Research Article

Iranian Journal of Rangelands and Forests Plant Breeding and Genetic Research DOI: 10.22092/IJRFPBGR.2026.371207.1487

Vol. 33, No. 1, Page 59-75 (2025)

iming on improving drought tolerance of seed germination of *Nepeta haussknechtii, N. glomerulosa and N. cataria*

Parvin Salehi Shanjani[*1], Hamideh Javadi[2], Leila Rasoulzadeh[3], and Bahareh Afsharnezhad[3]

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

Received: 27/05/2025 Revised: 01/07/2025 Accepted: 16/08/2025

Abstract

Background and Objectives: *Nepeta*, a member of the Lamiaceae family, is of interest due to its valuable medicinal compounds, such as nepetalactone. The excessive harvesting of medicinal plants without due respect for their regeneration has led to many medicinal species becoming critically endangered. Rain-fed cultivation of this species can prevent its excessive harvesting from the natural habitats of this species. Iran is an arid and semi-arid region, and most of the agricultural lands are faced with drought stress. Drought stress is an important environmental factor that limits seed germination, growth, and productivity of temperate plant species. For the development of rain-fed cultivation of this species, it is necessary to examine its response to drought. Since *Nepeta* is particularly sensitive to drought stress during the germination stage, this study aimed to investigate the effect of seed priming on improving drought stress tolerance during the seed germination stage of three species of the genus *Nepeta*, including *N. haussknechtii*, *N. glomerulosa*, and *N. cataria*, to provide recommendations for the development of dryland cultivation of these species under drought conditions.

Methodology: In this study, the critical water potential point (induced by different concentrations of polyethylene glycol, PEG) for optimal germination was first determined to investigate the effectiveness of priming at that point. To determine the critical water potential point of each species, six water potential levels (0, -0.3, -0.6, -0.9, -1.2, and -1.5 MPa) were compared using a completely randomized design with three replications in 2023 at the Seed Technology Research Laboratory of the Iranian Natural Resources Gene Bank. Considering the significant reduction in germination at a potential of -0.6 MPa, it was concluded that -0.6 MPa is a critical point for optimal germination of *Nepeta*. Subsequently, the effectiveness of different seed priming techniques (hydropriming, osmopriming, and hormopriming) in reducing the adverse effects of drought stress (induced by -0.6 MPa PEG) on the germination characteristics of three *Nepeta* species, including *N. haussknechtii*, *N. glomerulosa*, and *N. cataria*, was investigated. Thus, the seeds were placed in the dark for two days in an incubator at 10°C in five priming treatments, including distilled water (hydropriming), PEG solutions of -0.3 MPa and 2 mM potassium nitrate

Copyright: © 2025 by the authors. This is an open access, peer-reviewed article published by Research Institute of Forests and Rangelands (http://ijrfpbgr.areeo.ac.ir//) and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

(osmopriming), and gibberellin 50 and 100 ppm (hormopriming). After drying the seeds under laboratory conditions, germination of primed and unprimed seeds was examined for 21 days in a PEG solution with a potential of -0.6 MPa.

Results: The response of seeds of the three studied species to drought stress (induced by PEG) showed that increasing PEG concentration and decreasing water potential (increasing stress) by -0.3 MPa had a slight stimulating effect on improving germination. However, from -0.6 MPa potential onwards, the reduction in germination was significant, such that germination reached zero at -1.5 MPa potential. These results indicated that the drought tolerance threshold for optimal germination in the studied *Nepeta* species is a water potential of -0.6 MPa. Analysis of variance results showed that priming treatments had a highly significant ($p < 0.01$) effect on germination percentage, germination rate, mean germination time, vigor index, and radicle length in all species under drought stress. The results showed that primed seeds of all species had higher germination performance under drought stress conditions compared to the control (non-primed). Cumulative germination curves and daily germination rates also confirmed improved and more synchronized germination in primed seeds. Based on the data presented, in *N. haussknechtii*, hydropriming, potassium nitrate, and gibberellin 100 ppm treatments, in *N. glomerulosa*, gibberellin 100 ppm and 50 ppm treatments, and in *N. cataria*, hydropriming and gibberellin 100 ppm and 50 ppm treatments were the most effective treatments in increasing seed vigor. These differences emphasize the dependence of the response to priming on the specific genotype of each species.

Conclusion: In the studied *Nepeta* species, priming is an essential strategy for cultivation in dryland conditions or areas with intermittent drought stress. This technique not only increases the chances of germination by crossing the critical point of -0.6 MPa, but also provides a solid foundation for continued growth and survival of the plant by producing stronger and more uniform seedlings. Its positive response to priming, especially in the seedling vigor and growth index, indicates that application this simple technique can led to successful establishment and increased yield of this valuable medicinal plant.

Keywords: *Nepeta*, PEG, Seed, Germination, Hydropriming, Osmopriming, Hormopriming.

بررسی اثر پرایمینگ بذر بر بهبود تحمل به تنش خشکی در مرحله جوانه‌زنی بذر سه گونه از جنس پونه‌سا (*Nepeta haussknechtii*، *N. glomerulosa* و *N. cataria*)

پروین صالحی شانجانی*[۱]، حمیده جوادی[۲]، لیلا رسول‌زاده[۳] و بهاره افشارنژاد[۳]

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

پست‌الکترونیک: psalehi1@gmail.com

۲- استادیار پژوهش، 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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۶ تاریخ اصلاح نهایی: ۱۴۰۴/۰۴/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۵

چکیده

سابقه و هدف: جنس *Nepeta* از تیره نعناعیان (Lamiaceae) به دلیل داشتن ترکیبات دارویی با ارزشی مانند نپتالاکتون مورد توجه است. برداشت‌های بی‌رویه بسیاری از گیاهان در رویشگاه‌های اصلی بدون توجه کافی به احیای آنها، باعث شده تا بسیاری از گونه‌های دارویی در معرض خطر انقراض قرار گیرند. کشت و اهلی کردن این گونه‌ها در شرایط دیم می‌تواند از برداشت بی‌رویه آن از رویشگاه‌های طبیعی جلوگیری کند. ایران منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک است و بیشتر اراضی کشاورزی با تنش خشکی مواجه هستند. تنش خشکی یک عامل محیطی مهم است که جوانه‌زنی بذر، رشد و بهره‌وری گونه‌های گیاهی مناطق معتدل را محدود می‌کند. از آنجاییکه گیاه *Nepeta* به ویژه در مرحله جوانه‌زنی به تنش خشکی حساس است، این پژوهش با هدف بررسی اثر پرایمینگ بذر بر بهبود تحمل به تنش خشکی در مرحله جوانه‌زنی بذر سه گونه از جنس *Nepeta* شامل *N. haussknechtii*، *N. glomerulosa* و *N. cataria* انجام شد تا توصیه‌هایی برای توسعه کشت دیم این گونه ها در شرایط خشکی ارائه گردد.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه، ابتدا نقطه بحرانی پتانسیل آب (القاشده توسط غلظت‌های مختلف پلی‌اتیلن‌گلایکول، PEG) برای جوانه‌زنی مطلوب در هر سه گونه تعیین گردید تا اثر بخشی پرایمینگ در آنها بررسی گردد. برای تعیین نقطه بحرانی پتانسیل آب هر گونه، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی در شش سطح پتانسیل آبی (۰، ۰/۳-، ۰/۶-، ۰/۹-، ۱/۲- و ۱/۵- مگاپاسکال) و سه تکرار در سال ۱۴۰۲ در آزمایشگاه تحقیقات تکنولوژی بذر بانک ژن منابع طبیعی ایران اجرا شد. با توجه به کاهش چشمگیر جوانه‌زنی در پتانسیل ۰/۶- مگاپاسکال، نتیجه‌گیری شد که ۰/۶- مگاپاسکال یک نقطه بحرانی برای جوانه‌زنی مطلوب *Nepeta* است. در ادامه به بررسی اثربخشی تکنیک‌های مختلف پرایمینگ بذر (هیدروپرایم، اسموپرایم و هورمون پرایم) در کاهش اثرهای نامطلوب تنش خشکی (القاء شده با ۰/۶- مگاپاسکال PEG) بر ویژگی‌های جوانه‌زنی سه گونه *Nepeta* شامل *N. haussknechtii*، *N. glomerulosa* و *N. cataria* پرداخته شد. به این ترتیب که بذرها به مدت دو روز در تاریکی در انکوباتور ۱۰ درجه سانتیگراد در پنج تیمار پرایمینگ شامل آب مقطر (هیدروپرایم)، محلول‌های PEG ۰/۳- مگاپاسکال و نیترات پتاسیم ۲ میلی‌مولار (اسموپرایم) و جیبرلین ۵۰ و ۱۰۰ پی‌پی‌ام (هورمون پرایم) قرار گرفتند. پس از خشک نمودن بذرها در شرایط آزمایشگاه، جوانه‌زنی بذور پرایم شده و پرایم نشده به مدت ۲۱ روز در محلول PEG با پتانسیل ۰/۶- مگاپاسکال بررسی گردید.

نتایج: واکنش بذرهای سه گونه مورد مطالعه به تنش خشکی (القا شده توسط PEG) نشان داد که افزایش غلظت PEG و کاهش پتانسیل آب (افزایش تنش)، به میزان ۰/۳- مگاپاسکال اثر تحریک‌کننده خفیفی بر بهبود جوانه‌زنی دارد. اما از پتانسیل ۰/۶- مگاپاسکال به بعد، کاهش جوانه‌زنی چشمگیر بوده بطوریکه جوانه‌زنی در پتانسیل ۱/۵- مگاپاسکال به صفر رسید. این نتایج نشان می‌دهد که آستانه تحمل به خشکی برای جوانه‌زنی مطلوب در گونه های مورد بررسی *Nepeta* پتانسیل آب ۰/۶- مگاپاسکال است. نتایج تجزیه واریانس صفات جوانه‌زنی نشان داد که تیمارهای پرایمینگ تأثیر معنی‌داری بر درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، میانگین زمان جوانه‌زنی،

شاخص بنیه و طول ریشه‌چه در تمام گونه‌های تحت تنش خشکی داشت($p<0.05$). نتایج نشان دادند که بذرهای پرایم شده تمامی گونه‌ها در شرایط تنش خشکی، درصد جوانه‌زنی بالاتری را در مقایسه با شاهد داشتند. منحنی‌های جوانه‌زنی تجمعی و میزان جوانه‌زنی روزانه نیز جوانه‌زنی بهبود یافته و هماهنگ‌تر در بذرهای پرایم شده را تأیید کردند. براساس داده‌های ارائه شده، در گونه *N. haussknechtii* تیمارهای هیدروپرایم و نیترات پتاسیم و جیبرلین ۱۰۰ ppm، در گونه *N. glomerulosa* تیمارهای جیبرلین ۱۰۰ ppm و ۵۰ ppm و در گونه *N. cataria* تیمارهای هیدروپرایم و جیبرلین ۱۰۰ ppm و ۵۰ ppm مؤثرترین تیمارها در افزایش بنیه بذر بودند. این تفاوت‌ها بر وابستگی پاسخ به پرایمینگ به ژنوتیپ خاص هر گونه تأکید دارد.

نتیجه‌گیری در گونه‌های مورد مطالعه *Nepeta* پرایمینگ یک راهبرد ضروری برای کشت در شرایط دیم یا مناطق با تنش خشکی متناوب محسوب می‌شود. این تکنیک نه تنها شانس جوانه‌زنی را از طریق عبور از نقطه بحرانی ۰/۶- مگاپاسکال افزایش می‌دهد، بلکه با تولید گیاهچه‌های قوی‌تر و یکدست، پایه محکمی برای ادامه رشد و بقای گیاه فراهم می‌کند. پاسخ مثبت آن به پرایمینگ، به‌ویژه در شاخص بنیه و رشد گیاهچه، نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری روی این تکنیک ساده می‌تواند بازده بسیار بالایی در استقرار موفق و افزایش عملکرد این گیاه دارویی ارزشمند داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: PEG، بذر، جوانه‌زنی، هیدروپرایم، اسموپرایم، هورمون پرایم.

مقدمه

تغییرات آب‌وهوایی جهانی و افزایش تنش‌های محیطی، به‌ویژه خشکی، یکی از بزرگترین چالش‌های این قرن در زمینه امنیت غذایی و کشاورزی پایدار به‌شمار می‌رود. براساس گزارش‌های سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO, 2022) بیش از ۴۰ درصد از سطح خشکی‌های جهان در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار دارد و پیش‌بینی می‌شود که این میزان با تشدید تغییرات اقلیمی افزایش یابد. تنش خشکی به عنوان یکی از مهمترین تنش‌های غیرزیستی، تأثیرات گسترده‌ای بر فرایندهای فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و مولکولی گیاهان دارد. این پدیده به‌ویژه در مراحل اولیه رشد مانند جوانه‌زنی بذر که یکی از حساس‌ترین مراحل رشد گیاه محسوب می‌شود، می‌تواند آثار مخرب قابل توجهی بر جای بگذارد (Saha *et al.*, 2022).

در شرایط تنش خشکی، قابلیت دسترسی به آب کاهش یافته، فعالیت آنزیم‌های مرتبط با تجزیه ذخایر بذر مختل شده و در نهایت درصد و سرعت جوانه‌زنی به شدت کاهش می‌یابد. مطالعات نشان داده که تنش خشکی می‌تواند موجب کاهش درصد جوانه‌زنی تا ۷۰ درصد در برخی از گونه‌های گیاهی شود (Farooq *et al.*, 2021). این کاهش در قابلیت جوانه‌زنی نه تنها بر استقرار گیاهچه تأثیر می‌گذارد (Salehi Shanjani *et al.*, 2024)، بلکه می‌تواند منجر به کاهش نهایی عملکرد و کیفیت محصول شود (Mingli *et al.*, 2015; Saha *et al.*, 2022). اثرهای زیان‌آور تنش آبی در محصولات مختلف مانند مریم‌گلی (Izadi *et al.*, 2022)، پونه (Nezami *et al.*, 2016)، نعناع فلفلی (Shamsabadi *et al.*, 2023)، سیاه‌دانه (Khorramdel *et al.* 2012)، گلرنگ (Taheri *et al.*, 2018)، ریحان (Rezaei *et al.*, 2019)، پنبه (Soltani *et al.*, 2008) و گندم (Khomdi *et al.*, 2016; Tabassum *et al.*, 2018) گزارش شده است.

جنس *Nepeta* از تیره نعناعیان (Lamiaceae) با دارا بودن بیش از ۲۵۰ گونه در سراسر جهان، از اهمیت اکولوژیک و دارویی بالایی برخوردار است (Mozaffarian, 2006). گونه‌های جنس پونه‌سا مانند *N. haussknechtii*، *N. glomerulosa* و *N. cataria* به دلیل دارا بودن ترکیبات ثانویه ارزشمند ازجمله نپتالکتون‌ها، فلاونوئیدها و ترپنوئیدها، در صنایع داروسازی، عطرسازی و پزشکی سنتی کاربردهای گسترده‌ای دارند. این ترکیبات دارای خواص ضدالتهابی، ضدمیکروبی و آنتی‌اکسیدانی هستند (Muhie *et al.*, 2018). موفقیت در کشت و احیای این گیاهان با ارزش، به جوانه‌زنی موفق بذر و استقرار مؤثر گیاهچه بستگی دارد که مرحله‌ای

حساس و بسیار آسیب‌پذیر در برابر تنش‌های محیطی، به‌ویژه خشکی است.

گزارش‌های متعدد حکایت از آن دارد که بذرهایی که بتوانند در مرحله جوانه‌زنی واکنش مناسبی نسبت به تنش خشکی نشان دهند، در مرحله گیاهچه‌ای رشد بهتری داشته و سیستم ریشه‌های توسعه یافته‌تری را تولید می کنند. بنابراین، سرعت جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه در شرایط تنش، نقش مهمی را در افزایش رشد گیاه ایفا می‌کنند (Ahmadpoor Dehkordi *et al.*, 2018). در سال‌های اخیر، تکنیک‌های مختلف پرایمینگ بذر به عنوان راهکارهای مؤثر و مقرون به صرفه برای افزایش تحمل به تنش‌های محیطی مورد توجه قرار گرفته‌اند. این تکنیک‌ها با القای فرایندهای پیش‌سازنده جوانه‌زنی، موجب افزایش یکنواختی جوانه‌زنی، بهبود استقرار مزرعه و تقویت مقاومت گیاه در برابر تنش‌های مختلف می‌شوند. در بین روش‌های مختلف پرایمینگ، می‌توان به سه روش هیدروپرایمینگ، اسموپرایمینگ و هورمون پرایمینگ اشاره کرد (Ashraf & Foolad 2007). هیدروپرایمینگ که ساده‌ترین روش پرایمینگ بوده، شامل خیس کردن بذرها در آب مقطر است. این روش با فعال‌سازی اولیه فرایندهای متابولیک، موجب افزایش سرعت جذب آب و جوانه‌زنی می‌شود. تحقیقات انجام شده بر روی گندم نشان داده که هیدروپرایمینگ می‌تواند درصد جوانه‌زنی را در شرایط تنش خشکی تا ۳۵ درصد افزایش دهد (Alam, *et al.*, 2022). اسموپرایمینگ که در آن از محلول‌های اسمزی مانند پلی‌اتیلن گلیکول (PEG) برای کنترل سرعت جذب آب استفاده می‌شود. این روش با شبیه‌سازی شرایط تنش خشکی، موجب افزایش تحمل به خشکی در بذرها می‌گردد. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که اسموپرایمینگ می‌تواند موجب تجمع اسمولیت‌های سازگار مانند پرولین و قندهای محلول در بذرها شود (Alam *et al.*, 2022). هورمون پرایمینگ شامل استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی مانند اسید جیبرلیک، اسید سالیسیلیک یا جاسمونیک در پرایمینگ است. این ترکیبات با تأثیر بر سیگنالینگ (Signaling) هورمونی و بیان ژن‌های مرتبط با تحمل به تنش، مقاومت گیاه را افزایش می‌دهند. مطالعه دیگری نشان داده که هورمون پرایمینگ با جیبرلین می‌تواند فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را در بذرهای تحت تنش خشکی افزایش دهد (Rhaman *et al.*, 2021).

سازوکارهای عمل پرایمینگ در افزایش تحمل به خشکی بسیار پیچیده و چند بعدی هستند. در سطح سلولی، پرایمینگ موجب افزایش سنتز پروتئین‌های شوک حرارتی (HSPs)، تجمع اسمولیت‌های سازگار مانند پرولین و گلیسین بتائین، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT) و پراکسیداز (POD) و حفظ یکپارچگی غشاهای سلولی می‌شود. در سطح فیزیولوژیک، پرایمینگ موجب بهبود کارایی فتوسنتز، افزایش محتوای کلروفیل، تنظیم تعادل یونی و بهبود روابط آبی گیاه می‌شود. همچنین در سطح مولکولی، پرایمینگ با القای بیان ژن‌های مرتبط با تحمل به خشکی مانند ژن‌های خانواده LEA، Aquaporinها و فاکتورهای رونویسی مرتبط با پاسخ به تنش، مقاومت گیاه را افزایش می‌دهد (Jatana *et al.*, 2024).

اگرچه مطالعات متعددی در زمینه اثر پرایمینگ بر جوانه‌زنی بذر گیاهان مختلف انجام شده است، اما اطلاعات جامعی در مورد پاسخ‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گونه‌های مختلف *Nepeta* به تیمارهای پرایمینگ در شرایط تنش خشکی وجود ندارد. همچنین مقایسه سیستماتیک بین اثربخشی روش‌های مختلف پرایمینگ بر ویژگی‌های جوانه‌زنی این گونه‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این پژوهش با هدف بررسی اثر تیمارهای مختلف پرایمینگ بر شاخص‌های جوانه‌زنی سه گونه ارزشمند از جنس پونه‌سا *Nepeta* در شرایط تنش خشکی طراحی شد. اهداف ویژه این تحقیق، شامل ۱) ارزیابی اثر تیمارهای مختلف خشکی بر صفات جوانه‌زنی و تعیین آستانه تحمل به خشکی هریک از گونه‌های مورد مطالعه، ۲) تعیین مؤثرترین روش پرایمینگ در شرایط خشکی برای هریک از گونه‌های مورد مطالعه است.

مواد و روش‌ها

آزمون تنش خشکی و تعیین نقطه بحرانی جوانه‌زنی

به منظور بررسی واکنش جوانه‌زنی بذرهای سه گونه دارویی پونه‌سا *Nepata haussknechtii*، *N. pogonosperma* و *N. glomerulosa* تحت تنش خشکی در شش سطح پتانسیل ۰، ۰/۳-، ۰/۶-، ۰/۹-، ۱/۲- و ۱/۵- مگاپاسکال (القا شده با محلول PEG 6000) ، این تحقیق در سال ۱۴۰۳ در آزمایشگاه تحقیقات تکنولوژی بذر بانک ژن منابع طبیعی ایران اجرا شد. سطوح مختلف تنش خشکی طبق روش (Michel & Kaufmann, 1973) تهیه گردید. سطح پتانسیل اسمزی ۰/۶- مگاپاسکال از طریق PEG، به علت افت شدید جوانه‌زنی، به عنوان نقطه بحرانی جوانه‌زنی مطلوب بذرهای گونه‌های مورد مطالعه *Nepeta* برای بررسی تأثیر پرایمینگ در شرایط خشکی انتخاب شد.

آزمون پرایمینگ بذر

طبق بررسی‌های آزمایشگاهی اولیه، پنج تیمار پرایمینگ که بیشترین تأثیر مثبت را در جوانه‌زنی بذرهای *Nepeta* داشته‌اند برای این پژوهش انتخاب شدند (نتایج درج نشده است). تیمارهای مورد بررسی شامل هیدروپرایم (آب مقطر)، اسموپرایم (PEG ۰/۳- مگاپاسکال و نیترات پتاسیم ۲ میلی‌مولار) و هورمون پرایم (جیبرلین ۵۰ و ۱۰۰ ppm) بودند که به‌مدت ۲ روز در تاریکی و دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر روی بذرها اعمال شدند (Saberi *et al.*, 2010; Ali *et al.*, 2021). پس از خشک کردن بذرها در شرایط آزمایشگاه، جوانه‌زنی بذرهای پرایم شده و پرایم نشده به مدت ۱۴ روز در محلول PEG با پتانسیل ۰/۶- مگاپاسکال بررسی گردید. صفات اندازه‌گیری شده شامل درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، میانگین زمان جوانه‌زنی، شاخص بنیه بذر، طول ریشه‌چه و طول ساقه‌چه ثبت شدند. شمارش درصد جوانه‌زنی (خروج ریشه‌چه دو میلی‌متری) به‌صورت روزانه انجام شد.

هر دو آزمون در ظروف پتری و در شرایط ژرمیناتور ۲۵ درجه سانتیگراد ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی با سه تکرار و در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. فرمول‌های مورد استفاده در دو آزمون شامل:

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

$$G\% = {}^{n_g}/_{n_t} \times 100 \quad (1)$$

که G%: درصد جوانه‌زنی، n_g: تعداد بذرهای جوانه‌زده و n_t: تعداد بذر کاشته شده است.

میانگین مدت زمان جوانه‌زنی با استفاده از رابطه ۲ تعیین گردید (Ellis & Roberts, 1981).

$$MGT = \frac{\sum(n \times d)}{n_g} \quad (2)$$

که MGT: مدت زمان جوانه‌زنی، n: تعداد بذرهای جوانه‌زده در هر روز، d: تعداد روز پس از شروع آزمایش و n_g:کل تعداد بذرهای جوانه‌زده است.

سرعت جوانه‌زنی نیز از طریق رابطه ۳ به دست آمد (Agrawal, 2004).

$$GS = \sum {}^{n_i}/_{d_i} \quad (3)$$

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

شاخص بنیه بذر از طریق رابطه ۴ محاسبه شد.

$$VI = G\% \times SL \quad (4)$$

که VI: شاخص بنیه بذر، G%: درصد جوانه‌زنی و SL: میانگین طول گیاهچه (سانتی‌متر) است.

تجزیه واریانس و مقایسه میانگین به روش دانکن با نرم‌افزار SAS 9.0 و نمودارها با نرم‌افزار Excel رسم گردید.

نتایج

ارزیابی تنش خشکی و تعیین نقطه بحرانی جوانه‌زنی

ارزیابی پاسخ بذرهای سه گونه مورد مطالعه به تنش خشکی (القا شده توسط PEG) نشان داد که افزایش غلظت PEGو کاهش پتانسیل آب (افزایش تنش)، باعث کاهش درصد و سرعت جوانه‌زنی در هر سه گونه شد (جدول ۱). از میان غلظت‌های مختلف PEG، پتانسیل آب ۰/۳- مگاپاسکال اثر تحریک‌کننده خفیفی بر جوانه‌زنی داشت که می‌تواند ناشی از ایجاد یک تنش ملایم و آغاز فرایندهای آماده‌سازی بذر باشد. اما از پتانسیل ۰/۶- مگاپاسکال به بعد،

کاهش جوانه‌زنی چشمگیر بوده، به‌طوری‌که جوانه‌زنی در پتانسیل ۱/۵- مگاپاسکال به صفر رسید. این نتایج نشان داد که آستانه تحمل به خشکی برای جوانه‌زنی مطلوب در گونه‌های مورد بررسی، پتانسیل آب ۰/۶- مگاپاسکال است. تفاوت در مقادیر مطلق درصد جوانه‌زنی بین گونه‌ها می‌تواند نشان‌دهنده سطح متفاوت تحمل ذاتی آنها به خشکی باشد.

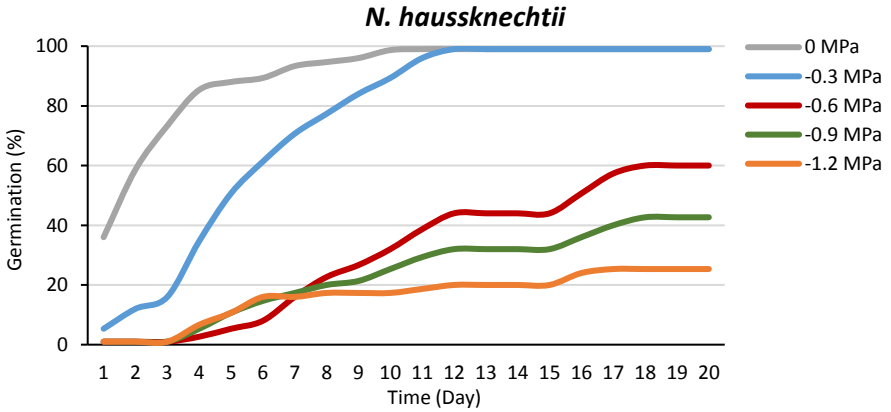
نمودارهای تجمعی جوانه‌زنی گونه‌های *N. haussknechtii*، *N. glomerulosa* و *N. cataria* (شکل‌های ۱ تا ۳) اطلاعات با ارزشی در دسترس قرار داد. در تیمار شاهد (بدون تنش)، منحنی جوانه‌زنی شیب تندی داشت که نشان‌دهنده سرعت بالای جوانه‌زنی و یکنواختی آن است. با اعمال تنش خشکی، نه تنها درصد نهایی جوانه‌زنی کاهش یافت، بلکه شیب منحنی نیز کم شد. به‌طوری‌که جوانه‌زنی کندتر شده و بذرها در روزهای مختلف و با تأخیر جوانه زدند که این موضوع منجر به عدم یکنواختی در مزرعه گردید. در شدیدترین سطح تنش، منحنی تقریباً افقی ماند که نشان از توقف کامل فرایند جوانه‌زنی است (شکل ۱ تا ۳).

جدول ۱- مقایسه درصد و سرعت جوانه‌زنی بذرهای سه گونه مورد مطالعه **Nepeta** در سطوح مختلف خشکی

Table 1. Comparison of seed germination percentage and rate of three Nepeta species at different levels of drought

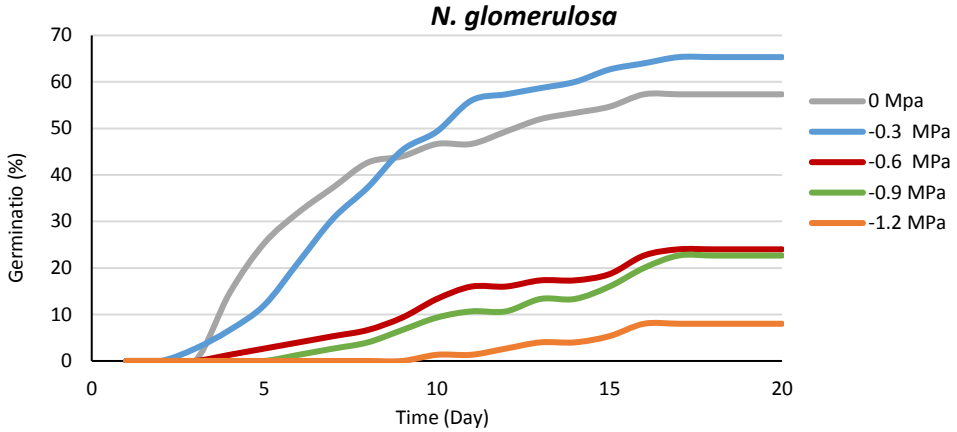
Species	Drought stress (MPa)	Germination%	Germination rate
N. haussknechtii	0	100 a	16.37 a
	-0.3	100 a	6.01 b
	-0.6	60.00 b	1.65 c
	-0.9	42.66 c	1.38 c
	-1.2	25.33 d	1.02 c
N. glomerulosa	0	57.33 a	2.01 a
	-0.3	65.33 a	1.98 a
	-0.6	24.00 b	0.63 b
	-0.9	22.67 b	0.46 b
	-1.2	8.00 c	0.13 c
N. cataria	0	52.00 a	1.82 a
	-0.3	40.66 b	1.19 b
	-0.6	14.66 c	0.37 c
	-0.9	2.66 d	0.06 d
	-1.2	0.0 d	0.0 d

Means of followd by the same letters are not significantly different according to DMRT 5%.



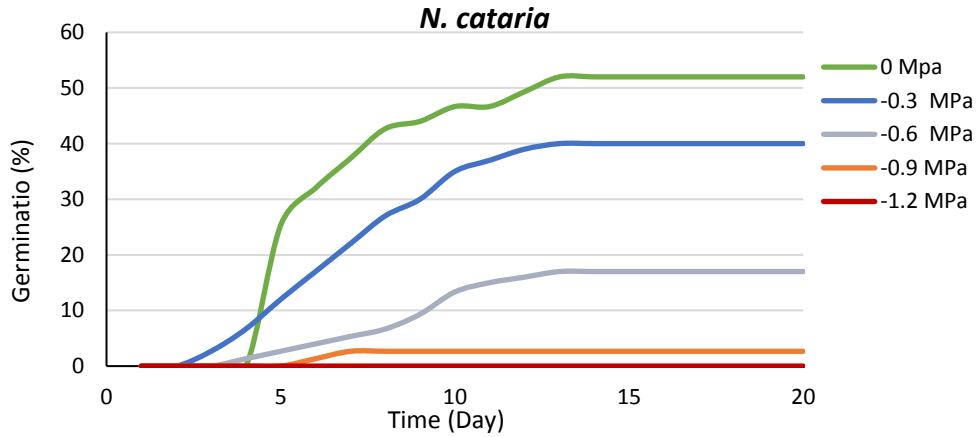
شکل ۱- جوانه‌زنی تجمعی بذرهای ***N. haussknechtii*** در سطوح مختلف خشکی

Fig. 1. Cumulative germination of *N. haussknechtii* seeds at different levels of drought stress



شکل ۲- روند جوانه‌زنی تجمعی بذرهای ***N. glomerulosa*** در سطوح مختلف خشکی

Fig. 2. Cumulative germination of *N. glomerulosa* seeds at different levels of drought stress.



شکل ۳- روند جوانه‌زنی تجمعی بذرهای ***N. cataria*** در سطوح مختلف خشکی

Fig. 3. Cumulative germination of *N. cataria* seeds at different levels of drought stress

تأثیر تیمارهای پرایمینگ بر تحمل تنش خشکی

نتایج تجزیه واریانس برای صفات مختلف جوانه‌زنی بذر گونه‌های *N. haussknechtii*، *N. glomerulosa* و *N. cataria* تحت تیمارهای مختلف پرایمینگ و در تنش خشکی (القا شده توسط محلول PEG ۰/۶- مگاپاسکال) نشان داد که تیمارهای پرایمینگ بر صفات اندازه‌گیری شده تأثیر معنی‌داری داشتند (در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد). این موضوع نشان داد که پرایمینگ بذر می‌تواند بر فیزیولوژی جوانه‌زنی حتی تحت شرایط سخت تنش خشکی تأثیر بگذارد. معنی‌دار بودن صفات رشد گیاهچه مانند طول ساقه‌چه در جوانه‌زنی گونه‌های *N. haussknechtii*، *N. glomerulosa* و *N. cataria* و نیز شاخص بنیه بذر که فرمول بسیار مهمی برای ارزیابی کیفیت بذر محسوب می‌شود نشان دادند که پرایمینگ نه تنها بر خروج بذر از پوسته، بلکه بر قدرت و سلامت گیاهچه حاصل از آن نیز تأثیر مثبت دارد. این موضوع حکایت از آن دارد که اثر مثبت پرایمینگ فراتر از مرحله جوانه‌زنی بوده و به مرحله رشد اولیه گیاهچه نیز تسری می‌یابد. توسعه بهتر سیستم ریشه در شرایط تنش، دسترسی گیاه به آب را بهبود بخشیده و شانس بقای آن را افزایش می‌دهد.

الف) گونه *N. haussknechtii*

مقایسه میانگین صفات مورد مطالعه گونه *N. haussknechtii* نشان داد که تیمارهای هیدروپرایم و جیبرلین ۱۰۰ Ppm مؤثرترین تیمارها در افزایش درصد جوانه‌زنی بودند (جدول ۲). بعلاوه پرایمینگ با هیدروپرایم و جیبرلین ۱۰۰ Ppm به وضوح باعث افزایش سرعت جوانه‌زنی شده است. با وجود اینکه تیمارهای پرایمینگ، موجب تحریک رشد ساقه‌چه نشدند ولی ریشه‌چه و بنیه گیاهچه تحت تأثیر هیدروپرایم قرار گرفته و نسبت به سایر تیمارها مقادیر بیستری داشتند (جدول ۲).

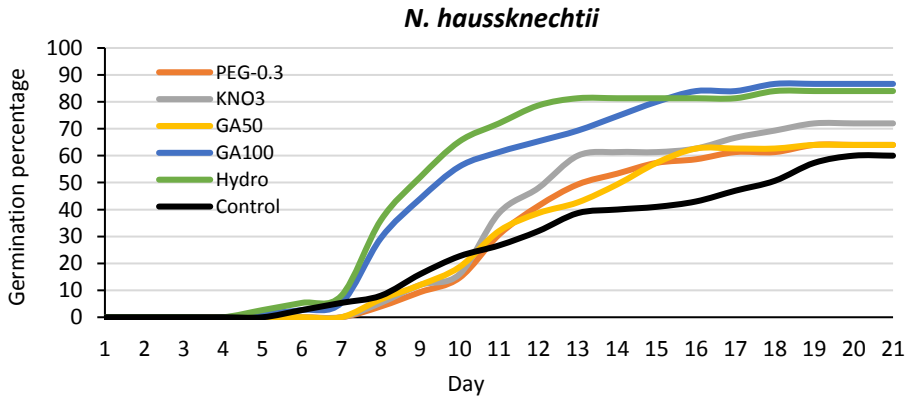
نمودارهای تجمعی درصد و سرعت جوانه‌زنی بذرهای پرایم شده (شامل هیدروپرایم، اسموپرایم و هورمون پرایم و شاهد پرایم نشده) تحت تنش خشکی (القا شده توسط محلول PEG ۰/۶- مگاپاسکال) اطلاعات مفیدی از گونه *N. haussknechtii* را در اختیار قرار داد (شکل ۴). در این گونه تیمارهای پرایمینگ نسبت به تیمار شاهد منجر به افزایش درصد جوانه‌زنی شدند (شکل ۴). منحنی‌های مربوط به بذرهای پرایم شده شیب تندتری در روزهای اولیه دارند که نشان از جوانه‌زنی سریع‌تر و هماهنگ‌تر آنهاست. این یکنواختی برای استقرار موفقیت‌آمیز در مزرعه حیاتی است. بیشترین سرعت جوانه‌زنی در بذرهای شاهد (پرایم نشده) در روز ۸، در تیمارهای هیدروپرایم و جیبرلین ۱۰۰ Ppm در روز ۷ و در سایر تیمارها در روز ۱۰ انجام شد (شکل ۴).

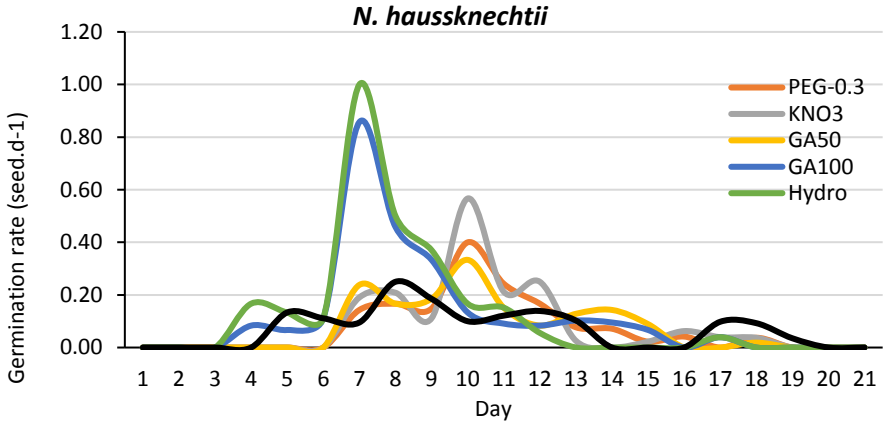
جدول ۲- مقایسه میانگین‌های صفات جوانه‌زنی بذرهای سه گونه مورد مطالعه *Nepeta* پرایم شده (با ۵ تیمار هیدروپرایم، اسموپرایم و هورمون پرایم) و شاهد در شرایط خشکی با محلول PEG -0.6 MPa

Table 2. Comparison of mean germination traits of primed (with 5 treatments of hydroprime, osmoprime and hormoprime) and unprimed (control) of three *Nepeta* species seeds under dry conditions with PEG solution -0.6 Mpa

Treatments	Germination %	Germination rate	Mean germination time	Vigor index	Radicle Length (cm)	Shoot Length (cm)
PEG-0.3	64.0 b	1.51 b	11.09 a	2.81 c	2.80 b	1.60 ab
KNO3	72.0 ab	1.72 b	11.01 a	3.28 bc	3.23 a	1.40 b
GA50	64.0 b	1.53 b	11.13 a	2.54 c	2.53 b	1.43 ab
GA100	86.6 a	2.52 a	9.44 b	3.48 b	2.60 b	1.43 ab
Hydroprim	84.0 a	2.69 a	8.34 c	4.67 a	3.80 a	1.76 a
Control	60.0 b	1.46 b	11.58 a	4.16 ab	1.93 c	1.16 c

Means of followd by the same letters are not significantly different according to DMRT 5%.





شکل ۴- روند درصد جوانه‌زنی تجمعی و سرعت جوانه‌زنی روزانه بذرهای ***N. haussknechtii*** پرایم شده (با ۵ تیمار هیدروپرایم، اسموپرایم و هورمون پرایم) و شاهد پرایم نشده در شرایط خشکی ایجاد شده با محلول **PEG -0.6 MPa**

Fig. 4. Cumulative germination percentage values and daily germination rate of primed seed using 5 treatments of hydroprime, osmoprime and hormoprime) and control *N. haussknechtii* seeds under dry conditions generated with PEG solution -0.6 MPa

ب) گونه ***N. glomerulosa***

نمودارهای تجمعی درصد جوانه‌زنی و مقایسه میانگین صفات جوانه‌زنی بذرهای پرایم شده (شامل هیدروپرایم، اسموپرایم و هورمون پرایم و شاهد) تحت تنش خشکی (القا شده توسط محلول PEG ۰/۶- مگاپاسکال) اطلاعات مفیدی از گونه‌های مورد مطالعه Nepeta نشان دادند (جدول ۳ و شکل ۵). مقایسه میانگین صفات جوانه‌زنی در گونه *N. glomerulosa* نشان داد که تیمارهای جیبرلین ۱۰۰ Ppm و ۵۰ Ppm مؤثرترین تیمارها در افزایش درصد و سرعت جوانه‌زنی بودند (جدول ۳). کمترین میزان درصد و سرعت جوانه‌زنی نسبت به شاهد (پرایم نشده) در تیمار KNO3 مشاهده گردید. اگرچه دو تیمار جیبرلین ۱۰۰ Ppm و ۵۰ Ppm رشد ریشه‌چه را تحریک نمودند ولی تیمار جیبرلین ۱۰۰ Ppm، موجب تحریک رشد ساقه‌چه شد. بیشترین مقادیر شاخص بنیه گیاهچه تحت تأثیر تیمارهای جیبرلین ۱۰۰ Ppm و ۵۰ Ppm و نیز شاهد (پرایم نشده) ثبت گردید (جدول ۳).

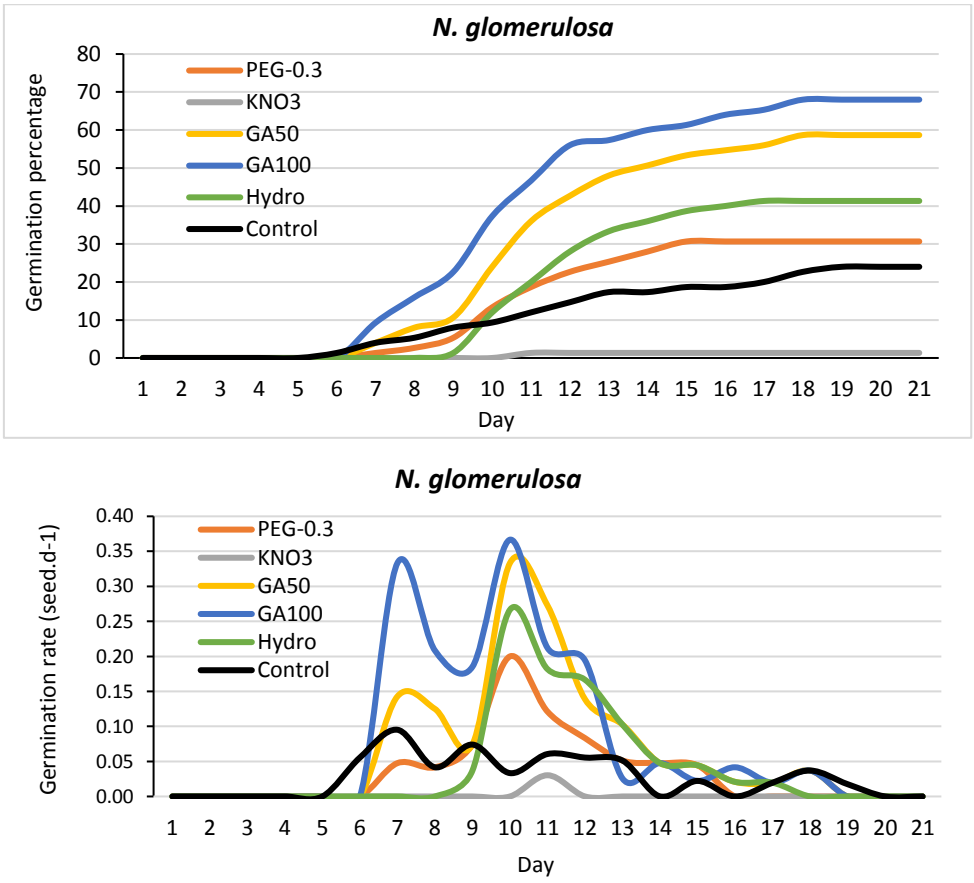
نمودارهای تجمعی درصد و سرعت جوانه‌زنی بذرهای پرایم شده (شامل هیدروپرایم، اسموپرایم، هورمون پرایم و شاهد پرایم نشده) تحت تنش خشکی (القا شده توسط محلول PEG ۰/۶- مگاپاسکال) نشان دادند در این گونه تیمارهای پرایمینگ (به استثناء KNO3) نسبت به تیمار شاهد منجر به افزایش درصد و سرعت جوانه‌زنی شدند. بیشترین سرعت جوانه‌زنی در بذرهای پرایم نشده در روز ۷، در تیمارهای جیبرلین ۱۰۰ Ppm و ۵۰ Ppm در روز ۷ و ۱۱ و در سایر تیمارها در روز ۱۱ انجام شد (شکل ۵).

جدول ۳- مقایسه میانگین‌های صفات جوانه‌زنی بذرهای ***N. glomerulosa*** پرایم شده (با ۵ تیمار هیدروپرایم، اسموپرایم و هورمون پرایم) و شاهد در شرایط خشکی با محلول **PEG -0.6 MPa**

Table 3. Comparison of mean germination traits of primed (with 5 treatments of hydroprime, osmoprime and hormoprime) and unprimed (control) of *N. glomerulosa* seeds under dry conditions with PEG solution -0.6 Mpa

Treatments	Germination %	Germination rate	Mean germination time	Vigor index	Radicle Length (cm)	Shoot Length (cm)
PEG-0.3	30.67 c	0.71 b	11.34 a	0.25 ab	0.39 b	0.43 a
KNO3	1.33 d	0.03 c	3.66 b	0.01 b	0.03 b	0.03 c
GA50	68.00 a	1.69 a	10.68 a	0.39 a	0.32 b	0.25 b
GA100	58.66 a	1.35 a	11.38 a	0.45 a	0.35 b	0.42 a
Hydroprim	41.33 b	0.88 b	11.93 a	0.21 ab	0.27 b	0.24 b
Control	24.00 c	0.56 b	11.83 a	0.38 a	0.99 a	0.39 a

Means of followd by the same letters are not significantly different according to DMRT 5%.



شکل ۵- روند درصد جوانه‌زنی تجمعی و سرعت جوانه‌زنی روزانه بذرهای ***N. glomerulosa*** پرایم شده (با ۵ تیمار هیدروپرایم، اسموپرایم و هورمون پرایم) و پرایم نشده در شرایط خشکی با محلول **PEG -0.6 Mpa**

Fig. 5. Cumulative germination percentage values and daily germination rate of primed seeds (with 5 treatments of hydroprime, osmoprime and hormoprime) and unprimed (control) of three *Nepeta* species seeds under dry conditions with PEG solution -0.6 MPa

ج) گونه ***N. cataria***

مقایسه میانگین صفات مورد مطالعه گونه *N. cataria* نشان می‌دهد که تیمارهای KNO_3 و جیبرلین ۱۰۰ Ppm و ۵۰ Ppm مؤثرترین تیمارها در افزایش درصد جوانه‌زنی و پرایمینگ با جیبرلین ۱۰۰ Ppm بودند و باعث افزایش سرعت جوانه‌زنی شدند (جدول ۴). از میان سه تیمار مؤثر در افزایش درصد جوانه‌زنی، تیمار KNO3، موجب تحریک رشد ساقه‌چه، ریشه‌چه و بنیه گیاهچه گردید (جدول ۴).

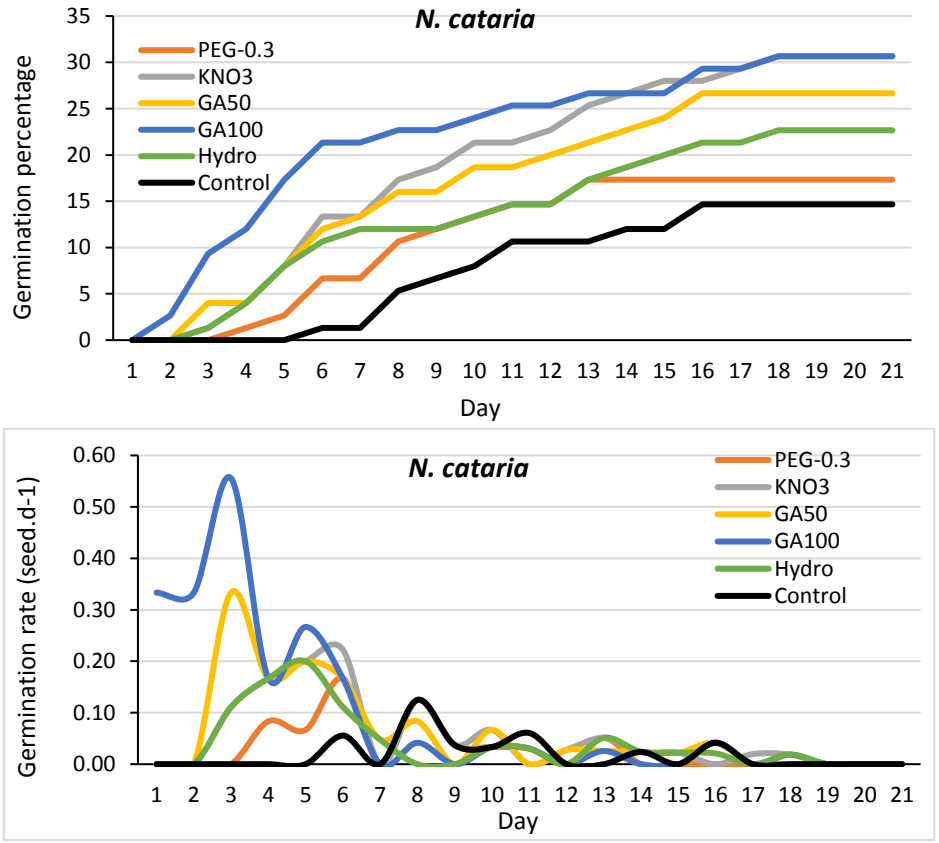
نمودارهای تجمعی درصد و سرعت جوانه‌زنی بذرهای پرایم شده (شامل هیدروپرایم، اسموپرایم، هورمون پرایم و شاهد پرایم نشده) تحت تنش خشکی (القا شده توسط محلول PEG ۰/۶- مگاپاسکال) اطلاعات مفیدی از گونه *N. cataria* در اختیار قرار دادند (شکل ۶). در این گونه تیمارهای پرایمینگ نسبت به تیمار شاهد منجر به افزایش درصد جوانه‌زنی شدند (شکل ۶). منحنی‌های مربوط به بذرهای پرایم شده شیب تندتری در روزهای اولیه داشتند که نشان از جوانه‌زنی سریع‌تر و هماهنگ‌تر آنهاست. این یکنواختی برای استقرار موفقیت‌آمیز در مزرعه حیاتی است. بیشترین سرعت جوانه‌زنی در بذرهای پرایم نشده در روز ۸، در تیمارهای هیدروپرایم و جیبرلین ۱۰۰ Ppm و ۵۰ Ppm در روز ۳ و در سایر تیمارها در روز ۶ انجام شد (شکل ۶).

جدول ٤- مقایسه میانگین‌های صفات جوانه‌زنی بذرهای *N. cataria* پرایم شده (با ٥ تیمار هیدروپرایم، اسموپرایم و هورمون پرایم) و شاهد در شرایط خشکی با محلول PEG -0.6 MPa

Table 4. Comparison of mean germination traits of primed (with 5 treatments of hydroprime, osmoprime and hormoprime) and unprimed (control) *N. cataria* seeds under dry conditions with PEG solution -0.6 MPa

Treatments	Germination %	Germination rate	Mean germination time	Vigor index	Radicle Length (cm)	Shoot Length (cm)
PEG-0.3	17.33 b	0.59bc	8.33 ab	0.24cd	0.73 c	0.60 b
KNO3	30.66 a	1.09ab	8.69 ab	1.05 a	2.13 a	1.33 a
GA50	26.66 a	1.03ab	8.48 ab	0.56 b	1.10bc	1.00ab
GA100	30.66 a	1.68 a	6.94 b	0.81ab	1.70ab	1.00ab
Hydroprim	22.66ab	0.83bc	8.85 ab	0.51bc	1.10bc	0.96ab
Control	14.66 b	0.37 c	10.69a	0.18 d	0.56 c	0.63 b

Means followed by the same letters are not significantly different according to DMRT at 5%.



شکل ۶- روند درصد جوانه‌زنی تجمعی و سرعت جوانه‌زنی روزانه بذرهای *N. cataria* پرایم شده (با ۵ تیمار هیدروپرایم، اسموپرایم و هورمون پرایم) و پرایم نشده در شرایط خشکی با محلول PEG -0.6 MPa

Fig. 6. Cumulative germination percentage values and daily germination rate of primed (with 5 treatments of hydroprime, osmoprime and hormoprime) and unprimed (control) *N. cataria* seeds under dry conditions with PEG solution -0.6 MPa

بحث

نتایج این پژوهش به وضوح نشان داد که تنش خشکی ایجاد شده توسط PEG، یک فاکتور محدودکننده قوی برای جوانه‌زنی و رشد گیاهچه هر سه گونه *Nepeta* است. از پتانسیل ۰/۶- مگاپاسکال به بعد، درصد و سرعت جوانه‌زنی به‌طور بحرانی کاهش یافت و منجر به تضعیف رشد گیاهچه

گردید. پرایمینگ بذر گونه‌های مورد مطالعه به روشنی حکایت از افزایش درصد و سرعت جوانه‌زنی، بهبود شاخص بنیه و تقویت رشد ریشه‌چه در بذرهای پرایم شده تحت تنش خشکی داشت. به‌طوری‌که در *N. haussknechtii* تیمارهای هیدروپرایم و جیبرلین ۱۰۰ Ppm، در *N. glomerulosa* تیمارهای جیبرلین ۱۰۰ Ppm و ۵۰ Ppm و در *N. cataria* تیمارهای نیترات پتاسیم، جیبرلین ۱۰۰ Ppm و ۵۰ Ppm مؤثرترین تیمارها در افزایش پارامترهای جوانه‌زنی بودند. بهبود معنی‌دار پارامترهای جوانه‌زنی در بذرهای پرایم شده تحت تنش خشکی، همسو با تحقیقات پیشین روی گونه‌های مختلف گیاهی توسط هیدروپرایمینگ (Kalhori *et al.*, 2018)، اسموپرایمینگ (Ali *et al.*, 2021; Dagne *et al.* 2024) و هورمون پرایمینگ (Saberi *et al.*, 2010; Rhaman *et al.*, 2021) است. برای نمونه، در ریحان، پرایمینگ بذر با فیتوهورمون‌ها موجب بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه ریحان تحت تنش خشکی شده است (Rezaee *et al.*, 2019) و به‌طور مشابه، در مطالعات متعددی اثرهای مثبت پرایمینگ بر جوانه‌زنی بذر گیاهان ازجمله آویشن دنایی (Alizadeh *et al.*, 2020) و مریم‌گلی (Pichand *et al.*, 2023) گزارش شده است. این شباهت نشان می‌دهد که پاسخ مثبت به پرایمینگ می‌تواند یک ویژگی مشترک در میان بسیاری از گیاهان دارویی باشد (Tabatabaei *et al.*, 2021). مطالعات نشان داده است که پرایمینگ با فراهم کردن شرایط کنترل شده برای جذب آب، فرایندهای متابولیک اولیه ازجمله سنتز پروتئین‌ها، فعال‌سازی آنزیم‌ها و ترمیم غشاها و DNA را آغاز می‌کند (Savvides *et al.*, 2016). هنگامی که بذرهای پرایم شده در شرایط تنش خشکی کشت می‌شوند، برخلاف بذرهای پرایم‌نشده که باید این فرایندها را از پتانسیل صفر آغاز کنند، می‌توانند به سرعت و با انرژی بیشتری جوانه بزنند. این موضوع به وضوح در نمودارهای تجمعی جوانه‌زنی که شیب تندتری در روزهای اول برای بذرهای پرایم شده داشتند مشهود بود. مطالعه‌ای بر روی برنج (Ali et al., 2021) نشان داد که پرایمینگ با سیلیکون، ذخایر انرژی (ATP) و فعالیت آنزیم‌های گلیاکسیزومی را افزایش داد که این موضوع توضیحی برای افزایش سرعت جوانه‌زنی مشاهده شده در گونه‌های *Nepeta* می‌تواند باشد. یکی از پاسخ‌های کلیدی گیاهان به تنش خشکی، تجمع ترکیبات اسمولیت فعال مانند پرولین، گلیسین بتائین و قندهای محلول است. این ترکیبات با کمک به حفظ تورگر سلول و محافظت از ماکرومولکول‌ها، پتانسیل آب سلول را پایین آورده و جذب آب را در شرایط خشکی تسهیل می‌کنند (Marthandan *et al.*, 2020). پژوهش‌ها نشان می‌دهند که پرایمینگ می‌تواند این فرایند را تحریک کند، برای نمونه، در ذرت پرایمینگ با سیلیکون منجر به تجمع بیشتر پرولین و قندهای محلول در گیاهچه‌های تحت تنش خشکی شده است (Parveen *et al.*, 2019). این سازوکار می‌تواند دلیلی بر بهبود شاخص بنیه و رشد بهتر ریشه‌چه و ساقه‌چه در گونه‌های *N. glomerulosa* و *N. haussknechtii* در این مطالعه باشد. تنش خشکی منجر به تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و بروز استرس اکسیداتیو می‌شود که به لیپیدها، پروتئین‌ها و DNA آسیب می‌زند. پرایمینگ بذر با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز (CAT)، سوپراکسید دیسموتاز (SOD) و پراکسیداز (POD)، گیاهچه را برای مقابله با این آسیب‌ها آماده می‌نماید (Jisha *et al.*, 2013) و پرایمینگ با فیتوهورمون‌ها، سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی گیاه را در مرحله جوانه‌زنی تقویت می‌کند (Rhaman *et al.*, 2021). بنابراین، بهبود درصد جوانه‌زنی در بذرهای پرایم شده گونه‌های جنس پونه‌سا تحت تنش ۰/۶- مگاپاسکال می‌تواند ناشی از کاهش آسیب‌های اکسیداتیو در طول فرایند حیاتی جوانه‌زنی باشد. پرایمینگ می‌تواند تعادل هورمون‌های گیاهی را به نفع رشد تحت تنش تغییر دهد. به‌طور معمول، پرایمینگ باعث افزایش سطح هورمون‌های رشد مانند جیبرلین (GA) و سیتوکینین (CK) و کاهش سطح هورمون بازدارنده آبسزیک اسید (ABA) می‌شود (Rhaman *et al.*, 2021). این تغییرات سیگنال‌دهی، به‌طور همزمان جوانه‌زنی را تقویت و پاسخ‌های به تنش را تعدیل می‌کند. تیمارهای هورمون پرایم مورد استفاده در این پژوهش نیز احتمالاً از این سازوکار بهره برده‌اند.

نتایج پژوهش در گونه *N. cataria* و *N. haussknechtii* حکایت از بهبود معنی‌دار طول ریشه‌چه در بذرهای پرایم شده داشت. این نتیجه با یافته‌های تحقیقات در آویشن دنایی (Alizadeh *et al.*, 2020) و مریم‌گلی (Pichand *et al.*, 2023) و در مرزه *Satureja montana* (Vidak *et al.*, 2022) مطابقت دارد. آنان گزارش کردند که پرایمینگ منجر به توسعه سیستم ریشه قوی‌تر و عمیق‌تر می‌شود که این موضوع دسترسی گیاه به آب در اعماق پایین‌تر خاک را افزایش داده و در نهایت تحمل به خشکی را در مراحل بعدی رشد بهبود می‌بخشد. این موضوع اهمیت راهبردی پرایمینگ را نه تنها برای جوانه‌زنی، بلکه برای تأمین پایه‌ای محکم برای کل دوره رشد گیاه نشان می‌دهد.

یکی از یافته‌های جالب این پژوهش، تفاوت در میزان پاسخ سه گونه به تیمارهای پرایمینگ بود. این پدیده که وابستگی پاسخ به ژنوتیپ نامیده می‌شود، در سایر تحقیقات نیز گزارش شده که اثر پرایمینگ در بهبود تحمل به خشکی در ارقام مختلف برنج، متفاوت است (Hussain *et al.*, 2017). این موضوع بر ضرورت بهینه‌سازی شیوه‌نامه پرایمینگ (نوع ماده، غلظت و زمان تیمار) برای هر گونه به‌طور جداگانه تأکید می‌کند. البته یک شیوه‌نامه واحد ممکن است برای همه گونه‌ها بهینه نباشد. به این ترتیب می‌توان نتیجه‌گیری نمود که پرایمینگ باعث افزایش درصد جوانه‌زنی نهایی تحت تنش خشکی می‌شود. این موضوع احتمالاً از طریق فعال‌سازی آنزیم‌های دخیل در جوانه‌زنی، سنتز پروتئین‌ها و نوکلئیک اسیدها و ترمیم ساختارهای سلولی آسیب‌دیده در طول دوره پرایمینگ انجام می‌شود. پرایمینگ سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی را افزایش می‌دهد. این موضوع از شیب تندتر منحنی‌های جوانه‌زنی تجمعی در بذرهای پرایم شده مشهود است. البته یکنواختی در استقرار گیاهچه برای مدیریت بهینه مزرعه و رسیدن به عملکرد مطلوب ضروریست. پرایمینگ رشد گیاهچه، به‌ویژه سیستم ریشه را تقویت می‌کند. افزایش معنی‌دار طول ریشه‌چه در بذرهای پرایم شده، یک مزیت اکولوژیک بزرگ در شرایط تنش خشکی محسوب می‌شود، زیرا جذب آب از اعماق بیشتر خاک را ممکن می‌سازد.

پاسخ به پرایمینگ می‌تواند وابسته به گونه باشد. نظر به پاسخ متفاوت در صفات جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه بین گونه‌های *N. haussknechtii*، *N. glomerulosa* و *N. cataria* نتایج این پژوهش بر لزوم انجام مطالعات گونه-محور برای دستیابی به بهترین نتیجه تأکید دارد. بعلاوه یافته‌های این پژوهش به وضوح نشان داد که تکنیک پرایمینگ بذر می‌تواند به عنوان یک راهبرد مؤثر، تحمل به خشکی را در سه گونه *N. haussknechtii*، *N. glomerulosa* و *N. cataria* در مرحله جوانه‌زنی و رشد اولیه بهبود ببخشد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که هر سه گونه *Nepeta* به تنش خشکی در مرحله جوانه‌زنی حساس هستند. پتانسیل آب ۰/۶- مگاپاسکال نقطه بحرانی جوانه‌زنی مطلوب *Nepeta* است و پرایمینگ یک راهبرد عملی، مقرون به صرفه و بسیار مؤثر برای کاهش خسارت‌های ناشی از تنش خشکی در مرحله حساس جوانه‌زنی سه گونه ارزشمند *Nepeta* می‌باشد. براساس داده‌های ارائه شده، در *N. haussknechtii* تیمارهای هیدروپرایم و نیترات پتاسیم و جیبرلین ۱۰۰ Ppm، در گونه *N. glomerulosa* تیمارهای جیبرلین ۱۰۰ Ppm و ۵۰ Ppm و در گونه *N. cataria* تیمارهای هیدروپرایم و جیبرلین ۱۰۰ Ppm و ۵۰ Ppm مؤثرترین تیمارها در افزایش بنیه بذر بودند. این تفاوت‌ها بر وابستگی پاسخ به پرایمینگ به ژنوتیپ خاص هر گونه تأکید دارد. تکنیک پرایمینگ بذر می‌تواند به‌طور معنی‌داری باعث افزایش درصد جوانه‌زنی، سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی و قدرت اولیه گیاهچه در شرایط تنش شود. در میان سه گونه مورد مطالعه فقط *N. glomerulosa* رشد گیاهچه متمایزی در پرایمینگ نشان نداد. این موضوع لزوم مطالعات دقیق‌تر برای بهینه‌سازی شیوه‌نامه پرایمینگ برای این گونه را نشان می‌دهد. نتایج این پژوهش نشان دادند در حالی که پرایمینگ یک راهبرد کلی مفید است، مدیریت کشت و کار باید با در نظر گرفتن ویژگی‌های

فیزیولوژیک خاص هر گونه انجام شود. کاربرد این تکنیک‌های پرایمینگ برای بهبود استقرار و عملکرد گونه‌های *Nepeta* در مناطقی که با کم‌آبی مواجه هستند، توصیه می‌شود. این تکنیک نه تنها شانس جوانه‌زنی را از طریق عبور از نقطه بحرانی ۰/۶- مگاپاسکال افزایش می‌دهد، بلکه با تولید گیاهچه‌های قوی‌تر و یکدست، پایه محکمی برای ادامه رشد و بقای گیاه فراهم می‌کند. پاسخ بسیار مثبت این گونه‌ها به پرایمینگ، به‌ویژه در شاخص بنیه و رشد گیاهچه، نشان داد که سرمایه‌گذاری روی این تکنیک ساده می‌تواند بازده بسیار بالایی در استقرار موفق و افزایش عملکرد این گیاه دارویی ارزشمند داشته باشد. نتایج این پژوهش به روشنی نشان داد که تکنیک ساده و کم‌هزینه پرایمینگ بذر می‌تواند سد مهم مرحله جوانه‌زنی را در شرایط تنش خشکی پشت سر گذاشته و موفقیت کشت دیم این گونه‌های باارزش را تضمین کند.

References

- Agrawal, R. L. 2004. Seed Technology. New Delhi, Oxford IBH Pub, 204; p:104-6.
- Ahmadpoor Dehkordi, E., Danesh Shahraki, A. and Khosravi Lamjiri, P. 2018. Effect of seed priming with salicylic acid on seed germination and seedling growth of *Hibiscus sabdariffa* under drought stress. Iranian Journal of Seed Sciences and Research, *5*(4): 1-11. https://doi: 10.22124/jms.2018.2941.
- Alam, M., Fujita, M., Nahar, K., Rahman, A., Anee, T., Masud, A., Amin, A.K.M. and Hasanuzzaman, M. 2022. Seed Priming Upregulates Antioxidant Defense and Glyoxalase Systems to Conferring Simulated Drought Tolerance in Wheat Seedlings. Plant Stress, 6: 100120. https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100120.
- Ali, L. G., Nulit, R., Ibrahim, M. H. and Yien, C. Y. S. 2021. Efficacy of KNO3, SiO2 and SA priming for improving emergence, seedling growth and antioxidant enzymes of rice (*Oryza sativa*), under drought. Scientific Reports, 11(1): 1-11. https://doi.org/10.1038/s41598-021-83434-3.
- Alizadeh, M.A., Hossieni Todashki, N., Sobhanian, H., Bakhshi Khaniki, G.R. and Jafari, A.A. 2020. Evaluation of seed emergence and vigor of three populations of *Thymus daenensis* by different priming techniques in greenhouse conditions. Iranian Journal of Seed Science and Research, 7(3): 341-350. (In Persian). DOI: 10.22124/jms.2020.4594.
- Ashraf, M. and Foolad, M. R. 2007. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. Environmental and Experimental Botany, 59: 206-216. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.12.006.
- Dagne, B.A., Duga, J.N. and Hirpa, G.D. 2024. Response of Hot Pepper (*Capsicum annuum*) to Potassium Nitrate Seed Priming. Advances in Agriculture, 2024(1): 6881808. https://doi.org/10.1155/2024/6881808
- Ellis, R.H. and Roberts, E.H. 1981. The quantification of ageing and survival in orthodox seeds. Seed Science and Technology, 9: 373–409.
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. 2022. The State of Food Security and Nutrition in the World 2022. Repurposing food and agricultural policies to make healthy diets more affordable. Rome: FAO. https://doi.org/10.4060/cc0639en.
- Farooq, M., Almamari, S. A. D., Rehman, A., Al-Busaidi, W. M., Wahid, A. and Al-Ghamdi, S. S. 2021. Morphological, physiological and biochemical aspects of zinc seed priming-induced drought tolerance in *faba bean*. Scientia Horticulturae, 281: 109894. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109894.
- Hussain, M., Farooq, M. and Lee, D. J. 2017. Evaluating the role of seed priming in improving drought tolerance of pigmented and non-pigmented rice. Journal of Agronomy and Crop Science, 203(4): 269-276. https://doi.org/10.1111/jac.12195.
- Izadi, Z. (2022). Effect of Water Deficit Stress at Vegetative and Reproductive Stages on Some Physiological and Biochemical Characteristics of Sage (*Salvia officinalis* L.). Plant Production Technology, 14(1): 1-18. (In Persian). https://doi.org/10.22084/ppt.2023.25350.2064.
- Jatana, B. S., Grover, S., Ram, H., & Baath, G. S. 2024. Seed Priming: Molecular and Physiological Mechanisms Underlying Biotic and Abiotic Stress Tolerance. Agronomy, 14(12): 2901. https://doi.org/10.3390/agronomy14122901.
- Jisha, K. C., Vijayakumari, K. and Puthur, J. T. 2013. Seed priming for abiotic stress tolerance: an overview. Acta Physiologiae Plantarum, 35(5): 1381-1396.
- Kalhori, N., Nulit, R., Azizi, P., Abiri, R. and

Atabaki, N. 2018. Hydropriming stimulates seedling growth and establishment of Malaysian Indica rice (MR219) under drought stress. Acta Scientiarum Agriculture, 2(9): 9-16.
- Khomdi, N., Nabipour, M., Roshanfekr, H. and Rahman Ghahfarkhi, A. 2016. The effect of sowing date and seed priming on germination, yield and yield components in three bread wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.). Applied Agricultural Research, 29(1): 119-125. https://doi.org/ 10.22092/aj.2016.109570.
- Khorramdel, S., Rezvani Moghaddam, P., Amin Ghafori, A. and Shabahang, J. 2012. Study the germination characteristics of black seed (*Nigella sativa* L.) under drought stress conditions in different salicylic acid levels. Iranian Journal of Field Crops Research, 10(4): 709-725. https://doi.org/ 10.22067/gsc.v10i4.20382.
- Marthandan, V., Geetha, R., Kumutha, K., Renganathan, V. G., Karthikeyan, A. and Ramalingam, J. 2020. Seed priming: a feasible strategy to enhance drought tolerance in crop plants. International Journal of Molecular Sciences, 21(21): 8258. https://doi.org/10.3390/ijms21218258.
- Michel, B.F. and Kaufmann, M.R. 1973. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. Plant Physiology, 51: 914-916. https://doi.org/10.1104/pp.51.5.914.
- Mingli L., Meng L., Kaichang L. and Na S. 2015. Effects of Drought Stress on Seed Germination and Seedling Growth of Different Maize Varieties. Journal of Agricultural Science, 7 (5): 231-240. https://doi.org/10.5539/jas.v7n5p231.
- Mozaffarian, V.A. 2006. Dictionary of Iranian Plant Names: Latin-English-Persian. 4th Ed. Farhang Moaser, Tehran, 360p. (In Persian).
- Muhie, S. 2018. Seed Priming with Phytohormones to Improve Germination Under Dormant and Abiotic Stress Conditions. Advances in Crop Science and Technology: 06. https://doi.org/10.4172/2329-8863.1000403.
- Nezami, S., Nemati, S. H., Aruee, H. and Bagheri, A. 2016. Study on the effect of water deficit stress on the growth of three *Mentha* species. Environmental Stresses in Crop Sciences, 9(1): 59-74. (In Persian). https://doi.org/ 10.22077/escs.2016.300.
- Parveen, A., Liu, W., Hussain, S., Asghar, J., Perveen, S. and Xiong, Y. 2019. Silicon priming regulates morpho-physiological growth and oxidative metabolism in maize under drought stress. Plants, 8(10): 431. https://doi.org/10.3390/plants8100431.
- Pichand, M., Dianati Tilaki, G. A., Moradi, H. and Alizadeh, M. (2023). The effect of halopriming on seed germination of (*Salvia aegyptiaca*) under conditions of salinity stress. Iranian Journal of Seed Science and Technology, 12(3), 1-11. (In Persian). https://doi.org/10.22092/ijsst.2023.360046.1453.
- Rezaei, L., Baradaran, M.H., Bakhtiari, S. 2019. Effect of seed priming on germination characteristics and vegetative growth of Basil (*Ocimum basilicum* L.) under salt stress conditions. Journal of Seed Research, 9 (3): 1-10. https://doi.org/10.22077/escs.2018.1072.1213.
- Rhaman, M. S., Imran, S., Rauf, F., Khatun, M., Baskin, C. C., Murata, Y. and Hasanuzzaman, M. 2021. Seed priming with phytohormones: an effective approach for the mitigation of abiotic stress. Plants, 10(1): 37. https://doi.org/10.3390/plants10010037.
- Saberi, M., Tavili, A. and Safari, B. 2010. Comparison of the effect of gibberellic acid and potassium nitrate on the improvement of *Salsala rigida* germination characteristics. Journal of Rangeland Research. 3(3): 272-280. (In Persian).
- Saha, D., Choyal, P., Nandan Mishra, U., Dey, P., Bose, B., MD, P., Kumar Gupta, N., Kumar Mehta, B., Kumar, P., Pandey, S., Chauhan, J., and Kumar Singhal, R. 2022. Drought stress responses and inducing tolerance by the seed priming approach in plants. Plant Stress, 4: 100066. https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100066.
- Salehi Shanjani, P., Javadi, H., R L., Fallah, L. and M A. (2024). Evaluation of seed germination of *Nepeta haussknechtii*, *N. pogonosperma* and *N. glomerulosa* subsp. *staffina* in response to water potential using the hydrotime model. Iranian Journal of Rangelands and Forests Plant Breeding and Genetic Research, 32(1): 97-114. (In Persian). https://doi.org/10.22092/ijrfpbgr.2025.366957.1466.
- Savvides, A., Ali, S., Tester, M. and Fotopoulos, V. 2016. Chemical priming of plants against multiple abiotic stresses: mission possible? Trends in Plant Science, 21(4): 329-340. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.11.003.
- Shamsabadi,V. , Banejad,H. , Ansari, H. and Nemati, S. H. (2023). Investigating Water Productivity and some characteristics of *Mentha piperita* L under Salinity and Drought Stress in the presence of Selenium. Water Management in Agriculture, 9(2): 115-130. (In Persian).
- Soltani, E., Akram-Ghaderi, F. and Maemar, H. 2008. The effect of priming on germination components and seedling growth of cotton seeds under drought. Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources, 14(5): 1-8.
- Tabassum, T., Farooq, M., Ahmad, R., Zohaib, A., Wahid, A., Shahid, M., 2018. Terminal drought and seed priming improve drought tolerance in wheat.

Physiology and Molecular Biology of Plants, 24: 845–856. https://doi.org/10.1007/s12298-018-0547-y.
- Tabatabaei, S. A., Rajabi, M., Vahidi, M. and Besharati, H. 2021. Effects of osmopriming on germination indices of medicinal plants under drought stress. South African Journal of Botany, 142: 295-302.
- Taheri, S., Gholami, A., Abbasdokht, H. and Makarian, H. 2018. Alleviation of water deficit stress effects on safflower cultivars by seed priming. Journal of Crops Improvement, 20(2): 487-502. https://doi.org/10.22059/jci.2018.244528.1858.
- Vidak, M., Lazarević, B., Nekić, M., Šatović, Z. and Carović-Stanko, K. 2022. Effect of Hormonal Priming and Osmopriming on Germination of Winter Savory (*Satureja montana* L.) Natural Population under Drought Stress. Agronomy, 12(6): 1288. https://doi.org/10.3390/agronomy12061288.