



شبیه‌سازی پاسخ جوانه‌زنی هندوانه (*Citrullus lanatus* Thunb.) به دما و پتانسیل آب

سید فرهاد صابرعلی^{۱*} - حسین نستری نصرآبادی^۲ - زهرا شیرمحمدی علی اکبرخانی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۱۴

چکیده

جوانه‌زدن کامل و یکنواخت که شرط لازم برای استقرار گیاهچه‌های قوی و نهایتاً تولید موفق یک محصول است، تحت تاثیر عوامل مختلف محیطی بویژه حرارت و رطوبت بستر کشت قرار می‌گیرد. به منظور مطالعه تاثیر دما و تنش خشکی بر جوانه‌زنی بذر هندوانه و کمی سازی پاسخ جوانه‌زنی با مدل‌های زمان حرارتی-رطوبتی، آزمایشی به صورت فاکتوریل با هفت سطح دما شامل ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سلسیوس و شش سطح تنش خشکی شامل ۰، ۲۵/۵، ۵۰/۵، ۷۵/۵، ۱۰۰/۵ و ۱۲۵/۵- مگاپاسکال انجام شد. نتایج نشان داد بطور متوسط در همه سطوح دمایی با کاهش پتانسیل اسمزی، میزان جوانه‌زنی کاهش یافت، با این‌وجود شدت این کاهش در محدوده حرارتی ۲۵ درجه سانتی‌گراد کمتر از دماهای بالاتر و پایین تر آن بود. کمینه و بیشینه دما برای جوانه‌زنی هندوانه در روش رگرسیون خطی به ترتیب ۱۰/۷ و ۴۰/۰ درجه سانتی‌گراد، و در روش مدل زمان حرارتی ۱۱/۵ و ۴۰/۱ درجه سانتی‌گراد برآورد گردید. درجه حرارت مطلوب جوانه‌زنی نیز در روش رگرسیون و مدل زمان حرارتی-رطوبتی به ترتیب ۲۵/۳ و ۲۵/۲ درجه سانتی‌گراد برآورد شد. مقدار پتانسیل آب پایه برای جوانه‌زنی هندوانه در مدل زمان رطوبتی در درجه حرارت‌های مختلف نیز بین ۰/۴۵- تا ۱/۲۳- مگاپاسکال محاسبه شد، با این‌وجود در مدل زمان حرارتی-رطوبتی مقدار پتانسیل آب آستانه برای جوانه‌زنی در دامنه حرارتی پایین تر و بالاتر از حد مطلوب حرارتی بین ۱/۱- تا ۱/۲- مگاپاسکال تخمین زده شد. بدین ترتیب نتایج نشان داد که با افزایش حرارت بستر کشت پتانسیل آب پایه برای جوانه‌زنی افزایش خواهد یافت. در نهایت نتایج مدل نشان داد که مدل زمان حرارتی-رطوبتی به‌خوبی قادر است بیش از ۹۰ درصد تغییرات جوانه‌زنی بذر هندوانه را در پاسخ به حرارت و رطوبت کمی کند.

واژه های کلیدی: تجزیه پروبیت، تنش خشکی، پتانسیل آب پایه و مدل زمان حرارتی-رطوبتی

مقدمه

از گیاهان می‌باشند (۶ و ۱۰). جوانه‌زنی گیاهان در یک دامنه حرارتی بنام دماهای اصلی (کاردینال) جوانه‌زنی اتفاق می‌افتد، که شامل سه دمای کمینه، مطلوب و بیشینه است. دمای مطلوب جوانه‌زنی دمایی است که بیشترین میزان جوانه‌زنی در کوتاه‌ترین زمان ممکن را در یک توده بذری باعث می‌شود. درجه حرارت‌های بالاتر و پایین تر از حد مطلوب باعث کاهش سرعت و درصد جوانه‌زنی می‌شود. دمای کمینه (پایه) و بیشینه (سقف)، دماهایی هستند که به ترتیب در دماهای پایین تر و بالاتر از آنها، جوانه‌زنی متوقف شود (۳ و ۴). بطور مثال گزارش شده دمای مطلوب برای جوانه‌زنی بسیاری از گونه‌های گیاهی در حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و افزایش یا کاهش در محدوده ۱۰ درجه‌ای از این دما، اگر چه ممکن است اثر بازدارنده بر سایر مراحل رشدی نداشته باشد، اما موجب کاهش میزان جوانه‌زنی خواهد شد (۷ و ۱۲). از دیگر عوامل محیطی ضروری برای جوانه‌زنی بذور گیاهی جذب رطوبت کافی می‌باشد، که خود تابعی از پتانسیل آب خاک و بذر گیاه می‌باشد (۶). جذب آب کافی توسط بذور برای شروع واکنش‌های بیوشیمیایی، شروع تقسیم و بزرگ شدن سلولهای رویان

جوانه‌زنی مرحله ابتدایی و بحرانی شروع چرخه زندگی در گیاهان می‌باشد (۶). جوانه‌زدن سریع، کامل و یکنواخت بمنظور استقرار گیاهچه‌های قوی، در واقع شرط لازم موفقیت تولید یک محصول است. بنابراین شناخت عوامل موثر بر جوانه‌زنی و نحوه پاسخ گیاهان به آنها اساس اتخاذ مدیریت‌های زراعی مناسب در مزرعه را تشکیل می‌دهد (۱۹).

جوانه‌زنی بذر توسط عوامل مختلف محیطی از قبیل حرارت، رطوبت و اکسیژن بسترکشت کنترل می‌شود که در این میان دما و رطوبت از مهمترین عوامل محیطی کنترل کننده جوانه‌زنی در بسیاری

۱ و ۲- استادیار ان گروه علوم و مهندسی باغبانی، مجتمع آموزش عالی تربت جام

(*)- نویسنده مسئول: Email: sf.saberali@yahoo.com

۳- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، مجتمع آموزش عالی تربت جام
DOI: 10.22067/jhort4.v33i4.80628

عالی تربت جام با هدف کمی کردن جوانه‌زنی بذر گیاه هندوانه در پاسخ به دما و رطوبت بستر کشت انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل پتانسیل آب در سطوح ۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱/۰ و ۱/۲۵- مگاپاسکال و دمای ثابت در سطوح ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد بود. برای ایجاد پتانسل‌های مختلف آب ترکیب پلی اتیلن گلايکول ۶۰۰۰ استفاده گردید. بمنظور تهیه محلول‌های کشت با پتانسیل مورد نظر از رابطه ارایه شده توسط میشل و کافمن (۳۲) استفاده گردید. تیمارهای حرارتی توسط ژرمیناتور چهارقلو با توان تامین ۴ درجه حرارت همزمان و با دقت نیم درجه سانتی‌گراد اعمال گردید.

بذرهای رقم هندوانه کریمسون سوئیت (Crimson Sweet) از فروشگاه معتبر توزیع سم، بذر و کود تهیه گردید شد. بذر هندوانه قبل از انجام آزمایش بطور کامل با آب مقطر شسته شدند. این کار بمنظور حذف بقایای قارچ‌کش‌های بذر بمنظور جلوگیری از تأثیر احتمالی در پتانسل بستر کشت، انجام گردید. بذرهای هندوانه قبل از کشت با محلول هیپوکلریت سدیم ۱۰ درصد به مدت دو دقیقه ضدعفونی شده، و سپس با آب شهری و نهایتاً آب مقطر کاملاً شسته شدند. پس از آماده‌سازی محلول‌های پلی اتیلن گلايکول با پتانسیل‌های مختلف، محلول‌های تهیه شده جهت همدما شدن با دماهای مختلف به مدت ۲۴ ساعت در ژرمیناتور با دماهای مورد نظر قرار گرفت. قبل از کشت بذر، پتری دیش‌ها برای ضدعفونی به مدت ۲۴ ساعت در داخل محلول هیپوکلریت ۱۰ درصد قرار گرفته و بعد از آن با آب مقطر کامل شسته و در آون خشک شدند. از اشعه فرابنفش هود میکروبی نیز به مدت ۲ ساعت برای ضد عفونی کاغذهای صافی، پنس‌ها و ضد عفوی مجدد پتری‌ها قبل از کشت بذر استفاده شد. بمنظور جلوگیری از تغییر احتمالی پتانسیل آب در اثر جذب آب توسط بستر کشت، قبل از کشت کاغذ صافی مورد استفاده بعنوان بستر کشت با محلول‌های با پتانسیل‌های مختلف اشباع گردید. سپس در سه تکرار، ۲۵ بذر بر روی یک لایه کاغذ صافی از پیش اشباع شده، کشت شد. بعلاوه ۵ میلی لیتر از محلول پلی اتیلن گلايکول مورد نظر برای تیمارهای خشکی و ۵ میلی لیتر آب دوبار تقطیر برای تیمار شاهد (صفر) به هر پتری‌دیش اضافه گردید.

تمام پتری‌دیش‌ها هر روز توزین شده و به اندازه اختلاف وزن آن‌ها با وزن اولیه در شروع آزمایش، به آن‌ها آب مقطر اضافه گردید. این کار به جهت جلوگیری از تغییر غلظت و نهایتاً تغییر پتانسیل هر محلول در اثر تبخیر آب صورت گرفت (۲۱). لازم به ذکر است در انتهای هفته اول و دوم نیز محلول‌های تازه از پلی اتیلن گلايکول با پتانسل‌های مورد نظر تهیه و بذر بعد از شستشو با آب مقطر برای ادامه فرایند جوانه‌زنی در هفته دوم و سوم به این محلول‌های تازه تهیه شده انتقال یافت. هر روز تعداد بذر جوانه زده شمارش می‌شدند و بذوری جوانه‌زده محسوب می‌شدند که طول ریشه‌چه آن‌ها حداقل ۲

بذر در فرآیند جوانه‌زنی ضروری است. افزایش پتانسیل آب بستر کشت بذر، باعث کاهش جذب آب توسط آنها و نهایتاً کاهش سرعت و درصد جوانه‌زنی خواهد شد (۶ و ۲۳).

مدل‌های ریاضی رشد و نمو گیاهی، از جمله ابزار کارآمد در بهبود مدیریت کشت و کار محصولات زراعی و باغی هستند. بطور مثال تخمین طول دوره رشد و زمان میوه‌دهی گیاه در پاسخ به شرایط محیطی موجود در منطقه، می‌تواند تولیدکنندگان را برای تخمین تعیین زمان مناسب کاشت برای رسیدن محصول به بازار اقتصادی مناسب یاری نماید (۱۳). انواع مختلفی از مدل‌های ریاضی برای شرح رابطه بین سرعت جوانه‌زنی بذر گیاهان با دما و رطوبت استفاده شده است. بطور مثال بمنظور کمی کردن اثر حرارت، رگرسیون خطی سرعت جوانه‌زنی در برابر درجه حرارت‌های کمتر از حد مطلوب و بالاتر از حد مطلوب از جمله این روش هاست (۱۷ و ۲۶). همچنین پاسخ جوانه‌زنی بذر به اثر دما و پتانسیل آب را می‌توان با مدل‌های زمان حرارتی (Thermal time)، زمان رطوبتی (Hydrotime time) و زمان حرارتی-رطوبتی (Hydrothermal time) که به ترتیب پاسخ به دما، پاسخ به رطوبت و پاسخ به برهمکنش دما و رطوبت را کمی می‌کنند، مدل‌سازی کرد (۲ و ۱۷). زمان حرارتی-رطوبتی (θ_{HT}) در ابتدا برای گیاه چغندر قند (*Beta vulgaris* L.) و بر اساس رابطه خطی بین سرعت جوانه‌زنی و پتانسیل آب در یک دمای ثابت پیشنهاد شده است (۱۷). زمان حرارتی-رطوبتی در واقع شامل تجمع دماهای بالاتر از یک دمای پایه (T_b) و تجمع رطوبت بیش از یک آستانه آبی (ψ_b) است که نهایتاً منجر به جوانه‌زنی بذر می‌شوند (۲۴ و ۲۵). از مدل‌های زمان حرارتی-رطوبتی به طور گسترده‌ای برای پیش‌بینی جوانه‌زنی هم در گونه‌های بومی و زراعی معرفی شده استفاده شده است که از جمله می‌توان به گوجه (*Lycopersicon esculentum* Mill.)، هویج (*Daucus carota* L.)، سیب زمینی (*Solanum tuberosum* L.) و گندم (*Triticum aestivum* L.) اشاره کرد (۳، ۱۴، ۱۵ و ۳۵).

محصولات جالیزی نزدیک به ۳ درصد از سطح زیر کشت کشور و حدود ۱۰ درصد از کل تولید محصولات کشاورزی را به خود اختصاص می‌دهند. در بین محصولات جالیزی، گیاه هندوانه (*Citrullus lanatus* Thunb.) به تنهایی ۴۰ درصد از این سطح زیر کشت ایران را به خود اختصاص می‌دهد (۳۳). با توجه به اهمیت تولید هندوانه در کشور، این تحقیق با هدف تعیین درجه حرارت‌های کاردینال برای مرحله جوانه‌زنی گیاه هندوانه و همچنین کمی کردن پاسخ جوانه‌زنی آن به برهمکنش دما و رطوبت انجام پذیرفت.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال ۱۳۹۷ در آزمایشگاه مرکزی مجتمع آموزش

در مدل زمان رطوبتی نیز، زمان رطوبتی مورد نیاز برای جوانه‌زنی توسط رابطه ۵ توصیف شد. همچنین از رابطه ۶ بمنظور برآورد پارامترهای مورد نیاز مدل با استفاده از تجزیه پروبیت استفاده گردید (۹ و ۱۶):

$$\theta_H = (\psi - \psi_{b(g)}) t_g \quad \text{معادله ۵:}$$

معادله ۶: $Probite(g) = [\psi - (\theta_H/t_g) - \psi_{b(50)}] / \sigma_{\psi b}$
 که در این رابطه ψ مقدار واقعی پتانسیل آب در آزمون جوانه‌زنی، $\psi_{b(50)}$ پتانسیل آب آستانه یا پایه برای رخداد ۵۰ درصد جوانه‌زنی، θ_H زمان رطوبتی و $\sigma_{\theta T}$ انحراف معیار پتانسیل آب پایه است.

در شرایطی که حرارت و رطوبت هر دو تغییر کنند، با استفاده از مفهوم زمان حرارتی-رطوبتی (رابطه ۷) و از طریق تجزیه پروبیت ضرایب مدل زمان حرارتی-رطوبتی برای دماهای کمتر (رابطه ۸) و بالاتر از حد مطلوب (رابطه ۹) جداگانه تخمین زده شد (۱۲ و ۱۶):

$$\theta_H = (\psi - \psi_{b(g)})(T - T_b)t_g \quad \text{معادله ۷:}$$

معادله ۸: $Probite(g) = \{[\psi - (\theta_{HT}/(T - T_b)t_g) - \psi_{b(50)}]\} / \sigma_{\psi b}$
 معادله ۹:

$$Probite(g) = \{[\psi - K_T(T - T_b) - (\theta_{HT}/(T - T_b)t_g) - \psi_{b(50)}]\} / \sigma_{\psi b}$$

در این رابطه θ_{TH} زمان حرارتی-رطوبتی و k_T شیب خط رابطه بین درجه حرارت‌های بالاتر از حد مطلوب و پتانسیل آب پایه می‌باشند، سایر پارامترها نیز در روابط قبلی مشخص گردیدند. لازم به ذکر است اگرچه حدود ضرایب مدل‌ها از طریق رابطه بین متغیرها و سرعت جوانه‌زنی تعیین گردید، با این‌وجود مقادیر قطعی از طریق تکرار روش تجزیه پروبیت که توسط الیس و همکاران (۱۸) ارائه شده، برآورد گردید. مقادیری که کمترین خطای برآورد را باعث شد به عنوان مقادیر قطعی مدل در نظر گرفته شدند. آنالیز واریانس داده‌ها بعد از آزمون نرم‌الیته توزیع خطا، توسط نرم افزار SAS انجام پذیرفت. میانگین داده‌ها نیز با آزمون LSD و در سطح ۵ درصد مقایسه شدند. برای برآورد ضرایب اولیه مدل از روش ارائه شده توسط استین‌ماس و همکاران (۳۸) در Excel و برای رسم نمودارها از نرم افزار SigmaPlot استفاده گردید.

نتایج و بحث

درصد جوانه‌زنی:

تجزیه واریانس نشان داد که دما، پتانسیل آب و اثر متقابل آنها تاثیر معنی‌داری بر درصد جوانه‌زنی گیاه هندوانه دارند (جدول ۱). بذور مورد استفاده در این تحقیق در شرایط مطلوب حدود ۹۶ درصد قابلیت جوانه‌زنی داشتند، که بروز آن تحت تاثیر میزان دما و پتانسیل آب

میلی‌متر بود (۱۴). طول مدت آزمایش جوانه‌زنی ۲۱ روز تدارک دیده شد. با این‌وجود شمارش بذور در هر تیمار در صورتی که به مدت ۷۲ ساعت افزایشی در تعداد بذور جوانه زده مشاهده نشد، متوقف گردید.

جهت کمی کردن واکنش جوانه‌زنی بذرها و تعیین سرعت جوانه‌زنی، در ابتدا درصد جوانه‌زنی تجمعی در هر دمای (T) یا پتانسیل آب (ψ) معین در برابر زمان رسم و معادله متناسب به آن برازش داده شد (۳۸)، و سپس زمان طول کشیده (t_g) برای رسیدن به صدک‌های مختلف جوانه‌زنی تجمعی (۱۰-۹۰ درصد) از این روی این تابع بر اساس روش ارایه شده توسط استین‌ماوس و همکاران (۳۸) محاسبه گردید. بمنظور تخمین ضرایب مدل در دماهای کمتر و بالاتر از حد مطلوب، درجه حرارتی که منجر به بالاترین سرعت جوانه‌زنی در صدک ۵۰ شد، به عنوان معیار تفکیک دامنه حرارتی کمتر و بیشتر از دمای مطلوب قرار گرفت. سپس در این دو دامنه حرارتی ضرایب مدل به روش رگرسیون خطی و همچنین مدل زمان حرارتی-رطوبتی برآورد گردید (۲۷ و ۳۸).

مدل زمان حرارتی:

زمان حرارتی لازم برای جوانه‌زنی هر کسری از یک توده بذری در دما کمتر از حد مطلوب و بیشتر از حد مطلوب با استفاده از رابطه ۱ و ۲ نشان داده می‌شود (۱۴). بمنظور برآورد ضرایب مدل حرارتی به روش تجزیه پروبیت و کمی کردن جوانه‌زنی در دماهای کمتر از حد مطلوب و بیشتر از حد مطلوب نیز به ترتیب از رابطه ۳ و ۴ استفاده شد. (۹ و ۴۰):

$$\theta_T(g) = (T - T_b) t_g \quad \text{معادله ۱:}$$

$$\theta_{Tc}(g) = (T_c - T) t_g \quad \text{معادله ۲:}$$

$$\text{معادله ۳:}$$

$$Probite(g) = [\log[(T - T_b) t_g] - \log(\theta_{T(50)})] / \sigma_{\theta T}$$

$$\text{معادله ۴: } Probite(g) = [T + (\theta_{Tc}/t_g) - T_{c(50)}] / \sigma_{Tc}$$

در این روابط، پروبیت شکل تبدیل شده‌ای از درصد جوانه‌زنی تجمعی است که این تبدیل باعث خطی شدن رابطه سیگموئیدی شکل پاسخ جوانه‌زنی نسبت به لگاریتم زمان می‌شود (۲۰ و ۲۲)، T دمای اعمال شده برای جوانه‌زنی، T_b درجه حرارت پایه که بذور در کمتر از آن دما قادر به جوانه‌زنی نباشد، T_c دمایی است که بذور در بیشتر از آن دما قادر به جوانه‌زنی نباشد، t_g زمان تا جوانه‌زنی نسبت-های مختلف جوانه‌زنی، θ_T زمان حرارتی، $\theta_{T(50)}$ زمان حرارتی میانه-ای است که در آن ۵۰ درصد بذور جوانه بزنند، $T_{c(50)}$ حرارت سقف میانه‌ای است که در آن ۵۰ درصد بذور جوانه‌زنی ندارند، $\sigma_{\theta T}$ نیز انحراف معیار لگاریتمی زمان حرارتی در بین بذور یک توده بذری است و σ_{Tc} نیز انحراف معیار درجه حرارت سقف در یک توده بذری است.

مدل زمان رطوبتی:

سانتی گراد، درصد جوانه‌زنی بذور در پتانسیل آب ۰/۲۵- مگاپاسکال کمتر از شاهد بدون تنش بود. بررسی تاثیر سطوح تنش خشکی در هر سطح دمایی همچنین نشان داد که میزان جوانه‌زنی هندوانه در پتانسیل آب ۱/۲۵- مگاپاسکال به صفر رسید (جدول ۲). بعلاوه در پتانسیل ۱ مگاپاسکال تنها در محدوده حرارتی ۲۰ تا ۳۰ درجه سانتی گراد جوانه‌زنی وجود داشت. در صورتی که در پتانسیل آب ۰/۵- و ۰/۷۵- مگاپاسکال در دماهای ۱۵ و ۳۵ درجه سانتی گراد نیز جوانه‌زنی ثبت شد. پیش تر نیز اثر برهم کنش دما و تنش خشکی بر جوانه‌زنی تعدادی از گیاهان معنی‌دار گزارش شده بود (۱ و ۹). پیش تر نیز گزارش شده است که جوانه‌زنی هندوانه در دمای کمتر از ۱۵ و بیشتر از ۴۲ درجه سانتی گراد متوقف می‌شود (۳۰). میزان جوانه‌زنی هندوانه رقم Petite Sweet در ژرمیناتور و در دمای ثابت ۱۴ درجه سانتی گراد ۴۴ درصد گزارش شده است (۳۷). همچنین گزارش شده است که با کاهش پتانسیل آب بستر کاشت، دامنه حرارتی که جوانه‌زنی در آن در بیشینه خود قرار دارد، کاهش می‌یابد (۳۱ و ۳۵).

محیط کشت داشت. بطور کلی میانگین جوانه‌زنی در پتانسیل‌های مختلف نشان داد که دماهای کمتر و بیشتر از ۲۵ درجه سانتی‌گراد میزان جوانه‌زنی گیاه هندوانه را بطور معنی‌داری کاهش داد (جدول ۲). بعلاوه در دمای ۱۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد جوانه‌زنی رخ نمی‌دهد. پاسخ جوانه‌زنی هندوانه به دما تحت تاثیر پتانسیل آب بستر کشت قرار داشت. بطوری که در شرایط عدم تنش رطوبتی (۰ بار) و تنش خفیف رطوبتی (۰/۲۵- بار) درصد جوانه‌زنی در دمای ۲۰ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد یکسان بود. با این‌وجود با تشدید تنش رطوبتی میزان جوانه‌زنی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بطور معنی‌داری بیشتر از دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد بود. نتایج همچنین نشان داد که پاسخ جوانه‌زنی به پتانسیل آب بستر کشت تحت تاثیر دمای جوانه‌زنی قرار داشت. بطوریکه در محدوده حرارتی ۲۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد، تنش رطوبتی حاصل از پتانسیل آب ۰/۲۵- مگاپاسکال باعث کاهش معنی‌دار جوانه‌زنی نسبت به شاهد بدون تنش در هندوانه نشد (جدول ۲). در صورتی که در دماهای بالاتر از ۳۰ درجه و کمتر از ۲۰ درجه

جدول ۱- نتایج آنالیز واریانس درصد جوانه‌زنی بذور هندوانه در پاسخ به دما و پتانسیل‌های مختلف آب

Table 1- ANOVA for germination percentage affected by different levels of temperature and water potential in watermelon seeds

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	جوانه زنی Germination
دما Temperature (T)	6	11848.559**
پتانسیل آب Water potential (WP)	5	12083.315**
T×WP	30	1236.073**
خطا Error	82	1683.951
ضریب تغییرات CV (%)		7.2

**معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

** Significant at 1% level.

جدول ۲- پاسخ درصد جوانه‌زنی بذر هندوانه به دماها و پتانسیل‌های مختلف آب

Table 2- Germination percentage of watermelon in response to different levels of temperature and water potential

دما Temperature (°C)	پتانسیل آب Water potential (MPa)						Mean
	0	-0.25	-0.5	-0.75	-1.0	-1.25	
10	0.00a	0.00a	0.00a	0.00a	0.00a	0.00a	0.0f
15	60.0a	31.1b	0.0c	0.0c	0.0c	0.0c	15.2e
20	95.6a	93.3a	80.0b	48.00c	15.6d	0.0e	55.56b
25	95.6a	93.3a	86.7a	60.0b	28.9c	0.0d	60.7a
30	93.33a	88.9a	75.6b	24.4c	4.4d	0.0d	47.8c
35	64.4a	53.3b	31.1c	4.4d	0.0d	0.0d	25.6d
40	0.0a	0.0a	0.0a	0.0a	0.0a	0.0a	0.0f
Mean	58.1a	51.7b	39.0c	19.7d	6.9e	0.0f	

حروف مشابه در هر ردیف و ستون بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون LSD می‌باشد.

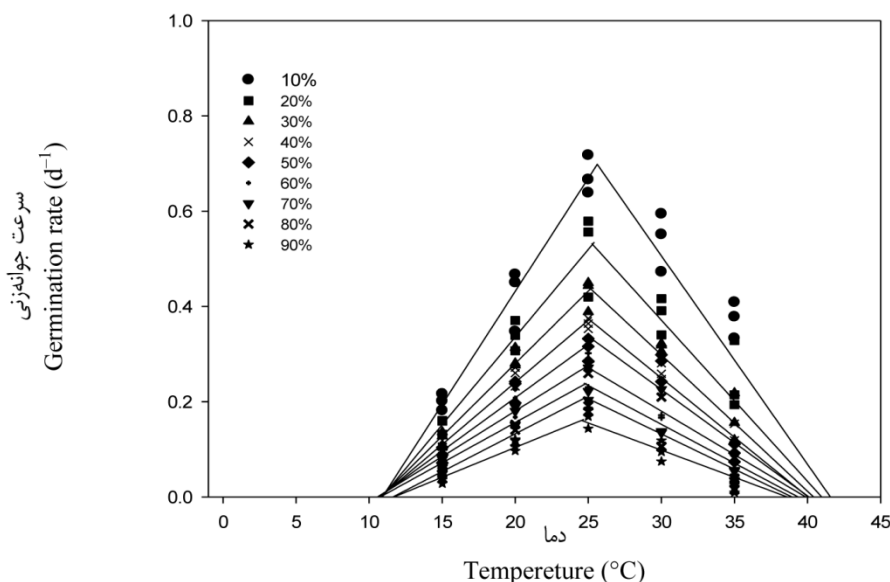
In each row and column, values with the same letter are not significantly different ($p \leq 0.05$), by LSD test.

پایه و حداکثر که باعث تخمین درصد جوانه زنی بذور با کمترین RMSE شدند نیز به ترتیب ۱۱/۵ و ۴۰/۱ درجه سانتی‌گراد در پتانسیل آب صفر بود (جدول ۴). اگرچه در پتانسیل‌های پایین آب کارایی مدل حرارتی برای تخمین جوانه زنی کاهش یافت (جدول ۳). تخمین حرارت پایه و حداکثر و شاخص‌های آماری آن در سایر پتانسیل‌های آب نیز در جدول ۴ نمایش داده شده است. اختلاف در تخمین درجه حرارت‌های پایه و حداکثر بین دو روش رگرسیون خطی ساده و تجزیه پروبیت مکرر در مورد گونه‌های مختلف گیاهی گزارش شده است (۱۵ و ۴۰).

درجه حرارت مطلوب جوانه‌زنی در ارقام مختلف هندوانه بین ۲۴ تا ۲۸ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است (۱۷ و ۳۰). درجه حرارت پایه، مطلوب و بیشینه برای جوانه‌زنی هندوانه (رقم Crimson sweet) به ترتیب ۱۰، ۲۸/۳ و ۴۰/۸ درجه سانتی‌گراد بوسیله مدل حرارتی تخمین زده شد (۵). تفاوت در برآورد درجه حرارت پایه در بین توده‌های بذری و در پتانسیل‌های مختلف آبی گزارش شده است، به همین منظور برآورد پارامترهای مدل زمان حرارتی اغلب در شرایط پتانسیل آب صفر برآورد می‌گردد (۱۱ و ۱۲). تغییر درجه حرارت پایه در پتانسیل‌های مختلف آب در برخی گیاهان همچون گل‌جالیز (*Orobancha aegyptiaca Pers.*) و برخی گونه‌های مرتعی (*Eurotia lanata Moq.*) گزارش شده است (۲۹ و ۳۹).

کمی‌سازی اثر درجه حرارت

نتایج نشان داد که بیشترین سرعت جوانه‌زنی مربوط به دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بود و سرعت جوانه‌زنی در دماهای کمتر و بیشتر از آن کاهش یافت (شکل ۱). بمنظور کمی کردن پاسخ جوانه‌زنی به دما، درجه حرارت‌های موثر در جوانه‌زنی به دو دسته حرارت‌های کمتر از حد مطلوب و حرارت‌های بیشتر از حد مطلوب تقسیم شد، که در واقع درجه حرارتی که باعث بیشترین سرعت جوانه‌زنی گردید، مرز این تقسیم‌بندی بود (۴۰). بر اساس روش برون‌یابی رگرسیون خطی (۱۸)، تخمین درجه حرارت پایه در پتانسیل آب صفر به روش رگرسیونی نشان داد که که دامنه درجه حرارت‌های پایه، مطلوب و بیشینه در بین صدک‌های مختلف جوانه زنی (۹۰-۱۰ درصد) به ترتیب ۱۱/۶-۱۰/۶، ۲۵/۷-۲۴/۶ و ۴۱/۵-۳۸/۷ بود (شکل ۱ و جدول ۳). دمای پایه، مطلوب و بیشینه حرارتی برای وقوع ۵۰ درصد جوانه‌زنی به ترتیب ۱۰/۷، ۲۵/۳ و ۴۰/۱ درجه سانتی‌گراد بود (جدول ۳). کمی کردن تاثیر حرارت با استفاده از مدل زمان حرارتی و روش تجزیه پروبیت مکرر (۱۸) با برازش معادله ۳ و ۴ بترتیب برای درجه حرارت‌های کمتر و بیشتر از حد مطلوب در پتانسیل‌های آب مختلف نشان داد که مدل زمان حرارتی بخوبی (با ضریب تبیین ۸۷ تا ۹۳ درصد) می‌تواند پویایی جوانه‌زنی در بذور هندوانه را در پتانسیل صفر آب توصیف کند (جدول ۳). همچنین در این روش مقدار دمای



شکل ۱- پاسخ سرعت جوانه‌زنی هندوانه به دما در پتانسیل آب صفر و تجزیه رگرسیونی این پاسخ برای صدک‌های مختلف توده بذری.

بستر کشت میزان جوانه‌زنی بذر هندوانه کاهش یافت، و در دامنه حرارتی ۱۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد، میزان متوسط جوانه زنی از ۵۸

کمی‌سازی اثر پتانسیل آب

نتایج نشان داد که بطور متوسط با منفی تر شدن پتانسیل آب

دارد، با افزایش دما از ۱۵ به ۲۵ درجه سانتی‌گراد پتانسیل آب پایه مورد نیاز برای جوانه‌زنی بذر شویید از ۰/۴۵- به ۱/۲۳- مگا پاسکال رسید و با افزایش دما از ۲۵ به ۳۵ درجه سانتی‌گراد به ۰/۵۱- مگا پاسکال رسید. و مقدار زمان رطوبتی (θ_H) نیز با افزایش دما از ۱۵ به ۳۵ درجه سانتی‌گراد از ۵/۵ مگا پاسکال در روز به ۳ مگا پاسکال در روز کاهش یافت (جدول ۵).

درصد در پتانسیل صفر به مقدار صفر درصد در پتانسیل ۱/۲۵- مگا پاسکال رسید (جدول ۲). مدل زمان رطوبتی تغییرات جوانه‌زنی بذر هندوانه را در پاسخ به رطوبت در سطوح مختلف دمایی را با ضریب تبیین بین ۸۸ تا ۹۳ درصد به خوبی توصیف نمود (جدول ۵، شکل ۴). با این‌وجود برآزش یک مدل رطوبتی که قادر به تخمین میزان جوانه‌زنی در همه سطوح حرارتی باشد، نتیجه موفقی نداشت (جدول ۵). نتایج نشان داد که در محدوده حرارتی که بذر هندوانه جوانه‌زنی

جدول ۳- دامنه درجه حرارت‌های کاردینال تخمین زده شده توسط رگرسیون خطی برای هندوانه در صدک‌های ۱۰-۹۰ جوانه‌زنی.

Table 3- Estimated cardinal temperature ranges by linear regression for watermelon germination in different percentiles (10-90%)

صدک‌ها Percentiles	دمای پایه T _b	دمای مطلوب T _o	دمای بیشینه یا سقف T _c or T _{max}
10	10.9	25.7	41.5
20	10.9	25.3	41.0
30	10.8	25.1	40.5
40	10.7	25.2	40.1
50	10.7	25.3	40.0
60	10.6	25.3	39.8
70	10.8	24.8	39.3
80	11.5	24.7	38.9
90	11.6	24.6	38.7

Figure 1- Germination rate of watermelon in response to temperature at water potential of 0 MPa, and regression analysis of germination response in different percentiles.

جدول ۴- ضرایب مدل زمان حرارتی برای تخمین جوانه‌زنی بذر هندوانه در دماهای کمتر (قسمت الف) و بیشتر از حد مطلوب (قسمت ب) در پتانسیل‌های مختلف آب

Table 4- Parameters of the thermal time model for prediction of watermelon germination at suboptimal and supraoptimal temperature ranges under different water potentials.

الف. دمای‌های کمتر از حد مطلوب: ۱۵-۲۵ درجه سانتی‌گراد

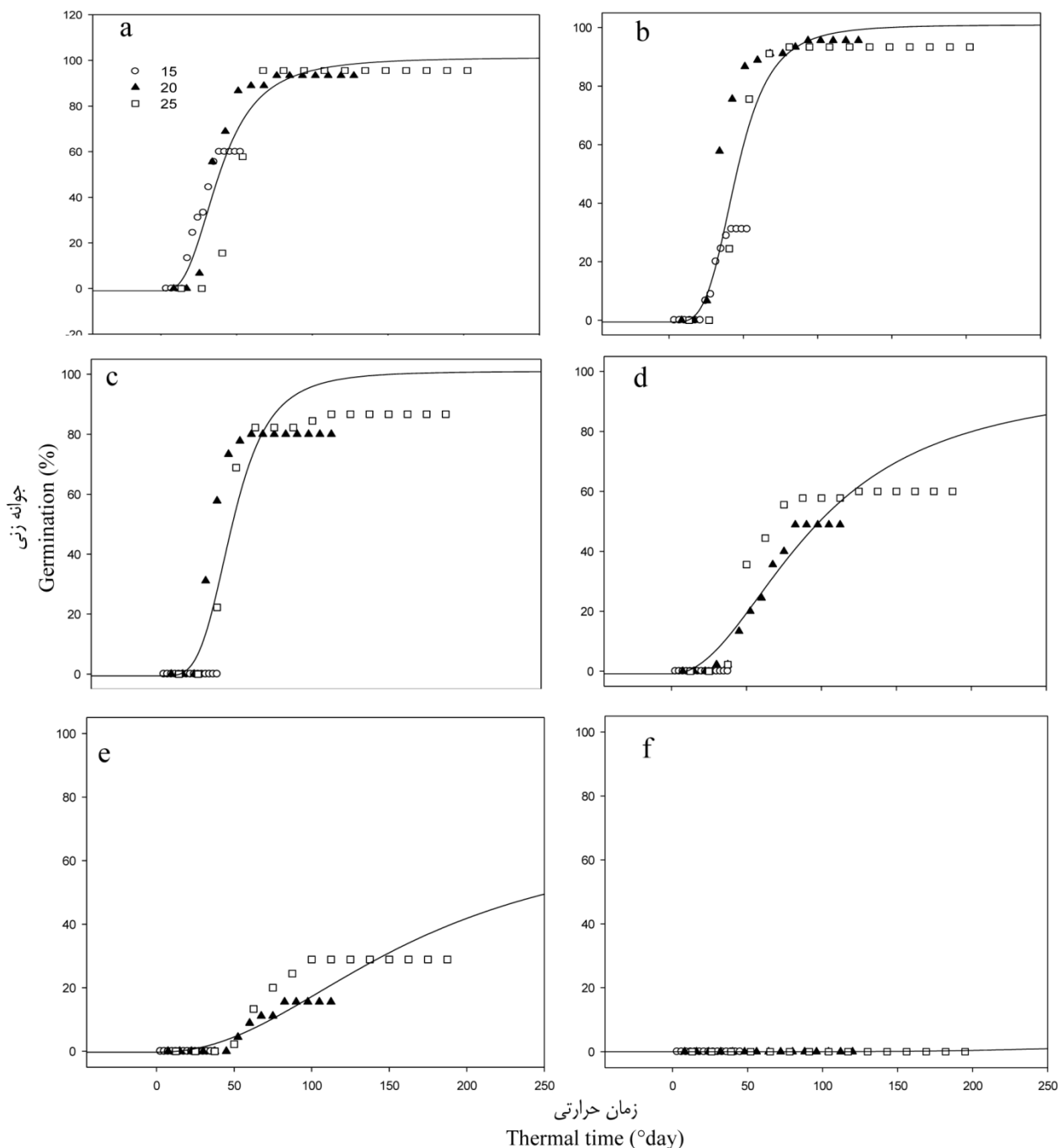
A. suboptimal temperature range: 15-25 °C

پتانسیل آب Water potential (Mpa)	$\theta_{T(50)}$ (Log°C.days)	T _b (°C)	$\sigma_{\theta T}$ (Log°C.days)	R ²	RMSE
0	1.58	11.5	0.23	0.93	0.10
0.25	1.65	11.5	0.18	0.92	0.12
0.50	1.67	12.5	0.18	0.90	0.13
0.75	1.99	12.5	0.35	0.90	0.08
1	2.37	12.5	0.39	0.87	0.06
1.25	-	-	-	-	-
Overall	1.88	12.5	0.38	0.37	0.29

ب. دمای‌های بیشتر از حد مطلوب: ۲۵-۳۵ درجه سانتی‌گراد

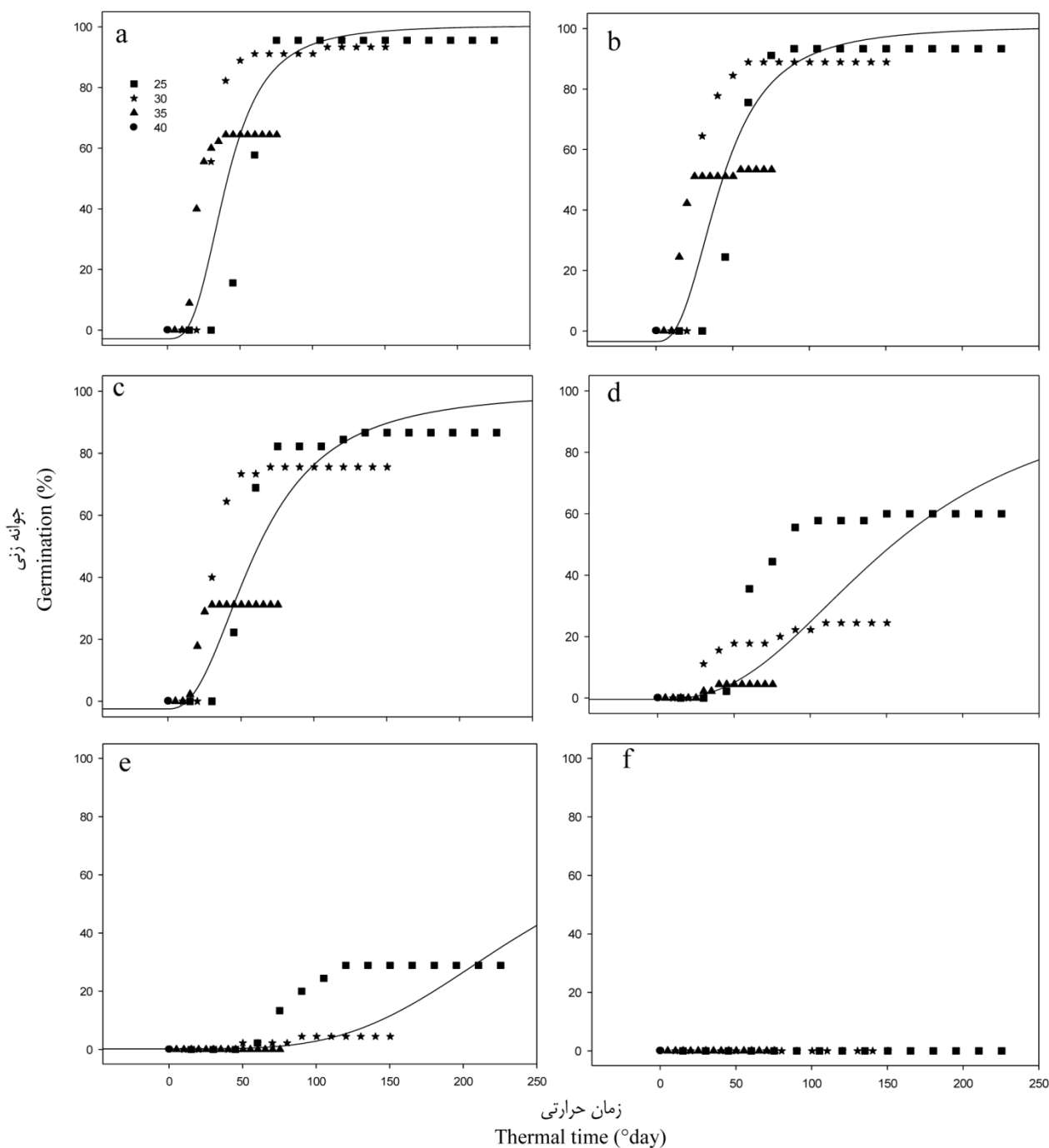
B. supraoptimal temperature range: 25-35 °C

پتانسیل آب Water potential (Mpa)	θ_{Tc} (°C.days)	T _{c(50)} (°C)	σ_{Tc} (°C)	R ²	RMSE
0	40	40.1	-3.87	0.87	0.14
0.25	40	39.7	-4.49	0.87	0.14
0.50	48	38.2	-5.45	0.88	0.12
0.75	120	37.1	-7.39	0.61	0.13
1	235	37.3	-8.19	0.45	0.08
1.25	-	-	-	-	-
Overall	57	37.0	-6.75	0.50	0.26



شکل ۲- مقادیر واقعی (نقاط) و شبیه سازی شده (خط) درصد جوانه زنی بذر هندوانه در پاسخ به درجه حرارت های کمتر از حد مطلوب (۱۵-۲۵) در پتانسیل آب صفر، (الف) -۰/۲۵، (ب) -۰/۵، (ج) -۰/۷۵، (د) -۱/۰، (ه) -۱/۲۵ و (و) -۱/۵ مگاپاسکال. مقادیر شبیه سازی شده با استفاده از مدل حرارتی و با توجه به ضرایب نمایش داده شده در جدول ۴ بدست آمد.

Figure 2- The observed (symbols) and predicted (lines) germination percentage of watermelon in response to suboptimal temperature ranges (15-25 °C) at water potentials of (a) 0, (b) -0.25, (c) -0.5, (d) -0.75, (e) -1.0, (f) -1.25 MPa. The predicted values obtained by the thermal time model using the parameters were shown in Table 4.



شکل ۳- مقادیر واقعی (نقاط) و شبیه‌سازی شده (خط) درصد جوانه‌زنی بذر هندوانه در پاسخ به درجه حرارت‌های بیشتر از حد مطلوب (۲۵-۴۰) در پتانسیل آب صفر، (الف) -۰/۲۵، (ب) -۰/۵، (ج) -۰/۷۵، (د) -۱/۰، (ه) -۱/۲۵ و (و) مگاپاسکال. مقادیر شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل حرارتی و با توجه به ضرایب نمایش داده شده در جدول ۴ بدست آمد.

Figure 3- The observed (symbols) and predicted (lines) germination percentage of watermelon in response to supraoptimal temperature ranges (25-40°C) at water potentials of (a) 0, (b) -0.25, (c) -0.5, (d) -0.75, (e) -1.0, (f) -1.25 MPa. The predicted values obtained by the thermal time model using the parameters were shown in Table 4.

درجه حرارت‌های بیشتر از حد مطلوب در گیاهان مختلف از جمله هندوانه بیشتر گزارش شده است (۵). کاهش زمان رطوبتی مورد نیاز

روند مشابه کاهش پتانسیل آب پایه در درجه حرارت‌های کمتر از حد مطلوب تا درجه حرارت مطلوب و روند افزایش پتانسیل آب پایه در

جوانه‌زنی بذور هندوانه ۴۰/۵ مگاپاسکال-درجه‌روز است. بعلاوه دمای مطلوب جوانه‌زنی آن نیز ۲۵/۲ درجه سانتی‌گراد تخمین زده شد. درجه حرارت مطلوب جوانه‌زنی در ارقام مختلف هندوانه بین ۲۴ تا ۲۸ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است (۱۷ و ۳۰). بخشنده و همکاران (۵) نیز دمای مطلوب جوانه‌زنی بذور هندوانه را ۲۷/۳ درجه سانتی‌گراد تخمین زدند. چن و برادفور (۱۴) گزارش کردند که تفاوت در ضرایب مدل حرارتی-رطوبتی حتی در یک گونه گوجه فرنگی بین توده‌های مختلف بذری آن نیز مشاهده می‌شود. بطور مثال درجه حرارت پایه بین توده‌های بذری یک گونه گوجه فرنگی بین ۱۲/۵ تا ۱۳/۵ درجه سانتی‌گراد و در گونه دیگری این اختلاف در حد نیم درجه سانتی‌گراد (۱۳ تا ۱۳/۵) بود. در مدل زمان حرارتی-رطوبتی جوانه‌زنی استفاده شده توسط برخی محققین (۲ و ۲۵) درجه حرارت پایه و زمان حرارتی-رطوبتی مورد نیاز برای جوانه‌زنی ثابت فرض شد، و از طرفی تغییرات پتانسیل آب پایه مطابق توزیع نرمال و ناچیز در نظر گرفته شده است. این روش بمنظور ساده سازی فرایند کمی‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. با این‌وجود تغییرات این ضرایب در پژوهش‌های مختلف برای گیاهان مختلف به اثبات رسیده است (۲۸ و ۳۹). در صورتی که تغییرات و تنظیمات فرآیندهای فیزیولوژیک بذر را در پاسخ به شرایط محیطی بپذیریم، تغییرات ضرایب مدل حرارتی-رطوبتی دور از انتظار نیست، بخصوص که این مدل‌ها بر مبنای فیزیولوژی گیاه طراحی شده‌اند (۳). کمی کردن اثر درجه حرارت و پتانسیل آب در مدل هیدروتایم بذور سیب زمینی (*Solanum tuberosum*)، هویج (*Daucus carota*) و پیاز (*Allium cepa*) نشان داد که پتانسیل آب پایه در درجه حرارت‌های کمتر و بیشتر از حد مطلوب می‌تواند متفاوت باشد (۳۶).

برای جوانه‌زنی بذور گیاهان با افزایش حرارت نیز در گونه‌های مختلف گیاهی پیشتر گزارش شده است (۴۰). توانایی جوانه‌زدن در پتانسیل آب کم‌تر به عنوان یکی از گزینه‌های سازگاری گیاهان با زیستگاه‌های خشک معرفی شده است (۸). افزایش پتانسیل آب پایه برای جوانه و کاهش زمان رطوبتی با افزایش دما پیشتر نیز گزارش شده است (۳ و ۴۰)، که این ویژگی می‌تواند باعث جوانه‌زنی سریع‌تر و مانع از جوانه‌زنی در رطوبت‌های کم شود (۲). پتانسیل آب پایه بالاتر باعث کاهش سرعت جوانه‌زنی و درصد نهایی جوانه‌زنی شده و زمان رطوبتی بالاتر نیز کاهش سرعت جوانه‌زنی را در پی دارد (۱۱). تاثیر آب بر روند جوانه‌زنی پیچیده‌تر از اثر حرارت می‌باشد بخصوص در پتانسیل‌های آب کمتر، که امکان رخداد تنظیم اسمزی نیز هست (۳۴). همچنین بیان شده است که تخمین ضرایب مدل در دامنه متفاوت رطوبتی و حرارتی، فهم دلایل تفاوت جوانه‌زنی بین گونه‌های مختلف و مقایسه بین گونه‌ها را تسهیل می‌نماید (۲ و ۴۰).

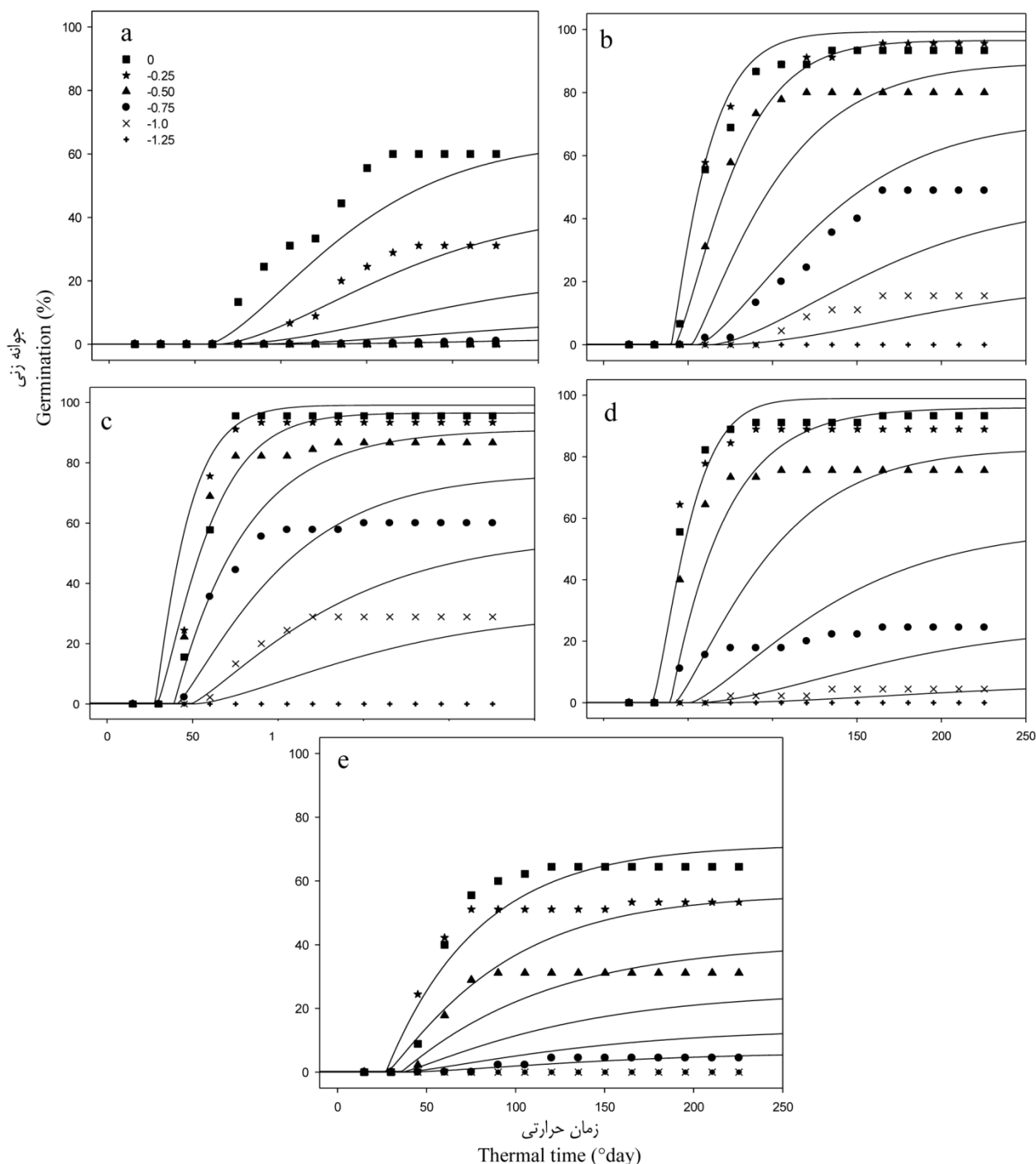
کمی‌سازی برهمکنش حرارت و رطوبت

نتایج برازش مدل زمان حرارتی-رطوبتی نشان داد که این مدل می‌تواند ۹۰ تا ۹۲ درصد تغییرات جوانه‌زنی بذر هندوانه در سطوح مختلف رطوبتی را در دو دامنه حرارتی پایین‌تر و بالاتر از حد مطلوب را توصیف نماید (شکل ۵ و جدول ۶). نتایج نشان داد که با افزایش دما از دامنه حرارتی کمتر از حد مطلوب به بیشتر از حد مطلوب، پتانسیل آب پایه برای جوانه‌زنی بذر هندوانه از ۱/۱۳- به ۱/۲- مگاپاسکال کاهش یافت. در مطالعه مشابهی پتانسیل آب آستانه ($\Psi_b(50)$) برای جلوگیری از ۵۰ درصد جوانه‌زنی بذور هندوانه، ۰/۹۶- مگاپاسکال با انحراف معیار ۰/۲۱ (σ_{Ψ_b}) مگاپاسکالی گزارش شده است (۵). نتایج نشان داد که زمان حرارتی-رطوبتی مورد نیاز برای

جدول ۵. ضرایب مدل زمان رطوبتی برای پیش‌بینی جوانه‌زنی بذر هندوانه در پاسخ به پتانسیل‌های مختلف آب و در درجه حرارت‌هایی که حداقلی از جوانه‌زنی در آنها ثبت شد.

Table 5. Parameters of the hydro-time model for prediction of watermelon germination at various water potential within temperature ranges caused a minimum germination.

دما Temperature (°C)	θ_H (MPa.days)	$\Psi_b(50)$ (MPa)	σ_{Ψ_b} (MPa)	R ²	RMSE
10	-	-	-	-	-
15	5.5	-0.45	0.396	0.93	0.05
20	4.5	-1.18	0.325	0.93	0.09
25	3.5	-1.23	0.374	0.91	0.11
30	3.0	-0.95	0.282	0.88	0.13
35	3.0	-0.51	0.570	0.89	0.08
40	-	-	-	-	-
Overall	13	-0.74	0.543	0.29	0.28



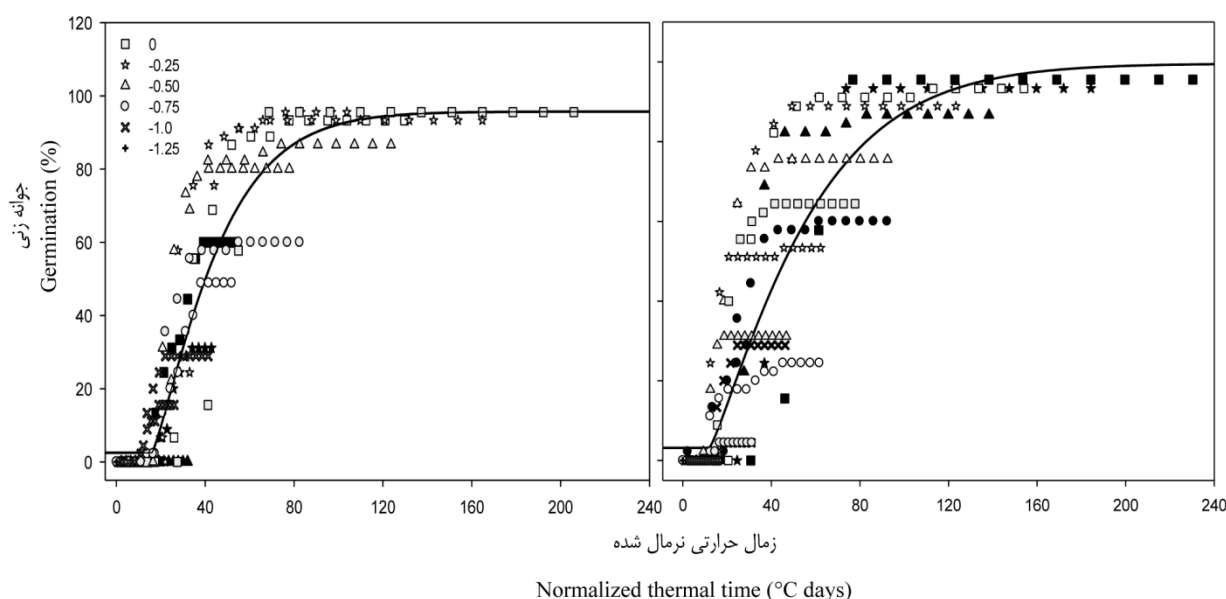
شکل ۴- مقادیر واقعی (نقاط) و شبیه‌سازی شده (خط) پاسخ جوانه‌زنی بذر هندوانه به پتانسیل‌های آب مختلف در درجه‌حرارت‌های ۱۵ (الف)، ۲۰ (ب)، ۲۵ (ج)، ۳۰ (د) و ۳۵ (ه) سانتی‌گراد که در آنها جوانه‌زنی رخ داده بود. مقادیر شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل زمان رطوبتی و با توجه به ضرایب نمایش داده شده در جدول ۵ بدست آمد.

Figure 4- The observed (symbols) and predicted (lines) germination percentage of watermelon in response to various water potentials at temperatures of 15 (a), 20 (b), 25 (c), 30 (d) and 35 (e) °C in which germination was occurred. The predicted values obtained by the hydro-time model using the parameters were shown in Table 5.

جدول ۶- ضرایب مدل زمان حرارتی-رطوبتی برای پیش‌بینی جوانه‌زنی بذر هندوانه در پاسخ به دماها و پتانسیل‌های مختلف آب.

Table 6- Parameters of the hydrothermal time model for prediction of watermelon germination at different levels of water potential under suboptimal and supraoptimal temperatures

دما Temperature (°C)	θ_{HT} (MPa.°C.days)	T_b (°C)	$\Psi_{b(50)}$ (MPa)	$\sigma_{\Psi b}$ (MPa)	R^2	RMSE		
15-25	40.5	11.5	-1.13	0.37	0.92	0.10		
دما Temperature (°C)	θ_{HT} (MPa.°C.days)	T_b (°C)	T_o (°C)	K_T (MPa/°C)	$\Psi_{b(50)}$ (MPa)	$\sigma_{\Psi b}$ (MPa)	R^2	RMSE
25-40	40.5	11.5	25.2	0.09	-1.20	0.37	0.90	0.11



شکل ۵- مقادیر واقعی (نقاط) و شبیه‌سازی شده (خط) پاسخ درصد جوانه‌زنی بذر هندوانه به پتانسیل‌های مختلف آب در دماهای کمتر (نمودار سمت چپ) و بیشتر (نمودار سمت راست) از حد مطلوب. مقادیر شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل زمان حرارتی-رطوبتی و با توجه به ضرایب نمایش داده شده در جدول ۶ بدست آمد.

Figure 5- The observed (symbols) and predicted (lines) germination of watermelon in response to different levels of water potential at suboptimal (left) and supraoptimal (right) temperature ranges. The predicted values obtained by the hydrothermal time model using the parameters shown in Table 6.

نتیجه‌گیری کلی

۲۵ درجه سانتیگراد کمتر از سایر دماها بویژه دماهای بالاتر از ۲۵ درجه بود. نتایج نشان داد که مدل زمان حرارتی-رطوبتی یک ابزار مؤثر برای مطالعه جوانه‌زنی در شرایط مختلف و متغیر است، بطوریکه بیش از ۹۰ درصد از تغییرات جوانه‌زنی بذر هندوانه در شرایط مختلف دمایی و رطوبتی توسط این مدل قابل تخمین است. دمای پایه، مطلوب و حداکثر تخمین زده شده توسط مدل زمان حرارتی در شرایط عدم تنش خشکی (پتانسیل آب صفر) و مدل زمان حرارتی-رطوبتی به ترتیب ۱۱/۵، ۲۵/۲ و ۴۰/۱ درجه سانتیگراد بود. مقدار پتانسیل آب پایه برای جوانه‌زنی هندوانه در مدل زمان حرارتی-رطوبتی نیز حدود ۱/۱۳- تا ۱/۲- مگاپاسکال برآورد گردید. با اینحال اگر پویایی تغییرات و تنظیمات فرآیندهای فیزیولوژیک بذر را در پاسخ به شرایط محیطی بپذیریم، بروز درصدی از تغییرات در ضرایب مدل

جوانه‌زنی کامل و سریع بذرها و نهایتاً استقرار یکنواخت گیاهچه‌های قوی لازمه موفقیت تولید محصولات زراعی و باغی در هر منطقه است. نتایج این آزمایش نشان داد که بذور هندوانه در دامنه دمایی بین ۲۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد بیش از ۹۳ درصد جوانه‌زنی دارد، و دمای کمتر و پایین‌تر از این دامنه حرارتی باعث افت معنی‌دار درصد جوانه‌زنی آن خواهد شد. بطوری که در دمای پایین‌تر از ۱۵ درجه سانتی‌گراد و بالاتر از ۴۰ درجه سانتی‌گراد میزان جوانه‌زنی بذور هندوانه به صفر رسید. همچنین نتایج نشان داد که پتانسیل‌های آب کمتر از ۰/۲۵- مگاپاسکال باعث کاهش معنی‌دار جوانه‌زنی هندوانه می‌شود. اگرچه تاثیر منفی کاهش پتانسیل آب بر جوانه‌زنی در دمای

پتانسیل جوانه‌زنی هر گونه گیاهی را در هر منطقه‌ای با توجه به شرایط اقلیمی حاکم بر آن فراهم کرده، و از طرفی امکان مطالعه و تخمین اثرات بالقوه گرمایش جهانی بر جوانه‌زنی بذور گیاهان را نیز فراهم خواهد کرد.

حرارتی-رطوبتی در شرایط مختلف محیطی و ژنوتیپ‌های مختلف گیاهی دور از انتظار نیست. برآورد ضرایب این مدل‌ها، این توانایی را ایجاد می‌کند که میزان جوانه‌زنی گیاه را در شرایط مزرعه و با توجه به عوامل محدود کننده احتمالی تعیین کنیم. همچنین امکان تخمین

منابع

- 1- Akram-Ghaderi F., Soltani A. and Sadeghipour H.R. 2008. Effect of temperature and water potential on germination of medicinal pumpkin (*Cucurbita pepo*. convar. *pepo* var. *styriaca*), black cumin (*Nigella sativa* L.) and borago (*Borago officinalis* L.). Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources, 15(5): 157-170. (In Persian)
- 2- Allen P.S., Meyer S.E. and Khan M.A. 2000. Hydrothermal time as a tool in comparative germination studies. p.401-410. In: Black, M., Bradford, K. J., Vazquez-Ramos J. (ed.), Seed biology: Advances and applications, CAB International, Wallingford, UK.
- 3- Alvarado V., and Bradford K.J. 2002. A hydrothermal time model explains the cardinal temperatures for seed germination. Plant, Cell and Environment, 25: 1061-1069.
- 4- Argyris J., Dahal P., Hayashi E., Still D.W., and Bradford K.J. 2008. Genetic variation for lettuce seed thermoinhibition is associated with temperature-sensitive expression of abscisic acid, gibberellin, and ethylene biosynthesis, metabolism, and response genes. Plant Physiology 148: 926-947.
- 5- Bakhshandeh E., Atashi S., Hafeznia M., Pirdashti H., and Teixeira da Silva J. A. 2015. Hydrothermal time analysis of watermelon (*Citrullus vulgaris* cv. 'Crimson sweet') seed germination. Acta Physiologiae Plantarum, 37: 1737-1743.
- 6- Baskin C.C., and Baskin J. M. 2014. Seeds: Ecology, biogeography and evolution of dormancy and germination (2nd ed). Elsevier/Academic Press, San Diego, California, USA.
- 7- Bloomberg M., Sedcole J.R., Mason E.G., and Buchan G. 2009. Hydrothermal time germination models for radiata pine (*Pinus radiata* D.Don). Seed Science Research, 19: 171-182.
- 8- Bochet E., García-fayos P., Alborch B., and Tormo J. 2007. Soil water availability effects on seed germination account for species segregation in semiarid roadslopes. Plant and Soil, 295: 179 - 191.
- 9- Boddy L.G., Bradford K.J., and Fischer A.J. 2012. Population-based threshold models describe weed germination and emergence patterns across varying temperature, moisture and oxygen conditions. Journal of Applied Ecology, 49: 1225-1236.
- 10- Boroumand-Rezazadeh Z., and Koocheki A. 2006. Evaluation of cardinal temperature for three species of medicinal plants, Ajowan (*Trachyspermum ammi*), Fennel (*Foeniculum vulgare*) and Dill (*Anethum graveolens*). BIABAN (Desert Journal), 11, 11-16. (In Persian)
- 11- Bradford K.J. 1995. Water relations in seed germination. P.351-396. In: Kigel, J., Galili, G. (ed.), Seed Development and Germination. Marcel Dekker, New York,
- 12- Bradford K.J. 2002. Application of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. Weed Science, 50: 248-260.
- 13- Cave R.L., Birch C.J., Hammer G.L., Erwin J.E., and Johnston, M.E. 2011. Cardinal temperatures and thermal time for seed germination of *brunonia australis* (Goodeniaceae) and *calandrinia* sp. (Portulacaceae). HortScience, 46: 753-758.
- 14- Cheng Z., and Bradford, K.J. 1999. Hydrothermal time analysis of tomato seed germination responses to priming treatments. Journal of Experimental Botany, 50: 89-99.
- 15- Chantre G.R., Batlla D., Sabbatini M.R., and Orioli, G. 2009. Germination parameterization and development of an after-ripening thermal-time model for primary dormancy release of *Lithospermum arvense* seeds. Annals of Botany, 103: 1291-1301.
- 16- Dahal P. and Bradford K.J. 1994. Hydrothermal time analysis of tomato seed germination at suboptimal temperature and reduced water potential. Seed Science Research 4: 71-80.
- 17- Demir I., and Mavi K. 2004. The effect of priming on seedling emergence of differentially matured watermelon (*Citrullus lanatus* Thunb.) seeds. Scientia Horticulturae, 102: 467-473.
- 18- 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 at constant temperatures. Journal of Experimental Botany, 37: 1503-1515.
- 19- Ertan, S.K. 2010. Modelling the effect of temperature on seed germination in some cucurbits. African Journal of Biotechnology, 9: 1343-1353.
- 20- Fenner M., and Thompson K. 2005. The ecology of seeds. Cambridge University Press, Edinburgh House, Cambridge. 250 p.
- 21- Fernandez G., and Johnston M. 1995. Seed vigor testing in lentil, bean, and chickpea. Seed Science and Technology, 23: 617-627.

- 22- Finney D.J. 1971. Probit analysis. Third edition. Cambridge University Press, Cambridge.
- 23- Gareca E.E., Vandeloek F., Fernández M., Hermy M., Honnay O., Hermy M., and Honnay, O. 2012. Seed germination, hydrothermal time models and the effects of global warming on a threatened high Andean tree species. *Seed Science Research*, 22: 287–298.
- 24- Grundy A.C., Phelps K., Reader R.J., and Burston S. 2000. Modelling the germination of *Stellaria media* using the concept of hydrothermal time. *New Phytologist*, 148: 433–444.
- 25- Gummerson R.J. 1986. The effect of constant temperatures and osmotic potential on the germination of sugarbeet. *Journal of Experimental Botany*, 37:729–741.
- 26- Hasandokht M.R. 2012. *Vegetables Production Technology*. Selsele Press. Tehran. Iran. (in Persian)
- 27- Holt, J.S. and D.R. Orcutt. 1996. Temperature thresholds for bud sprouting in perennial weeds and seed germination in cotton. *Weed Science*. 44:523–533.
- 28- Kebreab E., and Murdoch A.J. 1999. Modelling the effects of water stress and temperature on germination rate of *Orobanchae aegyptiaca* seeds. *Journal of Experimental Botany*, 50): 655–664.
- 29- Kebreab E., and Murdoch A.J. 2000. The effect of water stress on the temperature germination rate of *Orobanchae aegyptiaca* seeds. *Journal of Experimental Botany*, 50): 655-664.
- 30- Kurtar E.S. 2010. Modelling the effect of temperature on seed germination in some cucurbits. *African Journal of Biotechnology*, 9: 1343–1353.
- 31- Larsen S.U., Bailly C., Côme 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: 35-50.
- 32- Michel B.E. and Kaufmann M.R. 1973. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiology*, 51: 914–916.
- 33- National Agriculture Statistics. 2017. Ministry of Jihad-Agriculture. Information and Communication Technology Center. Pp 116.
- 34- Ni B.R., and Bradford K.J. 1992. Quantitative models characterizing seed germination responses to abscisic acid and osmoticum. *Plant Physiology*, 98: 1057–1068.
- 35- Nozari-nejad M., Zeinali E., Soltani A., Soltani E., and Kamkar, B. 2013. Quantify wheat germination rate response to temperature and water potential. *Journal of Crop production*, 6: 117-135. (in Persian with English abstract)
- 36- Rowse H.R., and Finch-Savage, W.E. 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 Phytologist*, 158: 101–108.
- 37- Singh S., Singh P., Sanders D.C., and Wehner, T. C. 2001. Germination of watermelon seeds at low temperature. *Report-Cucurbit Genetics Cooperative*, 24: 59–64.
- 38- Steinmaus S.J., Timonhy S.P. and Jodie S.H. 2000. Estimation of base temperature for nine weed species. *Journal of Experimental Botany*, 51: 275– 286.
- 39- Wang R., Bai Y., and Tanino, K. 2005. Germination of winterfat (*Eurotia lanata* Moq.) seeds at reduced water potentials: testing assumptions of hydrothermal time model. *Environmental and Experimental Botany*, 53: 49–63.
- 40- Wen-Hu X., Fan Y., Baskin C. C., Baskin J.M., and Wang Y.R. 2015. Comparison of the effects of temperature and water potential on seed germination of Fabaceae species from desert and Subalpine grassland. *American Journal of Botany* 102: 649 – 660.



Simulation of Germination Response of Watermelon (*Citrullus lanatus* Thunb.) to Temperature and Water Potential

S.F. Saberli^{1*}- H. Nastari Nasrabadi²- Z. Shirmohamadi Ali AkbarKhani³

Received: 29-05-2019

Accepted: 05-11-2019

Introduction: A rapid, complete, and uniform seed germination is important to establish a healthy seedling that is a critical key to successful crop production. Therefore, identification of effective factors on germination and plant response to various conditions are important to use an appropriate agronomic managements. Temperature and water are the most important environmental factors controlling seed germination in plants. The crop growth models are among the most effective tools for using in crop management decisions. The response of seed germination to temperature and water potential can be simulated by thermal time, hydrotime and hydrothermal time models. Regarding the importance of watermelon production in Iran, this study was conducted to determine the cardinal temperatures of germination in watermelon plant, and also to quantify its germination in response to the temperature and water potential interaction. .

Materials and Methods: In order to investigate the effects of temperature and drought stress on seed germination and quantifying the germination responses; a factorial experiment was conducted with seven levels of temperature including 10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40 °C and the six levels of water potential including 0, -0.25, -0.5, -0.75, -1.0, and -1.25 MPa, respectively. A Ψ of 0 MPa was obtained using distilled water. The negative Ψ levels were prepared by polyethylene glycol (PEG 6000; Merck, Germany) according to Michel and Kaufman (1973). For each treatment, four 25-seed replicates were placed in 9-cm petri dishes containing one disk of Whatman No. 1 filter paper, with 7 mL of test solutions. Cumulative germination percentage was transformed to probit regression against time log (Finney, 1971; Steinmaus et al., 2000), and the time taken for cumulative germination (t_g) to reach subpopulation percentiles (10–90%) was estimated from this function according to Steinmaus et al. (2000). Then the germination rates (GR) were calculated as the inverses of the germination times for each percentile at each T or Ψ . The preliminary estimation of the parameters in the TT, and HT models were obtained by plotting GR versus T and Ψ for each percentile. Then using repeated probit analysis developed by Ellis et al. (1986), the exact parameters for the TT, HT and HTT models were determined for the whole seed population. All statistical procedure were done by SAS and Excel software, and the figures were drawn by SigmaPlot10 software.

Result and Discussion: The analysis of variance showed that the temperature, water potential and their interaction had significant effect on the germination percentage of the watermelon plant. Seed germination of watermelon was about 96 % under the optimal conditions. However, the germination ability was affected by the temperature and water potential of the seedbed. The results showed that the germination was decreased by decreasing water potential, at all temperature levels. The seeds of watermelon germinated over a range of water potentials from 0 to -1 MPa. Furthermore, the lowest germination loss associated with decreasing water potential observed at temperature range of 20-30 °C (compared to temperatures below and above this range). The maximum percentage of germination was recorded at 20-30 °C, while no seeds germinated at 10 and 40 °C. The results also showed that the highest germination rate was obtained at 25 °C and the germination rate decreased at lower and higher temperature than this range. While watermelon seeds were grown under no water stress condition, the estimated base and ceiling temperatures of germination by a linear regression method were 10.7 and 40.0 °C, respectively. However thermal time model was used, but the base and the maximum temperatures were estimated as 11.5 and 40.1 °C, respectively. Furthermore, an optimum temperature of 25.2 °C was predicted by hydrothermal time model for watermelon germination. The results showed that the base temperature and median thermal time to germination were varied with changing water potential. The hydrotime analysis showed that the base water potentials was in a range from -0.45 to -1.23 Mpa, that differed with changing water potential. Watermelon seeds had higher base water potential and also required a longer hydrotime for

1 and 2- Assistant Professors, Department of Horticulture Science and Engineering, High Educational Complex of Torbat-e Jam

(*-Correspondin Author Email: sf.saberli@yahoo.com)

3 - Assistant Professor, Department of Water Science and Eengineering, High Educational Complex of Torbat-e Jam

germination under non-optimal temperature. Hydrothermal time analysis showed that seed germination responses to temperature and water potential might as well quantified by parameters derived from hydrothermal time models ($R^2= 0.90-0.92$). The amount of hydrothermal time required to germinate was 40.5 MPa °C days on the suboptimal and supra optimal temperature ranges. The HTT model showed that the $\Psi_b(50)$ increased by 0.09 MPa with every degree increase in temperature above optimum temperature.

Conclusions: The thermal time, hydrotime and hydrothermal time models well described germination time course of watermelon seeds in response to temperature and water potential. Thus, the estimated parameters of these germination models allowed us to characterize the germination behavior of watermelon seeds under varying environmental conditions and global warming.

Keywords: Base water potential, Hydrothermal time model, Probit analysis, Water stress.