

بهینه سازی مصرف انرژی در فرآیند خشک کردن سیب با استفاده از امواج مایکروویو

امین حاضروظیفه^۱، علی محمدنیکبخت^{۲*}، پرویز احمدی مقدم^۳

^۱ دانشجوی دکترای مکانیک ماشین های کشاورزی دانشگاه ارومیه

^۲ استادیار گروه مکانیک ماشین هتی کشاورزی دانشگاه ارومیه

^۳ استادیار گروه مکانیک ماشین های کشاورزی دانشگاه ارومیه

*نویسنده مسئول:

ارومیه - دانشگاه ارومیه - دانشکده کشاورزی - گروه مکانیک ماشین های کشاورزی

صندوق پستی: ۱۶۵ - تلفن: ۰۹۱۲۶۳۸۹۶۸۲

پست الکترونیکی: alinikbakht87@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۱/۱/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۲/۲/۱۳

چکیده

اهمیت بسیار زیاد سیب در ایران، ارزش افزوده قابل توجه آن پس از فرآوری و از طرفی بروز مشکلات تأمین انرژی جهت خشک کردن این محصول ارزشمند، باعث شده است تا در طی سالهای اخیر روش های متعددی برای کاهش زمان و انرژی مصرفی در زمینه فرآوری سیب پیشنهاد گردد. در این تحقیق مطالعه و بهینه سازی مصرف انرژی در یک خشک کن ترکیبی مایکروویو-جریان هوای گرم انجام شد. در این خشک کن برای تولید امواج مایکروویو از یک لامپ مگنترون با توان نامی ۱/۳kW و فرکانس ۲/۴۵GHz استفاده گردید. به منظور تولید جریان هوای گرم از ۶ گرم کن ۷۰۰W به همراه دمنده ای با دور ۱۷۵۰ دور بر دقیقه استفاده شد. ارزیابی سیستم خشک-کردن برش های سیب با معیارهای زمان و میزان کل انرژی مصرفی در طول فرآیند خشک شدن در مقابل تغییرات توان مایکروویو (۵۰۰W، ۱۰۰۰W، ۱۵۰۰W و ۲۰۰۰W)، دمای هوا (۴۰°C، ۵۰°C، ۶۰°C و ۷۰°C) و سرعت هوای ورودی (۰/۵m s⁻¹، ۱m s⁻¹، ۱/۵m s⁻¹ و ۲m s⁻¹) در سه روش خشک کردن جریان هوای گرم، مایکروویو و ترکیب مایکروویو-جریان هوای گرم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین زمان انجام فرآیند در روش جریان هوای گرم با دمای هوای ۴۰°C و سرعت هوای ۰/۵m s⁻¹ بوده و کمترین زمان صرف شده نیز در روش ترکیبی با توان مایکروویو ۲۰۰۰W و دمای هوای ۷۰°C و سرعت هوای ۲m s⁻¹ مشاهده می شود. همچنین بیشترین میزان مصرف انرژی در روش جریان هوای گرم با دمای هوای ۴۰°C و سرعت هوای ۲m s⁻¹ و کمترین میزان مصرف انرژی در روش مایکروویو با توان ۲۰۰۰W رخ داد.

واژگان کلیدی: خشک کردن، سیب، مایکروویو، مصرف انرژی.

فهرست نمادها

Nomenclature

انرژی مصرفی دمنده (ژول)	Consumed energy of blower (J)
انرژی مصرفی گرم کن ها (ژول)	Consumed energy of heaters (J)
انرژی کل مصرفی برای تولید جریان هوای گرم (ژول)	Total consumed energy for producing hot air flow (J)
انرژی کل مصرفی برای تولید امواج مایکروویو (ژول)	Total consumed energy for producing microwave radiation (J)
انرژی کل مصرفی برای تولید همزمان مایکروویو و جریان هوای گرم (ژول)	Total consumed energy for Simultaneous producing hot air flow and microwave radiation (J)
توان نامی دمنده (وات)	Blower nominal power (W)
توان نامی گرم کن (وات)	Heater nominal power (W)
کل زمان کارکرد گرم کن (ثانیه)	Total heater working time (s)

مقدمه

بالای موجود در محصول، سبب رشد و فعالیت میکروارگانیسم-ها و ایجاد واکنش های شیمیایی نامطلوب شده و ماندگاری آنها را کاهش می دهد. خشک کردن یکی از شاخص ترین و قدیمی-

یکی از راه کارهای مؤثر در کاهش ضایعات محصولات کشاورزی و جلوگیری از فساد آنها در مرحله پس از برداشت، کاهش میزان رطوبت محصول تا حد مطلوب می باشد. رطوبت

(1999). جریان هوای گرم در حذف آب آزاد موجود در سطح یا نزدیکی‌های سطح محصول نسبتاً موثر است و سیستم مایکروویو نیز تأثیر مهمی در حذف آب آزاد درون محصول دارد و آب درونی را بر اثر افزایش فشار به طرف سطح محصول هدایت می‌کند. بنابراین ترکیب مناسب این دو سیستم می‌تواند عمل خشک کردن را بهبود ببخشد (Andreset al., 2004).

در تحقیقی دو گونه میوه زالک¹ قرمز و زرد با استفاده از جریان هوای گرم در ۲ سطح دمایی ۶۰°C و ۷۰°C و سرعت هوای ۰/۲۵ m s⁻¹ خشک گردیدند. نتایج نشان داد که درجه حرارت بطور مؤثری زمان خشک کردن و انرژی مصرفی را تحت تأثیر قرار می‌دهد به طوری که حداقل انرژی مصرفی برای زالک قرمز و زرد در درجه حرارت ۷۰°C مشاهده شد و برابر با ۴۲/۸۰ kWhkg⁻¹ و ۲۷/۶۸ kWhkg⁻¹ به ترتیب برای زالک قرمز و زرد بدست آمد (Koyuncuet al., 2007). در تحقیق ذکر شده سرعت هوای ورودی برای هر دو درجه حرارت ثابت گرفته شده است. در حالی که سرعت هوای ورودی نیز می‌تواند میزان انرژی مصرفی را در طول فرآیند خشک کردن تغییر دهد. بنابراین با سرعت‌های مختلف هوای ورودی در کنار تغییرات دمای هوا می‌توان به حداقل میزان انرژی مصرفی در طول فرآیند دست یافت.

در تحقیقی دیگر از سه روش خورشیدی، آون در سطوح دمایی ۵۰°C، ۶۰°C و ۷۰°C و مایکروویو در توان‌های ۷۰۰W و ۲۱۰W به طور مجزا برای خشک کردن تکه‌های پیاز استفاده شد و نتایج نشان داد که خشک کردن با مایکروویو نسبت به روش‌های دیگر زمان کمتری نیاز دارد و بیشترین ضریب نفوذ رطوبت در خشک کردن به طریق مایکروویو حاصل می‌شود (Arslan & Özcan, 2010). یکی از ویژگی‌های استفاده از انرژی مایکروویو، قابلیت ترکیب چند روش خشک کردن باهم است. بطور مثال می‌توان از جریان هوای گرم به همراه مایکروویو استفاده کرد. دو سیستم مایکروویو و جریان هوای گرم با توجه به ویژگی‌هایشان در خشک کردن محصولات کشاورزی، مکمل یکدیگر می‌باشند و فرآیند خشک شدن را بهبود می‌بخشند. لذا تحقیقاتی نیز در زمینه آبدایی از محصولات به روش ترکیبی مایکروویو-جریان هوای گرم انجام گرفته است (Sharma et al., 2009).

خشک کردن کدوتنیل با سه روش مایکروویو، جریان هوای گرم و روش ترکیبی مایکروویو-جریان هوای گرم در پژوهشی مورد مطالعه قرار گرفت و مشاهده شد که مناسب‌ترین روش برای خشک کردن این محصول با در نظر گرفتن زمان، انرژی

ترین روش‌های فرآوری و نگهداری محصولات کشاورزی است که با کاهش میزان رطوبت محصول، سبب تقلیل در سرعت فعل و انفعالات شیمیایی از قبیل قهوه‌ای شدن و اکسیداسیون شده و مدت ماندگاری محصولات را افزایش می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان مواد غذایی را با اطمینان و با عمر انبارمانی بالا ذخیره کرده و یا جهت صادرات، در عین به حداقل رساندن ضایعات، انتقال داد (Goksuet al., 2005).

معمول‌ترین نوع خشک‌کن‌های صنعتی، خشک‌کن جریان هوای گرم می‌باشد که در آنها هوای گرم پس از تماس با محصول باعث تبخیر رطوبت و خشک شدن محصول می‌گردد. البته این نوع خشک‌کن‌ها به دلیل ماهیت انتقال انرژی، سبب ایجاد سوختگی سطحی، تغییرات فیزیکوشیمیایی و چروکیدگی بالا در محصول می‌شوند. علاوه بر آن، مدت زمان خشک کردن و انرژی مصرفی در این نوع خشک‌کن‌ها بالا است (Das et al., 2004). امروزه برای حل مشکلات ذکر شده و همچنین افزایش راندمان انرژی، همراه با صرف زمان کمتر، از تکنولوژی‌های مدرن‌تر برای خشک کردن محصولات کشاورزی استفاده می‌شود. یکی از روش‌های نوین برای خشک کردن محصولات کشاورزی که در دهه اخیر عملاً توجه زیادی به آن شده است، استفاده از امواج مایکروویو برای خشک کردن محصولات کشاورزی می‌باشد. مایکروویو یک موج الکترومغناطیس (ترکیب میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی) با فرکانسی در محدوده ۳۰۰MHz تا ۳۰۰۰۰MHz است که به ترتیب دارای طول موجی در محدوده ۱m تا ۱mm می‌باشد. این امواج قادرند با تغییر قطبیت مولکول‌ها (در حدود پنج میلیارد بار در ثانیه)، در مواد دو قطبی همچون آب ایجاد گرما نمایند (cheng, 2011). امروزه مایکروویو به یک منبع جذاب انرژی حرارتی در فرآیند خشک کردن تبدیل شده است، چرا که زمان خشک شدن در استفاده از این روش بسیار کاهش یافته و در نتیجه میزان انرژی مصرفی در طول فرآیند به طور چشم گیری کاهش می‌یابد. از طرف دیگر سیستم مایکروویو بدلیل تمرکز انرژی، فقط ۲۰ تا ۳۵ درصد نسبت به سایر روش‌های خشک کردن نیاز به فضا دارد (Maskan, 2000). علیرغم مزایای ذکر شده در استفاده از مایکروویو در فرآیند خشک کردن، این روش می‌تواند بسته به خواص حرارتی و دی‌الکتریک محصول، باعث گرمادهی غیریکنواخت شود (Abbasi souraki & mowla, 2008).

همچنین بدلیل سرعت بالای انتقال جرم در این روش، دفع رطوبت خارج شده از محصول مشکل بوده و سبب ایجاد میعان بخار در داخل محفظه می‌گردد. برای فایق آمدن بر مشکلات ذکر شده می‌توان از ترکیب مایکروویو با جریان هوای گرم، اعمال پالسی مایکروویو و همچنین روش ترکیبی مایکروویو - خلاء در فرآیند خشک کردن استفاده کرد (Gunasekaran,

¹Azarole

یک دیمر استفاده شد که با تغییر جریان برق ورودی به دمنده، دور آن را متناسب با سطوح سرعت هوای لازم در این تحقیق (0.5 m s^{-1} ، 1 m s^{-1} ، 1.5 m s^{-1} و 2 m s^{-1})، تنظیم می نماید. به منظور کالیبره کردن سرعت هوای ورودی با دیمر از یک بادسنج مدل (TSI velocimeter, USA) استفاده گردید. برای گرم کردن هوای ورودی در مسیر جریان هوا از ۶ المنت حرارتی 700 W استفاده شد. کنترل دمای هوای ورودی توسط یک حسگر دما (Model PT100)، ترموستات و کنتاکتور انجام می گردید. بدین ترتیب که پس از اندازه گیری دما توسط حسگر و ارسال سیگنال به ترموستات، سیگنال قطع و وصل جریان برق ورودی گرم کن ها به کنتاکتور فرستاده می شد به طوری که در صورت افزایش دمای هوای ورودی، جریان برق به گرم کن ها قطع و در صورت کاهش دما، جریان برق به گرم کن ها وصل می شد (گرم کن ها بصورت سه تایی فعال و غیر فعال می گردند).

در خشک کن مورد نظر از یک لامپ مگنترون با توان نامی $1/3 \text{ kW}$ و فرکانس $2/45 \text{ GHz}$ برای تولید امواج مایکروویو استفاده شده است. لامپ مگنترون که در واقع به عنوان شتاب دهنده به الکترون ها عمل می کند، توسط یک مدار ولتاژ بالا^۲ تغذیه می شود. مدار طراحی شده شامل یک ترانسفورماتور با بهره ۱۰ و همچنین یک مدار سلفی-خازنی با بهره ۲ می باشد که برق 220 V شهری بعد از عبور از ترانسفورماتور و مدار سلفی-خازنی تقریباً به 4500 V که ولتاژ آستانه لامپ مگنترون است، افزایش می یابد. در این مدار برای تشعشع پالسی امواج مایکروویو توسط لامپ مگنترون از یک دیود ولتاژ بالا نیز استفاده شده است. بدلیل گرمای ایجاد شده در زمان

کارکرد لامپ مگنترون از یک دمنده جهت خنک کردن لامپ استفاده شد. همچنین به دلیل استفاده از جریان هوای گرم در این خشک کن و نزدیکی مدار ولتاژ بالا به محفظه محصول که جریان هوای گرم از آن عبور می کند، یک دمنده دیگر نیز برای خنک کردن مدار مورد استفاده قرار گرفت. به منظور کنترل توان اعمالی امواج مایکروویو توسط لامپ مگنترون و مدت زمان کارکرد آن از یک تابلوی کنترل کننده مولد مایکروویو استفاده شده است که بر روی درب بدنه دستگاه نصب گردید.

به منظور اندازه گیری میزان انرژی مصرفی برای تولید امواج مایکروویو در طول فرآیند خشک کردن، جریان برق ورودی به مدار تغذیه لامپ مگنترون ابتدا از یک انرژی سنج عبور داده

مصرفی و تغییرات رنگ، روش ترکیبی مایکروویو-جریان هوای-گرم می باشد (Alibas, 2007).

ترکیب مایکروویو-جریان هوای گرم در سه سطح توانی 210 W ، 300 W و 560 W و در سه سطح دمایی 160°C ، 180°C و 200°C برای خشک کردن سویا بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که خشک کن ترکیبی مایکروویو-جریان هوای گرم، زمان خشک کردن را نسبت به خشک کن جریان هوای گرم چهار برابر و نسبت به استفاده از خشک کن مایکروویو دو برابر کاهش می دهد و مطلوب ترین شرایط خشک کردن در درجه حرارت 160°C و توان 210 W مشاهده شد (Gowenat *al.*, 2008).

هدف از انجام این تحقیق بررسی زمان صرف شده و میزان انرژی مصرفی در سه روش خشک کردن جریان هوای گرم، مایکروویو و ترکیب مایکروویو-جریان هوای گرم می باشد که با متغیر گرفتن سه فاکتور تأثیرگذار دما، سرعت هوا و توان مایکروویو بیشترین و کمترین میزان انرژی مصرفی در تیمارهای مختلف در هر سه روش خشک کردن مشخص گردیده است.

مواد و روش ها

در این تحقیق برای بهره گرفتن از روش های نوین خشک-کردن و فراوری محصولات کشاورزی از یک دستگاه خشک کن ترکیبی مایکروویو-جریان هوای گرم استفاده شد. خشک کن ساخته شده دارای سه کارکرد جداگانه می باشد و می تواند محصولات را تا رطوبت مورد نظر تحت شرایط کنترل شده خشک نماید (شکل ۱).



شکل ۱- نمایی از خشک کن ساخته شده
Fig1-A view of the manufactured dryer

برای تولید جریان هوا از یک دمنده با موتور 70 W و دور بیشینه 1750 rpm استفاده گردید. جهت کنترل دور دمنده از

^۲High voltage

برای انجام آزمایشات، ابتدا پوست گیری از سیب‌های خارج شده از سردخانه که به شرایط دمایی محیط رسیده بودند، انجام شده و سپس توسط اسلایسر برش‌های سیب به صورت استوانه‌ای به ضخامت 4mm تهیه می‌شدند و هسته و قسمت‌های مرکزی سیب تخلیه می‌شدند. نمونه‌های 175 گرمی که توسط نیروسنج خود دستگاه توزین می‌شدند، بر روی سینی محصول بصورت متقارن قرار می‌گرفتند (شکل ۲).



شکل ۲- نمایی از قرار گرفتن برش‌های سیب بر روی سینی
Fig 2-apple slices laid down on the drying tray

از قرار دادن نمونه‌ها در وسط سینی خودداری می‌شد. وقتی محصول در وسط سینی قرار می‌گیرد به دلیل آنکه شعاع چرخش آن کم و یا صفر می‌باشد تحت تشعشع دائم امواج مایکروویو قرار گرفته و منجر به سوختگی‌های سطحی بر روی سطح میوه می‌گردد
آزمایشات در 84 تیمار به سه روش جریان هوای گرم، مایکروویو و ترکیب مایکروویو-جریان هوای گرم، مطابق جدول (1) در محیطی با دمای 25°C و رطوبت نسبی 50٪ در آزمایشگاه تحقیقات انرژی دانشگاه ارومیه انجام گرفت. در طول فرآیند، جرم نمونه‌ها در فواصل زمانی 10 ثانیه توسط نیروسنج اندازه‌گیری و در رایانه ثبت می‌شد. عملیات خشک‌شدن تا زمانی ادامه داشت که رطوبت نمونه‌ها به 20٪ بر پایه تر می-رسید. بیشترین بازارپسندی و رضایت مشتری در این مقدار رطوبت حاصل می‌گردد که توسط تست پانل و ارزیابی توسط یک نمونه آماری مورد تأیید می‌باشد.

می‌شد و سپس وارد مدار تغذیه می‌گردید. بر روی صفحه نمایش این انرژی‌سنج، ولتاژ، جریان‌عبوری، انرژی لحظه‌ای و انرژی کل مصرفی توسط مدار راه انداز لامپ مگنترون، نمایش داده می‌شد.

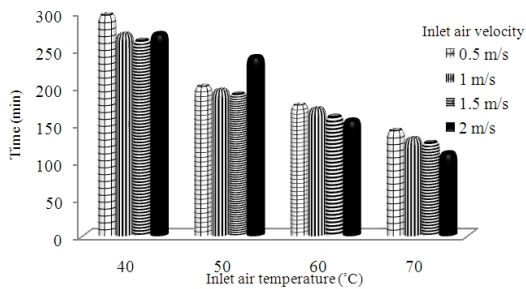
محفظه محصول متناسب با نوع لامپ مگنترون مورد استفاده در خشک‌کن، به صورت مکعب مستطیل در ابعاد 38x35x22cm طراحی شد. جریان هوای گرم توسط کانال هادی که به کف محفظه محصول منتهی می‌شود به داخل آن هدایت می‌گردد. در داخل این محفظه، سینی محصول قرار دارد که به منظور عبور جریان هوای گرم از روی محصول به صورت مشبک ساخته شده است. در این خشک‌کن با استفاده از یک نیروسنج خمشی (Sewhacnm, AB120, Korea) با دقت 1gr مقدار جرم محصول به صورت آنلاین در طول جریان خشک‌شدن اندازه‌گیری می‌شود و داده‌های اندازه‌گیری شده بر روی یک نمایشگر (Cammos Model) نمایش داده می‌شوند. این نمایشگر با اتصال به رایانه، داده‌های دریافتی را در آن ثبت و ضبط می‌کند. سینی محصول که داخل فضای محفظه محصول بصورت معلق قرار دارد، توسط رابطی که از سوراخ بالای محفظه عبور می‌کند به نیروسنج آویزان شده است. یکی از ویژگی‌های ذاتی موج مایکروویو، پخش غیر یکنواخت آن در داخل محفظه خشک‌کن می‌باشد. برای رفع این مشکل از یک موتور دور آرام (Kangbo Model) برای گرداندن سینی محصول استفاده گردید.

برای ارزیابی هر سه کارکرد جداگانه خشک‌کن ساخته شده (هوای گرم، مایکروویو، ترکیب مایکروویو-جریان هوای گرم) و بررسی دقت عملکرد اجزای سازنده دستگاه، از میوه سیب رقم گلدن دلشز برای خشک‌کردن استفاده شد. برای تعیین رطوبت اولیه، ابتدا نمونه‌ها از سردخانه خارج شدند و مدتی به آنها اجازه داده شد تا به شرایط دمایی محیط برسند. سپس نمونه‌های 175 گرمی در 4 تکرار در داخل آون فن‌دار خلأیی با دمای 70°C به مدت 16 ساعت قرار داده شدند و در نهایت رطوبت اولیه بر پایه تر محاسبه گردید و 74/7٪ بدست آمد (AOAC, 1995).

جدول 1- روش‌های خشک کردن با تیمارهای مختلف

Table 1-drying methods with different treatments

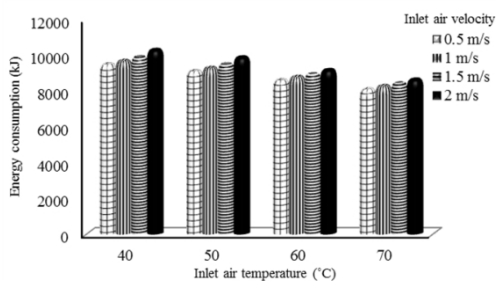
توان امواج مایکروویو (وات) Microwave power (W)	سرعت هوا ورودی (متر بر ثانیه) Inlet air velocity (ms ⁻¹)	دمای هوای ورودی (درجه سانتیگراد) Inlet air temperature (°C)	روش خشک کردن Drying method
-	0.5	40	جریان هوای گرم Hot air flow
-	1	50	
-	1.5	60	
-	2	70	
500	-	-	مایکروویو Microwave
1000	-	-	
1500	-	-	
2000	-	-	
500	0.5	40	ترکیب مایکروویو-جریان Combined microwave-hot air flow
1000	1	50	
1500	1.5	60	
2000	2	70	



شکل ۳- زمان انجام فرآیند در خشک کردن به روش جریان هوای گرم در دما و سرعت های مختلف

Fig 3- Drying time in hot air flow drying method at different air velocities and temperatures.

نتایج نشان داد که در یک دمای ثابت با افزایش سرعت هوا، زمان خشک کردن کاهش پیدا می کند. این پدیده به این دلیل است که با افزایش سرعت جریان هوا فشار بخار محیط کاهش یافته و رطوبت محصول برای خروج از آن با مقاومت کمتری مواجه می شود. در نتیجه رطوبت با سرعت بیشتری از محصول خارج می گردد. البته این پدیده در سرعت هوای بالاتر (2 m s^{-1}) که دمای هوای ورودی پایین می باشد (40°C) و 50°C) به علت خنک شدن سطح محصول توسط جریان هوا و کاهش گرادیان حرارتی، اثر عکس داشته و سبب افزایش زمان فرآیند می شود (شکل ۴). این نتیجه منطبق با یافته های ونگ و چاو (۲۰۰۲)، راماسوامی و نینوجزن (۲۰۰۲)، ساکیلیک و الیسین (۲۰۰۶) برای میوه سیب می باشد.



شکل ۴- انرژی مصرفی در طول فرآیند خشک کردن برش های سیب به روش جریان هوای گرم در سرعت و دماهای مختلف

Fig 4 – Energy consumption in hot air flow drying process at different air velocities and temperatures

افزایش دما در سرعت هوای ثابت، میزان انرژی مصرفی کل را در طول فرآیند خشک شدن کاهش می دهد. زیرا با افزایش دما، زمان خشک شدن کاهش یافته و تأثیر کاهش زمان خشک شدن بر کاهش میزان انرژی مصرفی، بیشتر از تأثیر افزایش دما بر افزایش میزان انرژی مصرفی می باشد. نتایج مشابهی را آغباشلو (۲۰۰۸) برای زرشک گزارش کرده است.

از آنجا که هوای تولید شده توسط دمنده، پس از برخورد به گرم کن ها وارد محفظه محصول می شود. افزایش سرعت

میزان انرژی مصرفی در طول فرآیند خشک شدن محصول در هر سه آزمایش در مقابل تغییرات توان مایکروویو، دما و سرعت هوای ورودی مورد مطالعه قرار گرفت. در آزمایش مربوط به مایکروویو، مقدار انرژی مورد نیاز برای تولید امواج مایکروویو توسط لامپ مگنترون و مدار تغذیه آن، از طریق عدد نشان داده شده بر روی نمایشگر انرژی سنج مشخص می شد. در آزمایش مربوط به جریان هوای گرم، انرژی مصرفی به منظور تولید جریان هوای گرم از توان نامی دمنده و گرم کن ها، مدت زمان کارکرد آنها و با استفاده از روابط (۱، ۲ و ۳) محاسبه گردید. در روش ترکیبی نیز به دلیل استفاده همزمان از جریان هوای گرم و تشعشع امواج مایکروویو، مجموع انرژی های صرف شده برای تولید آنها در طول فرآیند به عنوان انرژی کل مصرفی در نظر گرفته می شد (معادله ۴). در پایان، میزان انرژی مصرفی در هر یک از آزمایش ها با تیمارهای مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت.

$$E^1 = W^1 \times t^1 \quad (1)$$

$$E^2 = W^2 \times t^2 \quad (2)$$

$$E^{T1} = E^1 + E^2 \quad (3)$$

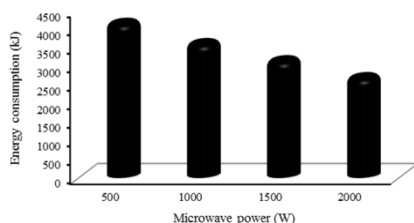
$$E^{T3} = E^{T1} + E^{T2} \quad (4)$$

نتایج و بحث

نتایج حاصل از این تحقیق در سه بخش جداگانه و بصورت زیر ارائه می شود.

آزمایش اول (جریان هوای گرم)

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که در خشک کردن برش های سیب به روش جریان هوای گرم، افزایش دمای هوای ورودی تأثیر چشمگیری بر کاهش زمان خشک شدن دارد (شکل ۳)، زیرا با افزایش دما، گرادیان حرارتی داخل محصول افزایش یافته و در نتیجه سرعت تبخیر رطوبت محصول افزایش می یابد. به عنوان مثال با افزایش دمای هوا از 40°C به 70°C در سرعت هوای ثابت 0.5 m s^{-1} زمان خشک شدن از 296 min به 141 min و در سرعت هوای ثابت 2 m s^{-1} ، زمان خشک شدن از 271 min به 111 min کاهش پیدا کرده است (شکل ۳). نتایج مشابهی کویونشو و همکاران (۲۰۰۷) برای میوه گیلاس و پرابهانجان و همکاران (۱۹۹۵) برای هویج گزارش کرده اند.



شکل ۶: انرژی مصرفی در طول فرآیند خشک کردن برش‌های سیب به روش مایکروویو در توان‌های مختلف
Fig 6 –Energy consumption in microwave drying method at different microwave powers

آزمایش سوم (ترکیبی مایکروویو- جریان هوای گرم)

نتایج حاصل از آزمایش ترکیبی نشان از تأثیر چشم‌گیر توان مایکروویو بر زمان خشک کردن دارد، به طوری که با افزایش توان مایکروویو، زمان خشک شدن به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. علت این پدیده در آن است که گرادیان حرارتی برش‌های سیب در توان‌های بالاتر مایکروویو، بیشتر بوده و در نتیجه زمان خشک شدن کاهش می‌یابد. گون و همکاران (۲۰۰۸) در تحقیقی به نتایج مشابهی دست یافته‌اند. با توجه به نمودار شکل ۸ در سرعت هوای ثابت 0.5 m s^{-1} و در دماهای مختلف 40°C ، 50°C ، 60°C و 70°C با افزایش توان مایکروویو از 500 W تا 2000 W ، زمان خشک شدن به ترتیب 73 min ، 67 min ، 50 min و 43 min کاهش یافته است. در بررسی تأثیر دما بر زمان خشک کردن مشخص گردید که افزایش دمای هوای ورودی در فرآیند خشک کردن به روش ترکیبی، بدلیل افزایش گرادیان حرارتی و تسریع در خروج رطوبت از محصول، سبب کاهش زمان خشک کردن می‌گردد (شکل ۷). این موضوع به این دلیل است که حرارت جریان هوای گرم، به طریق رسانش، به لایه‌های درونی محصول نفوذ می‌کند و بدلیل هدایت گرمایی پایین آن، تأثیر افزایش دما، کاهش می‌یابد. این در حالی است که با تشعشع امواج مایکروویو، انتقال حرارت به روش تابشی صورت می‌گیرد و امواج با نفوذ به درون محصول، جذب مولکول‌های آب شده و آن‌ها را به جنبش وای می‌دارند. نظریه کنتراس و همکاران (۲۰۰۸) این نتیجه را تأیید می‌نمایند.

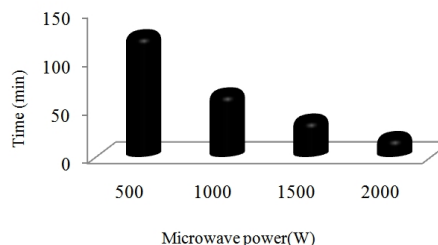
نتایج نشان داد که افزایش سرعت هوای ورودی در هر یک از آزمایشات با توان مایکروویو 500 W ، 1000 W ، 1500 W و 2000 W با ثابت بودن دمای هوا، به دلیل کاهش فشار بخار محفظه محصول، سبب کاهش زمان فرآیند شده است. این در حالی است که در دماهای پایین جریان هوای ورودی (40°C)، 50°C)، با تجاوز سرعت هوا از 1.5 m s^{-1} ، زمان خشک شدن برش‌های سیب به دلیل خشک شدن سطح محصول و کاهش

هوای ورودی سبب خنک شدن گرم‌کن‌ها می‌گردد. بنابراین برای تأمین دمای مورد نظر، گرم‌کن‌ها باید مدت زمان زیادتری روشن باشند تا بتوانند عمل خنک‌سازی هوا را جبران کنند. لذا در دمای ثابت با افزایش سرعت جریان هوا میزان انرژی مصرفی افزایش می‌یابد. افزایش سرعت هوای ورودی به دلیل کاهش فشار بخار محفظه محصول سبب کاهش زمان فرآیند می‌شود، ولی تأثیر این میزان کاهش در زمان فرآیند بر کاهش مصرف انرژی از تأثیر افزایش زمان کارکرد گرم‌کن‌ها بر افزایش انرژی مصرفی، کمتر است که در نهایت میزان کل انرژی مصرفی افزایش می‌یابد. در دماهای پایین (40°C ، 50°C) نیز چون در سرعت هوای بالا (2 m s^{-1})، افزایش در زمان فرآیند مشاهده می‌شود، میزان افزایش در مصرف انرژی بیشتر است، چون در این سطح از سرعت هوا هم عمل خنک‌سازی محصول بر میزان مصرف انرژی دخیل است که سبب افزایش زمان انجام فرآیند می‌شود. لازم به ذکر است که افزایش در میزان انرژی مصرفی دمنده بر اثر افزایش دور آن به هنگام افزایش سرعت هوای ورودی، ناچیز بوده و قابل اغماض می‌باشد (شکل ۴).

آزمایش دوم (مایکروویو)

نتایج نشان داد که افزایش توان مایکروویو تأثیر چشم‌گیری بر کاهش زمان خشک کردن محصول دارد (شکل ۵). زیرا گرادیان حرارتی محصول در توان‌های بالاتر بیشتر می‌باشد که این امر سبب تسریع در فرآیند خشک شدن می‌شود. به طوری که زمان خشک شدن در هر یک از توان‌های 500 W ، 1000 W ، 1500 W و 2000 W به ترتیب برابر با 125 min ، 52 min ، 36 min و 20 min می‌باشد. (شکل ۵)

با افزایش توان مایکروویو، انرژی مصرفی لامپ مگنترون در واحد زمان برای تولید امواج با توان بالا افزایش می‌یابد. ولی چون در این حالت رطوبت موجود در محصول، امواجی با توان بالا را جذب می‌کند گرادیان حرارتی محصول افزایش یافته و در نتیجه زمان فرآیند کاهش می‌یابد (شکل ۶).



شکل ۵: زمان انجام فرآیند در خشک کردن به روش مایکروویو در توان‌های مختلف

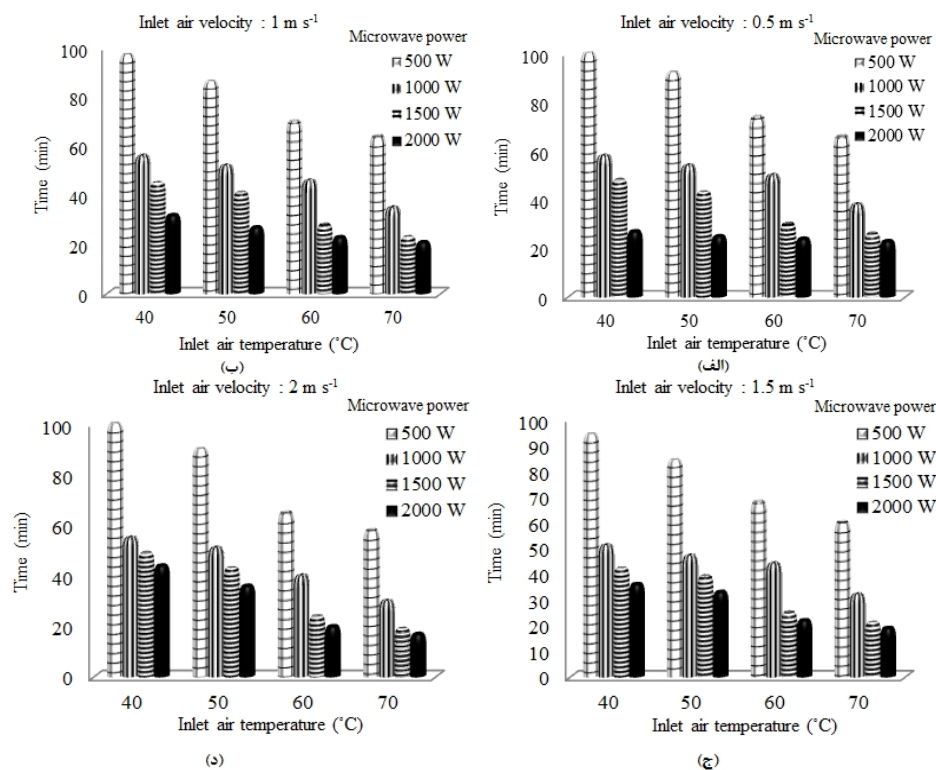
Fig 5 -Drying time in microwave drying method at different microwave powers

در طی آزمایشات تأثیر افزایش سرعت هوا بر افزایش مصرف انرژی در دماهای پایین هوای ورودی (40°C تا 50°C) و در سرعت هوای 2 m s^{-1} ، پر رنگ تر ملاحظه گردید. زیرا در این سطح از سرعت هوا با دمای پایین، علاوه بر عمل خنک سازی گرم کن ها، عمل خنک سازی محصول نیز توسط جریان هوا وجود دارد که کاهش گرادیان حرارتی محصول، سبب افزایش زمان خشک شدن می شود (شکل ۸).

پس از اتمام آزمایش ها، از طریق داده های بدست آمده در طول فرآیند، زمان صرف شده و میزان انرژی مصرفی در هر سه روش خشک کردن با تیمارهای مختلف باهم مقایسه گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که زمان انجام فرآیند در خشک کردن به روش ترکیبی مایکروویو-جریان هوای گرم، از زمان خشک شدن به دو روش جریان هوای گرم و روش مایکروویو در همان ترکیب های توان، دما و سرعت جریان هوا کوتاه تر است و فرآیند با سرعت بیشتری انجام می پذیرد. این موضوع به این دلیل است که در روش ترکیبی مایکروویو-جریان هوای گرم، به طور همزمان انتقال حرارت به صورت جابجایی و تابشی صورت می گیرد، در صورتی که در روش جریان هوای گرم، انتقال حرارت به صورت جابجایی و در روش مایکروویو انتقال حرارت به صورت تابشی انجام می پذیرد.

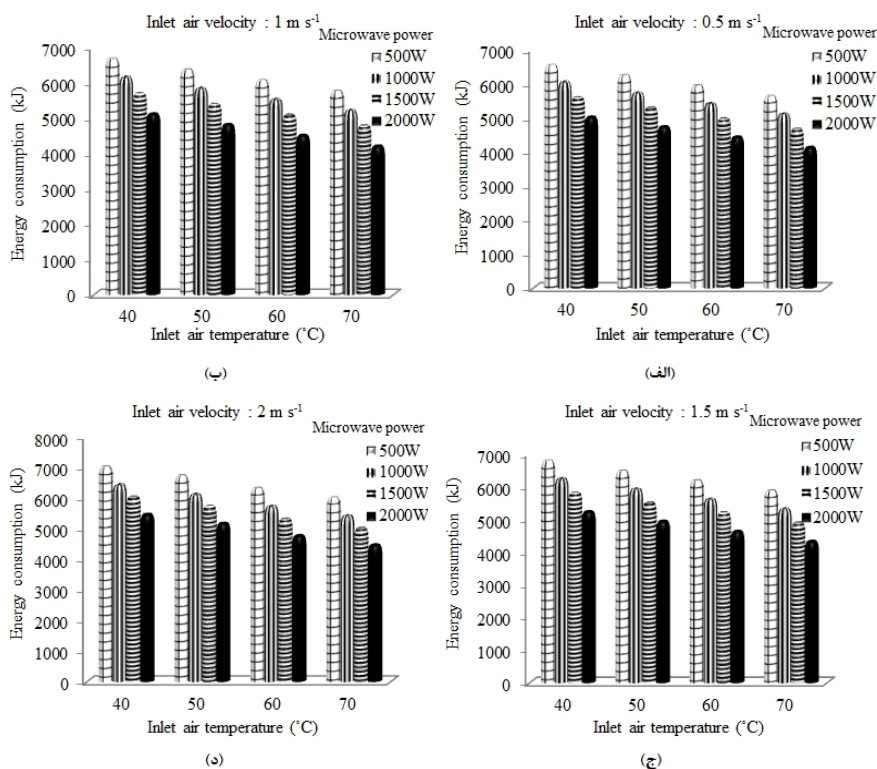
گرادیان حرارتی افزایش یافته است. این نتایج مشابه یافته های پیرا و همکاران (۲۰۰۷) می باشد.

در روش ترکیبی از آنجا که جریانی هوای گرم و امواج مایکروویو برای خشک کردن محصول به صورت همزمان استفاده می گردد، ویژگی های هر کدام از این روش های جداگانه در روش ترکیبی، دخیل می باشند. به این دلیل در روش ترکیبی نیز با توجه به شکل ۸ مشاهده می گردد که افزایش توان مایکروویو به دلیل کاهش زمان فرآیند، سبب کاهش میزان انرژی مصرفی می شود. همچنین افزایش دمای هوای ورودی نیز با تسریع در تبخیر رطوبت محصول و در نتیجه کاهش زمان خشک شدن باعث کاهش در مصرف انرژی می گردد، که البته به دلیل تفاوت ماهویدر مکانیسم انتقال حرارت توسط جریان هوای گرم با مایکروویو که قبلاً نیز ذکر گردید، تأثیر افزایش توان مایکروویو در کاهش انرژی مصرفی خشک کردن بیشتر است. رابطه توان مایکروویو و دمای هوا با میزان مصرف انرژی در تمامی آزمایشات بصورت معکوس مشاهده شد. این در حالی است که سرعت هوای ورودی با انرژی مصرفی در طول فرآیند رابطه مستقیم دارد و با افزایش سرعت هوای ورودی بدلیل عمل خنک سازی گرم کن ها و در نتیجه افزایش مدت کارکرد آن ها، میزان انرژی مصرفی افزایش می یابد.



شکل ۷: زمان انجام فرآیند در خشک کردن به روش ترکیبی مایکروویو- جریان هوای گرم

Fig 7 -Drying time in combined microwave- hot air flow drying method



شکل ۸- انرژی مصرفی در طول فرآیند خشک کردن برش های سیب به روش ترکیبی مایکروویو- جریان هوای گرم
 Fig 8 -Energy consumption in combined microwave- hot air flow drying method

اما در روش مایکروویو، به دلیل جذب امواج توسط رطوبت موجود در محصول و ارتعاش مولکول های آب، گرما در کل بافت محصول تولید می شود و مشکلات مربوط به هدایت گرمایی و خشک شدن لایه سطحی تا حدود زیادی کم رنگ شده و زمان خشک شدن کاهش می یابد. (جدول ۲)

همانطور که از جدول ۲ ملاحظه می گردد، کمترین زمان انجام فرآیند مربوط به روش ترکیبی می باشد که برابر است با ۱۷min. در روش ترکیبی مایکروویو- جریان هوای گرم، با هر ترکیبی از دما و سرعت هوای ورودی در توان ۲۰۰۰W، زمان فرآیند نسبت به روش مایکروویوی در همان توان افزایش یافته است.

در مقایسه روش های مایکروویو و جریان هوای گرم نیز مشخص گردید که زمان خشک شدن به روش ترکیبی مایکروویو کوتاه تر است. دلیل این پدیده در آن است که در روش جریان هوای گرم، پس از گرم شدن سطح محصول با انتقال حرارت به روش جابجایی، زمان مورد نیاز برای گرم کردن کل جرم محصول به روش رسانایی، طولانی می باشد و از طرف دیگر، چون ابتدا لایه خارجی محصول خشک می گردد، با بسته شدن منافذ موجود در سطح محصول پدیده سخت شدگی رخ می دهد. و در این صورت، لایه سخت شده، مانعی در مقابل پخش رطوبت در سطح محصول ایجاد می کند و خروج رطوبت را از محصول طولانی می نماید.

جدول ۲- بیشترین و کمترین زمان انجام فرآیند در هر سه روش خشک کردن

Table 2 -Maximum and minimum drying time in each drying method

بیشترین زمان انجام فرآیند (دقیقه) Maximum drying time (min)	کمترین زمان انجام فرآیند (دقیقه) Minimum drying time (min)	روش خشک کردن Drying method
271	111	جریان هوای گرم Hot air flow]
126	20	مایکروویو Microwave
100	17	ترکیب مایکروویو - جریان هوای گرم Combined microwave- hot air flow

جریان هوای گرم در آزمون تست پانل بهتر از دو روش دیگر اثبات شد (شکل ۹). علت این پدیده را می توان به خشک شدگی بیش از حد سطح محصول به دلیل مکانیسم انتقال حرارت در روش جریان هوای گرم نسبت داد. سوختگی سطحی، چروکیدگی زیاد و پدیده سخت شدگی از عواقب این پدیده می باشد که منجر به کاهش کیفیت محصول و طولانی بودن زمان خشک شدن و نیز قهوه ای شدن محصول و کاهش چشم گیری در حجم محصول خشک شده خواهد شد. مهمترین دلیل افزایش کیفیت محصول خشک شده در روش مایکروویو نسبت به روش جریان هوای گرم، کاهش چشم گیر زمان فرآیند است، همچنین مکانیسم انتقال حرارت (درون به سطح) باعث عدم خشک شدن سطح محصول شده و همواره لایه ای از رطوبت در طول فرآیند در سطح محصول وجود خواهد داشت. این مهمترین عامل کاهش میزان چروکیدگی در روش مایکروویو می باشد (Knoerzer *et al.*, 2008).

لازم به یادآوری است که امواج مایکروویو باعث جنبش مولکول های آب و ایجاد حرارت می شوند و به سبب چگالش رطوبت در سطح محصول، سوختگی سطحی و تغییرات فیزیکیوشیمیایی ناشی از آن به طور معمول مشاهده می گردد. این مشکل در روش ترکیبی به دلیل وجود جریان هوا و تبخیر قسمتی از رطوبت چگالش شده در سطح محصول مرتفع می گردد. بنابراین کیفیت محصول خشک شده توسط روش ترکیب جریان هوای گرم و تابش دهی مایکروویو افزایش می یابد.

علت این موضوع را می توان در آن دانست که در این سطح از توان مایکروویو، دمای محصول تا حد زیادی افزایش می یابد و در صورت استفاده از جریان هوا عمل خنک کنندگی رخ داده و دمای محصول کاهش می یابد و در نتیجه زمان انجام فرآیند افزایش می یابد. از بین آزمایشات انجام شده به روش ترکیبی در توان 2000 W ، زمان انجام فرآیند تنها در دمای هوای 70°C و سرعت های هوای $1/5\text{ m s}^{-1}$ و 2 m s^{-1} ، نسبت به زمان خشک شدن به روش مایکروویو در همان توان کاهش یافته است.

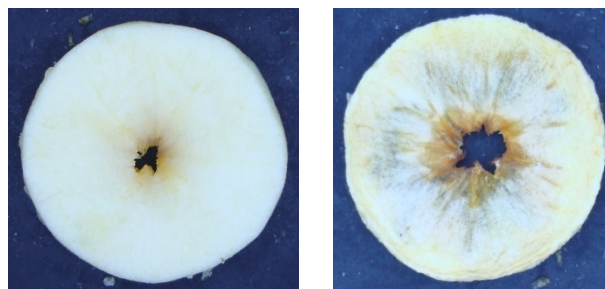
کمترین میزان مصرف انرژی در بین سه روش جریان هوای گرم، مایکروویو و ترکیب مایکروویو-جریان هوای گرم، در روش مایکروویو مشاهده گردید و انرژی مصرف شده در طول فرآیند خشک کردن محصول با جریان هوای گرم نیز بیشتر از روش ترکیبی می باشد. دلیل این موضوع در آن است که زمان مورد نیاز برای خشک کردن محصول تا رطوبت مطلوب با استفاده از جریان هوای گرم بسیار بیشتر از دو روش دیگر یعنی مایکروویو و ترکیبی است. در روش ترکیبی نیز به دلیل آنکه میزان انرژی مصرفی از مجموع انرژی صرف شده برای تولید جریان هوای گرم و امواج مایکروویو محاسبه می گردد، انرژی مصرف شده در طول فرآیند بیشتر از روش مایکروویو می باشد. (جدول ۳)

کیفیت محصول خشک شده از جمله میزان چروکیدگی، تغییر حجم و تغییر رنگ تحت تأثیر شرایط آزمایش قرار دارد به طوری که از بین سه روش ذکر شده برای خشک کردن، کیفیت سیب های خشک شده به روش ترکیبی مایکروویو-

جدول ۳- بیشترین و کمترین میزان مصرف انرژی در هر سه روش خشک کردن

Table 3 –Maximum and minimum energy consumption in each drying method

بیشترین میزان انرژی مصرفی (کیلو ژول) Maximum energy consumption(kJ)	کمترین میزان مصرف انرژی (کیلو ژول) Minimum energy consumption(kJ)	روش خشک کردن Drying method
10263.2	8059.2	جریان هوای گرم Hot air flow
4148	2684	مایکروویو Microwave
7005	4118	ترکیب مایکروویو- جریان هوای گرم Combined microwave- hot air flow



شکل ۹: تصویری از برش سیب قبل و بعد از خشک شدن به روش ترکیبی مایکروویو-جریان هوای گرم
Fig 9 - Apple slice before and after drying with combined microwave- hot air flow method

نتیجه گیری

مایکروویو زمان انجام فرآیند نسبت به روش جریان هوای گرم به شدت کاهش می یابد بنابراین میزان انرژی مصرفی در طول فرآیند نیز کاهش پیدا خواهد کرد همچنین در این روش تنها از تولید امواج مایکروویو برای فرآیند خشک کردن بهره گرفته می شود که طبیعتاً انرژی مصرفی نسبت به روش ترکیبی که از تولید همزمان جریان هوای گرم و مایکروویو در طول فرآیند خشک کردن بهره می گیرد کمتر خواهد بود. بنابراین حداقل میزان انرژی مصرفی در روش مایکروویو مشاهده گردید که برابر با ۴۱۱۸ kJ بود.

زمان صرف شده برای خشک کردن برش های سیب به روش جریان هوای گرم به طور قابل ملاحظه ای بیشتر از روش مایکروویو و روش مایکروویو بیشتر از روش ترکیبی مایکروویو-جریان هوای گرم می باشد. بیشترین زمان انجام فرآیند در روش جریان هوای گرم با ۲۷۱min و کمترین زمان انجام فرآیند در روش ترکیبی با ۱۷min مشاهده گردید. بیشترین میزان انرژی مصرفی در روش جریان هوای گرم به دلیل طولانی بودن زمان انجام فرآیند رخ داد که برابر با ۱۲۶۳/۲kJ بود. در روش

منابع

1. Abbasi Souraki, B. and Mowla, D. 2008. Experimental and theoretical investigation of drying behavior of garlic in an inert medium fluidized bed assisted by microwave. **Journal of Food Engineering**. 88: 438–449.
2. Aghbashlo, M., Kianmehr, M. and Samimi-Akhijahani, H. 2008. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (Berberidaceae). **Energy Conversion and Management**. 49: 2865-2871.
3. Alibas, I. 2007. Microwave, air and combined microwave–air-drying parameters of pumpkin slices. **LWT, Food Science and Technology**. 40: 1445–1451.
4. Andres, A., Bilbao, C. and Fito, P. 2004. Drying kinetics of apple cylinders under combined hot air–microwave dehydration. **Journal of Food Engineering**. 63: 71–78.
5. AOAC. 1995. Official methods of analysis, Arlington, VA: **Association of Official Analytical Chemists**.
6. Arslan, D. and Özcan, M. M. 2010. Study the effect of sun, oven and microwave drying on quality of onion slices. **LWT - Food Science and Technology**. 43: 1121-1127.
7. Cheng, D. 2011. Electromagnetic Field and Wave. Translated by Parviz Jobbedare Marallani; Mohammad Ghavami. **Publication of Tehran University**, Iran. (In Farsi)
8. Contreras, C., Mart´n-Esparza, M. E., Chiralt, A. and Mart´nez-Navarrete, N. 2008. Influence of microwave application on convective drying: Effects on drying kinetics, and optical and mechanical properties of apple and strawberry. **Journal of Food Engineering**. 88: 55–64.
9. Das, I., Das, S. K. and Bal, S. 2004. Specific energy and quality aspects of infrared (IR) dried parboiled rice. **Journal of Food Engineering**. 68: 249-255.
10. Goksu, E. I., Sumnu, G. and Esin, A. 2005. Effect of microwave on fluidized bed drying of macaroni beads. **Journal of Food Engineering**. 66: 463–468.

11. Gowen, A. A., Ghannam, N. A., Frias, J. and Oliveira, J. 2008. Modeling dehydration and rehydration of cooked soybeans subjected to combined microwave-hot-air drying. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**. 9: 129–137.
12. Gunasekaran, S. 1999. Pulsed microwave-vacuum drying of food materials. **Drying Technology**. 17(3): 395-412.
13. Knoerzer, K., Regier, M. and Schubert, H. 2008. A computational model for calculating temperature distributions in microwave food applications. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**. 9: 374–384.
14. Koyuncu, T., Pinar, Y. and Lule, F. 2007. Convective drying characteristics of azarole red (*Crataegus monogyna* Jacq.) and yellow (*Crataegus aronia* Bosc.) fruits. **Journal of Food Engineering**. 78: 1471–1475.
15. Koyuncu, T., Tosun, I. and Yunus, P. 2007. Drying characteristics and heat energy requirement of cornelian cherry fruits (*Cornus mas* L.). **Journal of Food Engineering**. 78: 735–739.
16. Maskan, M. 2000. Microwave/air and microwave finish drying of banana. **Journal of food Engineering**. 44: 71-78.
17. Pereira, N. R., Marsaioli, J. A. and Ahrne, L. M. 2007. Effect of microwave power, air velocity and temperature on the final drying of osmotically dehydrated bananas. **Journal of Food Engineering**. 81: 79–87.
18. Prabhanjan, D. G., Ramaswamy, H. S. and Raghavan, G. S. V. 1995. Microwave assisted convective air drying of thin layer carrots. **Journal of Food Engineering**. 25: 283–293.
19. Ramaswamy, H. S. and van Nieuwenhuijzen, N. H. 2002. Evaluation and modeling of two-stage osmo-convective drying of apple slices. **Drying Technology**. 20(3): 651–667.
20. Sacilik, K. and Elicin, A. K. 2006. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. **Journal of Food Engineering**. 73: 281–289.
21. Sharma, G. P., Prasad, S. and Chahara, V. K. 2009. Moisture transport in garlic cloves undergoing microwave-convective drying. **Food and bioproducts processing**. 87: 11–16.
22. Wang, J. and Chao, Y. 2002. Drying characteristics of irradiated apple slices. **Journal of Food Engineering**. 52(1): 83–88.

OPTIMIZATION OF ENERGY CONSUMPTION IN APPLE DRYING PROCESS USING MICROWAVE RADIATION

Amin Hazervazifeh¹, Ali Mohammad Nikbakht*², Parviz Ahmadi Moghaddam³

1- Phd student in Mechanics of Agricultural Machinery, Urmia University, Iran.

2- Assistant Professor of Mechanics of Agricultural Machinery Department of Urmia University.Iran

3- Assistant Professor of Mechanics of Agricultural Machinery Department of Urmia University.Iran

Alinikbakht87@yahoo.com

Abstract

The great Importance of apple fruit in Iran, it's significant added value after processing and energy supply challenges for drying have been the leading factors for energy and time saving research approaches in apple processing. In this research, a microwave-hot airflow dryer was designed, fabricated and was evaluated as the goal to optimize energy consumption in apple drying. A Magnetron lamp with nominal power 1.3 W and frequency of 2.45 GHz was used to generate microwave radiation. Furthermore, six heaters of 700 W power were used along with a 1750 rpm fan to produce hot air flow. Evaluation of the dryer was investigated at the setups of hot airflow, microwave and the integration of microwave and hot airflow. During the process, drying time and energy consumption at different microwave power levels (500W, 1000W, 1500W and 2000W), temperature (40°C, 50°C, 60°C and 70°C) and inlet air velocity (0.5 ms⁻¹, 1 ms⁻¹, 1.5ms⁻¹ and 2ms⁻¹) at each method were studied and compared with each other. The results showed that the maximum and minimum time of process was observed respectively in hot air flow method with 40°C temperature and 0.5 ms⁻¹ air velocity and combination method with 2000 W microwave power, 70°C temperature and 2 m s⁻¹ air velocity. Also the maximum and minimum consumed energy occurred respectively in hot air flow method with 40°C temperature and 2 m s⁻¹ air velocity and in microwave method with 2000 W power.

Keywords: Apple, Drying, Energy consumption, Microwave.