

ضریب پخش موثر و انرژی فعال سازی ریحان در خشک کردن لایه‌ی نازک با هوای داغ

امین طاهری گراوند^{۱*}، شاهین رفیعی^۱، علیرضاکیهانی^۱، سید مهدی جعفری^۲

^۱ گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی و فن‌آوری کشاورزی، تهران، ایران

^۲ گروه صنایع غذایی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۷/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۰/۱۴

چکیده

هدف از انجام این مطالعه، محاسبه‌ی ضریب پخش موثر و انرژی فعال سازی برگ‌های ریحان در خشک کردن نازک می‌باشد. آزمایش‌های خشک کردن لایه‌ی نازک تحت پنج سطح دمای خشک کن ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه‌ی سلسیوس، سه سطح سرعت هوای ورودی ۱/۵، ۲ و ۲/۵ و سه سطح رطوبت هوای ورودی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد انجام شد. برای توضیح انتقال رطوبت از لایه‌های نازک ریحان، مدل فیک پخش مورد استفاده قرار گرفت. نتایج، نشان داد مقدار ضریب پخش موثر در نمونه‌های خشک شده در دماهای بین ۴۰ تا ۸۰ درجه‌ی سلسیوس، از $1/05009 \times 10^{-11}$ تا $2/24941 \times 10^{-10}$ m²/s تغییر می‌کند. با استفاده از رابطه‌ی آرنیوس لازم برای فعال سازی، از $44/04$ تا 60 kJ/mol و ثابت ضریب پخش از $1/29618391 \times 10^{-4}$ تا $1/31327786 \times 10^{-1}$ m²/s به دست آمد که نشان‌دهنده‌ی اثر دمای خشک کن، سرعت هوا و رطوبت نسبی هوای ورودی روی پدیده پخش می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: خشک کردن، مدل فیک، ضریب پخش، انرژی فعال‌سازی، ریحان، رطوبت نسبی.

*مسئول مکاتبه: amin.taheri49@yahoo.com

amintaheri@ut.ac.ir

دویماز (۲۰۰۶) خشک شدن نعناع را در دماهای ۳۵ تا ۶۰ درجه‌ی سلسیوس مورد آزمایش قرار دادند. داده‌های حاصل از آزمایش با مدل‌های تجربی و نیمه‌تجربی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای توضیح انتقال رطوبت نعناع، مدل پخش فیک مورد استفاده قرار داد. پخش ۲ از $3/067 \times 10^{-9}$ تا $1/941 \times 10^{-8}$ متر بر مجذور ثانیه در محدوده‌ی دمایی آزمایش شده، متغیر بود. وابستگی پخش به دما به درستی توسط رابطه‌ی آرنیوس ۳ توضیح داده شد. انرژی فعال‌سازی برای پخش رطوبت در طول خشک شدن $62/96 \text{ KJ/kmol}$ به دست آمد (۵). موسیگا و اولوال در سال ۲۰۰۵ برای توضیح انتقال رطوبت برگ کلم، مدل پخش فیک مورد استفاده قرار دادند. نتایج، نشان داد مقدار ضریب پخش موثر در نمونه‌های خشک شده در دماهای بین ۳۰ تا ۶۰ درجه‌ی سلسیوس و سرعت هوای یک متر بر ثانیه، از $14/9 \times 10^{-10}$ تا $55/9 \times 10^{-9}$ متر بر مجذور ثانیه تغییر می‌کند که نشان‌دهنده‌ی اثر دمای هوای خشک کن، روی پدیده‌ی پخش می‌باشد. با استفاده از رابطه‌ی آرنیوس انرژی لازم برای فعال‌سازی از $36/115 \text{ kJ/mol}$ به دست آمد (۱۱). آغباشلو و همکاران در زمینه‌ی اثر شرایط خشک شدن بر روی پخش رطوبت و انرژی فعال‌سازی زرشک، بررسی کردند. آزمایش‌ها در دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه‌ی سلسیوس و با سرعت هوای $0/7, 0/5, 1$ و 2 متر بر ثانیه، انجام شد. بر اساس نتایج، مقدار ضریب پخش موثر از $3/32 \times 10^{-10}$ تا 9×10^{-9} متر بر مجذور ثانیه متغیر بود (۱).

هدف از انجام این تحقیق، محاسبه‌ی ضریب پخش موثر و انرژی فعال‌سازی برگ‌های ریحان در شرایط مختلف دما، رطوبت و سرعت هوای خشک کن را در هنگام خشک کردن با هوای داغ در خشک‌کن تحقیقاتی می‌باشد.

گیاه ریحان (*Ocimum basilicum L.*)، یک‌ساله و از گیاهان دارویی ارزشمندی است که نه تنها در صنایع غذایی، داروسازی، دندانپزشکی، عطرسازی و صنایع آرایشی و بهداشتی مصارف و کاربردهای فراوانی دارد (۱۳) بلکه در طب سنتی و مدرن نیز موارد استفاده‌ی بسیار زیادی دارد (۱۶). خشک کردن، یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری مواد غذایی است. با استفاده از این روش، علاوه بر جلوگیری از فساد ماده‌ی غذایی به وسیله‌ی میکروارگانیسم‌ها و یا واکنش‌های شیمیایی، وزن ماده‌ی غذایی کاهش یافته و صرفه‌جویی بسیاری در هزینه‌های حمل و نقل و نگهداری حاصل می‌شود. انجام صحیح عملیات خشک کردن به علت امکان بروز برخی تغییرات نامطلوب در ماده‌ی غذایی اهمیت زیادی دارد. برای کاهش آب مواد غذایی تا جایی که در طولانی مدت قابل نگه‌داری باشند، به ویژه آن‌هایی که دارای ترکیبات قندی هستند (نظیر میوه‌ها)، زمانی طولانی و دمایی نسبتاً بالا مورد نیاز است که همین عوامل موجب بروز برخی تغییرات نامطلوب می‌شود که از جمله می‌توان به تغییرات رنگ، طعم، عطر، کاهش مواد مغذی، افزایش وزن مخصوص (به علت چروکیدگی شدید) و کاهش ظرفیت آبگیری مجدد محصول خشک شده اشاره کرد (۶ و ۹).

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 پروسه، کنترل کیفی، انتخاب نوع انبار کردن مناسب و چگونگی جا به جایی مناسب محصولات، لازم می‌باشد. ضریب پخش، یکی از مشخصات محصولات کشاورزی است و مقدار آن بستگی به شرایط داخل ماده، دارد. پخش رطوبت موثر، همه‌ی مکانیزم‌های ممکن حرکت رطوبت در ماده را توصیف می‌کند مثل: پخش مایع، پخش بخار، پخش سطحی، جریان کاپیلاری و جریان هیدرودینامیکی. حرکت رطوبت که شامل پخش رطوبت در ماده‌ی جامد می‌باشد، دارای پروسه‌ی پیچیده‌ای است. دانستن درباره‌ی پخش رطوبت موثر برای طراحی و مدل‌سازی پروسه‌ی انتقال جرم، مثل آب‌زدایی، جذب سطحی و دفع رطوبت در طول انبارداری، لازم می‌باشد (۱۴).

و ۲/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. تمامی آزمایش‌ها در سه تکرار صورت گرفت.

مدل‌سازی منحنی خشک‌شدن

قانون دوم فیک پخش که در معادله‌ی (۱) نشان داده شده است، به طور وسیعی برای توصیف پروسه‌ی خشک کردن در طول کاهش نرخ رطوبت برای بیش تر مواد بیولوژیکی استفاده می‌شود (۱۵).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla [D_{eff} (\nabla M)] \quad (1)$$

که در آن:

D ضریب پخش رطوبت موثر (m^2/s)، M محتوی رطوبت ($kg \text{ water}/kg \text{ dry solid}$) و t زمان (s) می‌باشد. D نشان‌دهنده‌ی قسمت هدایت در تمام مکانیزم‌های انتقال رطوبت است. این پارامتر معمولاً از منحنی‌های خشک کردن آزمایشگاهی تعیین می‌شود. بیش‌ترین فرض در تعیین این پارامتر، این است که خشک کردن به انتقال فقط جرم محدود می‌شود و نیز پروسه‌ی خشک کردن به صورت ایزوترم (هم دما) در تمام نمونه‌ها اتفاق می‌افتد.

رابطه‌ی بین دما و ضریب پخش موثر، در معادله‌ی (۲) نشان داده شده است (۱۸):

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT_a}\right) \quad (2)$$

که در آن:

D_0 ثابت ضریب پخش m^2/s ، E_a انرژی فعال‌سازی kJ/mol ، R ثابت جهانی گازها kJ/mol ، T_a دمای مطلق هوا K می‌باشد. انرژی فعال‌سازی از طریق نمودار $\ln(D)$ در مقابل $(1/T)$ به دست می‌آید. دمای استفاده شده در معادله‌ی فوق دمای محصور شده در محیط خشک کردن می‌باشد. بنابراین، باید فرض هم دما بودن هم در پخش موثر و هم در انرژی فعال‌سازی مد نظر قرار گیرد برگ‌های ریحان باید به صورت باریکه‌های نامحدود مورد بررسی قرار گیرند زیرا ضخامت این ورقه‌ها (میلی متر) در برابر سطح برگ (حدود ۳۷ میلی متر مربع) بسیار کوچک می‌باشد.

پخش رطوبت برای باریکه نامحدود توسط معادله‌ی (۳) که توسط کرانک (۴)، پیشنهاد شده است، محاسبه می‌شود که

۲- مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه‌ها

در ابتدا، سبزی ریحان از بازار میوه و تره بار کرج تهیه شد. خلاصه‌ای از برخی مشخصه‌های فیزیکی اندازه‌گیری شده برای ریحان در جدول ۱ آمده است. سپس برای جلوگیری از تغییرات فیزیکی و شیمیایی به انبار با دمای 4 ± 0.5 درجه‌ی سلسیوس منتقل شدند (۱۲). برای انجام این آزمایش از خشک‌کن تحقیقاتی لایه‌ی نازک که در گروه ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران طراحی و ساخته شده است، استفاده گردید (۱۷). این خشک‌کن از یک فن سانتریفوژ برای دمیدن هوا و ده‌المنت برقی برای گرم کردن هوای ورودی، از یک سامانه‌ی رطوبت‌گیر و رطوبت‌زن برای کنترل رطوبت هوای ورودی به محفظه‌ی خشک‌کن و دو حس‌گر دما و رطوبت برای اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی هوای خشک‌کننده تشکیل شده است. برای ارتباط حس‌گرها و رله‌ها و کتاکتورها از یک میکروکنترلر ATMEGA32 استفاده شده است. میکروکنترلر، اطلاعات مربوط به حس‌گر دما و رطوبت را از طریق صفحه کلید دریافت کرده و هم‌زمان فرمان‌های کنترلی لازم برای کنترل دما و رطوبت هوای خشک‌کن را اجرا می‌کند. برای اجرای الگوریتم کنترل و پایش اطلاعات، برنامه میکروکنترلر در محیط C+ طراحی و پیاده‌سازی گردیده است که اطلاعات مربوط به حس‌گرهای دما و رطوبت و نیز روشن یا خاموش بودن هر یک از المنت‌ها، سامانه رطوبت‌گیر و رطوبت‌زن را در هر لحظه نمایش می‌دهد. برای آماده کردن خشک‌کن، پس از روشن کردن رایانه، فن، ترازو، المنت‌ها و سیستم جمع‌آوری داده، سرعت فن برای آزمایش مورد نظر تنظیم می‌شود. برای اندازه‌گیری سرعت از یک حس‌گر دستی مدل TESTO405-V1 و یک سرعت‌سنج پروانه‌ای استفاده شد. بعد از آن، نرم‌افزار پایش و کنترل اجرا شده و دمای مورد نظر برای آزمایش در نرم‌افزار تنظیم می‌گردید. برای رسیدن شرایط سیستم به حالت پایدار، کلیه‌ی آزمایش‌ها ۳۰ دقیقه بعد از روشن کردن سیستم شروع می‌شد. سپس سینی حاوی نمونه‌ها (حاوی ۴۰ گرم نمونه) با احتیاط در محفظه‌ی خشک‌کن قرار داده می‌شد. دماهای مورد بررسی در این تحقیق ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه‌ی سلسیوس، رطوبت نسبی هوا ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد و سرعت هوای ورودی ۱/۵، ۲

متفاوت بود. رطوبت براساس وزن برگ های ریحان که در زمان های مختلف (برحسب دقیقه) خشک شدن اندازه گیری شد، محاسبه گردید. بررسی نمودارهای شکل (۱) نشان می دهد که افزایش سرعت هوای ورودی از ۱/۵ تا ۲/۵ متر بر ثانیه سبب کاهش مدت زمان خشک شدن ریحان شد. همچنین با بررسی نمودارها مشخص می شود که در دماهای بالا تفاوت بین مدت زمان خشک شدن در سرعت های متفاوت قابل نظر کردن است در حالی که این تفاوت در دماهای پایین معنی دار است. به عبارت دیگر، تاثیر سرعت هوای عبوری بر مدت زمان خشک شدن در دماهای پایین بیش تر است. این نتیجه با نتیجه ی گزارش شده توسط آغباشلو و همکاران در مورد خشک شدن لایه ی نازک زرشک مطابقت دارد (۲).

منحنی دمای خشک شدن در برابر مدت زمان خشک شدن در رطوبت های ثابت هوای عبوری برای ریحان شکل (۲) نشان داده شده است. بررسی نمودارهای این شکل، نشان می دهد که کاهش رطوبت هوای ورودی از ۶۰٪ تا ۲۰٪ سبب کاهش مدت زمان خشک شدن ریحان شد. همچنین با بررسی نمودارها مشخص می شود که در دماهای بالا تفاوت بین مدت زمان خشک شدن در رطوبت های متفاوت قابل نظر کردن است در حالی که این تفاوت در دماهای پایین، معنی دار است. به عبارت دیگر، تاثیر رطوبت هوای عبوری بر مدت زمان خشک شدن در دماهای پایین بیش تر است.

تاثیر افزایش دما بر کاهش مدت زمان خشک شدن بیش تر از تاثیر افزایش سرعت بر کاهش مدت زمان خشک شدن است. این نتیجه با نتیجه ی گزارش شده توسط کایا و آیدین در مورد خشک شدن لایه ی نازک گیاهان دارویی مطابقت دارد (۸).

با مشاهده ی شکل های ۱ و ۲ خواهید دید که تاثیر افزایش دما بر کاهش مدت زمان خشک شدن بیش تر از تاثیر افزایش سرعت بر کاهش مدت زمان خشک شدن است. این نتیجه با نتیجه ی گزارش شده توسط آغباشلو و همکاران در مورد خشک شدن لایه ی نازک زرشک مطابقت دارد (۲).

ضریب پخش رطوبت موثر D ، توسط معادله ی (۵) محاسبه شد و در جدول (۲) نشان داده شده است. مشاهده می شود که مقدار ضریب پخش موثر در نمونه های خشک شده در دماهای بین ۴۰ تا ۸۰ درجه ی سلسیوس، از 1.05×10^{-11} تا $2.24941 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ تغییر می کند. مشاهده می شود که کم ترین

فرض هایی که برای این معادله در نظر گرفته می شود، به شرح زیر است:

(۱) رطوبت در ابتدا به صورت یکنواخت، درون جرم نمونه پخش می شود.

(۲) انتقال جرم به صورت منظم به طرف مرکز انجام می گیرد.

(۳) محتوی رطوبت سطحی نمونه ی آن ها با شرایط هوای محیط به تعادل می رسد.

(۴) مقاومت سطح نمونه در برابر انتقال جرم تفاوت قابل اغمازی با مقاومت داخلی آن دارد.

(۵) انتقال جرم فقط با پخش انجام می گیرد.

(۶) ضریب پخش، ثابت می باشد و افت آن قابل چشم پوشی است.

(۳)

$$MR = \frac{M}{M_0} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 Dt}{4L^2}\right)$$

که در آن:

MR نسبت رطوبت، L ضخامت ورقه ها (m) و n عدد صحیح مثبت می باشد. فقط قسمت اول معادله ی (۳) برای زمان های طولانی خشک کردن، استفاده می شود (۱۰):

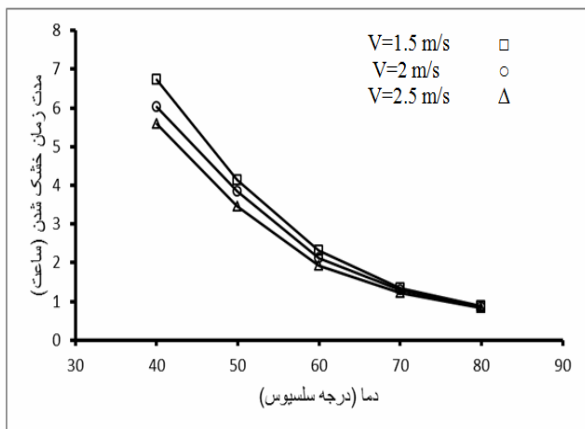
$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 Dt}{4L^2}\right) \quad (4)$$

ضریب k_0 با رسم منحنی $\ln(MR)$ در مقابل زمان محاسبه می شود، مطابق معادله ی (۴) که در زیر آمده است (۱۴):

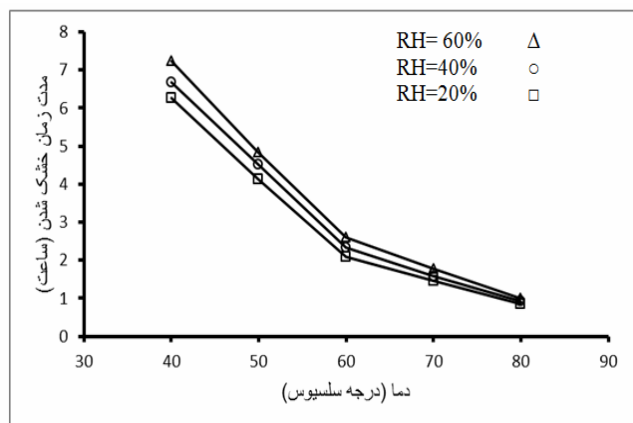
$$k_0 = \frac{\pi^2 D}{4L^2} \quad (5)$$

۳- نتایج و بحث

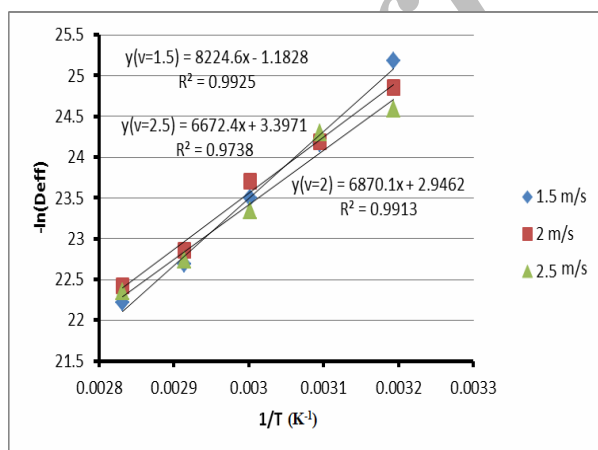
آزمایش ها در پنج سطح دمایی ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه ی سلسیوس و سرعت هوای ورودی ۱/۵، ۲، ۲/۵ m/s و رطوبت نسبی های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد برای برگ های ریحان در سه تکرار انجام شد. رطوبت برگ های ریحان در شروع خشک کردن (w.b.) ۸۷/۵٪ بود که در پایان خشک کردن به (w.b.) ۱۰٪ رسید. خشک کردن تا زمانی ادامه داشت که تغییرات رطوبت برگ ها بسیار کم شده در نتیجه شدت خشک شدن تقریباً صفر شود و نیازی به خشک کردن تا رطوبت تعادلی نیست (۷). مدت خشک کردن نمونه ها برای مختلف شرایط



شکل ۱- منحنی دمای خشک شدن در برابر مدت زمان خشک شدن در سرعت‌های ثابت هوای عبوری (در رطوبت هوای ۴۰٪)



شکل ۲- منحنی دمای خشک شدن در برابر مدت زمان خشک شدن در سرعت‌های ثابت هوای عبوری (در سرعت ۱/۵ m/s)

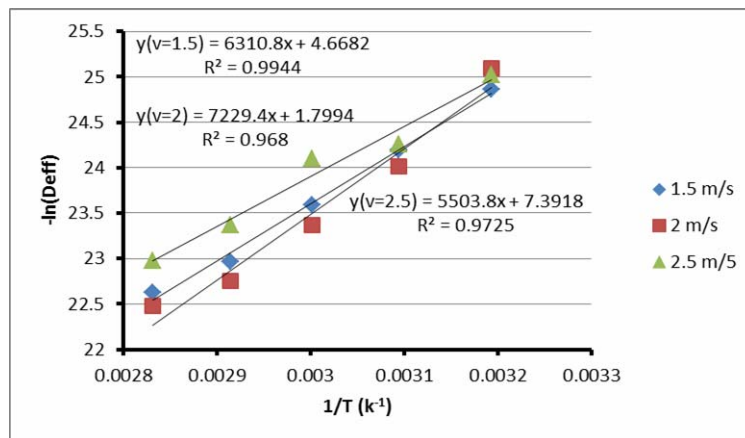


شکل ۳- ارتباط بین ضریب پخش موثر و دما برای رطوبت نسبی ۲۰٪

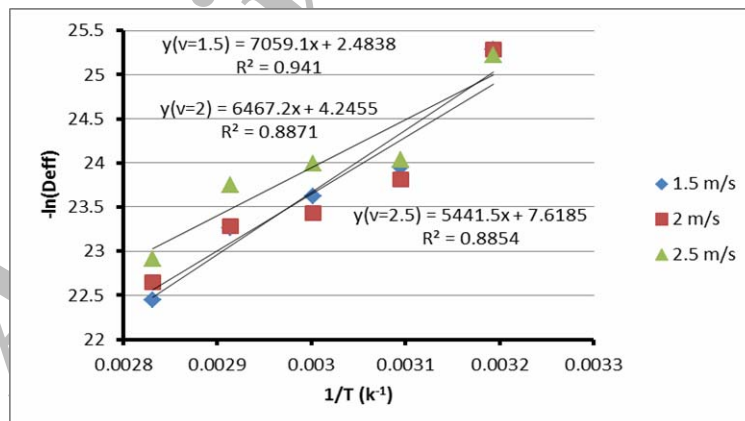
مقدار ضریب پخش موثر در دمای ۴۰ درجه‌ی سلسیوس است. در حالی که بیش‌ترین مقدار ضریب پخش موثر در دمای ۸۰ درجه‌ی سلسیوس است. به‌طور کلی، میزان ضریب پخش رطوبت موثر برای مواد غذایی در محدوده‌ی 10^{-11} تا $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ تغییر می‌کند. دانستن پخش رطوبت برای طراحی فرآیند، کنترل کیفی، مسائل مربوط به انبار کردن و چگونگی جابه‌جایی مناسب محصولات، لازم می‌باشد (۱ و ۳).

محاسبات، نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ی مستقیم بین پخش موثر و درجه‌ی حرارت بود که نشان می‌دهند هر چه دما افزایش یابد، ضریب موثر پخش نیز افزایش می‌یابد. دمای ۸۰ بالاترین ارزش D را در شرایط مختلف رطوبت و سرعت هوای ورودی دارد. با استفاده از رابطه‌ی آرنیوس که در معادله‌ی ۲ آمده است، وابستگی ضریب موثر پخش به دما به درستی توضیح داده شد. انرژی فعال‌سازی و ثابت ضریب پخش از شیب نمودار آرنیوس ($\ln(D) - 1/T$) محاسبه شد و در جدول (۳) آمده است. دامنه‌ی تغییرات ثابت ضریب پخش موثر برای ریحان از $1.29618391 \times 10^{-4}$ تا $3.1327786 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ در محدوده‌ی دمایی ۴۰ تا ۸۰ درجه‌ی سلسیوس به دست آمد. انرژی فعال‌سازی برای ریحان در محدوده‌ی ۴۴/۰۴ تا ۶۰ kJ/mol متغیر بود.

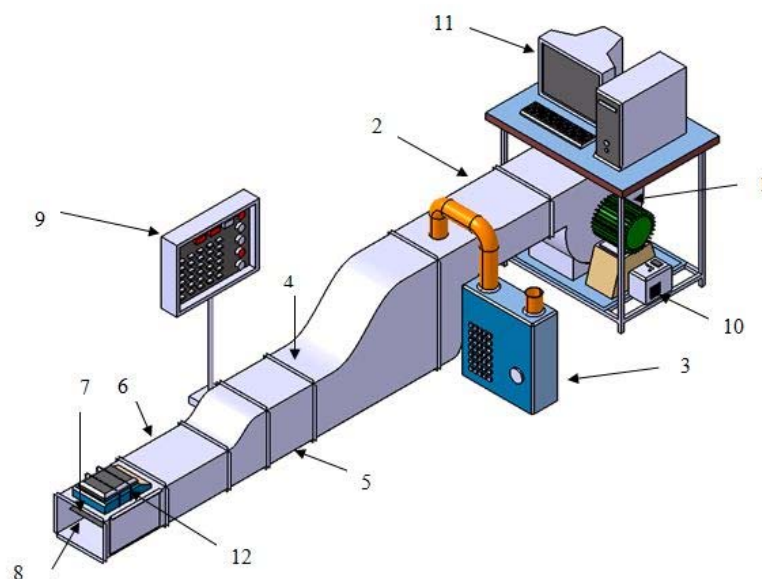
با افزایش رطوبت نسبی هوا و همچنین با افزایش سرعت هوای خشک‌کن، کاهش انرژی فعال‌سازی مشاهده می‌شود. ارتباط بین ضریب موثر پخش و دما، توسط شکل‌های ۳ تا ۵ برای شرایط مختلف، نشان داده شده است. این شکل‌ها از طریق رگرسیون خطی به دست آمده‌اند. ضریب تبیین (R^2) برای ارتباط بین ضریب پخش موثر و دما در سه سطح رطوبت هوا و سه سطح سرعت هوا، مورد بررسی بین ۰/۹۹۴۴ تا ۰/۸۸۵۴ حاصل شد که بالاترین مقدار آن (۰/۹۹۴۴) برای سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه و رطوبت نسبی ۴۰٪ می‌باشد. انرژی فعال‌سازی همه‌ی نمونه‌ها کم‌تر از ۶۰ kJ/mol و دامنه‌ی آن از ۴۴/۰۳۷ تا ۵۹/۲۰۵ kJ/mol متغیر بود.



شکل ۴- ارتباط بین ضریب پخش موثر و دما برای رطوبت نسبی ۰.۴۰٪



شکل ۵- ارتباط بین ضریب پخش موثر و دما برای رطوبت نسبی ۰.۶۰٪



شکل ۶- طرحواره خشک کن آزمایشگاهی ساخته شده

۱- فن ۲- رطوبت گیر ۳- رطوبت زن ۴- حس گر رطوبت ۵- المنتها ۶- محفظه‌ی مستقیم کننده
۷- حس گر دما ۸- سینی نمونه‌ها ۹- تابلوی کنترل ۱۰- اینورتر ۱۱- رایانه ۱۲- ترازوی دیجیتال

جدول ۱- برخی از مشخصه‌های فیزیکی اندازه گیری شده برای ریحان

خواص فیزیکی	ریحان
میزان رطوبت بر پایه تر (%)	$93/5 \pm 1$
طول (mm)	$34/59 \pm 1/09$
عرض (mm)	$17/07 \pm 0/88$
ضخامت (mm)	$0/39 \pm 0/1$
جرم (g)	$0/14 \pm 0/02$
سطوح تصویر (mm ²)	$31/23 \pm 451/2$
ضریب اصطکاک استاتیکی روی چوب	$0/47 \pm 0/01$
ضریب اصطکاک استاتیکی روی آهن گالوانیزه	$0/65 \pm 0/02$
ضریب اصطکاک استاتیکی روی شیشه	$0/63 \pm 0/01$

جدول ۲- ضریب پخش موثر در برگ‌های ریحان در شرایط مختلف خشک شدن

ضریب پخش موثر (m^2/s)					سرعت هوای خشک کن (m/s)	رطوبت هوا (%)
$۸.0^{\circ}C$	$۷.0^{\circ}C$	$۶.0^{\circ}C$	$۵.0^{\circ}C$	$۴.0^{\circ}C$		
$۲/۲۴۹۴۱ \times 10^{-۱۰}$	$۱/۴۰۸۷۶ \times 10^{-۱۰}$	$۶/۲۲۷۳۶ \times 10^{-۱۱}$	$۳/۱۸۶۷۱ \times 10^{-۱۱}$	$۱/۱۶۰۹۶ \times 10^{-۱۱}$	۱/۵	۲۰
$۱/۸۳۶۹۹ \times 10^{-۱۰}$	$۱/۱۸۷۳۲ \times 10^{-۱۰}$	$۵/۰۵۱۵۸ \times 10^{-۱۱}$	$۳/۱۳۷۱۴ \times 10^{-۱۱}$	$۱/۵۹۸۶۸ \times 10^{-۱۱}$	۲	۲۰
$۱/۹۶۳۵۸ \times 10^{-۱۰}$	$۱/۳۳۸۲۷ \times 10^{-۱۰}$	$۷/۳۰۴۱۶ \times 10^{-۱۱}$	$۲/۸۱۲۲۵ \times 10^{-۱۱}$	$۲/۰۹۶۸۸ \times 10^{-۱۱}$	۲/۵	۲۰
$۱/۴۹۳ \times 10^{-۱۰}$	$۱/۰۶۱۱ \times 10^{-۱۰}$	$۵/۷۱۴۶۷ \times 10^{-۱۱}$	$۳/۱۲۲۹۷ \times 10^{-۱۱}$	$۱/۵۹۸۶۳ \times 10^{-۱۱}$	۱/۵	۴۰
$۱/۷۳۶۴۴ \times 10^{-۱۰}$	$۱/۳۱۳۳۱ \times 10^{-۱۰}$	$۷/۱۲۸۴۶ \times 10^{-۱۱}$	$۳/۷۹۳۳۳ \times 10^{-۱۱}$	$۱/۲۶۶۵۵ \times 10^{-۱۱}$	۲	۴۰
$۱/۰۵۱۱۴ \times 10^{-۱۰}$	$۷/۱۲۴۹۶ \times 10^{-۱۱}$	$۳/۴۲۵۸۵ \times 10^{-۱۱}$	$۲/۹۲۸۶۱ \times 10^{-۱۱}$	$۱/۳۶۲۹ \times 10^{-۱۱}$	۲/۵	۴۰
$۱/۷۸۰۶۹ \times 10^{-۱۰}$	$۷/۹۱۸۰۳ \times 10^{-۱۱}$	$۵/۵۳۷۰۲ \times 10^{-۱۱}$	$۳/۰۴۷۲۸ \times 10^{-۱۱}$	$۱/۰۴۷۲۸ \times 10^{-۱۱}$	۱/۵	۶۰
$۱/۴۵۶۲۱ \times 10^{-۱۰}$	$۷/۷۳۳۹۲ \times 10^{-۱۱}$	$۶/۶۴۸۱۲ \times 10^{-۱۱}$	$۴/۵۳۱۳۸ \times 10^{-۱۱}$	$۱/۰۵۰۰۹ \times 10^{-۱۱}$	۲	۶۰
$۱/۱۱۶۸۲ \times 10^{-۱۰}$	$۴/۸۴۷۱ \times 10^{-۱۱}$	$۳/۸۲۱۵۳ \times 10^{-۱۱}$	$۳/۶۵۳۵۶۷ \times 10^{-۱۱}$	$۱/۱۱۲۱۹ \times 10^{-۱۱}$	۲/۵	۶۰

جدول ۳- ثابت ضریب پخش و انرژی فعال سازی برای ریحان

انرژی فعال سازی E_a (kJ/mol)	ثابت ضریب پخش D_0 (m^2/s)	سرعت (m/s)	رطوبت هوا (%)
۵۹/۲۰۵۸۴	$۱/۳۱۳۲۷۷۸۶ \times 10^{-۱}$	۱/۵	۲۰
۵۵/۹۱۲۲۶	$۳/۴۸۷۱۴۷۲ \times 10^{-۲}$	۲	۲۰
۵۰/۷۷۲۳۳	$۶/۵۲۴۲۱۲ \times 10^{-۳}$	۲/۵	۲۰
۵۶/۹۲۳۴	$۱/۳۳۸۹۶۶ \times 10^{-۳}$	۱/۵	۴۰
۴۵/۹۹۳۷۸	$۱/۱۵۳۲۷۴ \times 10^{-۲}$	۲	۴۰
۴۶/۰۸۴۳۹	$۶/۹۳۱۰۱ \times 10^{-۴}$	۲/۵	۴۰
۵۰/۰۰۴۷۱	$۱/۲۹۶۱۸۳۹۱ \times 10^{-۴}$	۱/۵	۶۰
۴۴/۰۳۷۰۱	$۴/۶۱۲۷۸ \times 10^{-۴}$	۲	۶۰
۴۹/۹۳۶۷۱	$۲/۵۶۴ \times 10^{-۳}$	۲/۵	۶۰

۴- نتیجه‌گیری

۱) ضریب پخش موثر با افزایش ضخامت ورقه‌ها و افزایش دمای خشک‌کن، افزایش می‌یابد. ۲) دمای هوا اثر بیش‌تری نسبت به سرعت و رطوبت هوای ورودی بر سرعت خشک شدن لایه‌ی نازک ریحان دارد. ۳) اثر افزایش سرعت هوا بر مدت زمان خشک شدن لایه‌ی نازک ریحان در دماهای پایین، معنی‌دارتر بود. ۴) اثر افزایش رطوبت هوا بر مدت زمان خشک شدن لایه‌ی نازک ریحان در دماهای پایین، معنی‌دارتر بود. ۵) مقدار ضریب پخش موثر با افزایش دمای خشک‌کن، افزایش می‌یابد. ۶) مقدار ضریب پخش موثر با افزایش سرعت هوای ورودی به خشک‌کن، کاهش می‌یابد. ۷) مقدار ضریب پخش موثر در نمونه‌های خشک شده در دماهای بین ۴۰ تا ۸۰ درجه‌ی سلسیوس، از $1/05009 \times 10^{-11}$ تا $2/24941 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ تغییر می‌کند.

۵- سپاس‌گزاری

مولفان از گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشکده مهندسی و فناوری دانشگاه تهران برای تأمین وسایل و امکانات مورد نیاز و از آقای فرهاد گراوند برای کمک در انجام تحقیق تشکر و قدردانی می‌کنند.

۶- منابع

- 6- Feng, H. and Tang, J. 1998. Microwave finish Drying of Diced Apples in a Spouted Bed. *Journal of Food Science*, v(63): No 4.
- 7- Gastón, A.L., Abalone, R.M., Giner, S.A. and Bruce, D.M. 2004. Effect of modelling assumptions on the effective water diffusivity in wheat. *Biosystems Engineering*, v(88): 175–185.
- 8- Kaya, A., and Aydın, O. 2009. An experimental study on drying kinetics of some herbal leaves. *Energy Conversion and Management*, 50, 118–124.
- 9- Krokida, M K. and Maroulis, Z.B. 1997. Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Drying Technology*, v(15), 2441-2458.
- 10- Lopez, A., Iguaz, A., Esnoz, A. and Virseda, P. 2000. Thin-layer drying behaviour of vegetable waste from wholesale market. *Drying Technology*, v(18): 995–1006.
- 11- Mwithiga, G. and Olwal J.O. 2005. The drying kinetics of kale (*Brassica oleracea*) in a convective hot air dryer. *Journal of Food Engineering*, v(71):373-378.
- 12- O'Connor-Shaw, R.E., Roberts, R., Ford, A.L. and Nottingham, S.M. 1994. Shelf-Life of minimally processed honeydew, kiwifruit, papaya, pineapple and cantaloupe. *Journal of Food Engineering*, v(59):1202-1206,1215.
- 13- Omidbaigi, R. 2005. Production and processing of medicinal plants. Vol. 3. Astane Quds Publ.
- 14- 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.
- 15- Saravacos, G.D. and Maroulis, Z.B. 2001. Transport properties of foods. New York: Marcel Dekker.
- 16- Simon, J. E., Craker, L. E. & Chadwick, A. 1984. Herbs: an indexed bibliography, 1971-1980. Thescientific literature on selected herbs, and aromatic and medicinal plants of the temperate zone. Archon Books, Hamden CT. Pp. 215.
- 17- Taheri-Garavand, A. 2011. Fabrication and evaluation of a pilot thin-layer dryer with the capability of controlling the operational parameters. M. Sc. Thesis. Faculty of Engineering and Thechnology, University of Tehran. Tehran, pp. 347. (In Farsi).
- 18- Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F., Zhao, G., Wu, J. and Hu, X. 2007. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Research International*, v(40): 39–46.
- 1- 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 beriberi fruit (*Berberidaceae*). *Energy Conversion and Management*, 49, 2865–2871.
- 2- Aghbashlo, M., Kianmehr, M. and Samimi-Akhijahani, H. 2009. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetiks of barberries (*barberries vulgaris*). *Journal of Food Process Engineering*, 32(2), 278-293.
- 3- Babilis, J. and Belessiotis, V. G. 2004. Influence of the drying conditions on the drying contents and moisture diffusivity during the thin layer drying of figs. *Journal of Food Engineering*, 65(3), 449–458.
- 4- Crank J. 1975. The mathematics of diffusion. 2nd ed. Oxford University Press, Oxford, 104-106.
- 5- Doymaz, I. 2006. Thin-layer drying behaviour of mint leaves. *Journal of Food Engineering*, v(74): 370–375.