

خشک کردن ذرت در یک خشک کن آزمایشگاهی بستر سیال - فراصوت

بهاره عبدلی^۱، داریوش زارع^{۲*}، آرش نورمحمدی مقدمی^۳

۱. دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، بخش مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۲. دانشیار، بخش مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۳. دانشجوی دکتری، بخش مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۸/۱۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۳/۱۶ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۲/۲۶)

چکیده

تاکنون چندین مطالعه درباره تجهیز خشک کن بستر سیال با رویکرد افزایش بازده و بهبود عملکرد انجام شده است که به منظور تحقق این هدف ترکیب آن با تجهیزات فراصوت توان بالا می تواند مناسب باشد. هدف اصلی این پژوهش بررسی تاثیر فراصوت توان بالا بر روی خشک کن آزمایشی بستر سیال در خصوص مدت زمان خشک کردن و خصوصیات مکانیکی ذرت است که در سه سطح توان فراصوت (۱۱/۱، ۱۴/۶ و ۱۷/۸ کیلووات بر مترمکعب)، چهار سطح فرکانس (۲۰، ۲۵، ۲۸ و ۳۰ کیلوهرتز) و سه سطح دمای (۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس) به منظور کاهش رطوبت اولیه از مقدار اولیه 32 ± 0.5 درصد به رطوبت نهایی 17 ± 0.5 درصد (d. b.) به آن پرداخته شده است. نتایج نشان داد در پایین ترین سطح دما، فرکانس ۲۵ کیلوهرتز و توان ۱۴/۶ کیلووات بر مترمکعب موثرترین ترکیب از نظر زمان خشک کردن در میان تیمارهای آزمایش بوده است. این ترکیب در مقایسه با حالت بدون فراصوت، زمان نهایی خشک شدن را ۴۳ درصد کاهش داد و فراصوت به دلیل ایجاد پدیده اسفنجی در محصول، موجب کاهش مقاومت فشاری نهایی و چقرمگی گردید. نتایج نشان داد که انرژی چقرمگی در مقایسه با مقاومت فشاری نهایی شاخص مناسب تری برای مشخص کردن مقاومت شکست دانه می باشد.

واژه های کلیدی: خصوصیات مکانیکی، فراصوت توان بالا، ذرت

مقدمه

ذرت (*Zea mays L*) بعد از گندم و برنج یکی از مهم ترین غلات شناخته شده، که گاهی بر این دو محصول پیشی گرفته و جایگاه اول تولید را به خود اختصاص داده است (FAO, 2014) و یکی از منابع مهم غله در جهان است و یک منبع پروتئینی کیفیت بالا برای خوراک و برنامه غذایی است. اصولاً ذرت یک گونه است ولی از ارقام و واریته های متفاوتی تشکیل شده است. ذرت استفاده شده در این آزمایش ذرت دندان اسپی (*Zea mays var. indentata*) بود که این نوع ذرت دارای مخلوطی از نشاسته ی نرم و سخت می باشد. از خصوصیات ظاهری دانه آن، می توان به وجود نقطه ای فرو رفته در طرف تاج دانه اشاره نمود که به دلیل خشک شدن آندوسپرم نشاسته ای به وجود می آید (Wolf et al., 1952). ذرت دندان اسپی یا ذرت دندانهای^۱

نوعی ذرت است که تاج دانه آن در حالت رسیدگی به علت از دست دادن رطوبت خودش، مقعر و دنداندار است دانه ها در مرحله رسیدن مقداری از آب خود را از دست می دهند که باعث متراکم شدن حجم بخش درونی آن می گردد و در نتیجه یک گودی در رأس دانه تشکیل می گردد که به شکل دندان اسپ می باشد (Jones, 1924). نمونه تازه برداشت شده دانه ذرت در بالاترین سطح دارای ۳۲ تا ۳۴ درصد رطوبت (d. b.%) می باشد که به منظور جلوگیری از زوال زودرس و حفظ کیفیت محصول برای مدت زمان طولانی تر باید آن را به رطوبت در حدود ۱۷ درصد پایه خشک رساند (Brooker et al., 1992). خشک کردن از مهم ترین عملیات بعد از برداشت ذرت دانه ای است که مصرف انرژی و خصوصیات کمی و کیفی محصول را تحت تاثیر قرار می دهد (Zare et al., 2006). روش های خشک کردن سنتی بر پایه ی هوای گرم می تواند کیفیت نهایی محصول را خراب کند و موجب عطر و طعم ناخواسته ی غذا، ترکیب رنگ، تخریب ویتامین و از دست دادن اسیدهای آمینه ی ضروری شود (Jayaraman and Das Gupta, 1992; Mujumdar

* نویسنده مسئول : dzare@shirazu.ac.ir

al., 2007a; Garcia-Perez *et al.*, 2009; Rodríguez *et al.*, 2014). نتایج این تحقیقات نشان داد که استفاده از انرژی فراصوت می تواند زمان نهایی خشک کردن را کاهش دهد زیرا امواج فراصوت می تواند موجب تناوب های سریع از انقباض ها و انبساط ها در محصول شود و اصطلاحاً باعث ایجاد پدیده اسفنجی در محصول شود. نیروهای درگیر در این مکانیزم می تواند کانال میکروسکوپی ایجاد کنند که خروج رطوبت را آسان تر می کند. علاوه بر این فراصوت موجب تولید گودال (حفره) در محصول شده که می تواند برتی حذف رطوبت مفید باشد. اثر اسفنجی ایجاد شده توسط فراصوت به کار برده شده، می تواند مسئول ایجاد کانال های میکروسکوپی در مواد متخلخل مانند میوه ها باشد (De la Fuente-Blanco *et al.*, 2006; Tarleton, 1992; Tarleton & Wakeman, 1998). از آنجایی که اطلاعاتی در مورد تاثیر و عملکرد فراصوت بر روی خشک کردن ذرت وجود ندارد، این تحقیق با هدف بررسی (۱) زمان خشک کردن ذرت در یک خشک کن بستر سیال- فراصوت و (۲) خصوصیات مکانیکی ذرت بعد از اعمال فراصوت انجام شده است.

مواد و روش ها

آماده سازی نمونه

محصول آزمایشی این پژوهش ذرت دندان آسیبی یا ذرت رقم ۷۰۴ بود که از یکی از شهرستان های استان فارس، خریداری شد. به منظور جلوگیری از کاهش رطوبت و حفظ آن، نمونه های پاک شده ذرت را با الکل ضدعفونی نموده و در کیسه های نایلونی زیپ دار (زیپ کیپ) ریخته و سپس در یخچال با دمای 4 ± 0.5 درجه سلسیوس نگهداری شدند. رطوبت اولیه ذرت به کمک آن استاندارد 32 ± 0.5 درصد (d. b. %) اندازه گیری شد (ASABE, 2008b).

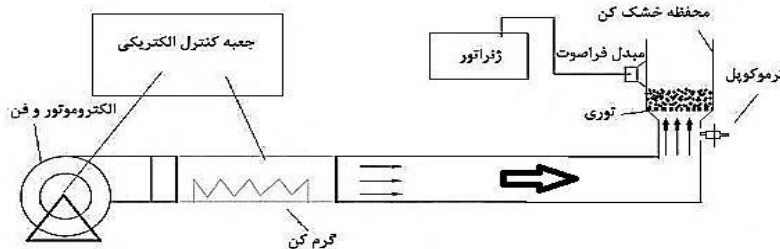
ساختمان دستگاه و تجهیزات مورد نیاز

خشک کن بستر سیال با محفظه خشک کن فراصوت توسط جعفری و زارع (Jafari and Zare, 2016) طراحی و ساخته شد که طرح واره آن در شکل (۱) مشاهده می شود. به منظور بهبود عملکرد و مناسب تر نمودن شرایط دستگاه جهت خشک کردن نمونه ذرت، تغییراتی اعمال گردید. این اصلاحات عبارت بودند از تغییر در: سیستم گرمایشی دستگاه (اضافه کردن واحدهای گرمکن برقی)، سیستم برق رسانی (مطمئن تر کردن و ایمن تر ساختن سیستم و استفاده از لوله سیمانی جهت سوار کردن واحدهای گرمکن برقی و جلوگیری از ایجاد اتصال کوتاه در بین واحدهای گرمایی)، محل قرارگیری حسگر دما (قراردهی سنسور در زیر بستر نمونه) و یکنواخت تر کردن گرمای ناشی از

(and Menon, 1995). خشک کن های بستر سیال مهم ترین خشک کن های محصولات دانه ای هستند که به طور یکنواخت مواد را خشک می کند ولی به دلیل مدت زمان بالای خشک کردن، محققین به دنبال راهکاری به منظور بهبود بهره وری و عملکرد این خشک کن ها بوده اند. بنابراین برخی از تحقیقات بر روی خشک کن بستر سیال به منظور تجهیز کردن به کمک فن آوری های جدید با هدف کاهش مصرف انرژی و بهبود خصوصیات کمی و کیفی محصولات انجام شده است که از این میان می توان به فن آوری مایکروویو و مادون قرمز اشاره کرد (Zare 2006; Zare *et al.*, 2012; Ranjbaran *et al.*, 2014). در روش های مذکور دمای داخلی محصول به دلیل بالا رفتن دمای رطوبت داخلی محصول و انتقال حرارت از لایه های بیرونی به لایه های درونی افزایش می یابد که این حالت برای محصولات حساس به گرما مناسب نیست چون خصوصیات کیفی و ظاهری محصول را تحت تاثیر قرار می دهد (De La Fuente-Blanco *et al.*, 2006; Momenzadeh *et al.*, 2011; Barzegar *et al.*, 2015; Jafari & Zare, 2016). فراصوت توان بالا به عنوان یک عامل غیر حرارتی می تواند برای محصولات حساس به گرما مناسب باشد (Gallego-Juarez *et al.*, 2007) و به عنوان یک منبع جدید، موثر و منبع قدرت بی خطر برای بسیاری از برنامه های کاربردی خشک کن ها در نظر گرفته شده است (Dolatowski *et al.*, 2007). این تکنولوژی راه خود را به عنوان مختلف پیدا کرده و در بسیاری از برنامه های کاربردی محققان مزایای آن به اثبات رسیده است. در چندین پژوهش انرژی فراصوت توان بالا (HPU) به طور مستقیم بر روی محصولات هم چون هویج و ورق لیمو (García-Pérez *et al.*, 2009)، سبزیجات (Gallego-Juárez *et al.*, 2007)، سیب زمینی (De la Fuente-Blanco *et al.*, 2006)، توت فرنگی های دلمه قرمز (Schössler *et al.*, 2012)، خرمالو (Cárcel *et al.*, 2007b) و شلتوک (Jafari & Zare, 2016)، قارچ دلمه ای، کلم بروکلی و گل کلم (Jambrak *et al.*, 2007)، موز (Fernandes *et al.*, 2008)، خربزه (Fernandes *et al.*, 2008)، سویا (Karki, 2009)، آناناس (Fernandes *et al.*, 2008)، فلفل سبز (Szadzin'ska *et al.*, 2017) و هویج (Chen *et al.*, 2016) استفاده شده است. در برخی تحقیقات از صفحات پخش کننده تشعشع استفاده شده که محصول آزمایشی آنها هویج، ورق لیمو و آویشن بود (Cárcel *et al.*

واحدهای گرمکن برقی به گونه‌ای بود که دور تا دور لوله نصب گردیدند.

گرمکن‌های برقی (قراردهی گرمکن‌های برقی متناسب با ظرفیت گرمایی آن‌ها، به گونه‌ای که گرمکن برقی قوی‌تر در فاصله دورتر از بستر نمونه و گرمکن برقی با توان گرمایی ضعیف‌تر در فاصله نزدیک‌تر به بستر نمونه قرار می‌گرفت و طرز قرارگیری



شکل ۱. طرح‌واره دستگاه خشک‌کن بستر سیال - فراصوت

(PZT-8 20kHz100W, PZT-8 25kHz100W, PZT-8 30kHz100W, 28kHz100W) در چهار فرکانس (۲۰، ۲۵، ۲۸ و ۳۰ کیلوهرتز) مورد استفاده قرار گرفتند. مبدل‌ها به صورت تک به تک به ژنراتور متصل شده و جریان خروجی از ژنراتور را به امواج مافوق صوت تبدیل می‌کرد. حداکثر توان مصرفی این مبدل‌ها ۱۰۰ وات و سطوح توانی استفاده شده در این پژوهش ۱۱/۱، ۱۴/۶ و ۱۸/۷ کیلووات بر مترمکعب بود که در شکل (۲) نمای دستگاه ژنراتور فراصوت توان بالا و مبدل‌های فراصوتی آن مشاهده می‌شود.

شرایط آزمایش

بستر خشک‌کن (ظرفی که نمونه در آن قرار می‌گرفت) به همراه دانه‌های ذرت دارای وزن $10 \pm 830/74$ گرم بود و رطوبت داخلی نمونه‌ها $0/5 \pm 32$ درصد (d. b. %) اندازه‌گیری شد. ارتفاع دانه‌های ریخته شده درون بستر ۴ سانتی متر و حداقل سرعت، جهت بستر سیال کردن نمونه‌ها در حدود $0/21 \pm 0/79$ متر بر ثانیه بود. آزمایش‌ها تا جایی ادامه می‌یافت که رطوبت نهایی نمونه به $0/5 \pm 17$ درصد (d. b. %) کاهش پیدا کند. آزمایش‌ها 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.

تحلیل آماری

برای بررسی آماری این تحقیق از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. فاکتورهای مورد آزمایش شامل دمای هوای خشک‌کننده (در سه سطح ۴۰، ۵۰، ۶۰ درجه سلسیوس)، توان فراصوت (در سه سطح ۱۱/۱، ۱۴/۶، ۱۷/۸ کیلووات بر مترمکعب) و فرکانس فراصوت (در چهار سطح ۲۰،

جریان هوا به کمک یک فن گریز از مرکز که موتور آن توسط یک مبدل^۱ (N50-007SF -Korea) کنترل می‌گردید، ایجاد شده و سرعت هوای عبوری توسط یک سرعت سنج (Testo 435-2) با دقت $\pm 0/03$ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. برای رسیدن به دمای داخلی مورد نظر از یک مجموعه گرمکن برقی که از واحدهای گرمایی ۱ و ۲ کیلووات و ۵/ کیلووات تشکیل شده بود، استفاده شد. این مجموعه توسط حسگر دما ترموکوپل نوع K (K-type) با دقت ± 1 درجه سلسیوس تجهیز شده بود، کنترل می‌شد. لوله انتقال دهنده هوای گرم دارای قطر داخلی ۱۱ سانتی متر و طول ۳ متر بود که به یک محفظه خشک‌کن وصل شده بود. رطوبت هوای عبوری و انتقال دهنده به نمونه توسط دستگاه Testo 435-2 و پروب مخصوص آن اندازه‌گیری شد. به منظور موثرتر کردن اثر فراصوت شدت بالا بر روی محصول و جلوگیری از افت انتقال فراصوت از یک محفظه خشک‌کن بستر سیال آلومینیومی (قطر داخلی ۱۳۰ میلی‌متر، حداکثر ارتفاع ۲۶۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر) استفاده گردید.

از یک دستگاه ژنراتور توان بالا فراصوت (UCE) Ulterasonic PBC ساخت کشور چین با ولتاژ ورودی 10 ± 220 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 راه‌اندازی مبدل فراصوت توان بالا در سطوح مختلف توان را دارا بود و امپدانس را به صورت اتوماتیک تنظیم می‌کرد. از چهار مبدل فراصوت توان بالا برای تولید فراصوت استفاده گردید. مبدل‌های فراصوت توان بالا

1. Inverter

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.



شکل ۲. ژنراتور توان بالای فراصوت (تصویر سمت چپ) به همراه مبدل‌های فراصوتی (تصویر سمت راست)

می‌شد. بعد از اتمام فرآیند تست، با استفاده از نرم‌افزار متلب، مساحت سطح زیر نمودار محاسبه می‌شد و از تقسیم آن بر حجم اولیه نمونه مقدار چقرمگی محصول بدست می‌آمد. به منظور مشخص کردن حجم اولیه نمونه از قطر، تعداد ۲۰ دانه ی ذرت به صورت تصادفی انتخاب و ابعاد آن به کمک کولیس مدرج با دقت ± 0.1 جهت مشخص کردن قطر معادل d_e اندازه گیری شد. قطر معادل دانه ها به کمک میانگین هندسی به وسیله ی سه ابعاد محوری (طول، عرض و ضخامت) و به کمک رابطه ی (۱) محاسبه و حجم اولیه دانه با استفاده از رابطه‌ی (۲) محاسبه گردید (Mohsenin, 1970):

$$d_e = (LWT)^{1/3} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

$$Ve = \frac{1}{6} \pi d_e^3 \quad \text{(رابطه ۲)}$$



شکل ۳. دستگاه اینستران به همراه سیستم ثبت داده ها (تصویر سمت چپ) و پروب مخصوص (تصویر سمت راست)

بررسی اثر فراصوت توان بالا در خشک‌کن بستر سیال - فراصوت بررسی شد. جدول ۱ خلاصه ای از تجزیه واریانس بررسی تاثیر فاکتورهای مختلف بر روی زمان نهایی خشک کردن را در سطح احتمال ۵ درصد نشان میدهد. همان‌طور که در جدول ۱ نشان

۲۵، ۲۸، ۳۰ کیلو هرتز) بودند و آزمایش‌ها فراصوت و بدون فراصوت (تیمار شاهد) در سه تکرار انجام و به طور کلی ۱۱۷ تیمارآزمایشی مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور تعیین مقایسه میانگین صفات زمان نهایی خشک کردن و خصوصیات مکانیکی

خصوصیات مکانیکی

بعد از اتمام فرآیند خشک کردن، تعداد ۲۰ نمونه از دانه‌های ذرت در هر آزمایش به منظور تعیین مقاومت فشاری نهایی و انرژی چقرمگی هر تیمار در زیر دستگاه چند منظوره اینستران (STM-20, SANTAM, Iran) که شامل یک لودسل (-DBBP 200, Taiwan) و پروبی با شعاع ۸.۳۸ میلی متر بود، قرار گرفت (شکل ۳). سرعت بارگذاری پروب به میزان ۰/۵۱ متر بر ثانیه تنظیم شد (ASABE, 2008a). نمودار رسم شده توسط کامپیوتر، تغییرات جابه‌جایی ناشی از نفوذ پروب در دانه ذرت را بر حسب نیرو نشان می‌داد. میزان نفوذ پروب در دانه ذرت تا زمانی ادامه می‌یافت که مقدار نیروی وارده بر آن به مقدار بیشینه خود برسد. این نیروی بیشینه حداکثر مقاومت فشاری نهایی بود که بعد از وارد شدن آن، دانه از هم گسیخته می‌شد و نمودار به صورت نزولی افت می‌کرد و در نهایت آزمایش متوقف



نتایج و بحث

زمان خشک کردن

طیف مشخصی از فرکانس در چگالی توان‌های مختلف بمنظور

موجب تسریع فرآیند خشک شدن می شوند. که این کانال های میکروسکوپی برای اولین بار توسط فرناندز و همکاران در میکروگراف از بافت خربزه بعد از خشک کردن توسط فراصوت گزارش شد (Fernandes et al., 2008). علاوه بر این فراصوت می تواند پدیده کاویتاسیون را ایجاد کند که ممکن است برای خارج کردن مقدار زیاد رطوبت مناسب باشد. سایر تاثیرات دیگر فراصوت شامل تغییر گرانشی، کشش سطحی و تغییر شکل مواد جامد متخلخل می باشد که تغییر شکل مواد جامد متخلخل باعث ایجاد کانال های میکروسکوپی، کاهش انتشار لایه های مرزی و افزایش جرم انتقالی در مواد غذایی می شود (Tarleton, 1992; Tarleton et al., 1998; De la Fuente-Blanco et al., 2009; Fernandes et al., 2006). نتایج نشان داد فراصوت در دما و فرکانس فراصوتی پایین تر بهتر در دانه ذرت نفوذ می کند. هر چه فرکانس پایین تر باشد فراصوت دارای نفوذ بهتری در دمای پایین تر می باشد و باعث تشکیل کانال هایی بین بافت سلولی می گردد (Fernandes et al., 2009). وجود فرکانس بالا نه تنها به فرآیند خروج رطوبت کمک نکرده، بلکه ساختار درونی را دچار در هم ریختگی (بی نظمی) نموده و موجب تغییر و تخریب در ساختار داخلی نمونه در مقایسه با تیمار شاهد شده است و در نتیجه مدت زمان خشک کردن را هم افزایش داده است (Karki, 2009, Garcia- Noguera et al., 2010, Abdoli, 2016, Nowacka et al., 2012). همچنین وجود دمای بالا در هنگام فرآیند خشک کردن می تواند موجب آسیب به ساختار داخلی و تخریب بعضی از قسمت های محصول شود (Witrowa-Rajchert & Rzaca, 2009). گارسیا نگورا در سال ۲۰۱۰ هم به این نتیجه رسید که هر چه فرکانس کمتر باشد زمان پیش تیمار برای خشک کردن توت فرنگی کاهش می یابد (Garcia-Noguera et al., 2010). با افزایش توان، زمان خشک کردن دارای مقدار کمتری در مقایسه با تیمار شاهد شد که در واقع توان فراصوتی در شدت های پایین تاثیر اندکی بر روی سرعت خشک کردن داشته و به دلیل اینکه سرعت خشک کردن افزایش داده شود از توان فراصوتی با شدت بالاتر استفاده شد (GarcíaPérez et al., 2006). در مقایسه 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. هرچه دما بالاتر باشد اثر آن ش به دلیل کاهش فشار جزئی هوا غالب تر شده و محصول سریع تر خشک شده و مانع از محسوس شدن اثرات فراصوتی می گردد (Abdoli, 2016).

داده شده اثرهای اصلی دما، توان و فرکانس به صورت مجز و در مورد اثرهای متقابل چندگانه این پارامترها در سطح ۱ درصد معنی دار شده است. این بررسی با دید این موضوع که تاثیرات دمای هوای ورودی روی کاهش زمان نهایی خشک شدن امری بدیهی است، صورت گرفت. 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.

جدول ۱. تجزیه واریانس اثرات فاکتورهای آزمایشی بر روی زمان نهایی خشک کردن

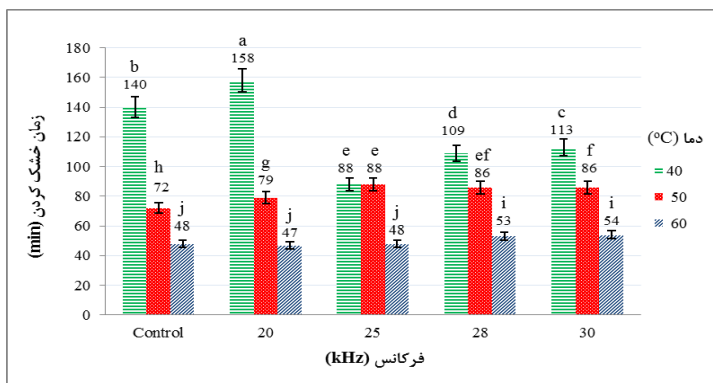
F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منابع تغییرات
**۳/۱۱۵۲۳	۳۴/۴۰۰۱۱	۶۸/۸۰۰۲۲	۲	دمای هوای ورودی
**۷۷/۵۲۹	۴۷/۱۸۳۹	۴۰/۵۵۱۸	۳	فرکانس مبدل
**۵۴/۳۳	۴۵/۱۱۶	۹۱/۲۳۲	۲	توان مبدل
**۱۷/۱۶	۱۵/۵۶	۵۹/۲۲۴	۴	دمای هوای ورودی* توان مبدل
**۸۴/۸۹۹	۴۳/۳۱۲۴	۵۷/۱۸۷۴۶	۶	دمای هوای ورودی* فرکانس مبدل
۰۹**/۴۷	۵۰/۱۶۳	۰۲/۹۸۱	۶	توان مبدل* فرکانس مبدل
۰۴**/۴۱	۴۹/۱۴۲	۹۲/۱۷۰۹	۱۲	دمای هوای ورودی* توان مبدل* فرکانس مبدل
	۴۷/۳	۰۰/۲۵۰	۷۲	خطای آزمایشی

** در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار است.

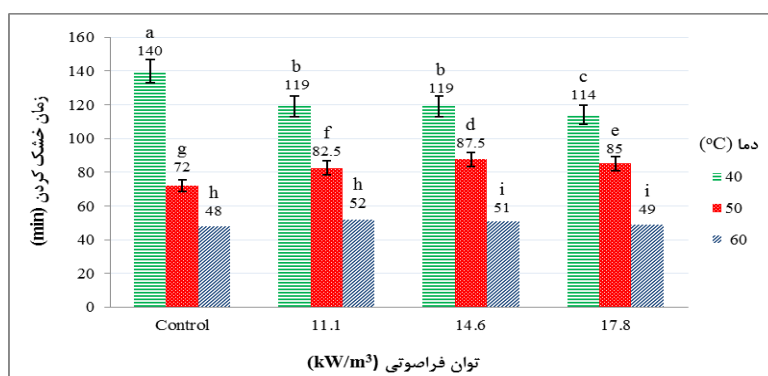
* در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار است.

ns: معنی دار نیست

بهترین حالت از لحاظ 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. فرکانس های فراصوت بخصوص فرکانس های بالاتر موجب از هم گسیختگی و ایجاد حفره هایی درون ساختار سلول ماده می شود. در واقع زمانی که امواج فراصوت با شدت بالا به طور مستقیم وارد محصول می شود در مسیر انتقال به قسمت جامد محصول مجموعه ای از انبساط ها و انقباض ها رقم می خورد (حالت اسفنجی زمانی رخ می دهد که فشردن و رها شدن به طور مکرر درون محصول اتفاق بیفتد) که نیروی های درگیر در این مکانیزم مکانیکی بیشتر از نوع کششی سطحی بوده و رطوبت درون لوله های موئین محصول موجب تشکیل کانال های میکروسکوپی شده که به خروج راحت تر رطوبت از داخل محصول کمک می کنند و



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 اند.



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 اند.

خصوصیات مکانیکی

جدول ۲ مربوط به تجزیه واریانس میانگین نیروی مقاومت فشاری نهایی در متغیرهای آزمایشی دمای هوای خشک کننده، توان فراصوتی و فرکانس های مختلف هر تیمار است. همانطور که جدول تجزیه آنالیز واریانس مشخص است اثر توان معنی دار نشده و اثرات دما و فرکانس هر کدام در سطح یک درصد معنی دار شده اند و در مورد اثرات متقابل چندگانه، فقط اثرات متقابل دما و فرکانس بر روی هم معنی دار شده است.

در تیمارهای شاهد با افزایش دمای خشک کردن، نکته ضروری است که هر چه فرکانس بالاتر باشد اثرات تخریبی ساختار درونی و فیزیولوژیکی محصول بیشتر خواهد شد و باعث کاهش کیفیت اولیه محصول می شود که نتیجه مطلوبی نیست، چون حفظ کیفیت محصول هم از لحاظ ظاهری و هم از لحاظ ساختار داخلی مورد توجه است (Karki, , Abdoli, 2016). پژوهش (Nowacka et al., 2009, Nowacka et al., 2012) نشان داد که استفاده از فراصوت بر روی میکروساختارهای میوه سیب در مدت زمان طولانی تر موجب تخریب بیشتر بر ساختار سیب خشک شده و موجب تغییر خواص جذب آب در مقایسه با نمونه شاهد شد (Nowacka et

al., 2012). در بررسی مقاومت فشاری در دمای ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس به دلیل اینکه اثر 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 و با وجود اینکه سعی شد از دانه های هم شکل و هم اندازه جهت تعیین خواص مکانیکی استفاده شود ولی مقاومت فشاری نمی تواند شاخص خوبی جهت تعیین خصوصیات مکانیکی دانه های ذرت باشد به این علت که مواد غذایی و بیولوژیکی دارای خاصیت ویسکوالاستیکی هستند که در اثر وارد شدن نیروی فشاری به آنها دارای رفتار غیرخطی شده و در هنگام شکستن و از هم گسیختن نمونه ها بر اثر نیروی فشاری، در بعضی از نمونه ها نقطه تسلیم^۱ و نقطه ای از هم گسیختن^۲ بر روی یکدیگر منطبق می شوند و از همدیگر قابل تمایز نبوده و نمی توان به طور دقیق نیروی لازم جهت از هم گسیختن آنها را تعیین کرد (ASABE, 2008a; Abdoli, 2016).

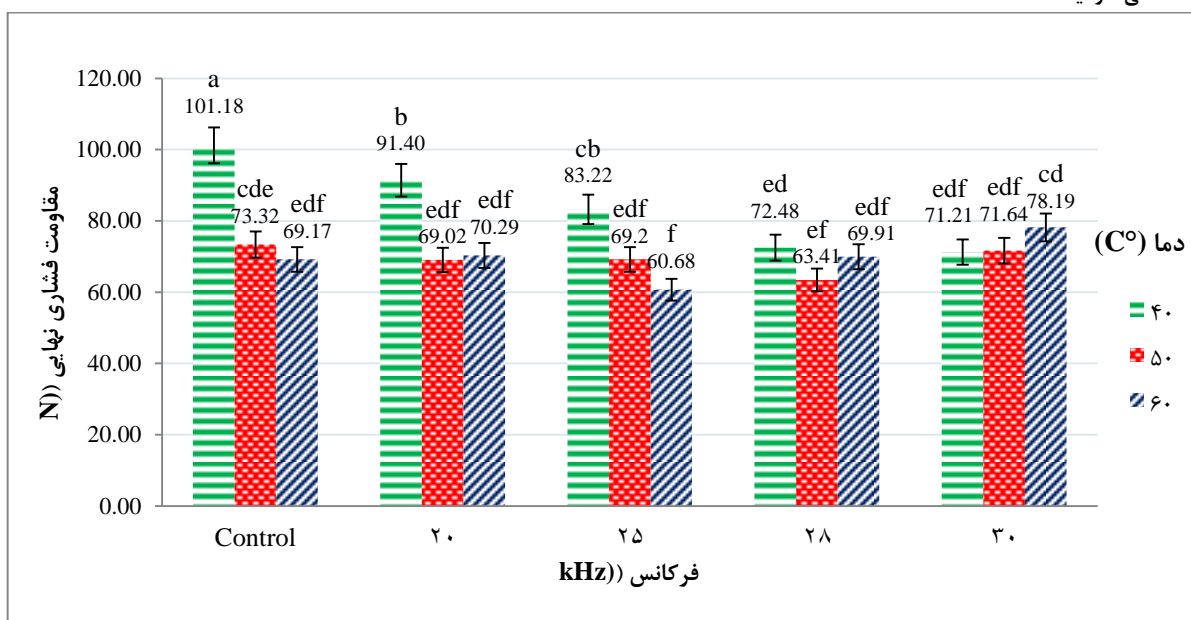
جدول ۲. تجزیه واریانس اثرات فاکتورهای آزمایشی بر روی مقاومت فشاری نهایی دانه های ذرت

F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منابع تغییرات
** ۱۷/۳۲	۴۵/۶۰۲۰	۸۹/۱۲۰۴۰	۲	دمای هوای ورودی
** ۸۱/۴	۴۱/۱۶۷۲	۲۳/۵۰۱۷	۳	فرکانس مبدل
ns ۰/۶۹	۵۸/۲۴۰	۱۶/۴۸۱	۲	توان مبدل
ns ۲۳/۱	۵۵/۴۲۶	۲۴/۱۷۰۶	۴	دمای هوای ورودی* توان مبدل
** ۷۷/۵	۴۵/۲۰۰۶	۷۰/۱۲۰۳۸	۶	دمای هوای ورودی* فرکانس مبدل
ns ۴۷/۰	۴۷/۱۶۴	۸۴/۹۸۶	۶	توان مبدل* فرکانس مبدل
ns ۴۱/۰	۲۰/۱۴۲	۴۰/۱۷۰۶	۱۲	دمای هوای ورودی* توان مبدل* فرکانس مبدل
	۶۹/۳۴۷	۷۰/۱۹۶۴۴۶	۵۶۵	خطای آزمایش

** در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار است.

* در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار است.

ns معنی دار نیست.



شکل ۶. مقایسه میانگین مقاومت فشاری نهایی 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 اند.

گسیختگی بافت‌های 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 موجب شده برای از هم گسیختن و شکستن محصول بر اثر نیروی فشاری نیروی کمتری نسبت به حالت عادی مورد نیاز باشد. تشکیل کانال میکروسکوپی اصولاً همراه با شکستن سلول های متراکم شده و با کاهش چسبندگی و اتصال بین سلولی همراه است (Gallant et al., 1972; Tarleton, 1992; Tarleton et al., 1998; De la Fuente-Blanco et al., 2006; Fernandes et al., 2009; Nowacka et al., 2012). با در نظر داشتن اینکه انرژی چقرمگی مجموع حاصل ضرب نیروهای فشاری در میزان جابجایی مربوطه (نفوذ) نمونه است، مجموع انرژی در واحد

جدول ۳ نتایج مربوط به تجزیه واریانس تعیین انرژی چقرمگی دانه های ذرت در سطوح مختلف دما، توان و فرکانس است که همان گونه در جدول مشخص است اثر جداگانه ی فرکانس و دما و اثرات دوگانه ناشی از دما و فرکانس در سطح ۱ درصد معنی دار شده است و در مورد تاثیر توان و اثرات ناشی از آن اثرات چندگانه معنی دار نشده است.

همانطور که در شکل (۷) مشاهده می شود، 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 به ترتیب کاهشی به میزان ۷۹/۶۶ و ۷۹/۲۳ درصد در چقرمگی مشاهده شد. اعمال فراصوت بخصوص در فرکانس‌های بالاتر موجب از هم

حجم کمتری برای از هم گسیختن کامل محصولی که حالت حفره حفره در آن ایجاد شده است، لازم است. به همین دلیل در فرکانس‌های بالاتر میزان انرژی چقرمگی کمتری در مقایسه

جدول ۳. تجزیه واریانس اثرات فاکتورهای آزمایشی بر روی تعیین نیروی چقرمگی دانه ذرت

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F
دمای هوای ورودی	۲	۰/۹۸	۰/۴۹	۱۵۹/۹۲**
فرکانس مبدل	۳	۰/۵۶	۰/۱۹	۶۰/۶۷**
توان مبدل	۲	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۰۸۹	ns
دمای هوای ورودی* توان مبدل	۴	۰/۰۲۲	۰/۰۰۵۶	ns
دمای هوای ورودی* فرکانس مبدل	۶	۱/۷۴	۰/۲۹	۹۴/۷۷**
توان مبدل* فرکانس مبدل	۶	۰/۰۲۵	۰/۰۰۴۱	ns
دمای هوای ورودی* توان مبدل* فرکانس مبدل	۱۲	۰/۰۵۵	۰/۰۰۴۶	ns
خطای آزمایش	۳۹۹	۱/۲۲	۰/۰۰۳۱	

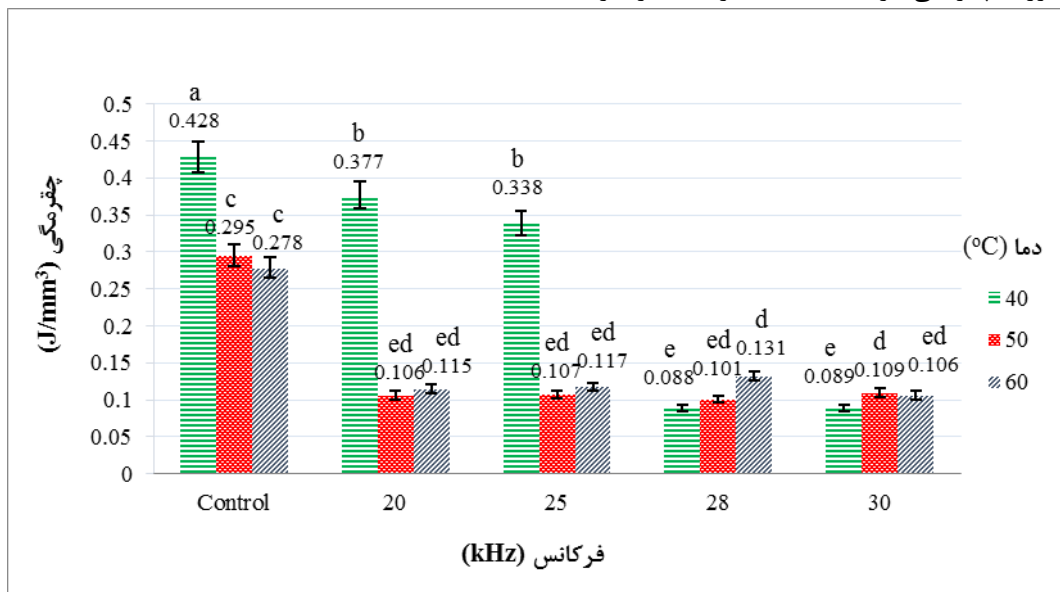
** در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار است.

* در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار است.

ns معنی دار نیست.

پی دارد. به طور کلی در بررسی خصوصیات مکانیکی دانه ذرت باید گفت چقرمگی شاخص مناسبی جهت تعیین انرژی لازم برای از هم گسیختن دانه می‌باشد زیرا مجموع نیروهایی که تا لحظه شکستن دانه به آن وارد می‌شود را به طور دقیق مشخص می‌کند (Abdoli, 2016).

در دماهای ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس، تیمارهای فراصوتی دارای اختلاف قابل ملاحظه‌ای با تیمار شاهد بودند که این مسئله نشان دهنده این است که علیرغم غالب بودن اثر دما و مانع شدن از ایجاد تمایز میان تیمارهای فراصوتی در این محدوده دمایی، وجود فراصوت در ساختار داخلی نمونه بی تاثیر نبوده و کاهش انرژی چقرمگی در مقایسه با تیمار شاهد را در



شکل ۷. 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 اند.

روند خشک کردن دانه های ذرت هر چه دمای هوای داخلی خشک کن و فرکانس پایین تر باشد، انرژی فراصوت تاثیر بیشتری

نتیجه گیری کلی

نتایج نشان داد در مقایسه دماها و فرکانس های موثر بر روی

نهایی محصول به عنوان غذای انسان یا خوراک دام و طیور بستگی دارد زیرا در تهیه خوراک دام هر چه مواد اسفنجی باشد انرژی کمتری صرف خرد و آسیاب کردن محصول صرف می شود که مطلوب است. از طرفی در بحث ذخیره سازی دانه سالم و یا انتقال مواد به سیلوها، کامیون ها و یا کشتی بارگیری دانه های مقاوم به شکستگی مطلوب ترند. بنابراین بحث تعیین تیمار بهینه از لحاظ کیفیت، بستگی به استفاده نهایی محصول دارد که بایستی مورد توجه قرار گیرد.

بر روی خشک کردن نمونه های ذرت دارد و موجب کاهش معنی داری در زمان خشک کردن می شود. علاوه بر این هر چه فرکانس بالاتر و دما پایین تر باشد مقاومت فشاری نهایی و چقرمگی کاهش می یابد که این امر به جهت ایجاد پدیده اسفنجی و تشکیل کانال های میکروسکوپی در محصول می باشد. انرژی چقرمگی در مقایسه با مقاومت فشاری نهایی می تواند پارامتر مناسب تری جهت مشخص کردن از هم گسیختگی و شکستن دانه ذرت باشد. ویژگی کیفی دانه ذرت به استفاده

REFERENCES

- Abdoli, B. (2016). *Evaluation of corn drying process in an Ultrasound-Assisted Fluidized Bed Dryer*. Published MS Thesis, Shiraz University, Shiraz. (In Farsi).
- ASABE, (2008a). S368.4: *Compression test of food materials of convex shape*. ASABE Standards. St. Joseph, MI.
- ASABE, (2008b). S352.2: *Moisture measurement-Unground grain and seeds*. ASABE Standards St. Joseph, MI.
- 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.
- Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W. & Hall, C. W. (1992). *Drying and storage of grains and oilseeds*. Springer Science & Business Media.
- Cárcel, J. A., Benedito, J., Rosselló, C. & Mulet, A. (2007a). 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. & Mulet, A. (2007b). Influence of high-intensity ultrasound on drying kinetics of persimmon. *Drying Technology*, 25(1), 185-193.
- Chen, Z. G., Guo, X. Y., & Wu, T. (2016). A novel dehydration technique for carrot slices implementing ultrasound and vacuum drying methods. *Ultrasonics sonochemistry*, 30, 28-34.
- De la Fuente-Blanco, S., De Sarabia, E. R. F., Acosta-Aparicio, V. M., Blanco-Blanco, A. & Gallego-Juárez, J. A. (2006). Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics*, 44, e523-e527.
- Dolatowski, Z. J., Stadnik, J. & Stasiak, D. (2007). Application of ultrasound in food technology. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 6(3), 88-99.
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics Division, www.faostat.fao.org, 2014 (accessed 5/8/2014).
- Fernandes, F. A., Gallão, M. I. & Rodrigues, S. (2009). Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. *Journal of Food Engineering*, 90(2), 186-190.
- Fernandes, F. A., & Rodrigues, S. (2007). Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. *Journal of Food Engineering*, 82(2), 261-267.
- Fernandes, F. A., Gallão, M. I., & Rodrigues, S. (2008). Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration. *LWT-Food Science and Technology*, 41(4), 604-610.
- Fernandes, F. A., & Rodrigues, S. (2008). Dehydration of sapota (*Achras sapota* L.) using ultrasound as pretreatment. *Drying Technology*, 26(10), 1232-1237.
- Fernandes, F. A., Gallão, M. I., & 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. & Guilbot, A. (1972). Microscopic effects of ultrasound on the structure of potato starch preliminary study. *Starch*, 24(4), 116-123.
- Gallego-Juárez, J. A., Riera, E., De la Fuente Blanco, S., Rodríguez-Corral, G., Acosta-Aparicio, V. M. & Blanco, A. (2007). Application of high-power ultrasound for dehydration of vegetables: processes and devices. *Drying Technology*, 25(11), 1893-1901.
- García-Noguera, J., Oliveira, F. I., Gallão, M. I., Weller, C. L., Rodrigues, S. & 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. & 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. & Mulet, A. (2009). Influence of the applied acoustic energy on the drying of carrots and lemon peel. *Drying Technology*, 27(2), 281-287.
- Jambrak, A. R., Mason, T. J., Paniwnyk, L., & Lelas, V. (2007). Accelerated drying of button mushrooms, Brussels sprouts and cauliflower by applying power ultrasound and its rehydration properties. *Journal of Food Engineering*, 81(1), 88-97.

- Jayaraman, K. S., & Das Gupta, D. K. (1992). Dehydration of fruits and vegetables-recent developments in principles and techniques. *Drying Technology*, 10(1), 1-50.
- Jones, D. F. (1924). The origin of flint and dent corn. *Journal of Heredity*, 15(10), 417-419.
- Szadzińska, J., Łechtańska, J., Kowalski, S. J., & Stasiak, M. (2017). The effect of high power airborne ultrasound and microwaves on convective drying effectiveness and quality of green pepper. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 531-539.
- Karki, B. (2009). Use of high-power ultrasound during soy protein production and study of its effect on functional properties of soy protein isolate. PhD. dissertation, Iowa State University, Ames.
- Lewicki, P. P., & Pawlak, G. (2003). Effect of drying on microstructure of plant tissue. *Drying Technology*, 21(4), 657-683.
- Mohsenin, N. N. (1970). Physical properties of plant and animal materials. Vol. 1. Structure, physical characteristics and mechanical properties. *Physical properties of plant and animal materials. Vol. 1. Structure, physical characteristics and mechanical properties.*, 1.
- Momenzadeh, L., Zomorodian, A. & 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.
- Mujumdar, A. S., & Menon, A. S. (1995). Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers. *Handbook of industrial drying*, 1, 1-39.
- Nowacka, M., Wiktor, A., Śledź, M., Jurek, N. & 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., & 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. (2014). Influence of high-intensity ultrasound on drying kinetics in fixed beds of high porosity. *Journal of Food Engineering*, 127, 93-102.
- Schössler, K., Jäger, H. & 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. & Mason, T. J. (1998). *Ultrasonics in Food Processing*. (pp. 193-218). Blackie Academic and Professional, Glasgow.
- Witrowa-Rajchert, D. & Rzaca, M. (2009). Effect of Drying Method on the Microstructure and Physical Properties of Dried Apples. *Drying Technology*, 27, 903-909.
- Wolf, M. J., Buzan, C. L., MacMASTERS, M. M., & Rist, C. E. (1952). Structure of the mature corn kernel. 1. Gross anatomy and structural relationships. *Cereal Chemistry*, 29(5), 321-333.
- Jafari, A., & Zare, D. (2016). Ultrasound-assisted Fluidized Bed Drying of Paddy: Energy Consumption and Rice Quality Aspects. *Drying Technology*, doi.org/10.1080/07373937.2016.1230742.
- Zare, D., Minaei, S., Zadeh, M. M. & Khoshtaghaza, M. H. (2006). Computer simulation of rough rice drying in a batch dryer. *Energy Conversion and Management*, 47(18), 3241-3254.
- Zare, D., Jayas, D. S., & Singh, C. B. (2012). A generalized dimensionless model for deep bed drying of paddy. *Drying Technology*, 30(1), 44-51.