

## بررسی مصرف انرژی و خصوصیات کیفی خشک کردن ذرت در خشک کن بستر سیال

### فراصوت

داریوش زارع<sup>۱\*</sup>، بهاره عبدلی<sup>۲</sup>، آرش نورمحمدی<sup>۳</sup> مقدمی<sup>۳</sup>

۱- عضو هیئت علمی بخش مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز

۲- دانشجوی اسبق کارشناسی ارشد، بخش مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز

۳- دانشجوی دکتری، بخش مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز

\* ایمیل نویسنده مسئول: [dzare@shirazu.ac.ir](mailto:dzare@shirazu.ac.ir)

### چکیده

از فراصوت توان بالا به عنوان یک انرژی بی خطر می توان در فرآیندهای خشک کردن مواد غذایی به صورت یک پیش تیمار یا مکمل در طی فرآیند خشک کردن و به منظور بهبود روند اصلی در خشک کن ها استفاده کرد. به دلیل کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره وری و عملکرد خشک کن بسترسیال، ترکیب آن با تجهیزات فراصوت توان بالا می تواند مناسب باشد. هدف اصلی این پژوهش بررسی تاثیر انرژی فراصوت روی سینتیک خشک کردن و خصوصیات کیفی ذرت از جمله نیروی لازم برای شکست دانه و چقرمگی می باشد. این تحقیق در سه سطح توان صوتی (۱۱/۱، ۱۴/۶ و ۱۸/۷ کیلووات بر مترمکعب)، چهار سطح فرکانسی (۲۰، ۲۵، ۲۸ و ۳۰ کیلوهرتز) و سه سطح دمایی (۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس) به منظور کاهش رطوبت اولیه از مقدار  $32.5 \pm 0.5$  درصد به رطوبت نهایی  $17 \pm 0.5$  درصد (بر مبنای وزن خشک) انجام پذیرفت. نتایج نشان داد، در فرکانس ۲۵ کیلوهرتز و توان  $14/6$  کیلووات بر مترمکعب که موثرترین فرکانس و توان از نظر زمان خشک کردن از میان سایر تیمارها بود، در مقایسه با حالت بدون فراصوت، زمان نهایی خشک شدن را ۴۳ درصد کاهش داد و فراصوت به جهت پدیده ی اسفنجی کردن محصول، موجب کاهش نیروی شکست و چقرمگی گردید. مقدار انرژی ویژه مصرفی خشک کن (SEC) در تیمارهای مختلف اندازه گیری گردید و تیمار بهینه بر پایه ی کمترین مقدار (SEC) محاسبه شد. نتایج نشان داد که بکارگیری فراصوت در خشک کردن، انرژی ویژه مصرفی را به طور معناداری کاهش می دهد.

**واژه های کلیدی:** بسترسیال، خشک کردن، ذرت، فراصوت توان بالا، مبدل های فراصوتی



## مقدمه

در زمان برداشت، محتوای رطوبتی دانه ی ذرت ۴۳-۳۲ درصد (بر مبنای وزن خشک) می باشد که ذرت با این محتوای رطوبتی به هیچ وجه قابلیت انبارداری ندارد و باید بلافاصله پس از برداشت آن را تا رطوبت مناسب انبارداری (محتوای رطوبتی ۱۷ درصد بر مبنای وزن خشک) رساند (Brooker *et al.*, 1992). خشک کردن یکی از مهمترین عملیات پس از برداشت است که مقدار قابل توجهی از مصرف انرژی، کیفیت نهایی و کمیت محصول خشک شده را تحت تاثیر قرار می‌دهد (Zare *et al.*, 2006; Zare *et al.*, 2014; Ranjbaran *et al.*, 2014). بنابراین تحقیقات بسیاری با بهره‌گیری از تکنولوژی های جدید در این زمینه انجام شده است که تاثیرات این تکنولوژی ها را بر روی عملکرد خشک کن بستر سیال، نشان می دهد. از میان تکنولوژی های مذکور می-توان به مایکروویو و مادون قرمز اشاره کرد. هر دو تکنولوژی، زمان خشک کردن را با دید کاهش میزان مصرف انرژی بهبود داده اند ولی در این روش ها دمای داخلی نمونه افزایش یافته و بر روی کیفیت محصول تاثیر گذاشتند (Momenzadeh *et al.*, 2011; Barzegar *et al.*, 2015). از دیگر تکنولوژی های مورد استفاده در خشک کردن می‌توان به فراصوت اشاره نمود که بدون بالا بردن دمای داخلی نمونه برای محصولات حساس به گرما مناسب است (Gallego-Juárez *et al.*, 2007). علاوه بر این می توان کیفیت و کمیت غذا را بر پایه ی انرژی حفظ کرد. از این رو محققان در بکارگیری این تکنولوژی مفید علاقه نشان داده اند. در چندین پژوهش انرژی فراصوت توان بالا (HPU) به طور مستقیم بر روی محصولاتی مانند هویج و لیمو (García-Pérez *et al.*, 2009)، سبزیجات (Gallego-Juárez *et al.*, 2007)، سیب زمینی (De la Fuente-Blanco *et al.*, 2006)، سیب و ورقه های دلمه قرمز (Schössler *et al.*, 2012)، توت فرنگی (Garcia-Noguera *et al.*, 2010)، خرمالو (Cárcel *et al.*, 2007b) و شلتوک (Zare and Jafari, 2015) استفاده شده است. در بعضی از تحقیقات از صفحات پخش کننده تشعشع استفاده شد که محصول آزمایشی آنها هویج، ورقه های لیمو و آویشن بود (Cárcel *et al.*, 2007; Garcia-Perez *et al.*, 2009; Rodríguez *et al.*, 2014). نتایج این تحقیقات نشان داد که استفاده از انرژی فراصوت زمان خشک کردن را کاهش می دهد و با توجه به مطالعات انجام شده اطلاعاتی در مورد تاثیر و عملکرد فراصوت بر روی خشک کردن ذرت وجود ندارد. اهداف این تحقیق شامل بررسی سینتیک خشک کردن ذرت در یک خشک کن بستر سیال- فراصوت، بررسی خصوصیات کیفی ذرت بعد از اعمال فراصوت و انرژی ویژه مصرفی (SEC) می‌باشد.

## مواد و روش ها

## آماده سازی نمونه

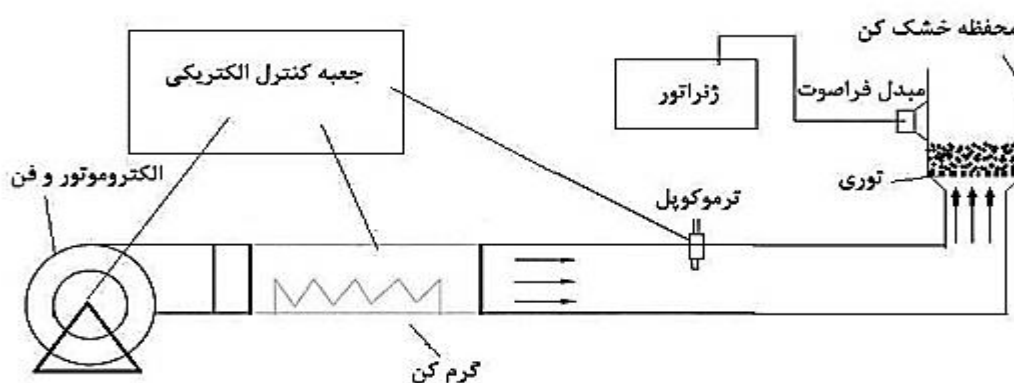
محصول آزمایشی این پژوهش ذرت دندان اسبی یا ذرت رقم ۷۰۴ نام داشت که از شهرستان‌های استان فارس، خریداری شد. قبل از شروع آزمایش‌ها ضمن تمیز کردن توده‌های بذر، نمونه‌های پاک شده‌ی ذرت در کیسه‌های نایلونی زیپ دار (زیپ کیپ) نگه



داری شدند و قبل از ریختن نمونه‌ها در کیسه‌ها، آن‌ها را کاملاً ضد عفونی کرده و ذرت‌ها در دمای  $4 \pm 0.5$  درجه سلسیوس درون یک یخچال به مدت ۷۲ ساعت نگه داری شد تا رطوبت کل نمونه‌ها به تعادل برسد (ASABE, 2008).

ساختمان دستگاه و تجهیزات مورد نیاز

خشک کن بستر سیال با محفظه ی خشک کن فراصوت توسط زارع و جعفری (Zare and Jafari, 2015) طراحی و ساخته شد که طرح شماتیکی دستگاه در شکل (۱) مشاهده می‌شود. سرعت هوا به کمک فن گریز از مرکز که موتور آن توسط یک مبدل<sup>۱</sup> (N50-007SF - Korea) کنترل می‌گردد، ایجاد شده و سرعت هوای عبوری توسط یک سرعت سنج (Testo 435-2) با دقت  $\pm 0.3$  متر بر ثانیه اندازه گیری شد. برای رسیدن به دمای داخلی مورد نظر از یک مجموعه هیتر الکترونیکی که از واحدهای گرمایی (۱ و ۲ کیلووات و چهار واحد گرمایی (هیتر) ۰.۵ کیلووات تشکیل شده بود، استفاده شد. این مجموعه توسط یک کنترل کننده ی دما (SU-105IP, Samwon Engineering, Korea) که با یک ترموکوپل نوع K (K-type) با دقت  $\pm 1$  درجه سلسیوس تجهیز شده بود، کار می‌کرد. لوله ی انتقال دهنده ی دما دارای قطر داخلی ۱۱ سانتی متر و طول ۳ متر بود که به یک محفظه ی خشک کن وصل شده بود. رطوبت هوای محاصره شده و انتقال دهنده به نمونه توسط دستگاه Testo 435-2 و پروب مخصوص آن اندازه گیری می‌شد. به منظور موثرتر کردن اثر فراصوت با شدت بالا از محفظه ی خشک کن بستر سیال آلومینیومی (قطر داخلی ۱۳۰ میلی‌متر، حداکثر ارتفاع ۲۶۰ میلی‌متر و دارای ضخامت ۱۰ میلی‌متر) استفاده شد.



شکل ۱- شماتیک دستگاه خشک کن بستر سیال- فراصوت

از یک ژنراتور توان بالا (UCE Ulterasonic PBC) ساخت کشور چین با ولتاژ ورودی  $220 \pm 10$  ولت، توان حداکثر ۳۰۰ وات و بازه کنترل توان صفر تا ۱۰۰ درصد به منظور ایجاد فراصوت استفاده شد. این دستگاه قابلیت تولید جریان مناسب برای راه اندازی مبدل فراصوت توان بالا در سطوح مختلف توان را دارا بوده و امپدانس را به صورت اتوماتیک تنظیم می‌کند. از چهار مبدل فراصوت توان بالا برای تولید فراصوت استفاده گردید. مبدل‌های فراصوت توان بالا ( PZT-8 20kHz100W PZT-8 )

<sup>1</sup> - Inverter

، PZT-30kHz100W، 25kHz100W، PZT-8 28kHz100W در چهار فرکانس (۲۰، ۲۵، ۲۸ و ۳۰ کیلوهرتز) تهیه و مورد استفاده قرار گرفتند. این مبدل‌ها به صورت تک به تک به ژنراتور متصل شده و جریان خروجی از ژنراتور را به امواج مافوق صوت تبدیل می‌کنند. حداکثر توان مصرفی این مبدل‌ها ۱۰۰ وات می‌باشد و محدوده‌ی توانی استفاده شده در این پژوهش (۱۱/۱، ۱۴/۶ و ۱۸/۷ کیلووات بر مترمکعب) بود.

روند خشک کردن

بستر خشک کن (ظرفی که نمونه در آن قرار می‌گرفت) به همراه دانه‌های ذرت دارای وزن  $10 \pm 830/74$  گرم بود و رطوبت داخلی نمونه‌ها  $0/5 \pm 32/5$  درصد بر مبنای وزن خشک اندازه‌گیری شد. ضخامت دانه‌ها درون بستر ۴ سانتی متر و حداقل سرعت، جهت بستر سیال کردن نمونه‌ها در حدود  $0/21 \pm 0/79$  متر بر ثانیه بود (Brooker *et al.*, 1992; ASABE, 2008). آزمایشات تا جایی ادامه یافت که رطوبت نهایی نمونه تا میزان  $0/5 \pm 17$  درصد بر مبنای خشک کاهش پیدا کند. آزمایشات خشک کن بستر سیال - فراصوت در سه سطح دمایی (۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس)، چهار سطح فرکانسی (۲۰، ۲۵، ۲۸ و ۳۰ کیلوهرتز) و سه سطح توان فراصوتی (۱۱/۱، ۱۴/۶ و ۱۸/۷ کیلووات بر مترمکعب) انجام و چندین آزمایش بستر سیال (تیمار شاهد) جهت مقایسه با تیمارهای فراصوتی انجام پذیرفت.

جهت مشخص کردن سینتیک خشک کردن از نسبت رطوبتی MR استفاده شد که از معادله‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱)  $M_i$  رطوبت داخلی محصول (بر پایه‌ی خشک)،  $M_t$  نسبت رطوبتی ذرت در زمان  $t$  (بر پایه‌ی خشک) و  $M_e$  درصد رطوبت تعادلی (بر پایه‌ی خشک) می‌باشد که توسط رابطه‌ی (۲) که به رابطه‌ی چانگ پی فست (Chung-Pfost) معروف است بدست می‌آید:

$$M_e = E - F \ln[-(T + C) \ln(RH)] \quad (2)$$

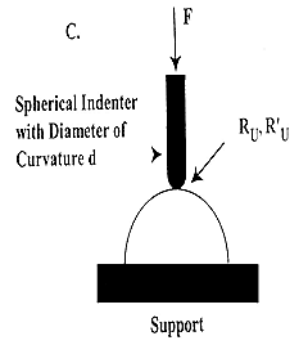
در رابطه‌ی (۲) ثابت‌های  $E$ ،  $F$  و  $C$  از جدول مربوط به ثابت‌های ذرت استخراج و در معادله قرار داده شد و پارامتر  $T$  و  $RH$  رطوبت نسبی و دمای هوای خشک کن بر حسب درصد و درجه سلسیوس است.

تحلیل آماری

برای بررسی آماری این تحقیق از آزمایش فاکتوریل بر مبنای طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. به منظور تعیین مقایسه میانگین صفات از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد و نرم افزار SAS 9.0 و Excel 2010 جهت تجزیه و تحلیل نتایج و رسم نمودارها استفاده شد.

خصوصیات کیفی

بعد از فرآیند خشک کردن ذرت، حداقل تعداد ۲۰ نمونه از دانه‌های ذرت به منظور تعیین نیروی شکست و انرژی چقرمگی در زیر دستگاه چند منظوره اینستران (STM-20, SANTAM, Iran; Fig. 2) که شامل یک لودسل (DBBP-200, Taiwan; Fig. 2) و پروبی با شعاع ۰/۸۳۸ میلی متر بود، قرار گرفت. سرعت بارگذاری پروب مقدار ۰/۵۱ متر بر ثانیه تنظیم شد (ASABE, 2008).



شکل ۲- دستگاه اینستران و لودسل به همراه سیستم ثبت داده ها

انرژی ویژه مصرفی

انرژی ویژه مصرفی (SEC) در خشک کردن مقدار انرژی مورد نیاز برای خارج کردن ۱ کیلوگرم آب از محصول می‌باشد که مقدار آن از طریق رابطه ی زیر بدست می‌آید:

$$SEC = \frac{E_t}{m_{ev}} \quad (3)$$

$E_t$  مجموع انرژی مصرفی بر حسب ژول و  $m_{ev}$  مجموع مقدار آب خارج شده از نمونه ذرت در طی فرآیند خشک کردن و برحسب کیلوگرم است. توان فن گریز از مرکز که انتقال هوا بر واحد سطح بستر و برحسب وات است، طبق رابطه ی زیر محاسبه می شود (Brooker *et al.*, 1992):

$$FP = \frac{\Delta P \cdot V}{\eta_f} \quad (4)$$

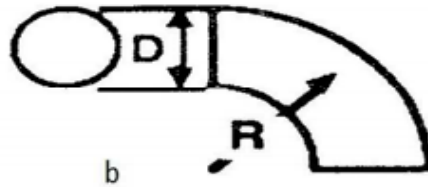
در رابطه فوق  $V$  سرعت هوای عبوری بر حسب متر بر ثانیه و  $\eta_f$  بازده فن گریز از مرکز است که بستگی به نوع فن و میزان باز و بسته بودن فضای هوای عبوری دارد که در این تحقیق متناسب با شرایط آزمایش در حدود ۰/۵ بدست آمد. سه پارامتر موثر فشار که مورد ارزیابی قرار گرفت شامل فشار عمق ( $\Delta P$ )، تاثیر مقاومت هوای دانه ها ( $\Delta P_g$ ) و افت فشار ناشی از خمیدگی لوله ( $\Delta P_d$ ) است (افت فشار ناشی از طول لوله به علت کوتاهی مسیر ناچیز بوده و صرفه نظر شد). مقاومت بستر قرارگیری دانه های ذرت به علت اینکه مساحت حفره های (سوراخ های) بستر بیشتر از ۱۰ درصد از کل مساحت بستر بود نادیده گرفته شد (Brooker *et al.*, 1992). بنابراین افت فشار طبق رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$\Delta P = \Delta P_g + \Delta P_d \quad (5)$$

افت فشار ناشی از مقاومت دانه ها و ارتفاع دانه ها طبق معادله زیر محاسبه می شود:

$$\Delta P_g = \frac{5.38 \times 10^4 \times L \times V^2}{\ln(1+79 \times V)} \quad (6)$$

L عمق قرارگیری دانه بر حسب متر و V سرعت جریان هوای عبوری از لوله بر حسب متر بر ثانیه است. افت فشار هوای خشک کردن در لوله با تغییر زاویه لوله مطابق شکل (۳)، توسط رابطه ی (۷) محاسبه می شود:



شکل ۳- تغییر زاویه ی لوله

$$\Delta P_d = c_2 \left( \frac{V}{1.29} \right)^2 \quad (7)$$

$C_2$  ضریب ثابت در معادله ی خمیدگی لوله و V سرعت جریان هوای عبوری از لوله می باشد که بر حسب متر بر ثانیه است و معادله حرارتی مورد نیاز برای خشک کردن که از رابطه ی تعادل حرارتی پیروی می کند طبق رابطه ی (۸) بدست می آید:

$$HP = \rho_a V C_p (T_d - T_a) \quad (8)$$

$\rho_a$  دانسیته ی هوا بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب، V سرعت جریان هوای عبوری از لوله بر حسب متر بر ثانیه،  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه هوا بر حسب ژول بر کیلوگرم درجه کلون (J/kg.K) و  $T_a$  و  $T_d$  هوای داخلی درون و بیرون خشک کن بر حسب درجه کلون است. توان فراصوت (UP) توسط معادله زیر محاسبه می شود:

$$UP = U I \cos \Phi \quad (9)$$

U بر حسب ولتاژ و شدت جریان I بر حسب آمپر و  $\cos \Phi$  فاکتور ضریب توان است که دارای مقدار ۰/۸ است. مجموع مصرف انرژی توسط معادله ی زیر محاسبه می شود:

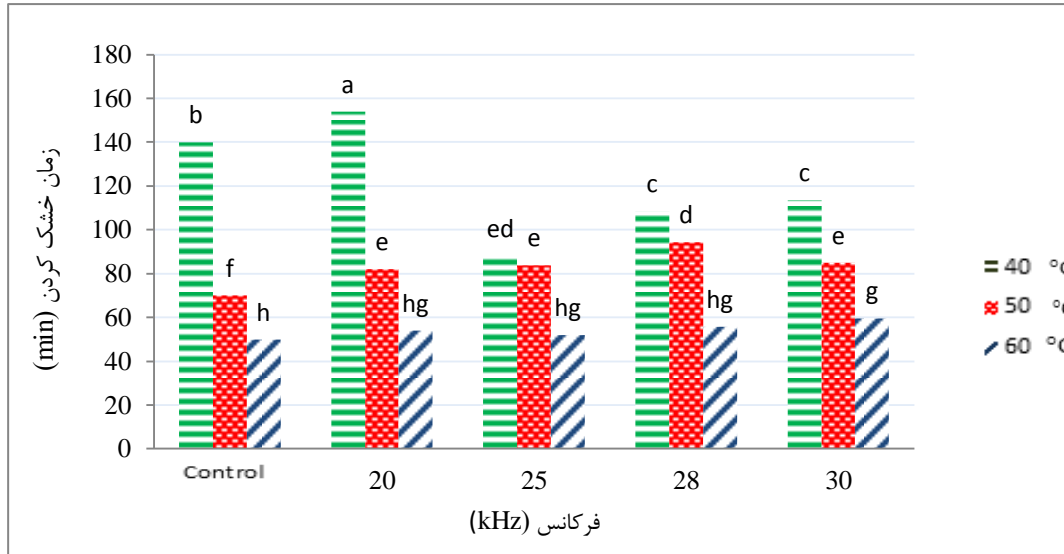
$$E_t = [(FP + HP) A + UP] \Delta t \quad (10)$$

که در آن A سطح مقطع خشک کن بر حسب متر مربع و  $\Delta t$  اختلاف زمان نهایی خشک کردن بر حسب ثانیه است.

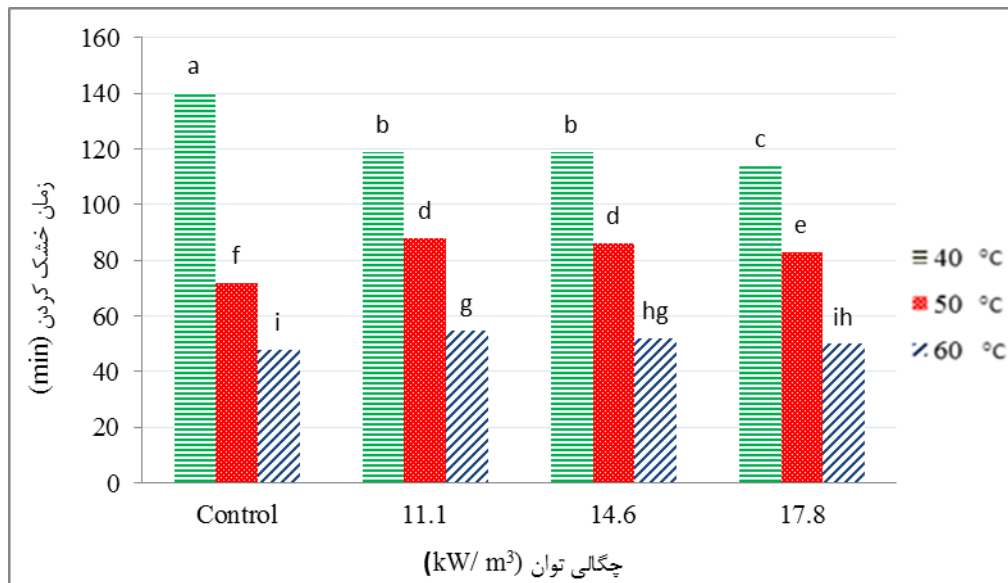
## نتایج و بحث

### زمان خشک کردن

تاثیرات دمای هوای ورودی روی زمان نهایی خشک شدن امری بدیهی بوده و اختلاف میانگین پارامترهای فرکانس و توان فراصوت در دماهای مختلف روی زمان نهایی خشک شدن با آزمون دانکن، سطح احتمال ۵ درصد در شکل (۴) و (۵) بررسی شده است.



شکل ۴- مقایسه میانگین زمان نهایی خشک کردن در سطوح مختلف دما و فرکانس، توسط آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد، حروف مشابه نشان دهنده عدم اختلاف معنی داری و Control نشان دهنده تیمار شاهد است که سایر تیمارها با آن مقایسه شده است.



شکل ۵- مقایسه میانگین زمان نهایی خشک کردن در سطوح مختلف دما و توان، توسط آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد، حروف مشابه نشان دهنده عدم اختلاف معنی داری و Control نشان دهنده تیمار شاهد است که سایر تیمارها با آن مقایسه شده است.

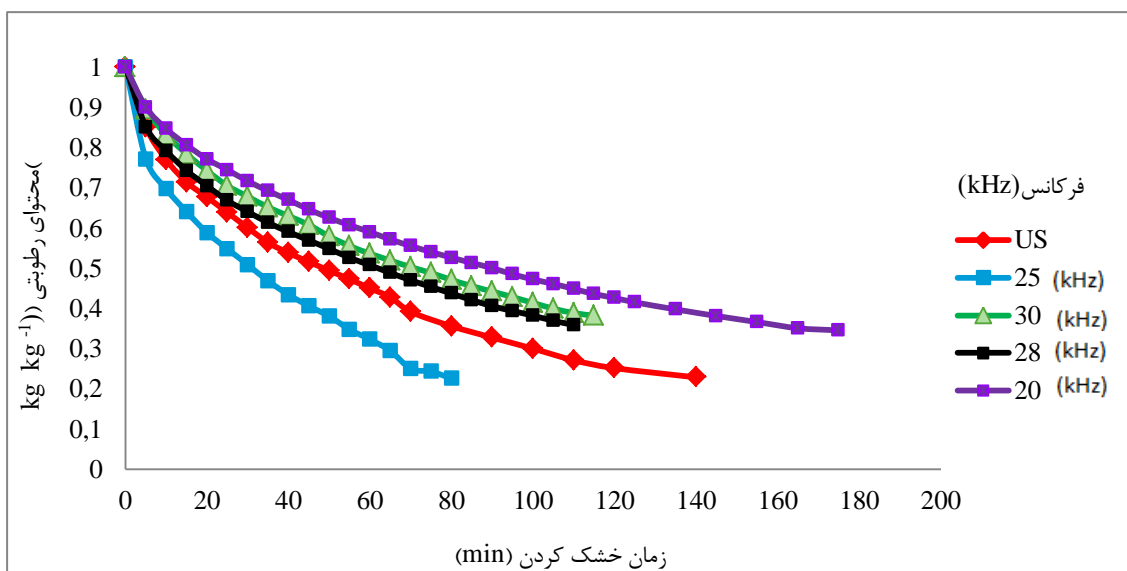
همانطور که در شکل (۵) و (۶) مشخص است، بهترین تیمار از جهت موثر بودن فراصوت بر روی کاهش زمان خشک کردن در دمای ۴۰ درجه سلسیوس، فرکانس ۲۵ کیلوهرتز و توان فراصوتی ۱۴/۶ کیلووات بر مترمکعب بدست آمد که زمان خشک کردن را به میزان ۴۳ درصد در مقایسه با تیمار شاهد (بدون فراصوت) کاهش داد. نتایج نشان داد هر چه فرکانس پایین تر باشد دارای نفوذ



بهتر در دمای پایین تر است زیرا هرچه فرکانس بالاتر باشد باعث ایجاد اعوجاج و درهم ریختگی درون ساختار محصول شده و نه تنها در بهبود روند خشک کردن موثر نبوده بلکه مدت زمان خشک کردن را هم افزایش می دهد (Karki, 2009; Garcia- Noguera *et al.*, 2010; Zare *et al.*, 2016). با افزایش توان زمان خشک کردن دارای مقدار کمتری در مقدار ماکزیمم در مقایسه با تیمار شاهد می باشد که در واقع در محیط کار بخش وسیعی از امواج فراصوت حالت میرا در توان های پایین فراصوتی دارند (GarcíaPérez *et al.*, 2006). در مقایسه ی تیمارهای فراصوتی در دمای ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس با تیمارهای شاهدشان، کاهشی در زمان خشک کردن مشاهده نشد چون هرچه دما پایین تر باشد اثرات فراصوتی راحت تر قابل مشاهده است و هرچه دما بالاتر باشد اثر آن غالب تر شده و دانسیته ی هوا کمتر شده و محصول سریع تر خشک می شود و مانع از مشاهده اثرات فراصوتی می گردد. امواج فراصوت می تواند موجب یک سری متناوب سریع از انقباض ها و انبساط ها در محصول شوند (اثر اسفنجی<sup>۲</sup>)، که در این روند انقباض و انبساط های مکرر، نیروهای درگیر در این مکانیزم می توانند باعث ایجاد کانال میکروسکوپی شوند و خروج رطوبت را آسان تر سازند (Tarleton, 1992; Tarleton *et al.*, 1998; De la Fuente-Blanco *et al.*, 2006).

### نسبت رطوبتی

آزمایشات نشان داد که دمای موثر جهت نفوذ فراصوت، دمای ۴۰ درجه سلسیوس می باشد. به منظور اینکه روند خشک کردن نمونه ها به صورت واضح قابل مشاهده شود از نمودار روند کاهش رطوبتی نمونه ها استفاده شد. در شکل (۶) نسبت رطوبتی در مقادیر مختلف فرکانسی در توان ۱۴/۶ کیلووات بر مترمکعب و در دمای ۴۰ درجه سلسیوس رسم شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می شود، فرکانس ۲۵ کیلوهرتز موثرترین فرکانس بر روی نرخ خشک کردن است.



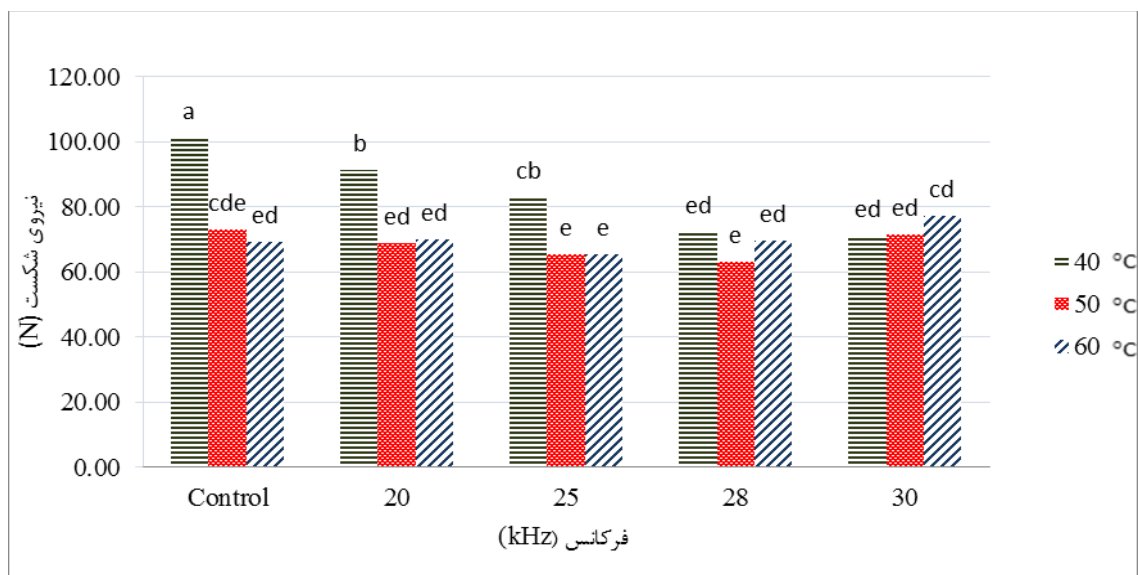
شکل ۶- نسبت رطوبتی در فرکانس های مختلف آزمایشی در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و توان ۱۴/۶ کیلووات بر مترمکعب

<sup>2</sup>- Sponge effect

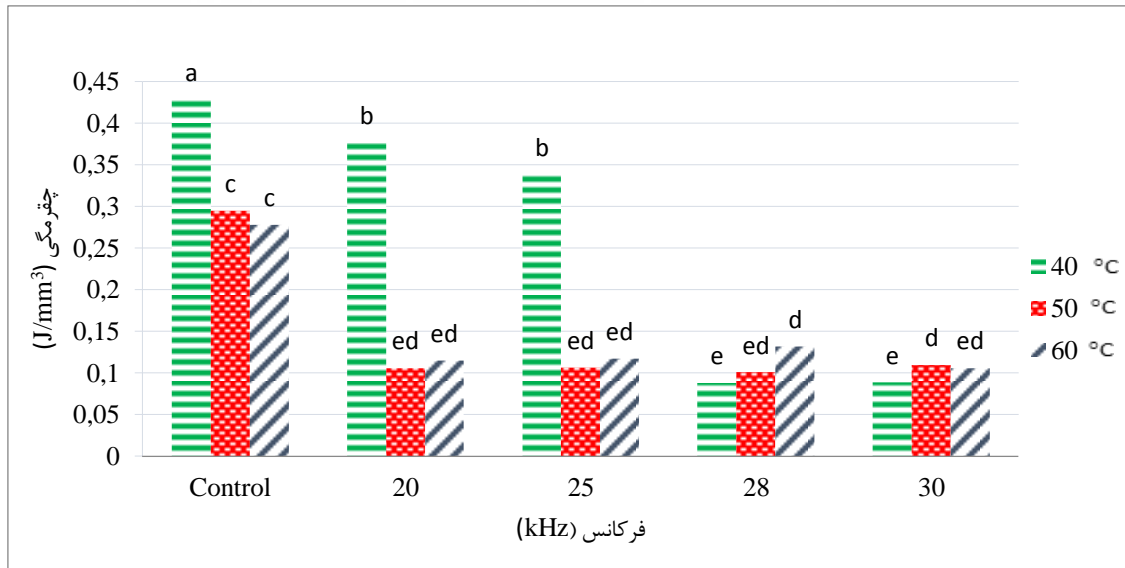


## خصوصیات کیفی

همانگونه که در شکل (۷) دیده می‌شود، در بررسی نیروی شکست، در فرکانس ۳۰ کیلو هرتز و دمای ۴۰ درجه سلسیوس، میزان نیروی شکست در مقایسه با سایر تیمارها کاهش بیشتری داشت و در مقایسه با تیمار شاهد دارای ۲۹/۶۲ درصد کاهش بود ولی ذکر این نکته ضروری است که هر چه فرکانس بالاتر باشد اثرات تخریبی ساختار درونی و فیزیولوژیکی محصول بیشتر خواهد بود و کیفیت اولیه را ندارد که این مسئله نتیجه ی مطلوبی نیست، چون حفظ کیفیت محصول هم از لحاظ ظاهری و هم از لحاظ ساختار داخلی مورد توجه است (Karki, 2009). در بررسی نیروی شکست در دمای ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس به جهت اینکه دما غالب تر بوده و مانع از بروز اثرات فراصوت بر روی تیمارها شده است، در این دماها تفاوت چندانی در مقایسه با تیمار شاهدشان مشاهده نمی شود. همانگونه که از شکل (۸) بر می‌آید، بیشترین میزان اختلاف انرژی چقرمگی در مقایسه با تیمار شاهد در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و فرکانس های ۲۸ و ۳۰ کیلوهرتز بدست آمد که در مقایسه با تیمار شاهد دارای کاهش ۷۹/۶۶ و ۷۹/۲۳ درصدی بود. در واقع وقتی یک موج فراصوت توان بالا وارد محصول می شود موجب انقباض و انقباض سریع و نوسانی در محصول شده و حالت اسفنجی را در آن ایجاد می کند و پیرو آن موجب باز شدن کانال های موئین شده و به بیرون آمدن رطوبت از درون محصول کمک می کند. اثر فراصوت بر روی محصول بخصوص در فرکانس های بالاتر موجب از هم گسیختگی بافت های درونی محصول و ایجاد حفره هایی درون ساختار سلول ماده می شود که این امر باعث ایجاد حالت اسفنجی و پوکی شدن در محصول شده و در نتیجه، برای از هم گسیختن و شکستن محصول بر اثر نیروی شکست دانه نیروی کمتری مورد نیاز است و تشکیل کانال میکروسکوپی اصولا همراه با شکستن سلول های متراکم شده است ( Tarleton, 1992; Tarleton *et al.*, 1998; De la  (Fuente-Blanco *et al.*, 2006; Fernandes *et al.*, 2009; Nowacka *et al.*, 2012; Gallant *et al.*, 1972



شکل ۷- مقایسه میانگین نیروی شکست در سطوح مختلف دما و فرکانس، توسط آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد، حروف مشابه نشان دهنده عدم اختلاف معنی داری و Control نشان دهنده تیمار شاهد است که سایر تیمارها با آن مقایسه شده است.



شکل ۸- مقایسه میانگین انرژی چقرمگی در سطوح مختلف دما و فرکانس، توسط آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد، حروف مشابه نشان دهنده عدم اختلاف معنی داری و Control نشان دهنده تیمار شاهد است که سایر تیمارها با آن مقایسه شده است.

#### انرژی ویژه مصرفی

در بررسی تیمارهای آزمایشی در دماهای مختلف، ترکیب دمای ۴۰ درجه سلسیوس، فرکانس ۲۵ کیلوهرتز و توان ۱۴/۶ کیلووات بر مترمکعب دارای کمترین مقدار انرژی مصرفی (SEC) بود (جدول ۱). در فرکانس ۲۵ کیلوهرتز و دمای ۴۰ درجه سلسیوس و در بررسی تمامی توان های آزمایشی آن کاهش معنی دار انرژی ویژه مصرفی در مقایسه با تیمار شاهد مشاهده شد. علاوه بر این SEC دارای روند افزایشی در دمای ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس بود و به طور کلی هرچه دما بالاتر باشد فراصوت اثر معکوس بر روی روند خروج رطوبت از محصول می‌گذارد. بدین جهت که کانال های میکروسکوپی موجب اعوجاج در میان سلول ها شده و موجب افزایش زمان خشک کردن و انرژی مصرفی می شود (Fernandes et al., 2009; Zare et al., 2016). ویژگی کیفی دانه، کیفیت نهایی و نوع مصرف آن (غذای انسانی یا حیوانی) را تعیین می کند. نتایج نشان داد که اگر دانه به منظور مصرف دام و به صورت خرد شده (آسیاب شده) مورد استفاده قرار گیرد در کل انرژی چقرمگی و انرژی مصرفی کمتری جهت شکستن و از هم گسیختن دانه مورد نیاز است (عبدلی، ۱۳۹۴). براساس نتایج حاصله از چقرمگی در شکل (۸) می توان مصالحه ای میان انرژی مصرفی و کیفیت نهایی دانه در فرآیند خشک کردن برقرار کرد. با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول (۱) ترکیبی همچون دمای ۴۰ درجه سلسیوس، فرکانس ۲۵ کیلوهرتز و چگالی توان ۱۴/۶ کیلووات بر مترمکعب، کمترین انرژی مصرفی را فراهم می کند.

### نتیجه گیری کلی

نتایج نشان داد هر چه دمای هوای داخلی خشک کن و فرکانس پایین تر باشد، انرژی فراصوت تاثیر بیشتری بر روی خشک کردن نمونه های ذرت داشته و موجب کاهش معنی دار زمان خشک کردن می شود. علاوه بر این هر چه فرکانس بالاتر و دما پایین تر باشد نیروی شکست و چقرمگی دارای کاهش معنی دار، به جهت ایجاد پدیده ی اسفنجی و تشکیل کانال های میکروسکوپی می شوند. مینیمم مقدار SEC مربوط به کمترین دمای آزمایش و فرکانس موثر ۲۵ کیلوهرتز بود.

جدول ۱- انرژی ویژه مصرفی (SEC) بر حسب مگاژول بر کیلوگرم در فرآیند خشک کردن برای تیمارهای مختلف

دما (°C)	چگالی توان (kW/m <sup>3</sup> )	فرکانس (kHz)				تیمار شاهد
		۲۰	۲۵	۲۸	۳۰	
۴۰	۱۱/۱	۱۲/۳۳	۷/۹۳	۸/۸۹	۹/۱۶	۲/۸۹
	۱۴/۶	۱۷/۵۷	۸/۷۷	۱۱/۶۲	۱۲/۴۷	
	۱۸/۷	۲۱/۱۲	۱۱/۹۱	۱۵/۲۱	۱۵/۲۶	
	-	-	-	-	-	
۵۰	۱۱/۱	۶/۸۷	۶/۹۱	۸/۰۱	۶/۸۹	۱/۳۳
	۱۴/۶	۹/۳۵	۹/۴۲	۱۰/۷۲	۹/۵۰	
	۱۸/۷	۱۱/۴۶	۱۲	۱۲/۸۸	۱۲/۱۰	
	-	-	-	-	-	
۶۰	۱۱/۱	۴/۴۲	۴/۴۵	۴/۴۸	۵/۴۴	۱/۰۸
	۱۴/۶	۶/۲۲	۵/۶۹	۶/۳۲	۶/۸۶	
	۱۸/۷	۸	۷/۲۷	۸	۷/۸۶	
	-	-	-	-	-	

منابع

عبدلی، ب. ۱۳۹۴. ارزیابی فرآیند خشک کردن ذرت در یک خشک کن بستر سیال - فراصوت. پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

ASABE, 2008. Resistance to Airflow of Grains, other Agricultural Products, and Perforated Metal Sheets. ASABE Standards. St. Joseph, MI.

ASABE, 2008. Compression Test of Food Materials of Convex Shape. ASABE Standards. St. Joseph, MI.

Barzegar, M., Zare, D., and 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.

Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W., and Hall, C. W. 1992. *Drying and storage of grains and oilseeds*. Springer Science & Business Media.

Cárcel, J. A., Benedito, J., Rosselló, C., and Mulet, A. 2007. Influence of ultrasound intensity on mass transfer in apple immersed in a sucrose solution. *Journal of food engineering*, 78(2), 472-479.

Cárcel, J. A., García-Pérez, J. V., Riera, E., and Mulet, A. 2007. Influence of high-intensity ultrasound on drying kinetics of persimmon. *Drying Technology*, 25(1), 185-193.

De la Fuente-Blanco, S., De Sarabia, E. R. F., Acosta-Aparicio, V. M., Blanco-Blanco, A., and Gallego-Juárez, J. A. 2006. Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics*, 44, e523-e527.

Fernandes, F. A., Gallão, M. I., and Rodrigues, S. 2009. Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. *Journal of Food Engineering*, 90(2), 186-190.

Gallant, D., Degrois, M., Sterling, C., and Guilbot, A. 1972. Microscopic effects of ultrasound on the structure of potato starch preliminary study. *Starch-Stärke*, 24(4), 116-123.

Gallego-Juárez, J. A., Riera, E., De la Fuente Blanco, S., Rodríguez-Corral, G., Acosta-Aparicio, V. M., and Blanco, A. 2007. Application of high-power ultrasound for dehydration of vegetables: processes and devices. *Drying Technology*, 25(11), 1893-1901.

- Garcia-Noguera, J., Oliveira, F. I., Gallão, M. I., Weller, C. L., Rodrigues, S., and Fernandes, F. A. 2010. Ultrasound-assisted osmotic dehydration of strawberries: Effect of pretreatment time and ultrasonic frequency. *Drying Technology*, 28(2), 294-303.
- García-Pérez, J. V., Cárcel, J. A., De la Fuente-Blanco, S., and De Sarabia, E. R. F. 2006. Ultrasonic drying of foodstuff in a fluidized bed: Parametric study. *Ultrasonics*, 44, e539-e543.
- García-Pérez, J. V., Cárcel, J. A., Riera, E., and Mulet, A. 2009. Influence of the applied acoustic energy on the drying of carrots and lemon peel. *Drying Technology*, 27(2), 281-287.
- Karki, B. 2009. Use of high-power ultrasound during soy protein production and study of its effect on functional properties of soy protein isolate.
- Momenzadeh, L., Zomorodian, A., and Mowla, D. 2011. Experimental and theoretical investigation of shelled corn drying in a microwave-assisted fluidized bed dryer using Artificial Neural Network. *Food and bioproducts processing*, 89(1), 15-21.
- Nowacka, M., Wiktor, A., Śledź, M., Jurek, N., and Witrowa-Rajchert, D. 2012. Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties. *Journal of Food Engineering*, 113(3), 427-433.
- Ranjbaran, M., Emadi, B., and Zare, D. 2014. CFD simulation of deep-bed paddy drying process and performance. *Drying Technology*, 32(8), 919-934.
- Rodríguez, J.; Mulet, A.; Bon, J. Influence of high-intensity ultrasound on drying kinetics in fixed beds of high porosity. *Journal of Food Engineering* 2014, 127, 93-102.
- Schössler, K., Jäger, H., and Knorr, D. 2012. Novel contact ultrasound system for the accelerated freeze-drying of vegetables. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 16, 113-120.
- Tarleton, E. S. 1992. The role of field-assisted techniques in solid/liquid separation. *Filtration & separation*, 29(3), 246-238.
- Tarleton, E. S., Wakeman, R. J., Povey, M. J. W., and Mason, T. J. 1998. *Ultrasounds in Food Processing*. Blackie Academic and Professional, Glasgow, 193-218.
- Zare, D., Abdoli, B., Nourmohamadi-Moghadami, A. 2016. Energy Consumption and Quality Attributes of Corn Drying in an Ultrasound-Assisted Fluidized Bed Dryer. 37<sup>th</sup> CIOSTA and CIGR (International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering). Jun. 26–29, 2016, Aarhus, Denmark.



Zare, D., Jafari, A.M. Paddy drying in an ultrasound-assisted fluidized bed dryer. 2015. 36<sup>th</sup> CIOSTA and CIGR (International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering). May 26-28, 2015, Saint-Petersburg, Russia.

Zare, D., Jayas, D. S., and Singh, C. B. 2012. A generalized dimensionless model for deep bed drying of paddy. *Drying Technology*, 30(1), 44-51.

Zare, D., Minaei, S., Zadeh, M. M., and Khoshtaghaza, M. H. 2006. Computer simulation of rough rice drying in a batch dryer. *Energy Conversion and Management*, 47(18), 3241-3254.