Iranian Journal of Seed Research

Homepage: https://yujs.yu.ac.ir/jisr

ISSN: 2383-1480 (Online); 2383-1251 (Print)

Electromagnetic Priming: A Novel Strategy to Enhance Drought Tolerance in Seeds and Seedlings of Rice (*Oryza sativa* cv. Hashemi)

Davar Molazem [1]✉

1. Corresponding author, Assistant Professor of Department of Agriculture, As. C., Islamic Azad University, Astara, Iran. Email: davar.molazem@iau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 04 December 2025
Received: 24 February 2026
Accepted: 27 February 2026

Keywords:
Chlorophyll
Electromagnetic field
Malondialdehyde
Rice
Stress tolerance

ABSTRACT

Objective: This study investigated the effectiveness of electromagnetic priming in improving drought tolerance of Hashemi rice (*Oryza sativa* L.) during germination and early seedling growth.

Method: A factorial experiment based on a completely randomized design with three replications was conducted in 2024 at the Islamic Azad University, Astara Branch. Rice seeds were exposed to magnetic fields (0, 50, 100, and 150 mT) for 20 or 40 minutes and then subjected to four PEG-induced drought levels (0, -2, -5, and -10 bar). Germination indecies and physiological traits including proline, MDA, and chlorophyll were measured after 25 days.

Results: The mean comparison of interaction effects showed that in the absence of an electromagnetic field (0 mT), increasing drought stress from 0 to −10 bar significantly decreased germination percentage from 97% to 66.53%, germination rate from 0.43 to 0.19 seeds day^{-1}, radicle length from 65.80 to 28.66, and plumule length from 45.33 to 17.33 mm. However, application of a 100 mT magnetic field considerably limited these reductions to approximately 24% and 49% for germination percentage and seedling length, respectively, indicating an improvement of more than 20% in maintaining germination capacity. With increasing drought stress, proline content significantly rose from 1.01 to 8.34 µmol g^{-1} FW, and MDA increased from 4.40 to 8.00 mmol g^{-1} FW, while chlorophyll *a* decreased from 0.64 to 0.17 and chlorophyll *b* from 0.75 to 0.32 mg g^{-1} FW. In the control (0 mT), chlorophyll *a* exhibited a 72% reduction, whereas at 100 mT this reduction was limited to 56.8%, reflecting approximately 15% improvement. Regression analysis revealed that the effect of magnetic field intensity on the measured traits depended strongly on the drought stress level and did not follow a consistent pattern; under severe stress (−10 bar), no significant linear relationship was detected.

Conclusions: The application of magneto-priming within the optimal range may serve as a simple, eco-friendly, and practical approach to enhance drought tolerance in rice seeds and improve early seedling establishment under unfavorable environmental conditions. In the present study, the treatment with 100 mT for 40 minutes resulted in improved seedling vigor indices for both length and weight. These findings offer new perspectives for the application of physical technologies in agricultural stress management and provide a basis for further field-based studies.

Cite this article: Molazem, D. (2026). Electromagnetic priming: a novel strategy to enhance drought tolerance in seeds and seedlings of rice (*Oryza sativa* cv. Hashemi). *Iranian Journal of Seed Research*, *12*(2), 111-132. http://doi.org/10.66224/yujs.12.2.111

© The Author(s).

Publisher: Yasouj University.

DOI: 10.66224/yujs.12.2.111

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/yujs.12.2.111]

Highlights

- Germination responses to magnetic fields are nonlinear and depend on field intensity and drought stress level.
- Electromagnetic priming at 100 mT for 40 minutes mitigates drought stress effects by up to 20% in germination traits.
- Magneto-priming offers a simple, eco-friendly strategy for improving rice seedling establishment under drought conditions.

Introduction

Rice (*Oryza sativa* L.) is among the most important cereal crops worldwide and serves as the staple food for more than one-third of the global population (Bandumula, 2018). As a major energy source, rice plays a crucial role in the diets of people in various regions, particularly Latin America, Asia, and the Pacific Islands. However, the germination stage in rice is highly sensitive to drought stress, as water deficiency during this phase can reduce germination percentage and rate, weaken seedling vigor, and ultimately result in poor plant establishment and consequently decreased yield (Nyasulu, 2024).

The application of electromagnetic fields prior to planting, as a safe and cost-effective method, can improve germination, early growth, earlier flowering, nutrient uptake, and ultimately crop yield. In recent years, the use of electromagnetic radiation as an innovative seed-priming approach has increased (Panuccio et al., 2018). Furthermore, physical pretreatments such as ultrasonic waves and ionizing radiation have emerged as novel and promising strategies to improve agricultural productivity (Rifna et al., 2019).

It has been reported that electromagnetic field treatments can positively affect seed germination in plants under drought stress, thereby enhancing germination performance. However, the effects of such pretreatments may vary depending on the intensity and duration of exposure, as well as among different plant species. Therefore, conducting applied studies to evaluate different intensities and exposure durations of these treatments is essential. The present study was therefore designed and conducted to investigate the effects of electromagnetic field treatments on germination-related traits and physiological characteristics of rice seeds under drought stress induced by polyethylene glycol (PEG).

Method

A factorial experiment was conducted in 2024 based on a completely randomized design (CRD) with three replications at the Plant Physiology Laboratory of the Islamic Azad University, Astara Branch. To generate the required magnetic field intensities, two solenoids made of ST37 steel cylinders (6 cm in diameter and 30 cm in length) were used. The magnetic cores were positioned inside the coils and aligned in opposite directions to produce a uniform magnetic field. Rice seeds were exposed to a constant electromagnetic field at intensities of 0 (control), 50, 100, and 150 mT for 20 or 40 minutes. Subsequently, drought stress was applied

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/yujs.12.2.111]

at four levels: 0 (control), -2, -5, and -10 bar using polyethylene glycol 6000 following the method of Michel and Kaufmann (1973).

During the experiment, the following traits were recorded randomly from 10 seeds: radicle length, coleoptile length, radicle and coleoptile dry weight, as well as seedling vigor indices (length- and weight-based). Physiological traits including chlorophyll *a* and *b* contents, malondialdehyde (MDA), and proline were measured according to the methods of Arnon (1975), Heath and Packer (1968), and Bates et al. (1973), respectively.

After confirming data normality and meeting the assumptions of analysis of variance, the data were analyzed as a factorial experiment within a completely randomized design. Mean comparisons were performed using Fisher's least significant difference (FLSD) test at the 5% probability level. All statistical analyses and graphing were carried out using XLSTAT software.

Results

The mean comparison of interaction effects at each magnetic field intensity level showed that in the absence of a magnetic field (0 mT), increasing drought stress from 0 to −10 bar significantly reduced all germination traits. Germination percentage fell from 97% to 53.66%, germination rate from 0.43 to 0.19 seeds day^{-1}, radicle length from 65.80 to 28.66, and plumule length from 45.33 to 17.33 mm, and the weight‑based seedling vigor index from 347.59 to 98.54. The reduction in germination traits under drought stress was particularly pronounced in the control (0 mT), with decreases of approximately 45% in germination percentage and 59% in seedling length. By contrast, applying a magnetic field—especially at 100 mT—limited these reductions to about 24% and 49%, respectively, reflecting an improvement of more than 20% in maintaining germination capacity. However, at 150 mT, the decline in germination traits was more severe than in other treatments, with the lowest values recorded at this intensity; germination percentage dropped from 89.83% to 46.66% and germination rate from 0.34 to 0.15 seeds day^{-1}, indicating a detrimental effect of higher magnetic field intensity.

As drought stress increased from 0 to −10 bar, proline content rose significantly from 1.01 to 8.34 µmol g^{-1} FW, and MDA from 4.40 to 8.00 mmol g^{-1} FW, whereas chlorophyll *a* decreased from 0.64 to 0.17 and chlorophyll *b* from 0.75 to 0.32 mg g^{-1} FW. At 100 mT, increasing drought stress was associated with a marked increase in proline and MDA contents. In the control (0 mT) chlorophyll *a* exhibited a 72% reduction, whereas at 100 mT the reduction was limited to 56.8%, representing approximately 15% improvement.

Furthermore, regression analysis revealed that the effect of magnetic field intensity on both physiological and germination traits was strongly dependent on the drought stress level and did not follow a consistent pattern. Under non‑stress conditions, only MDA showed a significant positive response to increasing magnetic field intensity, while other physiological traits remained unaffected. Under mild and moderate stress, significant increases in proline and MDA, along with a decrease in chlorophyll *b*, were observed. However, under severe

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/yujs.12.2.111]

stress (−10 bar), no significant linear relationship was detected between magnetic field intensity and physiological traits.

Conclusions

The significant declines in germination and physiological traits under drought stress reflect disruption of water balance, reduced metabolic activity, and increased oxidative stress in rice seedlings. However, the results demonstrated that magnetic field pretreatment, particularly at 100 mT, considerably mitigated these adverse effects, reducing the decline in germination percentage from approximately 45% in the control to about 24%. Among the treatments tested, the 100 mT treatment for 40 minutes proved most effective in improving these traits, especially under non-stress conditions.

In contrast, drought stress markedly reduced seedling physiological performance and was accompanied by increases in stress markers such as proline and malondialdehyde. Moreover, the interaction between the magnetic field and drought stress indicated that magnetic priming can serve to alleviate the negative effects of drought and assist plants in coping with adverse conditions. Overall, these findings highlight the potential of magnetic field application as a low-cost and non-chemical approach for improving plant growth under environmental stresses, particularly drought.

Author Contributions

Author have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data available on request from the author.

Acknowledgements

The author would like to thank the Vice-Chancellor for Research, the Department Head, and the Head of the Botany Laboratory at the Islamic Azad University, Astara Branch, for their support in providing research facilities and technical assistance.

Ethical Considerations

The author avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Funding

The author personally funded this research. The Islamic Azad University, Astara Branch, provided laboratory facilities and technical support.

Conflict of Interest

The author declare no conflict of interest.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/yujs.12.2.111]

پژوهش‌های بذر ایران

Homepage: https://yujs.yu.ac.ir/jisr

ISSN: 2383-1480 (Online); 2383-1251 (Print)

پیش‌تیمار الکترومغناطیسی: راهبردی نوین برای افزایش تحمل به خشکی در بذر و گیاهچه برنج (*Oryza sativa* cv. Hashemi)

داور ملازم[1] ✉

۱. نویسنده مسئول، استادیار، گروه کشاورزی، واحد آستارا، دانشگاه آزاد اسلامی، آستارا، ایران. رایانامه: davar.molazem@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۸
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۲۹

کلیدواژه‌ها:
برنج
تحمل تنش
کلروفیل
مالون‌دی‌آلدئید
میدان الکترومغناطیسی

چکیده

هدف: این مطالعه تأثیر پیش‌تیمار مغناطیسی را در بهبود تحمل به خشکی برنج رقم هاشمی در مرحله جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاهچه بررسی کرد.

روش پژوهش: آزمایشی فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در سال ۱۴۰۳ در دانشگاه آزاد اسلامی واحد آستارا اجرا شد. بذرهای برنج در معرض میدان‌های مغناطیسی (۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌تسلا) به مدت ۲۰ یا ۴۰ دقیقه قرار گرفتند و سپس تحت چهار سطح تنش خشکی القاشده با پلی‌اتیلن گلیکول (۰،۲-، ۵-، و ۱۰- بار) قرار گرفتند. شاخص‌های جوانه‌زنی و صفات فیزیولوژیکی شامل پرولین، مالون‌دی‌آلدئید و کلروفیل پس از ۲۵ روز اندازه‌گیری شدند.

یافته‌ها: مقایسه میانگین برهمکنش‌ها نشان داد که در نبود میدان الکترومغناطیسی، افزایش تنش خشکی از ۰ تا ۱۰- بار به‌طور معنی‌داری درصد جوانه‌زنی را از ۹۷ به ۶۶/۵۳ درصد، سرعت جوانه‌زنی را از ۰/۴۳ به ۰/۱۹ بذر در روز و طول ریشه‌چه از ۶۵/۸ به ۲۸/۶۶، طول ساقه‌چه از ۴۵/۳۳ به ۱۷/۳۳میلی‌متر کاهش داد. با این حال، کاربرد میدان مغناطیسی ۱۰۰ میلی‌تسلا این کاهش‌ها را به‌ترتیب برای درصد جوانه‌زنی و طول گیاهچه به حدود ۲۴ و ۴۹ درصد محدود کرد که بیانگر بهبود بیش از ۲۰ درصدی در حفظ توان جوانه‌زنی است. با افزایش تنش خشکی، محتوای پرولین از ۱/۰۱ به ۸/۳۴ میکرومول بر گرم وزن‌تر و مالون‌دی‌آلدئید از ۴/۴۰ به ۸/۰۰ میلی‌مول بر گرم وزن‌تر افزایش یافت، در حالی‌که کلروفیل a از ۰/۶۴ به ۰/۱۷ و کلروفیل b از ۰/۷۵ به ۰/۳۲ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر کاهش یافت. در شاهد، کلروفیل a حدود ۷۲ درصد کاهش نشان داد، در حالی‌که در شدت ۱۰۰ میلی‌تسلا این کاهش به ۵۶/۸ درصد محدود شد که حاکی از بهبود تقریباً ۱۵ درصدی است. تحلیل رگرسیون نشان داد که اثر شدت میدان مغناطیسی بر صفات مورد بررسی به سطح تنش خشکی وابسته بوده و از الگوی یکنواختی پیروی نمی‌کند؛ به‌طوری‌که در تنش شدید (۱۰- بار)، هیچ رابطه خطی معنی‌داری مشاهده نشد.

نتیجه‌گیری: کاربرد پیش‌تیمار مغناطیسی در محدوده بهینه می‌تواند به‌عنوان روشی ساده، زیست‌سازگار و کاربردی برای افزایش تحمل به خشکی در بذر برنج و بهبود استقرار اولیه گیاهچه در شرایط نامساعد محیطی به‌کار رود. در پژوهش حاضر، تیمار ۱۰۰ میلی‌تسلا به مدت ۴۰ دقیقه باعث بهبود شاخص‌های بنیه گیاهچه از نظر طول و وزن شد. این یافته‌ها افق‌های تازه‌ای را برای کاربرد فناوری‌های فیزیکی در مدیریت تنش‌های کشاورزی گشوده و زمینه را برای تحقیقات بیشتر در شرایط مزرعه‌ای فراهم می‌سازد.

جنبه‌های نوآوری

- پاسخ جوانه‌زنی به میدان‌های مغناطیسی غیرخطی بوده و به شدت میدان و سطح تنش خشکی وابسته است.
- پیش‌تیمار مغناطیسی با شدت ۱۰۰ میلی‌تسلا به مدت ۴۰ دقیقه، اثرات تنش خشکی را تا ۲۰ درصد در صفات جوانه‌زنی کاهش می‌دهد.
- پیش‌تیمار مغناطیسی راهبردی ساده و زیست‌سازگار برای بهبود استقرار گیاهچه برنج در شرایط خشکی ارائه می‌دهد.

استناد: ملازم، داور (۱۴۰۴). پیش‌تیمار الکترومغناطیسی: راهبردی نوین برای افزایش تحمل به خشکی در بذر و گیاهچه برنج (*Oryza sativa* cv. Hashemi). *پژوهش‌های بذر ایران*، ۱۲(۲)، ۱۳۲-۱۱۱. http://doi.org/10.66224/yujs.12.2.111

ناشر: دانشگاه یاسوج.

© نویسندگان.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/yujs.12.2.111]

مقدمه

برنج (*Oryza sativa* L.) یکی از مهم‌ترین غلات جهان و منبع اصلی تغذیه برای بیش از یک‌سوم جمعیت جهانی محسوب می‌شود (بندومولا[1]، ۲۰۱۸). این محصول راهبردی، نقشی حیاتی در اقتصاد بسیاری از کشورها ایفا کرده و به‌ویژه در آسیا بیش از ۹۰ درصد تولید جهانی برنج را به خود اختصاص داده و منبع اصلی درآمد میلیون‌ها کشاورز به‌شمار می‌رود (فائو[2]،۲۰۱۰). برنج منبعی غنی از ویتامین‌ها و مواد معدنی از جمله ویتامینE، ویتامینB5، تیامین، کلسیم، اسید فولیک و آهن است. همچنین دارای ترکیبات فنولیکی با خاصیت پاداکسیدانی است که در کاهش خطر بیماری‌هایی مانند دیابت و بیماری‌های قلبی مؤثرند (موهیدم[3] و همکاران، ۲۰۲۲). امروزه این محصول در بیش از ۱۰۰ کشور کشت شده و سالانه حدود ۵۰۰ میلیون تن شلتوک از سطحی معادل ۱۶۵ میلیون هکتار تولید می‌گردد (فائو، ۲۰۲۲). سطح زیر کشت و تولید کل برنج در سال ۲۰۱۹ در کشور ایران به‌ترتیب ۷۹۲ هزار هکتار و ۳/۶ میلیون تن می‌باشد (آمارنامه جهاد کشاورزی[4]، ۱۴۰۱). با این حال، مرحله جوانه‌زنی در برنج به‌شدت نسبت به تنش خشکی حساس است، به‌طوری‌که کم‌آبی در این مرحله باعث کاهش درصد و سرعت جوانه‌زنی و نیز تضعیف بنیه گیاهچه‌ها شده و در نهایت به کاهش استقرار گیاه و عملکرد نهایی منجر شود (نسلیو[5]، ۲۰۲۴).

پیش‌تیمار بذر یک روش ساده، مؤثر، سازگار با محیط‌زیست و کم‌هزینه برای بهبود جوانه‌زنی و افزایش تحمل گیاه به تنش‌های محیطی است (فاروق[6] و همکاران، ۲۰۱۹؛ میرمظلوم[7] و همکاران، ۲۰۲۰؛ تانو[8] و همکاران، ۲۰۱۲). استفاده از میدان‌های الکترو مغناطیسی پیش از کاشت به‌عنوان روشی ایمن و اقتصادی می‌تواند به بهبود جوانه‌زنی، رشد اولیه، گلدهی زودرس، جذب بهتر مواد مغذی و افزایش عملکرد کمک کند (رحمان[9] و همکاران، ۲۰۱۱؛ فلورز[10] و همکاران، ۲۰۰۷؛ سین[11] و همکاران، ۲۰۱۵؛ یولا[12] و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین، این فناوری می‌تواند اثرات منفی تنش‌های غیر زیستی (مانند شوری، خشکی، غرقابی، دماهای بالا و تابش زیاد) و تنش‌های زیستی (نظیر عوامل بیماری‌زای گیاهی) را کاهش دهد (شارما[13] و همکاران، ۲۰۱۴؛ کومار[14] و همکاران، ۲۰۱۶). در سال‌های اخیر، استفاده از پرتوهای الکترومغناطیسی به‌عنوان یک روش نوآورانه برای پیش‌تیمار بذرها افزایش‌یافته است (پنوچیو[15] و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین توجه بسیاری به تأثیر امواج الکترومغناطیسی، میدان‌های مغناطیسی، فراصوت و پرتوهای یونیزان بر بنیه بذر، جوانه‌زنی و رشد گیاهچه معطوف شده است (ریفنا[16] و همکاران، ۲۰۱۹؛ ابراهیم[17] و همکاران، ۲۰۲۰). امواج الکترومغناطیسی با تحریک واکنش‌های شیمیایی، تولید یون‌های H^+ و OH^- و افزایش گلوکز، موجب تسریع جوانه‌زنی و فعال‌سازی سیستم‌های آنزیمی در گیاه می‌شوند که به بهبود رشد و عملکرد کمک می‌کند (ما[18] و همکاران، ۲۰۲۰). میدان مغناطیسی پاسخ‌های مرتبط با تنش را در گیاهان القا کرده و منجر به افزایش تولید پاداکسیدان‌ها و سایر ترکیبات حفاظتی می‌شود. این امر به کشاورزان کمک می‌کند تا در شرایط تنش محصولات با کیفیتی تولید کنند (حسن[19] و همکاران، ۲۰۲۰).

پرتوهای الکترومغناطیسی غیر یونیزه بر انسان، حیوانات و گیاهان تأثیر می‌گذارد (پایونوف[20] و همکاران، ۲۰۲۵). تأثیر مستقیم امواج بر فرآیندهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی گیاه، ازجمله ویژگی‌های آناتومیکی، جذب

[1] Bandumula
[2] FAO
[3] Mohidem
[4] Ministry of Agriculture-Jahad
[5] Nyasulu
[6] Farooq
[7] Mirmazloum
[8] Tanou

[9] Rehman
[10] Florez
[11] Singh
[12] Ullah
[13] Sharma
[14] Kumar
[15] Panuccio
[16] Rifna
[17] Ibrahim
[18] Ma
[19] Hasan
[20] Paunov

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.66224/yujs.12.2.111]

مواد معدنی، تعادل آب، کلروفیل و فتوسنتز ثابت‌شده است (ماملیک[1] و همکاران، ۲۰۲۱). این امواج بر ویژگی‌های برگ در گیاه جعفری (*Petroselinum crispum*)، کرفس (*Apium graveolens*) و شوید (*Anethum graveolens*)، تأثیر گذاشته و سبب کاهش ضخامت دیواره سلولی و اندازه کلروپلاست و میتوکندری شده است (سورن[2] و همکاران، ۲۰۱۴؛ کیور[3] و همکاران، همکاران، ۲۰۲۱). پوتری[4] و همکاران (۲۰۲۴) نشان داد که میدان مغناطیسی با شدت ۰/۲ میلی‌تسلا به مدت ۱۱ دقیقه و ۴۴ ثانیه موجب بهبود جوانه‌زنی بذرهای قدیمی برنج محلی Lampung و افزایش مقاومت به خشکی شد. این نتایج نشان داد که میدان‌های مغناطیسی می‌توانند به‌عنوان روشی مؤثر برای افزایش قدرت جوانه‌زنی و تحمل تنش در بذرهای برنج مورد استفاده قرار گیرند.

حافیظ[5] و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای جامع به بررسی تأثیر میدان‌های مغناطیسی بر رشد و تغییرات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و مولکولی گیاهان پرداختند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که این میدان‌ها می‌توانند فرآیندهایی مانند فتوسنتز، تنفس، جذب مواد مغذی، تعادل آب و بیان ژن‌های مرتبط با ROS، پاداکسیدان‌ها، آنزیم‌ها، پروتئین‌ها و متابولیت‌های ثانویه را تحت‌تأثیر قرار دهند. با این حال، پژوهشگران به وجود نتایج متناقض در مطالعات مختلف اشاره کردند که می‌تواند ناشی از تفاوت‌های گونه‌ای یا شرایط متفاوت شدت و مدت مواجهه باشد (پایونوف و همکاران، ۲۰۲۵). صدیق[6] و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای روی لاین‌های برنج دانه‌بلند نشان دادند که تنش خشکی القاشده با پلی‌اتیلن‌گلیکول منجر به کاهش معنی‌دار تمامی صفات مورد بررسی، از جمله درصد جوانه‌زنی، در مقایسه با شاهد در تمامی سطوح تنش شد. ساتیاباراتی[7] و همکاران (۲۰۲۲) تنش خشکی القا شده با پلی‌اتیلن گلیکول (۰/۸- مگاپاسکال) را بر واریته‌های محلی برنج (*Oryza sativa* L.) مطالعه کردند.

نتایج نشان داد که برخی از این نژادها در مرحله گیاهچه‌ای در برابر تنش خشکی مقاوم بودند. اورنوخسایکن[8] و همکاران (۲۰۲۵) در بررسی اثر میدان الکترومغناطیسی با شدت ۷/۵ میلی‌تسلا و ۵ ساعت، نشان داد که کاربرد امواج الکترومغناطیسی در مراحل اولیه رشد، واکنش‌های بیوشیمیایی را فعال کرده و جوانه‌زنی بذر گندم را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. کاربونل[9] و همکاران (۲۰۰۸) بذرهای برنج را در میدان‌های مغناطیسی ثابت ۱۵۰ و ۲۵۰ میلی‌تسلا به مدت ۲۰ دقیقه قرار داده و مشاهده نمودند که قرار گرفتن مداوم در معرض میدان مغناطیسی ۱۵۰ میلی‌تسلا باعث افزایش معنی‌دار سرعت و درصد جوانه‌زنی نسبت به شاهد شد. تفاوت‌های قابل توجهی نیز برای بذرهایی که به مدت ۲۰ دقیقه در معرض میدان مغناطیسی ۲۵۰ میلی‌تسلا قرار گرفته بودند، مشاهده شد. مشنسکایا[10] و همکاران (۲۰۲۳) در بررسی تأثیر میدان الکترومغناطیسی با فرکانس بسیار پایین (۱۴/۳ هرتز) بر حساسیت گندم به خشکی پرداخته و نشان دادند که میدان الکترومغناطیسی می‌تواند اثر محافظتی بر گیاهان در شرایط تنش خشکی داشته باشد. . آلارکون[11] و همکاران (۲۰۲۴) در تحقیقی به بررسی تأثیر آهن‌ربا بر رشد گیاه لوبیا سبز (*Phaseolus vulgaris*) پرداختند. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از میدان‌های مغناطیسی به‌طور قابل توجهی رشد گیاه لوبیا سبز را تحت تأثیر قرار داده و سبب افزایش طول ساقه، تعداد برگ‌ها و وزن خشک گیاه نسبت به گروه شاهد شدند.

بر اساس مطالعات انجام‌شده، استفاده از میدان‌های الکترومغناطیسی می‌تواند تأثیرات مثبتی بر فرآیند جوانه‌زنی بذر گیاهان در شرایط تنش خشکی داشته باشد و موجب بهبود این فرآیند شود. با این حال، اثرات ناشی از شدت و مدت پیش‌تیمارهای اعمال‌شده ممکن است در انواع مختلف بذرها متفاوت باشد. بنابراین، انجام پژوهش‌های کاربردی با بررسی شدت و مدت زمان‌های مختلف این تیمارها ضروری به نظر می‌رسد. پژوهش

[1] Mamlic
[2] Soran
[3] Kaur
[4] Putri
[5] Hafeez
[6] Siddique
[7] Sathyabharathi
[8] Urnukhsaikhan
[9] Carbonell
[10] Mshenskaya
[11] Alarcon

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.66224/yujs.12.2.111]

حاضر با هدف بررسی اثرات تیمارهای میدان الکترومغناطیسی بر صفات مرتبط با جوانه‌زنی و صفات فیزیولوژیکی بذر برنج تحت تنش خشکی ناشی از پلی اتیلن گلیکول (PEG) طراحی و اجراشده است.

مواد و روش‌ها

آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار، در آزمایشگاه فیزیولوژی دانشگاه آزاد اسلامی واحد آستارا در سال ۱۴۰۳ اجرا شد. برای اعمال میدان مغناطیسی با شدت‌های موردنیاز از دو استوانه به قطر ۶ سانتی‌متر و طول ۳۰ سانتی‌متر از جنس فولاد ST37 ساخت ایران استفاده شد. هسته‌ها درون سیم‌پیچ‌ها و مقابل یکدیگر قرار گرفتند. هر سیم‌پیچ از ۵۰۰۰ دور سیم لاکی از جنس مس با قطر ۰/۷۵ میلی‌متر ساخته‌شده بود. برای هر سیم‌پیچ، از یک منبع تغذیه DC متغیر ۳۰ ولت با حداکثر جریان خروجی ۳ آمپر به‌صورت جداگانه استفاده گردید. به‌منظور تنظیم شدت میدان تولیدشده بین قطعات قطبی از تسلامتر دیجیتال مدل TES-3196 ساخت تایوان استفاده شد. بذر رقم محلی هاشمی در معرض میدان الکترومغناطیس ثابت با شدت‌های صفر (شاهد)، ۵۰، ۱۰۰ و۱۵۰ میلی تسلا و مدت زمان ۲۰ و ۴۰ دقیقه قرار گرفته سپس فاکتور تنش آبی، در چهار سطح صفر (شاهد)، ۲-، ۵- و ۱۰- بار با استفاده از پلی اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ مطابق معادله میشل و کافمن[1] (۱۹۷۳) اعمال شد. بذرهای خشک بعد از ضدعفونی با الکل ۷۰ درصد به‌مدت ۱۰ ثانیه و محلول ۱۰ درصد هیپوکلریت سدیم به‌مدت ۵ دقیقه، در دسته‌های ۱۰۰ تایی در داخل یک لوله نازک شفاف پلاستیکی در میدان الکترومغناطیسی با شدت و مدت لازم قرار گرفت. بذور در دسته‌های ۲۵ تایی در پتری‌های استریل به قطر ۱۰ سانتی‌متر در معرض تنش خشکی قرار گرفتند. در طول آزمایش، شمارش روزانه تعداد بذرهای جوانه‌زده به مدت هشت روز در ساعت ۸ صبح و ۱۵ بعد از ظهر انجام شد و صفاتی همچون درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی (در ۲۵ بذر)، طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه، طول گیاهچه، وزن خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه و شاخص بنیه طولی و وزنی گیاهچه به‌صورت تصادفی در ۱۰ بذر ثبت شد. جهت اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیکی نشاهای سالم، به گلدان-های پلاستیکی حاوی ماسه منتقل شدند. گلدان‌ها در اتاقک کشت با دمای ۲۴ درجه سلسیوس و ۱۶ ساعت نور و ۸ ساعت تاریکی با رطوبت ۷۰ درصد منتقل گردید (قانع[2] و همکاران، ۲۰۱۲). درصد جوانه‌زنی با استفاده از رابطه ۱ (بلچر[3]، ۱۹۹۵) محاسبه گردید. در این مطالعه، بذرهایی که طول ریشه‌چه آن‌ها حداقل دو میلی‌متر بود، به‌عنوان بذر جوانه‌زده در نظر گرفته شدند (ایستا[4]، ۱۹۷۶).

رابطه ۱: $GP\% = n/N \times 100$

سرعت جوانه‌زنی از رابطه ۲ طبق روش ماگویر[5] (۱۹۶۲) محاسبه شد.

رابطه ۲:

$$GR=(a/1)+(b-a/2)+(c-b/3)+\ldots+(n-n-1/N)$$

GP درصد جوانه‌زنی، n تعداد بذرهای جوانه‌زده در هر پتری، N تعداد کل بذرهای کشت‌شده، GR سرعت جوانه‌زنی (day^{-1}) ، n..... ,c,b,a , به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تعداد بذرهای جوانه‌زده پس از ۱، ۲، ۳ و n روز از شروع آبگیری است. همچنین شاخص بنیه گیاهچه طبق رابطه ۳ و ۴ (عبدل باکی و اندرسون[6] ، ۱۹۷۳) محاسبه شد.

رابطه ۳: طول گیاهچه (ریشه‌چه + ساقه‌چه)(سانتی‌متر) × درصد جوانه‌زنی = شاخص طولی بنیه گیاهچه

رابطه ۴: وزن خشک گیاهچه (ساقه‌چه + ریشه‌چه) (میلی‌گرم) × درصد جوانه‌زنی = شاخص وزنی بنیه گیاهچه

طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه و طول گیاهچه و وزن‌خشک آن‌ها پس از اتمام دوره جوانه‌زنی اندازه‌گیری شدند. وزن‌خشک نمونه‌ها در اون ۷۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرارگرفته و سپس با ترازوی حساس با دقت یک‌دهم میلی‌گرم توزین شدند.

[1] Michel and Kaufmann

[2] Ghane
[3] Belcher
[4] ISTA
[5] Maguire
[6] Abdul-Baki and Anderson,

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.66224/yujs.12.2.111]

محتوای کلروفیل a و کلروفیل b بر اساس روش آرنون[1] (۱۹۷۵) اندازه‌گیری شد. مقدار جذب نوری با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۶۶۳ و ۶۴۵ نانومتر قرائت و غلظت کلروفیل بر اساس روابط ۵ و ۶ تعیین شد.

رابطه ۵: میلی‌گرم کلروفیل a در هر گرم وزن‌تر:
۰/۵×[(جذب ۶۴۵) ×۲/۶۹ – (جذب در ۶۶۳) ×۱۲/۷]

رابطه ۶: میلی‌گرم کلروفیل b در هر گرم وزن‌تر:
۰/۵×[(جذب ۶۶۳) ×۴/۶۹ – (جذب در ۶۴۵) ×۲۲/۹]

مالون‌دی‌آلدئید (MDA) به‌روش هیت و پاکر[2] (۱۹۶۸) محاسبه شد. ۰/۲ گرم از بافت فریز شده برگ گیاه با ۵ میلی‌لیتر تری‌کلرواستیک اسید (TCA) ۰/۱ درصد سائیده شد. عصاره‌ی حاصل با استفاده از سانتریفیوژ به مدت ۵ دقیقه در ۱۰۰۰۰g سانتریفیوژ شد. به یک میلی‌لیتر از محلول روئی حاصل از سانتریفیوژ، ۴ میلی‌لیتر محلول تری‌کلرواستیک اسید (TCA) ۲۰ درصد که حاوی ۰/۵ درصد تیوباربیتوریک اسید (TBA) بود، اضافه شد. مخلوط حاصل به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۹۵ درجه سلسیوس در حمام آب‌گرم حرارت داده‌شده سپس بلافاصله در یخ سرد شد و دوباره مخلوط به مدت ۱۰ دقیقه در ۱۰۰۰۰g سانتریفیوژ گردید. شدت جذب این محلول با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۵۳۲ نانومتر خوانده شد.

پرولین با روش بتیس[3] و همکاران (۱۹۷۳) اندازه‌گیری شد. ۰/۵گرم ماده‌تر برگ را در هاون له‌کرده و درون یک تیوب ریخته و ۱۰ میلی‌لیتر اسیدسولفوسالیسیلیک ۳٪ به آن اضافه کرده و نمونه درون یخ قرار داده شد. تیوب را در ۱۵۰۰۰ دور به مدت ۱۰ تا ۱۵ دقیقه در دمای ۴ درجه سلسیوس سانتریفیوژ نموده تا مواد اضافی از محلول جدا شود. دو میلی‌لیتر آن را برداشته و روی آن ۲ میلی‌لیتر اسید نایهیدرین و ۲ میلی‌لیتر اسیداستیک خالص اضافه شد و پس از قرار دادن در حمام آب‌گرم ۱۰۰ درجه سلسیوس به مدت یک ساعت به آب‌یخ منتقل شد. ۴ میلی‌لیتر تولوئن به‌آن اضافه شده و پس‌از ۲۰ ثانیه تکان شدید جذب بخش رنگی بالایی در طول‌موج ۵۲۰ نانومتر قرائت شد.

پس از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها و برقراری مفروضات تجزیه واریانس، داده‌ها بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی آنالیز شدند. برای مقایسه میانگین‌ها و برش‌دهی برهمکنش‌ها از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (FLSD) در سطح احتمال پنج درصد استفاده شد. برای محاسبات آماری، رگرسیون و ترسیم نمودارها از نرم‌افزار آماری XLSTAT بهره گرفته شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه (جداول ۱ و ۲) نشان‌داد که اثر سطوح مختلف تنش خشکی بر صفات مورد بررسی از جمله درصد و سرعت جوانه‌زنی، طول و وزن ریشه‌چه، ساقه‌چه، پرولین، کلروفیل a، کلروفیل b و مالون‌دی‌آلدئید در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود، که این امر نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه تنش بر ویژگی‌های جوانه‌زنی و فیزیولوژیکی گیاه است. علاوه بر این، اثر میدان الکترومغناطیسی نیز در تمامی صفات به سطح معنی‌داری رسید که بیانگر توان این عامل در تعدیل پاسخ‌های گیاه تحت شرایط تنش و غیرتنش است. کاتریا[4] کاتریا[4] و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که پیش‌تیمار بذرهای سویا و ذرت با میدان مغناطیسی می‌تواند جوانه‌زنی و رشد اولیه این گیاهان را بهبود بخشد. از سوی دیگر، برهم‌کنش میدان مغناطیسی در تنش خشکی بر اکثر صفات از جمله شاخص بنیه وزنی و طولی گیاهچه، وزن خشک اندام‌ها و درصد و سرعت جوانه‌زنی معنی‌دار بود و نشان‌دهنده آن است که پاسخ گیاه به میدان مغناطیسی بسته به شرایط رطوبتی محیط (تنش خشکی یا بدون تنش) تغییر می‌کند. این نتایج با یافته‌های تحقیقاتی شبرنگی[5] (۲۰۲۴) در خصوص تأثیرات معنی‌دار معنی‌دار میدان مغناطیسی بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌ها همخوانی دارد.

در مجموع، این نتایج بیانگر آن است که پاسخ صفات

[1] Arnon
[2] Heath and Packer
[3] Bates
[4] Kataria
[5] Shabrangy

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.66224/yujs.12.2.111]

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر میدان الکترومغناطیسی و تنش خشکی بر شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه برنج

Table 1. Analysis of variance for the effects of electromagnetic field and drought stress on germination and seedling growth indices of rice

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی df	درصد جوانه‌زنی Germination Percentage	سرعت جوانه‌زنی Germination Rate	طول ریشه‌چه Radicle Length	طول ساقه‌چه Coleoptile Length	وزن خشک ریشه‌چه Radicle Dry Weight	وزن خشک ساقه‌چه Coleoptile Dry Weight	شاخص طولی بنیه گیاهچه Seedling Length Vigor Index	شاخص وزنی بنیه گیاهچه Seedling Weight Vigor Index
میدان مغناطیسی Magnetic Field (MF)	3	1156.170**	0.072**	472.913**	233.984**	0.818**	0.311**	27972261.953**	33944.341**
زمان Time	1	0.570 ns	0.0001 ns	38.888 ns	0.468	0.076 ns	0.006 ns	255735.809 ns	317.401 ns
تنش خشکی Drought Stress	3	6325.659**	0.222**	4299.983**	3094.233**	0.694**	5.243**	232447084.349**	198897.573**
میدان ×زمان MF × Time	3	118.930**	0.002**	21.575 ns	12.684*	0.043 ns	0.003 ns	1476059.437**	2061.697**
میدان × تنش MF × Stress	9	103.608**	0.002**	22.683 ns	11.150**	0.077**	0.063**	651298.329*	2662.399**
زمان ×تنش Time × Stress	3	7.401 ns	0.0001 ns	8.143 ns	3.400 ns	0.029 ns	0.084*	184292.621 ns	446.229 ns
میدان×زمان ×تنش MF × Time × Stress	9	4.871 ns	0.0003 ns	5.102 ns	4.887 ns	0.017 ns	0.010 ns	107103.237 ns	181.464 ns
اشتباه آزمایشی Error	64	15.069	0.0001	21.916	3.688	0.022	0.021	249948.707	350.121
ضریب تغییرات٪ CV (%)		4.71	5.25	28.5	24.5	1.33	8.85	7.51	7.94

ns **و*، به ترتیب بیانگر عدم معنی‌داری، معنی‌دار در سطوح ۱ و ۵ درصد

ns, ** and * indicate, non-significant, significant at the 1% and 5%probability level respectively.

جدول۲ - تجزیه واریانس اثر میدان الکترومغناطیسی و تنش خشکی بر صفات فیزیولوژیکی گیاهچه برنج

Table 2. Analysis of variance for the effects of electromagnetic field and drought stress on physiological traits of rice seedlings

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی df	پرولین Proline	کلروفیل *a* Chlorophyll *a*	کلروفیل *b* Chlorophyll *b*	مجموع کلروفیل Chlorophyll *a+b*	مالون دی آلدئید Malondialdehyde
میدان مغناطیسی Magnetic Field (MF)	3	39.761**	0.508**	1.606**	3.898**	88.892**
زمان Time	1	11.915**	0.003 ns	0.024*	0.043 ns	0.232 ns
تنش خشکی Drought Stress	3	288.465**	0.713**	0.672**	2.761**	25.287**
میدان ×زمان MF × Time	3	5.845**	0.014 ns	0.019**	0.063**	32.843**
میدان × تنش MF × Stress	9	3.876**	0.017 ns	0.037**	0.094**	1.770**
زمان ×تنش Time × Stress	3	0.961 ns	0.002 ns	0.006 ns	0.014 ns	0.065 ns
میدان×زمان ×تنش MF × Time × Stress	9	0.650 ns	0.001 ns	0.005 ns	0.008 ns	0.433 ns
اشتباه آزمایشی Error	64	0.375	0.009	0.005	0.015	0.248
ضریب تغییرات٪ CV (%)		10.53	23.46	12.78	13.01	6.51

ns , **و*، به ترتیب بیانگر عدم معنی‌داری، معنی‌دار در سطوح ۱ و ۵ درصد

ns, ** and * indicate, non-significant, significant at the 1% and 5%probability level respectively.

مورد مطالعه تحت تأثیر هم‌زمان شرایط خشکی و تیمار میدان الکترومغناطیسی قرار گرفته است، لذا برای بررسی دقیق‌تر روند تغییرات، مقایسه میانگین تیمارها و برش‌دهی سطوح آن‌ها و نیز تحلیل‌های رگرسیونی انجام گردید.

مقایسه میانگین برهم‌کنش تنش خشکی در هر سطح از شدت میدان مغناطیسی نشان داد که پاسخ صفات جوانه‌زنی به تنش خشکی در هر شدت میدان روند مشخص و وابسته به شدت دارد. در شدت میدان مغناطیسی صفر میلی‌تسلا، با افزایش شدت تنش خشکی

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/yujs.12.2.111]

از صفر به ۱۰- بار، تمامی صفات جوانه‌زنی شامل درصد جوانه‌زنی از ۹۷ به ۵۳/۶۶ درصد، سرعت جوانه‌زنی از ۰/۴۳ به ۰/۱۹ بذر در روز، طول ریشه‌چه از ۶۵/۸ به ۲۸/۶۶ میلی‌متر، طول ساقه‌چه از ۴۵/۳۳ به ۱۷/۳۳ میلی‌متر، وزن خشک ریشه‌چه از ۱/۲۷ به ۰/۷۳ میلی‌گرم، وزن خشک ساقه‌چه از ۲/۳۱ به ۱/۰۹ میلی‌گرم، شاخص طولی بنیه گیاهچه از ۱۰۷۷۹/۹ به ۲۵۰۸/۳ و شاخص وزنی بنیه گیاهچه از ۳۴۷/۵۹ به ۹۸/۵۴ به‌طور معنی‌داری کاهش یافتند (جدول ۳) که نشان‌دهنده حساسیت بالای گیاهچه‌ها به تنش خشکی است. در شدت میدان ۵۰ میلی‌تسلا نیز روند کاهشی صفات با افزایش تنش مشاهده شد، اما میزان کاهش نسبت به شاهد کمتر بوده و بیانگر اثر تعدیلی این شدت در کاهش خسارت تنش است. در شدت ۱۰۰ میلی‌تسلا، اگرچه با افزایش تنش کاهش صفات اجتناب‌ناپذیر بود، اما مقادیر صفات در تمامی سطوح تنش نسبت به سایر شدت‌ها در وضعیت بهتری حفظ شد، به‌طوری‌که حتی در تنش شدید نیز برتری نسبی این تیمار قابل مشاهده بود. کاهش صفات جوانه‌زنی در اثر تنش خشکی در تیمار شاهد (بدون میدان) بسیار شدید بود، به‌طوری‌که درصد جوانه‌زنی و طول گیاهچه به‌ترتیب حدود ۴۵ و ۵۹ درصد کاهش یافتند، در حالی‌که کاربرد میدان مغناطیسی به‌ویژه در شدت ۱۰۰ میلی‌تسلا این کاهش را به‌ترتیب به حدود ۲۴ و ۴۹ درصد محدود کرد که نشان‌دهنده بهبود بیش از ۲۰ درصدی در حفظ توان جوانه‌زنی است. در مقابل، در شدت ۱۵۰ میلی‌تسلا، کاهش صفات جوانه‌زنی با افزایش تنش شدیدتر از سایر تیمارها بوده و کمترین مقادیر در این سطح ثبت شد به‌طوری‌که درصد جوانه‌زنی از ۸۹/۸۳ به ۴۶/۶۶ درصد و سرعت جوانه‌زنی از ۰/۳۴ به ۰/۱۵ بذر در روز کاهش یافت که نشان‌دهنده اثر منفی شدت‌های بالای میدان است (جدول ۳). در مجموع، این نتایج نشان می‌دهد که میدان مغناطیسی در شدت‌های متوسط می‌تواند شیب کاهش صفات در پاسخ به تنش خشکی را تعدیل کند، در حالی‌که شدت‌های بالا نه‌تنها اثر حفاظتی ندارند بلکه اثرات تنش را تشدید می‌کنند. مطالعات ساری[1] و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که میدان مغناطیسی ثابت تأثیرات مثبتی بر جوانه‌زنی بذر لوبیا داشته است. شرفی[2] (۲۰۲۵) نشان داد که پیش‌تیمار میدان مغناطیسی با شدت ۲۵۰ میلی‌تسلا به‌مدت ۴ ساعت و امواج فراصوت (۴ دقیقه) به‌طور موثری تحمل به شوری و خشکی را در بذرهای خشک یونجه افزایش داد و سبب افزایش سرعت رشد گیاهچه شد. وثیقه شمس‌آبادی[3] و همکاران (۲۰۱۸) در بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر برخی صفات فیزیولوژیک و جوانه‌زنی بذر گلرنک نشان‌داد که شدت میدان مغناطیسی بر صفات درصد و سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه، طول گیاهچه، وزن‌خشک گیاهچه و شاخص بنیه طولی معنی‌دار بود و تیمار ۱۰ میلی‌تسلا باعث افزایش معنی‌دار درصد جوانه‌زنی و طول ریشه‌چه در بذرهای خشک و تر گلرنگ شد. در تحقیقی اثر میدان مغناطیسی حدود ۴۰۰ میلی‌تسلا در دوره‌های زمانی صفر(شاهد)، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰و ۱۵۰ دقیقه بر تحریک فعالیت‌های بیوشیمیایی گیاه سیاه‌دانه انجام شد و بیش‌ترین درصد جوانه‌زنی بذر و طول ریشه‌چه و ساقه‌چه در دوره زمانی ۹۰ دقیقه به‌دست آمد (العلاف و البیکر[4]، ۲۰۲۲). تأثیر میدان الکترومغناطیسی بر صفات جوانه‌زنی و رشد گیاهچه آفتابگردان نشان داد که قرار گرفتن بذور در میدان با شدت ۱۰۰ میلی‌تسلا به‌مدت ۱۰ دقیقه سبب افزایش درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی و رشد محصول و عملکرد شد (افضل[5] و همکاران، ۲۰۲۱).

بررسی پاسخ صفات فیزیولوژیکی به سطوح مختلف تنش خشکی (جدول ۴) در هر شدت میدان مغناطیسی نشان داد که الگوی تغییرات این صفات به‌شدت وابسته به شدت میدان است. در شدت میدان مغناطیسی صفر میلی‌تسلا، با افزایش تنش خشکی از صفر به ۱۰- بار، محتوای پرولین از ۱/۰۱ به ۸/۳۴ میکرومول بر گرم وزن‌تر و مالون‌دی‌آلدئید از ۴/۴۰ به ۸/۰ میلی‌مول بر گرم وزن‌تر به‌طور معنی‌داری افزایش و کلروفیل a از ۰/۶۴ به ۰/۱۷ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر و کلروفیل b از ۰/۷۵ به ۰/۳۲ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر و کلروفیل کل از ۱/۳۹ به ۰/۵۰

[1] Sarı
[2] Sharafi
[3] Vasiqeh Shamsabadi
[4] Al-Allaf and Al-Baker
[5] Afzal

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.66224/yujs.12.2.111]

جدول ۳- مقایسه میانگین برهم‌کنش میدان‌های مغناطیسی در هر سطح تنش خشکی برای ویژگی‌های جوانه‌زنی برنج

Table 3. Means comparison of the interaction of magnetic field within each level of drought stress for rice germination characteristics

شدت میدان مغناطیسی (میلی‌تسلا) Magnetic Field Intensity (mT)	تنش خشکی Drought Stress (bar)	درصد جوانه‌زنی Germination Percentage	سرعت جوانه‌زنی (بذر بر روز) Germination Rate (Seed day^{-1})	طول ریشه چه (میلی‌متر) Radicle Length (mm)	طول ساقه چه (میلی‌متر) Coleoptile Length (mm)	وزن خشک ریشه چه (میلی‌گرم) Radicle Dry Weight (mg)	وزن خشک ساقه‌چه (میلی‌گرم) Coleoptile Dry Weight (mg)	شاخص طولی بنیه گیاهچه Seedling Length Vigor Index	شاخص وزنی بنیه گیاهچه Seedling Weight Vigor Index
0	0	97.000 a	0.433 a	65.800 a	45.333 a	1.270 a	2.313 a	10779.9 a	347.590 a
	-2	91.000 b	0.277 b	52.333 b	31.667 b	1.340 a	1.837 b	7643.667 b	289.083 b
	-5	77.667 c	0.207 c	44.000 c	21.000 c	0.887 b	1.257 c	5048.333 c	166.397 c
	-10	53.667 d	0.198 c	28.667 d	17.333d	0.733 b	1.095 c	2508.333 d	98.543 d
50	0	98.683 a	0.432 a	61.550 a	44.667 a	1.308 a	2.395 a	10480.152 a	365.496 a
	-2	94.950 b	0.297 b	54.000 b	33.450 b	1.452 a	1.950 b	8303.805 b	323.037 b
	-5	83.500 c	0.220 c	44.500 c	24.350 c	1.342 b	1.622 c	5748.000 c	247.227 c
	-10	63.500 d	0.208 c	33.000 d	19.667 d	1.122 b	1.283 c	3345.333 d	151.727 d
100	0	99.833 a	0.472 a	66.967 a	46.150 a	1.237 a	2.160 a	11292.950 a	339.112 a
	-2	97.383 b	0.358 b	56.833 b	36.333 b	1.278 a	1.737 b	9074.350 b	293.720 b
	-5	88.350 c	0.318 c	48.300 c	28.233 c	1.118 b	1.277 c	6766.900 c	211.710 c
	-10	75.667 d	0.265 c	34.000 d	23.500 d	1.112 c	1.370 c	4335.167 d	187.130 d
150	0	89.833 a	0.347 a	53.233 a	42.000 a	1.100 a	2.130 a	8554.900 a	290.070 a
	-2	83.833 a	0.205 b	47.167 b	28.583 b	0.975 a	1.672 b	6365.883 b	222.288 b
	-5	76.333 b	0.177 c	37.067 c	17.817 c	0.790 b	1.183 c	4194.750 c	151.780 c
	-10	46.667 c	0.152 c	26.333 d	16.000 d	0.633 c	1.182 c	1987.333 d	85.373 d

حروف غیر مشابه نشانگر تفاوت معنی دار در سطح احتمال ۵٪ است.

The different letters indicate significant differences at 5% probability level.

جدول ۴- مقایسه میانگین برهم‌کنش میدان‌های مغناطیسی در هر سطح تنش خشکی برای ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاهچه برنج

Table 4. Means comparison of the interaction of magnetic field within each level of drought stress on physiological traits in rice seedlings

شدت میدان مغناطیسی (میلی‌تسلا) Magnetic Field Intensity (mT)	تنش خشکی Drought Stress (bar)	مالون دی آلدئید (میلی مول بر گرم وزن تر) Malondialdehyde (mmol.gFW^{-1})	مجموع کلروفیل (میلی گرم بر گرم وزن تر) Chlorophyll *a+b* (mg.gFW^{-1})	کلروفیل *b* (میلی گرم بر گرم وزن تر) Chlorophyll *b* (mg.gFW^{-1})	کلروفیل *a* (میلی گرم بر گرم وزن تر) Chlorophyll *a* (mg.gFW^{-1})	پرولین پرولین (میکرومول بر گرم وزن تر) Proline (µmol.gFW^{-1})
0	0	4.403 b	1.399 a	0.751 a	0.648 a	1.017 d
	-2	5.370 ab	1.062 b	0.619 ab	0.443 b	3.563 c
	-5	6.483 a	0.715 c	0.473 bc	0.242 c	6.257 b
	-10	8.000 a	0.503 c	0.324 c	0.179 c	8.347 a
50	0	6.140 c	1.556 a	0.856 a	0.700 a	1.138 d
	-2	7.207 bc	1.220 b	0.700 b	0.520 b	4.628 c
	-5	7.777 ab	0.940 c	0.575 bc	0.365 c	7.358 b
	-10	8.512 a	0.744 c	0.432 c	0.312 c	8.450 a
100	0	8.778 c	1.910 a	1.087 a	0.824 a	1.513 d
	-2	10.207 bc	1.352 b	0.794 b	0.558 b	7.418 c
	-5	11.070 ab	1.075c	0.622 bc	0.453 c	10.277 b
	-10	11.628 a	0.888 c	0.532 d	0.356 c	11.587 a
150	0	6.107 c	0.568 a	0.237 a	0.332 a	1.165 d
	-2	6.915 ab	0.456 b	0.194 b	0.262 b	5.190 c
	-5	6.892 ab	0.267 c	0.122 bc	0.145 c	7.142 b
	-10	6.975 a	0.196 c	0.092 d	0.105 c	7.950 a

حروف غیر مشابه نشانگر تفاوت معنی دار در سطح احتمال ۵٪ است.

The different letters indicate significant differences at 5% probability level.

میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر کاهش معنی‌دار یافت (جدول ۴) که بیانگر تشدید تنش اکسیداتیو و کاهش ظرفیت فتوسنتزی است. در شدت میدان مغناطیسی ۵۰ میلی‌تسلا نیز روند مشابهی مشاهده شد، اما مقادیر کلروفیل در سطوح تنش نسبت به شاهد در وضعیت بهتری حفظ شده و افزایش پرولین نشان‌دهنده فعال شدن پاسخ‌های دفاعی گیاه است. در شدت میدان مغناطیسی ۱۰۰ میلی‌تسلا، افزایش تنش خشکی با افزایش قابل توجه پرولین و

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/yujs.12.2.111]

مالون‌دی‌آلدئید همراه بود، اما در عین حال مقادیر کلروفیل نسبت به سایر شدت‌ها کمتر کاهش یافت که نشان‌دهنده نقش این شدت در ایجاد تعادل بین تحمل تنش و حفظ عملکرد فتوسنتزی است. در حالت بدون میدان مغناطیسی کلروفیل a ۷۲ درصد کاهش نشان داد در حالی که در میدان مغناطیسی ۱۰۰ میلی‌تسلا این کاهش ۵۶/۸ درصد بود و میدان مغناطیسی ۱۰۰ میلی‌تسلا سبب کاهش حدود ۱۵ درصدی گردید. در مقابل، در شدت ۱۵۰ میلی‌تسلا، کاهش شدید کلروفیل‌ها در کنار افزایش محدودتر پرولین مشاهده شد که بیانگر اختلال در سازوکارهای دفاعی و تشدید اثرات منفی تنش است. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که شدت ۱۰۰ میلی‌تسلا مؤثرترین سطح در تعدیل اثرات تنش خشکی بوده، در حالی‌که شدت‌های بالاتر کارایی خود را از دست داده و حتی اثرات مخرب ایجاد می‌کنند.

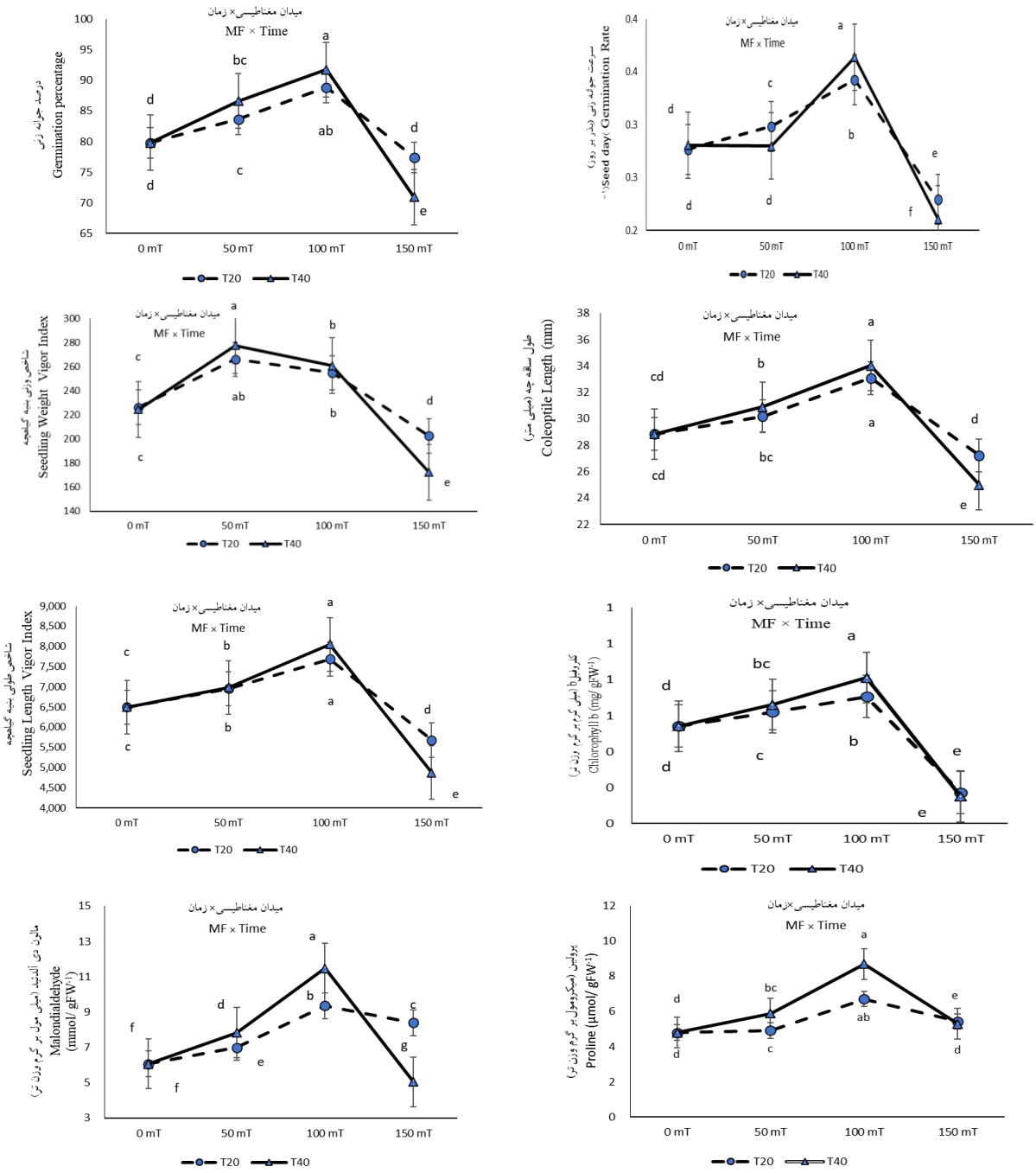
ممتاز[1] و همکاران (۲۰۲۴) در بررسی تأثیر امواج با شدت بالا بر ویژگی‌های بیوشیمیایی گیاه جو نشان داد که درصد جوانه‌زنی، رشد وزنی و طولی گیاهچه‌ها، همچنین مقادیر کلروفیل، کاروتنوئید و محتوای پروتئین محلول در تمام گروه‌های تحت تیمار، به‌طور معنی‌داری نسبت به گروه شاهد افزایش یافت. میدان مغناطیسی ۱۵۰ میلی‌تسلا همراه با تنش خشکی ۱۰- بار سبب کاهش شدید محتوای کلروفیل شد. مالون‌دی‌آلدئید (MDA) به‌عنوان شاخص پراکسیداسیون لیپیدها و نشان‌دهنده آسیب اکسیداتیو در گیاهان، تحت تأثیر عوامل محیطی مختلفی مانند امواج الکترومغناطیسی و تنش خشکی قرار می‌گیرد. محمدی[2] و همکاران (۲۰۱۸) در بررسی تأثیر پرایمینگ مغناطیسی بر ویژگی‌های فیزیولوژیک و فیتوشیمیایی گیاه زوفا (*Hyssopus officinalis* L.) نشان داد که پرایمینگ مغناطیسی (به‌ویژه در ۲۰۰ میلی‌تسلا به‌مدت ۵ دقیقه) باعث افزایش وزن‌خشک اندام‌های هوایی (۸۲/۶ درصد)، وزن‌خشک ریشه‌ها (۸۶/۵ درصد)، محتوای کلروفیل کل (۳۲/۸ درصد)، محتوای کاروتنوئیدها (۳۲/۴ درصد) و پلی فنل‌ها (به میزان دو برابر) شد.

مقایسه میانگین برهم‌کنش اثر زمان در شدت میدان مغناطیسی برای صفت نشان داد که شدت ۵۰ میلی‌تسلا در ۴۰ دقیقه سبب افزایش مقدار شاخص وزنی بنیه گیاهچه نسبت به ۲۰ دقیقه شد، که این اختلاف نسبت به سایر شدت‌های میدان مغنطیسی معنی‌دار بود. شدت ۱۰۰ میلی‌تسلا در ۴۰ دقیقه سبب افزایش مقدار صفات درصد و سرعت جوانه‌زنی، طول ساقه‌چه و شاخص طولی بنیه گیاهچه، محتوای پرولین، کلروفیل b، و محتوای مالون‌دی‌آلدئید نسبت به ۲۰ دقیقه گردید که این اختلاف برای سرعت جوانه‌زنی، مالون‌دی‌آلدئید و کلروفیل b معنی‌دار بود. افزایش شدت میدان مغناطیسی به ۱۵۰ میلی‌تسلا سبب کاهش شدید و معنی‌دار همه صفات گردید که بیش‌ترین کاهش در مدت ۴۰ دقیقه ثبت شد (شکل ۱). جانعلی‌زاده[3] و همکاران (۲۰۱۶) اثر شدت‌های میدان مغناطیسی (۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌تسلا) را در زمان‌های (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه) روی جوانه‌زنی بذر کنجد مطالعه کردند. نتایج نشان‌داد که میدان‌های مغناطیسی اثر معنی‌داری بر درصد جوانه‌زنی نهایی نداشتند. پیش‌تیمار بذرها با میدان مغناطیسی با شدت ۵۰ میلی‌تسلا به مدت ۲۰ دقیقه منجر به افزایش سرعت جوانه‌زنی نسبت به تیمار شاهد شد، اما تمامی سطوح تیمار ۱۰۰ میلی‌تسلا منجر به کاهش سرعت جوانه‌زنی نسبت به تیمار شاهد شد. در این آزمایش بیش-ترین طول ریشه‌چه، طول گیاهچه و نیز شاخص طولی بنیه گیاهچه متعلق به تیمار ۷۵ میلی‌تسلا به مدت ۶۰ دقیقه و بیش‌ترین وزن‌خشک گیاهچه و شاخص وزنی بنیه گیاهچه متعلق به تیمار ۱۰۰ میلی‌تسلا برای ۲۰ دقیقه بود. درجه‌بندی تیمارها نشان‌داد که قرار گرفتن بذرها به مدت یک ساعت در معرض میدانی با شدت ۵۰ میلی‌تسلا و ۱۰ دقیقه در معرض ۲۵ میلی‌تسلا بهترین نتایج را به دنبال دارد.

کتسنیوز[4] و همکاران (۲۰۲۱) سه گونه (کلم پیچ، گندم دوروم و اسفناج) را در یک آزمایش گلخانه‌ای در سه مرحله رشد مختلف (بذری، گیاه چه و قبل از برداشت) تحت میدان الکترومغناطیسی قراردادند. نتایج نشان‌داد که

[1] Mumtaz
[2] Mohammadi
[3] Janalizadeh Qazvini
[4] Katsenios

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.66224/yujs.12.2.111]



شکل ۱- برهم‌کنش شدت و زمان میدان الکترومغناطیسی بر درصد جوانه‌زنی، محتوای پرولین، مالون دی آلدئید و کلروفیل b. حروف غیر مشابه در آزمون FLSD نشانگر تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ است.

Fig. 1- Interaction of electromagnetic field intensity and time on germination percentage, proline content, malondialdehyde and chlorophyll b. The different letters in the FLSD test indicate significant differences at 5% probability level.

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/yujs.12.2.111]

وزن‌تر در هر سه گونه گیاهی افزایش یافت، درحالی‌که وزن‌خشک در گیاهان تیمار شده برای گندم و اسفناج در مقایسه با شاهد بیشتر بود. تیمار میدان الکترومغناطیسی هیچ تأثیر منفی در گیاهان نداشت، بلکه باعث بهبود رنگ سبز در گندم و کاهش رنگ زرد در اسفناج شد. نتایج صراف[1] و همکاران (۲۰۲۱) نشان داد که شدت‌های ۱۵۰ میلی‌تسلا (۱ ساعت) و ۲۰۰ میلی‌تسلا (۱ ساعت) تأثیرات مثبتی بر صفات مربوط به جوانه‌زنی در سویا واریته JS-335 داشت.

فراز علی[2] و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای تأثیر پیش‌تیمار با میدان‌های الکترومغناطیسی بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه دو ژنوتیپ ذرت (*Zea mays* L.)، شامل FH-1046 و YH-5427، را بررسی کردند. نتایج نشان داد که قرار گرفتن در معرض میدان‌های الکترو مغناطیسی می‌تواند تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی بذرها را بهبود بخشد. همچنین، ویژگی‌های ریخت‌شناسی مانند سطح برگ، ارتفاع بوته، و وزن‌تر و خشک گیاهچه افزایش یافت. بیشترین تأثیر بر جوانه‌زنی به ترتیب مربوط به میدان‌های الکترومغناطیسی با شدت ۱۸۰ میلی‌تسلا در مدت ۳ دقیقه و ۱۲۰ میلی‌تسلا در مدت ۶ دقیقه بود. علاوه بر این، ژنوتیپ FH-1046 نسبت به YH-5427 حساسیت بیشتری به میدان‌های الکترومغناطیسی نشان داد.

کتسنیوز و همکاران (۲۰۱۶) در یک مطالعه سه‌ساله در شرایط آزمایش مزرعه‌ای، تأثیر میدان الکترو مغناطیسی پالسی به مدت‌های ۰، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه به‌عنوان پیش‌تیمار قبل از کاشت بر بذر گندم دوروم را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که میدان الکترومغناطیسی پالسی تأثیر مثبت و قابل توجهی بر جوانه‌زنی، پنجه‌زنی، وزن خشک، سطح برگ، محتوای کلروفیل، سرعت فتوسنتز، نرخ تعرق، رسانایی روزنه‌ای و عملکرد دو رقم گندم دوروم داشت. تیمارهای ۳۰ و ۴۵ دقیقه‌ای میدان مغناطیسی پیش از کاشت بهترین نتایج را به همراه داشتند. تمامی تیمارهای میدان مغناطیسی اختلاف معنی‌داری را نسبت به گروه شاهد نشان دادند. کاربونل و همکاران (۲۰۰۰) گزارش کردند بذور برنجی که در معرض میدان مغناطیسی ۱۵۰و ۲۵۰ mT قرار گرفته بودند سرعت و درصد جوانه‌زنی معنی‌داری نسبت به شاهد داشتند.

نتایج رگرسیون (جداول ۵ و ۶) نشان داد که اثر شدت میدان مغناطیسی بر صفات فیزیولوژیکی و جوانه‌زنی به‌شدت وابسته به سطح تنش خشکی بوده و از الگوی یکنواختی پیروی نمی‌کند؛ به‌طوری‌که در شرایط بدون تنش، تنها مالون‌دی‌آلدئید افزایش معنی‌دار و مثبتی با شدت میدان نشان داد که بیانگر افزایش آسیب اکسیداتیو است، در حالی‌که سایر صفات فیزیولوژیکی تغییر معنی‌داری نداشتند. با اعمال تنش ملایم و متوسط، افزایش معنی‌دار پرولین و مالون‌دی‌آلدئید همراه با کاهش کلروفیل *b* مشاهده شد که نشان‌دهنده تحریک همزمان پاسخ‌های تنشی و سازوکارهای دفاعی گیاه در اثر میدان مغناطیسی است، اما در تنش شدید (۱۰- بار) هیچ رابطه خطی معنی‌داری بین شدت میدان و صفات فیزیولوژیکی مشاهده نشد که حاکی از غلبه اثر تنش خشکی بر پاسخ گیاه می‌باشد. در مورد صفات جوانه‌زنی نیز، در شرایط بدون تنش، افزایش شدت میدان مغناطیسی منجر به کاهش معنی‌دار شاخص‌های رشد نظیر طول گیاهچه، وزن خشک و شاخص بنیه گردید، در حالی‌که درصد جوانه‌زنی تحت تأثیر قرار نگرفت، که این امر نشان می‌دهد میدان مغناطیسی بیشتر بر رشد پس از جوانه‌زنی اثرگذار است تا شروع آن؛ در مجموع، کاهش قدرت روابط رگرسیونی در سطوح بالاتر تنش بیانگر تضعیف اثر میدان مغناطیسی در شرایط تنش شدید و وابستگی پاسخ گیاه به برهم‌کنش پیچیده بین شدت میدان و سطح تنش خشکی است.

نتیجه‌گیری

کاهش قابل‌توجه صفات جوانه‌زنی و فیزیولوژیکی در اثر تنش خشکی، نشان‌دهنده اختلال در تعادل آب، کاهش فعالیت‌های متابولیکی و افزایش تنش اکسیداتیو در گیاهچه‌های برنج است. با این حال، نتایج نشان داد که پیش‌تیمار میدان مغناطیسی به‌ویژه در شدت ۱۰۰ میلی‌تسلا توانست به‌طور معنی‌داری از شدت این کاهش‌ها بکاهد، به‌طوری‌که افت درصد جوانه‌زنی از حدود ۴۵ درصد در شاهد به حدود ۲۴ درصد کاهش یافت. این

[1] Sarraf
[2] Faraz Ali

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.66224/yujs.12.2.111]

بهبود را می‌توان به نقش میدان مغناطیسی در فعال‌سازی زودهنگام سامانه‌های دفاعی نسبت داد. افزایش پرولین در سطوح تنش، که در تیمارهای دارای میدان مغناطیسی نیز تقویت شد، نشان‌دهنده تجمع اسمولیت‌ها برای حفظ پتانسیل اسمزی و پایداری ساختارهای سلولی است. از سوی دیگر، کاهش کمتر کلروفیل در تیمار ۱۰۰ میلی‌تسلا نسبت به شاهد، بیانگر حفظ بهتر ساختار کلروپلاست و کارایی فتوسنتزی تحت تنش می‌باشد. در میان تیمارهای بررسی‌شده، شدت ۱۰۰ میلی‌تسلا به مدت ۴۰ دقیقه، بیشترین اثربخشی را در بهبود این صفات، به‌ویژه در شرایط بدون تنش خشکی، نشان داد. در مقابل، تنش خشکی به‌طور محسوسی عملکرد فیزیولوژیکی گیاهچه‌ها را کاهش داد و با افزایش شاخص‌های تنش مانند پرولین و مالون‌دی‌آلدئید همراه بود. با این حال، برهمکنش میدان مغناطیسی و تنش خشکی نشان داد که استفاده از میدان مغناطیسی می‌تواند تا حدودی اثرات منفی ناشی از خشکی را کاهش دهد و به گیاه در مقابله با شرایط نامساعد کمک کند. این نتایج بیانگر پتانسیل کاربرد میدان مغناطیسی به‌عنوان روشی کم‌هزینه و غیرشیمیایی برای بهبود رشد گیاهان در شرایط تنش محیطی، به‌ویژه خشکی، است. با این حال، به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر و تعمیم‌پذیری نتایج به شرایط زراعی واقعی، انجام مطالعات تکمیلی در مزرعه توصیه می‌شود. همچنین، بررسی اثر میدان‌های مغناطیسی بر مراحل بعدی رشد گیاه و ارقام مختلف برنج می‌تواند چشم‌اندازهای جدیدی برای بهره‌گیری از این فناوری در مدیریت تنش‌های محیطی در کشاورزی پایدار فراهم کند.

جدول ۵- رگرسیون خطی بین شدت میدان مغناطیسی و ویژگی‌های جوانه‌زنی در سطوح مختلف تنش حاصل از پلی اتیلن گلایکول

Table 5. Linear regression analysis between magnetic field intensity and germination traits under different levels of polyethylene glycol-induced stress

تنش خشکی Drought Stress (bar)	درصد جوانه‌زنی Germination Percentage	سرعت جوانه‌زنی (بذر بر روز) Germination Rate (Seed day^{-1})	طول گیاهچه (میلی‌متر) Seedling Length (mm)	وزن خشک گیاهچه (میلی‌گرم) Seedling Dry Weight (mg)	شاخص طولی بنیه گیاهچه Seedling Length Vigor Index
	Regression equation / R^2/ P-value	Regression equation / R^2/ P-value	Regression equation / R^2/ P-value	Regression equation / R^2/ P-value	Regression equation / R^2/ P-value
0	Y = 98.73 − 0.025 MF /0.216/ 0.128 ^{ns}	Y = 0.447 - 0.0003 MF /0.374 / 0.035 *	Y = 113.483- 0.076 MF /0.372 / 0.035 *	Y = 3.635 - 0.003 MF /0.84 / 0.001 **	Y =11188.07 -9.857MF /0.367 / 0.037 *
-2	Y = 93.593 − 0.018 MF /0.055/ 0.463 ^{ns}	Y = 0.309 - 0.0001 MF /0.107 / 0.299 ^{ns}	Y = 87.067- 0.022 MF /0.055 / 0.465 ^{ns}	Y = 3.306 - 0.003 MF /0.67 / 0.001 **	Y =8144.353 -3.306MF /0.053/ 0.472 ^{ns}
-5	Y = 79.617 − 0.026 MF /0.087/ 0.353 ^{ns}	Y = 0.232 - 0.0001 MF /0.007 / 0.999 ^{ns}	Y = 69.213- 0.041 MF /0.090 / 0.343 ^{ns}	Y = 2.498 - 0.001 MF /0.032 / 0.578 ^{ns}	Y =5523.507 -1.598MF /0.012/ 0.735 ^{ns}
-10	Y = 59.067 − 0.001 MF /0.001/ 0.981 ^{ns}	Y = 0.218 - 0.0001 MF /0.029 / 0.597 ^{ns}	Y = 49.70- 0.017 MF /0.011 / 0.749 ^{ns}	Y = 2.216 - 0.001 MF /0.007 / 0.794 ^{ns}	Y =2989.033 -1.014MF /0.004/ 0.847 ^{ns}

جدول ۶- رگرسیون خطی بین شدت میدان مغناطیسی و ویژگی‌های فیزیولوژیکی در سطوح مختلف تنش حاصل از پلی اتیلن گلایکول

Table 6. Linear regression analysis between magnetic field intensity and physiological traits under different levels of polyethylene glycol-induced stress

تنش خشکی Drought Stress (bar)	مالون دی آلدئید (میلی مول بر گرم وزن تر) Malondialdehyde (mmol gFW^{-1})	کلروفیل *b* (میلی گرم بر گرم وزن تر) Chlorophyll *b* (mg gFW^{-1})	کلروفیل *a* (میلی گرم بر گرم وزن تر) Chlorophyll *a* (mg gFW^{-1})	پرولین (میکرومول بر گرم وزن تر) Proline (µmol gFW^{-1})
	Regression equation / R^2/ P-value	Regression equation / R^2/ P-value	Regression equation / R^2/ P-value	Regression equation / R^2/ P-value
0	Y =4.720 + 0.022 MF /0.74/ 0.001 **	Y = 0.895 - 0.003 MF /0.322 / 0.054 ^{ns}	Y = 0.728 - 0.002 MF /0.293 / 0.069 ^{ns}	Y = 1.036 + 0.001 MF /0.104 / 0.306 ^{ns}
-2	Y =5.618 + 0.024 MF /0.768/ 0.001 **	Y = 0.744 - 0.002 MF /0.354 / 0.041 *	Y = 0.506 - 0.001 MF /0.177 / 0.173 ^{ns}	Y = 3.686 + 0.014 MF /0.430 / 0.021 *
-5	Y =6.715 + 0.018 MF /0.609/ 0.003 *	Y = 0.591 - 0.002 MF /0.332 / 0.050 *	Y = 0.312 - 0.001 MF /0.007 / 0.789 ^{ns}	Y = 6.474 + 0.010 MF /0.349 / 0.043 *
-10	Y =8.134 + 0.010 MF /0.307/ 0.062 ^{ns}	Y = 0.423 - 0.001 MF /0.142 / 0.226 ^{ns}	Y = 0.256 - 0.001 MF /0.009 / 0.766 ^{ns}	Y = 8.427 + 0.004 MF /0.033 / 0.571 ^{ns}

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/yujs.12.2.111]

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسنده اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده و این موضوع مورد تأیید ایشان است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده نسخه نهایی را مطالعه و تأیید کرده‌اند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسنده این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

این تحقیق با حمایت مالی موسسه ثبت و گواهی بذر و نهال، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران، انجام شده است.

سپاسگزاری

نویسنده از معاون محترم پژوهشی، مدیر گروه و مسئول آزمایشگاه گیاه‌شناسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد آستارا به‌خاطر حمایت‌های آن‌ها در فراهم‌سازی امکانات تحقیقاتی و کمک‌های فنی صمیمانه سپاسگزار است.

منابع

References

Abdul-baki, A. A., & Anderson, J. D. (1973). Vigor determination in soybean seed by multiplication. *Crop Science*, *13*, 630-633. http://dx.doi.org/10.2135/cropsci1973.0011183X001300060013x

Afzal, I., Saleem, S., Skalicky, M., Javed, T., Bakhtavar, M. A., ul Haq, Z., Kamran, M., Shahid, M., Sohail Saddiq, M., Afzal, A., Shafqat, N., Dessoky, E. S., Gupta, A., Korczyk-Szabo, J., Brestic, M., & E. L. Sabagh, A. (2021). Magnetic field treatments improves sunflower yield by inducing physiological and biochemical modulations in seeds. *Molecules*, *26*(7), 1-14. http://doi.org/10.3390/molecules26072022

Al-Allaf, S. J. A., & Al-Baker, R. A. H. (2022). Effectiveness of magnetic field in stimulation of biochemical and enzymes activities in seedling and callus of *Nigella sativa*. *International Journal of Health Sciences*, *6*(S2), 3301-3314. http://doi.org/10.53730/ijhs.v6nS2.5818

Alarcon, J. L. P., Cuesta, J. C., Molejon, M. R. B., Paragsa, J. D., & Ypon, N. M. Q. (2024). Investigating the influence of magnets in the growth of string bean (*Phaseolus vulgaris*) plant. *American Journal of Life Science and Innovation*, *3*(1), 16-19. http://doi.org/10.54536/ajlsi.v3i1.2450

Arnon, D. I. (1975). Copper enzymes in isolated chloroplasts; polyphenol-oxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, *24*, 1-15. https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/yujs.12.2.111]

Bandumula, N. (2018). Rice production in Asia: key to global food security. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: *Biological Sciences*, *88*, 1323-1328. https://doi.org/10.1007/s40011-017-0867-7

Bates, I., Waldern, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free prolin for water stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207. https://doi.org/10.1007/BF00018060

Belcher, E. W. (1995). The effect of seed condition and length of stratification on the germination of loblolly pine seed. *Tree Planters' Notes 46*(4), 138–142.

Carbonell, M. V., Martinez, E., & Amaya, J. M. (2000). Stimulation of germination in rice (*Oryza sativa* L.) by a static magnetic field. *Electro- and Magnetobiology*, *19*(1), 121–128. https://doi.org/10.1081/JBC-100100303

Carbonell, M., Martínez, E., Florez, M., Maqueda, R., Pintor-Lopez, A., & Amaya, J. (2008). Magnetic field treatments improve germination and seedling growth in *Festuca arundinacea* Schreb. and *Lolium perenne* L. *Seed Science Technology*, *36*, 31-37. https://doi.org/10.15258/sst.2008.36.1.03

FAO. (2010). Rice in the global economy: Strategic research and policy issues for food security. https://www.fao.org/agrifood-economics/publications/detail/en/c/123033/

FAO. (2022). FAOSTAT online database. Food Agriculture Organization of the United Nations. http://faostat.fao.org/data.

Faraz Ali, M., Sajid Aqeel Ahmad, M., Gaafar, A.-R. Z., & Shakoor, A. (2024). Seed pre-treatment with electromagnetic field (EMF) differentially enhances germination kinetics and seedling growth of maize (*Zea mays* L.). *Journal of King Saud University Science*, *36*(5), 103184. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksus.2024.103184

Farooq, M. A., Niazi, A. K., Akhtar, J., Saifullah, Farooq, M., Souri, Z., Karimi, N., & Rengel, Z. (2019). Acquiring control: The evolution of ROS-Induced oxidative stress and redox signaling pathways in plant stress responses. *Plant Physiology and Biochemistry*, *141*, 353-369. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.04.039

Florez, M., Carbonell, M. V., & Martínez, E. (2007). Exposure of maize seeds to stationary magnetic fields: effects on germination and early growth. *Environmental and Experimental Botany*, *59*(1), 68-75. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.10.006

Ghane, S. G., Lokhande, V. H. & Nikam, T. D. (2012). Differential growth, physiological and biochemical responses of Niger (*Guizotia abyssinica* Cass.) cultivars to water-deficit (drought) stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, *34*(1), 215-225. https://doi.org/10.1007/s11738-011-0820-y

Hafeez, M. B., Zahra, N., Ahmad, N., Shi, Z., Raza, A., Wang, X., & Li, J. (2023). Growth, physiological, biochemical and molecular changes in plants induced by magnetic fields: A review. *Plant Biology*, *25*(1), 8-23. https://doi.org/10.1111/plb.13459

Hasan, M. M., Alharby, H. F., Uddin, M. N., Ali, M. A., Anwar, Y., Fang, X.-W., Hakeem, K. R., Alzahrani, Y., & Hajar, A. S. (2020). Magnetized water confers drought stress tolerance in Moringa biotype via modulation of growth, gas exchange, lipid peroxidation and antioxidant

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/yujs.12.2.111]

activity. *Polish Journal of Environmental Studies*, *29*(2), 1625-1636. https://doi.org/10.15244/pjoes/110347

Heath, R. L., & Packer, I. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, *125*(1), 189–198. https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1

Ibrahim, S., El-Liethy, M. A., Elwakeel, K. Z., Hasan, M. A. E.-G., Al Zanaty, A. M., & Kamel, M. M. (2020). Role of identified bacterial consortium in treatment of quhafa wastewater treatment plant influent in Fayuom, Egypt. *Environmental Monitoring and Assessment*, *192*(3), 161. https://doi.org/10.1007/s10661-020-8105-9

International Seed Testing Association (1976). International rules for seed testing. *Seed Science and Technology*, *4*, 51-177.

Janalizadeh M., Nizami, A., Khazaei, H., Faizi, H., & Guldani, M. (2016). Effect of magnetic fields on seed germination and seedling growth of sesame (*Sesamum indicum* L.). *Iranian Journal of Seed Research*, *3*(1), 1–13. http://dx.doi.org/10.29252/yujs.3.1.1 [In Persian]

Kataria, S., Baghel, L., & Guruprasad, K. N. (2017). Pre-treatment of seeds with static magnetic field improves germination and early growth characteristics under salt stress in maize and soybean. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *10*, 83–90. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2017.02.010

Katsenios, N., Bilalis, D., Efthimiadou, A., Aivalakis, G., Nikolopoulou, A.-E., Karkanis, A., & Travlos, I. (2016). Role of pulsed electromagnetic field on enzyme activity, germination, plant growth and yield of durum wheat. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *6*, 152–158. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2016.03.010

Katsenios, N., Christopoulos, M. V., Kakabouki, I., Vlachakis, D., Kavvadias, V., & Efthimiadou, A. (2021). Effect of pulsed electromagnetic field on growth, physiology and postharvest quality of kale (*Brassica oleracea*), wheat (*Triticum durum*) and spinach (*Spinacia oleracea*) microgreens. *Agronomy*, *11*(7), 1364. https://doi.org/10.3390/agronomy11071364

Kaur, S., Vian, A., Chandel, S., Singh, H. P., Batish, D. R., & Kohli, R. K. (2021). Sensitivity of plants to high frequency electromagnetic radiation: cellular mechanisms and morphological changes. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, *20*(1), 55–74. https://doi.org/10.1007/s11157-020-09563-9

Kumar, A., Singh, M., Singh, P. P., Singh, S. K., Singh, P. K., & Pandey, K. D. (2016). Isolation of plant growth promoting rhizobacteria and their impact on growth and curcumin content in *Curcuma longa* L. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *8*, 1–7. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2016.07.002

Ma, Y., Dias, M. C., & Freitas, H. (2020). Drought and salinity stress responses and microbe-induced tolerance in plants. *Frontiers in Plant Science*, *11*, 591911. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.591911

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/yujs.12.2.111]

Maguire, J. D. (1962). Speed of germination—aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science*, *2*(2), 176–177. https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x

Mamlic, Z., Maksimovic, I., Canak, P., Mamlic, G., Đukić, V., Vasiljević, S., & Dozet, G. (2021). The use of electrostatic field to improve soybean seed germination in organic production. *Agronomy*, *11*(8), 1473. https://doi.org/10.3390/agronomy11081473

Michel, B. E., & Kaufmann, M. R. (1973). The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiology*, *51*(5), 914–916. https://doi.org/10.1104/pp.51.5.914

Ministry of Agriculture-Jahad. 2019. Agricultural Sstatistics. Vol. 1. Crop Plants. Statistics, Information and communication Technology Center, Ministry of Agriculture-Jahad, Tehtan, Iran. [In Persian]

Mirmazloum, I., Kiss, A., Erdélyi, É., Ladányi, M., Németh, É. Z., & Radácsi, P. (2020). The effect of osmopriming on seed germination and early seedling characteristics of *Carum carvi* L. *Agriculture*, *10*(4), 94. https://doi.org/10.3390/agriculture10040094

Mohammadi, R., Roshandel, P., & Tadayon, A. (2018). Investigating the growth, physiology and antioxidant system of hyssop under the influence of magnetopriming. *New Findings in Biological Sciences*, *6*(1), 106–115. SID. https://sid.ir/paper/250522/fa

Mohidem, N. A., Hashim, N., Shamsudin, R., & Che Man, H. (2022). Rice for food security: Revisiting its production, diversity, rice milling process and nutrient content. *Agriculture*, *12*(6), 741. https://doi.org/10.3390/agriculture12060741

Mshenskaya, N. S., Grinberg, M. A., Kalyasova, E. A., Vodeneev, V. A., Ilin, N. V., Slyunyaev, N. N., Mareev, E. A., & Sinitsyna, Y. V. (2023). The effect of an extremely low-frequency electromagnetic field on the drought sensitivity of wheat plants. *Plants*, *12*(4), 826. https://doi.org/10.3390/plants12040826

Mumtaz, S., Javed, R., Rana, J. N., Iqbal, M., & Choi, E. H. (2024). Pulsed high power microwave seeds priming modulates germination, growth, redox homeostasis, and hormonal shifts in barley for improved seedling growth: Unleashing the molecular dynamics. *Free Radical Biology and Medicine*, *222*, 371–385. https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2024.06.013

Nyasulu, M., Zhong, Q., Li, X., Liu, X., Wang, Z., Chen, L., He, H., & Bian, J. (2024). Uncovering novel genes for drought stress in rice at germination stage using genome wide association study. *Frontiers in Plant Science*, *15*, 1421267. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1421267

Panuccio, M., Chaabani, S., Roula, R., & Muscolo, A. (2018). Bio-priming mitigates detrimental effects of salinity on maize improving antioxidant defense and preserving photosynthetic efficiency. *Plant Physiology and Biochemistry*, *132*, 465–474. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.09.033

Paunov, M., Angelova, B., Goltsev, V., Atanasova, G., Atanasov, B., Atanasov, N., & Kouzmanova, M. (2025). Electromagnetic field used in precision agriculture does not induce long-term effects

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/yujs.12.2.111]

in wheat and maize. *Proceedings of the Bulgarian Academy of Sciences*, *78*(7), 1083–1093. https://doi.org/10.7546/CRABS.2025.07.15

Putri, A. E., Agustrina, R., & Marjunus, R. (2024). Germination responses of old seeds from lampung local rice to magnetic fields and drought stress. *Biodidaktika: Jurnal Biologi dan Pembelajarannya*, *19*(2), 68–78. http://dx.doi.org/10.30870/biodidaktika.v19i2.24902

Rehman, H. U., Basra, S., Ahmed, M., & Farooq, M. (2011). Field appraisal of seed priming to improve the growth, yield, and quality of direct seeded rice. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, *35*(4), 357–365. https://doi.org/10.3906/tar-1004-954

Rifna, E. J., Ramanan, K. R., & Mahendran, R. (2019). Emerging technology applications for improving seed germination. *Trends in Food Science and Technology*, *86*, 95–108. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.029

Sarı, M. E., Demir, İ., Yıldırım, K., & Memiş, N. (2023). Magnetopriming enhance germination and seedling growth parameters of onion and lettuce seeds. *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences*, *7*(3), 468–475. https://doi.org/10.31015/jaefs.2023.3.1

Sarraf, M., Deamici, K. M., Taimourya, H., Islam, M., Kataria, S., Raipuria, R. K., Abdi, G., & Brestic, M. (2021). Effect of magnetopriming on photosynthetic performance of plants. *International Journal of Molecular Sciences*, *22*(17), 9353. https://doi.org/10.3390/ijms22179353

Sathyabharathi, B., Nisha, C., Jaisneha, J., Nivetha, V., Aathira, B., Ashok, S., & Sampath, S. (2022). Screening of genotypes for drought tolerance using PEG 6000 in different landraces of rice (*Oryza sativa* L.). *International Journal of Plant and Soil Science*, *34*(22), 1424–1434. https://doi.org/10.9734/IJPSS/2022/v34i2231515

Shabrangy, A. (2024). Using magnetic fields to enhance the seed germination, growth, and yield of plants. In Maghuly F. (Ed.), *Plant Functional Genomics: Methods in Molecular Biology*, *2788*. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-3782-1_22

Sharafi, S. (2025). Enhanced seedling growth of annual medic under salt-drought stress through ultrasonic wave and magnetic field treatments. *Applied Water Science*, *15*, 59. https://doi.org/10.1007/s13201-025-02399-0

Sharma, H. S., Fleming, C., Selby, C., Rao, J., & Martin, T. (2014). Plant biostimulants: a review on the processing of macroalgae and use of extracts for crop management to reduce abiotic and biotic stresses. *Journal of Applied Phycology*, *26*, 465–490. https://doi.org/10.1007/s10811-013-0101-9

Siddique, F., Ahmed, M. S., Javaid, R. A., Hanif, A., Rabnawaz, M., Arshad, M., & Majeed, A. (2023). Screening of elite coarse rice lines for drought stress simulated by polyethylene glycol (PEG) at seedling stage. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, *36*(1), 71–79. https://doi.org/10.17582/journal.pjar/2023/36.1.71.79

Singh, N., Singh, R., Meena, V., & Meena, R. (2015). Can we use maize (*Zea mays*) rhizobacteria as plant growth promoter. *Vegetos*, *28*(1), 86–99. https://doi.org/10.5958/2229-4473.2015.00012.9

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/yujs.12.2.111]

Soran, M.-L., Stan, M., Niinemets, Ü., & Copolovici, L. (2014). Influence of microwave frequency electromagnetic radiation on terpene emission and content in aromatic plants. *Journal of Plant Physiology*, *171*(15), 1436–1443. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.06.013

Tanou, G., Fotopoulos, V., & Molassiotis, A. (2012). Priming against environmental challenges and proteomics in plants: update and agricultural perspectives. *Frontiers in Plant Science*, *3*, 216. https://doi.org/10.3389/fpls.2012.00216

Ullah, A., Nisar, M., Ali, H., Hazrat, A., Hayat, K., Keerio, A. A., Ihsan, M., Laiq, M., Ullah, S., & Fahad, S. (2019). Drought tolerance improvement in plants: an endophytic bacterial approach. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *103*, 7385–7397. https://doi.org/10.1007/s00253-019-10045-4

Urnukhsaikhan, E., Bold, B. E., Khurelbaatar, L., Bazarvaani, A., & MishigOchir, T. (2025). Effects of electromagnetic field on seed germination, β-amylase activity, total protein content, water uptake, and growth of wheat seedlings (*Triticum aestivum*). *Bioelectromagnetics*, *46*(5), e70011. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/bem.70011

Vasiqeh Shamsabadi, A., Modarres Sanavy, S. A. M., Modarres Vamghi, S. M., & Keshavarz, H. (2018). Effect of magnetic field on some physiological traits and germination of safflower crop seeds and four important weed species. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, *31*(1), 184–196. SID. https://sid.ir/paper/395946/fa. [In Persian]

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.66224/yujs.12.2.111]