



علوم و تحقیقات بذر ایران

سال یازدهم/ شماره چهارم/ ۱۴۰۳ (۸۲ - ۶۷)

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22124/jms.2024.8799



تأثیر شدت و مدت زمان میدان الکترومغناطیسی بر جوانه‌زنی برنج (*Oryza sativa* L.) تحت تنش خشکی

علیرضا فیضی پورمریانی^۱، داور ملازم^{۲*}، رضا تقی‌زاده^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱

چکیده

آزمایشی در سال ۱۴۰۳ به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با متغیرهای شدت و مدت زمان اثر میدان الکترومغناطیسی تحت تنش خشکی با استفاده از پلی‌اتیلن گلیکول (PEG6000) روی بذر برنج رقم هاشمی با هدف بررسی تأثیر این متغیرها بر صفات مرتبط با جوانه‌زنی و فیزیولوژیکی 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)، مدت زمان (۳۰ و ۶۰ دقیقه) و سه سطح تنش خشکی (صفر، ۳- و ۶- بار) با استفاده از پلی‌اتیلن گلیکول تیمار شدند. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که میدان مغناطیسی، تنش خشکی و برهم‌کنش آنها برای اکثر صفات معنی‌دار بود. تنش خشکی سبب افزایش معنی‌دار محتوای پروتئین و مالون‌دی‌آلدئید و کاهش کلروفیل a و b شد. بیش‌ترین مقادیر کلروفیل، سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه و طول گیاهچه در شدت میدان ۱۰۰ میلی‌تسلا و شرایط بدون تنش خشکی به دست آمد. همچنین، تیمار با شدت ۱۰۰ میلی‌تسلا به مدت ۶۰ دقیقه، بهبود قابل‌توجهی در درصد و سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه و طول گیاهچه در مقایسه با شاهد نشان داد. در مقابل، تیمار با شدت ۱۵۰ میلی‌تسلا به مدت ۶۰ دقیقه و تنش خشکی ۶- بار باعث کاهش تمامی صفات مرتبط با جوانه‌زنی شد. یافته‌ها نشان‌دهنده پتانسیل کاربرد میدان الکترومغناطیسی برای بهبود ویژگی‌های جوانه‌زنی و برخی صفات فیزیولوژیکی بذر برنج تحت شرایط تنش خشکی تا ۶- بار است.

واژه‌های کلیدی: برنج، پلی‌اتیلن گلیکول (PEG)، تنش خشکی، جوانه‌زنی، شاخص بنیه گیاهچه، مگنتوپرایمینگ

rete1351@gmail.com

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد آستارا، دانشگاه آزاد اسلامی، آستارا، ایران.

davar.molazem@iau.ac.ir

۲- استادیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد آستارا، دانشگاه آزاد اسلامی، آستارا، ایران.

reza.taghizadeh@iau.ac.ir

۳- استادیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد آستارا، دانشگاه آزاد اسلامی، آستارا، ایران.

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

مقدمه

برنج (*Oryza sativa* L.) یکی از مهم‌ترین غلات جهان و منبع اصلی تغذیه برای بیش از یک سوم جمعیت جهانی محسوب می‌شود (Bandumula, 2018). این محصول کشاورزی استراتژیک، نقش کلیدی در اقتصاد بسیاری از کشورها دارد و بیش از ۹۰ درصد تولید جهانی آن در آسیا متمرکز است، جایی که به‌عنوان غذای اصلی و منبع درآمد برای میلیون‌ها کشاورز اهمیت دارد (FAO, 2010). برنج منبعی غنی از ویتامین‌ها و مواد معدنی مانند ویتامین E، B5، تیامین، کلسیم، اسید فولیک و آهن است و حاوی ترکیبات فنولیکی با خواص آنتی‌اکسیدانی است که به کاهش خطر بیماری‌های قلبی و دیابت کمک می‌کند (Mohidem et al., 2022). برنج به‌عنوان منبع اصلی تأمین انرژی، نقشی کلیدی در رژیم غذایی مردم مناطق مختلف از جمله آمریکای لاتین، آسیا و جزایر اقیانوس آرام دارد (Zafar and Jianlong, 2023). این محصول امروزه در بیش از ۱۰۰ 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 (FAO, 2022). بر اساس آمار وزارت جهاد کشاورزی، سطح زیر کشت و تولید کل برنج در سال ۱۴۰۱ در کشور به ترتیب ۷۹۲ هزار هکتار و ۳/۶ میلیون تن می‌باشد (Ministry of Agriculture-Jahad, 2019). برنج در مرحله جوانه‌زنی به تنش خشکی حساس است و کمبود آب می‌تواند باعث کاهش جوانه‌زنی، قدرت گیاهچه‌ها و عملکرد محصول شود (Nyasulu et al., 2024).

پرایمینگ بذر به‌عنوان یک ابزار بیوتکنولوژیکی، رویکردی ساده، عملی، مؤثر، سازگار با محیط‌زیست و مقرون به صرفه برای افزایش تحمل گیاه به تنش‌های مختلف محیطی و بهبود جوانه‌زنی بذر محسوب می‌شود (Tanou et al., 2012; Farooq et al., 2019; Mirmazloum et al., 2020). قرار گرفتن بذر در معرض میدان‌های الکترومغناطیسی، یکی از ایمن‌ترین و مقرون به صرفه‌ترین روش‌های قبل از کاشت بذر، به‌منظور بهبود رشد و استقرار گیاهچه در مزرعه است (Flórez et al., 2007). این روش می‌تواند به بهبود ظهور و استقرار گیاهچه، تحریک گلدهی زودرس، کاهش خواب بذر و افزایش جذب مواد مغذی و عملکرد کمک کند (Rehman et al., 2011; Singh et al., 2015; Ullah et al.,

2019). همچنین، این تکنیک 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 (Kausar and Ashraf, 2003; Sharma et al., 2014; Kumar et al., 2016). در سال‌های اخیر، استفاده از پرتوهای الکترومغناطیسی به‌عنوان یک روش نوآورانه برای پرایمینگ بذرهای افزایش‌یافته است (Panuccio et al., 2018). پیش‌تیمارهای فیزیکی، از جمله قرار گرفتن در معرض امواج مافوق صوت و تابش یونیزان، به‌عنوان جایگزین‌های امیدوارکننده‌ای برای افزایش بازده محصولات کشاورزی مطرح شده‌اند (Rifna et al., 2019). در سال‌های اخیر تحقیقات بر روی اثرات امواج الکترومغناطیسی، میدان مغناطیسی، امواج فراصوت و پرتوهای یونیزان در طول موج‌های مختلف بر بنیه بذر، پاسخ‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه متمرکز شده است (Ibrahim et al., 2020). امواج الکترومغناطیسی با تغییر در واکنش‌های شیمیایی، جوانه‌زنی بذر را تسریع می‌کنند. همچنین این تشعشعات به تشکیل یون‌های هیدروژن (H^+) و هیدروکسیل (OH^-) در بذرهای کمک می‌کنند که برای چرخه تنش اکسیداتیو حیاتی هستند. تولید گلوکز ناشی از این تشعشعات، جوانه‌زنی بذر را تسریع کرده و به فعال‌سازی سیستم‌های آنزیمی و بهبود رشد گیاهچه و بهره‌وری گیاه منجر می‌شود (Ma et al., 2020). میدان‌های مغناطیسی با القای پاسخ‌های مرتبط با تنش در گیاهان، تولید آنتی‌اکسیدان‌ها و ترکیبات حفاظتی را افزایش می‌دهند. این فرایند می‌تواند به کشاورزان کمک کند تا در شرایط محیطی سخت نیز محصولات با کیفیت تولید کنند (Hasan et al., 2020).

پرتوهای الکترومغناطیسی غیر یونیزه بر انسان، حیوانات و گیاهان تأثیر می‌گذارد. تأثیر مستقیم امواج بر فرآیندهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی گیاه، از جمله ویژگی‌های آناتومیکی، 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 (*Apium graveolens*) تأثیر گذاشته و سبب کاهش ضخامت دیواره سلولی و اندازه کلروپلاست و میتوکندری شده است (Soran et al., 2014; Kaur et al., 2021). پوتری و

حساسیت گندم به خشکی پرداخته و نشان دادند که میدان الکترومغناطیسی می‌تواند اثر محافظتی بر گیاهان در شرایط تنش خشکی داشته باشد. آلارکون و همکاران (Alarcon *et al.*, 2024) در پژوهشی تأثیر میدان‌های مغناطیسی بر رشد گیاه لوبیا سبز (*Phaseolus vulgaris*) را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از آهن‌ربا باعث افزایش قابل توجهی در طول ساقه، تعداد برگ‌ها و وزن خشک گیاه نسبت به گروه شاهد گردید.

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 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 اجرا شده است.

مواد و روش‌ها

آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۲۴ تیمار به همراه شاهد، در سه تکرار، در آزمایشگاه فیزیولوژی دانشگاه آزاد اسلامی واحد آستارا در سال ۱۴۰۳ انجام شد. برای اعمال میدان مغناطیسی با شدت‌های موردنیاز از دو استوانه به قطر ۶ سانتی‌متر و طول ۳۰ سانتی‌متر از جنس فولاد ST37 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 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 تسلا متر دیجیتال مدل TES-3196 ساخت تایوان استفاده شد. بذرهای رقم هاشمی در معرض میدان الکترومغناطیس ثابت با شدت‌های صفر (شاهد)، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ میلی‌تسلا و مدت زمان ۳۰ و ۶۰ دقیقه قرار گرفته سپس عامل تنش آبی، در سه سطح صفر (شاهد)، ۳- و ۶- بار و با استفاده از پلی‌اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ به‌ترتیب با صفر، ۱۴۹/۵۷ و ۲۲۰/۷۷ گرم در لیتر

همکاران (Putri *et al.*, 2024) نشان دادند که میدان‌های مغناطیسی با شدت ۰/۲ میلی‌تسلا و مدت ۱۱ دقیقه و ۴۴ ثانیه موجب بهبود جوانه‌زنی و افزایش مقاومت به خشکی بذرهای برنج محلی Lampung شدند. بذرهای تیمار شده نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری در شاخص‌های جوانه‌زنی داشتند. حافظ و همکاران (Hafeez *et al.*, 2023) نشان دادند که میدان‌های مغناطیسی می‌توانند فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان مانند تنفس، فتوسنتز، جذب مواد مغذی و تولید آنتی‌اکسیدان‌ها و آنزیم‌ها را تحت تأثیر قرار دهند. این مطالعه همچنین به تناقضات و نتایج ناهماهنگ در تحقیقات مختلف اشاره کرد که ممکن است به دلیل تفاوت‌های گونه‌ای یا زمان و شدت مواجهه با میدان‌های مغناطیسی باشد. یافته‌ها نشان می‌دهند که میدان‌های مغناطیسی می‌توانند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای بهبود فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در گیاهان استفاده شوند. صدیق و همکاران (Siddique *et al.*, 2023) با بررسی تنش خشکی القا شده توسط پلی‌اتیلن گلیکول در لاین‌های برنج دانه بلند، تمامی صفات مورد بررسی از جمله درصد جوانه‌زنی در تمامی سطوح تنش خشکی کاهش معنی‌داری با شاهد نشان دادند. ساتیاباراتی و همکاران (Sathyabharathi *et al.*, 2022) تنش خشکی القا شده توسط پلی‌اتیلن گلیکول (۰/۸- مگاپاسکال) بر چندین نژاد محلی برنج (*Oryza sativa* L.) را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که برخی از این نژادها در مرحله گیاهچه‌ای در برابر تنش خشکی مقاوم بودند. رادزویشیوز و همکاران (Radzevicius *et al.*, 2022) نشان دادند که تابش میدان الکترومغناطیسی تأثیرات مثبتی بر رشد و کیفیت گل‌های میخک داشته و به ویژه میدان با شدت ۱۶۰ میلی‌تسلا به مدت ۱۰ دقیقه بهترین تأثیر را بر طول عمر و ویژگی‌های گل‌دهی میخک‌ها داشت. کاربونل و همکاران (Carbonell *et al.*, 2008) با قرار دادن بذرهای برنج در میدان‌های مغناطیسی ثابت ۱۵۰ و ۲۵۰ میلی‌تسلا نشان دادند که میدان مغناطیسی ۱۵۰ میلی‌تسلا باعث افزایش معنی‌دار سرعت و درصد جوانه‌زنی نسبت به گروه شاهد شد. همچنین، تفاوت‌های قابل توجهی در بذرهایی که در میدان مغناطیسی ۲۵۰ میلی‌تسلا قرار گرفتند، مشاهده گردید. مشنسکایا و همکاران (Mshenskaya *et al.*, 2023) در بررسی تأثیر میدان الکترومغناطیسی با فرکانس بسیار پایین (۱۴/۳ هرتز) بر

محتوای کلروفیل a و b بر اساس روش آرنون (Arnon, 1975) اندازه‌گیری شد. مقدار جذب نوری با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۶۳ و ۶۴۵ نانومتر قرائت و غلظت کلروفیل بر اساس روابط ۵ و ۶ تعیین شد.

رابطه (۵)
$$\text{Chl a} = [(A_{663}) \times 12.7 - (A_{645}) \times 2.69] \times 0.5$$

رابطه (۶)
$$\text{Chl b} = [(A_{645}) \times 22.9 - (A_{663}) \times 4.69] \times 0.5$$

که در آن Chl a، Chl b به ترتیب کلروفیل a و b بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر می‌باشد.

مالون‌دی‌آل‌نید (MDA) به روش هیت و پاکر (Heath and Packer, 1968) محاسبه شد. ۰/۲ گرم از بافت منجمد 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 ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه 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 سانتی‌گراد در حمام آب‌گرم حرارت داده شده سپس بلافاصله در یخ سرد شد و دوباره مخلوط به مدت ۱۰ دقیقه در ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ گردید. شدت جذب این محلول با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۳۲ نانومتر خوانده شد.

پروکلین با روش بتیس و همکاران (Bates et al, 1973) اندازه‌گیری شد. ۰/۵ گرم ماده‌تر برگ را در هاون له کرده و ۱۰ میلی‌لیتر اسیدسولفوسالسیلیک 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 سانتریفیوژ نموده تا مواد اضافی از محلول جدا شود. دو میلی‌لیتر آن را برداشته و روی آن ۲ میلی‌لیتر اسیدنینهیدرین و ۲ میلی‌لیتر اسیداستیک خالص اضافه شد و پس از قرار دادن در حمام آب‌گرم ۱۰۰ درجه به مدت یک ساعت به آب‌یخ منتقل شد. ۴ میلی‌لیتر تولوئن به آن اضافه شده و پس از ۲۰ ثانیه تکان شدید جذب بخش رنگی بالایی در طول موج 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 تجزیه آماری شدند. برای مقایسه میانگین‌ها نیز از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار

طبق رابطه میشل و کافمن (Michel and Kaufmann, 1973) اعمال شد. بذرها بعد از ضدعفونی به صورت دسته‌های ۱۰۰ تایی در داخل یک لوله نازک شفاف پلاستیکی در میدان الکترومغناطیسی با شدت و مدت لازم قرار گرفت و سپس به صورت دسته‌های ۲۵ تایی در پتری-های ضدعفونی شده با محیط تنش خشکی قرار گرفتند. در طول آزمایش، شمارش روزانه تعداد بذرهاى جوانه‌زده به مدت هشت روز در ساعت ۸ صبح و ۱۵ بعد از ظهر انجام شد و صفاتی همچون درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه، طول گیاهچه، وزن خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه و شاخص بنیه طولی و وزنی گیاهچه به صورت تصادفی در ۱۰ بذر اندازه‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیکی بقیه بذور به اتاقک کشت با دمای ۲۴ درجه سلسیوس و ۱۶ ساعت نور و ۸ ساعت تاریکی با رطوبت ۷۰ درصد منتقل گردید (Ghane et al., 2012).

درصد جوانه‌زنی با استفاده از رابطه بلچر (Belcher, 1995) محاسبه گردید. در این مطالعه، بذرهایی که طول ریشه‌چه آن‌ها حداقل دو میلی‌متر بود، به‌عنوان بذر جوانه‌زده در نظر گرفته شدند (ISTA, 2009).

$$\text{رابطه (۱)} \quad \text{GP}\% = n/N \times 100$$

$$\text{رابطه (۲)} \quad \text{GR} = (a/1) + (b-a/2) + (c-b/3) + \dots + (n-n-1/N)$$

سرعت جوانه‌زنی طبق روش ماگویر (Maguire, 1962) محاسبه شد. GP: درصد جوانه‌زنی، n: تعداد بذرهاى جوانه‌زده در هر پتری، N: تعداد کل بذرهاى کشت‌شده، GR: سرعت جوانه‌زنی (day⁻¹)، a, b, c, ..., n: به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تعداد بذرهاى جوانه‌زده پس از ۱، ۲، ۳ و n روز از شروع کشت است. هم‌چنین شاخص بنیه گیاهچه طبق رابطه و عبدل باکی و اندرسون (Abdul-Baki and Anderson, 1973) محاسبه شد.

$$\text{رابطه (۳)} \quad \text{طول گیاهچه (ریشه‌چه + ساقه‌چه) (سانتی‌متر)} \times \text{درصد جوانه‌زنی} = \text{شاخص طولی بنیه گیاهچه}$$

$$\text{رابطه (۴)} \quad \text{وزن خشک گیاهچه (ساقه‌چه + ریشه‌چه) (میلی‌گرم)} \times \text{درصد جوانه‌زنی} = \text{شاخص وزنی بنیه گیاهچه}$$

طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه و طول گیاهچه و وزن خشک آن‌ها پس از اتمام دوره جوانه‌زنی اندازه‌گیری شدند. وزن خشک نمونه‌ها در آون در دمای ۷۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفته و سپس با ترازوی حساس با دقت یک‌دهم میلی‌گرم توزین شدند.

شرایط بدون تنش خشکی و میدان ۱۰۰ میلی‌تسلا مشاهده شد. شدت میدان مغناطیسی ۱۰۰ میلی‌تسلا باعث افزایش معنی‌دار طول ریشه‌چه، ساقه‌چه و گیاهچه در شرایط بدون تنش خشکی و تنش ۳- و ۶- بار شد. بیشترین وزن خشک ریشه‌چه در تنش خشکی ۳- بار و میدان ۵۰ میلی‌تسلا مشاهده شد. شاخص طولی بنیه گیاهچه در شرایط بدون تنش و میدان ۱۰۰ میلی‌تسلا بیشترین مقدار را داشت، در حالی که بیشترین شاخص وزنی بنیه گیاهچه در شرایط بدون تنش و میدان ۵۰ میلی‌تسلا ثبت شد. کمترین مقادیر شاخص‌های بنیه طولی و وزنی گیاهچه در تنش خشکی شدید و میدان ۱۵۰ میلی‌تسلا مشاهده شد (جدول ۳). مطالعات ساری و همکاران (Sari et al., 2023) نشان داد که استفاده از میدان مغناطیسی ثابت می‌تواند تأثیرات مثبتی بر جوانه‌زنی بذرهای لوبیا داشته باشد. وثیقه شمس‌آبادی و همکاران (Vasiqeh Shamsabadi et al., 2017) نشان دادند که شدت میدان مغناطیسی تأثیر معنی‌داری بر درصد و سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه، طول گیاهچه، وزن خشک گیاهچه و شاخص بنیه طولی بذر گلرنگ داشت. تیمار ۱۰ میلی‌تسلا باعث افزایش معنی‌دار درصد جوانه‌زنی و طول ریشه‌چه در بذرهای خشک و تر گلرنگ شد. در تحقیقی اثر میدان مغناطیسی در دوره‌های زمانی مختلف بر روی تحریک فعالیت‌های بیوشیمیایی گیاه سیاه‌دانه انجام شد و بیش‌ترین درصد جوانه‌زنی بذر و طول ریشه‌چه و ساقه‌چه در دوره زمانی ۹۰ دقیقه به‌دست آمد (Al-Allaf and Al-Baker, 2022). در تحقیقی تأثیر میدان الکترومغناطیسی بر صفات جوانه‌زنی و رشد گیاهچه آفتابگردان بررسی شد و نتایج نشان داد که قرار گرفتن بذر در میدان الکترومغناطیسی ۱۰۰ میلی‌تسلا به مدت ۱۰ دقیقه باعث افزایش درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی و رشد محصول و عملکرد شد (Afzal et al., 2021).

بررسی اثرات متقابل میدان در تنش خشکی برای صفات فیزیولوژیکی نشان داد که کم‌ترین محتوای پرولین در شرایط بدون تنش خشکی بود و با افزایش تنش خشکی محتوای پرولین بصورت معنی‌داری افزایش یافت. بیش‌ترین محتوای پرولین در تنش خشکی ۶- بار و شدت میدان ۱۰۰ میلی‌تسلا و کم‌ترین آن در شرایط بدون تنش خشکی و بدون میدان مغناطیسی به ترتیب با ۱۰/۲۷۷ و ۱/۰۱۷ میکرومول بر گرم وزن تر ثبت گردید. افزایش شدت میدان

(FLSD) در سطح احتمال پنج درصد استفاده شد. برای محاسبات و ترسیم شکل‌ها از نرم‌افزار آماری XLSTAT بهره گرفته شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه نشان داد که اثر شدت میدان مغناطیسی بر اکثر شاخص‌ها از جمله درصد جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه، طول گیاهچه، وزن خشک ریشه‌چه، وزن خشک ساقه‌چه و شاخص‌های بنیه طولی و وزنی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود و نشان‌دهنده تأثیر مستقیم میدان مغناطیسی بر بهبود شاخص‌های مرتبط با جوانه‌زنی است. هم‌چنین میدان مغناطیسی اثرات مثبتی بر صفات فیزیولوژیکی گیاهچه‌های برنج، از جمله پرولین، کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل a+b، نسبت a/b و مالون دی‌آلدئید داشت. کاتریا و همکاران (Kataria et al., 2017) نشان دادند که پیش‌تیمار بذرهای سویا و ذرت با میدان مغناطیسی می‌تواند جوانه‌زنی و رشد اولیه این گیاهان را بهبود بخشد. تنش خشکی بجز در وزن خشک ساقه‌چه تأثیر بسیار معنی‌داری بر سایر شاخص‌ها، مانند درصد، سرعت جوانه‌زنی، وزن خشک اجزا گیاهچه و شاخص‌های بنیه طولی و وزنی گیاهچه و تمامی صفات فیزیولوژیکی داشت. تنش خشکی باعث کاهش محتوای کلروفیل و افزایش پرولین و مالون دی‌آلدئید شد. این تغییرات نشان‌دهنده پاسخ گیاه به تنش و تلاش برای سازگاری از طریق افزایش تولید پرولین و مقاومت به آسیب اکسیداتیو است. برهم-کنش میدان مغناطیسی در تنش خشکی در تمامی صفات مرتبط با جوانه‌زنی و صفات فیزیولوژیکی بجز طول ساقه‌چه معنی‌دار بود (جدول ۱ و ۲). این نتایج با یافته‌های تحقیقاتی شبرنگی (Shabrangy, 2024) در خصوص تأثیرات معنی‌دار میدان‌های مغناطیسی بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌های برنج و جو همخوانی دارد. مقایسه میانگین برهم‌کنش شدت میدان مغناطیسی و تنش خشکی نشان داد که بیش‌ترین درصد جوانه‌زنی در شرایط بدون تنش خشکی و بدون میدان مغناطیسی بود، اما بین شدت میدان‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌تسلا اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. با افزایش شدت میدان به ۱۵۰ میلی‌تسلا، درصد جوانه‌زنی کاهش یافت. افزایش شدت تنش خشکی باعث کاهش اکثر صفات شد. بیش‌ترین سرعت جوانه‌زنی در

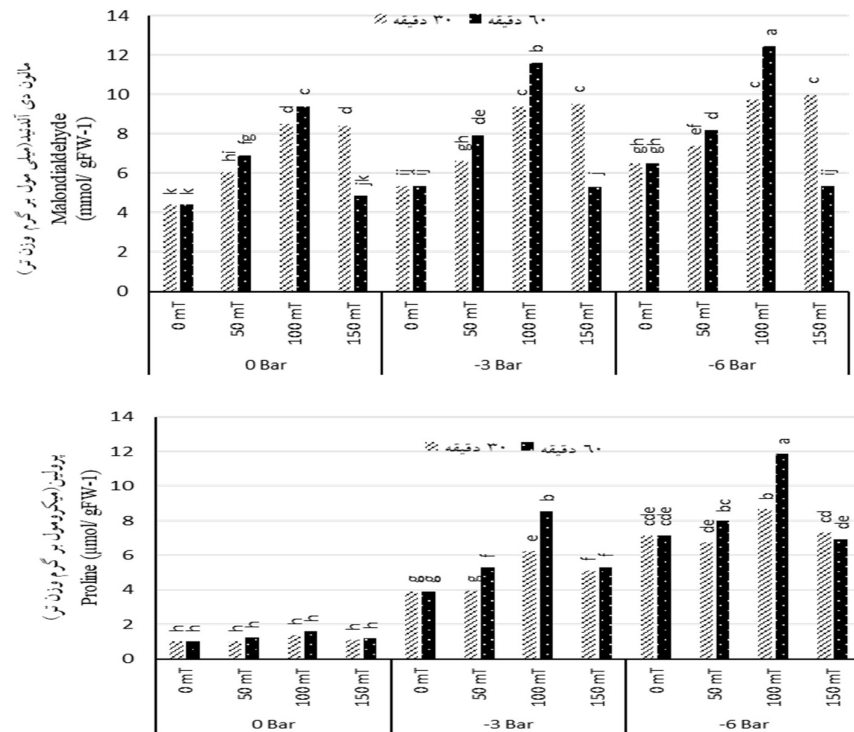
به ۱۵۰ میلی‌تسلا در تمامی سطوح تنش خشکی باعث کاهش محتوای پرولین شد. کلروفیل a و کلروفیل b رفتار تقریباً یکسانی نسبت به افزایش تنش خشکی و شدت میدان مغناطیسی داشتند. بیشترین مقدار این صفات در شرایط بدون تنش و میدان ۱۰۰ میلی‌تسلا به ترتیب با ۰/۸۰۷ و ۰/۹۹۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تر به دست آمد. مقایسه میانگین این صفات نشان داد که افزایش تنش خشکی سبب کاهش معنی‌دار کلروفیل می‌گردد اما شدت میدان مغناطیسی ۱۰۰ میلی‌تسلا سبب افزایش آن نسبت به شرایط بدون میدان مغناطیسی می‌شود. مالون دی‌آلدئید (MDA) به‌عنوان شاخص پراکسیداسیون لیپیدها و نشان‌دهنده آسیب اکسیداتیو در گیاهان، تحت تأثیر عوامل محیطی مختلفی مانند امواج الکترومغناطیسی و تنش خشکی قرار می‌گیرد. در شرایط بدون تنش خشکی کم‌ترین مقدار مالون دی‌آلدئید در شدت میدان صفر با ۴/۴۰۳ میلی‌مول برگرم وزن تر به دست آمد که با تمامی تیمارها اختلاف معنی‌داری داشت. افزایش تنش خشکی سبب افزایش مقدار مالون دی‌آلدئید گردید به طوری که بیش‌ترین مقدار این صفت در تنش خشکی ۶- و ۱۰۰ میلی‌تسلا با ۱۱/۱۰۳ میلی‌مول برگرم وزن تر به دست آمد (جدول ۴). ممتاز و همکاران (Mumtaz et al., 2024) نشان دادند که امواج ماکروویو با شدت بالا تأثیر مثبتی بر ویژگی‌های بیوشیمیایی گیاه جو دارند. درصد جوانه‌زنی، رشد وزنی و طولی گیاهچه‌ها، هم‌چنین محتوای کلروفیل، کارتنوئید و پروتئین محلول در تمام گروه‌های تحت تیمار به‌طور معنی‌داری نسبت به گروه شاهد افزایش یافت. محمدی و همکاران (Mohammadi et al., 2019) در بررسی تأثیر مگنتوپرایمینگ بر ویژگی‌های فیزیولوژیک و فیتوشیمیایی گیاه زوفا (*Hyssopus officinalis* L.) نشان داد که مگنتوپرایمینگ (به‌ویژه در ۲۰۰ میلی‌تسلا/۵ دقیقه) باعث 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 پلی‌فنل‌ها (به میزان دو برابر) شد.

مقایسه میانگین برهم‌کنش سطوح عامل زمان در سطوح عامل شدت میدان مغناطیسی در شرایط مختلف تنش خشکی برای صفت محتوای پرولین نشان داد که در شرایط عدم تنش خشکی، تفاوت معنی‌داری بین سطوح مختلف شدت میدان مغناطیسی در زمان‌های مختلف

مشاهده نگردید. با افزایش شدت تنش به ۳- بار، محتوای پرولین تحت تأثیر شدت میدان مغناطیسی و مدت زمان مورد بررسی رفتار متفاوتی نشان داد، به طوری که بیش‌ترین محتوای پرولین در شدت میدان ۱۰۰ میلی‌تسلا و زمان ۶۰ دقیقه به دست آمد. در شرایط تنش خشکی ۶- بار، محتوای پرولین در تمامی سطوح شدت میدان مغناطیسی افزایش یافت و بیش‌ترین میزان آن در شدت میدان ۱۰۰ میلی‌تسلا و مدت زمان ۶۰ دقیقه ثبت شد که اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها داشت. مقایسه میانگین برهم‌کنش سطوح عامل زمان در سطوح عامل شدت میدان در سطوح مختلف تنش خشکی برای صفت مالون دی‌آلدئید بررسی شد و نتایج نشان داد که در شرایط بدون تنش خشکی اختلاف معنی‌داری بین سطوح شدت میدان مغناطیسی در مدت زمان‌های مختلف دیده می‌شود به طوری که در شدت میدان ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌تسلا مدت زمان ۶۰ دقیقه سبب افزایش مالون دی‌آلدئید می‌شود اما قرار گرفتن گیاهچه در شدت میدان ۱۵۰ میلی‌تسلا به مدت ۶۰ دقیقه سبب کاهش معنی‌دار می‌شود. با افزایش شدت تنش به ۳- بار مالون دی‌آلدئید بیش‌ترین مقدار را در شدت ۱۰۰ میلی‌تسلا و زمان ۶۰ دقیقه نشان داد. در شدت تنش خشکی ۶- بار بیش‌ترین محتوای مالون دی‌آلدئید در شدت میدان ۱۰۰ میلی‌تسلا و ۶۰ دقیقه ثبت شد که با تمامی تیمارها اختلاف معنی‌داری داشت (شکل ۱). جانعلی‌زاده قزوینی و همکاران (Janalizadeh Qazvini et al., 2015) با بررسی شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی بر جوانه‌زنی بذر کنجد، نشان دادند که میدان‌های مغناطیسی تأثیر معنی‌داری بر درصد جوانه‌زنی نهایی نداشتند. پرایمینگ بذر با میدان مغناطیسی ۵۰ میلی‌تسلا به مدت ۲۰ دقیقه سرعت جوانه‌زنی را افزایش داد، اما تیمارهای ۱۰۰ میلی‌تسلا موجب کاهش سرعت جوانه‌زنی شد. بیش‌ترین طول ریشه‌چه و گیاهچه مربوط به تیمار ۷۵ میلی‌تسلا به مدت ۶۰ دقیقه و بیش‌ترین وزن خشک گیاهچه مربوط به تیمار ۱۰۰ میلی‌تسلا برای ۲۰ دقیقه بود. بهترین نتایج مربوط به قرار دادن بذر با مدت یک ساعت در میدان ۵۰ میلی‌تسلا و ۱۰ دقیقه در میدان ۲۵ میلی‌تسلا بود. کتسنیوز و همکاران (Katsenios et al., 2021) 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

جوانه‌زنی در سویا واریته JS-335 داشت. فراز علی و همکاران (Faraz Ali *et al.*, 2024) نشان دادند که میدان‌های الکترومغناطیسی می‌توانند تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی بذر ذرت را بهبود بخشند و ویژگی‌های مورفولوژیکی مانند سطح برگ، ارتفاع بوته و وزن گیاهچه را افزایش دهند. بیشترین تأثیر بر جوانه‌زنی مربوط به میدان‌های ۱۸۰ میلی‌تسلا در ۳ دقیقه و ۱۲۰ میلی‌تسلا در ۶ دقیقه بود.

نشان داد 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 سبب بهبود رنگ سبز در گندم و کاهش رنگ زرد در اسفناج شد. نتایج صراف و همکاران (Sarrafi *et al.*, 2021) نشان داد که شدت‌های ۱۵۰ میلی‌تسلا (۱ ساعت) و ۲۰۰ میلی‌تسلا (۱ ساعت) تأثیرات مثبتی بر صفات مربوط به



شکل ۱- برهم‌کنش تنش خشکی، شدت و زمان میدان الکترومغناطیسی بر محتوای پرولین و مالون دی آلدئید
Figure 1. Interaction of drought stress, electromagnetic field intensity and time on proline and malondialdehyde content

و همکاران (Carbonell *et al.*, 2000) گزارش کردند بذور برنجی که در معرض میدان مغناطیسی ۱۵۰ و ۲۵۰ mT قرار گرفته بودند سرعت و درصد جوانه‌زنی معنی‌داری نسبت به شاهد داشتند.

نتیجه‌گیری کلی

میدان مغناطیسی تأثیر مثبتی و معنی‌داری بر جوانه‌زنی، رشد و صفات فیزیولوژیکی گیاهچه‌های برنج داشت و می‌تواند به بهبود صفاتی مانند درصد جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه، وزن خشک و میزان کلروفیل کمک کند. نتایج این مطالعه نشان داد که تیمار با شدت میدان

کستنیز و همکاران (Katsenios *et al.*, 2016) 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 تحقیق آن‌ها 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 بهترین نتایج را به همراه داشتند و تمامی تیمارها نسبت به گروه شاهد تفاوت معنی‌داری نشان دادند. کاربونل

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

Table 1 - Analysis of variance for the effects of electromagnetic field and drought stress on germination indices in rice seedlings.

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات (Mean square)									
		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 بنيه گیاهچه Seedling Length Vigor Index	شاخص وزنی بنيه گیاهچه Seedling Weight Vigor Index
میدان مغناطیسی (MF) Magnetic Field	3	83.009**	0.0592 ^{ns}	145.686**	174.315**	622.150**	0.520**	0.442**	1.805**	8995893.545**	19194.988**
مدت زمان (T) Time (T)	1	1.417 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	21.890*	1.773 ^{ns}	11.202 ^{ns}	0.024 ^{ns}	0.060**	0.008 ^{ns}	37708.072 ^{ns}	220.549 ^{ns}
تنش خشکی (DT) Drought Stress	2	1169.065**	0.2313**	2078.707**	2800.498**	9697.791**	0.362**	4.762**	7.193**	138151805.598**	115569.327**
میدان × زمان MF × T	3	4.281 ^{ns}	0.0018**	19.338**	12.417 ^{ns}	56.561**	0.048**	0.028**	0.112**	674085.133**	1246.922**
میدان × تنش MF × DT	6	16.145**	0.0021**	15.169**	15.963 ^{ns}	39.765**	0.072**	0.048**	0.214**	665218.728**	1967.867**
زمان × تنش T × DT	2	0.738 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	17.585*	0.164 ^{ns}	18.514 ^{ns}	*0.030	0.004 ^{ns}	0.022 ^{ns}	172367.600 ^{ns}	144.238 ^{ns}
میدان × زمان × تنش MF × T × DT	6	2.123 ^{ns}	0.0003*	6.234 ^{ns}	1.747 ^{ns}	6.159 ^{ns}	0.010 ^{ns}	0.006 ^{ns}	0.013 ^{ns}	53947.399 ^{ns}	146.835 ^{ns}
اشتباه آزمایشی Error	48	2.066	0.0001	4.060	1.273	7.553	0.006	0.004	0.011	83947.910	137.905
ضریب تغییرات (% CV)		1.552	3.505	3.736	3.390	3.151	6.840	3.641	3.574	3.544	4.214

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

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

جدول ۲ - تجزیه واریانس اثر میدان الکترومغناطیسی و تنش خشکی بر صفات فیزیولوژیکی در گیاهچه برنج

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

میانگین مربعات (Mean square)							
منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	پرولین Proline	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	مجموع کلروفیل Chlorophyll a+b	کلروفیل a/b Chlorophyll a/b	مالون دی آلدئید Malondialdehyde
میدان مغناطیسی (MF) Magnetic Field	3	0.395**	0.395**	1.231**	3.012**	1.528**	69.966**
مدت زمان (T) Time	1	0.001**	0.001 ns	0.014*	0.022 ns	0.037 ns	1.656**
تنش خشکی (DT) Drought Stress	2	0.673**	0.673**	0.508**	2.342**	0.225*	16.474**
میدان × زمان MF × T	3	0.011**	0.011 ns	0.010**	0.040**	0.026 ns	32.126**
میدان × تنش MF × DT	6	0.021**	0.021**	0.028**	0.081**	0.043 ns	0.574*
زمان × تنش T × DT	2	0.001*	0.001 ns	0.001 ns	0.003 ns	0.006 ns	0.117 ns
میدان × زمان × تنش MF × T × DT	6	0.001*	0.001 ns	0.001 ns	0.002 ns	0.009 ns	0.565*
اشتباه آزمایشی Error	48	0.006	0.006	0.002	0.010	0.051	0.192
ضریب تغییرات/ CV (%)		1.67	17.80	8.13	9.66	25.41	5.83

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

جدول ۳- مقایسه میانگین برهم کنش میدان‌های مغناطیسی در تنش خشکی برای ویژگی‌های جوانه‌زنی برنج

Table 3. Mean comparison for the interaction effect of magnetic fields at drought stress on germination characteristics of rice

تنش خشکی (بار) Drought Stress (bar)	شدت میدان مغناطیسی (میلی‌تسلا) Magnetic Field Intensity (mT)	سرعت جوانه‌زنی درصد جوانه‌زنی Germination Percentage	سرعت جوانه‌زنی Germination Rate	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 ساقه‌چه (میلی‌گرم) Coleoptile Dry Weight (mg)	وزن خشک گیاهچه (میلی‌گرم) Seedling Dry Weight (mg)	شاخص وزنی بنیه شاخص طولی بنیه گیاهچه Seedling Length Vigor Index	شاخص وزنی بنیه شاخص طولی بنیه گیاهچه Seedling Weight Vigor Index
Control	0	99.00 a	0.43 b	66.00 a	45.33 ab	111.33 a	1.27 bc	2.31 b	3.58 a	11021.33 a	354.74 a
	50	98.43 a	0.43 b	61.35 b	44.33 b	105.68 b	1.31 bc	2.40 a	3.70 a	10401.21 b	364.57 a
	100	98.35 a	0.47 a	67.00 a	46.15 a	113.15 a	1.24 c	2.16 c	3.40 b	11129.08 a	334.07 b
	150	95.33 c	0.35 c	58.77 c	42.00 c	100.77 c	1.10 d	2.13 c	3.23 c	9605.53 c	307.95 c
-3	0	95.00 c	0.28 f	52.33 de	31.67 f	84.00 f	1.34 b	1.84 e	3.18 cd	7980.33 f	301.81 cd
	50	96.18 bc	0.30 e	54.00 d	33.45 e	87.45 e	1.45 a	1.95 d	3.40 b	8411.11 e	327.17 b
	100	97.38 ab	0.36 c	57.50 c	36.33 d	93.83 d	1.28 bc	1.74 f	3.02 e	9138.68 d	293.72 d
	150	93.00 d	0.21 h	51.50 e	28.58 g	80.08 g	0.98 e	1.67 f	2.65 f	7449.02 g	246.18 f
-6	0	82.00 g	0.21 h	44.00 gh	21.00 i	65.00 j	0.89 e	1.26 gh	2.14 h	5330.00 j	175.80 h
	50	86.00 f	0.22 g	44.50 g	24.35 h	68.85 i	1.34 b	1.72 f	3.06 de	5923.05 i	263.45 e
	100	89.17 e	0.32 d	48.30 f	28.40 g	76.70 h	1.12 d	1.28 g	2.40 g	6841.12 h	213.63 g
	150	81.53 g	0.18 i	41.87 h	17.82 j	59.68 k	0.79 f	1.18 h	1.97 i	4875.11 k	161.27 i

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 و تنش خشکی برای ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاهچه برنج

Table 4. Mean Comparison the interaction effect of magnetic fields and drought stress on physiological traits in rice seedlings

تنش خشکی (بار) Drought Stress (bar)	شدت میدان مغناطیسی (میلی‌تسلا) Magnetic Field Intensity (mT)	مالون دی آلدئید (میلی مول بر گرم وزن تر) Malondialdehyde (mmol/ gFW ⁻¹)	کلروفیل a/b Chlorophyll a/b	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 (میکرومول بر گرم وزن تر) Proline (μmol/ gFW- 1)
Control	0	4.403 g	0.874 a	1.406 c	0.751 c	0.655 b	1.017 e
	50	6.473 e	0.864 a	1.534 b	0.824 b	0.710 b	1.138 e
	100	8.945 c	0.815 a	1.800 a	0.993 a	0.807 a	1.513 e
	150	6.652 e	1.428 a	0.565 h	0.233 h	0.332 fg	1.165 e
-3	0	5.370 f	0.775 a	1.095 d	0.619 e	0.477 cd	3.897 d
	50	7.280 d	0.714 a	1.170 d	0.683 d	0.486 cd	4.628 c
	100	10.480 b	0.679 a	1.332 c	0.794 bc	0.538 c	7.403 b
	150	7.415 d	1.342 a	0.456 h	0.194 h	0.262 fg	5.207 c
-6	0	6.483 e	0.521 a	0.708 g	0.467 g	0.242 g	7.163 b
	50	7.777 d	0.686 a	0.856 f	0.508 fg	0.348 ef	7.358 b
	100	11.103 a	0.791 a	0.976 e	0.546 f	0.430 de	10.277 a
	150	7.675 d	1.214 a	0.264 i	0.119 i	0.145 h	7.142 b

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

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

همچنین، پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده بر روی تأثیر میدان‌های مغناطیسی بر سایر مراحل رشد گیاه و همچنین بر روی ارقام مختلف برنج متمرکز شوند تا بتوان از این روش به‌عنوان یک راه‌کار مؤثر در مدیریت تنش‌های محیطی در کشاورزی استفاده کرد.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از مدیر گروه کشاورزی و مسئول آزمایشگاه گیاه‌شناسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد آستارا قدردانی می‌گردد.

مغناطیسی ۱۰۰ میلی‌تسلا به مدت ۶۰ دقیقه، بیشترین تأثیر مثبت را بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌ها داشت، به‌ویژه در شرایط بدون تنش خشکی از سوی دیگر، تنش خشکی به طور قابل توجهی بر این صفات تأثیر منفی گذاشت و باعث افزایش میزان پرولین و مالون دی‌آلدئید در گیاهان شد. با این حال، برهم‌کنش میدان مغناطیسی و تنش خشکی نشان داد که در برخی شرایط، میدان مغناطیسی می‌تواند اثرات منفی تنش خشکی را کاهش دهد. این یافته‌ها نشان‌دهنده پتانسیل استفاده از میدان مغناطیسی برای بهبود جوانه زنی بذر برنج تحت شرایط تنش خشکی است. با این حال، برای تعمیم این نتایج به شرایط مزرعه‌ای، انجام مطالعات بیشتر و گسترده‌تری ضروری است.

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. doi.org/10.2135/cropsci1973.0011183X001300060013x. **(Journal)**
- 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., and E. L. Sabagh, A. 2021. Magnetic Field Treatments Improves Sunflower Yield by Inducing Physiological and Biochemical Modulations in Seeds. *Molecules*, 26(7), 1-14. https://doi.org/10.3390/molecules26072022. **(Journal)**
- 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. doi.org/10.53730/ijhs.v6nS2.5818 . **(Journal)**
- 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. doi.org/10.54536/ajlsi.v3i1.2450 **(Journal)**
- Aron, D. I. 1975. Copper enzymes in isolated chloroplasts; polyphenol-oxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol.* 24, 1-15. doi: 10.1104/pp.24.1.1 **(Journal)**
- 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. **(Journal)**
- Bates, I., Waldern, R. P., and Teare, I. D. 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207. doi.org/10.1007/BF00018060 **(Journal)**
- 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., and 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 **(Journal)**
- 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. Technology*, 36, 31-37. **(Journal)**
- 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., 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/https://doi.org/10.1016/j.jksus.2024.103184>. **(Journal)**
- 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/https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.04.039>. **(Journal)**
- 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> **(Journal)**
- 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>. **(Journal)**
- 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>. **(Journal)**
- Heath, R. L., and Packer, I. 1968. Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. Archives of Biochemistry and Biophysics, 125, 189-198. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1) **(Journal)**
- 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. DOI: 10.15244/pjoes/110347. **(Journal)**
- 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>. **(Journal)**
- ISTA. 1979. The germination test. International Seed Testing Association. Seed Science and Technology, 4, 23-28. **(Journal)**
- Janalizadeh Qazvini, M., Nizami, A., Khazaei, H., Faizi, H. and Guldani, M. 2015. 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)**
- 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>. **(Journal)**
- 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/https://doi.org/10.1016/j.bcab.2016.03.010>. **(Journal)**
- 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), 1364, 1-13. <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/7/1364>. **(Journal)**
- 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>. **(Journal)**
- Kausar, A., and Ashraf, M. 2003. Alleviation of salt stress in pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.) through seed treatments. Agronomie, 23(3), 227-234. doi : 10.1051/agro:2002086_ **(Journal)**
- 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> **(Journal)**

- 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, 591911, 1-18. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.591911> **(Journal)**
- 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>. **(Journal)**
- Ministry of Agriculture-Jahad. 2019. Agricultural Statistics. 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., and Radácsi, P. 2020. The Effect of Osmopriming on Seed Germination and Early Seedling Characteristics of *Carum carvi* L. *Agriculture*, 10(4), 94, 1-11. <https://www.mdpi.com/2077-0472/10/4/94>. **(Journal)**
- Michel, B.E. and 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> **(Journal)**
- Mohammadi, R., Roshandel, P., and Tadayon, A. 2019. The effects of magnetopriming on the growth, physiology and antioxidant systems in hyssop. *Nova biologica reperta*, 6(1), 106-115. **(In Persian)**
- 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, 1-28. <https://doi.org/10.3390/agriculture12060741>. **(Journal)**
- 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, 1-13. <https://doi.org/10.3390/plants12040826>. **(Journal)**
- 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/https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2024.06.013>. **(Journal)**
- Nyasulu, M., Zhong, Q., Li, X., Liu, X., Wang, Z., Chen, L., He, H., and 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> **(Journal)**
- 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> **(Journal)**
- Putri, A. E., Agustina, R., and 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> **(Journal)**
- 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. [http://dx.doi.org/10.30848/PJB2023-1\(38\)](http://dx.doi.org/10.30848/PJB2023-1(38)) **(Journal)**
- 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> **(Journal)**
- 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/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.029>. **(Journal)**
- Sari, 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/jaefs.2023.3.1> **(Journal)**
- 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, 9353, 1-14. <https://doi.org/10.3390/ijms22179353>. **(Journal)**
- Sathyabharathi, B., Nisha, C., Jaisneha, J., Nivetha, V., Aathira, B., Ashok, S., and 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. doi: 10.9734/IJPSS/2022/v34i2231515. **(Journal)**
- Shabrangy, A. 2024. Using Magnetic Fields to Enhance the Seed Germination, Growth, and Yield of Plants. In: Maghuly, F (Eds), 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> **(Journal)**
- Siddique, F., Ahmed, M. S., Javaid, R. A., Hanif, A., Rabnawaz, M., Arshad, M., and 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://dx.doi.org/10.17582/journal.pjar/2023/36.1.71.79> .**(Journal)**
- 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. doi.org/10.5958/2229-4473.2015.00012.9 **(Journal)**
- 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> **(Journal)**
- Tanou, G., Fotopoulos, V., and Molassiotis, A. 2012. Priming against environmental challenges and proteomics in plants: update and agricultural perspectives. Frontiers in Plant Science, 3, 31211, 1-5. doi:10.3389/fpls.2012.00216. **(Journal)**
- 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> **(Journal)**
- Vasiqeh 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)**
- 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> **(Journal)**



Effect of electromagnetic field intensity and duration on germination of rice (*Oryza sativa* L.) under drought stress

Alireza Faizipour Mariani¹, Davar Molazem^{2*}, Reza Taghizadeh³

Received: January 26, 2025

Accepted: March 11, 2025

Abstract

An experiment was conducted in 2024 as a factorial in a completely randomized design with the variables of electromagnetic field intensity and duration under drought stress using polyethylene glycol (PEG6000) on Hashemi variety rice seeds with the aim of investigating the effect of these variables on germination and physiological traits at Islamic Azad University, Astara Branch. Rice seeds were treated in a plastic bag under magnetic fields with intensities (0, 50, 100 and 150 mT), durations (30 and 60 minutes) and three levels of drought stress (0, -3 and -6 bar) using polyethylene glycol. The results of variance analysis showed that magnetic field, drought stress and their interaction were significant for most traits. Drought stress significantly increased proline and malondialdehyde content and decreased chlorophyll a and b. The highest chlorophyll content, germination rate, radicle length, shoot length, and seedling length were obtained at a field intensity of 100 mT and under no drought stress conditions. Also, treatment with a field intensity of 100 mT for 60 minutes showed significant improvement in germination percentage and rate, radicle length, shoot length, and seedling length compared to the control. In contrast, treatment with a field intensity of 150 mT for 60 minutes and -6 bar drought stress reduced all germination-related traits. The findings indicate the potential of using electromagnetic fields to improve germination characteristics and some physiological traits of rice seeds under drought stress conditions up to -6 bar.

Keywords: Drought Stress; Germination; Magnetopriming; Polyethylene Glycol (PEG6000); Rice; Seedling vigor index

How to cite this article

Faizipour Mariani, A., Molazem, D. and Taghizadeh, R. 2025. Effect of electromagnetic field intensity and duration on germination of rice (*Oryza sativa* L.) under drought stress. Iranian Journal of Seed Science and Research, 11(4): 67-82. (In Persian)(**Journal**)

DOI: [10.22124/jms.2024.8799](https://doi.org/10.22124/jms.2024.8799)

COPYRIGHTS

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to the Iranian Journal of Seed Science and Research

The content of this article is distributed under Iranian Journal of Seed Science and Research open access policy and the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY4.0) License. For more information, please visit <http://jms.guilan.ac.ir/>

1. MSc Graduated, Department of Agronomy and Plant Breeding, Astara Branch, Islamic Azad University, Astara, Iran. rete1351@gmail.com
2. Assistant Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Astara Branch, Islamic Azad University, Astara, Iran. davar.molazem@iau.ac.ir
3. Assistant Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Astara Branch, Islamic Azad University, Astara, Iran. reza.taghizadeh@iau.ac.ir

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