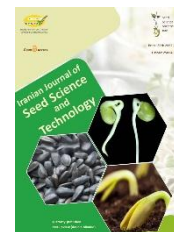




Iranian Journal of Seed Science and Technology



ISSN: 2588-4638

Research Article

Mitigating the adverse impact of drought stress on germination and related traits of Chickpea through seed priming with iron nanoparticles and bulk form

Nasrin Teimouri¹, Mohsen Saeidi^{2*}, Mahmood Khoramivafa², Shahab Khoshkholi³

1. Postdoctoral student, Department of Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran.
2. Associated professor, Department of Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran.
3. Researcher, Department of Medicinal plants, Kermanshah ACECR Institute of Higher Education, Kermanshah, Iran.

Article Information

Received: 10 Apr. 2024
Revised: 07 May 2024
Accepted: 13 May 2024

Keywords:

Allometric coefficient,
Germination rate,
Group comparison,
Seed weight

Corresponding Author:

msaeidi@razi.ac.ir



Abstract

The utilization of nanoparticles for seed priming may enhance the germination and seedling growth compared to bulk forms. Therefore, this research aims to investigate the effect of seed priming (with bulk iron oxide, nanoparticles of 1-100 nm and 40-60 nm in concentrations of zero, 2, 4, and 8 g l⁻¹, water, and no priming) at different levels of drought stress (including no stress, -2, -4 and -8 bar) using polyethylene glycol 6000 on the characteristics of germination and growth of Adel chickpea cultivar. This research was performed as a factorial experiment based on a completely randomized design in three replications at Razi University. The results showed that germination ceased completely under drought stress of -8 bar. Drought stress at -4 bar after -8 bar resulted in a significant decrease in the percentage, speed, and vigor of germination by 96, 93, and 40%, respectively, and 130% increase in root length/shoot length ratio compared to the non-drought stress treatment. Seed priming treatments had the most positive and significant effect on the speed and vigor of germination in non-drought stress treatment and on the germination percentage in drought stress treatment. The seed priming with iron 8 g l⁻¹ and 40-60 nm produced the highest length and weight vigor of germination. It appears that the priming treatments have resulted in better vigor and rate of germination in non-drought stress condition while germination percentage in drought stress. The seed priming treatment using iron 40-60 nm is the most effective compared to other priming treatments.

How to cite this paper: Teimouri, N., Saeidi, M., Khoramivafa, M., & Khoshkholi, SH. (2025). Mitigating the adverse impact of drought stress on germination and related traits of Chickpea through seed priming with iron nanoparticles and bulk form. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, XX (X), X-X. <https://doi.org/10.22092/ijssst.2024.365419.1521>



© Authors, Published by Iranian Journal of Seed Science and Technology. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Chickpea (*Cicer arietinum* L.), with a protein content exceeding 20%, is one of the most important legume crops. Its cultivation is widespread in the western regions of the country. However, this crop's yield per unit area (463 kg ha^{-1}) is significantly lower than the global average (1085 kg ha^{-1}), highlighting the need for research to identify and address limiting factors in production. Priming is an effective strategy to enhance seed germination quality, seedling emergence, and grain yield. Given the increasing use of nanoparticles in agriculture, including in fertilizers and growth promoters, nano priming of seeds is a promising approach. Therefore, this research was conducted to study the effect of seed priming with common forms (bulk) and iron nanoparticles with different particle sizes on the quality of chickpea germination under drought-stress condition.

Materials and Methods

This study investigated the effect of priming chickpea seeds with conventional (bulk) and iron nanoparticles of varying particle sizes on germination quality under drought-stress conditions. The research was conducted at the Razi University Plant Physiology Laboratory using the Adel cultivar of chickpea in two stages: (1) priming seeds with iron-based fertilizers of different particle sizes and (2) examining the effects of priming treatments on germination quality under varying levels of drought stress. In the first stage, chickpea seeds were subjected to osmopriming with iron oxide at concentrations of 2, 4, and 8 g l^{-1} , hydropriming, and no priming. The iron fertilizers included bulk and nanoparticles (1 to 100 and 40 and 60 nm). Based on the preliminary test results, seeds were placed in the mentioned solutions for 12 h at laboratory temperature to perform priming treatments. In the second stage, germination traits related to seed quality were evaluated under the influence of two factors: priming treatments and four levels of drought stress (0, -2, -4, and -8 bar) in a factorial experiment with three replications.

Results and Discussion

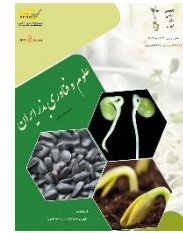
The results showed that drought stress at -8 bar completely halted germination. Drought stress at -4 bar, following -8 bar, significantly reduced germination percentage, speed, and vigor by 96%, 93%, and 40%, respectively, and increased the root-to-shoot ratio by 130% compared to the control treatment. Under non-stress conditions, the germination speed of unprimed seeds was approximately 12 seeds per day. As drought stress increased from -2 to -4 bar, germination speed decreased to 3.6 and 0.55 seeds per day. Priming treatments significantly and positively affected germination speed and vigor under non-stress conditions and germination percentage under drought stress. The lowest seedling vigor indices were observed in the -4 bar drought stress treatment compared to non-stress conditions, with 93% and 87% reductions for weight and length indices, respectively. The highest seedling vigor was achieved with priming using iron nanoparticles of 40-60 nm at a concentration of 8 g l^{-1} . Increasing drought stress significantly reduced the allometric coefficient, with reductions of 16% and 59% observed in the -2 and -4 bar treatments, respectively, relative to the non-stressed control. Analysis of seed priming treatments under non-stressed conditions revealed that both the 40-60 nm and 1-100 nm iron nanoparticle groups significantly enhanced the seed germination rate compared to the other treatments. Furthermore, bulk iron and hydropriming resulted in superior germination rates compared to the unprimed control. Under both -2 and -4 bar drought stress, all seed priming treatments significantly improved the germination rate compared to the control; however, no significant differences were detected among the various priming treatments.

Conclusion

The findings indicate that chickpea germination of the Adel cultivar will cease under drought stress at -8 bar. Priming with iron nanoparticles outperformed bulk iron and hydropriming in improving seed germination quality under stress and non-stress conditions. Priming with 40-60 nm iron nanoparticles was more effective than those of 1-100 nm in enhancing germination-related traits.



نشریه علوم و فناوری بذر ایران



ISSN: 2588-4638

مقاله پژوهشی

کاهش اثرات نامطلوب تنش خشکی بر جوانه‌زنی و صفات مرتبط با آن در نخود توسط پرایمینگ بذر با فرم نانوذره و بالک آهن

نسرین تیموری^۱ ID، محسن سعیدی^{۲*} ID، محمود خرمی وفا^۲ ID، شهاب خوشخوی^۳ ID

۱. دانشجوی پسادکتر، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
۲. دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
۳. پژوهشگر، گروه گیاهان دارویی، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی کرمانشاه، ایران.

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۴

واژه‌های کلیدی:

بنيه وزني بذر،
سرعت جوانه‌زنی،
ضريب آلومتریک،
مقایسه گروهی

نویسنده مسئول:

msaeidi@razi.ac.ir


کاربرد نانوذرات جهت پرایمینگ بذر در مقایسه با فرم‌های بالک ممکن است سبب بهبود جوانه‌زنی و رشد گیاهچه شود. بنابراین این تحقیق به منظور بررسی اثر پرایمینگ بذر (با اکسید آهن بالک، نانوذره ۱۰۰-۱ نانومتر و ۶۰-۴۰ نانومتر در غلظت‌های صفر، ۲، ۴ و ۸ گرم در لیتر، آب و عدم پرایمینگ) در سطوح مختلف تنش خشکی (شامل عدم تنش، ۲-، ۴- و ۸- بار) با استفاده از پلی‌اتیلن گلاکول ۶۰۰۰ بر خصوصیات جوانه‌زنی و رشد گیاهچه نخود رقم عادل انجام شد. این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار در دانشگاه رازی انجام شد. نتایج نشان دادند تنش خشکی ۸- بار سبب توقف کامل جوانه‌زنی شد. تنش خشکی ۴- بار پس از ۸- بار سبب کاهش معنی‌دار و بیش‌تر درصد، سرعت و بنيه طولی جوانه‌زنی به ترتیب با ۹۳، ۹۶ و ۴۰ درصد و افزایش ۱۳۰ درصدی نسبت طول ریشه‌چه به ساقه‌چه در مقایسه با تیمار شاهد شد. تیمارهای پرایمینگ بذر بیش‌ترین اثر مثبت و معنی‌دار را بر سرعت و بنيه جوانه‌زنی در عدم تنش خشکی و بر درصد جوانه‌زنی در تنش خشکی داشتند. بیش‌ترین بنيه طولی و وزنی گیاهچه در تیمار پرایمینگ بذر با آهن نانوذره ۶۰-۴۰ نانومتر در غلظت ۸ گرم در لیتر حاصل شد. به نظر می‌رسد تیمارهای پرایمینگ بذر در شرایط عدم تنش خشکی با بهبود بنيه و سرعت جوانه‌زنی و در تنش خشکی با بهبود درصد جوانه‌زنی، کیفیت جوانه‌زنی بذر را افزایش دادند. پرایمینگ بذر با آهن نانوذره ۶۰-۴۰ نانومتر از دیگر تیمارهای پرایمینگ بذر برتر بود.

نحوه استناد به این مقاله:

Teimouri, N., Saeidi, M., Khoramivafa, M., & Khoshkhoi, SH. (2025). Mitigating the adverse impact of drought stress on germination and related traits of Chickpea through seed priming with iron nanoparticles and bulk form. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, XX (X), X-X. <https://doi.org/10.22092/ijssst.2024.365419.1521>

مقدمه

گیاه نخود (*Cicer arietinum* L.) با درصد پروتئین بالاتر از ۲۰ درصد (Upadhyaya et al., 2016; USDA, 2021) یکی از مهم‌ترین گیاهان خانواده حبوبات می‌باشد. کشت این گیاه در مناطق غربی کشور بسیار رایج است. پایین بودن مقدار عملکرد در واحد سطح این گیاه (۴۶۳ کیلوگرم در هکتار) در مقایسه با میانگین جهانی آن (۱۰۸۵ کیلوگرم در هکتار) (FAO, 2023) و امکان علمی افزایش مقدار تولید در واحد سطح این گیاه، ضرورت تحقیق در ارتباط با شناسایی دقیق عوامل محدود کننده تولید و دسته‌بندی علمی آن‌ها را جهت برطرف نمودن مشخص می‌سازد.

تنش خشکی از اصلی‌ترین تنش‌های غیرزیستی است که سبب کاهش رشد و تولید محصول گیاهان زراعی بین ۳۰ تا ۹۰ درصد می‌شود (Fahad et al., 2017; Hussain et al., 2019). طبق آمار موجود حدود چهار پنجم از مساحت زمین‌های کشاورزی جهان و بیش از ۹۰ درصد زمین‌های کشاورزی ایران در مناطق خشک نیمه خشک قرار دارند (Najafi & Alizadeh, 2023). حساسیت عملکرد گیاهان زراعی به تنش خشکی به زمان وقوع تنش خشکی در مراحل مختلف نمو گیاه و شدت و مدت اعمال آن بستگی دارد (Dietz et al., 2021). تنش خشکی وقتی که در مراحل اولیه جوانه‌زنی و رشد گیاهچه گیاهان زراعی رخ می‌دهد، علاوه بر اختلال شدید در جوانه‌زنی و سبز شدن، سبب تولید گیاهچه‌های ضعیف و کاهش قدرت استقرار گیاهچه‌ها شده و در نهایت سبب کاهش معنی‌دار عملکرد آن‌ها می‌شود (Himaja et al., 2023). تنش خشکی از طریق کاهش پتانسیل آب خاک و کاهش جذب آب توسط بذرها سبب کاهش شدید و یا حتی توقف جوانه‌زنی بذر گیاهان زراعی از جمله نخود در پتانسیل اسمزی کمتر از ۸- بار می‌شود (Sleimi et al., 2013). یکی از دلایل اصلی کاهش جوانه‌زنی در شرایط وقوع تنش خشکی، طولانی شدن زمان آبنوشتی بذرها می‌باشد (Tang et al., 2019). اما (Ghorbani et al., 2022) گزارش نمودند که در پتانسیل اسمزی ۸- بار جوانه‌زنی رقم آرمان نخود ۸۵ درصد کاهش یافت، ولی متوقف نشد.

پرایمینگ (پیش تیمار) یکی از راه کارهای موثر در جهت افزایش کیفیت جوانه‌زنی بذر است. در نتیجه بذر پرایم شده بنيه جوانه‌زنی و

سبز شدن بالاتری داشته و شرایط تنش خشکی اولیه خاک را که در مناطق خشک و نیمه خشک رایج است، بهتر تحمل می‌کند و از این نظر پرایمینگ بذر برای کشاورزان سودمند است (Amir et al., 2024). پرایمینگ بذر از طریق بهبود فعالیت‌های آنزیمی از جمله آنزیم‌های موثر در تجزیه نشاسته در بذر مانند آلفا آمیلاز و تامین اسکلت کربنی مورد نیاز ساخت ترکیبات جدید سبب بهبود جوانه‌زنی و در نهایت سبز شدن و تولید گیاهچه‌های قوی‌تر می‌شود (Saha et al., 2022). پرایمینگ بذر زمان سبز شدن گیاهچه را به حداقل رسانده و گیاهان قوی‌تری تولید می‌کند که به تنش‌های مختلف زنده و غیرزنده متحمل‌تر هستند (Mehmood et al., 2021). در مطالعات متعدد به اثبات رسیده که پرایمینگ بذر بهبود جوانه‌زنی گونه‌های مختلف زراعی را به همراه دارد که منجر به بهبود کیفیت بذر از طریق شاخص جوانه‌زنی (Moreno et al., 2018)، زمان جوانه‌زنی (Alias et al., 2018)، وزن خشک گیاهچه (Farooq et al., 2019) و شاخص بنيه گیاهچه (Singhal & Bose, 2020) شده است. افزون بر این، پرایمینگ می‌تواند جوانه‌زنی را به‌ویژه در شرایط نامناسب رشد بهبود داده و در بسیاری از گونه‌های گیاهی افزایش سرعت جوانه‌زنی را به همراه داشته باشد (Jisha & Puthur, 2018). با توجه به گسترش استفاده از نانوذرات در کشاورزی از جمله در تولید کودها و محرک‌های رشد (Saha et al., 2022)، به نظر می‌رسد که نانوپرایمینگ بذر یک راهکار موثر در این ارتباط باشد. در بررسی‌های مختلف مشخص شده است که نانوذرات با ایفای نقش مثبت در متابولیسم بذر، مسیرهای سیگنال‌دهی و بیان ژن‌های موثر در تحمل گیاه به تنش‌های محیطی در بهبود جوانه‌زنی و استقرار گیاهان نقش دارند (An et al., 2020; Mahakham et al., 2017; Ye et al., 2020). مطالعه اثر تیمار پرایمینگ بذر با سولفات آهن بالک و اکسید آهن نانوذره بر خصوصیات جوانه‌زنی برنج نشان داد، هر دو تیمار سبب بهبود خصوصیات جوانه‌زنی شدند. در این بررسی اثر مثبت پرایمینگ بذر با سولفات آهن بالک از اکسید آهن نانوذره بیش‌تر بود (Kharb et al., 2023). همچنین اثر مثبت پرایمینگ بذر نخود با نانوذرات اکسید آهن مخصوصاً در شرایط تنش خشکی توسط Mazhar et al. (2023) گزارش شده است. آن‌ها گزارش دادند که غلظت ۷۵ میلی گرم در لیتر نانوذرات اکسید آهن سبب افزایش ۳۸ درصدی طول ریشه شد. در همین ارتباط (Manzoor et

معرض هوادهی ملایم توسط فن‌های دمنده هوا در دمای آزمایشگاه خشک شدند (Bruggink et al., 2007; Ghorbani et al., 2022). آزمایش مقدماتی جهت تعیین زمان پرایم انجام شد. براساس آزمایش مقدماتی بین زمان‌های ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ ساعت، زمان ۱۲ ساعت انتخاب شد. مبنای انتخاب زمان مناسب، تحریک فرایند جوانه‌زنی قبل از خروج ریشه‌چه از بذر بود. در مرحله دوم، صفات مختلف جوانه‌زنی بذر مرتبط با کیفیت بذر تحت تأثیر دو فاکتور پرایم بذر در ۱۱ سطح (طبق توضیحات فوق) و سطوح مختلف تنش خشکی در چهار سطح (صفر، ۲-، ۴-، ۸- بار) به صورت آزمایش فاکتوریل در سه تکرار مورد بررسی قرار گرفتند. به این منظور ۱۳۲ پتری‌دیش برای آزمایش در نظر گرفته شد. برای ایجاد سطوح مختلف پتانسیل اسمزی از پلی اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ (PEG 6000) استفاده شد. غلظت‌های مورد نظر برای تأمین پتانسیل اسمزی طبق روش Michel & Kaufmann (1973) تهیه شدند (معادله ۱).

$$\Psi_s (\text{bar}) = -(1.18 \times 10^{-2}) C - (1.18 \times 10^{-4}) C^2 + (2.67 \times 10^{-4}) CT + (8.39 \times 10^{-7}) C^2 T \quad (1)$$

در این معادله، Ψ_s : پتانسیل اسمزی بر حسب بار، C: غلظت پلی اتیلن گلیکول بر حسب گرم در کیلوگرم آب، T: درجه حرارت محیط بر حسب سیلیسیوس بودند.

هر واحد آزمایشی شامل ۲۵ عدد بذر بود که در داخل یک پتری‌دیش (به ابعاد ۹ سانتی متر) در بین دو عدد کاغذ صافی واتمن شماره یک قرار داده شدند. ابتدا بذرها توسط هیپوکلریت سدیم به مدت ۶۰ ثانیه ضدعفونی و سپس سه مرتبه با آب مقطر شسته شدند. قبل از انجام آزمایش، پتری‌دیش‌ها نیز توسط هیپوکلریت سدیم استریل شدند. در هر پتری‌دیش، میزان ۱۰ میلی‌لیتر محلول مورد نظر زیر کاغذ صافی ریخته شد و سپس به ژرمیناتور منتقل شدند و در دمای 20 ± 1 درجه سانتی‌گراد (شب/روز) و ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی و رطوبت نسبی ۶۰ درصد به مدت هشت روز نگهداری شدند (ISTA, 2016). شمارش بذرهاى جوانه‌زده به‌طور روزانه در ده روز متوالی یادداشت گردید (ISTA, 2016). خروج ریشه‌چه به اندازه دو میلی‌متر به عنوان معیار جوانه‌زنی بذر در نظر گرفته شد

al. (2023) نتیجه‌گیری کردند که بهبود خصوصیات جوانه‌زنی در شرایط استفاده از تیمار ترکیبات مختلف حاوی آهن، ممکن است به دلیل ورود آهن به درون بذر و افزایش فعالیت‌های آنزیمی مرتبط با جوانه‌زنی باشد. همچنین Noor et al. (2022) نتیجه‌گیری نمودند که پرایمینگ بذر با نانوذرات آهن می‌تواند راهکاری جهت افزایش مقاومت به خشکی و کاهش اثرات مضر تنش خشکی باشد.

اهمیت بالای گیاه زراعی نخود در اغلب مناطق کشاورزی ایران (مخصوصاً در مناطق غربی کشور) و پایین بودن میانگین عملکرد آن در این مناطق اهمیت مطالعات جهت بهبود رشد و تولید این گیاه زراعی را مشخص می‌سازد. از آنجا که یکی از راه کارهای مهم جهت افزایش عملکرد دانه، بهبود جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاهچه است، بنابراین این تحقیق با هدف مطالعه اثر پرایمینگ بذر با فرم‌های رایج (بالک) و نانوذره آهن با اندازه ذرات مختلف بر کیفیت جوانه‌زنی نخود در شرایط تنش خشکی انجام شده است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در سال ۱۴۰۲ در آزمایشگاه فیزیولوژی گیاهان زراعی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی روی نخود زراعی رقم عادل در دو مرحله شامل ۱) انجام پرایم بذر با کودهای آهن با اندازه ذرات متفاوت و ۲) مطالعه اثر تیمارهای پرایم بذر بر کیفیت جوانه‌زنی در شدت‌های مختلف تنش خشکی انجام شد. بذر نخود از موسسه تحقیقاتی دیم سرارود کرمانشاه تهیه شد. در مرحله اول بذرهاى نخود زراعی تحت شرایط اسمو پرایم (با کود اکسید آهن با اندازه ذرات مختلف در غلظت‌های ۲، ۴ و ۸ گرم در لیتر)، هیدرو پرایم و عدم پرایم بذر قرار گرفتند. کودهای اکسید آهن شامل فرم بالک یا رایج، نانوذره با اندازه ذرات یک تا ۱۰۰ نانومتر و نانوذره با اندازه ذرات ۴۰ تا ۶۰ نانومتر بودند. نانوذرات ساخت آمریکا بود و از شرکت ایرانی پیشگامان نانو مواد ایرانیان تهیه شد. به منظور انجام تیمار پرایم، بذرها به مدت ۱۲ ساعت براساس آزمایش مقدماتی در آزمایشگاه و همچنین منطبق با گزارش Vishwas et al. (2017) در محلول‌های ذکر شده قرار گرفتند. در طول مدت اعمال تیمار پرایم بذر، هوادهی به بذرها در درون محلول‌های مختلف به دقت انجام شد. بعد از زمان ذکر شده بذرها به سرعت با آب مقطر شسته شده و در

ریشه‌چه، ساقه‌چه و گیاهچه نیز با قراردادن این بخش‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد توسط ترازوی دقیق دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شدند. در ادامه صفت‌های درصد و سرعت جوانه‌زنی، متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی، متوسط جوانه‌زنی روزانه، شاخص طولی و وزنی بینه گیاهچه و ضریب آلومتریک جوانه‌زنی نیز براساس اطلاعات جدول ۱ محاسبه شدند.

(Alen et al., 1985). در پایان آزمایش تعداد بذره‌های جوانه‌زده‌ای که گیاهچه غیرنرمال تولید کرده بودند نیز شمارش شدند. شرایط این بذرها به نوعی است که در صورت انتقال به مزرعه قادر به ایجاد گیاهچه نرمال نخواهند بود (ISTA, 2016). در این آزمون، جهت برآورد طول ساقه‌چه و ریشه‌چه، در هر پلیت ۱۰ بذر جوانه‌زده به طور تصادفی انتخاب شد، و توسط کولیس دیجیتالی این صفت‌ها اندازه‌گیری شدند. در ادامه وزن تر و خشک

جدول ۱- صفت‌های اندازه‌گیری شده به همراه روش اندازه‌گیری آن‌ها

Table 1- Measured attributes along with their measurement method

نام صفت Attribute Name	رابطه	رفرنس Reference
درصد جوانه‌زنی Germination percentage	$GP = (N \times 100) / M$	ISTA, 2016
سرعت جوانه‌زنی Germination rate	$GR = \sum N_i / T_i$	Maguire, 1962
متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی Mean germination time	$(MGT) = \sum (N_i \times D_i) / \sum N$	Ellis & Roberts, 1981
متوسط جوانه‌زنی روزانه Mean daily germination	$(MDG) = GP / T$	Scott et al., 1984
شاخص طولی بینه گیاهچه Seedling vigor length	$(SVL) = GP \times SL$	Abdul-Baki & Anderson, 1973
شاخص وزنی بینه گیاهچه Seedling vigor weight	$(SVW) = GP \times SDW$	Abdul-Baki & Anderson, 1973
ضریب آلومتریک Allometric coefficient	$(AC) = SDW / RDW$	Gardner et al., 1999

GP: درصد جوانه‌زنی، N: تعداد بذره‌های جوانه‌زده در پایان آزمایش، M: تعداد کل بذرها، GR: سرعت جوانه‌زنی، N_i : تعداد بذور جوانه‌زده در هر روز، T_i : تعداد روزهای سپری شده از شروع آزمایش، MTG: متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی، D_i : تعداد روزهای پس از شروع جوانه‌زنی، $\sum N_i$: تعداد کل بذره‌های جوانه‌زده، SVW: شاخص وزنی بینه گیاهچه، SVL: شاخص طولی بینه گیاهچه، SL: طول ساقه‌چه، AR: ضریب آلومتریک، SDW: وزن خشک ساقه‌چه، RDW: وزن خشک ریشه‌چه

GP: germination percentage, N: number of germinated seeds at the end of the experiment, M: total number of seeds, GR: germination rate, N_i : number of germinated seeds per day, T_i : number of days elapsed since the start of the experiment, MTG: average time required for germination, D_i : number of days after the start of germination, $\sum N_i$: total number of germinated seeds, SVL: Seedling vigor length, SVW: Seedling vigor weight, SL: shoot length, AR: allometric coefficient, SDW: shoot dry weight, RDW: root dry weight

سطح از تیمار تنش خشکی از بررسی‌های آماری حذف شد. در این ارتباط (Sleimi et al., 2013) گزارش نمودند که جوانه‌زنی بذر نخود در پتانسیل اسمزی ۸- بار متوقف می‌شود. موافق با این نتایج (Ganjeali et al., 2008) بیان نمودند که پتانسیل اسمزی ۸- بار باعث توقف کامل جوانه‌زنی نخود شد. اما با توجه به وجود گزارشات متعدد در مورد جوانه‌زنی بذر نخود در پتانسیل اسمزی ۸- بار (Ahmadpour et al., 2022; Ghorbani et al., 2022; Masomi et al., 2023; Sadeghzadeh Ahari, 2016)، این سطح تنش هم در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. از آنجا که

پس از بررسی نرمال بودن روند توزیع داده‌ها و در صورت نیاز نرمال نمودن روند توزیع آن‌ها، تجزیه و تحلیل داده‌ها به کمک نرم افزارهای آماری MSTATC و SAS (Version 9.2, SAS Institute, USA) انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن ($P \leq 0.05$) انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج نشان دادند که در تیمار تنش خشکی در پتانسیل اسمزی ۸- بار جوانه‌زنی به طور کامل متوقف شد. به همین دلیل این

علاوه بر آن کمبود آب قابل دسترس برای بذر موجب کاهش ترشح هورمون‌ها، فعالیت آنزیم‌ها و در نتیجه کاهش رشد طول ریشه‌چه و ساقه‌چه می‌شود (Saha et al., 2022). تغییرات فشار آماس در سلول‌های ساقه‌چه و ریشه‌چه در توقف رشد طولی آن‌ها نقش بسزایی دارد، به طوری که با کمبود آب پیوندهای موجود در دیواره سلول‌های ساقه‌چه و ریشه‌چه سخت تر شده و در نتیجه توسعه‌پذیری، رشد طولی و تجمع ماده خشک ریشه‌چه محدود می‌شود (Coussement et al., 2021). در همین ارتباط، Yang et al. (2021) کاهش در وزن گیاهچه در شرایط وقوع تنش خشکی را کاهش جذب آب توسط بذر باعث کاهش ترشح هورمون‌ها و فعالیت آنزیم‌ها و در نتیجه اختلال در رشد و وزن گیاه گزارش نمودند.

نتایج مقایسه میانگین اثر پرایمینگ بذر بر خصوصیات رشد گیاهچه نخود شامل: طول گیاهچه، وزن تر گیاهچه، طول ریشه‌چه، وزن تر ریشه‌چه و طول ساقه‌چه نشان داد (شکل ۲)، تیمارهای پرایم بذر سبب افزایش این صفات نسبت به تیمار عدم پرایم بذر شدند. پرایمینگ بذر نقش مهمی در بهبود خصوصیات مختلف جوانه‌زنی و رشد گیاهچه گیاهان زراعی در شرایط تنش‌های محیطی از جمله تنش خشکی دارد (Hussain et al., 2017; Saha et al., 2022). به نظر می‌رسد که پرایمینگ بذر از طریق فعال نمودن بیان برخی از ژن‌های مرتبط با مقاومت به تنش‌های زیستی از جمله تنش خشکی این بهبود را میسر می‌سازد (Sazegari et al., 2020). با افزایش غلظت تیمارهای پرایمینگ، طول گیاهچه افزایش یافت. بیش‌ترین طول گیاهچه (شکل ۲A) در این شرایط در تیمار پرایمینگ آهن نانوذره ۴۰-۶۰ نانومتر در غلظت‌های ۴ و ۸ گرم در لیتر و آهن بالک ۸ گرم در لیتر به دست آمد. کم‌ترین طول گیاهچه نیز در تیمار بدون پرایمینگ مشاهده شد. در تیمار پرایمینگ با آهن نانوذره ۴۰-۶۰ نانومتر در غلظت ۴ و ۸ گرم در لیتر نسبت به غلظت ۲ گرم در لیتر طول گیاهچه به ترتیب ۱۱ و ۱۷ درصد و در تیمار نانوذره ۱۰۰-۱۰ نانومتر به ترتیب ۴ و ۸ درصد و در تیمار بالک به ترتیب ۴ و ۱۰ درصد نسبت به غلظت ۲ گرم در لیتر افزایش داشت. همچنین در تیمار پرایم شده با آب نسبت به شرایط بدون پرایم طول گیاهچه ۶ درصد افزایش داشت. با توجه به این نتایج می‌توان بیان کرد که تیمار نانو ذره

وجود آب کافی در بذر برای فعالیت آنزیم‌های تجزیه کننده مواد اندوخته‌ای دانه، انتقال مواد تجزیه شده به جنین، رشد جنین و در نهایت جوانه‌زنی ضروری است، به نظر می‌رسد که تنش خشکی از طریق کاهش آب قابل جذب و یا طولانی شدن زمان جذب آب توسط بذر سبب کاهش معنی‌دار یا توقف کامل جوانه‌زنی بذر می‌شود (Tang et al., 2019; Wijewardana et al., 2019). نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) نشان داد که اثر تیمار تنش خشکی بر صفت‌های مرتبط با رشد گیاهچه از جمله طول، وزن تر و وزن خشک گیاهچه، ریشه‌چه و ساقه‌چه، نسبت وزن طول ریشه‌چه به ساقه‌چه و سایر صفت‌های مرتبط با جوانه‌زنی (مانند درصد، سرعت، بنیه جوانه‌زنی و ضریب آلومتریکی جوانه‌زنی) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. تیمار پرایمینگ بذر نیز به غیر از وزن خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه و ضریب آلومتریکی بر سایر صفت‌های مورد بررسی اثر معنی‌دار داشت. اثر متقابل تنش خشکی × پرایمینگ بذر نیز بر وزن خشک گیاهچه، وزن تر ساقه‌چه و سایر صفت‌های مرتبط با جوانه‌زنی به غیر از شاخص طولی بنیه گیاهچه و ضریب آلومتریکی اثر معنی‌دار داشت (جدول ۲).

براساس نتایج مقایسه میانگین‌ها (شکل ۱)، سایر صفت‌های مرتبط با رشد گیاهچه بیش‌ترین مقدار خود را در تیمار عدم تنش خشکی داشتند. با افزایش شدت تنش خشکی از ۲- تا ۴- بار طول گیاهچه (شکل ۱A) به ترتیب ۲۵ و ۶۶ درصد، وزن تر گیاهچه (شکل ۱B) به ترتیب ۵۵ و ۷۴ درصد، طول ریشه‌چه (شکل ۱C) به ترتیب ۳۳ و ۵۸ درصد، وزن تر ریشه‌چه (شکل ۱D) ۵۷ و ۷۱ درصد، وزن خشک ریشه‌چه (شکل ۱E) به ترتیب ۴۰ و ۵۸ درصد و طول ساقه‌چه (شکل ۱F) ۴۰ و ۸۶ درصد و وزن خشک ساقه‌چه (شکل ۱G) ۲۸ و ۶۸ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافتند. نتایج همچنین نشان دادند که طول ساقه‌چه نسبت به طول ریشه‌چه به تنش خشکی حساسیت بیش‌تری داشت. مطابق با نتایج این تحقیق، در یک مطالعه روی نخود (رقم عادل) مشاهده شد که در شدت تنش خشکی ۶- و ۹- بار درصد جوانه‌زنی، رشد ساقه‌چه و ریشه‌چه به طور معنی‌داری کاهش یافت (Ahmadpour et al., 2022). کاهش طول ساقه‌چه و ریشه‌چه در شدت کم تنش خشکی با کاهش انتقال مواد غذایی و در شدت بالای تنش خشکی با عدم انتقال مواد مورد نیاز برای رشد مرتبط است (Biju et al., 2017).

۶ و ۱۳ درصد نسبت به غلظت ۲ گرم در لیتر افزایش داشت. همچنین در تیمار پرایم شده با آب نسبت به شرایط عدم پرایمینگ وزن تر گیاهچه ۴ درصد افزایش داشت (شکل B ۲). به نظر می‌رسد افزایش طول گیاهچه و وزن تر ریشه‌چه در این شرایط با کارایی بالاتر و توانایی انتقال سریع تر و ورود کارآمدتر این ذرات به درون سلول‌های گیاهی مرتبط باشد، زیرا قطر منافذ دیواره سلول‌های گیاهی در محدوده ۲۰-۵ نانومتر و پلاسمودسمات‌ها در محدوده ۶۰-۵۰ نانومتر است (Peter et al., 2021).

۶۰-۴۰ نانومتر بیش‌ترین تاثیر را در افزایش طول گیاهچه داشت. بیش‌ترین وزن تر گیاهچه در تیمار پرایمینگ بذری با آهن نانوذره ۶۰-۴۰ نانومتر، آهن نانوذره ۱۰۰-۱ نانومتر و آهن بالک در غلظت ۸ گرم در لیتر به دست آمد. کم‌ترین وزن تر گیاهچه هم در تیمار عدم پرایمینگ بذری مشاهده شد. با افزایش غلظت تیمارهای پرایمینگ بذری وزن تر گیاهچه افزایش یافت. در این شرایط وزن تر گیاهچه در تیمار پرایمینگ آهن نانوذره ۴۰-۶۰ نانومتر در غلظت‌های ۴ و ۸ گرم در لیتر به ترتیب ۱۱ و ۲۲ درصد، آهن نانو ذره ۱-۱۰۰ نانومتر به ترتیب ۱۰ و ۲۱ درصد و آهن بالک به ترتیب

جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمارهای تنش خشکی و پرایمینگ بذری بر برخی خصوصیات مرتبط با کیفیت جوانه‌زنی بذری و رشد گیاهچه نخود

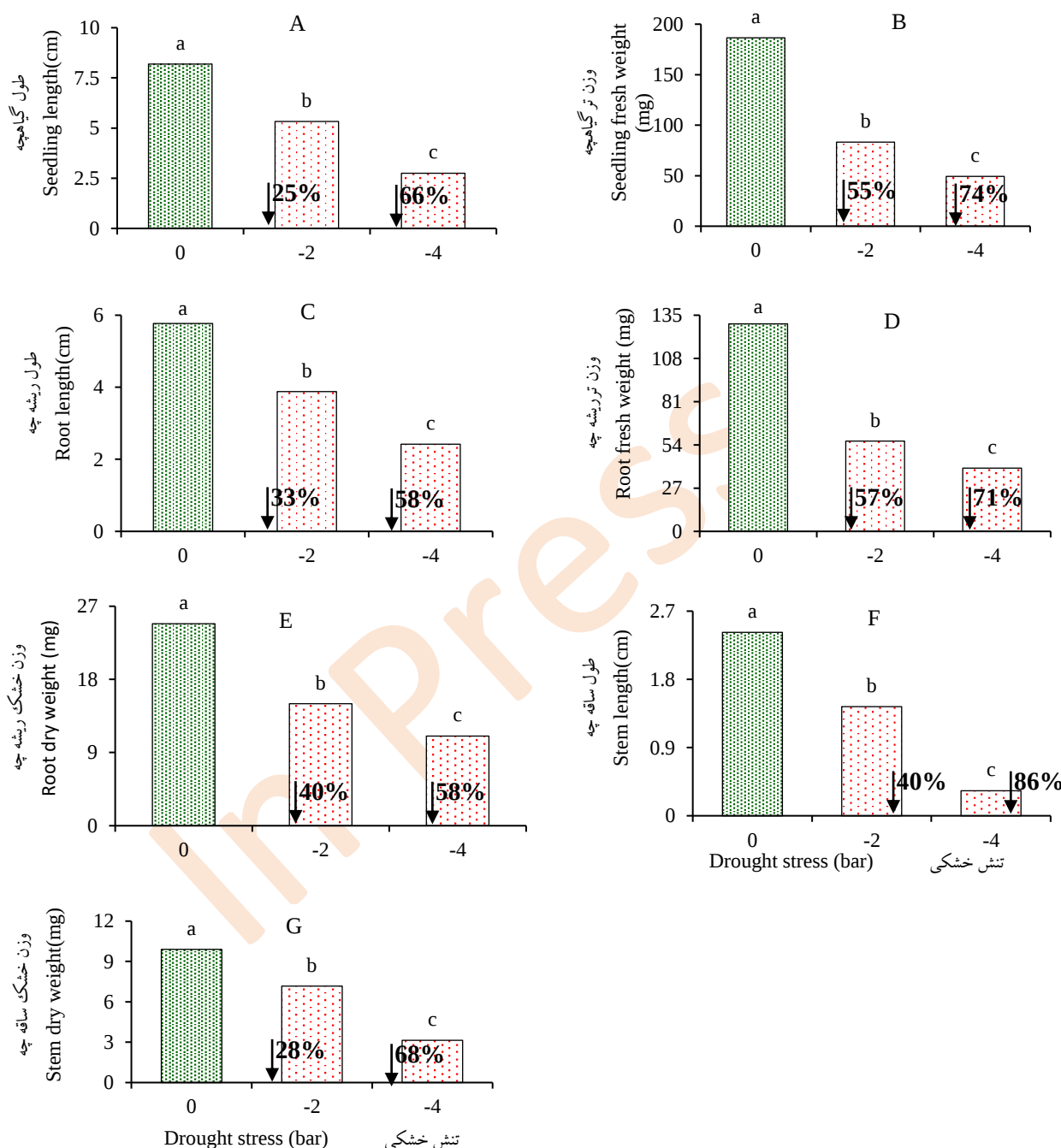
Table 2- Variance analysis (mean square) of drought stress and seed priming effects on Chickpea seed germination and growth

منابع تغییرات Sources of variations	درجه آزادی d.f.	طول گیاهچه Seedling length	وزن تر گیاهچه Seedling fresh weight	وزن خشک گیاهچه Seedling dry weight	طول ریشه‌چه Root length	وزن تر ریشه‌چه Root fresh weight	وزن خشک ریشه‌چه Root dry weight	طول ساقچه Shoot length	وزن تر ساقچه Shoot fresh weight	وزن خشک ساقچه Shoot dry weight	گیاهچه غیرنرمال Abnormal seedling
تنش خشکی Drought stress (D)	2	244**	168566**	4000**	92.9**	75638**	1668**	36.1**	18808**	501**	13411**
پرایمینگ بذری Seed priming (P)	10	1.57**	1076**	62.0**	1.186**	550*	26.6 ^{ns}	0.615**	198**	9 ^{ns}	167**
D×P	20	0.264	205	40.681*	0.333 ^{ns}	84.4	25.3 ^{ns}	0.208 ^{ns}	101**	7.6 ^{ns}	51.6*
خطا Error	66	0.328	139	19.376	0.308	137	20.2	0.180	44.8	9.02	27.0
ضریب تغییرات CV (%)		10.5	11.1	9.23	13.8	15.6	26.53	30.0	21.5	50.7	20.5

منابع تغییرات Sources of variations	درجه آزادی d.f.	درصد جوانه‌زنی Germination percentage	سرعت جوانه‌زنی Germination rate	میانگین زمان لازم برای جوانه‌زنی Mean germination time	میانگین جوانه‌زنی روزانه Mean daily germination	شاخص طولی بنیه گیاهچه Seedling vigor length	شاخص وزنی بنیه گیاهچه Seedling vigor weight	ضریب آلومتریک Allometric coefficient	ساقچه/ریشه‌چه Root/Shoot
تنش خشکی Drought stress (D)	2	35592**	2404**	146**	556**	4174061**	72930142**	0.252**	443**
پرایمینگ بذری Seed priming (P)	10	387**	17.9**	1.15**	6.05**	26318**	866484**	0.016 ^{ns}	25.0**
D×P	20	147**	6.61**	0.702**	2.30**	2870 ^{ns}	345578*	0.028 ^{ns}	23.1**
خطا Error	66	59.8	1.28	0.185	0.934	2853.925	177436	0.049	7.55
ضریب تغییرات CV (%)		10.1	12.9	10.9	10.0	11.3	21.5	62.76	53.2

^{ns}، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد

^{ns}، * and **: non- significant, significant at the five and one percent of probability, respectively



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر سطوح تنش خشکی بر طول و وزن تر گیاهچه (A, B)، طول و وزن تر و خشک ریشه چه (C, D, E)، طول و وزن خشک ساقه چه (F, G) نخود تحت تاثیر تیمارهای مختلف پرایمینگ بذر. براساس آزمون دانکن، ستون‌ها با حروف یکسان در سطح احتمال پنج درصد با هم تفاوت معنی دار ندارند.

Fig. 1- Mean comparison of the effect of drought stress on the length and fresh weight of seedlings (A, B), length, fresh and dry weight of roots (C, D, E) and length and dry weight of shoots (F, G) under seed priming treatments in Chickpea. According to Duncan's test, the columns with the same letters are not significantly different at the five percent probability level.

آنتی اکسیدان اثر مثبت داشته است. در این شرایط نانوذرات آهن در غلظت ۷۵ میلی گرم در لیتر سرعت فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز را به ترتیب ۱۳ و ۳۸ درصد در

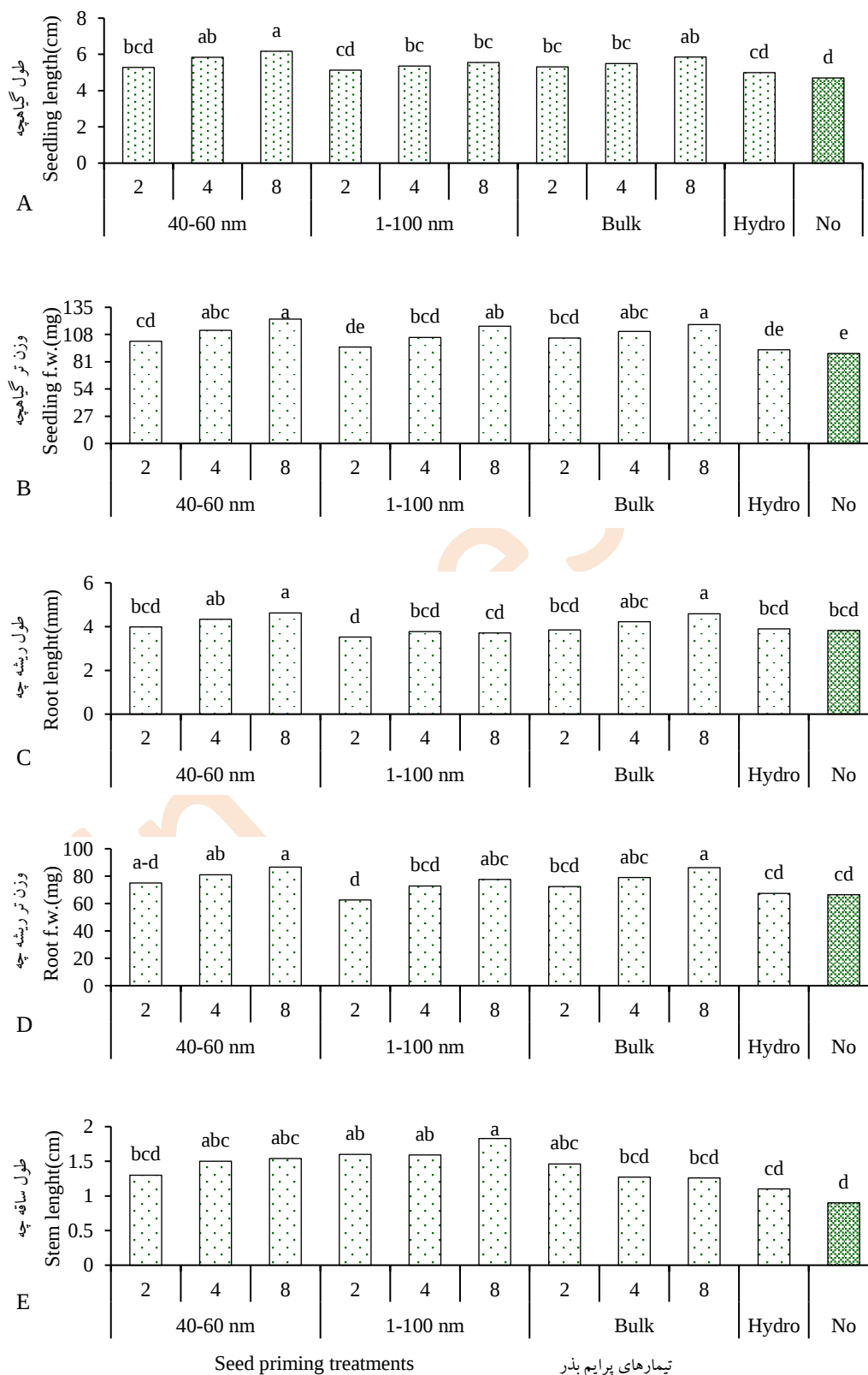
همچنین Mazhar et al. (2023) در بررسی اثر پرایمینگ بذر با نانوذرات آهن بر کیفیت جوانه زنی بذر نخود سبز گزارش نمودند که نانوذرات آهن بر سرعت فعالیت آنزیم‌های

طور معنی‌دار کاهش یافت (شکل A ۳). افزایش نسبت ریشه‌چه به ساقه‌چه همانند آنچه که در تیمار تنش خشکی ۴- بار رخ داد براساس گزارش (Maskova & Herben, 2018) و Marthandan et al. (2020) می‌تواند یک سازوکار گیاهی جهت افزایش سطح جذب آب و مقابله با تنش خشکی باشد. با توجه به محلول بودن عناصر غذایی در محلول خاک، جذب بیش‌تر آب توسط ریشه در این شرایط حرکت عناصر غذایی به سمت ریشه و جذب آن‌ها نیز تسریع شده و در نتیجه همانند آنچه که در مورد افزایش وزن و طول ریشه‌چه در این تحقیق در اثر تیمارهای پرایم دیده شد، می‌تواند یک سازوکار مقاومتی برای گیاه به تنش خشکی باشد.

در شرایط عدم تنش خشکی، تفاوت معنی‌داری از نظر درصد بذره‌های غیرنرمال وجود نداشت و در تیمارهای مختلف (پرایم و عدم پرایم بذری) بین ۱/۷۸ تا ۴/۴۵ درصد متغیر بود. در تیمار تنش خشکی ۲- بار، بیش‌ترین درصد بذره‌های غیرنرمال مربوط به شرایط شاهد یا عدم پرایم بذری با ۲۰/۴ درصد بود. سایر تیمارهای پرایم بذری سبب کاهش معنی‌دار درصد بذره‌های غیرنرمال در این شرایط شدند، اما تفاوت معنی‌داری بین آن‌ها وجود نداشت. در شرایط اعمال تیمار تنش خشکی ۴- بار، بیش‌ترین درصد بذره‌های غیرنرمال مربوط به شرایط شاهد یا عدم پرایم بذری با ۵۸/۷ درصد بود. سایر تیمارهای پرایم بذری سبب کاهش تعداد بذره‌های غیرنرمال نسبت به تیمار شاهد شدند. بیش‌ترین کاهش درصد بذره‌های غیرنرمال در این شرایط مربوط به تیمار پرایم بذری با آهن نانوذره ۴۰-۶۰ نانومتر در غلظت ۴ گرم در لیتر با ۳۱/۱ درصد بود. بنابراین تیمار تنش خشکی مخصوصاً در سطح ۴- بار سبب افزایش شدید درصد بذره‌های غیرنرمال شد. از طرفی تیمارهای پرایم بذری سبب کاهش معنی‌دار درصد بذره‌های غیرنرمال شدند (شکل B ۳). در مراحل اولیه جوانه‌زنی تنش خشکی می‌تواند درصد جوانه‌زنی و تعداد گیاهچه‌های غیرنرمال را به طور معنی‌دار افزایش دهد (Fahad et al., 2017). به نظر می‌رسد در این شرایط شکل‌گیری گونه‌های فعال اکسیژن و خسارت ناشی از آن‌ها در ایجاد گیاهچه‌های غیرنرمال نقش کلیدی داشته باشد (Alam et al., 2017; Hasanuzzaman et al., 2022). بنابراین پرایمینگ بذری با اکسید آهن در این تحقیق ممکن است از طریق فعالسازی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز (Mazhar et al., 2023) سبب کاهش درصد گیاهچه‌های غیرنرمال مخصوصاً در شرایط اعمال تنش خشکی شده است.

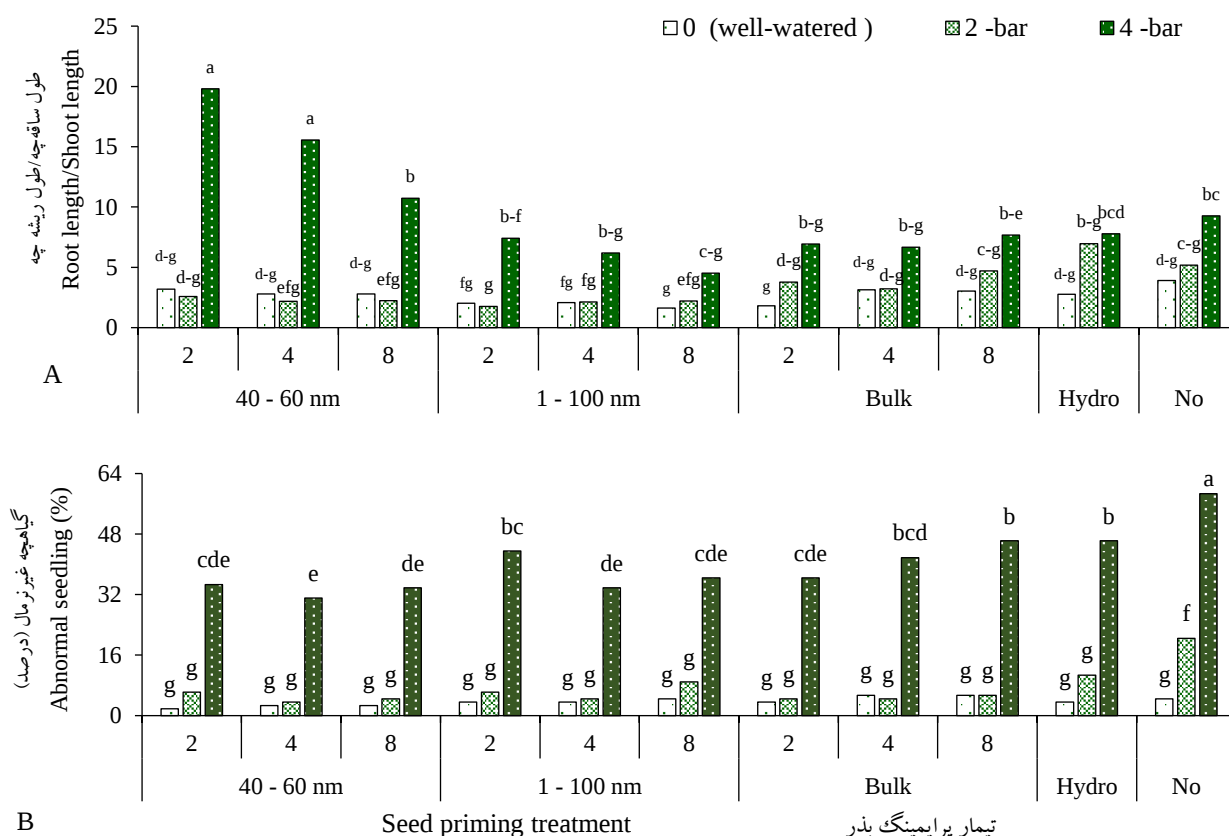
بذری در حال جوانه‌زنی افزایش دادند. بنابراین به نظر می‌رسد که نانوذرات آهن از طریق تحریک فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها در محافظت از غشاءهای سلولی و در نتیجه حفاظت از کارایی آن‌ها نقش دارند. این اثر سبب تداوم جذب آب توسط غشاءهای سلولی و در نهایت جوانه‌زنی و رشد ریشه‌چه و ساقه‌چه می‌شود (Acharya et al., 2020).

بیش‌ترین طول ریشه‌چه در تیمار پرایمینگ بذری با آهن نانوذره ۴۰-۶۰ نانومتر در غلظت ۸ گرم در لیتر مشاهده شد که با تیمارهای آهن نانوذره ۴۰-۶۰ در غلظت ۴ گرم در لیتر و بالک در غلظت ۸ گرم در لیتر و بالک در غلظت ۴ گرم در لیتر اختلاف معنی‌داری نداشت. کم‌ترین طول ریشه‌چه نیز در تیمار آهن نانوذره ۱۰۰-۱۱۰ نانومتر در غلظت ۲ گرم در لیتر مشاهده شد (شکل C ۲). بیش‌ترین وزن تر ریشه‌چه نیز در تیمار آهن نانوذره ۴۰-۶۰ نانومتر در غلظت ۸ گرم در لیتر و کم‌ترین وزن تر ریشه‌چه هم در تیمار آهن نانوذره ۱۰۰-۱۱۰ نانومتر در غلظت ۲ گرم در لیتر مشاهده گردید که با تیمارهای عدم پرایم و هیدروپرایم تفاوت معنی‌دار نداشت (شکل D ۲). بیش‌ترین طول ساقه‌چه در تیمار پرایمینگ با آهن نانوذره ۱۰۰-۱۱۰ نانومتر در غلظت ۸ گرم در لیتر مشاهده شد. کم‌ترین طول ساقه‌چه نیز در تیمار عدم پرایمینگ بذری مشاهده گردید. با افزایش غلظت تیمارهای پرایمینگ با آهن طول ساقه‌چه در تیمارهای آهن نانوذره ۴۰-۶۰ نانومتر و ۱۰۰-۱۱۰ نانومتر افزایش یافت، اما در تیمار آهن بالک کاهش یافت. در مجموع نسبت به شرایط هیدروپرایم و عدم پرایم طول ساقه‌چه در تیمارهای پرایمینگ با کود آهن افزایش یافت (شکل E ۲). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی $\times$ پرایمینگ بذری بر نسبت طول ریشه‌چه به ساقه‌چه نشان داد، در شرایط عدم پرایم بذری (شاهد)، اعمال تنش خشکی سبب افزایش معنی‌دار نسبت طول ریشه‌چه به ساقه‌چه شد. در این شرایط طول ریشه‌چه در تنش خشکی ۴- بار ۹/۲۷ بود که به طور معنی‌داری از تیمار عدم تنش خشکی با ۳/۹۱ به طور معنی‌داری بیش‌تر بود. تیمارهای پرایم بذری در شرایط عدم تنش خشکی و تنش خشکی ۲- بار اثر معنی‌داری بر نسبت طول ریشه‌چه به ساقه‌چه نداشتند، اما در تیمار تنش خشکی ۴- بار، پرایم بذری با آهن نانوذره ۴۰-۶۰ نانومتر در مقایسه با سایر تیمارهای پرایم بذری سبب افزایش معنی‌دار نسبت ریشه‌چه به ساقه‌چه (۱۹/۸) نسبت به تیمار شاهد (۹/۲۷) شد. در این شرایط با افزایش غلظت آهن نانوذره ۴۰-۶۰ نسبت ریشه‌چه به ساقه‌چه به



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر تیمار پرایمینگ بذری با آهن نانوذره با اندازه ذرات مختلف و فرم بالک آن و هیدروپرایم بر طول و وزن گیاهچه (A, B)، طول ریشه چه (C) و وزن تر و طول ساقه چه (D, E) نخود. براساس آزمون دانکن، ستون‌ها با حروف یکسان در سطح احتمال پنج درصد با هم تفاوت معنی‌دار ندارند.

Fig. 2- Mean comparison of the effect of seed priming with nanoparticle iron with different particle size and bulk form and hydropriming on the length and weight seedlings (A, B), roots (C, D), and stems (E) in Chickpea. According to Duncan's test, the columns with the same letters are not significantly different at the five percent probability level.



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل دو جانبه پرایمینگ بذر با آهن نانوذره با اندازه ذرات مختلف و فرم بالک آن و هیدروپرایم × تنش خشکی بر نسبت طول ریشه چه به طول ساقه چه (A) و درصد گیاهچه غیر نرمال (B) نخود. براساس آزمون دانکن، ستون‌ها با حروف یکسان در سطح احتمال پنج درصد با هم تفاوت معنی دار ندارند. Fig. 3- Mean comparison of two-way interaction of seed priming with nanoparticle iron with different particle size and bulk form and hydropriming × drought stress on root length/shoot length (A) and abnormal seedling percentage (B) of Chickpea. According to Duncan's test, the columns with the same letters are not significantly different at the five percent probability level.

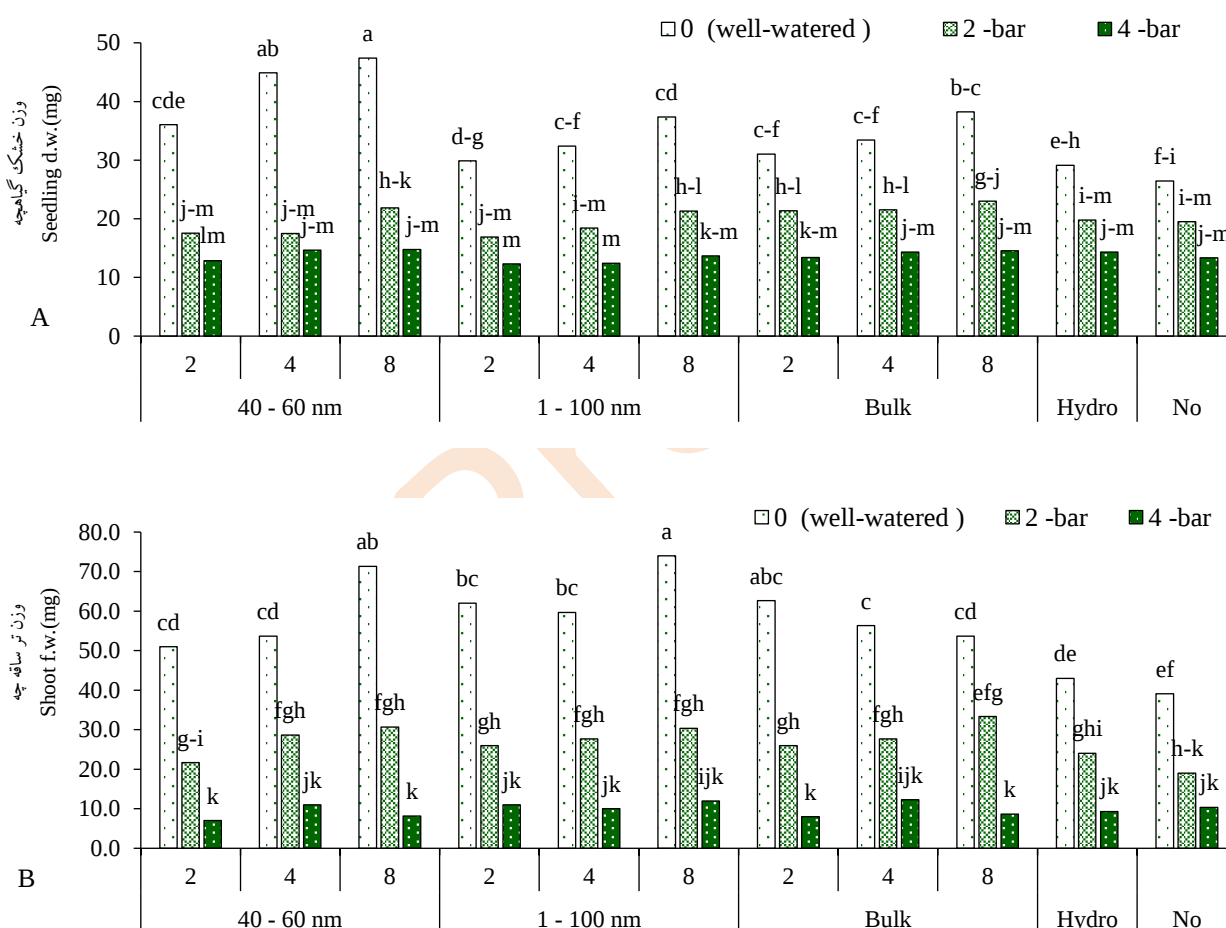
تنش خشکی ۴- بار نیز پرایمینگ بذر با غلظت‌های ۸ گرم در لیتر آهن نانوذره ۴۰-۶۰ نانومتر و ۱۰۰-۱ نانومتر و آهن بالک وزن خشک گیاهچه بیش‌تری را تولید نمودند. این نتایج نشان دادند که تیمارهای پرایمینگ بذر بیش‌ترین تاثیر مثبت در افزایش وزن خشک گیاهچه را در شرایط عدم تنش خشکی داشتند و با افزایش شدت تنش خشکی نقش مثبت آن‌ها در این ارتباط کاسته شد. به نوعی که در تیمار تنش خشکی ۴- بار اثر معنی‌داری نداشتند (شکل A ۴).

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی × پرایمینگ بذر نشان داد که با افزایش شدت تنش خشکی در تیمار عدم پرایمینگ بذر، وزن تر ساقه‌چه به طور معنی‌داری کاهش یافت. تیمارهای پرایمینگ بذر همانند وزن خشک گیاهچه در شرایط عدم تنش خشکی و تیمار تنش خشکی ملایم (۲- بار) به ترتیب

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی × پرایمینگ بذر نشان داد که با افزایش شدت تنش خشکی وزن خشک گیاهچه در تیمار عدم پرایم بذر به طور معنی‌داری کاهش یافت. با افزایش شدت تنش خشکی تاثیر تیمارهای پرایم در افزایش وزن خشک گیاهچه کاهش یافت. به نوعی که در تیمار عدم تنش خشکی و تیمار تنش خشکی ۴- بار به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین تاثیر را داشتند. در شرایط عدم تنش خشکی نیز بین تیمارهای مختلف پرایمینگ بذر، تیمار با آهن نانوذره ۴۰-۶۰ نانومتر بیش‌ترین تاثیر را در افزایش وزن خشک گیاهچه داشت. در این تیمار نیز با افزایش غلظت آهن نانوذره از ۲ تا ۸ گرم در لیتر، وزن خشک گیاهچه افزایش یافت. بنابراین بیش‌ترین وزن خشک گیاهچه در تیمار پرایمینگ بذر با آهن نانوذره ۴۰-۶۰ نانومتر در غلظت ۸ گرم در لیتر و تیمار عدم تنش خشکی به دست آمد. در شرایط

تر ساقه‌چه افزایش یافت. در تیمار تنش خشکی ۲- بار، پرایمینگ بذر به ترتیب با غلظت‌های ۸ گرم در لیتر آهن بالک، آهن نانوذره ۱۰۰-۱ و آهن نانوذره ۴۰-۶۰ بیشترین وزن تر ساقه‌چه را تولید نمودند (شکل B ۴).

بیشترین تاثیر مثبت و معنی‌دار را در افزایش وزن تر ساقه‌چه داشتند. در تیمار عدم تنش خشکی، پرایمینگ بذر با آهن نانوذره ۴۰-۶۰ و ۱۰۰-۱ نانومتر بیشترین تاثیر مثبت و معنی‌دار را در افزایش وزن تر ساقه‌چه داشتند. در این تیمارها با افزایش غلظت تیمار پرایمینگ از ۲ تا ۸ گرم در لیتر تاثیر مثبت در افزایش وزن



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل دو جانبه پرایمینگ بذر با آهن نانوذره با اندازه ذرات مختلف و فرم بالک آن و هیدروپرایم $\times$ تنش خشکی بر وزن خشک گیاهچه (A) و وزن تر ساقه‌چه (B) نخود. براساس آزمون دانکن، ستون‌ها با حروف یکسان در سطح احتمال پنج درصد با هم تفاوت معنی‌دار ندارند.

Fig. 4- Mean comparison of two-way interaction of seed priming with nanoparticle iron with different particle size and bulk form and hydropriming $\times$ drought stress on seedling dry weight (A) and shoot fresh weight (B) of Chickpea. According to Duncan's test, the columns with the same letters are not significantly different at the five percent probability level.

یافت. کاهش درصد جوانه‌زنی در این شرایط احتمالاً به دلیل کاهش در میزان جذب آب توسط بذر و کافی نبودن آب برای فرایندهای بیوشیمیایی بذر و در نهایت رشد سلول‌ها است (Pompelli et al., 2023). در شدت تنش خشکی ۲- و ۴- بار درصد جوانه‌زنی بذر پرایم نشده به ترتیب ۶۹ و ۱۲ درصد بود.

در شرایط عدم تنش خشکی، درصد جوانه‌زنی بذرهای پرایم نشده ۱۰۰ درصد بود و تیمارهای پرایم بذر با آب، آهن بالک و نانوذره با اندازه ذرات مختلف نسبت به تیمار عدم پرایم بذر تفاوت معنی‌داری از نظر درصد جوانه‌زنی نداشتند. با افزایش شدت تنش خشکی جوانه‌زنی بذر به طور معنی‌داری کاهش

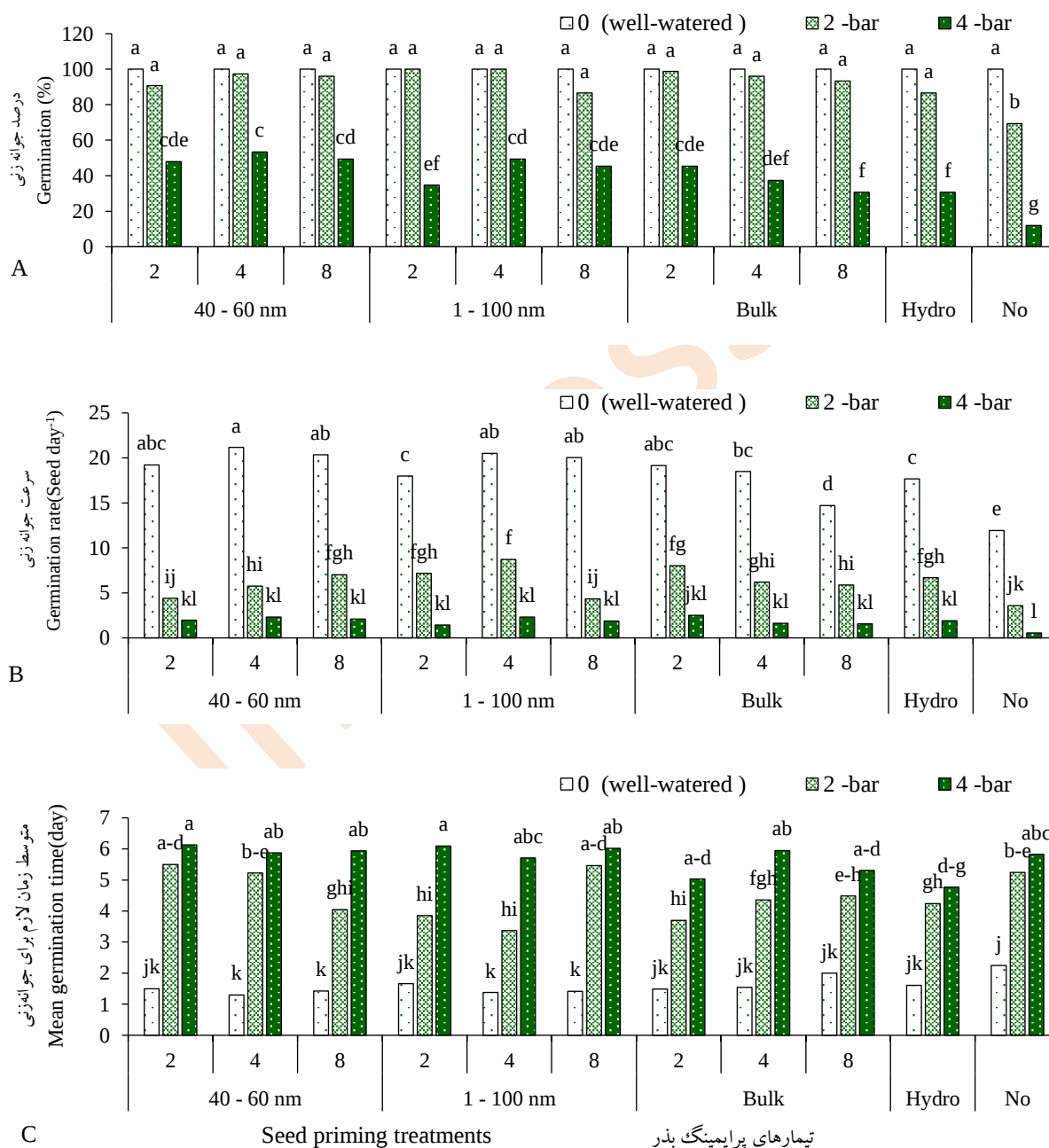
سایر تیمارهای پرایم بذر سبب افزایش معنی‌دار درصد جوانه‌زنی نسبت به تیمار عدم پرایم بذر شدند. در تیمار تنش خشکی ۲- بار، تفاوت معنی‌داری بین سایر تیمارهای پرایمینگ بذر از نظر افزایش درصد جوانه‌زنی نبود. اما در تیمار تنش خشکی ۴- بار، تیمارهای پرایمینگ بذر با آهن نانوذره ۱۰۰-۱ و ۶۰-۴۰ نانومتر از آهن بالک و آب پرایم در افزایش درصد جوانه‌زنی برتر بودند (شکل A ۵). جوانه‌زنی حاصل خروج گیاهچه تحت تاثیر فرآیندهای فیزیولوژیک بذر است. از جمله این فرآیندها انتقال ترکیبات ذخیره‌ای لپه‌ها به گیاهچه‌ها و رشد آن‌ها است. بررسی‌ها نشان داده که خشکی جوانه‌زنی بذرها را با کاهش فعالیت آنزیم‌ها و انتقال ترکیبات ذخیره‌ای از لپه‌ها به گیاهچه‌ها کاهش می‌دهد (Marthandan et al., 2020). کاهش انتقال ترکیبات ذخیره‌ای تحت تاثیر کم‌آبی با کاهش سرعت انتقال کربوهیدرات‌ها باعث کاهش سرعت جوانه‌زنی می‌شود، با تشدید تنش خشکی انتقال ترکیبات ذخیره‌ای به طور کامل متوقف شده و جوانه‌زنی اتفاق نمی‌افتد (Sahah et al., 2022). با این وجود تیمارهایی از جمله پرایمینگ با تغییراتی که در بذور ایجاد می‌کند، باعث بهبود سرعت و در نهایت درصد جوانه‌زنی می‌شود. به طور مثال (Nile et al., 2022) بیان کردند که پرایمینگ بذر از طریق تحریک بیان ژن‌های مرتبط با تولید آکواپورین‌ها (کانال‌های آبی سطح غشاء سلول‌ها) و همچنین بهبود سایر فعالیت‌های غشاء سلول‌ها (پایداری غشاء) سبب جذب بیش‌تر آب و تحریک درصد جوانه‌زنی بذر مخصوصاً در شرایط تنش خشکی می‌شوند. در همین ارتباط نتایج مشابهی توسط Jahantigh et al. (2023) در بررسی اثر پرایمینگ بذر با نانوذرات آهن بر درصد جوانه‌زنی بذر گندم به دست آمد. در همین ارتباط Mazhar et al. (2023) دلیل اصلی افزایش درصد و سرعت جوانه‌زنی تحت تاثیر تیمارهای پرایمینگ بذر با نانوذرات آهن را نفوذ آهن به درون بذر و در نتیجه افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و جلوگیری از اثرات مخرب تنش خشکی می‌دانند.

در شرایط عدم تنش خشکی سرعت جوانه‌زنی بذرهای پرایم نشده حدود ۱۲ بذر جوانه‌زده در روز بود. با افزایش شدت تنش خشکی از ۲- به ۴- بار سرعت جوانه‌زنی به ترتیب به ۳/۶ و ۰/۵۵ بذر جوانه‌زده در روز کاهش یافت. در شرایط عدم تنش خشکی،

تیمارهای پرایمینگ بذر سبب افزایش معنی‌دار سرعت جوانه‌زنی نسبت به تیمار عدم پرایم بذر شدند. در این شرایط پرایمینگ بذر با آهن نانوذره ۶۰-۴۰ نانومتر و ۱۰۰-۱ نانومتر از آهن بالک و هیدروپرایم برتر بودند. غلظت‌های ۴ و ۸ گرم در لیتر آهن نانوذره ۶۰-۴۰ نانومتر و ۱۰۰-۱ نانومتر نیز در این شرایط از نظر افزایش سرعت جوانه‌زنی بهتر عمل نمودند. بیش‌ترین افزایش سرعت جوانه‌زنی در این شرایط مربوط به تیمار ۴ گرم در لیتر آهن نانوذره ۶۰-۴۰ نانومتر با ۲۱/۲ بذر جوانه‌زده در روز بود (شکل B ۵). در همین ارتباط Ghorbani et al. (2022) نیز در بررسی اثر پرایمینگ بذر بر کیفیت جوانه‌زنی بذر نخود گزارش نمودند که تیمارهای پرایمینگ بذر به طور معنی‌داری سبب بهبود درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی و وزن خشک ریشه‌چه گردید. در تیمار تنش خشکی ۲- بار نیز سایر تیمارهای پرایمینگ بذر سبب افزایش معنی‌دار سرعت جوانه‌زنی بذر نخود نسبت به تیمار عدم پرایم شدند. بیش‌ترین سرعت جوانه‌زنی در این شرایط با ۹ بذر جوانه‌زده در روز مربوط به تیمار آهن نانوذره ۱۰۰-۱ نانومتر با غلظت ۴ گرم در لیتر نسبت به تیمار عدم پرایم (۳/۶ بذر جوانه‌زده در روز) بود. در تیمار تنش خشکی ۴- بار، سایر تیمارهای پرایم سبب افزایش سرعت جوانه‌زنی نسبت به تیمار عدم پرایم شدند، اما این تفاوت معنی‌دار نبود (شکل B ۵). عدم شرایط مطلوب محیطی منجر به کاهش قدرت جنین و در نهایت کاهش درصد و سرعت جوانه‌زنی بذر می‌شود (Dornbos, 2020). محققان کاهش درصد و سرعت جوانه‌زنی در شرایط تنش خشکی را ناشی از کاهش سرعت جذب آب توسط بذر گزارش کردند (Hamidi et al., 2016). محققان همچنین گزارش کردند که تنش خشکی از طریق اختلال در جذب آب در مراحل مختلف رشد باعث کاهش و یا عدم انتقال مواد غذایی به در مراحل مختلف رسیدگی بذر شده که در نهایت منجر به تولید گیاهچه‌های ضعیف می‌گردد (Hosseini et al., 2020). در یک بررسی آزمایشگاهی مشخص شد که پرایمینگ بذرهای برنج با سالیسیلیک اسید و سلنیوم احتمالاً از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده مواد ذخیره‌ای بذر سبب افزایش سرعت جوانه‌زنی شد (Nie et al., 2022). بررسی‌ها نشان داده که دو عنصر آهن و روی نقش مهمی در افزایش بیان آنزیم‌ها از جمله

ترتیب با آهن و روی باعث افزایش معنی دار فعالیت آنزیم آلfa آمیلاز می شود. این آنزیم با تجزیه نشاسته موجود در لپه ها و انتقال آن به گیاهچه ها، نقش کلیدی در جوانه زنی بذر گیاهان دارد.

آلfa آمیلاز در بذر دارد (Długosz et al., 2021; Monajjem et al., 2023). در بررسی های مشابه تحقیق حاضر، (Afzal et al., 2021) و (Li et al., 2021) نشان دادند که پرایمینگ بذر برنج به



شکل ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل دو جانبه پرایمینگ بذر با آهن نانوذره با اندازه ذرات مختلف و فرم بالک آن و هیدروپرایم × تنش خشکی بر درصد جوانه زنی (A)، سرعت جوانه زنی (B) و متوسط زمان لازم برای جوانه زنی (C) بذر نخود. براساس آزمون دانکن، ستون ها با حروف یکسان در سطح احتمال پنج درصد با هم تفاوت معنی دار ندارند.

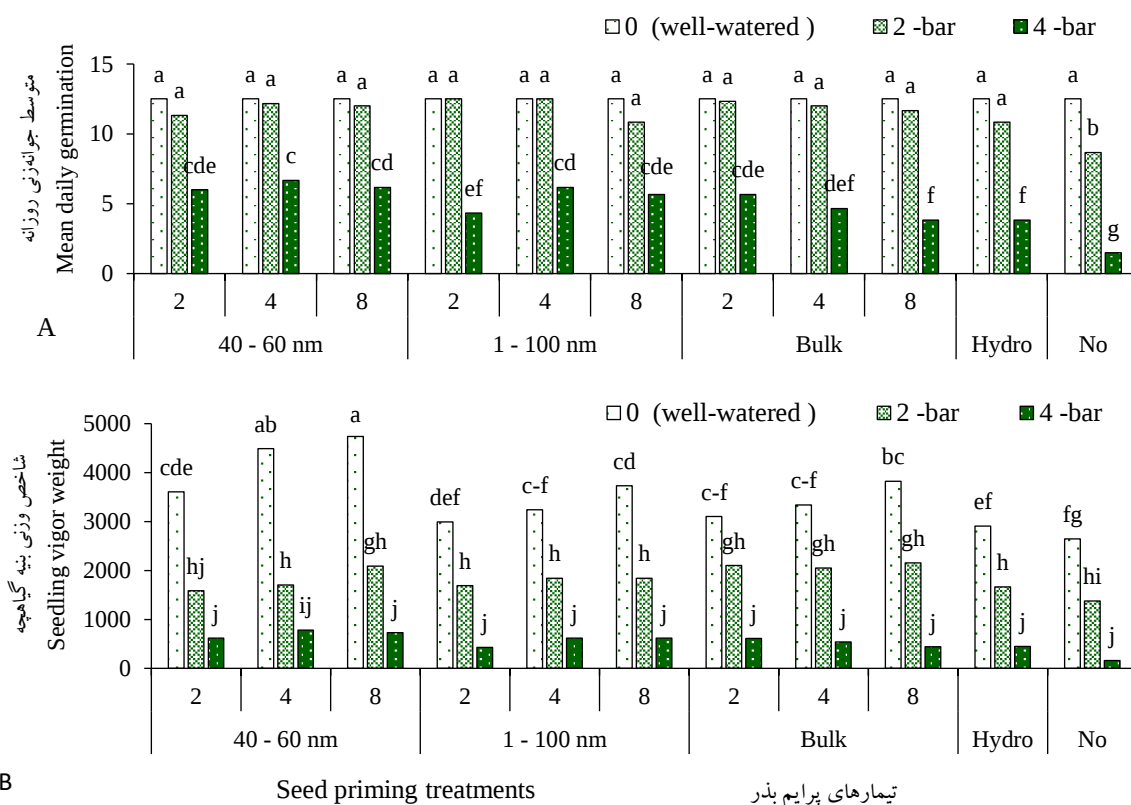
Fig. 5- Mean comparison of two-way interaction of seed priming with nanoparticle iron with different particle size and bulk form and hydropriming × drought stress on germination percentage (A), germination rate (B) and mean time to see germination (D) of Chickpea. According to Duncan's test, the columns with the same letters are not significantly different at the five percent probability level.

متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی در شرایط عدم پرایمینگ بذر با اعمال تیمار تنش خشکی به طور معنی‌داری افزایش یافت. متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی در شرایط عدم تنش خشکی ۲/۲۵ روز و در شرایط تنش خشکی ۴- بار ۵/۸۳ روز شد. در شرایط عدم تنش خشکی، تیمارهای پرایم بذر باعث کاهش متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی بذر نسبت به تیمار عدم پرایم شدند. در این تیمار تفاوت معنی‌داری بین سایر تیمارهای پرایم بذر با تیمار عدم پرایم بذر مشاهده نشد (شکل ۵ C). از نظر عددی بیش‌ترین اثر در این ارتباط مربوط به تیمارهای آهن نانوذره ۱۰۰-۱ و ۶۰-۴۰ نانومتر در غلظت‌های ۴ و ۸ گرم در لیتر بود. برخلاف درصد و سرعت جوانه‌زنی، با اعمال تیمار تنش خشکی متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی به طور معنی‌داری افزایش یافت. در تیمار تنش خشکی ۲- بار، تیمارهای پرایم سبب کاهش متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی شدند. بیش‌ترین کاهش معنی‌دار در این ارتباط مربوط به تیمارهای آهن نانوذره ۶۰-۴۰ نانومتر با غلظت ۸ گرم در لیتر (۴ روز)، آهن نانوذره ۱۰۰-۱ نانومتر با غلظت‌های ۲ و ۴ گرم در لیتر (به ترتیب با ۳/۹ و ۳/۴ روز) و آهن بالک ۲ گرم در لیتر با ۳/۸ روز بود. در تیمار تنش خشکی ۴- بار، سایر تیمارهای پرایمینگ بذر در مقایسه با تیمار شاهد نتوانستند تاثیر معنی‌داری بر کاهش متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی داشته باشند. (Ghorbani et al., 2022) گزارش کردند که متوسط زمان جوانه‌زنی بذر نخود با افزایش شدت تنش خشکی افزایش یافت که با نتایج به دست آمده از این تحقیق مطابقت دارد. زمان لازم جهت سبز شدن شاخص مناسبی جهت تخمین قدرت جوانه‌زنی و سبز شدن بذر می‌باشد (Amirmoradi & Feizi, 2017). این امر خصوصاً در شرایط تنش خشکی در استقرار سریع گیاهچه اهمیت دارد (Tao et al., 2023). تنش خشکی با محدود کردن جذب آب توسط بذر و حرکت و انتقال ذخایر بذر به جنین، سرعت جوانه‌زنی را کاهش و متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی را افزایش می‌دهد (Ma et al., 2024).

در تیمار عدم پرایمینگ بذر (تیمار شاهد) با اعمال تنش خشکی، متوسط جوانه‌زنی روزانه به طور معنی‌داری کاهش یافت. بیش‌ترین کاهش معنی‌دار در این شرایط مربوط به تیمار ۴- بار با ۱/۵ بذر جوانه‌زده به طور متوسط در روز نسبت به تیمار عدم تنش

خشکی با ۱۲/۵ بذر جوانه‌زده در روز به طور متوسط بود. در شرایط عدم تنش خشکی، تیمارهای پرایمینگ بذر اثر معنی‌داری بر متوسط جوانه‌زنی روزانه نداشتند. در شرایط تنش خشکی ۲- بار سایر تیمارهای پرایمینگ بذر سبب افزایش معنی‌دار این صفت شدند. اما بین تیمارهای پرایمینگ بذر در این شرایط تفاوت معنی‌دار دیده نشد. در شرایط تنش خشکی ۴- بار نیز تیمارهای پرایمینگ بذر سبب افزایش معنی‌دار متوسط جوانه‌زنی روزانه بذر نخود شدند. در این شرایط، تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای مختلف پرایم بذر از نظر افزایش متوسط جوانه‌زنی روزانه وجود نداشت، اما در شرایط تنش خشکی ۴- بار، تیمارهای پرایمینگ بذر با آهن نانوذره ۶۰-۴۰ و ۱۰۰-۱ نانومتر در غلظت‌های ۴ و ۸ گرم در لیتر نسبت به سایر تیمارهای پرایم بذر از نظر افزایش متوسط جوانه‌زنی روزانه از نظر عددی برتر بودند (شکل ۶ A).

شاخص وزنی بنیه گیاهچه در تیمار عدم پرایم بذر تحت تاثیر سطوح تنش خشکی نسبت به تیمار عدم تنش خشکی به طور معنی‌داری کاهش یافت. کم‌ترین شاخص بنیه گیاهچه بذر در این شرایط در تیمار تنش خشکی ۴- بار با ۹۳ درصد کاهش نسبت به تیمار شاهد دیده شد. در هر سه سطح رطوبتی (شاهد، ۲- و ۴- بار) تیمارهای پرایم بذر سبب بهبود معنی‌دار شاخص وزنی بنیه گیاهچه شدند، اما این افزایش در شرایط عدم تنش خشکی معنی‌دار بود. در این ارتباط در شرایط عدم تنش خشکی، تیمارهای پرایمینگ بذر با آهن نانوذره ۶۰-۴۰ نانومتر در غلظت‌های ۴ و ۸ گرم در لیتر سبب بیش‌ترین افزایش معنی‌دار شاخص وزنی بنیه گیاهچه نخود شدند. کم‌ترین مقدار شاخص شاخص وزنی بنیه گیاهچه هم مربوط به شرایط تنش خشکی ۴- بار در تیمار بدون پرایمینگ بود (شکل ۶ B). در این ارتباط، Parvar et al. (2019) در بررسی اثر پرایمینگ بذر با نانوذرات آهن بر نخود زراعی نشان دادند که بذره‌های تیمار شده با آهن نانوذره دارای شاخص بنیه گیاهچه بالاتری نسبت به تیمار شاهد بودند. افزایش معنی‌دار بنیه بذر تحت تاثیر پرایمینگ بذر با نانوذرات در مقایسه با فرم بالک، ممکن است به دلیلی تاثیر مثبت و بیش‌تر این ذرات در پایداری غشاء سلول‌های جنین در حال رشد و در نتیجه آن حفظ ظرفیت فسفریلاسیون سلول باشد (Acharya et al., 2020).

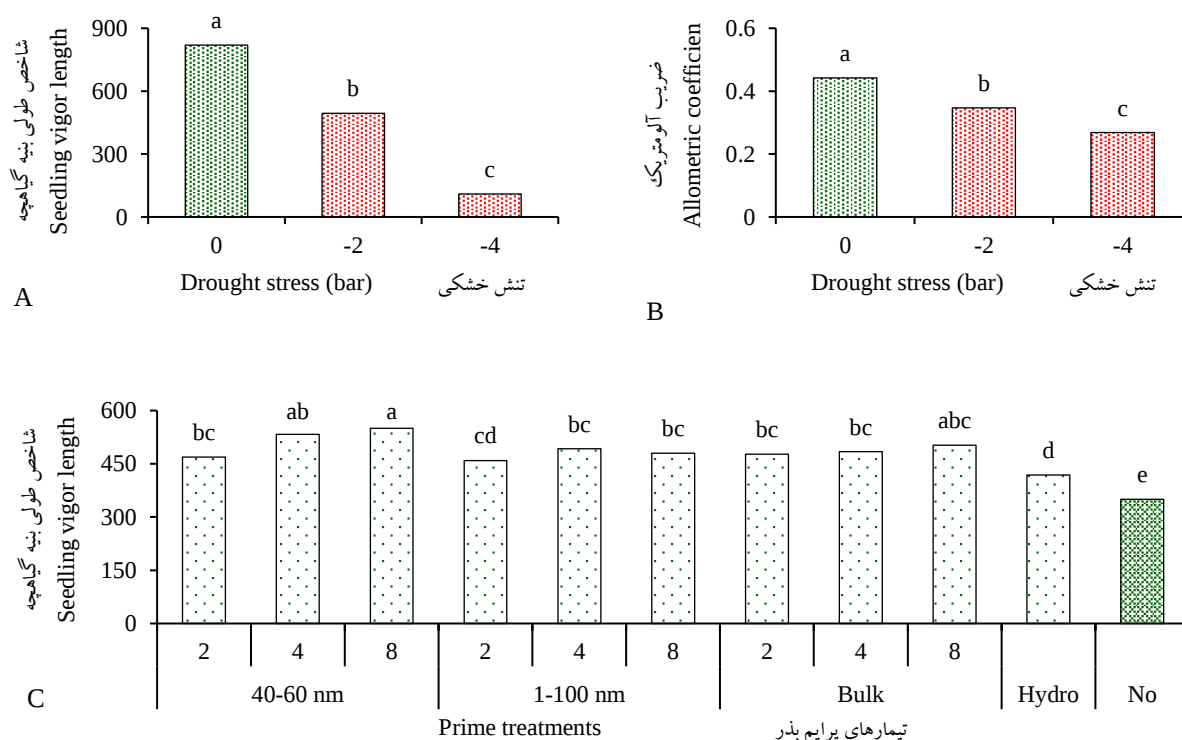


شکل ۶- مقایسه میانگین اثر متقابل دو جانبه پرایمینگ بذر با آهن نانوذره با اندازه ذرات مختلف و فرم بالک آن و هیدروپرایم × تنش خشکی بر متوسط جوانه‌زنی روزانه (A) و شاخص وزنی بینه گیاهچه (B) نخود. براساس آزمون دانکن، ستون‌ها با حروف یکسان در سطح احتمال پنج درصد با هم تفاوت معنی‌دار ندارند.

Fig. 6- Mean comparison of two-way interaction of seed priming with nanoparticle iron with different particle size and bulk form and hydropriming × drought stress on medium daily germination (A) and seedling vigor weight (B) of Chickpea. According to Duncan's test, the columns with the same letters are not significantly different at the five percent probability level.

نتیجه‌گیری نمودند که تنش خشکی از طریق تاخیر در جوانه‌زنی، رشد نامناسب ریشه و اندام هوایی، جذب مواد مغذی و تنش اکسیداتیو منجر به کاهش شاخص بینه گیاهچه می‌شود. براساس نتایج تجزیه واریانس داده‌های به دست آمده از این تحقیق، تیمارهای پرایم بذر اثر معنی‌داری بر صفت ضریب آلومتریک نداشتند (جدول ۱) و براساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، با افزایش شدت تنش خشکی مقدار ضریب آلومتریک در تیمارهای ۲- و ۴- بار به ترتیب ۱۶ و ۵۹ درصد نسبت به شرایط عدم تنش خشکی کاهش یافت (شکل ۷C). ضریب آلومتریک نشان‌دهنده نسبت اختصاص مواد خشک بین ریشه‌چه و ساقه‌چه است. کاهش معنی‌دار ضریب آلومتریک در این تحقیق به دلیل حساسیت بیش‌تر وزن خشک ریشه‌چه به وزن خشک ساقه‌چه در شرایط تنش خشکی است (Sarr et al., 2024).

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با افزایش شدت تنش خشکی مقدار شاخص طولی بینه گیاهچه در تیمارهای ۲- و ۴- بار به ترتیب ۴۰ و ۸۷ درصد نسبت به شرایط عدم تنش خشکی کاهش یافت (شکل ۷A). سایر تیمارهای پرایمینگ بذر سبب افزایش معنی‌دار شاخص طولی بینه گیاهچه نسبت به تیمار عدم پرایم بذر شدند. در این شرایط بیش‌ترین افزایش این صفت مربوط به تیمارهای پرایمینگ بذر با آهن نانوذره ۶۰-۴۰ نانومتر با غلظت‌های ۴ و ۸ گرم در لیتر و آهن بالک با غلظت ۸ گرم در لیتر بود (شکل ۷B). شاخص بینه گیاهچه معرف درصد و پتانسیل جوانه‌زنی است. هر چه کیفیت بذر پایین‌تر باشد، درصد جوانه‌زنی نیز پایین‌تر و شاخص بینه گیاهچه کاهش می‌یابد (Sripathy & Groot, 2023). Ahmadpour et al. (2022) در تحقیق بر روی نخود زراعی، کاهش ۸۹ درصدی بینه گیاهچه را در اثر افزایش شدت تنش خشکی تا ۹- بار گزارش کردند. Nyaupane et al. (2024)



شکل ۷- مقایسه میانگین اثر تنش خشکی بر شاخص طولی بیه گیاهچه (A) و ضریب آلومتریک (B) و اثر پرایمینگ بذر با آهن نانوذره با اندازه ذرات مختلف و فرم بالک آن و هیدروپرایم بر شاخص طولی بیه گیاهچه (C) نخود. براساس آزمون دانکن، ستون‌ها با حروف یکسان در سطح احتمال پنج درصد با هم تفاوت معنی‌دار ندارند.

Fig 7- Mean comparison of drought stress on seedling vigor length (A) and Allometric coefficient (B) and seed priming with nanoparticle iron with different particle size and bulk form and hydropriming on seedling vigor length (C) of Chickpea. According to Duncan's test, the columns with the same letters are not significantly different at the five percent probability level.

داد (جدول ۳)، در شرایط عدم تنش خشکی بذرهای پرایم شده با گروه‌های آهن نانوذره ۱-۱۰۰ نانومتر و ۶۰-۴۰ نانومتر بیش‌ترین تاثیر را در افزایش وزن تر ساقچه داشتند. اما در شرایط تنش خشکی ۲- و ۴- اگرچه اثر تیمارهای پرایم بذر مثبت بود، اما تفاوت معنی‌داری بین آن‌ها از نظر تاثیرگذاری بر وزن تر ساقچه مشاهده نشد (جدول ۴).

مقایسه گروهی تیمارهای پرایمینگ بذر از نظر درصد جوانه‌زنی نشان داد در شرایط عدم تنش خشکی تفاوت معنی‌داری بین آن‌ها وجود نداشت. اما در شدت تنش خشکی ۲- بار، گروه‌های پرایمینگ بذر آهن نانوذره ۶۰-۴۰ و ۱۰۰-۱ و آهن بالک از نظر تاثیر مثبت بر درصد جوانه‌زنی با هم تاثیر یکسان داشته و از تیمار هیدروپرایم و عدم پرایم بذر برتر بودند. در شرایط تنش خشکی ۴- بار دو گروه پرایمینگ بذر آهن

به منظور تعیین بهترین تیمار پرایمینگ بذر مورد بررسی در این تحقیق، میانگین غلظت‌های کودی محاسبه شد و به همراه تیمار هیدروپرایم و تیمار شاهد در سطوح تیمارهای رطوبتی مورد بررسی قرار گرفتند. صفت‌هایی که نتایج تجزیه واریانس معنی‌دار داشتند، در ادامه مورد بررسی قرار گرفتند. براساس نتایج به دست آمده از وزن خشک گیاهچه، در شرایط بدون تنش خشکی، بذرهای پرایم شده با گروه آهن نانوذره ۶۰-۴۰ نانومتر بیش‌ترین تاثیر را در افزایش وزن خشک گیاهچه داشتند و تفاوت معنی‌داری بین دیگر گروه‌های پرایم بذر با تیمار عدم پرایم وجود نداشت. در تیمارهای رطوبتی ۲- و ۴- بار تفاوت معنی‌داری بین گروه‌های مختلف کودی از نظر وزن خشک گیاهچه نخود وجود نداشت (جدول ۳).

مقایسه گروه‌های پرایمینگ بذر از نظر وزن تر ساقچه نشان

نانوذره ۶۰-۴۰ و ۱۰۰-۱ موثرتر بودند. البته در این شرایط گروه آهن نانوذره ۶۰-۴۰ نانومتر از گروه ۱۰۰-۱ نانومتر نیز از نظر عددی برتر بود. گروه‌های پرایمینگ بذر با آهن بالک و هیدروپرایم نیز در رتبه دوم از عدم پرایم بذر در این شرایط برتر بودند (جدول ۵).

جدول ۳- مقایسه میانگین گروه‌های مختلف تیمار پرایمینگ بذر از نظر اثر بر وزن خشک گیاهچه نخود

Table 3- Mean comparison of different seed priming groups in terms of the effect on the seedling dry weight of chickpea

تیمار رطوبتی	آهن (۶۰-۴۰ نانومتر)	آهن (۱۰۰-۱ نانومتر)	آهن بالک	هیدرو پرایم	عدم پرایم
Water regimes	Fe (1-100 nm)	Fe (1-100 nm)	Fe Bulk	Hydro prime	Nonprime
بدون تنش خشکی	42.8a	33.2bc	34.2b	29.10bcd	26.4cde
Well-watered					
۲- بار	18.9efg	18.9efg	21.9def	19.76efg	19.5efg
-2 bar					
۴- بار	14.1fg	12.8g	14.1fg	14.34fg	13.3g
-4 bar					

براساس آزمون دانکن، ستون‌ها با حروف یکسان در سطح احتمال پنج درصد با هم تفاوت معنی‌دار ندارند.

According to Duncan's test, the columns with the same letters are not significantly different at the five percent probability level.

جدول ۴- مقایسه میانگین گروه‌های مختلف تیمار پرایمینگ بذر از نظر اثر بر وزن تر ساقچه نخود

Table 4- Mean comparison of different seed priming groups in terms of the effect on the shoot fresh weight of chickpea

تیمار رطوبتی	آهن (۶۰-۴۰ نانومتر)	آهن (۱۰۰-۱ نانومتر)	آهن بالک	هیدرو پرایم	عدم پرایم
Water regimes	Fe (1-100 nm)	Fe (1-100 nm)	Fe Bulk	Hydro prime	Non
بدون تنش خشکی	58.7a	65.2a	57.6a	43.0b	39.07b
Well-watered					
۲- بار	27.0cd	28.0cd	29.0c	24.0cd	19.0de
-2 bar					
۴- بار	8.71f	11.0ef	9.66f	9.33f	10.3ef
-4 bar					

براساس آزمون دانکن، ستون‌ها با حروف یکسان در سطح احتمال پنج درصد با هم تفاوت معنی‌دار ندارند.

According to Duncan's test, the columns with the same letters are not significantly different at the five percent probability level.

جدول ۵- مقایسه میانگین گروه‌های مختلف تیمار پرایمینگ بذر از نظر اثر بر درصد جوانه‌زنی بذر نخود

Table 5- Mean comparison of different seed priming groups in terms of the effect on the germination percentage of chickpea seeds

تیمار رطوبتی	آهن (۶۰-۴۰ نانومتر)	آهن (۱۰۰-۱ نانومتر)	آهن بالک	هیدرو پرایم	عدم پرایم
Water regimes	Fe (1-100 nm)	Fe (1-100 nm)	Fe Bulk	Hydro prime	Non
بدون تنش خشکی	100a	100a	100a	100a	100a
Well-watered					
۲- بار	94.6ab	95.6ab	96.0ab	86.6b	69.3c
-2 bar					
۴- بار	50.2d	43.1de	37.78ef	30.6f	12.0g
-4 bar					

براساس آزمون دانکن، ستون‌ها با حروف یکسان در سطح احتمال پنج درصد با هم تفاوت معنی‌دار ندارند.

According to Duncan's test, the columns with the same letters are not significantly different at the five percent probability level.

این سطح رطوبتی به طور کلی سایر تیمارهای پرایم بذر سبب افزایش سرعت جوانه‌زنی شدند. در تیمار تنش خشکی در سطوح ۲- و ۴- بار سایر گروه‌های پرایمینگ بذر سبب افزایش معنی‌دار سرعت جوانه‌زنی شدند، اما تفاوت معنی‌داری بین این گروه‌ها وجود نداشت (جدول ۶).

مقایسه گروهی تیمارهای اعمال شده از نظر تاثیرگذاری مثبت بر صفت سرعت جوانه‌زنی بذر نخود نشان داد که، در شرایط عدم تنش خشکی گروه‌های پرایمینگ بذر آهن نانوذره ۶۰-۴۰ و ۱۰۰-۱ نسبت به سایر گروه‌ها برتر بودند. در رتبه بعدی گروه‌های آهن بالک و هیدروپرایم نسبت به تیمار عدم پرایم برتر بودند. در

جدول ۶- مقایسه میانگین گروه‌های مختلف تیمار پرایمینگ بذر از نظر اثر بر سرعت جوانه‌زنی بذر نخود

Table 6- Mean comparison of different seed priming groups in terms of the effect on the germination rate of chickpea seeds

تیمار رطوبتی	آهن (۶۰-۴۰ نانومتر)	آهن (۱۰۰-۱ نانومتر)	آهن بالک	هیدرو پرایم	عدم پرایم
Water regimes	Fe (1-100 nm)	Fe (1-100 nm)	Fe Bulk	Hydro prime	Non
بدون تنش خشکی	20.3a	19.5a	17.5b	17.7b	11.9c
Well-watered					
۲- بار	5.7d	6.8d	6.69d	6.70d	3.58e
-2 bar					
۴- بار	2.11f	1.88fg	1.89fg	1.90fg	0.54g
-4 bar					

براساس آزمون دانکن، ستون‌ها با حروف یکسان در سطح احتمال پنج درصد با هم تفاوت معنی‌دار ندارند.

According to Duncan's test, the columns with the same letters are not significantly different at the five percent probability level.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج این تحقیق، در صورت وقوع تنش خشکی با شدت ۸- بار، جوانه‌زنی نخود رقم عادل متوقف خواهد شد. همچنین تیمار تنش خشکی سبب کاهش معنی‌دار شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه و افزایش نسبت ریشه‌چه به ساقه‌چه می‌شود. تیمارهای پرایم بذر در شرایط تنش خشکی در سطح ۴- بار، سبب افزایش معنی‌دار درصد جوانه‌زنی، متوسط جوانه‌زنی روزانه و شاخص طولی بینه گیاهچه نخود شدند. نتایج این تحقیق همچنین نشان دادند که پرایمینگ بذر با فرم نانوذره آهن در شرایط تنش و عدم تنش خشکی در بهبود کیفیت جوانه‌زنی بذر از فرم بالک آهن و هیدروپرایم برتر بودند. پرایم با آهن نانوذره ۶۰-۴۰ نانومتر به طور موثرتری نسبت به تیمار پرایمینگ بذر با آهن نانوذره ۱۰۰-۱ نانومتر در بهبود خصوصیات مرتبط با جوانه‌زنی بذر موثر بود. با توجه به این که در پرایمینگ بذر مقدار مصرف ترکیبات ذکر شده بسیار کم است، بنابراین پرایمینگ بذر از نظر اقتصادی قابل توجه است.

سپاسگزاری

بدین وسیله نویسندگان مقاله مراتب سپاس و قدردانی صمیمانه خود را از دانشگاه رازی و شورای ملی نخود ایران به دلیل حمایت‌های مالی و معنوی از این پژوهش اعلام می‌دارند.

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تعارض منافی در رابطه با نگارش و یا انتشار این مقاله ندارند.

References

- Abdul-Baki, A. A., & Anderson, J. D. (1973). Relationship between decarboxylation of glutamic acid and vigor in soybean seed. *Crop Science*, 13(2), 227-232. <https://doi.org/10.2135/cropsci1973.0011183x00130002>
- Acharya, P., Jayaprakash, G. K., Crosby, K. M., Jifon, J. L., & Patil, B. S. (2020). Nanoparticle mediated seed priming improves germination, growth, yield, and quality of watermelons (*Citrullus lanatus*) at multi-locations in Texas. *Scientific Reports*, 10, 5037. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61696-7>

- Afzal, S., Sharma, D., & Singh, N. K. (2021). Eco-friendly synthesis of phytochemical-capped iron oxide nanoparticles as nano-priming agents for boosting seed germination in rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 40275-40287. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12056-5>
- Ahmadpour, R., Bachari, Y., & Hosseinzadeh, S. R. (2022). The role of compost tea in mitigating the negative effects of drought stress caused by polyethyleneglycol in chickpea seeds (Adel cultivar) by evaluating germination indices. *Iranian Journal of Pulses Research*, 13(2), 37-49. <https://doi.org/10.22067/IJPR.V13I2.2204-1030> [In Persian]
- Alam, M. U., Fujita, M., Nahar, K., Rahman, A., Anee, T. I., Masud, A. A. C., Amin, A. R., & Hasanuzzaman, M. (2022). Seed priming upregulates antioxidant defense and glyoxalase systems to confer simulated drought tolerance in wheat seedlings. *Plant Stress*, 6, 100120. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100120>
- Alen, S. G., Dobrenz, A. K., Schonhorst, M. H., & Stoner, J. E. (1985). Heritability of NaCl tolerance in germination of alfalfa seed. *Journal of Agronomy*, 77, 99-101. <https://doi.org/10.2134/agronj1985.0002196200770010023x>
- Alias, N. S. B., Billa, L., Muhammad, A., & Singh, A. (2018). Priming and temperature effects on germination and early seedling growth of some Brassica spp. *Acta Horticulturae*, 1225, 407-414. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1225.57>
- Amir, M., Prasad, D., Khan, F. A., Khan, A., & Ahmad, B. (2024). Seed priming: An overview of techniques, mechanisms, and applications. *Plant Science Today*, 11(1), 553-563. <https://doi.org/10.14719/pst.2828>
- Amirmoradi, S., & Feizi, H. (2017). Can mean germination time predict seed vigor of canola (*Brassica napus* L.) seed lots? *Acta Agrobotanica*, 70(4), 1729. <https://doi.org/10.5586/aa.1729>
- An, J., Hu, P., Li, F., Wu, H., Shen, Y., White, J. C., Tian, X., Li, Z., & Giraldo, J. P. (2020). Emerging investigator series: Molecular mechanisms of plant salinity stress tolerance improvement by seed priming with cerium oxide nanoparticles. *Environmental Science: Nano*, 7, 2214-2228. <https://doi.org/10.1039/d0en00387e>
- Association of Official Seed Analysts (AOSA). (1993). *AOSA rules for testing seeds 2023 complete set volumes 1-4*. <https://analyzeseeds.com/product/aosa-rules-for-testing-seeds-2023-complete-set-volumes-1-4/>
- Biju, S., Fuentes, S., & Gupta, D. (2017). Silicon improves seed germination and alleviates drought stress in lentil crops by regulating osmolytes, hydrolytic enzymes, and antioxidant defense system. *Plant Physiology and Biochemistry*, 119, 250-264. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.09.001>
- Bruggink, G. T., Ooms, J. J. J., & Van der Toorn, P. (1999). Induction of longevity in primed seeds. *Seed Science Research*, 9(1), 49-53. <https://doi.org/10.1017/S0960258599000057>
- Coussement, J. R., Villers, S. L., Nelissen, H., Inzé, D., & Steppe, K. (2021). Turgor-time controls grass leaf elongation rate and duration under drought stress. *Plant, Cell & Environment*, 44(5), 1361-1378. <https://doi.org/10.1111/pce.13989>
- Długosz, O., Matysik, J., Matyjasik, W., & Banach, M. (2021). Catalytic and antimicrobial properties of α -amylase immobilised on the surface of metal oxide nanoparticles. *Journal of Cluster Science*, 32, 1609-1622. <https://doi.org/10.1007/s10876-020-01921-5>
- Gough, R. E. (2020). *Seed quality: Basic mechanisms and agricultural implications* (pp. 119-152). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003075226>
- Ellis, R. H. (2022). Seed ageing, survival, and the improved seed viability equation: Forty years on. *Seed Science and Technology*, 50(Suppl. 1), 1-20. <https://doi.org/10.15258/sst.2022.50.1.s.01>
- Fahad, S., Bajwa, A. A., Nazir, U., Anjum, S. A., Farooq, A., Zohaib, A., Sadia, S., Nasim, W., Adkins, S., Saud, S., & Huang, J. (2017). Crop production under drought and heat stress: Plant responses and management options. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1147. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147>
- Farooq, M., Hussain, M., Imran, M., Ahmad, I., Atif, M., & Alghamdi, S. S. (2019). Improving the productivity and profitability of late sown chickpea by seed priming. *International Journal of Plant Production*, 13, 129-139. <https://doi.org/10.1007/s42106-019-00041-z>
- Ganjeali, A., Parsa, M., & Khatib, M. (2008). Quantifying seed germination response of chickpea genotypes (*Cicer arietinum* L.) influenced by temperature and drought stress regimes. *Agricultural Research*, 9(1), 77-88. [In Persian]
- Ghorbani, R., Movafeghi, A., Ganjeali, A., & Nabati, J. (2022). Investigating the germination characteristics of chickpea (*Cicer arietinum*) in response to titanium dioxide nanoparticles priming and drought stress. *Iranian Journal of Seed Science and Research*, 9(1), 189-202. <https://doi.org/10.52547/yujs.9.1.189> [In Persian]
- Hamidi, A., Daneshian, J., & Asgharzadeh, A. (2016). A review of drought stress on mother plant effect on soybean seed germination and vigor improvement by some beneficial soil microorganisms' treatment assessment. *Iranian Journal of Seed Science Research*, 3(2), 109-124. <https://doi.org/20.1001.1.24763780.1395.3.2.10.6> [In Persian]

- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Hossain, M. S., Mahmud, J. A., Rahman, A., Inafuku, M., Oku, H., & Fujita, M. (2017). Coordinated actions of glyoxalase and antioxidant defense systems in conferring abiotic stress tolerance in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(1), 200. <https://doi.org/10.3390/ijms18010200>
- Himaja, R., Radhika, K., Reddy, K. B., & Raghavendra, M. (2023). Screening of chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes for germination and early seedling growth under PEG 6000 induced drought stress. *Legume Research: An International Journal*, 46(7), 813-821. <https://doi.org/10.18805/LR-4183>
- Hosseini, P., Mohsenifar, K., Rajaie, M., & Babaeinezhad, T. (2020). Improvement and regeneration of canola seeds (*Brassica napus*) with growth promoting compounds under different irrigation intervals. *Iranian Journal of Seed Science and Research*, 7, 463-475. <https://doi.org/10.22124/JMS.2020.4643> [In Persian]
- Hussain, M., Farooq, M., & 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>
- International Seed Testing Association (ISTA). (2003). *Handbook for seedling evaluation* (3rd ed.). International Seed Testing Association.
- International Seed Testing Association (ISTA). (2006). *International rules for seed testing*. Basserdorf, Switzerland.
- Jahantigh, T., Esmaeilzadeh Bahabadi, S., Razmara, Z., & Hasanein, P. (2023). The effect of seed priming with three metallic complexes of iron and its Fe₃O₄ nanoparticles resulting from its thermal decomposition on some growth physiologic parameters of *Triticum aestivum*. *Journal of Plant Process and Function*, 12(53), 315-33. [In Persian]
- Jisha, K. C., & Puthur, J. T. (2018). Seed hydropriming enhances osmotic stress tolerance potential in *Vigna radiata*. *Agricultural Research*, 7, 145-151. <https://doi.org/10.1007/s40003-018-0306-x>
- Kharb, V., Sharma, V., Dhaliwal, S. S., & Kalia, A. (2023). Influence of iron seed priming on seed germination, growth, and iron content in rice seedlings. *Journal of Plant Nutrition*, 46(16), 4054-4062. <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2220731>
- Li, Y., Liang, L., Li, W., Ashraf, U., Ma, L., Tang, X., Pan, S., Tian, H., & Mo, Z. (2021). ZnO nanoparticle-based seed priming modulates early growth and enhances physio-biochemical and metabolic profiles of fragrant rice against cadmium toxicity. *Journal of Nanobiotechnology*, 19, 1-19. <https://doi.org/10.1186/s12951-021-00820-9>
- Ma, Y., Liao, K., Zhu, Y., Lu, X., Wang, K., & Zhang, X. R. (2024). Effects of drought stress on seed germination and early seedling growth in *Ferula ferulaeoides* (Steud.) Korov. *Brazilian Journal of Botany*, 47(3), 857-863. <https://doi.org/10.1007/s40415-023-00975-9>
- Maguire, J. D. (1962). Speed of germination: Aids in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science*, 2, 176-177. <https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x>
- Mahakham, W., Sarmah, A. K., Maensiri, S., & Theerakulpisut, P. (2017). Nanopriming technology for enhancing germination and starch metabolism of aged rice seeds using phytosynthesized silver nanoparticles. *Scientific Reports*, 7(1), 8263. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08669-5>
- Manzoor, N., Ali, L., Al-Huqail, A. A., Alghanem, S. M. S., Al-Haithloul, H. A. S., Abbas, T., Chen, G., Huan, L., Liu, Y., & Wang, G. (2023). Comparative efficacy of silicon and iron oxide nanoparticles towards improving the plant growth and mitigating arsenic toxicity in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 264, 115382. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115382>
- Marthandan, V., Geetha, R., Kumutha, K., Renganathan, V. G., Karthikeyan, A., & 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>
- Mašková, T., & Herben, T. (2018). Root: shoot ratio in developing seedlings: How seedlings change their allocation in response to seed mass and ambient nutrient supply. *Ecology and Evolution*, 8(14), 7143-7150. <https://doi.org/10.1002/ece3.4238>
- Masomi, S. H., Imani, A., Seyfzade, S., & Zakerin, H. R. (2023). Effect of drought-induced stress by PEG6000 on physiological and morphological traits of chickpea (*Cicer arietinum* L.) seed germination: Assortment of drought tolerant cultivars. *Journal of Plant Process and Function*, 11(52), 1-12. [In Persian]
- Mazhar, M. W., Ishtiaq, M., Maqbool, M., Ullah, F., Sayed, S. R., & Mahmoud, E. A. (2023). Seed priming with iron oxide nanoparticles improves yield and antioxidant status of garden pea (*Pisum sativum* L.) grown under drought stress. *South African Journal of Botany*, 162, 577-587. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.09.047>
- Mehmood, S., Khatoon, Z., Amna, Ahmad, I., Muneer, M. A., Kamran, M. A., Ali, J., Ali, B., Chaudhary, H. J., & Munis, M. F. H. (2023). *Bacillus* sp. PM31 harboring various plant growth-promoting activities regulates Fusarium dry rot and wilt tolerance in potato. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 69(2), 197-211. <https://doi.org/10.1080/03650340.2022.2078321>

- Michel, B. E., & Kaufmann, M. R. (1973). The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiology*, 51(5), 914-916. <https://doi.org/10.1104/pp.51.5.914>
- Monajjem, S., Soltani, E., Zainali, E., Esfahani, M., Ghaderi-Far, F., Chaleshtori, M. H., & Rezaei, A. (2023). Seed priming improves enzymatic and biochemical performances of rice during seed germination under low and high temperatures. *Rice Science*, 30(4), 335-347. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2023.03.012>
- Moreno, C., Seal, C. E., & Papenbrock, J. (2018). Seed priming improves germination in saline conditions for *Chenopodium quinoa* and *Amaranthus caudatus*. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 204(1), 40-48. <https://doi.org/10.1111/jac.12242>
- Nie, L., Song, S., Yin, Q., Zhao, T., Liu, H., He, A., & Wang, W. (2022). Enhancement in seed priming-induced starch degradation of rice seed under chilling stress via GA-mediated α -amylase expression. *Rice*, 15(1), 19. <https://doi.org/10.1186/s12284-022-00567-3>
- Nile, S. H., Thiruvengadam, M., Wang, Y., Samynathan, R., Shariati, M. A., Rebezov, M., Nile, A., Sun, M., Venkidasamy, B., Xiao, J., & Kai, G. (2022). Nano-priming as emerging seed priming technology for sustainable agriculture: Recent developments and future perspectives. *Journal of Nanobiotechnology*, 20(1), 254. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01423-8>
- Noor, R., Yasmin, H., Ilyas, N., Nosheen, A., Hassan, M. N., Mumtaz, S., Khan, N., Ahmad, A., & Ahmad, P. (2022). Comparative analysis of iron oxide nanoparticles synthesized from ginger (*Zingiber officinale*) and cumin seeds (*Cuminum cyminum*) to induce resistance in wheat against drought stress. *Chemosphere*, 292, 133201. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133201>
- Nyaupane, S., Poudel, M. R., Panthi, B., Dhakal, A., Paudel, H., & Bhandari, R. (2024). Drought stress effect, tolerance, and management in wheat: A review. *Cogent Food & Agriculture*, 10(1), 2296094. <https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2296094>
- Peters, W. S., Jensen, K. H., Stone, H. A., & Knoblauch, M. (2021). Plasmodesmata and the problems with size: Interpreting the confusion. *Journal of Plant Physiology*, 257, 153341. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2020.153341>
- Pompelli, M. F., Jarma-Orozco, A., & Rodríguez-Páez, L. A. (2023). Imbibition and germination of seeds with economic and ecological interest: Physical and biochemical factors involved. *Sustainability*, 15(6), 5394. <https://doi.org/10.3390/su15065394>
- Sadeghzadeh Ahari, D. (2016). Study on drought stress and seed size effects on germination and seedling characteristics of dryland chickpea genotypes. *Iranian Dryland Agronomy Journal*, 5(1), 19-30. <https://doi.org/10.22092/idaaj.2016.107100> [In Persian]
- Saha, D., Choyal, P., Mishra, U. N., Dey, P., Bose, B., Prathibha, M. D., Gupta, N. K., Mehta, B. K., Kumar, P., Pandey, S., & Singhal, R. K. (2022). Drought stress responses and inducing tolerance by seed priming approach in plants. *Plant Stress*, 4, 100066. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100066>
- Sarr, M. S., Seiler, J. R., & Sullivan, J. (2024). Effect of drought stress on the physiology and early growth of seven *Senegalia* (*Acacia*) *senegal* (L.) Britton provenances. *New Forests*, 55(5), 1145-1158. <https://doi.org/10.1007/s11056-023-10027-5>
- Sazegari, S., Zinati, Z., & Tahmasebi, A. (2020). Dynamic transcriptomic analysis uncovers key genes and mechanisms involved in seed priming-induced tolerance to drought in barley. *Gene Reports*, 21, 100941. <https://doi.org/10.1016/j.genrep.2020.100941>
- Scott, S. J., Jones, R. A., & Williams, W. (1984). Review of data analysis methods for seed germination. *Crop Science*, 24(6), 1192-1199. <https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400060043x>
- Singhal, R. K., Pandey, S., & Bose, B. (2021). Seed priming with $Mg(NO_3)_2$ and $ZnSO_4$ salts triggers physio-biochemical and antioxidant defense to induce water stress adaptation in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Stress*, 2, 100037. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100037>
- Sleimi, N., Guerfali, S., & Bankaji, I. (2015). Biochemical indicators of salt stress in *Plantago maritima*: Implications for environmental stress assessment. *Ecological Indicators*, 48, 570-577. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.08.035>
- Sripathy, K. V., & Groot, S. P. (2023). Seed development and maturation. In *Seed Science and Technology: Biology, Production, Quality* (pp. 17-38). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-5888-5_2
- Srivastava, A. K., Suresh Kumar, J., & Suprasanna, P. (2021). Seed 'primeomics': Plants memorize their germination under stress. *Biological Reviews*, 96(5), 1723-1743. <https://doi.org/10.1111/brev.12722>
- Tang, D., Wei, F., Qin, S., Khan, A., Kashif, M. H., & Zhou, R. (2019). Polyethylene glycol-induced drought stress strongly influences seed germination, root morphology, and cytoplasm of different kenaf genotypes. *Industrial Crops and Products*, 137, 180-186. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.019>

Tao, Q., Chen, D., Bai, M., Zhang, Y., Zhang, R., Chen, X., Sun, X., Niu, T., Nie, Y., Zhong, S., & Sun, J. (2023). Hydrotime model parameters estimate seed vigor and predict seedling emergence performance of *Astragalus sinicus* under various environmental conditions. *Plants*, 12(9), 1876. <https://doi.org/10.3390/plants12091876>

Vishwas, S., Chaurasia, A. K., Bara, B. M., Debnath, A., Parihar, N. N., Brunda, K., & Saxena, R. (2017). Effect of priming on germination and seedling establishment of chickpea (*Cicer arietinum* L.) seeds. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6(4), 72-74.

Wijewardana, C., Reddy, K. R., Krutz, L. J., Gao, W., & Bellaloui, N. (2019). Drought stress has transgenerational effects on soybean seed germination and seedling vigor. *PLOS ONE*, 14(9), e0214977. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214977>

Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., & Chen, S. (2021). Response mechanism of plants to drought stress. *Horticulturae*, 7(3), 50. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7030050>

Ye, Y., Cota-Ruiz, K., Hernández-Viezas, J. A., Valdes, C., Medina-Velo, I. A., Turley, R. S., Peralta-Videa, J. R., & Gardea-Torresdey, J. L. (2020). Manganese nanoparticles control salinity-modulated molecular responses in *Capsicum annuum* L. through priming: A sustainable approach for agriculture. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(3), 1427-1436. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b05615>

In Press