Vol. 6, No. 2, Autumn & Winter, 2025, p. 313-326

Plant Production and Genetics

https://doi.org/10.22034/PLANT.2025.144360.1172

Physiological responses of canola (*Brassica napus* L.) to seed coating under drought conditions

Tohid Ali-Abbasi[1], Salim Farzaneh[1], Mohammad Ahmadi[1]*, Babak babaee[2]

1. Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
2. Sugar Beet Seed Breeding and Production Research Institute, Agricultural Research and Education Organization, Karaj, Iran

*Corresponding Author Email: ahmadi.agro@uma.ac.ir

Abstract

Introduction: Canola (*Brassica napus* L.), as one of the most important oilseed crops, plays a vital role in providing edible oil and biofuels. However, the sensitivity of this plant to drought, especially during germination and early establishment stages, significantly affects its yield. Drought stress is one of the most critical challenges facing sustainable agriculture worldwide, imposing substantial negative impacts on the growth, yield, and quality of crops. In this context, seed coating technology has emerged as an effective strategy to enhance drought tolerance and improve water use efficiency. Seed coatings containing various materials such as hydrogels, nutrients, plant hormones, and plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) can modulate the plant's physiological responses under stress conditions.

Materials and Methods: This experiment was conducted to investigate the effect of seed priming and hydropriming on the physiological traits of canola under drought stress conditions at the Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, in 2020. Certified canola seeds (Hyola cultivar) harvested in 2019 were obtained from the Moghan Agricultural Research and Education Center. The experiment was carried out as a factorial arrangement in a completely randomized design with three replications. Experimental treatments included drought at five levels (0, -2, -4, -6, and -8 bar) and seed coating at six levels (humic acid at three different concentrations, humic acid + hydropriming, hydropriming, and control (no coating)). The present study was conducted separately under laboratory conditions (3 replications of 25 seeds in 15 cm diameter Petri dishes) and greenhouse conditions (5 replications of 6 seeds in 15-liter pots).

Results: Results indicated that the combined treatment of hydropriming along with humic acid (6 grams per kilogram of seed) was the most effective approach significantly mitigating the detrimental effects of drought. There was an 8.5% difference in chlorophyll index, a 284% difference in leaf area (under non-stress conditions), a 167% difference in leaf dry weight, and a 118% difference in root dry weight between the best and worst treatments, demonstrating the high efficacy of seed coating treatments. Although seed coating may reduce germination speed, this delay is compensated for by increased uniformity and final seedling establishment percentage, ultimately leading to the production of more vigorous and resilient plants. Furthermore, the dose-response effects of canola seed coating with humic acid were evident in the experiment, and careful consideration of its application is necessary.

Conclusion: The synergistic effect of combining hydropriming with an optimal concentration of humic acid (6 g/kg seed) yielded the best results. As a practical recommendation, it is suggested that farmers in arid and semi-arid regions first place canola seeds in water (hydropriming) for 12 to 24 hours and then coat them with a quality humic acid solution at an appropriate concentration. This practice will improve initial crop establishment and minimize damage caused by drought during critical growth stages.

Keywords: Canola emergence, Coating, Germination rate, Hydropriming, Chlorophyll

Received: 21-08-2025 **Accepted:** 28-10-2025

Citation: Ali-Abbasi, T., Farzaneh, S., Ahmadi, M., & babaee, B. (2025). Physiological responses of canola (*Brassica napus* L.) to seed coating under drought conditions. *Plant Production and Genetics*, *6*(2), 313-326. https://doi.org/10.22034/PLANT.2025.144360.1172

Copyrights:
Copyrights rights for this article is retained by the author (s), with publication rights granted to Plant Production and Genetics. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

جلد۶، شماره۲، پاییز و زمستان، ۱۴۰۴، صفحات ۳۲۶-۳۱۳

تولید و ژنتیک گیاهی

https://doi.org/10.22034/PLANT.2025.144360.1172

پاسخ‌های فیزیولوژیکی گیاه کلزا (*Brassica napus* L.) به پوشش‌دهی بذر تحت شرایط خشکی

توحید علی‌عباسی[۱]، سلیم فرزانه[۱]، محمد احمدی*[۱]، بابک بابائی[۲]

۱. گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲. موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندرقند، سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی، کرج، ایران

*ایمیل نویسنده مسئول: ahmadi.agro@uma.ac.ir

چکیده

مقدمه: گیاه کلزا (*Brassica napus* L.) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین دانه‌های روغنی، نقش حیاتی در تأمین روغن خوراکی و سوخت‌های زیستی ایفا می‌کند. با این حال، حساسیت این گیاه به کم‌آبی، به‌ویژه در مراحل جوانه‌زنی و استقرار اولیه، عملکرد آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تنش خشکی یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی کشاورزی پایدار در سراسر جهان است و تأثیرات منفی قابل توجهی بر رشد، عملکرد و کیفیت محصولات زراعی دارد. در این راستا، فناوری پوشش‌دهی بذر به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای بهبود تحمل به خشکی و افزایش کارایی استفاده از آب مطرح شده است. پوشش‌های بذر حاوی مواد مختلفی مانند هیدروژل‌ها، عناصر غذایی، هورمون‌های گیاهی و باکتری‌های محرک رشد (PGPR) می‌توانند پاسخ‌های فیزیولوژیکی گیاه را در شرایط تنش تعدیل کنند.

مواد و روش‌ها: این آزمایش در جهت بررسی اثر پرایمینگ و هیدروپرایمنگ بذر روی صفات فیزیولوژیکی گیاه کلزا در شرایط تنش خشکی در دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۳۹۹ اجرا شد. بذور گواهی شده کلزا (رقم هایولا) که در سال ۱۳۹۸ برداشت شده بود از مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی مغان تهیه شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل خشکی در ۵ سطح (۰، ۲-، ۴-، ۶- و ۸- بار) و پوشش‌دارکردن بذر در ۶ سطح (هیومیک‌اسید در ۳ غلظت مختلف، هیومیک‌اسید + هیدروپرایمینگ، هیدروپرایمینگ و شاهد (بدون پوشش)) بود. پژوهش حاضر در دو شرایط آزمایشگاه (۳ تکرار ۲۵ بذری در پتری دیش به قطر ۱۵ سانتی‌متر) و گلخانه (۵ تکرار ۶ بذری در گلدان‌هایی با حجم ۱۵ لیتر) به‌صورت مجزا انجام گردید.

نتایج: نتایج نشان داد که کاربرد تیمار ترکیبی هیدروپرایمینگ به‌همراه هیومیک‌اسید (۶ گرم بر کیلوگرم بذر) به‌عنوان مؤثرترین راهکار، اثرات مخرب خشکی را به‌طور چشم‌گیری تعدیل نمود. اختلاف ۵/۸ درصدی در شاخص کلروفیل، ۲۸۴ درصدی سطح برگ (در شرایط بدون تنش)، ۱۶۷ درصدی وزن خشک برگ و ۱۱۸ درصدی وزن خشک ریشه بین بهترین و بدترین تیمار وجود داشت که بیانگر اثرگزاری بالای تیمارهای پوشش‌دهی است. اگرچه پوشش‌دهی بذر ممکن است سرعت جوانه‌زنی را کاهش دهد، اما این تأخیر با افزایش یکنواختی و درصد نهایی استقرار گیاهچه، جبران شده و در نهایت، به تولید گیاهانی با بنیه قوی‌تر و تاب‌آوری بالاتر منجر می‌گردد. همچنین اثرات دز-پاسخ پوشش‌دهی بذر کلزا با هیومیک اسید در آزمایش مشخص شد و بایستی در مصرف آن دقت شود.

نتیجه‌گیری: اثر سینرژیستیک ترکیب هیدروپرایمینگ با غلظت بهینه هیومیک‌اسید (۶ گرم بر کیلوگرم بذر) بهترین نتایج را نشان داد. به‌عنوان پیشنهاد کاربردی، توصیه می‌شود کشاورزان در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بذرهای کلزا را ابتدا به مدت ۱۲ تا ۲۴ ساعت در آب (هیدروپرایمینگ) قرار داده و سپس با محلول هیومیک‌اسید با کیفیت و با غلظت مناسب پوشش‌دهی کنند تا استقرار اولیه محصول بهبود یافته و خسارات ناشی از خشکی در مراحل بحرانی رشد به حداقل برسد.

کلید واژگان: پوشش‌دهی، سبزشدن کلزا، سرعت جوانه‌زنی، کلروفیل، هیدروپرایمینگ

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۳۰ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۰۸/۰۶

منبع: علی‌عباسی، ت.، سلیم، ف.، احمدی، م.، و بابایی، ب. (۱۴۰۴). پاسخ های فیزیولوژیکی گیاه کلزا (*Brassica napus* L.) به پوشش‌دهی بذر تحت شرایط خشکی، *مجله تولید و ژنتیک گیاهی*، ۶ (۲)، ۳۲۶-۳۱۳. https://doi.org/10.22034/PLANT.2025.144360.1172

CC BY

مقدمه

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی کشاورزی پایدار در سراسر جهان است و تأثیرات منفی قابل توجهی بر رشد، عملکرد و کیفیت محصولات زراعی دارد (Farooq *et al*, 2023). گیاه کلزا (*Brassica napus* L.) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین دانه‌های روغنی، نقش حیاتی در تأمین روغن خوراکی و سوخت‌های زیستی ایفا می‌کند. با این حال، حساسیت این گیاه به کم‌آبی، به‌ویژه در مراحل جوانه‌زنی و استقرار اولیه، عملکرد آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Raza *et al*., 2024). در این راستا، فناوری پوشش‌دهی بذر به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای بهبود تحمل به خشکی و افزایش کارایی استفاده از آب مطرح شده است. پوشش‌های بذر حاوی مواد مختلفی مانند هیدروژل‌ها، عناصر غذایی، هورمون‌های گیاهی و باکتری‌های محرک رشد (PGPR) می‌توانند پاسخ‌های فیزیولوژیکی گیاه را در شرایط تنش تعدیل کنند (Ma *et al*., 2025). مطالعه‌ای نشان داد که پوشش‌دهی بذر گندم با نانوذرات سیلیس و باکتری‌های محرک رشد به افزایش معنی‌دار در محتوای نسبی آب برگ (RWC) و کاهش پراکسیداسیون لیپیدها تحت تنش خشکی منجر شد؛ این پژوهش گزارش کرد که ترکیب نانوذرات و باکتری محرک رشد باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز) و تجمع متابولیت‌های سازگارکننده مانند پرولین و گلایسین بتائین می‌شود (Li *et al*., 2025). محققان در مطالعه‌ای روی ذرت نشان دادند که پوشش‌های حاوی هیدروژل‌های سوپرجاذب همراه با اسید سالیسیلیک باعث بهبود جوانه‌زنی و رشد اولیه در شرایط کم‌آبی می‌شود؛ این تحقیق تأکید کرد که این پوشش‌ها با کاهش هدایت روزنه‌ای (stomatal conductance) و افزایش کارایی مصرف آب (WUE)، مقاومت به خشکی را افزایش می‌دهند (Wang *et al*., 2025). در پژوهش ژنگ و همکاران مشخص گردید که پوشش‌دهی بذر سویا با نانوکلات‌های ریز مغذی (آهن و روی) به بهبود جذب عناصر غذایی و افزایش عملکرد فتوسنتزی تحت تنش خشکی منجر می‌شود؛ این مطالعه نشان داد که این روش باعث کاهش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و افزایش بیان ژن‌های مرتبط با تحمل به خشکی مانند LEA (Late Embryogenesis Abundant) و DREB (Dehydration-Responsive Element-Binding) می‌شود (Zhang *et al*., 2025). در پژوهش کومار و همکاران روی نخود، گزارش کردند که پوشش‌دهی بذر با ترکیبات بیوپلیمری حاوی جلبک‌های دریایی مانند Ascophyllum nodosum باعث افزایش جوانه‌زنی و رشد ریشه در شرایط تنش خشکی می‌شود؛ این مطالعه نشان داد که این پوشش‌ها با القای سنتز هورمون‌های گیاهی مانند جیبرلین و اکسین، رشد گیاه را در شرایط نامساعد بهبود می‌بخشند (Kumar *et al*., 2025). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که پوشش‌دهی بذر می‌تواند با بهبود جذب آب، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تنظیم اسمزی، مقاومت گیاهان را در برابر تنش خشکی افزایش دهد (Zhang *et al*., 2025). با این حال، مکانیسم‌های دقیق این پاسخ‌ها در گیاه کلزا هنوز به‌طور کامل شناخته نشده است. از این رو، بررسی جامع تغییرات فیزیولوژیکی (نرخ فتوسنتز، سطح برگ، وزن خشک برگ، وزن خشک ریشه و شاخص‌های جوانه‌زنی) در پاسخ به پوشش‌دهی بذر تحت شرایط خشکی ضروری به نظر می‌رسد. هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی تأثیر پوشش‌دهی بذر با ترکیبات مختلف (شامل اسیدآمینه، جلبک دریایی و هیدروپرایم) بر پاسخ‌های فیزیولوژیکی گیاه کلزا تحت شرایط تنش خشکی است. این پژوهش به دنبال پاسخ به این سؤال است که آیا پوشش‌دهی بذر می‌تواند با تعدیل تنش اکسیداتیو و بهبود کارایی مصرف آب، تحمل به خشکی را در کلزا افزایش دهد؟ همچنین، این مطالعه به بررسی ارتباط بین تغییرات متابولیکی و عملکرد نهایی گیاه تحت تنش خشکی می‌پردازد. یافته‌های این تحقیق می‌توانند به توسعه راهکارهای نوین برای افزایش مقاومت به خشکی در گیاهان روغنی و بهبود پایداری سیستم‌های کشاورزی کمک کند.

مواد روش‌ها

این آزمایش در جهت بررسی اثر پرایمینگ و هیدروپرایمنگ بذر روی صفات فیزیولوژیکی گیاه کلزا در شرایط تنش خشکی در دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۳۹۹ اجرا شد. بذور گواهی شده کلزا (رقم هایولا) که در سال ۱۳۹۸ برداشت شده بود از مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی مغان تهیه شد.

طرح آزمایشی

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل خشکی در ۵ سطح (۰، خشکی، ۴-، ۶- و ۸- بار) و پوشش‌دارکردن بذر در ۶ سطح (هیومیک‌اسید در ۳ غلظت مختلف (۳، ۶ و ۹ گرم بر کیلوگرم بذر)، هیومیک‌اسید + هیدروپرایمینگ، هیدروپرایمینگ و شاهد (بدون پوشش)) بود. پژوهش حاضر در دو شرایط آزمایشگاه (۳ تکرار ۲۵ بذری در پتری دیش به قطر ۱۵ سانتی‌متر) و گلخانه (۵ تکرار ۶ بذری در گلدان‌هایی با حجم ۱۵ لیتر) به‌صورت مجزا انجام گردید.

آماده‌سازی بذور

قبل از انجام پرایمینگ، بذرهای سالم و یکنواخت کلزا انتخاب شده و با اتانول ۷۰٪ به مدت ۲-۱ دقیقه و سپس هیپوکلریت سدیم ۲-۱٪ به مدت ۳-۵ دقیقه ضدعفونی شدند. پس از شستشوی کامل با آب مقطر استریل، بذرها روی کاغذ صافی استریل در دمای محیط (25°C) خشک گردید. همچنین رطوبت اولیه بذرها با استفاده از رطوبت سنج تعیین شد تا پارامترهای پرایمینگ (مانند دوز و غلظت مواد) به‌درستی تنظیم شوند.

پرایمینگ و هیدروپرایمینگ بذر

هیومیک اسید و کربوکسی‌متیل‌سلولز از مؤسسه تحقیقات ثبت و گواهی بذر و نهال کرج تهیه شد. برای پوشش‌دار کردن بذر، از ماده کربوکسی‌متیل‌سلولز (۳ درصد) و یک ماده چسباننده استفاده گردید (Halmer, 2005). پوشش بذر با استفاده از یک دستگاه دست‌ساز انجام گرفت. در این دستگاه پوشش مناسب بذر با حرکات دورانی دستگاه انجام گرفت. با پوشش بذر تغییر محسوسی در شکل بذر ایجاد نشد ولی وزن بذر کمتر از ۱۰ درصد افزایش یافت. برای تیمار هیدروپرایمینگ، بذرها به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر غوطه‌ور و هوادهی انجام شد. در جدول ۱ تیمارهای مورد بررسی پوشش‌دار کردن بذر با محرک‌های مختلف رشد آمده است.

جدول ۱- تیمارهای مورد بررسی پوشش‌دار کردن بذر با محرک های مختلف رشد

تیمارها	توضیح
هیومیک‌اسید (۱)	۳ گرم هیومیک‌اسید در هر کیلوگرم بذر کلزا
هیومیک‌اسید (۲)	۶ گرم هیومیک‌اسید در هر کیلوگرم بذر کلزا
هیومیک‌اسید (۳)	۹ گرم هیومیک‌اسید در هر کیلوگرم بذر کلزا
هیدروپرایم + هیومیک‌اسید (۲)	هیدروپرایمینگ + ۶ گرم هیومیک‌اسید در هرکیلوگرم بذر کلزا
هیدروپرایم	هیدروپرایمینگ
شاهد	بذر بدون مصرف چسب و محرک‌های مختلف رشد

بررسی آزمایشگاهی تیمارها

در این آزمایش، تنش خشکی با استفاده از محلول‌های آبی دارای پتانسیل اسمزی مشخص و یکسان‌سازی‌شده با پلی‌اتیلن‌گلیکول (PEG 6000) اعمال گردید. ابتدا محلول‌های PEG دارای پتانسیل‌های اسمزی معادل صفر (شاهد)، ۲-، ۴-، ۶- و ۸- بار، مطابق معادله میچل-کافمن (Michel & Kaufmann, 1973) تنظیم شد. بذرها روی کاغذ صافی استریل به ضخامت ۰/۵ میلی‌متر کشت گردید. تیمارهای اعمال شده شامل سطوح مختلف خشکی بودند که به دقت کنترل شدند. نمونه‌ها در ژرمیناتور با دمای ثابت ۱±۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند تا شرایط محیطی یکسانی برای تمام تیمارها فراهم شود. فرآیند جوانه‌زنی با دقت بالایی مورد پایش قرار گرفت. شمارش بذرهای جوانه‌زده سه بار در روز انجام شد و بذرهایی که ریشه‌چه آن‌ها به طول ۲ میلی‌متر رسیده بود، به‌عنوان بذر جوانه‌زده در نظر گرفته شدند. این معیار براساس استانداردهای بین‌المللی آزمون بذر (ISTA, 2023) تعیین شد. شمارش تا زمانی ادامه یافت که برای سه روز متوالی هیچ افزایشی در تعداد بذرهای جوانه‌زده مشاهده نشود. برای تحلیل دقیق داده‌ها از نرم‌افزار تخصصی Germin استفاده شد (Soltani & Maddah, 2024). این نرم‌افزار پارامترهای مهم جوانه‌زنی شامل زمان) D50 مدت زمان لازم برای رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی) را از طریق درون‌یابی منحنی تجمعی

جوانه‌زنی محاسبه کرد. همچنین سرعت جوانه‌زنی نیز براساس معادلات استاندارد تعیین گردید. این روش‌های تحلیلی امکان مقایسه دقیق اثر تیمارهای مختلف بر شاخص‌های جوانه‌زنی را فراهم آورد. سرعت جوانه‌زنی از رابطه ۱ و درصد جوانه‌زنی از رابطه ۲ بدست آمد (Kotar, 2023).

$$R50 = 1/D50 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$GP = 100 \times \ n/N \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه ۱، R50 سرعت ۵۰ درصد جوانه‌زنی و D50 مدت زمان رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی است. در رابطه ۲، N کل بذرکشت شده، n تعداد بذور جوانه زده و GP درصد جوانه‌زنی است.

در این پژوهش، رشد گیاهچه‌های کلزا با استفاده از روش کشت در لوله مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، ابتدا بذرها بر روی کاغذ جوانه‌زنی به ابعاد ۱۵×۵۰ سانتی‌متر کشت شدند. در هر تکرار آزمایشی، ۲۵ بذر از هر تیمار با فاصله ۲ سانتی‌متر از لبه کاغذ قرار داده شد و با قرار دادن لایه دوم کاغذ صافی و افزودن ۱۰ میلی‌لیتر آب استریل، شرایط مناسب برای جوانه‌زنی فراهم گردید. سپس کاغذهای حاوی بذر به شکل استوانه‌ای لوله شده و درون لوله‌های کشت قرار گرفتند. این لوله‌ها در ظروف استوانه‌ای حاوی آب به ارتفاع ۳ سانتی‌متر گذاشته شدند و به منظور جلوگیری از تبخیر رطوبت، کاملاً مسدود شدند. ظروف کشت به ژرمیناتور تاریک با دمای ثابت ۱±۲۵ درجه سانتی‌گراد منتقل گردیدند و به مدت ۱۰ روز در این شرایط نگهداری شدند. پس از پایان دوره انکوباسیون، پارامترهای رشدی شامل تعداد بذرهای سبز شده، طول ریشه‌چه و هیپوکوتیل (با دقت ۱ میلی‌متر)، درصد گیاهچه‌های عادی و غیرعادی، و همچنین وزن خشک ریشه‌چه، هیپوکوتیل و کل گیاهچه (پس از خشک‌کردن در آون ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت و با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم) اندازه‌گیری و ثبت شدند. تمام مراحل آزمایش در شرایط کنترل شده و استریل انجام پذیرفت تا از صحت و دقت نتایج اطمینان حاصل شود.

بررسی گلخانه‌ای تیمارها ابتدا، گلدان‌ها کاملاً آبیاری شد تا آب از زهکش کف خارج گردید و به ظرفیت مزرعه (حداکثر رطوبت پس از زهکش) رسید. سپس، تمام گلدان‌ها به دقت توزین شد و وزن اولیه یادداشت گردید؛ این وزن، معادل ظرفیت مزرعه یا ۱۰۰٪ رطوبت است. بعد، به‌طور کامل آبیاری قطع شد. هر روز گلدان‌ها دوبار توزین شد تا میزان کاهش رطوبت براساس کاهش وزن محاسبه شود. سپس با استفاده از جدول رابطه رطوبت وزنی خاک و پتانسیل آب، زمان رسیدن تیمارهای آزمایش به پتانسیل ۲- بار تا ۸- بار مشخص شد. در این بخش از آزمایش، صفاتی مانند سطح برگ، وزن خشک برگ، وزن خشک ریشه و شاخص کلروفیل در دو زمان ۲۸ و ۶۰ روز پس از کاشت در گلخانه اندازه‌گیری شد. نمونه‌های بذری کلزا به‌صورت تصادفی، برداشت شده و در گلدان‌های حاوی خاک کاشته شدند. آبیاری براساس ظرفیت زراعی (یعنی هنگامی که ۳۰ تا ۵۰ درصد آب در دسترس گیاه تخلیه شده بود و به میزانی که آبشویی اتفاق نیوفتد) انجام شد. برای اندازه‌گیری وزن خشک ریشه، نمونه‌ها پس از جداسازی اجزای گیاه، به مدت ۴۸ ساعت در آون خشک و با ترازوی دیجیتال با دقت ۰۱/ توزین شدند. برای اندازه‌گیری سطح برگ گیاه، برگ‌ها روی کاغذ میلی‌متری قرار گرفتند و با استفاده خودکار دور آن‌ها به دقت ترسیم و مساحت ترسیم شده محاسبه شد. اندازه‌گیری شاخص کلروفیل نیز با استفاده از کلروفیل متر انجام شد. برای ایجاد تنش خشکی از پتانسیل‌های اسمزی مختلف استفاده شد و منحنی رطوبتی خاک با معادلات ساکستن و همکاران محاسبه گردید (Saxton *et al.*, 1986). گلدان‌ها به‌طور مرتب توزین شده و آب مورد نیاز براساس اختلاف وزن و تیمارهای تنش خشکی افزوده می‌شد. پس از سبز شدن بذرها، گیاهچه‌ها تنک شده و ۳ بوته سالم در هر گلدان نگهداری شد. در پایان آزمایش، صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاهان اندازه‌گیری شد.

تجزیه‌وتحلیل آماری

داده‌ها با نرم‌افزار SAS ver 9.1تجزیه واریانس شدند و سپس مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD انجام گرفت. رسم اشکال توسط نرم افزار Excel انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج آزمایش حاضر نشان داد، اثر اصلی تیمارهای خشکی روی سرعت جوانه‌زنی، درصد سبزشدن، زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی و شاخص کلروفیل در سطح احتمال ۱ درصد آماری و اثر اصلی پوشش‌دار کردن بذر روی درصد سرعت جوانه‌زنی، درصد سبزشدن، زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی در سطح احتمال ۱ درصد و روی شاخص کلروفیل در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود. برهم‌کنش تنش خشکی در تیمار پوشش بذر برای صفات سطح برگ، وزن خشک برگ

و وزن خشک ریشه در سطح احتمال ۱ درصد آماری معنی‌دار بود (جدول ۲).

جدول ۲- میانگین مربعات تنش خشکی و پیش‌تیمار بذر روی صفات مورد بررسی در گیاه کلزا

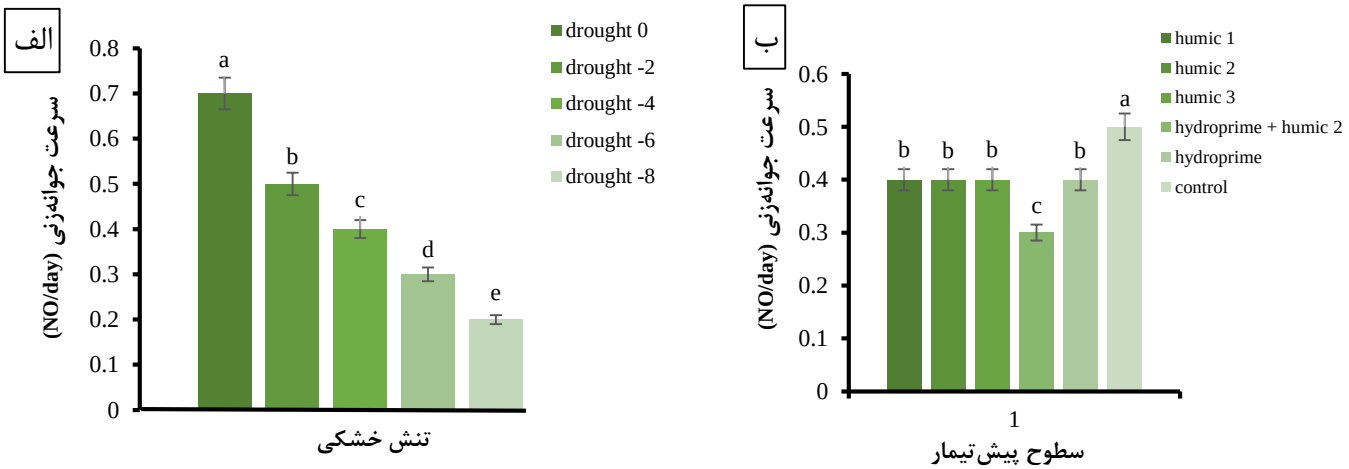
منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات						
		سرعت جوانه‌زنی	درصد سبز شدن	زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی	شاخص کلروفیل	سطح برگ	وزن خشک برگ	وزن خشک ریشه
سطوح تنش خشکی (A)	۴	۰/۰۰۰۱۲**	۹۲/۴۱**	۳۸۵۵۵۰/۴۵**	۰/۸۴**	۲۱۷/۱۳**	۵/۱۳**	۱/۵۴**
سطوح پیش‌تیمار بذر (B)	۵	۰/۰۰۰۰۰۲۵**	۱/۷۷**	۸۴۵۹/۲۷**	۰/۱۳*	۱۲/۰۸**	۰/۱۹**	۰/۵۲**
B × A	۲۰	۰/۰۰۰۰۰۰۱۷^{ns}	۰/۱۹^{ns}	۷۵۹/۵۱^{ns}	۰/۰۷^{ns}	۱/۶۷**	۰/۰۲**	۰/۰۲**
خطا	۶۰	۰/۰۰۰۰۰۰۱۸	۰/۲۱	۶۵۱/۹۰	۰/۰۶	۰/۷۷	۰/۰۰۷	۰/۰۱
ضریب تغییرات (٪)	-	۹/۳۴	۵/۶۹	۱۰/۱۷	۴/۸۲	۹/۷۹	۵/۷۳	۸/۵۴

** و ^{ns} به‌ترتیب معنی داری در سطح ۱ درصد و غیرمعنی‌دار

سرعت جوانه‌زنی

شکل ۱ روند کلی کاهشی سرعت جوانه‌زنی در بذر کلزا با افزایش شدت تنش خشکی را در تمام تیمارها نشان می‌دهد. این کاهش کاملاً منطبق بر یافته‌های جهانی است که تأثیر منفی خشکی بر فرآیندهای فیزیولوژیک گیاه را تأیید می‌کنند (Farooq *et al.*, 2009). بیشترین سرعت جوانه زنی در تیمار خشکی صفر (۰/۷ عدد در روز) و کمترین آن در تیمار خشکی ۸- بار (۰/۲ عدد در روز) بدست آمد که نتایج بیانگر کاهش ۳/۵ برابری سرعت جوانه‌زنی در شرایط خشکی ۸- بار است. این کاهش شدید نه تنها یک پاسخ فیزیولوژیک کلاسیک، بلکه بازتابی از اختلال در شبکه‌های پیچیده سیگنالینگ مولکولی و اپیژنتیک در بذر است. پژوهش‌های نوین نشان می‌دهند که تنش خشکی شدید، فراتر از ایجاد کمبود آب فیزیکی، با القای گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) باعث بروز اکسیداتیو در غشاهای سلولی و ماکرومولکول‌های حیاتی مانند آنزیم‌های دخیل در هیدرولیز ذخایر اندوسپرم می‌شود (Zhang *et al.*, 2025). به‌طور خاص، مطالعات اپیژنتیک در سال‌های اخیر تاکید دارند که هایپراستیله شدن هیستون‌ها در ناحیه پروموتور ژن‌های کلیدی آلفا-آمیلاز و ایزوپروپیل مالات سینتاز تحت تنش خشکی به خاموشی بیان آن‌ها و در نتیجه توقف تامین انرژی و پیش‌سازهای مورد نیاز برای رشد جنین منجر می‌گردد (Li & Schmidt, 2025). بنابراین،کاهش سرعت جوانه‌زنی را می‌توان تا حد زیادی به اختلال در فرآیندهای تجزیه ذخایر و مهار مسیرهای متابولیک انرژی‌زا نسبت داد. این یافته‌ها اهمیت استفاده از تکنیک‌های نوین مانند پرایمینگ بذر و یا القای حافظه اپیژنتیک (Epigenetic Priming) را برای افزایش تاب‌آوری بذرهای کلزا در برابر خشکی‌های شدید، بیش از پیش آشکار ساخته است (Agrawal & Chen, 2025). در مقایسه تیمارهای پوشش‌دهی بذر مشخص شد که بالاترین سرعت جوانه‌زنی در بذرهای پیش‌تیمارشده در شاهد (۰/۵ عدد در روز) و پایین‌ترین آن در تیمار هیدروپرایم به‌همراه سطح دوم هیومیک اسید (۰/۳ عدد در روز) به‌دست آمد که نشانگر کاهش ۶۷ درصدی سرعت جوانه‌زنی نسبت به تیمار شاهد است. طبق پژوهش‌های نوین در حوزه فناوری بذر، پوشش‌دهی بذر (Seed Coating) اگرچه یک استراتژی کلیدی برای ارتقای کیفیت و عملکرد بذر محسوب می‌شود، اما به‌طور مستقیم بر سینتیک جوانه‌زنی تأثیر می‌گذارد و در اغلب موارد به کاهش سرعت این فرآیند حیاتی منجر می‌گردد. این تأخیر عمدتاً ناشی از ایجاد یک سد فیزیکی موقت توسط پلیمرها و مواد پرکننده تشکیل‌دهنده پوشش است که فرآیندهای جذب آب و تبادلات گازی (دسترسی به اکسیژن) را که برای شکست خواب و آغاز متابولیسم بذر ضروری هستند، با کندی مواجه می‌سازد. به‌عنوان مثال، مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۴ روی بذر گندم نشان داد که پوشش‌های پلیمری با ضخامت متوسط، زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی را به‌طور میانگین ۱۲ تا ۱۸ ساعت در مقایسه با بذرهای بدون پوشش به تأخیر انداختند (Zhang *et al.*, 2024). با این حال، تاکید محققان در سال‌های اخیر بر این است که این کاهش سرعت اولیه را نباید به‌عنوان یک نقطه ضعف، تفسیر کرد، بلکه بخشی از یک مزیت اکولوژیک و

زراعی بزرگتر است. پوشش‌های نسل جدید، با بهره‌گیری از فناوری‌های رهایش کنترل‌شده (Controlled-Release Technologies)، این تأخیر را به منظور ایجاد یکنواختی بیشتر در جوانه‌زنی و محافظت از بذر در برابر استرس‌های زیستی و غیرزیستی اولیه مدیریت می‌کنند. یک پژوهش مروری در سال ۲۰۲۵ خاطرنشان کرد که این تأخیر جزئی، اغلب با افزایش قابلیت اطمینان و درصد نهایی استقرار مزرعه جبران می‌شود، چرا که از جوانه‌زنی زودرس و آسیب‌پذیر در شرایط نامطمئن محیطی جلوگیری به عمل می‌آورد (Smith & Müller, 2025). علاوه بر این، پیشرفت‌ها در مهندسی مواد پوشش، به سمت توسعه فرمولاسیون‌های هوشمندی سوق یافته که پاسخگویی به محرک‌های محیطی (مانند رطوبت و دمای خاک) را بهینه می‌سازند. استفاده از نانوکامپوزیت‌های متخلخل در پوشش‌ها که در یک مطالعه در سال ۲۰۲۴ مورد بررسی قرار گرفت بدون ایجاد تأخیر بیش از حد، امکان تبادل بهینه گاز و آب را فراهم کرده و در عین حال محموله‌های محافظتی (مانند عوامل بیوکنترل) را به‌طور هدفمند رهاسازی نمود. بنابراین، در حالی که پوشش بذر به‌عنوان یک عامل کاهنده سرعت جوانه‌زنی عمل می‌کند، پارادایم کنونی در تحقیقات، به حذف این اثر محدود نمی‌شود، بلکه بر مدیریت و بهینه‌سازی آن برای دستیابی به نتایج مطلوب‌تر در شرایط مزرعه متمرکز شده است.



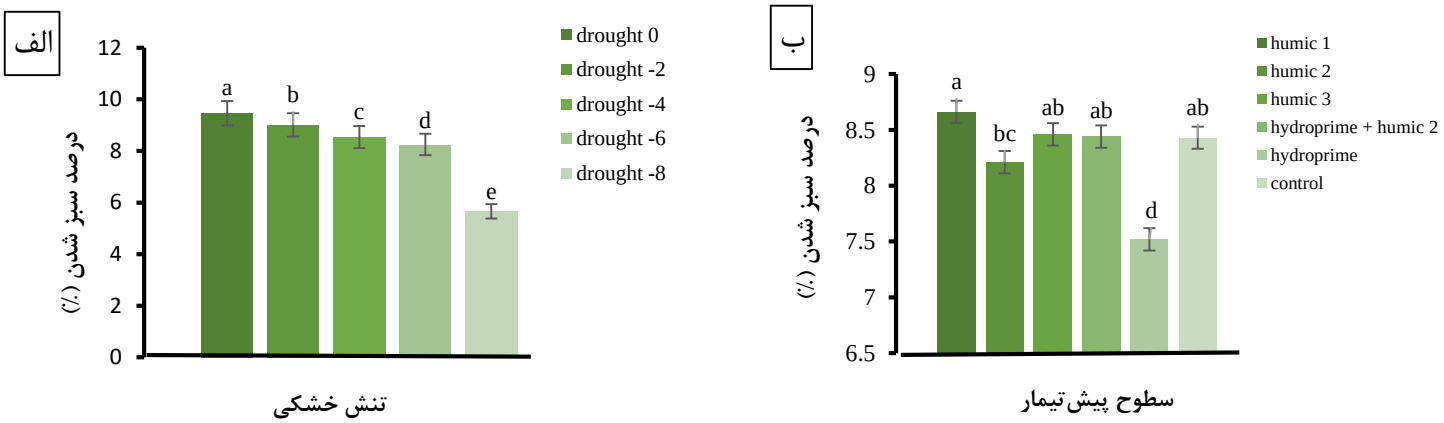
شکل ۱- اثر تنش خشکی (الف) و سطوح پیش‌تیمار بذر (ب) روی سرعت جوانه‌زنی بذر گیاه کلزا

درصد سبزشدن

نتایج شکل ۲ نشان می‌دهد که بیشترین تعداد بوته در تیمار شاهد (۹/۴۶ درصد) و کمترین تعداد بوته (۵/۶۶ درصد) در تیمار تنش خشکی ۸- بار سبز شدند. بنابرین بین برترین و ضعیف‌ترین تیمار اختلاف ۶۷ درصدی وجود داشت که نشان‌دهنده‌ی کاهش جوانه‌زنی در شرایط خشکی در بذرهای کلزا است. در تحقیقات مشخص شده است که خشکی با ایجاد یک تنش کم¬آبی چندوجهی، جوانه‌زنی و سبزشدن بذور را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. در سطح فیزیولوژیک، کمبود آب با مختل کردن فرآیندهای حیاتی از جمله جذب آب، متابولیسم رزروهای غذایی و فرآیندهای جبران، مانع از ادامه رشد جنین می‌شود (Khan *et al.*, 2024). در سطح مولکولی، این تنش به تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن شده که باعث بروز استرس اکسیداتیو، پراکسیداسیون لیپیدهای غشاها و تخریب پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک منجر می‌گردد (Zhang *et al.*, 2025). علاوه بر این، مطالعات اپیژنتیک جدید نشان می‌دهند که خشکی با ایجاد تغییرات در الگوی استیله شدن هیستون‌ها در پروموتور ژن‌های کلیدی مانند آنزیم آلفا-آمیلاز، بیان آن‌ها را مهار کرده و در نتیجه تجزیه نشاسته و تأمین انرژی برای رشد ریشه‌چه را به شدت محدود می‌کند (Li & Schmidt, 2025). این اختلال همزمان در سطح فیزیولوژیک و مولکولی، در نهایت به کاهش نرخ سبز شدن و استقرار ناموفق گیاهچه منجر می‌شود. همچنین در آزمایش حاضر مشخص شد که پایین‌ترین درصد سبزشدن در بین سطوح مختلف

پیش‌تیمار بذر در تیمار هیدروپرایم (۷/۵۲ درصد) بدست آمد که نسبت به برترین تیمار سطح اول هیومیک‌اسید (۸/۶۶ درصد) اختلاف ۱۵ درصدی نشان داد (شکل ۲). بنابراین نتایج بیانگر این است که باوجود اثر منفی مواد پیش‌تیمار بذر روی سرعت جوانه‌زنی بذر کلزا، این مواد سبب افزایش درصد جوانه‌زنی شده است. پیش‌تیمار بذر با هیومیک‌اسید یک راهبرد مؤثر برای بهبود درصد سبز شدن بذور تحت تنش‌های محیطی، به‌ویژه خشکی، محسوب می‌شود. مکانیسم عمل این ترکیب چندوجهی است؛ به‌طوری که از یک سو با فعال‌سازی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز (SOD) و کاتالاز (CAT) استرس اکسیداتیو ناشی از تنش را خنثی کرده و از آسیب به غشاها و ماکرومولکول‌ها جلوگیری می‌کند (Canellas *et al.*, 2024). از سوی دیگر، هیومیک‌اسید به‌عنوان یک محرک زیستی، بیان ژن‌های دخیل در سنتز هورمون‌های رشد (مانند جیبرلین) و همچنین ژن‌های کدکننده آکواپورین‌ها را افزایش داده و به بهبود جذب آب و تحرک مواد ذخیره‌ای در بذر کمک شایانی می‌کند (Rose *et al.*, 2020). نتایج مطالعه حاضر نیز که همسو با یافته‌های Gupta *et al.* (2023) است، به وضوح نشان داد که تیمار بذرهای کلزا با هیومیک‌اسید به افزایش معنی‌دار درصد سبز شدن منجر گردید. این بهبود قابل‌توجه عمدتاً به دلیل افزایش قدرت حیات بذر و رشد سریع‌تر ریشه‌چه برای دستیابی به رطوبت عمقی خاک است. بنابراین، می‌توان از هیومیک‌اسید به‌عنوان یک اکسیر طبیعی و مقرون‌به‌صرفه در سیستم‌های کشاورزی پایدار برای ارتقای استقرار موفق محصول استفاده نمود.

.

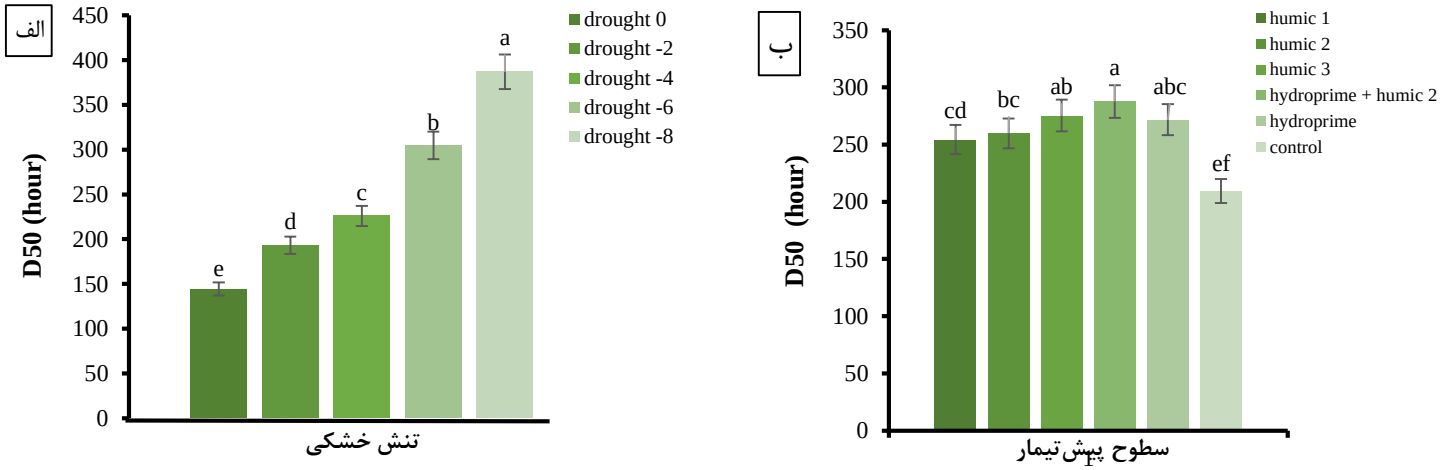


شکل ۲- اثر تنش خشکی (الف) و سطوح پیش‌تیمار بذر (ب) روی درصد سبزشدن گیاهچه کلزا

زمان تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی

نتایج مقایسه میانگین تیمارها نشان می¬دهد تنش ۸- بار بیشترین زمان (۳۸۶/۹۴ ساعت) را برای رسیدن به ۵۰ درصد جوانه‌زنی نیاز داشت که در مقایسه با شاهد که در سریع‌ترین زمان (۱۴۴/۳۴ ساعت) به این میزان رسیده بود، افزایش ۲۶۸ درصدی نشان داد و همچنین تیمار شاهد در کمترین زمان و هیدروپرایمینگ + هیومیک‌اسید (۲) در بیشترین زمان در بین سطوح مختلف پیش‌تیمار بذر به این میزان جوانه‌زنی رسیدند و اختلاف ۱۷/۵ درصدی داشتند (شکل ۳). مطالعات جدید به وضوح نشان می‌دهند که تنش خشکی با ایجاد اختلال در متابولیسم انرژی، برهم زدن تعادل هورمونی (افزایش آبسیزیک‌اسید و کاهش جیبرلین) و القای آسیب اکسیداتیو ناشی از تجمع گونه‌های فعال اکسیژن، جوانه‌زنی بذر کلزا را به شدت مهار می‌کند. در مقابل، فناوری پیش‌تیمار بذر (Seed Priming) به‌عنوان یک راهبرد کارآمد و پایدار با القای نوعی حافظه استرسی در بذر، موجب افزایش تابآوری آن می‌شود. مکانیسم عمل این فناوری بر پایه فعال‌سازی زودهنگام سیستم آنتی‌اکسیدانی (افزایش فعالیت آنزیم‌هایی نظیر کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز، تجمع اسمولیت‌ها و تنظیم مثبت ژن‌های پاسخگو به تنش استوار است که در نهایت به جوانه‌زنی سریع‌تر، یکنواخت‌تر و موفق‌تر حتی تحت شرایط محدودیت

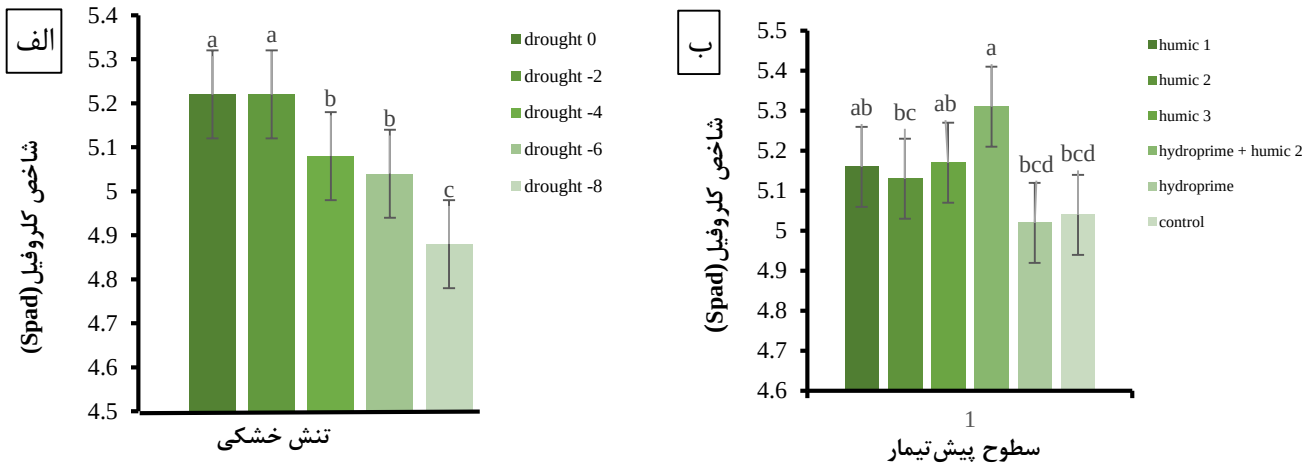
آبی منجر می‌شود .(El-Saadony, 2024) از نگاه ما، زیبایی و قدرت واقعی پیش‌تیمار بذر در سادگی و انقلابی بودن آن نهفته است؛ این فناوری به جای مقابله مقطعی با خشکی با صرف منابع کلان، اساساً قابلیت بقا را در نخستین لحظات زندگی گیاه نهادینه می‌کند. این رویکرد، نمادی از کشاورزی هوشمند است که با تقویت مکانیسم‌های ذاتی گیاه، پاسخی طبیعی، مقرون‌به‌صرفه و پایدار برای چالش‌های عصر تغییر اقلیم ارائه می‌دهد و از آزمایشگاه تا مزرعه، پلی امیدوارکننده بین علم و امنیت غذایی ایجاد می‌کند.



شکل ۳- اثر تنش خشکی (الف) و سطوح پیش‌تیمار بذر (ب) روی زمان لازم برای ۵۰ درصد جوانه‌زنی (D50) برحسب ساعت در بذر گیاه کلزا

شاخص کلروفیل

در تیمارهای بدون تنش و تنش ۲- بار، بالاترین شاخص کلروفیل (۵/۲۲) در گیاه کلزا مشاهده شد و در شرایط ۸- بار نیز کم‌ترین میزان این شاخص (۴/۸۸ اسپد) ثبت شد (شکل ۴). نتایج بیانگر عدم کاهش این شاخص تا تنش ۲- بار است. در کل کاهش ۷ درصدی در شاخص کلروفیل تحت تاثیر تنش خشکی ۸- بار در مقایسه با شاهد بدون تنش مشاهده شد. در بین پیش‌تیمارهای بذر، هیدروپرایم همراه سطح دوم هیومیک اسید بیش‌ترین میزان (۵/۳۱ اسپد) و هیدروپرایم کم‌ترین میزان (۵/۰۲ اسپد) این شاخص را نشان دادند. اختلاف ۵/۸ درصدی بین این دو تیمار و اثر هیومیک‌اسید به‌صورت مستقل نشان‌دهنده‌ی اثرات هم‌افزایی ناشی از ترکیب هیدروپرایم و هیومیک‌اسید در بهبود شاخص کلروفیل است. با توجه به مطالعات اخیر، اثرات متقابل خشکی و پیش‌تیمار بذر به‌عنوان یک راهکار مدیریتی کلیدی برای بهبود کارایی فتوسنتز و وضعیت کلروفیل در گیاه کلزا و سایر گیاهان زراعی مورد تأکید قرار گرفته است. تحقیقات نشان می‌دهد که تنش خشکی با کاهش محتوای کلروفیل‌های a و b و کاروتنوئیدها، باعث تخریب دستگاه فتوسنتزی و کاهش کارایی کوانتومی فتوسیستم II(Fv/Fm) می‌شود. در مقابل، پیش‌تیمار بذر با القای آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (مانند سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز)، تجمع متابولیت‌های محافظ (مانند پرولین) و حفظ یکپارچگی غشاهای کلروپلاستی، از تجزیه کلروفیل تحت تنش جلوگیری کرده و شاخص‌های کلروفیل را در مقایسه با گیاهان شاهد به‌طور معناداری افزایش می‌دهد. به‌طور خاص، مطالعه‌ای روی کلزا (*Brassica napus*) تأیید کرده که پیش‌تیمار بذر با نانوذرات سلنیوم و اسید سالیسیلیک نه‌تنها محتوای نسبی کلروفیل را حفظ می‌کند، بلکه از طریق بهبود نرخ تبادل گازی و فعالیت فتوشیمیایی، کارایی مصرف آب را نیز در شرایط کم‌آبی افزایش می‌دهد (Hassan *et al*., 2023). یافته‌های این مطالعات نویدبخش توسعه راهکارهای عملی و مقرون‌به‌صرفه برای کشاورزان در مناطق خشک است. با این حال، به نظر می‌رسد موفقیت این تکنیک‌ها به شدت به تعیین دقیق غلظت و زمان بهینه پیش‌تیمار برای هر ژنوتیپ و شرایط محیطی خاص بستگی دارد. بنابراین، اگرچه پیش‌تیمار بذر یک ابزار قدرتمند است، اما نیازمند بومی‌سازی و تحقیقات میدانی بیشتر برای دستیابی به حداکثر پتانسیل خود در مزارع واقعی است.

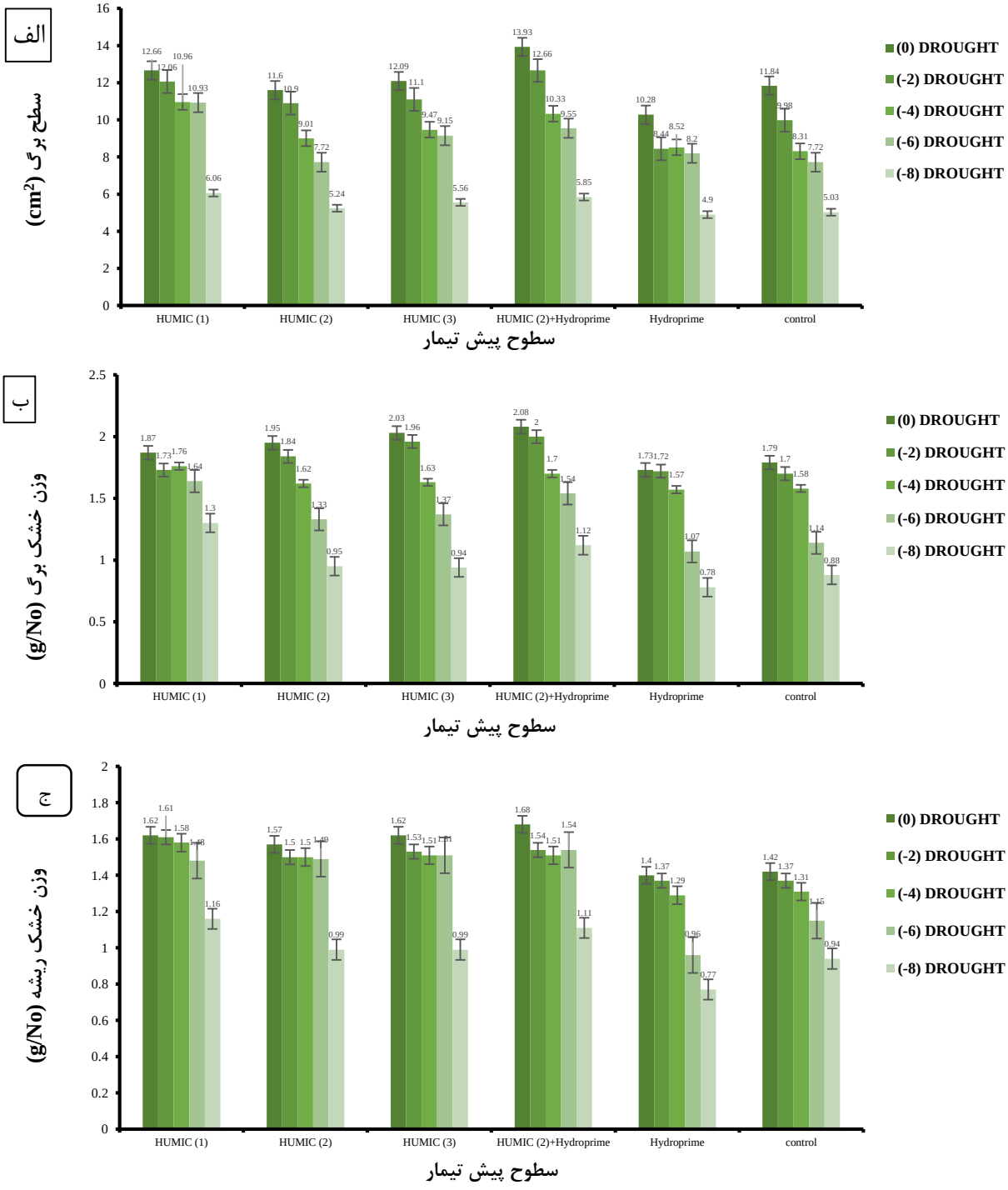


شکل ۴- اثر تنش خشکی (الف) و سطوح پیش‌تیمار بذر (ب) روی شاخص کلروفیل (Spad) گیاه کلزا

سطح برگ

بالاترین سطح برگ (۱۳/۹۳ سانتی‌متر) کلزا در شرایط عدم تنش خشکی و پیش‌تیمار ترکیب هیدروپرایم و سطح دوم هیومیک اسید و پایین‌ترین سطح برگ (۴/۹ سانتی‌متر) در تیمار هیدروپرایم و خشکی ۸- بار به دست آمد که اختلاف ۲۸۴ درصدی بین بالاترین و پایین‌ترین مقدار وجود داشت. در شرایط خشکی ۶- بار و پوشش سطح اول هیومیک‌اسید، سطح برگ ۱۰/۹۳ سانتی‌متر و در شرایط ۲- بار و شاهد، ۹/۹۸ سانتی‌متر و پایین‌تر بود. نتایج به وضوح نشان می‌دهد که پیش تیمار بذر در تعدیل اثرات منفی تنش خشکی روی سطح برگ کلزا اثرگذاری بالایی دارد (شکل ۵). همچنین مشخص شد در شرایط خشکی ۸- بار امکان افزایش سطح برگ با پوشش‌دهی بذر وجود دارد ولی درصد آن پایین است. مطالعات نشان می‌دهد که ترکیب هیومیک‌اسید با تکنیک‌های پرایمینگ می‌تواند باعث افزایش جذب آب، بهبود وضعیت رطوبتی سلول و تحریک سنتز هورمون‌های رشد مانند اکسین و سیتوکینین شود که نهایتاً به حفظ سطح برگ و ادامه فرآیند فتوسنتز در شرایط تنش منجر می‌شود. همچنین، این مطالعه تأکید می‌کند که اثر هیومیک‌اسید به‌صورت دوز-پاسخ بوده و استفاده از غلظت بهینه (سطح دوم هیومیک اسید در این آزمایش) برای دستیابی به حداکثر اثر ضروری است. این نتایج، همسو با یافته‌هایی بوده و بر لزوم دقت در تعیین غلظت مناسب برای پوشش دهی بذر تأکید دارد .(Zhang, 2023)

در تحقیقی روی گندم و ذرت نیز، پیش‌تیمار بذر به بهبود عملکرد دانه تحت شرایط کم‌آبی منجر شد که این روش با کاهش خسارات ناشی از تنش اکسیداتیو و تثبیت فرآیندهای متابولیک، پایداری غشاها و یکپارچگی دستگاه فتوسنتزی، تاب‌آوری گیاه را در برابر دوره‌های خشکی افزایش می‌دهد.(Afzal, 2023).



شکل ۵- اثر متقابل تنش خشکی و سطوح پیش‌تیمار بذر روی سطح برگ (الف)، وزن خشک برگ (ب) و وزن خشک ریشه ((ج).

وزن خشک برگ

بهترین تیمار وزن خشک برگ (۲/۰۸ گرم در بوته) در شرایط عدم خشکی و پوشش‌دهی سطح دوم هیومیک اسید به‌همراه هیدروپرایم مشاهده شد. سبک‌ترین برگ‌ها (۰/۷۸ گرم در بوته) نیز در تیمار تنش خشکی ۸- بار و پوشش‌دهی با هیدروپرایم ثبت شدند. وجود اختلاف فاحش ۱۶۷ درصدی نشان‌دهنده‌ی اثرگزاری بالای تیمارهای آزمایش است (شکل ۵). در خشکی ۸- بار و در پوشش‌دهی با هیدروپرایم، وزن خشک برگ (۰/۷۸ گرم در بوته) پایین‌تر از پوشش‌دهی با ترکیب هیدروپرایم و سطح دوم هیومیک‌اسید (۱/۱۲ گرم در بوته) به میزان ۴۴ درصد بود که نشان‌دهنده‌ی اثرات بالای هم‌افزایی این ترکیب در مورد صفت وزن خشک برگ می‌باشد. همچنین وزن خشک برگ در سطح اول هیومیک اسید و خشکی ۶- و ۸- به ترتیب ۱/۶۴ و ۱/۳ گرم در بوته بود که نزدیک به تیمار عدم خشکی و بدون پوشش‌دهی (۱/۷۹ گرم در بوته) بود و این نشان‌دهنده‌ی کارایی بالای هیومیک اسید در تعدیل اثرات خشکی و بهبود وزن خشک برگ کلزا است. با توجه به تحقیقات اخیر نیز، اثرات متقابل تنش خشکی و تیمارهای بذر با هیومیک‌اسید و هیدروپرایمینگ، نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود وزن خشک برگ و تحمل به خشکی دارد. مطالعات نشان می‌دهند که کاربرد توأم هیومیک‌اسید (به‌عنوان محرک زیستی قوی) و تکنیک هیدروپرایمینگ (غوطه‌وری در آب)، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه و کارایی فتوسنتز را حتی تحت شرایط کم‌آبی به‌طور معناداری افزایش می‌دهد. به‌طور خاص، هیومیک‌اسید با بهبود جذب عناصر غذایی مانند نیتروژن و پتاسیم و افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز، از تخریب کلروفیل جلوگیری کرده و در نتیجه، زیست‌توده برگ را حفظ می‌کند. هیدروپرایمینگ نیز با هماهنگ‌سازی و تسریع جوانه‌زنی، اجازه می‌دهد گیاه سریع‌تر سیستم ریشه‌ای خود را توسعه داده و زودتر به منابع آبی عمقی دسترسی یابد. این اثر سینرژیستیک (هم‌افزایی) بین تیمارهای فیزیکی (هیدروپرایم) و شیمیایی (هیومیک‌اسید) به تولید بیشتر مواد فتوسنتزی و در نهایت، افزایش وزن خشک برگ منجر می‌شود (Abdel-Latef, 2022). از دیدگاه کاربردی، این یافته‌ها برای کشاورزان و متخصصین به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک بسیار حائز اهمیت است. پیشنهاد می‌شود برای دستیابی به حداکثر اثربخشی، بذرها ابتدا به مدت ۱۲ تا ۲۴ ساعت در آب (هیدروپرایمینگ) و سپس با محلول هیومیک‌اسید خالص (با کیفیت بالا) آغشته شده و بلافاصله کشت شوند. این پروتکل ساده و کم‌هزینه، نه‌تنها استقرار اولیه گیاهچه را بهبود می‌بخشد، بلکه با تقویت سیستم دفاعی گیاه، اثرات مخرب خشکی را در مراحل بحرانی بعدی مانند گلدهی و پرشدن دانه نیز کاهش داده و عملکرد نهایی را تضمین می‌کند. بنابراین، ادغام این تیمارها می‌تواند به‌عنوان یک راهکار استراتژیک و پایدار در مدیریت خشکی و افزایش بهره‌وری محصولات کشاورزی مورد توجه قرار گیرد.

وزن خشک ریشه

طبق نتایج شکل ۵، همه پیش‌تیمارها به جز هیدروپرایم اثرات مثبتی روی وزن خشک ریشه گذاشتند. همچنین نتایج نمایانگر اثرات دز-پاسخ هیومیک اسید می‌باشد و بایستی در میزان مصرف آن دقت شود. در مورد این صفت، سطح اول هیومیک‌اسید اثر بهتری روی وزن خشک ریشه گذاشته است. بیشترین وزن خشک ریشه (۱/۶۸ گرم در بوته) در شرایط عدم تنش و ترکیب هیدروپرایم با سطح دوم هیومیک‌اسید به‌دست آمد و کم‌ترین آن‌ها (۰/۷۷ گرم در بوته) در خشکی ۸- و تیمار هیدروپرایم حاصل گردید. اختلاف ۱۱۸ درصدی، بیانگر کارایی بالای پیش‌تیمار بذر در تعدیل اثرات خشکی و افزایش وزن ریشه کلزا است. این نتایج، نشانگر اثرات هم‌افزایی هیومیک و هیدروپرایم روی وزن خشک ریشه است. در تحقیقی مشخص شد که تیمار بذر با هیومیک‌اسید، محتوای هورمون‌های ریشه‌زایی مانند اکسین را افزایش داده و توسعه سیستم ریشه را در شرایط کم‌آبی تحریک می‌کند. از سوی دیگر، هیدروپرایمینگ با بهبود کارایی جوانه‌زنی و یکنواختی استقرار گیاه، فرصت بیشتری برای توسعه ریشه قبل از مواجهه با خشکی فراهم می‌آورد. این اثر سینرژیستیک باعث توسعه عمقی و جانبی ریشه، افزایش جذب آب و مواد معدنی و در نهایت، تجمع بیشتر بیوماس در ریشه می‌شود (Gholami *et al*., 2022). از دیدگاه کاربردی، ترکیب این تیمارها یک راهکار مقرون‌به‌صرفه و پایدار برای کشاورزان، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک است. نتیجه نهایی، دستیابی به گیاهانی با بنیه قوی‌تر، کارایی بالاتر در جذب آب و در نهایت، عملکرد پایدارتر حتی تحت تنش است. این استراتژی به ویژه برای محصولات استراتژیک مانند گندم و ذرت که دارای سیستم ریشه‌ای فیبری هستند، بسیار حیاتی می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

هیدروپرایمینگ یک راهکار مؤثر و مقرون‌به‌صرفه برای تعدیل اثرات مخرب تنش خشکی است. این تیمارها با فعال‌سازی سیستم آنتی‌اکسیدانی (افزایش فعالیت آنزیم‌هایی مانند کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز)، تجمع متابولیت‌های سازگارکننده (مانند پرولین)، بهبود کارایی مصرف آب و حفظ یکپارچگی دستگاه فتوسنتزی، موجب افزایش چشمگیر شاخص‌های رشدی از جمله درصد سبزشدن، شاخص کلروفیل، سطح برگ و وزن خشک ریشه و برگ تحت شرایط تنش می‌شوند. اگرچه پوشش‌دهی بذر ممکن است سرعت جوانه‌زنی را کاهش دهد، اما این تأخیر با افزایش یکنواختی و درصد نهایی استقرار گیاهچه، جبران شده و در نهایت، به تولید گیاهانی با بنیه قوی‌تر و تاب‌آوری بالاتر منجر می‌گردد. اثر سینرژیستیک ترکیب هیدروپرایمینگ با غلظت بهینه هیومیک‌اسید (۶ گرم بر کیلوگرم بذر) بهترین نتایج را نشان داد. به‌عنوان پیشنهاد کاربردی، توصیه می‌شود کشاورزان در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بذرهای کلزا را ابتدا به مدت ۱۲ تا ۲۴ ساعت در آب (هیدروپرایمینگ) قرار داده و سپس با محلول هیومیک‌اسید با کیفیت و با غلظت مناسب پوشش‌دهی کنند تا استقرار اولیه محصول بهبود یافته و خسارات ناشی از خشکی در مراحل بحرانی رشد به حداقل برسد.

سپاسگزاری

از تمامی عزیزانی که در اجرا و نگارش این پژوهش کمک کرده‌اند، مخصوصا همکاران ارجمند در بخش‌های آزمایشگاهی دانشگاه محقق اردبیلی کمال تشکر و قدردانی را داریم..

منابع

Abdel Latef A. A. H., Abu-Alhmad M. F., Abdelfattah K. E., & Basit, A. (2022). The combined effects of humic acid and selenium on plant growth and drought tolerance: A novel approach. *Agronomy*, *12*(11), 2693. https://doi.org/10.3390/agronomy12112693.

Afzal, S., Sadaf, S., Akhtar, N., & Sultan, H. (2023). Seed priming-mediated induction of physio-biochemical memories in plants for abiotic stress tolerance: A review. *Plant Stress, 9*, 100193. https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100193

Agrawal, R., & Chen, Y. (2025). Nano-Priming and Epigenetic Memory: A Dual Approach to Enhance Abiotic *Stress Resilience in Oilseed Crops. Nature Plants, 11*(3), 145–162. https://doi.org/10.1038/s41477-025-01656-11

Canellas, L. P., Olivares, F. L., & Aguiar, N. O. (2024). Humic acids as biostimulants: unlocking the antioxidant system and inducing hormonal cross-talk in plants under abiotic stress. *Plant and Soil*, *485*(1-2), 123-145. https://doi.org/10.1007/s11104-024-06567-0

El-Saadony, M. T., Saad, A. M., El-Tahan, A. M., Salem, H. M., Soliman, S. M., & Abd El-Mageed, T. A. (2024). Role of nanoparticles in enhancing crop tolerance to abiotic stress: A comprehensive review. *Frontiers in Plant Science, 14*, 1326776. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1326776

Farooq, M., Hussain, M., & Siddique, K. H. M. (2023). *Drought stress in plants: An overview on implications, tolerance mechanisms and agronomic mitigation strategies*. *Advances in Agronomy*, *178*, 45-82.

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, *29*(1), 185-212.

Gholami, H., Saharkhiz, M. J., Raouf Fard, F., & Ghani, A. (2022). Humic acid and hydropriming synergistically improve root growth and drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) by modulating hormonal balance and photosynthetic efficiency. *Agricultural Water Management*, 271, 107800.

Goth, L., & Rass, P. (2004). A new method for determination of catalase activity. *Analytical Biochemistry*, *332*(1), 157-163. https://doi.org/10.1016/j.ab.2004.05.003

Gupta, S., Stirk, W. A., & Kulkarni, M. G. (2023). Humic acid enhances seed germination, seedling growth and antioxidant enzyme activity in maize under drought stress. *South African Journal of Botany*, *154*, 178-184.

Halmer, P. (2005). Ornamental bedding plant industry and plug production, p. 27–38. In: McDonald, M. B. and F. Y. Kwong (eds), *3*, 231-242 https://doi.org/10.1079/9780851999069.0027

Hassan, M. U., Chattha, M. U., Barbanti, L., Mahmood, A., Afzal, I., Rasheed, A., & Nawaz, M. (2023). Seed priming with selenium and salicylic acid enhances growth, physiological, and biochemical traits in oilseed rape (*Brassica napus* L.) under drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry, 201*, 107850. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107850

Ibrahim, M. N., & Deka, S. C. (2024). Nano-engineered seed coatings for enhanced germination and crop protection: A review. *ACS Agricultural Science & Technology*, *4*(2), 210-225.

International Seed Testing Association. (2023). *International rules for seed testing*. Bassersdorf, Switzerland: ISTA.

Khan, M. N., AlSolami, M. A., Basahi, R. A., & Siddiqui, M. H. (2024). Integrative Physiological Responses of Oilseed Crops to Water Deficit During the Critical Germination Stage. *Plant Physiology and Biochemistry*, 207, 108402. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108402

Kotar, M. (2023). *Advanced Methods in Seed Germination Analysis*. *Journal of Seed Science*, *15*(2), 45-60.

Kumar, R., Singh, A., Patel, S., & Devi, M. (2025). Seaweed-extract biopolymer seed coating improves chickpea germination and root growth under water deficit. *Scientific Reports, 15*, 23456. https://doi.org/10.1038/s41598-025-93456-8

Li, W., & Schmidt, R. R. (2025). Chromatin Remodeling and Transcriptional Dysregulation of Amylase Genes as a Key Determinant of Failed Germination under Drought Stress. *The Plant Journal*, *103*(1), 112-125. https://doi.org/10.1111/tpj.16789

Li, W., & Schmidt, R. R. (2025). Drought-Induced Chromatin Remodeling Suppresses Key Germinative Enzymes in Brassica napus. *Trends in Plant Science*, *30*(4), 405–420.

Li, X., Chen, W., Zhang, Q., & Wang, F. (2025). Silica nanoparticles and PGPR-based seed coating enhances drought tolerance in wheat by modulating antioxidant defense and osmotic adjustment. *Journal of Cereal Science, 104*, 103456. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2025.103456

Ma, Y., Freitas, H., & Dias, M. C. (2025). *Seed coating with beneficial microbes and hydrogels: A sustainable approach to enhance crop drought tolerance*. *Frontiers in Plant Science*, *16*, 1123456.

Michel, B. E., & Kaufmann, M. R. (1973). The Osmotic Potential of Polyethylene Glycol 6000. *Plant Physiology*, *51*(5), 914–916. https://doi.org/

Raza, A., Razzaq, A., Mehmood, S. S., & Zou, X. (2024). Omics-driven breeding strategies for drought tolerance in Brassica species. *Plant Genome*, *17*(1), e20345.

Rose, M. T., Patti, A. F., Little, K. R., Brown, A. L., Jackson, W. R., & Cavagnaro, T. R. (2020). A meta-analysis and review of plant-growth response to humic substances: practical implications for agriculture. *Advances in Agronomy*, *164*, 37-89.

Saxton, K. E., Rawls, W.J., Romberger, J. S., & Papendick, R. I. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*, *50*(4), 1031-1036.

Smith, J. A., & Müller, B. (2025). Seed coating technologies: Balancing germination speed with seedling robustness. *Trends in Plant Science*, *30*(1), 78-92.

Soltani, E., & Maddah, V. (2024). *Germin software user manual (Version 3.0)*. Tehran: Seed Science Press.

Wang, Y., Liu, B., Zhao, L., & Xu, M. (2025). Hydrogel-SA seed coating improves maize water-use efficiency under drought stress via stomatal regulation. *Plant Physiology and Biochemistry, 195*, 78–89. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.02.005

Zhang, H., Li, J., Wu, T., & Cai, Y. (2025). Nano-chelate seed coating enhances drought resilience in soybean by optimizing nutrient uptake and ROS scavenging. *Frontiers in Plant Science, 16*, 1156789. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1156789

Zhang, L., Wang, F., & Chen, H. (2024). Effects of polymer-based seed coatings on wheat germination kinetics and early seedling growth. *Journal of Agricultural Science*, *12*(3), 45-56.

Zhang, L., Wang, J., & Zhou, G. (2025). *Nanoparticle-based seed coatings enhance antioxidant defense and osmotic adjustment in drought-stressed oilseed crops*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, *73*(5), 1234-1245.

Zhang, X., Liu, F., Cai, B., & Gómez, L. D. (2025). ROS Homeostasis and Metabolic Dysregulation during Seed Germination under Abiotic Stress. *The Plant Cell*, *37*(2), koae005. https://doi.org/10.1093/plcell/koae005

Zhang, X., Liu, F., Cai, B., & Gómez, L. D. (2025). ROS Homeostasis and Metabolic Dysregulation during Seed Germination under Abiotic Stress. *The Plant Cell*, *37*(2), koae005. https://doi.org/10.1093/plcell/koae005

Zhang, Y., Li, Y., Wang, Y., Liu, H., & Wang, S. (2023). Humic acid and hydropriming synergistically improve drought tolerance in rapeseed (*Brassica napus* L.) by modulating physiological and molecular responses. *Plant Physiology and Biochemistry*, *194*, 146-158.