



تأثیر شرایط خشک کردن بر پخش رطوبت مؤثر، انرژی فعال‌سازی و انرژی مورد نیاز در خشک کردن لایه

نازک سنجد

احمد عباس‌زاده مایوان^۱، علی متولی^۱، برات قبادیان^۱، محمدهادی خوش‌تقاضا^۲، سعید مینایی^۲

۱- دانشجویان کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس، دانشیار دانشگاه تربیت مدرس

abbaszadeh62@gmail.com

چکیده

در این تحقیق به بررسی خشک شدن لایه نازک میوه سنجد با استفاده از یک خشک‌کن جریان هوای داغ به منظور محاسبه پخش رطوبت مؤثر، انرژی فعال‌سازی و انرژی مورد نیاز، پرداخته شده است. متغیرهای انتخاب شده سه سطح سرعت هوا ۰.۵، ۱ و ۱.۵ (m/s) و سه سطح دمای هوا ۵۰، ۶۰ و ۷۰°C بوده است. از قانون دوم فیک به عنوان معادله اصلی به منظور محاسبه ضریب پخش رطوبت مؤثر استفاده شده است. افزایش دمای هوا منجر به افزایش میزان پخش رطوبت مؤثر شده ولی سرعت هوا تأثیر عکس داشته است. پخش رطوبت مؤثر D_{eff} محاسبه شده برای میوه سنجد در شرایط مختلف دمایی و سرعت هوا از (5.56×10^{-11}) تا (3.18×10^{-10}) تغییر پیدا کرده است. مقادیر انرژی فعال‌سازی با استفاده از یک معادله آرهینوس بر مبنای رابطه بین دما و ضریب پخش مؤثر محاسبه گردید. مقادیر بدست آمده برای انرژی فعال‌سازی، از کمینه مقدار ۴۸.۱۸ kJ/mol در سرعت هوای ۱.۵ m/s تا بیشینه مقدار ۶۳.۸۳ kJ/mol در سرعت هوای ۰.۵ m/s متغیر بوده است. با توجه به نتایج، مقادیر بدست آمده برای انرژی کل و مخصوص مورد نیاز برای خشک کردن لایه نازک سنجد به ترتیب در دامنه ۷۵.۰۴ - ۱۶.۳۴ (kWh) و ۳۴۰.۵۵۸ - ۱۲۳۰.۳۶۶ (kWh/kg) قرار داشته است. کمترین زمان مورد نیاز برای خشک کردن در شرایط خشک شدن دمای ۷۰°C و سرعت هوای ۰.۵ m/s و بیشترین مقدار آن در دمای ۵۰°C و سرعت هوای ۱.۵ m/s اتفاق افتاده است.

کلید واژه: سنجد، پخش رطوبت مؤثر، انرژی فعال‌سازی، انرژی مصرفی کل، انرژی مخصوص

۱- مقدمه

میوه سنجد یکی از محصولات باغی تولیدشده در مناطق شمال شرق و جنوب ایران می‌باشد که دارای سطح زیر کشت بیش از ۲۷۰۸/۶ هزار هکتار و متوسط تولید ۵۴۳/۴۵ تن در سال می‌باشد و بطور عمده به صورت خشک به بازار عرضه می‌گردد. برگ و گل‌های این گیاه به خاطر کاربردشان به عنوان داروی تب‌بر در پزشکی سنتی مشهور می‌باشد. برداشت و اجرای عملیات بعد از برداشت مناسب یک بخش کلیدی برای بدست آوردن بیشترین کیفیت محصول که ضامن بازارپسندی و سود بالا است می‌باشد (Kashaninejad et al., 2007). از فعالیت‌های پس از برداشت مرسوم

می‌توان، عملیات خشک کردن را نام برد. در کل، واژه خشک کردن به حذف بخش کوچکی از رطوبت نسبی از مواد جامد یا مجاورت مواد جامد از طریق تبخیر اشاره دارد که موجب تثبیت میکروبیولوژی، و افزایش دوره نگهداری مواد می‌گردد.

مصرف مقدار زیادی از انرژی در صنعت خشک کردن موجب می‌شود که خشک کردن به عنوان یک عمل انرژی گیر با اهمیت صنعتی زیاد محسوب شود (Sahin and Dincer, 2002). بنابراین، خواص فیزیکی و حرارتی محصولات کشاورزی مانند انتقال جرم و حرارت، دیفیوژن، ضریب هدایت حرارتی، گرمایی ویژه و نرخ تبخیر، برای طراحی یک سیستم جدید یا بهبود سیستم‌های موجود شناخته می‌شود.

خشک کردن میوه‌ها به مشخصات مربوط به انتقال جرم و حرارت در محصولی که خشک می‌شود، بستگی دارد. دانستن پخش رطوبت و دمای محصولات برای طراحی، کنترل کیفی، انتخاب نوع انبار کردن مناسب و چگونگی جابجایی مناسب محصولات، لازم می‌باشد. منحنی‌های خشک شدن بدست آمده از آزمایش‌های خشک کردن تحت شرایط کنترل-شده، اطلاعات مفیدی در رابطه با مکانیزم انتقال رطوبت و محاسبه پخش رطوبت مؤثر تأمین می‌نماید. ضریب پخش یکی از مشخصه‌های محصولات کشاورزی است و مقدار آن به شرایط داخل ماده بستگی دارد. پخش رطوبت مؤثر، همه مکانیزم‌های ممکن حرکت رطوبت در ماده مثل: پخش مایع، پخش بخار، پخش سطحی، جریان کاپیلاری و جریان هیدرودینامیکی را توصیف می‌کند. حرکت رطوبت که شامل پخش رطوبت در ماده جامد می‌باشد، دارای پیچیده‌ای است. آگاهی از پخش رطوبت مؤثر برای طراحی و مدل سازی فرآیند انتقال جرم مثل: آب‌زدایی، جذب سطحی و دفع رطوبت در طول دوره انبارداری، لازم می‌باشد (Rafiee et al., 2008).

تحقیقات زیادی بر روی ضریب پخش رطوبت مؤثر، انرژی فعال‌سازی، انرژی مصرفی و ارزیابی تأثیر شرایط مختلف خشک کردن در خشک کردن لایه نازک سبزی‌ها و میوه‌های مختلف انجام شده است مثل زرشک (Aghbashlo et al., 2008)، انگور (Pahlavanzadeh et al., 2001)، انگور بدون دانه (Doymaz and Pala, 2005)، ذرت (Doymaz and Pala, 2003)، کدو تنبل تکه شده (Doymaz, 2006)، آلو (Goyal et al., 2007)، انگور سیاه تیمار شده با محلول‌های مختلف (Doymaz, 2005)، فندق (Ozdemir and Devres, 1999)، شلتوک برنج (Basunia and Abe, 2001) و کیوی (Simal et al., 2006). با این وجود، تا کنون تحقیقی در رابطه با محاسبه ضریب پخش مؤثر، انرژی فعال‌سازی و انرژی مصرفی میوه سنجد صورت نگرفته است.

اهداف این تحقیق عبارتند از: محاسبه ضریب پخش مؤثر، انرژی فعال‌سازی و انرژی مصرفی میوه سنجد در شرایط خشک کردن لایه نازک، بررسی تأثیر دما و سرعت هوا بر میزان ضریب پخش مؤثر، انرژی فعال‌سازی و انرژی مصرفی و ارائه روابط بر اساس دما و سرعت هوا برای ضریب پخش مؤثر، انرژی فعال‌سازی و انرژی مصرفی.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها و شرایط خشک کردن

سنجدهای تازه برداشت شده (*elaegnus angustifolia*) از بازارهای محلی در منطقه مایوان واقع در استان خراسان شمالی خریداری شده است. مواد درون یخچال در دمای $+5^{\circ}\text{C}$ نگهداری شده است. به منظور انجام آزمایش‌ها از میوه‌های سنجد با اشکال و ابعاد یکنواخت استفاده شده است و میوه‌های چروکیده و آسیب خورده به صورت دستی جدا شده است. محتوی رطوبتی اولیه میوه‌های سنجد به روش آون محاسبه شده است. میزان رطوبت اولیه میوه سنجد پس از انجام آزمایشات (w.b) ۲۴٪، محاسبه گردید. شرایط خشک کردن در این تحقیق در سه سطح دمایی (50°C و 60°C و 70°C) و سه سطح سرعت هوای خشک کن (0.5 ، 1 و 1.5 m/s) در نظر گرفته شده است.

۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی

یک خشک کن هوای داغ آزمایشگاهی با محفظه ثابت (آزمایشگاه گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس) برای آزمایشات مورد استفاده قرار گرفت. بخش‌های اصلی سیستم خشک کن عبارتند از یک دمنده گریز از مرکز، محفظه گرم کننده هوا (1.5 kW)، محفظه خشک کن، سیستم کنترل، اینورتور* و سبد خشک کردن. دمای هوا توسط کنترل کننده اتوماتیک با دقت ± 0.1 کنترل می‌شد. سرعت هوا در مقادیر ذکر شده (0.5 ، 1 و 1.5 m/s) با دقت ± 0.1 m/s با استفاده از یک اینورتر کنترل می‌شد. برای ثابت نگهداشتن سرعت هوا از یک اینورتور که روی موتور دمنده عمل می‌کرد (1.5 کیلووات) استفاده می‌شد. جهت هوا روی نمونه‌ها عمودی بوده و نمونه‌های خشک شده هر یک ساعت بوسیله یک ترازوی دقیق \square با دقت 0.01 gr وزن می‌شد. وزن نمونه‌های مورد استفاده در آزمایشات 100 گرم انتخاب شدند. آزمایشات تا موقعی که رطوبت گردها به 0.3 (kg water/kg dry matter) بر پایه تر برسد، ادامه یافتند. یک کنترل کننده دما، دمایی هوا در محفظه خشک کن را با دقت $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ کنترل می‌کرد. قبل از انجام آزمایشات، برای رسیدن به شرایط پایدار خشک کن نیم ساعت روشن می‌شد.

۲-۳ اصول نظری

پخش رطوبت مؤثر به عنوان یکی از ویژگی‌های یک ماده غذایی است که به صورت خاصیت انتقال جرم رطوبتی ذاتی تعریف می‌شود و شامل انتشار مولکولی، انتشار مایعی، انتشار بخاری، جریان هیدرودینامیک و دیگر مکانیزم‌های انتقال جرم ممکن می‌باشد (Karathanos et al., 1990 and Srinivasa, 2007). ترسیم لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت در مقابل زمان خشک شدن اثبات می‌کند که همه منحنی‌ها در همه جا دارای ذات غیر خطی بوده و این موضوع در تمامی شرایط خشک کردن مطالعه شده صادق می‌باشد. این غیر خطی بودن در روابط ممکن است به علت فرض‌هایی از قبیل توزیع یکنواخت رطوبت اولیه، صرف نظر از چروکیدگی در محصولات، پخش یکنواخت رطوبت درون جرم نمونه، انتقال جرم متقارن نسبت به مرکز، صرف نظر از مقاومت سطح نمونه در برابر انتقال در مقایسه با مقاومت داخلی آن و فرض اینکه انتقال جرم تنها به صورت دیفیوژن صورت می‌گیرد، که به دور از واقعیت در نظر گرفته شده‌اند (Karathanos et al., 1990 and Srinivasa, 2007, Pokharkar and Prasad, 2000).

۱- Parto Sanat, Igbt & Co, Iran

۲- (AND GF-600, Japan)

عموماً فرض بر این است که انتقال آب در مواد جامد از طریق پخش مولکولی صورت می‌گیرد. روش مرسوم برای مطالعه انتقال جرم در یک حالت ناپایدار به هنگام خشک کردن مواد غذایی، معادلات فیک می‌باشند (Vega, 2007). اغلب مدل‌های تئوری مطالعه شده در خشک کردن لایه نازک مواد غذایی مختلف با استفاده از حل قانون دوم فیک بدست آمده‌اند. قانون فیک در مختصات متعاند سه بعدی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود (Doymaz, 2006):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{eff} \frac{\partial M}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{eff} \frac{\partial M}{\partial z} \right) \quad (1)$$

حل سری عمومی قانون دوم فیک در مختصات کروی در زیر آمده است که در آن انتشار رطوبت ثابت، نمونه‌ها کروی، رطوبت در سطح برابر رطوبت تعادلی و خشک کردن بدون چروکیدگی فرض شده است.

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

که در آن n تعداد ترم‌های خشک شدن (۱ و ۳ و ۵...) در نظر گرفته شده از معادله، t زمان خشک شدن، D_{eff} ضریب پخش مؤثر (m^2/s)، Γ_0 شعاع کره (m) که در فرآیند خشک شدن ثابت فرض شده است و $\frac{D_{eff} t}{r_o^2} = F_0$ عدد فیک در انتقال جرم می‌باشد. برای زمان‌های خشک شدن طولانی زمانیکه عدد فیک بزرگتر از ۰.۱ یا MR کوچکتر از ۰.۶ است، تمامی ترم‌های معادله به غیر از ترم اول صفر می‌باشد (Rizvi, 1986). بنابراین معادله (۲) با در نظر گرفتن اولین ترم سری به معادله زیر خلاصه می‌شود.

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp \left(-\pi^2 \frac{D_{eff} t}{r_o^2} \right) \quad (3)$$

معادله (۳) توسط محققان زیادی برای توصیف ضریب پخش رطوبت مؤثر استفاده شده است (Doymaz, 2005). در این فرآیند، شعاع Γ_0 ثابت در نظر گرفته می‌شود. می‌توان معادله (۳) را بصورت خطی نیز نوشت. بنابراین:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(\pi^2 \frac{D_{eff} t}{r_o^2}\right) \quad (4)$$

از رسم معادله (۴)، در مقابل زمان خط راستی با شیب k_1 بدست می‌آید. با رسم داده‌های آزمایشگاهی در مقابل زمان ضریب پخش مؤثر بدست می‌آید.

$$D_{eff} = \frac{-k_1 r_o^2}{\pi^2} \quad (5)$$

شعاع معادل سنجدها نیز می‌تواند از معادله زیر محاسبه شود که در آن L قطر بزرگ و W قطر متوسط و T قطر کوچک میوه سنجد (m) می‌باشند (Mohsenin, 1996).

$$r_o = \frac{(L \times W \times T)^{\frac{1}{3}}}{2} \quad (6)$$

با استفاده از معادله آرهینوس رابطه بین دما و ضریب پخش مؤثر در معادله زیر نشان داده شده است که از این رابطه می-توان انرژی فعال سازی را بدست آورد.

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R_g T_{abs}}\right) \quad (7)$$

که در آن D_0 ضریب آرهینوس (m^2/s)، E_a انرژی فعالساز (kJ/mol)، T_{abs} دمای مطلق (k) و R_g ثابت جهانی گازها می باشد. دمای استفاده شده در معادله (7) دمای محصور شده در محیط خشک کردن می باشد بنابراین بایستی فرض ثابت بودن دما هم در پخش مؤثر و هم در انرژی فعالساز در نظر گرفته شود. معادله (7) می تواند با لگاریتم گیری از طرفین معادله به صورت خطی در آید.

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R_g} \cdot \frac{1}{T_{abs}} \quad (8)$$

انرژی فعالساز E_a را می توان از ترسیم نمودار $\ln D_{eff}$ در مقابل $(1/T_{abs})$ بدست آورد که شیب این خط برابر است با K_2 و عرض از مبدأ آن برابر با $\ln D_0$ می باشد (Barrozo et al., 2001). در طی آزمایش کل زمان خشک شدن، کل انرژی مورد نیاز توسط گرمکنها در هر بار استفاده از خشک کن محاسبه گردید. میزان انرژی مصرفی در هر دوره توسط رابطه (10) اندازه گیری می شود (Koyuncu et al., 2007).

$$K_2 = \frac{-E_a}{R_g} \quad (9)$$

$$E_t = A v \rho_a C_a \Delta t D_t \quad (10)$$

که E_t کل انرژی مصرفی در هر دوره خشک شدن (kWh)، A مساحت ظرف که نمونه آزمایش در آن قرار می گیرد (m^2)، v سرعت باد (m/s)، ρ_a چگالی هوا (kg/m^3)، Δt اختلاف دما، D_t کل زمان خشک شدن هر نمونه (hr) و C_a گرمای ویژه ($kJ/kg \text{ } ^\circ C$) می باشد. میزان انرژی مصرفی برای خشک کردن یک کیلوگرم از سنجد تازه با استفاده از رابطه (10) محاسبه می شود. که E_{kg} میزان انرژی مصرفی برای خشک کردن یک کیلوگرم از سنجد تازه و W_0 وزن اولیه نمونه آزمایشی است.

$$E_{kg} = \frac{E_t}{W_0} \quad (11)$$

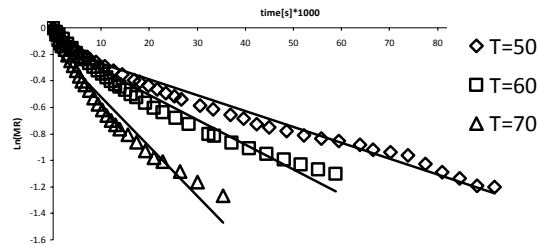
۳- نتایج و بحث

۳-۱ محاسبه ضریب پخش رطوبت مؤثر

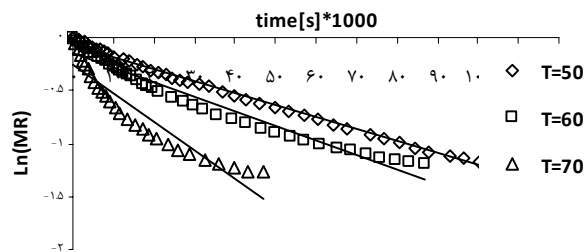
با استفاده از داده های آزمایشگاهی نسبت رطوبت از رابطه (2) بدست آمده و در یک نمودار نیمه لگاریتمی در مقابل زمان (ثانیه)، نظر به رابطه (4) که در آن $\frac{D_{eff} t}{r_0} = F_0$ عدد فوریه در انتقال جرم می باشد، ترسیم شده است. شکل های (1 و 2 و 3)،

لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت $\ln(MR)$ را در مقابل زمان (S) در شرایط سرعت هوای ثابت و سطوح دمایی مختلف نمایش می دهد. همان طور که از تمامی شکلها ملاحظه می شود، خشک شدن میوه های سنجد تنها به صورت یک دوره با نرخ نزولی اتفاق می افتد که این بدین معناست که پخش مایع عامل محرک کنترل کننده فرآیند خشک شدن می باشد. در

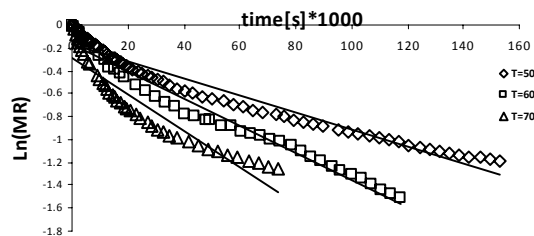
نتیجه، تمامی منحنی‌ها به صورت خط راست می‌باشند. پخش رطوبت مؤثر با استفاده از روش شیب خط محاسبه شده و در جدول (۱) آورده شده‌است.



شکل ۱: ارتباط بین $\ln(mr)$ و زمان (s) در حالت سرعت 0.5 m/s و دماهای مختلف.



شکل ۲: ارتباط بین $\ln(mr)$ و زمان (s) در حالت سرعت 1 m/s و دماهای مختلف.



شکل ۳: ارتباط بین $\ln(mr)$ و زمان (s) در حالت سرعت 1.5 m/s و دماهای مختلف.

جدول ۱: مقادیر مختلف ضریب نفوذ و ضریب همبستگی آزمایش‌های انجام شده در شرایط مختلف دمایی و سرعت هوا.

	$V= 0.5 \text{ m/s}$	R^2	$V= 1 \text{ m/s}$	R^2	$V= 1.5\text{m/s}$	R^2
$T=50^{\circ}\text{C}$	$7.9437\text{E}-11$	0.9722	$6.3550\text{E}-11$	0.9930	$5.5607\text{E}-11$	0.9550

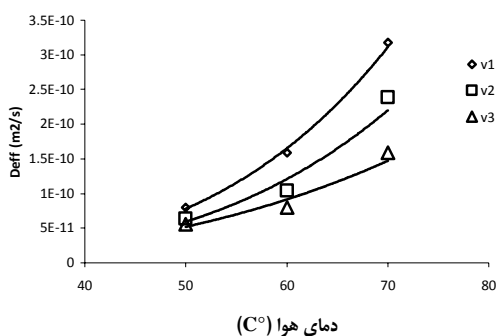
$T=60^{\circ}C$ $1.58887E-10$ 0.9585 $7.9438E-11$ 0.9612 $7.9438E-11$ 0.9699

$T=70^{\circ}C$ $3.1775E-10$ 0.9421 $2.3831E-10$ 0.8904 $1.5888E-10$ 0.8769

دامنه کلی پخش رطوبت مؤثر برای محصولات غذایی مختلف بین 10^{-11} تا 10^{-9} می باشد (Babalis and Belessiotis, 2004). پخش رطوبت مؤثر D_{eff} محاسبه شده برای میوه سنجد در شرایط مختلف دمایی و سرعت هوا از (5.56×10^{-11}) تا (3.18×10^{-10}) تغییر کرده است که بیشترین مقدار آن مربوط به دمای هوای $70^{\circ}C$ و سرعت هوای $0.5m/s$ و کمترین مقدار آن مربوط به دمای هوای $50^{\circ}C$ و سرعت هوای $1.5 m/s$ می باشد.

۳-۱-۱ تأثیر دمای هوا بر ضریب پخش رطوبت مؤثر

در شکل (۴) نمودار ضریب پخش رطوبت مؤثر در سطوح مختلف سرعت هوا در مقابل درجه حرارت هوا ترسیم شده است. معادله رگرسیونی نمایی برای میزان D_{eff} های محاسبه شده، برازش خوبی را نشان می دهد. معادلات مربوطه و همچنین ضرایب R^2 مربوط به معادلات برازش داده شده در جدول (۲) آمده است. همانطور که از شکل نمایان است، افزایش در میزان درجه حرارت هوا در یک سرعت هوای ثابت باعث افزایش در مقدار D_{eff} شده است. افزایش میزان D_{eff} در خشک کردن جریان انتقال هوای داغ، در یک سرعت هوای ثابت به علت افزایش فشار بخار در اطراف هسته سنجد می باشد. با توجه به شکل حداقل مقدار D_{eff} میوه سنجد مربوط به پایین ترین دمای هوا می باشد. نتایج دیگر نشان می دهد که در یک درجه حرارت ثابت، افزایش در سرعت هوا باعث کاهش در میزان D_{eff} می گردد.



شکل ۴: D_{eff} در مقابل دما برای سرعت های هوای مختلف، به هنگام خشک کردن لایه نازک میوه سنجد.

جدول ۲: معادلات برازش داده شده برای D_{eff} در سرعت هوای ثابت.

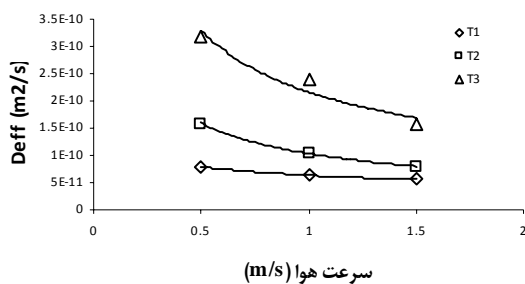
V(m/s)	معادله برازش داده شده	R^2
0.5	$D_{eff} = 8E^{-18}T^{4.1105}$	$R^2=0.9977$

$$1 \quad D_{eff} = 1E^{-17}T^{3.8919} \quad R^2 = 0.9639$$

$$1.5 \quad D_{eff} = 3E^{-16}T^{3.085} \quad R^2 = 0.9475$$

۳-۱-۲ تأثیر سرعت هوا بر ضریب پخش رطوبت مؤثر

در شکل (۵) مقادیر D_{eff} مقابل سرعت هوا در سطوح مختلف درجه حرارت هوا ترسیم شده است و معادله رگرسیونی نمایی بهترین برازش را نسبت به مقادیر ضریب پخش رطوبت مؤثر داشته است. در جدول (۳) معادلات نمایی و ضرایب R^2 مربوطه برای درجه حرارت‌های مختلف آورده شده است. همانطور که در شکل (۵) نمایش داده شده است، سرعت هوا بر میزان پخش رطوبت مؤثر دارای اثرات معکوس است. کمترین مقدار D_{eff} در سرعت هوای ۱.۵ m/s اتفاق افتاده است.



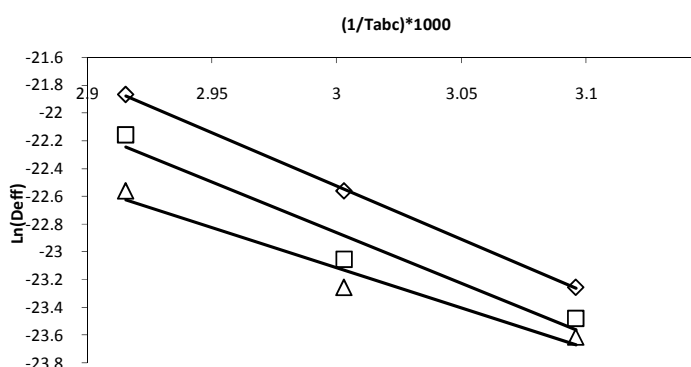
شکل ۵: D_{eff} در مقابل دما برای دماهای مختلف، به هنگام خشک کردن لایه نازک میوه سنجید.

جدول ۳: معادلات برازش داده شده برای D_{eff} در دمای هوای ثابت.

$T (^{\circ}C)$	معادله برازش داده شده	R^2
۵۰	$D_{eff} = 6E^{-11}v^{-0.3244}$	۰.۹۹۹۰ $R^2 =$
۶۰	$D_{eff} = 1E^{-10}v^{-0.6283}$	۰.۹۹۹۲ $R^2 =$
۷۰	$D_{eff} = 2E^{-10}v^{-0.6077}$	۰.۹۳۹۸ $R^2 =$

۲-۳ محاسبه انرژی فعال‌سازی

لگاریتم ضرایب پخش رطوبت مؤثر محاسبه شده در مقابل معکوس درجه حرارت مطلق (برای هر سرعت هوا) با توجه به معادله (۷) ترسیم شده‌است. با استفاده از شیب این خطوط (K_2) انرژی فعال‌سازی (E_a (kJ/mol) محاسبه شده و مقادیر آن‌ها به همراه ضرایب همبستگی مربوطه و ضریب آرنیوس (D_0 (m²/s) در جدول (۴) آورده شده‌است. در شکل (۶) مقادیر محاسبه شده $\ln D_{eff}$ در مقابل معکوس درجه حرارت مطلق بر اساس رگرسیون گیری خطی ترسیم شده‌است. مقادیر بدست آمده برای انرژی فعال‌سازی، از کمینه مقدار ۴۸.۱۸ kJ/mol در سرعت هوای ۱.۵ m/s تا بیشینه مقدار ۶۳.۸۳ kJ/mol در سرعت هوای ۰.۵ m/s متغیر می‌باشد. مقادیر انرژی فعال‌سازی برای مواد غذایی در محدوده کلی ۱۱۰-۱۲۷ kJ/mol قرار دارد (Zogzas, 1996).

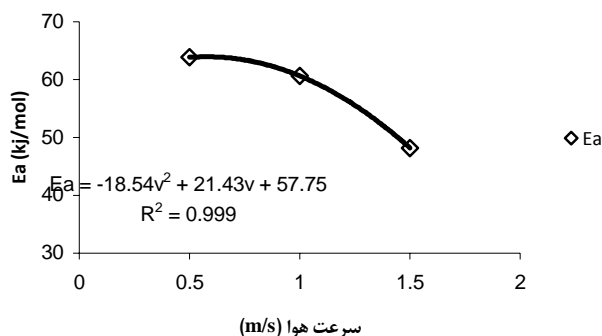


شکل ۶: $\ln D_{eff}$ در مقابل $1 / T_{abc}$ برای سرعت‌های مختلف هوا، به هنگام خشک کردن لایه نازک میوه سنجید.

جدول ۴: انرژی فعال‌سازی و ضریب همبستگی مربوط به سرعت‌های هوای مختلف.

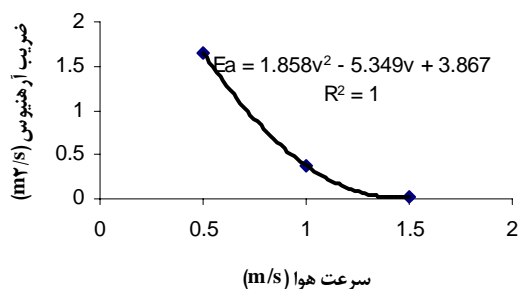
V(m/s)	0.5	1	1.5
E_a (kJ/mol)	۶۳.۸۳	۶۰.۶۴	۴۸.۱۸
R^2	۰.۹۹۹۷	۰.۹۷۹۹	۰.۹۶۰۴
D_0	۱.۶۵۷	۰.۳۷۶	۰.۰۲۴

در شکل (۷) مقادیر E_a در برابر سرعت هوا ترسیم شده‌است و یک معادله درجه دو بر نقطه داده‌ها برازش داده شده‌است.



شکل ۷. تأثیر سرعت هوا بر روی انرژی فعالسازی به هنگام خشک کردن لایه نازک میوه سنجد.

با توجه به شکل (۷) مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت هوا میزان انرژی فعالسازی کاهش یافته‌است. این رفتار می‌تواند به خاطر تأثیرات آیرودینامیکی، با توجه به الگوی جریان خاص تشکیل شده اطراف محصول خشک‌شده باشد. در شکل (۸) مقادیر ضریب آرهنیوس D_0 در مقابل سرعت هوا ترسیم شده‌است و رابطه رگرسیونی بین آن‌ها با استفاده از یک معادله رگرسیون چند جمله‌ای درجه دو برازش داده شده‌است که در شکل نشان داده شده است.

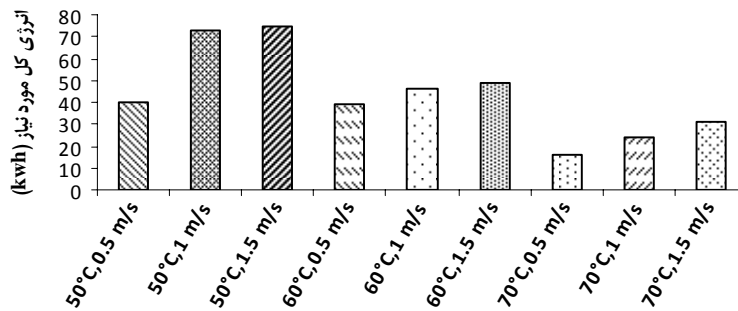


شکل ۸: رابطه سرعت هوا با ضریب آرهنیوس به هنگام خشک کردن لایه نازک میوه سنجد.

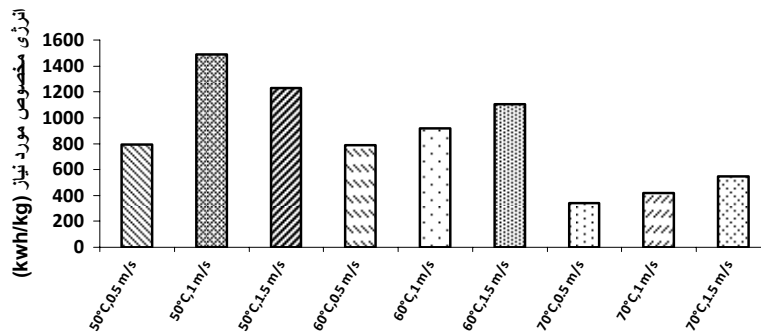
همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، مقادیر D_0 مربوط به سرعت‌های پائین‌تر از ۱.۲۵ m/s قابل چشم‌پوشی می‌باشد.

۳-۳ محاسبه انرژی مصرفی کل و انرژی مخصوص

در طی مرحله خشک شدن، کل انرژی مورد نیاز توسط گرمکن‌ها در هر بار استفاده از خشک کن را می‌توان از رابطه (۹) بدست آورد. همچنین میزان انرژی مورد نیاز برای خشک کردن یک کیلوگرم سنجد تازه می‌تواند از رابطه (۱۰) محاسبه گردد. مقادیر انرژی مصرفی کل و همچنین میزان انرژی مخصوص در شرایط مختلف دمایی در شکل‌های (۹ و ۱۰) نشان داده شده است.



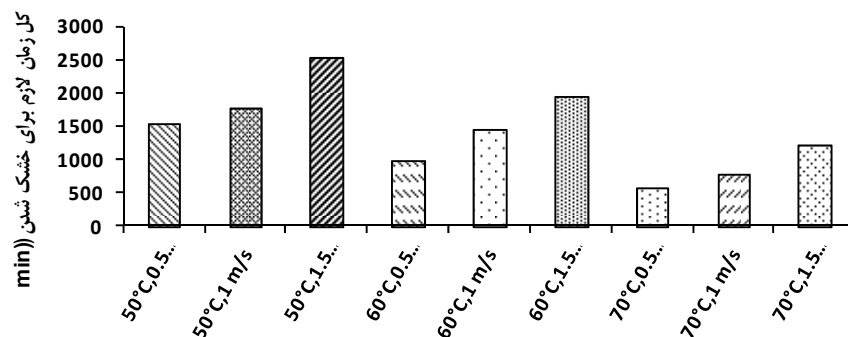
شکل ۹: انرژی کل مورد نیاز برای خشک کردن لایه نازک میوه سنجد در سرعت و دماهای مختلف .



شکل ۱۰: انرژی مخصوص مورد نیاز برای خشک کردن لایه نازک میوه سنجد در سرعت و دماهای مختلف .

۳-۴ مدت زمان کل

همان‌طور که از شکل (۱۱) مشاهده می‌گردد، با افزایش دمای هوا مدت زمان مورد نیاز برای خشک کردن کاهش یافته است ولی افزایش سرعت هوای عبوری تأثیر معکوس بر روی مدت زمان خشک کردن داشته است. کمترین زمان مورد نیاز برای خشک کردن در شرایط خشک شدن دمای 70°C و سرعت هوای 0.5 m/s و بیشترین مقدار آن در دمای 50°C و سرعت هوای 1.5 m/s اتفاق افتاده است.



شکل ۱۱: زمان کل مورد نیاز برای خشک کردن لایه نازک میوه سنجد در سرعت و دماهای مختلف .

۴- نتیجه گیری

رفتار خشک شدن میوه سنجد به صورت لایه نازک در یک خشک کن آزمایشگاهی جریان هوای داغ در دماهای (۶۰، ۵۰ °C) و در سرعت های ۰.۵ و ۱.۵ m/s بررسی شد. با توجه به نتایج این تحقیق مشخص گردید که خشک شدن میوه سنجد تنها به صورت یک دوره با نرخ نزولی اتفاق می افتد. افزایش میزان درجه حرارت هوا در یک سرعت هوای ثابت باعث افزایش در مقدار D_{eff} شده ولی افزایش سرعت باد در یک دمای ثابت باعث کاهش D_{eff} است. پخش رطوبت مؤثر D_{eff} محاسبه شده برای میوه سنجد در شرایط مختلف دمایی و سرعت هوا از (5.56×10^{-11}) تا (3.18×10^{-10}) تغییر پیدا نموده است. مقادیر بدست آمده برای انرژی فعال سازی، از کمینه مقدار 48.18 kJ/mol در سرعت هوای 1.5 m/s تا بیشینه مقدار 63.83 kJ/mol در سرعت هوای 0.5 m/s متغیر می باشد و افزایش سرعت باد منجر به کاهش میزان انرژی فعال سازی می شود. نتایج نشان داد که افزایش دما و سرعت هوا به ترتیب باعث افزایش و کاهش میزان انرژی کل مصرفی و انرژی مخصوص مورد نیاز می گردد. با توجه به نتایج بدست آمده، مقادیر حاصله برای انرژی کل و انرژی مخصوص مورد نیاز برای خشک کردن لایه نازک سنجد به ترتیب در دامنه $16.34 - 75.04 \text{ kWh}$ و $1230.366 - 340.558 \text{ kWh/kg}$ قرار داشته است. حداقل مدت زمان مورد نیاز برای خشک شدن در دمای 70°C و سرعت 0.5 m/s اتفاق افتاده است.

۵- منابع

- [۱]. Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A., and Tabil, L.G. (2007). Thin-drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of Food Engineering*, 78: 98–108.
- [۲]. Sahin, A. Z., & Dincer, I. (2002). Graphical determination of drying process and moisture transfer parameters for solids drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45 (16): 3267–3273.
- [۳]. Rafiee, S., Keyhani, A. and jafari, A. (2008). Modeling effective moisture diffusivity of wheat (Tajan) during air drying. *International Journal of Food Properties*, v(11): 1–10.
- [۴]. 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.
- [۵]. Pahlavanzadeh, H., Basiri, A., & Zarrabi, M. (2001). Determination of parameters and pretreatment solution for grape drying. *Drying Technology*, 19(1): 217–226.
- [۶]. Doymaz I., Pala M. (2005). The effects of dipping pretreatment on air-drying rates of seedless grapes. *J. Food. Eng*, 52: 413–7.
- [۷]. Doymaz I, Pala M. (2003). The thin-layer drying characteristics of corn. *J. Food. Eng*, 60:125–30.
- [۸]. Doymaz I. (2006). The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *J. Food. Eng*, 79:243–8.
- [۹]. Goyal R.K, Kingsly A.R.P, Manikantan M.R, Ilyas S.M. (2007). Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. *J. Food. Eng*, 79:176–80.
- [۱۰]. Doymaz, I. 2005. Drying kinetics of black grapes treated with different solutions. *J. Food. Eng*, 76: 212-217.
- [۱۱]. Ozdemir M, Devres YO. (1999). The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *J Food Eng*. 42:225–33.

- [۱۲]. Basunia, M.A and Abe, T. (2001). Thin layer solar drying characteristics of rough rice under natural convection. *J. Food. Eng.* 47: 225-301.
- [۱۳]. Simal, S., A. Femenia., M.C. Garau and C. Rossello. (2005). Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *J. Food. Eng.* 66: 323–328.
- [۱۴]. Karathanos, V. T., Villalobas, G., and Saravacos, G. D. (1990). Comparison of two methods of estimation of the effective diffusivity from drying data. *J. Food. Science*, 55(1), 218–223.
- [۱۵]. Srinivasa Rao, P., Satish, B., and Goswami, T.K. (2007). Modelling and optimization of drying variables in thin layer drying of parboiled paddy. *J. Food. Eng.* 78: 480–487.
- [۱۶]. Pokharkar, S.M., Prasad, S. (2000). Diffusivity model in osmotically dehydrated pineapple. In *Proceedings of the international agricultural engineering conference, Bangkok, Thailand, December 4–7*, pp. 205–211.
- [۱۷]. Vega, A., Uribe, E., Lemus, R., & Miranda, M. (2007). Hot-air drying characteristics of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) and influence of temperature on kinetic parameters. *LWT.* 40: 1698 – 1707.
- [۱۸]. Doymaz, I. (2006). Drying kinetics of black grapes treated with different solutions. *Journal of Food Engineering.* 76 : 212–217.
- [۱۹]. Rizvi, S.S.H. (1986). Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: Rao, M.A., Rizvi, S.S.H. (Eds.), *Engineering Properties of Foods*. Marcel Dekker Inc, New York, pp. 133–214.
- [۲۰]. Babalis, S. J., and Belessiotis, V. G. (2004). Influence of drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering.* 65,449–458.
- [۲۱]. Doymaz, I. (2005). Influence of pretreatment solution on the drying of Sour-Cherry. *Journal of Food Engineering.* 78: 591–596.
- [۲۲]. Mohsenin, N. N. (1996). *Physical characteristics: physical properties of plant and animal materials*. Gordon and Breach Science publisher.
- [۲۳]. Barrozo, M. A. S., Souza, A. M., Costa, S. M., & Murata, V. V. (2001). Simultaneous heat and mass transfer between air and soybean seeds in a concurrent moving bed. *International Journal of Food Science and Technology*, 36(4), 393–399
- [۲۴]. Koyuncu T, Pinar Y, Lule F. (2007). Convective drying characteristics of azarole red (*Crataegus monogyna* Jacq.) and yellow (*Crataegus aronia* Bosc.) fruits. *J Food Eng.* 78:1471–5.
- [۲۵]. Babalis SJ, Belessiotis VG. (2004). Influence of drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *J Food Eng.* 65:449–58.
- [۲۶]. Zogzas, N. P., Maroulis, Z. B., & Marinos-Kouris, D. (1996). Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology*, 14(10), 2225–2253.

Abstract

Thin layer drying of Russian olive (*Elaeagnus gastifolial* L.) fruit using a hot air dryer in order to calculate effective moisture diffusivity, activation energy and energy consumption has been evaluated in this article. The selected variables included three levels of air velocity of 0.5, 1 and 1.5 m/s and three air temperature levels of 50, 60 and 70°C. Fick's second law has been used as principal equation to calculate effective moisture diffusivity coefficient. Increased air temperature increased effective moisture diffusivity but increase in air temperature had an inverse effect. Effective moisture diffusivity (D_{eff}) calculated for russian olive fruit in different temperatures and air velocities ranged between 5.56×10^{-11} to 3.18×10^{-10} . Activation energy values were calculated using an Arrhenius type equation based on the relationship between temperature and effective moisture diffusivity coefficient. The resulting values for activation energy had a minimum of 48.18 kJ/mol in 1.5 m/s air velocity up to a maximum of 63.83 kJ/mol in 0.5 m/s air velocity. According to the results, the values obtained for total and specific energy consumption for thin layer russian olive. obtained results, The values for total and specific energy required in thin layer drying russian olive ranged between 16.34-75.04 (kWh) and 340.558-1230.366 (kWh / kg) respectively.