

Evaluation, Modelling, and Optimisation of Fennel Seed Germination under Cold Plasma Pretreatment and Combined Ultrasound–Magnetic Field Treatment

F. Gavari Bami¹, M. Namjoo^{1*}, M. R. Kamandar¹

1- Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, University of Jiroft, Jiroft, Iran

(*- Corresponding Authors Email: m.namjoo@ujiroft.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2026.100498.1519>

Introduction

Fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) is a widely cultivated medicinal and aromatic plant valued in the food, pharmaceutical, and traditional medicine industries for its phosphorus, potassium, calcium, and fatty acid content, as well as its antimicrobial, antifungal, hypolipidaemic, and hepatoprotective properties. Because germination directly determines field stand density and crop establishment, rapid and uniform germination is essential for efficient production. Seed-coat impermeability and endogenous growth-inhibiting compounds, however, frequently delay water uptake and reduce germination vigour, particularly in the arid and semi-arid regions typical of fennel cultivation.

Non-chemical physical pretreatments, including cold plasma, ultrasound, and magnetic fields, have emerged as environmentally friendly alternatives capable of enhancing germination without damaging the seed. Cold plasma generates reactive oxygen and nitrogen species that modify seed-surface roughness and hydrophilicity, facilitating water absorption. Ultrasound induces cavitation and pressure oscillations that create micro-channels in the seed coat, improving mass transfer. Magnetic fields interact with polar molecules and cellular ions, potentially stimulating metabolic and enzymatic activity. Although the independent effects of each technology have been studied in several crops, information on their combined and interactive effects on fennel seed germination remains limited. This study therefore aimed to evaluate, model, and optimise the germination and early seedling-growth indices of fennel seed exposed to cold plasma pretreatment followed by simultaneous magnetic field ultrasound treatment, using Response Surface Methodology.

Materials and Methods

A combined magnetic field-ultrasound generation system was designed and constructed at the University of Jiroft, Iran. The ultrasound unit operated at 20 kHz, and the magnetic-field unit generated magnetic intensities up to 450 mT. A separate low-pressure cold-plasma reactor, operating at 15,000 V between two high-voltage electrodes, was used for seed pretreatment.

Experiments followed a “3 × 3 × 3” factorial design based on a completely randomised design with three replications (27 treatments, 81 experimental units). The independent variables were cold plasma pretreatment time (CPT: 0, 1, 2 min), ultrasound power (USp: 0, 60, 120 W), and magnetic field intensity (MFi: 150, 300, 450 mT). Pretreated seeds were incubated on moistened filter paper at 25 ± 1 °C for 14 days. Daily counts allowed for the calculation of seven responses: germination percentage (GP), germination rate (GR), mean germination time (MGT), shoot length (SL), root length (RL), shoot weight (SW), and root weight (RW). ANOVA and Duncan's test ($P < 0.05$) were performed in SPSS 26; second-order polynomial models relating the independent variables to each response were developed and optimised via a desirability-function approach in Design-Expert 13, and response surfaces and heatmaps were generated in MATLAB R2017a.

Results and Discussion

Cold plasma pretreatment time was the most influential factor ($p < 0.01$) for all seven responses, followed by ultrasound power, which was also highly significant for every trait. Magnetic field intensity was significant only for shoot weight and had a negligible effect on the remaining indices. The CPT × USp interaction was significant for most traits, confirming a synergistic relationship between plasma and ultrasound, whereas interactions involving the magnetic field were largely non-significant.

All responses followed a non-linear (hormetic) pattern with respect to plasma exposure: 1 min of pretreatment produced the best performance, while extending exposure to 2 min reduced germination and growth, likely due to

oxidative stress and membrane damage at higher doses. Germination percentage reached 85–87% following 1 min of cold plasma pretreatment combined with 60 W ultrasound, compared with 65–68% after 0- and 2-min plasma pretreatments. The same combination produced the highest germination rate (~ 6 seeds day⁻¹), the shortest mean germination time (5-6 days versus 8-9 days without plasma), and the greatest shoot length (42-48 mm), root length (25-26 mm), shoot weight (~ 37 -38 mg), and root weight, indicating a clear synergy between plasma-induced surface modification and ultrasound-induced cavitation. Ultrasound at 120 W did not outperform 60 W in most cases, and magnetic field intensity produced no consistent significant trend for most traits.

Second-order polynomial models with significant linear and quadratic terms for plasma (and, for several traits, ultrasound) adequately described all responses, confirming an optimum plasma dose beyond which benefits diminish. Multi-response optimisation via the desirability function identified an overall optimum at approximately 1.04 min cold plasma, 63.7 W ultrasound, and 231 mT magnetic field, yielding a predicted GP of 84.13%, GR of 5.71 seeds day⁻¹, and MGT of 5.60 days, with an overall desirability of 0.859.

Conclusion

Cold plasma pretreatment was the dominant factor governing fennel seed germination and early growth, exhibiting a hormetic response with an optimum near 1 minute. Ultrasound, particularly at 60 W, acted as an effective complementary treatment, and its interaction with plasma produced synergistic improvements across all indices. Magnetic field intensity played only a minor, largely non-significant role. The developed models and the desirability-based optimum (≈ 1.04 min plasma, 63.7 W ultrasound, 231 mT magnetic field) provide a validated, chemical-free strategy for enhancing fennel seed germination and early growth, offering practical guidance for improving stand establishment in commercial fennel production.

Acknowledgement

The authors would like to express their sincere gratitude to the University of Jiroft for providing financial and technical support for this research.

Keywords: Cold plasma, Fennel, Magnetic field, Response surface methodology, Ultrasound

ارزیابی، مدل‌سازی و بهینه‌سازی پاسخ‌های جوانه‌زنی بذر رازیانه به تیمار امواج فراصوت -

میدان مغناطیسی و پیش‌تیمار پلاسمای سرد

فاطمه گوری بمی^۱، مسلم نامجو^{۱*}، محمدرضا کماندار^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

چکیده

هدف از این پژوهش، مدل‌سازی، ارزیابی و بهینه‌سازی شاخص‌های جوانه‌زنی بذر رازیانه با استفاده از تیمارهای فیزیکی ترکیبی شامل پیش‌تیمار پلاسمای سرد، امواج فراصوت و میدان مغناطیسی بود. به‌منظور دستیابی به این هدف، سامانه ترکیبی تولید میدان مغناطیسی - امواج فراصوت ساخته شد و آزمایش‌ها بر اساس طرح فاکتوریل با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) طراحی گردید. متغیرهای مستقل شامل زمان پیش‌تیمار پلاسمای سرد (۰، ۱ و ۲ دقیقه)، توان امواج فراصوت (۰، ۶۰ و ۱۲۰ وات) و شدت میدان مغناطیسی (۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ میلی‌تسلا) بودند. شاخص‌های مورد ارزیابی شامل درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، میانگین زمان جوانه‌زنی، طول ساقچه‌چه و ریشه‌چه و وزن تر ساقچه‌چه و ریشه‌چه بودند. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که پلاسمای سرد و امواج فراصوت اثرات بسیار معنی‌داری ($p < 0.01$) بر اکثر شاخص‌ها داشتند، در حالی که میدان مغناطیسی در بیشتر موارد اثر معنی‌داری نداشت. برهم‌کنش پلاسمای سرد و فراصوت نیز در بسیاری از صفات معنی‌دار بود که حاکی از اثر هم‌افزایی این دو تیمار است. مدل‌های ریاضی چندجمله‌ای درجه دوم با ضریب تبیین بالا، توانایی خوبی در پیش‌بینی پاسخ‌ها نشان دادند. شرایط بهینه بر اساس شاخص مطلوبیت برابر با ۰/۸۶ شامل حدود ۱/۰۴ دقیقه پلاسمای سرد، ۶۳/۶۷ وات فراصوت و شدت میدان مغناطیسی حدود ۲۳۰ میلی‌تسلا به‌دست آمد که در این شرایط درصد جوانه‌زنی حدود ۸۴/۱۳٪، سرعت جوانه‌زنی ۵/۷۱ بذر در روز و میانگین زمان جوانه‌زنی ۵/۶۰ روز پیش‌بینی شد.

واژه‌های کلیدی: پلاسمای سرد، رازیانه، فراصوت، مدل‌سازی سطح پاسخ، میدان مغناطیسی

مقدمه

می‌آید، زیرا نقش عمده‌ای در تعیین تراکم نهایی مزرعه دارد بنابراین جوله‌زدن و استقرار مناسب گیاهچه اصولاً به‌عنوان یک عامل تعیین‌کننده در میزان عملکرد به‌حساب می‌آید (Li, Guan, & Probert, 2007). بذرهای بیشتر گیاهان به علت سازگاری اکولوژیکی با شرایط سخت محیطی دارای انواع خواب هستند. خواب به‌وجودآمده به علت نفوذناپذیری پوشش‌های بذر یکی از دلایل عمده در عدم جوانه‌زنی بذر در گیاهان مختلف است. از طرفی دیگر وجود مواد شیمیایی بازدارنده رشد در پوسته بذر طی نمو و باقی ماندن آن‌ها در بذر حتی بعد از برداشت عاملی تأثیرگذار بر عدم جوانه‌زنی می‌باشد (Obembe & Agboola, 2008). به‌طور کلی برای بذرهای گیاهان باید شرایطی فراهم شود تا رطوبت و اکسیژن را به سرعت به خود جذب کرده، خواب بذر شکسته شده و در اثر فعل و انفعالاتی که در آن‌ها رخ می‌دهد شروع به جوانه‌زنی کنند. یکی از روش‌های دستیابی به این هدف استفاده از پلاسمای سرد، امواج فراصوت و میدان مغناطیسی بدون استفاده از مواد شیمیایی و آسیب رساندن به بذر

رازیانه با نام علمی *Foeniculum vulgare* Mill. متعلق به خانواده چتریان، یکی از گیاهان دارویی بومی ایران است که استفاده‌های فراوانی در صنایع غذایی و دارویی دارد. دانه رازیانه سرشار از فسفر، پتاسیم و کلسیم بوده و نیز مقادیر بالایی از اسیدهای چرب مفید و ویتامین‌ها را دارا می‌باشد. رازیانه دارای خواص ضد میکروبی، ضد قارچی، ضد سرطان، ضد دیابت، بهبوددهنده عملکرد دستگاه گوارش، محافظت از کبد، کاهنده چربی خون و ضد اسپاسم عضلانی می‌باشد (Mehra, Tamta, & Nand, 2021). یکی از عمده‌ترین تنگناهای تولید گیاهان دارویی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مشکل کمبود آب است که این امر به‌ویژه در مرحله جوله‌زنی حایز اهمیت است. بذرهایی که زودتر جوانه زده و زودتر مستقر می‌شوند، کارایی بالایی در جذب آب و استفاده بهینه از مواد مغذی خاک دارند. مرحله جوانه‌زنی یکی از مراحل حساس در چرخه رشدی گیاهان به حساب

* نویسنده مسئول: (Email: m.namjoo@ujiroft.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2026.100498.1519>

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت،

جیرفت، ایران

می‌باشد (Rifna, Ramanan, & Mahendran, 2019). پیش‌تیمار روشی است که به‌واسطه آن بذرها پیش از قرارگرفتن در بستر خود، به لحاظ فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی آمادگی بیشتری برای جوانه‌زنی را به‌دست می‌آورند. پیش‌تیمار بذر با استفاده از روش‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی انجام می‌شود که استفاده از پلاسما به‌عنوان روشی جدید برای پیش‌تیمار بذر در گیاهان مختلف مد نظر قرار گرفته است. پیش‌تیمار فیزیکی بذر با پلاسمای سرد و فراصوت، به دلیل کنترل‌پذیری بالاتر، سرعت عمل بیشتر، عدم نیاز به مصرف آب و خشک‌سازی مجدد، افزایش آبدوستی، آسیب فیزیکی کمتر به بذر، اثر جانبی ضد عفونی‌کنندگی و قابلیت ترکیب‌پذیری برای ایجاد اثرات هم‌افزا، جایگزینی کارآمدتر و سازگارتر با محیط‌زیست نسبت به روش سنتی هیدروپرایمینگ محسوب می‌شود (Rifna *et al.*, 2019). پلاسمای سرد یکی از فناوری‌های نوظهور در پیش‌تیمار بذر است که از طریق برهم‌کنش گونه‌های فعال با سطح بذر می‌تواند ویژگی‌های سطحی و نفوذپذیری پوسته را تغییر دهد. ایجاد ریزترک‌ها و تغییر ساختار سطح بذر، افزایش جذب آب و مواد معدنی و کاهش بار میکروبی سطح بذر از جمله اثرات گزارش‌شده این تیمار هستند که می‌توانند به افزایش سرعت جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاهچه منجر شوند (Sera, Stranák, Serý, Tichý, & Spatenka, 2008). همچنین، سرعت عمل، کاهش استفاده از مواد شیمیایی و سازگاری نسبی با محیط‌زیست، پلاسمای سرد را به گزینه‌ای مناسب برای توسعه روش‌های نوین پیش‌تیمار بذر تبدیل کرده است. امواج فراصوت نیز با ایجاد نوسانات متوالی فشار و پدیده‌های مکانیکی در بذر، می‌توانند انتقال جرم و جذب آب را تسهیل کنند. چرخه‌های متناوب انقباض و انبساط بافت، ایجاد ریزمنافذ و کانال‌ها و کاهش مقاومت لایه مرزی، از سازوکارهای مؤثر در افزایش نفوذ آب به بذر محسوب می‌شوند (Namjoo, Dibagar, Golbakhshi, Figiel, & Masztalerz, 2024). افزایش جذب آب، به‌عنوان یکی از نخستین مراحل جوانه‌زنی، موجب فعال شدن فرایندهای متابولیکی و آنزیمی شده و می‌تواند سرعت و درصد جوانه‌زنی و استقرار اولیه گیاهچه را بهبود دهد؛ روش‌های پیشین بهبود جذب آب و جوانه‌زنی بذر معمولاً بر یک مکانیسم مشخص متکی هستند و اثربخشی آن‌ها می‌تواند با محدودیت‌هایی مانند آسیب به ساختار بذر، دشواری کنترل دما یا وابستگی شدید به گونه گیاهی همراه باشد. در مقابل، روش پیشنهادی این پژوهش با ترکیب هم‌زمان پلاسمای سرد، فراصوت و میدان مغناطیسی، از سه سازوکار مکمل شامل اصلاح سطح و افزایش آبدوستی پوسته، ایجاد ریزکانال‌های ناشی از کاویتاسیون و تحریک فرایندهای زیستی و آنزیمی بهره می‌گیرد. این رویکرد چندمکانیسمی و هم‌افزا، بدون نیاز به مصرف آب و تولید پساب و در مدت‌زمان کوتاه، توانست شاخص‌های رشد بذر رازیانه را بهبود دهد و ظرفیت بالای فناوری ترکیبی را نسبت به کاربرد منفرد روش‌های متداول نشان دهد

(Rifna *et al.*, 2019). میدان مغناطیسی نیز به‌عنوان یک محرک فیزیکی غیرشیمیایی می‌تواند از طریق برهم‌کنش با یون‌ها، مولکول‌های قطبی و اجزای سلولی بر فرایندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی بذر اثرگذار باشد. مطالعات نشان داده‌اند که میدان‌های مغناطیسی در شرایط مناسب می‌توانند فرایندهای متابولیکی، انتقال مواد و جوانه‌زنی را تحت تأثیر قرار دهند؛ با این حال، شدت میدان و مدت زمان اعمال آن از عوامل مهم تعیین‌کننده پاسخ بذر هستند (Hassanpour, 2025; Maleki Farahani, Rezazadeh, & Aghighi Shahverdi, 2015). از این رو، تعیین شرایط مناسب اعمال میدان مغناطیسی برای دستیابی به بیشترین اثر تحریک‌کنندگی ضروری است.

با وجود مطالعات انجام‌شده درباره اثرات مستقل پلاسمای سرد بر برخی شاخص‌های جوانه‌زنی دانه‌های کلزا (Puligundla, Kim, & Mok, 2017)، ماش (Sadhu, Thirumdas, Deshmukh, & Annapure, 2017)، برنج (Yodpitak *et al.*, 2019)، ریحان (Singh, Bourke, 2019)، سوپا (Prasad, Mohan, Verma, & Kumar, 2019)، امواج فراصوت بر برخی شاخص‌های جوانه‌زنی دانه‌های جو (Yaldagard, Mortazavi, & Tabatabaie, 2008a)، کنجد (Shekari, Mustafavi, & Abbasi, 2015)، لوبیای سبز (Chiu, Machikowa, & Sung, 2014)، یونجه (Toth, 2012)، آفتابگردان (Kulrattanarak, & Wonprasaid, 2013)، نخود، هندوانه، گندم، فلفل (Goussous, Samarah, Alqudah, & Othman, 2010)، زیره سبز (Namjoo, Moradi, Dibagar, Taghvaei, & Niakousari, 2022)، لوبیای قرمز (Younesian, Ajam Norouzi, 2017)، سوپا (Lo Porto *et al.*, 2018)، نیشکر (Zeng *et al.*, 2023)، گوجه‌فرنگی (Moghaddam, & Ommani, 2019)، و میدان مغناطیسی بر برخی شاخص‌های جوانه‌زنی دانه‌های نخود (Vashisth & Nagarajan, 2008)، آفتابگردان (Vashisth & Nagarajan, 2010)، جعفری (Rafiei, Khoshnam, Dowlati, Soleimani, & Namjoo, 2023)، سوپا (Shine, Guruprasad, & Anand., 2011)، تربچه (Konefał-Janocha *et al.*, 2018)، گوجه‌فرنگی (Shalaby, El-Gizawy, Khalf, & El-Satar, 2011)، باقلا (Rajendra *et al.*, 2005)، ماش (Reddy, Reshma, Jareena, & Nagaraju, 2012)، ذرت (Anand *et al.*, 2012) و خیار (Bhardwaj, Anand, & Nagarajan, 2012)، اطلاعات محدودی درباره اثر هم‌زمان این عوامل و برهم‌کنش میان آن‌ها بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر رازیانه وجود دارد. جوانه‌زنی بذر رازیانه تحت تأثیر عوامل مختلف فیزیولوژیکی، ژنتیکی و محیطی قرار دارد. وجود خواب مورفوفیزیولوژیکی و توسعه‌نیافتگی نسبی جنین، همراه با حساسیت به

یک سامانه ترکیبی تولید میدان مغناطیس- امواج فراصوت در دانشکده کشاورزی دانشگاه جیرفت ساخته شد و برای اعمال میدان مغناطیسی و امواج فراصوت بر بذره‌های رازیانه از این دستگاه استفاده شد. شکل ۱ تصویری واقعی و شماتیک از سیستم ترکیبی تولید میدان مغناطیس- امواج فراصوت را نشان می‌دهد. این سامانه از یک واحد فراصوت با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و یک واحد تولید میدان مغناطیس تشکیل شده بود. برای ساخت سیم‌پیچ هلمهولتز^۲، ابتدا دو قالب قرقره‌ای شکل از جنس تفلون (PTFE) تهیه گردید و سیم مسی لایه‌ای با کشش مناسب و به‌صورت کاملاً منظم و لایه‌لایه بر روی هر یک از قالب‌ها پیچیده شد. سپس دو سیم‌پیچ تولیدشده، هم‌مرکز و هم‌محور، بر روی یک محور غیرفلزی قرار گرفتند. در ادامه، سیم‌پیچ‌ها به‌صورت سری به منبع تغذیه جریان مستقیم متصل شدند تا جریان الکتریکی یکسان از هر دو عبور کرده و میدان‌های مغناطیسی حاصله در ناحیه مرکزی با یکدیگر هم‌جهت شده و جمع شوند (شکل ۱). جهت دریافت حداقل و حداکثر شدت میدان مغناطیس، هر بوبین از سه لایه سیم تشکیل شده بود. یعنی هر بوبین سه ورودی و سه خروجی دارد. لایه اول که کمترین شدت میدان را تولید می‌کند ۴۵۰ دور و لایه دوم با ۶۵۰ دور و لایه سوم با ۱۱۵۰ دور سیم، بیشترین شدت میدان را تولید می‌کند. شدت میدان خروجی از هر سیم‌پیچ بستگی به عواملی از قبیل میزان جریان عبوری از هر سیم‌پیچ و تعداد دورهای آن دارد، به‌طوری‌که با افزایش جریان و تعداد دور هر سیم‌پیچ، میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد. با استفاده از رابطه (۱) میزان شدت میدان سیم‌پیچ قابل محاسبه است:

$$B = (8\mu_0 NI) / (\sqrt{125R}) \quad (1)$$

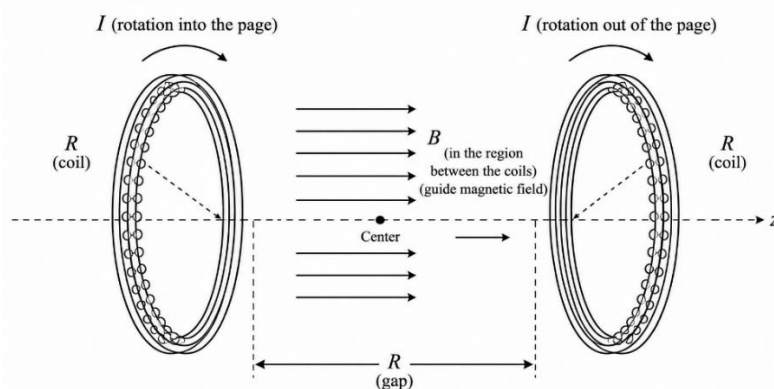
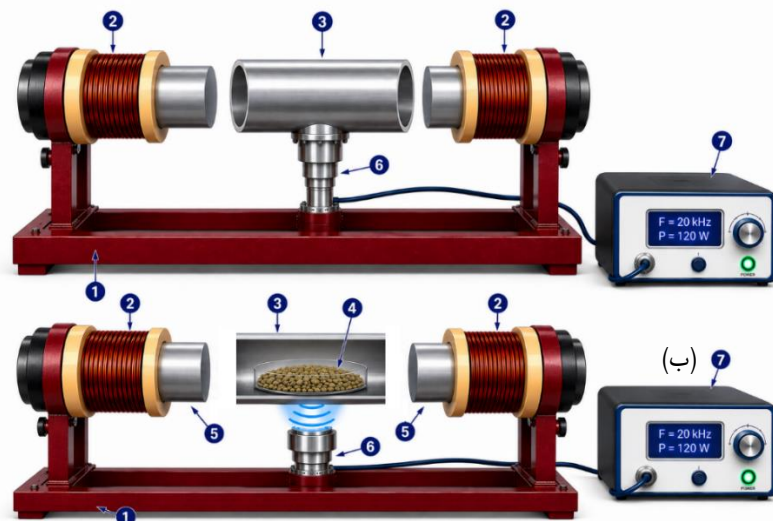
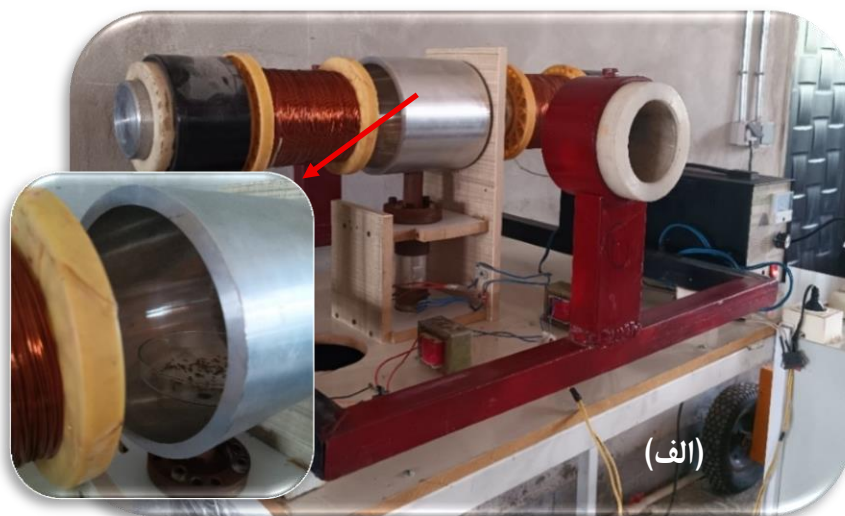
که در آن R شعاع سیم‌پیچ، B شدت میدان مغناطیسی بر حسب تسلا (Tesla)، μ_0 ضریب نفوذپذیری مغناطیسی خلأ و برابر با $4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$ شدت جریان الکتریکی عبوری از سیم‌پیچ بر حسب آمپر (A) و N تعداد دورهای سیم‌پیچ می‌باشد. این سیم‌پیچ‌ها بر روی هسته آلومینیومی قرار گرفته و در نهایت بر روی شاسی نگهدارنده دستگاه نصب شده‌اند. از یک هسته آلومینیومی برای ایجاد میدان مغناطیسی در میان هر سیم‌پیچ و داخل قرقره استفاده شد. در میان قرقره‌ی هر بوبین از یک هسته‌ی آلومینیومی توپر با مقطع دایره‌ای شکل به قطر ۸۸ میلی‌متر و طول ۳۰۰ میلی‌متر استفاده شد که در داخل قرقره به‌راحتی حرکت می‌کند. به‌منظور تأمین توان الکتریکی مورد نیاز برای تولید میدان مغناطیسی، از دو عدد ترانسفورماتور کاهنده ۱۲ ولت استفاده شد که در نهایت به کمک ۴ دیود به ولتاژ مستقیم (DC) تبدیل می‌شود. جریان عبوری از سیم‌پیچ‌ها در دامنه ۱ تا حداکثر ۳ آمپر و فاصله حدودی بین دو سیم‌پیچ در آزمایش‌ها حدود ۱۵ سانتی‌متر بود.

دماهای نامناسب، کمبود آب و تنش اسمزی و شوری، می‌تواند درصد، سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی و بنبه گیاهچه را کاهش دهد. علاوه بر این، تفاوت‌های ژنوتیپی و اکوتیپی، کیفیت و منشأ بذر، موقعیت تشکیل بذر در چتر و شرایط محیطی گیاه مادری در زمان تشکیل بذر نیز بر توان جوانه‌زنی مؤثر هستند. بنابراین، توسعه روش‌های سریع، غیرشیمیایی و مؤثر برای کاهش محدودیت‌های جوانه‌زنی و بهبود جذب آب و فعالیت‌های فیزیولوژیکی بذر رازیانه ضروری به نظر می‌رسد و فناوری‌های فیزیکی نوین می‌توانند در این زمینه راهکارهای امیدوارکننده‌ای ارائه دهند (Beyk-Khormizi, Hosseini, Sarghein, Sarafraz-Ardakani, Mousavi-Kouhi, & Ganjeali, 2023; Hashemirad, Soltani, Izadi-Darbandi, & Alahdadi, 2023; Mohammadi, Pouryousef, & Farhang, 2023). از نظر فرایندی، ترکیب این فناوری‌ها می‌تواند اثرات مکملی ایجاد کند؛ به‌گونه‌ای که اصلاح ویژگی‌های سطح بذر توسط پلاسما سرد، تسهیل انتقال آب و جرم تحت تأثیر امواج فراصوت و تحریک فرایندهای فیزیولوژیکی توسط میدان مغناطیسی، به‌صورت هم‌زمان فرایند جوانه‌زنی را تحت تأثیر قرار دهند. با این حال، وجود چندین متغیر مؤثر و احتمال برهم‌کنش میان آن‌ها، تعیین شرایط بهینه را پیچیده می‌کند. در چنین شرایطی، روش سطح پاسخ (RSM^۱) می‌تواند به‌عنوان ابزاری مناسب برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی این فرایند چندمتغیره مورد استفاده قرار گیرد. این روش امکان بررسی اثرات مستقل و متقابل متغیرهای فرایند، توسعه مدل‌های تجربی، پیش‌بینی پاسخ‌ها و تعیین شرایط بهینه را فراهم می‌کند. مدل‌سازی شاخص‌های جوانه‌زنی همچنین می‌تواند با کمی‌سازی اثر عوامل مؤثر، شناخت بهتر روابط میان متغیرها و پاسخ‌ها و پیش‌بینی رفتار بذر در شرایط آزمایش‌نشده، به کاهش تعداد آزمایش‌ها و افزایش کارایی فرایند کمک کند.

بر این اساس، هدف پژوهش حاضر ارزیابی، مدل‌سازی و بهینه‌سازی شاخص‌های جوانه‌زنی بذر رازیانه در یک میدان ترکیبی مغناطیس- امواج فراصوت پس از پیش‌ تیمار با پلاسما سرد است. در این پژوهش، اثر زمان اعمال پلاسما سرد، شدت میدان مغناطیسی و توان امواج فراصوت بر شاخص‌های جوانه‌زنی بررسی و روابط بین متغیرهای مستقل و پاسخ‌ها با استفاده از روش سطح پاسخ مدل‌سازی می‌شود. در نهایت، شرایط بهینه ترکیب این عوامل به‌منظور دستیابی به وضعیت مطلوب جوانه‌زنی بذر رازیانه تعیین خواهد شد.

مواد و روش‌ها

سامانه ترکیبی تولید میدان مغناطیس- امواج فراصوت



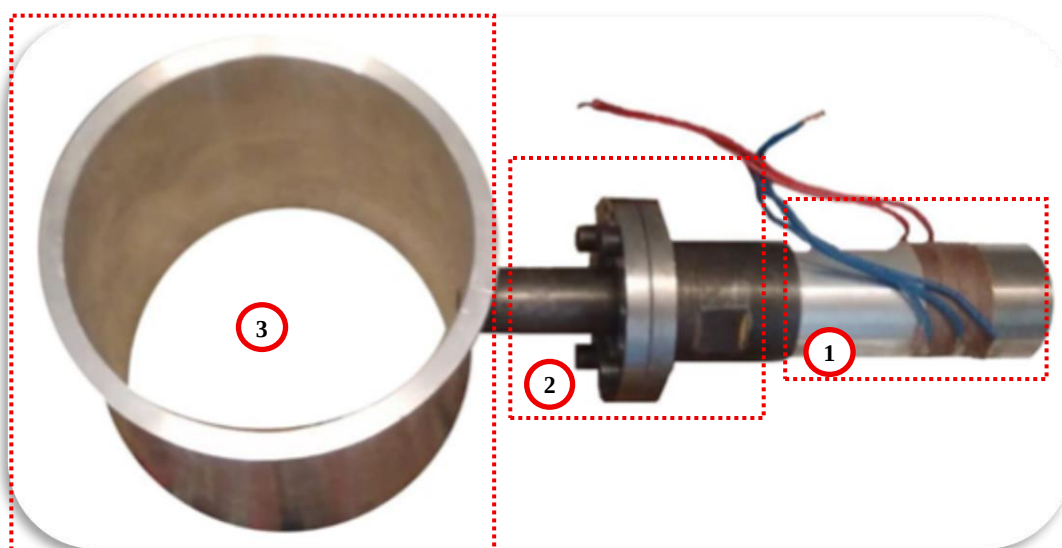
(ج)

شکل ۱- (الف) عکس واقعی دستگاه، **(ب)** شکل شماتیک دستگاه (دستگاه ترکیبی مجهز به امواج فراصوت و میدان مغناطیسی: ۱- شاسی نگهدارنده، ۲- سیم‌پیچ، ۳- رادیاتور مولد امواج فراصوت، ۴- بذر، ۵- هسته آلومینیومی، ۶- مبدل و ۷- ژنراتور فراصوت) و **(ج)** شکل شماتیک سیم‌پیچ‌های هلمهولتز و میدان مغناطیسی یکنواخت

Fig.1. (a) Photograph of the actual device, **(b)** schematic diagram of the device (combined ultrasound and magnetic field treatment system: 1- supporting chassis, 2- coil, 3- ultrasonic wave generator radiator, 4- seeds, 5- aluminium core, 6- transducer, and 7- ultrasound generator), and **(c)** schematic of Helmholtz coils producing a uniform magnetic field

سیگنال‌های تولیدشده توسط منبع تولید توان به لرزش است که برای تولید توان مکانیکی آکوستیکی استفاده می‌شوند. در واقع مبدل یک قطعه الکتروآکوستیک یا الکترومکانیکی است که در بسامدهای ۲۰ کیلوهرتز و یا بیشتر به کار گرفته می‌شوند. عملگر استوانه‌ای توخالی استفاده‌شده در این آزمایش (یک سیلندر آلومینیومی با طول ۱۵۶ میلی‌متر، قطر خارجی ۱۷۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر) وظیفه انتقال امواج فراصوت را به بذرهای رازیانه دارند (Golbakhshi, Namjoo, Kamandar, 2024).

در این سامانه واحد فراصوت (شرکت فراصوت زاگرس، ایران) از یک ژنراتور ۱۲۰ وات (شکل ۱، شماره ۷)، مبدل و عملگر (شکل ۲) تشکیل شده بود که با توجه به نیاز سیستم از یک واحد تقویت‌کننده امواج فراصوت نیز بین مبدل و عملگر استفاده شد. منبع تولید امواج فراصوت (شکل ۱ شماره ۷) اصلی‌ترین قسمت یک سیستم ماورای صوت است و وظیفه آن تبدیل ولتاژ ورودی ۲۲۰ ولت و بسامد ۵۰ هرتز به یک سیگنال الکتریکی ۱۰۰۰ ولت و بسامد برابر یا بیشتر از ۲۰ کیلوهرتز است. وظیفه مبدل‌های صوتی و فراصوت، تبدیل



شکل ۲- مجموعه (۱) مبدل، (۲) تقویت‌کننده و (۳) عملگر فراصوت استفاده‌شده در سامانه ترکیبی فراصوت- میدان مغناطیس
Fig. 2. Assembly of (1) the transducer, (2) the amplifier, and (3) the ultrasonic actuator used in the combined ultrasound-magnetic field system

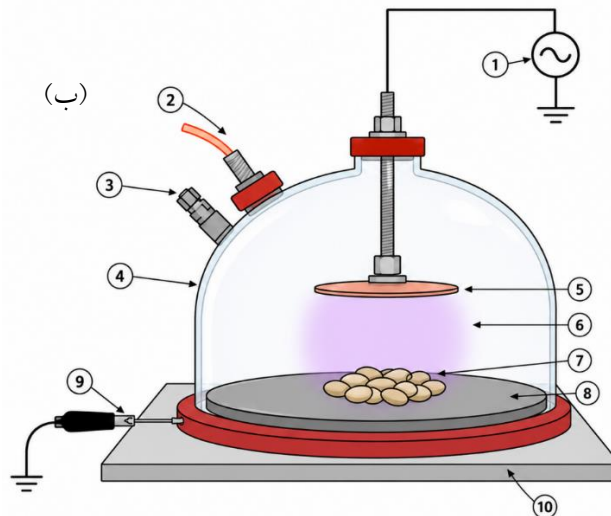
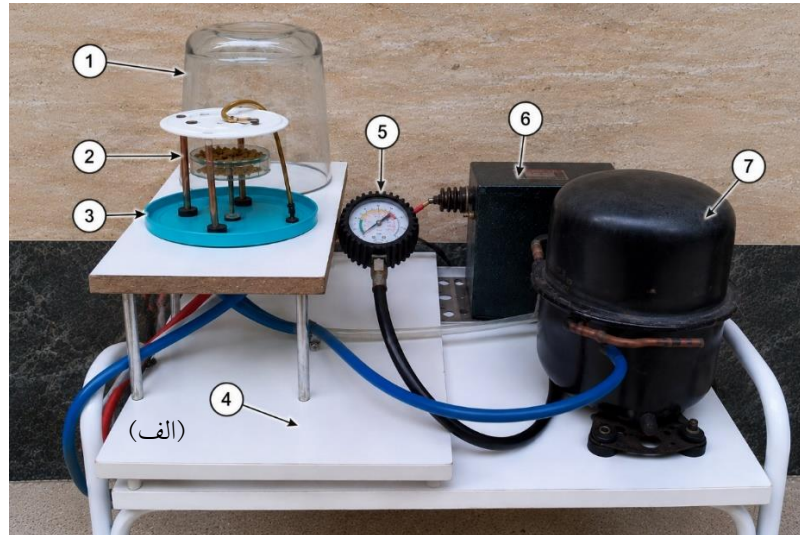
خروجی با جریان ۳۰ میلی‌آمپر) بود. در آزمایش مربوط به پلاسمادهی به بذرهای رازیانه با استفاده از پمپ خلا (موتور یخچال) در فضای راکتور (محفظه شیشه‌ای) خلا ایجاد شد، مقدار خلا اندازه‌گیری شده در حین آزمایش حدود ۱۰۰ میلی‌بار اندازه‌گیری شد. استفاده از شرایط خلا در تیمار پلاسمایی بذر، با افزایش مسیر آزاد میانگین ذرات، به الکترون‌ها اجازه می‌دهد تا پیش از برخورد، انرژی شتاب‌گیری کافی را کسب کنند که این امر موجب یونیزاسیون گاز و تشکیل پلاσμα در ولتاژهای بسیار پایین‌تری می‌شود. این محیط کم‌فشار، علاوه بر صرفه‌جویی در انرژی، از شکل‌گیری قوس‌های الکتریکی موضعی و سوزاندن جلویی کرده و پلاسمای را به صورت تابشی یکنواخت و حجمی در سراسر محفظه پخش می‌کند تا تمام سطوح بذر به طور مساوی تحت تأثیر قرار گیرند (Dai & Wang, 2013). همچنین، از

سامانه تولید پلاسمای سرد

در آزمایش‌های جولنه‌زنی، انتخاب بذرهای صحیح اهمیت زیادی دارد؛ زیرا کیفیت بذر مستقیماً بر نتایج آزمایش اثر می‌گذارد. پیش از انجام آزمون جولنه‌زنی، بذرهای از نظر سلامت ظاهری بررسی شده و بذرهای شکسته، چروکیده، نابالغ، آلوده به قارچ، آسیب‌دیده توسط حشرات و بذرهای دارای تغییر رنگ حذف شدند. سپس بذرهای سالم، یکنواخت از نظر اندازه، شکل و رنگ انتخاب و پس از تمیزسازی و در صورت نیاز ضدعفونی سطحی، برای انجام آزمایش‌های جولنه‌زنی مورد استفاده قرار گرفتند (Bradford, 2002). در شکل ۳، بذرهای رازیانه درون یک محفظه شفاف از جنس شیشه در بین دو الکترود با فاصله ۸ میلی‌متر قرار گرفتند و تحت تیمار پلاسمای سرد فشار پایین واقع شدند. منبع تغذیه این سامانه دارای توان ۴۵۰ W (۱۵۰۰ ولت

اصلاح کنند. با اعمال ولتاژ و فرکانس بالا بین الکترودها، تخلیه الکتریکی ایجاد شده و پلاسما تشکیل شد. حجم محفظه شیشه‌ای در این آزمایش ۷۵۰ میلی‌لیتر و ولتاژ ۱۵ kV و فرکانس ۵kHz برای ایجاد پلاسمای سرد اعمال شد (Namjoo, Moradi, Shi & Kong, 2005; Nematollahi, & Golbakhshi, 2025).

آن‌جا که در این شرایط عمده انرژی به الکترون‌ها منتقل شده و دمای ذرات سنگین‌تر پایین می‌ماند (پلاسمای سرد)، هیچ‌گونه آسیب حرارتی به ساختار حساس بذر وارد نمی‌شود و گونه‌های فعال شیمیایی تولید شده می‌توانند با پایداری و دقت بالا، بدون تخریب بافت زنده، خاصیت آبدوستی و نفوذپذیری پوسته بذر را برای تسریع جوانه‌زنی



شکل ۳- سامانه اعمال تیمار پلاسمای سرد بر بذرهای رازیانه؛ (الف) عکس واقعی ۱- محفظه شیشه‌ای، ۲- محفظه راکتور، ۳- درپوش محفظه شیشه‌ای، ۴- شاسی دستگاه، ۵- گیج فشار، ۶- منبع تغذیه و ۷- کمپرسور خلا و (ب) شکل شماتیک ۱- منبع تغذیه، ۲- ورودی گاز، ۳- اتصال به پمپ خلا، ۴- محفظه شیشه‌ای، ۵- الکترود بالایی، ۶- محل تشکیل پلاسمای سرد، ۷- بذر، ۸- الکترود پایینی، ۹- اتصال زمین و ۱۰- صفحه زیرین (شاسی)

Fig. 3. Cold plasma treatment system for fennel seeds; (a) actual photograph: 1- glass chamber, 2- reactor chamber, 3- glass chamber cover, 4- device chassis, 5- pressure gauge, 6- power supply, and 7- vacuum pump; and (b) schematic diagram: 1- power supply, 2- gas inlet, 3- connection to the vacuum pump, 4- glass chamber, 5- upper electrode, 6- cold plasma formation zone, 7- seeds, 8- lower electrode, 9- ground connection, and 10- bottom plate (chassis)

آماده‌سازی نمونه‌ها برای جوانه‌زنی

این پژوهش به منظور بررسی اثرات هم‌افزایی تیمارهای فیزیکی بر جوانه‌زنی بذر رازیانه در قالب یک آزمایش فاکتوریل $3 \times 3 \times 3$ بر پایه طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار انجام گرفت. در مجموع، ۲۷ تیمار آزمایشی تعریف گردید که با احتساب ۳ تکرار، در نهایت ۸۱ آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. بذرهای مورد استفاده در این تحقیق از شرکت پاکان بذر اصفهان با عنوان اکوتیپ اصفهان تهیه و به محل آزمایش در دانشگاه جیرفت منتقل شد. آزمایش‌ها در بهار ۱۴۰۵ انجام شد. رطوبت اولیه بذرهای به روش خشک کردن در آون (Oven-

Drying Method) با دمای 103°C درجه سانتی‌گراد و مدت زمان 24 ± 1 ساعت مشخص شد و رطوبت اولیه بذرهای 9.48 ± 1 (d.b %) به‌دست آمد. دما و رطوبت نسبی آزمایشگاه به ترتیب 25 ± 1 درجه سانتی‌گراد و 35 ± 1 ٪ اندازه‌گیری شد. به منظور پیش‌تیمار بذرهای رازیانه با پلاسمای سرد، نمونه بذرهای به‌صورت یکنواخت درون محفظه واکنش دستگاه پلاسما قرار گرفتند. وزن هر نمونه ۱ گرم (حدود ۱۵۰ عدد) بود. برخی از خواص فیزیکی بذر این اکوتیپ رازیانه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- برخی خواص فیزیکی بذر رازیانه اکوتیپ اصفهان

Table 1- Some physical properties of fennel seeds from the Isfahan ecotype

ویژگی Property	مقدار Quality
طول Length (mm)	6.43 ± 0.27
عرض Width (mm)	2.21 ± 0.19
ضخامت Thickness (mm)	1.93 ± 0.16
وزن هزار دانه Thousand-seed weight (g)	7.18 ± 0.43

بذرهای کشت شده است و از رابطه (۲) محاسبه شد:

$$GP = \left(\frac{N_g}{N_t} \right) \times 100 \quad (2)$$

که در آن N_g تعداد بذرهای جوانه‌زده نهایی و N_t تعداد کل بذرهای کشت‌شده در هر پتری‌دیش است. شاخص سرعت جوانه‌زنی ^{2} (GR) بیانگر تعداد بذر جوانه‌زده در واحد زمان است و با استفاده از رابطه (۳) محاسبه گردید:

$$GR = \sum \left(\frac{n_i}{t_i} \right) \quad (3)$$

که در آن n_i تعداد بذرهای جوانه‌زده در روز i -ام و t_i تعداد روزهای سپری‌شده از زمان کشت تا روز i -ام است. شاخص میانگین زمان جوانه‌زنی ^{3} (MGT) سرعت جوانه‌زنی را به‌صورت معکوس نشان داده و برای تعیین میانگین زمان مورد نیاز برای جوانه‌زنی استفاده می‌شود:

$$MGT = \frac{\sum (n_i \cdot t_i)}{\sum n_i} \quad (4)$$

پس از پایان دوره جوانه‌زنی (روز پایانی آزمایش)، ۱۰ گیاهچه به‌صورت تصادفی از هر پتری‌دیش انتخاب و اندازه‌گیری‌های طول و وزن ریشه‌چه و ساقچه‌چه انجام شد؛ طول ریشه‌چه (RL) و ساقچه‌چه^۴ (SL) با استفاده از کولیس دیجیتال (میژرینگ- مدل ۳۰۰، ساخت

دستگاه پلاسمای سرد مطابق با سطوح تعیین‌شده (۱ و ۲ دقیقه) فعال گردید. این مرحله به‌منظور تغییر در نفوذپذیری پوسته بذر و تحریک اولیه صورت پذیرفت. بلافاصله پس از تیمار پلاسما، بذرهای به دستگاه ترکیبی میدان مغناطیسی- امواج فراصوت منتقل شدند. در این مرحله، بذرهای درون پتری‌دیش‌های مخصوص قرار گرفته و تحت تأثیر هم‌زمان امواج فراصوت (در توان‌های ۶۰ و ۱۲۰ وات) و میدان مغناطیسی (در شدت‌های ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ میلی‌تسلا) قرار گرفتند. پس از اعمال تیمارهای فیزیکی، بذرهای بلافاصله به پتری‌دیش‌های حاوی بستر کشت (کاغذ صافی مرطوب با آب مقطر استریل) منتقل شده و در ژرمیناتور با دمای کنترل‌شده 25 ± 1 درجه سانتی‌گراد برای طی کردن دوره جوانه‌زنی (۱۴ روز) قرار گرفتند. پس از انتقال به ژرمیناتور، پایش بذرهای به‌صورت روزانه انجام شد. بذر زمانی جوانه‌زده محسوب می‌شد که ریشه‌چه آن حداقل ۲ میلی‌متر از پوسته خارج شده باشد. شمارش روزانه بذرهای تا زمان توقف کامل جوانه‌زنی ادامه یافت تا شاخص‌هایی نظیر درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی و میانگین زمان جوانه‌زنی با دقت محاسبه گردد. تمامی اندازه‌گیری‌ها به‌صورت روزانه تا زمان رسیدن به ثبات در جوانه‌زنی انجام شد. شاخص درصد جوانه‌زنی^۱ (GP) نشان‌دهنده نسبت بذرهای جوانه‌زده نهایی به کل

3- Mean Germination Time
4- Root And Shoot Length

1- Germination Percentage
2- Germination Rate

چین) با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. همچنین وزن تر هر بخش با استفاده از ترازوی دیجیتال آزمایشگاهی با دقت ۰/۰۰۱ گرم تعیین گردید.

مدل‌سازی و بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ

در این پژوهش، برای مدل‌سازی ریاضی و بهینه‌سازی فرایند، از روش سطح پاسخ و نرم‌افزار Design-Expert 13 استفاده گردید. با توجه به این‌که داده‌های تجربی از پیش موجود بودند، از بخش طرح سفارشی^۱ نرم‌افزار برای ورود و انتقال مجموعه داده‌های آزمایشگاهی و برازش مدل‌های رگرسیونی بر روی آن‌ها بهره‌گیری شد. مدل‌سازی با استفاده از رگرسیون چندجمله‌ای درجه دوم صورت گرفت و معنی‌داری ضرایب مدل و اثرات متقابل متغیرها از طریق تحلیل واریانس (ANOVA) در سطح اطمینان ۹۵٪ ($p\text{-value} < 0.05$) ارزیابی گردید. در این مرحله، یک مدل رگرسیونی معمولاً به صورت یک چندجمله‌ای از درجه دو برای تحلیل داده‌ها برازش می‌شود. این مدل می‌تواند به صورت رابطه (۵) نوشته شود:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \beta_{11} X_{12} + \beta_{22} X_{22} + \dots + \beta_{kk} X_{k2} + \sum_{i,j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (5)$$

در این مدل، Y پاسخ مورد نظر است، X_1, X_2, X_3 و X_k متغیرهای ورودی، $\beta_0, \beta_1, \beta_k$ ضرایب رگرسیون هستند که باید تعیین شوند و ε خطای مدل است. این معادله نشان‌دهنده تأثیرات اصلی فاکتورها و اثرات متقابل بین آن‌ها است. به طور کلی، درجه دو بودن مدل به این معنا است که علاوه بر اثرات اصلی فاکتورها، اثرات غیرخطی (مربوط به مربع فاکتورها) و اثرات متقابل نیز در مدل گنجانده می‌شود. مرحله نهایی در RSM بهینه‌سازی است که با استفاده از تابع مطلوبیت^۲ در نرم‌افزار، مقادیر بهینه متغیرهای ورودی تعیین گردید (Rafiei, Khoshnam, & Namjoo, 2025). در این مرحله، با استفاده از مدل ساخته‌شده، مقادیر بهینه برای فاکتورها (ورودی‌ها) تعیین می‌شود که منجر به بهترین نتیجه برای پاسخ (خروجی) می‌شود. هدف از این مرحله، به دست آوردن بهترین ترکیب از فاکتورها است که نتایج مطلوب یا نزدیک به بهینه را به دست دهد. آنالیزهای آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزارهای Matlab R2017a و Design-Expert 13 انجام شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ($P < 0.05$) صورت گرفت.

نتایج و بحث

جدول تجزیه واریانس ۲ نشان می‌دهد که زمان اعمال پلاسمای

سرد (CP_t) در سطح احتمال یک درصد بر تمامی هفت شاخص (درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، میانگین زمان جوانه‌زنی، طول ساقه‌چه، طول ریشه‌چه، وزن ساقه‌چه و وزن ریشه‌چه) کاملاً معنی‌دار بوده و بیشترین سهم تغییرات را به خود اختصاص داده است. توان امواج فراصوت (US_p) نیز در تمامی صفات در سطح یک درصد معنی‌دار بوده و نقش مکمل و تقویت‌کننده داشته است. شدت میدان مغناطیسی (MF_i) تنها بر وزن ساقه‌چه معنی‌دار بوده و در شش شاخص دیگر غیرمعنی‌دار ارزیابی شده است. عدم معنی‌داری اثر میدان مغناطیسی احتمالاً به کاهش شدت میدان مؤثر در محل قرارگیری بذرها مربوط می‌شود. قرارگیری پتری‌دیش در مرکز رادیاتور استوانه‌ای سامانه فراصوت، فاصله بذرها از سیم‌پیچ‌ها را افزایش داده و در نتیجه شدت میدان مغناطیسی مؤثر بر نمونه‌ها را کاهش داده است. از این رو، شدت میدان در محل واقعی بذرها ممکن است برای ایجاد تغییرات فیزیولوژیکی قابل تشخیص کافی نبوده باشد. برهم‌کنش دوگانه پلاسمای و فراصوت ($CP_t \times US_p$) در اکثر صفات (به جز برخی موارد ضعیف‌تر) معنی‌دار بوده و وجود اثر هم‌افزایی بین این دو عامل را تأیید می‌کند. سایر برهم‌کنش‌های مربوط به میدان مغناطیسی ($CP_t \times MF_i$)، ($US_p \times MF_i$) و اثر سه‌گانه عمدتاً غیرمعنی‌دار بوده‌اند که نشان‌دهنده نقش بسیار محدود این فاکتور در محدوده آزمایشی است. اعمال پلاسمای و همچنین اثر مثبت فراصوت عمدتاً از طریق پدیده کاویتاسیون و افزایش تخلخل پوسته بذر موجب معنی‌دار شاخص‌ها شده است. توجه احتمالی برای این امر می‌تواند این باشد که اثرات مکانیکی ایجادشده توسط فراصوت، سوراخ‌های کوچک متعددی را روی پوشش و شکاف‌هایی روی پریکارپ ایجاد کرده است که منجر به افزایش قابل توجه رطوبت نهال‌ها شده است (Yaldagard et al., 2008b). در مورد افزایش عملکرد جوانه‌زنی کنگد با دستگاه فراصوت ۲۰ کیلوهرتز، نمونه‌هایی که در معرض مدت زمان تیمار ۱۰ و ۲۰ دقیقه قرار گرفتند، افزایش سطح جوانه‌زنی را نشان دادند. این امر با شکاف‌های ایجادشده روی پوشش محافظ اطراف پریکارپ و بذر پس از تیمار و افزایش رطوبت گیاهچه توضیح داده شد (Shekari et al., 2015). غلبه فراصوت ممکن است به دلیل ظرفیت نگهداری بالا و تخلخل بالا باشد که باعث افزایش دسترسی به اکسیژن می‌شود (Namjoo et al., 2022). شریفی‌فر و همکاران (Sharififar, Nazari, & Asghari, 2015) پاسخ فراصوت را بر جوانه‌زنی گونه‌های دارویی؛ علف شور، کبر و زیره بررسی کردند. فراصوت جوانه‌زنی را در بذرها تیمارشده به ترتیب تا ۲۸٪، ۳۵/۷٪ و ۳۶٪ نسبت به بذرها تیمارنشده افزایش داد. وانگ و همکاران (Wang

به طوری که جوانه زنی و رشد اولیه ریشه بذرهای پیر در شرایط تاریکی تحریک شد، در حالی که جوانه زنی بذرهای جوان در شرایط روز بلند (Long-day) کاهش یافت. همچنین، تیمار میدان الکترومغناطیسی موجب تحریک رشد ریشه و کاهش رشد ساقه گیاهچه های حاصل از بذرهای جوان شد و تغییراتی در یکپارچگی غشا، رنگیزه های فتوسنتزی و فیتوهورمون ها ایجاد کرد (Pawełek et al., 2022). در مطالعه دیگری، اثر شدت های مختلف میدان الکترومغناطیسی و زمان های متفاوت تیمار بر ویژگی های جوانه زنی سه گونه یونجه یک ساله و علف هرز سس (*Cuscuta monogyna*) بررسی شد. نتایج نشان داد که تیمارهای میدان الکترومغناطیسی تأثیر معنی داری بر درصد جوانه زنی، طول و جرم ساقه، وزن خشک گیاهچه و شاخص بنیه بذر سس داشتند و با افزایش شدت میدان، شاخص بنیه و وزن خشک گیاهچه سس کاهش یافت. در مقابل، افزایش شدت میدان الکترومغناطیسی در گونه های یونجه یک ساله موجب افزایش سرعت و درصد جوانه زنی و طول ساقه شد و بیشترین جوانه زنی در شدت ۱۲۸ میکروتسلا و زمان تیمار ۱۰ دقیقه مشاهده گردید (Balouchi & Modarres Sanavy, 2009). میانگین مربعات خطای بسیار پایین در تمامی صفات، دقت بالای آزمایش و یکنواختی مناسب تکرارها را تأیید می کند. به طور کلی، پلاسما ی سرد و فراصوت به عنوان دو عامل فیزیکی کلیدی در بهبود جوانه زنی و رشد اولیه بذر رازیانه عمل کرده اند. میدان مغناطیسی در دامنه ۱۵۰ تا ۴۵۰ میلی تسلا توانسته است تغییر قابل توجهی در رفتار بیولوژیکی بذر ایجاد کند. این نتایج اهمیت تنظیم دقیق زمان پلاسما و شدت فراصوت را برای دستیابی به حداکثر عملکرد جوانه زنی و رشد گیاهچه برجسته می سازد.

(et al., 2012) گزارش دادند که سطح جوانه زنی علف سویچ گراس^۱ پس از اعمال فراصوت از ۶۶/۹٪ به ۹۰/۱٪ افزایش یافت. عدم معنی داری میدان مغناطیسی در بیشتر صفات با یافته های برخی مطالعات پیشین هم خوانی دارد که اثر این عامل را وابسته به گونه گیاهی، شدت و مدت تیمار می دانند (Pawełek et al., 2022). در برخی پژوهش ها، مواجهه بذر یا گیاهچه با میدان مغناطیسی یا الکترومغناطیسی با کاهش شاخص های جوانه زنی و رشد اولیه همراه بوده است؛ به عنوان نمونه، ارز و ازبک (Erez & Özbek, 2024) گزارش دادند بذرهای گندم (*Triticum turgidum* L.) که تحت تیمار ۱۲/۵ و ۲۵ میلی تسلا قرار گرفته بودند، درصد جوانه زنی و طول ریشه آن ها کاهش یافت. گنزالز- ویدال و همکاران (González-Vidal, Mercado-Sáenz, Burgos-Molina, Sendra-Portero, & Ruiz-Gómez, 2022) با مطالعه بر سوخ های پیاز (*Allium cepa* L.) که در معرض مغناطیسی پالسی قرار گرفته بودند، گزارش دادند که در نمونه های قرار گرفته در معرض میدان مغناطیسی پالسی (۱۴±۶) ریشه در روز اول تا ۲۱±۸ در روز چهارم) ریشه های کمتری نسبت به گروه های کنترل (۳۲±۱۷ تا ۴۸±۲۳) رشد کردند و قرار دادن سوخ های پیاز در معرض میدان مغناطیسی پالسی با فرکانس ۲۵ هرتز و شدت ۱/۵ میلی تسلا به مدت ۳۳ ساعت، باعث کاهش جوانه زنی و رشد ریشه ها در پیاز می شود. در مطالعه دیگری، اثر میدان الکترومغناطیسی با فرکانس ۵۰ هرتز و شدت ۷ میلی تسلا بر جوانه زنی و رشد اولیه بذرهای جوان و پیر باقالا (*Vicia faba* L.) تحت شرایط مختلف محیطی بررسی شد. نتایج نشان داد که پاسخ بذرها به تیمار میدان الکترومغناطیسی به سن بذر و شرایط رشد وابسته است؛

جدول ۲- میانگین مربعات تجزیه واریانس اثر زمان اعمال پلاسما ی سرد، توان فراصوت، میدان مغناطیسی و برهم کنش آن ها بر شاخص های جوانه زنی و رشد بذر

Table 2- Mean squares of analysis of variance for the effects of cold plasma treatment time, ultrasound power, magnetic field intensity, and their interactions on fennel seed germination and growth indices

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی d.f.	درصد جوانه زنی GP	سرعت جوانه زنی GR	میانگین زمان جوانه زنی MGT	طول ساقه چه SL	طول ریشه چه RL	وزن ساقه چه SW	وزن ریشه چه RW
CP _t	2	2245.778**	19.898**	42.006**	1376.920**	177.271**	1047.208**	525.640**
US _p	2	153.444**	8.031**	6.269**	335.476**	51.614**	281.314**	75.669**
MF _i	2	0.778ns	0.006ns	0.150ns	2.946ns	0.521ns	1.268**	0.078ns
CP _t × US _p	4	13.444**	0.472**	0.382*	38.008**	2.132**	9.528**	13.602**
CP _t × MF _i	4	1.278ns	0.014ns	0.297*	5.905ns	0.219ns	0.111ns	0.028ns
US _p × MF _i	4	1.556ns	0.002ns	0.041ns	4.518ns	0.036ns	0.028ns	0.041ns
CP _t × US _p × MF _i	8	0.306ns	0.013ns	0.043ns	4.417ns	0.213ns	0.111ns	0.023ns
Error	54	0.864	0.025	0.108	3.516	0.398	0.243	0.097

GP: germination percentage, GR: germination rate, MGT: mean germination time, SL: shoot length, RL: root length, SW: shoot weight, RW: root weight, CP_t: cold plasma time, US_p: ultrasound power, and MF_i: magnetic field intensity

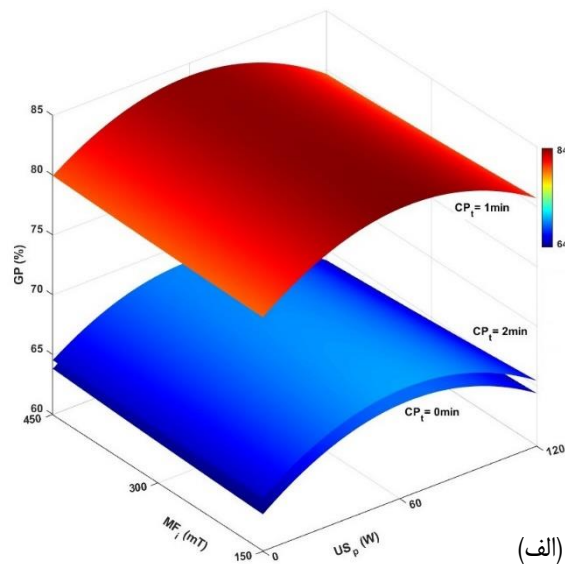
GP: درصد جوانه زنی، GR: سرعت جوانه زنی، MGT: میانگین زمان جوانه زنی، SL: طول ساقه چه، RL: طول ریشه چه، SW: وزن ساقه چه، RW: وزن ریشه چه، CP_t: زمان

اعمال پلاسمای سرد، US_p : توان فراصوت و MF_i : شدت میدان مغناطیسی

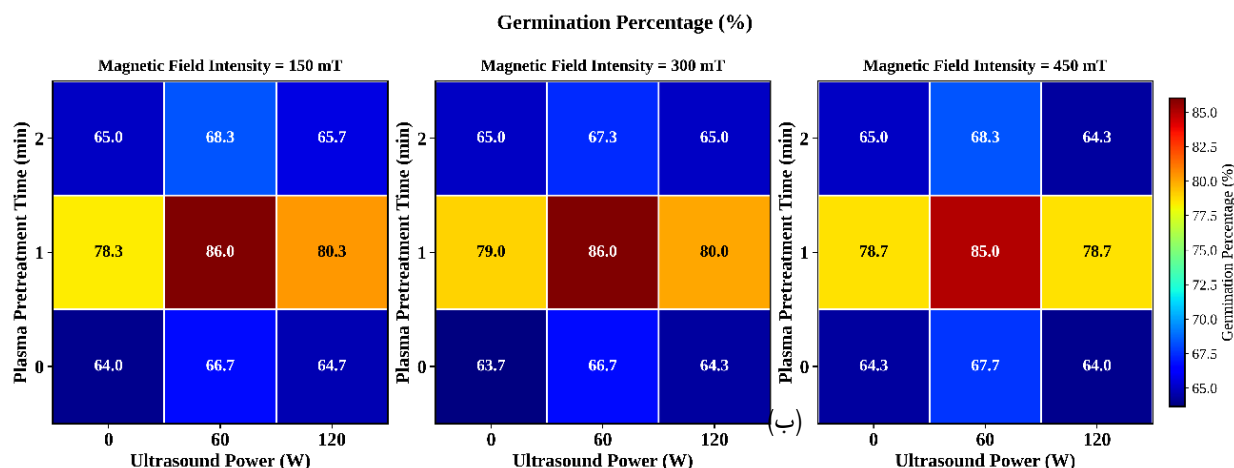
درصد جوانه‌زنی بذر رازیانه

شکل ۴ تغییرات درصد جوانه‌زنی بذر رازیانه را تحت تأثیر سطوح مختلف پلاسمای سرد، توان فراصوت و شدت میدان مغناطیسی نشان می‌دهد. پاسخ بذرها به این تیمارهای فیزیکی غیرخطی بوده و تحلیل داده‌ها نقش تعیین‌کننده پلاسمای سرد را در افزایش توان جوانه‌زنی تأیید می‌کند. بیشترین میزان درصد جوانه‌زنی در سطح ۱ دقیقه پلاسمای حاصل شد و به محدوده ۸۵ تا ۸۷٪ رسید. پلاسمای سرد با تولید گونه‌های فعال اکسیژن و نیتروژن و تغییر ویژگی‌های سطحی بذر، آبدوستی و ترشوندگی را افزایش می‌دهد و نفوذ آب را تسهیل می‌کند (Shashikanthalu, Ramireddy, & Radhakrishnan, 2020). پلاسمای سرد مهم‌ترین عامل بهبود این شاخص بود؛ افزایش

زمان پلاسمای از ۰ به ۱ دقیقه، میانگین درصد جوانه‌زنی را از ۶۵/۱۱٪ (دامنه ۶۳/۷۰ تا ۶۷/۷۰٪) به ۸۱/۳۳٪ (دامنه ۷۸/۳ تا ۸۶/۰۰٪) رساند که معادل ۲۴/۹۰٪ بهبود است، در حالی که افزایش بیشتر زمان پلاسمای به ۲ دقیقه این بهبود را تقریباً به‌طور کامل از بین برد و تنها ۱/۴۰٪ بهبود نسبت به سطح صفر باقی گذاشت. زمان ۱ دقیقه به‌عنوان نقطه بهینه تحریک بیولوژیکی بذر عمل کرد، اما افزایش زمان به ۲ دقیقه منجر به افت جوانه‌زنی شد که احتمالاً ناشی از اثرات منفی دوزهای بالاتر بر غشاهای سلولی است. فراصوت نقش مکمل و ضعیف‌تری داشت؛ توان ۶۰ وات درصد جوانه‌زنی را ۶/۳٪ افزایش داد (از ۶۹/۲۲ به ۷۳/۵۶٪)، اما ۱۲۰ وات تقریباً بدون اثر بود (تنها ۰/۶٪ افزایش). در ترکیب با زمان بهینه پلاسمای، اعمال ۶۰ وات فراصوت بهترین عملکرد را در افزایش درصد جوانه‌زنی نشان داد.



(الف)



شکل ۴- (الف) نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی و **(ب)** نمایش نقشه حرارتی درصد جوانه‌زنی بذر رازیانه به‌عنوان تابعی از توان فراصوت، شدت میدان مغناطیسی و زمان‌های پیش‌تیمار پلاسمای سرد

Fig. 4. (a) Three-dimensional response surface plot and (b) heatmap of fennel seed germination percentage as a function of ultrasound power, magnetic field intensity, and cold plasma pretreatment time

کونیفال-جانوچا و همکاران (Konefal-Janocha *et al.*, 2018) تأثیر میدان مغناطیسی ثابت و متغیر را بر بذر تریچه بررسی کردند و نشان دادند میدان ثابت ۲۰ میلی‌تسلا به مدت ۱۲ دقیقه بیشترین بهبود را ایجاد کرد در مقابل، میدان مغناطیسی متغیر با شدت ۶ میلی‌تسلا و فرکانس ۵۰ هرتز موجب کاهش شاخص‌های جوانه‌زنی شد. این نتایج تأکید می‌کند که نوع، شدت و مدت مواجهه میدان مغناطیسی عوامل کلیدی در پاسخ بذر هستند.

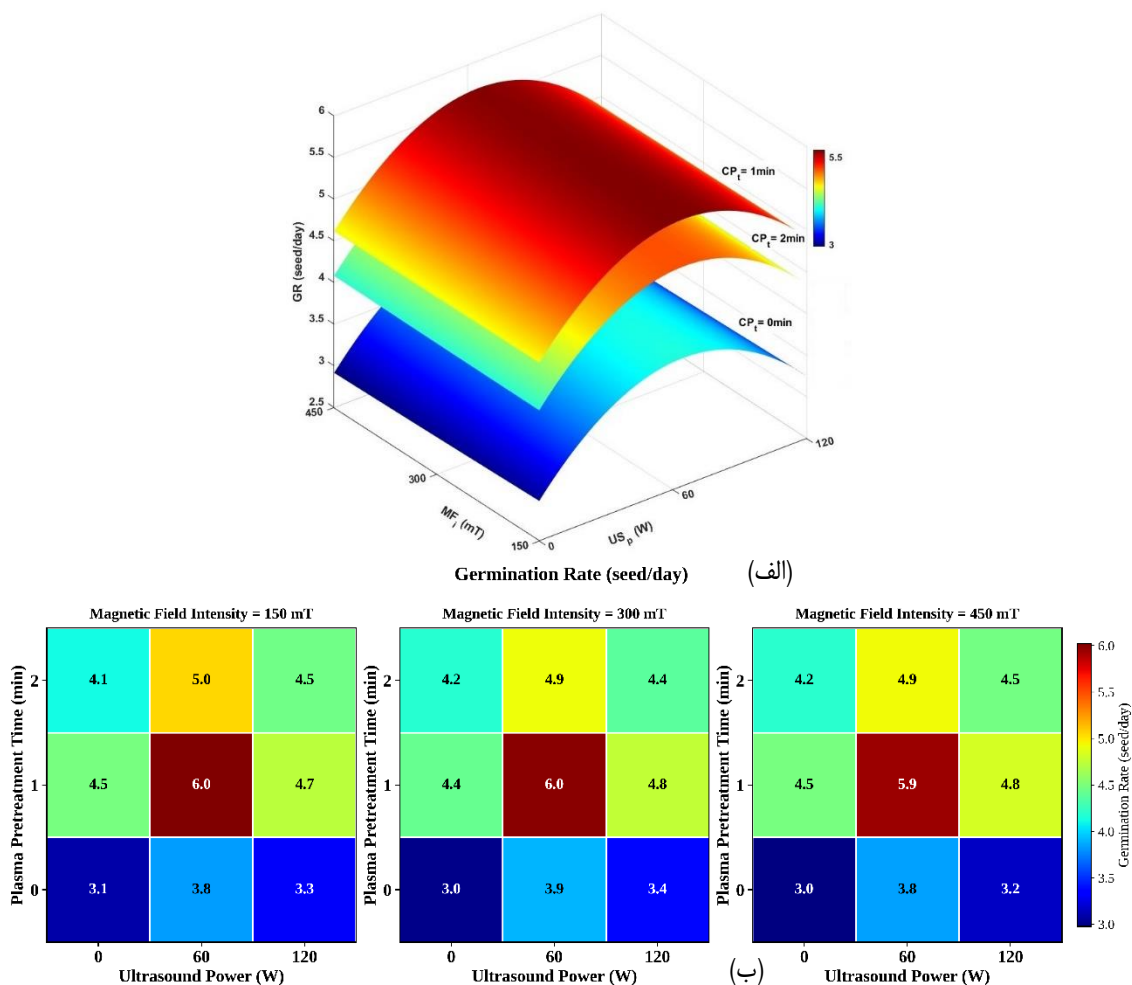
نرخ جوانه‌زنی بذر رازیانه

شکل ۵ نرخ جوانه‌زنی بذر رازیانه تحت تأثیر تیمارهای فیزیکی را نشان می‌دهد. نرخ جوانه‌زنی بیانگر تعداد بذر جوانه‌زده در واحد زمان است و شاخصی کلیدی برای سرعت استقرار گیاهچه محسوب می‌شود. تیمارها تأثیر معنی‌داری بر این شاخص داشته‌اند و تیمارهای ترکیبی در مقایسه با شاهد عملکرد بهتری نشان می‌دهند. زمان اعمال پلاسمای سرد مؤثرترین عامل بر نرخ جوانه‌زنی شناسایی شد. این شاخص بیشترین حساسیت را به پلاسمای سرد نشان داد؛ ۱ دقیقه پلاسمای میانگین سرعت جوانه‌زنی را از ۳/۳۹ (دامنه ۲/۹۸ تا ۳/۹۰ بذر در روز) به ۵/۰۷ (دامنه ۴/۴۲ تا ۶/۰۲ بذر در روز) افزایش داد، معادل ۴۹/۷٪ بهبود، و حتی در ۲ دقیقه پلاسمای نیز بهبود ۳۳/۵٪ نسبت به سطح صفر حفظ شد (بدون افت شدید مثل سایر شاخص‌ها). در تیمارهای بدون پلاسمای (شاهد) و ۲ دقیقه پلاسمای، نرخ جوانه‌زنی به‌طور معنی‌داری کمتر بود. این پاسخ هورموتیک (دوز متوسط پلاسمای) با تحریک مسیرهای بیوشیمیایی و اصلاح فیزیکی سطح بذر حاصل شده است. افزایش دوز به ۲ دقیقه احتمالاً به دلیل تنش اکسیداتیو و آسیب‌های میکروسکوپی باعث افت نرخ جوانه‌زنی شد. پلاسمای سرد

توان ۶۰ وات نسبت به حالت بدون فراصوت و توان ۱۲۰ وات بهبود معنی‌داری ایجاد کرد. میدان مغناطیسی عملاً بدون تأثیر بود و در هر دو سطح ۳۰۰ و ۴۵۰ میلی‌تسلا کاهش بسیار جزئی (به ترتیب ۰/۳ و ۰/۵٪) نسبت به ۱۵۰ میلی‌تسلا مشاهده شد که از نظر آماری غیرمعنی‌دار است. تحقیقات شاشیکانثالو و همکاران (Shashikanthalu *et al.*, 2020) نشان داد پلاسمای سرد با ولتاژ ۷ کیلوولت و ۳ دقیقه مواجهه، درصد جوانه‌زنی بذر زیره سبز را از ۴۲ به ۷۴٪ افزایش داد. یودپیتاک و همکاران (Yodpitak *et al.*, 2019) نیز گزارش کردند پلاسمای سرد درصد جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه و ارتفاع گیاهچه برنج قهوه‌ای را به‌طور قابل‌توجهی (تا ۵۲، ۴۸ و ۳۰٪) بهبود بخشید. اثر مثبت فراصوت را می‌توان به بهبود جذب آب از طریق کاویتاسیون مکانیکی بر پوسته بذر و تحریک آنزیم‌های دخیل در جوانه‌زنی نسبت داد. یو و همکاران (Yu *et al.*, 2024) نشان دادند ترکیب فراصوت با شدت بالا و پراکسید هیدروژن مؤثرترین تیمار برای افزایش جوانه‌زنی بذر لوبیا قرمز (تا ۷۷٪) بود. شیا و همکاران (Xia *et al.*, 2020) نیز گزارش کردند امواج فراصوت (۲۸ کیلوهرتز، ۵ دقیقه) درصد جوانه‌زنی برنج قهوه‌ای را افزایش داد و ارزش تغذیه‌ای آن را بهبود بخشید. بررسی شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی نشان داد این فاکتور تغییرات اندکی ایجاد کرده و تأثیر معنی‌داری بر درصد جوانه‌زنی نداشته است. عدم معنی‌داری اثر میدان مغناطیسی ناشی از محدودیت هندسی سامانه آزمایشگاهی بوده است؛ حضور رادیاتور فراصوت موجب افزایش فاصله پتری‌دیش‌ها از سیم‌پیچ‌های هولم‌هولتز و خروج نمونه‌ها از ناحیه میدان یکنواخت شد. این امر سبب کاهش شدید شدت واقعی میدان در محل بذرها نسبت به مقادیر قرائت‌شده توسط سنسور (در نزدیکی سیم‌پیچ) و در نتیجه بی‌اثری آن گردید.

تیمار فراصوت را در افزایش سرعت جوانه‌زنی بذر گیاهان زراعی و دارویی گزارش کرده‌اند. امواج فراصوت از طریق پدیده کاویتاسیون نفوذپذیری پوسته بذر را افزایش داده و جذب آب را تسهیل می‌کند و دوره جوانه‌زنی بذر جو را بین ۳۰ تا ۴۵٪ کاهش می‌دهد (Yaldagard *et al.*, 2008b). توان ۱۲۰ وات فراصوت بهبود بیشتری نسبت به ۶۰ وات ایجاد نکرد. میدان مغناطیسی تأثیر ناچیز و منفی جزئی داشت (کاهش ۴٪ در ۳۰۰ و کاهش ۷٪ در ۴۵۰ میلی‌تسلا نسبت به ۱۵۰ میلی‌تسلا). به دلیل قرارگیری رادیاتور استوانه‌ای سامانه فراصوت در بین سیم‌پیچ‌های هولمهولتز، فاصله مؤثر نمونه‌ها از سیم‌پیچ‌ها افزایش یافت. این تغییر هندسی موجب خروج نمونه از ناحیه یکنواخت میدان و در نتیجه کاهش چشمگیر اثر میدان بر بذرها گردید.

سرعت جوانه‌زنی و رشد اولیه لوبیای سبز را به‌طور معنی‌داری افزایش داد؛ به‌طوری‌که سرعت جوانه‌زنی ۹۰٪، طول ریشه ۲۴٪ و میزان آبدوستی سطح بذر ۸۴٪ نسبت به نمونه‌های شاهد بهبود یافت و فعالیت آنزیمی بذر را نیز تحریک کرد (Sadhu *et al.*, 2017). امواج فراصوت نقش مکمل و تقویتی در افزایش نرخ جوانه‌زنی ایفا کردند. توان ۶۰ وات فراصوت در تمامی سطوح پلاسما بهترین نرخ جوانه‌زنی را ثبت کرد. فراصوت در سطح ۶۰ وات سرعت جوانه‌زنی را ۲۷/۱۰٪ افزایش داد (از ۳/۸۸ به ۴/۹۳ بذر در روز)، در حالی‌که ۱۲۰ وات تنها ۷/۱٪ بهبود ایجاد کرد. ترکیب ۱ دقیقه پلاسما و ۶۰ وات فراصوت بیشترین نرخ جوانه‌زنی کل دوره آزمایش را داشت. میسون و همکاران (Mason, Riera, Vercet, & Lopez-Buesa, 2005) اثر مثبت



شکل ۵- (الف) نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی و (ب) نمایش نقشه حرارتی سرعت جوانه‌زنی بذر رازیانه به‌عنوان تابعی از توان فراصوت، شدت میدان مغناطیسی و زمان‌های پیش‌تیمار پلاسمای سرد

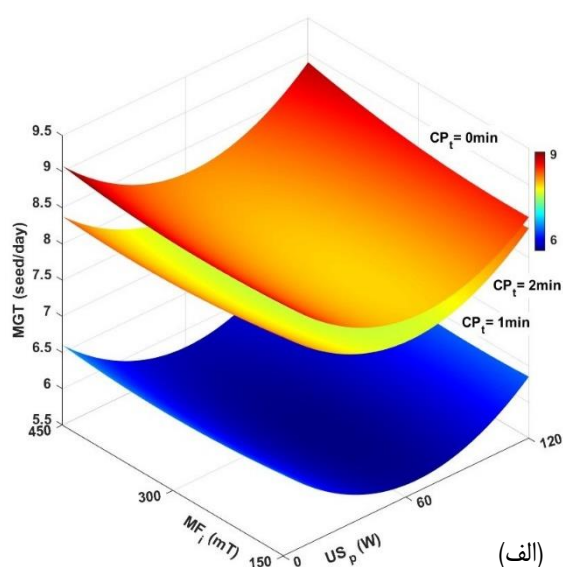
Fig. 5. (a) Three-dimensional response surface plot and (b) heatmap of fennel seed germination rate as a function of ultrasound power, magnetic field intensity, and cold plasma pretreatment time

شکل ۶ تأثیر تیمارهای ترکیبی پلاسمای سرد، امواج فراصوت و

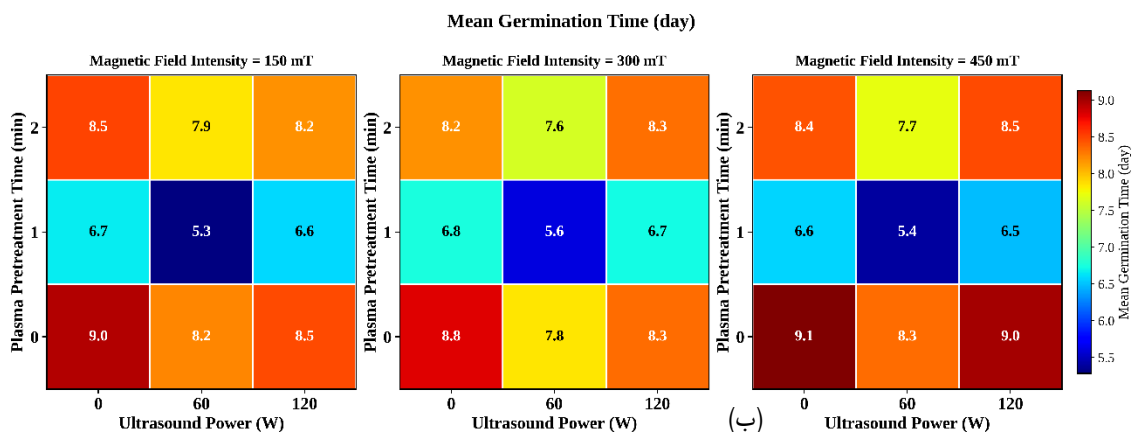
میانگین زمان جوانه‌زنی بذر رازیانه

مطالعات منفی یا دوفازی گزارش شده است. شرا و همکاران (Šerá et al., 2012) نشان دادند افزایش بیش از حد زمان مواجهه با پلاسما ممکن است باعث اثرات مہارکننده شود. کونیفال-جانوچا و همکاران (Konefal-Janocha et al., 2018) بر تأثیر میدان مغناطیسی ثابت بر جوانه‌زنی بذر تریچه تأکید کردند. یو و همکاران (Yu et al., 2024) ترکیب فراصوت با پراکسید هیدروژن را مؤثرترین تیمار برای تسریع جوانه‌زنی بذر لوبیا قرمز دانستند. نتایج کلی نشان می‌دهد که بهترین شرایط برای حداقل میانگین زمان جوانه‌زنی، تیمار $CPT=1$ min همراه با $USp=60W$ است. این ترکیب با کاهش حدود ۳۰ تا ۴۰ درصدی زمان جوانه‌زنی نسبت به شاهد، مؤثرترین عملکرد را داشت. یافته‌ها تأکید می‌کنند که بهینه‌سازی زمان تیمار پلاسما و شدت فراصوت نقش حیاتی در تسریع جوانه‌زنی بذر رازیانه دارد. میدان مغناطیسی در برخی مطالعات موجب کاهش میانگین زمان جوانه‌زنی و تسریع فرایند جوانه‌زنی بذرها شده است. این اثر عمدتاً از طریق تحریک فعالیت‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی بذر حاصل می‌شود (Vashisth & Nagarajan, 2008, 2010). برخی مطالعات نشان دادند که شدت‌های بالای میدان مغناطیسی می‌تواند باعث مہار رشد سلولی، افزایش تنش اکسیداتیو و در نتیجه کاهش سرعت جوانه‌زنی و افزایش میانگین زمان جوانه‌زنی (MGT) شود (Sarraf et al., 2020). میدان مغناطیسی در ترکیب‌های خاص شدت و مدت زمان، اثر دوفازی دارد؛ به‌طوری‌که شدت‌های بالا باعث کاهش نرخ جوانه‌زنی و مہار رشد اولیه گیاهچه می‌شود (Ali et al., 2025).

میدان مغناطیسی بر میانگین زمان جوانه‌زنی (MGT) بذر رازیانه را نشان می‌دهد. شاخص MGT سرعت فرایند جوانه‌زنی را بیان می‌کند و هرچه کمتر باشد، جوانه‌زنی سریع‌تر و کارآمدتر است. با توجه به نمودار، پلاسمای سرد نقش اصلی و تعیین‌کننده‌ای در کاهش زمان جوانه‌زنی دارد. پلاسمای سرد در سطح ۱ دقیقه، MGT را از ۸/۵۷ (دامنه ۷/۸۴ تا ۹/۱۳ روز) به ۶/۲۳ روز (دامنه ۵/۲۸ تا ۶/۷۵ روز) کاهش داد که معادل ۲۷/۳٪ کاهش (بهبود) است؛ در اعمال پلاسمای ۲ دقیقه‌ای این بهبود به تنها ۵/۰٪ کاهش رسید. کاهش زمان در تیمار ۱ دقیقه ناشی از افزایش نفوذپذیری پوشش بذر، تحریک فعالیت‌های متابولیکی اولیه و فعال‌سازی آنزیم‌های تجزیه مواد ذخیره‌ای است. زمان طولانی‌تر تیمار (۲ دقیقه) به دلیل ایجاد تنش اکسیداتیو و تغییرات نامطلوب در سطح بذر، سرعت جوانه‌زنی را مہار کرده و میانگین زمان را افزایش داد. در ترکیب با $CPT=1$ min، ۶۰ وات فراصوت کوتاه‌ترین میانگین زمان جوانه‌زنی را ایجاد کرد. هم‌افزایی پلاسما و فراصوت از طریق افزایش نفوذپذیری پوسته بذر، بهبود تبادل گاز و آب و تحریک مکانیزم‌های زیستی حاصل شده است. فراصوت در سطح ۶۰ وات MGT را ۱۱/۳۰٪ کاهش داد (از ۸/۰۰ به ۷/۱۰ روز)، اما در ۱۲۰ وات کاهش تنها ۲/۰٪ بود. میدان مغناطیسی، بنا به دلایل ذکرشده در مباحث قبلی، اثر بسیار ضعیف و ناپایدار داشت؛ ۳۰۰ میلی‌تسلا کاهش جزئی ۰/۸٪ ایجاد کرد اما ۴۵۰ میلی‌تسلا برعکس باعث افزایش ۱/۲٪ MGT شد که نشان‌دهنده بی‌اثر بودن معنی‌دار این عامل است. اثر میدان مغناطیسی در برخی



(الف)



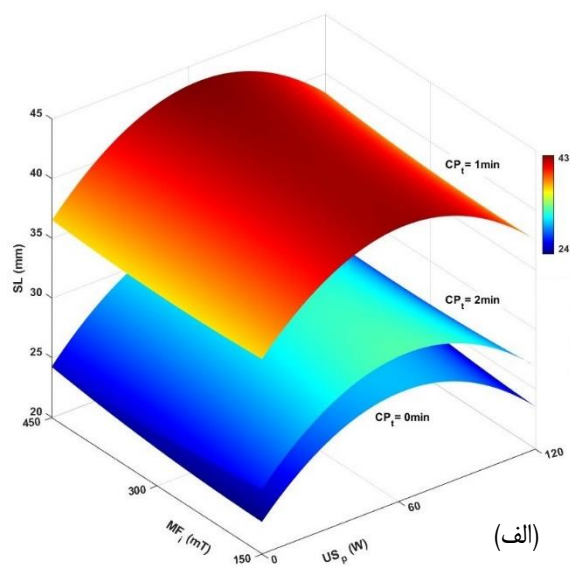
شکل ۶- (الف) نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی و (ب) نمایش نقشه حرارتی میانگین زمان جوانه‌زنی بذر رازیانه به‌عنوان تابعی از توان فراصوت، شدت میدان مغناطیسی و زمان‌های پیش‌تیمار پلاسمای سرد

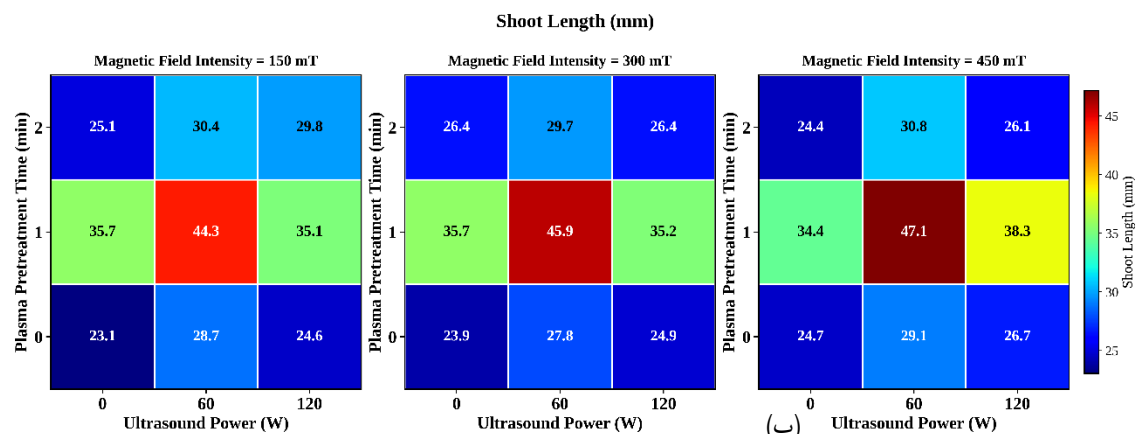
Fig. 6. (a) Three-dimensional response surface plot and (b) heatmap of the mean germination time of fennel seeds as a function of ultrasound power, magnetic field intensity, and cold plasma pretreatment time

ترکیبی پلاسمای سرد، امواج فراصوت و میدان مغناطیسی نشان می‌دهد.

طول ساقچه بذر رازیانه

شکل ۷ تغییرات طول ساقچه بذر رازیانه را تحت تأثیر تیمارهای





شکل ۷- (الف) نمودار سطح پاسخ سه بعدی و **(ب)** نمایش نقشه حرارتی طول ساقه‌چه بذر رازیانه به عنوان تابعی از توان فراصوت، شدت میدان مغناطیسی و زمان‌های پیش تیمار پلاسمای سرد

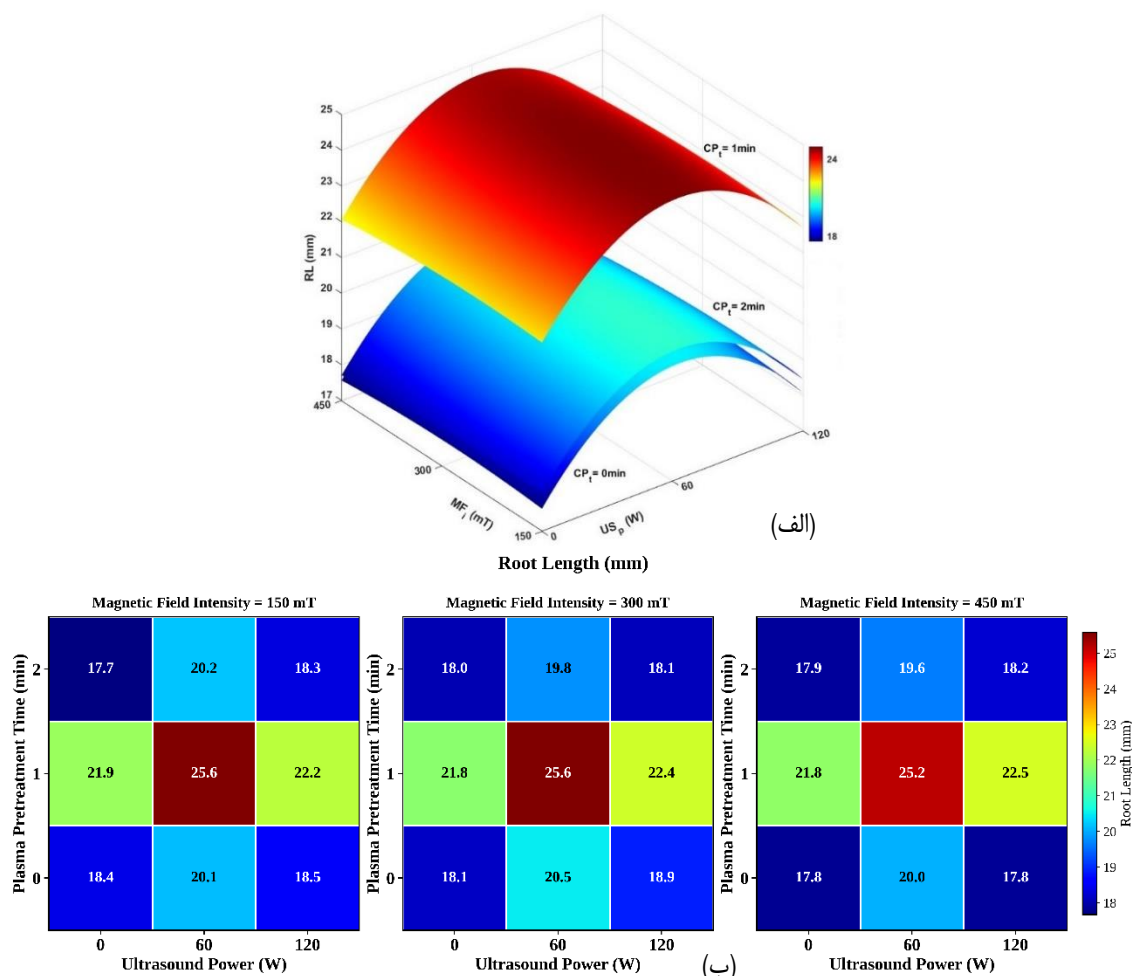
Fig. 7. (a) Three-dimensional response surface plot and (b) heatmap of fennel seed shoot length as a function of ultrasound power, magnetic field intensity, and cold plasma pretreatment time

ساقه گیاهچه‌ها شد. این یافته‌ها تأیید می‌کند که تیمار فراصوت می‌تواند با تحریک فرایندهای فیزیولوژیکی، رشد اولیه گیاهچه را بهبود بخشد. همان‌طور که در قسمت‌های قبل گفته شد، با توجه به محل قرارگیری نمونه‌ها، میدان مغناطیسی تأثیر بسیار محدودی نشان داد؛ ۳۰۰ میلی‌تسلا عملاً بدون تغییر (کاهش ۳٪ و ۴۵۰ میلی‌تسلا افزایش جزئی ۱٪ ایجاد کرد. نتایج شکل ۷ تأیید می‌کند که برای حصول حداکثر رشد طولی ساقه‌چه در بذر رازیانه، تلفیق پلاسمای سرد به مدت ۱ دقیقه و امواج فراصوت ۶۰ وات شرایط بهینه را فراهم می‌آورد. این پاسخ غیرخطی به پلاسما، اهمیت تنظیم دقیق زمان تیمار را برای ارتقای موفق رشد اولیه گیاهچه برجسته می‌سازد. اثر سینرژیک پلاسما و فراصوت احتمالاً از طریق افزایش نفوذپذیری پوشش بذر و تحریک آنزیم‌های رشد حاصل شده است. در مقابل، دوزهای بالاتر پلاسما (دو دقیقه) ممکن است تنش اکسیداتیو ایجاد کرده و رشد را مهار کند.

طول ریشه‌چه بذر رازیانه

شکل ۸ تغییرات طول ریشه‌چه بذر رازیانه را تحت تأثیر تیمارهای ترکیبی پلاسمای سرد، امواج فراصوت و میدان مغناطیسی نشان می‌دهد.

پلاسمای سرد عامل اصلی تحریک رشد طولی ساقه‌چه بوده و بیشترین مقادیر در تیمار یک دقیقه پلاسما مشاهده شده است. این شاخص بیشترین درصد بهبود را در بین صفات رشدی به پلاسمای سرد نشان داد؛ یک دقیقه پلاسما طول ساقه‌چه را از ۲۵/۹۳ (دامنه ۲۳/۰۶ تا ۲۹/۰۶ میلی‌متر) به ۳۹/۰۸ میلی‌متر (دامنه ۳۴/۳۵ تا ۴۷/۱۴ میلی‌متر) افزایش داد، معادل ۵۰/۷۰٪ بهبود، در حالی که دو دقیقه پلاسما تنها ۶/۷۰٪ بهبود نسبت به سطح صفر ایجاد کرد. این الگوی غیرخطی (سه‌می‌وار) بیانگر وجود نقطه بهینه زمانی برای تیمار پلاسمای سرد است. کاربرد یک دقیقه پلاسما اثر تحریک‌کنندگی مطلوبی داشته، اما افزایش زمان به دو دقیقه احتمالاً به دلیل تغییرات بیش از حد در خواص بیوشیمیایی یا فیزیکی بذر، اثرات مهاری ایجاد کرده است. جیانگ و همکاران (Jiang et al., 2014) گزارش کردند پلاسمای سرد شاخص‌های رشد گیاهچه گندم را بهبود بخشید و ارتفاع گیاهچه، طول ریشه و وزن تر را به ترتیب ۹، ۲۴ و ۸٪ نسبت به شاهد افزایش داد. این اثر از طریق تحریک فرایندهای فیزیولوژیکی اولیه حاصل گردید. فراصوت در سطح ۶۰ وات طول ساقه‌چه را ۲۳/۹۰٪ افزایش داد (از ۲۸/۱۴ به ۳۴/۸۷ میلی‌متر)، در حالی که تیمار فراصوت ۱۲۰ وات تنها ۵/۵٪ بهبود داشت. هیدوگی و همکاران (Hidvégi, Gulyás, & Dobránszki, 2022) نشان دادند پیش تیمار بذرهای گندم زمستانه رقم SE15 با امواج فراصوت در فرکانس ۳۰ کیلوهرتز به مدت ۵ دقیقه، باعث افزایش معنی‌دار طول و وزن ریشه و



شکل ۸- (الف) نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی و **(ب)** نمایش نقشه حرارتی طول ریشه‌چه بذر رازیانه به‌عنوان تابعی از توان فراصوت، شدت میدان مغناطیسی و زمان‌های پیش‌تیمار پلاسمای سرد

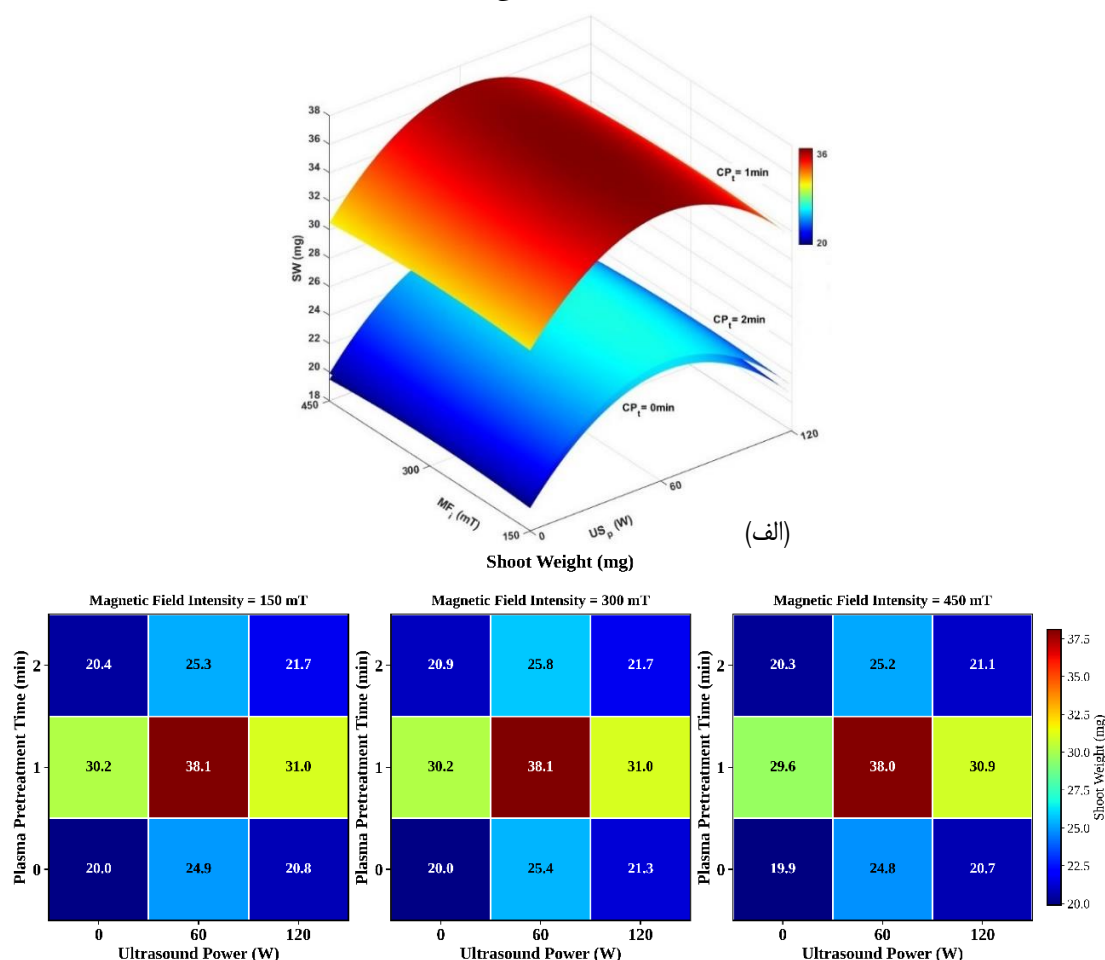
Fig. 8. (a) Three-dimensional response surface plot and (b) heatmap of fennel seed root length as a function of ultrasound power, magnetic field intensity, and cold plasma pretreatment time

نگهداری رطوبت اشاره داشته باشد. بر اساس مطالعات پیشین، پلاسمای سرد موجب ایجاد تغییرات قابل‌توجهی در سطح بذر شده و نفوذپذیری و جذب آب را افزایش می‌دهد. پیش‌تیمار بذر با پلاسمای سرد مبتنی بر تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD) موجب تغییرات هورمونی درون‌زاد شده و افزایش درصد جوانه‌زنی و بهبود پارامترهای رشد از جمله طول ریشه‌چه را در بذر نخود به همراه داشته است (Stolárik *et al.*, 2015). این اثرات به مدت‌زمان مواجهه بذر با پلاسمای سرد وابسته بوده و با تغییر زمان تیمار، میزان پاسخ نیز تغییر می‌کند. امواج فراصوت نقش مکملی در بهبود طول ریشه‌چه ایفا کرده است. فراصوت در سطح ۶۰ وات طول ریشه‌چه را ۱۳/۳٪ افزایش داد (از ۱۹/۲۷ به ۲۱/۸۴ میلی‌متر)، در حالی که ۱۲۰ وات فقط ۲/۱٪ بهبود ایجاد کرد. نقش میدان مغناطیسی در مقایسه با سایر عوامل بسیار محدود بوده است. نوسانات مشاهده‌شده در طول ریشه‌چه در سطوح مختلف میدان مغناطیسی تفاوت ساختاری و معنی‌داری نشان نمی‌دهد.

پلاسمای سرد به‌عنوان عامل کلیدی در تحریک رشد طولی ریشه‌چه عمل کرده است و در سطح یک دقیقه، طول ریشه‌چه را از ۱۸/۹۱ (دامنه ۱۷/۸۰ تا ۲۰/۴۹ میلی‌متر) به ۲۳/۲۱ میلی‌متر (دامنه ۲۱/۷۸ تا ۲۵/۵۸ میلی‌متر) افزایش داد، معادل ۲۲/۷٪ بهبود؛ اما در سطح دو دقیقه، طول ریشه‌چه نه تنها بهبود نیافت بلکه اندکی کاهش یافت (کاهش ۱/۴٪ نسبت به سطح صفر)، که نشان‌دهنده اثر مهاری دوز بالای پلاسما بر رشد ریشه است. این روند غیرخطی مؤید وجود یک آستانه بهینه برای تیمار پلاسمای سرد است. کاربرد یک دقیقه پلاسما اثر تحریک‌کنندگی مطلوبی داشته، اما افزایش زمان به دو دقیقه احتمالاً منجر به تنش‌های فیزیولوژیک یا کاهش کارایی شده است. شرا و همکاران (Šerá *et al.*, 2021) نشان دادند نوع روش تولید پلاسما از عوامل مؤثر بر جوله‌زنی است و با افزایش زمان مواجهه از ۱۸۰ به ۳۰۰ و ۶۰۰ ثانیه، طول ریشه‌چه کاهش یافته است. این کاهش از لحاظ فیزیکی می‌تواند به صیقلی‌شدن سطح بذر و عدم

شکل ۹ تغییرات وزن ساقچه بذر رازیانه را تحت تأثیر تیمارهای ترکیبی پلاسمای سرد، امواج فراصوت و میدان مغناطیسی نشان می‌دهد.

وزن ساقچه بذر رازیانه



شکل ۹- (الف) نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی و (ب) نمایش نقشه حرارتی وزن ساقچه بذر رازیانه به‌عنوان تابعی از توان فراصوت، شدت میدان مغناطیسی و زمان‌های پیش‌تیمار پلاسمای سرد

Fig. 9. (a) Three-dimensional response surface plot and (b) heatmap of fennel seed shoot weight as a function of ultrasound power, magnetic field intensity, and cold plasma pretreatment time

داشته است. افزایش توان فراصوت از ۰ به ۶۰ و سپس ۱۲۰ وات در برخی ترکیب‌ها باعث افزایش یا حفظ وزن شده، هرچند شدت اثر کمتر از پلاسمای بوده است. فراصوت در سطح ۶۰ وات وزن ساقچه را ۲۵/۶٪ افزایش داد (از ۲۳/۵۰ به ۲۹/۵۱ میلی‌گرم)، در حالی که ۱۲۰ وات تنها ۴/۱٪ بهبود ایجاد کرد. میدان مغناطیسی تنها عاملی است که در جدول تجزیه واریانس برای این شاخص معنی‌دار گزارش شده بود، اما از نظر مقدار، تغییرات آن بسیار جزئی است (افزایش ۰/۹٪ در ۳۰۰ میلی‌تسلا و کاهش ۰/۸٪ در ۴۵۰ میلی‌تسلا نسبت به ۱۵۰ میلی‌تسلا). واشیست و ناگاراچان (Vashisth & Nagarajan, 2008) گزارش کردند میدان مغناطیسی استاتیک (۵۰ تا ۱۵۰ میلی‌تسلا به

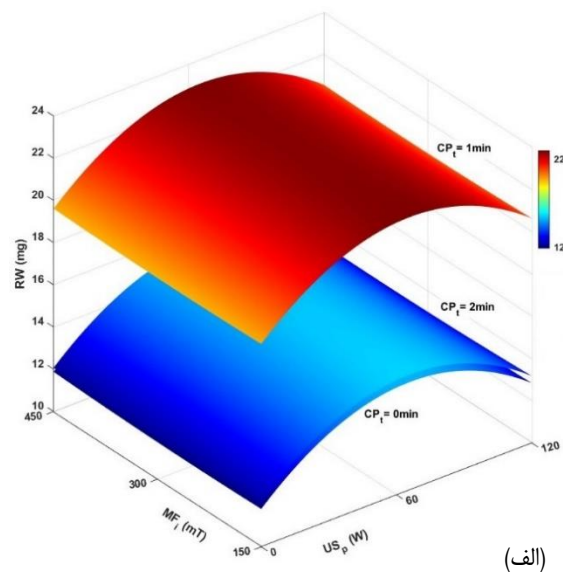
پلاسمای سرد مهم‌ترین عامل مؤثر بر وزن ساقچه بوده است. افزایش زمان تیمار از صفر به یک دقیقه در اغلب ترکیب‌ها موجب افزایش قابل توجه این شاخص شده است. پلاسمای سرد در سطح یک دقیقه، وزن ساقچه را از ۲۱/۹۸ (دامنه ۱۹/۹۰ تا ۲۵/۴۰ میلی‌گرم) به ۳۳/۰۱ میلی‌گرم (دامنه ۲۹/۶۰ تا ۳۸/۱۰ میلی‌گرم) افزایش داد، معادل ۵۰/۲٪ بهبود؛ در سطح دو دقیقه، این بهبود به تنها ۲/۳٪ کاهش یافت. پاسخ ساقچه نسبت به پلاسمای غیرخطی بوده و برای این صفت سطح بهینه وجود داشته است. استفاده بیش از حد از پلاسمای نه تنها رشد را افزایش نداد، بلکه از شدت اثر مثبت آن کاسته است. فراصوت اثر تقویتی ملایمی بر وزن ساقچه نشان داده و بیشتر نقش مکمل

دقیقه) کارایی بالاتری دارد. فراصوت در سطح ۶۰ وات وزن ریشه‌چه را ۲۲/۵٪ افزایش داد (از ۱۴/۴۹ به ۱۷/۷۶ میلی‌گرم). در حالی که ۱۲۰ وات ۶/۸٪ بهبود ایجاد کرد. بیشترین وزن ریشه‌چه در شرایط تیماری با پلاسمای سرد یک دقیقه و به‌ویژه در ترکیب با فراصوت ۶۰ وات حاصل می‌شود. میدان مغناطیسی در هر دو سطح ۳۰۰ و ۴۵۰ میلی‌تسلا تأثیر منفی جزئی و ناچیز داشت (به‌ترتیب کاهش ۰/۷ و کاهش ۰/۳٪ نسبت به ۱۵۰ میلی‌تسلا). اهمیت تنظیم دقیق شدت و مدت تیمارهای فیزیکی برای بهبود رشد اولیه بذر رازیانه تأیید می‌شود. واشیست و ناگراجان (Vashisth & Nagarajan, 2010) گزارش کردند میدان مغناطیسی (۵۰ و ۲۰۰ میلی‌تسلا به مدت ۲ ساعت) طول ریشه، سطح و حجم ریشه و وزن خشک گیاهچه آفتابگردان را نسبت به شاهد افزایش داد. همچنین این تیمار فعالیت آنزیم‌های کلیدی را تقویت کرد که با یافته‌های حاضر در مورد نقش محدودتر میدان مغناطیسی در دامنه بررسی‌شده هم‌خوانی نسبی دارد. همان‌گونه که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، تیمارهای مختلف تأثیر محسوسی بر رشد اولیه گیاهچه‌های رازیانه داشتند. در تیمار شاهد (الف) رشد ریشه‌چه و ساقه‌چه در سطح پایین‌تری مشاهده شد. در تیمار پلاسمای سرد (ب) افزایش طول ریشه‌چه و ساقه‌چه نسبت به شاهد مشاهده گردید که نشان‌دهنده اثر مثبت پلاسمای سرد بر تحریک جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاهچه است. بیشترین رشد گیاهچه‌ها در تیمار پلاسمای سرد همراه با امواج فراصوت (ج) مشاهده شد؛ به‌طوری‌که افزایش طول ریشه‌چه و ساقه‌چه و توسعه بهتر گیاهچه‌ها نسبت به سایر تیمارها بیانگر اثر هم‌افزایی این دو پیش‌تیمار در بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد اولیه بذر رازیانه است.

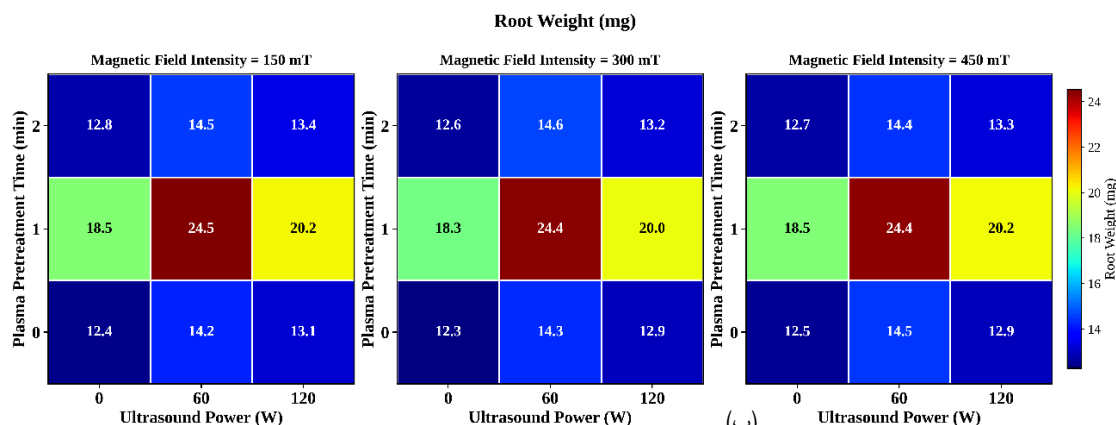
مدت ۱ تا ۲ ساعت) درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، طول و وزن خشک گیاهچه نخود را به‌طور معنی‌داری بهبود بخشید. شاین و همکاران (Shine et al., 2011) نشان دادند میدان مغناطیسی (۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌تسلا به مدت ۶۰ دقیقه) سرعت جوانه‌زنی سویا را تا ۴۲٪، طول گیاهچه را تا ۷۳٪ و وزن تر را تا ۵۳٪ افزایش داد. لینگ و همکاران (Ling, Jiangang, Minchong, Chunlei, & Yuanhua, 2015) گزارش کردند پلاسمای سرد تحت تنش خشکی، میزان جوانه‌زنی کلزا را در رقم حساس ۶/۲۵ و در رقم مقاوم ۴/۴۴٪ بهبود بخشید و ویژگی‌های رشدی از جمله وزن خشک را افزایش داد.

وزن ریشه‌چه بذر رازیانه

شکل ۱۰ تغییرات وزن ریشه‌چه بذر رازیانه را تحت تأثیر تیمارهای ترکیبی پلاسمای سرد، امواج فراصوت و میدان مغناطیسی نشان می‌دهد. این شاخص بیشترین درصد بهبود کلی را در میان همه هفت شاخص نشان داد؛ پلاسمای سرد در سطح یک دقیقه، وزن ریشه‌چه را از ۱۳/۲۳ (دامنه ۱۲/۲۷ تا ۱۴/۴۷ میلی‌گرم) به ۲۱/۰۰ میلی‌گرم (دامنه ۱۸/۳۰ تا ۲۴/۵۳ میلی‌گرم) افزایش داد، معادل ۵۸/۷٪ بهبود؛ در سطح ۲ دقیقه پلاسما، این بهبود به تنها ۲/۰٪ کاهش یافت. در تیمارهای بدون پلاسما وزن ریشه‌چه در سطح پایین‌تری قرار دارد و توان رشد اولیه کاهش یافته است. افزایش زمان پلاسما به دو دقیقه عموماً باعث کاهش وزن ریشه‌چه نسبت به سطح یک دقیقه گردید. این روند بیانگر وجود پاسخ غیرخطی و احتمال بروز اثرات بازدارنده یا کاهش کارایی در سطوح بالاتر پلاسما است. برای این صفت، پلاسمای سرد دارای سطح بهینه بوده و تیمار متوسط (حدود یک



(الف)



شکل ۱۰- (الف) نمودار سطح پاسخ سه بعدی و (ب) نمایش نقشه حرارتی وزن ریشه چه بذر رازیانه به عنوان تابعی از توان فراصوت، شدت میدان مغناطیسی و زمان های پیش تیمار پلاسمای سرد

Fig. 10. (a) Three-dimensional response surface plot and (b) heatmap of fennel seed root weight as a function of ultrasound power, magnetic field intensity, and cold plasma pretreatment time



شکل ۱۱- اثر تیمارهای ترکیبی پلاسمای سرد، فراصوت و میدان مغناطیسی بر رشد و نمو گیاهچه رازیانه پس از ۱۲ روز از شروع جوانه زنی، (الف) شاهد، (ب) پلاسمای سرد و (ج) پلاسمای سرد همراه با امواج فراصوت

Fig. 11. Effects of combined cold plasma, ultrasound, and magnetic field treatments on the growth and development of fennel seedlings 12 days after the onset of germination: (a) control, (b) cold plasma, and (c) cold plasma combined with ultrasound

تیمار پلاسمای تا یک سطح مشخص موجب بهبود درصد جوانه زنی، سرعت جوانه زنی، طول ساقچه، طول ریشه چه، وزن ساقچه و وزن ریشه چه می شود. با این حال، معنی دار بودن جملات درجه دوم مربوط به پلاسمای در اغلب مدل ها نشان داد که این اثر کاملاً خطی نبوده و پس از رسیدن به سطحی بهینه، روند افزایشی پاسخ ها کاهش می یابد یا حتی معکوس می شود؛ بنابراین می توان نتیجه گرفت که کاربرد پلاسمای در مقادیر متوسط مؤثرتر از سطوح پایین یا بسیار بالای آن است. امواج فراصوت نیز در اکثر مدل ها دارای ضریب خطی مثبت بود که نشان می دهد این عامل نقش مکمل و تقویت کننده ای در بهبود صفات جوانه زنی و رشد اولیه داشته است. در برخی صفات مانند وزن ساقچه و وزن ریشه چه، وجود جمله درجه دوم برای فراصوت نیز مؤید آن بود که این عامل دارای دامنه بهینه اثر است و استفاده بیش از حد

مدل سازی فرایند جوانه زنی بذر رازیانه

نتایج مدل سازی چندمتغیره (جدول ۳) در این پژوهش نشان داد که روابط بین زمان اعمال پلاسمای سرد، توان امواج فراصوت و شدت میدان مغناطیسی با شاخص های جوانه زنی و رشد اولیه بذر رازیانه را می توان به خوبی با مدل های چندجمله ای درجه دوم توصیف کرد. استفاده از این مدل ها امکان بررسی همزمان اثرات خطی، درجه دوم و برهم کنش بین عوامل را فراهم ساخت و تصویری دقیق تر از چگونگی پاسخ بذر رازیانه به تیمارهای فیزیکی ارائه داد. به طور کلی، نتایج بیانگر آن بود که پلاسمای سرد مهم ترین عامل مؤثر بر اکثر صفات مورد بررسی بوده است، به گونه ای که در تمامی مدل ها ضریب خطی این عامل مثبت و نسبتاً بزرگ ظاهر شد و نشان داد افزایش زمان

ظاهر شد که نشان‌دهنده تأثیر ضعیف‌تر آن بر پاسخ‌های اندازه‌گیری شده است.

از آن ممکن است از شدت پاسخ مثبت بکاهد. در مقابل، میدان مغناطیسی در مقایسه با دو عامل دیگر نقش محدودتری در مدل‌ها ایفا کرد و تنها در برخی شاخص‌ها به‌صورت ضریب خطی کوچک

جدول ۳- مدل‌های ریاضی چندجمله‌ای درجه دوم برای پیش‌بینی شاخص‌های جوانه‌زنی بذر رازیانه

Table 3- Second-order polynomial mathematical models for predicting fennel seed germination indices

متغیر پاسخ	معادلات چندجمله‌ای درجه دوم با ضرایب معنی‌دار
Response variable	Second-order polynomial equations with significant coefficients
GP (%)	$GP = 62.90 + 32.42 \times CP_t + 0.15 \times US_p - 15.78 \times CP_t^2$
GR (seed day ⁻¹)	$GR = 3.02 + 2.76 \times CP_t + 0.03 \times US_p - 1.12 \times CP_t^2$
MGT (mg)	$MGT = 9.25 - 4.43 \times CP_t - 0.03 \times US_p - 0.002 \times MF_i + 0.001 \times CP_t \times US_p + 2.13 \times CP_t^2$
SL (mm)	$SL = 23 + 26.58 \times CP_t + 0.2 \times US_p - 0.004 \times MF_i + 0.003 \times CP_t \times US_p - 0.004 \times CP_t \times MF_i - 12.28 \times CP_t^2 - 0.002 \times US_p^2$
RL (mm)	$RL = 17.84 + 8.57 \times CP_t + 0.082 \times US_p + 0.0025 \times MF_i + 4.43 \times CP_t^2$
SW (mg)	$SW = 18.69 + 21.90 \times CP_t + 0.192 \times US_p + 0.008 \times MF_i - 10.78 \times CP_t^2 - 0.002 \times US_p^2$
RW (mg)	$RW = 12 + 15.50 \times CP_t + 0.10 \times US_p - 0.002 \times MF_i - 7.64 \times CP_t^2 - 0.0007 \times US_p^2$

GP: germination percentage, GR: germination rate, MGT: mean germination time, SL: shoot length, RL: root length, SW: shoot weight, RW: root weight, CP_t: cold plasma time, US_p: ultrasound power, and MF_i: magnetic field intensity

GP: درصد جوانه‌زنی، GR: سرعت جوانه‌زنی، MGT: میانگین زمان جوانه‌زنی، SL: طول ساقه‌چه، RL: طول ریشه‌چه، SW: وزن ساقه‌چه، RW: وزن ریشه‌چه، CP_t: زمان اعمال پلاسمای سرد، US_p: توان فراصوت و MF_i: شدت میدان مغناطیسی

۴ و شکل ۱۲ قابل مشاهده است.

بر اساس محاسبات بهینه‌سازی (جدول ۲)، ترکیب بهینه تیمارها شامل تقریباً ۱/۰۴ دقیقه پلاسمای سرد، ۶۳/۶۹ وات امواج فراصوت و ۲۳۱ واحد شدت میدان مغناطیسی است که در شکل ۱۲ هم به‌صورت گرافیکی آورده شده است. در این شرایط بهینه، مقادیر پیش‌بینی شده برای شاخص‌های اصلی نظیر درصد جوانه‌زنی (۸۴/۱۳٪)، سرعت جوانه‌زنی (۵/۷۱ بذر در روز) و میانگین زمان جوانه‌زنی (۵/۶۰ روز) با شاخص مطلوبیت کلی برابر با ۰/۸۵۹ حاصل می‌شود که نشان‌دهنده کارایی بالای مدل در پیش‌بینی شرایط ایده‌آل است. این یافته‌ها ثابت می‌کند که کاربرد تلفیقی تیمارهای فیزیکی با تنظیم دقیق سطوح آن‌ها، راهکاری کارآمد برای ارتقای توان جوانه‌زنی و بهبود استقرار گیاهچه رازیانه است و مدل‌های توسعه‌یافته می‌توانند به‌عنوان ابزاری قابل‌اعتماد در بهینه‌سازی فرایندهای نوین تیمار بذر مورد استفاده قرار گیرند.

بهینه‌سازی شاخص‌های جوانه‌زنی بذر رازیانه

تحلیل مدل‌های جدول ۳ آشکار ساخت که پلاسمای سرد تأثیرگذارترین فاکتور در بهبود صفات فیزیولوژیک است، به‌طوری‌که اثر خطی مثبت و قوی آن در تمامی مدل‌ها مشهود بود. با این حال، وجود جملات درجه دوم منفی برای این عامل، مؤید رفتار سهمی‌وار و وجود یک نقطه بهینه زمانی است که افزایش بیشتر آن پس از این آستانه، نه تنها منجر به بهبود نمی‌شود، بلکه می‌تواند اثرات نامطلوب داشته باشد. در کنار پلاسمای سرد، امواج فراصوت نیز نقش مکملی ایفا کرده و با اثرات خطی مثبت و در مواردی وجود جمله درجه دوم، به تقویت پاسخ‌های رشدی کمک کرده است. در مقابل، نقش میدان مغناطیسی در مدل‌ها محدودتر بوده و تنها به‌عنوان یک عامل تعدیل‌کننده با اثرات خطی ضعیف ظاهر شد. در نهایت، با استفاده از روش سطح پاسخ و تحلیل مطلوبیت^۱، شرایط بهینه برای حصول حداکثر پاسخ‌های رشد و حداقل زمان جوانه‌زنی تعیین گردید که مقادیر بهینه در جدول

جدول ۴- شرایط بهینه شاخص‌های جوانه‌زنی بذر رازیانه همراه با مقدار پیش‌بینی شده متغیرهای پاسخ و شاخص مطلوبیت

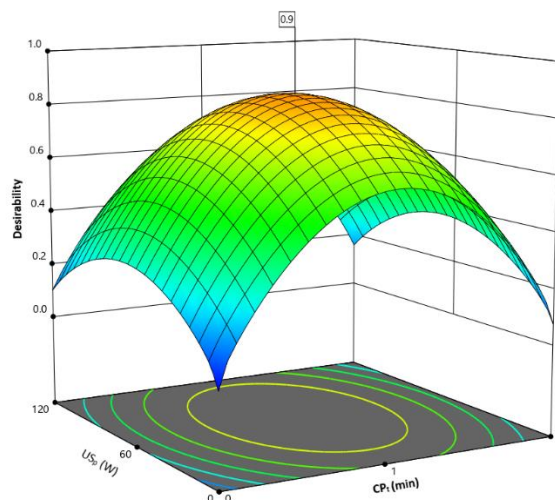
Table 4- Optimal conditions for fennel seed germination indices, together with the predicted response values and desirability index

No.	CP _t	US _p	MF _i	GP	GR	MGT	SL	RL	SW	RW	Desirability
1	1.038	63.685	231.111	84.131	5.709	5.604	42.822	24.899	36.898	22.836	0.859
2	1.038	63.712	230.797	84.131	5.709	5.604	42.823	24.899	36.897	22.837	0.859
3	1.038	63.686	229.431	84.133	5.709	5.604	42.823	24.899	36.896	22.837	0.859

GP: germination percentage, GR: germination rate, MGT: mean germination time, SL: shoot length, RL: root length, SW: shoot weight, RW: root weight, CP_t: cold plasma time, US_p: ultrasound power, and MF_i: magnetic field intensity

GP: درصد جوانه‌زنی، GR: سرعت جوانه‌زنی، MGT: میانگین زمان جوانه‌زنی، SL: طول ساقه‌چه، RL: طول ریشه‌چه، SW: وزن ساقه‌چه، RW: وزن ریشه‌چه، CP_t: زمان

اعمال پلاسمای سرد، US_p: توان فراصوت و MF_i: شدت میدان مغناطیسی



شکل ۱۲- شرایط بهینه شاخص‌های جوانه‌زنی بذر رازیانه همراه با حداکثر شاخص مطلوبیت

Fig. 12. Optimal conditions for fennel seed germination indices along with the maximum desirability index

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، الگوی پاسخ بذرها نشان داد که پلاسمای سرد مهم‌ترین و تعیین‌کننده‌ترین عامل در تحریک جوانه‌زنی و رشد اولیه بوده است؛ به‌گونه‌ای که سطح یک دقیقه پلاسما در اغلب شاخص‌ها بهترین پاسخ را ایجاد کرد، در حالی که افزایش زمان تیمار به دو دقیقه در بسیاری از موارد موجب افت عملکرد نسبت به زمان بهینه شد. این رفتار نشان‌دهنده وجود یک پاسخ غیرخطی به پلاسما است؛ یعنی مقدار متوسط تیمار موجب تحریک مطلوب فرایندهای زیستی شده، اما افزایش بیش از حد آن احتمالاً با ایجاد تنش اکسیداتیو یا آسیب‌های سطحی، بخشی از اثر مثبت را کاهش داده است. در کنار پلاسما، فراصوت به‌ویژه در سطح ۶۰ وات نقش تقویتی قابل‌توجهی در بهبود جوانه‌زنی ایفا کرد و در ترکیب با پلاسما، بیشترین اثر را در بسیاری از صفات نشان داد. به نظر می‌رسد فراصوت با ایجاد کاویتاسیون و افزایش نفوذپذیری پوسته بذر، جذب آب و تبادلات متابولیکی را تسهیل کرده و در نتیجه سرعت شروع جوانه‌زنی و رشد گیاهچه را افزایش داده است. به‌طور خلاصه، پلاسمای سرد در سطح ۱ دقیقه تمام هفت شاخص جوانه‌زنی را به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشید (بین ۲۲/۷۰ تا ۵۸/۷۰٪ افزایش در صفات مثبت، و ۲۷/۳۰٪ کاهش در زمان جوانه‌زنی)، اما در سطح ۲ دقیقه این اثرات تقریباً به‌طور کامل از بین رفت (اکثراً زیر ۷٪ و حتی در طول ریشه‌چه منفی). فراصوت در سطح ۶۰ وات اثری مکمل و متوسط داشت (بهبود بین ۶/۳ تا ۲۷/۱۰٪)، در حالی که ۱۲۰ وات اثر ضعیف‌تری نشان داد (اغلب زیر ۷٪). میدان مغناطیسی در تمام هفت شاخص و در هر دو سطح

۳۰۰ و ۴۵۰ میلی‌تسلا نسبت به ۱۵۰ میلی‌تسلا، تغییراتی کمتر از ۲٪ ایجاد کرد. عدم معنی‌داری میدان مغناطیسی احتمالاً ناشی از افزایش فاصله بذرها از سیم‌پیچ‌ها و کاهش شدت میدان مؤثر در محل بذرها بوده است. از نظر آماری، تجزیه واریانس شاخص‌ها نشان داد که اثرات اصلی و برخی اثرات متقابل، به‌ویژه برهم‌کنش Cpt×USp، در تعدادی از صفات بسیار معنی‌دار بوده‌اند و این موضوع اهمیت استفاده از تیمارهای ترکیبی را تأیید می‌کند. در مقابل، بسیاری از اثرات مرتبط با MF_i در مقایسه با دو عامل دیگر از اهمیت کمتری برخوردار بوده‌اند. علاوه بر تحلیل آماری کلاسیک، مدل‌سازی و بهینه‌سازی پاسخ‌ها نیز نشان داد که می‌توان با انتخاب مناسب سطوح تیمارها، به یک شرایط بهینه چندشاخصه دست یافت. در این پژوهش، مدل به‌کاررفته توانست رفتار پاسخ‌ها را به‌خوبی توصیف کند و بر اساس تابع مطلوبیت، مقدار $D=0.859$ به‌دست آمد که نشان‌دهنده سطح بالای مطلوبیت و موفقیت مدل در یافتن ترکیب مناسب تیمارها است. این مقدار بیان می‌کند که مجموعه پاسخ‌های جوانه‌زنی و رشد اولیه در شرایط بهینه، به‌طور هم‌زمان در سطح مناسبی قرار گرفته‌اند و بنابراین می‌توان از این تیمارها به‌عنوان یک راهبرد مؤثر برای افزایش کیفیت بذر رازیانه استفاده کرد. در کل، این پژوهش نشان داد پلاسمای سرد و فراصوت می‌توانند جوانه‌زنی بذر رازیانه را بهبود بدهند، اما هنوز جای کار زیادی باقی‌مانده؛ آزمایش‌ها فقط در محیط کنترل‌شده آزمایشگاه و روی یک نوع بذر انجام شده، میدان مغناطیسی در دامنه محدودی بررسی شد. همچنین مشخص نیست این تیمارها روی رشد بعدی گیاه، عملکرد نهایی، یا اجرای صنعتی چه

نتیجه‌ای می‌دهند. برای همین، قدم بعدی این است که نتایج در مزرعه و روی ارقام یا اکوتیپ‌های مختلف رازیانه امتحان شود، مکانیسم دقیق‌تر پاسخ بذر بررسی شود، و امکان استفاده صنعتی از این روش هم سنجیده شود.

مشارکت نویسندگان

فاطمه گوری بمی: انجام تحقیق و جمع‌آوری داده‌ها، استخراج و تهیه متن اولیه

مسلم نامجو: نوشتن مقاله، مشاوره فنی، پردازش داده، تحلیل آماری، خدمات نرم افزاری، تصویرسازی نتایج
محمدرضا کماندار: مشاوره فنی، ویرایش متن

سپاسگزاری

نویسندگان از حمایت‌های مالی و معنوی دانشگاه جیرفت تشکر و سپاسگزاری می‌نمایند.

References

1. Ali, K. A., Junaid, M., El-Meligy, M. A., Dar, M. A., Altarawneh, R., Ul-Haq, Z., & Mahmoud, H. A. (2025). Magnetic field treatment as a catalyst for enhanced germination, growth, and biochemical properties of garlic seeds. *Scientia Horticulturae*, 350, 114356. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2025.114356>
2. Anand, A., Nagarajan, S., Verma, A. P. S., Joshi, D. K., Pathak, P. C., & Bhardwaj, J. (2012). Pre-treatment of seeds with static magnetic field ameliorates soil water stress in seedlings of maize (*Zea mays* L.). *Indian Journal of Biochemistry and Biophysics*, 49(1), 63-70.
3. Balouchi, H. & Modarres Sanavy, S. A. M. (2009). Electromagnetic field impact on annual medics and dodder seed germination. *International Agrophysics*, 23(2), 111-115.
4. Beyk-Khormizi, A., Hosseini Sarghein, S., Sarafraz-Ardakani, M. R., Mousavi-Kouhi, S. M., & Ganjeali, A. (2023). Ameliorating effect of vermicompost on *Foeniculum vulgare* under saline condition. *Journal of Plant Nutrition*, 46(8), 1601-1615. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2092513>
5. Bhardwaj, J., Anand, A., & Nagarajan, S. (2012). Biochemical and biophysical changes associated with magnetopriming in germinating cucumber seeds. *Plant Physiology and Biochemistry*, 57, 67-73. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.05.008>
6. Bradford, K. J. (2002). Applications of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. *Weed Science*, 50(2), 248-260. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2002\)050\[0248:AOHTTQ\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2002)050[0248:AOHTTQ]2.0.CO;2)
7. Chiu, K. Y., & Sung, J. M. (2014). Use of ultrasonication to enhance pea seed germination and microbial quality of pea sprouts. *International Journal of Food Science & Technology*, 49(7), 1699-1706. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12476>
8. Dai, D., & Wang, Q. (2013). Effect of driving AC voltage frequency on breakdown voltage in dielectric barrier discharge at atmospheric pressure in helium. *High Voltage Engineering*, 39(9), 2235-2240. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-6520.2013.09.024>
9. El-Yazied, A., Shalaby, O., El-Gizawy, A., Khalf, S., & El-Satar, A. (2011). Effect of magnetic field on seed germination and transplant growth of tomato. *Journal of American Science*, 7(12), 306-312. <https://doi.org/10.7537/marsjas071211.41>
10. Erez, M. E., & Özbek, M. (2024). Magnetic field effects on the physiologic and molecular pathway of wheat (*Triticum turgidum* L.) germination and seedling growth. *Acta Physiologiae Plantarum*, 46(1), 5. <https://doi.org/10.1007/s11738-023-03631-7>
11. Golbakhshi, H., Namjoo, M., & Kamandar, M. R. (2024). The Modal and Harmonic Analysis of a Cylindrical Horn Designed for an Airborne Ultrasonic Dryer. *Biomechanism and Bioenergy Research*, 3(2), 14-30. <https://doi.org/10.22103/bbr.2024.23407.1084>
12. González-Vidal, A., Mercado-Sáenz, S., Burgos-Molina, A. M., Sendra-Portero, F., & Ruiz-Gómez, M. J. (2022). Growth alteration of *Allium cepa* L. roots exposed to 1.5 mT, 25 Hz pulsed magnetic field. *International Journal of Environmental Health Research*, 32(11), 2471-2483. <https://doi.org/10.1080/09603123.2021.1972090>
13. Goussous, S., Samarah, N., Alqudah, A., & Othman, M. (2010). Enhancing seed germination of four crop species using an ultrasonic technique. *Experimental Agriculture*, 46(2), 231-242. <https://doi.org/10.1017/S0014479709991062>
14. Hashemirad, S., Soltani, E., Izadi-Darbandi, A., & Alahdadi, I. (2023). Cold stratification requirement to break morphophysiological dormancy of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) seeds varies with seed length. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2023.100465>
15. Hassanpour, H. (2025). Static magnetic field-induced changes in the growth, photosynthetic pigments, antioxidative enzyme activities, and secondary metabolites of *Echium amoenum* seedlings. *Journal of Plant Research*, 38(2), 155-167.
16. Hidvégi, N., Gulyás, A., & Dobránszki, J. (2022). Ultrasound, as a hypomethylating agent, remodels DNA methylation and alters mRNA transcription in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *Physiologia*

- Plantarum*, 174(5), e13777. <https://doi.org/10.1111/ppl.13777>
17. Jamshidi, A. R., Ghazanfari Moghaddam, A., & Ommani, A. R. (2019). Effect of ultrasonic atomizer on the yield and yield components of tomato grown in a vertical aeroponic planting system. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 6(2), 237–246. <https://doi.org/10.22059/ijhst.2019.278366.284>
 18. Jiang, J., He, X., Li, L., Li, J., Shao, H., Xu, Q., ... & Dong, Y. (2014). Effect of cold plasma treatment on seed germination and growth of wheat. *Plasma Science and Technology*, 16(1), 54. <https://doi.org/10.1088/1009-0630/16/1/12>
 19. Konefał-Janocha, M., Banaś-Ząbczyk, A., Bester, M., Bocak, D., Budzik, S., Górny, S., ... & Cholewa, M. (2018). The effect of stationary and variable electromagnetic fields on the germination and early growth of radish (*Raphanus sativus*). *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(2), 709–715. <https://doi.org/10.15244/pjoes/84920>
 20. Li, A.-R., Guan, K.-Y., & Probert, R. J. (2007). Effects of light, scarification, and gibberellic acid on seed germination of eight *Pedicularis* species from Yunnan, China. *HortScience*, 42(5), 1259–1262. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.42.5.1259>
 21. Ling, L., Jiangang, L., Minchong, S., Chunlei, Z., & Yuanhua, D. (2015). Cold plasma treatment enhances oilseed rape seed germination under drought stress. *Scientific Reports*, 5(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/srep13033>
 22. Lo Porto, C., Ziuzina, D., Los, A., Boehm, D., Palumbo, F., Favia, P., ... & Cullen, P. J. (2018). Plasma activated water and airborne ultrasound treatments for enhanced germination and growth of soybean. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 49, 13–19. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.07.013>
 23. Los, A., Ziuzina, D., Boehm, D., Cullen, P. J., & Bourke, P. (2019). Investigation of mechanisms involved in germination enhancement of wheat (*Triticum aestivum*) by cold plasma: Effects on seed surface chemistry and characteristics. *Plasma Processes and Polymers*, 16(4), Article 1800148. <https://doi.org/10.1002/ppap.201800148>
 24. Machikowa, T., Kulrattanarak, T., & Wonprasaid, S. (2013). Effects of ultrasonic treatment on germination of synthetic sunflower seeds. In Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology. *International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering*, 7(1), 1-3. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1328510>
 25. Maleki Farahani, S., Rezazadeh, A., & Aghighi Shahverdi, M. (2015). Effects of electromagnetic field and ultrasonic waves on seed germination of Cumin (*Cuminum cyminum* L.). *Iranian Journal of Seed Research*, 2(1), 109–118. <https://doi.org/10.29252/yujs.2.1.109>
 26. Mason, T. J., Riera, E., Vercet, A., & Lopez-Buesa, P. (2005). Application of ultrasound. In D. W. Sun (Ed.), *Emerging technologies for food processing* (pp. 323–351). Amsterdam, the Netherlands: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012676757-5/50015-3>
 27. Mehra, N., Tamta, G., Nand, & V. (2021). A review on nutritional value, phytochemical and pharmacological attributes of *Foeniculum vulgare* Mill. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 10(2), 1255-1263. <https://doi.org/10.22271/phyto.2021.v10.i2q.13983>
 28. Mohammadi, M., Pouryousef, M., & Farhang, N. (2023). Study on germination and seedling growth of various ecotypes of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) under salinity stress. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 34. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2023.100481>
 29. Namjoo, M., Dibagar, N., Golbakhshi, H., Figiel, A., & Masztalerz, K. (2024). RSM-Based Optimization Analysis for Cold Plasma and Ultrasound-Assisted Drying of Caraway Seed. *Foods*, 13(19), 3084. <https://doi.org/10.3390/foods13193084>
 30. Namjoo, M., Moradi, M., Dibagar, N., Taghvaei, M., & Niakousari, M. (2022). Effect of green technologies of cold plasma and airborne ultrasound wave on the germination and growth indices of cumin (*Cuminum cyminum* L.) seeds. *Journal of Food Process Engineering*, 45(12), e14166. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14166>
 31. Namjoo, M., Moradi, M., Nematollahi, M. A., & Golbakhshi, H. (2025). Artificial Neural Network (ANN) Modeling of Plasma and Ultrasound-assisted Air Drying of Cumin Seeds. *Journal of Agricultural Machinery*, 15(1), 1–22. <https://doi.org/10.22067/jam.2024.85744.1209>
 32. Obembe, O. O., & Agboola, D. (2008). Seed pretreatments enhance germination in *Occimum gratissimum* (lameaceae). *Life Science Journal*, 5(1), 46–48.
 33. Pawelek, A., Wyszowska, J., Cecchetti, D., Dinka, M. D., Przybylski, K., & Szmidi-Jaworska, A. (2022). The physiological and biochemical response of field bean (*Vicia faba* L.(partim)) to electromagnetic field exposure is influenced by seed age, light conditions, and growth media. *Agronomy*, 12(9), 2161. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092161>
 34. Pizá, M. C. P., Prevosto, L., Zilli, C., Cejas, E., Kelly, H., & Balestrasse, K. (2018). Effects of non-thermal plasmas on seed-borne Diaporthe/Phomopsis complex and germination parameters of soybean seeds. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 49, 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.07.009>
 35. Puligundla, P., Kim, J.-W., & Mok, C. (2017). Effect of corona discharge plasma jet treatment on decontamination and sprouting of rapeseed (*Brassica napus* L.) seeds. *Food Control*, 71, 376–382. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.07.021>
 36. Rafiei, M., Khoshnam, F., Dowlati, M., Soleimani, A., & Namjoo, M. (2023). Effect of Magnetic Field and its

- Stability on Growth Indices of Parsley (*Petroselinum Crispum*) Seeds. *Biomechanism and Bioenergy Research*, 2(2), 39–46. <https://doi.org/10.22103/BBR.2023.22341.1057>
37. Rafiei, M., Khoshnam, F., & Namjoo, M. (2025). Effect of Magnetic Field on Seeds of Parsley (*Petroselinum crispum*): Modelling and Optimisation by Response Surface Methodology. *Journal of Agricultural Machinery*, 15(3), 305–318. <https://doi.org/10.22067/jam.2024.88417.1256>
 38. Rajendra, P., Sujatha Nayak, H., Sashidhar, R., Subramanyam, C., Devendranath, D., Gunasekaran, B., ... & Bhaskaran, A. (2005). Effects of power frequency electromagnetic fields on growth of germinating *Vicia faba* L., the broad bean. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 24(1), 39–54. <https://doi.org/10.1081/JBC-200055058>
 39. Reddy, K. V., Reshma, S. R., Jareena, S., & Nagaraju, M. (2012). Exposure of greengram seeds (*Vigna radiata* var. *radiata*) to static magnetic fields: Effects on germination and α -amylase activity. *Research Journal of Seed Science*, 5(3), 106–114. <https://doi.org/10.3923/rjss.2012.106.114>
 40. Rifna, E., Ramanan, K. R., & Mahendran, R. (2019). Emerging technology applications for improving seed germination. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 95–108. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.029>
 41. Sadhu, S., Thirumdas, R., Deshmukh, R., & Annapure, U. (2017). Influence of cold plasma on the enzymatic activity in germinating mung beans (*Vigna radiata*). *LWT*, 78, 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.12.026>
 42. Sarraf, M., Kataria, S., Taimourya, H., Santos, L. O., Menegatti, R. D., & Jain, M. (2020). Magnetic field (MF) applications in plants: An overview. *Plants*, 9(9), 1139. <https://doi.org/10.3390/plants9091139>
 43. Šerá, B., Gajdová, I., Černák, M., Gavril, B., Hnatiuc, E., Kováčik, D., Kříha, V., Slama, J., Šerý, M., & Špatenka, P. (2012). How various plasma sources may affect seed germination and growth. In *Proceedings of the 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)* (pp. 1365–1370). Braşov, Romania: Transilvania University Press. <https://doi.org/10.1109/OPTIM.2012.6231880>
 44. Šerá, B., Scholtz, V., Jirešová, J., Khun, J., Julák, J., & Šerý, M. (2021). Effects of non-thermal plasma treatment on seed germination and early growth of leguminous plants—A review. *Plants*, 10(8), 1616. <https://doi.org/10.3390/plants10081616>
 45. Sera, B., Stranák, V., Serý, M., Tichý, M., & Spatenka, P. (2008). Germination of *Chenopodium album* in response to microwave plasma treatment. *Plasma Science and Technology*, 10(4), 506. <https://doi.org/10.1088/1009-0630/10/4/22>
 46. Sharififar, A., Nazari, M., & Asghari, H. R. (2015). Effect of ultrasonic waves on seed germination of *Atriplex lentiformis*, *Cuminum cyminum*, and *Zygophyllum eurypterum*. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 2(3), 102–104. <https://doi.org/10.1016/J.JARMAP.2015.05.003>
 47. Shashikanthalu, S. P., Ramireddy, L., & Radhakrishnan, M. (2020). Stimulation of the germination and seedling growth of *Cuminum cyminum* L. seeds by cold plasma. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 18, 100259. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2020.100259>
 48. Shekari, F., Mustafavi, S.-H., & Abbasi, A. (2015). Sonication of seeds increase germination performance of sesame under low temperature stress. *Acta Agriculturae Slovenica*, 105(2), 203–212. <https://doi.org/10.14720/aas.2015.105.2.03>
 49. Shi, J. J., & Kong, M. G. (2005). Nonthermal atmospheric plasmas sustained without dielectric barrier in the kilohertz range. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 33(2), 276–277. <https://doi.org/10.1109/TPS.2005.844997>
 50. Shine, M. B., Guruprasad, K. N., & Anand, A. (2011). Enhancement of germination, growth, and photosynthesis in soybean by pre-treatment of seeds with magnetic field. *Bioelectromagnetics*, 32(6), 474–484. <https://doi.org/10.1002/bem.20656>
 51. Singh, R., Prasad, P., Mohan, R., Verma, M. K., & Kumar, B. (2019). Radiofrequency cold plasma treatment enhances seed germination and seedling growth in variety CIM-Saumya of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 12, 78–81. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2018.11.005>
 52. Stolárik, T., Henselová, M., Martinka, M., Novák, O., Zahoranová, A., & Černák, M. (2015). Effect of low-temperature plasma on the structure of seeds, growth and metabolism of endogenous phytohormones in pea (*Pisum sativum* L.). *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 35(4), 659–676. <https://doi.org/10.1007/s11090-015-9627-8>
 53. Toth, I. (2012). The effects of ultrasound exposure on the germination capacity of birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus* L.) seeds. *Romanian Journal of Biophysics*, 22(1), 13–20.
 54. Vashisth, A., & Nagarajan, S. (2008). Exposure of seeds to static magnetic field enhances germination and early growth characteristics in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Bioelectromagnetics*, 29(7), 571–578. <https://doi.org/10.1002/bem.20426>
 55. Vashisth, A., & Nagarajan, S. (2010). Effect on germination and early growth characteristics in sunflower (*Helianthus annuus*) seeds exposed to static magnetic field. *Journal of Plant Physiology*, 167(2), 149–156. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2009.08.011>
 56. Wang, Q., Chen, G., Yersaiyiti, H., Liu, Y., Cui, J., Wu, C., Zhang, Y., & He, X. (2012). Modeling analysis on germination and seedling growth using ultrasound seed pretreatment in switchgrass. *PLoS ONE*, 7(10), e47204.

-
- <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047204>
57. Xia, Q., Tao, H., Li, Y., Pan, D., Cao, J., Liu, L., ... & Barba, F. J. (2020). Characterizing physicochemical, nutritional and quality attributes of wholegrain *Oryza sativa* L. subjected to high intensity ultrasound-stimulated pre-germination. *Food Control*, 108, 106–127. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106827>
 58. Yaldagard, M., Mortazavi, S. A., & Tabatabaie, F. (2008a). Application of ultrasonic waves as a priming technique for accelerating and enhancing the germination of barley seed: Optimization of method by the Taguchi approach. *Journal of the Institute of Brewing*, 114(1), 14–21. <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.2008.tb00300.x>
 59. Yaldagard, M., Mortazavi, S. A., & Tabatabaie, F. (2008b). Influence of ultrasonic stimulation on the germination of barley seed and its alpha-amylase activity. *African Journal of Biotechnology*, 7, 2465–2471. <https://doi.org/10.5897/AJB07.514>
 60. Yodpitak, S., Mahatheeranont, S., Boonyawan, D., Sookwong, P., Roytrakul, S., & Norkaew, O. (2019). Cold plasma treatment to improve germination and enhance the bioactive phytochemical content of germinated brown rice. *Food Chemistry*, 289, 328–339. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.061>
 61. Younesian, A., Ajam Norouzi, H., & Gholipour, M. (2017). Alleviation of drought stress effects on red bean by ultrasonication and foliar application of 24-epi-brassinolid. *International Journal of Plant Production*, 11(4), 505–514.
 62. Yu, Z., Gao, Y., Duan, H., Zheng, D., Shang, Z., Zhang, L., & Chen, Y. (2024). Ultrasound-assisted germination of red kidney beans: Enhancements in physicochemical and nutritional profiles. *Food Chemistry*, 454, 139829. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139829>
 63. Zeng, Z., Liu, X., Deng, Q., Ashraf, U., Chen, J., & Shen, W. (2023). Transcriptome analysis revealed mechanisms involved in improved germination and growth of sugarcane by ultrasonic treatment. *Industrial Crops and Products*, 192, 116104. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116104>