



## مدل ریاضی خشک‌شدن دانه‌های انار در خشک‌کن فرسرخ

علی متولی<sup>۱</sup> - محمد هادی خوش تقاضا<sup>۲</sup> - سعید مینایی<sup>۲</sup> - احمد عباس زاده<sup>۱</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

ali.motevali62@yahoo.com

### چکیده

در این پژوهش، به منظور تخمین و انتخاب یک مدل ریاضی مناسب، ضریب انتشار رطوبت موثر و مقادیر انرژی فعال سازی برای خشک کردن دانه انار، آزمایش‌های تجربی خشک کردن در چهار سطح سرعت باد (۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ متر بر ثانیه) و شدت تابش (۲۲، ۳۱ و ۴۹ وات بر سانتی‌متر مربع) انجام گرفت. داده‌های تجربی با انواع مدل‌های نیمه نظری و تجربی ارزیابی شد و نهایتاً از میان مدل‌های مورد نظر، مدل میدیلی با توجه به معیارهای بیشترین  $R^2$  و کمترین  $\chi^2$  و RMSE به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. ضریب موثر انتشار رطوبت موثر دانه‌های انار بین  $0.4 \times 10^{-9}$  تا  $3.21 \times 10^{-9}$  متر مربع بر ثانیه بدست آمد. انرژی فعال سازی با استفاده از یک رابطه نمایی بر مبنای رابطه آرنیوس محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی: مدل ریاضی، خشک‌کردن لایه نازک، خشک‌کن فرسرخ، دانه انار

### مقدمه

در طی خشک‌شدن، فرآیند انتقال حرارت و انتقال جرم بطور توأم اتفاق می‌افتد، یعنی حرارت به داخل ماده نفوذ کرده و موجب تبخیر رطوبت آن می‌شود و رطوبت تبخیر شده از منافذ ماده به خارج از آن راه می‌یابد. خشک‌کردن با استفاده از جریان هوای داغ دارای معایبی از جمله اتلاف انرژی حرارتی و بازده کم دستگاه (Umesh Hebbar et al., 2004; Pan et al., 2008)، زمان طولانی برای خشک‌شدن (Nowak and Lewicki, 2004) و کیفیت پایین و چروکیدگی در محصول خشک‌شده (Timoumi et al., 2007) می‌باشد. یکی از روش‌های جدید در خشک‌کردن مواد غذایی، بکارگیری انرژی تشعشعی فرسرخ (IR) است. بخشی از پرتوهای فرسرخ تابیده شده به سمت محصول از آن عبور کرده، قسمتی از آن بازتابانیده می‌شود. بخشی نیز توسط محصول جذب شده و تبدیل به انرژی حرارتی می‌شود و دمای محصول بالا می‌رود (Nowak and Lewicki, 2004).

در خشک کردن با تابش IR، از لامپ مخصوص فرو سرخ استفاده می‌شود. در روش تابش، انتقال انرژی از یک منبع مولد انرژی و از طریق فضا (خلأ و یا دارای هوا) صورت می‌گیرد و گرما از منبع در فضا منتشر می‌شود. میزان تابش بستگی به محیط و دمای مطلق سطح تابنده دارد (Henderson et al., 1997). در این روش هوای محیط اطراف ماده مرطوب، توسط دمنده یا مکنده‌ای جریان می‌یابد تا ضمن جلوگیری از اشباع شدن سطح ماده از رطوبت، رطوبت خارج شده از ماده را از محیط اطراف ماده خارج کند تا رطوبت برای خارج شدن از ماده با مقاومت کمتری مواجه گردد. از کاربردهای خشک‌کردن

<sup>1</sup> -Infrared Radiation

با استفاده از تابش فروسرخ می‌توان به خشک‌کردن بسیاری از مواد شیمیایی، مواد دارویی و مواد غذایی در صنعت و انجام تست‌های آزمایشگاهی به منظور تعیین مشخصات خشک شدن مواد مختلف، اشاره نمود (Nonhebel, 1973). از مزایای خشک‌کردن فروسرخ افزایش گرادیان حرارتی در مدت زمان کوتاه (Nowak and Lewicki, 2004) و کاهش زمان خشک‌شدن (Nowak and Lewicki, 2004; Sharma et al., 2004) می‌باشد.

پژوهشگران زیادی سینتیک خشک‌کردن محصولات کشاورزی را با استفاده از تابش پرتوهای فروسرخ برای یافتن بهترین مدل ریاضی به منظور توصیف سینتیک خشک شدن آن‌ها بررسی کرده‌اند، که از آن جمله می‌توان به خشک شدن لایه‌های سیب‌زمینی (Afzal and Abe, 1998)، سبزی‌جات (Umesh Hebbar et al., 2004)، برنج (Das et al., 2004)، پیاز (Sharma et al., 2004)، زیتون (Celma et al., 2007)، موز (Pan et al., 2008)، لایه‌های سیب (Timoumi et al., 2007) شلتوک (pan et al., 2008) و مهاجران، (۱۳۸۳) اشاره کرد.

انار را می‌توان بر اساس مزه به دو نوع شیرین و ترش تقسیم کرد. موطن اصلی انار خاور میانه به ویژه ایران می‌باشد بصورتی که نوع ترش مزه آن بطور وحشی در جنگل‌های شمال ایران به فراوانی وجود دارد (شهرستانی ۱۳۷۷). به علت ترشی بیش از اندازه، دانه‌های انارترش را خشک کرده و پس از خشک‌کردن، دانه‌های انار را با دستگاه خرد و با غذا مخلوط کرده و مورد استفاده قرار می‌دهند.

اساساً برای انتخاب یک مدل ریاضی مناسب که بتوان بر اساس آن سینتیک خشک شدن محصول مورد نظر را بدست آورد، نیاز به یک سری ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی محصولات کشاورزی مانند انتقال جرم و حرارت، ضریب انتشار موثر رطوبت می‌باشد تا بتوان به کمک آن‌ها یک خشک‌کن جدید با کارایی مناسب طراحی نمود. هدف اصلی این تحقیق، انتخاب بهترین مدل ریاضی و شرایط هوای داغ برای خشک کردن دانه‌های انار ترش به منظور طراحی و بهینه‌سازی (زمان خشک شدن و مصرف انرژی) یک سیستم جدید می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

انار تازه ترش از شهرستان جویبار، استان مازندران تهیه و برای انجام آزمایشات در یخچال در دمای  $5^{\circ}\text{C}$  نگهداری شد. میزان رطوبت اولیه دانه‌های انار، به روش خشک کردن در آون بدست آمد (Doymaz, 2005). این کار ۵ بار تکرار شد و نتایج نشان داد که میزان رطوبت اولیه دانه‌های انار در حدود ۳۳٪ درصد بر پایه خشک می‌باشد.

فرآیند خشک‌کردن دانه‌های انار در ۴ سطح سرعت باد (۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ متر بر ثانیه) و ۳ سطح تابش فروسرخ (۰/۴۹، ۰/۳۱ و ۰/۲۲ وات بر سانتی‌مترمربع) انجام شد. وزن کردن نمونه‌ها آزمایشی به صورت پیوسته در طی خشک‌کردن با استفاده از ترازوی (EK-3000i مدل A&D ساخت کشور ژاپن) و اندازه‌گیری دمای محیط با استفاده از دماسنج (Lutron, TM-925, Taiwan)، همچنین برای تنظیمات سرعت باد از بادسنج (Anemometer, Lutron-YK,80AM, Taiwan) و برای اندازه‌گیری رطوبت از رطوبت‌سنج (testo مدل ۴۰۰ ساخت آلمان) استفاده شد. برای اندازه‌گیری شدت تابش اشعه‌ی مادون‌قرمز از تابش‌سنج OPHIR مدل 10A و برای تولید پرتوهای فروسرخ از لامپ‌های اسرام با قدرت ۲۵۰ وات و شدت جریان ۲۲۰ ولت استفاده شد.

در اکثر پژوهش‌ها، مدل سینتیک خشک کردن بر اساس نسبت رطوبت (MR) بدست آمده است که علت آن کاهش پراکندگی و خوش فرم کردن داده‌ها می‌باشد (Akpınar et al., 2003).

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

در این رابطه، MR نسبت رطوبت (بدون بعد)،  $M_t$ ،  $M_e$  و  $M_o$  به ترتیب میزان رطوبت در هر لحظه از فرآیند خشک کردن، میزان رطوبت تعادلی و میزان رطوبت اولیه بر حسب اعشار بر پایه خشک (d.d.b.) می‌باشد. با توجه به اینکه معمولاً مقدار  $M_e$  در مقایسه با  $M_o$  و  $M_t$  عدد کوچکی است لذا اغلب خطای ناشی از در نظر نگرفتن آن نیز بسیار جزئی است (Babalís et al., 2005). لذا برای محاسبه نسبت رطوبت دانه‌های انار در طول فرآیند خشک کردن از رابطه (۲) استفاده شد.

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

برای برآزش مدل‌های استاندارد خشک شدن لایه نازک با داده‌های آزمایشی از محیط برآزش منحنی<sup>۲</sup> نرم‌افزار MATLAB 2007 استفاده شد. برای تعیین بهترین مدل از سه معیار ضریب تعیین ( $R^2$ )، مربع کای ( $\chi^2$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ ) استفاده شد. در ابتدا ۱۴ مدل تجربی جدول ۱ را بر داده‌های آزمایشگاهی برآزش داده و با توجه به سه معیار بیشترین ضریب تعیین ( $R^2$ )، مربع کای ( $\chi^2$ ) و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ )، ۷ مدل با دقت بالا انتخاب شد.

جدول ۱ - مدل‌های مورد استفاده برای برآزش داده‌های تجربی

$MR = \exp(-kt)$	(۱) مدل لوئیس (Lewis., 1921)
$MR = a \exp(-kt)$	(۲) مدل هندرسون و پاپیس (Lahsasni et al., 2004)
$MR = \exp(-ktn)$	(۳) مدل پیچ (Page, 1949)
$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$	(۴) مدل لگاریتمی (Togrul and Pehlivan 2004)
$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	(۵) تقریب پنخس (Togrul and Pehlivan 2004)
$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	(۶) ورما و همکاران (Verma et al., 1985)
$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	(۷) میدیلی و همکاران (Menges and. Ertekin 2005)

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

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

<sup>2</sup>. Curve fitting

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

که در این رابطه‌ها،  $MR_{exp,i}$  نسبت رطوبت تجربی نام  $MR_{pre,i}$  نسبت رطوبت پیشگویی شده نام،  $N$  تعداد مشاهدات و  $m$  تعداد ثابتهای خشک شدن می‌باشد.

میانگین قطر هندسی دانه های انار به طور جداگانه حساب شد. برای این منظور حجم ۵۰ عدد دانه انار با استفاده از جابه جایی تولوئن بدست آمد (این عمل در ۳ تکرار انجام شد). سپس با استفاده از حجم کل، حجم یک دانه انار محاسبه شده و تقریباً برابر با حجم کره در نظر گرفته شد و در نهایت شعاع معادل دانه به کمک رابطه (۶) محاسبه گردید (Mohsenin, 1996). شعاع معادل برای دانه انار ۴/۱۱ میلی متر بدست آمد.

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

در شرایط ناپایدار، اشکال کروی می‌توان مطابق قانون دوم فیک انتقال رطوبت در مرحله نزولی فرآیند خشک کردن را با استفاده از معادله (۷) توصیف نمود (Crank, 2001).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{D_{eff} t}{r_o^2}\right) \quad (7)$$

که در آن،  $MR$  نسبت رطوبت (بدون بعد)،  $M_t$ ،  $M_e$  و  $M_o$  به ترتیب میزان رطوبت در هر لحظه از فرآیند خشک کردن، میزان رطوبت تعادلی و میزان رطوبت اولیه بر پایه خشک (d.d.b.)،  $n$  تعداد عبارات در نظر گرفته شده از رابطه،  $t$  زمان خشک شدن (min)،  $D_{eff}$  ضریب موثر انتشار رطوبت ( $m^2/s$ )،  $r_o$  شعاع کره (m) است. رابطه (۷) در مدت زمان های طولانی خشک شدن به صورت رابطه (۸) خلاصه می شود (Aghabashlo et al, 2008)

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 \frac{D_{eff} t}{r_o^2}\right) \quad (8)$$

رابطه (۸) برای بدست آوردن ضریب موثر انتشار رطوبت استفاده شده است. در این مرحله شعاع دانه انار ( $r_o$ ) ثابت در نظر گرفته می شود. با لگاریتم گیری از طرفین رابطه (۸) می توان رابطه را به صورت خطی نوشت:

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

با رسم لگاریتم طبیعی داده های بدست آمده در طول آزمایش نسبت به زمان، خطی با شیب  $k_1$  بدست می آید که از مساوی قرار دادن این شیب با ضریب  $t$  در رابطه (۹)، ضریب موثر انتشار رطوبت را می توان به کمک رابطه (۱۰) محاسبه کرد.

$$k_1 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r_o^2} \quad (10)$$

از آنجایی که دما در خشک کن IR در هنگام کار به طور دقیق قابل اندازه گیری نیست، برای به دست آوردن انرژی فعال سازی باید از شکل اصلاح شده رابطه آرنیوس استفاده کرد. شکل اصلاح شده رابطه آرنیوس در خشک کردن به روش میکروویو استفاده و انرژی فعال سازی محاسبه گردید (dadali et al., 2007a). اما در روش IR از آنجا که دما مشخص نیست می‌توان مانند روش میکروویو از ارتباط بین آهنگ ثابت سینتیک خشک شدن ( $K$ ) و نسبت شدت پرتو فروسرخ به وزن نمونه ( $m/R$ ) به جای دمای هوا استفاده کرد. در این حالت پس از ارزیابی داده‌ها، با به کار بردن رابطه (۱۱) و رسم

مقادیر آهنگ ثابت خشک شدن ( $K$ ) در مقابل وزن نمونه به توان مایکروویو ( $m/R$ ) در نرم افزار MATLAB می توان مقدار انرژی فعال سازی را بدست آورد.

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

که در آن ( $K$ ) آهنگ ثابت خشک شدن ( $\text{min}^{-1}$ ) است که از رابطه میدلی بدست می آید. ( $K_0$ ) عرض از مبدا رابطه ( $\text{min}^{-1}$ )،  $E_a$  انرژی فعال سازی ( $\text{W/cm g}$ )، ( $R$ ) شدت پرتوهای فروسرخ ( $\text{W cm}^{-1}$ ) و ( $m$ ) وزن نمونه ها ( $\text{g}$ ) می باشد. در روش دوم، برای بدست آوردن انرژی فعال سازی از ارتباط بین ضریب انتشار رطوبت موثر و نسبت شدت پرتوهای فروسرخ به وزن نمونه ( $M/R$ ) نمونه بر اساس مدل آرنیوس می تواند بدست آید (Dadali et al., 2007a)

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

که در آن،  $D_{eff}$  ضریب انتشار رطوبت ( $\text{m}^2/\text{s}$ )،  $D_0$  عرض از مبدا ( $\text{m}^2/\text{s}$ )،  $E_a$  انرژی فعال سازی ( $\text{W/cm g}$ )، ( $R$ ) شدت پرتوهای فروسرخ ( $\text{W/cm}$ ) و ( $m$ ) وزن نمونه ها ( $\text{g}$ ) می باشد.

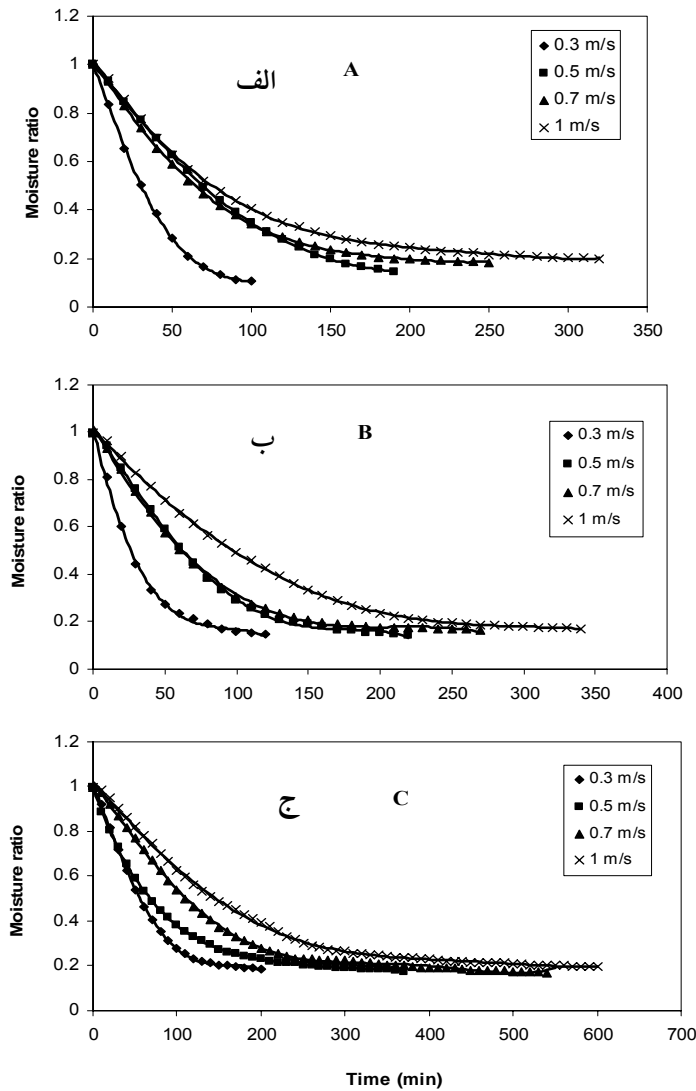
با رسم نمودار در دو حالت بالا و با استفاده از مدل دادالی و همکاران و تحلیل رگرسیون چند متغیره در محیط نرم افزار MATLAB می توان انرژی فعال سازی و ضریب ( $D_0$  و  $K_0$ ) را بدست آورد.

با استفاده از معادلات (۱۱) و (۱۲) می توان رابطه بین آهنگ ثابت خشک شدن و ضریب موثر انتشار رطوبت را بدست آورد. مقادیر تئوریک آهنگ ثابت خشک شدن ( $K$ ) از رابطه (۱۱) و مقادیر ضریب موثر انتشار رطوبت از معادله (۱۲) بدست می آید که رابطه بین آن ها عبارت است از (رابطه ۱۳):

$$K_{th} = A.(D_{eff})_{th} \quad (13)$$

## نتایج و بحث

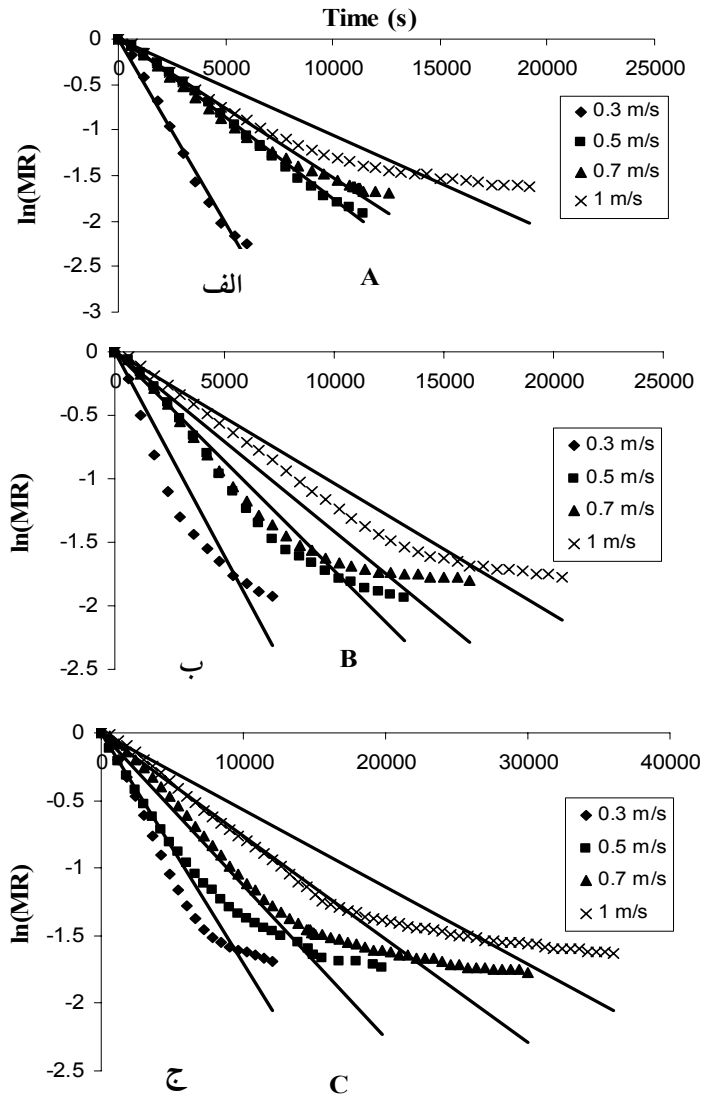
شکل ۱ منحنی های خشک شدن دانه های انار را در سرعت های مختلف هوای گرم و شدت تابش ثابت نشان می دهد. در شروع فرآیند خشک کردن، رطوبت اولیه محصول زیاد بوده و آهنگ از دست دادن رطوبت زیاد است. به تدریج با پیشرفت زمان، میزان رطوبت محصول کاهش یافته و در نتیجه سرعت کاهش رطوبت نیز به طور طبیعی کاهش می یابد. بهترین مدلی که می تواند سینتیک خشک شدن دانه های انار را توصیف کند با توجه به بیشترین مقدار میانگین ضریب تعیین ( $R^2$ ) و کمترین مقادیر میانگین  $\chi^2$  و RMSE انتخاب شد. با مقایسه این شاخص ها (جدول ۲) مشخص شد که مدل میدلی مناسبترین مدل برای توصیف داده های آزمایشگاهی است. افزایش سرعت جریان هوا با آهنگ خشک شدن رابطه معکوس دارد. آهنگ پایین خشک کردن دانه های انار در سرعت های بالای جریان هوا به علت پدیده ی خنک شدن سطح دانه های انار می باشد. در نتیجه با افزایش سرعت باد مدت زمان خشک شدن افزایش می یابد. نتایج بدست آمده با یافته های پژوهشگران دیگر در مورد پیاز و برنج (Sharma et al., 2004 و Das et al., 2004) مشابهت دارد.



شکل ۱. تاثیر سرعت جریان هوا، ( $\blacklozenge$  ۰/۳،  $\blacksquare$  ۰/۵،  $\blacktriangle$  ۰/۷ و  $\times$  ۱ متر بر ثانیه) بر نسبت رطوبت دانه‌های انار در فرآیند خشک شدن بر حسب میزان برآزش داده‌ها با مدل میدیلی (خطوط پیوسته) در شدت‌های تابش الف)  $22 \text{ W/cm}^2$ ، ب)  $31 \text{ W/cm}^2$ ، ج)  $49 \text{ W/cm}^2$

### ضریب انتشار رطوبت

شکل ۳ تغییرات  $\ln(MR)$  در مقابل زمان خشک شدن را در شرایط مختلف سرعت هوا و شدت تابش فرورسرخ برای خشک کردن دانه‌های انار نشان می‌دهد. با افزایش شدت تابش فرورسرخ و کاهش سرعت باد، آهنگ تبخیر به علت کاهش خنک‌شدگی دانه انار افزایش یافته و به تبع میزان ضریب نفوذ نیز افزایش می‌یابد به طوری که بیشترین مقدار ضریب انتشار رطوبت موثر برای دانه‌های انار به میزان  $9-3/21 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  در بالاترین شدت تابش فرورسرخ ( $49 \text{ W/cm}^2$ ) و پایین‌ترین سرعت هوا ( $0/3 \text{ m/s}$ ) و کمترین مقدار ضریب موثر انتشار رطوبت به میزان  $9-0/40 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  در پایین‌ترین شدت تابش ( $22 \text{ W/cm}^2$ ) و بالاترین سرعت هوا ( $1 \text{ m/s}$ ) می‌باشد.



شکل ۳- تاثیر سرعت جریان هوا (♦ ۰/۳، ■ ۰/۵، ▲ ۰/۷ و × ۱ متر بر ثانیه) بر تغییرات  $\ln(MR)$  طی زمان خشک شدن دانه انار در شدت تابش الف)  $22 \text{ W/cm}^2$  ب)  $31 \text{ W/cm}^2$  ج)  $49 \text{ W/cm}^2$

با توجه به اینکه ضریب موثر انتشار رطوبت به دما و ترکیب مواد بستگی دارد (Rizvi, 1996) و نظر به اینکه در پژوهش حاضر ترکیب دانه‌های انار در آزمایش‌ها ثابت بود لذا دلیل اصلی تغییر میزان ضریب نفوذ در شرایط مختلف خشک کردن مربوط به دماهای مختلف اعمال شده می‌باشد زیرا دما وابسته به شدت تابش پرتوهای فروسرخ و سرعت هوا می‌باشد که در نسبت‌های مختلف ترکیب این دو عامل ضرایب پخش موثر رطوبتی متفاوتی بدست آمد. با افزایش شدت تابش دمای دانه‌های انار بالا رفته و با کاهش سرعت هوا شدت خنک شدن سطح دانه‌های انار کاهش می‌یابد به همین دلیل بیشترین مقدار ضریب نفوذ موثر در بیشترین شدت تابش و کمترین سرعت باد اتفاق می‌افتد. مقادیر مختلف میزان ضریب پخش رطوبت در جدول ۳ آمده است. نتایج بدست آمده مشابه نتایج بدست آمده از تحقیقات سایر پژوهشگران است (Shin Kim and Bhowmik, 1995; Sharma and Prasad, 2004)

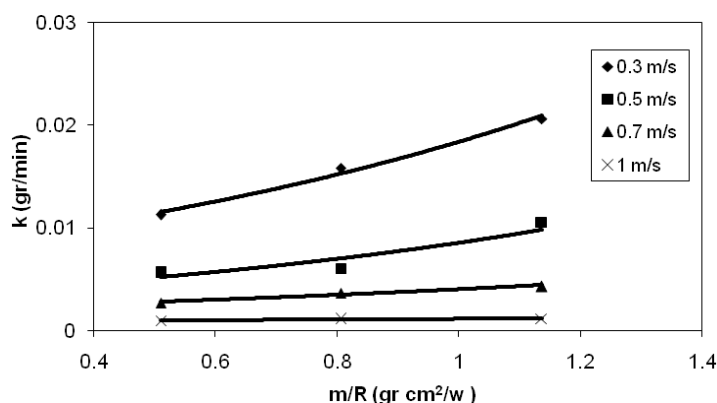
جدول ۳- مقادیر ضریب موثر انتشار رطوبت و ضریب تعیین مدل خطی در صورت اعمال شدت تابش و سرعت‌های مختلف هوا هنگام خشک‌شدن دانه‌های انار

شدت تابش ( $W/cm^2$ )

۴۹		۳۱		۲۲		سرعت هوا (m/s)
$D_{eff} \times 10^{-9}$	$R^2$	$D_{eff} \times 10^{-9}$	$R^2$	$D_{eff} \times 10^{-9}$	$R^2$	
۱/۶۱	۰/۹۲	۲/۴۱	۰/۹۲	۳/۲۱	۰/۹۸	۰/۳
۰/۷۲	۰/۹۰	۱/۶۱	۰/۹۵	۱/۶۱	۰/۹۹	۰/۵
۰/۴۸	۰/۸۶	۰/۸	۰/۸۸	۰/۸	۰/۹۵	۰/۷
۰/۴	۰/۸۸	۰/۵۶	۰/۹۵	۰/۷۲	۰/۸۷	۱

### انرژی فعال‌سازی

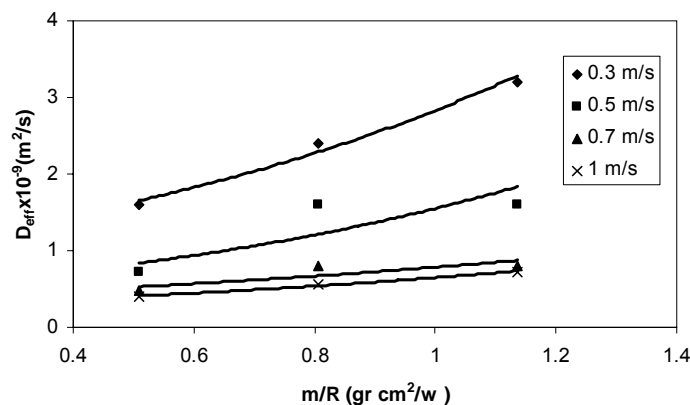
با استفاده از روش اول و با رسم نمودار ( $K$ ) در مقابل ( $m/R$ )، انرژی فعال‌سازی و ( $K_0$ ) از رابطه (۱۱) بدست آمد. از آنجا که مدل میدیلی بهترین برازش را بر داده‌های آزمایشگاهی داشت (جدول ۲) و با توجه به ضرایب بدست آمده در مدل میدیلی (شکل ۴) مشاهده شد که با افزایش شدت تابش، آهنگ ثابت خشک شدن  $K$  افزایش یافت. با استفاده از آنالیز آماری و با رسم نمودار آهنگ ثابت خشک‌شدن در برابر وزن نمونه/ شدت تابش و با بکارگیری مدل دادالی و همکاران در محیط نرم‌افزار MATLAB و برازش آن بر داده‌های رسم شده (شکل ۴) مقدار انرژی فعال‌سازی برای دانه‌های انار ۰/۴۳ تا ۱/۱۷ وات بر گرم سانتی‌مترمربع بدست آمد.



شکل ۴- انرژی فعال‌سازی محاسبه شده با استفاده از آهنگ ثابت خشک‌شدن در مقابل  $m/R$

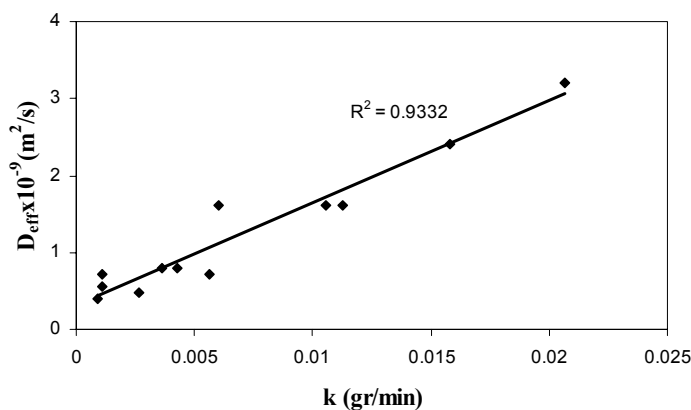
در روش دوم برای بدست آوردن انرژی فعال‌سازی مقادیر ضریب موثر انتشار رطوبت (جدول ۳) را در مقابل (وزن نمونه/ شدت تابش) در محیط نرم‌افزار MATLAB رسم گردید و با استفاده از مدل دادالی و همکاران (رابطه ۱۲) بر داده‌های رسم شده (شکل ۵) برازش داده شده مقدار انرژی فعال‌سازی تعیین گردید. مقدار انرژی فعال‌سازی در روش دوم برای دانه‌های انار ۰/۷۲ تا ۱/۱ وات بر گرم سانتی‌متر مربع بدست آمد.





شکل ۵- انرژی فعال سازی محاسبه شده با استفاده از ضریب موثر پخش در مقابل  $m/R$

رابطه بین آهنگ ثابت خشک شدن مدل میدیلی و ضریب موثر انتشار رطوبت در شکل (۶) نشان داده شده است. ضریب تعیین ( $R^2$ ) برای ارتباط بین داده‌ها در شکل زیر ۰/۹۳ بدست آمد که نشان می‌دهد مقادیر انرژی فعال سازی تعیین شده از دو روش بسیار نزدیک می‌باشد.



شکل ۶- ارتباط بین مقادیر تئوری آهنگ ثابت خشک شدن و مقادیر تئوری ضریب موثر انتشار رطوبت برای دانه‌های انار

### نتیجه‌گیری

بر اساس رفتار خشک شدن دانه‌های انار به صورت لایه نازک در خشک کن فرسرخ در شدت تابش (۲۲، ۳۱ و ۴۹ وات بر سانتی‌مترمربع) و سرعت‌های مختلف جریان هوا (۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ متر بر ثانیه) مشخص شد که فرآیند خشک شدن دانه‌های انار در مرحله نزولی روی می‌دهد. همچنین مشخص شد که تاثیر شدت تابش و سرعت هوا، در خشک کن فرسرخ فاکتور مهمی بر زمان خشک شدن دانه‌های انار و ثابت‌های مدل میدیلی بود. نتایج بدست آمده نشان داد که مدل میدیلی بهترین برازش را بر داده‌های آزمایشگاهی داشت. با افزایش سرعت هوا زمان خشک شدن روند افزایشی و با افزایش شدت تابش، زمان خشک شدن روند کاهشی داشت. ضریب موثر انتشار رطوبت نیز دانه‌های انار در خشک کن فرسرخ با افزایش شدت تابش و کاهش سرعت باد افزایش یافت. انرژی فعال سازی در خشک کردن فرسرخ با ۲ روش محاسبه شد که مقادیر بدست آمده از ۲ روش به یکدیگر نزدیک بودند.

- مهاجران، س. ح (۱۳۸۳). ساخت خشک کن تابش فرورسرخ آزمایشگاهی برای خشک کردن شلتوک. پایان نامه کارشناسی ارشد مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، ص ۸۷.
- Afzal, T. M. and Abe, T. (1998). Diffusion in potato during far infrared radiation drying. *Journal of Food Engineering*, 37(4) : 353-365.
- Aghbashlo, M., Kianmehr, M., 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.
- Akpınar, E., Midilli, A. and Bicer, Y. (2003). Single layer drying behavior of potato slices in a convective cyclone and mathematical modeling. *Journal Energy Conversion and Management*. 44: 1689–1705.
- Babalıs, S. J., Papaniclaou, 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.
- Celma, A. R., Rojas, S., Lopez, F., Montero, I. and Miranda, T. (2007). Thin-layer drying behaviour of sludge of olive oil extraction. *Journal of Food Engineering*, 80: 1261-1271.
- Crank, J. (2001) *Mathematics of diffusion* (2nd ed.) London: Oxford University Press.
- Dadali, G., Apar, D. K. and Ozbek, B. (2007a). Microwave drying kinetics of okra. *Drying Technology*.
- 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.
- Doymaz, I., (2005). Influence of pretreatment solution on the drying of sour-cherry. *Journal of food engineering*; 78:591–6.
- Henderson, S.M., R.L. Perry, and J.H. Young. (1997). Principles of process engineering. American Society of Agriculture Engineers (ASAE). Fourth edition.
- Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahroz, M., Aitmahamad, 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.
- Lewis, W. K., (1921). The rate of drying of solid materials. *Ind. Engineering Chemistry*. 13: 427–432.
- Menges, H. O and C. Ertekin. (2005). Mathematical modeling of thin layer drying of golden apples. *Journal of Food Engineering*. Vol 77: 119-125.
- Mohsenin, N. (1996). *Physical Characteristics: Physical Properties of Plant and Animal Materials*. New York, Gordon and Breach Science Publisher.
- Nonhebel, G.(1973). Drying of solids in the chemical industry. Butterworth and Co.LTD. England.
- Nowak, D. and Lewicki, P. (2004). Infrared drying of apple slices. *Innovation Food Science and Emerging Technologies*, 5: 353-360.
- Page, G.E. (1949). Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. M. Sc. Thesis, Purdue University.
- Pan, Z., Khir, R., Godfrey, L. D., Lewis, R., Thompson, J. F. and Salim, A. (2008). Feasibility of simultaneous rough rice and disinfestations by infrared radiation heating and rice milling quality. *Journal of Food Engineering*, 84: 469-479.
- Rizvi, S. S. H. (1996). *Thermodynamic properties of foods in dehydration*. In M. A.
- Sharma, G. P., Verma, R. C. and Pathare, P. B. (2004). Thin-layer infrared radiation drying of onion slices. *Journal of Food Engineering*, 67: 361-366.
- Sharma, G.P. and Prasad, S. (2004) Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave- convective drying. *Journal of Food Engineering*, 65: 609–617.

- Shin Kim, S. and Bhowmik, R.S. (1995). Effective moisture diffusivity of plain yoghurt undergoing microwave vacuum drying. *Journal of Food Engineering*, 24: 137–148.
- Timoumi, S., Mihoubi, D. and Zagrouba, F. (2007). Shrinkage, vitamin C degradation and aroma losses during infra-red drying of apple slices. *Journal of LWT*, 40:1648-1654.
- Timoumi. S., Mihoubi. D.,a, Zagrouba. F. (2007). Shrinkage, vitamin C degradation and aroma losses during infra-red drying of apple slices. *LWT*. 40 - 1648–1654.
- Togrul, I.T. and Pehlivan, D. (2004). Modelling of thin-layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering*. 65(3): 413–425.
- Umesh Hebber, H., Vishwanatan, K. H. and Ramesh, M. N. (2004). Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. *Journal of Food Engineering*, 65: 557-563.
- Verma, L. R., Bucklin, R. A., Endan, J. B., and Wratten, F. T. (1985). Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of the ASAE*, 28: 296–

## Abstract

In this study, in order to predict and select a suitable mathematical model, effective moisture diffusion coefficient and activation energy for pomegranate arils drying were performed experimentally at four air velocity levels (0, 0.3, 0.5, 0.7 and 1  $\text{ms}^{-1}$ ) and three infrared radiation levels (22, 31 and 49  $\text{W cm}^{-2}$ ). Experimental data with semi-theoretical and empirical models were evaluated. Among the models, Midili model and was selected as the best fitted mathematical model based on the highest  $R^2$  and lowest  $\chi^2$  and RMSE values. Effective diffusion coefficient of pomegranate arils was in the range of  $0.4 \times 10^{-9}$  to  $3.21 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ . Activation energy was calculated from exponential equation based on Arrhenius model.

**Keywords:** Mathematical model, thin layer drying, IR drying, pomegranate arils