

Evaluation of Seed Germination of *Nepeta* Species in Response to Water Potential Using the Hydrotime Model.

P. Salehi Shanjani^{1*}, H. Javadi², L. Rasoulzadeh³, L. Falah Hoseini³, and A. Mamedi⁴

^{1*}Corresponding author, Assoc. Prof., Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran, E-mail: psalehi1@gmail.com

² Assist. Prof., Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

³ Researcher, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

⁴ Ph.D. Graduate, Dept. Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Received: 06.06.2024

Accepted: 14.08.2024

Abstract

Background and Objectives:

Iran's arid and semi-arid regions span over 1.5 million km², accounting for nearly 92% of the country's total area. Drought is one of the most critical abiotic stresses affecting these areas. Due to challenges faced in breeding improved drought-tolerant genotypes, the domestication and cultivation of drought-resistant plants have emerged as the best solution to prevent the extinction of wild species and restore pastures. Selecting drought-tolerant plants during the germination stage is crucial for successful plant establishment. Seed germination is the first and most important developmental stage, that is influenced by genetic and environmental factors. The hydrotime model describes the relationship between water potential (ψ) and seed germination rate and percentage. This model quantifies the rate of germination progression (hydrotime constant: θ_H), the uniformity of germination (standard deviation of the base water potential: σ_{ψ_b}), and the stress tolerance of germination [base osmotic potential for 50% germination: $\psi_{b(50)}$]. These indicators can be used to determine seed vigor and seed dormancy and the effects of treatments on seed viability. This study aimed to use hydrotime model to predict of germination response of three medicinal species of *Nepeta haussknechtii*, *N. pogonosperma*, and *N. glomerulosa* subsp. *staffina* to water potential.

Methodology:

For each species, six water potential levels (0, -0.3, -0.6, -0.9, -1.2, and -1.5 MPa) were applied using a completely randomized design with three replications in 1402 at the Seed Technological Research Laboratory of the Natural Resources Gene Bank, Iran. Seed germination of species was recorded daily at a temperature of 25°C. Since no germination was observed at a potential level of -1.5 MPa, this treatment was excluded from the analysis. The hydrotime model was then fitted to the germination data, and the hydrotime constant (θ_H), base osmotic potential for 50% germination $\psi_{b(50)}$, and standard deviation of the base water potential (σ_{ψ_b}) were quantified.

Results:

The analysis of variance revealed significant effects of drought (at five levels of 0, -0.3, -0.6, -0.9, and -1.2 MPa) on all seed germination characteristics of all three *Nepeta* species ($P < 0.05$). The hydrotime model results showed that the germination rate under drought stress was higher in *N. haussknechtii* ($\theta_H = 48.32$) than in *N. glomerulosa* ($\theta_H = 52.13$) and *N. pogonosperma* ($\theta_H = 56.57$). Furthermore, the germination uniformity of *N. haussknechtii* ($\sigma_{\psi_b} = 0.18$) was higher than that of *N. glomerulosa* ($\sigma_{\psi_b} = 0.39$) and *N. pogonosperma* ($\sigma_{\psi_b} = 0.24$). In terms of drought resistance, *N. pogonosperma* ($\psi_{b(50)} = -1.006$) exhibited greater resistance compared to *N. haussknechtii* ($\psi_{b(50)} = -0.69$) and *N. glomerulosa* ($\psi_{b(50)} = -0.77$).

Conclusion:

Osmotic stress significantly impacted the germination pattern, timing, and rate of *Nepeta* seeds. Since seed quality concerning drought resistance determines the speed and uniformity of germination, the output of the hydrotime model, including parameters θ_H , σ_{ψ_b} , and $\psi_{b(50)}$, was effective in predicting germination percentages under drought stress conditions. Drought-tolerant genotypes were identified using the hydrotime model, with *N. pogonosperma* being the most resistant species, followed by *N. haussknechtii* and *N. glomerulosa*. The hydrotime model is a tool in breeding programs for identifying high-efficiency genotypes' resistance to stress conditions.

Keywords: Base potential, hydrotime coefficient, *Nepeta*, osmotic stress.

ارزیابی جوانه‌زنی بذر سه گونه دارویی پونه‌سا *Nepeta* در واکنش به پتانسیل آب با استفاده از مدل

هیدروتایم

پروین صالحی شانجانی^{۱*}، حمیده جوادی^۲، لیلا رسول‌زاده^۳، لیلا فلاح حسینی^۳ و آرش مامدی^۴

*^۱- نویسنده مسئول، دانشیار پژوهشی، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران

پست الکترونیک: psalehi1@gmail.com

^۲- استادیار، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران

^۳- محقق، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران

^۴- دانش‌آموخته دکتری، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۴

چکیده

سابقه و هدف:

وسعت مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران بیش از ۱/۵ میلیون کیلومتر مربع است که نزدیک به ۹۲ درصد از مساحت ایران را شامل می‌شود. به این ترتیب خشکی یکی از مهمترین تنش‌های غیرزیستی در این مناطق است. از آنجایی که اصلاح گیاهان برای تحمل به تنش خشکی همواره با مشکلات خاص خود مواجه است، کشت و اهلی‌سازی گیاهان مقاوم به خشکی بهترین راهکار برای جلوگیری از انقراض گونه‌های خودرو و احیای مراتع است. انتخاب گیاهان مقاوم به خشکی در حساس‌ترین مرحله زندگی گیاه که جوانه‌زنی است نقش مهمی در مراحل دیگر استقرار گیاه خواهد داشت. یکی از عوامل مهم کنترل‌کننده جوانه‌زنی در شرایط خشکی پتانسیل آب می‌باشد. مدل هیدروتایم رابطه درصد و سرعت جوانه‌زنی با پتانسیل آب را توصیف می‌کند. این مدل سرعت پیشروی جوانه‌زنی (θ_H)، یکنواختی جوانه‌زنی (σ_{ψ_b}) و میزان مقاومت به شرایط تنش خشکی ($\psi_{b(50)}$) را کمی می‌سازد. این شاخص‌ها در تعیین قدرت توده‌ها یا ارقام بذرها، بررسی کمون در بذرها و بررسی اثر تیمارهای بهبوددهنده قدرت بذرها کاربرد دارند. به‌منظور تعیین گونه‌های مقاوم به خشکی و پیش‌بینی پاسخ جوانه‌زنی سه گونه دارویی پونه‌سا *Nepeta haussknechtii*، *N. pogonosperma* و *N. glomerulosa* subsp. *staffina* به پتانسیل آب، از مدل هیدروتایم استفاده شد.

مواد و روش‌ها:

در هر یک از گونه‌ها شش سطح پتانسیل آب، ۰، -۰/۳، -۰/۶، -۰/۹، -۱/۲ و ۱/۵ مگاپاسکال در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار در سال ۱۴۰۲ در آزمایشگاه تحقیقات تکنولوژی بذر بانک ژن منابع طبیعی ایران اجرا شد. جوانه‌زنی بذر گونه‌های مختلف به صورت روزانه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد ثبت گردید. از آنجایی که در سطح پتانسیل ۱/۵ مگاپاسکال جوانه‌زنی ثبت نگردید، این داده‌ها حذف شدند. سپس مدل هیدروتایم به داده‌های جوانه‌زنی برازش داده شد. با مدل هیدروتایم ثابت هیدروتایم (θ_H)، پتانسیل پایه برای جوانه‌زنی ۵۰ درصد بذرها ($\psi_{b(50)}$) و انحراف معیار پتانسیل آب پایه (σ_{ψ_b}) گونه‌های مورد بررسی کمی‌سازی گردید.

یافته‌ها:

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر خشکی (در پنج سطح ۰، ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ مگاپاسکال) بر همه صفات جوانه‌زنی بذر سه گونه پونه‌سا در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. در این مطالعه داده‌های جوانه‌زنی سه گونه پونه‌سا در سطوح مختلف خشکی با استفاده از مدل هیدروتایم تجزیه شد. نتایج خروجی مدل نشان داد که سرعت جوانه‌زنی در شرایط تنش خشکی در گونه *N. haussknechtii* ($\theta_H=48/32$) نسبت به دو گونه *N. glomerulosa* ($\theta_H=52/13$) و *N. pogonosperma* ($\theta_H=56/57$) بیشتر بود. بعلاوه یکنواختی جوانه‌زنی *N. haussknechtii* ($\sigma_{\psi_b}=0/18$) بیشتر از *N. pogonosperma* ($\sigma_{\psi_b}=0/24$) و *N. glomerulosa* ($\sigma_{\psi_b}=0/39$) بود. از نظر مقاومت به خشکی، گونه *N. pogonosperma* ($\psi_{b(50)}=-1/06$) نسبت به دو گونه *N. haussknechtii* ($\psi_{b(50)}=-0/69$) و *N. glomerulosa* ($\psi_{b(50)}=-0/77$) مقاوم‌تر بود.

نتیجه‌گیری:

تنش اسمزی به‌طور معنی‌داری الگو، زمان و میزان جوانه‌زنی بذرهای گونه‌های مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار داد. از آنجایی که کیفیت بذر در ارتباط با میزان مقاومت به خشکی، تعیین‌کننده سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی در بذرها است، خروجی مدل هیدروتایم که شامل پارامترهای θ_H ، σ_{ψ_b} و $\psi_{b(50)}$ است برای پیش‌بینی درصد جوانه‌زنی در شرایط تنش خشکی استفاده شد. با استفاده از مدل هیدروتایم گونه‌های متحمل به خشکی شناسایی شدند. با توجه به شاخص‌هایی که از مدل هیدروتایم به دست آمد، گونه *N. pogonosperma* نسبت به دو گونه *N. haussknechtii* و *N. glomerulosa* مقاوم‌تر بود. نتیجه‌گیری شد که مدل هیدروتایم در برنامه‌های اصلاحی می‌تواند کمک زیادی به اصلاح‌گران، برای شناسایی بذرهای با کارایی بالا و دارای مقاومت به شرایط در شرایط خشکی بکند.

واژه‌های کلیدی: پونه‌سا، پتانسیل پایه، ثابت هیدروتایم

مقدمه

به‌دنبال تغییر اقلیم، کاهش تولیدات کشاورزی و تخریب عرصه‌های طبیعی، جهان را با یکی از بزرگترین بحران‌های تاریخ مدرن روبرو کرده است (Anderson et al., 2020). دمای بالا، خشکسالی و شوری، تنش‌های غیرزیستی هستند که کشاورزی را در سراسر جهان تهدید می‌کنند (Phour & Sindhu, 2023). تأخیر در جوانه‌زنی بذرها از مشکلات مدیریتی مهم در نواحی با شرایط تنش‌های خشکی، شوری و دمای پایین است. تأثیر شرایط نامطلوب در طول دوره جوانه‌زنی و مراحل اولیه رشد گیاه نسبت به سایر مراحل رشد، مهمتر است. تنش‌های آبی می‌توانند در کاهش سرعت و درصد جوانه‌زنی تأثیر بگذارند. دلیل کاهش شاخص‌های جوانه‌زنی در اثر تنش خشکی، کاهش سرعت جذب اولیه آب توسط بذر است. بذرهایی که بتوانند در شرایط تنش، جوانه‌زنی قابل قبولی داشته باشند، در مناطق خشک و

نیمه‌خشک، ارزش فراوانی خواهند داشت (Bradford & Somasco, 1994).

امروزه محققان برای پیش‌بینی جوانه‌زنی و استقرار گیاهان در شرایط مزرعه از مدل‌های ریاضی استفاده می‌کنند. یکی از این مدل‌ها که حساسیت جوانه‌زنی بذرها به تنش خشکی را تعیین می‌کند، مدل هیدروتایم است (Bradford, 2002). پارامترهای مدل هیدروتایم می‌تواند برای تفکیک توده‌های بذری دارای قوه‌نامیه مطلوب استفاده شود. به این ترتیب که پارامتر ثابت هیدروتایم معیاری از سرعت جوانه‌زنی است و پتانسیل پایه برای جوانه‌زنی حکایت از قدرت بذر دارد که در توده‌هایی با قدرت بذر بالاتر مقادیر منفی‌تری خواهد داشت (Bradford & Still, 2004). در نتیجه می‌توان گفت ارقامی که پتانسیل پایه کمتری داشته باشند، احتمالاً بنیه بذر بالاتری دارند و ارقامی که ثابت هیدروتایم آنها کمتر باشد، سرعت جوانه‌زنی و استقرار سریع‌تری خواهند داشت (Bewley et

یکنواخت تر سبز شوند، استقرار بهتری نیز در مزرعه خواهند داشت و در رقابت با علف‌های هرز موفق تر خواهند بود. استقرار سریع تر کانوبی می‌تواند امتیازات دیگری برای گیاهان زراعی نیز داشته باشد که در نهایت باعث افزایش عملکرد خواهد شد (Soltani & Latifi, 2012; Adeli et al., 2018). بنابراین انواعی از گونه‌های پونه‌سا که متحمل به تنش خشکی در مرحله جوانه‌زنی هستند، از نظر تولید محصول در مناطق خشک و نیمه‌خشک اهمیت زیادی دارند. به دلیل پراکنش وسیع و کاربرد دارویی گونه‌های این جنس در ایران، تلاش برای اهلی‌سازی و کشت آنها در شرایط دیم در مناطق معتدل ایران در حال افزایش است (Kudori et al., 2016). هدف از اجرای این پژوهش، بررسی صفات و شاخص‌های مربوط به جوانه‌زنی سه گونه دارویی پونه‌سا *N. haussknechtii*، *N. glomerulosa* subsp. *staffina* و *pogonosperma* در شرایط تنش خشکی و شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل با کمک مدل هیدورتایم است.

مواد و روش‌ها

بذرهای سه گونه دارویی پونه‌سا *Nepata glomerulosa* و *N. pogonosperma haussknechtii* subsp. *staffina* که در سال‌های ۱۳۸۸ لغایت ۱۳۸۹ جمع‌آوری شده بودند و دارای بذر قابل تبادل کافی بودند از بانک ژن منابع طبیعی ایران تهیه گردید. به علت نیاز بالای آزمایش مدل‌سازی، بذرهای در سال ۱۴۰۰ در مزرعه تحقیقاتی البرز کرج تکثیر شدند. به منظور بررسی واکنش جوانه‌زنی بذرهای سه گونه پونه‌سا تحت تنش خشکی و تعیین ضرایب مدل هیدورتایم، در هر گونه شش سطح پتانسیل آب ۰، ۰/۳-، ۰/۶-، ۰/۹-، ۱/۲ و ۱/۵ مگاپاسکال در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار در سال ۱۴۰۲ در آزمایشگاه تحقیقات تکنولوژی بذر بانک ژن منابع طبیعی ایران اجرا شد. سطوح مختلف تنش خشکی از طریق حل کردن مقدار مشخصی از پلی‌اتیلن گلیکول (۶۰۰۰) در آب مقطر برای ایجاد پتانسیل اسمزی ایجاد گردید (Michel & Kaufmann, 1973) و از آب مقطر برای ایجاد شرایط بدون تنش (صفر مگاپاسکال)

(al., 2013). محققان از مدل هیدورتایم برای کمی‌سازی واکنش جوانه‌زنی بذرهای به شرایط تنش رطوبتی استفاده کرده‌اند، از این قبیل تحقیقات می‌توان به استفاده از مدل هیدورتایم برای پیش‌بینی جوانه‌زنی بذر *Elymus trachycaulus* در شرایط رطوبتی و دماهای مختلف (Schellenberg et al., 2013) و کاربرد مدل هیدورتایم برای تحلیل جوانه‌زنی چندین گونه مرتعی در شرایط رطوبتی و دمایی مختلف اشاره کرد (Huarte, 2006).

جنس پونه‌سا گیاهی علفی متعلق به قبیله *Menthae*، زیرقبیله *Nepetinae*، خانواده *Lamiaceae* و زیرخانواده *Nepetoideae* می‌باشد. این جنس دارای ۷۱۱ گونه است که به‌طور گسترده در اوراسیا وجود دارد. جنوب‌غربی آسیا، به ویژه ایران و غرب هیمالیا دو منطقه مهم توزیع این جنس است (Jamzad et al., 2003). در ایران جنس پونه‌سا دارای ۶۸ گونه گیاه علفی یکساله و چند ساله بوده که ۳۹ گون آنها انحصاری هستند (Mozaffarian, 2006).

گونه‌های جنس پونه‌سا کاربرد دارویی دارند. نیتالاکتون‌ها و ترکیب‌های ایریدوئیدی و گلوکوزیدی مشتق شده از آنها، دی‌ترین‌ها، تری‌ترین‌ها و فالونوئیدها به‌عنوان متابولیت‌های ثانویه اصلی گونه‌های پونه‌سا گزارش شده‌اند. فعالیت ضدباکتریایی، ضدقارچی، ضدویروسی، ضد درد، ضد التهاب، ضد تورم، آنتی‌اکسیدانی، سیتوتوکسیک، فیتوتوکسیک، آرام بخشی اعصاب، تنظیم‌کنندگی سیستم ایمنی، ضدلختگی خون و دورکنندگی حشرات را نام برد (Dienaitė et al., 2018).

ایران کشوری خشک و نیمه‌خشک است و محدودیت آب آبیاری و بارندگی با پراکنش نامنظم آن به‌ویژه در مناطق دیم در بیشتر نواحی وجود دارد. به همین دلیل تنش خشکی یکی از مهمترین عواملی است که در بیشتر مراحل رشد گیاهان زراعی اثرگذار است. از آنجایی که تنش خشکی می‌تواند آسیب زیادی به جوانه‌زنی و استقرار گیاه پونه‌سا به‌ویژه در شرایط دیم وارد کند، یافتن گونه‌ها و ارقامی که بتوانند تنش خشکی را در مرحله جوانه‌زنی و سبز شدن بهتر تحمل کنند، در افزایش تعداد گیاهچه‌های سبز شده و در نهایت عملکرد نهایی، مؤثر خواهد بود. از سویی، گیاهچه‌هایی که زودتر و

که Gr: سرعت جوانه‌زنی، n_i : تعداد بذرهای جوانه‌زده روز i و d_i : تعداد روز پس از شروع آزمایش است.

شاخص بنیه بذر از طریق رابطه ۴ محاسبه شد:

$$GI = (SI * Gp)/100 \quad \text{Equ. 4}$$

که GI: شاخص بنیه بذر و SI: میانگین طول گیاهچه (سانتی‌متر) است.

برای پیش‌بینی جوانه‌زنی بذرهای گونه‌های پونه‌سا در بعد زمان و سطوح مختلف تنش خشکی از مدل هیدروتایم یا زمان-رطوبتی استفاده گردید که تابع آن به صورت رابطه ۵ می‌باشد (Bradford, 2002):

$$\theta_H = [\Psi - \Psi_{b(g)}]t_g \quad \text{Equ. 5}$$

که θ_H : ثابت هیدروتایم (مگاپاسکال در روز)، Ψ : پتانسیل آب محیط (مگاپاسکال)، $\Psi_{b(g)}$: پتانسیل پایه برای جوانه‌زنی کسری از جمعیت بذرها (g) و t_g : زمان (روز) برای جوانه‌زنی g است.

با این فرضیه که تنوع پتانسیل پایه در توده بذری دارای توزیع نرمال می‌باشد، پارامترهای هیدروتایم با استفاده از مدل پروبیت (probit یا واحد احتمال) از طریق رابطه ۶ برآورد شدند. $probit(g) = [\psi - \theta_H/t_g - \psi_{b(50)}]/\sigma_{\psi_b}$ Equ. 6

که $\Psi_{b(50)}$: پتانسیل پایه برای جوانه‌زنی ۵۰ درصد بذرها و

σ_{ψ_b} : انحراف معیار پتانسیل آب پایه می‌باشد.

تجزیه واریانس و مقایسه میانگین به روش دانکن با نرم‌افزار SAS 9.0 انجام شد و مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار Excel برازش داده شدند و برای رسم نمودارها و جدول‌ها نیز از همین نرم‌افزار استفاده شد.

استفاده شد. پیش از شروع آزمایش، بستر بذر (کاغذ صافی در پتری‌دیش شیشه‌ای) در اتوکلاو در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه استریل شد و بذرها به مدت ۳۰ ثانیه با محلول هیپوکلریت سدیم ۵ درصد ضدعفونی گردیدند. بعد از اتمام ضدعفونی، بذرها با آب مقطر شست‌وشو شده و در دمای اطاق خشک شدند. سپس در پتری‌دیش‌های استریل قرار داده شده و با ۵ میلی‌لیتر محلول پلی‌اتیلن گلايکول مرطوب گردیدند. طبق تجربیات نویسندگان، مناسب‌ترین دما برای جوانه‌زنی بذرهای گونه‌های پونه‌سا مورد مطالعه، دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. شمارش درصد جوانه‌زنی (خروج ریشه‌چه به میزان دو میلی‌متر) به صورت روزانه و به مدت ۱۴ روز انجام شد و پس از آن طول گیاهچه‌ها اندازه‌گیری گردید. از آنجایی که در سطح پتانسیل ۱/۵ مگاپاسکال جوانه‌زنی ثبت نگردید، از داده‌های آنها در تجزیه آماری استفاده نشد.

درصد جوانه‌زنی از طریق رابطه ۱ محاسبه شد (Ellis & Roberts, 1981):

$$Gp = ng/nt \times 100 \quad \text{Equ. 1}$$

که Gp : درصد جوانه‌زنی، ng : تعداد بذرهای جوانه‌زده و nt : تعداد بذر کاشته شده است.

میانگین مدت زمان جوانه‌زنی با استفاده از رابطه ۲ تعیین

گردید (Ellis & Roberts, 1981):

$$MGT = (\sum n_i d_i)/ng \quad \text{Equ. 2}$$

که MGT : میانگین مدت زمان جوانه‌زنی، n_i : تعداد بذرهای جوانه‌زده روز i ، d_i : تعداد روز پس از شروع آزمایش و ng : کل تعداد بذرهای جوانه‌زده است.

سرعت جوانه‌زنی نیز از طریق رابطه ۳ به دست آمد

(Agrawal, 2004):

$$Gr = \sum n_i/d_i \quad \text{Equ. 3}$$

نتایج

گونه *N. haussknechtii*

بر کلیه صفات به استثناء نسبت ریشه‌چه به ساقه‌چه، بر تمامی صفات جوانه‌زنی بذر *N. haussknechtii* در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر خشکی (در پنج سطح پتانسیل ۰، -۰/۳، -۰/۶، -۰/۹ و ۱/۲ مگاپاسکال)

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس اثر خشکی بر صفات جوانه‌زنی بذر *N. haussknechtii*

Table 1. Analysis of variance for effects the drought stress on germination traits of *N. haussknechtii* seeds

SOV	Df	MS							
		Germination %	Germination rate	Germination time	Vigor index	Radicle length	Shoot length	Seedling length	RS#
Water potential	4	3409.07**	30.38**	29.45**	19.79**	1.64**	0.33**	3.03**	1.18 ^{ns}
Error	10	56.53	0.22	0.878	0.38	0.173	0.072	0.12	0.86
CV %		7.52	3.26	8.98	4.23	9.09	7.34	5.66	3.13

** : Significant at 1% probability level. #RS=Root /shoot Length ratio.

. ** : معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

مگاپاسکال مشاهده شد (شکل ۱). همانگونه که مشاهده می‌شود در تنش ۱/۲- مگاپاسکال کمترین میزان جوانه‌زنی مشاهده گردید. با توجه به رابطه مستقیم شاخص بنیه با درصد جوانه‌زنی و طول گیاهچه، کاهش این شاخص با افزایش تنش خشکی موضوعی بدیهی بوده و ناشی از کاهش همزمان درصد جوانه‌زنی و طول گیاهچه با افزایش سطح تنش است. بنابراین بنیه بذر با افزایش تنش خشکی به تدریج کاهش یافت و در تنش ۱/۲- مگاپاسکال به کمترین مقدار رسید (شکل ۱). در نتیجه، بذر *N. haussknechtii* در محدوده وسیع تنش خشکی از صفر تا ۱/۲- مگاپاسکال، توانایی جوانه‌زنی را داشت و می‌توان گفت که *N. haussknechtii* به عنوان یک گیاه دارویی مقاوم به تنش خشکی قابلیت کشت و سازگاری بالایی دارد. توان یک بذر برای جوانه‌زدن و تولید گیاهچه در شرایط خشکی نشانگر این است که این گیاه ظرفیت ژنتیکی برای تحمل به خشکی را دارد.

کمی‌سازی واکنش جوانه‌زنی بذرهای *N. haussknechtii* به تنش خشکی با کمک مدل زمان-رطوبتی (هیدروتایم) برازش داده شد. این مدل شامل سه ضریب می‌باشد که هر سه دارای مفهوم بیولوژیک هستند که شامل ضریب هیدروتایم θ_H

بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌های صفات، درصد جوانه‌زنی بذر *N. haussknechtii* به تدریج با کاهش پتانسیل اسمزی، کاهش یافته است. در تنش خشکی صفر مگاپاسکال، درصد جوانه‌زنی بذر *N. haussknechtii* ۱۰۰٪ بود. با افزایش تنش خشکی به ۰/۳- مگاپاسکال، میزان درصد جوانه‌زنی با سطح شاهد تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۱). ولی با افزایش تنش خشکی درصد جوانه‌زنی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. در تنش خشکی ۱/۵- مگاپاسکال جوانه‌زنی بذر *N. haussknechtii* متوقف گردید.

نتایج مقایسه میانگین تیمارها برای سرعت جوانه‌زنی نشان داد که در سطوح مختلف تنش خشکی، حساسیت بالایی نسبت به درصد جوانه‌زنی داشت و با افزایش تدریجی تنش خشکی، میزان سرعت جوانه‌زنی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. در تنش خشکی ۱/۲- مگاپاسکال سرعت جوانه‌زنی از ۸/۳ (در شاهد) به ۰/۸ جوانه در روز کاهش یافت.

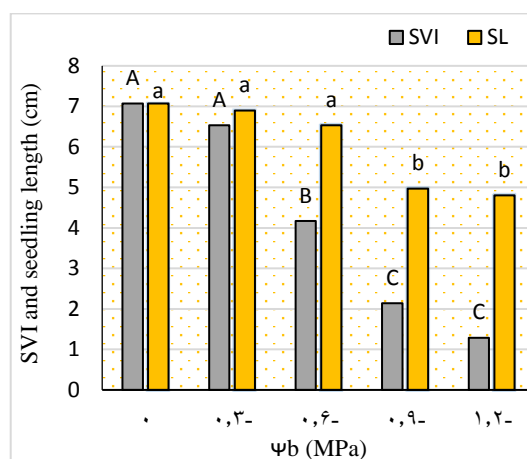
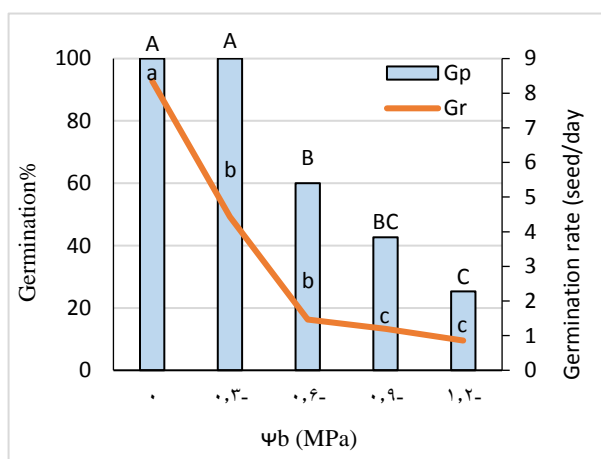
شاخص بنیه بذر با افزایش تنش خشکی از شاهد به ۰/۶- مگاپاسکال از ۷/۲ به ۴/۲ کاهش یافت. ولی در خشکی ۰/۶- مگاپاسکال طول گیاهچه کاهش معنی‌داری نشان نداد. کاهش قابل ملاحظه در طول گیاهچه از خشکی ۰/۶- به ۰/۹-

پتانسیل‌های آب مختلف به‌ویژه پتانسیل‌های آب صفر، $0/3-$ و $0/6-$ مگاپاسکال به خوبی به داده‌های واقعی برازش داده شد. به طوری که مقدار ضریب تبیین برای این برازش، $0/92$ بود که بیانگر دقت بالای پیش‌بینی مدل می‌باشد.

خط رگرسیون پروبیت جوانه‌زنی تجمعی در مقابل پتانسیل آب پایه Ψ_b گونه *N. haussknechtii* تناسب خوبی را نشان می‌دهد. در محاسبه Ψ_b برای نشان دادن تفاوت بین نمونه‌ها در سطوح مختلف خشکی، مدل هیدروتایم توصیف رضایت‌بخشی از داده‌ها را ارائه می‌دهد ($R^2 = 0/84$) (شکل ۳).

پتانسیل پایه برای جوانه‌زنی 50 درصد بذرها $\Psi_{b(50)}$ و ضریب انحراف معیار پتانسیل آب پایه (σ_{Ψ_b}) می‌باشد. عدد ثابت هیدروتایم نشان‌دهنده سرعت جوانه‌زنی می‌باشد، مقدار پایین این ثابت، بیانگر بالا بودن سرعت جوانه‌زنی است. ثابت هیدروتایم شاخصی برای نشان دادن تحمل به خشکی در مرحله جوانه‌زنی می‌باشد. منفی‌تر بودن مقدار این ثابت، بیانگر مقاومت بیشتر به تنش خشکی است.

درصد جوانه‌زنی تجمعی و مدل هیدروتایم برازش داده شده به داده‌ها برای هر پتانسیل آبی به صورت جداگانه در شکل ۲ نشان داده شده است. زمان تا جوانه‌زنی پیش‌بینی شده در

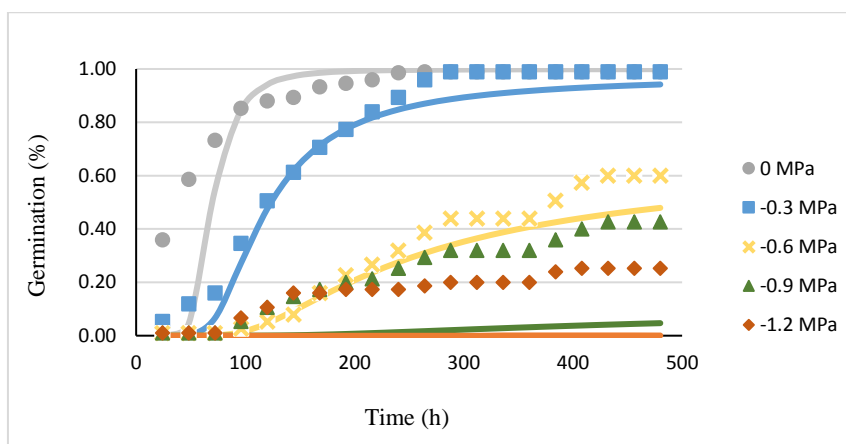


شکل ۱- مقایسه خصوصیات جوانه‌زنی بذر شامل (Gp): درصد جوانه‌زنی، (Gr): سرعت جوانه‌زنی، (SVI): شاخص بنیه بذر و (SL): طول گیاهچه) *N. haussknechtii* در سطوح مختلف تنش خشکی

درج حروف مختلف در میانگین ستون هر صفت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای تنش خشکی است.

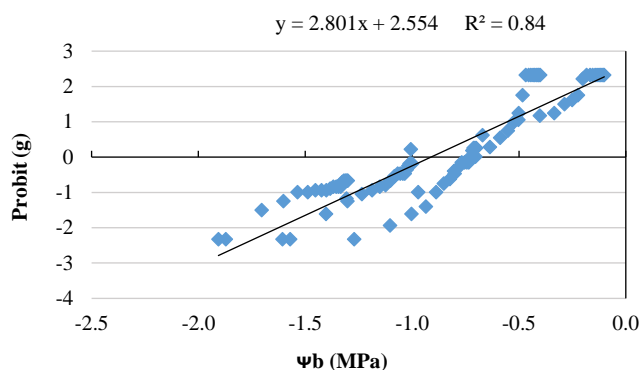
Fig. 1. Means of Gp: germination percentage, Gr: germination rate, SVI: seed vigor index, and SL: seedling length of *N. haussknechtii* seeds at different levels of drought stress.

Means of column for each trait followed by different letters indicate significant differences between drought



شکل ۲- جوانه‌زنی تجمعی بذرهای *N. haussknechtii* در سطوح مختلف تنش خشکی (علائم و خطوط به ترتیب درصد جوانه‌زنی مشاهده شده و پیش‌بینی شده با مدل هیدروتایم را نشان می‌دهد)

Fig. 2. Cumulative germination of *N. haussknechtii* seeds at different levels of drought (the signs and lines respectively show the observed and predicted germination percentage by the hydrotime model)



شکل ۳- رگرسیون پروبیت جوانه‌زنی تجمعی در مقابل پتانسیل آب پایه Ψ_b گونه *N. haussknechtii*

Fig. 3. Probit regression of cumulative germination versus base water potential Ψ_b *N. haussknechtii*

با برآزش مدل هیدروتایم به پروبیت درصد جوانه‌زنی در برابر زمان مورد نیاز به جوانه‌زنی و پتانسیل مختلف آب، ثابت هیدروتایم (θ_H)، پتانسیل پایه برای جوانه‌زنی ۵۰ درصد بذرها ($\Psi_{b(50)}$) و انحراف معیار پتانسیل آب پایه (σ_{Ψ_b}) به ترتیب ۴۸/۳۲ مگاپاسکال ساعت و -۰/۶۹ مگاپاسکال و ۰/۱۸ پیش‌بینی گردید (جدول ۲).

جدول ۲- برآورد پارامترهای مدل هیدروتایم شامل ثابت هیدروتایم (θ_H)، پتانسیل پایه برای جوانه‌زنی ۵۰ درصد بذرها ($\Psi_{b(50)}$) و انحراف معیار پتانسیل آب پایه (σ_{Ψ_b}) و ضریب تبیین (R^2) گونه‌های مورد بررسی

Table 2. Estimated Hydro-time parameters including hydro-time constant (θ_H), base osmotic potential for 50% germination ($\Psi_{b(50)}$), standard deviation of the base water potential (σ_{Ψ_b}) and the coefficient of determination (R^2) in studied species

Specis	θ_H	$\Psi_{b(50)}$	σ_{Ψ_b}	R^2
<i>N.haussknechtii</i>	48.32	-0.69	0.18	0.92
<i>N.pogonosperm</i>	56.57	-1.006	0.24	0.94
<i>N. glomerulosa</i>	52.57	-0.77	0.39	0.95

گونه *N. pogonosperma*

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر خشکی (در پنج سطح پتانسیل ۰، -۰/۳، -۰/۶، -۰/۹ و ۱/۲ مگاپاسکال) بر همه صفات جوانه‌زنی بذر *N. pogonosperma* در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳).

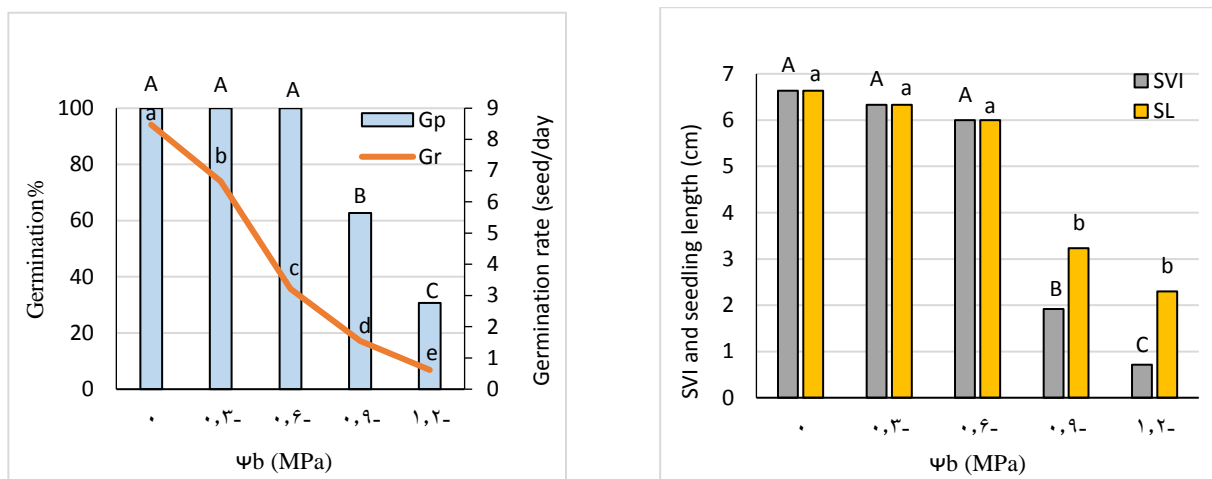
در مقایسه میانگین تیمارها می‌توان بیان کرد که در تنش خشکی صفر مگاپاسکال درصد جوانه‌زنی بذر گونه *N. pogonosperma* ۱۰۰٪ بود. البته با افزایش تنش خشکی تا -۰/۶ مگاپاسکال، میزان درصد جوانه‌زنی کاهش نیافت. ولی با افزایش تنش خشکی به -۰/۹ و -۱/۲ مگاپاسکال درصد جوانه‌زنی به‌طور معنی‌داری از ۱۰۰ تیمار شاهد به ترتیب به ۶۰ و ۳۰ درصد کاهش یافت. در تنش خشکی ۱/۵- مگاپاسکال جوانه‌زنی بذر *N. pogonosperma* متوقف گردید (شکل ۴).

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که سرعت جوانه‌زنی در سطوح مختلف تنش خشکی ح‌سا سیت بالایی نسبت به درصد جوانه‌زنی داشت. به‌طوری‌که با افزایش تدریجی تنش خشکی، میزان سرعت جوانه‌زنی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. در تنش خشکی ۱/۲- مگاپاسکال سرعت جوانه‌زنی از ۸/۵ به ۰/۶ جوانه در روز کاهش یافت. همانند درصد جوانه‌زنی، با افزایش تنش خشکی از صفر به -۰/۶ مگاپاسکال طول گیاهچه به‌طور معنی‌داری کاهش نیافت ولی در تنش -۰/۹ مگاپاسکال به نصف کاهش پیدا کرد. بنیه بذر نیز با افزایش تنش خشکی از صفر به -۰/۶ مگاپاسکال کاهش ملایمی داشت و در تنش ۱/۲- مگاپاسکال به کمترین مقدار رسید. بذر گیاه *N. pogonosperma* در محدوده وسیع تنش خشکی از صفر تا ۱/۲ مگاپاسکال توانایی جوانه‌زنی را داشت (شکل ۴).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر خشکی بر صفات جوانه‌زنی بذر *N. pogonosperma*Table 3. Analysis of variance for effects of the drought stress on germination traits of *N. pogonosperma* seeds

SOV	Df	MS							
		Germination %	Germination rate	Germination time	Seed vigor index	Radicle length	Shoot length	Seedling length	RS
Water potential	4	2944**	33.82**	56.27**	23.26**	9.60**	0.291**	11.58**	12.32**
Error	10	21.33	0.117	2.28	0.64	1.34	0.34	1.69	1.76
CV %		5.87	8.35	8.62	8.63	8.38	9.48	6.53	6.41

** : معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد. #RS=Root /shoot Length ratio. **: Significant at 1% probability level.



شکل ۴- مقایسه برخی خصوصیات جوانه‌زنی بذر *N. pogonosperma* شامل (Gp): درصد جوانه‌زنی، (Gr): سرعت جوانه‌زنی، (SVI):

شاخص بنیه بذر و (SL): طول گیاهچه) در سطوح مختلف تنش خشکی

درج حروف مختلف در میانگین ستون هر صفت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌داری بین تنش خشکی است.

Fig. 4. Means of Gp: germination percentage, Gr: germination rate, SVI: seed vigor index, and SL: seedling length of *N. pogonosperma* seeds at different levels of drought.

Means of column for each trait followed by different letters indicate significant differences between drought stress

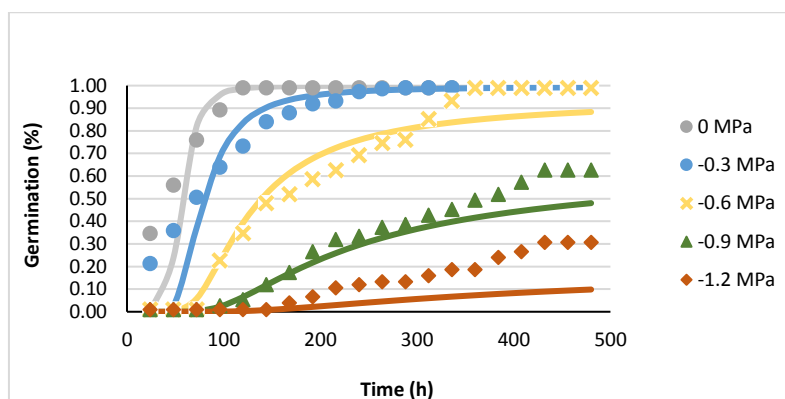
سطوح مختلف خشکی، مدل هیدروتایم توصیف رضایت‌بخشی

از داده‌ها را ارائه می‌دهد ($R^2 = 0.90$) (شکل ۶).

با برازش مدل هیدروتایم به پروبیت درصد جوانه‌زنی بذرهای *N. pogonosperma* در مقابل زمان مورد نیاز به جوانه‌زنی و پتانسیل مختلف آب، ثابت هیدروتایم (θ_H)، پتانسیل پایه برای جوانه‌زنی ۵۰ درصد بذرها ($\Psi_{b(50)}$) و انحراف معیار پتانسیل آب پایه (σ_{Ψ_b})، به ترتیب ۵۶/۵۷ مگاپاسکال ساعت و ۱/۰۰۶- مگاپاسکال و ۰/۲۴ پیش‌بینی گردید (جدول ۲).

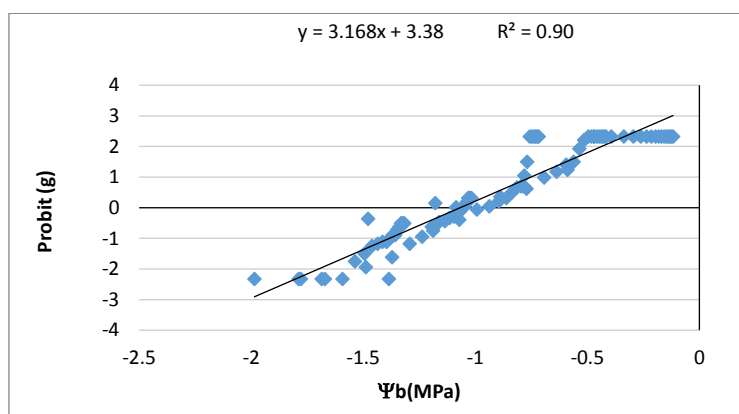
درصد جوانه‌زنی تجمعی و مدل هیدروتایم برازش داده شده به داده‌ها برای هر پتانسیل آبی به صورت جداگانه در شکل ۵ نشان داده شده است. زمان تا جوانه‌زنی پیش‌بینی شده در پتانسیل‌های آب مختلف به خوبی به داده‌های واقعی برازش داده شد. به طوری که مقدار ضریب تبیین برای این برازش ۰/۹۴ بود که بیانگر دقت بالای پیش‌بینی مدل می‌باشد (شکل ۵).

خط رگرسیون پروبیت تناسب خوبی را نشان داد که نشان می‌دهد در محاسبه Ψ_b برای نشان دادن تفاوت بین نمونه‌ها در



شکل ۵- جوانه‌زنی تجمعی بذرهای *N. pogonosperma* در سطوح مختلف تنش خشکی (علائم و خطوط به ترتیب درصد جوانه‌زنی مشاهده شده و پیش‌بینی شده با مدل هیدروتایم را نشان می‌دهد)

Fig. 5. Cumulative germination of *N. pogonosperma* seeds at different levels of drought (the signs and lines respectively show the observed and predicted germination percentage by the hydrotime model)



شکل ۶- رگرسیون پروبیت جوانه‌زنی تجمعی در مقابل پتانسیل آب پایه Ψ_b گونه *N. pogonosperma*

Fig. 6. Probit regression of cumulative germination versus base water potential Ψ_b *N. pogonosperma*

مگاپاسکال، میزان درصد جوانه‌زنی با سطح شاهد تفاوت معنی‌داری نداشت. ولی با افزایش تنش خشکی به $0/6-$ مگاپاسکال درصد جوانه‌زنی به‌طور معنی‌داری از ۷۵ درصد تیمار شاهد به ۲۴ درصد کاهش یافت. در تنش خشکی $1/2-$ مگاپاسکال جوانه‌زنی بذر *N. glomerulosa* به ۸ درصد رسید (شکل ۷).

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بذرهای این گونه سرعت جوانه‌زنی پایینی داشته ($2/4$ جوانه در روز) و در سطوح مختلف تنش خشکی حساسیت کمتری نسبت به

گونه *N. glomerulosa*

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر خشکی (در پنج سطح $1/2-$ ، $0/9-$ ، $0/6-$ ، $0/3-$ و صفر مگاپاسکال) برای کلیه صفات به استثناء میانگین زمان جوانه‌زنی بذر *N. glomerulosa* در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴).

براساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، می‌توان بیان کرد که در تنش خشکی صفر مگاپاسکال، درصد جوانه‌زنی بذر *N. glomerulosa* ۷۵٪ بود. با افزایش تنش خشکی به $0/3-$

به ۲/۳ سانتی‌متر کاهش یافت و در تنش ۱/۲- مگاپاسکال به نیم سانتی‌متر کاهش یافت (شکل ۷). با توجه به رابطه مستقیم شاخص بنیه با درصد جوانه‌زنی و طول گیاهچه، کاهش این شاخص با افزایش تنش خشکی موضوعی بدیهی بوده و ناشی از کاهش درصد جوانه‌زنی و طول گیاهچه همزمان با افزایش سطح تنش است. بنابراین بنیه بذر با افزایش تنش خشکی به تدریج کاهش یافت و در تنش ۱/۲- مگاپاسکال به کمترین مقدار (۰/۰۷) رسید.

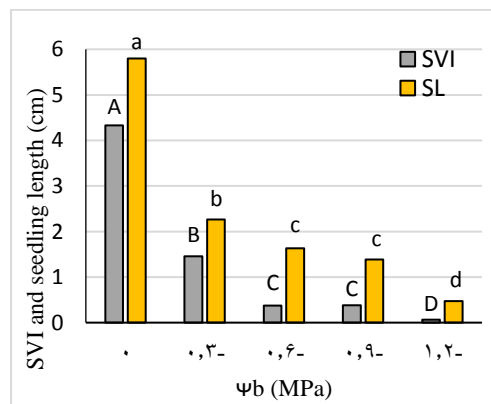
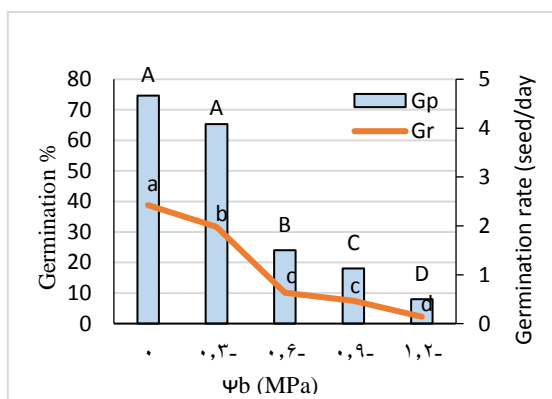
در صد جوانه‌زنی داشت. با افزایش تدریجی تنش خشکی، میزان سرعت جوانه‌زنی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. بیشترین کاهش سطح مربوط به تنش خشکی ۰/۳- به ۰/۶- مگاپاسکال بود که سرعت جوانه‌زنی به‌طور معنی‌داری از ۲ به ۰/۶ جوانه در روز کاهش یافت. در تنش خشکی ۱/۲- مگاپاسکال سرعت جوانه‌زنی از ۲/۴ (تیمار شاهد) به ۰/۱۴ جوانه در روز رسید. با افزایش تنش خشکی از صفر به ۰/۳- مگاپاسکال طول گیاهچه به‌طور معنی‌داری از ۵/۸

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر خشکی بر صفات جوانه‌زنی بذر *N. glomerulosa*

Table 4. Analysis of variance for effects the drought stress on germination traits of *N. glomerulosa* seeds

SOV	df	MS							
		Germination %	Germination rate	Germination time	Seed vigor index	Radicle length	Shoot length	Seedling length	Radicle/shoot Length ratio
Water potential	4	2563.73**	3.04**	9.32	9.33**	11.86**	0.201**	12.64**	37.78**
Error	10	70.4	0.08	16.82	0.08	0.22	0.013	0.29	0.95
CV %		8.39	5.16	10.47	11.67	7.02	11.01	13.39	11.80

** : Significant at 1% probability level. **: معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.



شکل ۷- مقایسه برخی خصوصیات جوانه‌زنی بذر *N. glomerulosa* در سطوح مختلف تنش خشکی (Gp): درصد جوانه‌زنی، (Gr):

سرعت جوانه‌زنی، SVI: شاخص بنیه بذر و SL: طول گیاهچه در واحد سانتی‌متر)

درج حروف مختلف در میانگین ستون هر صفت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌داری بین تنش خشکی است.

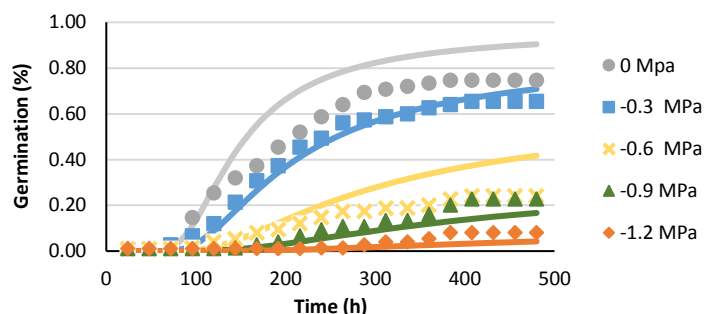
Fig. 7. Means of Gp: germination percentage, Gr: germination rate, SVI: seed vigor index, and SL: seedling lengths of *N.*

glomerulosa seeds at different levels of drought stress.

Means of column for each trait followed by different letters indicate significant differences between drought stress

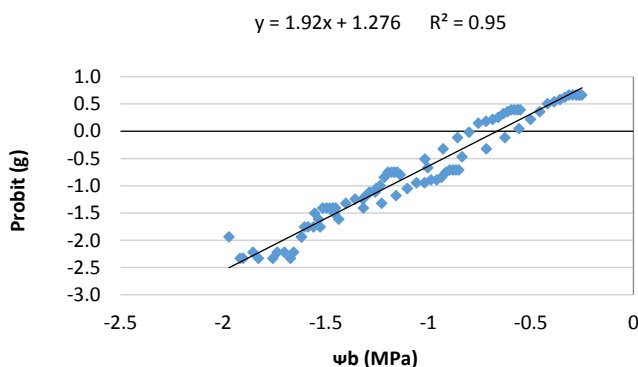
سطوح مختلف خشکی، مدل هیدروتایم توصیف رضایت‌بخشی از داده‌ها را ارائه می‌دهد ($R^2 = 0.95$ شکل ۹). با برازش مدل هیدروتایم به پروبیت درصد جوانه‌زنی بذرهای *N. glomerulosa* در مقابل زمان مورد نیاز به جوانه‌زنی و پتانسیل مختلف آب، ثابت هیدروتایم (θ_H)، پتانسیل پایه برای جوانه‌زنی ۵۰ درصد بذرها ($\Psi_{b(50)}$) و انحراف معیار پتانسیل آب پایه (σ_{Ψ_b}) به ترتیب ۵۲/۱۳ مگاپاسکال ساعت و -۰/۷۷ و مگاپاسکال و ۰/۳۹ مگاپاسکال ساعت پیش‌بینی گردید (جدول ۲).

درصد جوانه‌زنی تجمعی و مدل هیدروتایم برازش داده شده به داده‌ها برای هر پتانسیل آبی به صورت جداگانه در شکل ۸ نشان داده شده است. زمان تا جوانه‌زنی پیش‌بینی شده در پتانسیل‌های آب مختلف به خوبی به داده‌های واقعی برازش داده شد. به طوری که مقدار ضریب تبیین برای این برازش ۰/۹۵ بود که بیانگر دقت بالای پیش‌بینی مدل می‌باشد. خط رگرسیون پروبیت تناسب خوبی را نشان داد که نشان می‌دهد در محاسبه Ψ_b برای نشان دادن تفاوت بین نمونه‌ها در



شکل ۸- جوانه‌زنی تجمعی بذرهای *N. glomerulosa* در سطوح مختلف تنش خشکی (علائم و خطوط به ترتیب درصد جوانه‌زنی مشاهده شده و پیش‌بینی شده با مدل هیدروتایم را نشان می‌دهد)

Fig. 8. Cumulative germination of *N. glomerulosa* seeds at different levels of drought (the signs and lines respectively show the observed and predicted germination percentage by the hydrotime model)



شکل ۹- رگرسیون پروبیت جوانه‌زنی تجمعی در مقابل پتانسیل آب پایه Ψ_b گونه *N. glomerulosa*

Fig. 9. Probit regression of cumulative germination versus base water potential Ψ_b *N. glomerulosa*

بحث

Hosseinipur et al., 2021) و *Linum usitatissimum* (et al., 2017)

بدست آمده است.

پژوهش‌های مختلفی در مورد اثرهای پتانسیل آب بر جوانه‌زنی در گیاهان مختلف انجام شده است. زیرا الگوی زمانی جوانه‌زنی بذر به شدت توسط پتانسیل آب خاک (Ψ) محیط جوانه‌زنی تنظیم می‌شود، به طوری که پتانسیل آب بستر جوانه‌زنی تعیین‌کننده موازنه محتوای آب بذر خواهد بود (Daws et al., 2008). نتایج مدل هیدروتایم برای جوانه‌زنی بذرهای سه گیاه مورد مطالعه، در سطوح مختلف خشکی نشان‌دهنده قدرت متفاوت بذر سه گونه پونه‌سا است. مقادیر پتانسیل پایه برای ۵۰ درصد جوانه‌زنی ($\Psi_{b(50)}$) نشان‌دهنده سطحی از پتانسیل است که در مقادیر کمتر از این پتانسیل، درصد جوانه‌زنی بذرها به طور حتم کمتر از ۵۰ درصد خواهد شد (Bradford & Still, 2004). بنابراین زمانی که مقدار $\Psi_{b(50)}$ منفی تر است، بیانگر توانایی بیشتر برای مقاومت مرحله جوانه‌زنی در مقابل خشکی می‌باشد. $\Psi_{b(50)}$ گونه *N. pogonosperma* (-۱/۰۰۶ - مگاپاسکال) منفی‌تر از دو گونه *N. glomerulosa* (-۰/۷۷ - مگاپاسکال) و *N. haussknechtii* (-۰/۶۹ - مگاپاسکال) بود. براساس این نتایج در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد گونه *N. pogonosperma* نسبت به گونه‌های *N. glomerulosa* و *N. haussknechtii* مقاومت بیشتری به خشکی دارد. گزارش‌ها نشان داده است که بذرهای *Lamium amplexicaule* در پتانسیل اسمزی کمتر از -۰/۸ - مگاپاسکال در دمای ۲۱ درجه سانتی‌گراد قادر به جوانه‌زنی نیستند (Tamado et al., 2002). در پژوهشی دیگر، Ansari و همکاران (۲۰۱۷) پتانسیل پایه پنیرک (*Malva sylvestris*) را در دماهای ۱۵ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب -۱/۱۱ - و -۱/۱۳ - مگاپاسکال برآورد کردند. Derakhshan و همکاران (۲۰۱۶) براساس مدل هیدروتایم پتانسیل پایه جوانه‌زنی بذر شاه افسر (*Melilotus officinalis*)، خردل وحشی (*Sinapis arvensis*) و جو (*Hordeum vulgare*) را به ترتیب -۰/۸۵ -، -۰/۹۸ - و -۲/۴۷ - برآورد نمودند. به این ترتیب می‌توان استنباط نمود

حساس‌ترین بخش نموی گیاه، جوانه‌زنی است و موفقیت در گذراندن این دوره نقش مهمی در مراحل دیگر استقرار گیاه خواهد داشت (Bewley et al., 2013). نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش تدریجی تنش خشکی، پاسخ‌های فیزیولوژیکی جوانه‌زنی بذر سه گونه پونه‌سا ضعیف‌تر و کندتر می‌شود. زیرا تنش خشکی موجب کاهش پتانسیل اسمزی شده، در نتیجه باعث کاهش دسترسی بذر به رطوبت می‌شود. بنابراین پتانسیل آب محیط بر سرعت جذب آب و جوانه‌زنی بذر تأثیر مستقیم دارد (Yan, 2015). هرگاه پتانسیل اسمزی کمتر از حد آستانه شود، بذر با تنش آب روبرو خواهد شد و با توجه به شدت کاهش پتانسیل اسمزی و نوع گیاه، ظرفیت جوانه‌زنی محدود می‌گردد، زیرا فرایند جذب آب توسط بذر دچار اختلال گردیده، سرعت فعالیت‌های متابولیکی جوانه‌زنی بذر کند شده، در نتیجه مدت زمان خروج ریشه‌چه از بذر افزایش و سرعت جوانه‌زنی کاهش خواهد یافت (Nonogak et al., 2010). درصد و سرعت جوانه‌زنی بالا از فاکتورهای حیاتی تأثیرگذار بر استقرار موفق گیاه در شرایط تنش می‌باشد (Fernandez & Johnston, 1995). به‌علاوه کاهش درصد جوانه‌زنی در تنش خشکی می‌تواند ناشی از تأثیر مستقیم تجزیه‌کننده مواد آندوسپرم لپه‌ها با انتقال‌کننده مواد تجزیه شده به گیاهچه باشد که این موضوع می‌تواند علاوه بر تأثیر بر جوانه‌زنی بر شاخص قدرت و رشد گیاهچه نیز تأثیر بگذارد (Saeedi Goraghani et al., 2017). کاهش جوانه‌زنی در اکوتیپ‌های زیره (Saeedi Goraghani et al., 2017)، ماشک گل‌بر (Ghaderi et al., 2011) و شبدر برسیم (Tamartash et al., 2010) نیز گزارش شده است. مطالعات نشان داده‌اند هرچه بنیه بذر قوی‌تر باشد گیاهچه حاصل از آن استقرار بیشتری دارد. کاهش پتانسیل آب که باعث کاهش بنیه بذر می‌گردد باعث ایجاد رادیکال‌های آزاد اکسیژن می‌شود که در نهایت سبب آسیب به سلول‌های بافت جنین می‌شود. نتایج مشابهی در سایر گونه‌های *Festuca arundinacea* (Mamedi et al., 2022) و *Sesamum indicum* (Soltani Khankahdani

استفاده کرده‌اند (Bradford & Still, 2004; Windauer *et al.*, 2007).

نتیجه‌گیری

کیفیت بذر در ارتباط با میزان مقاومت به خشکی، تعیین‌کننده سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی در بذرهاست. در این مطالعه داده‌های جوانه‌زنی سه گونه پونه‌سا در سطوح مختلف خشکی با استفاده از مدل هیدروتایم تجزیه شد. نتایج خروجی مدل نشان داد که سرعت جوانه‌زنی و یکنواختی جوانه‌زنی در شرایط تنش خشکی در گونه *N. haussknechtii* بیشتر از گونه‌های *N. glomerulosa* و *N. pogonosperma* بود. در حالی که از نظر مقاومت به خشکی گونه *N. pogonosperma* نسبت به دو گونه *N. haussknechtii* و *N. glomerulosa* مقاوم‌تر بود. با توجه به شاخص‌هایی که از مدل هیدروتایم به دست آمد، این مدل در برنامه‌های اصلاحی می‌تواند کمک زیادی به اصلاح‌گران برای شناسایی بذرها با کارایی بالا و دارای مقاومت به شرایط تنش بکند. به‌علاوه خروجی مدل هیدروتایم می‌تواند برخی از شاخص‌های مهم جوانه‌زنی مرتبط با تحمل گیاه به شرایط تنش خشکی از قبیل سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی را پیش‌بینی کند. با استفاده از مدل‌هایی که کمی‌سازی پاسخ جوانه‌زنی به رطوبت را پیش‌بینی می‌کنند، می‌توان زمان استقرار هر گیاه را در شرایط مختلف محیطی پیش‌بینی کرد.

که مدل هیدروتایم می‌تواند به خوبی در شناسایی گیاهان مقاوم به خشکی کاربرد داشته باشد.

ضریب انحراف توزیع پتانسیل پایه در جمعیت (σ_{ψ_b}) ضریب دیگری است که از خروجی‌های مدل هیدروتایم است. این ضریب نشان‌دهنده میزان یکنواختی جوانه‌زنی بذرها در جمعیت است (Bradford & Still, 2004). هرچه مقدار عددی این ضریب کوچک‌تر باشد بیانگر یکنواختی بیشتر جوانه‌زنی است. مقایسه ضریب σ_{ψ_b} سه گونه مورد مطالعه این پژوهش نشان داد که یکنواختی جوانه‌زنی در گونه *N. haussknechtii* (۰/۱۸) بیشتر از گونه‌های *N. pogonosperma* (۰/۲۴) و *N. glomerulosa* (۰/۳۹) بود. سومین خروجی مدل هیدروتایم ضریب هیدروتایم (θ_H) با واحد مگاپاسکال ساعت یا مگاپاسکال روز است. ثابت هیدروتایم شاخصی از سرعت جوانه‌زنی در سطوح مختلف تنش خشکی می‌باشد و هر چه این ثابت کمتر باشد، نشان دهنده بیشتر بودن سرعت جوانه‌زنی است (Alimaghani & Cardoso & Ghaderifar, 2014; Salehi *et al.*, 2020; Bianconi, 2013). ثابت هیدروتایم در گونه *N. haussknechtii* (۴۸/۳۲) کمتر از گونه‌های *N. glomerulosa* (۵۲/۱۳) و *N. pogonosperma* (۵۶/۵۷) بود، بنابراین گونه *N. haussknechtii* سرعت جوانه‌زنی بیشتری دارد. ضریب هیدروتایم مهم‌ترین شاخص در تعیین قدرت بذر در شرایط تنش می‌باشد، به طوری که بسیاری از محققان از این ضریب برای تعیین قدرت بذر در شرایط مختلف

References

- Adeli, R., Soltani, E., Akbari, G.A. and Ramshini, H. 2018. Assessment of seed germination on the response to water potential in different canola genotypes using hydrotimic model. *Journal of Crops Improvement*, 19(4): 921-932 (In Persian).
- Agrawal, R.L. 2004. *Seed Technology*. New Delhi, Oxford IBH Press, 104p.
- Alimaghani, S.M., and Ghaderifar, F. 2014. Hydrotimic model: Introduction and application of this model in seed research. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 7: 41-52 (In Persian).
- Anderson, R., Bayer, P.E. and Edwards, D. 2020. Climate change and the need for agricultural adaptation. *Current Opinion in Plant Biology*, 56: 197-202.
- Ansari, A., Gharekhloo, J., Ghaderifar, F. and Kamkar, B. 2017. Quantification of germination response of *Malva sylvestris* L. to water potential. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 10: 67-77 (In Persian).
- Bewley, J.D., Bradford, K.J., Hilhorst, H.W.M. and Monogaki, H. 2013. *Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy*. Third Edition, Springer, New York, NY, 392p.

- Bradford, K.J. 2002. Application of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. *Weed Science*, 50: 248-260.
- Bradford K.J. and Somasco O.A. 1994. Water relations of lettuce seed thermos-inhibition I Priming and endosperm effects on base water potential. *Seed Science Research*, 4(1): 1–10.
- Bradford K.J. and Still D.W. 2004. Application of hydrottime analysis in seed testing. *Seed Technology*, 26(1): 74-85.
- Cardoso, V.J.M. and A. Bianconi. 2013. Hydrottime model can describe the response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seeds to temperature and reduced water potential. *Acta Scientiarum*, 35: 255-261.
- Daws, M.I., Crabtree, L.M., Dalling, J.W., Mullins, C.E. and Burslem, D.R.P. 2008. Germination responses to water potential in neotropical pioneers suggest large-seeded species take more risks. *Annals Botany*, 102 (6): 945–951.
- Derakhshan, A., Moradi Talavat., M.R. and Siadat, A. 2016. Hydrottime analysis of yellow sweet clover (*Melilotus officinalis* (L.) Lam.), wild mustard (*Sinapis arvensis* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.) seed germination. *Journal of Plant Protection*, 30: 518-523 (In Persian).
- Dienaitė, L., Pukalskienė, M., Matias, A.A., Pereira, C.V., Pukalskas, A. and Venskutonis, P.R. 2018. Valorization of six *Nepeta* species by assessing the antioxidant potential, phytochemical composition and bioactivity of their extracts in cell cultures. *Journal of Functional Foods*, 45: 512-522.
- Ellis R.H. and Roberts, E.H. 1981. The quantification of aging and survival in orthodox seeds. *Seed Science and Technology*, 9: 373–409.
- Fernandez, G. and Johnston, M. 1995. Seed vigor testing in lentils, beans, and chickpeas. *Seed Science and Technology*, 23(1): 617-627.
- Ghaderi, S., Gholami, P., Karimzadeh, A. and Salarian, F. 2011. The effect of salinity and drought stresses on germination traits of *Viciavillosa*, *Ecological and Agricultural Journal*, 3: 121-130.
- Jamzad, Z., 2009. Notes on the genus *Nepeta* L. (Lamiaceae, Nepetoideae). *The Iranian Journal of Botany*, 15(2): 141-145.
- Hosseinipour, A. 2017. Germination quantification and investigation of physiological and biochemical characteristics of deteriorated oilseeds of flax (*Linum usitatissimum* L.) cultivar Norman at different temperatures and water potentials. Master thesis, Faculty of Agriculture, University Yasuj, 150p (In Persian).
- Huarte, R. 2006. Hydrottime analysis of the effect of fluctuating temperatures on seed germination in several non-cultivated species. *Seed Science and Technology*, 34: 533-547.
- Kudori, M.R., Sefekhiani, F., Rahmani, G. Sherifi Yazdi, M. and Darvishi Zeydabadi, D. 2016. Introduction of proper medicinal plant to cultivate in dry lands areas. *Iranian of Irrigation and Water Engineering*, 6(24): 153-166. Available from: <https://sid.ir/paper/247340/en> (In Persian).
- Mamedi, A., Salehi Shanjani, P. and Divargar, F. 2022. Response of *Festuca arundinacea* seed germination to temperatures, water potentials, and priming treatments using hydro- and thermal-time models. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 28: 1545-1558.
- Michel, B.F. and Kaufmann, M.R. 1973. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiology*, 57: 914-916.
- Mozaffarian, V.A. 2006. Dictionary of Iranian Plant Names: Latin-English-Persian. 4th Ed. Farhang Moaser, Tehran, 360p (In Persian).
- Nonogaki, H., Bassel, G.W. and Bewley, J.D. 2010. Germination- Still a mystery. *Plant Science*, 179(6): 574-581.
- Phour, M. and Sindhu, S.S. 2023. Soil Salinity and Climate Change: Microbiome-Based Strategies for Mitigation of Salt Stress to Sustainable Agriculture BT: 191–243. In: Parray, J.A. (Eds.). *Climate Change and Microbiome Dynamics: Carbon Cycle Feedbacks*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 550p, ISBN 978-3-031-21079-2.
- Saeedi Goraghani, H.R., Ranjbar Fordoei, A., Soleimani Sardo, M. and Mahdavi, M.J. 2017. Effect of salinity and drought stresses on germination stage and growth of black cumin (*Bunium persicum* Boiss). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 15(1): 1-7 (In Persian).
- Salehi, Sh., Diyanat, M. and Noormohammadi, Gh. 2020. Determination of cardinal temperature and evaluation of phenological stages of medicinal plant, broadleaf plantain (*Plantago major* L.). *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 9(2): 87-100 (In Persian).
- Schellenberg, M.P., Biliget, B. and Wei, Y. 2013. Predicting seed germination of slender wheatgrass [*Elymus trachycaulus* (Link) Gould subsp. *trachycaulus*] using thermal and hydro time models. *Canadian Journal of Plant Science*, 93: 793-798.
- Soltani A. and Latifi N. 2012. Evaluation of early seedling vigor in canola cultivars (*Brassica napus* L.). *Journal of Seed Science and Technology*, 3: 37-48.
- Soltani Khankahdani, V., Balouchi, H., Moradi, A. and Gholamhoseini, M. 2021. Effect of water potential on seed germination indices of six Sesame cultivars (*Sesamum indicum*) at different temperatures and its relation to fatty acid composition. *Plant Process and Function*, 10: 31-52.
- Tamado, T., Schutz, W. and Milberg, P. 2002. Germination ecology of the weed *Parthenium hysterophorus* in eastern Ethiopia. *Annals of Applied Biology*, 140: 263–270.
- Tamartash, R., Shokrian, F. and Kargar, M. 2010. Effects of salinity and drought stress on *Trifolium alexanderium* L. seed germination properties. *Rangeland*, 4(2): 288-297 (In Persian).

- Windauer, L., Altuna, A. and Benech-Arnold, R. 2007. Hydrotime analysis of *Lesquerella fendleri* seed germination responses to priming treatments. Industrial Crops Products, 25: 70-74.
- Yan, M. 2015. Seed priming stimulates germination and early seedling growth of Chinese cabbage under drought stress. South African Journal of Botany, 99: 88-92.