

## Effect of Ultrasound on Drying Kinetics of Rough Rice at Tempering Duration in an Infrared- Hot Air Combined Dryer

FARAMARZ NOEI KHODABADI<sup>1</sup>, ALI RAJABIPOUR<sup>1\*</sup>, MAHMOUD OMID<sup>1</sup>, DARIUSH ZARE<sup>2</sup>

1. Agricultural Machinery Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, Tehran University, Karaj, Iran

2. Biosystems Engineering Department, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

(Received: June. 3, 2019- Revised: July. 7, 2019- Accepted: July. 10, 2019)

### ABSTRACT

Rough rice is one of the most important agricultural products and it plays an important role in ensuring food security. The objective of this study was to investigate the effect of high power ultrasound in tempering duration on the drying kinetics of rough rice in a combined far-infrared radiation (FIR) dryer. Tests were conducted in a factorial design at four levels of ultrasound power density (Zero, 0.5, 0.75 and 1 kW/kg), four levels of frequency (20, 25, 28, and 30kHz) and three levels of drying air temperature (30, 40, and 50°C). Results showed that mechanical characteristics of rough rice were affected significantly at all ultrasound power and frequency levels at different inlet air temperatures at tempering duration and led to reduction of both drying time and specific energy consumption. So that at power of 0.5 kW / kg, low ultrasonic frequencies of 20 and 25 kHz and input temperature of 30 ° C while reducing the percentage of cracks in rough rice kernels, they also increase the energy required for healthy seed breakage on average.

**Keywords:** Rough rice, Ultrasound, Tempering, Combined FIR dryer

## بررسی اثر امواج فراصوت بر سینتیک خشک کردن دانه شلتوک در زمان استراحت‌دهی در یک خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز-هوای گرم

فرامرز نوعی خدابادی<sup>۱</sup>، علی رجبی پور<sup>۱\*</sup>، محمود امید<sup>۲</sup>، داریوش زارع<sup>۲</sup>

۱. گروه مهندسی ماشینهای کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۳/۱۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۴/۱۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۴/۱۹)

### چکیده

شلتوک یکی از پراهمیت‌ترین محصولات کشاورزی است و نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی را به خود اختصاص داده است. در این تحقیق اثر امواج فراصوت بر سینتیک خشک کردن دانه شلتوک در زمان استراحت‌دهی در یک خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در سه سطح دمای هوای ورودی (۳۰، ۴۰ و ۵۰°C)، چهار سطح توان فراصوت (صفر، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱kW/kg) و چهار سطح فرکانس فراصوت (۲۰، ۲۵، ۲۸ و ۳۰kHz) انجام شد. برای تحلیل داده‌ها، از طرح پایه بلوک‌های کاملاً تصادفی بهره گرفته شد. نتایج بدست آمده نشان داد در دماهای مختلف هوای ورودی، استفاده از امواج فراصوت در سطوح مختلف توان و فرکانس در مدت زمان استراحت‌دهی می‌تواند بر خصوصیات مکانیکی شلتوک اثرگذار باشد و باعث کاهش مدت زمان خشک شدن دانه شلتوک و مصرف انرژی ویژه شود. به طوری که در توان ۰/۵kW/kg، فرکانس‌های پایین فراصوت ۲۰ و ۲۵kHz و دمای ورودی ۳۰°C ضمن اینکه درصد دانه‌های ترک خورده را کاهش می‌دهند به طور میانگین باعث افزایش انرژی مورد نیاز برای شکست دانه سالم نیز می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: شلتوک، فراصوت، استراحت‌دهی، خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز

### مقدمه

شلتوک یکی از پراهمیت‌ترین محصولات کشاورزی است و نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی بسیاری از کشورها بخصوص در کشورهای در حال توسعه به خود اختصاص داده است. شلتوک معمولاً در رطوبت بین ۱۸-۲۴ درصد (بر مبنای وزن تر) برداشت شده و با هدف جلوگیری از کاهش کیفیت آن و قابلیت نگهداری طولانی مدت، رطوبت محصول در محدوده ۱۴-۱۲ درصد (بر مبنای وزن تر) کاهش می‌یابد (Nosrati et al., 2018). بکارگیری خشک‌کن‌ها در فرآیند خشک کردن محصول نهایی امری اجتناب ناپذیر است و امروزه کاربرد وسیعی از خشک‌کن‌ها در این فرآیند دیده می‌شود. استفاده از فناوری‌های جدید مانند فراصوت، مادون قرمز و به کارگیری خشک‌کن‌های چند مرحله‌ای ضمن کاهش مصرف انرژی، بر فرآیند خشک کردن و خواص کیفی برنج نیز مؤثر است.

خشک‌کن‌های مادون قرمز از اساس نسبت به خشک‌کن‌های هوای گرم متفاوت هستند. خشک‌کن‌های رایج هوای گرم با انتقال گرما به روش همرفت واداشته (حرکت هوا بر روی محصول ناشی از عامل خارجی پنکه است) باعث انتقال

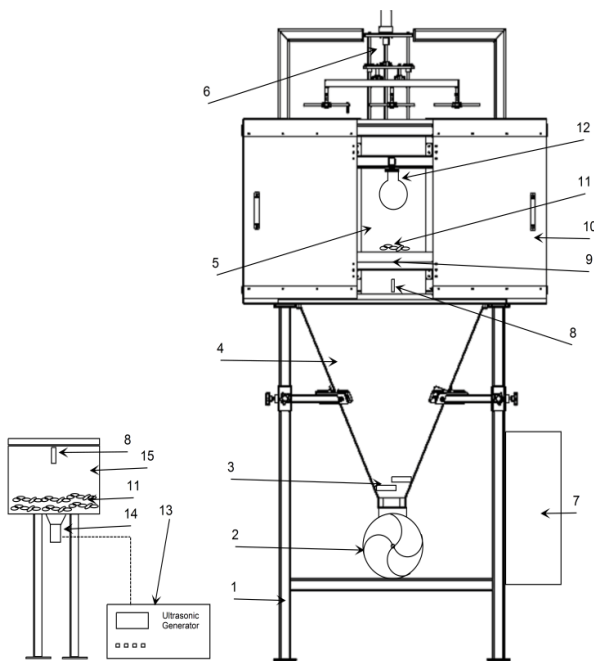
حرارت به محصول می‌شود اما این در حالی است که در خشک‌کن‌های مجهز به مادون قرمز انتقال حرارت به صورت تابشی است به طوری که محصول به صورت مستقیم و بدون دخالت ماده واسط انرژی را جذب و دمای آن افزایش می‌یابد. دو استراتژی سری و ترکیبی در خشک‌کن‌های مجهز به مادون قرمز به کار برده می‌شود. در روش سری، تابش مادون قرمز بعد از یک دوره خشک کردن با هوای گرم مورد استفاده قرار می‌گیرد اما در روش ترکیبی برای خشک کردن محصول همزمان از تابش مادون قرمز و هوای گرم استفاده می‌شود (Meeso et al., 2008). انرژی مادون قرمز از المان‌های حرارتی به سطح محصول تابیده می‌شود بدون اینکه هوای اطراف را گرم کند. امواج در محصول نفوذ کرده و به گرما تبدیل می‌گردد به طوری که این گرما به صورت یکنواخت‌تر در محصول پراکنده می‌شود. نرخ خشک کردن بالا، کاهش مدت زمان خشک شدن، افزایش راندمان انرژی، کیفیت بالای محصول خشک شده، پراکندگی یکنواخت دما و در نهایت کاهش لزوم عبور جریان هوا بر روی محصول، از جمله مزایایی است که برای خشک‌کن مادون قرمز می‌توان نام برد. نتایج بدست آمده در تحقیق روش ترکیبی مادون قرمز-

خشک کردن، مصرف انرژی ویژه را نیز به طور چشمگیری کاهش می‌دهد. به طوری که در این تحقیق استفاده از نسبت وقفه‌های (نسبت مدت زمان استراحت دهی به مدت زمان خشک کردن) بالای ۴، کاهش بیش از ۷۰ درصدی گرادیان رطوبتی درون دانه و کاهش ۸۰ درصدی دانه‌های ترک‌دار را ایجاد کرده است. همچنین کاهش مدت زمان خشک کردن در یک دوره نیز ضمن کاهش گرادیان رطوبت درون دانه باعث کاهش مدت زمان خشک کردن شده به طوری که این موضوع کاهش درصد دانه‌های ترک‌دار را به دنبال داشته است (Nosrati, 2018). این در حالی است که تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد اختلاف رطوبت بوجود آمده درون دانه در طی مدت زمان استراحت‌دهی نیز می‌تواند باعث بوجود آمدن ترک درون دانه شود (Yamaguchi *et al.*, 1984). در زمان استراحت‌دهی رطوبت از مرکز دانه به سطح دانه حرکت می‌کند، به طوری که مرکز دانه منقبض و سطح دانه منبسط می‌گردد. انقباض وسط دانه باعث بوجود آمدن تنش کششی و انبساط سطح دانه باعث بوجود آمدن تنش فشاری می‌گردد، به طوری که اگر تنش بوجود آمده از مقاومت شکست دانه بیشتر باشد، باعث بوجود آمدن ترک در دانه می‌شود. یکی از اهداف این تحقیق کاهش گرادیان رطوبتی درون دانه در مدت زمان استراحت‌دهی با استفاده از امواج فراصوت است. استفاده از فراصوت در مدت زمان استراحت‌دهی می‌تواند ضمن افزایش سرعت انتقال رطوبت از مرکز به سطح و کمک به پراکندگی یکنواخت رطوبت درون دانه، میزان گرادیان رطوبت را کاهش دهد. امواج فراصوت دسته‌ای از امواج الکترومغناطیسی هستند که می‌توان آنها را به دو گروه توان بالا با دامنه فرکانسی بین ۱۰۰kHz - ۱۰kHz و توان پایین با دامنه فرکانسی ۱۰MHz - ۱MHz تقسیم نمود (Kentish & Ashokkumar, 2011; Jafari & Zare, 2016). در صنایع غذایی امواج فراصوت توان پایین را به منظور تشخیص یک جسم غیر قابل دید درون ماده مانند تشخیص یک ماده خارجی درون غذا استفاده می‌کنند در مقابل از امواج فراصوت توان بالا به منظور ایجاد تغییر درون ماده و یا ایجاد یک واکنش شیمیایی مانند تغییر ماهیت پروتئین‌ها و یا تشدید بلورسازی<sup>۴</sup> درون غذا استفاده می‌شود (Kentish & Ashokkumar, 2011). همچنین امواج با توان بالا با ایجاد بافت اسفنجی در ماده غذایی سبب افزایش نرخ انتقال حرارت و جرم طی خشک کردن می‌شوند. استفاده از انرژی فراصوت بصورت پیش تیمار و یا کاربرد مستقیم در محفظه خشک‌کن، می‌تواند بهترین نتیجه را به لحاظ کاهش زمان فرآیند، حفظ ویژگی‌های

هوای گرم برای خشک کردن لایه نازک شلتوک به منظور بررسی شدت تابش امواج مادون قرمز، دما و سرعت هوای خشک‌کن نشان می‌دهد زمانی که از امواج مادون قرمز در تمام سطوح دمایی استفاده می‌شود، مدت زمان خشک شدن کاهش می‌یابد چرا که امواج مادون قرمز در محدوده طول موج‌های قابل جذب توسط آب هستند و با جذب این امواج توسط رطوبت موجود در شلتوک‌ها و ارتعاش مولکول‌های آب، گرما در درون دانه شلتوک تولید می‌شود و مشکلات مربوط به هدایت گرمایی و خشک شدن لایه سطحی و ایجاد گرادیان‌های رطوبتی تا حدودی کاهش می‌یابد (Zare *et al.*, 2014).

هدف اصلی در استفاده از فن آوری‌های نوین در خشک کردن برنج کاهش سریع رطوبت بدون کاهش کیفیت دانه است. چرا که در صورتی که دانه برنج به هنگام خشک کردن در معرض شرایط سخت قرار گیرد، امکان بوجود آمدن ترک<sup>۱</sup> درون دانه وجود دارد. ترک خوردگی دانه برنج یکی از چالش‌های پیش رو به هنگام خشک کردن دانه برنج است چرا که ترک خوردگی نه تنها باعث کاهش برنج سالم در زمان آسیاب کردن<sup>۲</sup> می‌شود بلکه بر خصوصیت‌های ترکیبی<sup>۳</sup> دانه نیز اثر می‌گذارد. محققان برای درک بهتر چگونگی ایجاد ترک درون دانه برنج در زمان خشک شدن به بررسی تغییرات دما و رطوبت در لایه‌های مختلف دانه پرداخته‌اند (Cnossen *et al.*, 2001). گرادیان رطوبت و دما به دلیل اختلاف رطوبت و دما بین لایه سطحی و مرکزی دانه بوجود می‌آید. در مدت زمان خشک کردن، رطوبت لایه بیرونی دانه کمتر از لایه مرکزی است در حالی که این موضوع برای دما برعکس است چراکه دمای لایه بیرونی بیشتر از لایه مرکزی است (Yang *et al.*, 2002). علاوه بر استفاده از فن‌آوری‌های نوین در خشک‌کن‌ها، یکی از روش‌های کاهش گرادیان رطوبت و دما درون دانه، استراحت‌دهی است. نگهداری محصول در محفظه‌ای در یک دمای مشخص و مدت زمان معین باعث کاهش گرادیان رطوبت می‌شود. چرا که در مرحله استراحت‌دهی اجازه داده می‌شود تا رطوبت از مرکز دانه به سطح دانه منتقل شود، بدون اینکه رطوبت سطح دانه کاهش یابد. این انتقال رطوبت باعث کاهش گرادیان رطوبت می‌شود. یکی از چالش‌های پیش رو در مرحله استراحت‌دهی تعیین زمان، مدت زمان و دمای استراحت‌دهی است. تحقیقات بسیاری در این خصوص صورت پذیرفته است. در تحقیق انجام شده با هدف تعیین زمان و مدت زمان خشک کردن و استراحت‌دهی دانه شلتوک در یک خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز نشان داده شد خشک کردن با وقفه ضمن کاهش مدت زمان

فراصوت توان بالا (UCE Ultrasonic PCB) ساخت کشور چین با ولتاژ ورودی  $10 \pm 220V$ ، توان حداکثر  $300W$  و بازه کنترل توان صفر تا ۱۰۰ درصد استفاده شد. این دستگاه قابلیت تولید جریان الکتریکی مناسب برای راه اندازی مبدل فراصوت توان بالا را در سطوح مختلف توان دارا بوده و امپدانس را به صورت اتوماتیک تنظیم می‌کند. از چهار مبدل فراصوت توان بالا برای تولید فراصوت استفاده شد. مبدل‌های فراصوت توان بالا (PZT-8 20k100W, PZT-4 25k100W, PZT-4 28k100W, PZT-8 30k100W) در چهار فرکانس ۲۰، ۲۵، ۲۸ و  $30kHz$  تهیه و در قسمت تحتانی محفظه استراحت‌دهی نصب گردید. این مبدل‌ها به صورت تک به تک به ژنراتور متصل شده و جریان خروجی از ژنراتور را به امواج فراصوت تبدیل می‌کنند. حداکثر توان مصرفی این مبدل‌ها  $100W$  است. برای جلوگیری از افت انتقال صوت به محصول از یک محفظه با جنس استیل با ضخامت ورق  $0.5$  میلی‌متر برای محفظه استراحت‌دهی استفاده شد تا مبدل بعد از اتصال به بدنه محفظه به صورت یکپارچه شده و صوت از طریق بدنه با کمترین افت انرژی انتشار یابد. طراحی محفظه استراحت‌دهی به گونه است که امواج فراصوت از طریق هوا انتقال یافته و قابلیت استفاده از فراصوت در محیط متخلخل را ممکن ساخته است (Charoux et al., 2017).



شکل ۱. طرحواره خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز مجهز به فراصوت. ۱-شاسی ۲-فن ۳-المنت حرارتی ۴-محفظه هوای گرم ۵-محفظه خشک‌کن ۶- مکانیزم تنظیم ارتفاع لامپ‌های مادون قرمز ۷-جعبه بردهای الکتریکی ۸- سنسور دما و رطوبت ۹-سبد دانه ۱۰-درب محفظه خشک‌کن ۱۱-شلتوک ۱۲-لامپ مادون قرمز ۱۳-مولد فراصوت ۱۴-مبدل فراصوت ۱۵-محفظه استراحت‌دهی

کیفی محصول و راندمان مصرف انرژی به همراه داشته باشد در حالی که به کارگیری امواج فراصوت یک روش ایمن، ساده و نسبتاً کم هزینه بوده که قابلیت کاربرد در مقیاس صنعتی را دارد (Charoux et al., 2017).

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد اطلاعات کمی در خصوص اثر گرادیان رطوبت ایجاد شده در مدت زمان استراحت‌دهی در دسترس است. تحقیق حاضر ضمن بررسی اثر گرادیان رطوبت ایجاد شده در مدت زمان استراحت‌دهی، اثر امواج فراصوت بر کاهش گرادیان رطوبت، مصرف انرژی و درصد دانه‌های سالم را نیز مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

## مواد و روش‌ها

### تجهیزات آزمایشگاهی

یک خشک‌کن ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز بستر ارتعاشی به منظور انجام آزمایش در شرایط مختلف بر روی نمونه‌های شلتوک، در مقیاس آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. طرحواره این خشک‌کن در شکل ۱ نشان داده شده است. هوای ورودی این خشک‌کن توسط یک فن گریز از مرکز با قابلیت تنظیم سرعت با استفاده از یک اینورتور (N50-007SF, Korea)، تأمین گردید. بر اساس گزارش‌های ارائه شده سرعت هوای ورودی  $0.15 \text{ ms}^{-1}$  با استفاده از یک سرعت‌سنج باد (Testo 625) با سنسور گرمایی با دقت  $0.3 \pm 0.0 \text{ m.s}^{-1}$  تنظیم و در تمام آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شد (Zare et al., 2014). بخش گرمایشی خشک‌کن از سه المنت حرارتی با توان اسمی  $1 \text{ kW}$  تشکیل شده است که توان آن‌ها با استفاده از یک کنترل منطق فازی بمنظور تنظیم دمای هوای ورودی در سطوح مختلف، کنترل شد (شکل ۲). دما و رطوبت نسبی هوای ورودی با استفاده از سنسور DHT22 با دامنه عملکرد صفر تا ۱۰۰ درصد برای رطوبت نسبی و  $40$  تا  $80$  درجه سلسیوس برای دما اندازه‌گیری شد. سنسورها با استفاده از دستگاه Testo 625 کالیبره شدند. طراحی خشک‌کن به گونه‌ای بود که لامپ‌های مادون قرمز با توان اسمی  $275$  وات در بالای بستر خشک‌کن قرار گیرند. فاصله لامپ‌ها تا سطح دانه‌های شلتوک در طول انجام آزمایش در حدود  $20 \text{ cm}$  تنظیم گردید. برای تأمین شدت تابش در سطوح مختلف، توان لامپ‌ها با استفاده از یک دیمر کنترل گردید به طوری که یک تابش‌سنج سیلیکونی (Casella 187010b-02, UK) شدت تابش را اندازه‌گیری می‌نمود. از یک مکانیزم خارج از مرکز بمنظور تأمین حرکت ارتعاشی بستر دانه‌ها استفاده شد. فرکانس ارتعاشی دانه با استفاده از یک اینورتور که سرعت موتور الکتریکی را کنترل می‌کند، بر روی  $10 \text{ kHz}$  تنظیم گردید. همچنین از یک مولد

## روش آزمون

شلتوک تازه رقم محلی شمیم از مزرعه‌ای در شهرستان رستم واقع در استان فارس خریداری شد. میانگین قطر دانه‌های شلتوک با استفاده از میکرومتر مقدار  $1/68 \text{ mm} \pm 0/19$  \*  $2/19$  \*  $9/68$  اندازه‌گیری شد. قبل از انجام آزمایش، نمونه‌های شلتوک در اندازه‌های  $30 \pm 30 \text{ g}$  بسته‌بندی و به منظور تعادل رطوبت نسبی در یخچال در دمای  $4-5^\circ\text{C}$  نگهداری شدند. رطوبت اولیه دانه‌های شلتوک با روش استاندارد خشک کردن در آن در دمای  $103^\circ\text{C}$  به مدت ۷۲ ساعت در محدوده  $1 \pm 0/17$  (رطوبت بر پایه تر) بدست آمد (AACC, 1995). آزمون خشک کردن با وقفه شلتوک در خشک‌کن ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز برای بررسی اثر امواج فراصوت در مدت زمان استراحت‌دهی در سه سطح دمای هوای ورودی ( $30$ ،  $40$  و  $50^\circ\text{C}$ )، چهار سطح توان فراصوت (صفر،  $0/5$ ،  $0/75$  و  $1 \text{ kW/kg}$ ) و چهار سطح فرکانس فراصوت ( $20$ ،  $25$ ،  $28$  و  $30 \text{ kHz}$ ) در سه تکرار انجام شد. قبل از انجام هر آزمایش، نمونه‌ها از یخچال خارج و به مدت ۴ ساعت اجازه داده شد تا دمای آن‌ها با دمای محیط به تعادل برسد. در ادامه سبدهای درون محفظه خشک‌کن خارج و در هر سبد مقدار  $10 \pm 30 \text{ g}$  شلتوک قرار داده شد. در تمام آزمایش‌ها سعی شد ضخامت دانه‌های درون سبد از مقدار  $3 \text{ mm}$  تجاوز نکند. در طول تمام آزمون‌ها شدت تابش مادون قرمز برابر با  $300 \text{ Wm}^{-2}$  و سرعت هوای ورودی  $0/15 \text{ m/s}$  تعیین گردید. همچنین مدت زمان خشک کردن برابر با ۱۵ دقیقه و مدت زمان استراحت دهی با در نظر گرفتن نسبت وقفه ۲، برابر با ۳۰ دقیقه ثابت نگه داشته شد. برای تعیین تغییرات رطوبت نسبی، وزن دانه‌ها در فاصله‌های زمانی ۳ دقیقه به طور مرتب در طول آزمایش با خارج کردن سبدها از درون محفظه خشک‌کن و اندازه‌گیری آنها با استفاده از ترازو محاسبه گردید. به ازای هر ۱۵ دقیقه خشک کردن، نمونه به مدت ۳۰ دقیقه به محفظه استراحت‌دهی منتقل و تحت تأثیر امواج فراصوت در توان‌ها و فرکانس‌های مختلف قرار گرفت. این فرآیند تا حصول رطوبت مطلوب ( $10$  درصد بر مبنای وزن تر) برای شلتوک ادامه یافت (Shaker, 2016). در ادامه میزان مصرف انرژی نیز در ابتدا و انتهای هر آزمون توسط کنتور برق متصل به خشک‌کن اندازه‌گیری شد. همچنین درصد دانه‌های ترک خورده با اندازه‌گیری میانگین تعداد دانه‌های ترک خورده قبل و بعد از انجام هر آزمایش با استفاده از دستگاه ترک‌بین مشخص شد. خصوصیت‌های مکانیکی دانه‌های خشک شده نیز تحت شرایط مختلف با استفاده از آزمون خمش سه محوره توسط دستگاه Instron (STM-20, SANTAM, Iran) انجام پذیرفت.

## مصرف انرژی ویژه (SEC) (Specific Energy Consumption)

مقدار انرژی مورد نیاز برای تبخیر یک کیلوگرم آب از محصول در فرآیند خشک کردن را مصرف انرژی ویژه تعریف می‌کنند (Barzegar *et al.*, 2015). منابع اصلی مصرف انرژی در خشک‌کن ارائه شده شامل المنت‌های حرارتی، لامپ‌های مادون قرمز و مولد فراصوت می‌باشد که در هر آزمایش مقدار آن‌ها متفاوت بود. در ابتدا و انتهای هر آزمون، مقدار انرژی مصرف شده در مدت زمان خشک کردن و استراحت‌دهی توسط کنتور برق متصل به دستگاه اندازه‌گیری و برای تعیین میزان مصرف انرژی ویژه مورد استفاده قرار گرفت.

$$SEC = \frac{E_t \times 3.6}{m_w} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن  $SEC$  مصرف انرژی ویژه (MJ)،  $E_t$  کل انرژی مصرفی (kWh) و  $m_w$  رطوبت از دست رفته شلتوک در مدت زمان خشک شدن (kg).

## درصد دانه‌های ترک خورده (Percentage of Cracked Kernel (PCK))

یکی از متغیرهای وابسته در تعیین کیفیت شلتوک خشک شده، درصد تعداد دانه‌هایی است که دارای ترک ظاهری می‌باشند. در این تحقیق از دستگاه ترک‌بین به منظور تعیین دانه‌های ترک خورده استفاده شده است. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده، این دستگاه شامل یک لامپ فلورسنت کوچک است که در زیر یک صفحه مشبک قرار دارد. صفحه مشبک دارای شیارهای طولی است که دانه‌های برنج بطور مورب روی آن قرار گرفته و با استفاده از یک ذره‌بین می‌توان دانه‌ها را از لحاظ وجود ترک مورد بررسی قرار داد.

برای تعیین درصد تعداد دانه‌های ترک خورده در هر آزمایش ابتدا قبل از انجام آزمایش سه نمونه  $30$  تایی بطور تصادفی انتخاب، بصورت دستی پوست کنی و تعداد دانه‌های ترک‌دار مشخص شد. بعد از عملیات خشک کردن دانه شلتوک نیز سه نمونه  $30$  تایی از شلتوک خشک شده انتخاب، بصورت دستی پوست کنی و تعداد دانه‌های ترک‌دار تعیین گردید.

## مقدار انرژی لازم برای شکست دانه‌های سالم

مقدار انرژی لازم برای شکست دانه‌های سالم که تحت شرایط مختلف خشک شده اند با استفاده از آزمون خمش سه محوره توسط دستگاه جامع آزمون کشش و فشار (STM-20, SANTAM, Iran) مجهز به لودسل با ظرفیت  $50 \text{ kgf}$  انجام پذیرفت. برای آزمون خمشی سه محوره، از یک پایه متناسب با رقم کامفیروزی که فاصله بین دو فک آن برابر با  $2/4 \text{ mm}$  می‌باشد

که در آن تنش  $\sigma$  ( $Nm^{-2}$ )، نیرو  $F$  (N)، فاصله بین دو فک  $d_1$  (mm)، قطر بزرگ دانه شلتوک  $d_s$  (mm)، قطر کوچک دانه شلتوک  $\varepsilon$  (mm)، کرنش (mm/mm) و  $U$  جابجایی<sup>۲</sup> (mm) است.

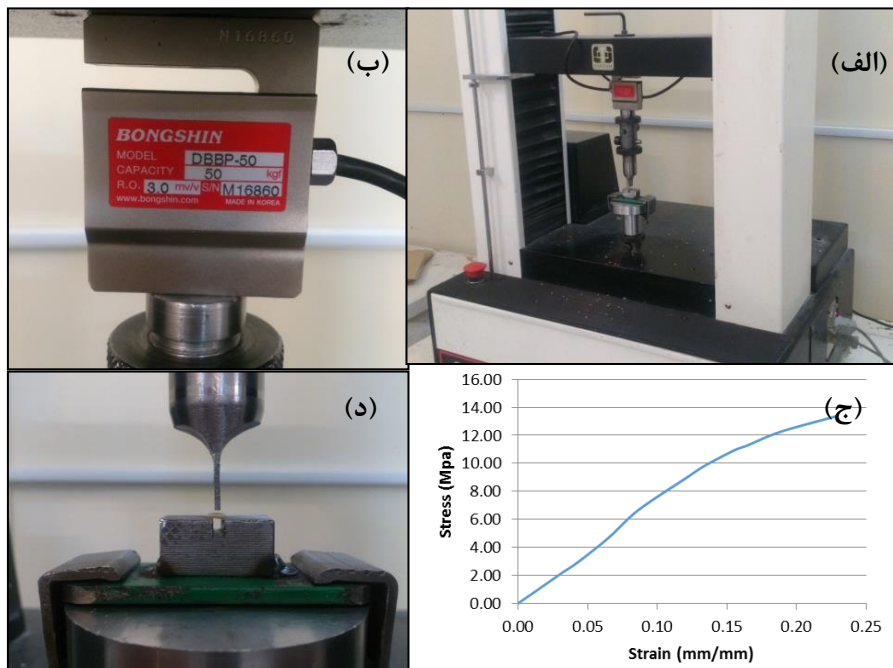


شکل ۲. دستگاه ترک بین

استفاده شد. برای هر تیمار ۱۰۰ دانه شلتوک به طور تصادفی انتخاب و با دقت و بصورت دستی پوست کنی شد. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، بارگذاری بر روی دانه برنج توسط فک تیغه‌ای اعمال می‌گردد. با توجه به اطلاعات به دست آمده از آزمون و رابطه‌های ۲ و ۳، نمودار تنش-کرنش رسم شد. مساحت زیر نمودار تنش-کرنش (چقرمگی<sup>۱</sup>) مقدار انرژی لازم برای شکست دانه در واحد حجم را نشان می‌دهد. سرعت حرکت دستگاه بر اساس گزارش‌ها، به مقدار ۳۰ mm/min تنظیم گردید (Siebenmorgen & Qin, 2005).

$$\sigma = \frac{8FL}{\pi d_1 d_s^2} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$\varepsilon = \frac{6v d_s}{L} \quad (\text{رابطه ۳})$$



شکل ۳. (الف) دستگاه جامع آزمون کشش و فشار (ب) لود سل (ج) نمودار تنش-کرنش (د) فک دانکن استفاده گردید.

### تحلیل‌های آماری

برای تحلیل داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده، از آزمایش‌های فاکتوریل، با طرح پایه بلوک‌های کاملاً تصادفی بهره گرفته شد. فاکتورهای اصلی این آزمایش شامل سه سطح دمای هوای ورودی (۳۰، ۴۰ و ۵۰°C)، چهار سطح توان فراصوت (صفر، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱kW/kg) و چهار سطح فرکانس فراصوت (۲۰، ۲۵، ۲۸ و ۳۰kHz) و برای هر سطح آزمایش سه تکرار انجام شد. برای تعیین اختلاف معنی‌داری بین میانگین نتایج بدست آمده نیز از آزمون

### نتایج و بحث

خشک کن ترکیبی هوای گرم-مادون قرمز بستر ارتعاشی که برای ارزیابی اثر امواج فرا صوت در مدت زمان استراحت دهی شلتوک ساخته شد، در شکل ۴ نشان داده شده است. این خشک کن از چهار قسمت جدا از هم شامل، اتاقک خشک کن، محفظه هوای گرم، نگهدارنده لامپ های مادون قرمز و محفظه استراحت دهی

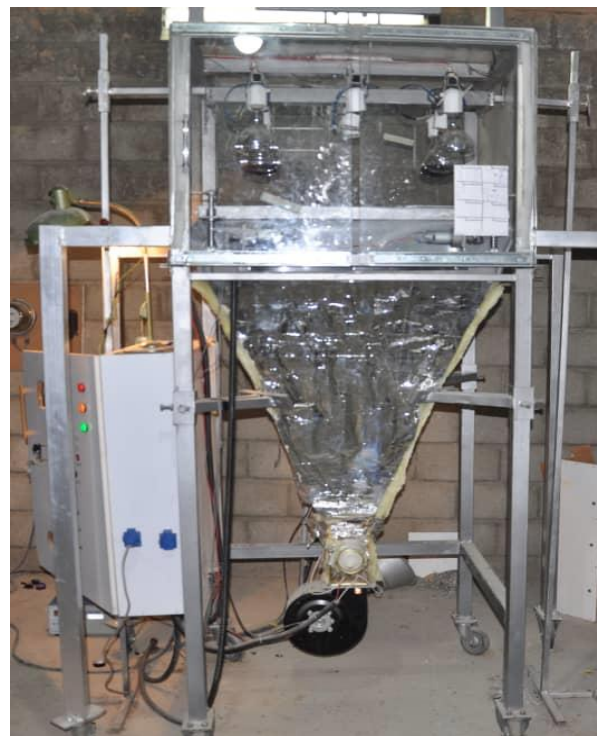


**سینماتیک خشک شدن شلتوک**

جدول تجزیه واریانس اثر دمای هوای خشک کننده (۳۰، ۴۰ و ۵۰°C)، توان فراصوت (صفر، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱kW/kg) و فرکانس فراصوت (۲۰، ۲۵، ۲۸ و ۳۰kHz) در سه تکرار بر مدت زمان خشک شدن دانه شلتوک در جدول ۱ آورده شده است. هر سه عامل اصلی شامل دمای هوا، توان و فرکانس فراصوت تأثیر معناداری در سطح ۵ درصد بر زمان خشک شدن داشته است. همانطور که از جدول ۱ مشخص است، تأثیر متقابل نیز برای همه سطوح تیمارها معنی دار شده است ( $P < 0/05$ ) که این بدان معنی است که برای اثرات متقابل همسویی وجود ندارد.

بررسی آزمون دانکن برای تعیین معناداری بین اختلاف میانگین‌ها در تیمارهای مختلف نشان داد، افزایش دما و افزایش توان فراصوت به طور معنی داری ( $P < 0/05$ ) در تمام سطوح باعث کاهش مدت زمان خشک شدن می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد افزایش دما و توان فراصوت باعث افزایش سرعت حرکت رطوبت از مرکز به سطح دانه می‌شود که این موضوع باعث افزایش سرعت خشک شدن شلتوک گردید. Steffe & Singh, 1980; Lu & Siebenmorgen, 1992; Prakash & Pan, 2011; Nosrati, 2018 اعلام کردند رابطه بین دما ضریب پخش از یک رابطه نمایی پیروی می‌کند. همچنین تحقیقات انجام شده توسط Jafari (2014) بر روی سینتیک خشک شدن شلتوک در یک خشک‌کن بستر سیال-فراصوت نشان می‌دهد فراصوت توان بالا در مقایسه با حالت بدون فراصوت، زمان نهایی خشک شدن را ۲۳٪ کاهش می‌دهد. اگر چه همانطور که در شکل ۵ اثر متقابل دما و توان فراصوت نشان داده شده است، افزایش دما باعث کاهش اثر توان فراصوت می‌شود. از آنجا که اثر دما بر ضریب پخش دانه شلتوک بیشتر از اثر توان فراصوت است، بنابراین اثر توان فراصوت در دما های بالا ناچیز می‌شود.

تشکیل شده است. محفظه هوای گرم با استفاده از المنت های حرارتی و یک سیستم کنترلی هوای ورودی اتاق خشک کن را در یک دما و سرعت مشخص تنظیم می نمود. از یک فن گریز از مرکز برای تنظیم سرعت هوای ورودی که در تمام آزمایش ها ثابت و برابر با ۰/۱۵m/s بود، بهره گرفته شد. اتاقک خشک کن محل قرار گیری سبد های دانه های شلتوک بر روی یک بستر ارتعاشی است به طوری که این امکان فراهم شده است که امواج مادون قرمز به صورت مستقیم و یکنواخت بر روی دانه شلتوک تابیده شوند. برای جلوگیری از انتقال ارتعاش به لامپ های مادون قرمز همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است از یک نگهدارنده مستقل استفاده شده است.

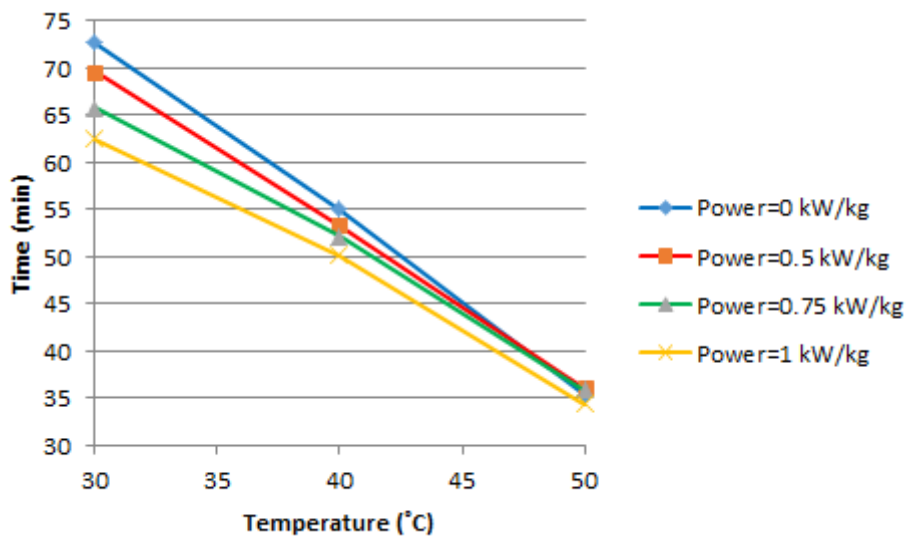


شکل ۴. اجزای اصلی تشکیل دهنده خشک کن ترکیبی مادون قرمز-هوای گرم

جدول ۱. تجزیه واریانس اثرات عامل های آزمایشی بر مدت زمان خشک شدن شلتوک

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F
دما	۲	۲۴۸۷۴/۶۸	۱۲۴۳۷/۳۴	۵۷۵۸/۷۶*
توان فراصوت	۳	۵۷۳/۴۱	۱۹۱/۱۳	۸۸/۵۰*
فرکانس فراصوت	۳	۸۶/۲۵	۲۸/۷۵	۱۳/۳۱*
توان فراصوت*دما	۶	۳۱۴/۳۷	۵۲/۳۹	۲۴/۲۶*
فرکانس فراصوت*دما	۶	۷۴/۸۷	۱۲/۴۷	۵/۷۷*
توان فراصوت*فرکانس فراصوت	۹	۱۵۲/۳۰	۱۶/۹۲	۷/۸۳*
دما*توان فراصوت*فرکانس فراصوت	۱۸	۱۴۱/۴۰	۷/۸۵	۳/۶۳*
خطای آزمایشی	۹۶	۲۰۷/۳۳	۲/۱۶	
کل	۱۴۳	۲۶۴۲۴/۶۳		

\*-در سطح ۵ درصد معنی دار است

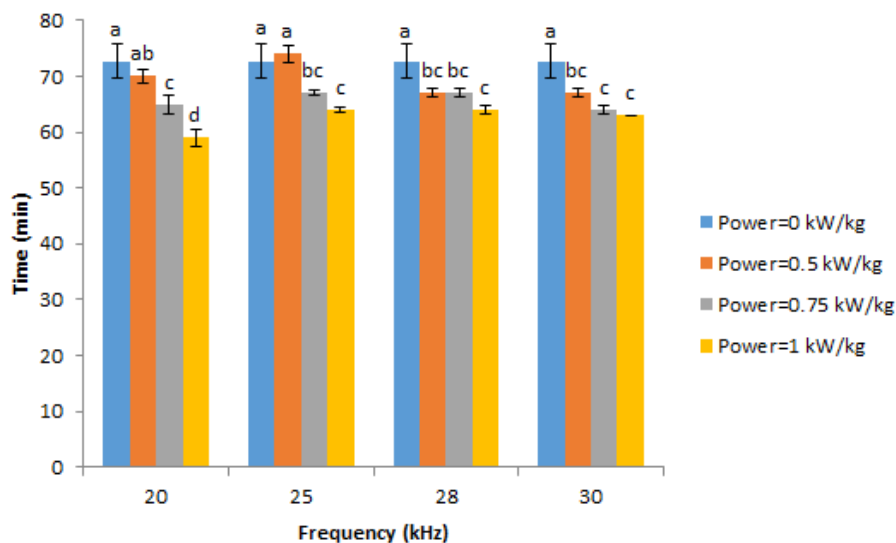


شکل ۵. اثر متقابل دما و توان فراصوت بر مدت زمان خشک شدن دانه شلتوک

#### مصرف انرژی ویژه

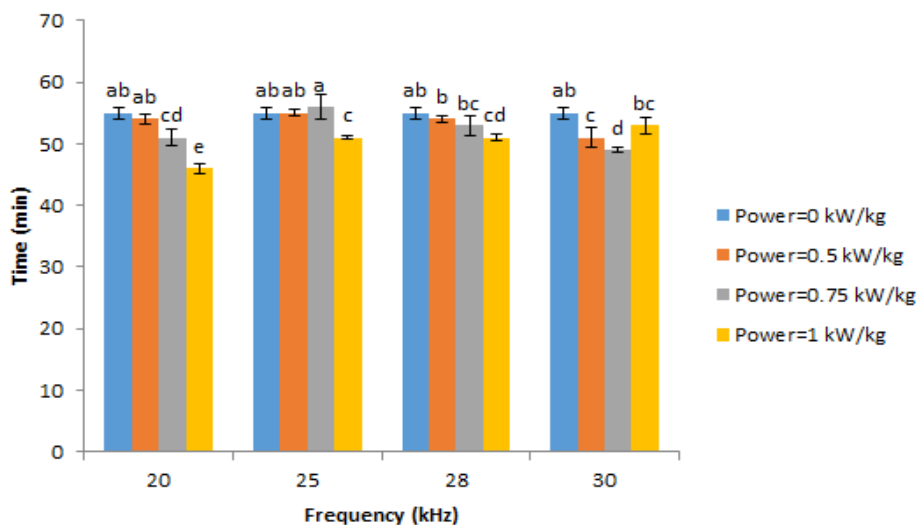
جدول تجزیه واریانس اثر دما (۳۰، ۴۰ و ۵۰°C)، توان فراصوت (صفر، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ kW/kg) و فرکانس فراصوت (۲۰، ۲۵، ۲۸ و ۳۰ kHz) در سه تکرار بر مصرف انرژی ویژه در جدول ۲ آورده شده است. هر سه عامل تأثیر معناداری در سطح ۵ درصد بر مصرف انرژی ویژه داشته است. همانطور که از جدول ۲ مشخص است تأثیر متقابل نیز برای همه سطوح تیمارها معنی دار شده است ( $P < 0.05$ ) که این بدان معنی است که برای اثرات متقابل همسویی وجود ندارد.

همچنین همانطور که در شکل ۶ تا ۸ نشان داده شده است، افزایش توان فراصوت باعث افزایش اثر فرکانس‌های فراصوت در تمام سطوح بر مدت زمان خشک شدن شد. به طوری که بیشترین نرخ خشک شدن دانه شلتوک در تمام سطوح فرکانس در توان فرکانس ۱ kW/kg اتفاق افتاد. به علاوه بررسی‌ها نشان می‌دهد فرکانس‌های پایین فراصوت بیشترین تأثیر را در افزایش نرخ خشک شدن دانه شلتوک داشته‌اند به طوری که در تمام سطوح دما و توان فراصوت، فرکانس ۲۰ kHz بیشترین نرخ خشک شدن دانه شلتوک را داشته است. Jafari & Zare (2016) که برای خشک کردن دانه شلتوک از امواج فراصوت بهره برده بودند اعلام کردند بدلیل نفوذ عمیق‌تر امواج فراصوت در فرکانس‌های پایین سرعت خشک شدن دانه شلتوک افزایش می‌یابد.

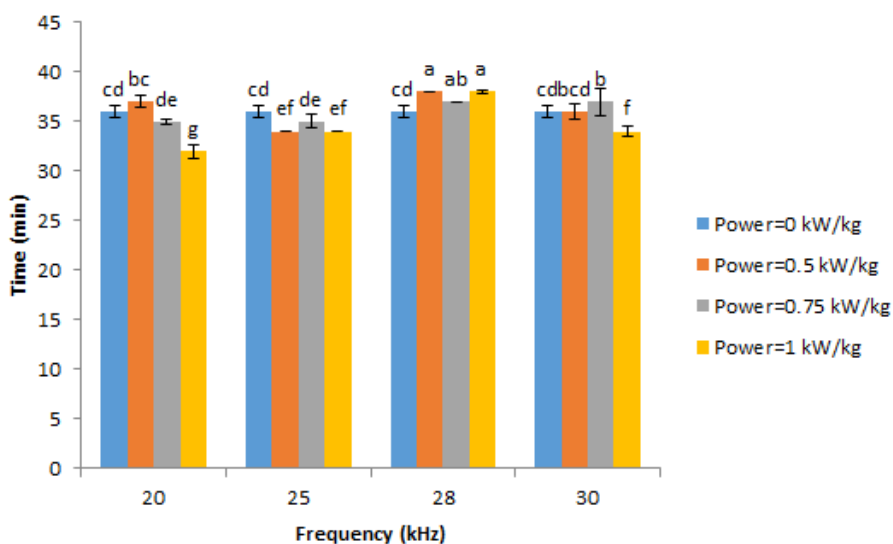


شکل ۶. اثر متقابل فرکانس و توان فراصوت بر مدت زمان خشک شدن دانه شلتوک در دمای ۳۰°C (آزمون دانکن، حروف مشابه نشان دهنده عدم اختلاف معنادار در سطح ۵٪ است)





شکل ۷. اثر متقابل فرکانس و توان فراصوت بر مدت زمان خشک شدن دانه شلتوک در دمای ۴۰°C (آزمون دانکن، حروف مشابه نشان دهنده عدم اختلاف معنادار در سطح ۵٪ است)



شکل ۸. اثر متقابل فرکانس و توان فراصوت بر مدت زمان خشک شدن دانه شلتوک در دمای ۵۰°C (آزمون دانکن، حروف مشابه نشان دهنده عدم اختلاف معنادار در سطح ۵٪ است)

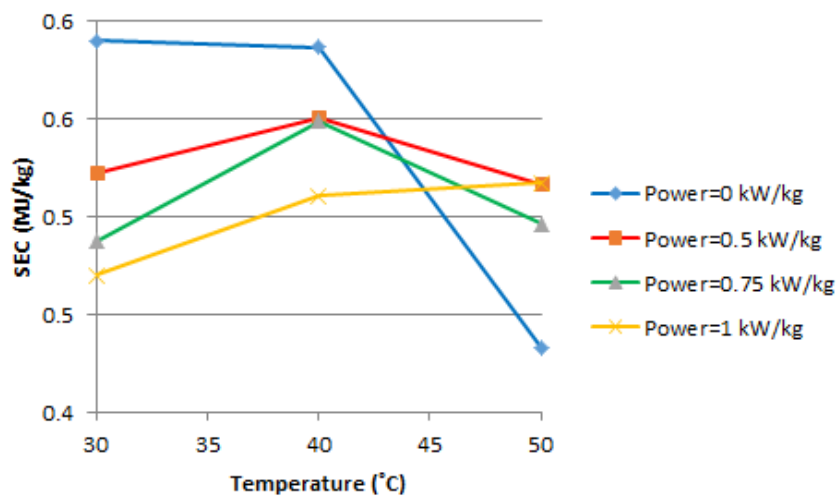
جدول ۲. تجزیه واریانس اثرات عامل های آزمایشی بر مصرف انرژی ویژه

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F
دما	۲	۰/۰۸۲	۰/۰۴۱	۲۱۹/۲۱*
توان فراصوت	۳	۰/۰۳۲	۰/۰۱۱	۵۶/۳۶*
فرکانس فراصوت	۳	۰/۰۲۷	۰/۰۰۹	۴۷/۹۸*
توان فراصوت*دما	۶	۰/۱۶۱	۰/۰۲۷	۱۴۳/۴۸*
فرکانس فراصوت*دما	۶	۰/۰۲۱	۰/۰۰۴	۱۸/۹۳*
توان فراصوت*فرکانس فراصوت	۹	۰/۰۳۸	۰/۰۰۴	۲۲/۳۴*
دما*توان فراصوت*فرکانس فراصوت	۱۸	۰/۰۷۹	۰/۰۰۴	۲۳/۵۵*
خطای آزمایشی	۹۶	۰/۰۱۸	۰/۰۰۰۲	
کل	۱۴۳	۰/۴۵۷		

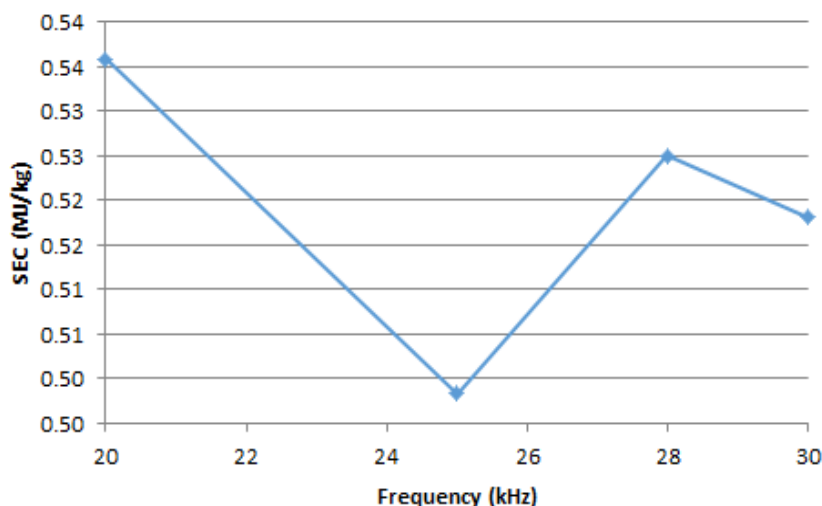
\*-در سطح ۵ درصد معنی دار است

کمر شد. این موضوع نشان می‌دهد کاهش مدت زمان خشک کردن در دمای  $40^{\circ}\text{C}$  به اندازه‌ای نیست که بتواند افزایش مصرف انرژی در المان‌های حرارتی را جبران کند و این موضوع باعث افزایش مصرف انرژی ویژه در این تیمار شده است. این در حالی است که تغییرات فرکانس فراصوت در تمام سطوح با وجود اختلاف معنادار، روند خاصی را در دما و توان‌های مختلف از منظر مصرف انرژی ویژه دنبال نمی‌کنند اما به طور کلی با توجه به شکل ۱۰ بیشترین مصرف انرژی ویژه در فرکانس  $20\text{kHz}$  مشاهده گردید.

بررسی آزمون دانکن برای تعیین معناداری بین اختلاف میانگین‌ها در تیمارهای مختلف نشان داد، افزایش توان فراصوت به صورت معناداری به جز در توان  $0/5\text{kW/kg}$  باعث کاهش مصرف انرژی می‌شود. اگر چه افزایش توان فراصوت باعث افزایش مصرف مولد فراصوت می‌شود اما این در حالی است که افزایش توان باعث کاهش مدت زمان خشک شدن می‌شود و در کل، کاهش مدت زمان خشک کردن به اندازه‌ای است که می‌تواند مصرف انرژی ویژه را کاهش دهد. همچنین همان طور که در شکل ۹ اثر متقابل دما و توان فراصوت نشان داده شده است میزان مصرف انرژی ویژه در دمای  $30^{\circ}\text{C}$  و  $50^{\circ}\text{C}$  نسبت به دمای  $40^{\circ}\text{C}$



شکل ۹. اثر متقابل دما و توان فراصوت بر مقدار مصرف انرژی ویژه (SEC)



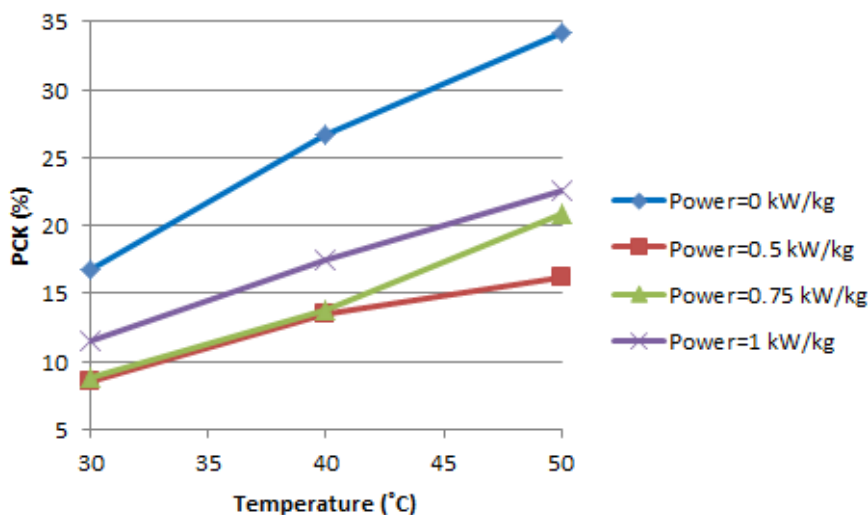
شکل ۱۰. تغییرات مصرف انرژی ویژه در سطوح مختلف فرکانس فراصوت

درصد افزایش ترک خوردگی دانه داشته است. همانطور که از جدول ۳ مشخص است تأثیر متقابل نیز برای همه سطوح تیمارها معنی‌دار شده است ( $P < 0/05$ ) که این بدان معنی است که برای اثرات متقابل همسویی وجود ندارد.

#### درصد دانه‌های ترک خورده

جدول تجزیه واریانس اثر دما ( $30^{\circ}\text{C}$ ،  $40^{\circ}\text{C}$  و  $50^{\circ}\text{C}$ )، توان فراصوت (صفر،  $0/5$ ،  $0/75$  و  $1\text{kW/kg}$ ) و فرکانس فراصوت ( $20$ ،  $25$ ،  $28$  و  $30\text{kHz}$ ) در سه تکرار بر درصد دانه‌های ترک خورده در جدول ۳ آورده شده است. هر سه عامل تأثیر معناداری در سطح  $5\%$  بر

2001). در ادامه همان طور که اثرات متقابل دما و توان فراصوت در شکل ۱۱ نشان داده شده است، بیشترین درصد افزایش ترک در دمای  $50^{\circ}\text{C}$  رخ داد که این به دلیل وجود گرادیان‌های بالای رطوبتی درون دانه در این دما است. همچنین بررسی‌ها نشان داد افزایش توان فراصوت به صورت معناداری باعث افزایش درصد دانه‌های ترک خورده می‌شود به طوری که کمترین درصد افزایش در توان  $0.5\text{ kW/kg}$  رخ می‌دهد. این در حالی است که حتی در توان بالای فراصوت، درصد افزایش دانه‌های ترک خورده کمتر از زمانی است که از امواج فراصوت در مدت زمان استراحت‌دهی استفاده نشده است. این نشان می‌دهد استفاده از فراصوت در مدت زمان استراحت‌دهی باعث پراکندگی یکنواخت تر رطوبت درون دانه شلتوک شده به طوری که می‌توان گرادیان رطوبت را به صورت معناداری کاهش دهد.



شکل ۱۱. اثر متقابل دما و توان فراصوت بر درصد افزایش دانه‌های ترک خورده

شکل ۱۳ نمودار عمومی توزیع فراوانی انرژی مورد نیاز برای شکست دانه‌های سالم در دمای  $30^{\circ}\text{C}$  در توان فراصوت صفر و  $0.5\text{ kW/kg}$  و فرکانس‌های پایین  $20$  و  $25\text{ kHz}$  را به طور نمونه نشان می‌دهد. تمام نمودارهای توزیع فراوانی بطور مشابه از الگوی دو حالت پیروی کرده‌اند. بر اساس الگوی دو حالت، محققان دانه‌های برنج را به دو گروه ضعیف و قوی تقسیم‌بندی می‌کنند (Nassiri & Etesami, 2016). همانطور که در شکل ۱۳ نشان داده شده استفاده از فراصوت در مدت زمان استراحت‌دهی به خصوص در فرکانس و توان‌های پایین به طور قابل توجهی باعث افزایش درصد فراوانی در گروه قوی شده است. اعمال فراصوت بخصوص در فرکانس‌های بالاتر از  $25\text{ kHz}$  موجب از هم گسیختگی بافتهای درونی محصول و ایجاد حفره‌هایی درون ساختار سلول

جدول ۳. تجزیه واریانس اثرات عامل‌های آزمایشی درصد دانه‌های ترک خورده

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F
دما	۲	۳۵۱۱/۲۶	۱۷۵۵/۶۳	۷۱۱۹/۰۰*
توان فراصوت	۳	۳۶۵۷/۳۹	۱۲۱۹/۱۳	۲۸۱/۵۷*
فرکانس فراصوت	۳	۵۹۶/۷۱	۱۹۸/۹۰	۱۹۵/۵۲*
توان فراصوت*دما	۶	۳۲۱/۸۹	۵۳/۶۴	۳۱/۹۰*
فرکانس فراصوت*دما	۶	۹۱/۶۳	۱۵/۲۷	۸/۶۰*
توان فراصوت*فرکانس فراصوت	۹	۴۵۲/۹۸	۵۰/۳۳	۲/۴۴*
دما*توان فراصوت*فرکانس فراصوت	۱۸	۲۵۳/۴۵	۱۴/۰۸	۸/۰۷*
خطای آزمایشی	۹۶	۵۹۸/۵۶	۶/۲۳	۲/۲۵*
کل	۱۴۳	۹۴۸۳/۸۹		

\* در سطح ۵ درصد معنی‌دار است

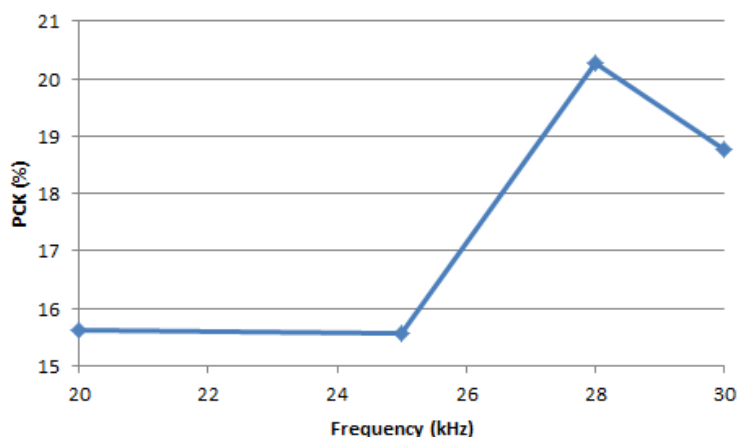
بررسی آزمون دانکن برای تعیین معناداری بین اختلاف میانگین‌ها در تیمارهای مختلف نشان داد، افزایش دما باعث افزایش درصد ترک‌های دانه شد. چرا که افزایش دما باعث افزایش گرادیان رطوبت درون دانه می‌شود و یکی از دلایل مهم در ترک دانه وجود گرادیان‌های بالا می‌باشد (Cossen et al.,

همچنین همان طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، کمترین درصد دانه‌های ترک خورده در فرکانس‌های پایین  $20$  و  $25\text{ kHz}$  رخ می‌دهد به طوری که اختلاف معناداری بین فرکانس‌های پایین  $20$  و  $25\text{ kHz}$  وجود نداشت. این در حالی است که فرکانس‌های بالای  $28$  و  $30\text{ kHz}$  با اختلاف معناداری نسبت به فرکانس‌های پایین بیشترین درصد دانه‌های ترک خورده را ایجاد کرده‌اند. Javari & Zare (2016) اعلام کردند استفاده از امواج فراصوت علاوه بر اینکه باعث کاهش مدت زمان خشک کردن دانه شلتوک می‌شود باعث بهبود کیفیت دانه از منظر درصد دانه‌های ترک خورده و انرژی مورد نیاز برای شکست دانه‌های سالم نیز شده است.

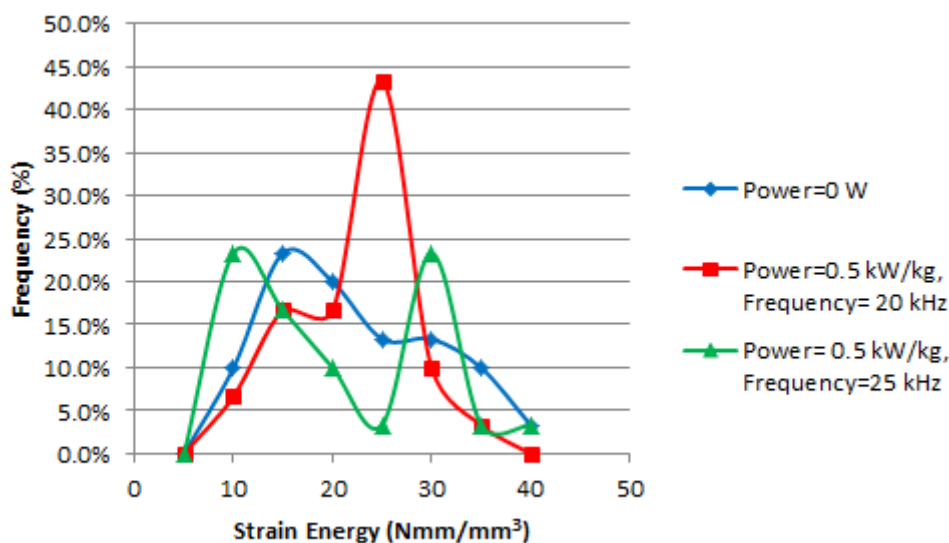
انرژی مورد نیاز برای شکست دانه سالم

کمتر از ۲۵kHz است (Jafari & Zare, 2016; Abdoli *et al.*, 2017; Dibagar & Amiri Chayjan, 2018).

ماده می شود که این امر باعث ایجاد حالت اسفنجی و پوکی شدن در محصول شده و در نتیجه موجب از هم گسیختن و شکستن محصول در نیروی فشاری کمتری نسبت به حالت با فرکانس های



شکل ۱۲. تغییرات درصد افزایش دانه های ترک خورده در سطوح مختلف فرکانس فراصوت



شکل ۱۳. نمودار توزیع فراوانی انرژی مورد نیاز برای شکست دانه سالم در دمای ۳۰°C

انرژی مورد نیاز برای شکست دانه های سالم می شود. در توان های بالای فراصوت، اثر فرکانس ها در مدت زمان خشک شدن کاملاً معنی دار است اگر چه تأثیر فرکانس بر میزان مصرف انرژی ویژه در تمام سطوح توان فراصوت معنادار نیست. بررسی ها نشان داد فرکانس های پایین فراصوت ۲۰ و ۲۵kHz در توان پایین ۰/۵kW/kg، ضمن کاهش درصد دانه های ترک دار، میانگین انرژی لازم برای شکست دانه های سالم را افزایش می دهند.

### نتیجه گیری کلی

بررسی ها نشان داد امواج فراصوت در دماهای پایین اثر معناداری را بر نرخ خشک شدن، مصرف انرژی و خصوصیت های مکانیکی شلتوک دارا است. افزایش توان فراصوت، افزایش نرخ خشک شدن و کاهش مصرف انرژی را به همراه دارد در حالی که توان های پایین فراصوت باعث کاهش درصد دانه های ترک خورده و افزایش

### REFERENCES

- AACC. (1995). Approved Method of the American of Cereal Chemists (9th ed). St. Paul, Minnesota  
 Abdoli, B., Zare, D., & Nourmohamadi-Moghadami, A. (2017). Corn Drying in a Laboratory Scale

Ultrasound-Assisted Fluidized Bed Dryer. *IJBSE*, 48(3), 309-318

Barzegar, M., Zare, D., & Stroshine, R. L. (2015). An integrated energy and quality approach to

- optimization of green peas drying in a hot air infrared-assisted vibratory bed dryer. *Journal of Food Engineering*, 166, 302-315
- Charoux, C. M. G., Ojha, K. S., O'Donnell, C. P., Cardoni, A., & Tiwari, B. K. (2017). Applications of airborne ultrasonic technology in the food industry. *Journal of Food Engineering*, 208, 28-36
- Cnossen, A. G., Siebenmorgen, T. J., Yang, W., & Bautistad, R. C. (2001). An Application of Glass Transition Temperature to Explain Rice Kernel Fissure Occurrence During the Drying Process. *Drying Technology*, 19(8), 1661-1682
- Dibagar, N., & Amiri Chayjan, R. (2018). Rough rice convective drying enhancement by intervention of airborne ultrasound – A response surface strategy for experimental design and optimization. *Drying Technology*, 37(9), 1097-1112. doi: 10.1080/07373937.2018.1485693
- Jafari, M. (2014). Technology Development and Modeling of Paddy Drying in an Ultrasound-assisted Fluidized Bed Dryer
- Jafari, M., & Zare, D. (2016). Ultrasound-assisted fluidized bed drying of paddy: Energy consumption and rice quality aspects. *Drying Technology*, 35(7), 893-902
- Kentish, S., & Ashokkumar, M. (2011). *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing* (H. Feng, G. Barbosa-Canovas & J. Weiss Eds. 1 ed.). Verlag New York: Springer
- Lu, R., & Siebenmorgen, T. J. (1992). Moisture Diffusivity Of Long-grain Rice Component. *Transactions of ASABE*, 35(6), 388-399
- Meeso, N., Nathakaranakule, A., Madhiyanon, T., & Soponronnarit, S. (2008). Different Strategies of Far-Infrared Radiation Application in Paddy Drying. *International Journal of Food Engineering*, 4(3), 238-251
- Nassiri, S. M., & Etesami, S. M. (2016). Estimation of head rice yield by measuring the bending strength of kernels after drying by different drying methods. *CIGR Journal*, 18, 368-377
- Nosrati, M. (2018). Control and Optimization of Rough Rice Drying in a Laboratory Scale Infrared-assisted Vibratory Bed Dryer. (Ph.D.), Shiraz University, Shiraz
- Nosrati, M., Zare, D., Nassiri, S. M., Jafari, A. A., & Eghtesad, M. (2018). Modeling and Optimization of Rough Rice Drying under Hot Air-infrared Radiation in a Laboratory Scale Vibratory Bed Dryer. *IJBSE*, 49(3), 423-435
- Prakash, B., & Pan, Z. (2011). Modeling Moisture Movement in Rice. In M. El-Amin (Ed.), *Advanced Topics in Mass Transfer* (pp. 283-304): InTech
- Shaker, M. (2016). Improvement of Robber-roll Paddy Husker Automatic Control System and Machine Vision. (Ph.D.), Tarbiat Modares University, Tehran
- Siebenmorgen, T. J., & Qin, G. (2005). Relating Rice Kernel Breaking Force Distributions to Milling Quality. *Transactions of the ASAE*, 48(1), 223-228
- Steffe, J. F., & Singh, R. P. (1980). Liquid Diffusivity of Rough Rice Components. *Transactions of the ASAE*, 23(3), 767-774
- Yamaguchi, S., Wakabayashi, K., & Yamazawa, S. (1984). Change of Cracked Rice Percentage and Internal Stress of Brown Rice Kernels During Drying Operation. *Drying Technology*, 3(2), 205-303
- Yang, W., Jia, C., Siebenmorgen, T. J., Howell, T. A., & Cnossen, A. G. (2002). Intra-Kernel Moisture Responses of Rice to Drying and Tempering Treatments by Finite Element Simulation. *Transactions of ASABE*, 54(4), 1037-1044
- Zare, D., Naderi, H., & Ranjbaran, M. (2014). Energy and Quality Attributes of Combined Hot Air-Infrared Drying of Paddy. *Drying Technology*, 33(5), 570-582