

سینیتیک خشک کردن دانه‌های انار و میزان انرژی مصرفی در خشک کردن به روش مایکروویو

علی متولی¹، سعید مینایی^{2*}، عماد احمدی³، محمد حسین عزیزی⁴، محمد هادی خوش تقاضا²

1- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه آزاد واحد اسلامشهر

2- دانشیار گروه مهندسی ماشین های کشاورزی دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

3- دانش آموز دوره کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

4- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: 87/3/12 تاریخ پذیرش: 88/4/13)

چکیده

در این مطالعه رفتار خشک شدن و تاثیر شرایط مختلف خشک کردن بر تمایل به از دست دادن رطوبت و ضریب نفوذ موثر، تعیین بهترین مدل ریاضی خشک شدن، تعیین مقادیر انرژی فعال سازی و میزان انرژی مصرفی در دو گونه انار شیرین و ترش با استفاده از خشک کن مایکروویو مورد بررسی قرار گرفت. با تحلیل رگرسیونی برای مدل های مورد بررسی، مشخص شد که مدل پیچ بهترین برازش را با داده های بدست آمده نشان می دهد. ضریب نفوذ موثر دانه های انار در خشک کن مایکروویو بین $3/43 \times 10^{-10}$ تا $32/05 \times 10^{-10}$ متر مربع بر ثانیه بدست آمد. انرژی فعال سازی در خشک کن مایکروویو به ترتیب برای انار شیرین و ترش برابر با 17/22 و 23/83 کیلوژول محاسبه شد. میزان انرژی مصرفی برای خشک کردن دانه های انار شیرین و ترش بین 0/167 تا 0/383 کیلووات بر کیلوگرم بدست آمد.

کلید واژگان: انار، مدل ریاضی، خشک کن مایکروویو، ضریب نفوذ موثر

1- مقدمه

می شود. در طی خشک کردن آب از ماده غذایی خارج شده و در نتیجه امکان رشد ریز سازواره ها و ایجاد واکنش های شیمیایی نامطلوب به حداقل رسیده و ماندگاری ماده افزایش می یابد [2]. خشک کردن محصولات غذایی با استفاده از مایکروویو نیز می تواند جانشین مناسبی برای خشک کن های هوای گرم محسوب شود. فرایند خشک کردن با مایکروویو روشی نسبتاً ارزان بوده که امروزه توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است. طیف الکترومغناطیسی بین

انار با نام علمی *Malus Granatum* به معنی سیب پردانه از خانواده Punicaceae می باشد. انار را می توان بر اساس مزه به دو نوع شیرین و ترش تقسیم کرد. موطن اصلی انار خاور نزدیک به ویژه ایران می باشد بصورتی که نوع ترش مزه آن بطور وحشی در جنگل های شمال ایران به فراوانی وجود دارد. در اروپا، مرکز عمده تولید آن اسپانیا و در افریقا، سواحل جنوبی دریای مدیترانه می باشد [1]. فرایند خشک کردن یکی از بهترین راه های نگهداری میوه ها از جمله انار محسوب

*مسئول مکاتبات: minaee@modares.ac.ir

بسامدهای 300 مگاهرتز و 300 گیگاهرتز نشان‌گر امواج مایکروویو در غذا نفوذ کرده و گرما را در مایکروویو است. برخلاف سامانه‌های گرمایشی رایج، سراسر ماده غذایی گسترش می‌دهند. چرخش دوقطبی ساز و کار مهمی است که تولید گرما را در ماده‌ای که در یک میدان مایکروویو قرار می‌گیرد توضیح می‌دهد. مواد غذایی حاوی مولکول‌های قطبی مانند آب هستند. این مولکول‌ها عموماً دارای یک جهت گیری تصادفی می‌باشند اما هنگامی که یک میدان الکتریکی اعمال می‌شود مولکول‌ها خودشان را در جهت میدان قرار می‌دهند. در یک میدان مایکروویو قطبیت به سرعت تغییر می‌کند. مولکول‌های قطبی دوران می‌کنند تا در راستای قطبیتی که به سرعت در حال تغییر است قرار گیرند. این چرخش مولکول‌ها منجر به ایجاد اصطکاک و تولید گرما می‌شود [3]. کاراسلان و تونسر¹ برگ‌های اسفناج را در خشک‌کن مایکروویو، همرفتی و ترکیب مایکروویو- همرفتی خشک کرده و اثرات آن را بر زمان خشک کردن، آهنگ تبخیر و تغییرات رنگ مورد بررسی و مقایسه قرار دادند [4]. آلکنور² و همکاران برش‌های کدو تنبل را با سه روش خشک‌کن مایکروویو، همرفتی و ترکیب مایکروویو- همرفتی خشک کرده و بهترین دوره خشک کردن، رنگ و مصرف انرژی را بدست آوردند [5].

به خشک شدن دانه‌ها تحت شرایط ثابت دمایی و رطوبتی به صورت تک لایه گسترده خشک کردن به روش لایه نازک گویند [6]. مدل‌های شبیه‌سازی شده، کنترل راحت‌تر، مصرف انرژی کمتر و بهترین شرایط را برای فرآیند خشک کردن مهیا می‌سازند. مدل‌های سینتتیک پخش رطوبت برای تفسیر پدیده خشک شدن مواد دانه‌ای یا خشک کردن توده بستر نازک بکار می‌روند. هدف از استخراج مدل خشک شدن محصولات کشاورزی، پیش‌بینی نحوه خشک شدن محصول می‌باشد [7]. انتخاب مدل استاندارد که بتوان بر اساس آن مدل خشک شدن محصول مورد نظر را بدست آورد نقش مهمی بر میزان

دقت مدل برازش شده دارد بنابراین، ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی محصولات کشاورزی مانند انتقال جرم و حرارت، ضریب نفوذ موثر برای طراحی یک خشک‌کن جدید مورد نیاز است. مطالعات انجام شده در مورد خشک کردن محصولات مختلف به وسیله مایکروویو نشان داد که هیچ تحقیقی در مورد خشک کردن دانه انار به وسیله مایکروویو انجام نشده است و از آنجا که دانه انار خشک شده در نقاط مختلف ایران مورد مصرف قرار می‌گیرد انجام این تحقیق ضرورت می‌یابد.

هدف از این تحقیق بررسی رفتار خشک شدن دانه‌های انار شیرین و ترش، تعیین بهترین مدل ریاضی خشک شدن برای توصیف سینتتیک خشک شدن، تاثیر شرایط خشک کردن بر آهنگ از دست دادن رطوبت، تاثیر شرایط خشک کردن بر ضریب نفوذ موثر، تعیین مقادیر انرژی فعال‌سازی و میزان انرژی مصرفی در طی خشک کردن دانه‌های انار شیرین و ترش در روش خشک کردن مایکروویو می‌باشد.

2- مواد و روش‌ها

انار تازه ترش از شهرستان جویبار، استان مازندران و انار شیرین از شهرستان نی‌ریز، استان فارس تهیه شد و برای انجام آزمایش‌ها در یخچال در دمای +5 درجه سلسیوس نگهداری شد. میزان رطوبت اولیه انارها با روش خشک کردن در آون بدست آمد. نمونه‌های 20 گرمی در آون در دمای 105 ± 1 درجه سلسیوس قرار گرفته و خشک شدند. بطوریکه تغییر وزنی بین دو بار توزین مشاهده نشد. این کار در 5 تکرار انجام شد. نتایج نشان داد که میزان رطوبت اولیه (331%) برای انار ترش و (342/2%) برای انار شیرین بر پایه خشک می‌باشد. فرآیند خشک کردن دانه‌های انار با استفاده از خشک‌کن مایکروویو (Samsung/model:M945) در سه سطح توانی 200، 300 و 400 وات انجام شد. در خشک‌کن مایکروویو، عملیات توزین کردن نمونه‌ها در وقفه‌های زمانی 5 دقیقه‌ای اجرا شد. توزین نمونه‌ها تا زمانی ادامه می‌یافت که

1. Karaaslan and Tuncer
2. Ilknur

سه معیار برای تعیین بهترین برازش استفاده شد، ضریب همبستگی R^2 ، مربع کای χ^2 و مربع میانگین خطای نسبی $RMSE$.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (3)$$

$$c^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - m} \quad (4)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$MR_{exp,i}$ رطوبت نسبی آزمایشگاهی i ام، $MR_{pre,i}$ رطوبت نسبی پیش‌بینی شده i ام، N تعداد مشاهدات و m تعداد ثابت‌های خشک شدن می باشند. بهترین برازشی که می تواند خصوصیات خشک شدن دانه‌های انار را توصیف کند مدل دارای بیشترین ضریب همبستگی R^2 و کمترین مربع کای χ^2 و مربع میانگین خطای نسبی $RMSE$ می باشد.

میانگین قطر هندسی دانه های انار شیرین و ترش جداگانه حساب شده به طوری که حجم 50 دانه انار را با استفاده از جابه جایی تولون بدست می آید (این عمل را در 3 تکرار انجام شد) با استفاده از حجم جابه‌جایی تولون حجم یک دانه انار را بدست آورده و حجم بدست آمده را تقریباً برابر با حجم کره در نظر گرفته و شعاع معادل دانه نیز می تواند از معادله (6) محاسبه شود [20] که شعاع معادل برای انار شیرین (4/93 میلی متر) و برای انار ترش (4/11 میلی متر) به دست آمد.

$$v = \frac{4}{3} \pi r_e^3 \quad (6)$$

قانون دوم فیک برای شرایط ناپایدار در اشکال کروی می تواند انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک کردن را توصیف کند [21].

اختلاف وزنی بین دو وزن‌گیری متوالی مشاهده نشود. کسر رطوبتی دانه‌های انار در طول خشک کردن با استفاده از فرمول (1) محاسبه شد:

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

که در آن MR کسر رطوبتی (بدون بعد)، M_t میزان رطوبت در هر لحظه (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد)، M_e رطوبت تعادلی (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد) و M_o محتوی رطوبت اولیه (کیلوگرم آب/کیلوگرم ماده جامد) می باشد. مقدار M_e در مقایسه با M_o و M_t کوچک است. از این‌رو خطای ناشی از در نظر نگرفتن آن جزئی است و معادله به صورت زیر ساده می شود [8].

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

در اکثر پژوهش‌ها مدل سینتیک خشک کردن بر اساس کسر رطوبتی (MR) بدست آمده است که علت آن کاهش پراکندگی و خوش فرم کردن داده ها می باشد. [9].

مدل هایی که برای برازش داده های حاصل از خشک کردن تحت شرایط شرایط یاد شده استفاده گردید در جدول (1) آورده شده است.

جدول 1 مدل های مورد استفاده برای برازش داده های تجربی نسبت رطوبت

مدل لوئیس یا نیوتن [10 و 11]	$MR = \exp(-kt)$
مدل هندرسون و پابیس [12 و 13]	$MR = a \exp(-kt)$
مدل پیچ [14]	$MR = \exp(-kt^n)$
لگاریتمیک [15]	$MR = a \exp(-kt) + c$
مدل دو جمله‌ای [16]	$MR = a \exp(k_0 t) + b \exp(k_1 t)$
مدل تقریبی انتشار [17 و 18]	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
مدل نمایی دو جمله‌ای [19]	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$

باشد. در روش دوم برای بدست آوردن انرژی فعال سازی در مایکروویو وابستگی بین ضریب نفوذ موثر و نسبت توان خروجی مایکروویو در برابر مقدار (وزن) نمونه بر اساس مدل آرهینوس می تواند بدست آید [23]:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a \cdot m}{p}\right) \quad (12)$$

با رسم نمودار در دو حالت بالا و با استفاده از مدل دادالی و همکاران [24] تحلیل رگرسیونی چند متغیره در محیط نرم افزار *MATLAB* می توان انرژی فعال سازی و ضریب (k_0 و D_0) را بدست آورد. همچنین می توان با لگاریتم گیری از طرفین معادله (12) آن را به صورت خطی در آید:

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{p} \cdot \frac{m}{1} \quad (13)$$

با رسم نمودار ($\ln D_{eff}$) در مقابل ($1/p$) می توان شیب خط (k_2) را برای مایکروویو به دست آورد.

$$K_2 = \frac{E_a}{p} \quad (14)$$

انرژی مصرفی در مایکروویو که به عنوان پیش تیمار از آن استفاده شد با انرژی مصرفی در خشک کن جمع گردید. انرژی مصرفی در مایکروویو برابر است با

$$E_t = P \times t \quad (15)$$

که در آن E_t کل انرژی مصرفی در هردوره خشک شدن (kW.h)، P توان خروجی از مایکروویو (kW) و t مدت زمان خشک شدن (ساعت) می باشد [25].

3- نتایج و بحث

شکل (1) زمان کلی خشک شدن در مقابل توان خروجی مایکروویو برای انار ترش و شیرین را نشان می دهد. در توان پایین تر مدت زمان خشک شدن زیاد می باشد اما با افزایش توان از 200 به 300 وات، بین زمان های خشک

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{p^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-n^2 p^2 \frac{D_{eff} t}{r_0^2}) \quad (7)$$

که در آن n تعداد عبارات در نظر گرفته شده از معادله، t زمان خشک شدن، D_{eff} ضریب نفوذ موثر، r_0 شعاع کره است که در طول روند خشک شدن ثابت فرض شده است. معادله (7) در مدت زمان های طولانی خشک شدن به صورت زیر خلاصه می شود [22]:

$$MR = \frac{6}{p^2} \exp(-p^2 \frac{D_{eff} t}{r_0^2}) \quad (8)$$

در این مرحله شعاع دانه انار (r_0) ثابت در نظر گرفته می شود. با گرفتن لگاریتم از طرفین معادله (8) می توان معادله را به صورت خطی نوشت:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{6}{p^2}\right) - (p^2 \frac{D_{eff} t}{r_0^2}) \quad (9)$$

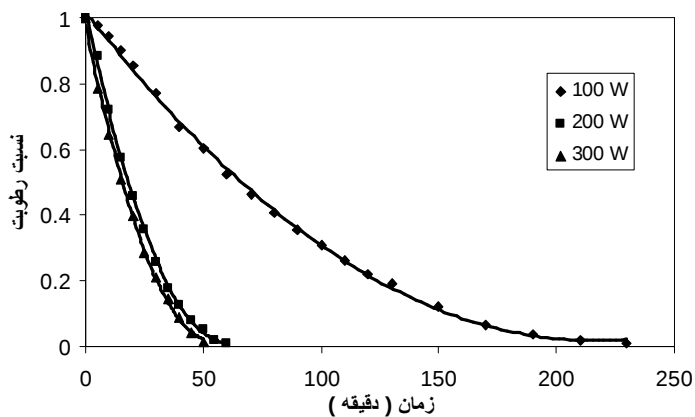
با رسم لگاریتم داده های بدست آمده در طول آزمایش در مقابل زمان، خطی با شیب k_1 بدست می آید که از مساوی قرار دادن این شیب با ضریب t در رابطه (8)، ضریب نفوذ موثر را می توان از رابطه (10) محاسبه کرد.

$$k_1 = \frac{p^2 D_{eff}}{r_0^2} \quad (10)$$

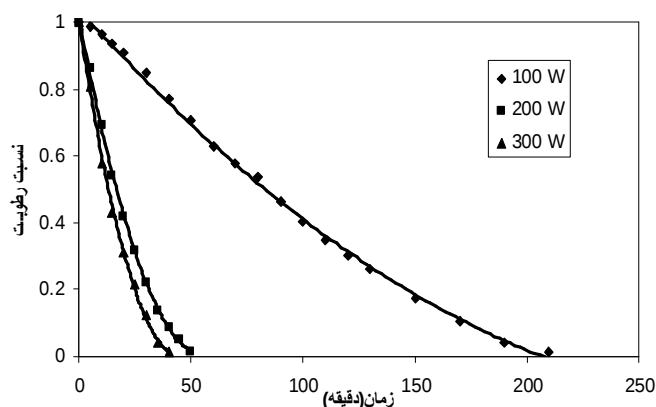
از آنجایی که دما در خشک کن مایکروویو در هنگام کار به طور دقیق قابل اندازه گیری نبود، برای دست آوردن انرژی فعال سازی از شکل اصلاح شده معادله آرنیوس استفاده کرد. در روش اول از ارتباط بین آهنگ ثابت سینتیک خشک شدن (K) و نسبت توان خروجی مایکروویو به وزن نمونه (m/p) به جای دمای هوا استفاده کرد [23]. پس از ارزیابی داده ها، با استفاده از معادله

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{E_a \cdot m}{p}\right) \quad (11)$$

که در آن (K) آهنگ ثابت خشک شدن (min^{-1}) که از معادله پیچ بدست می آید. (k_0) عرض از مبدا معادله (min^{-1})، E_a انرژی فعال سازی (W g^{-1})، (p) توان خروجی مایکروویو (w) و (m) وزن نمونه ها (g) می



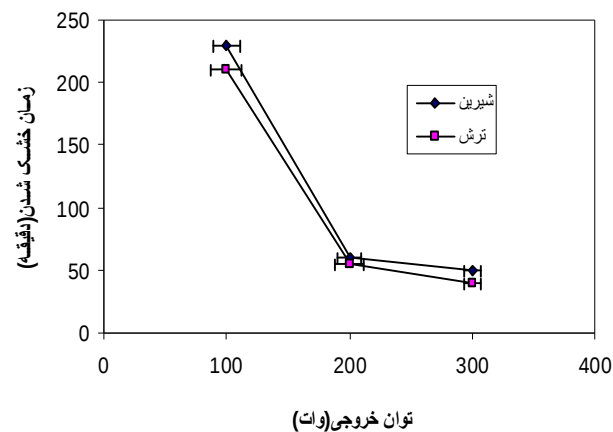
شکل 2 نمودار خشک شدن دانه های انار شیرین در خشک کن مایکروویو و منحنی پیشگویی شده توسط مدل پیچ



شکل 3 نمودار خشک شدن دانه های انار ترش در خشک کن مایکروویو و منحنی پیشگویی شده توسط مدل پیچ

در شروع روند خشک کردن، رطوبت اولیه دانه های انار زیاد بوده و آهنگ از دست دادن رطوبت زیاد است، بتدریج با گذشت زمان میزان رطوبت محصول کاهش پیدا کرده و کاهش رطوبت به طور طبیعی کاهش می یابد. محصول، بیشتر رطوبت خود را در لحظات اولیه خشک شدن از دست می دهد و در نتیجه زمان زیادی برای از دست دادن رطوبت باقی مانده لازم است. تحلیل رگرسیونی چند متغیره در محیط نرم افزار *MATLAB* انجام شد. بهترین مدلی که می تواند سینتیک خشک شدن دانه های انار را توصیف کند با توجه به بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقادیر χ^2 و $RMSE$ انتخاب شد. با مقایسه

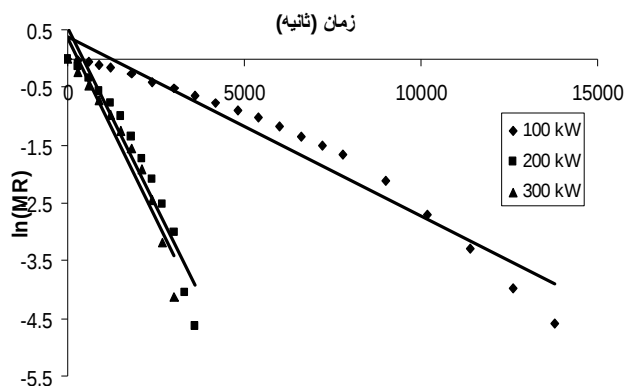
کردن اختلاف چندانی وجود ندارد. این روند در انار شیرین و ترش به طور یکسان مشاهده شده است. مدت خشک کردن نمونه ها در توان های مختلف متفاوت بود. توان بیشتر از 300w سبب ایجاد پدیده سوختگی در دانه های انار و عدم ادامه آزمایش شد. از آنجا که وزن اولیه نمونه ها در شروع هر آزمایش یکسان بود لذا آزمایشات تا آنجا ادامه پیدا می کرد که اختلاف وزنی بین دو وزن گیری متوالی وجود نداشت و وزن تقریبی نمونه ها در انتهای هر آزمایش با هم برابر بود.



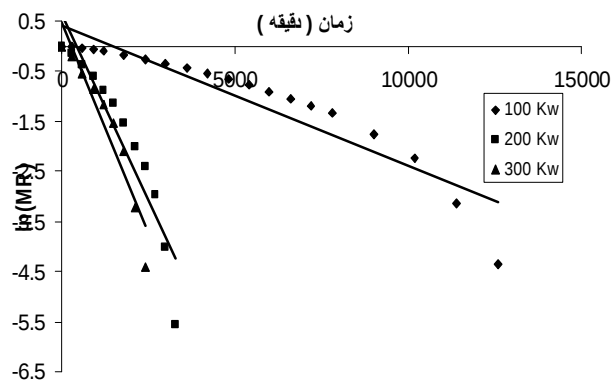
شکل 1 اثر توان مایکروویو بر زمان نهایی خشک شدن دانه های انار ترش و انار شیرین

افزایش توان خروجی مایکروویو، رطوبت نسبی محصول را بیشتر کاهش می دهد، زیرا این گونه به نظر می رسد که با افزایش توان خروجی از مایکروویو دمای درون محفظه و شدت پرتوهای مایکروویو افزایش یافته و باعث کاهش بیشتر میزان رطوبت دانه می شود، به عبارت دیگر توان بالاتر باعث انتقال بیشتر جرم و حرارت شده و کاهش رطوبت شدیدتر است. با توجه به نمودارهای شکل 2 و 3، سرعت خشک شدن و از دست دادن رطوبت با گذشت زمان در طی خشک کردن کاهش می یابد (نتیجه بدست آمده شبیه خشک کردن محصولات با هوای داغ می باشد). مدت زمان خشک شدن انار شیرین در توان 100 وات حدود 4/6 برابر بیشتر از توان 300 وات بود در حالی که مدت زمان خشک شدن انار ترش در توان 100 وات حدود 5/25 برابر بیشتر از توان 300 وات بدست آمد.

شکل‌های (4 و 5) برای خشک کن مایکروویو می‌توان دریافت که با افزایش توان خشک کن مایکروویو، شیب خط‌ها افزایش می‌یابد، به عبارت دیگر با افزایش توان مایکروویو ضریب نفوذ موثر نیز افزایش می‌یابد.



شکل 4 منحنی $\ln(MR)$ در مقابل زمان خشک شدن دانه انار شیرین در خشک کن مایکروویو



شکل 5 منحنی $\ln(MR)$ در مقابل زمان انار ترش در خشک کن مایکروویو

و χ^2 و $RMSE$ مشخص شد که در تمام آزمایشات، مدل Page توانست بهتر از بقیه مدل‌ها روند خشک شدن لایه نازک دانه انار را پیش‌بینی کند.

رابطه‌ای بین ثابت‌های مدل پیچ و توان مایکروویو برای دانه‌های انار ترش برقرار شد. معادله 18 بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شده و R^2 مربوطه در زیر گزارش شده است:

$$K = 0.0000762P \quad R^2 = 0.94 \quad (16)$$

$$n = 0.0057P \quad R^2 = 0.81 \quad (17)$$

$$MR(P) = \exp((-0.0000762p) \times t^{(0.0057P)}) \quad R^2 = 0.91 \quad (18)$$

رابطه‌ای بین ثابت‌های مدل پیچ و توان مایکروویو برای دانه‌های انار شیرین برقرار شد. معادله 21 را بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده و R^2 مربوطه در زیر گزارش شده است

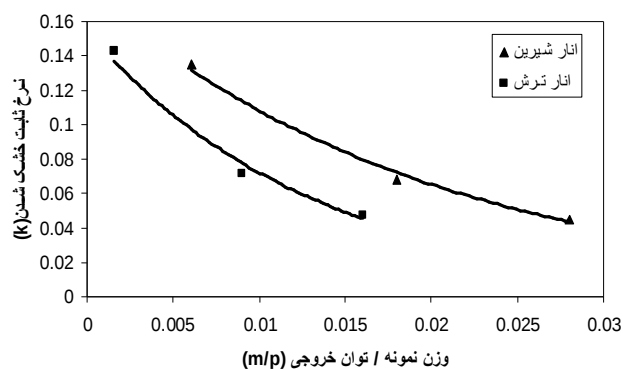
$$K = 0.0000843P \quad R^2 = 0.94 \quad (19)$$

$$n = 0.005424P \quad R^2 = 0.83 \quad (20)$$

$$MR(P) = \exp((-0.0000843p) \times t^{(0.00542P)}) \quad R^2 = 0.89 \quad (21)$$

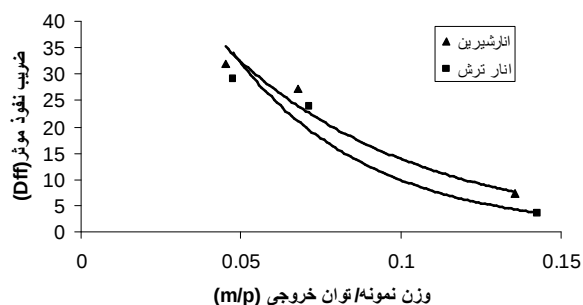
شکل‌های (4 و 5) نمودار $\ln(MR)$ را نسبت به زمان در شرایط مختلف توان مایکروویو به ترتیب برای دانه‌های انار شیرین و ترش نشان می‌دهد. در خشک کردن با پرتوهای مایکروویو در توان 100 وات، کمترین مقدار ضریب نفوذ رطوبتی برای دانه انار ترش $3/43 \times 10^{-10}$ و بیشترین مقدار پخش رطوبتی برای دانه انار شیرین $32/05 \times 10^{-10}$ می‌باشد. ریضوی (26) بیان کرد که ضریب پخش موثر به دما و ترکیب مواد بستگی دارد. از آنجا که توان خروجی در خشک کن مایکروویو برای انار شیرین و ترش یکسان بود می‌توان گفت که تنها عامل موثر در متفاوت بودن ضریب پخش موثر در دانه‌های انار ترکیبات آن‌ها می‌باشد که یکسان نیستند.

وات بر گرم) بدست آمد. با توجه به مقادیر بدست آمده، انرژی فعال سازی در انار ترش بیشتر از انار شیرین بیشتر بوده است.



شکل 6 آهنگ ثابت خشک شدن در مقابل وزن نمونه/توان میکروویو برای دانه‌های انار شیرین و ترش

در روش دوم انرژی فعال سازی را می توان با رسم نمودار (D_{eff}) در مقابل (m/p) ضرایب معادله (13) را بدست آورد. مقادیر انرژی فعال سازی در روش دوم برای انار شیرین (16/945 وات بر گرم) و برای انار ترش (23/563 وات بر گرم) بدست آمد.



شکل 7 ارتباط بین ضریب نفوذ موثر و وزن نمونه/توان خروجی میکروویو برای دانه‌های انار شیرین و ترش

جدول 4 برآورد ضریب نفوذ موثر و تحلیل آماری از مدل خطی در توان های مختلف خشک کن مایکروویو برای انار شیرین

قدرت خروجی	شیب	$D_{eff} \times 10^{-10} (m^2 s^{-1})$	R^2
100	0/0003	7/29	0/9507
200	0/0012	29/58	0/9354
300	0/0013	32/05	0/9324

جدول 5 تخمین ضریب نفوذ موثر و آنالیز آماری از مدل خطی در توان های مختلف در خشک کن مایکروویو در انار ترش

قدرت خروجی	شیب	$D_{eff} \times 10^{-10} (m^2 s^{-1})$	R^2
100	0/0002	3/43	0/9169
200	0/0015	25/76	0/8912
300	0/0017	29/19	0/9012

رابطه ای بین ضریب نفوذ موثر و توان خروجی میکروویو به ترتیب در رابطه 22 و 23 برای دانه های انار شیرین و ترش برقرار شد. معادله و R^2 مربوطه در زیر گزارش شده است.

$$D_{eff} = -34.6 + 0.519P - 0.001P^2 \quad R^2=0.9992 \quad (22)$$

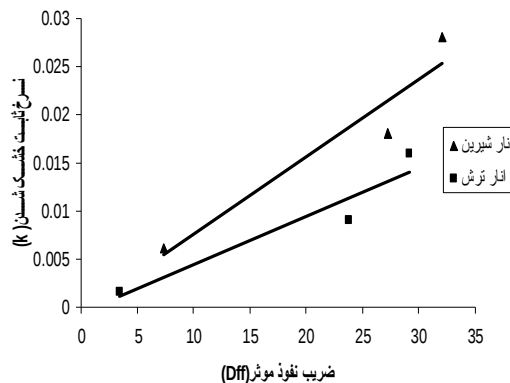
$$D_{eff} = -39.28 + 0.5083P - 0.0009P^2 \quad R^2=0.9995 \quad (23)$$

انرژی فعال سازی در مایکروویو

به عنوان روش اول برای بدست آوردن انرژی فعال سازی با رسم نمودار (k) در مقابل (m/p) انرژی فعال سازی و (K_0) را از معادله (12) را بدست آورد. با استفاده از آنالیز آماری و بدست آوردن ضرایب مدل پیچ مشاهده شد که با افزایش توان مایکروویو آهنگ ثابت خشک شدن (k) افزایش می یابد. مقادیر انرژی فعال سازی در روش اول برای انار شیرین (16/675 وات بر گرم) و ترش (24/222

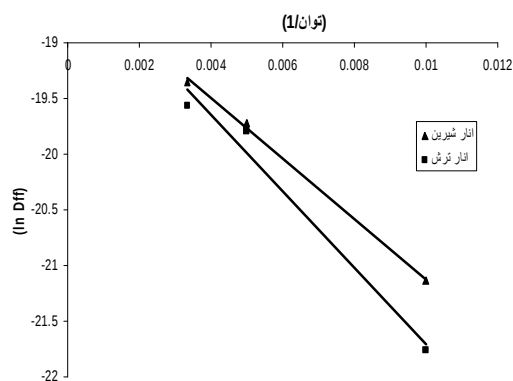
میزان انرژی مصرفی:

یکی از عوامل بسیار مهم در طراحی و ارزیابی خشک کن ها میزان انرژی مصرفی است. خشک کردن به روش مایکروویو یکی از روش های ارزان می باشد و انرژی کمتری را نسبت به بقیه خشک کن ها مصرف می کند. خشک کردن دانه های انار در توان های مختلف انجام شد. کمترین میزان انرژی مصرفی در خشک کردن انار ترش در توان 200 وات به میزان 0/167 کیلووات ساعت و بیشترین میزان انرژی مصرفی در خشک کردن انار شیرین در توان 100 وات به میزان 0/383 کیلووات ساعت بود. به طوری که میزان انرژی مصرفی در توان 100 وات برای انار شیرین تقریباً سه برابر انرژی مصرفی در توان 200 وات برای انار ترش بود.

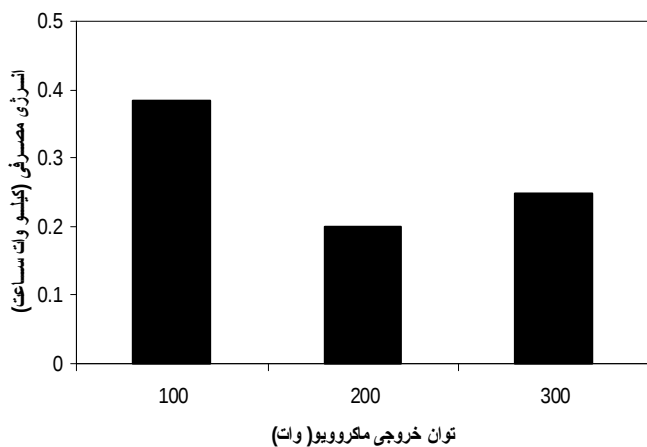


شکل 8 ارتباط بین مقادیر تئوری آهنگ ثابت خشک شدن و مقادیر تئوری ضریب نفوذ موثر برای دانه‌های انار شیرین و ترش

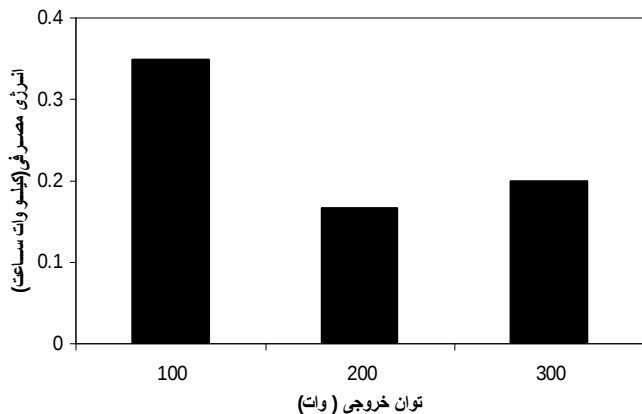
با لگاریتم‌گیری از طرفین رابطه 13 می‌توان برای بدست انرژی فعال سازی شیب خط نمودار $\ln(D_{eff})$ در مقابل $(1/P)$ را بدست آورد که با تقسیم شیب نمودار به وزن نمونه ها می توان انرژی فعال سازی را بدست آورد. مقادیر انرژی فعال سازی در حالت سوم برای انار شیرین (17/22 وات بر گرم) و ترش (23/83 وات بر گرم) بدست آمد. مقایر بدست آمده انرژی فعال سازی در هر سه حالت بسیار به هم نزدیک بوده است.



شکل 9 منحنی $\ln(D_{eff})$ نسبت به $(1/P)$ برای دانه های انار شیرین و ترش در خشک کن مایکروویو



شکل 10 میزان انرژی مصرفی برای خشک کردن دانه انار شیرین



شکل 11 میزان انرژی مصرفی برای خشک کردن دانه انار ترش

parameters of pumpkin slices. LWT, 40: 1445–1451.

- [6] Chakraverty, A. and Singh, R.P, 1988. Post harvest Technology of Cereals, Pulses and Oilseeds. OXFORD and IBH PUBLISHING CO. PVT. LTD. New Delhi.
- [7] Gogus, F., and Maskan, M. 1999. Water adsorption and drying characteristics of okra (*Hibiscus esculentus L.*). Drying Technology, 17: 883–89.
- [8] Diamante, L.M. and Munro, P.A. 1991. Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. Solar Energy, 51: 271–276.
- [9] Akpinar, E.K. Bicer, Y., and Yilidiz, C. 2003. Thin layer drying of red pepper. Journal of food engineering , 59: 99-104.
- [10] Babilis, S. J., Papanicolaou, E., Kyriakis, N. and Belessiotis, V.G. 2005. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus Carica*). Journal of Food Engineering, 75: 205–214.
- [11] Lewis, W. K. 1921. The rate of drying of soil materials. Indian Engineering Chemistry. 13: 427–432.
- [12] Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahroua, M., Aitmohamed, L. and Agorram, B. 2004. Characteristic drying curve and mathematical modeling of thin-layer solar drying of Prickly pear cladode (*Opuntia ficus indica*). Journal of Food Process Engineering. 27(2), 103–117.
- [13] Henderson, S.M. and Pabis, S. 1961. Grain drying theory. 1. temperature affection drying coefficient. Journal of agriculture Engineering research, 6, 169–170.
- [14] Page, G.E. 1949. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. M. Sc. Thesis, Purdue University.
- [15] Yagcioglu, A., Degirmencioglu, A., and Cagatay, F., 1999. Drying characteristics of laurel leaves under different conditions. In: Bascetincelik, A. (Ed.), Proceedings of the 7th International Congress on Agricultural Mechanization and Energy. Adana, Turkey, pp. 565–569.

4- نتیجه گیری

رفتار خشک شدن دانه های انار شیرین و ترش به صورت لایه نازک در خشک کن مایکروویو در توان های (100,200,300 وات) بررسی شد. توان خروجی مایکروویو در خشک کن مایکروویو عامل مهمی در زمان خشک شدن دانه های انار و ثابت های مدل χ^2 ، R^2 و $RMSE$ داشت. خشک شدن دانه های انار در خشک کن مایکروویو تحت تاثیر توان مایکروویو و رطوبت اولیه محصول می باشد به طوری که با افزایش توان در خشک کن مایکروویو سرعت خشک کردن افزایش می یابد. ضریب نفوذ موثر در دانه های انار ترش و شیرین در خشک کردن مایکروویو با افزایش توان خروجی مایکروویو افزایش می یابد. حداقل مقدار ضریب نفوذ موثر $3/43 \times 10^{-10}$ متر مربع بر ثانیه و حداکثر مقدار آن $32/05 \times 10^{-10}$ متر مربع بر ثانیه بود. انرژی فعال سازی در خشک کن مایکروویو انرژی فعال سازی دانه انار ترش بیشتر از دانه انار شیرین بود. میزان انرژی مصرفی در طی خشک کردن دانه انار شیرین کمی بیشتر از انار ترش بود.

5- منابع

- [1] Shahrestani, N, barbers fruits, gilan university publication, 1988
- [2] Barbosa-Canovas, G.V. and Vega-Mercado, H. 1996. Dehydration of Foods (first ed.), (Chapman and Hall, NY, USA).
- [3] Schiffman, R.F., 1992. Microwave processing in the U.S. food industry. Food Technology, 50: 52: 56.
- [4] Karaaslan, S. N., and Tuncer, I. K. 2008. Development of a drying model for combined microwave–fan-assisted convection drying of spinach. Biosystems Engineering, 100: 44–52.
- [5] Ilknur, A. 2007. Microwave, air and combined microwave–air-drying

- [22] 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.
- [23] Ozbek, B., Dadali, G. (2007). Thin-layer drying characteristics and modeling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering*, 83: 541-549.
- [24] Dadali, G., Apar, D. K., and Ozbek, B. 2007. Microwave drying kinetics of okra. *Drying Technology*.
- [25] Ozkan, A., Akbudak, B., Akbudak, N., (2007). Microwave drying characteristics of spinach. *Journal of Food Engineering*, 78: 577-583.
- [26] Rizvi, S. S. H. 1986. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In M. A.
- [16] Henderson, S.M., 1974. Progress in developing the thin layer drying equation. *ASAE* 17: 1167-1172.
- [17] Bakari, H. H. and Hobani, A.I. 2000. Thin-layer drying of dates. *Journal of Food Process Engineering*. 2001. 23, 177-189.
- [18] Yaldiz, O., Ertekin, C. and Uzun, H.I. 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*. 26, 457-465.
- [19] Sharaf-Eldeen, Y. I., Blaisdell, J. L., and Hamdy, M. Y. 1980. A model for ear corn drying. *Transactions of the ASAE*, 23, 1261-1271.
- [20] Mohsenin N. N, 1996. Physical characteristics: physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach Science Publisher.
- [21] Crank, J. 1975. Mathematics of diffusion (2nd ed.) London: Oxford University Press.

Determination of mathematical model, effective diffusion coefficient, activation and consumption energy for microwave drying of pomegranate arils

Motevali, A.¹, Minaei, S.^{2*}, Ahmadi, E.³, Azizi, M. H.³, Khoshtaghaza, M. H.²

1- Department of Mechanics, Eslamshahr Branch, Islamic Azad University Eslamshahr-Iran

2- Associate professor, Agricultural Machinery Engineering Dept., Tarbiat Modares University

3- M.Sc., Graduate of Food Science and Technology, College of Agriculture, Tarbiat Modares University

4- Associate professor, Department of Food Science and Technology, Tarbiat Modares University

(Received: 88/3/12 Accept: 88/4/13)

In this study, the drying behavior and the effects of different drying conditions on the trend of moisture loss and effective diffusion coefficient in sweet and sour pomegranate were determined. The best drying model, energy consumption and activation energy values were also determined for the two varieties using microwave drying. Results of regression analysis of mathematical models points to the page model as the one best described the data. Effective diffusion coefficient of pomegranate arils was found to be 3.43×10^{-10} to $32.05 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Activation energy was determined to be 17.22 and 23.83 kJ for sweet and sour pomegranates respectively. In addition, consumed energy consumption drying of for sweet and sour pomegranate arils was 0.167 to 0.383 kW/kg respectively.

Keywords: Pomegranate seed, Mathematical model, Microwave drier, effective diffusion coefficient

* Corresponding Author E-Mail address: minaee@modares.ac.ir