بررسی سینتیک خشک شدن و ضریب انتشار رطوبت مؤثر خرما رقم مضافتی در خشک‌کن خورشیدی کابینتی

محمد حسین انصاری فر[1]، محمد حسین آق خانی [2*]، محمود رضا گلزاریان[3]، محمد طبسی زاده[4]

1- دانشجوی تحصیلات تکمیلی گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد
2- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد
3- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد
4- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت: 93/8/27 تاریخ پذیرش: 94/6/14)

چکیده

در این تحقیق به بررسی فرآیند سینتیک خشک‌کردن، به‌دست آوردن ضریب انتشار رطوبتی مؤثر، تعیین بهترین مدل ریاضی و به‌دست آوردن انرژی فعال‌سازی برای خرما رقم مضافتی در خشک‌کن خورشیدی کابینتی پرداخته شد. آزمایش‌های خشک شدن در سه سطح دمایی 50، 65 و 80 درجه سلسیوس و سه سطح سرعت جریان هوا 1، 1/5 و 2 متر بر ثانیه انجام شد. تأثیر دما و سرعت هوا بر پارامتر زمان و چروکیدگی در قالب طرح کاملاً تصادفی بررسی شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که اثر دما و سرعت هوا بر فرآیند خشک شدن معنی‌دار می‌باشد. به‌طور متوسط افزایش دما از 50 به 80 درجه سلسیوس 70/77% زمان خشک شدن را کاهش داد. برای فرآیند مدل‌سازی ریاضی 8 مدل تجربی را بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شد سپس با توجه به بزرگ‌ترین مقدار ضریب تعیین[1] (R^2)، کمترین مقدار مربع کای[2] (χ^2) و ریشه میانگین مربعات خطا[3] (RMSE) بهترین مدل ریاضی با دقت بالا انتخاب شد. نتایج حاصل از تحلیل رگرسیونی مدل‌های مورد بررسی، نشان داد که مدل پیج بهترین برازش را با داده‌های به‌دست آمده دارد. همچنین کمترین ضریب نفوذ رطوبتی مؤثر $4/309\times10^{-10}$ در دمای 50 درجه سلسیوس و بیشترین مقدار $1/889\times10^{-9}$ در دمای 80 درجه سلسیوس به‌دست آمد. مقدار انرژی فعال‌سازی به‌دست آمده در خشک‌کردن خرمای مضافتی از 31/22 تا 42/27 کیلوژول بر مول مشاهده شد.

کلید واژگان: خرمای مضافتی، خشک‌کن خورشیدی کابینتی، مدل ریاضی، ضریب نفوذ رطوبتی مؤثر، انرژی فعال‌سازی

* مسئول مکاتبات: aghkhani@um.ac.ir

1. Correlation coefficient
2. Chi-square
3. Root mean square error

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-15]

1- مقدمه

خرما یکی از مهم‌ترین نباتات خانواده پالماسه[1] با نام علمی فونیکس داکتیلیفرا[2] است. خرما یکی از محصولات مهم کشاورزی و یکی از منابع عمده تحصیل ارز برای کشور می‌باشد. میوه خرما ازنظر گیاه‌شناسی یک میوه سته از خانواده پالم می‌باشد که از هسته، میان‌بر (مزوکارپ) گوشتی و پوست میوه (برون‌بر یا اپی کارپ) تشکیل شده است[1]. اولین گزارش در مورد خشک‌کردن مصنوعی خرما، توسط وینسون در ایالت آریزونای آمریکا ثبت شده است. از مزایای خشک‌کردن مصنوعی (صنعتی) می‌توان به کاهش ضایعات، کنترل دمای فرآیند، حفاظت از محصول در مقابل عوامل نامساعد جوی، سرعت بالاتر خشک‌کردن، رعایت راحت‌تر و بهتر اصول بهداشتی، کنترل آسان‌تر فرآیند و درصد رطوبت محصول، حفاظت محصول در برابر حمله حشرات و پرندگان و نیاز به فضای کمتر اشاره کرد و از معایب آن می‌توان هزینه بالای آن‌ها و کاهش رنگ محصول نسبت به روش طبیعی در برخی موارد نام برد[2و3و4]. خشک‌کردن کابینتی روشی است که در کشورهای پیشرفته، جایگزین روش آفتابی برای اکثر مواد غذایی شده است. کاهش رطوبت در خشک‌کن‌های کابینتی در دما و جریان هوای کنترل شده باعث تنظیم رطوبت مناسب برای نگهداری خرما و نگهداری محصولی با کیفیت بالا می‌شود. در تحقیقی گزارش شد که اثر دمای خشک‌کن بر رطوبت خرما معنی‌دار است و شیب منحنی خشک‌کردن در دمای 70 درجه سلسیوس بیشتر از سایر دماها (50، 60 و 80) درجه سلسیوس می‌باشد. به دلیل سخت شدن پوسته خرما در دمای 80 درجه سلسیوس، سرعت خشک شدن کمتر از دمای 70 درجه سلسیوس گزارش شد[5]. مدل تجربی وانگ برای خشک‌کردن خرمای با پوسته و مدل ورما برای خشک‌کردن خرمای بدون پوسته گزارش شد. این آزمایش در دماهای 60، 70 و 80 درجه سلسیوس در خشک‌کن هوای گرم با سرعت 1/5 متر بر ثانیه انجام شد[6]. در تحقیقی سینتیک خشک شدن لایه نازک خمیر خرما در دماهای 60،70 و 80 درجه سلسیوس در ضخامت‌های 1، 1/5 و 2 سانتی‌متر در محفظه تحت خلأ آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت و مدل‌سازی سینتیک خشک شدن خمیر خرما رقم کبکاب در دماها و ضخامت‌های مختلف بررسی شد. نتایج آزمایشگاهی با 8 مدل سینتیک به کار گرفته شده در مطالعات خشک‌کردن لایه نازک برازش داده شد. مدل‌های جنا-دس، هندرسون - پابیس و ورما تطابق بهتری با داده‌های خشک‌کردن تجربی نسبت به سایر مدل‌ها نشان دادند تغییرات ضریب نفوذ مؤثر بین $0/608\times10^{-7}$ و $4/868\times10^{-7}$ m^2/s بود. ضریب نفوذ مؤثر با افزایش دما و ضخامت نمونه افزایش می‌یافت. وابستگی ضریب نفوذ مؤثر به دما توسط رابطه آرینوس بیان شد[7]. در تحقیقی رفتار خشک شدن خرما رقم ساکاری[3] در سه دمای 70،80 و 90 درجه سلسیوس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج با 3 مدل سینتیک به کار گرفته شده در مطالعات خشک‌کردن لایه نازک برازش داده شد. این مدل‌ها عبارت بودند از مدل نمایی، مدل پیج و مدل تقریبی انتشار. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مدل پیج تطابق بهتری با داده‌های تجربی داشت[8]. خشک شدن قطعه‌های پالپ سه رقم خرمای رایج در الجزایر (فرزا[4]، مچ دگلا[5]و دگلا بیدا[6]) را مورد بررسی قرار دادند. خشک شدن در خلأ 200 میلی بار و دماهای 60، 80 و 100 درجه سلسیوس انجام شد. مدل‌های نیوتن، هندرسون و پابیس بهترین تطبیق را با رفتار سینتیک خشک شدن پالپ‌های مچ دگلا و فرزا در 60 و 80 درجه با MRE[7] کمتر از 6/07 درصد. همین مدل‌ها بیشترین تطبیق را با داده‌های آزمایشگاهی در دمای 60 درجه سلسیوس

1. Palmaceae
2. Phoenix dactylifera
3. Sukkari
4. Frezza
5. Mech-degla
6. Degla-beida
7. Mean relative error

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-15]

برای رقم دگلا بیدا (MRE = 6/07 ; R^2 = 0/988) همچنین در دمای 100 درجه سلسیوس برای رقم مچ دگـلا (MRE = 8/ 61% ; R^2 = 0/988) داشتند[9]. برای انتخاب یـک مـدل ریاضی مناسب که بتوان بر اساس آن، سـینتیک خـشک شـدن محصول مورد نظر را به‌دست آورد، به تعدادی از ویژگی‌هـای فیزیکی و حرارتی محصولات کشاورزی مانند ضریب هـدایت حرارتی، گرمایی ویژه، نرخ تبخیر رطوبت، ضریب انتشار مؤثر رطوبت و نظایر آن مورد نیاز است تـا بتـوان بـه کمـک آن‌هـا خشک‌کن جدیدی با کارایی مناسب طراحی کرد. به همین دلیل به‌منظور ارزیابی دستگاه خشک‌کن کابینتی، رفتار خشک شـدن خرمای مـضافتی، انتخـاب مناسـب‌تـرین مـدل ریاضـی بـرای توصیف سینتیک خشک شدن، تأثیر دما و سرعت‌های مختلف هوا بر آهنگ از دست دادن رطوبت در خشک‌کن کابینتی مورد بررسی قرار گرفت.

فهرست واژگان لاتین

معادل فارسی	نام لاتین	معادل فارسی	نام لاتین
آغباشلو	Aghbashlo	بارولد	Barreveld
آکپینار	Akpinar	رتی	Ratti
پرادو	Prado	سگوی	Saguy
گازر	Gazor	ویوسک	Waewsak
بابلیس	Babalis	فلید	Falade
کیچائو	Kechaou	آملا	Amellal
ریضوی	Rizvi	کاظم	Kassem
پاون	Pavón	چینن	Chhinnan
دویماز	Doymaz	یاگچیگلو	Yagcioglu
مادمبا	Madamba	وانگ	Wang
تولابا	Tolaba	ارتکن	Ertekin
کایماک	Kaymak	سیمال	Simal
کارسنوز	Karathanos	شرما	Sharma
		آینسو	Ayensu

2- مواد و روش‌ها

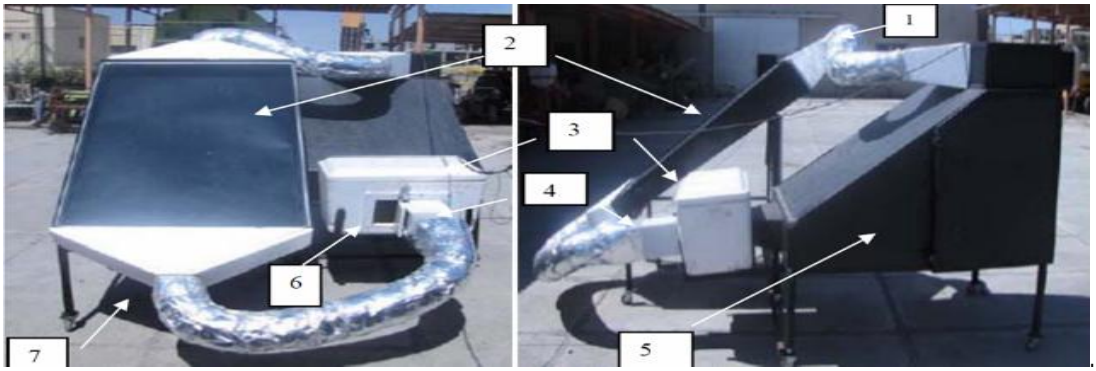
2-1- طریقه‌ی انجام آزمایش

خرمای مضافتی مورد نیاز از شهرستان جیرفت تهیه شد. میزان رطوبت اولیه نمونه با روش خشک‌کردن در آون به‌دست آمـد. نمونه‌های تقریبـاً 60 گرمـی در آون در دمـای 2±105 درجـه سلسیوس به مدت 72 ساعت قرارگرفته و خشک شد، بـا وزن نمودن مجدد نمونه‌ها و محاسـبه کـاهش وزن بـه وزن اولیـه، رطوبت نمونه‌ها بر پایه تر محاسبه شد. این کـار در 3 تکـرار انجام گرفت. درصد رطوبت بر پایه‌تر بـرای خرمـای مـضافتی حدود 29% به‌دست آمد. توزین نمونه‌هـای 60 گرمـی توسـط ترازوی دیجیتالی بعد از آنکه نمونه‌ها 2 ساعت در دمای محیط قرار گرفتند، انجام شد. فرآیند خشک شدن خرمای مضافتی در این تحقیق با استفاده از یک خشک کن خورشیدی کـابینتی بـا قابلیت کنترل به وسیله کامپیوتر شکل (1)، در آزمایشگاه گروه مهندسـی مکانیـک بیوسیـستم دانـشکده کـشاورزی دانـشگاه فردوسـی مـشهد در 3 سـطح دمـایی 50، 65 و 80 درجـه سلسیوس و سه سطح سرعت هوای 1، 1/5 و 2 متر بـر ثانیـه انجام شد. نتایج با استفاده از آزمایش فاکتوریل در پایـه طـرح کاملاً تصادفی، شاخص‌هایی نظیر متوسط زمان خشک شدن و چروکیدگی در سه تکرار با یکـدیگر مقایـسه گردیـد. تـوزین نمونه‌ها در طول فرآیند خشک شدن تا رسیدن رطوبت به 20% بر پایه تر، هر یک ساعت توسط ترازوی دیجیتال (*TE214S* ساخت کشور آلمان) با دقت 0/01 ± گرم انجام می‌گرفت.

هوای خشک‌کننده در ابتدا از داخـل جمـع کننـده خورشـیدی عبور و دمای آن افزایش می‌یافت.

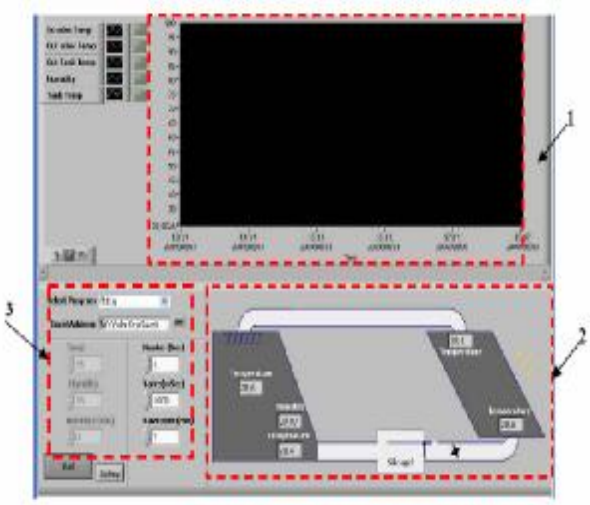
پـس‌ازآن، چنانچـه دمـای هـوای خروجـی از جمـع کننـده خورشیدی کمتر از دمای تنظیم‌شده برای خـشک‌کـردن باشـد، سامانه کنترل، گرم‌کن الکتریکی را روشن کرده و دمای هـوا را تا مقدار مطلوب افزایش می‌دهد.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-15]



شکل 1 الف) نمای روبرو ب) نمای جانبی خشک‌کن خورشیدی کابینتی مورد استفاده (1- کانال خروج هوا از جمع کننده، 2- جمع کننده خورشیدی، 3- محفظه سیلیکا ژل، 4- دمنده، 5- محفظه محصول، 6- دریچه هوای آزاد و 7- کانال ورود هوا به جمع کننده).

در ادامه هوای گرم با دمای مشخص از روی سینی‌های محصول که در داخل محفظه قرارگرفته بودند، عبور کرده و با جذب رطوبت محصول، آن را خشک می‌کرد. درنتیجه‌ی این فرآیند، دمای هوا پس از عبور از روی محصول کاهش و رطوبت نسبی افزایش می‌یافت. در ادامه، در صورت استفاده از خشک‌کن با سامانه گردش هوای بسته، هوای مرطوب خروجی از محفظه محصول از داخل محفظه‌ی رطوبت‌گیر سیلیکاژل عبور می‌کرد تا رطوبت موجود در آن کاهش‌یافته و برای خشک‌کردن دوباره محصول، وارد جمع کننده خورشیدی شود. به‌منظور اندازه‌گیری دمای هوای محیط و در قسمت‌های مختلف خشک‌کن، از 5 حسگر دما استفاده شد. حسگرهای دمای داخل خشک‌کن، قبل و بعد از جمع کننده خورشیدی و در کانال‌های ورودی و خروجی محفظه محصول قرار داشتند. رطوبت نسبی هوای خشک‌کننده توسط حسگر رطوبت نسبی[1] که در کانال خروجی محفظه محصول قرار داشت، اندازه‌گیری شد. یک کابل سریال، تمامی این حسگرها را به رایانه متصل می‌کند و داده‌های مربوط به هر حسگر، با نرم‌افزار نمایش و کنترل (که برای این سامانه تهیه شده بود) نمایش داده شد. سامانه کنترل مورد استفاده در خشک‌کن، شامل کنترل گرم‌کن کمکی الکتریکی و کنترل‌کننده دریچه هوای تازه محیط بود. به‌منظور کنترل گرم‌کن کمکی از یک کنترل‌کننده‌ی دو وضعیتی (روشن/خاموش) استفاده شد. چنانچه هوای خروجی از جمع کننده از دمای مورد نظر برای خشک‌کن که در (که در ابتدای آزمایش از طریق نرم‌افزار کنترل خشک‌کن تنظیم می‌گردید) کمتر بود، کنترل‌کننده در وضعیت روشن قرار می‌گرفت و گرم‌کن روشن می‌شد. این وضعیت تا رسیدن دمای هوا به دمای مطلوب ادامه داشت و پس از آن، کنترل‌کننده گرم‌کن را خاموش می‌کرد شکل (2).



شکل 2 تصویری از نحوه‌ی نمایش اطلاعات مربوط به سامانه کنترل و نمایش در رایانه، 1- محل ترسیم نمودار مربوط به تغییرات داده‌ها در طول زمان آزمایش، 2- نمایش مقادیر اندازه‌گیری شده به‌صورت لحظه‌ای، 3- محل انجام تنظیمات اولیه.

1 . مدل TMH-1 با دقت 3% ساخت شرکت Lutron - تایوان

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-15]

2-2- چروکیدگی

برای اندازه‌گیری چروکیدگی، تغییرات حجم نمونه‌ها با استفاده از روش جابجایی مایع تعیین گردید. در این پژوهش از تولوئن استفاده شد. از مزایای تولوئن نسبت به سایر مایعات می‌توان کشش سطحی و دانسیتهٔ کم، نقطه‌جوش نسبتاً بالا و عدم تغییر ساختار شیمیایی آن در اثر مجاورت با هوا را نام برد. قبل از اندازه‌گیری حجم توسط تولوئن، دانسیتهٔ دقیق آن با استفاده از روش پیکنومتری تعیین گردید. بدین منظور وزن پیکنومتر خشک و پرشده با آب مقطر تعیین و بر اساس اختلاف وزن این دو، وزن آب درون پیکنومتر مشخص شد. سپس با توجه به دانسیتهٔ آب ($1000 kg/m^3$)، حجم پیکنومتر خالی (V_p) محاسبه گردید. پیکنومتر مجدداً با تولوئن پر و وزن تولوئن درون آن تعیین شد. در نهایت با توجه به وزن تولوئن و حجم پیکنومتر دانسیتهٔ تولوئن (ρt) برابر $867 kg/m^3$ محاسبه گردید.

برای اندازه‌گیری حجم نمونه‌ها با استفاده از روش جابجایی مایع، وزن یک بشر خالی (mp) تعیین گردید. بشر تا نیمه با تولوئن پر شد و نمونه توزین شده (m_s) در داخل آن قرار گرفت. سپس بشر از حلال پر گردید. با وزن کردن مجدد، وزن بشر+ تولوئن + نمونه (m_{p+t+s}) اندازه‌گیری شد. حجم نمونه‌ها با استفاده از رابطه (1) محاسبه شد.

$$V = \frac{V_p \times \sigma_t - (m_{p+t+s} - m_p - m_s)}{\sigma_t}$$

لازم به ذکر است به‌منظور تعیین حجم اولیه خرما (V_1) دانسیتهٔ یک قطعه از همان خرما با استفاده از روش مذکور تعیین گردید و سپس حجم نمونه با توجه به وزن و دانسیتهٔ آن اندازه‌گیری شد. درصد چروکیدگی (Sh) با تعیین حجم اولیه و حجم نهایی (V_2) با استفاده از رابطه (2) محاسبه شد.

$$Sh = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \times 100$$

2-3- مدل‌سازی

توزین نمونه‌ها تا زمانی که درصد رطوبت بر پایه‌تر به 20% برسد ادامه می‌یافت. کسر رطوبتی خرمای مضافتی در طول خشک‌کردن با استفاده از رابطه (3) محاسبه شد.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$

که در رابطه (3): MR کسر رطوبتی (بدون بعد)، M_t میزان رطوبت در هرلحظه (کیلوگرم ماده جامد/ کیلوگرم آب)، M_e رطوبت تعادلی (کیلوگرم ماده جامد /کیلوگرم آب) و M_0 محتوی رطوبت اولیه (کیلوگرم ماده جامد/ کیلوگرم آب) می‌باشد. مقدار M_e در مقایسه با M_t و M_0 کوچک می‌باشد از این رو می‌توان از آن صرف نظر کرد و معادله به رابطه شماره (4) ساده می‌شود[10].

$$MR = \frac{M_t}{M_0}$$

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

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre})(MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre})^2 \sum_{i=1}^{n}(MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre})^2}}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(MR_{exp,i} - MR_{pre})^2}{n - z}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre})^2}$$

در روابط فوق MRexp,i رطوبت نسبی آزمایشگاهی i ام، MRpre,i رطوبت نسبی پیش‌بینی شده i ام، n تعداد مشاهدات و z تعداد ثابت‌های خشک شدن می‌باشند. بهترین برازشی که می‌تواند خصوصیات خشک شدن خرمای مضافتی را توصیف کند، مدل دارای بیشترین مقدار ضریب همبستگی R2و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا RMSE و مربع کای$\chi 2$ می‌باشد.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-15]

معادله‌های متعددی برای پیش‌بینی روند خشک شدن محصولات وابسته به دمای خشک شدن ارائه شده است. این معادله‌ها در جدول (1) نشان داده شده‌اند.

جدول 1 مدل‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی فرآیند خشک شدن.

شماره	نام مدل	معادله مدل	منبع
1	میدیلی و همکاران	$MR = a.exp(-kt^n) + b.t$	[11]
2	هندرسون و پابیس	$MR = a.exp(-kt)$	[12]
3	لگاریتمی	$MR = a.exp(-kt) + c$	[13]
4	پیج اصلاح‌شده	$MR = exp(-(kt)^n)$	[14]
5	تقریب پخش	$MR = a.exp(-kt) + (1-a)exp(-kbt)$	[15]
6	پیج	$MR = exp(-kt^n)$	[16]
7	وانگ و سینگ	$MR = 1 + at + bt^2$	[17]
8	نیوتن	$MR = exp(-kt)$	[18]

2-4- ضریب نفوذ رطوبتی مؤثر

برای به‌دست آوردن ضریب نفوذ مؤثر از معادله زیر استفاده می‌شود. حجم خرما با استفاده از روش غوطه‌وری در مایع تولوئن به‌دست آمد (این عمل در3 تکرار انجام شد). با استفاده از حجم تولوئن جابه‌جا شده، حجم خرما به‌دست آمد. این حجم تقریباً برابر با حجم کره در نظر گرفته شد و شعاع معادل دانه خرما (r_o) محاسبه شد در این فرآیند شعاع (خرما) r_o ثابت در نظر گرفته می‌شود[19].

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

با لگاریتم گیری از طرفین معادله بالا می‌توان معادله را به‌صورت خطی نوشت. برای این کار داریم:

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

با رسم لگاریتم طبیعی داده‌های به‌دست آمده در طول آزمایش نسبت به زمان، خطی با شیب k_1 به‌دست می‌آید که از مساوی قرار دادن این شیب با ضریب t در معادله (9)، ضریب نفوذ مؤثر را می‌توان از رابطه (10) محاسبه کرد.

$$k_1 = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r_o^2}$$

2-5- انرژی فعال‌سازی

با استفاده از معادله آرنیوس رابطه بین دما و ضریب نفوذ مؤثر در معادله (11) نشان داده شده است که می‌توان انرژی فعال‌سازی را به‌دست آورد[20].

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

که، Ea انرژی فعال‌سازی (kJ/mol) و R_g ثابت جهانی گازها که برابر با (8/3143 kJ/mol) T_{abs} دمای هوای درون محفظه خشک‌کن (K) و D_0 عرض از مبدأ که مقدار آن ثابت می‌باشد. دمای استفاده شده در معادله فوق دمای محصورشده در محیط خشک‌کن می‌باشد بنابراین می‌باید فرض هم دما بودن هم در پخش مؤثر و هم در انرژی فعال‌سازی مد نظر قرار گیرد. با لگاریتم گیری از طرفین معادله (11)، این معادله به‌صورت رابطه خطی (12) در می‌آید.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-15]

$$\ln D_{eff} = \ln D_o - \frac{E_a}{R_g}.\frac{1}{T_{abs}}$$

با رسم نمودار (LnD_{eff}) در مقابل ($1/T_{abs}$) خطی با شیب (k_2) به‌دست می‌آید. درنهایت برای مدل‌سازی داده‌های حاصل از آزمایش‌ها، از نرم‌افزار *MATLAB.2013* استفاده شد.

3- نتایج و بحث

3-1- اثر دما و سرعت هوا بر زمان خشک شدن و چروکیدگی خرما

نتایج حاصل از تجزیه واریانس تأثیر دما و سرعت بر زمان خشک شدن خرما مورد بررسی قرار گرفت. همان گونه که جدول (2) نشان می‌دهد اثر فاکتورهای دما و سرعت هوا به ترتیب در سطح 1% و5% بر روی مدت زمان خشک شدن معنی‌دار شده است. اثر متقابل دما و سرعت هوا بر زمان خشک شدن معنی‌دار نبود. اثر فاکتورهای دما، سرعت هوا و اثر متقابل آن‌ها بر روی چروکیدگی معنادار نشد. محققین دیگری نظیر چراغی دهدزی[6] و پرادو و همکاران[21] نتایج مشابهی را گزارش کردند.

جدول 20 نتایج تجزیه واریانس اثر دما و سرعت هوا بر فاکتور وابسته اندازه گیری شده.

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		زمان	چروکیدگی
دما	2	778499/370**	8/197ns
سرعت	2	8801/037*	33/481ns
سرعت× دما	4	1719/481ns	5/714ns
خطا	8	2457/074	31/043

اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد، ** اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد، ns عدم اختلاف معنی‌دار.

طبق جدول (2) دمای خشک‌کردن بر زمان خشک شدن تأثیر داشته و مدت زمان خشک‌کردن به‌طور معنی‌داری کاهش یافته است. افزایش دما موجب می‌شود که سرعت خروج رطوبت از خرما افزایش یافته و منحنی‌های به‌دست آمده از تغییرات نسبت رطوبت محصول در واحد زمان دارای روندهای کاهشی قابل توجهی باشند. افزایش دما موجب شیب بیشتر منحنی‌های به‌دست آمده گشته و بیانگر سرعت بالای فرآیند می‌باشد. این نتایج با نتایج بررسی گازر و محسنی‌منش[22] ارتکن[15] و اکپینار[20] مطابقت دارد. میانگین زمان خشک شدن بر اساس سرعت‌های مختلف به‌وسیله آزمون چند دامنه‌ای دانکن مقایسه شد. طبق جدول (3)، مشخص گردید که سرعت هوا نیز مانند دما تأثیر معکوس بر زمان خشک شدن دارد. با افزایش سرعت جریان هوا، زمان خشک‌کردن محصول به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. علت این پدیده در آن است که با افزایش سرعت جریان هوا، فشار بخار محیط کاهش می‌یابد و در نتیجه رطوبت محصول برای خروج از آن با مقاومت کمتری مواجه خواهد بود و با سرعت بیشتری از آن خارج می‌گردد. همچنین میانگین زمان خشک شدن بر اساس دماهای مختلف به‌وسیله آزمون چند دامنه‌ای دانکن مقایسه شد و مشخص گردید که افزایش دما از 50 به 65 و 65 به 80 درجه به ترتیب باعث

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-15]

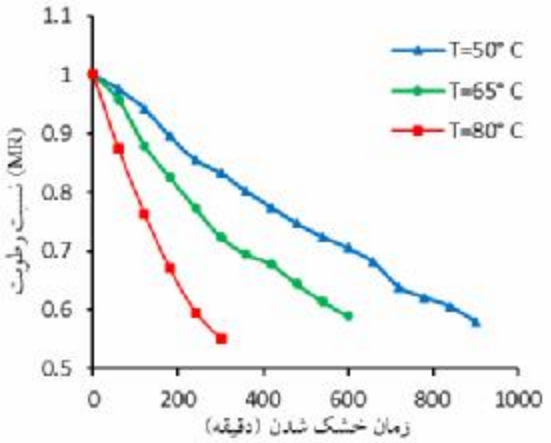
کاهش میزان زمان خشک شدن به میزان 42/20 و 49/44 درصد شد. محققین دیگری نیز مانند فلید و همکاران[5]، بابلیس[23] و کیچائو و مالج[24] گزارش کردند که با افزایش دما زمان خشک شدن کاهش می‌یابد.

جدول 0 مقایسه میانگین اثرات اصلی بر زمان خشک شدن

اثر میانگین تیمارها	تیمار 50 درجه	تیمار 65 درجه	تیمار 80 درجه
اثر میانگین سرعت	1 متر بر ثانیه	1/5 متر بر ثانیه	2 متر بر ثانیه
داده‌ها	546/44 [a]	536/89 [ab]	485/11 [b]
اثر میانگین دما	50°C	65°C	80°C
داده‌ها	827/44 [a]	478/22 [b]	241/78 [c]

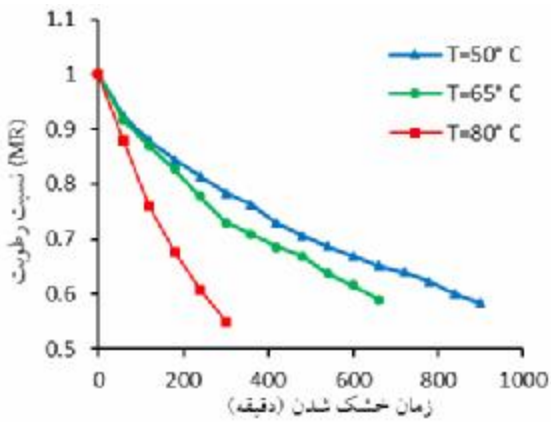
3-2- بررسی سینتیک خشک شدن

شکل‌های (۳) تا (۵) نمودارهای مربوط به نسبت رطوبت و زمان خشک شدن می‌باشند. با توجه به شکل‌ها، با افزایش دما و سرعت هوای گرم سرعت خروج رطوبت از خرمای مضافتی سریع‌تر شده و زمان خشک شدن کاهش می‌یابد. این روند در دما و سرعت هوای گرم بالاتر با شدت بیشتری رخ می‌دهد. از آنجا که وزن اولیه نمونه‌ها، 60 گرم به‌طور یکسان در شروع هر آزمایش بود لذا آزمایش ها تا آنجا ادامه پیدا می‌کرد که اختلاف وزنی بین دو وزن‌گیری متوالی وجود نداشت و وزن تقریبی نمونه‌ها در انتهای هر آزمایش باهم برابر بود و رطوبت خرما به 20% می‌رسید. کمترین مدت زمان خشک شدن خرمای مضافتی در دمای 80 درجه سلسیوس و سرعت هوای 2 متر بر ثانیه حدود 230 دقیقه و بیشترین مدت زمان خشک شدن در دمای 50 درجه سلسیوس و سرعت هوای 1 متر بر ثانیه حدود 840 دقیقه به‌دست آمد. در شروع روند خشک‌کردن، رطوبت اولیه خرمای مضافتی زیاد بوده و آهنگ از دست دادن رطوبت زیاد است. به تدریج با گذشت زمان، میزان رطوبت محصول کاهش پیدا کرده و نرخ کاهش رطوبت به‌طور طبیعی کاهش می‌یابد. محققین دیگری نظیر خفاجه و همکاران[25] گزارش کردند که با گذشت زمان سرعت خشک شدن کاهش می‌یابد. نمونه‌ها، بیشتر رطوبت خود را در اوایل فرآیند خشک شدن از دست می‌دهند و در نتیجه زمان زیادی برای از دست دادن رطوبت باقی مانده لازم است.

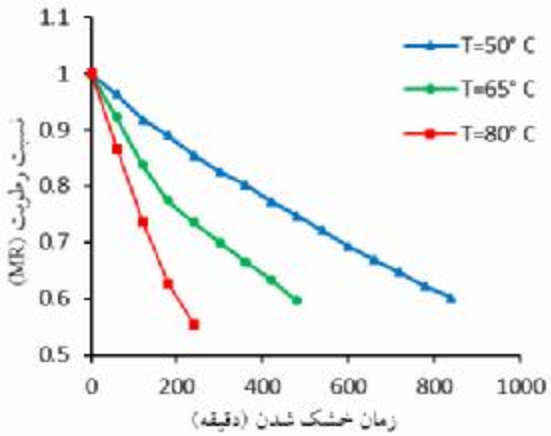


شکل ۳ منحنی‌های خشک شدن خرما در سرعت ۱ متر بر ثانیه.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-15]



شکل 4 منحنی‌های خشک شدن خرما در سرعت 1/5 متر بر ثانیه.



شکل 5 منحنی‌های خشک شدن خرما در سرعت 2 متر بر ثانیه.

3-3- مدل‌سازی

تحلیل رگرسیونی چند متغیره در محیط نرم افزار متلب[1] انجام شد. بهترین مدلی که می‌تواند سینتیک خشک شدن خرمای مضافتی را توصیف کند با توجه به بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقادیر χ^2 و $RMSE$ انتخاب شد. در جدول‌های (4) تا (6) مقادیر R^2، χ^2 و $RMSE$ آمده است. با مقایسه مقادیر R^2، χ^2 و $RMSE$ مشخص شد که مدل پیج بهترین مدلی بود که می‌توانست رفتار خشک شدن خرمای مضافتی را پیش‌بینی کند.

[1].Matlab

سیمال و همکاران برای شبیه‌سازی سینتیک خشک شدن میوه کیوی مدل پیج را مدل مناسب گزارش دادند[16]. گازر و محسنی‌منش تأثیر تغییرات دما و سرعت را بر سینتیک خشک شدن کلزا مطالعه کردند و نشان دادند که در مدل‌سازی فرآیند خشک شدن کلزا، مدل پیج دارای برازش بهتری بود، ولی به دلیل کمتر بودن ضرایب ثابت در مدل نیوتن و اختلاف جزئی شاخص‌های مورد ارزیابی کاربرد مدل نیوتن را توصیه کردند[22]. کارانتانوس و بلسیوتیس در تحقیقی نشان دادند که مدل پیج در مدل کردن فرآیند خشک شدن میوه‌های آبدار موفقیت آمیز بوده است[33].

با توجه به اینکه مدل پیج ($MR = exp(-kt^n)$) برای سطح دمایی 50، 65 و 80 درجه سلسیوس و سه سرعت هوای 1، 1/5 و 2 متر بر ثانیه، انتخاب شد. ضرایب آن در جدول (7) آمده است.

3-4- ضریب نفوذ رطوبتی مؤثر

شکل‌های (6) تا (8) نمودار $Ln\ (MR)$ را نسبت به زمان (ثانیه) در شرایط مختلف دما و سرعت هوا نشان می‌دهد. ضریب نفوذ مؤثر، به دما و ترکیب مواد بستگی دارد[26]. نظر به اینکه در پژوهش حاضر ترکیب خرما در آزمایش‌ها ثابت بود لذا دلیل اصلی تغییر میزان ضریب نفوذ مؤثر در شرایط مختلف خشک‌کردن مربوط به دماهای مختلف اعمال شده می‌باشد.

با افزایش دما و سرعت هوای عبوری از محفظه خشک‌کن، رطوبت نسبی محصول بیشتر کاهش می‌یابد. افزایش دما و سرعت هوا در محفظه خشک‌کن باعث انتقال جرم و گرمای بالاتری شده و کاهش رطوبت شدیدتر است. محاسبات نشان می‌دهد که رابطه مستقیمی بین ضریب نفوذ مؤثر با دما و سرعت هوای عبوری از محفظه خشک‌کن وجود دارد.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-15]

جدول 4 شاخص‌های آماری مربوط به مدل‌های مختلف ریاضی در دمای 50 درجه سلسیوس و سرعت‌های 1، 1/5 و 2 متر بر ثانیه.

مدل	T=50 °c ،v=1(m/s)			T=50 °c ،v=1/5(m/s)			T=50 °c ،v=2(m/s)		
	χ^2	R^2	RMSE	χ^2	R^2	RMSE	χ^2	R^2	RMSE
نیوتن	$10/07\times10^{-5}$	0/9936	0/01033	$12/73\times10^{-4}$	0/9058	0/03569	$4/88\times10^{-4}$	0/9691	0/02208
پیج	$2/97\times10^{-5}$	0/9982	0/00563	$1/3\times10^{-5}$	0/999	0/00372	$5/26\times10^{-5}$	0/9967	0/00752
پیج اصلاح‌شده	$2/97\times10^{-5}$	0/9982	0/00563	$1/3\times10^{-5}$	0/999	0/00372	$5/26\times10^{-5}$	0/9967	0/00752
وانگ و سینگ	$6/13\times10^{-5}$	0/9963	0/0081	$3/67\times10^{-4}$	0/9728	0/01984	$2/55\times10^{-4}$	0/9839	0/01655
هندرسون و پاپیس	$5/71\times10^{-5}$	0/9966	0/00782	$4/27\times10^{-4}$	0/9684	0/02139	$1/54\times10^{-4}$	0/9902	0/01287
لگاریتمی	$3/94\times10^{-5}$	0/9976	0/00673	$1/09\times10^{-4}$	0/992	0/0112	$1/03\times10^{-4}$	0/9934	0/01098
تقریبی انتشار	$11/08\times10^{-5}$	0/9929	0/01168	$12/73\times10^{-4}$	0/9058	0/03832	$4/88\times10^{-4}$	0/969	0/02387
میدیلی	$2/67\times10^{-5}$	0/9984	0/00577	$9/89\times10^{-4}$	0/9993	0/00351	$3/49\times10^{-4}$	0/9779	0/02107

جدول 5 شاخص‌های آماری مربوط به مدل‌های مختلف ریاضی در دمای 65 درجه سلسیوس و سرعت‌های 1، 1/5 و 2 متر بر ثانیه.

مدل	T=65 °c ،V=1(m/s)			T=65 °c ،V=1/5(m/s)			T=65 °c ،V=2(m/s)		
	χ^2	R^2	RMSE	χ^2	R^2	RMSE	χ^2	R^2	RMSE
نیوتن	$7/81\times10^{-4}$	0/9602	0/02794	$10/82\times10^{-4}$	0/9373	0/0329	$11/54\times10^{-4}$	0/933	0/03398
پیج	$6/53\times10^{-5}$	0/9967	0/00857	$9/83\times10^{-5}$	0/9943	0/01051	$3/17\times10^{-5}$	0/9982	0/00609
پیج اصلاح شده	$6/53\times10^{-5}$	0/9967	0/00857	$9/83\times10^{-5}$	0/9943	0/01051	$3/17\times10^{-5}$	0/9982	0/00609
وانگ و سینگ	$9/2\times10^{-5}$	0/9953	0/01017	$1/02\times10^{-4}$	0/9941	0/01096	$2/55\times10^{-4}$	0/9852	0/01706
هندرسون و پاپیس	$4/62\times10^{-4}$	0/9765	0/0228	$6/39\times10^{-4}$	0/963	0/02681	$6/2\times10^{-4}$	0/964	0/02662
لگاریتمی	$2/78\times10^{-5}$	0/9986	0/00597	$2/65\times10^{-5}$	0/9985	0/00583	$7/68\times10^{-5}$	0/9955	0/01012
تقریبی انتشار	$2/22\times10^{-5}$	0/9989	0/00534	$10/82\times10^{-5}$	0/9373	0/03731	$1/16\times10^{-3}$	0/9327	0/03932
میدیلی	$2/66\times10^{-5}$	0/9986	0/00631	$2/9\times10^{-5}$	0/9983	0/00659	$10/98\times10^{-4}$	0/9362	0/04192

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-15]

جدول 6 شاخص‌های آماری مربوط به مدل‌های مختلف ریاضی در دمای 80 درجه سلسیوس و سرعت‌های 1، 1/5 و 2 متر بر ثانیه.

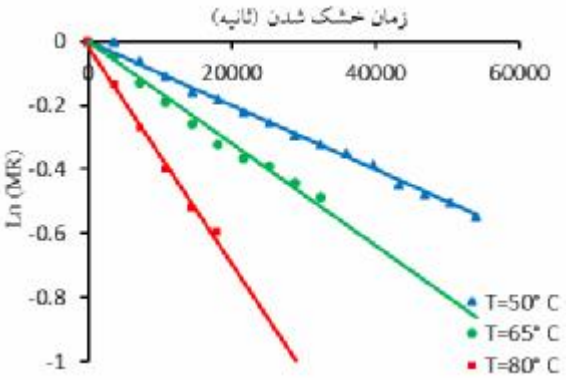
مدل	T=80 °c، V=1 (m/s)			T=80 °c، V=1/5 (m/s)			T=80 °c، V=2 (m/s)		
	χ^2	R^2	RMSE	χ^2	R^2	RMSE	χ^2	R^2	RMSE
نیوتن	$6/47\times10^{-4}$	0/9779	0/02544	$4/52\times10^{-4}$	0/9844	0/02125	$3/45\times10^{-6}$	0/9999	0/00185
پیج	$7/95\times10^{-5}$	0/9973	0/00996	$1/36\times10^{-5}$	0/9995	0/00412	$4/53\times10^{-7}$	0/9999	0/00082
پیج اصلاح شده	$7/95\times10^{-5}$	0/9972	0/00998	$1/36\times10^{-5}$	0/9995	0/00412	$4/53\times10^{-7}$	0/9999	0/00082
وانگ و سینگ	$1/19\times10^{-4}$	0/9935	0/01545	$5/61\times10^{-5}$	0/9981	0/00837	$3/79\times10^{-6}$	0/9999	0/00238
هنلرسون و پایس	$4/63\times10^{-4}$	0/9842	0/02406	$3/14\times10^{-4}$	0/9892	0/01982	$2/81\times10^{-6}$	0/9999	0/00205
لگاریتمی	$1/01\times10^{-3}$	0/9966	0/01297	$1/03\times10^{-5}$	0/9996	0/00413	$1/01\times10^{-6}$	0/9999	0/00174
تقریبی انتشار	$7/08\times10^{-5}$	0/9976	0/01084	$4/56\times10^{-4}$	0/9843	0/02757	$3/85\times10^{-6}$	0/9999	0/00339
میدیلی	$7/78\times10^{-5}$	0/9973	0/01395	$10/66\times10^{-4}$	0/9633	0/05162	$2/35\times10^{-15}$	0/9999	0/00013

جدول 7 ضرایب مدل پیج برای تیمارهای مختلف.

تیمارها	K	N
T=50 °c, V=1 (m/s)	0/001167	0/9014
T=50 °c, V=1/5 (m/s)	0/006169	0/6501
T=50 °c, V=2 (m/s)	0/002824	0/7797
T=65 °c, V=1 (m/s)	0/005152	0/7467
T=65 °c, V=1/5 (m/s)	0/006507	0/6974
T=65 °c, V=2 (m/s)	0/008049	0/6733
T=80 °c, V=1 (m/s)	0/007129	0/7833
T=80 °c, V=1/5 (m/s)	0/006192	0/8068
T=80 °c, V=2 (m/s)	0/003655	0/9821

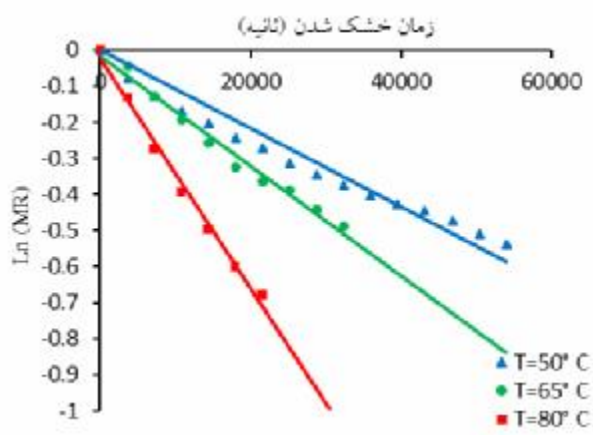
پژوهشگران دیگر نیز نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند. ضریب نفوذ مؤثر رطوبتی محصولات مختلف (انگور، سیب‌زمینی، سیب و هویج) از $2/2\times10^{-10}$ تا $9/4\times10^{-10}$ مترمربع بر ثانیه گزارش شده است[27]. ضریب نفوذ مؤثر رطوبتی هویج از $0/776\times10^{-9}$ تا $1/371\times10^{-9}$ مترمربع بر ثانیه در محدوده دمای 50 تا 70 درجه سلسیوس گزارش شد [28]. همچنین مقادیر ضریب نفوذ مؤثر به‌دست آمده در این تحقیق با دامنه عمومی 10^{-11} تا 10^{-9} که برای مواد غذایی گزارش‌شده است مطابقت دارد [29و30].

با توجه به شکل‌های (6) تا (8) در سرعت ثابت هوا در محفظه خشک‌کن، میزان ضریب نفوذ مؤثر با افزایش دمای هوا افزایش می‌یابد. پایین‌ترین دما و سرعت هوای خروجی سبب کمترین ضریب نفوذ مؤثر شده و بیشترین مقدار ضریب نفوذ مؤثر در بالاترین دما و سرعت هوا اتفاق افتاد.

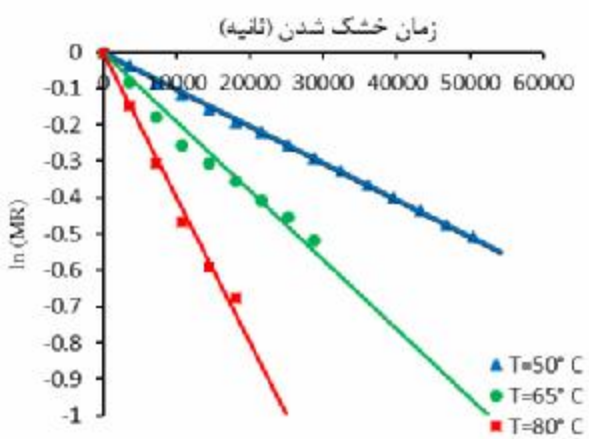


شکل 6 نمودار Ln(MR) در مقابل زمان در سرعت 1 متر بر ثانیه.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-15]



شکل 7. نمودار Ln(MR) در مقابل زمان در سرعت 1/5متر بر ثانیه.



شکل 8. نمودار Ln(MR) در مقابل زمان در سرعت 2 متر بر ثانیه.

جدول 8 مقادیر ضریب نفوذ مؤثر(m^2/s) و ضریب تعیین در تیمارهای مختلف.

T (°C)	V_1=1 m/s	R^2	V_2=1/5 m/s	R^2	V_3=2 m/s	R^2
50	$4/309\times10^{-10}$	0/9977	$4/524\times10^{-10}$	0/9819	$4/929\times10^{-10}$	0/9994
65	$6/393\times10^{-10}$	0/9849	$7/572\times10^{-10}$	0/9742	$8/215\times10^{-10}$	0/9828
80	$1/163\times10^{-9}$	0/9817	$1/56\times10^{-9}$	0/992	$1/889\times10^{-9}$	0/9907

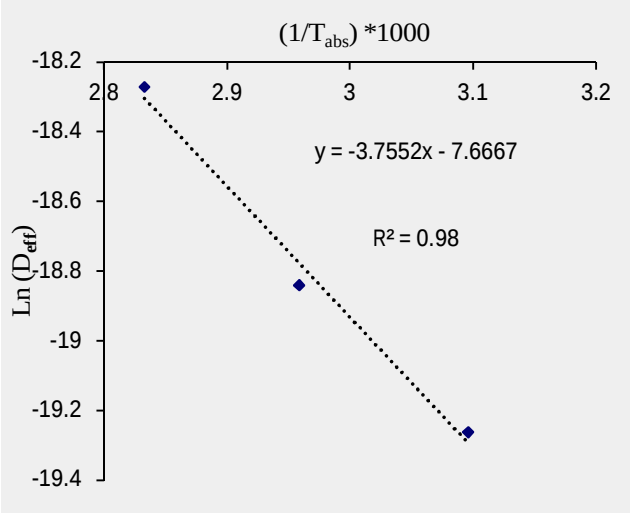
3-5- انرژی فعال‌سازی

ارتباط بین ضریب نفوذ و دما از طریق معادله آرنیوس معادله (11) بررسی شد. همان‌گونه که بیان شد دما و سرعت هوای بالا موجب افزایش ضریب نفوذ مؤثر رطوبتی می‌شود زیرا افزایش دما و سرعت هوا موجب افزایش انتقال جرم و حرارت می‌شود. برای به‌دست آوردن انرژی فعال‌سازی مقادیر مختلف $Ln(D_{eff})$ در برابر $(1/T_{abs})$ برای سرعت‌های مختلف به ترتیب در شکل‌های (9) تا (11) رسم گردید. با به‌دست آوردن شیب خط می‌توان با استفاده از رابطه (12) انرژی فعال‌سازی را به‌دست آورد. مقادیر انرژی فعال‌سازی (Ea) در خشک‌کردن خرمای مضافتی در سرعت‌های مختلف در جدول (9) آورده شده است. مقادیر انرژی فعال‌سازی گزارش شده توسط سایر پژوهشگران نیز با مقادیر به‌دست آمده در این تحقیق شباهت دارد. مقدار انرژی فعال‌سازی در خشک‌کردن ذرت 27/61 کیلوژول بر مول[31] و برای سیب سبز 51/4 کیلوژول بر مول[32] گزارش شده است.

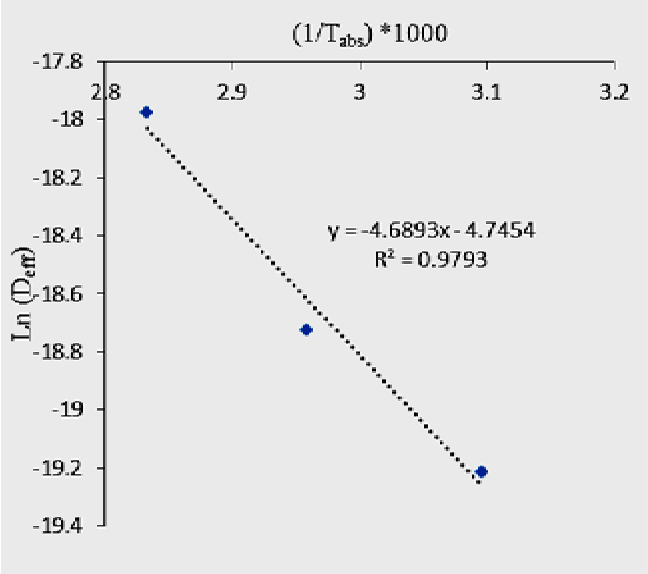
[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-15]

جدول 9 مقادیر انرژی فعال‌سازی و ضریب تعیین برای سرعت‌های مختلف.

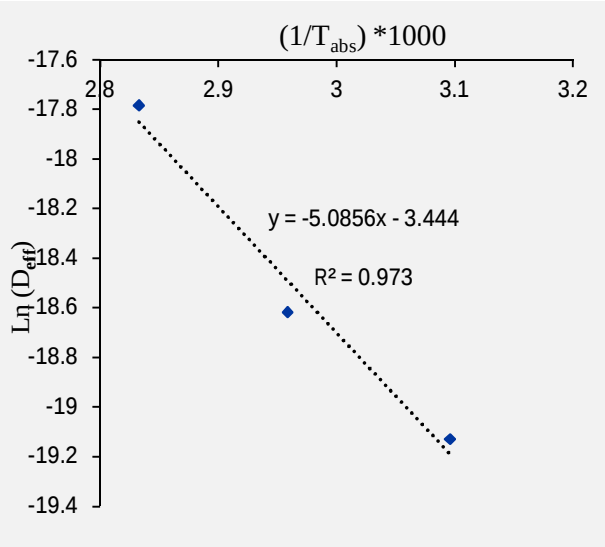
Ea(kJ/mol)	R^2	V(m/s)
31/21	0/9877	1
38/98	0/9793	1/5
42/27	0/9736	2



شکل 9 مقادیر $Ln(D_{eff})$ در مقابل $(1/T_{abs})$ در سرعت 1 متر بر ثانیه.



شکل 10 مقادیر $\mathbf{Ln(D_{eff})}$ در مقابل $\mathbf{(1/T_{abs})}$ در سرعت 1/5 متر بر ثانیه



شکل 11. مقادیر $Ln(D_{eff})$ در مقابل $(1/T_{abs})$ در سرعت 2 متر بر ثانیه.

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر دما و سرعت هوای گرم بر روی خشک شدن خرما رقم مضافتی بررسی شد و نتایج نشان داد که افزایش دما و سرعت هوای گرم باعث کاهش زمان خشک شدن می‌گردد و این افزایش تاثیری در میزان چروکیدگی ندارد. همچنین یک مدل ریاضی برای مدل کردن نرخ تبخیر رطوبت خرمای مضافتی ارائه شده است. نرخ تبخیر رطوبت برحسب تابعی از زمان و دما و سرعت هوای گرم برای خشک شدن خرمای مضافتی بیان شده است. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مدل پیج بهترین مدل برای توصیف فرآیند خشک شدن است که میزان R^2 اغلب در حدود 0/9943 تا 0/9999 و میزان مربع کای χ^2 و ریشه میانگین مربعات خطا *RMSE* به ترتیب در حدود $1/34\times10^{-4}$ تا $9/83\times10^{-4}$ و 0/00082 تا 0/01051 بود. به‌عبارت دیگر شاخص ضریب تبیین مدل پیج، بیشترین مقدار و دو شاخص دیگر کمترین مقدار را نسبت به مدل‌های دیگر داشتند. همچنین کمترین مدت زمان خشک شدن خرمای مضافتی در دمای 80 درجه سلسیوس و سرعت هوای 2 متر بر ثانیه حدود 230 دقیقه و بیشترین مدت زمان خشک شدن در دمای 50 درجه سلسیوس و سرعت هوای 1 متر بر ثانیه حدود

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-15]

840 دقیقه به‌دست آمد. دمای هوای داغ و سرعت هوای خشک‌کن فاکتورهای مهم در میزان ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و انرژی فعال‌سازی خرما رقم مضافتی بودند. مقادیر ضریب نفوذ با افزایش دما در سرعت ثابت هوای گرم و با افزایش سرعت هوای گرم در دمای ثابت افزایش می‌یافت و نتایج نشان داد که کمترین ضریب نفوذ مؤثر $4/309\times10^{-10}$ مترمربع بر ثانیه در دمای 50 درجه سلسیوس و بیشترین مقدار $1/889\times10^{-9}$ مترمربع بر ثانیه در دمای 80 درجه سلسیوس به‌دست آمد. با افزایش دمای خشک‌کن ضریب نفوذ مؤثر افزایش می‌یابد که به خاطر سرعت زیاد تبخیر و نفوذ سریع‌تر حرارت به داخل نمونه می‌باشد. همچنین مقدار انرژی فعال‌سازی به‌دست آمده در خشک‌کردن خرمای مضافتی از 31/22 تا 42/27 کیلوژول بر مول متغیر بود. که بیانگر مقدار انرژی لازم برای شروع فرآیند خشک شدن می‌باشد. در این تحقیق کمترین زمان خشک شدن در دمای 80 درجه سلسیوس و سرعت هوای 2 متر بر ثانیه بدست آمد.

جدول 10 مقادیر انرژی فعال‌سازی و ضریب تعیین برای سرعت‌های مختلف.

Ea(kJ/mol)	R^2	V(m/s)
31/21	0/9877	1
38/98	0/9793	1/5
42/27	0/9736	2

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر دما و سرعت هوای گرم بر روی خشک شدن خرما رقم مضافتی بررسی شد و نتایج نشان داد که افزایش دما و سرعت هوای گرم باعث کاهش زمان خشک شدن می‌گردد و این افزایش تاثیری در میزان چروکیدگی ندارد. همچنین یک مدل ریاضی برای مدل کردن نرخ تبخیر رطوبت خرمای مضافتی ارائه شده است. نرخ تبخیر رطوبت برحسب تابعی از زمان و دما و سرعت هوای گرم برای خشک شدن خرمای مضافتی بیان شده است. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مدل پیج بهترین مدل برای توصیف فرآیند خشک شدن است که میزان R^2 اغلب در حدود 0/9943 تا 0/9999 و میزان مربع کای χ^2 و ریشه میانگین مربعات خطا *RMSE* به ترتیب در حدود $1/34\times10^{-4}$ تا $9/83\times10^{-4}$ و 0/00082 تا 0/01051 بود. به‌عبارت دیگر شاخص ضریب تبیین مدل پیج، بیشترین مقدار و دو شاخص دیگر کمترین مقدار را نسبت به مدل‌های دیگر داشتند. همچنین کمترین مدت زمان خشک شدن خرمای مضافتی در دمای 80 درجه سلسیوس و سرعت هوای 2 متر بر ثانیه حدود 230 دقیقه و بیشترین مدت زمان خشک شدن در دمای 50 درجه سلسیوس و سرعت هوای 1 متر بر ثانیه حدود 840 دقیقه به‌دست آمد. دمای هوای داغ و سرعت هوای خشک‌کن فاکتورهای مهم در میزان ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و انرژی فعال‌سازی خرما رقم مضافتی بودند. مقادیر ضریب نفوذ با افزایش دما در سرعت ثابت هوای گرم و با افزایش سرعت هوای گرم در دمای ثابت افزایش می‌یافت و نتایج نشان داد که کمترین ضریب نفوذ مؤثر $4/309\times10^{-10}$ مترمربع بر ثانیه در دمای 50 درجه سلسیوس و بیشترین مقدار $1/889\times10^{-9}$ مترمربع بر ثانیه در دمای 80 درجه سلسیوس به‌دست آمد. با افزایش دمای خشک‌کن ضریب نفوذ مؤثر افزایش می‌یابد که به خاطر سرعت زیاد تبخیر و نفوذ سریع‌تر حرارت به داخل نمونه می‌باشد. همچنین مقدار انرژی فعال‌سازی به‌دست آمده در خشک‌کردن خرمای مضافتی از 31/22 تا 42/27 کیلوژول بر مول متغیر بود. که بیانگر مقدار انرژی لازم برای شروع فرآیند خشک شدن می‌باشد. در این تحقیق کمترین زمان خشک شدن در دمای 80 درجه سلسیوس و سرعت هوای 2 متر بر ثانیه بدست آمد.

5- منابع

[1] Barreveld, W. (1993). Date palm products. Agricultural services bulletin no. 101. Food and Agriculture Organisation of the United Nations. Ed. FAO, Rome.

[2] Ratti, C. (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. Journal of Food Engineering, 49(4): 311-319.

[3] Saguy, I., Marabi, F., Alejandro, D., Wallach, B., and Rony, A. (2005). New approach to model rehydration of dry food particulates utilizing principles of liquid

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-15]

transport in porous media. Trends in Food Science and Technology, 16(11): 495-506.

[4] Waewsak, J., Chindaruksa, S., and Punlek, C. (2006). A mathematical modeling study of hot air drying for some agricultural products. Thammasat international Journal of science and Technology, 11(1): 14-20.

[5] Falade, Kolawole, O., Abbo, and Emmanuel, S. (2007). Air-drying and rehydration characteristics of date palm (*Phoenix dactylifera*) fruits. Journal of Food Engineering, 79(2): 724-730.

[6] Cheraghi Dehdazi, S., and Hamdami, N. (2010). A Study of Kinetics and Some Resulting Physical Characteristics of Dates (Barhi variety) During Drying (Modeling and Experimental Validation). Iranian Journal of Biosystems Engineering (Iranian Journal Of Agricultural Sciences), 41(1): 81-88 (In Farsi).

[7] Ashraf, Z., Hamidi, Z., and Sahari, M. (2012). Evaluation and characterization of vacuum drying of date paste. Journal of Agricultural Science and Technology, 14(3): 565-575.

[8] Hassan, B. H., and Hobani, A. I. (2000).tThin layer drying of dates. Journal of Food Process Engineering, 23(3): 177-189.

[9] Amellal, H., and Benamara, S. (2008). Vacuum drying of common date pulp cubes. Drying Technology, 26(3): 378-382.

[10] Kassem, A. (1998). Comparative studies on thin layer drying models for wheat. Paper presented at the 13th international congress on agricultural engineering.

[11] Menges, H. O., and Ertekin, C. (2006). Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples. Journal of Food Engineering, 77(1): 119-125.

[12] Chhinnan, M. S. (1984). Evaluation of selected mathematical models for describing thin-layer drying of in-shell pecans. Transactions of the ASAE [American Society of Agricultural Engineers](USA).

[13] Yagcioglu, A., Degirmencioglu, A., and Cagatay, F. (1999). Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. Paper presented at the Proceedings of the 7th international congress on agricultural mechanization and energy.

[14] Wang, C., and Singh, R. (1978). A single layer drying equation for rough rice. ASAE paper, 3001.

[15] Ertekin, C., and Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. Journal of Food Engineering, 63(3): 349-359.

[16] Simal, S., Femenia, A., Garau, M. C., and Rosselló, C. (2005). Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. Journal of Food Engineering, 66(3): 323-328.

[17] Sharma, G. P., Verma, R. C., and Pathare, P. (2005). Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. Journal of Food Engineering, 71(3): 282-286.

[18] Ayensu, A. (1997). Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. Solar Energy, 59(4–6): 121-126.

[19] Aghbashlo, 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(10):2865-2871.

[20] Akpinar, E., Midilli, A., and Bicer, Y. (2003). Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. Energy conversion and management, 44(10): 1689-1705.

[21] Prado, M., Alonso, L., and Park, K. (2000). Shrinkage of dates (Phoenix Dactilyfera L.) during drying. Drying Technology, 18(1-2): 295-310.

[22] Gazor, H. R. and Mohsenimanesh, A. (2010). Modelling the drying kinetics of canola in fluidised bed dryer. Czech J. Food Sci, 28(6): 531-537.

[23] Babalis, S. (2004). Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-15]

drying of figs. Journal of Food Engineering, 65(3): 449-458.

[24] Kechaou, N., and Maalej, M. (2000). A simplified model for determination of moisture diffusivity of date from experimental drying curves. Drying Technology, 18(4-5): 1109-1125.

[25] Khafajeh, H., Banakar, A., Minaei, S., Taghizadeh, A., Motavali, A., and Rezaei Aderyani, M. (2014). Investigation of energy consumption and drying kinetics of thyme leaves in microwave dryer. Journal of Food science and Technology, 11(4): 45-54. (In Farsi)

[26] Rizvi, S. S. (1986). Thermodynamic properties of foods in dehydration. Engineering properties of foods, 2.

[27] Pavón-Melendez, G., Hernández, J. A., Salgado, M. A., Garcı, amp, x, and a, M .A. (2002). Dimensionless analysis of the simultaneous heat and mass transfer in food drying. Journal of Food Engineering, 51(4): 347-353.

[28] Doymaz, I. (2004). Convective air drying characteristics of thin layer carrots. Journal of Food Engineering, 61(3): 359-364.

[29] Madamba, P. S., Driscoll, R. H., and Buckle, K. A. (1996). The thin-layer drying characteristics of garlic slices. Journal of Food Engineering, 29(1): 75-97.

[30] Wang, Z., Sun, J., Chen, F., Liao, X., and Hu, X. (2007). Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. Journal of Food Engineering, 80(2): 536-544.

[31] Tolaba, M., and Suarez, C. (1988). Simulation of the thin-layer drying of corn by means of the diffusional model. Lebensmittel-Wissenschaft Technologie, 21(2): 83-86.

[32] Kaymak Ertekin, F. (2002). Drying and rehydrating kinetics of green and red peppers. Journal of Food Science, 67(1): 168-175.

[33] Karathanos, V. T., and Belessiotis, V. G. (1999). Application of a Thin-Layer Equation to Drying Data of Fresh and Semi-dried Fruits. Journal of Agricultural Engineering Research, 74(4): 355-361

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-15]

Investigation of Mazafati Dates Species Drying Kinetics and Effective Moisture Diffusivity under the Cabinet Solar Dryer

Ansarifar, M. H. [1], Aghkhani, M. H. [1*], Golzarian, M. R. [1], Tabasi Zade, M. [1]

1. Ferdowsi University of Mashhad / Faculty of Agriculture / Department of Bio systems engineering

(Received: 93/8/27 Accepted: 94/6/14)

In this research drying kinetics, moisture diffusivity and determination of most appropriate mathematical modeling and activation energy of Mazafati dates species were studied under a cabinet solar dryer. Drying experiments were carried out at three air temperatures of 50, 65, and 80ºC and three air velocities of 1.0, 1.5, and 2.0 m/s. Effect of temperature and air velocity evaluated on drying time and shrinkage by using a completely randomized statistical design. Results showed that the effects of temperature and air velocity are significant on drying time. The average increase of temperature from 50ºC to 80ºC caused the drying time to decrease by 70.77%. For determination of most appropriate model, the highest value of R^2 and the lowest values of χ^2 and RMSE were used. For mathematical modeling, eight empirical models were fitted on experimental data and the best model was selected. The result of regression analysis showed that Page model has the best fitting with data. Moreover, the lowest and highest value of moisture diffusivity were obtained as 4.309×10^{-10} and 0.0188×10^{-9} m^2/s at temperatures of 80°C and 50°C, respectively. Also the values of activation energy in the drying of Mazafati dates species were found between 31.22 to 42.27 kJ/mol.

Keywords: Mazafati dates species, Cabinet solar dryer, Mathematical modeling, Moisture diffusivity, Activation energy

*Corresponding Author E-Mail Address: aghkhani@um.ac.ir

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2025-07-15]