

کمی سازی پاسخ جوانه زنی شوید (*Anethum graveolens* L.) به دما و تنش خشکی توسط مدل زمان حرارتی-رطوبتی

سید فرهاد صابری علی^{۱*} و محمد ناصر مودودی^۲

۱ و ۲. استادیاران گروه علوم و مهندسی باغبانی، مجتمع آموزش عالی تربت جام، خراسان رضوی، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۰۲ - تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۴/۳۰)

چکیده

دما و رطوبت از مهمترین عوامل محیطی کنترل کننده جوانه زنی در گیاهان می باشند. به منظور بررسی تأثیر دما و تنش خشکی بر جوانه زنی بذر شوید و کمی سازی آن، آزمایشی به صورت فاکتوریل با هشت سطح دما شامل ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سلسیوس و هفت سطح تنش خشکی شامل ۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ - مگاپاسکال انجام شد. نتایج نشان داد در همه سطوح دمایی با کاهش پتانسیل اسمزی، میزان جوانه زنی کاهش یافت، با این وجود شدت این کاهش در محدوده حرارتی ۲۰ تا ۳۰ درجه سانتی گراد کمتر بود. با دو روش مختلف، درجه حرارت پایه جوانه زنی شوید ۲/۳ و ۲/۹ درجه سانتی گراد و درجه حرارت حداکثر جوانه زنی آن ۴۳/۰ و ۴۷/۳ درجه سانتی گراد برآورد شد. دمای مطلوب جوانه زنی برای شوید نیز حدود ۲۶ درجه سانتی گراد به دست آمد. مقدار پتانسیل آب پایه برای جوانه زنی شوید در مدل زمان حرارتی-رطوبتی نیز ۰/۵۳ - مگاپاسکال محاسبه شد. نتایج همچنین نشان داد که با افزایش حرارت، پتانسیل آب پایه برای جوانه زنی بذر شوید در حد نیم واحد مگاپاسکال افزایش یافت. در نهایت مشخص شد که در صورت متغیر در نظر گرفتن پتانسیل آب پایه در واکنش به تغییرات دما، مدل زمان حرارتی-رطوبتی به خوبی قادر است پاسخ جوانه زنی شوید به حرارت و رطوبت را کمی کند.

واژه های کلیدی: تجزیه پروبیت، پتانسیل آب پایه، شوید، گیاه دارویی و مدل سازی.

Quantifying of germination response in dill (*Anethum graveolens* L.) to temperature and drought stress by hydrothermal time model

Seyed Farhad Saberli^{1*} and Mohammad Naser²

Assistant professors, Department of Horticulture Science and Engineering, High Educational Complex of Torbat-e Jam, Khorasan Razavi, Iran

(Received: January 22, 2018 - Accepted: July 21, 2018)

ABSTRACT

Temperature and water are the most important environmental factors controlling seed germination in plants. In order to investigate the effect of temperature and drought stress on seed germination and quantifying of germination; a factorial experiment was conducted with eight temperature levels including 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40 degrees Celsius and the seven levels of drought stress including 0, 0.5-0.0, -0.2, -0.3, -0.4, -0.5 and -0.6 MPa, respectively. The results showed that the germination was decreased by decreasing osmotic potential at all temperature levels. However, the intensity of this decrease was less in the range of 20 to 30°C. Using two different methods, the base and maximum temperature of dill germination was estimated in the range of 2.3 and 2.9 °C and 43.0 and 47.3 °C, respectively. The optimum temperature for dill germination was 26 °C. The estimated value of base water potential for germination was -0.53 Mpa with the hydrothermal time model. The results also showed that water base potential for dill germination was increased by -0.5 Mpa as temperature increased. Finally, it was found that if the base water potential taking into account variable in response to changing temperature, then the hydrothermal time model can be good enough to quantify dill germination response to temperature and water.

Keywords: *Anethum graveolens*, Base water potential, medicinal plant, modelling and probit analysis.

* Corresponding author E-mail: sf.saberli@yahoo.com

مقدمه

جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه از مراحل بحرانی در چرخه زندگی گیاهان می‌باشد (Baskin & Baskin, 2014). موفقیت یا عدم موفقیت تولید گیاهان به جوانه‌زدن کامل و سریع بذرها و تولید گیاهچه‌های قوی وابسته است. بنابراین درک مناسب از رفتار جوانه‌زنی در شرایط مختلف محیطی دارای اهمیت زیادی است. (Fenner & Thompson, 2005) جوانه‌زنی بذر توسط عوامل مختلف محیطی از قبیل حرارت، رطوبت و اکسیژن کنترل می‌شود که در این میان دما و رطوبت از مهمترین عوامل محیطی کنترل‌کننده جوانه‌زنی در بسیاری از گیاهان می‌باشند (Baskin & Baskin, 2014). گیاهان دارای سه دمای اصلی (کاردینال) شامل دمای پایه یا حداقل، دمای مطلوب و دمای حداکثر یا سقف برای جوانه‌زنی هستند، دمای پایه و حداکثر دماهایی هستند که به ترتیب در دماهای پایین‌تر و بالاتر از آنها، جوانه‌زنی متوقف می‌شود و دمای مطلوب، دمایی است که در آن جوانه‌زنی در کوتاهترین زمان ممکن اتفاق می‌افتد، یعنی سرعت جوانه‌زنی در حداکثر است (Alvarado & Bradford, 2002). دیگر عوامل محیطی ضروری برای جوانه‌زنی رطوبت قابل‌دسترس است که خود تابعی از پتانسیل آب خاک و بذر گیاه می‌باشد (Bradford, 2002). با افزایش پتانسیل آب، درصد و سرعت جوانه‌زنی به شدت کاهش می‌یابد (Grundy et al., 2000). اگرچه واکنش گونه‌های سازگار به محیط‌های خشک نسبت به گونه‌های سازگار به محیط‌های مرطوب ممکن است به تنش آبی کمتر باشد (Allen et al., 2000). انواع مختلفی از مدل‌های ریاضی برای شرح رابطه بین سرعت جوانه‌زنی بذر گیاهان با دما و رطوبت استفاده شده است. پاسخ جوانه‌زنی بذر به اثر دما و پتانسیل آب را می‌توان با مدل‌های زمان حرارتی (Thermal time)، زمان رطوبتی (Hydrotime) و زمان حرارتی-رطوبتی (Hydrothermal) که به ترتیب پاسخ به دما، پاسخ به رطوبت و پاسخ به برهمکنش دما و رطوبت را کمی می‌کنند، مدل‌سازی کرد (Allen et al., 2000; Ellis et al., 1986; Bradford, 2002). زمان حرارتی-رطوبتی (θ_{HT}) در ابتدا توسط (Gummerson, 1986) 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. مدل زمانی حرارتی-رطوبتی و

مفروضات مربوط به آن بعدها توسط (Bradford, 1994); Dahal and Bradford (2000, 1995) بیشتر توسعه یافت. 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. از مدل‌های زمان حرارتی-رطوبتی به‌طور گسترده‌ای برای پیش‌بینی جوانه‌زنی در گونه‌های بومی و زراعی معرفی شده استفاده شده است که از جمله می‌توان به گوجه (*Lycopersicon esculentum* Mill.)، هویج (*Daucus carota* L.) و سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) اشاره کرد (Alvarado and Bradford, 2002; Dahal & Bradford, 1999; Cheng & Bradford, 1999; Bradford, 1994). مدل زمان حرارتی-رطوبتی حدود ۸۸ درصد تغییرات جوانه‌زنی بذر واقعی سیب‌زمینی را پوشش داد (Alvarado and Bradford, 2002) و درجه حرارت پایه و مطلوب جوانه‌زنی به ترتیب $3/2$ و $19/3$ درجه سانتی‌گراد تخمین زده شد. بررسی جمعیت‌های مختلف از یک گونه سوروف (*Echinochloa phyllopogon*) در کالیفرنیا با استفاده از مدل حرارتی و رطوبتی نشان داد که درجه حرارت پایه در این علف‌هرز حدود ۹ درجه سانتی‌گراد و پتانسیل آب پایه در آن حدود $1/1$ - مگا پاسکال می‌باشد (Boddy et al., 2012). شوید (*Anethum graveolens* L.) گیاهی است یکساله متعلق به خانواده چتریان با برگ‌های متناوب و با پهنک منقسم، گل‌هایی زرد رنگ و میوه فندقه‌ای که مصارف مختلفی در صنایع دارویی و غذایی دارد. دانه‌های شوید دارای مصارف غذایی و دارویی است و از آن در درمان چربی خون، درد معده، سرماخوردگی، سرفه، مشکلات ادراری، نفخ، تشنج و اسپاسم استفاده می‌شود (Hasandokht, 2012). با توجه به اهمیت گیاه شوید در بین گیاهان دارویی و همچنین مرحله جوانه‌زنی در شروع چرخه زندگی گیاهان، این تحقیق با هدف تعیین درجه حرارت‌های کاردینال مرحله جوانه‌زنی گیاه شوید و همچنین کمی‌کردن پاسخ جوانه‌زنی آن به برهمکنش دما و رطوبت انجام پذیرفت.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال ۱۳۹۵ در آزمایشگاه مرکزی مجتمع آموزش عالی تربت‌جام با هدف کمی‌کردن جوانه‌زنی بذر

از تغییر غلظت و نهایتاً تغییر پتانسیل هر محلول در اثر تبخیر آب صورت گرفت (Fernandez & Johnston, 1995). لازم به ذکر است در انتهای هفته اول نیز محلول‌های تازه از پلی‌اتیلن‌گلیکول با پتانسیل‌های مورد نظر تهیه و بذور بعد از شستشو با آب مقطر برای ادامه فرایند جوانه‌زنی در هفته دوم به این محلول‌های تازه تهیه‌شده انتقال یافت. هر روز تعداد بذور جوانه‌زده شمارش می‌شدند و بذوری جوانه‌زده محسوب می‌شدند که طول ریشه‌چه آنها حداقل ۲ میلی‌متر بود. شمارش بذور تا هنگامی که به مدت ۴۸ ساعت افزایشی در تعداد بذور جوانه‌زده مشاهده نشد، ادامه یافت که بدین ترتیب طول دوره جوانه‌زنی ۱۵ روز ادامه داشت.

جهت کمی‌کردن واکنش جوانه‌زنی بذرها و تعیین سرعت جوانه‌زنی، در ابتدا درصد جوانه‌زنی تجمعی در هر دمای (T) یا پتانسیل آب (Ψ) معین در برابر زمان برازش داده شد (Steinmaus *et al.*, 2001)، 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 ارایه‌شده توسط Steinmaus *et al.* (2000) محاسبه شد. برای تجزیه و تحلیل زمان حرارتی، تیمارهای حرارتی به دو دامنه حرارتی کمتر و بیشتر از دمای مطلوب تقسیم شد و درجه حرارتی که منجر به بالاترین سرعت جوانه‌زنی در صدک ۵۰ ($1/t_{50}$) شد، معیار تفکیک این دو دامنه بود. سپس دامنه‌ای که درجه حرارت پایه و همچنین درجه حرارت حداکثر در آن قرار داشت به روش رگرسیون محاسبه گردید (Ellis *et al.*, 1986).

مدل زمان حرارتی

جوانه‌زنی بذر در پاسخ به دماهای کمتر از حد بهینه و بیشتر از حد بهینه به ترتیب با استفاده از رابطه ۱ و ۲ کمی شد. همچنین زمان حرارتی برای هر کسری از جوانه‌زنی نیز با استفاده از رابطه ۳ محاسبه گردید (Wen-Hu *et al.*, 2015):

(Cheng & Bradford, 1999):

معادله ۱:

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

معادله ۲:

$$Probite(g) = [T + (\theta_T / t_g) - T_{c(50)}] / \sigma_{Tc}$$

شوید در پاسخ به دما و آب قابل‌دسترس انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل پتانسیل آب در سطوح ۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶ و مگاپاسکال و دمای ثابت در سطوح ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد بود. برای ایجاد پتانسیل‌های مورد نظر از ترکیب پلی‌اتیلن‌گلیکول ۶۰۰۰ مطابق با رابطه ارایه‌شده توسط Michel & Kaufmann (1973) استفاده گردید. تیمارهای حرارتی توسط ژرمیناتور چهارقلوی با توان تامین ۴ درجه حرارت همزمان و با دقت حرارتی نیم درجه ساتی-گراد اعمال گردید.

بذرهای شوید پس از خریداری از منابع محلی و تا قبل از شروع انجام آزمایش، درون کیسه کاغذی در یخچالی با دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ماه نگهداری شد. استفاده از توده‌های بذری هر منطقه برای انجام تحقیقات بر روی گیاهانی که به‌طور کامل زراعی نشده‌اند و همچنین نگهداری بذور در یک شرایط ثابت مرسوم می‌باشد (Wen-Hu *et al.*, 2015, Larsen *et al.*, 2004). قبل از انجام آزمایش، بذرهای شوید با محلول هیپوکلیت سدیم ۱۰ درصد به مدت پنج دقیقه ضدعفونی شدند و سپس با آب شهری و سپس آب مقطر کاملاً شسته شدند. پس از آماده‌سازی محلول‌های پلی‌اتیلن‌گلیکول با پتانسیل‌های مختلف، جهت اعمال تنش خشکی ابتدا محلولها جهت همدم شدن با دماهای مختلف، به مدت ۲۴ ساعت در دماهای مورد نظر قرار گرفته و سپس تیمارهای مورد نظر در ۳ تکرار و در هر تکرار روی ۲۵ بذر اعمال شد. قبل از کشت بذور، پتری‌دیش‌ها برای ضدعفونی به مدت ۲۴ ساعت در داخل محلول هیپوکلیت ۱۰ درصد قرار گرفته و بعد از شستشو کامل با آب شهری و سپس آب مقطر برای خشک‌شدن در آونی با دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. از اشعه فرابنفش هود میکروبی نیز به مدت ۲ ساعت برای ضدعفونی کاغذهای صافی، پنس‌ها و ضدعفوی مجدد پتری‌ها قبل از کشت بذور استفاده شد. بذور بر روی یک لایه کاغذ صافی واتمن کشت و سپس ۵ میلی‌لیتر از محلول پلی-اتیلن-گلیکول برای تیمارهای خشکی و ۵ میلی-لیتر آب دوبار تقطیر برای تیمار شاهد (صفر) به هر پتری‌دیش اضافه شد. 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

معادله ۳:

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

که در این روابط پروبیت مقدار تبدیل‌شده درصد جوانه‌زنی تجمعی است که این تبدیل باعث خطی‌شدن رابطه سیگموئیدی شکل پاسخ جوانه‌زنی به لگاریتم زمان می‌شود (Finney, 1971)، T دمای جوانه‌زنی، T_b درجه حرارت پایه که بذر در کمتر از آن دما قادر به جوانه‌زنی نباشد، t_g زمان واقعی نسبت‌های مختلف جوانه‌زنی، θ_T زمان حرارتی و $\theta_{T(50)}$ زمان حرارتی میانه که در آن ۵۰ درصد بذور جوانه بزنند، $T_{c(50)}$ حرارت سقف میانه که در آن ۵۰ درصد بذور جوانه زنی ندارند، σ_{θ_T} نیز انحراف معیار لگاریتمی زمان حرارتی در بین بذور یک توده بذری است و σ_{T_c} نیز انحراف معیار درجه حرارت سقف در یک توده بذری است.

در این رابطه θ_{TH} زمان حرارتی-رطوبتی می‌باشد، 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 روش تکرار تجزیه و تحلیل پروبیت که توسط Ellis *et al.* (1986)، ارائه شده، برآورد گردید. مقادیری که کمترین خطای برآورد را باعث شد به‌عنوان مقادیر قطعی مدل در نظر گرفته شدند. آنالیز واریانس داده‌ها بعد از آزمون نرمالیتی خطا توسط نرم‌افزار SAS انجام پذیرفت. برای برآورد ضرایب اولیه مدل از روش اریه-شده توسط Steinmaus *et al.* (2000) در Excel و به‌منظور برآورد دقیق آنها از رویه PROC NLIN در نرم‌افزار SAS استفاده گردید. برای رسم نمودارها نیز از نرم‌افزار SigmaPlot استفاده گردید.

نتایج و بحث

درصد جوانه زنی

نتایج نشان داد که ۹۸ درصد از بذور شویید مورد استفاده در این تحقیق قابلیت جوانه‌زنی داشت، که بروز آن وابسته به میزان دما و پتانسیل آب محیط کشت داشت. تجزیه واریانس نشان داد که دما، پتانسیل آب و اثر متقابل آنها تاثیر معنی‌داری بر درصد جوانه‌زنی گیاه شویید دارند (جدول ۱). به‌طور کلی دماهای کمتر از ۲۰ درجه سانتی-گراد و بیشتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد میزان جوانه‌زنی گیاه شویید را به‌طور معنی‌داری کاهش داد (جدول ۲). همچنین سطوح تنش خشکی منفی‌تر از ۰/۱- مگاپاسکال کاهش معنی‌دار جوانه‌زنی در شویید را باعث شد. بررسی تاثیر سطوح تنش خشکی در هر سطح دمایی نشان داد که در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد، با افزایش پتانسیل آب از ۰/۱- مگاپاسکال به ۰/۶- مگاپاسکال افت جوانه‌زنی شویید نسبت به شاهد بدون تنش (آب مقطر) از ۶ درصد به ۱۰۰ افزایش یافت (جدول ۲). مقادیر افت جوانه‌زنی با افزایش پتانسیل آب از ۰/۱- مگاپاسکال به ۰/۶- مگاپاسکال در دما ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد نیز به‌ترتیب از ۷ درصد به ۱۰۰ درصد، از ۵ درصد به ۹۵ درصد، از ۳/۵ درصد به ۹۱ درصد، از ۳/۵ درصد به ۹۸ درصد و نهایتاً از ۸ درصد به ۱۰۰ درصد افزایش یافت. همان‌طور که مشاهده می‌شود

مدل زمان رطوبتی

در مدل زمان رطوبتی، نیز از روابط زیر برای کمی‌کردن پاسخ جوانه‌زنی به پتانسیل آب استفاده گردید:

معادله ۴:

$$\theta_H = (\Psi - \Psi_{b(g)}) t_g$$

معادله ۵:

$$Probite(g) = [\Psi - (\theta_H/t_g) - \Psi_{b(50)}] / \sigma_{\Psi b}$$

که در این رابطه Ψ مقدار واقعی پتانسیل آب در آزمون جوانه‌زنی، $\Psi_{b(50)}$ پتانسیل آب آستانه یا پایه برای ۵۰ درصد جوانه زنی، θ_H زمان رطوبتی و σ_{θ_H} انحراف معیار پتانسیل آب پایه است. زمانی هم که حرارت و رطوبت هر دو تغییر کنند، از زمان حرارتی-رطوبتی مطابق روابط زیر برای مدل‌سازی پاسخ جوانه‌زنی به برهمکنش دما و رطوبت استفاده شد:

معادله ۶:

$$\theta_H = (\Psi - \Psi_{b(g)})(T - T_b)t_g$$

معادله ۷:

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

گزارش شده بود (Akram-Ghaderi *et al.*, 2008). همچنین گزارش شده است که با کاهش پتانسیل آب، دامنه دمایی که جوانه‌زنی در آن در بیشینه خود قرار دارد، کاهش می‌یابد (Nozari-nejad *et al.*, 2013).

تأثیر محدودکننده تنش خشکی در دماهای کمتر از ۲۰ درجه سانتی‌گراد و بیشتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد بر جوانه‌زنی بذر شویید بیشتر بود. پیش‌تر نیز اثر برهم کنش دما و تنش خشکی بر جوانه‌زنی تعدادی از گیاهان دارویی معنی‌دار

جدول ۱. نتایج آنالیز واریانس درصد جوانه‌زنی بذر شویید در پاسخ به دما و تنش خشکی.

Table 1. Analysis of variance of germination percentage affected by temperature and drought stress in dill seeds.

S.O.V.	df	Germination (%)
Temperature (T)	7	11834.1624**
Water potential (WP)	6	18078.9683**
T*WP	42	35078.5714**
Error	112	32.4157
CV (%)		5.8

** معنی‌دار بودن در سطح ۱ درصد را نشان می‌دهد.

** Significant at 1% level.

جدول ۲. پاسخ جوانه‌زنی بذر شویید به دماها و پتانسیل‌های آب مختلف

Table 2. Germination percentage of dill in response to temperature and water potential.

Temperature	Water potential							Mean
	0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	
5	6.67 ^a	1.67 ^b	0.00 ^b	0.00 ^b	0.00 ^b	0.00 ^b	0.00 ^b	1.190 ^d
10	90.00 ^a	85.00 ^a	71.67 ^b	48.33 ^c	18.33 ^d	6.67 ^d	0.00 ^d	45.714 ^b
15	91.67 ^a	85.00 ^a	71.67 ^b	55.00 ^c	28.33 ^d	13.3 ^{de}	0.00 ^e	49.286 ^b
20	98.33 ^a	93.33 ^a	78.33 ^b	58.33 ^c	36.67 ^d	16.67 ^e	5.000 ^e	55.238 ^a
25	97.67 ^a	93.33 ^a	83.33 ^b	60.00 ^c	41.67 ^{cd}	21.67 ^{de}	8.33 ^e	57.857 ^a
30	95.00 ^a	91.67 ^a	80.00 ^b	61.67 ^{bc}	35.00 ^{cd}	15.00 ^{de}	1.67 ^e	54.286 ^a
35	83.33 ^a	76.67 ^a	58.33 ^b	43.33 ^c	15.00 ^d	0.00 ^d	0.00 ^d	39.524 ^c
40	0.00 ^a	0.0 ^a	0.0 ^a	0 ^a	0 ^a	0 ^a	0 ^a	0.000 ^d
Mean	70.208 ^a	65.833 ^b	55.417 ^c	40.833 ^d	21.875 ^e	9.167 ^f	1.875 ^g	

حروف مشابه در هر ردیف بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد می‌باشد.

In each row, values with the same letter are not significantly different ($P \leq 0.05$).

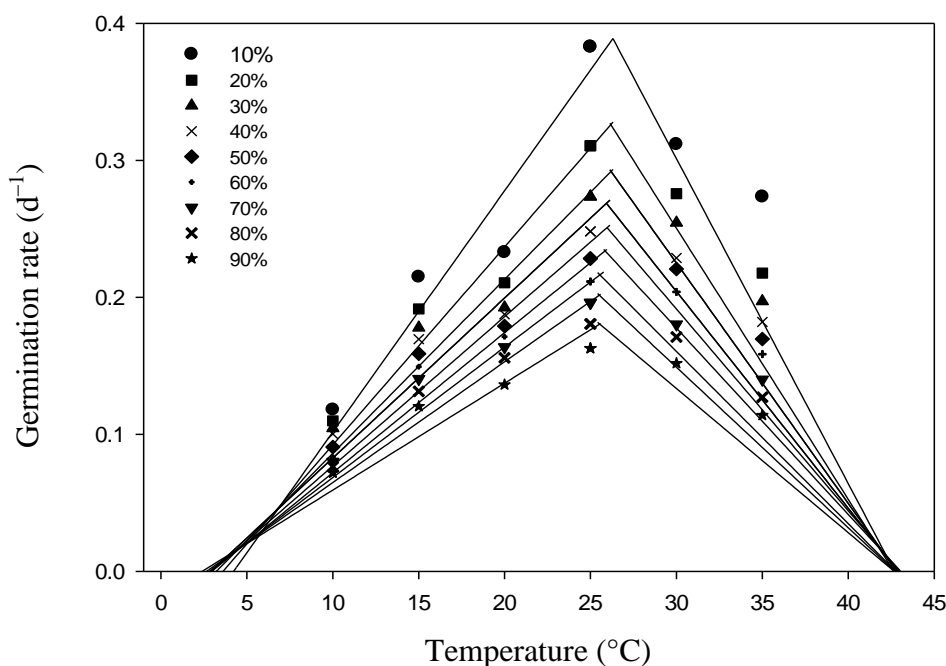
های موثر در جوانه‌زنی به دو دسته حرارت‌های کمتر از حد مطلوب و حرارت‌های بیشتر از حد مطلوب تقسیم شد، که در واقع درجه حرارتی که باعث بیشترین سرعت جوانه‌زنی گردید، مرز این تقسیم‌بندی بود (Wen-Hu *et al.*, 2015). نتایج حاصل از برازش معادله ۱ و ۲ به ترتیب برای درجه حرارت‌های کمتر و بیشتر از حد مطلوب در پتانسیل آب صفر با استفاده از روش تجزیه پروبیت مکرر (Ellis *et al.*, 1986) نشان داد که مدل زمان حرارتی به خوبی (با ضریب تبیین ۹۲ تا ۹۳ درصد) می‌تواند پویایی جوانه‌زنی در بذر شویید را توصیف کند (شکل ۲). همچنین در این روش، مقدار درجه حرارت پایه و حداکثر جوانه‌زنی که موجب کمترین RMSE در تخمین جوانه‌زنی شدند نیز به ترتیب ۲/۳ و ۴۷/۳ درجه سانتی‌گراد بود (جدول ۴). اختلاف در تخمین درجه حرارت‌های پایه و حداکثر بین دو روش

کمی‌سازی اثر درجه حرارت

نتایج نشان داد که جوانه‌زنی بذر شویید در ۵ درجه سانتی‌گراد ناچیز (کمتر از ۷ درصد) و در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد متوقف می‌شود (جدول ۲). بیشترین سرعت جوانه‌زنی نیز در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد حاصل شد و سرعت جوانه‌زنی در دماهای کمتر و بیشتر از آن کاهش یافت (شکل ۱). بر اساس روش برون‌یابی رگرسیون خطی (Ellis *et al.*, 1986)، تخمین درجه حرارت پایه، مطلوب و حداکثر در شویید نشان داد که دامنه درجه حرارت‌های کاردینال ذکر شده در بین صدک‌های ۱۰ تا ۹۰ درصد به ترتیب ۲/۴ تا ۴/۲، ۲۵/۵ تا ۲۶/۲ و ۴۲/۳ تا ۴۳/۰ بود (شکل ۱ و جدول ۳). Boroumand & Koocheki (2006) درجه حرارت پایه در شویید را ۵ درجه سانتی‌گراد تخمین زدند. به‌منظور کمی‌کردن پاسخ جوانه‌زنی به دما، درجه حرارت-

درجه حرارت پایه در بین پتانسیل‌های مختلف آب در برخی گیاهان همچون گل جالیز (*Orobancha aegyptiaca* Pers. و برخی گونه‌های مرتعی (*Wang et al.*, 2005,) وجود دارد (*lanata* Moq. (Kebreab & Murdoch, 1999).

رگرسیون خطی ساده و تجزیه پروبیت مکرر در مورد گونه های مختلف گیاهی گزارش شده است (*Chantre et al.*, 2009; Wen-Hu *et al.*, 2015). تغییرات درجه حرارت پایه در بین توده‌های بذری و پتانسیل‌های مختلف آبی اندک گزارش شده است، به همین منظور اغلب درجه حرارت پایه در شرایط پتانسیل آب صفر برآورد می‌گردد (*Bradford*, 1995, 2002). اگرچه گزارشات اندکی نیز در مورد تغییرات



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

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

جدول ۳. دامنه درجه حرارت‌های کاردینال برای شوید در صدک‌های ۱۰-۹۰ جوانه‌زنی

Table 3. Cardinal temperature ranges for dill germination in different percentiles (10-90).

Percentiles	T _b	T _o	T _c or T _{max}
10	4.23	26.31	42.65
20	3.60	26.22	42.74
30	3.24	26.22	42.81
40	2.93	25.95	42.91
50	2.92	25.95	43.03
60	2.89	25.93	43.05
70	2.79	25.59	42.77
80	2.69	25.50	42.70
90	2.41	25.50	42.67

جدول ۴. ضرایب مدل زمان حرارتی برای پیش‌بینی جوانه‌زنی بذر شوید در درجه حرارت‌های کمتر (قسمت الف) و بیشتر از حد مطلوب (قسمت ب) در پتانسل آب صفر.

Table 4. Parameters of the thermal time model for prediction of dill germination at suboptimal and supraoptimal temperature ranges at water potential of 0 MPa.

A (suboptimal)				
$\theta_{T(50)}$ (°Cday)	T_b (°C)	$\sigma_{\theta T}$ (°C)	R^2	RMSE
87	2.3	1.34	0.93	0.11
B (supraoptimal)				
θ_{TC} (°Cday)	$T_{c(50)}$ (°C)	σ_{TC} (°C)	R^2	RMSE
70	47.32	7.21	0.92	0.11

افزایش پتانسیل آب پایه برای جوانه و کاهش زمان رطوبتی با افزایش دما پیشتر نیز گزارش شده است (Wen-Hu *et al.*, 2015; Alvarado & Bradford, 2002) که این ویژگی می‌تواند باعث جوانه‌زنی سریع‌تر و مانع از جوانه‌زنی در رطوبت‌های کم شود (Allen *et al.*, 2000). 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 (Bradford, 1995). تاثیر آب بر روند جوانه زنی پیچیده‌تر از اثر حرارت می‌باشد به‌خصوص در پتانسیل‌های آب کمتر، که امکان رخداد تنظیم اسمزی نیز هست (Ni & Bradford, 1992). Wang *et al.*, 2005. نیز گزارش کردند که در دمای بالاتر از ۱۰ درجه سانتی‌گراد میزان تغییرات زمان رطوبتی بسیار کمتر از درجه حرارت کمتر از ۱۰ درجه سانتی‌گراد است. 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 (Allen *et al.*, 2000; Wen-Hu *et al.*, 2015).

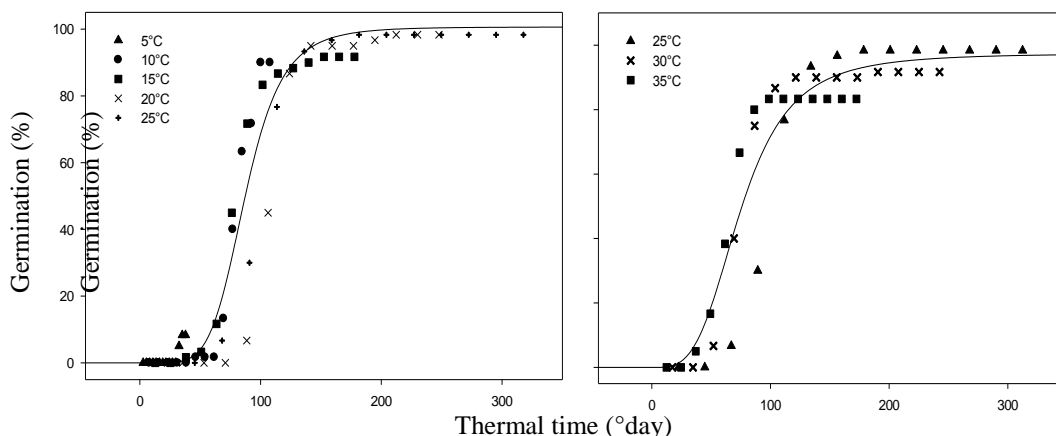
کمی‌سازی اثر پتانسیل آب

نتایج نشان داد که به‌طور متوسط افزایش پتانسیل آب از صفر به ۰/۶- بار باعث کاهش ۹۷ درصدی جوانه‌زنی شوید گردید (جدول ۲). مدل زمان رطوبتی، تغییرات جوانه‌زنی بذر شوید را در سطوح مختلف حرارتی با ضریب تبیین بین ۹۳ تا ۹۶ درصد به‌خوبی توصیف نمود (شکل ۳). در شکل ۳ منظور از زمان رطوبتی نرمال‌شده نیز زمان رطوبتی مورد نیاز برای جوانه‌زنی در پتانسیل‌های مختلف نسبت به آب خالص می‌باشد (Bradford, 2002). نتایج نشان داد که در محدوده حرارتی که بذر شوید بیش از ۱۰ درصد جوانه‌زنی دارد، با افزایش دما از ۱۰ به ۳۵ درجه سانتی‌گراد پتانسیل آب پایه مورد نیاز برای جوانه‌زنی بذر شوید از ۰/۸۰۵- به ۰/۵۰۸- و مقدار زمان رطوبتی (θ_H) از ۷ به ۳ رسید (جدول ۵). توانایی جوانه‌زدن در پتانسیل آب کم‌تر به‌عنوان یکی از گزینه‌های سازگاری گیاهان با زیستگاه‌های خشک معرفی شده است (Bochet *et al.*, 2007). نتایج همچنین نشان داد که میزان تغییرات زمان رطوبتی در دامنه درجه حرارت ۱۵ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد بسیار کمتر از تغییرات آن در درجه حرارت ۱۰ درجه سانتی‌گراد بود (جدول ۵).

جدول ۵. ضرایب مدل زمان رطوبتی برای پیش‌بینی جوانه‌زنی بذر شوید در پاسخ به پتانسیل‌های مختلف آب و در درجه حرارت‌هایی که حداقل موجب ۵۰ درصد جوانه‌زنی شدند.

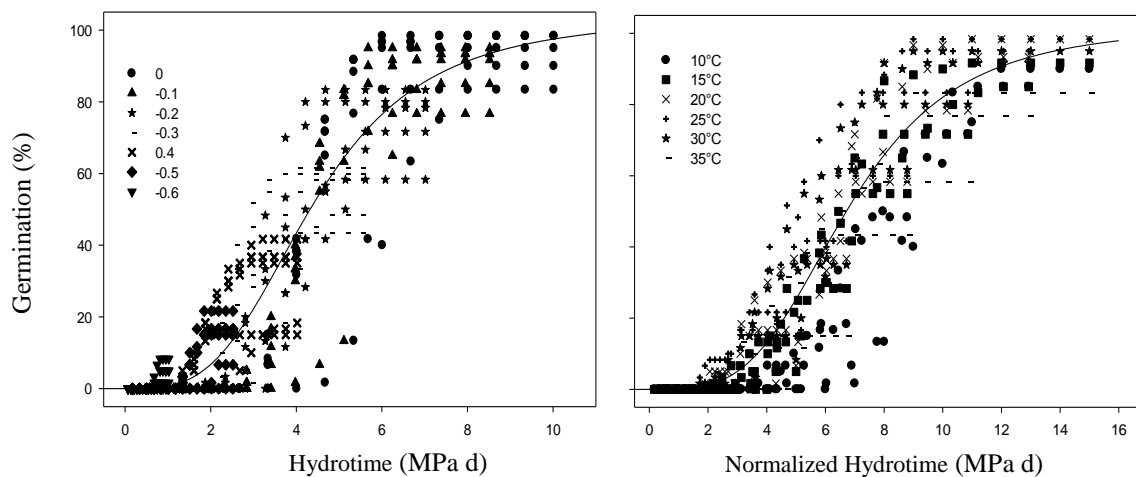
Table 5. Parameters of the hydro-time model for prediction of dill germination at various water potential within temperature ranges caused at least 10 percent germination.

Temperature	θ_H (MPa d)	$\psi_b(50)$ (MPa)	$\sigma_{\psi b}$	R^2	RMSE
10	7	-0.805	0.192	0.95	0.061
15	4.5	-0.679	0.205	0.96	0.066
20	4.0	-0.675	0.201	0.96	0.072
25	4.0	-0.684	0.210	0.95	0.081
30	3.5	-0.656	0.204	0.94	0.089
35	3.0	-0.508	0.228	0.93	0.077
Mean	4.3	-0.668	0.207	0.90	0.104



شکل ۲. مقادیر واقعی (نقاط) و شبیه‌سازی شده (خط) پاسخ جوانه‌زنی بذر شوید به درجه حرارت‌های کمتر (سمت چپ) و بیشتر (سمت راست) از حد مطلوب در پتانسیل آب صفر. مقادیر شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل حرارتی و با توجه به ضرایب نمایش داده شده در جدول ۴ به دست آمد.

Figure 2. The observed (symbols) and predicted (lines) germination of dill in response to suboptimal and supraoptimal temperature ranges at water potential of 0 MPa. The predicted values obtained by the thermal time model using the parameters shown in Table 4.



شکل ۳. مقادیر واقعی (نقاط) و شبیه‌سازی شده (خط) پاسخ جوانه‌زنی بذر شوید به پتانسیل‌های مختلف آب (سمت چپ) و پتانسیل آب نرمال شده (سمت راست) در درجه‌حرارت‌های مختلف. مقادیر شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل زمان رطوبتی و با توجه به ضرایب نمایش داده شده در جدول ۵ به دست آمد.

Figure 3. The observed (symbols) and predicted (lines) germination of dill in response to various water potentials (left) and normalized water potential at various temperature ranges. The predicted values obtained by the hydro-time model using the parameters shown in Table 5.

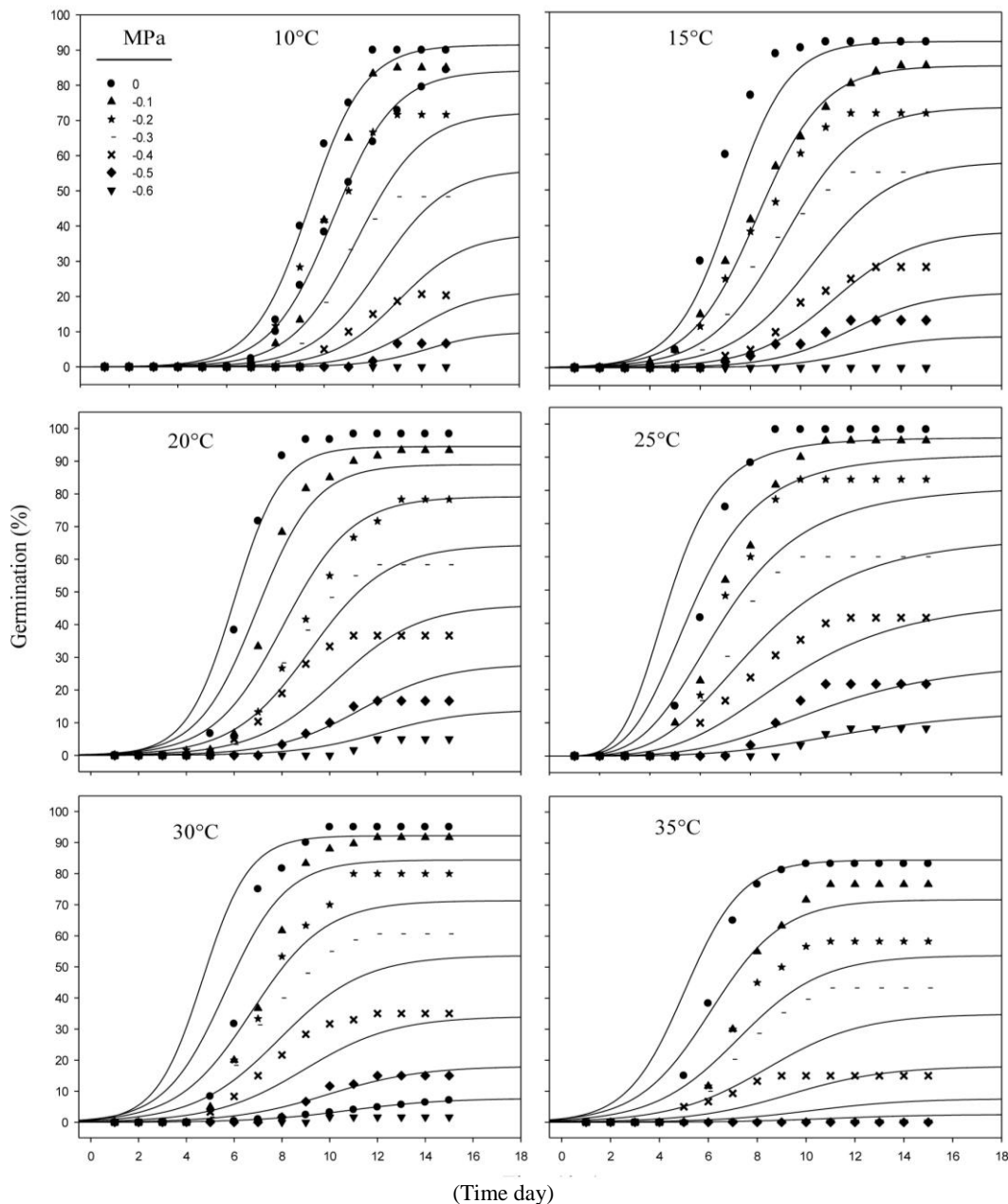
توان به‌خوبی تغییرات جوانه‌زنی بذر شوید را با ضریب تبیین بین ۹۰ تا ۹۵ درصد در سطوح مختلف رطوبتی و حرارتی توصیف نمود (شکل ۴ و جدول ۶). نتایج نشان داد

کمی‌سازی برهمکنش حرارت و رطوبت

نتایج برازش مدل زمان حرارتی-رطوبتی نشان داد که با متغیر در نظر گرفتن پتانسیل آب پایه در این مدل می-

مرتعی (*Eurotia lanata* Moq.) با افزایش دما از ۱۰ به ۲۵ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است (Wang et al., 2005).

که با افزایش حررات از ۱۰ درجه به ۳۵ درجه سانتی‌گراد، پتانسیل آب پایه برای جوانه‌زنی بذر شوید از ۰/۸۵- به ۰/۳۵- مگاپاسکال افزایش یافت. پیشتر نیز افزایش نیم واحدی پتانسیل آب پایه برای جوانه‌زنی در یک گونه



شکل ۴. مقادیر واقعی (نقاط) و شبیه‌سازی شده (خط) پاسخ جوانه‌زنی بذر شوید به پتانسیل‌های مختلف آب در درجه‌حرارت‌های مختلف. مقادیر شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل زمان حرارتی-رطوبتی و با توجه به ضرایب نمایش داده شده در جدول ۶ به‌دست آمد.
Figure 4. The observed (symbols) and predicted (lines) germination of dill in response to various water potentials at various temperature ranges. The predicted values obtained by the hydrothermal time model using the parameters shown in Table

زمان حرارتی-رطوبتی ($\theta_{HT(50)}$) و انحراف معیار پتانسیل پایه آب در پاسخ به تغییرات حرارتی بسیار کمتر بود، در

با توجه به اینکه نتایج تخمین ضرایب مدل نشان داد که در مقایسه با پتانسیل آب پایه تخمینی ($\Psi_b(50)$)، تغییرات

گیاهان مختلف به اثبات رسیده است (Alvarado & Bradford, 2002, Kebreab & Murdoch, 1999; Wang *et al.*, 2005). Wang *et al.*, 2005 گزارش کردند که ثابت در نظر نگرفتن پارامتر مدل زمان حرارتی-رطوبتی باعث بهبود تخمین جوانه‌زنی توسط این مدل گردید. آنها همچنین گزارش کردند که اندازه بذر نیز ممکن است در یک توده بذری روی تغییرات پارامترهای مدل اثرگذار باشد. 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، به‌خصوص که این مدل‌ها بر مبنای فیزیولوژی گیاه طراحی شده‌اند (Alvarado & Bradford, 2002). کمی‌کردن اثر درجه حرارت بر تغییرات پتانسیل آب پایه در مدل‌های هیدروتایم بذور سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.)، هویج (*Daucus carota*) و پیاز (*Allium cepa*) (Rowse & Finch-) (Savage, 2003) اعمال شده است، به‌طوری که پتانسیل آب پایه در درجه حرارت‌های کمتر و بیشتر از حد مطلوب متفاوت در نظر گرفته شده است.

نتیجه برای رسیدن به یک رابطه ساده‌تر اما کارآمد، مقدار زمان حرارتی-رطوبتی و انحراف معیار پتانسیل پایه آب (σ_{ψ_b}) ثابت در نظر گرفته شد. از طرفی واکنش پتانسیل آب پایه در پاسخ به تغییرات حرارتی نیز بوسیله رگرسیون خطی با ضریب تبیین ۹۶ درصد برآورد گردید (جدول ۶). Wang *et al.*, 2005 نیز از روش مشابهی برای تخمین پتانسیل آب پایه در درجه حرارت‌های مختلف در مدل زمان رطوبتی-حرارتی بهره جستند. آنها همچنین تغییرات زمان حرارتی-رطوبتی را با تغییر حرارت ناچیز گزارش کردند. در مدل زمان حرارتی-رطوبتی جوانه‌زنی استفاده شده توسط برخی محققین (Gummerson, 1986; Bradford, 1995; Allen *et al.*, 2000) 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 (Gummerson, 1986). این روش به‌منظور ساده‌سازی فرایند کمی‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. با این-وجود تغییرات این ضرایب در پژوهش‌های مختلف برای

جدول ۶. ضرایب مدل زمان حرارتی-رطوبتی برای پیش‌بینی جوانه‌زنی بذر شوید در پاسخ به پتانسیل‌های آب و دماهای مختلف که حداقل موجب ۵۰ درصد جوانه‌زنی شدند.

Table 6. Parameters of the hydrothermal time model for prediction of dill germination at various water potential within temperature ranges caused at least 10 percent germination.

Temperature	$\theta_{HT(50)}$ (d)	$\Psi_{b(50)}$ (MPa)	σ_{ψ_b}	R^2	RMSE
10	60	-0.82	0.198	0.95	0.06
15	60	-0.647	0.197	0.95	0.07
20	60	-0.619	0.191	0.94	0.08
25	60	-0.525	0.191	0.92	0.10
30	60	-0.47	0.188	0.90	0.11
35	60	-0.35	0.186	0.91	0.09
Mean	60	$\Psi_{b(50)} = 0.017 * \text{Temperature} - 0.955$	0.192	0.92	0.09

برآورد گردید. دمای مطلوب جوانه‌زنی برای شوید نیز ۲۶ درجه سانتی‌گراد برآورد گردید. بازه گسترده بین درجه حرارت کاردینال شوید نشان‌دهنده قابلیت جوانه‌زنی این گیاه در بازه‌های دمایی گسترده دارد. مقدار پتانسیل آب پایه برای جوانه‌زنی شوید در مدل زمان حرارتی-رطوبتی نیز ۰/۵۳- مگاپاسکال برآورد گردید. مدل زمان حرارتی-رطوبتی یک ابزار موثر برای مطالعه جوانه‌زنی در شرایط واقعی و متغییر است. برآورد پارامترهای این مدل‌ها، این توانایی را ایجاد می‌کند که میزان جوانه‌زنی گیاه را در شرایط مزرعه و با توجه به عوامل محدود کننده احتمالی

نتیجه‌گیری کلی

موفقیت یا عدم موفقیت تولید یک گیاه زراعی به جوانه‌زدن کامل و سریع بذرها و تولید گیاهچه‌های قوی وابسته است. نتایج این آزمایش نشان داد که بذر شوید در در دمای کمتر از ۱۰ درجه سانتی‌گراد و بالاتر از ۳۵ درجه سانتی-گراد دچار افت شدید جوانه‌زنی می‌شود. پتانسیل آب‌های بیش‌تر از ۰/۱- مگاپاسکال نیز کاهش معنی‌دار جوانه‌زنی شوید را باعث شد. در دو روش مختلف ارائه‌شده، درجه حرارت پایه در شوید حدود ۲/۳ و ۲/۹ درجه سانتی‌گراد و درجه حرارت حداکثر ۴۳/۰ و ۴۷/۳ درجه سانتی‌گراد

همچنین این مدل‌ها می‌تواند برای تخمین جمعیت و تراکم گیاهی در مطالعات اکولوژی نیز مورد استفاده قرار گیرد.

تعیین کنیم. همچنین امکان تخمین پتانسیل یک منطقه را برای جوانه‌زنی هر گونه گیاهی فراهم کرده و امکان تخمین اثرات بالقوه گرمایش جهانی بر جوانه‌زنی را فراهم می‌آورد.

REFERENCES

1. Akram-Ghadery, F., Soltani, A. & 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 Farsi)
2. Allen, P.S., Meyer, S.E. & Khan, M. A. (2000). Hydrothermal time as a tool in comparative germination studies. In: Black, M., Bradford, K. J., Vazquez-Ramos J. (Ed), *Seed biology: Advances and applications*, (pp.401-410) CAB International, Wallingford, UK.
3. Alvarado, V. & Bradford K. J. (2002). A hydrothermal time model explains the cardinal temperatures for seed germination. *Plant, Cell and Environment*, 25(8), 1061-1069.
4. Baskin, C.C. & Baskin, J. M. (2014). *Seeds: Ecology, biogeography and evolution of dormancy and germination* (2nd ed) . Elsevier/Academic Press, San Diego, California, USA.
5. Bochet, E., García-fayos, P., Alborch, B. & Tormo, J. (2007). Soil water availability effects on seed germination account for species segregation in semiarid roadslopes. *Plant and Soil*, 295 (1), 179 – 191.
6. Boddy, L. G., Bradford, K. J. & 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* 2012, 49(4), 1225-1236.
8. Bradford, K.J. (1995). Water relations in seed germination. In: Kigel, J., Galili, G. (Ed), *Seed Development and Germination*. (pp.351-396.) Marcel Dekker, New York,
9. Bradford, K.J. (2002). Application of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. *Weed Science*, 50(2), 248-260.
10. Chantre, G. R., Batlla, D., Sabbatini, M. R. & 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 (8), 1291-1301.
11. Dahal, P. & Bradford, K.J. (1994). Hydrothermal time analysis of tomato seed germination at suboptimal temperature and reduced water potential. *Seed Science Research*, 4(2), 71-80.
12. Ellis, R. H, Covell S., Roberts E.H. & 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(10),1503-1515.
13. Fenner. M. & Thompson K. (2005). *The ecology of seeds*. Cambridge University Press, Edinburgh House, Cambridge. 250 p.
14. Fernandez, G. & Johnston M. (1995). Seed vigor testing in lentil, bean, and chickpea. *Seed Science and Technology*, 23(1), 617-627.
15. Finney, D. J. (1971). Probit analysis. Third edition. Cambridge University Press, Cambridge.
16. Grundy, A.C., Phelps, K., Reader, R.J. & Burston, S. (2000). Modelling the germination of *Stellaria media* using the concept of hydrothermal time. *New Phytologist*, 148(3), 433-444.
17. Gummerson R. J. (1986). The effect of constant temperatures and osmotic potential on the germination of sugarbeet. *Journal of Experimental Botany*, 37(7),729-741.
18. Hasandokht, M. R. (2012). *Vegetables Production Technology*. Selsele Press. Tehran. Iran. (in Farsi)
19. Kebreab, E. & Murdoch, A.J. (1999). Modelling the effects of water stress and temperature on germination rate of *Orobanche aegyptiaca* seeds. *Journal of Experimental Botany* ,50 (334), 655-664.
20. Kebreab, E. & Murdoch, A.J.(2000). The effect of water stress on the temperature germination rate of *Orobanche aegyptiaca* seeds. *Journal of Experimental Botany*, 50(2), 655-664.
21. Larsen, S.U., Bailly, C., Côme D. & 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.
22. Michel, B.E. & Kaufmann, M.R. (1973). The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiology* 51(5), 914-916.
23. Ni, B.R. & Bradford, K.J. (1992). Quantitative models characterizing seed germination responses to abscisic acid and osmoticum. *Plant Physiology*, 98(3), 1057-1068.
24. Nozari-nejad, M., Zeinali, E., Soltani, A., Soltani, E. & Kamkar, B. (2013). Quantify wheat germination rate response to temperature and water potential. *Journal of Crop production*, 6 (4). 117-135. (In Farsi)
25. Rowse, H.R. & 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(1), 101–108.
26. Steinmaus, S.J., Timonhy, S.P. & Jodie, S.H. (2000). Estimation of base temperature for nine weed species. *Journal of Experimental Botany*, 51(3), 275–286.
27. Wang, R., Bai, Y. & 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(1), 49–63.
28. Wen-Hu, X., Fan, Y., Baskin, C. C., Baskin J.M. & 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 (5), 649 – 660.