Archive of SID

مقایسه پارامترهای خشک شدن و خصوصیات کیفی شلتوک طارم هاشمی با استفاده از مایکروویو جریان مداوم و مایکروویو خانگی

داود کلانتری[1]*، حسن جعفری[2]

1. استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
2. دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

(تاریخ دریافت: **95/3/29**، تاریخ پذیرش: **95/6/8**)

چکیده

خشک‌کردن شلتوک یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین مراحل پس از برداشت برنج برای ممانعت از رشد میکربی و قارچ‌ها است که باعث افزایش انبارمانی محصول می‌شود. در این تحقیق فرایند خشک‌کردن شلتوک طارم هاشمی در یک خشک‌کن مایکروویو جریان مداوم و یک خشک‌کن مایکروویو خانگی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان داد که با افزایش ضخامت لایه از 6 تا 18 میلی‌متر و افزایش سطح توان از 10 تا 30 درصد، به‌طور متوسط کسر رطوبتی کاهش و درصد شکستگی دانه‌ها افزایش پیدا می‌کند. هم‌چنین کسر رطوبتی در خشک‌کن مایکروویو خانگی نسبت به خشک‌کن مایکروویو جریان مداوم به‌جز در سطح توان 10 درصد در بقیه توان‌ها کم‌تر می‌باشد، در حالی‌که درصد دانه‌های شکسته شده در کلیه سطوح توان و لایه‌های خشک‌کردن در مایکروویو خانگی نسبت به مایکروویو جریان مداوم بیش‌تر بود. نتایج به‌دست آمده نشان داد که ضریب پخش رطوبتی در سطح توان 10 درصد در مایکروویو جریان مداوم نسبت به مایکروویو خانگی بیش‌تر و در سطح توان 50 درصد کم‌تر می‌باشد. در نهایت استفاده از خشک‌کن مایکروویو خانگی برای خشک‌کردن شلتوک به‌دلیل درصد زیاد شکستگی دانه‌ها توصیه نمی‌شود. اما استفاده از خشک‌کن جریان مداوم با سطح توان پایین (10 درصد) و در مقیاس بزرگ با توجه به کاهش سریع رطوبت و پایین بودن درصد شکست توجیه پذیر است.

واژه‌های کلیدی: خشک‌کن مایکروویو، سطح توان مایکروویو، شلتوک، کسر رطوبتی، درصد شکستگی.

* نویسنده مسئول: dkalantari2000@yahoo.com

www.SID.ir

Archive of SID

1- مقدمه

برنج از جمله محصولاتی است که بسته به رقم و رطوبت نسبی محیط، با رطوبت 25 تا 28 درصد بر پایه تر برداشت می‌شود که به منظور افزایش قابلیت نگه‌داری و یا امکان تبدیل آن به برنج سفید، باید رطوبت آن به زیر 13 درصد کاهش داده شود[4-1]. برای جدا کردن غلاف دانه از هسته باید مقدار رطوبت برنج تا حد مناسبی کاهش یابد. اما چنان‌چه درصد رطوبت شالی در حین خشک‌کردن بیش از حد مجاز کاهش پیدا کند، دانه‌های شلتوک در زمان پوست‌کنی و سفیدکنی بسیار شکننده خواهند بود که این امر موجب افزایش میزان درصد شکستگی دانه‌ها می‌شود [5]. به‌جز فرایند خشک‌کردن شلتوک، پوست کنی، سفید کردن و درجه بندی نیز دارای اهمیت است که از میان آن‌ها یکی از مهم‌ترین مشکلات موجود در این فرایندها، ترک خوردگی و شکست دانه می‌باشد[6]. طبق تحقیقات انجام شده، عمده شکست‌های ایجاد شده در دانه برنج بعد از مرحله خشک شدن و طی فرایند تبدیل، ایجاد می‌شوند و شکست برنج می‌تواند بلافاصله بعد از خشک کردن نیز اتفاق افتد[7].

در سال‌های اخیر به‌منظور بر طرف کردن مشکلات ناشی از هدایت حرارتی پایین در محصولات غذایی و رسیدن به فرایند موثر و سریع انتقال حرارت، استفاده از مایکروویو برای خشک‌کردن مواد غذایی توسعه یافته است[8]. در فرایند خشک‌کردن با استفاده از مایکروویو به‌دلیل تمرکز بهتر انرژی بر روی محصول در حال خشک شدن خروج رطوبت سریع‌تر بوده و فقط 20 تا 35٪ نسبت به سایر روش‌های خشک‌کردن به فضا نیاز دارد [9]. زمان خشک‌کردن با استفاده از امواج مایکروویو می‌تواند تا 50٪ یا بیش‌تر کاهش پیدا کند، البته این امر بستگی به نوع محصول و شرایط خشک‌کردن دارد [13-10]. در خشک‌کن‌های مایکروویو، تابش امواج مایکروویو برای خشک‌کردن محصولات مورد استفاده قرار می‌گیرد. مایکروویو یک موج الکترومغناطیس با فرکانسی در محدوده 300 تا 300000 مگاهرتز و طول موجی بین 1 میلی‌متر تا 1متر می‌باشد [14]. در حین عبور امواج مایکروویو از داخل بافت‌های ماده بیولوژیک، مولکول‌های قطبی مانند آب و نمک به ارتعاش در آمده و در اثر اصطکاک بین مولکول‌های مرتعش، ایجاد گرما می‌شود[9]. مزیت استفاده از امواج مایکروویو به‌جای روش‌های انتقال حرارت همرفتی مرسوم برای خشک‌کردن و گرم‌کردن محصولات غذایی این است که در استفاده از امواج مایکروویو و در صورت مدیریت مناسب امواج دهی، گرما به‌طور یکنواخت در کل بافت‌های ماده بیولوژیک تولید می‌شود ولی در روش‌های گرم کردن مرسوم، انتقال حرارت از سطح بیرونی محصول به سمت داخل صورت گرفته و همین گرادیان حرارتی ایجاد شده بین بافت‌های مختلف محصول در صورت زیادتر بودن از حد مجاز، ممکن است باعث ایجاد تنش و ترک در محصولات تردی مانند شلتوک گردد. از طرف دیگر در خشک‌کن‌های صنعتی به روش مایکروویو، انتقال انرژی به دیواره خشک‌کن، نوار نقاله و سایر اجزاء حداقل بوده، لذا بیش‌تر انرژی اعمال شده از طرف مگنترون‌های خشک‌کن مایکروویو به‌صورت حرارت در محصول تبدیل می‌شود. این امر به‌خاطر پایین بودن ثابت دی‌الکتریک اجزاء خشک‌کن مایکروویو می‌باشد. آلیباس [15]، چینکاچورن [5]، درویشی و همکاران [16]، کارسلان و تانسر [17] و متولی و همکاران [18]، مطالعاتی را در زمینه رفتار محصولات کشاورزی با استفاده از خشک‌کن‌های مایکروویو انجام داده‌اند. نتایج حاصل از این تحقیقات نشان داده است که با افزایش سطح توان مایکروویو، رطوبت محصولات با سرعت بیش‌تری کاهش پیدا می‌کند. هم‌چنین مطالعات ایشان نشان داده است که کاهش رطوبت محصول با گذشت زمان با شیب کم‌تری پیش می‌رود. در همین راستا، بویو و همکاران [19] کاسیم و همکاران [20]، مسکن [21]، یانگ ساوادیکول و گوناسکاران [22] مطالعاتی را در زمینه استفاده از امواج مایکروویو در خشک‌کردن محصولات زراعی انجام داده‌اند. در اکثر موارد فوق، فرایند خشک شدن در بستر ثابت، بستر سیال و ترکیب مایکروویو و هوای داغ مورد مطالعه قرار گرفته است.

در همین راستا حاضر وظیفه و همکاران [23] خشک‌کن ترکیبی مایکروویو-جریان هوای گرمی را طراحی، ساخت و ارزیابی کردند که از یک مگنترون با فرکانس 2450 مگاهرتز و توان نامی 1/3 کیلو وات جهت تولید امواج مایکروویو و از 6 المنت حرارتی 700 وات به همراه فن 1750 دور در دقیقه برای ایجاد جریان هوای گرم استفاده شد. نتایج تحقیق آن‌ها

www.SID.ir

Archive of SID

نشان داد که با افزایش توان مایکروویو و افزایش دمای جریان هوا، رطوبت با سرعت بیش‌تری کاهش پیدا می‌کند. قلی خانی و همکاران [24] خشک‌کن هیبریدی مایکروویو-هوای داغ مجهز به سامانه تصویربرداری بر خط را ساخته و ارزیابی کردند. برای ارزیابی دستگاه، سامانه را با ترکیب همزمان هوای داغ و اشعه مایکروویو در سه سطح سرعت هوای 1، 1/5 و 2 متربرثانیه و سه سطح دمای 40، 60 و 80 درجه سلسیوس و سه سطح توان تابشی 200، 400 و 600 وات ارزیابی کردند. سانگدو و همکاران [25] خشک‌کن مایکروویو بستر سیال جریان مداومی را برای خشک‌کردن شلتوک ارائه کردند که نسبت به روش‌های معمول خشک‌کردن با جریان هوای داغ و خشک‌کردن با مایکروویوهای خانگی دارای ظرفیت خشک‌کردن بالاتری بود. آن‌ها در این سیستم شکاف‌هایی عمودی بر یک مخزن استوانه‌ای متحدالمرکزی ایجاد کردند که توسط موج‌برهایی عمود بر این مخزن استوانه‌ای تحریک می‌شد. آن‌ها نشان دادند که سیستم طراحی شده با مصرف انرژی 5/2 کیلوژول، توانایی کاهش رطوبت شلتوک از 24 به 14٪ بر پایه تر را دارد. ظرفیت سیستم ساخته شده 3/1 کیلوگرم بر ساعت بود. جیندارات و همکاران [26] خشک‌کن مایکروویو جریان مداوم ترکیب شده با جریان هوای گرم را طراحی و ساختند. آن‌ها در این تحقیق انرژی مصرفی را در فرایند خشک‌کردن با استفاده از بستر متخلخل غیرجاذب رطوبت مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از تلفیق 12 عدد مگنترون با توان 800 وات و هوای گرمی با حداکثر دمای 240 درجه سلسیوس که با استفاده از 24 المنت الکتریکی تولید می‌شدند، استفاده کردند. در این تحقیق، آن‌ها تاثیر زمان خشک‌کردن، دمای هوای داغ، ساختار متخلخل (نوع بستر) و موقعیت‌های مگنترون بر روی سینتیک خشک‌کردن و مصرف انرژی را به صورت دقیق مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که سینتیک خشک‌کردن و مصرف انرژی به ساختار متخلخل بستر، دمای هوای گرم و موقعیت مگنترون‌ها بستگی دارد. نکته قابل توجه در مورد تحقیقات ذکر شده فوق این است که در همه آن‌ها از تغییر جزئی در ساختمان یک مایکروویو خانگی استفاده شده است، شرایطی که تابش امواج مایکروویو بر روی شلتوک مستقیم و یکنواخت نیست. موردی که در تحقیق حاضر مورد توجه قرار گرفته و تاثیر نحوه امواج دهی مستقیم از طریق خشک‌کن مایکروویو جریان مداوم (نیمه صنعتی) و امواج دهی غیرمستقیم از طریق خشک‌کن مایکروویو خانگی به محصول ترد و شکننده‌ای مانند شلتوک مورد بررسی قرار گرفته است.

لذا با توجه به اهمیت به‌کارگیری روش‌های نوین در مرحله خشک‌کردن شلتوک و مد نظر قرار دادن کاهش ضایعات، در کار تحقیقاتی حاضر به بررسی پارامترهای خشک شدن و خصوصیات کیفی شلتوک رقم طارم هاشمی با استفاده از خشک‌کن مایکروویو جریان مداوم و مایکروویو خانگی پرداخته شده است. در این مقاله سینتیک کاهش رطوبت محصول و درصد شکست محصول توسط خشک‌کن مایکروویو جریان مداوم با نتایج به‌دست آمده از خشک‌کن مایکروویو خانگی مقایسه و مورد ارزیابی قرار گرفته است.

2-مواد و روش‌ها

در این تحقیق از شلتوک رقم طارم هاشمی استفاده گردید که یکی از ارقام رایج برای کشت در شمال ایران می‌باشد. در ابتدای آزمایش محتوای رطوبتی شلتوک‌های مورد آزمون تعیین گردیده، سپس مبادرت به خشک‌کردن نمونه‌هایی به وزن 30 گرم در هر یک از خشک‌کن‌های مایکروویو خانگی و جریان مداوم شد.

2-1- تعیین محتوای رطوبتی

برای تعیین میزان محتوای رطوبتی شلتوک، نمونه‌های 50 گرمی شلتوک به مدت 24 ساعت در آون آزمایشگاهی با دمای 103 درجه سلسیوس قرار داده شد. رطوبت اولیه نمونه‌ها به روش وزنی بر اساس استاندارد ASAE، شماره S352.1 تعیین گردید [27]. میانگین محتوای رطوبتی طارم هاشمی در بررسی خشک‌کن مایکروویو خانگی و خشک‌کن مایکروویو جریان مداوم به ترتیب برابر با 24/5 و 25/46٪ بر پایه تر تعیین گردید.

$$MC = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه M_1 وزن اولیه نمونه (کیلوگرم)، M_2 وزن نهایی نمونه (کیلوگرم) می‌باشد. برای توزین نمونه‌های شلتوک از

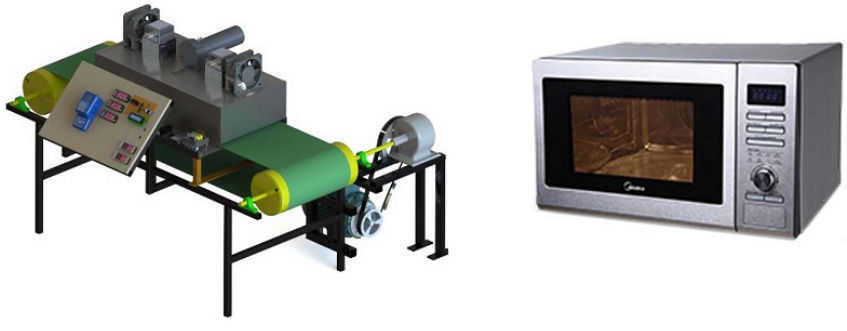
www.SID.ir

Archive of SID

ترازوی دیجیتال (مدل Jadever-Sky600, Korea) با دقت 0/01 گرم استفاده شد.

2-2- خشک‌کردن شلتوک

به‌منظور خشک‌کردن نمونه‌های شلتوک از دستگاه خشک‌کن مایکروویو خانگی (مدل Media, MW-F304ADY-W، ساخت کشور چین) و خشک‌کن مایکروویو جریان مداوم (ساخته شده در گروه مکانیک بیوسیستم) استفاده شد (شکل1). ابعاد داخلی محفظه خشک‌کن مایکروویو جریان مداوم حاضر 600×150×300 میلی‌متر و ابعاد داخلی مایکروویو خانگی، 520×467×335 میلی‌متر می‌باشد. دامنه تغییرات سطوح توان مایکروویو جریان مداوم ساخته شده دارای 10 سطح (از 10 تا 100 درصد با گام 10 درصد) و دامنه تغییرات سطوح توان در مایکروویو خانگی دارای پنج سطح (10، 30، 50، 80 و 100 درصد) می‌باشد. در پیش آزمون انجام شده با استفاده از مایکروویو خانگی در سطوح توان‌های بالاتر از 50 درصد، دانه‌های شلتوک از هم گسسته و باز شدند، لذا به منظور مقایسه بین ماکروویو خانگی و مایکروویو جریان مداوم از سه سطح توان 10، 30 و 50 درصد استفاده گردید. طبق استاندارد ASAE شماره S448، در خشک‌کردن غلات به روش لایه نازک مواد باید به‌طور کامل در معرض هوای خشک قرار گرفته و دارای ضخامت یکنواخت باشند، به‌طوری که ضخامت لایه مواد از ضخامت سه لایه دانه غله مربوطه تجاوز نکند [28]. با توجه به نکته فوق و این که قطر متوسط شلتوک طارم هاشمی به‌طور میانگین 2 میلی‌متر می‌باشد، لذا حالت لایه نازک برای تحقیق حاضر 6 میلی‌متر تعیین گردید. در همین راستا، آزمایش برای دو لایه دیگر با ضخامت‌های 12 و 18 میلی‌متر نیز مورد بررسی قرار گرفت. ضخامت 12 میلی‌متر بر اساس حداکثر عمق نفوذ امواج مایکروویو در شلتوک مورد آزمون انتخاب شد [29]. لایه آخر به صورت یک لایه نازک بیش‌تر از حداکثر عمق نفوذ امواج یعنی 18 میلی‌متر در نظر گرفته شد. در تمامی لایه‌های مورد آزمون از نمونه‌های 30 گرمی شلتوک استفاده شد. بازه زمانی خشک‌کردن برای خشک‌کن مایکروویو خانگی در 5 سطح 30، 60، 90، 120 و 150 ثانیه و برای خشک‌کن مایکروویو جریان مداوم در 5 سطح سرعت تغذیه محصول به دستگاه (سرعت نوار نقاله) شامل 0/24، 0/3، 0/4، 0/6 و 1/2 متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. با توجه به این که طول مفید محفظه خشک‌کن مایکروویو جریان مداوم 60 سانتی‌متر می‌باشد، لذا با توجه به سرعت‌های خطی ذکر شده برای مایکروویو جریان مداوم، زمان توقف محصول در داخل محفظه خشک‌کن جریان مداوم با زمان‌های آزمون در مایکروویو خانگی برابر می‌باشد. هم‌چنین با توجه به این که در تمامی آزمون‌ها از نمونه‌هایی با وزن ثابت 30 گرم استفاده شد، لذا با تغییر ضخامت لایه، سطح آزاد نمونه‌ها نیز تغییر یافت. با توجه به برابر بودن وزن نمونه‌های مورد آزمون در هر دو دستگاه و ثابت بودن ضخامت لایه‌های شلتوک، سطح آزاد نمونه‌ها در هر دو دستگاه یکسان بود. هر دو دستگاه دارای مگنترون با حداکثر توان خروجی 900 وات و فرکانس 2450 مگاهرتز بودند. اطلاعات بیش‌تر در زمینه نحوه نصب مگنترون‌ها و مدار تغذیه مرتبط در جعفری [29] قابل دسترسی است.



(b) (a)

شکل (1) خشک‌کن مایکروویو خانگی(a)، و خشک‌کن مایکروویو جریان مداوم مورد استفاده(b)

www.SID.ir

Archive of SID

کسر رطوبتی نمونه‌ها بعد از خشک شدن با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید [30]:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (2)$$

در این رابطه، MR کسر رطوبتی (بدون بعد)، M_t میزان رطوبت در لحظه t (وزن ماده جامد بر پایه تر/ وزن آب). M_e رطوبت تعادلی (وزن ماده جامد بر پایه تر/ وزن آب) و M_o محتوای رطوبتی اولیه (وزن ماده جامد بر پایه تر/ وزن آب) می‌باشد. در رابطه (2) میزان رطوبت تعادلی با استفاده از نرم افزار EMC[1] که در شرایط مختلف محیطی برای محصولات زراعی متفاوت در نظر گرفته شده، محاسبه گردید. با توجه به تعدد معادلات مربوط به محاسبه رطوبت تعادلی و ساده نبودن محاسبات مربوط به آن‌ها، نرم‌افزارهایی برای محاسبه رطوبت تعادلی در شرایط مختلف محیطی ارائه شده‌اند. یکی از این نرم افزارها، EMC می‌باشد که در محیط ویندوز توسط جیا از دانشگاه آرکانزاس نگارش شده و بر اساس معادله چانگ، رطوبت تعادلی غلات را محاسبه می‌کند. اطلاعات بیش‌تر در زمینه استفاده از این نرم افزار و معادله چانگ در اشتواد [31] ارائه شده است.

نرخ خشک شدن، نشان دهنده مقدار رطوبت خارج شده از محصول در واحد زمان بوده و پارامتر بسیار مهمی برای توضیح فرایند خشک‌کردن می‌باشد که از طریق رابطه زیر تعیین گردید [32]:

$$DR = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (3)$$

در این‌جا DR نرخ خشک شدن، M_t رطوبت محصول در لحظه‌ی t (ثانیه) و $M_t+\Delta t$ رطوبت محصول در لحظه $t+\Delta t$ می‌باشد.

برای محاسبه ضریب انتشار موثر رطوبت در شلتوک از قانون دوم فیک استفاده شد. قانون دوم فیک برای محاسبه ضریب پخش رطوبتی با در نظر گرفتن انتشار ثابت رطوبتی، هندسه صفحه و توزیع یکنواخت رطوبت اولیه قابل استفاده می‌باشد[33]. در این تحقیق، نمونه‌های شلتوک به صورت توده در مقابل امواج مایکروویو قرار گرفتند، لذا سطح تماس نمونه‌های در معرض امواج تقریبا به صورت یک صفحه تخت در نظر گرفته شد. حل معادله حاکم بر این سیستم با در نظر گرفتن اولین جمله سری به این صورت می‌باشد[33]:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = \frac{8}{\pi^2}\exp\left(-\frac{\pi^2}{4L^2}D_{eff}t\right) \quad (4)$$

دراین‌جا، D_{eff} ضریب پخش رطوبت، L نصف ضخامت نمونه‌ها (m) و t زمان خشک شدن محصول است. ضریب پخش رطوبتی از طریق معادله زیر قابل محاسبه است که در آن شیب خط K_1 از رسم ln(MR) در مقابل t به‌دست می‌آید.

$$K_1 = -\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (5)$$

3-2- مطالعه شکست

برای بررسی درصد شکست دانه‌های خشک شده شلتوک، از دستگاه پوست‌کن آزمایشگاهی استفاده شد. به این صورت که دانه‌های شلتوک پس از خشک شدن و خارج شدن از دستگاه خشک‌کن مایکروویو ابتدا به مدت دو ساعت استراحت داده شدند تا به رطوبت تعادلی برسند [34]. سپس به‌منظور سنجش و اندازه‌گیری درصد شکست دانه، از هر نمونه 100 عدد دانه شلتوک انتخاب و در دستگاه پوست‌کن آزمایشگاهی (مدل TZ4.5-China) قرار گرفت. پس از جدا شدن پوسته، برنج‌های قهوه‌ای سالم از دانه‌های شکسته شده جدا شدند. دانه‌های با اندازه کوچک‌تر از 75٪ دانه‌های سالم، به‌عنوان دانه‌های شکسته شده در نظر گرفته شدند. سپس دانه‌های شکسته شده توزین و درصد شکست دانه‌ها در حین خشک شدن تعیین شد. این آزمایش در 3 تکرار برای هر تیمار به صورت جداگانه انجام شد[30].

3-نتایج و بحث

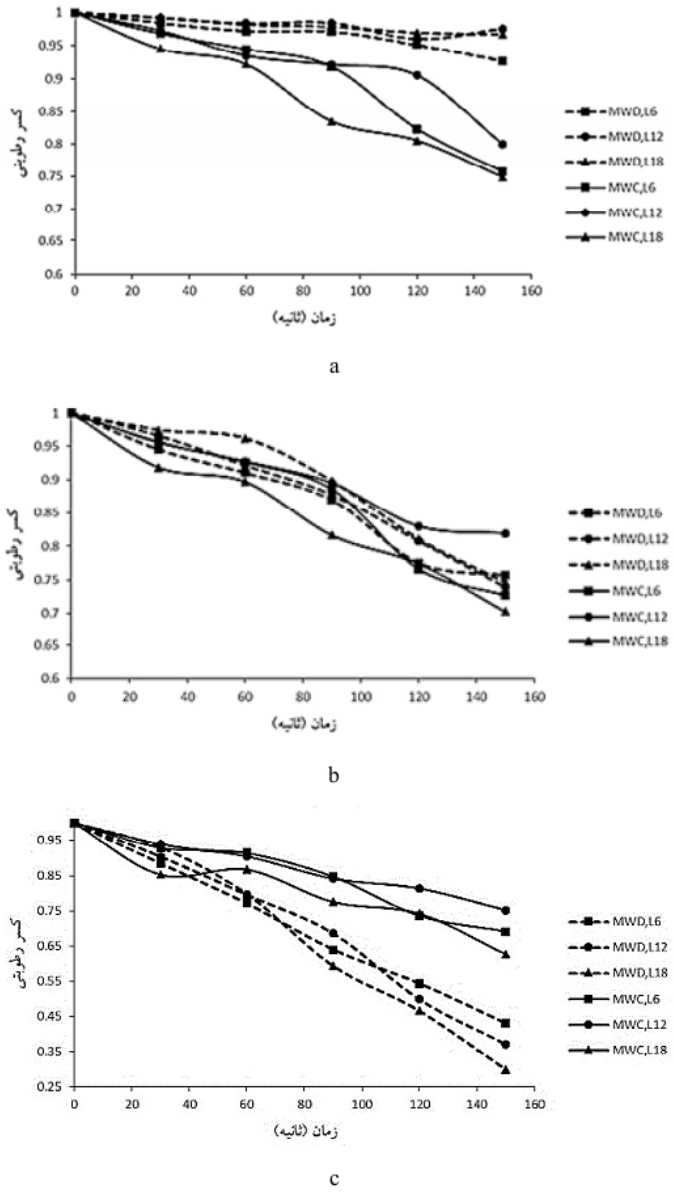
تغییرات کسر رطوبتی مربوط به لایه‌ها، سطوح مختلف توان و زمان‌های مختلف رقم طارم هاشمی در خشک‌کن مایکروویو جریان مداوم و خشک‌کن مایکروویو خانگی در شکل (2) نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌گردد، میزان کسر رطوبتی با افزایش زمان خشک‌کردن به سرعت در حال کاهش می‌باشد. این نتیجه با نتایج چینکاچورن [5] و یانگ ساوادیکول و گوناسکاران [22] بر روی شلتوک و آلیباس [15] و درویشی و همکاران [16] روی سایر محصولات کشاورزی مطابقت دارد. از طرف دیگر با افزایش سطح توان مایکروویو،

1. Equilibrium Moisture Content

www.SID.ir

Archive of SID

محتوای رطوبتی شلتوک‌های مورد آزمون با نرخ بیش‌تری در حال کاهش است. در سطح توان 50 درصد، کسر رطوبتی با شیب بسیار بیش‌تری در حال کاهش می‌باشد. به این علت که در سطوح توان بالا، زمان اشعه دهی به محصول افزایش یافته و افزایش دما در محصول بدون وقفه ادامه می‌یابد ولی در سطوح توان پایین مانند سطح توان 10 درصد، امواج دهی به محصول قطع و وصل می‌شود. نکته قابل توجه دیگر این که در سطح توان 10 درصد (پایین‌ترین سطح توان مورد آزمون)، کاهش کسر رطوبتی نسبت به زمان در خشک‌کن مایکروویو خانگی نسبت به خشک‌کن مایکروویو جریان مداوم در کلیه لایه‌ها و زمان‌ها کندتر می‌باشد (شکل 2). علت این امر به نحوه تابش امواج در داخل محفظه دو خشک‌کن و درصد جذب اشعه در



شکل (2) تغییرات کسر رطوبتی با زمان در لایه‌های مختلف در مایکروویو خانگی و مایکروویو جریان مداوم (a) سطح توان 10 درصد (b) سطح توان 30 درصد (c) سطح توان 50 درصد. ^{1}L، ^{2}MWD و ^{3}MWC به ترتیب نمایانگر لایه، مایکروویو خانگی و مایکروویو جریان مداوم است

1. Layer thickness
2. Microwave Dryer- Domestic
3. Microwave Dryer- Continues

www.SID.ir

Archive of SID

هر یک از آن‌ها برمی‌گردد.

در خشک‌کن مایکروویو خانگی محفظه خشک‌کن به‌طور کامل بسته بوده و در نتیجه درصد به تله افتادن انرژی نسبت به خشک‌کن جریان مداوم (به علت باز بودن محفظه خشک‌کن برای عبور مداوم نوار نقاله) بیش‌تر است. از طرف دیگر در خشک‌کن جریان مداوم امواج به‌طور یکنواخت از بالا بر روی محصول تابیده و به‌طور مستقیم توسط محصول در حال حرکت جذب می‌گردد، در حالی‌که در خشک‌کن مایکروویو خانگی امواج دهی به‌صورت افقی بوده و درصد رسیدن امواج به محصول در اثر بازتاب از سطوح و مستهلک شدن انرژی با گذشت زمان و جذب امواج توسط دیواره‌های داخلی مایکروویو کم‌تر است (شکل 3). تعامل بین این دو عامل تعیین کننده درصد جذب انرژی توسط محصول در دو خشک‌کن خانگی و جریان مداوم خواهد بود. در سطوح توان کم (به‌طور مثال سطح توان 10 درصد) مدت زمان امواج دهی به محصول کوتاه می‌باشد. در خشک‌کن نیمه صنعتی با توجه به تابش مستقیم امواج بر روی محصول، انرژی در همین مدت زمان کوتاه به سرعت به محصول رسیده و جذب می‌گردد. در حالی‌که در خشک‌کن خانگی، با توجه به تابش افقی امواج در داخل محفظه خشک‌کن و برخورد مکرر امواج به سطوح مختلف، شدت امواج تابیده شده با گذشت زمان و طی کردن مسیر طولانی در داخل محفظه خشک‌کن مستهلک شده و بخش ناچیزی از امواج به محصول می‌رسد. لذا انتظار می‌رود در سطح توان‌های کم‌تر مانند سطح توان 10 درصد جذب انرژی توسط محصول در خشک‌کن جریان مداوم بهتر از خشک‌کن مایکروویو خانگی باشد. نتیجه‌ای که مشاهدات تجربی را نیز تصدیق می‌کند (شکل 2).

از طرف دیگر در سطوح توان‌های بالای امواج دهی (به‌طور مثال سطح توان 50 درصد)، مدت زمان تابش مداوم امواج زیاد بوده و در نتیجه با توجه به بسته بودن محفظه خشک‌کن خانگی، به هر حال قسمت اعظم امواج تابیده شده حتی با وجود مسیر طولانی‌تر به محصول رسیده و بخش اعظمی از سطح توان جذب شلتوک می‌گردد. این در حالی است که در خشک‌کن جریان مداوم، به علت باز بودن محفظه خشک‌کن از دو طرف ورودی و خروجی، با این که مسیر امواج دهی مستقیم و کوتاه است ولی درصد فرار امواج از محفظه بیش‌تر بوده و در نتیجه درصد جذب انرژی کاهش می‌یابد. به همین دلیل کاهش رطوبت در سطح توان‌های بالا در خشک‌کن مایکروویو خانگی بهتر است، نتیجه‌ای که در شکل (2) نیز قابل رؤیت است. البته درصد شکستگی محصول نیز باید مد نظر قرار بگیرد که در ادامه مقاله بحث خواهد شد.

نتیجه دیگری که در شکل (2) نشان داده شده این است که با افزایش ضخامت لایه شلتوک از 6 تا 18 میلی‌متر، به‌طور متوسط مقدار کسر رطوبتی با سرعت بیش‌تری کاهش یافته و در زمان‌های یکسان مقدار بیش‌تری از رطوبت کاسته شده است. به‌طور مثال در سطح توان 10 درصد و زمان 90 ثانیه در خشک‌کن مایکروویو جریان مداوم، کسر رطوبتی برای لایه 6 میلی‌متری 0/92 و برای لایه 18 میلی‌متری برابر با 0/83 به‌دست آمد.

در ادامه تحقیق، ضریب پخش رطوبتی در لایه‌ها و سطح

شکل (3) نحوه امواج دهی به محصول در خشک‌کن مایکروویو خانگی(a) و خشک‌کن مایکروویو جریان مداوم(b)

www.SID.ir

Archive of SID

توان‌های مختلف خشک‌کن مایکروویو خانگی و مایکروویو جریان مداوم برای شلتوک رقم طارم هاشمی با استفاده از معادله (5) محاسبه گردید. مقادیر قدرمطلق ضریب پخش رطوبتی برای هر آزمایش در جدول (1) گزارش شده است. ضخامت لایه‌ها و سطوح توان بالا موجب افزایش ضریب پخش رطوبتی می‌شود، زیرا افزایش سطح توان، نفوذ امواج در محصول را بیش‌تر می‌کند و هم‌چنین با افزایش ضخامت لایه‌ها در محدوده مورد آزمون درصد بیش‌تری از امواج جذب شلتوک می‌گردد که می‌تواند موجب افزایش انتقال جرم وحرارت از داخل محصول گردد. نتایج به‌دست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که ضریب پخش رطوبتی در سطح توان 10 درصد، در مایکروویو جریان مداوم نسبت به مایکروویو خانگی بیش‌تر و در سطح توان 50 درصد کم‌تر می‌باشد. این نتیجه با نتایج آلیباس [15] و درویشی و همکاران [16] مطابقت دارد.

شکل (4) تغییرات درصد دانه‌های شکسته را در لایه‌ها، توان‌ها و زمان‌های مختلف برای رقم طارم هاشمی در خشک‌کن مایکروویو جریان مداوم و خشک‌کن مایکروویو خانگی نشان می‌دهد. با توجه به شکل (4)، با افزایش سطح توان مایکروویو درصد شکستگی دانه‌های شلتوک افزایش یافته به‌طوری که پس از سطح توان 30 درصد، افزایش درصد دانه‌های شکسته شده دارای شیب بیش‌تری است. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل (4)، میزان درصد دانه‌های شکسته شده با افزایش زمان خشک‌کردن نیز افزایش می‌یابد که این یافته با نتایج چینکاچورن [5]، کلانتری و اشتواد [16]، یونگساواتدیکول و گوناسکاران [22] و زکچی و گرلا [33] در روش خشک‌کردن با جریان هوای گرم مطابقت دارد. هم‌چنین با توجه به شکل (4) درصد دانه‌های شکسته شده در خشک‌کن خانگی به‌طور متوسط با افزایش ضخامت لایه افزایش یافته است. به‌طور نمونه، در سطح توان 50 درصد و زمان 90 ثانیه در خشک‌کن مایکروویو خانگی، درصد شکستگی دانه برای لایه 6 میلی‌متری 29٪ و برای لایه 18 میلی‌متری برابر با 55% به‌دست آمد. در کلیه موارد آزمون شامل سطوح توان مختلف، زمان خشک‌کردن متفاوت و ضخامت لایه‌های متفاوت، درصد شکستگی دانه‌های شلتوک در خشک‌کردن با خشک‌کن مایکروویو خانگی از خشک‌کن مایکروویو جریان مداوم بیش‌تر است. علت این امر این است که در خشک‌کن مایکروویو جریان مداوم بستر محصول در حال حرکت به‌طور یکنواخت امواج مایکروویو را دریافت کرده و تمرکز امواج بر روی سطح محصول یکنواخت می‌باشد. در حالی‌که در خشک‌کن مایکروویو خانگی، توزیع امواج در کل محصول یکسان نبوده و برخورد امواج به سطح نمونه‌های در حال خشک شدن به صورت تصادفی و غیریکنواخت است (شکل 3). لذا در هر لحظه بخش کوچکی از محصول به صورت تصادفی انرژی متمرکزی را جذب نموده و این موضوع باعث می‌شود تا درصد شکستگی دانه‌ها در خشک‌کن مایکروویو خانگی افزایش یابد، موردی که در گرم کردن یا پخت مواد غذایی در داخل مایکروویو خانگی

جدول (1) ضریب پخش رطوبتی برای آزمایشات خشک شدن لایه‌های شلتوک رقم هاشمی

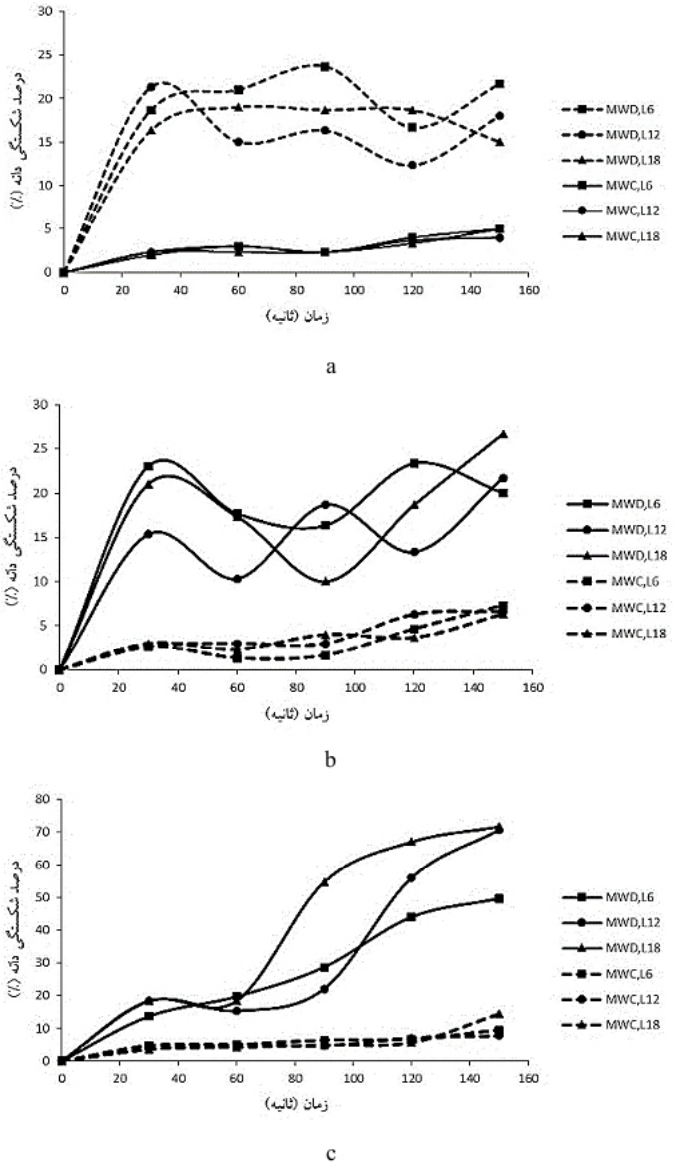
	مایکروویو خانگی		مایکروویو جریان مداوم		
لایه (میلی‌متر)	سطح توان	$D_{eff}\,10^{-9}x(m^2/s)$	R^2	$D_{eff}\,10^{-9}x(m^2/s)$	R^2
6	%10	1/68	0/9357	6/63	0/9106
	%30	7/07	0/9676	8/02	0/9361
	%50	20/4	0/9889	9/11	0/9542
12	%10	3/51	0/9182	18/76	0/8588
	%30	29/2	0/9677	20/21	0/9763
	%50	95/6	0/9465	26/87	0/9909
18	%10	7/37	0/9734	63/37	0/9811
	%30	65/3	0/8368	74/33	0/927
	%50	263/65	0/9813	89/64	0/9267

www.SID.ir

Archive of SID

کم اهمیت بوده ولی در خشک‌کردن ماده ترد و شکننده‌ای مانند شلتوک بسیار اهمیت پیدا می‌کند.

در نهایت با توجه به نتایج به‌دست آمده از مقایسه دو خشک‌کن آزمون شده، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از خشک‌کن مایکروویو خانگی برای خشک‌کردن شلتوک به‌دلیل درصد زیاد شکستگی دانه‌ها در زمان کم معقول نمی‌باشد. لیکن استفاده از خشک‌کن مایکروویو جریان مداوم برای خشک‌کردن شلتوک در زمان طولانی‌تر و در سطح توان‌های پایین‌تر توصیه می‌گردد که بازده کیفی بیش‌تری برای شلتوک در بر خواهد داشت. استفاده از خشک‌کن جریان مداوم در مقیاس بزرگ برای مناطق شمال کشور که احتمال بارندگی پس از برداشت وجود داشته و دپوی محصول برای انتظار خشک‌کردن در کارخانه ممکن است باعث افت کیفی محصول و رشد قارچ‌ها شود، توجیه پذیر است. از طرف دیگر به‌کارگیری خشک‌کن مایکروویو جریان مداوم برای کاهش رطوبت در مراحل انتهایی خشک‌کردن که درصد رطوبت پایین بوده و



شکل (4) تغییرات درصد دانه‌های شکسته شده با زمان در لایه‌های مختلف در مایکروویو خانگی و مایکروویو جریان مداوم (a) سطح توان 10 درصد (b) سطح توان 30 درصد (c) سطح توان 50 درصد. MWD، L و MWC به ترتیب نمایانگر لایه، مایکروویو خانگی و مایکروویو جریان مداوم است

www.SID.ir

Archive of SID

خارج کردن رطوبت باقیمانده در محصول با روش‌های عادی خشک‌کنی مانند جریان هوای گرم مشکل بوده و نیاز به دمای بیش‌تر و صرف انرژی بیش‌تری می‌باشد، جای تامل و تحقیق دارد. لیکن برای بررسی دقیق تر موضوع از نظر مصرف انرژی، کیفیت محصول خروجی و درصد شکست نهایی محصول نیاز به تحقیقات بیش‌تری است.

4-نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک خشک‌کن مایکروویو خانگی و یک خشک‌کن مایکروویو جریان مداوم نیمه صنعتی به‌منظور بررسی پارامترهای خشک شدن و خصوصیات کیفی شلتوک رقم طارم هاشمی با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج به‌دست آمده از آزمون نشان داد که در هر دو خشک‌کن و در زمان خشک‌کردن 150 ثانیه، کسر رطوبتی در سطح توان 50 درصد و ضخامت شلتوک 18 میلی‌متر نسبت به سایر سطوح توان و لایه‌های مورد آزمون کم‌تر است. برای آزمون‌های انجام شده، کسر رطوبتی در سطح توان 50 درصد و ضخامت شلتوک 18 میلی‌متر در مایکروویو خانگی نسبت به مایکروویو جریان مداوم بیش‌تر کاسته شده است. بررسی مقدار عددی ضریب انتشار رطوبتی در دو خشک‌کن برای لایه‌ها و سطوح توان مختلف نشان داد که با افزایش سطح توان و ضخامت لایه شلتوک، میزان ضریب انتشار به‌دلیل جذب بیش‌تر امواج افزایش یافته است. ضریب انتشار رطوبتی در سطح توان‌های پایین، برای مایکروویو خانگی از مایکروویو جریان مداوم کم‌تر و در سطح توان 50 درصد از مایکروویو جریان مداوم بیش‌تر بوده است. هم‌چنین نتایج به‌دست آمده در این تحقیق نشان داد که درصد شکستگی دانه‌ها در مایکروویو خانگی نسبت به مایکروویو جریان مداوم به‌طور چشمگیری بیش‌تر می‌باشد، به‌طوری که در بعضی موارد از حد مجاز نیز تجاوز نمود. اما در مایکروویو جریان مداوم درصد شکستگی دانه‌ها کم‌تر از 10% بود که در حد قابل قبولی قرار دارد (شکل 4). در همه موارد مورد آزمون، درصد شکستگی دانه‌ها با افزایش سطح توان افزایش یافت. با توجه به نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، سطح توان 10 درصد، ضخامت لایه 18میلی‌متر و سرعت نوار نقاله ی 0/24 متر بر ثانیه برای خشک‌کردن شلتوک در دستگاه مایکروویو نیمه صنعتی توصیه می‌گردد.

منابع

[1] Dadali, G., Demirhan, E., Özbek, B. (2007). Effect of drying conditions on rehydration kinetics of microwave dried spinach. *Food Bioprod. Process.*, 86, 235-241.

[2] Discala, K., Meschino, G., Vega-Galvez, A., Lemus-Mondaca, R., Roura, S., Mascheroni, R. (2013). An artificial neural network model for prediction of quality characteristics of apples during convective dehydration. *Food Sci. Technol.*, 33(3), 411-416.

[3] Doymaz, I., Kocayigit, F. (2011). Drying and Rehydration Behaviors of Convection Drying of Green Peas. *Dry. Technol.*, 29(11), 1273- 1282.

[4] Goksu, E.I., Sumnu, G., Esin, A. (2005). Effect of microwave on fluidized bed drying of macaroni beads. *J. Food Eng.*, 66, 463–468.

[5] Cheenkachorn, K. (2007). Drying of rice paddy using a microwave-vacuum dryer, *Proc. European Cong. Chem. Eng. (ECCE-6)*, Copenhagen. 16-20.

[6] Soysal, Y. (2004). Microwave Drying Characteristics of Parsley. *Biosys. Eng.*, 89 (2), 167–173.

[7] Cihan, A., Kahveci, K., Hacihafizoghlu, O. (2007). Modeling of intermittent drying of thin layer rough rice. *J. Food Eng.*, 79, 293-298.

[8] Kouchakzadeh, A., Shafeei, S. (2010). Modeling of microwave–convective drying of pistachios. *Energy Conv. Man.*, 51, 2012–2015.

[9] Maskan, M. (2000). Microwave air and microwave

www.SID.ir

Archive of SID

F. (2013). An Automated Combined Microwave and Electric-Element Fish Dryer. *Int J. Comp. Eng. Res*., 3(6), 38-41.

[20] Kassem, A.S., Shokr, A.Z., El-Mahdy, A.R., Aboukarima, A.M., Hamed, E.Y. (2011). Comparison of drying characteristics of Thompson seedless grapes using combined microwave oven and hot air drying. *J. Saudi Soc. Agr. Sci.*, 10, 33–40.

[21] Maskan, M. (2001). Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *J. Food Eng*., 48, 177-182.

[22] Yongsawatdikul, J., Gunasekaran, S. (1996). Microwave-vacuum drying of cranberries: Part I. Energy use and efficiency. *J. Food Proc. Pres*., 20, 121-143.

[23] Hazer Vazifeh, A., Nikbakht, A.M., Ahmadi Moghadam, P., Foj Lali, V. (2012). Design, fabrication and evaluation of a combined microwave-hot air. *7th Nat.Conf. Agri. Machin. Eng*., *Shiraz. Iran*. (In Farsi)., (251), 1-6.

[24] Gholikhani, A., Rafie, S.H., Aghili Nategh, N., Aghbashlo, M., Hoseinpor, S. (2015). A review of advantages and disadvantages of combined microwave and hot air dryer. *8th Nat. Conf. Agri. Machin. Eng.*, *Tehran. Iran*. (In Farsi)., (409), 1-10.

[25] Sangdao, C.H., Songsermpong, S., Krairiksh, M. (2011). A Continuous Fluidized Bed Microwave Paddy Drying System Using Applicators with Perpendicular Slots on a Concentric Cylindrical Chamber. *Dry. Technol.*, 29(1), 35-46.

[26] Jindarat, W., Rattanadecho, P., Vongpradubchai, S., Pianroj, Y. (2011). Analysis of Energy Consumption in Drying Process of Non-Hygroscopic Porous Packed Bed Using a Combined Multi-Feed Microwave-Convective Air and Continuous Belt System (CMCB). *Dry. Technol.*, 29 (8), 926-938.

finish drying of banana. *J.Food Eng*., 44, 71-78.

[10] Monteiro, R.L., Carciofi, B.A.M., Marsaioli Jr, A., Laurindo, J.B. (2015). How to make a microwave vacuum dryer with turntable. *J. Food Eng*., 166, 276–284.

[11] Mullin, J. (1995). Microwave processing. In New Methods of Food Preservation. Edited by G.W.Gould. Cornwall, UK: Blackie Acad & Professional., 112-134.

[12] Oghbaei, M., Mirzaee, O. (2010). Microwave versus conventional sintering: A review of fundamentals, advantages and applications. *J. Alloys and Comp.*, 494, 175–189.

[13] Shitanda, D., Nishiyama, Y., Koide, S. (2002). Compressive strength properties of rough rice considering variation of contact area. *J. Food Eng*., 53, 53-58.

[14] Hemis, M., Choudhary, R., Watson, D.G. (2012). A coupled mathematical model for simultaneous microwave and convective drying of wheat seeds. *Biosys Eng*., 112, 202 -209.

[15] Alibas, I. (2014). Mathematical modeling of microwave dried celery leaves and determination of the effective moisture diffusivities and activation energy. *J. Food Sci. Technol*., 34 (2), 394-401.

[16] Darvishi, H., Khoshtaghaza, M.H., Najafi, G., Zarein, M. (2013). Characteristics of sunflower seed drying and microwave energy consumption. *Int. Agro-Phys*., 27, 127-132.

[17] Karaaslan, S.N., Tuncer, I.K. (2008). Development of a drying model for combined microwave–fan-assisted convection drying of spinach. *Biosys Eng.*, 100, 44–52.

[18] Motevali, A., Minaei, S., Banakar, A., Ghobadian, B., Khoshtaghaza, M.H. (2014). Comparison of energy parameters in various dryers. *Energy Conv. Man*., 87, 711–725.

[19] Boyo, H. O., Boyo, A.O,. Osibona, A., Ishola, F.

www.SID.ir

Archive of SID

[27] ASAE Standards. (1999). D245.5. Moisture relationship of plant based agricultural products (46th Ed.). St. Joseph, Mich.: ASAE.

[28] ASAE. (1998). Standards S448 Dec93, Thin-layer drying of grain and crops St. Joseph. MI.

[29] جعفری، ح. (1394) طراحی و ساخت سامانه آزمایشگاهی خشک‌کن میکروویو شالی و امکان سنجی انضمام آن به کمباین غلات. *پایان نامه کارشناسی ارشد*. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

[30] Manikantun, M.R., Barnwalr, P., Goyal, R.K. (2012). Modeling the drying kinetics of paddy in an integrated paddy dryer. I.K. Int. Pub. House Ltd. New Delhi, Bangalore. 103-110.

[31] اشتواد، ر. (1390) بررسی تجربی و تحلیلی خصوصیات بیوفیزیکی و حرارتی برنج‌های ارقام اصلاح شده جدید. *پایان نامه کارشناسی ارشد*. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

[32] Minaei, S., Motevali, A., Ghobadian, B., Banakar, A., Samadi S.H. (2014). An Investigation of Energy Consumption, Solar Fraction and Hybrid Photovoltaic–Thermal Solar Dryer Parameters in Drying of Chamomile Flower. *Int. J. Food Eng.*, 10(4), 697–711.

[33] Zecchi, B., Gerla, P. (2007). Breakage and mass transfer models during drying of rough rice. *Dry. Technol.*, 25(9), 1405-1410.

[34] Kalantari, D., Eshtevad, R. (2013). Influence of different of tempering period and vacuum conditions on the rice grain breakage in thin layer dryer. *Cer. Agron. Mold.*, 47(4), 5-12.

[35] Chukwu, O., Akande, F.B. (2007). Development of an apparatus for measuring angle of repose of granular materials. *AU J.T.*, 11(1), 62-66.

www.SID.ir