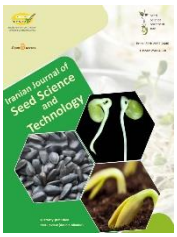
2025, 14 (2), 31-54 https://doi.org/10.22092/ijsst.2024.365419.1521

Seed Science Society of Iran

Seed and Plant Certification and Registration Institute

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 Teimouri[1], Mohsen Saeidi[2*], Mahmood Khoramivafa[2], Shahab Khoshkhoi[3]

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., & 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*, *14* (2), 31-54. https://doi.org/10.22092/ijsst.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.

دوره ۱۴، شماره ۲، صفحات ۵۴-۳۱ https://doi.org/10.22092/ijsst.2024.365419.1521

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]، محسن سعیدی[۲*]، محمود خرمی وفا[۲]، شهاب خوشخوی[۳]

۱. دانشجوی پسادکترا، 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.

چکیده

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 پلی‌اتلین گلایکول 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 بنیه طولی جوانه‌زنی به ترتیب با ۹۶، ۹۳ 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 بنیه جوانه‌زنی در عدم تنش خشکی و بر درصد جوانه‌زنی در تنش خشکی داشتند. بیش‌ترین بنیه 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 بنیه 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.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۴

واژه‌های کلیدی:
بنیه وزنی بذر،
سرعت جوانه‌زنی،
ضریب آلومتریک،
مقایسه گروهی

نویسنده مسئول:
msaeidi@razi.ac.ir

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*, *14* (2), 31-54. https://doi.org/10.22092/ijsst.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 دسته بندی 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 در صد می شود (Fahad et al., 2017; Hussain et al., 2019). طبق آمار موجود حدود چهار پنجم از مساحت زمین‌های کشاورزی جهان و بیش از ۹۰ در صد 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 نموی 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 آن ها 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 می شود (Sleimi et al., 2013). یکی از دلایل اصلی کاهش جوانه‌زنی در شرایط وقوع تنش خشکی، طولانی شدن زمان آبنوشی 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 (پیش‌تیمار) یکی از راه‌کارهای موثر در جهت افزایش کیفیت جوانه‌زنی بذر است. در نتیجه بذر پرایم شده بنیه 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 فعالیت های 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 می شود (Saha et al., 2022). پرایمینگ بذر زمان سبز شدن گیاهچه را به حداقل رسانده و گیاهان قوی‌تری تولید می‌کند که به تنش های مختلف زنده و غیرزنده متحمل‌تر هستند (Mehmood et al., 2021).

در مطالعات متعدد به اثبات رسیده که پرایمینگ بذر بهبود جوانه‌زنی گونه های 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 بنیه 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 کود ها و محرک های 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 میلی‌گرم در لیتر نانوذرات اکسید آهن سبب افزایش ۳۸ درصدی طول ریشه شد. در همین ارتباط (Manzoor et

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 راه‌کارهای 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 بذرهای 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 محلول های 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 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 تاثیر 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).

$$\Psi s_{(bar)} = -(1.18 \times 10^{-2})\, C - (1.18 \times 10^{-4})\, C2 + (2.67 \times 10^{-4})\, CT + (8.39 \times 10^{-7})\, C^2T \quad (1)$$

در این معادله، Ψs: پتانسیل اسمزی بر حسب بار، C: غلظت پلی اتیلن گلایکول بر حسب گرم در کیلوگرم آب، T: درجه حرارت محیط بر حسب سیلسیوس بودند.

هر واحد آزمایشی شامل ۲۵ عدد بذر بود که در داخل یک پتری دیش (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، پتری دیش‌ها نیز توسط هیپوکلریت سدیم استریل شدند. در هر پتری دیش، میزان ۱۰ میلی‌لیتر محلول مورد نظر زیر کاغذ صافی ریخته شد و سپس به ژرمیناتور منتقل شدند و در دمای ۱±۲۰ 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 بذرهای 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

(Alen et al., 1985). در پایان آزمایش تعداد بذرهای جوانه‌زده‌ای که گیاهچه غیرنرمال تولید کرده بودند نیز شمارش شدند. شرایط این بذرها به نوعی اســت که در صــورت انتقال به مزرعه قادر به ایجاد گیاهچه نرمال نخواهند بود (ISTA, 2016). در این آزمون، جهت برآورد طول ســاقه‌چه و ریشــه‌چه، در هر پلیت ۱۰ بذر جوانه‌زده به طور تصادفی انتخاب شد، و توسط کولیس دیجیتالی این صــفت‌ها اندازه‌گیری شــدند. در ادامه وزن تر و خشــک ریشــه‌چه، ســاقه‌چه و گیاهچه نیز با قراردادن این بخش‌ها به مدت ۲۴ ســاعت در آون با دمای ۷۲ درجه ســانتی‌گراد توســط ترازوی دقیق دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شــدند. در ادامه صــفت‌های درصــد و ســرعت جوانه‌زنی، متوســط زمان لازم برای جوانه‌زنی، متوســط جوانه‌زنی روزانه، شــاخص طولی و وزنی بنیه گیاهچه و ضــریب الومتریک جوانه‌زنی نیز براســاس اطلاعات جدول ۱ محاسبه شدند.

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	$GP = (N\times100) / M$	ISTA, 2016
سرعت جوانه‌زنی Germination rate	$GR = \Sigma N_i / T_i$	Maguire, 1962
متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی Mean germination time	$(MGT) = \Sigma (N_i \times D_i)/ \Sigma N$	Ellis & Roberts, 1981
متوسط جوانه‌زنی روزانه Mean daily germination	$(MDG) = GP/T$	Scott et al., 1984
شاخص طولی بنیه گیاهچه Seedling vigor length	$(SVL) = GP \times SL$	Abdul-Baki & Anderson, 1973
شاخص وزنی بنیه 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 بذرهای 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 بذرهای جوانه‌زده، SVW : شاخص وزنی بنیه گیاهچه، SVL: شاخص طولی بنیه 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, Ni: number of germinated seeds per day, Ti: number of days elapsed since the start of the experiment, MTG: average time required for germination, Di: number of days after the start of germination, ∑Ni: 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

پس از بررســی نرمال بودن روند توزیع داده‌ها و در صــورت 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 ($P\leq0.05$) 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 سطح از تیمار تنش خشــکی از بررســی‌های آماری حذف شــد. 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 اســمزی ۸- بار باعث توقف کامل جوانه‌زنی نخود شــد. 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 بررســی قرار گرفت. از آنجا که

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 آلومتریک جوانه‌زنی) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. تیمار پرایمینگ بذر نیز به غیر از وزن خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه و ضریب آلومتریک 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 آلومتریک 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 A ۱) به ترتیب ۲۵ و ۶۶ درصد، وزن تر گیاهچه (شکل B ۱) به ترتیب ۵۵ و ۷۴ درصد، طول ریشه‌چه (شکل C ۱) به ترتیب ۳۳ و ۵۸ درصد، وزن تر ریشه‌چه (شکل D ۱) ۵۷ و ۷۱ درصد، وزن خشک ریشه‌چه (شکل E ۱) به ترتیب ۴۰ و ۵۸ درصد و طول ساقه‌چه (شکل F ۱) ۴۰ و ۸۶ درصد و وزن خشک ساقه‌چه (شکل G ۱) ۲۸ و ۶۸ در صد 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).

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 توسعه پذیری، رشد طولی و تجمع ماده خشک ریشه چه 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 A ۲) در این شرایط در تیمار پرایمینگ آهن نانوذره ۶۰-۴۰ 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 پرایمنگ 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 ۱۰۰-۱ 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 می توان بیان کرد که تیمار نانو ذره

۶۰-۴۰ نانومتر بیش‌ترین تاثیر را در افزایش طول گیاهچه داشت.

بیش‌ترین وزن تر گیاهچه در تیمار پرایمینگ بذر 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 بذر مشاهده شد. با افزایش غلظت تیمارهای پرایمینگ بذر 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 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 سریع‌تر و ورود کارآمدتر این ذرات به درون سلول‌های گیاهی مرتبط باشد، زیرا قطر منافذ دیواره سلول‌های گیاهی در محدوده ۲۰-۵ نانومتر و پلا سمود سماتاها در محدوده ۶۰-۵۰ نانومتر است (Peter et al., 2021).

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

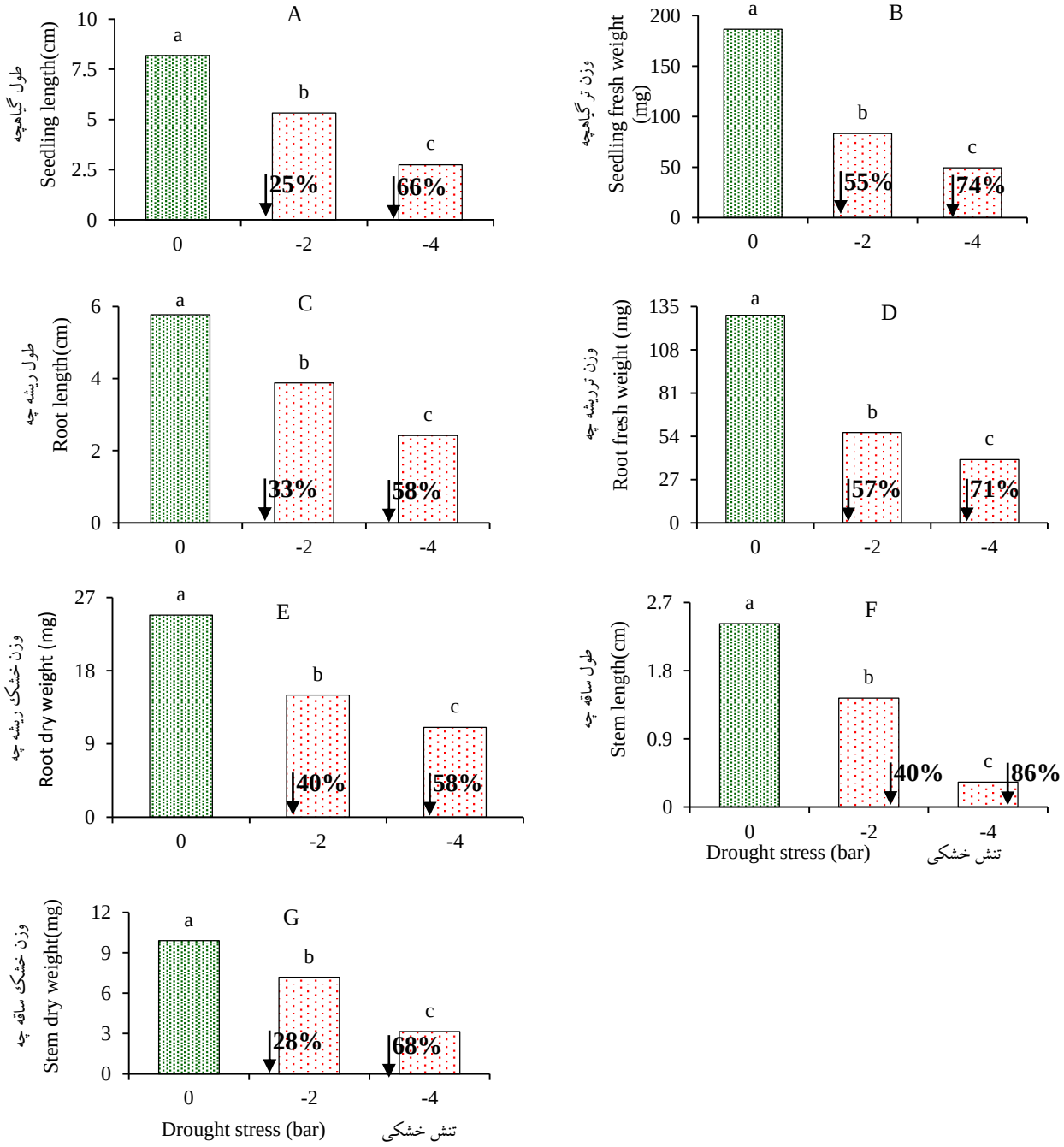
Table 2- Variance analysis (mean square) of drought stress and seed priming effects on Chickpea seed germination and growth

منابع تغییرات Sources of variations	درجه آزادی d.f.	طول گیاهچه Seedling length	وزن‌تر گیاهچه Seedling fresh weight	وزن خشک گیاهچه Seedling dry weight	طول ریشه‌چه Root length	وزن‌تر ریشه‌چه Root fresh weight	وزن خشک ریشه‌چه Root dry weight	طول ساقه‌چه Shoot length	وزن تر ساقه‌چه Shoot fresh weight	وزن خشک ساقه‌چه 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 بذر 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	متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی Mean germination time	متوسط جوانه‌زنی روزانه Mean daily germination	شاخص طولی بنیه گیاهچه Seedling vigor length	شاخص وزنی بنیه گیاهچه Seedling vigor weight	ضریب آلومتریک Allometric coefficient	ساقه‌چه/ریشه‌چه Root/Shoot
تنش خشکی Drought stress (D)	2	35592**	2404**	146**	556**	4174061**	72930142**	0.252**	443**
پرایمینگ بذر 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**	2870ns	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 ریشه‌چه (C, D, E)، طول و وزن خشک ساقه‌چه (F, G) نخود تحت تاثیر تیمارهای مختلف پرایمینگ بذر. براساس آزمون دانکن، ستون‌ها با حروف یکسان در سطح احتمال پنج درصد با هم تفاوت معنی‌دار ندارند.

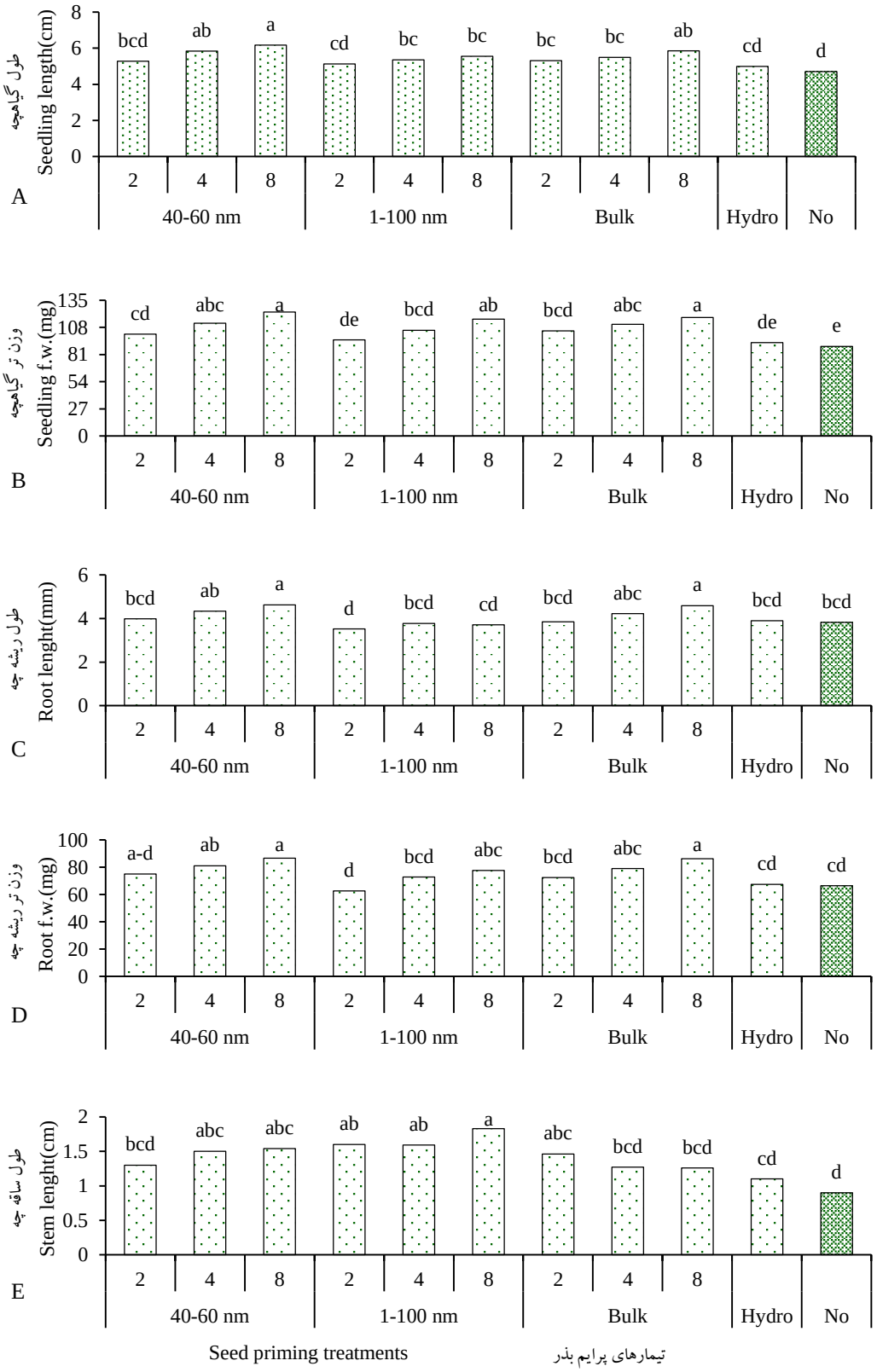
Fig. 1- Mean comparison of the effect of drought stress on the length and fresh weight of seedlings (A, B), length, fresh and dry weight of roots (C, D, E) and length and dry weight of shoots (F, G) under seed priming treatments in Chickpea. According to Duncan's test, the columns with the same letters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

همچنین Mazhar et al. (2023) در بررسی اثر پرایمینگ بذر با نانوذرات آهن بر کیفیت جوانه‌زنی بذر نخود سبز گزارش نمودند که نانوذرات آهن بر سرعت فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان اثر مثبت داشته است. در این شرایط نانوذرات آهن در غلظت ۷۵ میلی‌گرم در لیتر سرعت فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز را به ترتیب ۱۳ و ۳۸ در صد در

بذر در حال جوانه‌زنی افزایش دادند. بنابراین به نظر می‌رسد که نانوذرات آهن از طریق تحریک فعالیت آنتی‌اکسیدان ها 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 می شود (Acharya et al., 2020).

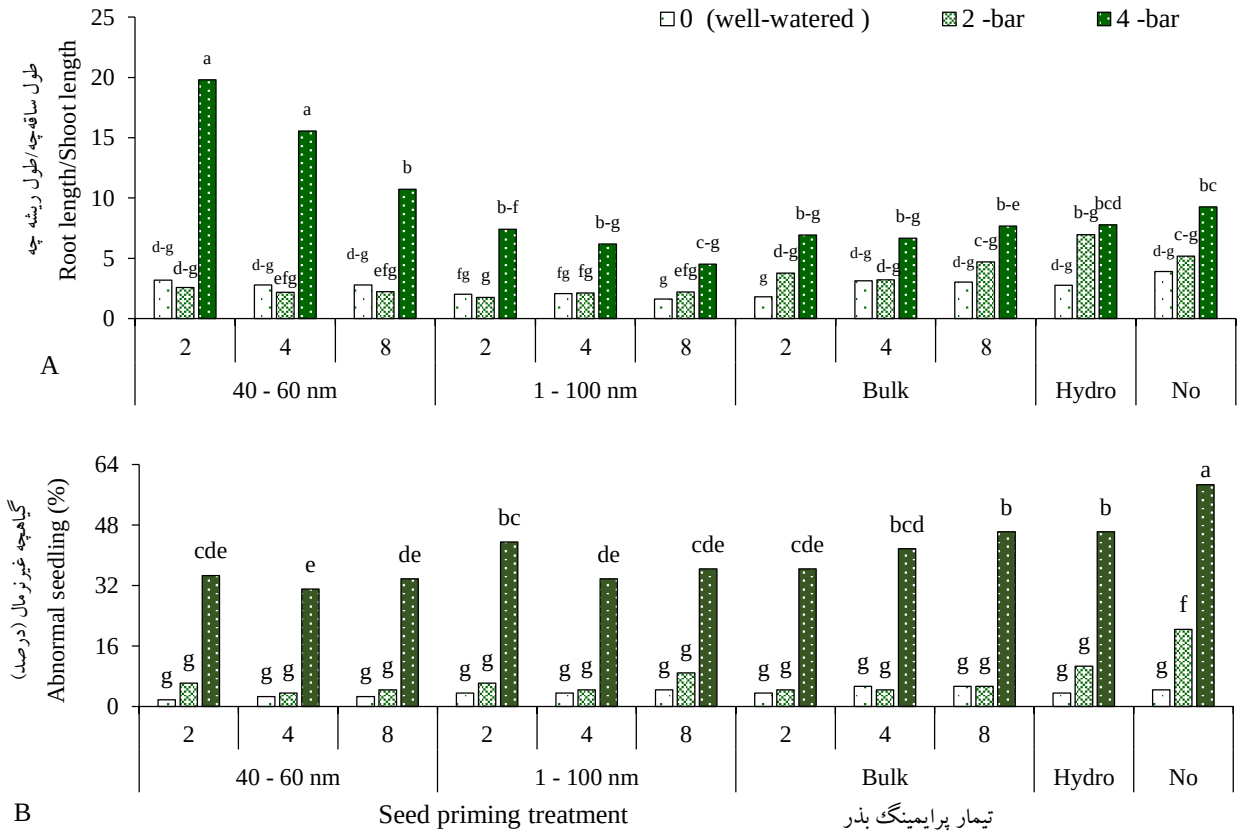
بیش‌ترین طول ریشه‌چه در تیمار پرایمینگ بذر با آهن نانوذره ۶۰-۴۰ نانومتر در غلظت ۸ گرم در لیتر مشاهده شد که با تیمارهای آهن نانوذره ۴۰-۶۰ در غلظت ۴ گرم در لیتر و بالک در غلظت ۸ گرم در لیتر و بالک در غلظت ۴ گرم در لیتر اختلاف معنی‌داری نداشت. کم‌ترین طول ریشه‌چه نیز در تیمار آهن نانوذره ۱۰۰-۱ نانومتردر غلظت ۲ گرم در لیتر مشاهده شد (شکل ۲ C). بیش‌ترین وزن تر ریشه‌چه نیز در تیمار آهن نانوذره ۴۰-۶۰ نانومتر در غلظت ۸ گرم در لیتر و کم‌ترین وزن‌تر ریشه‌چه هم در تیمار آهن نانوذره ۱۰۰-۱ نانومتردر غلظت ۲ گرم در لیتر مشاهده گردید که با تیمارهای عدم پرایم و هیدروپرایم تفاوت معنی‌دار نداشت (شکل ۲ D). بیش‌ترین طول ساقه‌چه در تیمار پرایمینگ با آهن نانوذره ۱۰۰-۱ نانومتر در غلظت ۸ گرم در لیتر مشاهده شد.کم‌ترین طول ساقه‌چه نیز در تیمار عدم پرایمینگ بذر مشاهده گردید. با افزایش غلظت تیمارهای پرایمینگ با آهن طول ساقه‌چه در تیمارهای آهن نانوذره ۴۰-۶۰ نانومتر و ۱-۱۰۰ 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 ۲ E). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی × پرایمینگ بذر بر نسبت طول ریشه‌چه به ساقه‌چه نشان داد، در شرایط عدم پرایم بذر (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 بذر 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 بذر با آهن نانوذره ۶۰-۴۰ نانومتر در مقایسه با سایر تیمارهای پرایم بذر سبب افزایش معنی‌دار نسبت ریشه‌چه به ساقه‌چه (۱۹/۸) نسبت به تیمار شاهد (۹/۲۷) شد. در این شرایط با افزایش غلظت آهن نانوذره ۶۰-۴۰ نسبت ریشه‌چه به ساقه‌چه به طور معنی‌دار کاهش یافت (شکل ۳ A). 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 بذرهای غیرنرمال وجود نداشت و در تیمارهای مختلف (پرایم و عدم پرایم بذر) بین ۱/۷۸ تا ۴/۴۵ درصد متغیر بود. در تیمار تنش خشکی ۲- بار، بیش‌ترین درصد بذرهای غیرنرمال مربوط به شرایط شاهد یا عدم پرایم بذر با ۲۰/۴ درصد بود. سایر تیمارهای پرایم بذر سبب کاهش معنی‌دار در صد بذرهای غیرنرمال در این شرایط شدند، اما تفاوت معنی‌داری بین آن‌ها وجود نداشت. در شرایط اعمال تیمار تنش خشکی ۴- بار، بیش‌ترین درصد بذرهای غیرنرمال مربوط به شرایط شاهد یا عدم پرایم بذر با ۵۸/۷ درصد بود. سایر تیمارهای پرایم بذر سبب کاهش تعداد بذرهای غیرنرمال نسبت به تیمار شاهد شدند. بیش‌ترین کاهش درصد بذرهای غیرنرمال در این شرایط مربوط به تیمار پرایم بذر 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 بذرهای غیرنرمال شد. از طرفی تیمارهای پرایم بذر سبب کاهش معنی‌دار درصد بذرهای غیرنرمال شدند (شکل ۳ B). 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 گونه های فعال اکسیژن و خسارت ناشی از آن ها در ایجاد گیاهچه‌های غیرنرمال نقش کلیدی داشته باشد (Alam et al., 2022; Hasanuzzaman et al., 2017). بنابراین پرایمینگ بذر 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.



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر تیمار پرایمینگ بذر با آهن نانوذره با اندازه ذرات مختلف و فرم بالک آن و هیدروپرایم بر طول و وزن گیاهچه (A, B)، طول ریشه‌چه (C) و وزن تر و طول ساقه‌چه (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.



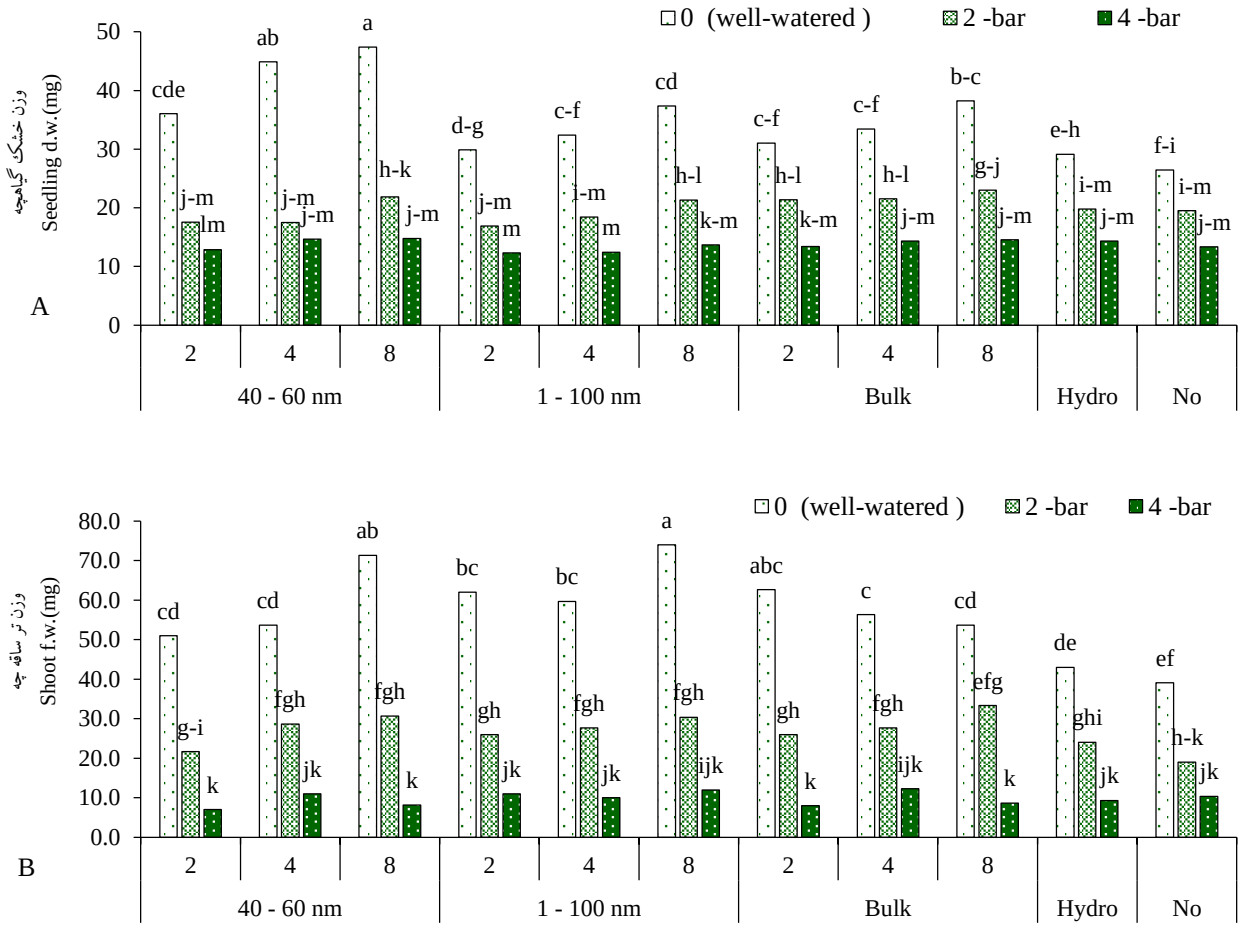
شکل ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل دو جانبه پرایمینگ بذر با آهن نانوذره با اندازه ذرات مختلف و فرم بالک آن و هیدروپرایم × تنش خشکی بر نسبت طول ریشه‌چه به طول ساقه‌چه (A) ودرصد گیاهچه غیرنرمال (B) نخود. براساس آزمون دانکن، ستون‌ها با حروف یکسان در سطح احتمال پنج درصد با هم تفاوت معنی‌دار ندارند.

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.

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی × پرایمنگ 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 ۶۰-۴۰ نانومتر در غلظت ۸ گرم در لیتر و تیمار عدم تنش خشکی به دست آمد. در شرایط تنش خشکی ۴- بار نیز پرایمینگ بذر با غلظت‌های ۸ گرم در لیتر آهن نانوذره ۶۰-۴۰ 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

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



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل دو جانبه پرایمینگ بذر با آهن نانوذره با اندازه ذرات مختلف و فرم بالک آن و هیدروپرایم × 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.

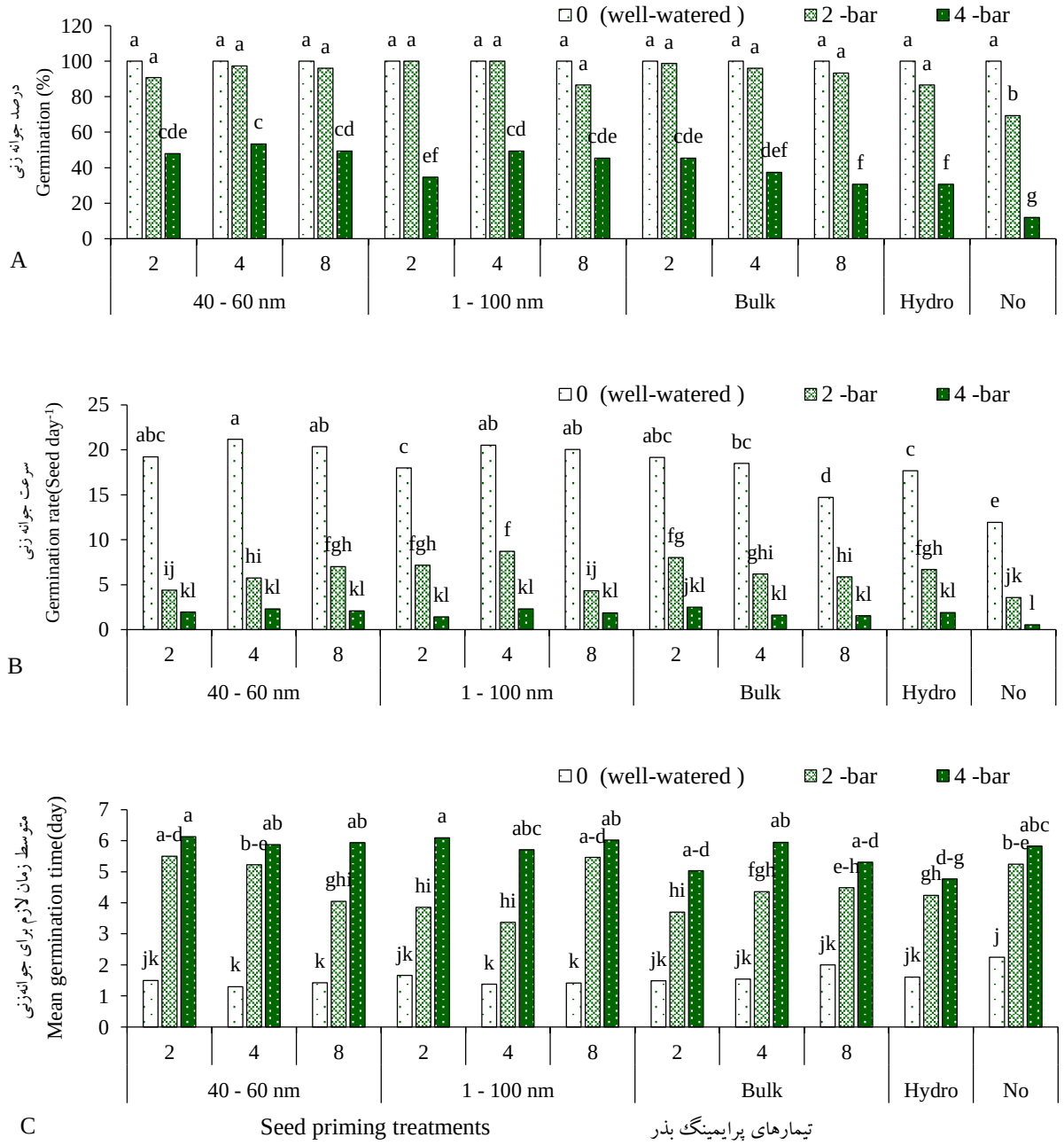
Fig. 4- Mean comparison of two-way interaction of seed priming with nanoparticle iron with different particle size and bulk form and hydropriming × drought stress on seedling dry weight (A) and shoot fresh weight (B) of Chickpea. According to Duncan's test, the columns with the same letters are not significantly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

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 بذور به طور معنی‌داری کاهش 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.

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 تیمار های 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 در صد 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 می شود، 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 ۴۰-۶۰ 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 در صد 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 تجزیه کننده 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

آلفا آمیلاز در بذر دارد (Długosz et al., 2021; Monajjem et al., 2023). در بررسی‌های مشابه تحقیق حاضر، (Afzal et al. 2021) و Li et al. (2021) نشان دادند که پرایمینگ بذر برنج به ترتیب با آهن و روی باعث افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز می‌شود. این آنزیم با تجزیه نشاسته موجود در لپه‌ها و انتقال آن به گیاهچه‌ها، نقش کلیدی در جوانه‌زنی بذر گیاهان دارد.



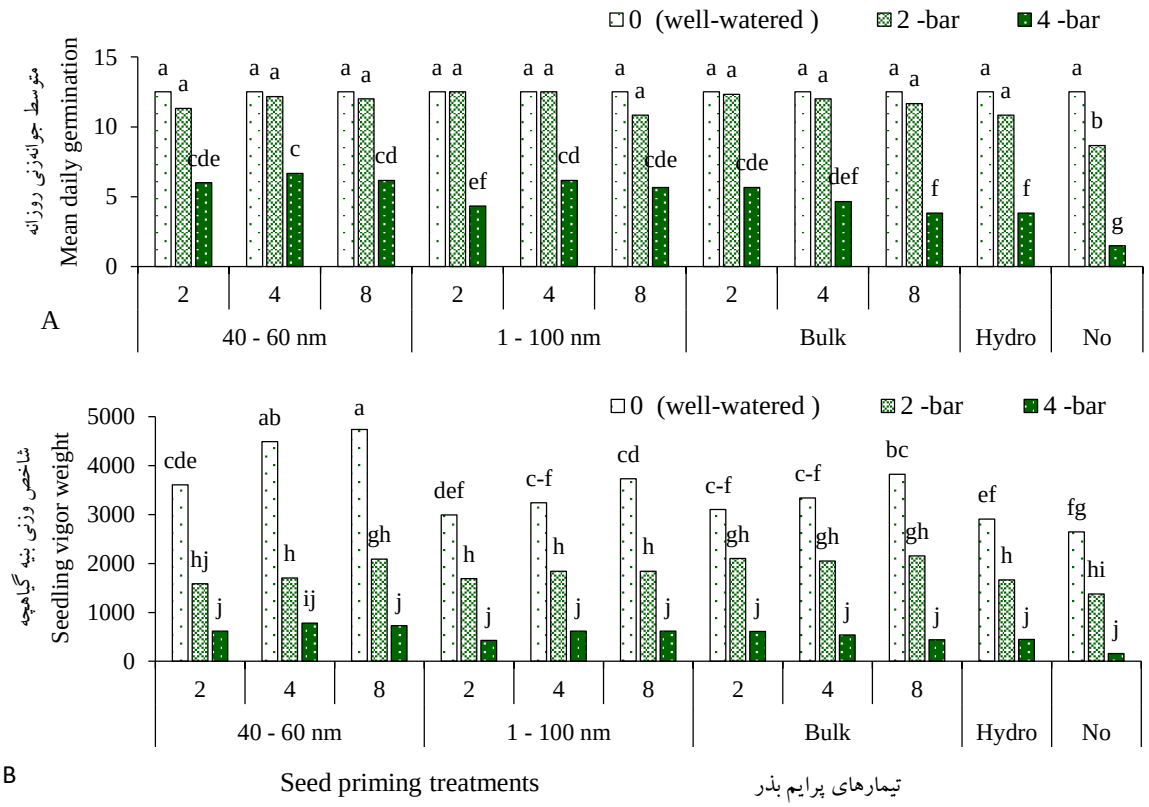
شکل ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل دو جانبه پرایمینگ بذر با آهن نانوذره با اندازه ذرات مختلف و فرم بالک آن و هیدروپرایم × تنش خشکی بر درصد جوانه‌زنی (A)، سرعت جوانه‌زنی (B) و متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی (C) بذر نخود. براساس آزمون دانکن، ستون‌ها با حروف یکسان در سطح احتمال پنج درصد با هم تفاوت معنی‌دار 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 C ۵). 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 A ۶).

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 خشکی۴- بار در تیمار بدون پرایمینگ بود (شکل B ۶). در این ارتباط، Parvar et al. (2019) در بررسی اثر پرایمینگ بذر با نانوذرات آهن بر نخود زراعی نشان دادند که بذرهای 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 فسفریلاسیونی سلول باشد (Acharya et al., 2020).

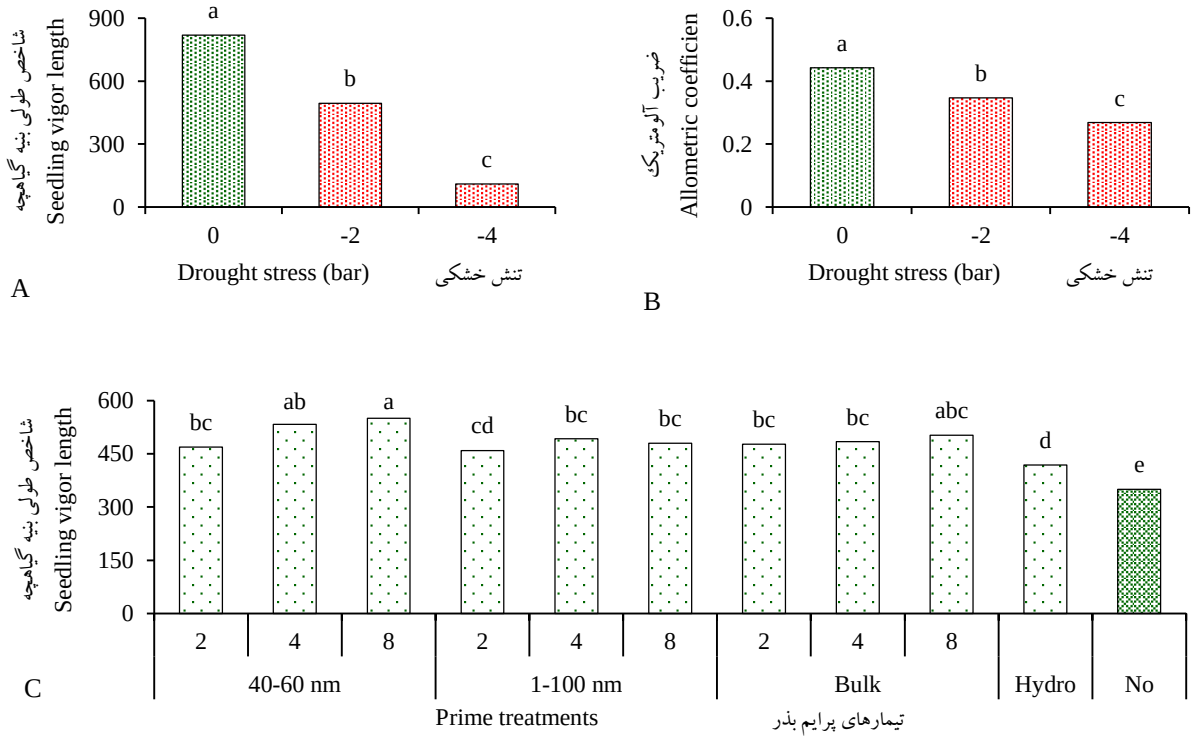


شکل ۶- مقایسه میانگین اثر متقابل دو جانبه پرایمینگ بذر با آهن نانوذره با اندازه ذرات مختلف و فرم بالک آن و هیدروپرایم × تنش خشکی بر متوسط جوانه‌زنی روزانه (A) و شاخص وزنی بنیه گیاهچه (B) نخود. براساس آزمون دانکن، ستون‌ها با حروف یکسان در سطح احتمال پنج درصد با هم تفاوت معنی‌دار ندارند.

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.

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با افزایش شدت تنش خشکی مقدار شاخص طولی بنیه گیاهچه در تیمارهای ۲- و ۴- بار به ترتیب ۴۰ و ۸۷ درصد نسبت به شرایط عدم تنش خشکی کاهش یافت (شکل A ۷). سایر تیمارهای پرایمینگ بذر سبب افزایش معنی‌دار شاخص طولی بنیه 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 B ۶). شاخص بنیه گیاهچه معرف درصد و پتانسیل جوانه‌زنی است. هر چه کیفیت بذر پایین‌تر باشد، درصد جوانه‌زنی نیز پایین‌تر و شاخص بنیه گیاهچه کاهش می‌یابد (Sripathy & Groot, 2023). Ahmadpour et al. (2022) در تحقیق بر روی نخود زراعی، کاهش ۸۹ درصدی بنیه گیاهچه را در اثر افزایش شدت تنش خشکی تا ۹- بار گزارش کردند. Nyaupane et al. (2024) 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 بنیه 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 در صد نسبت به شرایط عدم تنش خشکی کاهش یافت (شکل C ۷). 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).



شکل ۷- مقایسه میانگین اثر تنش خشکی بر شاخص طولی بنیه 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 بنیه 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.

به منظور تعیین بهترین گروه تیمار پرایمینگ بذر مورد بررسی در این تحقیق، میانگین غلظت‌های کودی محا سبه 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 ۴۰-۶۰ 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 ساقه‌چه نشان داد (جدول ۳)، در شرایط عدم تنش خشکی بذرهای پرایم شده با گروه‌های آهن نانوذره ۱-۱۰۰ نانومتر و ۴۰-۶۰ نانومتر بیش‌ترین تاثیر را در افزایش وزن تر ساقه‌چه 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 ساقه‌چه 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، گروه های پرایمینگ بذر آهن نانوذره ۴۰-۶۰ و ۱-۱۰۰ 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 بذر آهن نانوذره ۴۰-۶۰ و ۱-۱۰۰ موثرتر بودند. البته در این شرایط گروه آهن نانوذره ۴۰-۶۰ نانومتر از گروه ۱-۱۰۰ نانومتر نیز از نظر

عـددی برتر بود. گروه‌هـای پرایمینـگ بـذر بـا آهن بـالـک و هیدروپرایم نیز در رتبه دوم از عدم پرایم بذر در این شـــرایط 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 Water regimes	آهن (۶۰-۴۰ نانومتر) Fe (1-100 nm)	آهن (۱۰۰-۱ نانومتر) Fe (1-100 nm)	آهن بالک Fe Bulk	هیدرو پرایم Hydro prime	عدم پرایم Nonprime
بدون تنش خشکی Well-watered	42.8a	33.2bc	34.2b	29.10bcd	26.4cde
۲- بار -2 bar	18.9efg	18.9efg	21.9def	19.76efg	19.5efg
۴- بار -4 bar	14.1fg	12.8g	14.1fg	14.34fg	13.3g

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 ساقه‌چه نخود

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

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

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

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.

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

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

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 بنیه 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 این‌که در پرایمینگ بذر مقدار مصرف ترکیبات ذکر شده بسیار کم است، بنابراین پرایمینگ بذر از نظر اقتصادی قابل توجیه است.

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تعارض منافعی 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., Jayaprakasha, 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/agronj1985.00021962007700010023x

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 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., & Rodriguez-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/idaj.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(NO3)2 and ZnSO4 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/brv.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-Viezcas, 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