University of Birjand

Environmental Stresses in Crop Sciences

Journal homepage: https://escs.birjand.ac.ir

19(2), 259-274 (2026)

https://doi.org/10.22077/escs.2025.8462.2322

Original article

Effect of seed priming with growth-regulating compounds on germination and early growth of two stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) ecotypes under water stress

Ali Ghaderi[1], Mohammad Moghaddam[2*], Shahram Rezvan[3]

1. *Department of Horticultural, Damghan Branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran*
2. *Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad,Iran*
3. *Agriculture, Production and Technology of Herbal Medicines Research Center, Damghan Branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran*

Received 21 November 2024; Revised 7 January 2025; Accepted 8 January 2025

Extended abstract

Introduction

Water stress is a critical factor limiting agricultural productivity worldwide, adversely affecting seed germination and plant growth. Water-deficit stress poses significant challenges to achieving optimal crop production by reducing germination rates, root development, nutrient uptake, and chlorophyll synthesis. Seed priming has emerged as a promising strategy to enhance crop tolerance to abiotic stresses. This technique not only improves seed germination and seedling growth under stressful conditions but also accelerates plant development, reduces the growth cycle duration, and increases overall crop yield. Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni), a medicinal plant and natural sweetener from the Asteraceae family, is native to Paraguay, South America, and is now cultivated in many countries worldwide. Its high sweetening capacity and non-caloric properties have made stevia a plant of considerable economic significance globally. This study aimed to evaluate the most effective seed priming methods to enhance the germination and early growth of stevia under drought stress, thereby supporting its cultivation in arid and semi-arid regions.

Materials and methods

The study was conducted as a factorial experiment in a completely randomized design with three replications during 2023–2024 at the Seed Research Laboratory, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad. The experimental factors included two Stevia rebaudiana ecotypes (Chinese and Indian), seven seed priming treatments [non-primed (control), hydropriming, strigolactone (SLs), forchlorfenuron (CPPU), selenium (Se), combination of CPPU + SLs, and combination of SLs + Se], and four water stress levels (0, −0.25, −0.5, and −1 MPa). Osmotic stress levels were simulated using polyethylene glycol 6000 (PEG 6000). Germination was monitored daily from the second day of the experiment. The number of germinated seeds was recorded daily, and germination traits, including germination percentage (assessed on day 11, with radicle emergence as the germination criterion), germination rate, mean germination time, mean daily germination, daily germination rate (inverse of mean daily germination), seedling length, and seedling vigor index (based on length), were measured. Data analysis was carried out using SAS 9.1 software, and mean comparisons were performed using the LSD test at a 5% probability level.

Results and discussion

The results of this experiment indicated that in the Indian ecotype, the germination percentage in the combined treatment of SLs and Se reached 70%, showing a 15% increase compared to the control

* Corresponding author: Mohammad Moghaddam; E-Mail: M.moghadam@um.ac.ir

© 2026, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

treatment. Additionally, the germination rate in this treatment reached 9.13 seeds per day, which was double the lowest rate observed in the control treatment. Similarly, the highest mean daily germination and seedling vigor index were recorded in seeds primed with the combination of SLs and Se, reaching 3.18 seeds per day and 164.4, respectively. Seedling length achieved its highest average in the combined treatment of SLs and CPPU, indicating a significant improvement compared to the control treatment.

Conclusion

Overall, under non-stress conditions, the combined treatment of SLs + Se in the Indian ecotype and the SLs treatment in the Chinese ecotype effectively enhanced seed germination traits. The Indian ecotype demonstrated greater tolerance to water stress compared to the Chinese ecotype and responded more favorably to priming treatments. The combination of SLs and Se was identified as the most effective priming treatment, significantly improving the germination and early growth of stevia plants.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge all staff of the laboratories at the Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, and Damghan University for their support in carrying out this project.

Keywords: Drought stress, Germination percentage, Seed priming, Stevia ecotype, Strigol

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد نوزدهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۵

https://doi.org/10.22077/escs.2025.8462.2322

مقاله پژوهشی

ارزیابی اثر پیش‌تیمار بذر با ترکیبات تنظیم‌کننده رشد بر جوانه‌زنی و رشد اولیه دو اکوتیپ استویا (*Stevia rebaudiana* Bertoni) تحت تنش آبی

علی قادری[۱]، محمد مقدم[۲*]، شهرام رضوان[۳]

۱. گروه علوم باغبانی، واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان
۲. گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
۳. مرکز تحقیقات تولید و فن‌آوری داروهای گیاهی، واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
استریگول
پرایمینگ بذر
تنش آبی
درصد جوانه‌زنی
اکوتیپ استویا

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۹

تاریخ انتشار:
تابستان ۱۴۰۵
۱۹(۲): ۲۵۹-۲۷۴

چکیده

تنش آبی با اثرات منفی بر فرآیندهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه، مراحل جوانه‌زنی و رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پرایمینگ بذر با تنظیم‌کننده‌های رشد یک روش در دسترس، مقرون‌به‌صرفه و مؤثر برای افزایش تحمل گیاه به تنش آبی است. مطالعه حاضر به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح آزمایشی کاملاً تصادفی در سه تکرار که در آن اثر پرایمینگ بذر (بدون پرایمینگ، هیدروپرایمینگ، محرک رشد استریگول، هورمون فورکلرفنورون، عنصر سلنیوم، ترکیب فورکلرفنورون + استریگول و ترکیب استریگول + سلنیوم) بر روی دو اکوتیپ استویا (چینی و هندی) تحت شرایط تنش آبی (صفر، ۰/۲۵-، ۰/۵- و ۱- مگاپاسکال) در آزمایشگاه تحقیقات بذر دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در طی سال ۱۴۰۲ موردبررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش حاضر نشان داد که در اکوتیپ هندی، درصد جوانه‌زنی در تیمار ترکیبی استریگول و سلنیوم به ۷۰ درصد رسید که نسبت به تیمار شاهد ۱۵ درصد افزایش نشان داد. همچنین، سرعت جوانه‌زنی در این تیمار به ۹/۱۳ بذر در روز رسید که نسبت به کمترین مقدار مشاهده‌شده در تیمار شاهد دو برابر بود. به‌طور مشابه، بالاترین متوسط جوانه‌زنی روزانه و شاخص بنیه گیاهچه به ترتیب ۳/۱۸ بذر در روز و ۱۶۴/۴ در بذرهای پرایم شده اکوتیپ هندی با ترکیب استریگول و سلنیوم مشاهده شد. طول گیاهچه در تیمار ترکیبی استریگول و فلوکوروفنورون به بالاترین میانگین رسید که نشان‌دهنده افزایش قابل‌توجهی نسبت به تیمار شاهد بود. به‌طورکلی، تحت شرایط بدون تنش، تیمار ترکیبی استریگول + سلنیوم در اکوتیپ هندی و تیمار استریگول در اکوتیپ چینی به‌طور مؤثری ویژگی‌های جوانه‌زنی بذر را افزایش دادند. اکوتیپ هندی نسبت به اکوتیپ چینی تحمل بیشتری نسبت به تنش آبی نشان داد و پاسخ بهتری به تیمارهای پرایمینگ داد. ترکیب استریگول و سلنیوم به‌عنوان مؤثرترین تیمار پرایمینگ شناسایی شد که توانست به‌طور قابل‌توجهی جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاه استویا را بهبود بخشد.

مقدمه

تنش آبی، به‌ویژه در مرحله حساس جوانه‌زنی، یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده در تولید محصولات کشاورزی به شمار می‌رود. تغییرات اقلیمی و افزایش دما شدت این تنش را افزایش داده و ضرورت شناسایی گونه‌های مقاوم و متحمل به کم‌آبی را دوچندان کرده است (Gorzi et al., 2017). در مرحله جوانه‌زنی، بذر با چالش‌هایی نظیر کاهش رطوبت، افت پتانسیل آب خاک و افزایش تنش اسمزی مواجه می‌شود. این شرایط منجر به اختلال در جذب آب، کاهش فعالیت‌های آنزیمی، کندی فرآیندهای متابولیکی و درنهایت، کاهش درصد و سرعت جوانه‌زنی می‌شود (Muhammad et al., 2023). افزون بر این، تنش آبی می‌تواند قدرت بذر را برای تولید و حفظ جوانه‌های اولیه کاهش دهد و بر رشد ریشه‌چه اثر منفی بگذارد؛ این اثرات نامطلوب می‌توانند رشد و استقرار گیاه در مراحل بعدی را نیز تحت تأثیر قرار دهند (Tahir et

* نگارنده پاسخگو: محمد مقدم. پست الکترونیک: M.moghadam@um.ac.ir

al., 2023). بنابراین، موفقیت در استقرار گیاه و دستیابی به عملکرد بهینه محصول، به‌طور مستقیم از تنش آبی در مرحله جوانه‌زنی تأثیر می‌پذیرد (Ertuğrul et al., 2024). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که واکنش گونه‌های مختلف گیاهی به تنش آبی در این مرحله متفاوت است (Gorzi et al., 2017; Afshari et al., 2020). ازاین‌رو، شناسایی مکانیسم‌های مقاومت به خشکی در مرحله جوانه‌زنی و بهره‌گیری از این دانش در برنامه‌های اصلاح نباتات، یکی از راهبردهای کلیدی برای کاهش آثار منفی کم‌آبی در بخش کشاورزی به شمار می‌آید (Dalal et al., 2018).

پرایمینگ بذر به‌عنوان یک تکنیک پیش‌کاشت، نقشی کلیدی در بهبود توانایی گیاهان برای مقابله با تنش‌های محیطی ایفا می‌کند. این روش از طریق تحریک فرآیندهای متابولیکی در بذر و فعال‌سازی مکانیسم‌های دفاعی، باعث تسریع جوانه‌زنی و بهبود رشد اولیه گیاهچه می‌شود (Sarwar et al., 2023). در طی فرآیند پرایمینگ، ساختار بذر بدون تغییر باقی می‌ماند، اما سنتز RNA و پروتئین‌ها تقویت شده و سامانه‌های آنتی‌اکسیدانی فعال می‌شوند که به کاهش اثرات تنش‌های اکسیداتیو کمک می‌کند (Ahmad et al., 2020; Yan and Mao, 2021).

در میان انواع پرایمینگ، دو روش مهم شامل نوتری پرایمینگ[1] و هورمون پرایمینگ موردتوجه قرارگرفته‌اند. در روش نوتری پرایمینگ، عناصر غذایی به محلول پرایمینگ اضافه می‌شوند. این عناصر با تأمین مواد مغذی لازم برای بذر در مراحل اولیه رشد، سرعت جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاهچه را افزایش داده و مقاومت آن را در برابر تنش‌های محیطی و کمبود مواد غذایی بهبود می‌بخشند (Aghighi Shahverdi et al., 2017). در روش هورمون پرایمینگ، هورمون‌های گیاهی به محلول پرایمینگ افزوده می‌شوند. این هورمون‌ها با تنظیم فرآیندهای فیزیولوژیکی، ازجمله شکستن خواب بذر، تحریک تقسیم سلولی و افزایش رشد ریشه، به ارتقای جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاهچه کمک می‌کنند (Aghighi Shahverdi and Omidi, 2016). پیش‌تیمارهای مختلف ازجمله استفاده از مواد شیمیایی، هورمون‌ها و روش‌های فیزیکی می‌توانند به بهبود جوانه‌زنی و رشد گیاهان تحت تنش کم‌آبی کمک کنند. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که پیش‌تیمار با هورمون‌ها می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی جوانه‌زنی بذر را بهبود بخشد و تحمل گیاهان را در برابر تنش کم‌آبی افزایش دهد (Cáceres et al., 2023). تحت شرایط تنش‌های محیطی ازجمله کم‌آبی، پژوهشگران مختلف بیان داشتند که پرایمینگ بذر با ترکیبات مختلف ازجمله عناصر غذایی کم‌مصرف و پرمصرف و همچنین هورمون‌های گیاهی، منجر به افزایش شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه در بذر استویا گردید و میانگین این شاخص‌ها را تحت شرایط تنش بهبود بخشیدند (Gorzi et al., 2017; Afshari et al., 2020).

استریگولاکتون‌ها[2] فیتوهورمون‌های نسبتاً جدیدی هستند که از گیاه انگل استریگا نام‌گرفته‌اند و به‌عنوان یک کلاس جدید از هورمون‌های گیاهی شناخته می‌شوند که چندین فرآیند مختلف را در گیاهان تنظیم می‌کنند (Al-Amri et al., 2023). این هورمون‌ها به‌ویژه در تنظیم سازگاری گیاهان با تنش‌های محیطی، در تعامل با هورمون‌های دیگر مانند اسید آبسیزیک و اتیلن، نقش دارند (Omoarelojie et al., 2020). تاکنون پژوهشی درباره نقش استریگول برون‌زا در گیاه استویا انجام نشده است. فروکلروفنورون[3] به‌عنوان یک سیتوکنین مصنوعی، با تحریک تقسیم سلولی و رشد، تأثیر مثبتی بر جوانه‌زنی بذر و سایر فرآیندهای فیزیولوژیکی دارد (Singh et al., 2019; Naser and Abd-Alrahman 2023).

استویا (*Stevia rebaudiana* Bertoni)، یک گیاه دارویی و شیرین‌کننده طبیعی است که به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود، ازجمله قدرت شیرین‌کنندگی بالا و عدم تأثیر بر قند خون، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است (Milani et al., 2017). استویا که بومی پاراگوئه است، امروزه در بسیاری از کشورها کشت می‌شود. بااین‌حال، این گیاه به دلیل حساسیت بالا به تنش‌های محیطی مانند کم‌آبی، نیازمند مدیریت دقیق در فرآیند کشت و پرورش است (Aghighi Shahverdi et al., 2017). قرار گرفتن در معرض تنش‌های محیطی می‌تواند بر تمامی پارامترهای مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی استویا اثر گذاشته و موجب کاهش جوانه‌زنی، رشد گیاهچه و عملکرد آن شود (Janah et al., 2021). تحقیقات نشان می‌دهند که جوانه‌زنی بذر استویا به‌طورکلی در سطح پایینی قرار دارد و این امر به‌عنوان یک محدودیت جدی در تولید تجاری آن

[1] Nutri-primig
[2] Strigolactone
3 Forchlorfenuron

مطرح است (Afshari et al., 2020). علاوه بر این، تفاوت‌های ژنتیکی میان اکوتیپ‌های مختلف استویا منجر به تنوع قابل‌توجهی در شاخص‌های جوانه‌زنی می‌شود (Aghighi Shahverdi et al., 2017). ازاین‌رو، شناسایی روش‌های مؤثر برای بهبود جوانه‌زنی بذر و کاهش این محدودیت، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر تنش آبی و پیش تیمارهای مختلف بر جوانه‌زنی بذر و رشد دو اکوتیپ استویا انجام شد تا مناسب‌ترین روش‌ها برای ارتقای جوانه‌زنی و رشد این گیاه در شرایط تنش کم‌آبی شناسایی شود .

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار در سال ۱۴۰۲، در آزمایشگاه تحقیقات بذر دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد اجرا شد. فاکتورهای آزمایشی شامل تنش آبی (در چهار سطح)، پرایمینگ بذر (هفت سطح) و اکوتیپ استویا (دو سطح) بودند که مورد ارزیابی قرار گرفتند. دو اکوتیپ استویا (چینی و هندی) به‌عنوان مواد گیاهی انتخاب شدند و بذرهای آن‌ها تحت هفت تیمار پرایمینگ قرار گرفتند که شامل شاهد (بدون پرایمینگ)، هیدروپرایمینگ (خیساندن بذرها در آب مقطر)، استریگول (غلظت ۰/۰۱ میلی‌گرم بر لیتر)، فورکلرفنورون (با غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر)، سلنیوم (از منبع سلنیت با غلظت ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر)، ترکیب فورکلرفنورون + استریگول و ترکیب استریگول + سلنیوم بودند. برای اعمال تنش آبی، از محلول پلی‌اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ در چهار سطح صفر (شاهد)، ۰/۲۵-، ۰/۵- و ۱- مگاپاسکال استفاده شد.

مقادیر پلی‌اتیلن‌گلایکول ۶۰۰۰ موردنیاز برای هر سطح تنش بر اساس معادله ۱ محاسبه گردید (Michel and Kaufman, 1973).

$$S = (1.18\times10^{-2})\,C - (1.18\times10^{-4})\,C^2 + (1.18\times10^{-4})\,CT + (1.18\times10^{-7})\,C^2T \quad [1]$$

در این معادله، C غلظت پلی‌اتیلن‌گلایکول ۶۰۰۰ برحسب گرم در لیتر، T درجه‌حرارت برحسب درجه سانتی‌گراد و S پتانسیل آب برحسب بار است.

بذرهای اکوتیپ‌های چینی و هندی استویا، سالم و عاری از هرگونه آلودگی، در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ از شرکت زرگیاه شهرستان فیروزآباد، استان فارس تهیه شدند. پیش از آغاز آزمایش، بذرها به‌منظور حذف آلودگی‌های سطحی، به مدت یک دقیقه در اتانول ۷۰ درصد و سپس به مدت ۱۵ دقیقه در محلول هیپوکلریت سدیم ۲۰ درصد ضدعفونی شدند. پس از شستشوی کامل با آب مقطر استریل، بذرها برای انجام مراحل بعدی آماده شدند. بذرهای ضدعفونی شده در پتری‌دیش‌های استریل شده به مدت ۲۴ ساعت در محلول‌های پرایمینگ مختلف (آب مقطر، استریگول، فورکلرفنورون، سلنیوم و ترکیبات آن‌ها) در دمای ۱±۱۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند (Aghighi Shahverdi et al., 2017; Afshari et al., 2020). پس از اتمام دوره پرایمینگ، بذرها با آب مقطر شستشو داده شده و به مدت ۱۲ ساعت در دمای اتاق خشک شدند.

در ادامه، تعداد ۲۵ عدد از بذرهای هر تیمار بر روی کاغذ صافی واتمن در پتری‌دیش‌های استریل شده قرار گرفتند. به هر پتری‌دیش ۷ میلی‌لیتر از محلول‌های پلی‌اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ با غلظت‌های مختلف اضافه شد تا سطوح مختلف تنش آبی ایجاد شود. پتری‌دیش‌ها در شرایط کنترل‌شده با دمای ۲±۲۳ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۷۵ درصد و دوره نوری ۱۶ ساعت قرار داده شدند (Aghighi Shahverdi et al., 2017; Gorzi et al., 2017). به‌منظور کاهش میزان تبخیر، درب پتری‌ها به‌وسیله پارافیلم بسته شد. شمارش بذرهای جوانه‌زده از روز دوم به‌صورت روزانه در ساعتی معین انجام شد (Liopa-Tsakalidi et al., 2012). شمارش بذرهای جوانه‌زده به‌صورت روزانه به مدت ۱۱ روز انجام شد. در ادامه گیاهچه‌های نرمال برای محاسبات پارامترهای جوانه‌زنی جدا شدند. برای محاسبه درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، متوسط زمان جوانه‌زنی، متوسط جوانه‌زنی روزانه، سرعت جوانه‌زنی روزانه و شاخص طولی بنیه گیاهچه از روش‌های استاندارد استفاده شد (Liopa-Tsakalidi et al., 2012; Aghighi Shahverdi et al., 2017). در جدول ۱، صفات اندازه‌گیری شده و همچنین نحوه محاسبه آن‌ها ارائه شده است.

پس از حذف گیاهچه‌های غیرنرمال و اطمینان از نرمال بودن داده‌ها، تجزیه‌وتحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ انجام شد. طرح آزمایشی، فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار بود. برای مقایسه میانگین تیمارها از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد. همبستگی ساده بین صفات با استفاده از

نرم‌افزار ماکروسافت اکسل نسخه ۲۰۱۸ و نرم‌افزار Minitab نسخه ۱۸ صورت گرفت.

نتایج و بحث

درصد جوانه‌زنی

نتایج تحلیل واریانس نشان داد که تنش آبی و اکوتیپ و برهمکنش تنش آبی، پرایمینگ بذر و اکوتیپ اثر معنی‌داری بر درصد جوانه‌زنی بذر استویا داشتند (جدول ۲). بالاترین درصد جوانه‌زنی (۷۰ درصد) در اکوتیپ هندی، تحت تنش آبی ۰/۲۵- مگاپاسکال و با استفاده از پرایمینگ ترکیبی استریگول و سلنیوم مشاهده شد. سایر تیمارهای پرایمینگ، ازجمله ترکیب استریگول و فورکلرفنورون، استریگول به‌تنهایی و هیدروپرایمینگ، نیز در اکوتیپ هندی به درصد جوانه‌زنی قابل قبولی منجر شدند. کمترین درصد جوانه‌زنی (۸/۶۶ درصد) در اکوتیپ چینی، تحت تنش آبی شدید (۱- مگاپاسکال) و بدون پرایمینگ، مشاهده گردید (شکل ۱). به‌طورکلی، اکوتیپ هندی نسبت به اکوتیپ چینی تحمل بیشتری در برابر تنش آبی نشان داد و پرایمینگ بذر، به‌ویژه با ترکیب استریگول و سلنیوم، توانست اثرات منفی تنش آبی بر جوانه‌زنی را به‌طور چشمگیری کاهش دهد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهند که ترکیب پرایمینگ بذر با استریگول و سلنیوم می‌تواند به‌طور مؤثری درصد جوانه‌زنی بذر استویا را تحت شرایط تنش آبی افزایش دهد. مکانیسم احتمالی این اثر شامل تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی بذر توسط سلنیوم و تحریک جوانه‌زنی توسط استریگول است (Aghighi Shahverdi et al., 2017). سلنیوم، به‌عنوان یک عنصر کمیاب ضروری، نقش مهمی در محافظت از سلول‌ها در برابر تنش‌های اکسیداتیو ایفا می‌کند، درحالی‌که استریگول، به‌عنوان یک هورمون گیاهی، فرآیند جوانه‌زنی را از طریق تنظیم بیان ژن‌های مرتبط با جوانه‌زنی تحریک می‌کند. بنابراین، ترکیب این دو ماده می‌تواند اثرات هم‌افزایی داشته باشد و به بهبود جوانه‌زنی بذر در شرایط نامساعد محیطی کمک کند (Al-Amri et al., 2023). مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که پرایمینگ بذر می‌تواند با افزایش آمادگی متابولیکی بذر، توانایی آن را برای تحمل تنش‌های محیطی، ازجمله تنش آبی، بهبود بخشد (Sun et al., 2021). ترکیب استریگول و سلنیوم به‌عنوان یک پرایمر، با تقویت واکنش‌های فیزیولوژیکی مانند افزایش فعالیت آنزیم‌ها و بهبود حفظ آب، نقش مؤثری در بهبود جوانه‌زنی بذر ایفا می‌کند (Zhu et al., 2021).

جدول ۱. روابط محاسباتی صفات موردمطالعه در آزمایش

Table 1. Calculation formulas of traits studied in the experiment

Traits	صفات	Formula فرمول	Reference منابع
Germination percentage	**درصد جوانه‌زنی**	GP = (N×100) / M	(ISTA, 2010)
Germination rate	**سرعت جوانه‌زنی**	GR =∑Ni / ti	(Pagter et al., 2005)
Mean germination time	**میانگین مدت‌زمان جوانه‌زنی**	MGT = ∑ Ni / ∑N	(Ellis and Roberts, 1981)
Mean of daily germination	**میانگین جوانه‌زنی روزانه**	MDG = N / T	(Hoogenboom and Peterson, 1987)
Germination value	**ارزش جوانه‌زنی**	GV = MCGP/ti	(Panwar and Bhardwaj, 2005)
	شاخص طولی بنیه گیاهچه	SVI (1) = GP × SL	(ISTA, 2010)

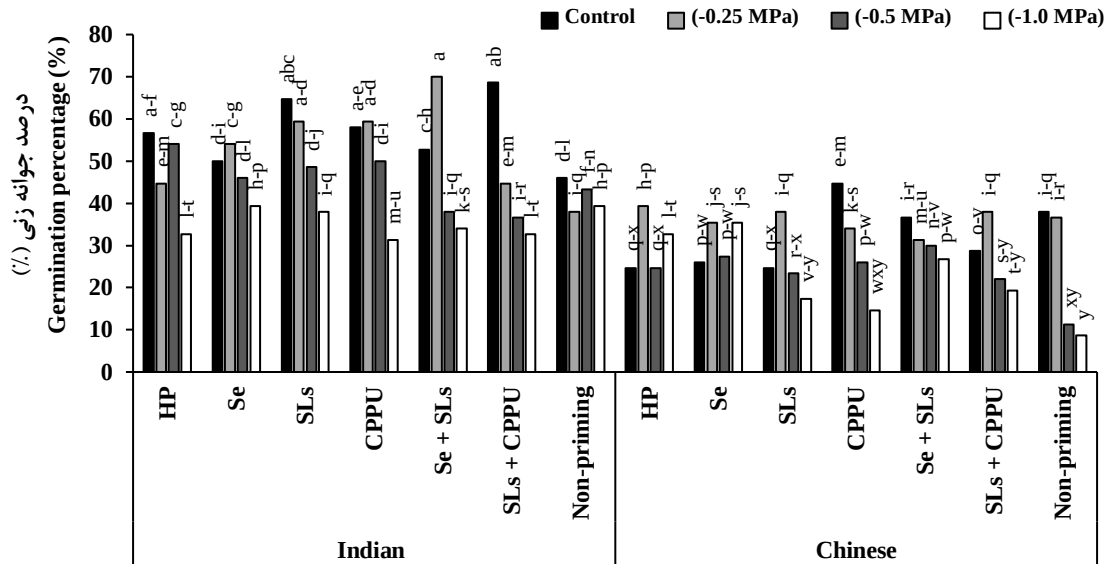
N= مجموع کل بذرهای جوانه‌زده در پایان آزمایش، M= کل بذرهای کاشته شده، T= طول کل دوره جوانه‌زنی، Ni= تعداد روزهای پس از جوانه‌زنی، ti= تعداد روزهای پس از شروع جوانه‌زنی، MCGP= حداکثر درصد جوانه‌زنی تجمعی، SL- طول گیاهچه

N = Total number of germinated seeds at the end of the experiment, M = Total number of seeds planted, T = Total length of germination period, Ni = Number of days after germination, ti = Number of days after germination, MCG MCGP = Maximum percentage of germination cumulative, SL = Seedling length

سرعت جوانه‌زنی

با توجه به نتایج تحلیل واریانس، اثر اصلی و متقابل تنش آبی، نوع پرایمینگ و اکوتیپ بر سرعت جوانه‌زنی بذر استویا به‌طور معنی‌داری تأثیرگذار بوده است (جدول ۲). بیشترین سرعت جوانه‌زنی (۹/۱۳ بذر در روز) در بذور اکوتیپ هندی تحت تیمار ترکیبی استریگول و سلنیوم در شرایط شاهد (بدون تنش آبی) مشاهده شد. این نتیجه نشان‌دهنده اثر مثبت و هم‌افزایی این دو عامل بر فرآیند جوانه‌زنی است. در مقابل، کمترین سرعت جوانه‌زنی در بذور اکوتیپ چینی

بدون تیمار پرایمینگ و تحت تنش شدید آبی (۱- مگاپاسکال) مشاهده گردید (شکل ۲). استفاده ترکیبی از سلنیوم و استریگول به‌عنوان پیش‌تیمار بذر، راهکاری مؤثر برای بهبود سرعت جوانه‌زنی بذر استویا، به‌ویژه در شرایط تنش آبی، محسوب می‌شود. سلنیوم به‌عنوان یک عنصر کمیاب ضروری، نقش محافظتی در برابر تنش‌های اکسیداتیو ایفا می‌کند. این عنصر با تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی بذر، به کاهش آسیب‌های ناشی از رادیکال‌های آزاد در شرایط تنش آبی کمک کرده و درنتیجه، توانایی بذر برای جوانه‌زنی را بهبود می‌بخشد (Sun et al., 2021; Raza et al., 2024). از سوی دیگر، استریگولاتون به‌عنوان یک هورمون گیاهی، نقش مهمی در تنظیم فرآیند جوانه‌زنی ایفا می‌کند. این هورمون با تحریک بیان ژن‌های مرتبط با جوانه‌زنی، به شکستن خواب بذر و تسریع جوانه‌زنی کمک می‌کند (Li et al., 2023). ترکیب سلنیوم و استریگولاتون به‌عنوان پرایمر، اثرات هم‌افزایی بر جوانه‌زنی بذر دارد. سلنیوم با کاهش تنش اکسیداتیو، محیطی مناسب برای فعالیت آنزیم‌ها و فرآیندهای متابولیکی مرتبط با جوانه‌زنی فراهم می‌کند. استریگولاتون نیز با تحریک جوانه‌زنی، به سلنیوم کمک می‌کند تا اثر خود را به‌صورت مؤثرتر اعمال کند. درنتیجه، این ترکیب می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی بذر را افزایش دهد (Aghighi Shahverdi et al., 2017; Al-Amri et al., 2023). در آزمایش‌های مختلفی اثر مثبت پرایمینگ بذر با سلنیوم به‌صورت جداگانه یا ترکیب با سایر بهبوددهنده‌ها جوانه‌زنی بر سرعت جوانه‌زنی تحت شرایط تنش‌های محیطی گزارش شده است که به‌طور مثال می‌توان به گیاه استویا (Aghighi Shahverdi et al., 2017) و کینوا (Amerian et al., 2023) اشاره کرد. این تیمار باعث بهبود متابولیسم بذر در شرایط تنش آبی می‌شود و درنتیجه سرعت جوانه‌زنی را در مقایسه با بذرهای غیرپرایم شده در محیط‌های کم‌آب تسریع می‌کند (Nie et al., 2023).

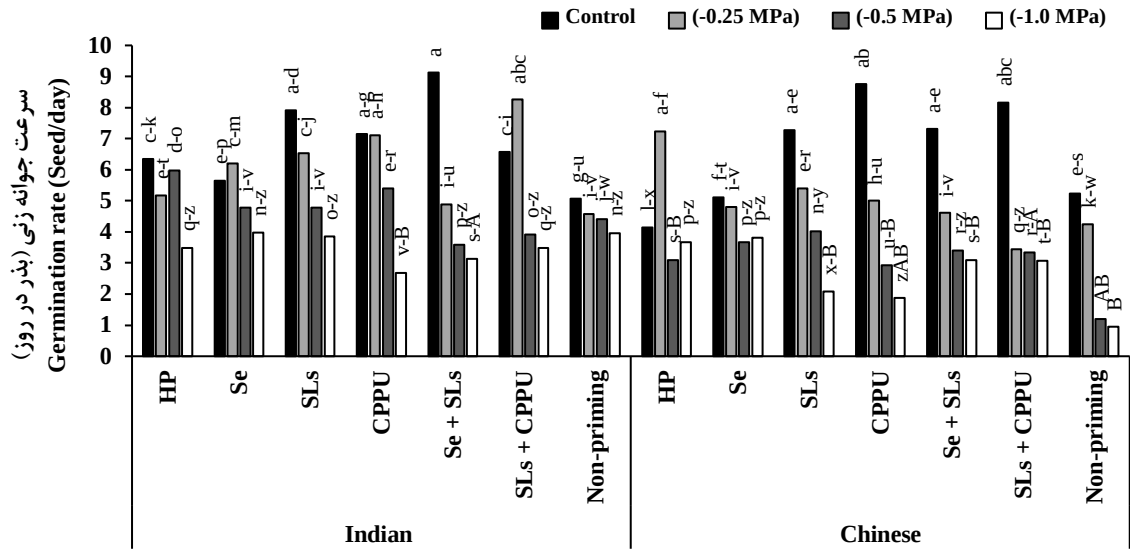


شکل ۱. برهمکنش تنش آبی و پرایمینگ بذر بر درصد جوانه‌زنی اکوتیپ‌های استویا. HP: هیدروپرایمینگ؛ Se: سلنیوم؛ SLs: استریگولاکتون؛ CPPU: فورکلرفنورون

Fig. 1. Interaction effects of water stress and seed priming on germination percentage of stevia ecotypes. HP: Hydro-priming; Se: Selenium; SLs: Strigolactone; CPPU: Forchlorfenuron

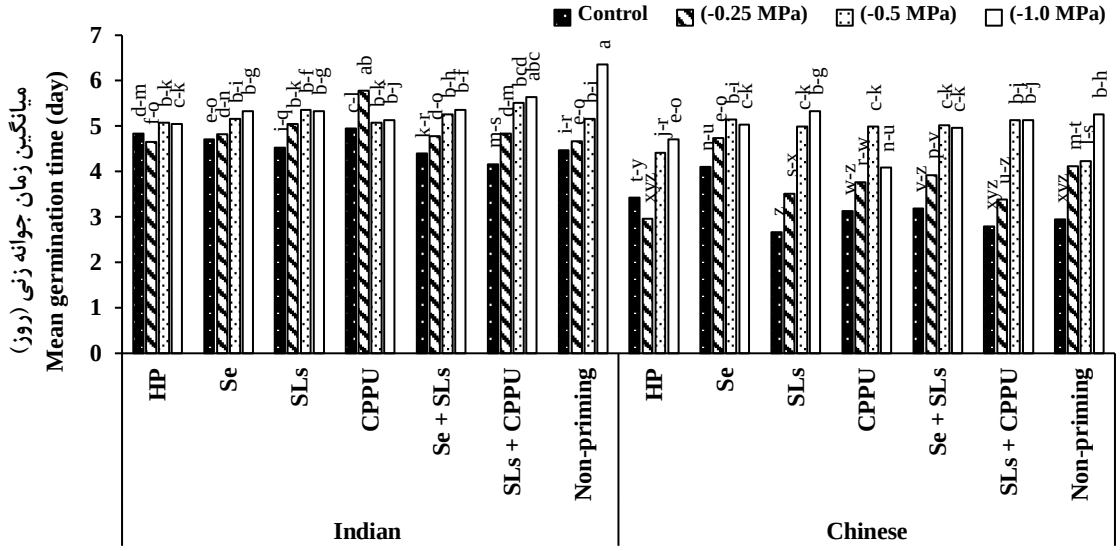
میانگین مدت‌زمان جوانه‌زنی

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تنش آبی، پرایمینگ بذر، اکوتیپ استویا و همچنین برهم‌کنش سه‌گانه آن‌ها تأثیر معنی‌داری (در سطح احتمال ۱ درصد) بر مدت‌زمان جوانه‌زنی داشتند (جدول ۲). بر اساس نتایج مقایسه میانگین، بیشترین مدت‌زمان جوانه‌زنی (۶/۳۶ روز) مربوط به بذرهای بدون پرایم اکوتیپ هندی تحت تنش شدید ۱- مگاپاسکال بود. در مقابل، کمترین مدت‌زمان جوانه‌زنی (۲/۶۶ روز) در بذرهای اکوتیپ چینی که با استریگول پرایم شده و تحت شرایط بدون تنش



شکل ۲. برهمکنش تنش آبی و پرایمینگ بذر بر سرعت جوانه‌زنی اکوتیپ‌های استویا HP: هیدروپرایمینگ؛ Se: سلنیوم؛ SLها: استریگولاکتون؛ CPPU: فورکلرفنورون

Fig. 2. Interaction effects of water stress and seed priming on germination rate of stevia ecotypes. HP: Hydro-priming; Se: Selenium; SLs: Strigolactone; CPPU: Forchlorfenuron



شکل ۳. برهمکنش تنش آبی و پرایمینگ بذر بر میانگین زمان جوانه‌زنی اکوتیپ‌های استویا HP: هیدروپرایمینگ؛ Se: سلنیوم؛ SLها: استریگولاکتون؛ CPPU: فورکلرفنورون

Fig. 3. Interaction effects of water stress and seed priming on mean germination time of stevia ecotypes HP: Hydro-priming; Se: Selenium; SLs: Strigolactone; CPPU: Forchlorfenuron

آبی قرار داشتند، مشاهده شد (شکل ۳). جوانه‌زنی بذر مستلزم تأمین آب کافی است، زیرا آب برای آغاز فعالیت‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی بذر ضروری است. درصورتی‌که بذر نتواند به میزان کافی آب جذب کند یا جذب آب به‌کندی انجام شود، فعالیت‌های درون بذر نیز به تأخیر افتاده و مدت‌زمان لازم برای ظهور ریشه‌چه افزایش می‌یابد. در شرایط تنش آبی، کاهش پتانسیل اسمزی منجر به اختلال در جذب آب شده و درنهایت از فعالیت آنزیم‌های مرتبط با جوانه‌زنی جلوگیری می‌شود (Afzal, 2005). پرایمینگ بذر با استریگول می‌تواند به کاهش زمان جوانه‌زنی کمک کند. این اثر ناشی از تقویت تنظیم بیان ژن‌های مرتبط با مقاومت به تنش، تحریک رشد ریشه‌چه، افزایش تولید آنتی‌اکسیدان‌ها، تنظیم تعادل هورمونی و بهبود جذب آب است (Omoarelojie et al., 2020; Li et al., 2023). در مقابل،

بذرهای غیرپرایم‌شده، به دلیل قرار گرفتن تحت‌فشار ناشی از تنش آبی، با تأخیر بیشتری به حداکثر جوانه‌زنی می‌رسند (Sajedi et al., 2016).

متوسط جوانه‌زنی روزانه

مطابق نتایج تحلیل واریانس، عوامل تنش آبی، روش پرایمینگ بذر و اکوتیپ استویا، به‌طور جداگانه و در تعامل با یکدیگر، اثر معنی‌داری بر متوسط جوانه‌زنی روزانه بذر داشته‌اند (جدول ۲). با افزایش شدت تنش آبی از صفر به ۱- مگاپاسکال، کاهش قابل‌توجهی در متوسط جوانه‌زنی روزانه مشاهده شد، به‌طوری‌که بالاترین سطوح تنش، بیشترین اثر منفی را بر این صفت اعمال نمودند. بیشترین متوسط جوانه‌زنی روزانه (۳/۱۸ بذر در روز) در بذرهای اکوتیپ هندی که با ترکیب استریگول و سلنیوم پرایم شده بودند و تحت شرایط بدون تنش آبی قرار داشتند، مشاهده گردید. در اکوتیپ چینی نیز، بذرهای پرایم شده با استریگول در شرایط بدون تنش آبی، بالاترین متوسط جوانه‌زنی روزانه (۲/۰۳ بذر در روز) را نشان دادند. در مقابل، کمترین متوسط جوانه‌زنی روزانه (۰/۳۹ بذر در روز) در بذرهای اکوتیپ چینی بدون پرایمینگ و تحت شدیدترین تنش آبی (۱- مگاپاسکال) مشاهده شد (شکل ۴). یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از محرک‌های رشد مانند استریگول و عناصر ضروری مانند سلنیوم در فرآیند پرایمینگ بذر، می‌تواند به‌طور چشمگیری درصد و سرعت جوانه‌زنی بذر، به‌ویژه در شرایط تنش آبی را افزایش دهد. مکانیسم این اثر مثبت، احتمالاً به دلیل بهبود جذب آب توسط بذر، افزایش فعالیت آنزیم‌های جوانه‌زنی و کاهش تنش اکسیداتیو در بذرهای تیمار شده است (Raza et al., 2024). مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که بذرهای تیمار شده با ترکیبات محرک رشد و عناصر معدنی، اغلب دارای سرعت جوانه‌زنی بالاتر و رشد رویشی قوی‌تری هستند (De los Ángeles Sariñana-Navarrete et al., 2024).

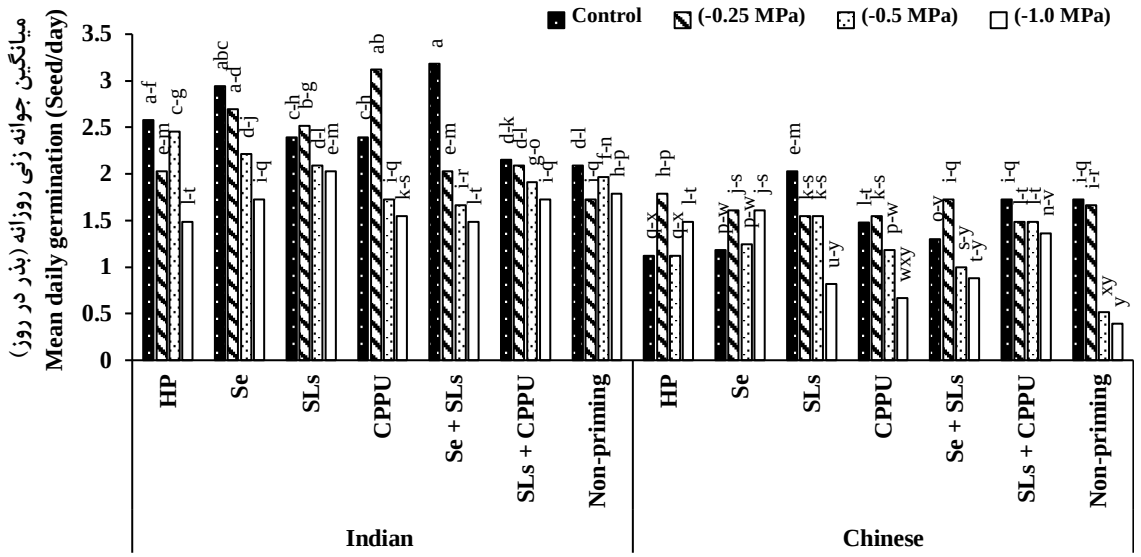
جدول ۲. تجزیه واریانس اثر تنش آبی و پرایمینگ بذر بر شاخص‌های جوانه‌زنی دو اکوتیپ هندی و چینی بذر استویا

Table 2. Analysis of variance of the effects of water stress and seed priming on germination indices of Indian and Chinese stevia ecotypes

منابع تغییرات S.O.V	df	میانگین مربعات (Mean square)						
		درصد جوانه‌زنی GP	سرعت جوانه‌زنی GR	میانگین مدت زمان جوانه‌زنی MGT	میانگین جوانه‌زنی روزانه MDG	ارزش جوانه‌زنی GV	طول گیاهچه SL	شاخص طولی بنیه گیاهچه SVI
تنش آبی Water stress (W)	3	2661.8**	128.5**	18.79**	5.5**	3.32**	13.61**	59820.61**
پرایمینگ Priming (P)	6	131.63ns	5.54**	0.93**	0.27ns	0.18*	0.89**	2949.32**
اکوتیپ Ecotype (E)	1	17894.24**	47.93**	39.45**	36.97**	21.2**	201.01**	639036.8**
W × P	18	110.92*	3.51**	0.55**	0.23*	0.19**	1.02**	2737.36**
W × E	3	170.59ns	6.13*	4.06**	0.35	0.73**	0.38	14869.6**
P × E	6	115.7ns	1.36ns	0.38ns	0.24ns	0.2*	1.26**	2589.13**
W × P × E	18	198.38**	4.24**	0.45**	0.41**	0.28**	0.71**	2539.73**
خطا Error	55	68.74	1.78	0.21	0.14	0.08	0.15	547.21
ضریب تغییرات CV (%)		*21.71*	*18.07*	*9.82*	*21.71*	*17.12*	*20.65*	*28.07*

* و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد. GP: درصد جوانه‌زنی؛ GR: سرعت جوانه‌زنی؛ MGT: میانگین زمان جوانه‌زنی؛ MGD: میانگین جوانه‌زنی روزانه؛ GV: ارزش جوانه‌زنی؛ SL: طول گیاهچه؛ SVI: شاخص بنیه گیاهچه (طول)

ns, *, and **: non-significant and significant at 5% and 1%, respectively. GP: Germination percentage; GR: Germination rate; MGT: Mean germination time; MGD: Mean daily germination; GV: Germination value; SL: Seedling length; SVI: Seedling vigor index (length)



شکل ۴. برهمکنش تنش آبی و پرایمینگ بذر بر میانگین جوانه‌زنی روزانه اکوتیپ‌های استویا HP: هیدروپرایمینگ؛ Se: سلنیوم؛ SLs‌ها: استریگولاکتون؛ CPPU: فورکلرفنورون

Fig. 4. Interaction effects of water stress and seed priming on mean daily germination of stevia ecotypes. HP: Hydro-priming; Se: Selenium; SLs: Strigolactone; CPPU: Forchlorfenuron

ارزش جوانه‌زنی

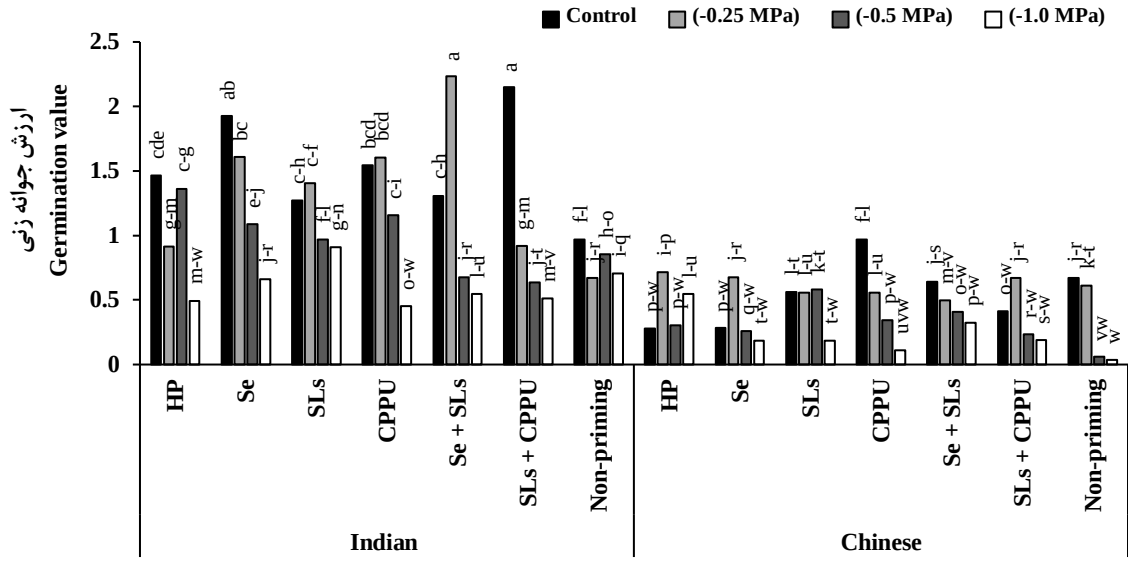
یافته‌های این پژوهش نشان داد که تأثیر تنش آبی، پرایمینگ بذر، اکوتیپ و همچنین برهم‌کنش سه‌گانه این عوامل بر صفت ارزش جوانه‌زنی معنی‌دار بود (جدول ۲). بررسی مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه تنش آبی، پرایمینگ بذر و اکوتیپ استویا نشان داد که تنش آبی موجب کاهش و پرایمینگ بذر منجر به افزایش ارزش جوانه‌زنی شد. در شرایط بدون تنش آبی، بذرهای پرایم شده اکوتیپ هندی با ترکیبات استریگول + سلنیوم و استریگول + فورکلرفنورون بالاترین ارزش جوانه‌زنی را نشان دادند (به ترتیب ۲/۳۲ و ۲/۱۴). نتایج همچنین مشخص کرد که تنش آبی ۱- مگاپاسکال در اکوتیپ چینی تحت شرایط بدون پرایمینگ، ارزش جوانه‌زنی را به‌شدت کاهش داده و کمترین مقدار میانگین (۰/۰۳) را ایجاد کرده است (شکل ۵). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که پرایمینگ بذر با ترکیباتی مانند سلنیوم و استریگول می‌تواند قدرت اولیه بذر، درصد و سرعت جوانه‌زنی و درنهایت عملکرد گیاه را افزایش دهد (Raza et al., 2024). در پژوهشی بر روی بذرهای گندم، پرایمینگ با سلنیوم موجب بهبود جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌ها در شرایط تنش آبی شد (Rocha et al., 2022). علاوه بر این، پرایمینگ بذر می‌تواند اثرات منفی تنش آبی را کاهش داده و مقاومت گیاهان را در برابر شرایط سخت محیطی افزایش دهد، موضوعی که در گیاهان دارویی به دلیل اهمیت خواص درمانی آن‌ها بسیار ارزشمند است (Ali et al., 2021). هورمون استریگول نیز نقش مهمی در فرآیند جوانه‌زنی بذر ایفا می‌کند. این هورمون با تحریک بیان ژن‌های مرتبط با جوانه‌زنی، به شکستن خواب بذر و آغاز این فرآیند کمک می‌کند. همچنین استریگول با تنظیم تولید و فعالیت آنزیم‌های هیدرولیتیک، زمان مناسب برای جوانه‌زنی را تعیین کرده و با تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی بذر، توانایی تحمل به تنش‌های محیطی نظیر خشکی و شوری را افزایش می‌دهد و از آسیب‌های ناشی از این شرایط جلوگیری می‌کند (Raza et al., 2024; Al-Amri et al., 2023).

طول گیاهچه

طول گیاهچه تحت تأثیر تنش آبی، پرایمینگ بذر اکوتیپ استویا و همچنین برهمکنش سه‌گانه تیمارهای آزمایش در سطح احتمال یک درصد تفاوت معنی‌داری نشان داد (جدول ۲). با افزایش تنش آبی در دو اکوتیپ موردمطالعه، طول گیاهچه کاهش یافت. طول گیاهچه در اکوتیپ چینی با کاهش ۶۵ درصدی و در اکوتیپ هندی با کاهش ۴۵ درصدی در مقایسه با شرایط بدون تنش آبی مواجه شد.

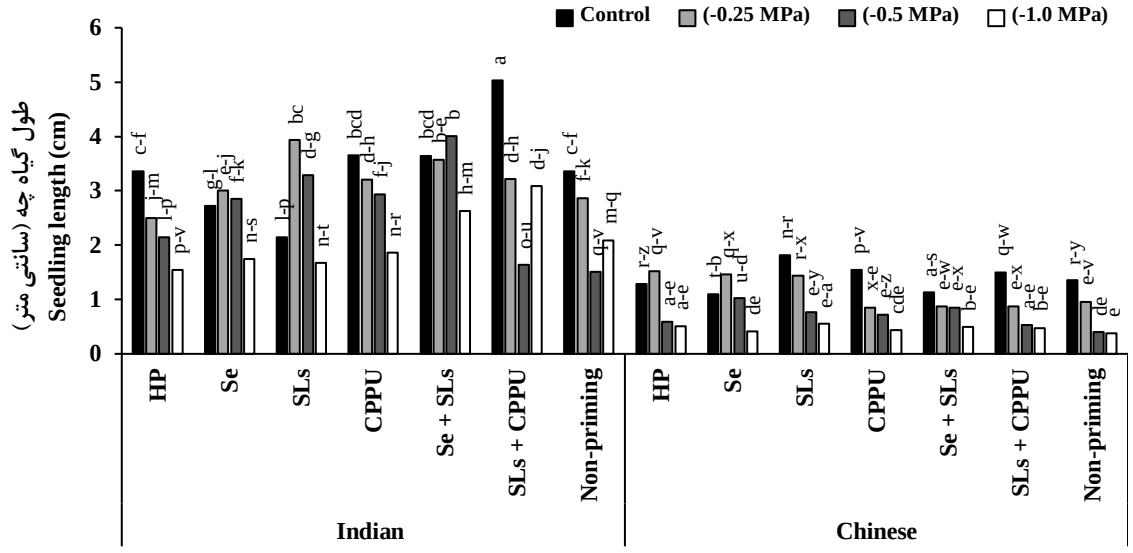
طبق نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل تنش آبی در پرایمینگ بذر در اکوتیپ، بیشترین طول گیاهچه در بذرهای پرایم شده اکوتیپ هندی استویا با ترکیب هورمون فورکلروفنورون +

محرک جوانه‌زنی استریگول تحت شرایط بدون تنش آبی با میانگین ۵/۰۳ سانتی‌متر مشاهده شد. از طرف دیگر، اکوتیپ چینی در تیمار عدم پرایمینگ بذر تحت تنش آبی شدید (۱- مگاپاسکال) کم‌ترین طول گیاهچه را با میانگین ۰/۳۷ سانتی-متر نشان داد (شکل ۶). دلیل اصلی کاهش طول گیاهچه تحت تنش آبی این است که کم‌آبی باعث کاهش انتقال مواد مغذی از لپه‌ها به جنین می‌گردد. علاوه بر این، کاهش جذب آب توسط بذرها در شرایط تنش باعث کاهش ترشح هورمونی



شکل ۵. برهمکنش تنش آبی و پرایمینگ بذر بر ارزش جوانه‌زنی اکوتیپ‌های استویا HP: هیدروپرایمینگ؛ Se: سلنیوم؛ SLsها: استریگولاکتون؛ CPPU: فورکلرفنورون

Fig. 5. Interaction effects of water stress and seed priming on germination value of stevia ecotypes. HP: Hydro-priming; Se: Selenium; SLs: Strigolactone; CPPU: Forchlorfenuron



شکل ۶. برهمکنش تنش آبی و پرایمینگ بذر بر طول گیاهچه اکوتیپ‌های استویا HP: هیدروپرایمینگ؛ Se: سلنیوم؛ SLsها: استریگولاکتون؛ CPPU: فورکلرفنورون

Fig. 6. Interaction effects of water stress and seed priming on seedling length of stevia ecotypes. HP: Hydro-priming; Se: Selenium; SLs: Strigolactone; CPPU: Forchlorfenuron

و فعالیت آنزیم‌ها و درنتیجه اختلال در رشد گیاهچه می‌شود (Kafi Falavarjani et al., 2005). پرایمینگ بذر ابزاری مؤثر برای افزایش جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه است که درنهایت باعث افزایش بهره‌وری در شرایط تنش‌های مختلف محیطی ازجمله تنش آبی می‌شود (Rafatpour et al., 2020). پرایم بذر با ترکیب توأم استریگول و فلوکوروفنورون باعث افزایش رشد گیاهچه اکوتیپ هندی در شرایط تنش آبی شدید شد، زیرا این ترکیب هم‌زمان چندین مکانیسم فیزیولوژیک و بیوشیمیایی را در بذرها فعال می‌کند. استریگول با تحریک بیان ژن‌های مرتبط با جوانه‌زنی و افزایش تولید آنزیم‌های هیدرولیتیک، به شکستن خواب بذر و آغاز رشد گیاهچه کمک می‌کند. علاوه بر این، استریگول با تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی، از سلول‌های گیاهچه در برابر آسیب اکسیداتیو ناشی از تنش آبی محافظت می‌کند (Al-Amri et al., 2023). از سوی دیگر، فلوکوروفنورون که یک تنظیم‌کننده رشد گیاه است، با تحریک تقسیم و طویل شدن سلول، رشد اولیه گیاهچه را تقویت می‌کند. ترکیب این دو ماده باعث افزایش تحمل گیاهچه به تنش آبی از طریق بهبود تعادل اسمزی، حفظ آب در سلول‌ها و کاهش اثرات منفی تنش محیطی می‌شود (Singh et al., 2019). مطالعات نشان داده، بذرهای تیمار شده با این ترکیبات افزایش قابل‌توجهی در طول گیاهچه در مقایسه با بذرهای تیمار نشده نشان می‌دهند، به‌ویژه وقتی تحت تنش آبی قرار گیرند (García-Locascio et al., 2024). این بهبود اغلب با بهبود فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند افزایش محتوای کلروفیل و کارایی بهتر فتوسنتز که برای رشد گیاه در شرایط تنش حیاتی هستند، مرتبط است (García-Locascio et al., 2024).

شاخص طولی بنیه گیاهچه

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، شاخص طولی بنیه گیاهچه تحت تأثیر تیمارهای اصلی تنش آبی، پرایمینگ بذر، اکوتیپ و همچنین برهم‌کنش‌های دوگانه و سه‌گانه تنش آبی، پرایمینگ بذر و اکوتیپ بذر استویا قرار گرفت (در سطح احتمال ۱ درصد) (جدول ۲).

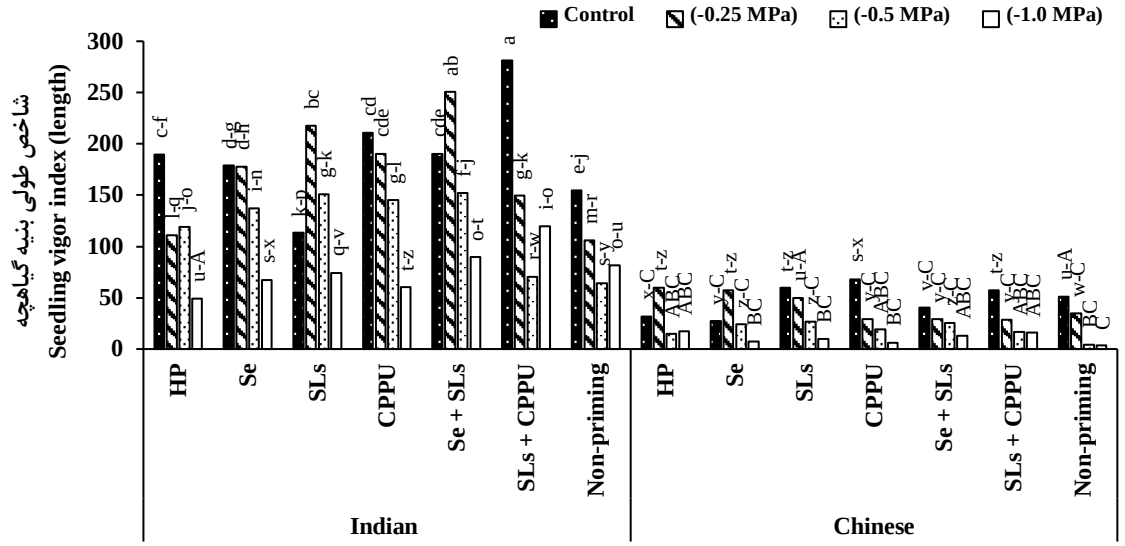
نتایج نشان داد که با افزایش سطوح تنش آبی، شاخص طولی بنیه گیاهچه به‌شدت کاهش یافت. در مقابل، استفاده از تیمار پرایمینگ بذر با ترکیب استریگول + فلوکوروفنورون، موجب افزایش شاخص طولی بنیه گیاهچه گیاه دارویی استویا در شرایط بدون تنش آبی شد و بالاترین میانگین این صفت (۲۸۱/۲) ثبت گردید. در شرایط تنش آبی ۱- مگاپاسکال، تیمار بدون پرایمینگ بذر (شاهد) در اکوتیپ چینی کمترین شاخص طولی بنیه گیاهچه را با میانگین ۱/۷۵ نشان داد (شکل ۷). یافته‌های پژوهش‌های پیشین نیز نشان داده‌اند که پرایمینگ هورمونی می‌تواند موجب بهبود و افزایش شاخص بنیه گیاهچه در شرایط تنش خشکی شود که این نتایج با یافته‌های این تحقیق همخوانی دارد (Rafatpour et al., 2020).

همبستگی ساده بین صفات

نتایج همبستگی ساده بین صفات مربوط به شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه دو اکوتیپ استویا تحت تأثیر تنش آبی و تیمارهای مختلف پرایمینگ در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده درصد جوانه‌زنی با صفات سرعت جوانه‌زنی، میانگین جوانه‌زنی روزانه، ارزش جوانه‌زنی، طول گیاهچه و شاخص طولی بنیه گیاهچه همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت. از طرف دیگر، میانگین مدت‌زمان جوانه‌زنی با صفات درصد و سرعت جوانه‌زنی و همچنین طول گیاهچه همبستگی منفی و معنی‌دار نشان داد.

نتیجه‌گیری نهایی

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش، می‌توان نتیجه گرفت که پرایمینگ بذر با ترکیباتی مانند استریگول و سلنیوم، روشی مؤثر برای بهبود جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاه استویا، به‌ویژه در شرایط تنش آبی، است. استفاده از این ترکیبات به‌عنوان پیش‌تیمار، باعث افزایش درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، ارزش جوانه‌زنی، طول گیاهچه و شاخص طولی بنیه گیاهچه شد. مکانیسم این اثر مثبت، احتمالاً به دلیل بهبود جذب آب توسط بذر، افزایش فعالیت آنزیم‌های جوانه‌زنی، تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی، تنظیم تعادل هورمونی و تحریک رشد ریشه است. اکوتیپ هندی نسبت به اکوتیپ چینی تحمل بیشتری نسبت به تنش آبی نشان داد و پاسخ بهتری به تیمارهای پرایمینگ داد. ترکیب استریگول و سلنیوم به‌عنوان مؤثرترین تیمار پرایمینگ شناسایی شد که توانست به‌طور قابل‌توجهی جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاه استویا را بهبود بخشد.



شکل ۷. برهمکنش تنش آبی و پرایمینگ بذر بر شاخص طولی بنیه گیاهچه اکوتیپ‌های استویا HP: هیدروپرایمینگ؛ Se: سلنیوم؛ SLها: استریگولاکتون؛ CPPU: فورکلرفنورون

Fig. 7. Interaction effects of water stress and seed priming on seedling vigor index (length) of stevia ecotypes. HP: Hydro-priming; Se: Selenium; SLs: Strigolactone; CPPU: Forchlorfenuron

جدول ۳. همبستگی ساده شاخص‌های جوانه‌زنی بذر دو اکوتیپ استویا تحت تنش آبی و تیمارهای مختلف پرایمینگ بذر

Table 3. Simple correlation of seed germination indices of two stevia ecotypes under water stress and different seed priming treatments

	درصد جوانه‌زنی GP	سرعت جوانه‌زنی GR	میانگین مدت‌زمان جوانه‌زنی MGT	میانگین جوانه‌زنی روزانه MDG	ارزش جوانه‌زنی GV	طول گیاهچه SL
سرعت جوانه‌زنی GR	0.78**					
میانگین مدت‌زمان جوانه‌زنی MGT	-0.24*	-0.53**				
میانگین جوانه‌زنی روزانه MDG	0.99**	0.78**	-0.08ns			
ارزش جوانه‌زنی GV	0.98**	0.76**	-0.08ns	0.98**		
طول گیاهچه SL	0.76**	0.50**	-0.24*	0.76**	0.73**	
شاخص طولی بنیه گیاهچه SVI	0.87**	0.60**	-0.15ns	0.87**	0.88**	0.95**

ns، * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

.ns, *, and **: non-significant and significant at 5% and 1%, respectively

GP: Germination percentage; GR: Germination rate; MGT: Mean germination time; MGD: Mean daily germination; GV: Germination value; SL: Seedling length; SVI: Seedling vigor index (length)

سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از تمامی مسئولین آزمایشگاه‌های دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد و همچنین دانشگاه دامغان برای اجرای این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را نمایند.

منابع

Afshari, F., Nakhaei, F., Mosavi, S., Seghatoleslami, M., 2020. Evaluating the role of nutri-priming in improving PEG-induced drought stress tolerance of stevia (*Stevia rebuadiana* Bertoni). Iranian Journal of Plant Physiology. 11, 3509-3522. [In Persian with English Summary]

Afzal, I., 2005. Seed enhancement to induced salt tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.). Ph.D. Thesis, Agriculture University of Faisalabad, Pakistan.

Aghighi Shahverdi, M., Omidi, H., 2016. Effect of hormone priming and hydropriming on germination of Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) under salt stress. Iranian of Seed Sciences and Research. 3, 97-108. [In Persian with English Summary]

Aghighi Shahverdi, M., Omidi, H., Tabatabaei, S.J., 2017. Effect of nutri-priming on germination indices and physiological characteristics of stevia seedling under salinity stress. Journal of Seed Science. 39, 353-362. [In Persian with English Summary]

Ahmad, A., Ali, H., Khan, H., Begam, A., Khan, S., Ali, S.S., Ahmad, N., Fazal, H., Ali, M., Hano, C., Ahmad, N., Abbasi, B.H., 2020. Effect of gibberellic acid on production of biomass, polyphenolics and steviol glycosides in adventitious root cultures of *Stevia rebaudiana* (Bert.). Plants (Basel). 9, 420. https://doi.org/10.3390/plants9040420

Al-Amri, A.A., Alsubaie, Q.D., Alamri, S.A., Siddiqui, M.H., 2023. Strigolactone analog GR24 induces seed germination and improves growth performance of different genotypes of tomato. Journal of Plant Growth Regulation. 42, 5653-5666. https://doi.org/10.1007/s00344-023-10947-8

Ali, L.G., Nulit, R., Ibrahim, M.H., 2021. Efficacy of KNO_3, SiO_2 and SA priming for improving emergence, seedling growth and antioxidant enzymes of rice (*Oryza sativa*), under drought. Scientific Reports. 11, 3864. https://doi.org/10.1038/s41598-021-83434-3.

Amerian, M., Khoramivafa, M., Rabani, B.A., 2023. Effect of selenium and humic acid on germination and some morphological characteristics of quinoa under drought and salinity stress. Journal of Vegetables Sciences. 6, 1-16. [In Persian with English Summary]

Cáceres, C., Quintana, J., Nunes-Nesi, A., et al. 2024. Interplay of phytohormone signaling with aluminum and drought-stress resistance mechanisms: An integrated perspective amidst climate change. Environmental and Experimental Botany. 218, 105575. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105575

Dalal, M., Sahu, S., Tiwari, S., Rao, A.R., Gaikwad, K., 2018. Transcriptome analysis reveals interplay between hormones, ROS metabolism and cell wall biosynthesis for drought-induced root growth in wheat. Plant Physiology and Biochemistry. 130, 482–92. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.07.035

De los Ángeles Sariñana-Navarrete, M., Benavides-Mendoza, A., González-Morales, S., Juárez-Maldonado, A., Preciado-Rangel, P., Sánchez-Chávez, E., Cadenas-Pliego, G., Antonio-Bautista, A., Morelos-Moreno, Á., 2024. Selenium seed priming and biostimulation influence the seed germination and seedling morphology of Jalapeño (*Capsicum annuum* L.). Horticulturae. 10, 119. https://doi.org/10.3390/horticulturae10020119

Ellis, R.H., Roberts, E.H., 1981. The quantification of ageing and survival in orthodox seeds. Seed Science and Technology. 9, 377-409.

Ertuğrul, R., Gökmen, S., Kahraman, N.D., 2024. Evaluation of quantitative trait loci for drought tolerance, located on the barley (*Hordeum vulgare* L.) chromosomes 1, 2, and 6, in the genomic background of three cultivars. Pakistan Journal of Botany. 56, http://dx.doi.org/10.30848/PJB2024-4(17)

García-Locascio, E., Valenzuela, E.I., Cervantes-Avilés, P., 2024. Impact of seed priming with Selenium nanoparticles on germination and seedlings growth of tomato. Scientific Reports. 14, 6726. https://doi.org/10.1038/s41598-024-57049-3

Gorzi, A., Omidi, H., Bostani, A., 2017. Morpho-physiological responses of Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) to various priming treatments under drought stress. Applied Ecology and Environmental Research. 16, 4753-4771. https://doi.org/10.15666/aeer/1604_47534771

Hoogenboom, G., Peterson, C.M., 1987. Shoot growth rate of soybean as affected by drought stress. Agronomy Journal. 79, 598-607.

International Seed Testing Association (ISTA). (2010). International Rules for Seed Testing. Wallisellen, Switzerland: International Seed Testing Association. Hand Book for Seedling Evaluation (3rd.Ed.). Zurich, Switzerland. 143pp.

Janah, I., Meddich, A., Elhasnaoui, A., Khayat, S., Anli, M., Boutasknit, A., Loutfi, K., 2021. Arbuscular mycorrhizal fungi mitigates stress toxicity in *Stevia rebaudiana* Bertoni through the modulation of physiological and biochemical responses. Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 23, 152–162. https://doi.org/10.1007/s42729-021-00690-y

Kafi Falavarjani, F.M., Nezami, A, Hosseini, H., Masomi, A., 2005. Physiological effects of drought stress by polyethylene glycol on germination of lentil (*lens culinaris medik*.) genotypes. Irannian Journal of Field Crop Research. 3, 69-80. [In Persian with English Summary]

Li, C., Lu, X., Liu, Y., Xu, J., Yu, W., 2023. Strigolactone alleviates the adverse effects of salt stress on seed germination in cucumber by enhancing antioxidant capacity. Antioxidants 12, 1043. https://doi.org/10.3390/antiox12051043

Liopa-Tsakalidi, A., Kaspiris, G., Salahas, G., Barouchas, P., 2012. Effect of salicylic acid (SA) and gibberellic acid (GA_3) pre-soaking on seed germination of stevia (*Stevia rebaudiana*) under salt stress. Journal of Medicinal Plants Research. 6, 416-423. https://doi.org/10.5897/JMPR11.1106

Michel, B.E., Kaufmann, M.R., 1973. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. Plant Physiology. 51, 914-916.

Milani, P.G., Formigoni, M., Lima, Y.C., Piovan, S., Peixoto, G.M.L., Camparsi, D.M., da Costa, S.C., 2017. Fortification of the whey protein isolate antioxidant and antidiabetic activity with fraction rich in phenolic compounds obtained from *Stevia rebaudiana* (Bert.). Bertoni leaves. Journal of food science and technology. 54, 2020–2029. https://doi.org/10.1007/s13197-017-2638-0.

Muhammad, G., Manaf, A., Khalid, A., Sher, A., Lovatt, C.J., Syed, A., 2023. Allometric dynamics of *Sinapis alba* under different ecological conditions. Journal of King Saud University Science. 35, 102403. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102403

Naser, A.A., Abd-Alrahman, H.B.A.D., 2023. Effect of treatment with growth regulators gibberellic acid and CPPU on some vegetative traits and yield of three potato cultivars *Solanum tuberesom* L. in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1213(1):012070. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1213/1/012070

Nie, M., Ning, N., Liang, D., Zhang, H., Li, Sh., Li, Sh. Fan, X., Yizhong, Z., 2023. Seed priming with selenite enhances germination and seedling growth of Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) Moench] under salt stress. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science. 73, 42-53. https://doi.org/10.1080/09064710.2023.2177561 .

Omoarelojie, L.O., Kulkarni, M.G., Finnie, J.F., Pospíšil, T., Strnad, M., Van Staden, J., 2020. Synthetic strigolactone (rac-GR24) alleviates the adverse effects of heat stress on seed germination and photosystem II function in lupine seedlings. Plant Physiology and Biochemistry. 155, 965-979. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.07.043

Pagter, M., Bragato, C., Brix, H., 2005. Tolerance and physiological responses of (*Phragmites australis*) to water deficit. Aquatic Botany. 81, 285–299.

Panwar, P., Bhardwaj, S.D., 2005. Handbook of Practical Forestry. AGROBIOS (INDIA), 191p.

Rafatpour, S., Shahriari, A., Saberi, M., Karvarinasab, M., Tarnian, F., 2020. Effects of priming on germination and seedling growth of *Zygophyllum atriplicoides* under drought stress. ECOPERSIA. 8, 89-96. [In Persian with English Summary] http://ecopersia.modares.ac.ir/article-24-19315-en.html

Raza, M.A.S., Aslam, M.U., Valipour, M., Iqbal, R., Haider, I., Mustafa, A.E.M.A., Elshikh, M.S., Ali, I., Roy, R., Elshamly, A.M.S. 2024. Seed priming with selenium improves growth and yield of quinoa plants suffering drought. Scientific Reports. 9, 14, 886. https://doi.org/10.1038/s41598-024-51371-6

Rocha, L., Silva, E., Pavia, I., Ferreira, H., Matos, C., Osca, J.M., Moutinho-Pereira, J., Lima-Brito, J., 2022. Seed soaking with sodium selenite as a biofortification approach in bread wheat: effects on germination, seedling emergence, biomass and responses to water

deficit. Agronomy. 12, 1975. https://doi.org/10.3390/agronomy12081975.

Sajedi, N., Madani, H., Sajedi, A., 2016. The effects of seed priming using distillate water and different rates of selenium on germination, seedling growth traits and seed yield of dryland wheat in laboratory and field condition. Iranian Journal of Seed Science and Technology. 5, 1-14. [In Persian with English Summary]

Sarwar, G., Shafique Chaudhary, M., Jamil, M., 2023. Innate strategic potential of olive trees to mitigate drought in water deficit regimes. Pakistan Journal of Botany. 55(SI), 41–51. https://doi.org/10.30848/PJB2023-SI(5).

Singh, V., Agrawal, K.K., Jha, A.K., Sahu, M.P. 2019. Effect of forchlorfenuron on yield and economics of transplanted rice. Progressive Agriculture. 19, 290-292. https://doi.org/10.18782/2320-7051.7700

Sun, Y., Xu, J., Miao, X., 2021. Effects of exogenous silicon on maize seed germination and seedling growth. Scientific Reports. 11, 1014. https://doi.org/10.1038/s41598-020-79723-y.

Tahir, S., Zafar, S., Ashraf, M.Y., Perveen, S., Mahmood, S., 2023. Evaluation of drought tolerance in maize (*Zea mays* L.) using physiological indices. Pakistan Journal of Botany. 55, 843–9. https://doi.org/10.30848/PJB2023-3(8)

Yan, H., Mao, P., 2021. Comparative time-course physiological responses and proteomic analysis of melatonin priming on promoting germination in aged oat (*Avena sativa* L.) seeds. International Journal of Molecular Sciences. 22, 811. https://doi.org/10.3390/ijms22020811

Zhu, Z.H., Sami, A., Xu, Q.Q., Wu, L.L., Zheng, W.Y., Chen, Z.P., Jin, X.Z., Zhang, H., Li, Y., Yu, Y., Zhou, K.J., 2021. Effects of seed priming treatments on the germination and development of two rapeseed (*Brassica napus* L.) varieties under the co-influence of low temperature and drought. PLoS One. 16, e0257236. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257236