# ارزیابی ویژگی‌های جوانه‌زنی بذر، رشد و رنگیزه‌های فتوسنتزی کلزا تحت اثر تیمارهای مختلف امواج فراصوت

**زهرا حسنی[۱]، خدیجه احمدی[۲]، حشمت امیدی[۳*]**

[۱]کارشناسی‌ارشد، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده علوم کشاورزی. دانشگاه شاهد، تهران، ایران

[۲]دانشجوی دکتری، گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه شاهد، تهران، ایران

[۳]دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشکده علوم کشاورزی. دانشگاه شاهد، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۲/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۵/۲۲

**چکیده**

به‌منظور بررسی اثر شدت (۴۰ و ۵۹ کیلو هرتز)، توان (۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ وات) و مدت زمان (۲، ۴، ۶، ۸ و ۲۰ دقیقه) امواج فراصوت بر خصوصیات جوانه‌زنی، رشد و فیزیولوژیکی کلزا (رقم اکاپی)، آزمایشی بصورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در آزمایشگاه فناوری بذر دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه شاهد در سال ۱۳۹۷ انجام شد. درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، میانگین زمان لازم برای جوانه‌زنی، شاخص وزنی و طولی بنیه گیاهچه، طول گیاهچه، وزن خشک گیاهچه و برخی شاخص‌های فیزیولوژیک از جمله کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل، محتوای کارتنوئید و محتوای نسبی آب اندازه‌گیری شد. اثر متقابل شدت، توان و مدت زمان کاربرد امواج فراصوت تمام صفات مورد مطالعه بجز ضریب سرعت جوانه‌زنی، وزن خشک گیاهچه و محتوای نسبی آب را تحت تاثیر قرار داد. بیشترین درصد جوانه‌زنی بذور کلزا در ترکیب تیماری مربوط به امواج ۵۹ کیلوهرتز، قدرت ۱۰۰ وات و ۶ دقیقه با میانگین ۸۸/۳۳ درصد بود. محتوای کارتنوئید، کلروفیل کل، کلروفیلa و کلروفیلb به‌ترتیب با میانگین ۲۲/۵۷، ۴۹/۰۸، ۲۲/۶۲ و ۲۶/۴۷ میکروگرم بر گرم وزن تر در کاربرد امواج فراصوت ۴۰ کیلوهرتز با قدرت ۸۰ وات به‌مدت دو دقیقه مشاهده شد. بر طبق نتایج بدست آمده می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که کاربرد امواج فراصوت توانست تا حدود زیادی ویژگی‌های جوانه‌زنی، رشدی و فیزیولوژیک را در گیاه کلزا بهبود بخشد. با توجه به زمانبر بودن روش‌های متداول شکستن خواب بذر، استفاده از امواج فراصوت به‌عنوان یک فناوری نوین در شکستن خواب بذر به‌عنوان جایگزینی برای روش‌های قدیمی قابل توصیه است.

***واژه‌های کلیدی:*** امواج فراصوت، جوانه‌زنی، کلروفیل، کلزا، محتوای نسبی آب.

**مقدمه**

کلزا (*Brassica napus* L.) یکی از مهم‌ترین گیاهان روغنی است که در مناطق مختلف دنیا کشت می‌شود. رشد این گیاه در دامنه وسیعی از شرایط مختلف محیطی، امکان کاشت آن را در اقلیم‌های متفاوت را فراهم کرده است و باعث شده است که به یکی از گیاهان زراعی مهم در مناطق مختلف تبدیل شود (Azizi et al., 2008). جوانه‌زنی بذر اولین و یکی از مهم‌ترین مراحل رشد گیاهان می‌باشد. هر عاملی که موجب اختلال در جوانه‌زنی شود، استقرار نامناسب و تراکم کم بوته و در نهایت کاهش عملکرد را به دنبال خواهد داشت (Windauer et al., 2007). جوانه‌زنی مطلوب بذر؛ دوام، استقرار و عملکرد گیاهان را تضمین می‌کند. بذرهایی که بتوانند در شرایط مختلف محیطی از

*نویسنده مسئول: midi@shahed.ac.ir

سرعت و یکنواختی بالای جوانه‌زنی و سبزشدن برخوردار باشند در حصول عملکرد مناسب نقش قابل توجهی خواهند داشت. امروزه روش‌های مختلفی برای بهبود ویژگی‌های بذر وجود دارد که یکی از رایج‌ترین این روش‌ها پرایمینگ بذر می‌باشد (Malek et al., 2019). پرایمینگ یکی از رایج‌ترین روش‌های بهبود بذر می‌باشد. پرایمینگ موجب افزایش سنتز اسیدهای نوکلئیک، فعال شدن فرآیندهای ترمیمی، افزایش فعالیت‌های تنفسی و بهبود فعالیت آنتی‌اکسیدانی در بذر می‌شود. ازجمله مهم‌ترین آثار پرایمینگ افزایش درصد، سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی و سبز شدن می‌باشد (Malek et al., 2020). یکی از تیمارهایی که به‌تازگی مورد توجه قرارگرفته است، استفاده از امواج فراصوت به‌عنوان یک فناوری نوین غیرحرارتی در شکستن خواب بذر است که نه‌تنها بر درصد بلکه بر سرعت جوانه‌زنی اثر مطلوبی دارد (Yaldagard et al., 2008). امواج فراصوت[1]، امواج مکانیکی هستند که فرکانس آن‌ها بیش از ۲۰ کیلوهرتز بوده و دارای انرژی بالایی هستند که به‌عنوان یک فناوری پیشرفته، کاربرد زیادی در علوم و صنایع مختلف پیدا کرده است (Kanto et al., 2015). امواج فراصوت کاربردهای فراوانی دارند به‌طوری که نه تنها در تیمار بذر و کاهش و حذف آفات و بیماری‌ها بلکه حتی این امواج در مهندسی ژنتیک و انتقال ژن دارای جایگاه مهمی می‌باشند (Sobhani et al., 2017). بذرهایی که معرض امواج فراصوت قرار می‌گیرد، دچار تورم شده و در نتیجه فعالیت هورمون اکسین در این بذرها افزایش می‌یابد. هم‌چنین میزان تنفس در آن‌ها افزایش یافته و دارای انرژی و فعالیت زیادتری شده که نتیجه‌ی آن جوانه‌زنی سریع‌تر و یکنواخت‌تر و ایجاد گیاهان مقاوم به تنش‌ها به‌خصوص تنش شوری است (Kanto et al., 2015). بالاترین درصد و سرعت جوانه‌زنی در بذرهای پرایم شده درمنه (*Artemisia aucheri*) در ۱۰ دقیقه تحت تأثیر امواج فراصوت به‌دست آمد. با توجه به زمان‌بر بودن روش‌های متداول شکستن خواب بذر، استفاده از امواج فراصوت به‌عنوان یک فناوری نوین در شکستن خواب بذر به‌عنوان جایگزینی برای روش‌های قدیمی قابل توصیه است (Eisvand and Latifinia, 2020). اعمال تیمار با امواج فراصوت بر روی گیاه جو سبب تحریک، افزایش جوانه‌زنی و عملکرد بذرهای جو گردید. پیش‌تیمار بذرها با امواج فراصوتی سبب تسریع ۲ تا ۳ روزه جوانه‌زنی بذرهای پیش‌تیمار شده نسبت به شاهد گردید (Miano et al., 2015). گزارش شده است که دلیل افزایش ظرفیت جوانه‌زنی بذرها به شتاب و سرعت مراحل فیزیولوژیک و مورفولوژیک در بذرها به‌ویژه افزایش سرعت جذب آب مربوط می‌باشد. امواج فراصوتی، قدرت بذر گیاهان مختلف را افزایش می‌دهد، اما شرایط بهینه اعمال تیمار با امواج فراصوتی در گونه‌های مختلف متفاوت می‌باشد (Chen et al., 2012; Yaldagard et al., 2007; Ghiyasi et al., 2008). بهترین زمان پیش‌تیمار با امواج فراصوتی در نخود، گندم و هندوانه به‌ترتیب ۴۵، ۳۰ و ۵ دقیقه گزارش شد (Goussous et al., 2010). در مطالعه تأثیر امواج فراصوت در آفتابگردان، افزایش درصد و سرعت جوانه‌زنی گزارش شده است (Machikowa et al., 2013). این پژوهش با هدف بررسی اثر تیمارهای مختلف امواج فراصوت بر ویژگی‌های جوانه‌زنی بذر، رشد و هم‌چنین میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی گیاهچه کلزا انجام شد.

## مواد و روش‌ها

در این مطالعه بذور کلزا (رقم اکاپی) از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه شدند. این پژوهش به‌منظور ارزیابی شاخص‌های جوانه‌زنی و رنگدانه‌های فتوسنتزی گیاهچه کلزا تحت اثر شدت و مدت زمان امواج فراصوت به‌صورت آزمایش کاملاً تصادفی در سه تکرار در آزمایشگاه فناوری بذر دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه

1.Ultrasonic

شاهد تهران در سال ۱۳۹۷ اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل توان‌های مختلف فراصوت ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ وات، امواج فراصوت ۴۰ و ۵۹ کیلوهرتز، در پنج زمان ۲، ۴، ۶، ۸ و ۲۰ دقیقه بودند. بذور برای پیش‌تیمار با امواج فراصوت پیش از انتقال به آزمایشگاه بذور توسط محلول هیپوکلریت سدیم ۵٪ ضدعفونی شدند. برای اعمال تیمارهای فراصوت از حمام فراصوت[1] با بسامد متغیر ۴۰ و ۵۹ کیلوهرتز استفاده شد. پس از اعمال تیمارها، تمامی بذور از محلول خارج شده و در هوای آزاد آزمایشگاه به‌صورت تدریجی خشک شده و به وزن اولیه برگشتند. سپس ۳۰ عدد از بذرهای تیمار شده به ظرف پتری حاوی کاغذ صافی واتمن انتقال داده شده و در دمای ۲۲ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی ۷۰٪ و چرخه روشنایی و تاریکی ۱۲/۱۲ ساعت نگهداری شدند. تعداد بذرهای جوانه‌زده در هر روز در ساعت مشخصی ثبت و در پایان اجرای آزمون نیز تعداد کل بذرهای جوانه‌زده یا گیاهچه‌های عادی و غیرعادی شمارش و یادداشت گردید. برای اندازه‌گیری صفات ابتدا از هر پتری‌دیش به صورت تصادفی پنج گیاهچه انتخاب شد و اندازه‌گیری صفات طولی با استفاده از خط کش بر حسب سانتی‌متر و توزین آن‌ها با استفاده از ترازو بر حسب گرم صورت گرفت. در این آزمایش، وزن خشک گیاهچه با قرار دادن نمونه‌ها در درون آون با دمای ۶۰ درجه به مدت ۴۸ ساعت تعیین گردید. ویژگی‌های جوانه‌زنی با رابطه‌های ۱، ۲ و ۳ اندازه‌گیری شد (Parmoon et al., 2013; Kazemi Golozani and Dalil, 2011).

رابطه (۱) $$MGT=\frac{\sum DN}{\sum N}$$

در این رابطه MGT: میانگین مدت جوانه‌زنی، D: تعداد روزها بعد از شروع جوانه‌زنی، N: تعداد بذرهای جوانه‌زده در روز D، PG: درصد جوانه‌زنی

رابطه ( $$PG= (n/N) \times 100$$

در این رابطه PG: درصد جوانه‌زنی، n: تعداد بذور جوانه‌زده، N: تعداد کل بذرهای مورد استفاده در آزمایش

رابطه (۳) $$GC= (1/MGT)$$

در این رابطه GC: ضریب سرعت جوانه‌زنی و MGT: میانگین مدت جوانه‌زنی می‌باشند.

شاخص‌های بنیه گیاهچه (SVI1: شاخص طولی بنیه گیاهچه، SVI2: شاخص وزنی بنیه گیاهچه) از رابطه ۴ و ۵ حاصل شد (ISTA, 2010).

(رابطه ۴) SVI (1) = (میانگین طول ریشه‌چه + میانگین طول ساقه‌چه) × درصد جوانه‌زنی

(رابطه ۵) SVI (2) = (درصد جوانه‌زنی × وزن خشک گیاهچه)

جهت اندازه‌گیری محتوای کلروفیل a، b، کل و کارتنوئید بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر اندام هوایی، در مرحله دو برگچه‌ای ۰/۲ گرم از اندام هوایی به همراه ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰٪ ساییده شد. پس از ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ در دور ۱۳۰۰۰ در دقیقه آن را به حجم ۲۰ میلی‌لیتر رسانده و پس از کالیبره کردن دستگاه اسپکتروفتومتر[2] با استون ۸۰٪ (شاهد) جذب عصاره حاصل در طول موج‌های ۶۶۳، ۶۴۵ و ۴۷۰ نانومتر قرائت گردید. با استفاده از اعداد به‌دست آمده از هر نمونه و مقدار کلروفیل a، b، کل و کارتنوئید به‌ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ محاسبه گردید.

رابطه (۶) $$Chl_{a\,(V/W)} = 0.0127 \times OD_{(663)} - 0.000259 \times OD_{(645)}$$

[1] Digital ultrasonic, CD 4820, Country Italy
[2] UV-Vis Perkin Elmer, Lambda25, Conntry Germany.

$$Chl_{b\ (V/W)} = 0.0229\times OD_{(645)} - 0.000469 \times OD_{(663)}$$ رابطه (۷)

$$Chl_{T\ (V/W)} = 0.0202\times OD_{(645)} - 0.008 \times OD_{(663)}$$ رابطه (۸)

$$Carotenoides = 100\times OD_{(470)} - 3.27(mg\ Chl_a) - 104\ (mg\ Chl_b)/227$$ رابطه (۹)

در رابطه‌های بالا، $Chl_a$ محتوای کلروفیل a، $Chl_b$ محتوای کلروفیل b، $Chl_T$ محتوای کلروفیل کل (بر حسب میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ)، OD: میزان جذب نور در طول موج‌های مربوطه، V: حجم استون ۸۰٪ استفاده شده به میلی‌لیتر و W: وزن تر نمونه برگ می‌باشند. داده‌های به‌دست آمده با نرم‌افزار SAS 9.1 تجزیه و تحلیل و مقایسه میانگین با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ صورت گرفت.

## نتایج و بحث

**شاخص‌های جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه:** اثر شدت امواج فراصوت بر درصد و سرعت جوانه‌زنی، میانگین مدت زمان جوانه‌زنی، طول گیاهچه، شاخص طولی و وزنی بنیه گیاهچه معنی‌دار بود. همچنین اثر قدرت دستگاه بر سرعت و درصد جوانه‌زنی، میانگین مدت زمان جوانه‌زنی، طول گیاهچه، وزن خشک گیاهچه و شاخص طولی و وزنی گیاهچه معنی‌دار شد. اثر شدت و توان دستگاه بر صفات بر درصد و سرعت جوانه‌زنی، میانگین مدت زمان جوانه‌زنی، طول گیاهچه و شاخص وزنی گیاهچه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند. ترکیب تیماری شدت و مدت زمان امواج دستگاه بر صفات جوانه‌زنی و رشد گیاهچه بجز شاخص طولی بنیه گیاهچه معنی‌دار بدست آمد. اثر توان دستگاه و مدت زمان بر صفات درصد جوانه‌زنی، طول گیاهچه و شاخص طولی و زنی بنیه گیاهچه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شدند. اثر متقابل سه‌گانه شدت و قدرت امواج فراصوت در زمان‌های مختلف بر درصد جوانه‌زنی، میانگین مدت زمان جوانه‌زنی، طول گیاهچه، شاخص طولی و وزنی بنیه گیاهچه معنی‌دار بود (جدول ۱).

نتایج مقایسه میانگین ترکیب تیماری اثر متقابل سه‌گانه نشان داد که استفاده از امواج فراصوت ۵۹ کیلوهرتز در ۱۰۰ وات قدرت دستگاه به مدت ۶ دقیقه بیش‌ترین درصد جوانه‌زنی بذور کلزا با میانگین ۸۸/۳۳ درصد بدست آمد. امواج فراصوت ۴۰ و ۵۹ کیلوهرتز در ۶۰ وات قدرت دستگاه نسبت به توان‌های ۸۰ و ۱۰۰ وات در زمان‌های مختلف درصد جوانه‌زنی قابل توجهی نشان دادند. درصد جوانه‌زنی در زمان ۲۰ دقیقه در امواج ۴۰ و ۵۹ کیلوهرتز به‌ترتیب در توان‌های ۱۰۰ و ۶۰ واحد با کاهش جوانه‌زنی روبرو شدند و در دیگر سطوح افزایش درصد جوانه‌زنی با افزایش زمان مشاهده شد (جدول ۲). در بررسی تأثیر امواج فراصوت بر جوانه‌زنی بذور مورد (*Myrtus communis*) با استفاده از امواج فراصوت قبل از فرآیند جوانه‌زنی بذر جهت بهبود جوانه‌زنی و شکستن خواب بذر، باعث افزایش سرعت و درصد جوانه‌نی شد (Alvandian et al., 2013) که با نتایج این تحقیق هم‌خوانی دارد.

در بررسی جوانه‌زنی بذور زیره سیاه و سبز (*Cuminum cyminum* L.) با استفاده از پیش تیمارها با امواج فراصوت قبل از فرآیند جوانه‌زنی بذر جهت بهبود جوانه‌زنی و شکستن خواب بذر، که بذرها به‌مدت ۰، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ دقیقه در معرض امواج فراصوت قرار گرفتند. بیشترین درصد جوانه‌زنی برای مدت‌های ۴ و ۶ دقیقه بود و بیشترین سرعت جوانه‌زنی را تیمار با مدت ۲ دقیقه داشته است (Maleki-Farahani and Fahimi-Negad, 2011). نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که امواج فراصوت سبب افزایش سرعت جوانه و درصد جوانه‌زنی در بذر جو (Yaldagard et al., 2008)، تربچه و فلفل (Faryabi et al., 2008) می‌شود. بینا و همکاران در پژوهشی بر روی بذور بادمجان، فلفل، گل رعنا و خیار اظهار داشتند تیمار امواج فراصوت ۵۲-۴۲ کیلوهرتز نسبت به شاهد برتری دارد

(Bina et al., 2008). اعمال امواج فراصوت برای شکستن خواب بذر درمنه کوهی مؤثر واقع گردیده و سبب افزایش شاخص‌های جوانه‌زنی از جمله درصد و سرعت جوانه‌زنی شد (Eisvand and Latifinia, 2020). زمانی که بذر در معرض امواج فراصوت قرار می‌گیرد، سبب نفوذپذیری پوسته بذر و تسریع در جذب آب و بالا رفتن دمای بافت‌ها می‌شوند، افزایش دمای بافت‌ها موجب تسریع در سرعت واکنش‌های بیوشیمیایی جوانه‌زنی می‌گردد، افزایش جذب آب نیز باعث تورم بذرهای پیش‌تیمار شده با امواج فراصوت می‌شود در نتیجه فعالیت هورمون اکسین در بذر افزایش می‌یابد. هم‌چنین میزان تنفس در بذر افزایش یافته و بذر دارای انرژی و فعالیت زیادتری شده که نتیجه آن جوانه‌زنی سریعتر و یکنواخت‌تر می‌شود (Maleki-Farahani and Fahimi-Negad, 2015).

میانگین مدت زمان جوانه‌زنی تحت اثر ترکیب تیماری کاربرد امواج فراصوت ۵۹ کیلوهرتزی با قدرت ۱۰۰ وات به مدت ۸ دقیقه با میانگین ۴/۷۸ روز مشاهده شد و در کاربرد امواج ۵۹ کیلوهرتزی با قدرت ۸۰ وات به‌مدت ۴ دقیقه دارای کم‌ترین مقدار مدت زمان جوانه‌زنی با میانگین ۲/۱۶ روز بود. توان دستگاه ۸۰ وات در موج ۵۹ کیلوهرتز و توان دستگاه ۶۰ وات و موج ۴۰ کیلوهرتزی نسبت به سطوح دیگر باعث کاهش مدت زمان جوانه‌زدن بذور کلزا شدند (جدول ۲). در اینجا مدت زمان برای کاهش میانگین مدت زمان جوانه‌زنی مؤثر بود، بنابراین می‌توان استنباط کرد که با کاربرد امواج فراصوت بر روی بذور میزان زمان برای جوانه‌زنی کاهش می‌یابد. شاخص وزنی و طولی بنیه بذر در استفاده از ۵۹ کیلوهرتز امواج فراصوت با قدرت ۱۰۰ وات به مدت ۸ دقیقه به‌ترتیب میانگین ۴۸/۴۰ و ۴۳/۳۴ داشتند. استفاده از امواج فراصوت ۵۹ کیلوهرتزی با قدرت ۸۰ وات به‌مدت ۲ و ۴ دقیقه به‌ترتیب شاخص وزنی و شاخص طولی دارای کم‌ترین مقدار بودند (جدول ۲). طول گیاهچه در اثر توان دستگاه ۱۰۰ وات، موج ۴۰ کیلوهرتز و ۸ دقیقه با افزایش روبرو شد و کم‌ترین طول گیاهچه در موج ۵۹ کیلوهرتز، توان ۶۰ وات و زمان ۲۰ دقیقه مشاهده شد (جدول ۲). الوندیان و همکاران (Alvandian et al., 2013) در بررسی اثر امواج الکترومغناطیسی بر خصوصیات رشدی گیاه مورد به افزایش در طول ساقه‌چه و گیاهچه دست یافته‌اند.

طبق تحقیقی بر روی گیاه دارویی زیره سبز، امواج فراصوت سبب افزایش طول ساقه‌چه می‌گردد (Maleki Farahani et al., 2015). افزایش طول گیاهچه‌های کنجد تحت تأثیر امواج فراصوت گزارش شده است (Moghbeli et al., 2019). در پژوهش حاضر پرایمینگ فیزیکی با امواج فراصوت سبب افزایش بنیه گیاهچه کلزا شد. بنیه گیاهچه بیانگر قدرت بذر بوده و بر تمام شاخص‌های تعیین کننده توانایی بذر برای سبز شدن سریع و یکنواخت و هم‌چنین نمو طبیعی گیاهچه‌ها در طیف وسیعی از شرایط مزرعه تأثیر گذار است (Elyasirad et al., 2016). تأثیر امواج فراصوت بر شاخص‌های وزنی و طولی بنیه گیاهچه کنجد گزارش شده است (Moghbeli et al., 2019).

**جدول ۱:** تجزیه واریانس صفات مورد بررسی در گیاه کلزا تحت تأثیر امواج التراسونیک

| منابع تغییرات | درجه آزادی | درصد جوانه‌زنی | ضریب سرعت جوانه‌زنی | میانگین مدت زمان جوانه‌زنی | طول گیاهچه | وزن خشک گیاهچه | شاخص طولی | شاخص وزنی | محتوای نسبی آب | کلروفیل a | کلروفیل b | کلروفیل کل | کارتنوئید |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| امواج فراصوت | ۲ | ۶۰۵/۸۴** | ۲۸۹/۵۴* | ۰/۷۹* | ۱۷۷/۹۲* | ۱/۸۰ ns | ۲۱۰/۷۸* | ۲۴۳/۳۴* | ۲۳۶۹/۶۷** | ۲۳۵/۶۵** | ۵۵۸/۵۳** | ۱۵۱۸/۷۵** | ۳۳۸/۰۵** |
| توان دستگاه | ۲ | ۹۷۹/۲۲** | ۹۰۸/۲۲** | ۵/۵۹** | ۳۰۴/۱۱** | ۶/۳۶** | ۵۰۲/۴۷** | ۱۰۶۹/۱۹** | ۲۱۶/۶۱* | ۸۰/۳۵** | ۳۴۳/۱۲** | ۷۵۴/۶۶** | ۱۹۵/۲۴** |
| زمان | ۴ | ۵۳۴/۹۲** | ۴۰۶/۲۶** | ۲/۶۳** | ۵۲۱/۸۳** | ۳/۸۷** | ۷۱۱/۶۹** | ۶۱۸/۵۷** | ۲۵۰/۵۶** | ۵۲/۲۰** | ۴۸/۳۰** | ۱۹۳/۷۵** | ۳۸/۰۶** |
| امواج فراصوت×توان دستگاه | ۲ | ۱۰۹۷/۴۳** | ۱۱۶۸/۵۱** | ۵/۹۸** | ۷۴۸/۰۵** | ۰/۴۶ ns | ۱۴۱/۸۴ ns | ۷۱۲/۷۲** | ۷۹۸/۱۹** | ۱۸۳/۰۶** | ۴۵۸/۱۹** | ۱۲۱۱/۲۵** | ۲۸۳/۱۴** |
| امواج فراصوت×زمان | ۴ | ۱۲۹/۹۸** | ۲۴۹/۵۴* | ۰/۶۷* | ۷۶۰/۲۳** | ۴/۸۵** | ۷۸/۲۸ ns | ۱۶۴/۰۶* | ۶۶۶/۹۶** | ۳۳/۵۷** | ۲۷/۸۴** | ۱۰۸/۶۷* | ۲۲/۲۳** |
| توان دستگاه×زمان | ۸ | ۱۸۷/۵۸** | ۱۲۴/۴۴ ns | ۰/۴۰ ns | ۲۴۹/۶۶** | ۱/۳۳ ns | ۱۸۹/۰۷** | ۱۲۱/۸۹* | ۲۷۸/۵۴** | ۴۹/۲۷** | ۴۹/۲۷** | ۲۳۲/۵۲** | ۴۶/۸۳** |
| امواج فراصوت×توان دستگاه×زمان | ۸ | ۳۱۹/۹۹** | ۱۲۵/۱۵ ns | ۰/۵۸* | ۳۳۹/۳۰** | ۰/۹۷ ns | ۲۳۱/۱۶** | ۲۲۲/۳۲** | ۹۰/۸۵ ns | ۱۸/۵۴** | ۷۳/۹۰** | ۶۶/۳۲* | ۱۸/۷۲** |
| خطای آزمایش | ۹۳ | ۵۶/۴۰ | ۷۳/۸۹ | ۰/۲۵ | ۵۲/۳۵ | ۰/۷۰ | ۴۷/۴۰ | ۵۵/۳۲ | ۵۹/۸۹ | ۰/۰۳ | ۰/۰۹ | ۰/۲۳ | ۰/۰۴ |
| ضریب تغییرات (٪) | - | ۱۰/۶۰ | ۲۸/۳۹ | ۱۴/۱۶ | ۱۶/۴۲ | ۱۶/۶۶ | ۱۱/۲۶ | ۱۲/۸۹ | ۱۰/۵۱ | ۱/۶۳ | ۴/۴۹ | ۲/۷۷ | ۲/۹۵ |

* و** به ترتیب وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۵، ۱ درصد و ns برابر عدم تفاوت معنی‌دار

**جدول ۲:** مقایسه میانگین صفات مورد مطالعه کلزا تحت تأثیر تیمارهای مختلف امواج فراصوت

| امواج فراصوت (کیلوهرتز) | توان دستگاه (وات) | زمان (دقیقه) | درصد جوانه‌زنی (درصد) | میانگین مدت زمان جوانه‌زنی (بذر در روز) | طول گیاهچه (سانتی‌متر) | شاخص طولی بنه گیاهچه | شاخص وزنی بنه گیاهچه | کلروفیل a (میکروگرم بر گرم) | کلروفیل b (میکروگرم بر گرم) | کلروفیل کل (میکروگرم بر گرم) | محتوای کارتنوئید (میکروگرم بر گرم) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۲ | ۷۶/۶۵a-f | ۳/۵۲c-h | ۳۹/۰۰e-h | ۱۳/۴۶i-k | ۱۸/۰۶e-i | ۷/۶۶p | ۳/۴۱lm | ۲۳/۴۰g | ۴/۶۹p-q |
| | | ٤ | ۷۰c-i | ۳/۷۰c-g | ۵۸/۴۹b | ۲۱/۷۰d-i | ۲٤/۵۳e-h | ۵/۲۳s | ۷/۴۹g | ۱۲/۷۳n | ٦/۰۲lm |
| | ۱۰۰ | ٦ | ٦۵f-j | ٤٤/۰۵c-g | ۳۵/۸۹ab | ۳۹/۰۲abc | ۱۲/۱۳g | ۵/۳۳k | ۲۹/۰۲c | ٦/۷۷j |
| | | ۸ | ۷۳/۳۳b-g | ٤/۱۷abc | ۷۸/۳a | ۳۳/۰۷bc | ۱۱/۵۱۳ | ۵/۲۳k | ۱۱/۷۸۰ | ٦/٤٤k |
| | | ۲۰ | ۷۰c-i | ۳/۵۳c-h | ۳۸/۱e-h | ۱٦/۳۳g-k | ۲۲/۵۷e-i | ۵/۸۲j | ۱۷/۹۵ij | ٦/۹۸ij |
| | | ۲ | ٦۸/۳۳e-i | ۳/۳۳e-h | ۳۳/۱۳gh | ۱۱/۲۸jk | ۱٤/٤۹ghi | ۲۲/٦۲a | ۲٦/٤۷a | ۲۲/۵۷a |
| ٤۰ | | ٤ | ۷۳/۳۳b-g | ۳/٦۸c-g | ۳۵/۷۹f-h | ۱۵/۲۱i-k | ۲۷/٤۰c-f | ۱۲/۰۸g | ۱۳/۳۵e | ۲٤/٤۲f | ۱۱/۰۷e |
| | ۸۰ | ٦ | ٦۵f-j | ۳/۹۳b-e | ۳۵/۸۸f-h | ۱۷/۵۳f-k | ۲۹/۰٤b-e | ۱۳/۱۹e | ۱۱/۹٦e | ۲۵/۱۵e | ۱۱/۰۷e |
| | | ۸ | ۸۱/۶۵a-c | ٤/۰۳bcd | ۵۱/۷۵bc | ۲۷/۸٦b-e | ۳۹/٦۲ab | ۱٤/۵۳d | ۱۳/٤۱d | ۲۷/۹٤d | ۱۲/۸٤c |
| | | ۲۰ | ۸۱/٦٦a-c | ۳/۹۱b-e | ٤۵/۷۹c-f | ۲۹/٦٦b-f | ۲۱/۹۷e-i | ۲۰/۳۳b | ۲۲/٤۱b | ۲٤/۳۵b | ۱۸/۸۵b |
| | | ۲ | ٦۵f-i | ۳/٤۷c-h | ۳۵/٦٤f-h | ۱٦/۷۵g-k | ۱۹/۱٦e-i | ۹/۰۹f | ۱٤/۳۱d | ۹/۰٤۳f | ۱۱/٦۰op |
| ۱۰۰ | | ٤ | ۷۵b-f | ۳/۰٦gh | ٤۹/۳۱b-e | ۱۹/۲۱٤-j | ۱٦/۸۱e-i | ۸/۷۲m | ٤/۰۱lm | ۱۲/۷۲n | ۱۲/۷۲n |
| | | ٦ | ۸۰a-d | ۳/٤۰d-h | ٤۲/۱٦c-h | ۱۵/۷۷i-k | ۱۹/۷۲e-i | ۱۵/۱۳c | ۱۳/۳۹c | ۱۷/٤۵j | ۱۷/٤٤c |
| | ٦۰ | ۸ | ۸۵ab | ۳/۰۱gh | ۵۱/۷bc | ۲۵/٦۸c-h | ۱۵/۳۹f-i | ۸/۳۹n | ۳/۳۹n | ۱٦/٤٦k | ٤/٦٤p-r |
| | | ۲۰ | ۷۱/٦۷c-h | ۳/۵۳c-h | ۳۳/٦٤f-h | ۱۵/۰٤i-k | ۱۳/۵۹ghi | ۱۰/۹۹ij | ٦/۹٦n | ۱۸/۳۱i | ۷/٦۱h |
| | | ۲ | ٦۱/٦۵g-j | ٤/۰۳bcd | ۳۶/٤۵f-h | ۲۱/٦٤d-i | ۲۹/۵۰b-e | ۷/۵٤pq | ۳/۱۳no | ۱٤/٦٤m | ٤/٤۷r |
| | | ٤ | ٦۱/٦۵g-j | ۳/۸۵b-f | ۳۸/۱e-h | ۱۲/۹۳i-k | ۱۹/۸٤e-i | ۱۳/۰٦e | ٦/۳۸i | ۸/٤۷s | ۷/۹۳g |
| ۱۰۰ | | ٦ | ۸۸/۳۳a | ۸۵ab | ۳۸/٦٤d-h | ۲۱/٤۹d-i | ۲۱/۰۹e-i | ۹/۲۷l | ٤/۱۸i | ۱۸/۰۲ij | ۵/٤۳n |
| | | ۸ | ٤/۷۸a | ٤/۷۸a | ۳۹/۰۵d-h | ٤۳/۳٤a | ٤/۸/٤۰a | ۷/۳۳q | ۳/۵٦mn | ۱۰/۰۵r | ٤/۱s |
| | | ۲۰ | ۷۳/۳۳b-g | ٤/۰۸a-d | ۵۹/٦b | ۱٦/۷۲g-k | ۲۸/۷٤b-e | ۱۰/۹٤j | ۵/۹۶jk | ۱۱/۷۱۵ | ٦/۲۲kl |
| | | ۲ | ۵۱/٦۷kl | ۲/۱٦i | ۵۲/٤۵bc | ۱۱/۰٦jk | ۱۰/۱۲k | ۱۰/۳۵i | ۵/۳٦jk | ۱۵/٤۸l | ۵/۷۳m |
| | | ٤ | ٤۸/۳۳l | ۱/۹۸i | ٤۵/۸c-f | ۹/۲۹k | ۱۰/۹٦i | ۷/۷۲p | ۳/۱۵no | ۱۰/۸۷q | ٤/۵۵qr |
| ۵۹ | ۸۰ | ٦ | ۵۶j-i | ۲/۹۲h | ۵۰/۸b-d | ۱٦/۲۲h-k | ۱۵/۸۲f-i | ۵/۵۷r | ٦/٦۵hi | ۸/۲۵s | ۳/٤٤t |
| | | ۸ | ٦۰k | ۲/۹۷h | ٤۰/۷۵c-h | ۱۱/۷۷jk | ۱۵/٦٦f-i | ۸/۰٦۵ | ۳/٤۷n | ۱۱/۵۲op | ٤/۸٦pq |
| | | ۲۰ | ۷۳/۳۳b-g | ۳/٤۱d-h | ۵۱/٦bc | ۱۹/۸٤d-j | ۲۱/۱۳e-i | ۸/۵۵mn | ۳/٤۲n | ۱۱/۹۷۰ | ٤/۷٤p-r |
| | | ۲ | ۷۸/۳۳a-e | ۳gh | ۳۹/٤f-h | ۱۰/۷۰jk | ۱٤/۷۷f-i | ۱۰/۳۵k | ٤/۲۸l | ۱۰/٦۷qr | ۵/۹lm |
| | | ٤ | ۷۵b-f | ۳/۰۵gh | ۳۲/٦gh | ۱۱/٤٦jk | ۱۵/٤۵f-i | ۵/٦٤r | ۲/۸۲۵ | ۱۹/٤٤h | ۳/۲t |
| | | ٦ | ٦٦/٦۵e-j | ٤/٤۵ab | ٤۹/٤۵b-e | ۲۸/۹۹bcd | ۲۹/۳۸b-e | ۷/۳۲q | ۲/۷۷o | ۱۳/٤۵n | ۷/۱۸ij |
| ٦۰ | | ۸ | ۸۱/۷۷a-c | ۳/۹۸bcd | ۵۰/۸b-d | ۲۱/٦۱d-i | ۲٦/۱٦d-g | ۷/۳۲q | ۲/۷۷o | ۱۰/۸۸pq | ۳/۹۳s |
| | | ۲۰ | ۷٦/۶۵a-f | ۳/۸۰b-e | ۳۰/۹۵h | ۲۵/۹۲c-g | ۲۰/۳٤e-i | ۷/٦۲p | ٤/۰۹l | ۱٦/٦۳k | ۵/۲۸n |

میانگین‌ها با حروف مشابه در هر ستون فاقد تفاوت آماری بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵٪ هستند.

**رنگیزه‌های فتوسنتزی و محتوای نسبی آب:** با توجه به نتایج تجزیه واریانس، رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاهچه شامل کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل تحت تأثیر امواج فراصوت، قدرت دستگاه، هم‌چنین زمان تیمار و اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه این عوامل، تفاوت معنی‌داری نشان دادند (جدول ۱). در پژوهش حاضر اثر تیمارهای امواج فراصوت، توان دستگاه، زمان تیمار، اثر دوگانه فراصوت در توان دستگاه، فراصوات در زمان و توان دستگاه در زمان بر محتوای نسبی آب در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). با توجه به اثرات سه گانه محتوای کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل در کاربرد موج فراصوت ۴۰ کیلوهرتز با قدرت ۸۰ وات به مدت دو دقیقه به ترتیب با میانگین ۲۲/۶۲، ۲۶/۴۷ و ۴۹/۰۸ میکروگرم بر گرم وزن تر افزایش نشان دادند. محتوای کلروفیل a، در تیمار ۴۰ کیلوهرتز با قدرت دستگاه ۱۰۰ وات به‌مدت ۴ دقیقه، کلروفیل b در موج ۵۹ کیلوهرتز با توان دستگاه ۶۰ وات به‌مدت ۶ دقیقه و هم‌چنین کلروفیل کل در طول موج ۵۹ کیلوهرتز با توان دستگاه ۸۰ وات و زمان ۶ دقیقه با کاهش روبرو شدند (جدول ۲). امواج فراصوت ۴۰ کیلوهرتز با قدرت دستگاه ۸۰ وات به مدت ۲ دقیقه با میانگین ۲۲/۵۷ میکروگرم بر گرم وزن تر محتوای کارتنوئید افزایش نشان داد. در تیمار ۵۹ کیلوهرتز با قدرت ۱۰۰ وات به مدت ۶ دقیقه محتوای کارتنوئید کاهش یافت (جدول ۲). تیمار با میدان مغناطیسی کلروپلاست گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. کلروپلاست و یون‌ها و عناصر موجود در آن تحت تأثیر تیمار میدان مغناطیسی جهت‌دار می‌شوند. این پدیده با تأثیر میدان مغناطیسی بر اجرام جامد مشابه است. این موضوع باعث تغییر در شدت جذب می‌شود. فتوسنتز در واقع جذب انرژی نورانی و تبدیل آن به انرژی شیمیایی است، این انرژی در گیاه از طریق الکترون آزاد منتقل می‌شود. تحت تأثیر میدان مغناطیسی خارجی، انرژی مواد پارامغناطیس موجود در گیاه افزایش می‌یابد که این مسئله می‌تواند منجر به فعال‌سازی هورمون‌های گیاهی شود (Marghaeizadeh et al., 2014). طی یافته‌های پژوهشی تأثیر میدان مغناطیسی بر فتوسنتز، بیشتر از طریق تأثیر بر افزایش کلروفیل گیاه می‌باشد (Racuciu et al., 2008).

با توجه به تأثیر معنی‌دار تیمارهای مختلف امواج فراصوت بر خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه کلزا، در همین راستا محقیقن گزارش دادند که تیمار امواج فراصوت باعث افزایش محتوای کلروفیل برگ گیاه لوبیا چشم بلبلی به میزان ۳۳/۶ درصد نسبت به عدم کاربرد امواج الکترومغناطیسی می‌شود (Nasiri Dehsorkhi et al., 2017). طی پژوهشی امواج فراصوت باعث افزایش محتوای کلروفیل برگ و عناصر معدنی دانه لوبیا چشم‌بلبلی شده است (Ebadi et al., 2013). گزارش شده است که پیش‌تیمار فراصوت باعث افزایش بتاکاروتن هویج می‌شود. این مسأله می‌تواند مربوط به نیروی برشی ایجاد شده و محتوای انرژی بالای این امواج و تأثیر آن‌ها در شکستن و متلاشی کردن دیواره‌های سلولی و افزایش احتمال رهایش محتویات آن ها به محیط استخراج و بهبود انتقال جرم باشد (Seyedifar et al., 2014). اثر میدان مغناطیسی و امواج فراصوت باعث تغییر در جذب طیف در تمامی نمونه‌ها در هر دو حوزه جذب توسط رنگیزه‌ها، و در نتیجه تأثیر بر سیستم فتوسنتزی گیاه زنیان داشت (Marghaeizadeh et al., 2014).

افزایش مدت زمان قرارگیری در معرض امواج فراصوت منجر به کاهش معنی‌دار میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی شد. در همین راستا، سایر پژوهشگران نیز گزارش کردند که با افزایش مدت زمان تابش امواج فراصوت میزان کلروفیل به‌صورت معنی‌داری کاسته شد. این کاهش را می‌توان به تنش اکسیداتیو ناشی از امواج فراصوت نسبت داد که باعث از بین رفتن ساختمان مولکول‌های درون سلولی و کلروپلاست شده و کاهش میزان کلروفیل a، b و کل را باعث شده است (Mokhberi et al., 2016). در پژوهش حاضر نتایج نشان داد که افزایش زمان و شدت منجر به کاهش این صفت گردید ولی این کاهش به‌شدت کلروفیل‌ها نبود. در همین راستا، گزارش شد که تابش امواج فراصوت در

زمان‌های بیشتر به‌عنوان یک تنش اکسیداتیو برای سلول به شمار می‌رود و سلول با افزایش میزان کارتنوئید درون سلولی خود به‌عنوان آنتی‌اکسیدان به مقابله با تنش می‌پردازد (Chen et al., 2008).

## نتیجه‌گیری کلی

براساس نتایج این آزمایش، کاربرد تیمارهای مختلف امواج فراصوت از طریق افزایش سرعت فرآیندهای مؤثر در جوانه‌زنی بذور کلزا و هم‌چنین بهبود ویژگی‌های رشد گیاهچه و افزایش محتوای کلروفیل برگ گیاه کلزا شود. با توجه به اهمیت و اولویت درصد سبز شدن بر تراکم بوته و عملکرد نهایی نسبت به سایر صفات، نتایج این پژوهش نشان داد طول موج ۴۰ کیلوهرتز با توان ۱۰۰ وات در زمان‌های پایین توانست درصد جوانه‌زنی و محتوای کلروفیل را به نحو معنی‌داری افزایش دهد. با استفاده از فناوری جدید اولتراسوند به‌عنوان روش غیر مخرب می‌توان ویژگی‌های جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهان را بهبود بخشید.

## References


**Alvandian, S., Vahedi, A. and Taghizadeh, R. 2013.** Investigation of the effect of ultrasound and cooling waves on germination of seeds of the medicinal plant (*Myrtus communis* L.). Seed Research. 3: 21-31. (In Persian)

**Azizi, M., Soltani, A. and Khavari Khorasani, S.** 2008. Canola (physiology, agronomy, breeding and biotechnology). Jihad University of Mashhad Press. 230 p. (In Persian)

**Bina, F., Rezaei, A. and Aghaeizadeh, M. 2008.** Investigation of the effect of ultrasonic waves on the physiological and morphological process of seed germination. Proceedings of the First National Conference on Plant Biology. University of Guilan. Guilan. Iran. p 7. (In Persian)

**Chen, B., Huang, J., Wang, J. and Huang, L. 2008.** Ultrasound effects on the antioxidant defense systems of *Prophyridium cruentum*. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 16: 88-92.

**Chen, G., Wanga, Q., Liu, Y., Li, Y., Cui, J., Liu, Y., Liu, H. and Zhang, Y. 2012.** Modelling analysis for enhancing seed vigour of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) using an ultrasonic technique. Biomass Bioenergy. 47: 426 -435.

**Ebadi Sh., Gholipoor M. and Gholami A. 2013.** The effect of ultrasonic waves and nitroxin biological fertilizer on growth, yield and yield components of cowpea (*Vigna sinensis*). Second National Conference on Sustainable Agricultural Development and Healthy Environmen. (In Persian).

**Eisvand, H.R. and Latifinia, E. 2020.** Effects of hydropriming and ultrasonic waves on seed leakage and germination of Artemisia (*Artemisia aucheri* L.). Iranian Journal of Seed Science and Research. 7: 179-190. (In Persian)

**Elyasirad, S., Mousavi, S.Gh. and Sangari, Gh. 2016.** Effects of hydro and osmopriming on germination and emergence of asafoetida (*Ferula assa-foetida* L.). Journal of Seed Ecophysiology. 1: 165-179. (In Persian)

**Faryabi, A., Zaremansh, H. Keshvarii, M. and Abdali, N. 2008.** The effect of ultrasonic waves on physiologic and morphologic processes of seed germination in capsicum pepper *(Capsicum annuum)* and radish *(Rhaphanus sativus)*. The 1st National Conference on Iranian Seed Science and Technology. Gorgan. Iran. (In Persian)

**Ghiyasi, M., Seyahjam, A. A., Tajbakhs, M., Amirnia, R. and Salehzade, H. 2008.** Effect of osmopriming with polyethylene glycol (8000) on germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) seeds under salt stress. Journal of Biological. Science. 3: 1249- 1251.

**Goussous, S.J., Samarah, N.H., Alqudah, A.M. and Othman, M.O. 2010.** Enhancing seed germination of four crops species using an ultrasonic technique. Experimental Agriculture. 46: 231-242.

**International Seed Testing Association (ISTA). 2010.** International Rules for Seed Testing, Bassersdorf, Switzerland.

**Kanto, U., Jutamanee, K., Osotsapar, Y., Chai-arree, W. and Jattupornpong, S. 2015.** Promotive effect of priming with 5-aminolevulinic acid on seed germination capacity, seedling growth and antioxidant enzyme activity in rice subjected to accelerated ageing treatment. Plant Production Science. 18: 443-454.

**Kazemi Golozani, K. and Dalil, B. 2011.** Germination and seed vigor tests. Mashahd University Publisher: Mashhad. (In Persian)

**Machikowa, T., Kulrattanarak, T. and Wonprasaid, S. 2013.** Effects of ultrasonic treatment on germination of synthetic sunflower seeds. International Journal of Biological, Agriculture and Food Engineering. 7: 11-18.

**Malek, M., Ghaderi-Far, F., Torabi, B. and Sadeghipour, H.R. 2020.** The effect of priming on seed viability of canola (*Brassica napus*) cultivars under different storage conditions. Iranian Journal of Seed Research. 6: 45-60. (In Persian)

**Malek, M., Torabi, B., Ghaderi-Far, F. and Sadeghipour, H. 2019.** The germination responses of primed canola seeds to varying temperatures. Journal of Plant Production Research. 26: 215-227. (In Persian)

**Maleki-Farahani, S. and Fahiminejad, H. 2011.** The effect of seed germination in common caraway (*Carum* L.) and cumin (*Cuminum* L.) before treatment with ultrasonic sources. 2nd Conference on Seeds. Mashhad: Ferdowsi University. Pp. 258-262. (In Persian)

**Maleki Farahani, S., Reza Zade, A.R. and Aghili Shahrodi, M. 2015.** The effect of magnetic field and ultrasound on the seed germination (*Cuminum cyminum* L.). Iranian Journal of Seed Reseach. 2: 110-118. (In Persian)

**Marghaeizadeh, Gh., Gharineh M.H., Fathi, Gh., Abdali, A.R. and Farbod, M. 2014.** Effect of ultrasound waves and magnetic field on germination, growth and yield of *Carum copticum* (L.) C. B. Clarke) in lab and field conditions. Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants. 30: 539-560.

**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 Technology. 43: 297–302.

**Moghbeli, H., Gholami, A., Amerian, M. and Abbasdokht, H. 2019.** Evaluation of germination, physiological and morphological characteristics of sesame (*Sesamum indicum* L.) under different ultrasound treatment. Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology). 32: 416-427. (In Persian)

**Mokhberi, R., Rezaei, A. and Kordenaeej, A. 2016.** The interaction effect of ultrasonic and salinity on growth and metabolite production in *Dunaliella salina* cells. Journal of Plant Process and Function. 17:171-191. (In Persian)

**Nasiri Dehsorkhi, A., Makarian, H., Gholipoor, M. and Abbasdokht, H. 2017.** Investigating the effect of ultrasonic waves and seed priming on emergence and growth of cowpea under soil-applied trifluralin. Journal of Plant Protection. 31: 40-51. (In Persian)

**Parmoon, G., Ebadi, A., Jahanbakhsh Godahkahriz, S. and Davari, M. 2013.** Effect of seed priming by salicylic acid on the physiological and biochemical traits of aging milk thistle (*Silybum marianum*) seeds. Europa Journal of Cancer Pres*s*. 7(4): 223-234. (In Persian)

**Racuciu, M., Creanga, D. and Horga, I. 2008.** Plant growth under static magnetic field influence. Romanian Journal of Physics. 53: 353-359.

**Seyedifar, R., Asefi, N. and Maghsoudlou, Y. 2014.** Effect of ultrasound waves pretreatment on quantity and antioxidant capacity of extracted beta-carotene from carrot residue. Food Hygiene. 4: 63-75. (In Persian).

**Sobhani, B., Salahi, B. and Roshanli, M. 2017.** Evaluation of rapeseed cultivation potential with analytical hierarchy process model and TOPSIS in Mazandaran Province, Iran. Agroecology Journal. 13:15-24. (In Persian)

**Windauer, L., Altuna, A. and Benech Arnold, R. 2007.** Hydrotime analysis of *Lesquerella fendleri* seed germination responses to priming treatments. Industrial Crop Production. 25: 70-74.

**Yaldagard, M., Mortazavi, A. and Tabatabaie, F. 2008.** Application of ultrasonic waves as a priming technique for accelerating and enhancing the germination of barely seed: optimization of method by the Taguchi approach. Journal of the Institute of Brewing. 3: 91-95.

**Yaldagard, M., Mortazavi, S.A. and Tabatabaie, F. 2007.** The effectiveness of ultrasound treatment on the germination stimulation of barley seed and its alpha-amylase activity. Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology. 1(10): 489-492.

Journal of Seed Research, Vol. 11, No. 3, Autumn 2021

# Evaluation of germination, growth and photosynthetic characteristics of rapeseed (*Brassica napus* L.) under different ultrasound treatments

**Zahra Hasani[1], Khadijeh Ahmadi[2], Heshmat Omidi[3*]**

[1]M.Sc, Department of Agriculture and Plant Breeding, University of Shahed, Tehran, Iran.
[2]Ph.D student, Department of Agriculture and Plant Breeding, University of Shahed, Tehran, Iran
[3]Associate Prof, Department of Agriculture and Plant Breeding, University of Shahed, Tehran, Iran

**Abstract**

In order to investigate the effect of intensity (40 and 59 kHz), power (60, 80 and 100 watts) and duration (2, 4, 6, 8 and 20 minutes) of ultrasound waves on germination, growth and physiological characteristics of canola (Ekapi cultivar), a factorial experiment was carried out as completely randomized design in the Seed Technology Laboratory of the Faculty of Agricultural Sciences of Shahed University in 2019. Germination percentage, germination rate, average time required for germination, weight and length index of seedling vigor, seedling length, seedling dry weight and some physiologic parameters including chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll, carotenoid content and relative water content were measured. The interaction of intensity, power of the device and duration of application of ultrasound waves affected all studied traits except germination rate, seedling dry weight and relative water content. The highest germination percentage of rapeseed seeds in the treatment composition was related to 59 kHz waves, 100 watts and 6 minutes with an average of 88.33%. The content of carotenoids, total chlorophyll, chlorophyll a and chlorophyll b were observed with an average of 22.57, 49.08, 22.62 and 26.47 µg/g fresh weight in the application of 40 kHz ultrasonic waves with a power of 80 watts for two minutes. Based on the results, it can be concluded that the use of ultrasound was able to improve the germination, growth and physiologic characteristics of rapeseed. Therefore, according to the conventional time-consumed seed dormancy breaking methods, the use of ultrasound as a new technology to break dormancy as an alternative to older methods is recommended.

***Keywords*:** Chlorophyll, Germination, Rapeseed, Relative water content, Ultrasound.

*Corresponding author; omidi@shahed.ac.ir