

The effect of ultrasound waves on cotton seedling characteristics under salt stress condition

Ashkan Asgari^{1*}, Mostafa Ahmadizadeh¹, Yunes Rameshjan²

¹ Minab Higher Education Center, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran. Research Group of Agroecology in Dryland Areas, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran, Email: Asgariashkan6@gmail.com

² Graduated with PhD in Agroecology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Article Info

Article type:
Research Full Paper

ABSTRACT

Background and objectives: Among abiotic stresses, salinity is a major global constraint that adversely affects plant physiology, growth, and productivity. Salinity impairs seed germination and early seedling development primarily through osmotic stress that limits water uptake and through ionic toxicity caused by excessive accumulation of Na⁺ and Cl⁻ ions. Consequently, developing approaches to mitigate the adverse effects of salinity during the early stages of plant growth is of considerable interest. This study aimed to evaluate the effects of seed exposure duration to ultrasound waves on germination and seedling responses of cotton under salt stress conditions in laboratory and greenhouse environments.

Materials and methods: The experiment consisted of a factorial combination of three ultrasound exposure durations (0, 20, and 40 min) and three salinity levels (0, 50, and 100 mM). Following ultrasound treatment, seeds were cultured under two growth conditions: Petri dishes (laboratory) and seedling trays (greenhouse). Germination indices and seedling growth traits were recorded. The experiment was conducted as a completely randomized design with three replications in both the laboratory and greenhouse at the Minab Higher Education Center.

Article history:

Received: 2025-10-18

Accepted: 2025-12-10

Results: Ultrasound treatment and salinity level significantly affected germination indices and seedling traits. Mean comparison analysis indicated that a 20-min ultrasound treatment resulted in the highest germination percentage, whereas the lowest germination occurred in seeds without ultrasound exposure. At 50 mM salinity, the 20-min ultrasound treatment substantially alleviated the inhibitory effects of salt stress, resulting in the highest germination percentage at this salinity level. Germination percentage increased as ultrasound exposure duration increased from 0 to 20 min but declined when exposure was extended to 40 min. Increasing salinity levels significantly reduced emergence percentage. The longest mean germination time was observed in the non-irradiated and 40-min ultrasound treatments, while the shortest mean germination time occurred with the 20-min ultrasound treatment. Correlation analysis

Keywords:

Ultrasonic
Germination
Seedling
abiotic stress

between laboratory and greenhouse data revealed significant positive relationships between germination percentage and emergence percentage, germination rate and emergence rate, and germination index and emergence index.

Conclusion: The results demonstrate that the effectiveness of ultrasound seed treatment under saline conditions is strongly dependent on both salinity intensity and exposure duration. Appropriate ultrasound pretreatment can partially mitigate salt-induced inhibition of germination and early seedling growth; however, excessive exposure may have adverse effects. These findings suggest that careful optimization of ultrasound parameters is essential and highlight the potential of ultrasound technology as a novel and effective seed pretreatment method for improving cotton establishment under salinity stress.

Cite this article: Asgari, A., Ahmadizadeh, M., Rameshjan, Y. (2025). The effect of ultrasound waves on cotton seedling characteristics under salt stress condition. *Iranian Journal Cotton Researches*, 13 (1), 81-100.



© The author(s)



10.22092/ijcr.2025.371071.1245

Publisher: Cotton Research Institute of Iran



تأثیر امواج فراصوت بر خصوصیات گیاهچه‌ای پنبه تحت شرایط تنش شوری

اشکان عسگری^{۱*}، مصطفی احمدی زاده^۱، یونس رامش جان^۲

^۱ مجتمع آموزش عالی میناب، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس. عضو هسته پژوهشی اگرواکولوژی در مناطق خشک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس.

^۲ دانش آموخته دکتری بوم شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۰	سابقه و هدف: در میان تنش‌های محیطی مختلف، شوری به دلیل اثرات محدود کننده آن بر فیزیولوژی و عملکرد گیاه، به یک مشکل اساسی در سراسر جهان تبدیل شده است. شوری با ایجاد پتانسیل اسمزی مانع جذب آب می‌شود یا از طریق اثرات سمی یون‌های Na^+ و Cl^- بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه تأثیر جدی دارد. لذا همواره روش‌های تعدیل کننده اثرات شوری بر مراحل اولیه رشد گیاهان مورد توجه واقع شده است. این مطالعه با هدف بررسی تأثیر مدت زمان قرارگیری بذر در معرض امواج فراصوت بر جوانه‌زنی و رفتارهای اولیه گیاهچه‌ای گیاه پنبه تحت شرایط تنش شوری در شرایط آزمایشگاهی و گلخانه‌ای صورت گرفت. مواد و روش‌ها: تیمارهای مورد بررسی در این آزمایش شامل سه زمان قرارگیری بذر در معرض امواج فراصوت (۰، ۲۰ و ۴۰ دقیقه) و سه سطح شوری (۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار) بود که پس از اعمال تیمارهای فراصوت بذرها در دو شرایط متفاوت محیط کشت (پتری دیش و سینی نشا) قرار گرفتند. سپس جوانه‌زنی و سبز شدن و سایر شاخص‌های مرتبط با آنها اندازه‌گیری گردید. این آزمایش بصورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار در آزمایشگاه و گلخانه مجتمع آموزش عالی میناب انجام شد. یافته‌ها: نتایج حاصل نشان داد که امواج فراصوت و شوری بر صفات مرتبط با جوانه زنی بذر و سبز شدن گیاهچه تأثیر معنی‌دار داشتند. نتایج مقایسه میانگین اثر ساده امواج فراصوت نشان داد که بیشترین درصد جوانه‌زنی در ۲۰ دقیقه تیمار با امواج فراصوت و کمترین مقدار آن در بدون تیمار امواج فراصوت بود. همچنین در سطح شوری ۵۰ میلی‌مولار، تیمار با فراصوت ۲۰ دقیقه توانست تا حد زیادی اثرات منفی شوری را جبران کند و بیشترین سرعت جوانه‌زنی را در این سطح از شوری ایجاد کند. افزایش مدت زمان امواج دهی از ۰ به ۲۰ دقیقه به‌طور معنی‌داری درصد سبز شدن را افزایش داد، ولی افزایش بیشتر تا ۴۰ دقیقه منجر به کاهش نسبی این شاخص گردید. همچنین با افزایش سطح شوری، درصد سبز شدن به‌طور پیوسته کاهش یافت. بالاترین مقدار میانگین زمان سبز شدن در بین تیمارهای مدت تابش امواج فراصوت، مربوط به تیمار عدم تابش و تابش ۴۰ دقیقه‌ای امواج فراصوت بود، در حالی که کوتاه‌ترین میانگین زمان سبز شدن مربوط به ۲۰ دقیقه تیمار فراصوت بود. نتایج بررسی همبستگی بین دو مطالعه آزمایشگاهی و گلخانه‌ای نشان داد که شاخص‌های درصد جوانه زنی با درصد سبز شدن، سرعت جوانه زنی با سرعت سبز شدن و شاخص جوانه زنی با شاخص سبز شدن همبستگی مثبت و معنی‌دار داشتند.
واژه‌های کلیدی: التراسونیک جوانه‌زنی سبز شدن تنش غیرزنده	

نتیجه گیری: به‌طور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهند که اثرات امواج فراصوت در حضور شوری کاملاً وابسته به شدت تنش شوری و مدت‌زمان تابش امواج است. این موضوع نشان می‌دهد که هنگام استفاده از تکنیک فراصوت، آستانه‌های فیزیولوژیکی گیاه باید به‌دقت مدنظر قرار گیرند. استفاده از امواج فراصوت می‌تواند به عنوان یک فناوری نوین و مؤثر در پیش تیمار بذرهای گیاه پنبه در شرایط تنش محیطی مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: عسگری، اشکان؛ احمدی‌زاده، مصطفی؛ رامش‌جان، یونس (۱۴۰۴). تاثیر امواج فراصوت بر خصوصیات گیاهچه‌ای پنبه تحت شرایط تنش شوری. *مجله پژوهش‌های پنبه/یران*، ۱۳ (۱)، ۸۱-۱۰۰.



10.22092/ijcr.2025.371071.1245

© نویسندگان

ناشر: موسسه تحقیقات پنبه کشور



مقدمه

تنش‌های غیرزنده، شامل خشکی، شوری، درجه حرارت‌های بالا و آلاینده‌ها که گیاهان اغلب در معرض آنها قرار دارند عامل اصلی تلفات محصولات کشاورزی در سراسر جهان هستند (کرچو و همکاران، ۲۰۲۰). تنش‌های غیرزنده نه تنها رشد و عملکرد گیاهان زراعی را کاهش می‌دهد، بلکه تنش شدید باعث مرگ گیاه می‌شود (گادجو و همکاران ۲۰۰۸؛ پترو و همکاران ۲۰۱۵). شوری آب و خاک چالشی مشترک در کشاورزی مناطق خشک و نیمه‌خشک است (کوچکی و همکاران، ۱۴۰۱) که رشد و نمو طبیعی گیاهان را محدود می‌کند. در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل تبخیر و تعرق بالا، همراه با بارش کم، آبیاری بی‌رویه با آب شور و تغییر اقلیم موجب افزایش شوری در مقیاس جهانی می‌شود (سقیب و همکاران، ۲۰۱۹). شوری تهدیدی برای بهره‌وری محصولات در کلیه مناطق و به‌خصوص در مناطقی که آبیاری نقشی اساسی در تولید دارد (فیتا و همکاران، ۲۰۱۵).

شوری بر مجموعه ویژگی‌های مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی، متابولیک و مولکولی در رشد گیاه تأثیر می‌گذارد (گالال، ۲۰۱۷). اثرات بازدارنده شوری شامل کاهش پتانسیل آب خاک، سمیت یونی و عدم تعادل یونی در بافت‌ها است (هاسیگاوا و همکاران، ۲۰۰۰؛ رونتین و همکاران، ۲۰۰۲). تنش شوری باعث خشکی فیزیولوژیکی، عدم تعادل یونی و تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) می‌شود که به نوبه خود باعث ایجاد چندین واکنش فیزیولوژیکی، مورفولوژیکی و متابولیکی می‌گردد (لین و همکاران، ۲۰۱۷؛ احمد و همکاران، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶). کاهش جوانه زنی بذر، استقرار ضعیف گیاهچه و بهره‌وری کمتر محصول از مشکلات معمول در خاک‌های تحت تأثیر نمک است (تسگای و آندارجی، ۲۰۱۸). همچنین افزایش شوری در محیط رشد گیاه پنبه موجب کاهش معنی‌دار مقادیر ارتفاع بوته، تعداد غوزه، وزن لیاف، وزن تر و خشک، طول و حجم ریشه نسبت به تیمار شاهد می‌گردد (عسگری و غفوری، ۱۴۰۳). لذا رویکردهای مختلفی برای کاهش

اثرات تنش شوری بر گیاهان استفاده شده است. محققان در تلاش هستند که روش‌های نوین برای برطرف کردن اثرات منفی ناشی از شوری پیدا کنند. این روش‌های مدیریتی شامل پیش تیمار، اصلاح گیاهان، استفاده از ریزجاندانان محرک رشد، کاربرد ورمی کمپوست، بازیابی خاک‌های شور با استفاده از کمپوست و زغال زیستی است (کوچکی و همکاران، ۱۴۰۱).

پیش تیمار بذر به عنوان نوعی فناوری برای بهبود تحمل گیاه به تنش شوری و بهبود جوانه‌زنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. پیش تیمار بذر بسته به نوع بذر و گونه گیاهی، در روش‌های کلی چون پیش تیمار شیمیایی، زیستی و فیزیکی قابل دسته‌بندی می‌باشد. فناوری امواج فراصوت بعنوان یکی از روش‌های پیش تیمار بذر بکار گرفته می‌شود که افزایش در جوانه‌زنی بذر را به همراه دارد و یک فناوری امیدوارکننده در زمینه علم بذر محسوب می‌گردد (گوسوس و همکاران، ۲۰۱۰؛ ریفتا و همکاران، ۲۰۱۹). فراصوت یک روش فیزیکی است که شامل استفاده از فرکانس‌های صوتی در محدوده نامفهوم (۲۰ تا ۱۰۰ کیلوهرتز) برای برهمکنش با مواد است، که می‌تواند حالت ماده را تغییر داده و حتی واکنش‌ها را تسریع کند. وجود دیواره‌های سلولی سخت در برخی گیاهان مانع از نفوذ آب و اکسیژن به داخل سلول شده و پتانسیل جوانه‌زنی آنها را کاهش می‌دهد. یکی از دلایل بهبود سرعت جوانه‌زنی، تحریک دیواره سلولی بذر توسط امواج فراصوت می‌باشد. در ضمن فراصوت روشی ساده، ارزان و سازگار با محیط زیست است (کاوه و همکاران، ۲۰۱۸؛ عباسپور گیلانده و همکاران، ۲۰۱۹).

مطالعات متعددی به بررسی تأثیر تیمار امواج فراصوت برای تحریک جوانه زنی در بذر گیاهان مختلف از جمله هویج، تربچه، ذرت، جو، برنج، گندم، نخود و آفتابگردان پرداخته‌اند (شیمومورو، ۱۹۹۸؛ میوشی و می، ۱۹۸۸؛ هبلینگ و سیلوا، ۱۹۹۵؛ شورز و همکاران، ۱۹۹۹؛ میوشی و می، ۱۹۸۸؛ هبلینگ و سیلوا، ۱۹۹۵؛ شورز و همکاران، ۱۹۹۹؛ کابونیل و همکاران، ۲۰۰۰؛ آلاجدجیان، ۲۰۰۲؛ فلورز و

از این روش‌ها برای افزایش فرآیندهای متابولیکی متغیر در گیاه شنبليله و تحريك خواص دارویی آن استفاده كرد. لذا این مطالعه نیز با هدف ارزیابی افزایش تحمل به شوری بذر پنبه در مرحله جوانه‌زنی و گیاهچه‌ای با بهره‌گیری از امواج فراصوت صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه اثر امواج فراصوت در سه سطح (۰، ۲۰ و ۴۰ دقیقه) و سه سطح شوری (۰، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار) بررسی شد. این آزمایش بصورت فاکتوریل در قالب طرح كاملاً تصادفی با ۳ تکرار در آزمایشگاه و گلخانه مجتمع آموزش عالی میناب در سال ۱۴۰۴ انجام شد. اثر امواج فراصوت و شوری بر شاخص‌های درصد جوانه‌زنی/سبزشدن (EP/GP)، سرعت جوانه‌زنی/سبزشدن (ER/GR)، میانگین زمان جوانه زنی/سبزشدن (MET/MGT)، شاخص جوانه زنی/سبز شدن (EI/GI)، ضریب سرعت جوانه زنی و سبز شدن (CVE/CVG) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (المدرس، ۱۹۹۸؛ ایستا، ۱۹۹۹؛ کادر و جوتزی، ۲۰۰۴؛ الوایر و حناچی، ۲۰۱۲؛ جاواید و همکاران، ۲۰۱۸).

درصد جوانه‌زنی/سبزشدن (GP/EP): برای محاسبه درصد جوانه‌زنی/سبزشدن از رابطه زیر استفاده شد که در آن N' تعداد بذرهای جوانه زده و N تعداد کل بذرها می‌باشد.

$$GP/EP = \left(\frac{N'}{N} \right) * 100$$

سرعت جوانه‌زنی/سبزشدن (GR/ER): برای محاسبه سرعت جوانه‌زنی/سبزشدن از رابطه زیر استفاده شد که N_i مجموع بذرهای جوانه زده/سبز شده در شمارش هر روز و D_i شمارش روز می‌باشد.

$$GR/ER = \sum_{i=1}^d (N_i/D_i)$$

میانگین زمان جوانه زنی/سبزشدن (MGT/MET): در این رابطه n_i برابر تعداد بذرهای جوانه زده در روز i ام، D_i برابر تعداد روزهای سپری شده از شروع آزمایش و

همکاران، ۲۰۰۷؛ یلداگرد و همکاران، ۲۰۰۸؛ گوسوس و همکاران، ۲۰۱۰). همچنین محققان دیگر در مورد استفاده از فناوری فراصوت برای تحريك جوانه‌زنی بذرهای مختلف مانند ذرت، برنج و دانه‌های آفتابگردان بحث کرده و بر اهمیت آن تأکید کرده‌اند (دینگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ ریفا و همکاران، ۲۰۱۹؛ صادقیان‌فر و همکاران، ۲۰۱۹).

تنش شوری باعث کاهش شاخص‌های سبز شدن و رشد گیاهچه چای ترش شد درحالی‌که پیش تیمار بذر باعث تعدیل اثر تنش شوری بر این صفات گردید. شوری موجب کاهش مقادیر صفات مورد بررسی گردید ولی برخی روش‌های پیش تیمار موجب کاهش اثرات منفی شوری بر رشد گیاه چای ترش شدند (عسگری و احمدی زاده، ۲۰۲۴). میانو و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که فناوری فراصوت بنیه بذر جو را در چهار روز اول جوانه‌زنی افزایش داده و سرعت جوانه زنی را بهبود می‌بخشد. علی و همکاران (۲۰۲۰) اثر تابش امواج فراصوت و قرارگیری در محلول نمک بر روی جوانه زدن و ویژگی جوانه شبدر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که فراصوت و پرایمینگ بذر با NaCl یک رویکرد ساده برای افزایش تحمل به تنش شوری در شبدر می‌باشد. همچنین این بررسی‌ها نشان داد که اثرات فراصوت بر جوانه‌زنی بذر به فراوانی و زمان قرار گرفتن در معرض امواج بستگی دارد و به نظر می‌رسد بین گونه‌ها و ارقام مختلف بسیار متفاوت است.

ال ستار و تاوفیک (۲۰۲۰) تأثیر مدت زمان قرارگیری در معرض امواج فراصوت بر جوانه‌زنی و رفتارهای اولیه گیاهچه‌ای بذر شنبليله تحت تنش شوری شرایط آزمایشگاهی را مورد بررسی قرار دادند. طبق یافته‌ها، با افزایش محتوای نمک، کاهش کلی در درصد جوانه‌زنی مشاهده شد. همچنین نتایج حاکی از آن بود که فراصوت‌دهی بذر شنبليله به مدت ۱۰ و ۲۰ دقیقه تأثیر قابل توجهی بر جوانه‌زنی بذر، رشد اولیه گیاهچه و ترکیبات بیوشیمیایی در شرایط عادی و تنش دارد. این تغییر با تیمارهای بیشتر فراصوت و نمک افزایش می‌یابد. ایشان گزارش نمودند که می‌توان

N برابر تعداد بذره‌های جوانه زده/سبز شده در هر روز است.

$$MGT/MET = \sum D_i (N_i/N)$$

شاخص جوانه زنی/سبز شدن (GI/EI): در این رابطه Gt تعداد بذره‌های جوانه زده/سبز شده در روز t و Dt زمان مربوط به Gt بر حسب روز است.

$$GI = \sum Gt/Dt$$

ضریب سرعت جوانه زنی و سبز شدن (CVG/CVE): در این رابطه N_i برابر تعداد بذره‌های جوانه زده/سبز شده در هر روز، T_i برابر تعداد روزهای پس از کاشت مربوط به N است.

$$CV = (\sum N_i / 100) \times (\sum T_i N_i)$$

برای اعمال تیمارهای فراصوت، ابتدا مخزن دستگاه اولتراسونیک با آب مقطر پر شدند و سپس بذرها به همراه آب مقطر در فالتکن قرار داده شد و در داخل مخزن دستگاه قرار گرفتند تا امواج بصورت یکنواخت به کل نمونه‌ها برخورد نماید. در طی فرایند تابش دهی با فرکانس فراصوت ۲۸ کیلوهرتز، دمای واکنش ۳۰ درجه سانتی گراد و زمان‌های صفر، ۲۰ و ۴۰ دقیقه استفاده شد. در نمونه‌های شاهد بذرها در آب مقطر در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد بدون استفاده از تابش فراصوت قرار گرفتند. پس از اعمال پیش تیمارهای فراصوت بذرها در پتری دیش (ژرمیناتور) و سینی نشا (گلخانه) کشت شدند و در ادامه تیمارهای شوری به محیط‌های کشت مورد نظر اضافه گردید به نحوی که مقدار ۵ میلی‌لیتر محلول‌های مورد نظر (۰، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار) به پتری دیش اضافه شد در آزمایش گلخانه‌ای نیز در هر مرحله آبیاری مقدار ۵ میلی‌لیتر محلول‌های مورد نظر (۰، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار) به سلول‌های سینی نشا اضافه شد و بعد از کشت هر ۲۴ ساعت بذره‌های جوانه زده و سبز شده به مدت یک هفته شمارش شدند و صفات مورد نظر اندازه‌گیری شد. در مطالعه آزمایشگاهی از پتری دیش ۹ سانتی متری با کاغذ صافی لومن استفاده شد که قبل از کشت به کمک دستگاه اتوکلاو ضد عفونی شدند و در مطالعه گلخانه‌ای بذرها در سینی نشا با حجم سلول ۲۲ سی

سی و بستر ترکیبی کوکوپیت + پرلیت قرار داده شدند. برای تجزیه و تحلیل و انجام عملیات آماری از نرم‌افزار SAS 9.2 و رسم نمودار از نرم افزار Excel استفاده شد و میانگین تیمارها بر اساس آزمون LSD مقایسه شدند.

نتایج و بحث

شرایط کشت در پتری دیش: طبق نتایج تجزیه واریانس اثرات اصلی تیمار پیش تیمار با امواج فراصوت و تیمار شوری بر درصد جوانه‌زنی به ترتیب در سطح یک درصد ($p < 0.01$) و پنج درصد ($p < 0.05$) معنی دار بود (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین اثر ساده امواج فراصوت نشان داد که بیشترین درصد جوانه‌زنی (۸۴٪) در امواج فراصوت ۲۰ دقیقه و کمترین مقدار آن (۴۳٪) در تیمار بدون اعمال امواج فراصوت بود (جدول ۲). البته پیش تیمار با امواج فراصوت به مدت ۴۰ دقیقه اثر قابل توجهی بر درصد جوانه‌زنی گذاشت (۶۸٪). بنابراین با افزایش مدت زمان قرارگیری بذور پنبه در معرض امواج فراصوت به طور معنی‌داری درصد جوانه‌زنی کاهش یافت (جدول ۲)، که این نتایج با یافته‌های ملکی فراهانی و همکاران (۱۳۹۴) مطابقت دارد، این محققین در بررسی تأثیر میدان الکترومغناطیس و امواج فراصوت بر جوانه‌زنی بذر زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) گزارش کردند هرچه شدت تیمار افزایش یافت در مدت زمان کمتری آثار مثبت امواج فراصوت بر جوانه‌زنی دیده می‌شود، به طوری که در شدت ۴۰ کیلوهرتز در مدت زمان‌های دو تا شش دقیقه باعث بهبود جوانه‌زنی شد و افزایش مدت زمان اعمال تیمار به هشت و ۱۰ دقیقه باعث کاهش درصد جوانه‌زنی شد.

نتایج مقایسه میانگین اثر اصلی شوری نشان داد که با افزایش سطوح شوری درصد جوانه‌زنی کاهش یافت به طوریکه کمترین (۵۷٪) مقدار این صفت در تیمار شوری ۱۰۰ میکرومولار مشاهده شد، که با تیمار شوری ۵۰ میکرومولار (۶۳٪) تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۲). در شرایط شوری، تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن سلول‌های گیاهی را با القای

پراکسیداسیون لیپیدی، اکسیداسیون پروتئین، آسیب اسید نوکلئیک، مهار آنزیم و شروع فرآیند مرگ سلولی برنامه‌ریزی شده در معرض خطر قرار می‌گیرد (گیل و همکاران، ۲۰۱۰). افزایش یون‌های سدیم در داخل بذرها می‌تواند باعث ایجاد سمیت یونی شود و یکپارچگی غشای سلولی را به دلیل دنا توره شدن پروتئین‌های غشاء و پراکسیداسیون فسفولیپیدها از بین ببرد. متعاقباً، هموستاز یونی، جذب مواد مغذی

ضروری، مکانیسم حمل و نقل فعال و تنظیم اسمزی را بسته به شدت تنش شوری محدود می‌کند (حسن‌زمان و همکاران، ۲۰۲۲). تعادل غیرمعمول یون‌های مختلف می‌تواند فعالیت‌های متابولیکی آنزیم‌ها را به حداقل برساند و منجر به جولنه‌زی کم بذرها کاشته شده در شرایط تنش شوری شود (سعادت و صادقی، ۲۰۲۵).

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر امواج فراصوت و شوری بر شاخص‌های جوانه‌زی گیاه پنبه در شرایط کشت در پتری دیش

میانگین مربعات MS					درجه آزادی (df)	منابع تغییرات S.O.V
ضریب سرعت جوانه‌زی CVG	شاخص جوانه‌زی GI	میانگین زمان جوانه‌زی MGT	سرعت جوانه‌زی GR	درصد جوانه‌زی GP		
9.24 ns	416.70 *	0.24 ns	5.04 *	3848.14 **	۲	امواج فراصوت
22.98 ns	120.14 ns	0.17 ns	1.01 *	825.92 *	۲	شوری
13.29 ns	26.48 ns	0.14 ns	0.45 *	264.81 ns	۴	فراصوت*شوری
18.69	46.33	0.24	0.14	159.25	۱۸	خطا
14.30	30.52	14.78	17.19	19.35		ضریب تغییرات

ns و ** و * به ترتیب نشان دهنده غیرمعنی‌دار بودن و معنی دار بودن در سطح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد می‌باشد.

Ns, ** and *, Nonsignificant or significant at P= 0.05, 0.01 respectively

جدول ۲- میانگین اثرات اصلی امواج فراصوت و شوری بر شاخص‌های مرتبط با جوانه‌زی گیاه پنبه در شرایط کشت در پتری دیش

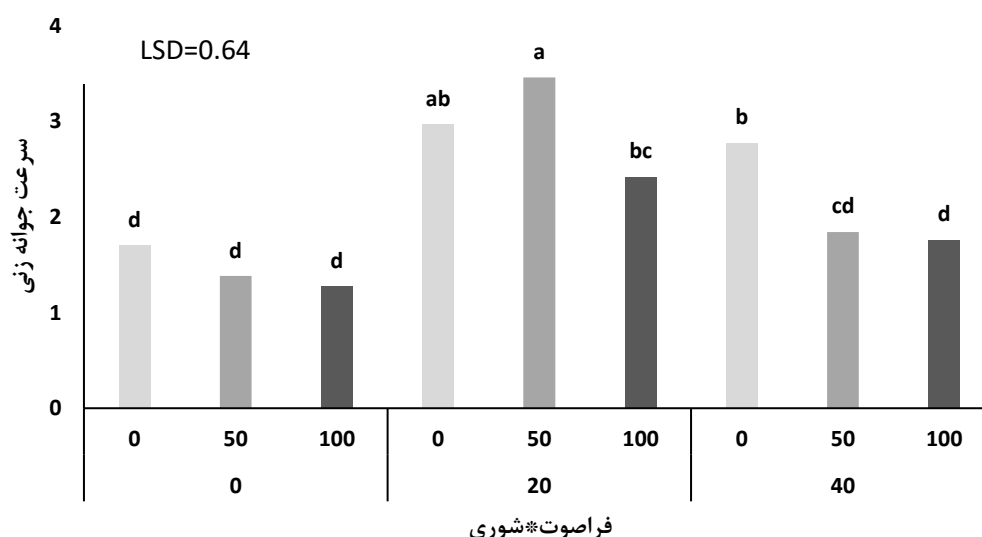
تیمار	سطوح	درصد جوانه‌زی GP	سرعت جوانه‌زی (جوانه زده در روز) GR	میانگین زمان جوانه‌زی (روز) MGT	شاخص جوانه‌زی GI	ضریب سرعت جوانه‌زی CVG
امواج فراصوت (دقیقه)	۰ ۲۰ ۴۰ LSD	43.33 84.44 67.78 12.49	1.46 2.95 2.13 0.37	3.31 3.24 3.56 0.49	14.56 27.33 25.00 6.74	30.68 30.92 29.06 4.28
شوری (میکرومولار)	۰ ۵۰ ۱۰۰ LSD	75.56 63.33 56.67 12.49	2.49 2.23 1.82 0.37	3.50 3.23 3.39 0.49	26.44 20.89 19.56 6.94	28.79 31.94 29.93 4.28

(۱). در شرایط بدون شوری، کاربرد فراصوت ۲۰ دقیقه بیشترین (۳ بذر در روز) افزایش در سرعت جوانه‌زی را نشان داد، که ناشی از تحریک فعالیت آنزیم‌ها، افزایش نفوذپذیری پوسته بذر و بهبود جذب آب می‌باشد. در مقابل، کاربرد فراصوت ۴۰ دقیقه تأثیر کمتری داشته و حتی در برخی موارد باعث کاهش سرعت جوانه‌زی شد

نتایج حاصل از تجزیه واریانس بیانگر آن است که اثرات اصلی و متقابل پیش تیمار امواج فراصوت و شوری بر سرعت جوانه‌زی در سطح پنج درصد معنی دار بود (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که هر دو عامل شوری و امواج فراصوت، به طور مستقل و متقابل بر سرعت جوانه‌زی اثرگذار هستند (جدول ۲ و شکل

جذب آب جلوگیری می‌کند یا با اثرات سمی یون‌های سدیم و کلرید مانع جوانه‌زنی شود (گوسوس و همکاران، ۲۰۱۰؛ اکبری مقدم و همکاران، ۲۰۱۱). با این حال، فراصوت ۲۰ دقیقه نسبت به نبود فراصوت عملکرد بهتری داشت، ولی نتوانست اثرات مخرب شوری بالا را به طور کامل جبران کند (۲/۵ بذر در روز). از سوی دیگر، کاربرد فراصوت ۴۰ دقیقه در این شرایط تأثیر منفی‌تری داشت که احتمالاً ناشی از ترکیب اثرات دو تنش (شوری و فراصوت شدید) است.

که می‌تواند ناشی از ایجاد تنش مکانیکی در ساختار بذر باشد. در سطح شوری ۵۰ میکرومولار، فراصوت ۲۰ دقیقه توانست تا حد زیادی اثرات منفی شوری را جبران کند و بیشترین (۳/۵ بذر در روز) سرعت جوانه‌زنی را در این سطح از شوری ایجاد کند. احتمالاً این تأثیر به دلیل بهبود انتقال آب و تنظیم اسمزی بهتر در حضور امواج فراصوت است. در شرایط شوری شدید (۱۰۰ میکرومولار)، سرعت جوانه‌زنی در تمام تیمارها کاهش چشمگیری داشت. همچنین می‌تواند بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه تأثیر بگذارد یا با ایجاد فشار اسمزی که از



شکل ۱- میانگین اثر متقابل امواج فراصوت و شوری بر شاخص سرعت جوانه زنی گیاه پنبه در شرایط کشت در پتری دیش

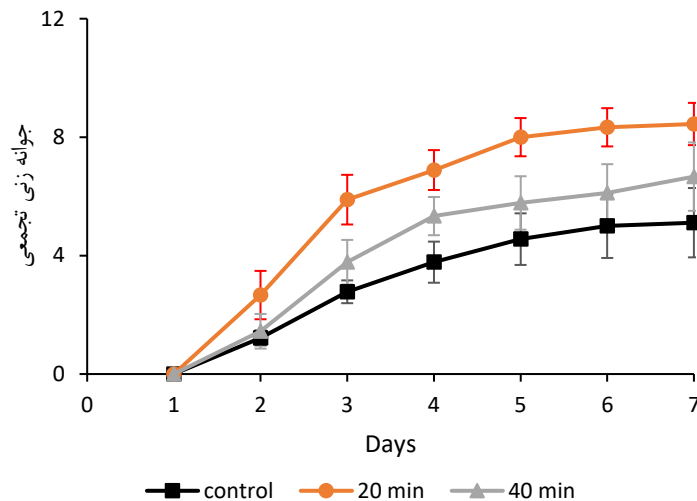
(شکل ۲). تیمار با امواج فراصوت به مدت ۲۰ دقیقه منجر به بیشترین میزان جوانه‌زنی تجمعی طی دوره ۷ روزه شد. افزایش سریع جوانه‌زنی از روز دوم تا روز چهارم مشاهده شد و پس از آن در سطحی بالا تثبیت گردید. این امر نشان‌دهنده اثر مثبت و مؤثر مدت زمان بهینه‌ی فراصوت در تحریک فعالیت متابولیکی، افزایش نفوذپذیری پوسته بذر و جذب بهتر آب است. تیمار ۴۰ دقیقه‌ای نیز در مقایسه با تیمار شاهد عملکرد بهتری داشت، ولی تأثیر آن کمتر از تیمار ۲۰ دقیقه‌ای بود. این کاهش نسبی نیز ممکن است ناشی از قرارگیری طولانی‌تر بذر در معرض تنش مکانیکی و احتمال آسیب به ساختار سلولی باشد. در تیمار شاهد

به‌طور کلی، استفاده از فراصوت به‌ویژه به مدت ۲۰ دقیقه می‌تواند نقش مؤثری در بهبود سرعت جوانه‌زنی بذر در شرایط شوری ملایم (۵۰ میکرومولار) داشته باشد. این روش می‌تواند به عنوان یک فناوری نوین و مؤثر در پیش‌تیمار بذر در شرایط تنش محیطی مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، در شوری‌های بالا (۱۰۰ میکرومولار) یا با افزایش بیش از حد قرارگیری در معرض امواج فراصوت (۴۰ دقیقه)، اثرات منفی می‌تواند بر عملکرد بذر غالب شود.

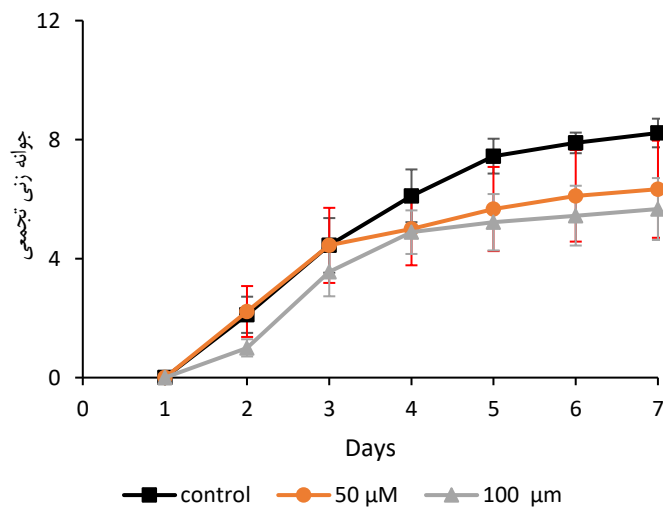
اثر مدت زمان قرارگیری بذر در معرض امواج فراصوت بر جوانه‌زنی تجمعی، نشان داد که مدت زمان تیمار نقش مهمی در بهبود جوانه‌زنی ایفا می‌کند

نتایج اثر شوری بر جوانه‌زنی تجمعی بذر پنبه نیز نشان داد با افزایش روزهای پس از کشت اختلاف تعداد بذرهای جوانه زده بین سطوح مختلف شوری افزایش یافته و به نحوی شاهد (شوری صفر) بیشترین و شوری ۱۰۰ میکرومولار کمترین مقدار را داشتند (شکل ۳).

(بدون فراصوت)، کمترین میزان جوانه‌زنی در تمام روزهای اندازه‌گیری مشاهده شد که نشان‌دهنده ضعف در جذب آب و آغاز فرایندهای متابولیکی در غیاب تحریک فیزیکی است.



شکل ۲- جوانه‌زنی تجمعی بذرهای در اثر اصلی امواج فراصوت در شرایط کشت در پتری دیش



شکل ۳- جوانه‌زنی تجمعی بذرهای در اثر اصلی سطوح شوری در شرایط کشت در پتری دیش

مدت ۲۰ دقیقه است و با افزایش مدت زمان قرار گیری بذور در معرض امواج فراصوت (۴۰ دقیقه) میزان این شاخص کاهش (۲۵) داشته با این حال در یک گروه آماری قرار دارند و تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند. کمترین میزان این شاخص مربوط به

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد اثرات اصلی پیش تیمار با امواج فراصوت بر شاخص جوانه‌زنی در سطح پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین (۲۷) میزان این شاخص مربوط به تیمار کاربرد امواج فراصوت به

همکاران، ۲۰۲۴؛ هانگ و همکاران، ۲۰۲۴؛ عسگری و همکاران، ۲۰۲۵).

شرایط کشت در سینی نشاء: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تمام صفات اندازه‌گیری شده مرتبط با سبز شدن گیاه پنبه در شرایط کشت در سینی نشاء بطور معنی‌دار در سطح یک درصد ($P < 0.01$) تحت تأثیر اثر اصلی شوری و امواج فراصوت قرار گرفته‌اند و اثر متقابل آنها فقط بر صفات درصد و شاخص سبز شدن در سطح پنج درصد ($P < 0.05$) معنی‌دار بود (جدول ۳).

نتایج مقایسه میانگین اثر اصلی امواج فراصوت و سطوح شوری بر درصد سبز شدن بذور نشان داد، بین تیمارهای امواج فراصوت از نظر درصد سبز شدن تفاوت معنی‌داری وجود داشت ($P < 0.01$) و بیشترین درصد سبز شدن (۸۱ درصد) مربوط به پیش‌تیمار به مدت ۲۰ دقیقه (۸۱٪) و در حالی که کمترین مقدار درصد سبز شدن (۵۶٪) مربوط به عدم پیش‌تیمار با امواج فراصوت بود. افزایش مدت زمان امواج دهی از ۰ به ۲۰ دقیقه به‌طور معنی‌داری درصد سبز شدن را افزایش داد، ولی افزایش بیشتر تا ۴۰ دقیقه منجر به کاهش نسبی این شاخص گردید. همچنین با افزایش سطح شوری، درصد سبز شدن به‌طور پیوسته کاهش یافت (جدول ۴).

تیمار عدم کاربرد امواج فراصوت (۱۴) بود، که به لحاظ آماری نسبت به تیمارهای کاربرد امواج فراصوت اختلاف معنی‌داری داشت. که این امر ناشی از اختلاف درصد و سرعت جوانه زنی بالاتر این تیمارها می‌باشد (جدول ۲). در این شاخص حداکثر وزن به بذرهایی که در روز اول جوانه زده‌اند، در حالی که وزن کمتری به بذرهایی که در تاریخ‌های بعدی جوانه زده‌اند، داده می‌شود و کمترین وزن به بذرهایی که در روز آخر جوانه زده‌اند تعلق می‌گیرد (بنچ و همکاران، ۱۹۹۱). بنابراین شاخص جوانه‌زنی بر درصد جوانه‌زنی و سرعت آن به‌طور هم‌زمان تأکید دارد. مقدار شاخص جوانه‌زنی بالاتر نشان دهنده درصد و سرعت جوانه‌زنی بالاتر است. این الگو با گزارش‌های معتبر هم‌خوان است: فراصوت با ایجاد ریز ترک‌ها در پوست دانه، نفوذپذیری و جذب آب را افزایش می‌دهد و هم‌زمان برخی آنزیم‌های کلیدی جوانه‌زنی (مثل آمیلازها و پروتئازها) را فعال‌تر می‌کند. با این‌حال، قراردهی طولانی‌تر می‌تواند به آسیب بافتی یا استرس اکسیداتیو خفیف بیانجامد و اثر افزایشی را تعدیل کند. بنابراین زمان و شدت بهینه اهمیت بسزایی دارد به‌طوری‌که در بسیاری محصولات دامنه ۱۰ تا ۳۰ دقیقه گزارش شده است و زمان ۲۰ دقیقه اعمال شده در این مطالعه نیز در این دامنه قرار دارد (الفلاحی و همکاران، ۲۰۲۲؛ گونگ و

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر امواج فراصوت و شوری بر شاخص‌های مرتبط با سبز شدن گیاه پنبه در شرایط کشت در سینی نشاء

میانگین مربعات MS					درجه آزادی (df)	منابع تغییرات S.O.V
ضریب سرعت سبز شدن CVE	شاخص سبز شدن EI	میانگین زمان سبز شدن MET	سرعت سبز شدن ER	درصد سبز شدن EP		
10.23 ns	1453.03**	0.73*	0.97**	1522.63**	۲	امواج فراصوت
79.36**	6.25 ns	5.24**	3.47**	816.46**	۲	شوری
1.10 ns	165.48*	0.14 ns	0.12 ns	172.01*	۴	فراصوت*شوری
3.42	45.51	0.17	0.08	42.79	۱۸	خطا
8.96	13.47	8.54	13.00	9.63		ضریب تغییرات

ns و ** به ترتیب نشان دهنده غیرمعنی‌دار بودن و معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد می‌باشد.

Ns, ** and *, Nonsignificant or significant at $P = 0.05, 0.01$ respectively

جدول ۴- میانگین اثرات اصلی التراسونیک و شوری بر شاخص‌های مرتبط با سبز شدن گیاه پنبه در شرایط کشت در سینی نشا

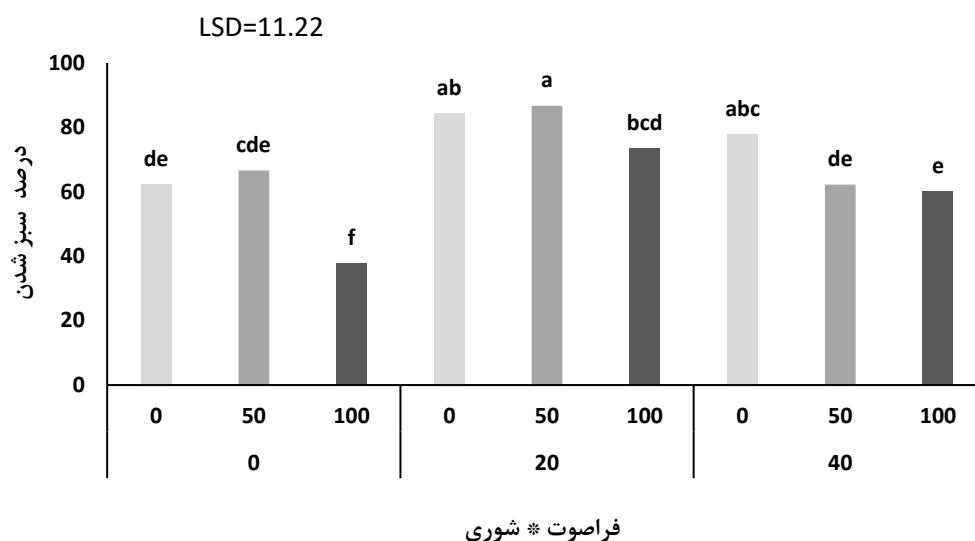
تیمار	سطوح	درصد سبز شدن	سرعت سبز شدن (سبز شده در روز)	میانگین زمان سبز شدن (روز)	شاخص سبز شدن	ضریب سرعت سبز شدن
		EP	ER	MET	EI	CVE
امواج فراصوت (دقیقه)	۰	55.55	1.88	4.78	39.11	21.13
	۲۰	81.48	2.53	3.28	64	19.42
	۴۰	66.66	2.3	4.78	47.11	21.38
	LSD	6.47	0.28	0.41	6.68	1.83
شوری (میکرومولار)	۰	74.81	2.74	4.36	49.11	23.11
	۵۰	71.85	2.44	4.69	50.56	21.47
	۱۰۰	57.04	1.54	5.82	50.56	17.34
	LSD	6.47	0.28	0.41	6.68	1.83

با این حال، اثر متقابل شوری و امواج فراصوت بر درصد سبز شدن گیاه پنبه در شرایط کشت در سینی نشا، پاسخ‌هایی پیچیده و غیرخطی نشان داد (شکل ۴). نتایج بیانگر آن است که هر دو عامل (شوری و فراصوت) به صورت مستقل و نیز به شکل تعاملی، بر سبز شدن گیاه تأثیرگذار بوده‌اند و تأثیرات ترکیبی آن‌ها به شدت به سطح شوری و مدت زمان تابش فراصوت وابسته است. در شرایط بدون شوری، افزایش مدت زمان تابش امواج فراصوت منجر به بهبود معنی‌دار در درصد سبز شدن گردید و به‌ویژه امواج فراصوت ۲۰ دقیقه، یکی از بالاترین درصدهای سبز شدن (حدود ۸۴٪) را نشان داد، که با تیمار تابش ۴۰ دقیقه‌ای امواج فراصوت در شرایط بدون تنش (۷۸٪) در یک گروه آماری قرار دارند. این نتیجه حاکی از آن است که فراصوت می‌تواند جذب آب را افزایش داده، فعالیت آنزیم‌ها را تحریک کند و موانع فیزیکی پوسته بذر را تضعیف نماید (شکل ۴). این مشاهدات با یافته‌های پژوهش‌های قبلی هم‌راستا هستند که نشان داده‌اند تیمار ملایم فراصوت می‌تواند خواب بذر را شکسته و جوانه‌زنی را تقویت کند (بابایی-قافلستانی و همکاران، ۲۰۲۰).

قابل توجه است که در شرایط شوری متوسط (۵۰ میلی مولار) بیشترین درصد سبز شدن (حدود ۸۷٪) در تیمار تابش ۲۰ دقیقه امواج فراصوت مشاهده شد (شکل ۴). این امر می‌تواند ناشی از بروز پدیده هورمسیس باشد، یعنی زمانی که تنش خفیف اسمزی، سازوکارهای دفاعی گیاه را فعال کرده و موجب افزایش

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، تولید اسمولیت‌هایی مانند پرولین، و یا افزایش سنتز هورمون‌های رشد نظیر جیبرلین‌ها می‌شود (عبدالحمید، ۲۰۱۹؛ سینزیا و برومبو، ۲۰۲۳؛ گوش و همکاران، ۲۰۲۵). با این حال، ترکیب این سطح از شوری با تابش امواج فراصوت بالاتر از ۲۰ دقیقه (به ویژه در مدت‌های ۴۰ دقیقه)، منجر به کاهش شدیدی در سبز شدن (۶۲٪) شد (شکل ۴) که احتمالاً به دلیل تحریک بیش‌ازحد یا تداخل در پاسخ‌های فیزیولوژیکی گیاه بوده است، چراکه هم‌زمان بودن تنش محیطی و تحریک مکانیکی ممکن است مسیرهای تنظیمی گیاه را مختل کند.

در شدیدترین سطح شوری (۱۰۰ میلی مولار)، کاهش چشمگیر در درصد سبز شدن در تمام تیمارهای فراصوت مشاهده شد، به‌ویژه در تیمار عدم تابش امواج فراصوت که پایین‌ترین درصد سبز شدن (حدود ۳۷٪) را به خود اختصاص داد (شکل ۴). این افت شدید می‌تواند به تنش شدید یونی و اسمزی نسبت داده شود که باعث اختلال در جذب آب، آسیب به غشاهای سلولی، کاهش عملکرد آنزیم‌ها و مختل شدن فرایندهای حیاتی جوانه‌زنی می‌شود. همچنین، تابش طولانی‌مدت امواج فراصوت در چنین شرایطی، احتمالاً موجب تشدید آسیب‌های سلولی از طریق ایجاد تنش مکانیکی، تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، و بی‌ثباتی در ساختار غشای سلولی و می‌تواند منجر به اختلال در فرایند جوانه‌زنی شود. این امر می‌تواند منجر به کاهش توانایی گیاه در تحمل تنش شوری شود.



شکل ۴- میانگین اثر متقابل امواج فراصوت و شوری بر شاخص درصد سبز شدن گیاه پنبه در شرایط کشت در سینی نشا

مکانیسم‌های فیزیولوژیکی بذر می‌شود (لیو و همکاران، ۲۰۱۸؛ عطا و همکاران، ۲۰۲۳).

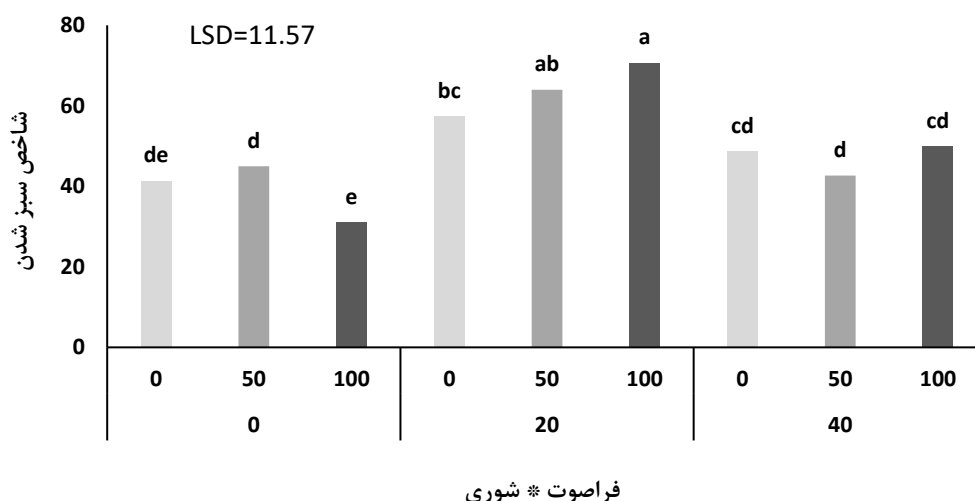
سرعت سبز شدن شاخصی کلیدی در ارزیابی توان رقابت اولیه گیاهچه در شرایط مزرعه می‌باشد. نتایج اثر اصلی مدت تابش امواج فراصوت نشان داد، بیشترین سرعت سبز شدن در تیمار فراصوت ۲۰ دقیقه‌ای مشاهده شد (۲/۵۳) که به لحاظ آماری با تیمار ۴۰ دقیقه تابش امواج فراصوت (۲/۳) تفاوت معنی‌داری نداشت، در حالی که کمترین مقدار این صفت (۲/۸۸) در بین تیمارهای تابش امواج فراصوت مربوط به تیمار عدم تابش امواج فراصوت بود. نتایج اثر اصلی میزان شوری نشان داد، بیشترین میزان سرعت سبز شدن (۲/۷۴) مربوط به تیمار عدم شوری بود و کمترین میزان این صفت مربوط به شوری ۱۰۰ میلی مولار (۱/۵۴) به ثبت رسید (جدول ۴). افزایش شوری کاهش معنی‌دار در سرعت سبز شدن ایجاد کرد، اما فراصوت تأثیر مثبتی در افزایش این شاخص داشت. نتایج نشان می‌دهد که تیمار فراصوت توانسته با افزایش جذب آب و شکستن خفتگی، باعث تسریع در فرآیند سبز شدن گردد. این یافته تأییدکننده پژوهش‌هایی است که نشان داده‌اند کایتاسیون ناشی از فراصوت منجر به

به‌طور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهند که اثرات امواج فراصوت در حضور شوری کاملاً وابسته به شدت تنش شوری و مدت‌زمان تابش بوده و در برخی شرایط مفید و در برخی دیگر مضر ظاهر شده است. بهترین نتایج در تیمار بدون شوری یا شوری متوسط با ۲۰ دقیقه فراصوت حاصل شده‌اند (شکل ۴). این موضوع نشان می‌دهد که هنگام استفاده از تکنیک فراصوت، آستانه‌های فیزیولوژیکی گیاه باید به‌دقت مدنظر قرار گیرند. بهبود چشمگیر این شاخص در تیمار فراصوت ۲۰ دقیقه‌ای احتمالاً ناشی از تحریک متابولیسم بذر، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و افزایش نفوذپذیری غشا به آب است. با این حال، افت درصد سبز شدن در مدت‌زمان ۴۰ دقیقه تابش امواج فراصوت می‌تواند به دلیل آسیب فیزیکی ناشی از تابش بیش از حد اولتراسوند باشد (گوسوس و همکاران، ۲۰۱۰؛ انگ و همکاران، ۲۰۲۲؛ گونگ و همکاران، ۲۰۲۴؛ هلنگ و همکاران، ۲۰۲۴). از سوی دیگر، کاهش درصد سبز شدن در تیمارهای شور، حاکی از تأثیر منفی تنش شوری بر فعالیت آنزیمی، جذب آب و تحرک یونی در مراحل ابتدایی جوانه‌زنی است. این نتایج هم‌راستا با یافته‌هایی است که نشان دادند شوری باعث اختلال در

تیمارهای شوری نشان داد، شوری باعث افزایش معنی‌دار این شاخص شد به گونه‌ای که در بین تیمارهای شوری، بالاترین (۵/۸۲) میزان این شاخص مربوط به تیمار شوری ۱۰۰ میلی مولار و تیمار بدون شوری کمترین (۴/۳۶) میانگین زمان سبز شدن بود (جدول ۴). میانگین زمان سبز شدن نشان‌دهنده سرعت کلی جولنه‌زنی در یک جمعیت بذر است. افزایش زمان سبز شدن در تیمارهای شور به دلیل کاهش جذب آب و تأخیر در فعالیت‌های آنزیمی و متابولیکی است. در مقابل، کاهش زمان سبز شدن در تیمارهای فراصوت، به ویژه در زمان ۲۰ دقیقه، بیانگر نقش مثبت آن در تسریع جوانه‌زنی است.

افزایش فعالیت آنزیم‌های مؤثر در هیدرولیز ذخایر غذایی بذر می‌شود. از طرف دیگر کاهش سرعت سبز شدن تحت شرایط شور نیز منطقی است (یلداگرد و همکاران، ۲۰۰۸)، زیرا تنش شوری با افزایش پتانسیل اسمزی محیط، جذب آب را مختل کرده و سبب تأخیر در سبز شدن می‌شود (گوسوس و همکاران، ۲۰۱۰).

بالاترین مقدار میانگین زمان سبز شدن در بین تیمارهای مدت تابش امواج فراصوت، مربوط به تیمار عدم تابش و تابش ۴۰ دقیقه‌ای امواج فراصوت بود (۴/۷۸)، در حالی که کوتاه‌ترین میانگین زمان سبز شدن مربوط به تیمار فراصوت ۲۰ دقیقه‌ای (۵.۲۸) روز بود. از سوی دیگر مقایسه میانگین اثر اصلی



شکل ۵- میانگین اثر متقابل امواج فراصوت و شوری بر شاخص سبز شدن گیاه پنبه در شرایط کشت در سینی نشا

حالی که کمترین مقدار این شاخص (۳۱) مربوط به تیمار ۱۰۰ میلی مولار شوری و بدون تابش فراصوت بود. این یافته بیانگر آن است که فراصوت با مدت زمان مناسب می‌تواند اثرات منفی ناشی از تنش شوری شدید را تا حدی تعدیل کند. در شرایط بدون شوری، تفاوت چندانی بین مدت زمان‌های مختلف فراصوت مشاهده نشد، ولی در سطوح شوری متوسط (۵۰ میلی مولار)، تابش ۲۰ دقیقه‌ای فراصوت منجر به افزایش قابل توجه شاخص سبز شدن گردید. در شرایط تنش

نتایج حاصل از بررسی اثر متقابل امواج فراصوت و شوری بر شاخص سبز شدن بذر پنبه در شرایط کشت در سینی نشا نشان داد که تیمارهای مختلف تأثیر معناداری بر شاخص سبز شدن داشته‌اند (جدول ۳). بیشترین میزان شاخص سبز شدن در اثر متقابل شوری ۱۰۰ و ۵۰ میلی مولار با ۲۰ دقیقه تابش فراصوت مشاهده شد (به ترتیب ۷۰/۶۷ و ۶۴) که با یکدیگر تفاوت معنی داری نداشتند. با این حال، به‌طور معناداری نسبت به برخی از تیمارها برتری داشتند. در

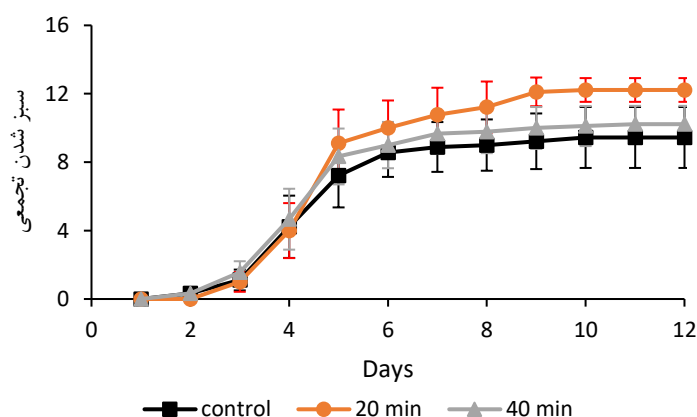
شوری بالا، به نظر می‌رسد تابش فراصوت با مدت‌زمان بهینه (۲۰ دقیقه) از طریق القای تغییراتی در دیواره سلولی، افزایش نفوذپذیری غشای بذر و تحریک مسیرهای آنزیمی مؤثر در جوانه‌زنی، توانسته است مقاومت بذر به شرایط شور را افزایش دهد. این موضوع با مطالعات پیشین نیز همخوانی دارد؛ به‌عنوان نمونه، پژوهش‌هایی که اثرات مثبت فراصوت را بر افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در شرایط تنش شوری گزارش کرده‌اند (تاراسو و کروتوا، ۲۰۲۴).

از سوی دیگر، تابش بیش از حد فراصوت (۴۰ دقیقه) حتی در شرایط شوری پایین نیز موجب کاهش شاخص سبز شدن نسبت به تابش ۲۰ دقیقه شد که احتمالاً ناشی از آسیب‌های مکانیکی یا القای استرس ثانویه در بذرها می‌باشد. بنابراین، به نظر می‌رسد مدت‌زمان تابش فراصوت باید به‌صورت بهینه و متناسب با شدت تنش انتخاب شود. به طور کلی، شاخص سبز شدن ترکیبی از سرعت و درصد سبز شدن را در بر می‌گیرد و نشان‌دهنده عملکرد کلی بذر در سبز شدن است. افزایش آن در اثر فراصوت ناشی از افزایش هم‌زمان درصد و سرعت سبز شدن است. در مقابل، شوری عملکرد کلی بذر را تضعیف کرده و کاهش معنی‌دار در این شاخص ایجاد نموده است.

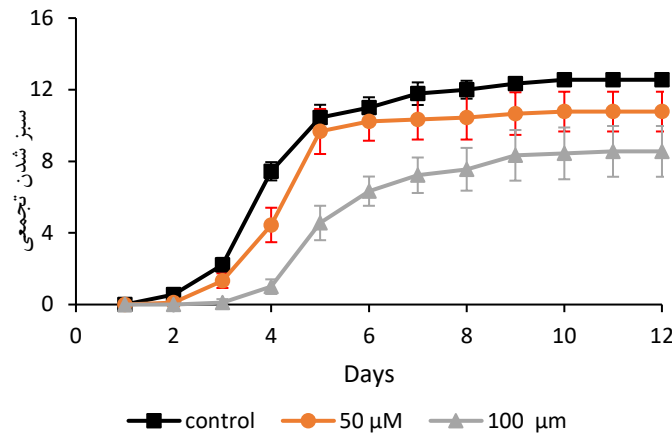
مقایسه میانگین بین تیمارهای شوری نشان داد، بالاترین مقدار ضریب سرعت سبز شدن در تیمار بدون شوری ثبت شد (۲۳/۱۱) و کمترین مقدار در تیمار

شوری ۱۰۰ میکرومولار (۱۷/۲۳). تغییرات بین تیمارها نسبتاً کم بوده، اما فراصوت باعث کاهش نسبی نوسانات شد (جدول ۴). ضریب تغییرات سبز شدن معیاری برای یکنواختی و هماهنگی سبز شدن بذرها است. کاهش ضریب در تیمارهای فراصوت نشان‌دهنده تأثیر مثبت این روش در هم‌زمان‌سازی جوانه‌زنی است. همچنین کاهش این ضریب در شوری بالا اگرچه به ظاهر نشانه هماهنگی است، اما در واقع به دلیل کاهش کلی سرعت سبز شدن و حذف بذرهای ضعیف‌تر بوده و نمی‌توان آن را نشانه‌ای مثبت تلقی کرد.

نتایج درصد سبز شدن تجمعی نیز بخوبی تأثیر مثبت امواج فراصوت به مدت ۲۰ دقیقه را نشان می‌دهد و همچنین ثابت شدن تعداد گیاهچه‌های سبز شده از روز نهم قابل مشاهده می‌باشد. از طرفی روند تجمعی سبز شدن در هر سه تیمار فراصوت تقریباً مشابه بود و اختلاف از روز پنجم ملموس‌تر گردید (شکل ۶). در خصوص نتایج درصد سبز شدن تجمعی تحت تأثیر تیمارهای شوری، مقدار این شاخص در شاهد بیشتر از سایرین بود بطوریکه اختلافات از روز ۳ سبز شدن قابل مشاهده بود و کمترین مقدار نیز در شوری ۱۰۰ میلی مولار حاصل شد. اختلاف سبز شدن تجمعی بین تیمارهای شوری صفر و ۵۰ میلی مولار با شوری ۱۰۰ میلی مولار قابل تشخیص و معنی دار بود (شکل ۷).



شکل ۶- سبز شدن تجمعی بذرها در اثر اصلی امواج فراصوت در شرایط کشت در سینی نشا



شکل ۷- سبز شدن تجمعی بذر های در اثر اصلی سطوح شوری در شرایط کشت در سینی نشا

جوانه زنی با شاخص سبز شدن ($0/54^{**}$) همبستگی مثبت و معنی‌دار داشتند. بدین ترتیب روندهای تقریباً مشابه آنها را در تیمارهای مورد بررسی در آزمایشات را نشان می‌دهد (جدول ۶).

نتایج بررسی همبستگی بین دو مطالعه آزمایشگاهی و گلخانه‌ای نشان داد که شاخص‌های درصد جوانه زنی با درصد سبز شدن ($0/68^{**}$)، سرعت جوانه زنی با سرعت سبز شدن ($0/52^{**}$) و شاخص

جدول ۶- ضرایب همبستگی بین شاخص‌ها در هر دو شرایط کشت پتری دیش و سینی نشا با یکدیگر

	GP	GR	MGT	GI	CVG
EP	0.686**				
ER		0.520**			
MET			0.005 ^{ns}		
EI				0.542**	
CVE					0.054 ^{ns}

مدت زمان ۴۰ دقیقه فراصوت، اثر منفی بر جوانه زنی و سبز شدن داشتند و موجب کاهش شاخص‌ها در مقایسه با سایرین شدند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تیمار بذر با امواج فراصوت، در صورتی که به‌درستی و با در نظر گرفتن شرایط محیطی به‌کار گرفته شود، می‌تواند روشی مؤثر برای بهبود جوانه زنی، سبز شدن و استقرار گیاه در مراحل اولیه رشد گیاه پنبه باشد. برای کاربردهای عملی در کشاورزی، استفاده از امواج فراصوت بصورت پیش تیمار بذر در محیط‌های تحت تنش شوری با در نظر گرفتن شرایط حاکم بر مزرعه و نوع گونه گیاهی، توصیه می‌شود. قابل ذکر است در گیاهانی که مقدار بذر مصرفی در واحد سطح زیاد می‌باشد اعمال تیمار فراصوت، محدودیت اصلی در فاز اجرایی می‌باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که شوری و تابش امواج فراصوت، به‌طور معنی‌داری بر ویژگی‌های بذر و گیاهچه پنبه در شرایط پتری دیش و کشت در سینی نشا تأثیر دارند. اثرات مثبت فراصوت به‌ویژه در شرایط بدون شوری و شوری ۵۰ میکرومولار مشهود بود و در این وضعیت، تابش ۲۰ دقیقه‌ای امواج فراصوت بالاترین درصد جوانه‌زنی و سبز شدن را به همراه داشت. همچنین، شوری متوسط (۵۰ میلی مولار) بدون هیچ‌گونه تیمار فراصوت نیز نتایج مطلوبی از خود نشان داد که احتمالاً به واسطه تحریک ملایم سازوکارهای دفاعی و سازگاری گیاه با تنش اسمزی ایجاد شده است. اما ترکیب شوری شدید (۱۰۰ میلی مولار) و

1. Abbaspour-Gilandeh, Y., Kaveh, M., and Jahanbakhshi, A. 2019. The effect of microwave and convective dryer with ultrasound pre-treatment on drying and quality properties of walnut kernel. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(11): e14178.
2. Abdelhamid, M. T.; El-Masry, R. R.; Darwish, D. S.; Abdalla, M. M. F.; Oba, S.; Ragab, R.; Sabagh, A. E.; El Kholy, M. H.; Omer, E. (2019) Mechanisms of seed priming involved in salt stress amelioration. In: Hasanuzzaman, M.; Fotopoulos, V. (eds.) *Priming and Pretreatment of Seeds and Seedlings: Implication in Plant Stress Tolerance and Enhancing Productivity in Crop Plants*. Springer, Berlin, pp 219–251.
3. Ahmad, P., Hashem, A., Abd-Allah, E.F., Alqarawi, A.A., John, R., Egamberdieva, D., and Gucel, S. 2015. Role of *Trichoderma harzianum* in mitigating NaCl stress in Indian mustard (*Brassica juncea* L.) through antioxidative defense system. *Frontiers in Plant Science*, 6: 868.
4. Akbarimoghaddam, H., Galavi, M., Ghanbari, A., and Panjehkeh, N. 2011. Salinity effects on seed germination. *Trakia Journal of Sciences*, 9: 43–50.
5. Aladjadjian, A. 2002. Increasing carrot seeds (*Daucus carota* L., cv. Nantes) viability through ultrasound treatment. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 8: 469–472.
6. Alfalahi, A.O., et al. 2022. Ultrasonic treatment enhances germination and affects antioxidant gene expression in soybean (*Glycine max* L. Merr). *Agronomy*, 12(10): 2446.
7. Al-Mudaris, M. 1998. Notes on various parameters recording the speed of seed germination. *Der Tropenlandwirt-Journal of Agriculture in the Tropics and Subtropics*, 99(2): 147–154.
8. Aly, T.A., Mustapha, A.T., Zhou, C., Sun, Y., and Ma, H. 2020. Ultrasound and salinity effects on growth, chemical composition and protein quality of clover sprouts. *Plant Archives*, 20(1): 2327–2337.
9. Asgari, A., and Ahmadizadeh, M. 2024. Performance of *Hibiscus sabdariffa* under constraining condition of salinity stress using seed treatment and humic acid application. *Environmental Engineering and Management Journal*, 23(12): 2429–2441.
10. Asgari, A., and Ghafori, A. 2024. The effects of biochar on improving the tolerance to salinity stress and some growth traits in cotton. *Iranian Journal of Cotton Researches*, 11(1), 1–12.
11. Asgari, A., Tahmasebi, A., and Jamali, B. 2025. Alleviation of seed dormancy and promotion of germination in *Physalis alkekengi* using ultrasound stimulation. *Environmental Engineering and Management Journal*, 24(6): 1251–1258.
12. Atta, K., Mondal, S., Gorai, S., Singh, A.P., Kumari, A., Ghosh, T., Roy, A., Hembram, S., Gaikwad, D.J., Mondal, S., Bhattacharya, S., Jha, U.C., and Jespersen, D. 2023. Impacts of salinity stress on crop plants: improving salt tolerance through genetic and molecular dissection. *Front Plant Sci*, 14: 1241736.
13. Babaei-Ghaghelestany, A., Alebrahim, M.T., MacGregor, D.R., Khatami, S.A., Hasani Nasab Farzaneh, R. 2020. Evaluation of ultrasound technology to break seed dormancy of common lambsquarters (*Chenopodium album*). *Food Science & Nutrition*, 15: 2662-2669.
14. Benech-Arnold, R.L., Fenner, M., and Edwards, P.J. 1991. Changes in germinability, ABA content and ABA embryonic sensitivity in developing seeds of *Sorghum bicolor* (L.) Moench induced by water stress during grain filling. *New Phytologist*, 118(2): 339–347.
15. 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*, 414: 121–128.
16. Ding, J., Hou, G.G., Dong, M., Xiong, S., Zhao, S., and Feng, H. 2018. Physicochemical properties of germinated dehulled rice flour and energy requirement in germination as affected by ultrasound treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 41: 484–491.
17. Elouaer, M.A., and Hannachi, C. 2012. Seed priming to improve germination and seedling growth of safflower (*Carthamus tinctorius*) under salt stress. *Eurasian Journal of Biosciences*, 6(1): 76–84.
18. El-Sattar, A.M.A., and Tawfik, E. 2023. Effects of ultrasonic waves on seedling growth, biochemical constituents, genetic stability of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*) under salinity stress. *Vegetos*, 36: 1427–1436.

19. Fita, A., Rodríguez-Burruezo, A., Boscaiu, M., Prohens, J. and Vicente, O. 2015. Breeding and domesticating crops adapted to drought and salinity: A new paradigm for increasing food production *Frontiers in Plant Science* 6: 978.
20. Flórez, 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: 68–75.
21. Forni, C., and Borromeo, I. 2023. The utilization of seed priming as a tool to overcome salt and drought stresses: Is still a long way to go? *Seeds*, 2(4): 406–420.
22. Gadjev, I., Stone, J.M., and Gechev, T.S. 2008. Programmed cell death in plants: new insights into redox regulation and the role of hydrogen peroxide. *International Review of Cell and Molecular Biology*, 270: 87–144.
23. Galal, A. 2017. Physico-chemical changes in Karkade (*Hibiscus sabdariffa*) seedlings responding to salt stress. *Acta Biologica Hungarica*, 68(1): 73–87.
24. Ghosh, T., Atta, K., Mondal, S., Bandyopadhyay, S., Singh, A.P., Jha, U.C., Kumar, R., and Gujar, R.S. 2025. Hormonal signaling at seed germination and seedling stage of plants under salinity stress. *Plant Growth Regulation*, 105: 583–600.
25. Gill, S.S., and Tuteja, N. 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48: 909–930.
26. Gong, M., Kong, M., Huo, Q., He, J., He, J., Yan, Z., Lu, C., Jiang, Y., Song, J., Han, W., and Lv, G. 2024. Ultrasonic treatment can improve maize seed germination and abiotic stress resistance. *BMC Plant Biology*, 24: 758.
27. Goussous, S.J., Samarah, N.H., Alqudah, A.M., and Othman, M.O. 2010. Enhancing seed germination of four crop species using an ultrasonic technique. *Experimental Agriculture*, 46(2): 231–242.
28. Hasanuzzaman, M., Raihan, M. R. H., Nowroz, F., and Fujita, M. 2022. Insight into the Mechanism of Salt-Induced Oxidative Stress Tolerance in Soybean by the Application of *Bacillus subtilis*: Coordinated Actions of Osmoregulation, Ion Homeostasis, Antioxidant Defense, and Methylglyoxal Detoxification. *Antioxidants*, 11(10), 1856.
29. Hasegawa, P.M., Bressan, R.A., Zhu, J.K., and Bohnert, H.J. 2000. Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annual Review of Plant Biology*, 51: 463–499.
30. Hebling, S.A., and da Silva, W.R. 1995. Effects of low intensity ultrasound on the germination of corn seeds (*Zea mays* L.) under different water availabilities. *Scientia Agricola*, 52: 514–520.
31. Huang, S., Ashraf, U., Duan, M., Ren, Y., Xing, P., Yan, Z., and Tang, X. 2024. Ultrasonic seed treatment improved seed germination, growth, and yield of rice by modulating associated physio-biochemical mechanisms. *Ultrasonics Sonochemistry*, 104: 106821.
32. ISTA. 1999. International rules for seed testing. Rules 1999.
33. Javaid, M.M., Florentine, S., Ali, H.H., and Weller, S. 2018. Effect of environmental factors on the germination and emergence of *Salvia verbenaca* L. cultivars (verbenaca and vernalis): An invasive species in semi-arid and arid rangeland regions. *PLoS One*, 13(3): e0194319.
34. Kader, M.A., and Jutzi, S.C. 2004. Effects of thermal and salt treatments during imbibition on germination and seedling growth of Sorghum at 42/19°C. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 190: 35–38.
35. Kaveh, M., Jahanbakhshi, A., Abbaspour-Gilandeh, Y., Taghinezhad, E., and Moghimi, M.B.F. 2018. The effect of ultrasound pre-treatment on quality, drying, and thermodynamic attributes of almond kernel under convective dryer using ANNs and ANFIS network. *Journal of Food Process Engineering*, 41(7): e12868.
36. Kerchev, P., van der Meer, T., Sujeeth, N., Verlee, A., Stevens, C.V., Van Breusegem, F., and Gechev, T. 2020. Molecular priming as an approach to induce tolerance against abiotic and oxidative stresses in crop plants. *Biotechnology Advances*, 40: 107503.
37. Koochaki, A., Nasiri Mahallati, M., Khorramdel, S., and Khajeh-Hosseini, M. 2022. Agroecology of arid regions; Volume II: Resource management and production agroecosystems. Ferdowsi University of Mashhad Press.

38. Lin, J., Wang, Y., Sun, S., Mu, C., and Yan, X. 2017. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth, photosynthesis and photosynthetic pigments of *Leymus chinensis* seedlings under salt-alkali stress and nitrogen deposition. *Science of The Total Environment*, 576: 234–241.
39. Liu, L., Xia, W., Li, H., Zeng, H., Wei, B., Han, S., and Yin, C. 2018. Salinity inhibits rice seed germination by reducing α -amylase activity via decreased bioactive gibberellin content. *Frontiers in Plant Science*, 9: 275.
40. Maleki Farahani, S., Rezazadeh, A., Aghighi Shahverdi, M. 2015. Effects of electromagnetic field and ultrasonic waves on seed germination of Cumin (*Cuminum cyminum*). *Iranian Journal of Seed Research*, 2(1): 109-118.
41. Miano, A.C., Forti, V.A., Abud, H.F., Gomes-Junior, F.G., Cicero, S.M., and Augusto, P.E.D. 2015. Effect of ultrasound technology on barley seed germination and vigour. *Seed Science and Technology*, 43: 297–302.
42. Miyoshi, K., and Mii, M. 1988. Ultrasonic treatment for enhancing seed germination of terrestrial orchid, *Calanthe discolor*, in asymbiotic culture. *Scientia Horticulturae*, 35: 127–130.
43. Petrov, V., Hille, J., Mueller-Roeber, B., and Gechev, T.S. 2015. ROS-mediated abiotic stress-induced programmed cell death in plants. *Frontiers in Plant Science*, 6: 69.
44. Pettigrew, W.T., Heitholt, J.J., and Meredith, Jr W.R. 1996. Genotypic interactions with potassium and nitrogen in cotton of varied maturity. *Agronomy Journal*, 88(1): 89–93.
45. Rifna, E.J., Ramanan, K.R., and Mahendran, R. 2019. Emerging technology applications for improving seed germination. *Trends in Food Science & Technology*, 86: 95–108.
46. Rontein, G., Basset, D., and Hanson, A.D. 2002. Metabolic engineering of osmoprotectant accumulation in plants. *Metabolic Engineering*, 4: 49–56.
47. Saadat, H., and Sedghi, M. 2025. Effect of priming using different combinations on germination indicators and antioxidant enzyme activity in Marigold seedling (*Calendula officinalis*) under salinity stress. *Plant Process and Function*, 14(65): 17.
48. Sadeghianfar, P., Nazari, M., and Backes, G. 2019. Exposure to ultraviolet (UV-C) radiation increases germination rate of maize (*Zea mays* L.) and sugar beet (*Beta vulgaris*) seeds. *Plants*, 8(2): 49.
49. Saqib, M., Akhtar, J., Abbas, G. and Murtaza, G. 2019. Enhancing food security and climate change resilience in degraded land areas by resilient crops and agroforestry. In: *Climate Change-Resilient Agriculture and Agroforestry*. (ed. Castro P), Pp. 283–297. Switzerland: Springer
50. Shimomura, S. 1998. The effects of ultrasonic irradiation on germination. *Proceedings., IEEE Ultrasonics Symposium*, 2: 1439–1442.
51. Shors, J.D., Soll, D.R., Daniels, K.J., and Gibson, D.P. 1999. Method for enhancing germination. US Pat. No. 5950362.
52. Tarasov, S.S., and Krutova, E.K. 2024. Dynamics of the activity of antioxidant enzymes and the expression of the genes encoding them in wheat after exposure to ultrasound. *Biology Bulletin*, 51(4): 346–357.
53. Tsegay, B.A., and Andargie, M. 2018. Seed priming with gibberellic acid (GA3) alleviates salinity induced inhibition of germination and seedling growth of *Zea mays* L., *Pisum sativum* Var. abyssinicum A. Braun and *Lathyrus sativus* L. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 21: 261–267.
54. Yaldagard, M., Mortazavi, S.A., and Tabatabaie, F. 2008. 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: 14–21.
55. Yaldagard, M., Mortazavi, S.A., and Tabatabaie, F. 2008. Influence of ultrasonic stimulation on the germination of barley seed and its alpha-amylase activity. *African Journal of Biotechnology*, 7(14): 2465–2471.

56. Zhang, L., Hao, N., Li, W., Zhang, B., Shi, T., Xie, M., and Yu, M. 2022. Effect of ultrasonic induction on the main physiological and biochemical indicators and γ -aminobutyric acid content of maize during germination. *Foods*. 11(9): 1358.