

The effect of different magnetic field intensities and times on germination and growth characteristics of rice (*Oryza sativa*) seedlings

Reza Imam Dost ¹, Davar Molazem ^{2,*}, Reza Taghizadeh ²

Extended abstract

Introduction: Rice (*Oryza sativa* L.), as one of the world's most important cereals, serves as a staple food for more than one-third of the global population. This strategic crop plays a key role in the economies of many countries. Seed priming is a biotechnological tool and a simple, practical, effective, eco-friendly, and cost-efficient approach to enhancing a plant's tolerance to various environmental stresses and improving seed germination. This study was designed and conducted to investigate the germination and physiological responses of two rice cultivars under varying intensities and durations of electromagnetic field exposures.

Materials and Methods: A factorial experiment in a completely randomized design with the factors of electromagnetic field intensity at 4 levels, time at 3 levels, and two cultivars (Tarom and Hashemi) in three replications was conducted at the Islamic Azad University, Astara Branch in 2023. Rice seeds were treated in a plastic bag under magnetic fields with intensities (0, 50, 100, and 150 mT) and times (10, 50, and 100 minutes). A plastic tray was used for the second experiment and seedling establishment. Healthy seedlings were transferred to plastic pots containing sand. After 25 days, the desired traits were measured.

Results: The analysis of variance results indicated that the effects of the magnetic field, time, cultivar, and their interactions were significant for most traits. The electromagnetic field at 100 mT for 50 minutes led to an increase in germination percentage compared with the control. In contrast, the treatment of 150 mT for 100 minutes caused a significant reduction in all germination-related traits. The highest values were observed under the 100 mT for 50-minute treatment, including germination percentage (98.8%), germination rate (12.5 seeds per day), radicle length (68.1 mm), plumule length (47.5 mm), seedling length (116 mm), radicle dry weight (0.715 mg), plumule dry weight (2.02 mg), seedling dry weight (2.74 mg), seedling length vigor index (11422), seedling weight vigor index (271), chlorophyll-a (0.846 mg g⁻¹ FW), chlorophyll-b (0.96 mg g⁻¹ FW), and carotenoids (0.44 mg g⁻¹ FW).

Conclusion: The electromagnetic field had a significant effect on germination-related traits and physiological characteristics, including germination percentage, germination rate, and chlorophyll content, leading to an increase in these indices. In the present study, the 100 mT treatment for 50 minutes improved seedling vigor in terms of both length and weight. Based on these findings, magnetopriming within the studied treatment range enhances germination and improves rice plant establishment by increasing chlorophyll levels.

Keywords: Chlorophyll, Germination rate, Magneto priming, Rice, Seedling vigor index

Highlights:

1. The effect of the magnetic field on the germination and physiological characteristics of rice seeds was investigated.
2. Seed priming at 100 mT for 50 minutes increased chlorophyll and carotenoid content.

¹ M.Sc. Graduated, Department of Agronomy and Plant Breeding, Astara Branch, Islamic Azad University, Astara, Iran.

² Assistant Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Astara Branch, Islamic Azad University, Astara, Iran.

*Corresponding author Email: davar.molazem@iau.ac.ir

<http://dx.doi.org/10.61882/yujs.11.2.125>



CrossMark

ISSN: 2383-1480 (On-Line); 2383-1251 (Print)



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Received: 15.12.2024; Revised: 29.1.2025;
Accepted: 3.2.2025; Online Published: 21.3.2025

تأثیر شدت و زمان‌های مختلف میدان مغناطیسی بر ویژگی‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه برنج (*Oryza sativa*)

رضا امام‌دوست^۱، داور ملازم^{۲*}، رضا تقی‌زاده^۲

چکیده مبسوط

مقدمه: برنج (*Oryza sativa* L.) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین غلات جهان، منبع اصلی تغذیه برای بیش از یک‌سوم جمعیت کره زمین به‌شمار می‌رود. این محصول راهبردی، نقشی کلیدی در اقتصاد بسیاری از کشورها ایفا می‌کند. پیش‌تیمار بذر یک ابزار زیست فناوریانه و یک رویکرد ساده، عملی، مؤثر، سازگار با محیط‌زیست و مقرون‌به‌صرفه برای بهبود تحمل گیاه به تنش‌های مختلف محیطی و افزایش جوانه‌زنی بذر است. این پژوهش با هدف بررسی واکنش‌های جوانه‌زنی و فیزیولوژیکی بذر دو رقم برنج در شدت و زمان مختلف میدان الکترومغناطیسی طراحی و اجرا شد.

مواد و روش‌ها: آزمایشی در سال ۱۴۰۳ به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با فاکتورهای شدت میدان الکترومغناطیسی در ۴ سطح، زمان در ۳ سطح و دو رقم طارم و هاشمی در سه تکرار در دانشگاه آزاد اسلامی واحد آستارا اجرا شد. بذور برنج در یک کیسه پلاستیکی تحت میدان‌های مغناطیسی با شدت (صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌تسلا) و زمان‌های (۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ دقیقه) تیمار شدند. جهت آزمایش دوم و استقرار گیاهچه از سینی پلاستیکی استفاده گردید. نشاهای سالم، به گلدان‌های پلاستیکی حاوی ماسه منتقل شدند. پس از گذشت ۲۵ روز، برای اندازه‌گیری صفات مورد نظر استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج تجزیه واریانس نشان‌داد که اثر میدان مغناطیسی، زمان، رقم و برهم‌کنش آن‌ها برای اکثر صفات معنی‌دار بود. میدان الکترومغناطیسی با شدت ۱۰۰ میلی‌تسلا به‌مدت ۵۰ دقیقه منجر به افزایش درصد جوانه‌زنی نسبت به شاهد شد. تیمار ۱۵۰ میلی‌تسلا در ۱۰۰ دقیقه سبب کاهش معنی‌دار تمامی صفات مرتبط با جوانه‌زنی شد. بیشترین جوانه‌زنی با ۹۸/۸ درصد، سرعت جوانه‌زنی با ۱۲/۵ بذر در روز، طول ریشه‌چه با ۶۸/۱ میلی‌متر، طول ساقه‌چه با ۴۷/۵ میلی‌متر، طول گیاهچه با ۱۱۵/۶ میلی‌متر، وزن خشک ریشه‌چه با ۰/۷۱۵ میلی‌گرم، وزن خشک ساقه‌چه با ۲/۰۲ میلی‌گرم، وزن خشک گیاهچه با ۲/۷۳۸ میلی‌گرم، شاخص طولی بنیه گیاهچه با ۱۱۴۲۳، شاخص وزنی بنیه گیاهچه با ۲۷۱، کلروفیل a با ۰/۸۴۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر، کلروفیل b با ۰/۹۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر و کاروتنوئید با ۰/۴۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تر در تیمار ۱۰۰ میلی‌تسلا به‌مدت ۵۰ دقیقه به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری: تأثیر میدان الکترومغناطیسی بر ویژگی‌های مرتبط با جوانه‌زنی و صفات فیزیولوژیکی، از جمله درصد، سرعت جوانه‌زنی و کلروفیل، معنادار بوده و منجر به افزایش این شاخص‌ها شده است. در تحقیق حاضر تیمار ۱۰۰ میلی‌تسلا به مدت ۵۰ دقیقه توانست شاخص طولی و وزنی بنیه گیاهچه را بهبود بخشد. بر اساس این نتایج، پیش‌تیمار مغناطیسی در محدوده تیمارهای مورد مطالعه، باعث بهبود جوانه‌زنی و استقرار بهتر گیاه برنج با افزایش کلروفیل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: برنج، سرعت جوانه‌زنی، شاخص بنیه گیاهچه، کلروفیل، پیش‌تیمار مغناطیسی

جنبه‌های نوآوری:

۱- اثر میدان مغناطیسی بر ویژگی‌های جوانه‌زنی و فیزیولوژیکی بذر گیاه برنج بررسی شد.

۲- پیش‌تیمار بذر با شدت ۱۰۰ میلی‌تسلا در ۵۰ دقیقه مقدار کلروفیل و کاروتنوئید را افزایش داد.

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد آستارا، دانشگاه

آزاد اسلامی، آستارا، ایران.

^۲ استادیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد آستارا، دانشگاه آزاد اسلامی، آستارا،

ایران.

*رایانامه نویسنده مسئول: davar.molazem@iau.ac.ir

<http://dx.doi.org/10.61882/yujs.11.2.125>



CrossMark

مقدمه

برنج (*Oryza sativa* L.) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین غلات جهان، منبع اصلی تغذیه برای بیش از یک‌سوم جمعیت کره زمین به‌شمار می‌رود (بندومولا^۱، ۲۰۱۸). این محصول کشاورزی راهبردی، نقشی کلیدی در اقتصاد بسیاری از کشورها ایفا می‌کند. بیش از ۹۰ درصد تولید جهانی برنج در آسیا متمرکز است، منطقه‌ای که برنج در آن نه‌تنها به‌عنوان یک غذای اصلی، بلکه به‌عنوان منبع درآمد برای میلیون‌ها کشاورز اهمیت دارد (فائو^۲، ۲۰۱۰). برنج منبعی غنی از ویتامین‌ها و مواد معدنی مهمی از جمله ویتامین E، ویتامین B5، تیامین، کلسیم، اسید فولیک و آهن است. علاوه بر این، حاوی ترکیبات فنولیکی مانند اسید فیتیک و فنول‌هاست که به دلیل خواص پاداکسیدانی خود، نقش مهمی در کاهش خطر ابتلا به بیماری‌های قلبی و دیابت ایفا می‌کند (موهیدم^۳ و همکاران، ۲۰۲۲). برنج به‌عنوان منبع اصلی تأمین انرژی، نقشی اساسی در رژیم غذایی مردم کشورهای مختلف آمریکای لاتین، آسیا و جزایر اقیانوس آرام ایفا می‌کند (زفر و جیانلاق^۴، ۲۰۲۳). امروزه این محصول در بیش از صد کشور جهان کشت می‌شود و سالانه حدود ۵۰۰ میلیون تن شلتوک برنج تولید می‌گردد که سطح زیر کشت آن حدود ۱۶۵ میلیون هکتار را شامل می‌شود (فائو، ۲۰۲۲).

پیش‌تیمار بذر یک ابزار زیست‌فناورانه و یک رویکرد ساده، عملی، مؤثر، سازگار با محیط‌زیست و مقرون‌به‌صرفه برای بهبود تحمل گیاه به تنش‌های مختلف محیطی و افزایش جوانه‌زنی بذر است (فاروق^۵ و همکاران، ۲۰۱۹؛ میرمظلوم^۶ و همکاران، ۲۰۲۰؛ پیری^۷ و همکاران، ۲۰۲۱؛ افروز^۸ و همکاران، ۲۰۲۳). قرار گرفتن بذر در معرض میدان‌های الکترومغناطیسی،

یکی از ایمن‌ترین و مقرون به‌صرفه‌ترین روش‌های قبل از کاشت بذر، به‌منظور بهبود رشد و استقرار گیاهچه در مزرعه است (فلورز^۹ و همکاران، ۲۰۰۷). ظهور و استقرار گیاهچه را بهبود بخشیده، گلدهی زودرس را تحریک کرده، خواب بذر را کاهش داده، جذب مواد مغذی و عملکرد را افزایش می‌دهد (رحمان^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۱؛ سینگ^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۵؛ یولا^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین اثرات نامطلوب تنش‌های غیرزیستی (شوری، خشک‌سالی، غرقابی، دمای بالا، تابش زیاد) و زیستی (پاتوژن‌های گیاهی) را کاهش می‌دهد (کوثر و اشرف^{۱۳}، ۲۰۰۳؛ شارما^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۴؛ کومار^{۱۵} و همکاران، ۲۰۱۶). در سال‌های اخیر، پرتوهای الکترومغناطیسی به‌عنوان روشی نوآورانه برای پیش‌تیمار بذرهای مورد استفاده قرار گرفته است (پنوجیو^{۱۶} و همکاران، ۲۰۱۸). پیش تیمارهای فیزیکی مانند قرار گرفتن در معرض تشعشعات الکترومغناطیسی مانند امواج مافوق صوت و تابش یونیزان، جایگزین‌های امیدوارکننده‌ای برای افزایش بازده محصولات کشاورزی هستند (ریفنا^{۱۷} و همکاران، ۲۰۱۹). در سال‌های اخیر تحقیقات روی اثرات امواج الکترومغناطیسی، میدان مغناطیسی، امواج فراصوت و پرتوهای یونیزان در طول موج‌های مختلف بر بنیه بذر، پاسخ‌های جوانه‌زنی، افزایش کلروفیل و رشد گیاهچه متمرکز شده است (ابراهیم^{۱۸} و همکاران، ۲۰۲۰). امواج الکترومغناطیسی با تغییر واکنش‌های شیمیایی، جوانه‌زنی بذر را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، تشعشعات الکترومغناطیسی تشکیل یون‌های هیدروژن (H^+) و هیدروکسیل (OH^-) را در بذرهای تحریک کرده که برای چرخه تنش اکسیداتیو مهم است. همچنین تولید گلوکز ناشی از تشعشعات

⁹ Florez¹⁰ Rehman¹¹ Singh¹² Ullah¹³ Kausar and Ashraf¹⁴ Sharma¹⁵ Kumar¹⁶ Panuccio¹⁷ Rifna¹⁸ Ibrahim¹ Bandumula² FAO³ Mohidem⁴ Zafar and Jianlong⁵ Farooq⁶ Mirmazloun⁷ Piri⁸ Afrouz

الکترومغناطیسی، جوانه‌زنی بذر را تسریع کرده و سامانه آنزیمی را فعال و رشد نهال و بهره‌وری گیاه را بهبود می‌بخشد (ما^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). میدان‌های مغناطیسی پاسخ‌های مرتبط با تنش را در گیاهان القا کرده و منجر به افزایش تولید پاداکسیدان‌ها و سایر ترکیبات حفاظتی می‌شود (وو^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). این امر می‌تواند به کشاورزان کمک کند تا در شرایط سخت محیطی نیز محصولات با کیفیتی تولید کنند (حسن^۳ و همکاران، ۲۰۲۰).

قرار دادن دانه‌های جو در معرض امواج مغناطیسی و UV-C به مدت ۱۰ ثانیه باعث بهبود جوانه‌زنی بذر شد (لازیم و رامادان^۴، ۲۰۲۰). تیمارهای تیمارهای حرارتی فرکانس‌رادیویی به‌طور قابل‌توجهی بر خواص فیزیولوژیکی دانه‌های گندم و ذرت تأثیر داشت و بنیه بذر، سرعت جوانه‌زنی و فعالیت آنزیمی از جمله سوپراکسیددیسموتاز، کاتالاز (CAT) و پراکسیداز (POD) را افزایش داد (جیائو^۵ و همکاران، ۲۰۱۶). برخی از مطالعات نشان داده‌اند که قرار گرفتن کوتاه‌مدت بذر در معرض امواج ماکروویو، سرعت جوانه‌زنی را افزایش می‌دهد، اما قرار گرفتن در معرض طولانی‌مدت اثرات نامطلوبی داشته است (لازیم و رامادان، ۲۰۲۰؛ راقا^۶ و همکاران، ۲۰۱۱؛ براست^۷ و همکاران، ۲۰۲۱). پرتوهای الکترومغناطیسی غیر یونیزه بر انسان‌ها، حیوانات و گیاهان تأثیر می‌گذارد. تأثیر مستقیم امواج بر فرایندهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی گیاه، از جمله ویژگی‌های آناتومیک، جذب مواد معدنی، تعادل آب، کلروفیل و فتوسنتز ثابت شده است. این امواج بر ویژگی‌های برگ در گیاه جعفری (*Petroselinum crispum*)، کرفس (*Anethum graveolens*) و شوید (*Anethum graveolens*)، تأثیر گذاشته و سبب کاهش ضخامت دیواره سلولی و اندازه کلروپلاست و میتوکندری شده

است (سورن^۸ و همکاران، ۲۰۱۴؛ کاور^۹ و همکاران، ۲۰۲۱). حافظ^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۳) در تحقیقی به بررسی تغییرات رشد، ویژگی‌های فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و مولکولی در گیاهان تحت تأثیر میدان‌های مغناطیسی پرداخته و نشان دادند که میدان‌های مغناطیسی توانایی تغییر فرایندهای فیزیولوژیکی مانند تنفس، فتوسنتز، جذب مواد مغذی، روابط آبی و ویژگی‌های بیوشیمیایی شامل ژن‌های مرتبط با ROS، پاداکسیدان‌ها، آنزیم‌ها، پروتئین‌ها و متابولیت‌های ثانویه را دارند. این مطالعه همچنین به تناقضات و نتایج ناهم‌آهنگ در تحقیقات مختلف اشاره می‌کند که ممکن است به دلیل تفاوت‌های گونه‌ای و یا زمان و شدت مواجهه با میدان‌های مغناطیسی باشد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که میدان‌های مغناطیسی می‌توانند به عنوان یک ابزار موثر برای بهبود فرایندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در گیاهان مورد استفاده قرار گیرند. تافورئو^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی تغییرات مولکولی و بیوشیمیایی در گیاهان تحت تأثیر میدان‌های الکترومغناطیسی پرداخته و نشان دادند که میدان‌های الکترومغناطیسی می‌تواند باعث تغییرات قابل‌توجهی در ساختار سلولی و فعالیت‌های متابولیکی گیاهان شوند. رادزویشیوز^{۱۲} و همکاران (۲۰۲۲) در بررسی تأثیر پیش‌تیمار تابش میدان الکترومغناطیسی بر گل میخک نشان دادند که مواجهه اولیه با میدان‌های الکترومغناطیسی تأثیرات مثبتی بر رشد و کیفیت گل‌های میخک داشته است. یافته‌ها حاکی از آن است که گل‌های میخک که در معرض تابش میدان الکترومغناطیسی با شدت‌های مختلف قرار گرفته‌اند، دارای طول عمر گل‌دانی بیشتری بوده و ویژگی‌های گل‌دهی بهتری نسبت به گروه شاهد داشتند. به طور خاص، نتایج نشان داد که شدت میدان ۱۶۰ میلی‌تسلا به مدت ۱۰ دقیقه بهترین نتیجه را در بهبود رشد و ویژگی‌های گل‌دهی

¹ Ma² Wu³ Hasan⁴ Lazim and Ramadhan⁵ Jiao⁶ Ragha⁷ Brust⁸ Soran⁹ Kaur¹⁰ Hafeez¹¹ Tafforeau¹² Radzevicius

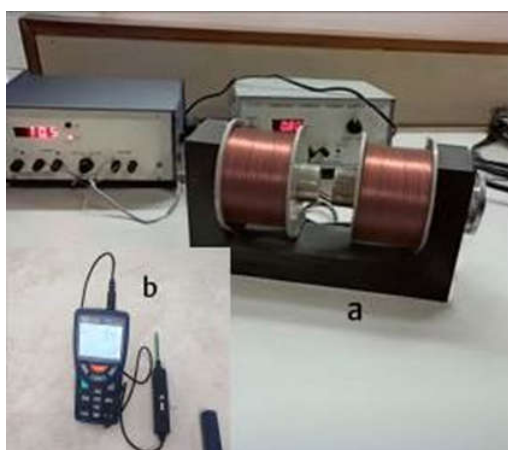
مواد و روش‌ها

آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۲۴ تیمار به همراه شاهد، در سه تکرار، در آزمایشگاه فیزیولوژی دانشگاه آزاد اسلامی واحد آستارا انجام شد. برای اعمال میدان مغناطیسی با شدت‌های مورد نیاز از دو استوانه به قطر ۶ سانتی‌متر و طول ۳۰ سانتی‌متر از جنس فولاد ST37 (شکل ۱) 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 ساخته شده بود. برای تأمین هر سیم‌پیچ، از یک منبع تغذیه DC متغیر ۳۰ ولت با حداکثر جریان خروجی ۳ آمپر به صورت جداگانه استفاده گردید. به منظور تنظیم شدت میدان تولید شده بین قطعات قطبی (با استفاده از تغییر ولتاژ منبع تغذیه) از تسلامتر دیجیتال مدل TES-3196 ساخت تایوان (شکل ۱) بهره‌گیری شد.

در این مطالعه، بذرهای خشک برنج درون کیسه‌های پلاستیکی نازک قرار داده شده و سپس در معرض میدان‌های مغناطیسی با شدت‌های صفر (شاهد)، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌تسلا و به مدت زمان‌های ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ دقیقه قرار گرفتند. پس از اعمال تیمار، بذرهای دو رقم برنج (هاشمی و طارم) به صورت گروه‌های ۲۵ تایی در پتری‌هایی با قطر ۱۰

میخک‌ها داشت. کاربونل^۱ 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^۲ 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 داشته باشد. آلارکون^۳ 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 به طور 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 داشته باشد و موجب بهبود این فرآیند شود. با این حال، اثرات ناشی از شدت و مدت پیش‌تیمارهای اعمال‌شده ممکن است در انواع مختلف بذرهای متفاوت باشد. بنابراین، انجام پژوهش‌های کاربردی با بررسی شدت و مدت زمان‌های مختلف این تیمارها ضروری به نظر می‌رسد. پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرات تیمارهای میدان الکترومغناطیسی بر واکنش‌های جوانه‌زنی بذر دو رقم برنج طراحی و اجرا شده است.



شکل ۱. مولد میدان مغناطیسی (a) و تسلامتر (b) مورد استفاده در آزمایش

Fig 1. Magnetic field generator(a) and Teslameter (b) used in the experiment

¹ Carbonell

² Mshenskaya

³ Alarcon

سانتی‌متر حاوی کاغذ صافی و اتمن مرطوب توزیع شده و به مدت ۱۰ روز در ژرمیناتور با دمای ثابت ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی مناسب نگهداری شدند. در طول آزمایش، جوانه‌زنی بذرها به‌صورت روزانه شمارش و در پایان، صفاتی همچون درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه، طول گیاهچه، وزن خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه و شاخص بنیه طولی و وزنی گیاهچه اندازه‌گیری شد. جهت آزمایش استقرار گیاهچه از سینی پلاستیکی که قبلاً با الکل ضدعفونی شده بود، استفاده گردید. برای جوانه‌دار کردن بذرها از ژرمیناتور استفاده شد. نشاهای سالم، به گلدان‌های پلاستیکی حاوی ماسه منتقل شدند. گلدان‌ها در اتاقک رشد با درجه حرارت ۲۵ درجه سلسیوس و ۱۶ ساعت روشنائی و ۸ ساعت تاریکی قرار گرفتند (قانع^۱ و همکاران، ۲۰۱۲). پس از گذشت ۲۵ روز، برای اندازه‌گیری صفات مورد نظر استفاده شد. درصد جوانه‌زنی با استفاده از رابطه بلچر^۲ (۱۹۹۵) محاسبه گردید. در این مطالعه، بذرهایی که طول ریشه‌چه آن‌ها حداقل دو میلی‌متر بود، به‌عنوان بذر جوانه‌زده در نظر گرفته شدند (ابستا^۳، ۱۹۷۹).

$$GP\% = n/N \times 100$$

ابطله (١):

سرعت جوانه‌زنی از رابطه ۲ بر طبق روش ماگویر^۴ (۱۹۶۲) محاسبه شد.

رابطه ۲:

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

در رابطه‌های فوق GP درصد جوانه‌زنی، n تعداد بذرهاى جوانه‌زده در هر پتری، N تعداد کل بذرهاى کشت‌شده، GR سرعت جوانه‌زنى (day^{-1})، a، b، c، n به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تعداد بذرهاى جوانه‌زده پس از ۱، ۲، ۳ و n روز از شروع آبیگری است. همچنین شاخص بنیه گیاهچه بر اساس رابطه اندرسون و عبدل باک^۵ (۱۹۷۳) محاسبه شد.

۳. ربطه:

× درصد جوانه زنی = شاخص طولی بنیه گیاهچه
طول گیاهچه (ریشه چه + ساقه چه) (میلی متر)

رابطه ۴:

× درصد جوانه‌زنی = شاخص وزنی بنیه گیاهچه
وزن خشک گیاهچه (ساقه‌چه + ریشه‌چه) (میلی‌گرم)
طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه و طول گیاهچه و
وزن خشک آن‌ها پس از اتمام دوره جوانه‌زنی
اندازه‌گیری شدند. وزن خشک نمونه‌ها در آون ۷۵
درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفته و سپس
با ترازوی حساس با دقت یک‌دهم میلی‌گرم توزین
شدند.

محتوای کلروفیل a و b بر اساس روش آرنون^۶ (۱۹۷۵) و طبق رابطه ۵ اندازه‌گیری شد. مقدار جذب نوری آن با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۶۳ و ۶۴۵ نانومتر قرائت و غلظت کلروفیل بر اساس رابطه ۵-۷ تعیین شد.

۵. ربطہ:

میلی گرم کلروفیل a در هر گرم وزن تر: $0.15 \times (\text{جذب } 645 - 2.69 \times (\text{جذب در } 663 \times 0.127))$

۶. ربطہ:

میلی گرم کلروفیل b در هر گرم وزن تر: $0.5 \times (\text{جذب})$
 $(663 \times 4.69 - (\text{جذب در } 645) \times 22.9)$

کاروتنوئیدها با استفاده از روش لیچنتالر^۷ (۱۹۸۷) اندازه گیری شد.

۷. رابطه:

$$- 1/8 \times (a \text{ (کلروفیل)} - 85/0.2 \text{ (b کلروفیل)}) / 198$$

(جذب د، ۴۷۰ × ۱۰۰۰)

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

¹ Ghane² Belcher³ ISTA⁴ Maguire

⁵ Anderson and Abdul Baki

⁶ Arnon

⁷ Lichtenthaler

نتایج و بحث

نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس نشان داد که شدت میدان مغناطیسی، زمان، رقم و برهم‌کنش میدان در زمان برای اکثر صفات مورد بررسی از جمله درصد جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه، وزن خشک آن‌ها، شاخص وزنی و طولی بنیه گیاهچه، کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید معنی‌داری بود (جدول ۱ و ۳). این نتایج با یافته‌های تحقیقاتی شبرنگی^۱ (۲۰۲۴) در خصوص تأثیرات معنی‌دار میدان‌های مغناطیسی بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌ها همخوانی دارد. ضرایب پراکندگی برای تمامی صفات محاسبه گردید. بیشترین ضریب برای وزن خشک ریشه‌چه و کمترین مقدار برای مجموع کلروفیل به ترتیب با ۱۰/۴۰۲ و ۰/۶۰۴ به‌دست آمد. بین ارقام از نظر سرعت جوانه‌زنی اختلاف معنی‌داری وجود نداشت، ولی از لحاظ وزن خشک ریشه‌چه در سطح احتمال ۵ درصد و از نظر سایر صفات در سطح احتمال یک درصد اختلاف معنی‌دار دیده شد. این نتایج با یافته‌های ژبو^۲ و همکاران (۲۰۱۸) همخوانی دارد که نشان دادند تفاوت‌های ژنتیکی بین ارقام مختلف تأثیرات متفاوتی بر پاسخ به میدان مغناطیسی داشته باشد. صفات مورفولوژیکی مرتبط با جوانه‌زنی نظیر طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه و طول گیاهچه نیز تحت تأثیر میدان‌های مغناطیسی قرار گرفت. به‌طوری‌که بیشترین طول ریشه‌چه و ساقه‌چه در شدت میدان ۱۰۰ میلی تسلا و ۵۰ دقیقه مشاهده گردید که با شدت ۱۰۰ میلی تسلا و زمان ۱۰۰ دقیقه اختلاف معنی‌داری نداشت و کمترین طول ساقه‌چه به مقدار ۳۴/۳۰ میلی‌متر در میدان الکترومغناطیس با شدت ۱۵۰ میلی تسلا و مدت ۱۰۰ دقیقه به‌دست آمد که با تمامی تیمارها اختلاف معنی‌داری داشت. بیشترین طول گیاهچه متعلق به تیمار ۱۰۰ میلی‌تسلا به‌مدت ۵۰ دقیقه و کمترین طول گیاهچه به مقدار ۸۳/۲۵ میلی‌متر در میدان الکترومغناطیس با شدت ۱۵۰ میلی تسلا و مدت ۱۰۰ دقیقه بود. اثر شدت میدان

در زمان برای وزن خشک ریشه‌چه نشان داد که بیشترین مقدار متعلق به تیمار شدت میدان ۱۰۰ میلی‌تسلا در زمان ۵۰ دقیقه با ۰/۷۱۵ میلی‌گرم که با تیمار شاهد اختلاف معنی‌داری نداشت و کمترین مقدار در تیمار ۱۵۰ میلی‌تسلا با ۱۰۰ دقیقه به مقدار ۰/۴۵۵ میلی‌گرم بود که با تمامی تیمارها اختلاف معنی‌داری داشت (جدول ۲). کاتریا^۳ و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که پیش‌تیمار بذرهای سویا و ذرت با میدان مغناطیسی می‌تواند جوانه‌زنی و رشد اولیه این گیاهان را بهبود بخشد.

نتایج صراف^۴ و همکاران (۲۰۲۱) نشان داد؛ شدت‌های ۱۵۰ میلی‌تسلا (۱ ساعت) و ۲۰۰ میلی‌تسلا (۱ ساعت) تأثیرات مثبتی بر صفات مربوط به جوانه‌زنی در سویا واریته JS-335 داشت. شدت میدان مغناطیسی ۱۰۰ میلی‌تسلا در مدت زمان ۵۰ دقیقه بیشترین تأثیر مثبت را بر درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، وزن خشک گیاهچه، شاخص وزنی بنیه گیاهچه، کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید داشت (جدول ۲ و شکل ۲). مطالعات ساری^۵ و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که استفاده از میدان مغناطیسی ثابت می‌تواند تأثیرات مثبتی بر جوانه‌زنی بذرهای لوبیا داشته باشد. در این تحقیق، بذرهای لوبیا به‌مدت ۱۰۰ دقیقه در معرض میدان‌های مغناطیسی با شدت‌های مختلف قرار گرفتند. نتایج نشان داد با افزایش شدت میدان مغناطیسی، جوانه‌زنی به صورت خطی افزایش می‌یابد. وثیقه شمس‌آبادی^۶ و همکاران (۲۰۱۷) در بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر برخی صفات فیزیولوژیک و جوانه‌زنی بذر گلرنگ نشان داد؛ شدت میدان مغناطیسی بر صفات درصد و سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه، طول گیاهچه، وزن خشک 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. افزایش میدان مغناطیسی به ۲۰

³ Kataria⁴ Sarraf⁵ Sari⁶ Vasiqeh Shamsabadi¹ Shabrangy² Xu

جدول ۱. تجزیه واریانس شاخص‌های جوانه‌زنی در گیاه برنج تحت میدان الکترومغناطیسی در زمان‌های مختلف

Table 1. Analysis of variance for germination indices of rice under electromagnetic fields at different times

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	درصد جوانه‌زنی Germination percentage	سرعت جوانه‌زنی Germination rate	طول ریشه‌چه Radicle length	طول ساقه‌چه Coleoptile length	طول گیاهچه Seedling length	وزن خشک ریشه‌چه Radicle dry weight	وزن خشک ساقه‌چه Coleoptile dry weight	وزن خشک گیاهچه Seedling dry weight	شاخص طولی بنیه گیاهچه Seedling length vigor index	شاخص وزنی بنیه گیاهچه Seedling weight vigor index
میدان مغناطیسی Magnetic Field (MF)	3	518.18**	4.16**	311.9**	156.1**	884.34**	0.071**	0.434**	0.712**	82327911**	16057.8**
زمان Time	2	68.580**	0.041 ^{ns}	88.163**	19.071*	185.43**	0.023**	0.100*	0.216**	4003131.3**	3546.62**
رقم Variety	1	20.587**	0.884 ^{ns}	363.15**	122.2**	906.6**	0.024*	0.202**	0.366**	11172256**	4461**
میدان × زمان MF × Time	6	26.66**	0.241 ^{ns}	74.25**	39.67**	216.1**	0.031**	0.063 ^{ns}	0.150**	3040072.9**	1973.5**
میدان × رقم MF × Variety	3	1.471 ^{ns}	1.517**	126.89**	1.559 ^{ns}	152.9**	0.003 ^{ns}	0.052 ^{ns}	0.080 ^{ns}	1353357.9**	712.19 ^{ns}
زمان × رقم Time × Variety	2	0.043 ^{ns}	0.496 ^{ns}	0.320 ^{ns}	1.877 ^{ns}	3.676 ^{ns}	0.005 ^{ns}	0.013 ^{ns}	0.031 ^{ns}	29815.7 ^{ns}	287.5 ^{ns}
میدان × زمان × رقم MF × Time × Variety	6	0.679 ^{ns}	0.147 ^{ns}	3.561 ^{ns}	1.56 ^{ns}	9.513 ^{ns}	0.002 ^{ns}	0.014 ^{ns}	0.025 ^{ns}	101923.04 ^{ns}	239.568 ^{ns}
اشتباه آزمایشی Error	48	2.817	0.485	6.335	5.393	8.975	0.004	0.028	0.037	123828.5	394.658
درصد ضریب تغییرات CV (%)		1.780	5.869	4.076	5.426	2.865	10.402	9.738	8.325	3.557	9.088

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

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

جدول ۲. مقایسه میانگین برهم‌کنش میدان‌های مغناطیسی در زمان‌های مختلف برای ویژگی‌های جوانه‌زنی برنج

Table 2. Mean comparison for the interaction effect of magnetic fields at different times on germination characteristics of rice

شدت میدان مغناطیسی (میلی‌تسلا) Magnetic field intensity (mT)	مدت زمان (دقیقه) Time (minutes)	درصد جوانه‌زنی Germination percentage	طول ریشه چه (میلی‌متر) Radicle length (mm)	طول ساقه چه (میلی‌متر) Coleoptile length (mm)	طول گیاهچه (میلی‌متر) Seedling length (mm)	وزن خشک ریشه چه (میلی‌گرم) Radicle dry weight (mg)	وزن خشک گیاهچه (میلی‌گرم) Seedling dry weight (mg)	شاخص طولی بنیه گیاهچه Seedling length vigor index	شاخص وزنی بنیه گیاهچه Seedling weight vigor index
0	10	97.70 ^{ab}	61.00 ^{de}	43.50 ^{bc}	104.50 ^d	0.667 ^{ab}	2.463 ^b	10211.83 ^{cd}	240.71 ^b
	50	97.70 ^{ab}	61.00 ^{de}	43.500 ^{bc}	104.50 ^d	0.667 ^{ab}	2.463 ^b	10211.83 ^{cd}	240.71 ^b
	100	97.70 ^{ab}	61.00 ^{de}	43.500 ^{bc}	104.50 ^d	0.667 ^{ab}	2.463 ^b	10211.83 ^{cd}	240.71 ^b
50	10	96.15 ^{bcd}	62.66 ^{cd}	43.400 ^{bc}	106.1 ^{cd}	0.601 ^{bc}	2.378 ^{bc}	10201.86 ^{cd}	229.07 ^{bc}
	50	97.81 ^{ab}	63.73 ^{bcd}	44.400 ^{bc}	108.13 ^c	0.525 ^{def}	2.311 ^{bc}	10579.78 ^{bc}	226.1 ^{bc}
	100	94.41 ^d	61.95 ^d	43.80 ^{bc}	105.7 ^{cd}	0.497 ^{ef}	2.300 ^{bc}	9986.95 ^d	217.3 ^{cd}
100	10	96.78 ^{bc}	65.50 ^{abc}	42.80 ^c	108.30 ^c	0.510 ^{ef}	2.270 ^{bcd}	10482.04 ^{bc}	219.5 ^{bc}
	50	98.80 ^a	68.133 ^a	47.467 ^a	115.60 ^a	0.715 ^a	2.738 ^a	11422.96 ^a	270.6 ^a
	100	95.31 ^{cd}	66.30 ^{ab}	45.60 ^{ab}	111.90 ^b	0.590 ^{cd}	2.237 ^{cd}	10666.9 ^b	213.2 ^{cd}
150	10	90.50 ^c	62.71 ^{cd}	42.60 ^c	105.3 ^{cd}	0.602 ^{bc}	2.167 ^{cd}	9529.3 ^c	196.2 ^{de}
	50	86.50 ^f	58.167 ^c	38.70 ^d	96.867 ^c	0.540 ^{cde}	2.068 ^d	8384.5 ^f	178.9 ^c
	100	81.83 ^g	48.950 ^f	34.30 ^e	83.250 ^f	0.455 ^f	1.827 ^e	6820.7 ^g	149.76 ^f

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

The different letters indicate significant differences at 5% probability level based in LSD test.

جدول ۳. تجزیه واریانس اثر میدان الکترومغناطیسی در زمان‌های مختلف بر رنگ‌های فتوسنتزی دو رقم برنج

Table 3. Analysis of variance of the effect of electromagnetic field at different times on photosynthetic pigments of two rice cultivars

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	کلروفیل <i>a</i> Chlorophyll <i>a</i>	کلروفیل <i>b</i> Chlorophyll <i>b</i>	کلروفیل <i>a+b</i> Chlorophyll <i>a+b</i>	کلروفیل <i>a/b</i> Chlorophyll <i>a/b</i>	کاروتنوئید Carotenoid
میدان مغناطیسی (MF)	3	0.605**	0.708**	2.602**	0.138 ^{ns}	0.050**
زمان (Time)	2	0.058**	0.108**	0.321**	0.057 ^{ns}	0.003**
رقم (Variety)	1	0.587**	0.116**	1.226**	0.990**	0.023**
میدان × زمان (MF × Time)	6	0.054**	0.090**	0.270**	0.040 ^{ns}	0.005**
میدان × رقم (MF × Variety)	3	0.017**	0.006*	0.041**	0.191*	0.001 ^{ns}
زمان × رقم (Time × Variety)	2	0.001 ^{ns}	0.001 ^{ns}	0.001 ^{ns}	0.070 ^{ns}	0.001 ^{ns}
میدان × زمان × رقم (MF × T × V)	6	0.012**	0.010**	0.042**	0.043 ^{ns}	0.001 ^{ns}
اشتباه آزمایشی (Error)	48	0.0025	0.0016	0.0052	0.0553	0.0005
CV (%) درصد ضریب تغییرات		0.8111	0.7087	0.6077	2.1215	0.6477

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

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

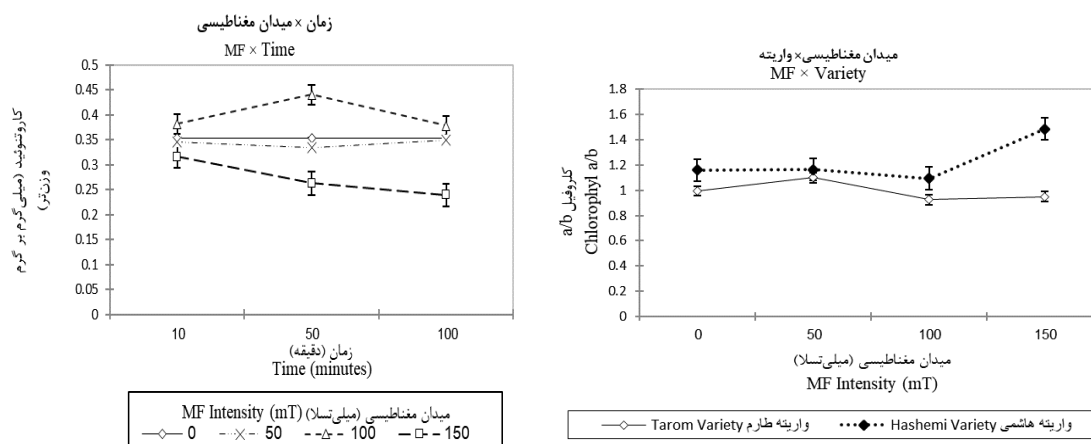


Fig 2. Effect of electromagnetic field on Carotenoid and Chlorophyll a/b at different time

آمد (العلاف و البیکر^۱، ۲۰۲۲). مقایسه میانگین برهم‌کنش میدان مغناطیسی در رقم برای ویژگی‌های فیزیولوژیکی نشان داد که بیشترین محتوای کلروفیل *a* در رقم هاشمی دیده شد که با رقم طارم اختلاف معنی‌داری داشت. شدت میدان ۱۰۰ میلی‌تسلا سبب افزایش معنی‌دار کلروفیل *b* در هر دو رقم نسبت به شاهد شد. از نظر محتوای کاروتنوئید اختلاف معنی‌داری بین ارقام

میلی‌تسلا سبب افزایش درصد جوانه‌زنی در بذره‌های خشک شد ولی طول ریشه‌چه کاهش یافت. در تحقیقی اثر میدان مغناطیسی حدود ۴۰۰ میلی‌تسلا در دوره‌های زمانی صفر (شاهد)، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ دقیقه روی تحریک فعالیت‌های بیوشیمیایی گیاه سیاه‌دانه انجام شد و بیشترین درصد جوانه‌زنی بذر و طول ریشه‌چه و ساقه‌چه در دوره زمانی ۹۰ دقیقه به‌دست

¹ Al-Allaf and Al-Baker

بیشترین مقدار شاخص وزنی بنیه گیاهچه در ۱۰۰ میلی‌تسلا در زمان ۵۰ دقیقه به‌دست آمد و کمترین مقدار این صفت در شدت میدان ۱۵۰ میلی‌تسلا با ۱۰۰ دقیقه مشاهده شد. کتسنیوز^۳ و همکاران (۲۰۲۱) سه گونه (کلم پیچ، گندم دوروم و اسفناج) را در یک آزمایش گلخانه‌ای در سه مرحله رشد مختلف (بذری، گیاهچه و قبل از برداشت) تحت میدان الکترومغناطیسی قرار دادند. نتایج نشان‌داد که وزن‌تر در هر سه گونه گیاهی افزایش یافت، درحالی‌که وزن خشک 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. بررسی شدت میدان مغناطیسی در رقم برای آزمایش جوانه‌زنی نشان داد که بین دو رقم از نظر سرعت جوانه‌زنی در شدت میدان‌های مختلف اختلافی وجود ندارند ولی از نظر سایر صفات رقم هاشمی بر رقم طارم برتری داشت (جدول ۴).

مقایسه میانگین برهمکنش سه‌گانه شدت، زمان و رقم نشان داد که شدت میدان ۱۰۰ میلی‌تسلا در ۵۰ دقیقه سبب افزایش معنی‌دار کلروفیل a، کلروفیل b و مجموع کلروفیل در رقم هاشمی شده است که اختلاف معنی‌داری با رقم طارم دارد (جدول ۵). ممتاز^۴ و همکاران (۲۰۲۴) در تحقیق خود به بررسی تأثیر امواج ماکروویو با شدت بالا بر ویژگی‌های بیوشیمیایی گیاه جو پرداختند. نتایج نشان داد که درصد جوانه‌زنی، رشد وزنی و طولی گیاهچه‌ها، همچنین مقادیر کلروفیل، کاروتنوئید و محتوای پروتئین محلول در تمام گروه‌های تحت تیمار با امواج ماکروویو، به‌طور معنی‌داری نسبت به گروه شاهد افزایش یافت. نتایج تحقیق نشان داد که سطح هورمون اکسین در گیاهان تیمار شده سه برابر افزایش یافته، در حالی که سطح هورمون اسید آبسزیک با کاهش ۶۵ درصدی مواجه شده بود.

نتایج حاصل از تحقیق محمدی^۵ و همکاران (۲۰۱۸) در رابطه با پیش‌تیمار مغناطیسی بر ویژگی‌های

در شدت‌های میدان مغناطیسی مشاهده نشد. بیشترین نسبت بین کلروفیل a به b در شدت ۱۵۰ میلی‌تسلا و در رقم هاشمی به دست آمد (شکل ۲). نتایج حاصل از مقایسه میانگین برهم‌کنش سطوح فاکتور زمان در سطوح فاکتور شدت میدان نشان داد که شدت میدان ۱۰۰ میلی‌تسلا به مدت ۵۰ دقیقه در صفات وزن خشک گیاهچه و شاخص وزنی بنیه گیاهچه بیشترین مقدار را داشته است (شکل ۳). در تحقیقی تأثیر میدان الکترومغناطیسی بر صفات جوانه‌زنی و رشد گیاهچه گندم بررسی شد و نتایج نشان داد که میدان الکترومغناطیسی باعث افزایش درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه، و وزن خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه شد (احمد^۱ و همکاران، ۲۰۱۹).

جانعلی‌زاده قزوینی^۲ 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 کنگد مطالعه کردند. نتایج نشان‌داد که میدان‌های مغناطیسی اثر معنی‌داری بر درصد جوانه‌زنی نهایی نداشتند. پیش‌تیمار بذرها با میدان مغناطیسی با شدت ۵۰ میلی‌تسلا به‌مدت ۲۰ دقیقه منجر به افزایش سرعت جوانه‌زنی نسبت به تیمار شاهد شد؛ اما کلیه سطوح تیمار ۱۰۰ میلی‌تسلا منجر به کاهش سرعت جوانه‌زنی نسبت به تیمار شاهد شدند. در این آزمایش بیشترین طول ریشه‌چه، طول گیاهچه و نیز شاخص طولی بنیه گیاهچه متعلق به تیمار ۷۵ میلی‌تسلا به‌مدت ۶۰ دقیقه و بیشترین وزن خشک گیاهچه و شاخص وزنی بنیه گیاهچه متعلق به تیمار ۱۰۰ میلی‌تسلا برای ۲۰ دقیقه بود. درجه‌بندی تیمارها نشان‌داد که قرار گرفتن بذرها به‌مدت یک ساعت در معرض میدانی با شدت ۵۰ میلی‌تسلا و نیز ۱۰ دقیقه در معرض ۲۵ میلی‌تسلا بهترین نتایج را به دنبال دارد. نتایج آزمایش اختلاف معنی‌داری در شاخص طولی بنیه گیاهچه نشان داد و بیشترین مقدار آن در ۱۰۰ میلی‌تسلا در زمان ۵۰ دقیقه بود که با سایر تیمارها نیز اختلاف معنی‌داری داشت. کمترین مقدار این صفت در میدان ۱۵۰ با ۱۰۰ دقیقه مشاهده شد (جدول ۲).

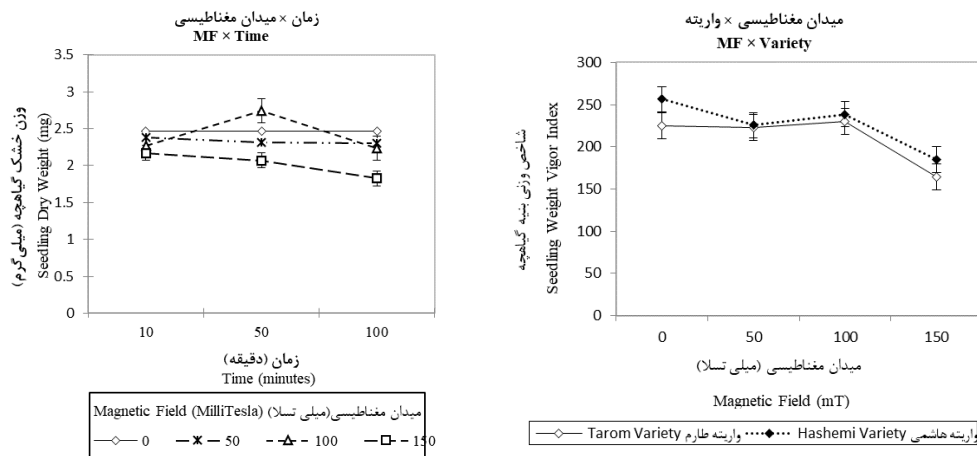
³ Katsenios

⁴ Mumtaz

⁵ Mohammadi

¹ Ahmad

² Janalizadeh Qazvini



شکل ۳. اثر میدان الکترومغناطیسی بر وزن خشک و شاخص بیه وزنی گیاهچه برنج در زمان‌های مختلف
Fig 3. Effect of electromagnetic field on seedling dry weight and seedling weight vigor index in rice at different time

جدول ۴. مقایسه میانگین برهم‌کنش میدان‌های مغناطیسی در ارقام مختلف برنج برای ویژگی‌های جوانه‌زنی

Table 4. Mean comparison for the interaction of magnetic fields on different rice varieties for germination traits

رقم Variety	شدت میدان مغناطیسی (میلی تسلا) Magnetic field intensity (mT)	سرعت جوانه‌زنی (بر روز) Germination rate (day ⁻¹)	طول ریشه چه (میلی متر) Radicle length (mm)	طول گیاهچه (میلی متر) Seedling length (mm)	شاخص طولی بیه گیاهچه Seedling length vigor index
هاشمی Hashemi	0	12.47 ^{ab}	66.000 ^a	111.0 ^a	10878.467 ^a
	50	11.656 ^c	66.822 ^a	112.25 ^a	10848.561 ^a
	100	12.0 ^{abc}	66.689 ^a	112.90 ^a	10995.558 ^a
	150	10.916 ^d	56.511 ^{bc}	96.26 ^{cd}	8423.300 ^c
طارم Tarom	0	11.90 ^{bc}	56.000 ^c	98.0 ^c	9545.200 ^b
	50	11.792 ^c	58.744 ^b	101.04 ^b	9663.839 ^b
	100	12.633 ^a	66.600 ^a	110.96 ^a	10719.092 ^a
	150	11.600 ^c	56.711 ^{bc}	94.022 ^d	8066.422 ^d

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

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

۱۲۰ و ۱۸۰ میلی تسلا به مدت ۳ و ۶ دقیقه بودند. نتایج نشان داد که قرار گرفتن در معرض میدان‌های الکترومغناطیسی می‌تواند تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی بذرها را بهبود بخشد. همچنین، ویژگی‌های ریخت‌شناسی مانند سطح برگ، ارتفاع بوته، و وزن تر و خشک گیاهچه افزایش یافت. بیشترین تأثیر بر جوانه‌زنی به ترتیب مربوط به میدان‌های الکترومغناطیسی با شدت ۱۸۰ میلی تسلا در مدت ۳ دقیقه و ۱۲۰ میلی تسلا در مدت ۶ دقیقه بود. علاوه بر این، ژنوتیپ FH-1046 نسبت به YH-5427 حساسیت بیشتری به میدان‌های الکترومغناطیسی نشان داد.

فیتوشیمیایی گیاه زوفا (*Hyssopus officinalis* L.) فیزیولوژیک و نشانگر افزایش وزن خشک اندام‌های هوایی (۸۲/۶ درصد)، وزن خشک ریشه‌ها (۸۶/۵ درصد)، محتوای کلروفیل کل (۳۲/۸ درصد)، محتوای کاروتنوئیدها (۳۲/۴ درصد) و پلی فنل‌ها (به میزان دو برابر) بود. فراز علی^۱ و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای تأثیر پیش‌ تیمار با میدان‌های الکترومغناطیسی بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه دو ژنوتیپ ذرت (*Zea mays* L.) شامل FH-1046 و YH-5427، را بررسی کردند. این تیمارها شامل میدان صفر (شاهد) و شدت‌های ۶۰،

¹ Faraz Ali

جدول ۵. مقایسه میانگین برهم‌کنش میدان‌های مغناطیسی در زمان‌ها و ارقام مختلف برای رنگیزه‌های فتوسنتزی

Table 5. Comparison of mean interaction effects of magnetic fields at different times and varieties on photosynthetic pigments

رقم Variety	شدت میدان مغناطیسی (میلی‌تسلا) MF Intensity (mT)	مدت زمان (دقیقه) Time (minutes)	کلروفیل a (میلی‌گرم بر گرم وزن تر) Chlorophyll a (mg/g fw)	کلروفیل b (میلی‌گرم بر گرم وزن تر) Chlorophyll b (mg/g fw)	کلروفیل a+b (میلی‌گرم بر گرم وزن تر) Chlorophyll a+b (mg/g fw)
هاشمی Hashemi	0	10	0.708 ^{efg}	0.612 ^{fg}	1.320 ^{ef}
		50	0.708 ^{efg}	0.612 ^{fg}	1.320 ^{ef}
		100	0.708 ^{efg}	0.612 ^{fg}	1.320 ^{ef}
	50	10	0.733 ^{def}	0.617 ^{fg}	1.350 ^{def}
		50	0.757 ^{cde}	0.665 ^{ef}	1.421 ^{cde}
		100	0.807 ^{bcd}	0.697 ^{de}	1.504 ^{bc}
	100	10	0.840 ^{bc}	0.768 ^c	1.608 ^b
		50	0.953 ^a	1.056 ^a	2.009 ^a
		100	0.850 ^b	0.660 ^{ef}	1.510 ^{bc}
	150	10	0.677 ^{efg}	0.553 ^g	1.230 ^{fg}
		50	0.467 ⁱ	0.320 ⁱ	0.787 ⁱ
		100	0.241 ^k	0.142 ^k	0.383 ^j
طارم Tarom	0	10	0.570 ^h	0.575 ^g	1.144 ^g
		50	0.570 ^h	0.575 ^g	1.144 ^g
		100	0.570 ^h	0.575 ^g	1.144 ^g
	50	10	0.617 ^{gh}	0.557 ^g	1.173 ^g
		50	0.647 ^{fgh}	0.590 ^{fg}	1.237 ^{fg}
		100	0.683 ^{efg}	0.627 ^{efg}	1.310 ^{ef}
	100	10	0.697 ^{efg}	0.760 ^{cd}	1.457 ^{cd}
		50	0.739 ^{def}	0.863 ^b	1.602 ^b
		100	0.480 ⁱ	0.483 ^h	0.963 ^h
	150	10	0.340 ^j	0.353 ⁱ	0.693 ⁱ
		50	0.251 ^k	0.250 ^j	0.501 ^j
		100	0.118 ^l	0.144 ^k	0.262 ^k

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

The different letters indicate significant differences at 5% probability level based in LSD test.

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. آلوارز^۱ و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند که پیش‌تیمار مغناطیسی تأثیر مثبتی بر جوانه‌زنی بذرهای تریتیکاله در شرایط تنش اسمزی

کستنیز و همکاران (۲۰۱۶) در یک مطالعه سه‌ساله در شرایط آزمایش مزرعه‌ای، تأثیر میدان الکترومغناطیسی 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

¹ Alvarez

دارد. در این مطالعه، بذره‌های تریتیکاله با استفاده از پیش‌ تیمار مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج نشان دادند که این روش قادر به بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی است. یافته‌های پژوهش حاکی از آن است که پیش‌ تیمار مغناطیسی می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر برای افزایش توان جوانه‌زنی بذرها در شرایط تنش اسمزی به کار گرفته شود.

نتیجه‌گیری

تأثیر میدان الکترومغناطیسی بر ویژگی‌های مرتبط با جوانه‌زنی، از جمله درصد و سرعت جوانه‌زنی، معنی‌دار بوده و منجر به افزایش این شاخص‌ها شده است. نتایج نشان می‌دهد که طول ریشه‌چه، ساقه‌چه و گیاهچه نیز

تحت تأثیر میدان الکترومغناطیسی افزایش یافته است. به نظر می‌رسد این افزایش ناشی از بهبود فعالیت‌های فیزیولوژیکی بذر، به‌ویژه جذب بیشتر آب توسط بذره‌های تیمار شده با میدان الکترومغناطیسی باشد، که در نهایت به افزایش درصد و سرعت جوانه‌زنی و بهبود شاخص‌های بنیه گیاهچه منجر شده است. تیمار ۱۰۰ میلی‌تسلا به مدت ۵۰ دقیقه توانست شاخص طولی و وزنی بنیه گیاهچه را بهبود بخشد. بر اساس این نتایج، پیش‌ تیمار مغناطیسی در محدوده تیمارهای مورد مطالعه، باعث بهبود جوانه‌زنی و استقرار بهتر گیاه برنج شد. با این حال، ارزیابی نتایج در شرایط مزرعه‌ای نیز ضروری به نظر می‌رسد.

منابع

- Abdul-Baki, A.A., and Anderson, J.D. 1973. Vigor determination in soybean seed by multiple criteria 1. Crop Science, 13(6): 630-633. <https://doi.org/10.2135/cropsci1973.0011183X001300060013x>
- Afrouz, M., Sayyed, R.Z., Fazeli-Nasab, B., Piri, R., Almalki, W.H. and Fitriatin, B. N. 2023. Seed bio-priming with beneficial *Trichoderma harzianum* alleviates cold stress in maize. PeerJ, 11: e15644. <https://doi.org/10.7717/peerj.15644>
- Ahmad, M., Hussain, M., and Ali, S. 2019. Effect of electromagnetic field on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). Journal of Plant Physiology, 234: 1-8.
- Al-Allaf, S.J.A., and 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. <https://doi.org/10.53730/ijhs.v6nS2.5818>
- Alarcon, J.L.P., Cuesta, J.C., Molejon, M.R.B., Paragsa, J.D., and 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. <https://doi.org/10.54536/ajlsi.v3i1.2450>
- Alvarez, J., Martinez, E., Florez, M., and Carbonell, V. 2021. Germination performance and hydro-time model for magneto-primed and osmotic-stressed triticale seeds. Romanian Journal of Physics, 66: 801.
- 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>
- 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>
- Belcher, E.W. 1995. Effect of seed condition, stratification, and germination temperature on the laboratory germination of loblolly pine seed. Tree Planters' Notes, 46(4): 138-142.

- Brust, H., Nishime, T., Wannicke, N., Mui, T., Horn, S., Quade, A., and Weltmann, K.-D. 2021. A medium-scale volume dielectric barrier discharge system for short-term treatment of cereal seeds indicates improved germination performance with long-term effects. *Journal of Applied Physics*, 129(4): 044904. <https://doi.org/10.1063/5.0033369>
- Carbonell, M., Martínez, E., Florez, M., Maqueda, R., Pintor-Lopez, A., and Amaya, J. 2008. Magnetic field treatments improve germination and seedling growth in *Festuca arundinacea* Schreb. and *Lolium perenne* L. *Seed Science and 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.
- FAO. 2022. FAOSTAT online database. Food Agriculture Organization of the United Nations.
- Faraz Ali, M., Sajid Aqeel Ahmad, M., Gaafar, A.-R.Z., and 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/10.1016/j.jksus.2024.103184>
- Farooq, M.A., Niazi, A.K., Akhtar, J., Saifullah, Farooq, M., Souri, Z., Karimi, N., and 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/10.1016/j.plaphy.2019.04.039>
- Florez, M., Carbonell, M.V., and 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. and 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., and 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., and Hajar, A.S. 2020. Magnetized water confers drought stress tolerance in *Moringa* biotype via modulation of growth, gas exchange, lipid peroxidation and antioxidant activity. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29: 1625-163. <https://doi.org/10.15244/pjoes/110347>
- Ibrahim, S., El-Liethy, M.A., Elwakeel, K. Z., Hasan, M.A. E.-G., Al Zanaty, A.M., and 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): 1-10. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8105-9>
- ISTA. 1979. The germination test. International Seed Testing Association. *Seed Science and Technology*, 4: 23-28.
- Janalizadeh Qazvini, M., Nizami, A., Khazaei, H., Faizi, H. and 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. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.29252/yujs.3.1.1>
- Jiao, S., Zhong, Y. and Deng, Y. 2016. Hot air-assisted radio frequency heating effects on wheat and corn seeds: Quality change and fungi inhibition. *Journal of Stored Products Research*, 69: 265-271. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2016.09.005>
- Kataria, S., Baghel, L. and 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. and 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. and 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): 1-13. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071364>
- Kaur, S., Vian, A., Chandel, S., Singh, H.P., Batish, D.R. and 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>
- Kausar, A. and Ashraf, M. 2003. Alleviation of salt stress in pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.) through seed treatments. *Agronomy*, 23(3): 227-234. <https://doi.org/10.1051/agro:2002086>
- Kumar, A., Singh, M., Singh, P.P., Singh, S.K., Singh, P.K. and 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>
- Lazim, S.K. and Ramadhan, M.N. 2020. Effect of microwave and UV-C radiation on some germination parameters of barley seed using mathematical models of gompertz and logistic: analysis study. *Basrah Journal of Agricultural Sciences*, 33(2): 28-41. <https://doi.org/10.37077/25200860.2020.33.2.03>
- Lichtenthaler, H.K. 1987. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148: 350-382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
- Ma, Y., Dias, M.C. and Freitas, H. 2020. Drought and salinity stress responses and microbe-induced tolerance in plants. *Frontiers in Plant Science*, 11: 1-18. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.591911>
- Maguire, J.D. 1962. Speed of germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop science*, 2(2): 176-77. <https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x>
- Mirmazloum, I., Kiss, A., Erdélyi, É., Ladányi, M., Németh, É. Z. and Radácsi, P. 2020. The effect of osmopriming on seed germination and early seedling characteristics of *Carum carvi* L. *Agriculture*, 10(4): 1-11. <https://doi.org/10.3390/agriculture10040094>
- Mohammadi, R., Roshandel, P. and Tadayon, A. 2018. Investigating the growth, physiology and antioxidant system of hyssop under the influence of magnetopriming. *New Findings in Biological Sciences (Science Journal)*, 6(1): 106-115. [In Persian] <https://doi.org/10.29252/nbr.6.1.106>
- Mohidem, N.A., Hashim, N., Shamsudin, R. and 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. and 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. and 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>
- Panuccio, M., Chaabani, S., Roula, R. and 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>
- Piri, R., Moradi, A., Salehi, A. and Balouchi, H.R. 2021. Effect of seed biological pretreatments on germination and seedling growth of cumin (*Cuminum cyminum* L.) under drought stress. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 9(4): 11-26. [In Persian]
- Radzevicius, A., Upadhyaya, S. and Zare, R. 2022. Pre-exposure impact of electromagnetic field radiation on carnation. *Pakistan Journal of Botany*, 54(1), 1-10.
- Ragha, L., Mishra, S., Ramachandran, V. and Bhatia, M.S. 2011. Effects of low-power microwave fields on seed germination and growth rate. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 3: 165-171. <https://doi.org/10.4236/jemaa.2011.35027>
- Rehman, H.U., Basra, S., Ahmed, M. and 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., Ratish Ramanan, K., and 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., and 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/jaeefs.2023.3.1>
- Sarraf, M., Deamici, K.M., Taimourya, H., Islam, M., Kataria, S., Raipuria, R.K., Abdi, G., and Brestic, M. 2021. Effect of magnetopriming on photosynthetic performance of plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 22: 1-14. <https://doi.org/10.3390/ijms22179353>
- Shabrangy, A. 2024. Using magnetic fields to enhance the seed germination, growth, and yield of plants. in f. maghuly (Ed.), *plant functional genomics: Methods and Protocols*, 2: 375-395. Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-3782-1_22
- Sharma, H.S., Fleming, C., Selby, C., Rao, J. and 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>
- Singh, N., Singh, R., Meena, V. and 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>
- Soran, M.-L., Stan, M., Niinemets, Ü. and 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>
- Tafforeau, M., Grémiaux, A. and Mildažienė, V. 2021. Molecular and biochemical changes in plants exposed to electromagnetic fields. *Environmental and Experimental Botany*, 178: 104-113.
- Ullah, A., Nisar, M., Ali, H., Hazrat, A., Hayat, K., Keerio, A.A., Ihsan, M., Laiq, M., Ullah, S. and 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>

- Vasiqueh Shamsabadi, A., Modarres Sanavy, S. A. M., Modarres Vamghi, S.M. and Keshavarz, H. 2017. Effect of magnetic field on some physiological traits and germination of safflower crop seeds and four important weed species. *Plant Research (Biology of Iran)*, 31(1): 184-196. [In Persian]
- Wu, Y., Zhao, X. and Li, Y. 2021. Evaluation of seed germination under water stress conditions using polyethylene glycol (PEG) solutions. *Plant Science Journal*, 15(3): 245-256.
- Xu, C., Zhang, Y., Yu, Y., Li, Y. and Wei, S. 2018. Suppression of Arabidopsis flowering by near-null magnetic field is mediated by auxin. *Bioelectromagnetics*, 39(1): 15-24. <https://doi.org/10.1002/bem.22086>
- Zafar, S. and Jianlong, X. 2023. Recent advances to enhance nutritional quality of rice. *Rice Science*, 30(6): 523-536. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2023.05.004>