاهده شد و با افزایش دما نسبت به دمای بهینه، مقدار پتانسیل پایه نیز به طور خطی افزایش خواهد یافت که نشان دهنده تأثیر بیشتر پتانسیل آب بر فرایند جوانه زنی در دماهای بالاتر از دمای بهینه می باشد. علاوه بر این، برخی از محققین افزایش

گاوپنبه به کاهش پتانسیل آب نسبت به تغییرات دمایی بیشتر بود. با کاهش دما نتایج مطالعه همچنین نشان داد که مدل هیدروترمال تایم توانست تا دماهای کاردینال جوانه زنی این گیاه را به خوبی کمی سازی نماید. علاوه بر این مدل هیدروترمال تایم به خوبی توانست واکنش جوانه زنی گاوپنبه را در هر یک از دماهای ثابت و پتانسیل های مختلف آب توصیف نماید. بنابراین، از این مدل می توان به عنوان ابزاری مناسب در مدل های شبیه سازی جوانه زنی گیاهان از جمله گاوپنبه استفاده نمود.

نتایج مشابهی در گیاه سیب زمینی و هندوانه نیز توسط سایر محققین گزارش شد (Alvarado and Bradford, 2002; Bakhshandeh *et al.*, 2015).

نتیجه گیری

درصد و سرعت جوانه زنی گاوپنبه به طور معنی داری تحت تأثیر پتانسیل آب قرار گرفتند. در هر یک از پتانسیل های آب، با افزایش فاصله از دمای بهینه هر دو سرعت و درصد جوانه زنی کاهش یافتند که این کاهش در پتانسیل های آب منفی تر بیشتر بود و پاسخ بذرهایی

Reference

منابع

- Allen, P. 2003. When and how many? Hydrothermal models and the prediction of seed germination. *New Phytol.* 158: 1-3.
- Alvarado, V., and K. Bradford. 2002. A hydrothermal time model explains the cardinal temperatures for seed germination. *Plant Cell Environ.* 25: 1061-1069.
- Atashi, S., E. Bakhshandeh., M. Mehdipour., M. Jamali, and J.A. Teixeira da Silva. 2015. Application of a hydrothermal time seed germination model using the Weibull distribution to describe base water potential in zucchini (*Cucurbita pepo* L.). *J. Plant Growth Regul.* 34: 150-157.
- Atashi, S., E. Bakhshandeh., Z. Zeinali., E. Yassari, and J.A. Teixeira da Silva. 2014. Modeling seed germination in *Melisa officinalis* L. in response to temperature and water potential. *Acta Physiol. Plantarum.* 36: 605-611.
- Bakhshandeh, E., and M. Gholamhossieni. 2018. Quantification of soybean seed germination response to seed deterioration under PEG-induced water stress using hydrotime concept. *Acta Physiol. Plantarum.* 40:126.
- Bakhshandeh, E., M. Jamali, E. Afshon, and M. Gholamhossieni. 2017. Using hydrothermal time concept to describe sesame (*Sesamum indicum* L.) seed germination response to temperature and water potential. *Acta Physiol. Plantarum.* 39:1-9.
- Bakhshandeh, E., S. Atashi., M. Hafez-Nia, and H. Pirdashti. 2013. Quantification of the response of germination rate to temperature in sesame (*Sesamum indicum*). *Seed Sci. Technol.* 41: 469-473.
- Bakhshandeh, E., S. Atashi., M. Hafez-Nia., H. Pirdashti, and J.A. Teixeira da Silva. 2015. Hydrothermal time analysis of watermelon (*Citrullus vulgaris* cv. 'Crimson sweet') seed germination. *Acta Physiol Plantarum.* 37: 1-8.
- Baskin, C.C., and J.M. Baskin. 2014. *Seeds: ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination.* Academic Press, San Diego.
- Bewley, J.D., K. Bradford, and H. Hilhorst. 2013. *Seeds: physiology of development, germination and dormancy.* 3rd edn. Springer, New York.
- Bradford, K.J. 1990. A water relations analysis of seed germination rates. *Plant Physiol.* 94: 840-849.
- Bradford, K.J. 1995. Water relations in seed germination. *Seed Dev. Germ.* 1: 351-396.

- Bradford, K.J. 2002.** Applications of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. *Weed Sci.* 50: 248-260.
- Bradford, K.J., and D.W. Still. 2004.** Applications of hydrotime analysis in seed testing. *Seed Technol.* 26: 75-85.
- Dahal, P., and K.J. Bradford. 1990.** Effects of priming and endosperm integrity on seed germination rates of tomato genotypes II. Germination at reduced water potential. *J. Exp. Bot.* 41: 1441-1453.
- Dahal, P., and K.J. Bradford. 1994.** Hydrothermal time analysis of tomato seed germination at suboptimal temperature and reduced water potential. *Seed Sci. Res.* 4: 71-80.
- Derakhshan, A., and J. Gherekhloo. 2015.** Comparison of hydrothermal time models to seed germination modeling of *Phalaris minor* on the basis of Normal, Weibull and Gumbel distributions. (In Persian, with English Abstract) *J. Plant Prod. Res.* 22: 39-57.
- García, A.L., J. Recasens., F. Forcella., J. Torra, and A. Royo-Esnal. 2013.** Hydrothermal emergence model for rigput brome (*Bromus diandrus*). *Weed Sci.* 61: 146-153.
- Gummerson, R. 1986.** The effect of constant temperatures and osmotic potentials on the germination of sugar beet. *J. Exp. Bot.* 37: 729-741.
- Kebreab, E., and A. Murdoch. 1999.** Modelling the effects of water stress and temperature on germination rate of *Orobancha aegyptiaca* seeds. *J. Exp. Bot.* 50: 655-664.
- Mesgaran, M., H. Mashhadi., H. Alizadeh., J. Hunt., K. Young, and R. Cousens. 2013.** Importance of distribution function selection for hydrothermal time models of seed germination. *Weed Res.* 53: 89-101.
- Michel, B.E., and M.R. Kaufmann. 1973.** The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiol.* 51: 914-916.
- Rowse, H., and W.E. Finch-Savage. 2003.** Hydrothermal threshold models can describe the germination response of carrot (*Daucus carota*) and onion (*Allium cepa*) seed populations across both sub-and supra-optimal temperatures. *New Phytol.* 158: 101-108.
- Sadeghloo, A., J. Asghari, and F. Ghaderi-Far. 2013.** Seed germination and seedling emergence of velvetleaf (*Abutilon theophrasti*) and barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*). *Planta Daninha.* 31: 259-266.
- Wang, R. 2005.** Modeling seed germination and seedling emergence in winterfat (*Krascheninnikovia lanata* (Pursh) ADJ Meeuse & Smit): Physiological mechanisms and ecological relevance. PhD thesis, University of Saskatchewan.
- Watt, M.S., M. Bloomberg, and W.E. Finch-Savage. 2011.** Development of a hydrothermal time model that accurately characterises how thermoinhibition regulates seed germination. *Plant Cell Environ.* 34: 870-876.
- Watt, M.S., V. Xu, and M. Bloomberg. 2010.** Development of a hydrothermal time seed germination model which uses the Weibull distribution to describe base water potential. *Ecol. Model.* 221: 1267-1272.
- Zhang, H., L. Irving., Y. Tian, and D. Zhou. 2012.** Influence of salinity and temperature on seed germination rate and the hydrotime model parameters for the halophyte, *Chloris virgata*, and the glycophyte, *Digitaria sanguinalis*. *South Afr. J. Bot.* 78: 203-210.