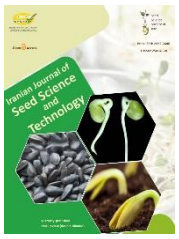
2025, 15 (2), 21-37 https://doi.org/10.22092/ijsst.2025.367891.1549

Iranian Journal of
Seed Science and Technology



ISSN: 2588-4638

Research Article

Evaluation the Effect of Melatonin Pretreatment on Germination Indices, Initial Growth and α-amylase Enzyme Activity of Camelina (*Camelina sativa* L.) Soheil Cultivar Seedlings Under Osmotic Stress

Rozita Kabiri[1*], Babak Hasanzadeh Tajarogh[2], Maryam Delfani[2]

1. Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Kerman, Iran.
2. Expert of National Botanical Garden of Iran, Tehran, Iran.

Article Information

Received: 04 Dec. 2024
Revised: 14 Apr. 2025
Accepted: 25 Apr. 2025

Keywords:
Oxidative damage,
Seed priming,
Plant growth regulator,
Seedling vigor length index.

Corresponding Author:
kabiri@areeo.ac.ir

Abstract

To assess the impact of melatonin pretreatment on germination indices, initial growth, and α-amylase activity in Camelina (Camelina sativa L.) Soheil cultivar seedlings under osmotic stress, an experiment was conducted in a factorial arrangement based on completely randomized design in the research laboratory of Bardsir Agricultural Higher Education Center, Shahid Bahonar University of Kerman in 2023. The first factor was melatonin at three concentrations (0, 100, and 200 micromolar), while the second factor was polyethylene glycol solution (PEG6000) at seven levels (-0.2, -0.4, -0.6, -0.8, -1.0, and -1.2 MPa) with three replicates. The highest germination percentage (92.7%), shoot length (18.9 mm), root dry weight (1 mg/plant), and seedling dry weight (1.2 mg/plant) were observed under non-osmotic stress. Moreover, a 100 µM melatonin concentration increased germination percentage, shoot length, root dry weight, and seedling dry weight by approximately 31.4%, 27.1%, 36.9%, and 35.1%, respectively, compared to plants pretreated with distilled water. By decreasing the osmotic potential from 0 to -1 MPa, the germination rate, seedling vigor length index, root length, shoot dry weight and α-amylase enzyme activity in seeds pretreated with 100 µmol melatonin increased by about 36.8, 77.2%, 58.23%, 62.5% and 75.7%, respectively, compared to seeds pretreated with distilled water. In seed pretreatment with 200 µM melatonin under osmotic stress of -1.2 MPa, germination occurred over a period of ten days but no seedling growth was recorded. It seems that increasing the melatonin concentration was unable to mitigate the negative and inhibitory effects of -1.2 MPa osmotic stress.

How to cite this paper: Kabiri, R., Hasanzadeh Tajarogh, B., & Delfani, M. (2026). Evaluation the effect of melatonin pretreatment on germination indices, initial growth and α-amylase enzyme activity of Camelina (*Camelina sativa* L.) Soheil cultivar seedlings under osmotic stress. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, *15* (2), 21-37. https://doi.org/10.22092/ijsst.2025.367891.1549

© 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

The processes of seed germination and seedling development are crucial stages in a plant's life cycle, which can be influenced by various stressors like drought and aging, leading to a decline in seed quality and viability. To enhance and standardize seed germination, seed priming has been applied to enhance plants' tolerance to osmotic stress. This method is straightforward, cost-effective, and poses minimal risk. In this regard, the aim of this experiment was to evaluate the effect of seed pretreatment with melatonin on germination indices, initial growth and α-amylase enzyme activity of Camelina seedlings under osmotic stress.

Materials and Methods

This experiment was carried out in a factorial arrangement based on completely randomized design at Bardsir Agricultural Higher Education Center, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran, in 2023. The first factor of melatonin at three concentrations (0 (distilled water), 100 and 200 µmol) and the second factor of polyethylene glycol solution at seven levels (0 (control), -0.2, -0.4, -0.6, -0.8, -1 and -1.2 MPa) was performed in three replications. Homogenous seeds of Camelina were surface sterilized using 10% sodium hypochlorite solution for 30-second to eliminate possible Seed-borne microorganisms, and then rinsed three times with sterile distilled water. The seeds of Camelina were exposed to seed priming; the first group was hydro-primed (immersed in distilled water), while the second group was osmo-primed (soaked in 100 and 200 µM melatonin) for 24 hr., based on concentrations suggested by preliminary experiments. After soaking period, the seeds were air-dried and then subjected to the different concentrations of PEG solution. Then, germination indices and α-amylase enzyme activity were measured.

Results and Discussion

The experiment results indicated that the highest germination percentage, shoot length, and seedling dry weight were observed at a concentration of 100 µM melatonin. Non-stress treatment produced the highest germination percentage, shoot length, and dry weights of roots and seedlings. Pretreatment with 100 µmol of melatonin improved germination rate, seedling vigor length index, α-amylase enzyme activity, root length, and plumule dry weight, enhancing tolerance of Camelina seedlings to osmotic stress. Under an osmotic potential of -1.2 MPa, seeds pretreated with distilled water did not germinate. In contrast, seeds treated with 200 µmol melatonin germinated over ten days under the same osmotic stress, but showed no seedling growth. Considering that, germination rate was more sensitive than germination percentage and applying of melatonin caused to stimulate germination indices. Regarding the impact of melatonin on the elongation of plumule and radicle, it was noted that the response of both organs varied and was concentration-dependent, affecting the organs' sensitivity.

Conclusion

Melatonin's effects are generally dependent on its concentration, with previous studies showing that high concentrations can inhibit or not promote germination. Pretreatment with 100 µM melatonin under osmotic stress enhanced germination, early seedling growth, and α-amylase activity compared to seeds treated with distilled water or 200 µM melatonin. At the highest osmotic stress level (-1.2 MPa), control seeds did not germinate, while seeds with 200 µM melatonin germinated but exhibited no early seedling growth.

دوره ۱۵، شماره ۲، صفحات ۳۷-۲۱ https://doi.org/10.22092/ijsst.2025.367891.1549

نشریه علوم و فناوری بذر ایران

ISSN: 2588-4638

مقاله پژوهشی

ارزیابی تأثیر پیش‌تیمار ملاتونین بر شاخص‌های جوانه‌زنی، رشد اولیه و فعالیت آنزیم α-آمیلاز گیاهچه کاملینا (*Camelina sativa* L.) رقم سهیل تحت تنش اسمزی

رزیتا کبیری[1*]، بابک حسن‌زاده تجرق[2]، مریم دلفانی[2]

۱. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (AREEO).

۲. کارشناس فضای سبز باغ ملی گیاه‌شناسی ایران، تهران، ایران.

چکیده

به منظور ارزیابی تأثیر پیش‌تیمار ملاتونین بر شاخص‌های جوانه‌زنی، رشد اولیه و فعالیت آنزیم α-آمیلاز گیاهچه کاملینا (*Camelina sativa* L.) رقم سهیل تحت تنش اسمزی، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملا تصادفی در آزمایشگاه تحقیقاتی مرکز آموزش عالی کشاورزی بردسیر، دانشگاه شهید باهنر کرمان در سال ۱۴۰۲ انجام گرفت. فاکتور اول ملاتونین در سه سطح غلظت‌های (صفر (آب مقطر)، ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار) و فاکتور دوم محلول پلی اتیلن گلایکول (PEG_{6000}) در هفت سطح با غلظت‌های (صفر، ۰/۲-، ۰/۴-، ۰/۶-، ۰/۸-، ۱- و ۱/۲- مگاپاسکال) با سه تکرار انجام شد. نتایج نشان داد بیشترین درصد جوانه‌زنی (۹۲/۷٪)، طول ساقه‌چه (۱۸/۹ میلی‌متر)، وزن خشک ریشه‌چه (۱ میلی گرم بر بوته) و وزن خشک گیاهچه (۱/۲ میلی گرم بر بوته) در شرایط عدم تنش اسمزی مشاهده گردید. هم‌چنین غلظت ۱۰۰ میکرومولار ملاتونین به ترتیب سبب افزایش حدود ۳۱/۴٪، ۲۷/۱٪، ۳۶/۹٪ و ۳۵/۱٪ در درصد جوانه‌زنی، طول ساقه‌چه، وزن خشک ریشه‌چه و وزن خشک گیاهچه در مقایسه با گیاهانی که با آب مقطر پیش‌تیمار شده بودند، گردید. با کاهش پتانسیل اسمزی از صفر به ۱- مگاپاسکال، سرعت جوانه‌زنی، شاخص طولی بنیه گیاهچه، طول ریشه‌چه، وزن خشک ساقه‌چه و فعالیت آنزیم α-آمیلاز در بذرهایی که با غلظت ۱۰۰µmol ملاتونین پیش‌تیمار شده بودند، به ترتیب حدود ۳۶/۸، ۷۷/۲٪، ۵۸/۲۳٪، ۶۲/۵٪ و ۷۵/۷٪ نسبت به بذرهایی که با آب مقطر پیش‌تیمار شده بودند، افزایش یافت. در پیش‌تیمار بذر با غلظت ۲۰۰ میکرومولار ملاتونین تحت تنش اسمزی ۱/۲- مگاپاسکال، طی دوره ده روزه، جوانه‌زنی صورت گرفت اما هیچ‌گونه رشد گیاهچه ثبت نگردید. بنظر می‌رسد افزایش غلظت ملاتونین قادر به کاهش اثرات منفی و بازدارندگی سطح ۱/۲- مگاپاسکال تنش اسمزی نبود.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۹

واژه‌های کلیدی:

آسیب اکسیداتیو،

پرایمینگ بذر،

تنظیم کننده رشد گیاهی،

شاخص طولی بنیه گیاهچه.

نویسنده مسئول:

kabiri@areeo.ac.ir

نحوه استناد به این مقاله:

Kabiri, R., Hasanzadeh Tajarogh, B., & Delfani, M. (2026). Evaluation the effect of melatonin pretreatment on germination indices, initial growth and α-amylase enzyme activity of Camelina (*Camelina sativa* L.) Soheil cultivar seedlings under osmotic stress. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, *15* (2), 21-37. https://doi.org/10.22092/ijsst.2025.367891.1549

مقدمه

کاملینا (*Camelina sativa* (L.) Crantz) یک گیاه دانه روغنی است که متعلق به تیره *Brassicaceae* است. اولین آثار کشت آن متعلق به حدود ۴۰۰۰ سال پیش می‌باشد. کاملینا تا دهه ۱۹۵۰ یک محصول مهم دانه‌های روغنی باقی ماند، زمانی که تا حد زیادی با سایر گیاهان تولید کننده روغن، از جمله کلزا جایگزین شد. گیاه کاملینا نه تنها به دلیل دوره رشد کوتاهش می‌تواند به عنوان یک کشت مخلوط استفاده شود، بلکه نیاز آبی و مواد مغذی کمی دارد و در برابر تنش‌های غیرزیستی مختلف و هم‌چنین پاتوژن‌ها و آفات نسبتاً مقاوم است (Rezaeva et al., 2024). کاملینا یک گونه گیاهی نسبتاً مقاوم در برابر استرس است که به طور بالقوه در زمین‌های حاشیه‌ای رشد می‌کند. کاملینا نه تنها می‌تواند به عنوان یک غذای سالم استفاده شود، بلکه دارای طیف وسیعی از کاربردهای صنعتی (به عنوان مثال، لوازم آرایشی، دارویی، و سوخت‌های بیودیزل) است (Zhao-Chen et al., 2024). محتوای روغن بالای دانه‌های آن، همراه با ترکیب منحصر به فرد اسیدهای چرب، این محصول را به ویژه برای کاربردهای غذایی و صنعتی مفید می‌کند. اسیدهای لینولئیک و α لینولنیک ضروری بیش از ۵۰ درصد از کل محتوای اسیدهای چرب را تشکیل می‌دهند. به خصوص نسبت بالای اسید لینولنیک امگا-۳ غیراشباع چندگانه (۳۰ تا ۴۳ درصد) فقط در روغن بذر کتان پیشی گرفته است. محتوای روغن دانه کاملینا بسته به ژنوتیپ، عوامل محیطی و عملکرد زراعی بین ۳۰ تا ۴۹ درصد گزارش شده است (Rezaeva et al., 2024).

جوانه‌زنی بذر با جذب آب شروع شده که با خروج رادیکال از پوسته بذر به پایان می‌رسد که مرحله حیاتی از چرخه زندگی گیاه است. یک‌سری رویدادهای متابولیکی، سلولی و مولکولی معمولاً در این فرآیند پیچیده برای استقرار موفق گیاه در مراحل اولیه رشد دخیل هستند. مرحله جوانه‌زنی بذر به طور قابل توجهی تحت تأثیر عوامل محیطی خارجی است و به تنش های غیرزیستی مانند خشکی، نمک و دماهای پایین و بالا بسیار حساس است (Awan et al., 2023). تغییرات در شاخص های جوانه‌زنی از جمله شاخص جوانه‌زنی (Germination index)، پتانسیل جوانه‌زنی (Germination potential) و سرعت جوانه‌زنی (Germination rate) را می‌توان برای ارزیابی تحمل به تنش غیر زنده در طول جوانه‌زنی بذر در نظر گرفت (Awan et al., 2023).

اسموپرایمینگ روشی مؤثر برای بهبود مهم‌ترین پارامترهای کیفی بذر مانند جوانه‌زنی و بنیه بذر است که باعث افزایش سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی بذر می‌گردد (Rosińska et al., 2023). پرایمینگ بذرها در شرایط اسمزی بالا به عنوان روشی مناسب برای غلبه بر مشکلات تنش خشکی و شوری است (Aazami & Zahedi, 2018). فرآیند اسموپرایمینگ به عنوان خیساندن بذرها در نمک‌های معدنی کم پتانسیل یا پلی‌اتن گلیکول (PEG) لازم برای جذب بهینه آب که عملکرد بهتر بذر را افزایش می‌دهد، نامیده می‌شود که مدت زمان خیساندن بذرها در این نمک‌های معدنی فاکتور مهمی می‌باشد (Rosińska et al., 2023)، این تکنیک شامل هیدراتاسیون بذر در محلولی است که پتانسیل اسمزی آن برای اجازه دادن به جوانه‌زنی اولیه کافی است اما برای خروج ریشه‌چه کافی نیست (Miladinov et al., 2018). پلی اتیلن گلیکول یک ترکیب پلیمری با زنجیره بلند، محلول در آب و غیر یونی است که دارای خواص اسمزی برای افزایش تنش خشکی در محیط با افزایش اسمز و رشد سلول‌های گیاهی تحت تنش کمبود آبی مانند دهیدراتاسیون در شرایط عادی بدون اثرات سمی است (Neamah & Jdayea, 2022).

روش‌های مرسوم مختلفی برای کاهش اثرات مضر تنش‌های غیرزیستی بر جوانه‌زنی بذر و سبز شدن رادیکال به کار گرفته شده‌اند (Seleiman et al., 2021). پیش تیمار بذر با مواد بیولوژیکی، بیومولکول‌ها یا فیتوهورمون‌ها می‌توانند برای افزایش جوانه‌زنی بذر و تحمل به تنش‌های غیرزیستی مهم باشد (Awan et al., 2021). اخیراً، ملاتونین به طور گسترده توسط محققان مختلف برای بهبود رشد، بهره‌وری و تحمل گیاهان تحت انواع مختلف تنش‌ها استفاده می‌شود و برای گیاهان در شرایط عادی و استرس‌زا مفید است (Awan et al., 2023). ملاتونین که از نظر شیمیایی با نام N-acetyl-5-methoxytryptamine شناخته شده است که یک ترکیب اندولیک تولید شده از سروتونین است که به عوامل مختلفی از جمله گونه گیاه، مرحله رشد و شرایط آب و هوایی بستگی دارد (Kumar et al., 2024). ملاتونین از

سلول‌های بنیادی گیاهان و اندام‌های مختلف مانند ریشه، ساقه و برگ تولید می‌گردد و میزان بیوسنتز آن تحت تاثیر عوامل متعددی مانند نور، خشکی، شوری و دمای پایین متفاوت خواهد بود (Qarehkhani et al., 2021). ملاتونین در فعالیت‌های ضروری و تنظیم رشد و نمو گیاهی مانند تحریک رشد رویشی، جوانه‌زنی، ریشه‌دهی و گل‌دهی از طریق مسیر بیوسنتز و اعمال فیزیولوژیک مشترک با هورمون ایندول استیک اسید دخالت می‌نماید که منجر به تسریع در رشد سلول‌ها می‌شود. هم‌چنین از طریق تغییر در تعادل هورمون‌ها (افزایش اکسین و سیتوکنین) در شرایط تنش، بر رشد ریشه و بخش هوایی گیاه تاثیرگذار است (Cheraghi et al., 2023).

کاربرد ملاتونین در شرایط تنش رطوبتی نسبت به سایر اسمولیت‌ها (هیومیک اسید، کیتوزان، سلنیوم) باعث بیشترین میزان تولید کل قندهای محلول در گیاه دارویی زنیان شد (Heydarzadeh et al., 2024). گیاهان تیمار شده با اصلاح‌کننده‌ها مانند ملاتونین و کیتوزان، افزایش قابل‌توجهی در کل قندهای محلول در مقایسه با نمونه‌های تیمار نشده حاصل نمودند که احتمالاً به دلیل فعالیت بالاتر آلفا آمیلاز است که نشاسته را به قند تجزیه می‌کند و صادرات به ریشه را کاهش می‌دهد (Awan et al., 2023). پرایمینگ بذر ذرت با محلول‌های ۰/۴، ۰/۸ و ۱/۶ میلی‌مولار ملاتونین به مدت ۲۴ ساعت در دمای معمولی اتاق در کاهش شوری منجر به کاهش میانگین زمان سبز شدن گردید (Jiang et al., 2016). کاربرد ملاتونین در شرایط تنش اسمزی باعث کاهش اثرات منفی شوری و آسیب در گیاه دارویی گل ارولنه اورامانی (*Hymenocrater longiflorus Benth.*) شد (Manafi et al., 2024).

پرایمینگ بذر به عنوان یک تیمار بذر قبل از کاشت جهت کمک به گیاهان در دفاع در برابر تنش‌های خشکی و/یا شوری می‌تواند تاثیرگذار باشد. ملاتونین از جمله فیتوهورمونی است که به عنوان یک مولکول پلیوتروپیک می‌تواند منجر به تنظیم گیاه دارویی کاملینا از طریق تغییر در تعادل هورمون‌ها در برابر تنش اسمزی و شرایط نرمال شود که ممکن است منجر به بهبود، افزایش سرعت و یکنواختی در شاخص‌های جوانه‌زنی این گیاه گردد. در همین راستا هدف آزمایش، ارزیابی تاثیر پیش‌تیمار بذر با ملاتونین بر شاخص‌های جوانه‌زنی، رشد اولیه و فعالیت آنزیم α-آمیلاز گیاهچه کاملینا تحت تنش اسمزی بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش با هدف تأثیر پیش‌تیمار ملاتونین بر شاخص‌های جوانه‌زنی، رشد اولیه و فعالیت آنزیم α-آمیلاز گیاهچه کاملینا رقم سهیل تحت تنش اسمزی، به‌صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی در آزمایشگاه تحقیقاتی مرکز آموزش عالی کشاورزی بردسیر، دانشگاه شهید باهنر کرمان در سال ۱۴۰۲ انجام گردید. فاکتور اول ملاتونین در سه سطح غلظت‌های (صفر (آب مقطر)، ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار) و فاکتور دوم محلول پلی اتیلن گلایکول (PEG_{6000}) در هفت سطح با غلظت‌های (صفر، ۰/۲-، ۰/۴-، ۰/۶-، ۰/۸-، ۱- و ۱/۲- مگاپاسکال) با سه تکرار انجام شد. بذرها از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه شد که جهت شروع آزمایش ابتدا، پتری دیش‌ها و بستر بذر (کاغذ صافی واتمن) در اتوکلاو با دمای ۱۲۰°C به مدت ۱۲۰ دقیقه استریل شدند و جهت ضدعفونی بذرهای هم اندازه از محلول هیپوکلریت سدیم ۱۰ درصد به مدت ۳۰ ثانیه استفاده گردید، سپس با آب مقطر سه مرتبه شستشوی بذرها انجام شد. جهت انجام پیش‌تیمار ملاتونین (تهیه شده از شرکت سیگما) بذرها به مدت ۲۴ ساعت در تاریکی درون محلول‌هایی با غلظت‌های ذکر شده به‌طور جداگانه خیسانده شدند. جهت انجام تیمار تنش اسمزی از بین بذرها، تعداد ۳۰ عدد از بذرهای خیس خورده در آب مقطر و محلول ملاتونین، به پتری دیش‌های استریل با قطر ۹ سانتی‌متر که حاوی یک لایه کاغذ صافی واتمن شماره یک و ده میلی‌لیتر محلول پلی اتیلن گلایکول (PEG_{6000}) با غلظت‌های (۰، ۰/۲-، ۰/۴-، ۰/۶-، ۰/۸-، ۱- و ۱/۲- مگاپاسکال) بودند، منتقل گردیدند. پتری‌ها به مدت ۱۰ روز در اتاقک رشد و در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند (Kaya & Day, 2008)، سپس از روز اول تا روز دهم شمارش تعداد بذرهای جوانه‌زده انجام شد. بذرهایی با طول ریشه‌چه دو میلی متر یا بیشتر جوانه‌زده در نظر گرفته شد (Kaya & Day, 2008). جهت سنجش پارامترهای مورفولوژیکی (طول ریشه‌چه و ساقه‌چه، وزن خشک ریشه‌چه و اندام هوایی) در روز دهم اندازه‌گیری صورت گرفت.

شاخص‌های جوانه‌زنی

جهت محاسبه درصد جوانه زنی از رابطه (۱) و سرعت جوانه‌زنی از رابطه (۲) توسط روش (Maguire, 1962) و وزن خشک گیاهچه از رابطه (۳) و شاخص طولی بنیه گیاهچه از رابطه (۴) توسط روش (Abdul-baki & Anderson, 1970) استفاده شد.

$$\%G = \left(\frac{n}{N}\right)/100 \quad (۱)$$

G درصد جوانه زنی، n تعداد نهایی بذرهای جوانه زده و N تعداد بذرهای کشت شده

$$GR = \sum_{i=1}^{n} \frac{Ni}{Ti} \quad (۲)$$

GR سرعت جوانه زنی، N_i تعداد بذرهای جوانه زده در هر شمارش و T_i زمان از ابتدای کاشت تا شمارش nام بر حسب روز است (Maguire, 1962).

(۳)

وزن خشک اندام هوایی + وزن خشک ریشه‌چه = وزن خشک گیاهچه

$$\text{شاخص طولی بنیه گیاهچه} = \frac{\left(\text{میانگین طول گیاهچه‌ها} \times \text{درصد جوانه‌زنی}\right)}{۱۰۰} \quad (۴)$$

آنزیم آلفا آمیلاز

جهت اندازه‌گیری فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز، یک گرم از بذور سالم که به مدت ۲۴ ساعت در شرایط متفاوت جوانه‌زنی بودند با ده میلی‌لیتر بافر فسفات سدیم روی یخ سائیده شد و مخلوط حاصل به مدت ۲۴ ساعت در دمای چهار درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. مخلوط حاصل به‌مدت ۲۰ دقیقه در دمای چهار درجه سانتی‌گراد با دور ۱۲۰۰۰ سانتریفیوژ شد. فعالیت آنزیمی در قسمت رویی با استفاده از معرف سه و پنج دی نیترو سالیسیلیک اسید (DNS) و با استفاده از نشاسته یک درصد به‌عنوان سوبسترا در جذب نمونه در ۵۴۰ نانومتر به‌وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر (UV-VIS SPEKOL 2000, Germany) اندازه‌گیری شد. مقدار واقعی جذب از کسر مقدار جذب نمونه مورد آزمایش با مقدار جذب نمونه شاهد، محاسبه گردید. فعالیت آنزیم بر اساس واحد محاسبه شد. یک واحد برابر با میلی‌گرم مالتوز تولید شده در یک دقیقه در یک گرم وزن‌تر بود (Carleton et al., 1968).

تجزیه داده‌ها

تجزیه آماری با استفاده از نرم افزار آماری SAS (ver. 9.1) و مقایسه میانگین ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ملاتونین و تنش اسمزی در کلیه صفات مورد آزمایش در سطح آماری یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). اثر متقابل ملاتونین ×تنش اسمزی در تمامی صفات (به استثنای درصد جوانه‌زنی، طول ساقه‌چه، وزن خشک ریشه‌چه و وزن خشک گیاهچه) در سطح آماری یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱).

در غلظت ۱/۲- مگاپاسکال از محلول PEG_{6000}، هیچ‌گونه جوانه‌زنی در تیمار شاهد مشاهده نگردید. هم‌چنین در پیش‌تیمار بذر با غلظت ۲۰۰ میکرو مولار ملاتونین تحت تنش اسمزی ۱/۲- مگاپاسکال، طی دوره ده روزه جوانه‌زنی صورت گرفت اما هیچ‌گونه رشد گیاهچه ثبت نگردید.

درصد جوانه‌زنی

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که کاربرد پیش‌تیمار ملاتونین (۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار) باعث افزایش درصد جوانه‌زنی نسبت به عدم مصرف ملاتونین شد. کاربرد غلظت ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار ملاتونین نسبت به شاهد (عدم مصرف) به ترتیب موجب افزایش ۳۱/۴ و ۲۸/۳ درصدی جوانه‌زنی شد (جدول ۲). در بالاترین سطح تنش اسمزی (۱/۲- مگاپاسکال)، درصد جوانه‌زنی حدود ۸۷/۳ درصد در مقایسه با عدم تنش کاهش یافت (جدول ۲).

یکی از اهداف کلیدی فیزیولوژی کاربردی گیاهی، شناسایی ترکیباتی است که بتوانند با بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی بذر و رشد گیاه، موجب افزایش تحمل به شرایط تنش‌زا گردند. به این ترتیب، کاربرد برون‌زای محرک‌های رشد می‌تواند راه‌کاری مؤثر برای نیل به این هدف باشد. اثرات معنی‌دار پرایمینگ بذر بر جوانه‌زنی به پیش‌توسعه جنین و تغییرات بیوشیمیایی و فعالیت آنزیم‌ها مربوط می‌شود. بهبود درصد و سرعت جوانه‌زنی بذرهای غوطه‌ور در غلظت‌های مختلف ملاتونین در مقایسه با شاهد، می‌تواند شاخصی از تحمل به تنش اسمزی در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱-تجزیه واریانس صفات شاخص‌های جوانه‌زنی، رشد اولیه و فعالیت آنزیم α-آمیلاز گیاهچه کاملینا تحت تنش اسمزی

Table 1- Variance analysis of germination indices, early growth and α-amylase enzyme activity of camelina seedlings under osmotic stress

منابع تغییرات SOV	درجه آزادی df	درصد جوانه‌زنی Germination percentage	سرعت جوانه‌زنی Rate of germination	شاخص طولی بنیه گیاهچه Seedling vigor length index	طول ریشه‌چه Radicle length	طول ساقه‌چه Plumule length	وزن خشک ریشه‌چه Radicle dry weight	وزن خشک ساقه‌چه Plumule dry weight	وزن خشک گیاهچه Seedling dry weight	آنزیم آلفا آمیلاز α-amylase enzyme
ملاتونین (M) Melatonin	2	2600.2**	1.02**	1331.01**	921.7**	66.68**	0.30**	0.007**	0.40**	17.38**
تنش اسمزی (O) Osmotic stress	6	6884.6**	7.73**	4140.65**	2074.2**	332.73**	1.13**	0.027**	1.51**	56.91**
M*O	12	50.5ns	0.04**	92.69**	42.09**	2.30ns	0.008ns	0.0004**	0.009ns	1.17**
خطا Error	42	45.52	0.008	14.68	14.35	4.22	0.33	0.000002	0.033	0.08
ضریب تغییرات CV(%)		11.71	5.65	14.73	13.87	20.75	34.36	1.28	29.09	6.39

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

ns not significant, * and ** significant at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

جدول ۲- مقایسه میانگین صفات شاخص‌های جوانه‌زنی، رشد اولیه و فعالیت آنزیم α-آمیلاز گیاهچه کاملینا تحت پیش‌تیمار بذر با ملاتونین و تنش اسمزی

Table 2- Comparison of the mean traits of germination indices, early growth and α-amylase enzyme activity of camelina seedlings under seed pretreatment and osmotic stress

ملاتونین (میکرومولار) Melatonin (µmol)	درصد جوانه‌زنی (٪) Germination percentage (%)	طول ساقه‌چه (میلی‌متر) Plumule length (mm)	وزن خشک ریشه‌چه (میلی‌گرم بربوته) Radicle dry weight (mg. plant^{-1})	وزن خشک گیاهچه (میلی‌گرم بر بوته) Seedling dry weight (mg. plant^{-1})
0	44.85b ±1.6	8.72b ±3.6	0.41b ±0.2	0.50c ±0.23
100	65.38a ±1.4	11.96a ±3	0.65a ±0.2	0.77a ±0.27
200	62.57a ±1.5	9.04b ±3.8	0.52b ±0.1	0.61b ±0.22

پلی اتیلن گلایکول (مگاپاسکال) (PEG_{6000}) (MPa)	درصد جوانه‌زنی (٪) Germination percentage (%)	طول ساقه‌چه (میلی‌متر) Plumule length (mm)	وزن خشک ریشه‌چه (میلی‌گرم بر بوته) Radicle dry weight (mg. plant^{-1})	وزن خشک گیاهچه (میلی‌گرم بر بوته) Seedling dry weight (mg. plant^{-1})
0	92.77a ±0.3	18.97a ±0.4	1.03a ± 0.2	1.20a ±0.24
-0.2	83.33b ±0.6	15.56b ±0.7	0.87a ± 0.04	1.02b ±0.05
-0.4	65.44c ±1.9	11.92c ±0.5	0.67b ±0.08	0.80c ±0.09
-.06	62.77c ±0.8	9.26d ±1.06	0.51bc ±0.09	0.61d ±0.095
-0.8	50.88d ±0.5	7.21e ±1.04	0.36cd ±0.07	0.43e ±0.094
-1	36.22e ±0.6	4.98f ±1.03	0.22d ± 0.06	0.27e ±0.071
-1.2	11.77f ±0.5	1.44g ±1.02	0.04e ±0.03	0.05f ±0.049

حروف غیر مشترک در هر ستون بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار می‌باشد.

Non-common letters in each column indicate significant differences

کاهش طول مدت زمان جوانه‌زنی در بذرهای پیش‌تیمار شده با ملاتونین نسبت به بذرهای هیدروپرایم، می‌تواند مربوط به فعال‌سازی آنزیم‌ها به‌ویژه α-آمیلاز در جنین و افزایش دسترسی به ATP و در نهایت رشد سریع‌تر جنین است (García-Cánovas et al., 2024). افزایش رشد در گیاهان پیش‌تیمار شده با ملاتونین، به ویژه در غلظت‌های پایین‌تر، می‌تواند تحریک و تغییر متابولیسم کربوهیدرات باشد (Tousi et al., 2020). غلظت بالای ملاتونین می تواند به عنوان بازدارنده رشد گیاه عمل کند که احتمالاً به دلیل افزایش محتوی کلی ملاتونین درون‌زا و تجمع آن در سطوح سمی در بافت‌ها است (Tousi et al., 2020). ملاتونین یک فیتوهورمون محرک زیستی بالقوه، مشتق شده از تریپتوفان است که به عنوان یک هورمون گیاهی مهم ایندول‌آمین است که در فرآیندهای بیولوژیکی متعدد گونه‌های گیاهی از جمله جوانه‌زنی، تنظیم رشد، گلدهی، فتوسنتز، پیری، حفظ کیفیت پس از برداشت و تحمل تنش غیرزیستی نقش دارد (Mazrou et al., 2023). کاربرد پیش تیمار ملاتونین در بذرگلرنگ (Akbari et al., 2020) و کلزا (Chen et al., 2009) منجر به افزایش جوانه‌زنی شد. کاربرد ۲۰ میکرمولار ملاتونین (نسبت به ۰، ۱، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرمولار) باعث بیشترین درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه، شاخص بنیه و طول گیاهچه در گیاه ترتیکاله شد (Guo et al., 2022).

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که با افزایش سطح تنش اسمزی درصد جوانه‌زنی کاهش یافت، به نحوی که تیمار عدم تنش اسمزی با میانگین ۹۲/۷۷ درصد باعث بیشترین درصد جوانه‌زنی و تنش اسمزی شدید (۱/۲- مگاپاسکال) با میانگین ۱۱/۷۷ درصد کم‌ترین درصد جوانه‌زنی را حاصل کرد (جدول ۲).

تنش‌های غیرزیستی شامل خشکی، نمک، سرما، گرما و فلزات سنگین با تأثیرگذاری بر فرآیندهای متابولیک و فیزیولوژیکی داخلی بر روی جوانه‌زنی بذر تأثیر منفی می‌گذارند (Cao et al., 2019). آسیب اکسیداتیو ناشی از تنش اسمزی به جوانه زنی بذر عمدتاً به دلیل کاهش مصرف آب و کاهش تأمین انرژی بذرها، ایجاد یک سری تغییرات در متابولیسم، از جمله تجمع رادیکال‌های آزاد اکسیژن، سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی، انتقال سیگنال هورمونی و تولید تنظیم کننده اسمزی است (Bai et al., 2020). افزایش تنش اسمزی منجر به کاهش درصد و سرعت جوانه‌زنی، وزن خشک گیاهچه و شاخص طولی بنیه گیاهچه در کاملینا گردید (Teimoori et al., 2023). بالاترین سطح تنش خشکی (۱/۲- مگاپاسکال) باعث اثر کاهشی بر درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی و شاخص طولی بنیه گیاهچه در گیاه دارویی دیلار (*Fagopyum esculentum*) شد (Miri et al., 2023). عدم تنش اسمزی باعث بیشترین درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، طول ساقه‌چه، وزن تر و خشک اندام‌های هوایی سویا شد (Awan et al., 2023).

سرعت جوانه‌زنی

در شرایط عدم تنش، تفاوت معنی‌داری بین غلظت‌های ملاتونین و شاهد از لحاظ سرعت جوانه‌زنی مشاهده نگردید، در حالی‌که در تمامی سطوح تنش اسمزی این اختلاف معنی‌دار بود (جدول ۳). در اثر متقابل عدم مصرف ملاتونین×بالاترین سطح تنش اسمزی (۱/۲- مگاپاسکال) جوانه‌زنی ثبت نگردید (جدول ۳). سرعت جوانه‌زنی در بذرهایی که با غلظت ۱۰۰ میکرو مولار ملاتونین پیش تیمار شده بودند به ترتیب افزایش ۳۶/۸٪ و ۱۸/۵٪ در مقایسه با شاهد و غلظت ۲۰۰ میکرومولار ملاتونین تحت تنش اسمزی ۱- مگاپاسکال نشان دادند (جدول ۳). در بالاترین سطح تنش اسمزی، غلظت ۱۰۰ میکرومولار ملاتونین موجب بهبود حدود ۲۷/۹ درصد در مقایسه با غلظت ۲۰۰ میکرومولار آن گردید (جدول ۳).

تنش اسمزی به دلیل کاهش سرعت و میزان جذب اولیه آب و اثر منفی پتانسیل‌های اسمزی پایین بر فرآیندهای بیوشیمیایی و متابولیسم جوانه‌زنی سبب کاهش شاخص‌های جوانه‌زنی (درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی و...) می‌گردد (Teimoori et al., 2023). تنش غیرزیستی، به ویژه تنش خشکی می‌تواند باعث تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن در گیاهان شود که منجر به افزایش تجمع H_2O_2 و سایر رادیکال‌های هیدروکسیل می‌شود که بر رشد و نمو گیاه تأثیر منفی می‌گذارد (Guo et al., 2022). اسموپرایمینگ با ملاتونین باعث افزایش سرعت جوانه‌زنی زردک (*Daucus carota* L.) شد که علت را چنین ذکر کردند که اسموپرایمینگ، هیدراتاسیون کنترل شده بذر است که باعث

بهبود جوانه‌زنی و قدرت بذر می‌شود که آنزیم‌هایی مانند آمیلازها و پروتئازها که مسئول هیدرولیز و متحرک‌سازی مواد ذخیره هستند، در طول پرایمینگ سنتز و فعال می‌شوند که در نهایت منجر به بیشتر، سریع‌تر و یکنواختی جوانه‌زنی بذرها می‌گردد (Rosińska et al., 2023). با افزایش سطح تنش اسمزی (PEG-6000%) درصد و سرعت جوانه‌زنی در گیاه پنبه کاهش یافت، در حالی‌که کاربرد ملاتونین در غلظت ۱۰۰ میکرومولار باعث بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی پنبه شد (Bai et al., 2020). افزایش تنش اسمزی در کاملینا (Čanak et al., 2020) و کینوا (Mamedi et al., 2022) منجر به کاهش درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، طول ساقه‌چه و طول ریشه‌چه گردید.

جدول ۳- مقایسه میانگین پیش‌تیمار بذر با ملاتونین بر شاخص‌های جوانه‌زنی، رشد اولیه و فعالیت آنزیم α-آمیلاز گیاهچه کاملینا تحت تنش اسمزی

Table 3- Mean comparison of seed pretreatment with melatonin on germination indices, early growth and α-amylase enzyme activity of camelina seedlings under osmotic stress

ملاتونین (میکرومولار) Melatonin (µmol)	پلی اتیلن گلایکول (مگاپاسکال) (PEG_{6000}) (MPa)	سرعت جوانه‌زنی (بذر در روز) Rate of germination ($Seed.day^{-1}$)	شاخص طولی بنیه گیاهچه Seedling vigor length index	طول ریشه‌چه (میلی‌متر) Radicle length (mm)	وزن خشک ساقه‌چه (میلی گرم بر بوته) Plumule dry weight ($mg.\ plant^{-1}$)	آنزیم α-آمیلاز α-amylase enzyme (unit)
0	0	2.99a ±0.00183	54.61bc ±1.51	44.05ab ±1.162	0.16a ±0.00085	7.33ab ±0.0709
	-0.2	2.109c ±0.00126	33.20d ±0.613	32.77cde ±0.0381	0.14d ±0.0011	6.19de ±0.494
	-0.4	1.619f ±0.05799	18.34gh ±1.25	27.52ef ±1.369	0.10f ±0.00043	5.14f ±0.737
	-0.6	1.45g ±0.14499	13.28hi ±1.175	20.33gh ±0.512	0.08h ±0.00225	3.60i ±0.084
	-0.8	1.028h ±0.00825	8.29ij ±1.161	14.11hi ±0.857	0.05k ±0.000173	1.27k ±0.12055
	-1	0.628jk ±0.0572	2.99jk ±0.356	9.23i ±0.0839	0.03l ±0.000573	0.79l ±0.0693
	-1.2	0 l ±0	0k ±0	0 j ±0	0 m±0	0 m ±0
100	0	3.1a ±0.00767	61.92a ±1.85	45.22a ±1.367	0.17a ±0.000438	7.67a±0.0789
	-0.2	2.66b ±0.0919	56.57ab ±1.2	46.55a ±0.778	0.15b ±0.000338	7.15b ±0.3065
	-0.4	2.06cd ±0.0359	49.36c ±1.8	46.99a ±1.511	0.14d ±0.000318	6.60cd ±0.0872
	-0.6	1.89e ±0.0245	35.58d ±1.907	38bc ±0.771	0.12e ±0.000033	5.52f ±0.0541
	-0.8	1.47fg ±0.00952	22.01fg ±1.39	29.67de ±0.195	0.09g ±0.000696	4.61g ±0.00069
	-1	0.995h ±0.0161	13.12hi ±0.472	22.10fg ±1.369	0.08i ±0.000153	3.26i ±0.093
	-1.2	0.708ij ±0.0555	3.11jk 0.315	11.66i ±0.335	0.05k ±0.000261	2.06j ±0.0478
200	0	3.095a ±0.0552	62.31a ±1.285	46.55a ±1.604	0.16a ±0.000485	7.63a ±0.000484
	-0.2	2.598b ±0.0942	54.02bc ±1.523	44.33a ±1.188	0.14c ±0.000481	7.01bc ±0.09035
	-0.4	1.913de ±0.0495	32.48de ±1.627	35.66cd ±1.701	0.11e ±0.00093	6.07e ±0.108346
	-0.6	1.609f ±0.0455	26.85ef ±1.654	29.88de ±0.621	0.09g ±0.00095	5.09f ±0.180419
	-0.8	1.071h ±0.00558	14.16hi ±0.826	18.94gh ±0.766	0.06j ±0.000208	4.13h ±0.05047
	-1	0.811i ±0.0437	5.42jk ±0.3713	9.91i ±0.075	0.03l ±0.000057	2.45j ±0.209
	-1.2	0.51k ±0.00839	0k ±0	0j ±0	0 m ±0	0m ±0

حروف غیر مشترک در هر ستون بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار می‌باشد.

Non-common letters in each column indicate significant differences.

شاخص طولی بنیه گیاهچه

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که اثر متقابل ملاتونین (۲۰۰ میکرومولار)×عدم تنش اسمزی با میانگین ۶۲/۳۱ بیشترین شاخص طولی بنیه گیاهچه حاصل شد، که از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با غلظت ۱۰۰ میکرو مولار ملاتونین تحت شرایط

کنترل و تنش ۰/۲- مگاپاسکال نداشت (جدول ۳). در سطح ۱- مگاپاسکال، غلظت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار ملاتونین به ترتیب موجب بهبود ۷۷/۲ ٪ و ۴۴/۸ ٪ در شاخص طولی بنیه گیاهچه نسبت به بذرهایی که با آب مقطر پیش‌تیمار شده بودند، گردید (جدول ۳). در مقابل اثر متقابل عدم مصرف ملاتونین×بالاترین سطح تنش اسمزی (۱/۲- مگاپاسکال) و اثر متقابل بالاترین سطح غلظت ملاتونین (۲۰۰ میکرو مولار) × بالاترین سطح تنش اسمزی (۱/۲- مگاپاسکال) هر دو با میانگین صفر هیچ شاخص طولی بنیه گیاهچه حاصل نشد، در حالی‌که عدد ۳/۱۱ برای صفت مذکور در پیش تیمار بذر با غلظت ۱۰۰ میکرو مولار ملاتونین تحت تنش اسمزی ۱/۲- مگاپاسکال ثبت گردید. به نظر می‌رسد که بالاترین غلظت ملاتونین توام با بالاترین سطح تنش اسمزی اثر بازدارنده بر صفت شاخص طولی بنیه گیاهچه داشت (جدول ۳).

تیمار تنش اسمزی (۰/۹- مگاپاسکال) باعث کم‌ترین شاخص طولی بنیه گیاهچه کاملینا شد (Teimoori et al., 2023). با افزایش تنش خشکی در کلزا باعث کاهش ۳۶ درصد بنیه گیاهچه شد (Seyed-ahmadi et al., 2013). شاخص طولی بنیه گیاهچه تابعی از طول گیاهچه و درصد جوانه‌زنی به‌حساب می‌آید. تنش اسمزی با کاهش انتقال عناصر غذایی از آندوسپرم به جنین بذر از تقسیم سلولی جلوگیری به‌عمل آورده و با اختلال در تعادل هورمونی، منجر به کاهش رشد گیاهچه می‌گردد (Soltani et al., 2006). کاربرد ملاتونین (۰/۳۷۵ میلی‌مولار) در شرایط عدم تنش خشکی باعث بیشترین درصد جوانه‌زنی (۹۶/۱۴٪)، سرعت جوانه‌زنی (۳/۶۸ روز) و شاخص طولی بنیه گیاهچه (۱۰۵۴) در گیاه دارویی دیلار (*Fagopyum esculentum*) شد (Miri et al., 2023). از بین سطوح مختلف ملاتونین در جو (۰/۰۵میکرومولار)، برنج (۲۰ میکرومولار)، سورگوم (۱ میکرومولار) بیشترین شاخص طولی بنیه گیاهچه به ترتیب با میانگین‌های ۶/۱، ۳/۸ و ۴/۱ مشاهده گردید (García-Cánovas et al., 2024). ملاتونین به‌واسطه تاثیر بر فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز و هورمون‌های اکسین، سیتوکینین و جیبرلین، میزان تقسیم سلولی بافت‌های مریستمی را افزایش می‌دهد (Ahmad et al., 2021).

طول ریشه‌چه

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که اثر متقابل ملاتونین (۱۰۰ میکرومولار)× تنش اسمزی (۰/۴- مگاپاسکال) با میانگین ۴۶/۹۹ میلی‌متر بیشترین طول ریشه‌چه را داشت (جدول ۳)، که از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با شاهد، اثر متقابل ملاتونین (۱۰۰ میکرومولار)× تنش اسمزی (۰/۲- مگاپاسکال)، ملاتونین (۱۰۰ میکرومولار)× عدم تنش اسمزی، ملاتونین (۲۰۰ میکرومولار)× عدم تنش اسمزی و ملاتونین (۲۰۰ میکرومولار)× تنش اسمزی (۰/۲- مگاپاسکال) به ترتیب با میانگین‌های ۴۴/۰۵، ۴۶/۵۵، ۴۵/۲۲، ۴۶/۵۵ و ۴۴/۳۳ میلی‌متر مشاهده نگردید (جدول ۳). در شرایط تنش MPa ۱-، طول ریشه‌چه در غلظت ۱۰۰ µmol ملاتونین به ترتیب حدود ۵۸/۲ ٪ و ۵۵/۲ ٪ در مقایسه با بذرهای بدون پیش‌تیمار و غلظت ۲۰۰ µmol افزایش یافت (جدول ۳).

استفاده از محرک‌های زیستی بر متابولیت‌های گیاه تاثیر داشته که منجر به تحریک بیوسنتز فیتوهورمون‌ها، تسهیل جذب عناصر غذایی و تحریک رشد ریشه در گیاهان می‌گردد (Wei et al., 2015). ملاتونین منجر به تشکیل ریشه و طویل شدن کلئوپتیل در گیاهان می‌شود که به دلیل آن است که ملاتونین از لحاظ ساختاری شبیه اکسین می‌باشد (Qarehkhani et al., 2021). کاربرد ۱۰۰ میکرومولار ملاتونین در عدم تنش اسمزی در گیاه دارویی بادرشبویه باعث بیشترین طول ریشه با میانگین ۴۰/۴۲ میلی‌متر شد، هم‌چنین کاربرد ملاتونین باعث افزایش درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، شاخص بنیه بذر و وزن خشک گیاهچه در شرایط تنش اسمزی گردید که علت آن چنین بیان شد، ملاتونین به واسطه القای اکسین باعث ریشه‌زایی و القای سیتوکنین باعث افزایش رشد اندام‌های هوایی در این گیاه شد (Kabiri et al., 2018). عدم تنش اسمزی (شوری+خشکی) و کاربرد ملاتونین باعث بیشترین طول ریشه گندم رقم H439 شد (Fu et al., 2024).

طول ساقه‌چه

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که کاربرد ملاتونین (۱۰۰ میکرومولار) نسبت به عدم مصرف آن و سطح ۲۰۰ میکرومولار ملاتونین به ترتیب باعث افزایش ۲۷/۱ و ۲۴/۴ درصدی طول

ساقه‌چه گردید (جدول ۲). نتایج حاصل از اندازه‌گیری طول ساقه‌چه کاملینا نشان داد که مقدار این صفت با افزایش تنش اسمزی کاهش یافت و این کاهش در تمامی سطوح مختلف تنش معنی‌دار بود (جدول ۲). بیشترین و کم‌ترین مقدار این صفت به ترتیب متعلق به تیمار شاهد (۱۸/۹۷ میلی‌متر) و تیمار MPa ۱/۲- (۱/۴۴ میلی‌متر) بود و کاهش در این صفت در تیمار MPa ۱/۲-، نسبت به شاهد حدود ۹۲/۴ ٪ بود (جدول ۲).

کاربرد ملاتونین بر افزایش طول اندام هوایی و ریشه دارای پاسخی متفاوت در هر دو اندام است که وابسته به غلظت ملاتونین مصرف شده و حساسیت بافت است که این عکس‌العمل مربوط به اکسین است، به نحوی که ریشه‌ها نسبت به ساقه یا برگ بسیار حساس‌تر هستند (García-Sánchez et al., 2022). کاربرد ملاتونین منجر به افزایش ترشح هورمون‌های محرک رشد مانند ایندول‌استیک اسید، سیتوکنین، جیبرلین، اکسین و کاهش بیوسنتز بازدارنده‌های رشد مانند اتیلن می‌شود که در نهایت سبب افزایش میزان تقسیم سلولی در بافت‌های مریستمی می‌گردد (Qarehkhani et al., 2021). کاربرد ۱۰۰ میکرومولار ملاتونین باعث بیشترین طول شاخساره (۲۹/۳ سانتی‌متر)، طول ریشه (۳۱/۳ سانتی‌متر)، وزن تر شاخساره (۳/۸ گرم)، وزن خشک شاخساره (۰/۵۷۹ گرم)، وزن تر ریشه (۰/۴۳۶ گرم) و وزن خشک ریشه (۰/۱۸۴ گرم) در گیاه گشنیز شد (Cheraghi et al., 2023). کاربرد ملاتونین باعث اثرات مثبت بر رشد اندام‌های هوایی گیاه‌چه ذرت شد (Kołodziejczyk et al., 2021).

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که با افزایش سطح تنش اسمزی طول ساقه‌چه کاهش یافت، به نحوی که تمامی سطوح تنش، از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر داشتند (جدول ۲).

تنش خشکی منجر به کاهش پروتیئن‌های دیواره سلولی شده که در نهایت سبب کاهش رشد طول اندام‌های هوایی و ریشه‌چه می‌گردد (zhang et al., 2013). تنش اسمزی (PEG-6000) منجر به کاهش درصد و سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه، طول گیاهچه، وزن خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه ذرت شد (Huang et al., 2021). تنش خشکی (PEG_{6000}) باعث کاهش طول ریشه، طول اندام هوایی، وزن تر ریشه و وزن تر اندام هوایی به ترتیب با میانگین ۱۱، ۱۷، ۳۸ و ۳۴ درصد در گیاه سویا شد (Bukan et al., 2024). با افزایش تنش اسمزی از ۰ تا ۰/۹- مگاپاسکال در گیاه جو باعث کاهش طول کلئوپتیل، طول ریشه‌چه و طول ساقچه شد (Serpoush, 2022). بالاترین سطح تنش اسمزی (۱/۱- مگاپاسکال) باعث کم‌ترین درصد و سرعت جوانه‌زنی، طول ساقچه و ریشه‌چه و شاخص بنیه گیاهچه در گیاه کلزا شد (Bouchyoua et al., 2024).

وزن خشک ریشه‌چه

بیشترین مقدار صفت وزن خشک ریشه‌چه متعلق به پیش‌تیمار ۱۰۰ میکرومولار ملاتونین (۰/۶۵ میلی‌گرم) بود که از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با شاهد و غلظت دیگر آن داشت (جدول ۲). مقایسه میانگین نشان داد که کاربرد غلظت ۱۰۰ میکرومولار ملاتونین نسبت به عدم مصرف آن باعث افزایش ۳۶/۹ درصدی وزن خشک ریشه‌چه شد (جدول ۲). با افزایش تنش اسمزی، وزن خشک ریشه‌چه بطور معنی‌دار کاهش یافت و کلیه سطوح تنش از لحاظ آماری با یکدیگر تفاوت داشتند (جدول ۲). بیشترین و کمترین مقدار این صفت به ترتیب متعلق به تیمار شاهد و تیمار MPa ۱/۲- بود و کاهش در این شاخص در تیمار MPa ۱/۲-، نسبت به شاهد حدود ۹۶/۱٪ بود (جدول ۳).

کاربرد ملاتونین اگزوژن در گیاهان ذرت نسبت به گیاهان شاهد دارای زیست توده ریشه بیشتر، ریشه‌های متراکم تر با طول ریشه بیشتر و وزن خشک ریشه بیشتر بود که علت آن را چنین بیان کردند که رشد ریشه ناشی از ملاتونین توسط فرآیندهای فیزیولوژیکی تعدیل شده با اکسین تنظیم می‌شود که بر جذب آب تأثیر می‌گذارد و گسترش غیرقابل برگشت دیواره سلولی را آغاز می‌کند (Ahmad et al., 2021). کاربرد محلول‌پاشی ملاتونین در گیاه شاهی (*Lepidium sativum*) باعث افزایش وزن خشک ریشه، اندام‌های هوایی و زیست توده گردید (Oloumi et al., 2018). کاربرد ملاتونین (۱ میکرومولار) نسبت به عدم مصرف و بالاترین سطح مصرفی ملاتونین (۱۰ میکرومولار) باعث بیشترین طول ساقه، طول ریشه، وزن ریشه، وزن برگ و وزن گیاه ریحان شد (Bahcesular et al., 2020). بیشترین طول ریشه‌چه، وزن تر و خشک ریشه‌چه با کاربرد ۳۰۰ میکرومولار ملاتونین و عدم تنش اسمزی در گیاه سویا حاصل

شد (Chen et al., 2020).

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که با افزایش سطح تنش اسمزی وزن خشک ریشه‌چه کاهش یافت، بطوریکه وزن خشک ریشه‌چه از ۱/۰۳ میلی‌متر در پتانسیل صفر به ۰/۰۴ میلی‌متر در پتانسیل ۱/۲- مگاپاسکال رسید (جدول ۲).

با افزایش تنش اسمزی (پلی‌اتیلن‌گلایکول) وزن تر و خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه ذرت کاهش یافت که چنین بیان شد، تنش اسمزی باعث کاهش دسترسی به آب و در نتیجه کاهش تقسیم و طول سلول می‌شود که این به دلیل کاهش فشار تورگور و رشد سلول است. در نهایت منجر به کاهش زیست توده و به ویژه وزن خشک می‌گردد (Mustamu et al., 2023). وزن خشک ریشه‌چه و ساقچه گندم در شرایط تنش اسمزی نسبت به عدم تنش اسمزی کاهش یافت (Altaf et al., 2021).

وزن خشک ساقه‌چه

نتایج مقایسه میانگین نشان داد بیشترین وزن خشک ساقه‌چه متعلق به اثر متقابل ملاتونین (۱۰۰ میکرومولار)×عدم تنش اسمزی با میانگین ۰/۱۷ میلی‌گرم مشاهده گردید، که اختلاف آماری معنی‌داری با تیمار شاهد (عدم مصرف ملاتونین×عدم تنش اسمزی) و اثر متقابل ملاتونین (۲۰۰ میکرومولار)×عدم تنش اسمزی هر دو با میانگین ۰/۱۶ میلی‌گرم نشان نداد (جدول ۳). در مقابل اثر متقابل عدم مصرف ملاتونین×بالاترین سطح تنش اسمزی (۱/۲- مگاپاسکال) و اثر متقابل بالاترین سطح غلظت ملاتونین (۲۰۰میکرومولار) × بالاترین سطح تنش اسمزی (۱/۲- مگاپاسکال) هر دو با میانگین صفر کم‌ترین طول ریشه‌چه حاصل گردید (جدول ۳). در تمامی سطوح پتانسیل اسمزی، کاربرد غلظت ۱۰۰ µmol ملاتونین با شاهد و غلظت ۲۰۰ µmol ملاتونین از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری مشاهده گردید (جدول ۳). افزایش ۶/۶۷ درصدی وزن خشک ساقه‌چه در غلظت ۱۰۰ µmol ملاتونین در مقایسه با بذور پیش‌تیمار نشده، به حدود ۶۲/۵ درصد در سطح تنش ۱ MPa- رسید (جدول ۳).

کاربرد برون‌زای ملاتونین در گیاهان ذرت نسبت به گیاهان شاهد دارای قطر ساقه بزرگ‌تر و کل ماده خشک به اندام‌هوایی بیشتری دارا بود که علت افزایش در تجمع زیست توده و ویژگی‌های رشد به دلیل جذب کربن بهبود یافته به دلیل افزایش ظرفیت فتوسنتزی گیاهان تیمار شده بود (Ahmad et al., 2021). غلظت‌های پایین ملاتونین به طور قابل ملاحظه‌ای پتانسیل جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه، وزن تر و خشک اندام هوایی سویا را بهبود بخشید، غلظت‌های بالاتر در شرایط تنش غیرزیستی بهبود قابل توجهی را نشان نداد (Awan et al., 2023). کاربرد ملاتونین باعث افزایش ۱۷/۷۴ درصدی وزن تر و ۲۶/۹۲ درصدی خشک اندام هوایی نسبت به عدم مصرف ملاتونین در گیاه زرین (*Dracocephalum kotschyi* Boiss.) شد (Vafadar et al., 2023). تنش خشکی باعث کاهش وزن خشک اندام‌های هوایی و ریشه در سویا شد که علت چنین ذکر شد که، زیست توده یکی از پارامترهای اصلی منعکس کننده رشد و نمو گیاهان در معرض عوامل تنش است. دسترسی ضعیف به آب منجر به تعدادی تغییرات در غشای سلولی می‌شود، تغییراتی که تأثیر منفی بر زیست توده کل گیاه دارد. هم‌چنین، گیاهان جهت تنظیم اسمزی باید انرژی بیشتری برای تجمع یون‌های معدنی و اسمولیت‌های آلی مصرف کنند و بر این اساس انرژی موجود برای رشد گیاه نسبتاً کاهش می‌یابد که بر تجمع زیست توده تأثیر گذاشته و مانع آن می‌شود که در نهایت منجر به کاهش تجمع زیست توده و تولید محصول گیاهان تحت تنش خشکی می‌شود (Matuszak-Slamani et al., 2022). بالاترین سطح تنش خشکی (۷۰ درصد ظرفیت زراعی) منجر به کاهش سریع رشد در گیاه دارویی آگاستاکه (*Agastache foeniculum* Pursh Kuntze) شد که در نهایت منجر به کاهش وزن خشک اندام هوایی گردید (Mohammadi et al., 2021). وزن خشک ریشه‌چه و گیاهچه در گیاه گندم از صفر به ۱/۲- مگاپاسکال کاهش یافت (Mahpara et al., 2022).

وزن خشک گیاهچه

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که استفاده از پیش‌تیمار ۱۰۰µmol ملاتونین نسبت به آب مقطر (شاهد) و غلظت ۲۰۰µmol آن به ترتیب موجب افزایش حدود ۳۵ ٪ و ۲۰/۷ ٪ در وزن خشک گیاهچه گردید (جدول ۲). وزن خشک گیاهچه کاملینا با افزایش تنش اسمزی کاهش یافت و این کاهش در تمامی سطوح مختلف

تنش معنی‌دار بود (جدول ۲). در سطوح MPa ۱- و ۱/۲- محلول PEG_{6000}، وزن خشک گیاهچه به ترتیب حدود ۷۷/۵ ٪ و ۹۵/۸ ٪ در مقایسه با گیاهچه‌های شاهد کاهش یافت (جدول ۲).

ملاتونین، جوانه‌زنی و رشد گیاهچه را از طریق تعدیل محتویات هورمون‌های گیاهی در بافت‌ها، عمدتاً بر روی اکسین، جیبرلین‌ها، سیتوکینین‌ها، اسید آبسیزیک، اتیلن، اسید جاسمونیک، اسید سالیسیلیک و براسینوستروئیدها بهبود می‌بخشد (García-Cánovas et al., 2024). وزن تر گیاه دارویی بذرالبنج تحت تاثیر عدم تنش اسمزی (PEG_{6000}) و ملاتونین (۱ میلی‌گرم بر لیتر) با میانگین ۷/۱۱ گرم حاصل شد، در حالی که بیشترین وزن خشک در شرایط عدم تنش اسمزی و ملاتونین (۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر) با میانگین ۰/۵۱۵ گرم حاصل شد (Neamah & Jdayea, 2022). بیشترین طول ساقه، وزن خشک ساقه و بوته ملاتونین (۷۵ میکرو مولار) به ترتیب با میانگین‌های ۶۶/۴۹ سانتی‌متر، ۲۷/۲۱ گرم در بوته و ۳۱/۲۲ گرم در بوته در گیاه استویا مشاهده شد (Normohammadi et al., 2021). کاربرد ملاتونین در گیاه شیرین بیان (*Glycyrrhiza* glabra) باعث افزایش وزن خشک گیاهچه شد (Afreen et al., 2006). کاربرد ملاتونین باعث بیشترین وزن تر و خشک گیاهچه ترتیکاله شد (Guo et al., 2022).

درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، وزن خشک گیاهچه و شاخص وزنی بنیه گیاهچه کاملینا با افزایش سطح تنش خشکی (پلی‌اتیلن‌گلایکول) کاهش یافت (Teimoori et al., 2023). با افزایش سطح تنش اسمزی از صفر به ۶- (بار) باعث کاهش وزن خشک گیاهچه زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) شد (Piri et al., 2021). تنش خشکی باعث کاهش وزن خشک گیاهچه در گیاه آنیسون شد که علت آن را چنین بیان کردند که تنش خشکی منجر به کاهش میزان تخلیه ذخایر بذر می‌گردد. هم‌چنین در شرایط تنش‌زا، ذخایر غذایی بیشتر صرف تنفس نگهداری می‌شود که در نهایت منجر به کاهش وزن خشک گیاهچه می‌شود (Hosseini et al., 2020).

آنزیم آلفا آمیلاز

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که اثر متقابل ملاتونین (۱۰۰ میکرومولار)×عدم تنش اسمزی با میانگین ۷/۶۷ باعث بیشترین میزان فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز شد. که اختلاف آماری معنی‌داری با شاهد (۷/۳۳) اثر متقابل ملاتونین (۱۰۰ میکرومولار)×عدم تنش اسمزی (۷/۶۳) نداشتند (جدول ۳). در مقابل اثر متقابل عدم مصرف ملاتونین×بالاترین سطح تنش اسمزی (۱/۲- مگاپاسکال) و اثر متقابل بالاترین سطح غلظت ملاتونین (۲۰۰ میکرومولار) × بالاترین سطح تنش اسمزی (۱/۲- مگاپاسکال) هر دو با میانگین صفر کم‌ترین فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز را به خود اختصاص دادند. در سطوح MPa ۰/۲- و ۰/۶- محلول PEG_{6000}، هر دو غلظت ملاتونین بدون اختلاف با یکدیگر، تفاوت آماری معنی‌داری را با شاهد نشان دادند (جدول ۳). با کاهش پتانسیل آب از صفر به ۰/۸- و ۱- مگاپاسکال، فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز در بذرهایی که با غلظت ۱۰۰µmol ملاتونین پیش‌تیمار شده بودند، حدود ۷۲/۴٪ و ۷۵/۷٪ نسبت به بذرهایی که با آب مقطر پیش‌تیمار شده بودند، افزایش یافت (جدول ۳).

جوانه‌زنی بذر با حضور چندین محصول ذخیره سازی مانند آمیلاز و تنظیم کننده های اسمزی (مانند پرولین، قندها و پروتئین) که املاح سازگاری هستند که انرژی لازم را برای ریخت زایی بذر فراهم می‌کنند، تنظیم می‌شود.آمیلاز با تجمع در قالب یک پلیمر غیرفعال و ذخیره در اندوسپرم بذرهای خشک به عنوان پروتئین ذخیره‌ای که در طی جوانه‌زنی به تدریج آزاد و فعال می‌شود، بنابراین آمیلاز نقش مهمی در جوانه‌زنی بذر دارد (Bai et al., 2020). ملاتونین متعلق به ایندول آمین‌ها که در تنظیم ریشه‌زایی، فتوسنتز، متابولیسم مواد مغذی (شامل متابولیسم لیپید، کربوهیدرات و نیتروژن)، بیوسنتز هورمون‌های گیاهی، سیگنال‌دهی، هومئوستاز یونی، ریتم شبانه روزی، رسیدن میوه، مهار رادیکال‌های آزاد اکسیژن، یکپارچگی غشای سلولی و تنظیم چرخه ASA/GSH (آسکوربات/گلوتاتیون) (Wang et al., 2024) و متابولیسم کربوهیدرات و بارگیری ساکارز نقش دارد (Tousi et al., 2020). کاربرد پیش تیمار با ملاتونین خارجی باعث افزایش فعالیت آمیلاز و آلفا آمیلاز در بذرهای لیمونیوم دو رنگ شد(Li et al., 2019). عدم تنش اسمزی (PEG) و کاربرد ملاتونین در چهار و شش روز پس از جوانه‌زنی باعث بیشترین فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز در گیاه پنبه شد (Bai et al., 2020).

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج بدست آمده از این آزمایش، می‌توان چنین استنباط کرد که کاربرد پیش تیمار ملاتونین با غلظت ۱۰۰ میکرومولار در شرایط تنش اسمزی باعث بهبود مولفه‌های جوانه‌زنی، رشد اولیه گیاهچه و فعالیت آنزیم α-آمیلاز نسبت به بذرهایی که با آب مقطر و غلظت ۲۰۰ میکرمولار ملاتونین پیش‌تیمار شده بودند،گردید. در بالاترین سطح تنش اسمزی (۱/۲- مگاپاسکال)، جوانه‌زنی در بذرهای شاهد ثبت نگردید و هم‌چنین در غلظت ۲۰۰ میکرومولار ملاتونین جوانه‌زنی صورت گرفت اما هیچ‌گونه رشد اولیه گیاهچه مشاهده نگردید. احتمالا افزایش غلظت بالای ملاتونین اثر بازدارندگی بر شاخص‌های رشد گیاهچه کاملینا در این آزمایش داشته است. بنابراین به نظر می‌رسد روش پیش‌تیمار بذر با ملاتونین با غلظت‌های بهینه می‌تواند راه‌کاری مناسب جهت افزایش جوانه‌زنی و تحمل گیاهچه کاملینا به شرایط تنش اسمزی باشد. جهت حصول نتیجه‌گیری بهتر پیشنهاد می‌شود تاثیر ملاتونین بر افزایش تحمل گیاه کاملینا به شرایط تنش کم‌آبی در سطح گلخانه و مزرعه نیز مورد بررسی قرار گیرد.

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافعی در رابطه با نگارش و یا انتشار این مقاله ندارند.

References

Aazami, M. A., & Zahedi, S. M. (2018). Germination of carrot (*Daucus carota* L.) seeds in response to osmotic priming. *Thai Journal of Agricultural Science*, *51*(4), 188–194.

Afreen, F., Zobayed, S. M., & Kozai, T. (2006). Melatonin in *Glycyrrhiza uralensis*: Response of plant roots to spectral quality of light and UV-B radiation. *Journal of Pineal Research*, *41*(2), 108–115. https://doi.org/10.1111/j.1600-079X.2006.00337.x

Ahmad, S., Muhammad, I., Wang, G. Y., Zeeshan, M., Yang, L., Ali, I., & Zhou, X. B. (2021). Ameliorative effect of melatonin improves drought tolerance by regulating growth, photosynthetic traits and leaf ultrastructure of maize seedlings. *BMC Plant Biology*, *21*(1), Article 368. https://doi.org/10.1186/s12870-021-03160-w

Akbari, G. A., Heshmati, S., Soltani, E., & Amini Dehaghi, M. (2020). Influence of seed priming on seed yield, oil content and fatty acid composition of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) grown under water deficit. *International Journal of Plant Production*, *14*(2), 245–258. https://doi.org/10.1007/s42106-019-00081-5

Altaf, A., Gull, S., Zhu, X., Zhu, M., Rasool, G., Ibrahim, M. E. H., ... & Chen, L. (2021). Study of the effect of PEG-6000 imposed drought stress on wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars using relative water content (RWC) and proline content analysis. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, *58*(1), 51–58. https://doi.org/10.21162/PAKJAS/21.953

Awan, S. A., Khan, I., Rizwan, M., Zhang, X., Brestic, M., Khan, A., ... & Huang, L. (2021). Exogenous abscisic acid and jasmonic acid restrain polyethylene glycol-induced drought by improving the growth and antioxidative enzyme activities in pearl millet. *Physiologia Plantarum*, *172*(2), 809–819. https://doi.org/10.1111/ppl.13247

Awan, S. A., Khan, I., Wang, Q., Gao, J., Tan, X., & Yang, F. (2023). Pre-treatment of melatonin enhances the seed germination responses and physiological mechanisms of soybean (*Glycine max* L.) under abiotic stresses. *Frontiers in Plant Science*, *14*, Article 1149873. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1149873

Bahcesular, B., Yildirim, E. D., Karaçocuk, M., Kulak, M., & Karaman, S. (2020). Seed priming with melatonin effects on growth, essential oil compounds and antioxidant activity of basil (*Ocimum basilicum* L.) under salinity stress. *Industrial Crops and Products*, *146*, Article 112165. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112165

Bai, Y., Xiao, S., Zhang, Z., Zhang, Y., Sun, H., Zhang, K., ... & Liu, L. (2020). Melatonin improves the germination rate of cotton seeds under drought stress by opening pores in the seed coat. *PeerJ*, *8*, Article e9450. https://doi.org/10.7717/peerj.9450

Bouchyoua, A., Kouighat, M., Hafid, A., Ouardi, L., Khabbach, A., Hammani, K., & Nabloussi, A. (2024). Evaluation of rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes for tolerance to PEG (polyethylene glycol)-induced drought at germination and early seedling growth. *Journal of Agriculture and Food Research*, *15*, Article 100928. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100928

Bukan, M., Kereša, S., Pejić, I., Sudarić, A., Lovrić, A., & Šarčević, H. (2024). Variability of root and shoot traits under PEG-induced drought stress at an early vegetative growth stage of soybean. *Agronomy*, *14*(6), Article 1188. https://doi.org/10.3390/agronomy14061188

Čanak, P., Jeromela, A. M., Vujošević, B., Kiprovski, B., Mitrović, B., Alberghini, B., ... & Zanetti, F. (2020). Is drought stress tolerance affected by biotypes and seed size in the emerging oilseed crop *Camelina*? *Agronomy*, *10*(12), Article 1856. https://doi.org/10.3390/agronomy10121856

Cao, Q., Li, G., Cui, Z., Yang, F., Jiang, X., Diallo, L., & Kong, F. (2019). Seed priming with melatonin improves the seed germination of waxy maize under chilling stress via promoting the antioxidant system and starch metabolism. *Scientific Reports*, *9*(1), Article 15044. https://doi.org/10.1038/s41598-019-51122-y

Chen, L., Liu, L., Lu, B., Ma, T., Jiang, D., Li, J., ... & Li, C. (2020). Exogenous melatonin promotes seed germination and osmotic regulation under salt stress in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *PLOS ONE*, *15*(1), Article e0228241. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228241

Chen, Q., Qi, W. B., Reiter, R. J., Wei, W., & Wang, B. M. (2009). Exogenously applied melatonin stimulates root growth and raises endogenous indoleacetic acid in roots of etiolated seedlings of *Brassica juncea*. *Journal of Plant Physiology*, *166*(3), 324–328. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2008.06.002

Cheraghi, M., Hatamnia, A. A., & Ghanbari, F. (2023). The effect of melatonin on some physiological and morphological characteristics of *Coriandrum sativum* L. and *Anethum graveolens* L. under salt stress. *Journal of Horticultural Science*, *37*(2), 561–575. https://doi.org/10.22067/jhs.2022.78109.1189 [In Persian]

Fu, Y., Li, P., Si, Z., Ma, S., & Gao, Y. (2024). Seed priming with melatonin improves root hydraulic conductivity of wheat varieties under drought, salinity, and combined stress. *International Journal of Molecular Sciences*, *25*(9), Article 5055. https://doi.org/10.3390/ijms25095055

García-Cánovas, I., Giraldo-Acosta, M., Cano, A., Arnao, M. B., & Hernández-Ruiz, J. (2024). Effect of melatonin on germination and seedling growth in aging seeds or under drought conditions. *Seeds*, *3*(3), 341–356. https://doi.org/10.3390/seeds3030025

García-Sánchez, S., Cano, A., Hernández-Ruiz, J., & Arnao, M. B. (2022). Effects of temperature and light on the germination-promoting activity by melatonin in almond seeds without stratification. *Agronomy*, *12*(9), Article 2070. https://doi.org/10.3390/agronomy12092070

Guo, Y., Li, D., Liu, L., Sun, H., Zhu, L., Zhang, K., ... & Li, C. (2022). Seed priming with melatonin promotes seed germination and seedling growth of *Triticale hexaploide* L. under PEG-6000-induced drought stress. *Frontiers in Plant Science*, *13*, Article 932912. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.932912

Heydarzadeh, S., Tobeh, A., Jahanbakhsh, S., Farzaneh, S., Vitale, E., & Arena, C. (2024). The application of stress modifiers as an eco-friendly approach to alleviate the water scarcity in Ajwain (*Carum copticum* L.) plants. *Plants*, *13*(23), Article 3354. https://doi.org/10.3390/plants13233354

Hosseini, A., Salehi, A., Moradi, A., & Balouchi, H. (2020). The effects of bio priming on some germination indices of *Pimpinella anisum* L., Faridan accession under drought stress. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, *9*(1), 1–13. https://doi.org/10.22034/ijsst.2020.114533.1109

Huang, A. H., Zou, C. L., Su, Y. C., Zhai, R. N., Mo, R. X., Huang, K. J., & Tan, H. (2021). Response of maize seed germination characteristics to different concentrations of PEG-6000. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, *34*(12), 2628–2633. https://doi.org/10.16213/j.cnki.scjas.2021.12.010

Jiang, X., Li, H., & Song, X. (2016). Seed priming with melatonin effects on seed germination and seedling growth in maize under salinity stress. *Pakistan Journal of Botany*, *48*(4), 1345–1352.

Kabiri, R., Hatami, A., Oloomi, H., Naghizadeh, M., Nasibi, F., & Tahmasebi, Z. (2018). Study the effect of melatonin on early growth and some physiological and germination characteristics of seed and Moldavian balm (*Dracocephalum moldavica*) seedling under osmotic stress. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, *7*(1), 25–40. https://doi.org/10.22034/ijsst.2018.108351.1027 [In Persian]

Kaya, M. D., & Day, S. (2008). Relationship between seed size and NaCl on germination, seed vigor and early seedling growth of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *African Journal of Agricultural Research*, *3*(11), 787–791.

Kołodziejczyk, I., Kaźmierczak, A., & Posmyk, M. M. (2021). Melatonin application modifies antioxidant defense and induces endoreplication in maize seeds exposed to chilling stress. *International Journal of Molecular Sciences*, *22*(16), Article 8628. https://doi.org/10.3390/ijms22168628

Kumar, K. A., Kalarani, M. K., Vijayalakshmi, D., Geethalakshmi, V., Raveendran, M., & Anandhi, V. (2024). Evaluation of melatonin concentrations on germination and seedling traits of rice against drought stress. *Indian Journal of Agricultural Research*, *58*(1), 29–35. https://doi.org/10.18805/IJARe.A-6147

Li, B., Huang, S., Wang, H., Liu, M., Xue, S., Tang, D., Cheng, W., Fan, T., & Yang, X. (2021). Effects of plastic particles on germination and growth of soybean (*Glycine max*): A pot experiment under field conditions. *Environmental Pollution*, *272*, Article 116418. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116418

Li, Z., Li, Q., Li, R., Zhao, Y., Geng, J., & Wang, G. (2020). Physiological responses of lettuce (*Lactuca sativa* L.) to microplastic pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*(24), 30306–30314. https://doi.org/10.1007/s11356-020-09349-0

Lian, J., Wu, J., Xiong, H., Zeb, A., Yang, T., Su, X., Su, L., & Liu, W. (2020a). Impact of polystyrene nanoplastics (PSNPs) on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Hazardous Materials*, *385*, Article 121620. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121620

Lian, J., Wu, J., Zeb, A., Zheng, S., Ma, T., Peng, F., Tang, J., & Liu, W. (2020b). Do polystyrene nanoplastics affect the toxicity of cadmium to wheat (*Triticum aestivum* L.)? *Environmental Pollution*, *263*, Article 114498. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114498

Lin, Z., Hu, Y., Yuan, Y., Hu, B., & Wang, B. (2021). Comparative analysis of kinetics and mechanisms for Pb(II) sorption onto three kinds of microplastics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *208*, Article 111451. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111451

Liu, Y., Cui, W., Li, W., Xu, S., Sun, Y., Xu, G., & Wang, F. (2023). Effects of microplastics on cadmium accumulation by rice and arbuscular mycorrhizal fungal communities in cadmium-contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, *442*, Article 130102. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130102

Majeed, A., Muhammad, Z., & Siyar, S. (2019). Assessment of heavy metal induced stress responses in pea (*Pisum sativum* L.). *Acta Ecologica Sinica*, *39*(4), 284–288. https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2018.12.002

Mangal, V., Nguyen, T. Q., Fiering, Q., & Guéguen, C. (2020). An untargeted metabolomic approach for the putative characterization of metabolites from *Scenedesmus obliquus* in response to cadmium stress. *Environmental Pollution, 266*, Article 115123. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115123

Martínez-Ballesta, M. C., Zapata, L., Chalbi, N., & Carvajal, M. (2016). Multiwalled carbon nanotubes enter broccoli cells enhancing growth and water uptake of plants exposed to salinity. *Journal of Nanobiotechnology, 14*(1), Article 42. https://doi.org/10.1186/s12951-016-0199-4

Moreira, I. N., Martins, L. L., & Mourato, M. P. (2020). Effect of Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn on seed germination and seedling growth of two lettuce cultivars (*Lactuca sativa* L.). *Plant Physiology Reports, 25*(2), 347–358. https://doi.org/10.1007/s40502-020-00509-5

Murtaza, B., Naeem, F., Shahid, M., Abbas, G., Shah, N. S., Amjad, M., Bakhat, H. F., Imran, M., Niazi, N. K., & Murtaza, G. (2019). A multivariate analysis of physiological and antioxidant responses and health hazards of wheat under cadmium and lead stress. *Environmental Science and Pollution Research, 26*(1), 362–370. https://doi.org/10.1007/s11356-018-3605-7

Pandey, N., & Sharma, C. P. (2002). Effect of heavy metals Co^{2+}, Ni^{2+} and Cd^{2+} on growth and metabolism of cabbage. *Plant Science, 163*(4), 753–758. https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00210-8

Pant, S. R., Irigoyen, S., Doust, A. N., Scholthof, K. B., & Mandadi, K. K. (2016). *Setaria*: A food crop and translational research model for C_4 grasses. *Frontiers in Plant Science, 7*, Article 1885. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01885

Patil, S., Bafana, A., Naoghare, P. K., Krishnamurthi, K., & Sivanesan, S. (2021). Environmental prevalence, fate, impacts, and mitigation of microplastics: A critical review on present understanding and future research scope. *Environmental Science and Pollution Research, 28*(5), 4951–4974. https://doi.org/10.1007/s11356-020-11700-4

Pignattelli, S., Broccoli, A., & Renzi, M. (2020). Physiological responses of garden cress (*L. sativum*) to different types of microplastics. *Science of the Total Environment, 727*, Article 138609. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138609

Pirzadah, T. B., Malik, B., Tahir, I., Hakeem, K. R., Alharby, H. F., & Rehman, R. U. (2020). Lead toxicity alters the antioxidant defense machinery and modulates the biomarkers in Tartary buckwheat plants. *International Biodeterioration & Biodegradation, 151*, Article 104992. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.104992

Radić, S., Babić, M., Škobić, D., Roje, V., & Pevalek-Kozlina, B. (2010). Ecotoxicological effects of aluminum and zinc on growth and antioxidants in *Lemna minor* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 73*(3), 336–342. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2009.10.014

Rillig, M. C. (2018). Microplastic disguising as soil carbon storage. *Environmental Science & Technology, 52*(11), 6079–6080. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02338

Rillig, M. C., & Lehmann, A. (2020). Microplastic in terrestrial ecosystems. *Science, 368*(6498), 1430–1431. https://doi.org/10.1126/science.abb5979

Saba, D., Manouchehri, N., Besançon, S., El Samad, O., Baydoun, R., Bou Khozam, R., Nafeh Kassir, L., Kassouf, A., Chebib, H., Ouaini, N., & Cambier, P. (2019). Bioaccessibility and radioisotopes of lead in soils around a fertilizer industry in Lebanon. *Environmental Geochemistry and Health, 41*(6), 2749–2762. https://doi.org/10.1007/s10653-019-00320-8

Sahasa, R. G. K., Dhevagi, P., Poornima, R., Ramya, A., Moorthy, P. S., Alagirisamy, B., & Karthikeyan, S. (2023). Effect of polyethylene microplastics on seed germination of Blackgram (*Vigna mungo* L.) and Tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Environmental Advances, 11*, Article 100349. https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100349

Seneviratne, M., Rajakaruna, N., Rizwan, M., Madawala, H. M. S. P., Ok, Y. S., & Vithanage, M. (2019). Heavy metal-induced oxidative stress on seed germination and seedling development: A critical review. *Environmental Geochemistry and Health, 41*(4), 1813–1831. https://doi.org/10.1007/s10653-017-0005-8

Sengar, R. S., Gautam, M., Sengar, R. S., Garg, S. K., Sengar, K., & Chaudhary, R. (2008). Lead stress effects on physiobiochemical activities of higher plants. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 196*, 73–93. https://doi.org/10.1007/978-0-387-78444-1_3

Sharma, N., & Niranjan, K. (2018). Foxtail millet: Properties, processing, health benefits, and uses. *Food Reviews International, 34*(4), 329–363. https://doi.org/10.1080/87559129.2017.1290103

Shi, W., Cheng, J., Wen, X., Wang, J., Shi, G., Yao, J., Hou, L., Sun, Q., Xiang, P., Yuan, X., Dong, S., Guo, P., & Guo, J. (2018). Transcriptomic studies reveal a key metabolic pathway contributing to a well-maintained photosynthetic system under drought stress in foxtail millet (*Setaria italica* L.). *PeerJ, 6*, Article e4752. https://doi.org/10.7717/peerj.4752

Singh, H. P., Kaur, G., Batish, D. R., & Kohli, R. K. (2011). Lead (Pb)-inhibited radicle emergence in *Brassica campestris* involves alterations in starch-metabolizing enzymes. *Biological Trace Element Research, 144*(1), 1295–1301. https://doi.org/10.1007/s12011-011-9129-3

Soltani, A., Gholipoor, M., & Zeinali, E. (2006). Seed reserve utilization and seedling growth of wheat as affected by drought and salinity. *Environmental and Experimental Botany, 55*(1–2), 195–200. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.10.012

Suma, P. F., & Urooj, A. (2012). Antioxidant activity of extracts from foxtail millet (*Setaria italica*). *Journal of Food Science and Technology, 49*(4), 500–504. https://doi.org/10.1007/s13197-011-0300-9

Sun, X.-D., Yuan, X.-Z., Jia, Y., Feng, L.-J., Zhu, F.-P., Dong, S.-S., Liu, J., Kong, X., Tian, H., Duan, J.-L., Ding, Z., Wang, S.-G., & Xing, B. (2020). Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Nature Nanotechnology, 15*(9), 755–760. https://doi.org/10.1038/s41565-020-0707-4

Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. In A. Luch (Ed.), *Molecular, clinical and environmental toxicology: Volume 3: Environmental toxicology* (pp. 133–164). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6

Tomulescu, I. M., Radoviciu, E. M., Merca, V. V., & Tuduce, A. D. (2004). Effect of copper, zinc and lead and their combinations on the germination capacity of two cereals. *Acta Agraria Debreceniensis*, *15*, 39–42. https://doi.org/10.34101/actaagrar/15/3355

Tuğ, G. N., & Yaprak, A. E. (2019). An overview of the germination behavior of halophytes and their role in food security. In M. Hasanuzzaman, K. Nahar, & M. Öztürk (Eds.), *Ecophysiology, abiotic stress responses and utilization of halophytes* (pp. 39–61). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3762-8_3

Urbina, M. A., Correa, F., Aburto, F., & Ferrio, J. P. (2020). Adsorption of polyethylene microbeads and physiological effects on hydroponic maize. *Science of the Total Environment*, *741*, Article 140216. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140216

Valivand, M., Amooaghaie, R., & Ahadi, A. (2019). Seed priming with H_2S and Ca^{2+} trigger signal memory that induces cross-adaptation against nickel stress in zucchini seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, *143*, 286–298. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.09.016

Wang, F., Feng, X., Liu, Y., Adams, C. A., Sun, Y., & Zhang, S. (2022). Micro(nano)plastics and terrestrial plants: Up-to-date knowledge on uptake, translocation, and phytotoxicity. *Resources, Conservation and Recycling*, *185*, Article 106503. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106503

Wang, F., Zhang, X., Zhang, S., Zhang, S., & Sun, Y. (2020a). Interactions of microplastics and cadmium on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in an agricultural soil. *Chemosphere*, *254*, Article 126791. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126791

Wang, Q., Zhang, Y., Wangjin, X., Wang, Y., Meng, G., & Chen, Y. (2020b). The adsorption behavior of metals in aqueous solution by microplastics effected by UV radiation. *Journal of Environmental Sciences*, *87*, 272–280. https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.07.006

Wierzbicka, M., & Obidzińska, J. (1998). The effect of lead on seed imbibition and germination in different plant species. *Plant Science*, *137*(2), 155–171. https://doi.org/10.1016/S0168-9452(98)00138-1

Xing, W., Yang, H., Ippolito, J. A., Zhang, Y., Scheckel, K. G., & Li, L. (2020). Lead source and bioaccessibility in windowsill dusts within a Pb smelting-affected area. *Environmental Pollution*, *266*, Article 115110. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115110

Yang, W., Cheng, P., Adams, C. A., Zhang, S., Sun, Y., Yu, H., & Wang, F. (2021). Effects of microplastics on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in a soil spiked with ZnO nanoparticles. *Soil Biology and Biochemistry*, *155*, Article 108179. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108179

Yang, Y., Wei, X., Lu, J., You, J., Wang, W., & Shi, R. (2010). Lead-induced phytotoxicity mechanism involved in seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *73*(8), 1982–1987. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2010.08.041

Zaaba, N. F., & Jaafar, M. (2020). A review on degradation mechanisms of polylactic acid: Hydrolytic, photodegradative, microbial, and enzymatic degradation. *Polymer Engineering & Science*, *60*(9), 2061–2075. https://doi.org/10.1002/pen.25511

Zhang, Q., Zhao, M., Meng, F., Xiao, Y., Dai, W., & Luan, Y. (2021). Effect of polystyrene microplastics on rice seed germination and antioxidant enzyme activity. *Toxics*, *9*(8), Article 179. https://doi.org/10.3390/toxics9080179

Zhang, Y., Deng, B., & Li, Z. (2018). Inhibition of NADPH oxidase increases defense enzyme activities and improves maize seed germination under Pb stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *158*, 187–192. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.04.028

Zong, X., Zhang, J., Zhu, J., Zhang, L., Jiang, L., Yin, Y., & Guo, H. (2021). Effects of polystyrene microplastic on uptake and toxicity of copper and cadmium in hydroponic wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *217*, Article 112217. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112217