

بررسی سینتیک خشک کردن لایه‌ای نازک کدوی سبز با فرآیند جابه‌جایی هوای داغ

سید محمد مشکانی^۱، زهرا پورفلاح^۱، حمید توکلی پور^۲، مرتضی محمدی^{۱*}، منیره نهاردانی^۱

^۱ دانش آموخته‌ی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سبزوار، گروه علوم و صنایع غذایی، سبزوار، ایران

^۲ استادیار دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سبزوار، گروه علوم و صنایع غذایی، سبزوار، ایران

تاریخ دریافت: 90/8/3 تاریخ پذیرش: 90/12/7

چکیده

در این تحقیق با استفاده از خشک‌کن آزمایشگاهی جابه‌جایی هوای داغ، خشک کردن لایه‌ای نازک برش‌های کدوی سبز، مدل‌سازی شد. آزمایش‌ها در سه سطح دمایی 60، 70 و 80 درجه‌ی سانتی‌گراد و سه ضخامت 3، 5 و 7 میلی‌متر در سه تکرار انجام گردید. رطوبت اولیه‌ی کدوی سبز 93/05 درصد بر مبنای مرطوب به دست آمد. مدل ریاضی سینتیکی استاندارد بر داده‌های تجربی برازش داده شد و ارزیابی مدل‌ها از طریق چهار معیار ضریب همبستگی، ریشه‌ی میانگین مربعات خطا، کاهش کای اسکور و خطای انحراف میانگین مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بررسی نتایج، نشان داد که مدل میدلی نسبت به سایر مدل‌ها مراحل خشک شدن برش کدوی سبز را بهتر ارزیابی می‌کند. بنابراین، این مدل برای پیش‌بینی تغییرات رطوبت و کیفیت بالای محصول در فرآیند خشک کردن لایه‌ای نازک کدوی سبز با جابه‌جایی هوای داغ مناسب تشخیص داده شد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی ریاضی، برش‌های کدو سبز، لایه‌ای نازک، خشک کردن.

1- مقدمه

کدو، گیاهی است یک ساله و خزنده که برگ‌های آن به شکل قلب و پهن و پوشیده از کرک ریز می‌باشد و دارای گل‌های زرد رنگ است و گل نر و گل ماده‌ی آن روی یک پایه قرار دارد. ریشه‌ی آن باریک و بلند است. کدو از جمله صیفی جاتی است که در کشورهای نظیر ترکیه و ایران در سطح وسیعی کشت می‌شود. تحقیقات باستان‌شناسی نشان می‌دهد که کشت صیفی جات قدمتی 4500 ساله دارد. علاوه بر مصرف گوشت آن، دانه‌ی کدوی تنبل نیز پس از برشته کردن و نمک زدن به صورت آجیل توسط ساکنین مناطق خاور میانه مورد استفاده قرار می‌گیرد (13 و 15).

خشک کردن سبزیجات به عنوان روشی است جهت بهبود قدرت ماندگاری و یکی از روش‌هایی است که از قرن‌ها پیش متداول بوده است. برخلاف سبزیجات تازه که فقط برای مدت کوتاهی و در شرایط خاصی نگه‌داری می‌شوند، فرآورده‌های خشک شده را می‌توان در مدت‌های طولانی، بدون کاهش ارزش غذایی نگه‌داری نمود. همچنین، سبزیجات خشک شده به دلیل وزن توده‌ی کم به آسانی و راحتی حمل و نقل می‌شوند. در برخی مواد، خشک کردن سبب کاهش قابل توجهی در حجم شده و این سبب کاهش فضای مورد نیاز جهت نگه‌داری می‌گردد (17). کوشش بر این است تا آهنگ خشک کردن از طریق انتقال گرما و رطوبت به بیش‌ترین مقدار ممکن رسانده شود. خشک کردن با هوای داغ به دلیل در بر داشتن هزینه‌های کم‌تر از مهم‌ترین روش‌های مورد استفاده در تولید مواد گیاهی خشک می‌باشد. اکثر خشک‌کن‌های صنعتی از جریان هوای داغ جهت خشک کردن استفاده می‌کنند. استفاده از خشک‌کن‌های جریان هوای گرم سبب تسریع در فرآیند خشک شدن شده و امکان رعایت شرایط بهداشتی را فراهم می‌آورد (1). به علت امکان تغییرات نامطلوب در کیفیت مواد غذایی در اثر خشک شدن، کنترل این فرآیند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در نتیجه، برای نگه‌داری مطمئن مواد غذایی لازم است آن‌ها را به رطوبت مشخصی رساند. برای این منظور بررسی خصوصیات جذب رطوبت در محصول در حال خشک شدن دارای اهمیت می‌باشد (3). برای رسیدن به این اهداف، باید فرآیند خشک کردن محصولات مختلف کشاورزی را مدل سازی نمود تا بتوان بر اساس الگوی به دست آمده از مدل، روند

خشک کردن محصول را پیش‌بینی نمود. هدف از استخراج مدل خشک کردن محصولات کشاورزی، پیش‌بینی نحوه‌ی خشک کردن محصولات می‌باشد (4). برای هر محقق به دست آوردن بهترین مدل برازش شده مورد هدف می‌باشد. بنابراین، جهت این امر، دانستن اطلاعات راجع به خصوصیات جذب رطوبتی معمول می‌باشد (3). از سایر تحقیقات صورت گرفته می‌توان به نتایجی که سایر محققین گرفته‌اند اشاره نمود که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

حسن طغرل (2008)، رفتار خشک شدن اسلایس سیب را به وسیله‌ی امواج مادون قرمز مورد بررسی قرار داد و نشان داد که با افزایش دما از 50 به 80 درجه‌ی سانتی‌گراد سرعت خشک شدن دو برابر شد و همچنین با مدل سازی ریاضی فرآیند خشک کردن نشان داد که مناسب‌ترین مدل برای خشک کردن اسلایس سیب به وسیله‌ی مادون قرمز، می‌سدلی می‌باشد (23).

کاواک آکینار و همکاران (2006) با بررسی فرآیند خشک کردن برگ‌های جعفری و مدل سازی ریاضی خشک کردن این گیاه به وسیله‌ی آون جریان هوای داغ و خورشیدی نشان دادند که با افزایش دما از 56 تا 93 درجه‌ی سانتی‌گراد مدل ریاضی پیچ‌نسبت به سایر مدل‌ها برازش مناسب‌تری از داده‌های خشک کردن نشان داد (14).

کامون پونخام و همکاران (2011) در مطالعه‌ی دیگر بر روی خشک کردن آناناس به دو روش جابه‌جایی هوای داغ و امواج مادون قرمز و مدلیتینگ ریاضی آن نشان دادند که مدل میدلی نسبت به سایر مدل‌ها بهتر بود (18).

زیلینسکا و مارکوسکی (2010) با بررسی شرایط خشک کردن روی قطعات مکعبی هویج با افزایش دما از 60 الی 90 درجه‌ی سانتی‌گراد و مدل سازی داده‌های حاصل از فرآیند خشک کردن با چهار مدل ریاضی معتبر نشان دادند که مدل دو جمله‌ای، بهترین نتیجه را نسبت به سایر مدل‌ها دارد (27).

هدف از این تحقیق، ارائه‌ی مناسب‌ترین مدل برای خشک کردن ورقه‌های نازک کدوی سبز بود تا بتوان بر اساس الگوی به دست آمده از مدل، روند خشک کردن محصول را پیش‌بینی نمود. برای این منظور، مدل‌های دینامیکی خشک کردن لایه‌ی نازک محصولات کشاورزی بر روی کدوی سبز شبیه‌سازی گردید و در نهایت، بهترین مدل بر اساس پارامترهای مورد بررسی تعیین گردید.

2- مواد و روش‌ها

2-1- تجهیزات

جهت انجام فرآیند خشک کردن لایه ای نازک کدوی سبز از آون با جریان هوای داغ (ممرت¹، ساخت کشور آلمان) استفاده گردید.

2-2- آماده سازی نمونه

در این تحقیق، نمونه‌های کدو سبز (تابستانی، زو کینی²) تازه از بازار محلی تهیه گردید. سپس از لحاظ رنگ، قطر و وزن درجه‌بندی شد. کلیه‌ی نمونه‌ها جهت کاهش میزان شدت تنفس و تغییرات فیزیولوژیکی و شیمیایی در یخچال با دمای 5 تا 6 °C نگاه‌داری شدند. نمونه‌های کدو سبز با کمک اسلایسر (کالباس بر صنعتی) در سه ضخامت 3، 5 و 7 میلی متر ورقه ورقه گردید. میزان رطوبت اولیه‌ی نمونه‌های کدو سبز با روش آون گذاری در دمای 105 °C به مدت 8 ساعت تعیین گردید (7).

در این معادله، m_t مقدار رطوبت در زمان t ، m_0 مقدار رطوبت اولیه، m_e مقدار رطوبت تعادلی، M_{t+dt} مقدار رطوبت در زمان $t+dt$ می‌باشد. مقدار رطوبت m_e در مقایسه با رطوبت‌های m_t یا m_0 بسیار ناچیز بوده و این مساله سبب تشخیص راحت این دو از یکدیگر می‌گردد. در این تحقیق، رفتار کاهش رطوبت با گذشت زمان مورد مطالعه قرار گرفت. مدل‌های منحنی خشک کردن ورقه‌ای نازک کدو سبز بر اساس مدل‌های توصیه شده توسط محققانی که در این زمینه کار نموده اند طبق جدول 1 انتخاب گردید. در این مطالعه، عملکردها و مدل‌های ریاضی توسط نرم افزار Sigma Plot Ver 11 بررسی گردید. منحنی‌های خشک کردن توسط 10 مدل رطوبت نسبی مختلف که به طور وسیعی برای مواد بیولوژیکی و اکثر مواد غذایی به کار برده می‌شود مورد برازش قرار گرفت. این مدل‌ها از طریق ساده کردن قانون دوم فیک مشتق شده است.

جدول 1- مدل‌های دینامیکی مختلف ارائه شده توسط نویسندگان برای منحنی‌های خشک کردن

شماره مدل	معادله مدل	نام مدل
1	$MR = \exp(-kt)$	Newton (Lewis)
2	$MR = \exp(-kt^n)$	Page
3	$MR = \exp(-(kt)^n)$	Modified page
4	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis
5	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + C \exp(-ht)$	Modified Henderson and Pabis
6	$MR = a \exp(-kt) + C$	Logarithmic
7	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	Two-term
8	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	Two term exponential
9	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	Diffusion approach
10	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli-kucuk

2-4- آنالیز داده‌های خشک کردن

مدل‌های رگرسیونی تغییرات رطوبت در طی خشک کردن جهت به دست آوردن مقادیر ضرایب ثابت این مدل‌های توصیفی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به سینتیک خشک کردن ورقه‌های نازک برش‌های کدوی سبز برآورد گردید. در این تحقیق برای انتخاب مناسب‌ترین مدل توصیف کننده‌ی سینتیک خشک کردن ورقه‌ای نازک برش‌های کدوی سبز، ضریب

2-3- مدل سازی ریاضی منحنی‌های خشک کردن

در این تحقیق نسبت رطوبت نمونه‌ها و آهنک سرعت خشک کردن کدو سبز توسط معادلات 1 و 2 محاسبه گردید.

$$MR = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} \quad (1)$$

$$R = \frac{(M_{t+dt} - m_t)}{dt} \quad (2)$$

1- Memmert

2- Zucchini

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{\text{eff}} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (6)$$

حل معادله‌ی فیک برای یک تیغه^۴ به صورت زیر می‌باشد:

$$MR = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2}\right] \quad (7)$$

در آن m_t میزان رطوبت در زمان t ، m_0 رطوبت اولیه، m_e مقدار رطوبت تعادلی، L نیم ضخامت تیغه (بر حسب متر)، D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر (بر حسب متر مربع بر ثانیه)، t زمان (بر حسب ثانیه)، MR نسبت رطوبت (بدون بُعد) و k_0 شیب خط می‌باشد. ضریب نفوذ معمولاً با رسم داده‌های تجربی خشک کردن بر حسب \ln MR نسبت به زمان تعیین می‌گردد. ضریب نفوذ مؤثر، همان شیب زاویه‌ی بخش خطی است.

2-5- محاسبه‌ی انرژی اکتیواسیون

وابستگی قابلیت نفوذ مؤثر در رطوبت با دما بر حسب معادله‌ی آرنیوس بیان می‌شود (17 و 21).

$$D_{\text{eff}}^{\circ} = D^{\circ} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (8)$$

$$\ln D_{\text{eff}}^{\circ} = \ln D^{\circ} + \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T}\right) \quad (9)$$

که در آن D_0 ضریب پیش‌نمایی معادله‌ی آرنیوس E_a ، (m²/s) انرژی فعال‌سازی برای نفوذ رطوبت R ، (kJ/kmol) ثابت جهانی گازهای ایده آل T ، (kJ/kmol.k) دمای مطلق بر حسب کلوین می‌باشد. انرژی فعال‌سازی را می‌توان با ترسیم $\ln D_{\text{eff}}$ بر حسب $1/T$ تعیین نمود.

3- نتایج و بحث

3-1- تاثیر دمای هوا خشک کردن و ضخامت کدوی سبز روی زمان خشک کردن و آهنگ خشک کردن

مدت زمان لازم برای خشک کردن کدوی سبز از مقدار رطوبت اولیه‌ی 93/05٪ در مبنای تر تا مقدار رطوبت نهایی 5٪ در مبنای تر برای دماهای 60، 70 و 80 درجه‌ی سانتی‌گراد در سه ضخامت 3، 5 و 7 میلی‌متر در شکل‌های 1 تا 3 به وضوح مشاهده می‌گردد. نتایج، نشان داد که دمای هوای خشک کردن

همبستگی^۱ (R^2)، ریشه‌ی میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE)، مربع کای کاهش یافته^۳ (χ^2) و خطای انحراف میانگین‌ها^۴ (MBE) بین داده‌های تجربی و نتایج پیش‌بینی شده توسط هر مدل محاسبه و با مدل‌های دیگر مورد مقایسه قرار گرفت. این معیارها توسط معادلات 3-5 محاسبه شدند.

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{exp},i})^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

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

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{exp},i}) \quad (5)$$

در این معادلات، $MR_{\text{exp},i}$ نسبت رطوبت ورقه‌های کدوی سبز مشاهده شده در i آمین اندازه‌گیری، $MR_{\text{pre},i}$ نسبت رطوبت ورقه‌های کدوی سبز پیش‌بینی شده از مدل در i آمین اندازه‌گیری، N تعداد مشاهدات (داده‌ها) و Z تعداد ضرایب ثابت به کار رفته در هر مدل می‌باشد. برای سنجش بهترین مدل جهت پیش‌بینی نحوه‌ی خشک شدن ورقه‌های کدوی سبز چهار معیار χ^2 ، $RMSE$ ، R^2 و MBE مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت، مدل مناسب خشک کردن با حداکثر همبستگی R^2 و حداقل $RMSE$ ، χ^2 و MBE به عنوان مدل مناسب برای توصیف سینتیک خشک کردن ورقه‌های کدوی سبز انتخاب شد (15 و 20).

2-5- تعیین ضریب انتشار رطوبت

امروزه در صنایع غذایی انتقال رطوبت در مواد غذایی موضوع بسیار مهمی است. شمار مکانیسم‌های انتقال رطوبت، گسترده و اغلب پیچیده است. پدیده‌ی انتقال معمولاً بر حسب نفوذ فشاری، نفوذ اجباری و نفوذ معمولی طبقه‌بندی می‌شود (انتقال خالص ماده بدون حرکت سیال، نفوذ معمولی نام دارد) (5).

قانون فیک^۵، اغلب برای توصیف پدیده‌ی نفوذ رطوبت به کار می‌رود (10 و 20):

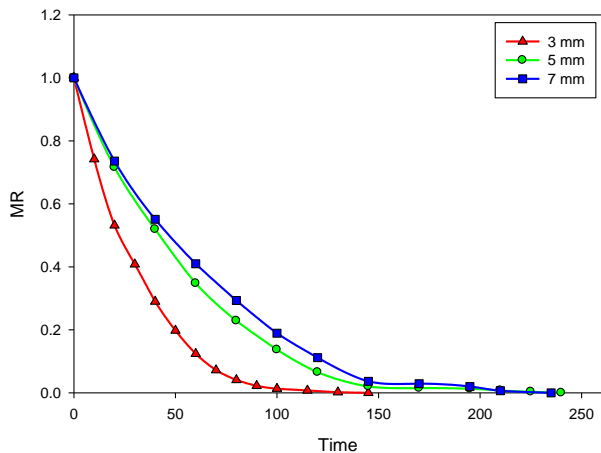
1-Determination of Coefficient (R^2)

2-Root Mean Square Error (RMSE)

3-Chi-square (χ^2)

4-Mean Bias Error (MBE)

5-Fick's Law



شکل 3- تأثیر دما بر سینتیک خشک کردن برش‌های کدوی سبز در دمای 80 درجه‌ی سانتی‌گراد

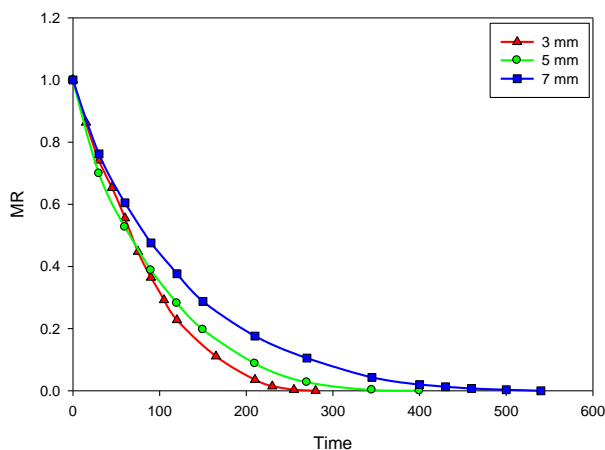
جدول 2- مقادیر سرعت خشک کردن برای کدوی سبز در دمای و ضخامت‌های متفاوت

سرعت خشک کردن (kg moisture/kg dry mater)	ضخامت (mm)	دما هوای (°C)
0/120984	3	60
0/129925	5	
0/096989	7	
0/415107	3	70
0/140376	5	
0/1302269	7	
0/368750	3	80
0/191407	5	
0/172	7	

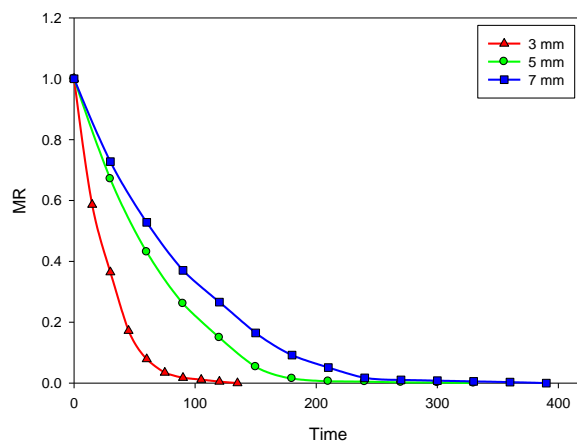
3-2- مدل سازی سینتیک خشک کردن

10 مدل دینامیکی خشک کردن لایه‌ای نازک ورقه‌های کدوی سبز در دماهای دمایی 60 تا 80 درجه‌ی سانتی‌گراد در سه ضخامت 3، 5 و 7 میلی‌متر مورد برآزش قرار گرفت. در همه‌ی حالت‌ها مقدار R^2 برای مدل‌های آماری مورد آزمون از 0/9862 بیش تر بود. همچنین، حداقل مقدار کسای اسکور و ریشه‌ی میانگین مربعات خطا نیز برای اکثر مدل‌های آماری مورد برآزش به ترتیب 0/000035062 و 0/0014349 بود. نتایج آنالیز آماری، نشان داد که مدل میدلی¹ دارای بالاتری R^2 و کم‌ترین χ^2

تأثیر معنی داری روی زمان خشک کردن داشت به طوری که از نمودارهای خشک کردن می‌توان دریافت که زمان لازم جهت خشک کردن کدوی سبز در هر سه ضخامت 3، 5 و 7 میلی‌متر برای دمای 60 درجه‌ی سانتی‌گراد نسبت به دمای 70 درجه‌ی سانتی‌گراد و دمای 70 درجه‌ی سانتی‌گراد نسبت به دمای 80 درجه‌ی سانتی‌گراد و دمای 80 درجه‌ی سانتی‌گراد، طولانی‌تر می‌باشد. نتایج مشابه توسط سایر محققان بر روی سبزیجات مختلف مشاهده گردید (20 و 21). همچنین، افزایش دما از 60 به 70 و از 70 به 80 درجه‌ی سانتی‌گراد سبب افزایش آهنگ خشک کردن می‌گردد. مقادیر آهنگ خشک کردن کدوی سبز در دماهای 60، 70، 80 درجه‌ی سانتی‌گراد در سه ضخامت آزمون در جدول 2، نشان داده شده است.



شکل 1- تأثیر دما بر سینتیک خشک کردن برش‌های کدوی سبز در دمای 60 درجه‌ی سانتی‌گراد



شکل 2- تأثیر دما بر سینتیک خشک کردن برش‌های کدوی سبز در دمای 70 درجه‌ی سانتی‌گراد

جدول 3- نتایج آماری مدل‌های خشک کردن ورقه‌ای نازک کدوی سبز و مقادیر به دست آمده برای ضرایب ثابت مدل میدلی

R^2	χ^2	RMSE	MBE	ثابت‌های مدل میدلی	ضخامت (mm)	دما ($^{\circ}\text{C}$)
0/9990	0/0001528	0/0104485	7/83014	$a_{0/9871n, 1/2023k, 0/0043}$ $b_{-0/0001,}$	3	
0/9990	0/0001700	0/0100782	14/84	$a_{,0/9955n, 0/9716k, 0/012}$ $b_{-0/0001}$	5	60
0/9997	0/0000351	0/005004454	15/306	$a_{,0/9966n, 0/9734k, 0/0093}$ $b_{-0/00004}$	7	
0/9985	0/0002565	0/012406815	19/64	$a_{,0/997n, 1/1204k, 0/0241}$ $b_{-0/00004}$	3	
0/9985	0/0002187	0/0120738	85/00	$a_{,0/9953n, 1/2008k, 0/0062}$ $b_{-0/00003}$	5	70
0/9985	0/0001968	0/011856	47/25	$a_{,0/9931n, 1/1394k, 0/0059}$ $b_{-0/00004}$	7	

مدل لويس ويژگي‌هاي خشك كردن دانه‌ي انگور را به طور مطلوب تري توصيف مي‌نمايد (19).

3-3- انتشار رطوبت موثر

مقادير انتشار رطوبت مؤثر تعيين شده براي ورقه‌هاي كدوي سبز خشك شده در جدول 4 نمايش داده شده است. مقادير D_{eff} براي ورقه‌هاي كدوي سبز در دامنه‌ي دمائي 60 تا 80 درجه‌ي سانتی‌گراد در دامنه‌ي (m^2/s) $5/81 \times 10^{-6}$ تا $2/13 \times 10^{-5}$ قرار دارد. نتايج، نشان داد كه با افزايش دماي خشك كردن و کاهش مقدار ضخامت برش‌ها مقدار انتشار رطوبت مؤثر افزايش مي‌يابد كه اين مطلب از طريق حركت يا انتقال جرم از منافذ مؤينه ماده‌ي غذايي توصيف مي‌گردد. همان طور كه در شكل 4 مشاهده مي‌گردد در دماي 80 درجه‌ي سانتی‌گراد و ضخامت 3 ميلي متر بالاترين مقدار انتشار رطوبت مؤثر مشاهده مي‌گردد. مقادير D_{eff} به طور مشابه توسط ساير نويسندگان براي كيوي و ساير سبزيجات گزارش گرديد. به طوري كه انتشار رطوبت براي كيوي با خشك كن جابه‌جايي هوا با سرعت 1/1 متر بر ثانيه در دامنه‌ي دمائي 40 تا 70 درجه‌ي سانتی‌گراد $10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ × فرنگي در دامنه‌ي دمائي 45-75 درجه‌ي سانتی‌گراد، $10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ × ، $3/72-12/27 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ × ، $0/87-1 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ × براي گوجه فرنگي گيلاسي در دامنه‌ي 40 تا 60 درجه‌ي سانتی‌گراد، $10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ × $0/87-2/17$ × براي

و RMSE مي‌باشد. نتايج مشابه توسط ساير محققان بر روي سبزيجات مختلف مشاهده گرديد (20 و 21). در جدول 3، مقادير به دست آمده براي ضرايب ثابت مدل ميدلي كه بهترين برازش را از داده‌هاي خشك كردن برش‌هاي كدوي سبز داشت، آورده شده است.

در تحقيقاتي ديگر درمزن لوگلو و همكاران (2007) سينتيك مدل سازي و تخریب كيفيت گوجه فرنگي را در طي خشك كردن اسمزي را مورد بررسي قرار دادند (7). دويماز (2004) لايه‌هاي نازك هويچ به ضخامت 0/5 سانتيمتر را در چهار دماي 50، 60، 65 و 70 درجه‌ي سانتی‌گراد با سرعت 0/5 تا 1 متر بر ثانيه به وسيله‌ي خشك كن آزمايشگاهي خشك نمود نشان داد كه مدل پيچ نسبت به مدل هندرسون و پاييس، برازش بهتري از داده‌هاي خشك كردن داشت (8). دويماز و اسماعيل (2010) ويژگي‌هاي خشك كردن گيلاس را مطالعه نمودند كه تاثير امولسيون‌هاي قليايي و اتيل اولئات بر ويژگي‌هاي خشك كردن گيلاس در سه سطح دمائي 60، 70 و 75 درجه‌ي سانتی‌گراد مورد بررسي قرار گرفت و در آن مدل پيچ به عنوان بهترين مدل براي توصيف ويژگي‌هاي خشك كردن گيلاس ارائه شد. ضريب نفوذ مؤثر رطوبت در دامنه‌ي دمائي 60-75 درجه‌ي سانتی‌گراد $10^{-10} \times 5/683$ و $10^{-9} \times 1/544 \text{m}^2/\text{s}$ × اندازه گيري گرديد (11). روبرت و همكاران (2008) سينتيك خشك كردن دانه‌ي انگور را مورد بررسي قرار داد. نتايج، نشان داد كه

کدوی سبز در جدول 5، نشان داده شده است. مقدار انرژی اکتیواسیون توسط محققین برای محصولات مختلف گزارش شده است به طوری که مقدار انرژی اکتیواسیون برای کیوی با خشک کن جابه‌جایی هوا با سرعت 1/1 متر بر ثانیه در دامنه‌ی دمایی 40 تا 70 درجه‌ی سانتی‌گراد (38/6 kJ/mol) بود. چیلی قرمز (41/95 kJ/mol)، نخود سبز خشک شده (28/40 kJ/mol)، بامیه خشک شده (51/26 kJ/mol)، گوجه‌فرنگی خشک شده با پیش‌تیمار اتیل اولئات قلیایی 2٪ و نمونه‌ی کنترل شده به ترتیب (17/40 kJ/mol) و (32/94 kJ/mol)، گیلایس خشک شده با پیش‌تیمار اتیل اولئات قلیایی 2٪ و نمونه‌ی کنترل شده به ترتیب (43/05 kJ/mol) و (49/17 kJ/mol)، انجیر خشک شده (40/95 kJ/mol) می‌باشد (6، 8، 9، 26، 22، 21، 20، 12).

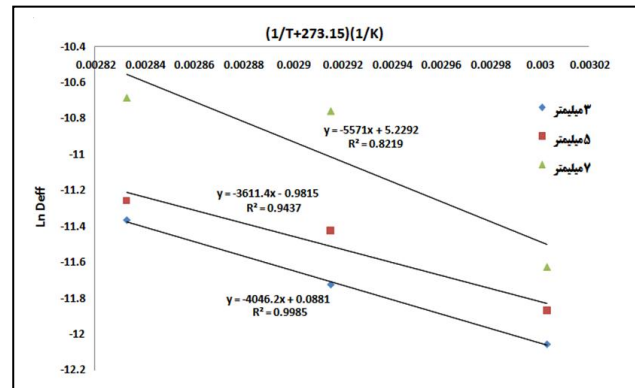
جدول 5- مقدار انرژی اکتیواسیون به دست آمده برای کدوی سبز

در دمای و ضخامت‌های متفاوت	
Ea (kJ/mol)	ضخامت (mm)
33/64	3
30/022	5
46/22	7

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تاثیر دما و ضخامت بر روی ویژگی‌های خشک کردن ورقه‌ای نازک کدو سبز مورد بررسی قرار گرفت. افزایش دمای خشک کردن و کاهش ضخامت سبب کاهش زمان و بالا رفتن آهنگ خشک کردن و انتشار مؤثر گردید به گونه‌ای که کدو سبز خشک شده در دمای 80 درجه‌ی سانتی‌گراد و ضخامت 3 میلی‌متر دارای کم‌ترین زمان خشک کردن بود. بعد از آنالیز آماری مدل، نتایج، نشان داد که در بین مدل‌های دینامیکی مورد برازش، مدل میدلی به دلیل داشتن حداکثر R^2 و حداقل χ^2 و RMSE به عنوان بهترین مدل برای خشک کردن ورقه‌ای نازک کدو سبز انتخاب گردید. انتشار رطوبت مؤثر در دامنه‌ی دمایی 60 تا 80 درجه‌ی سانتی‌گراد برای ورقه‌های کدوی سبز در دامنه‌ی (m^2/s) $5/81 \times 10^{-6}$ تا $2/13 \times 10^{-5}$ ارزیابی گردید. انرژی اکتیواسیون در دامنه‌ی دمایی 60 تا 80 درجه‌ی سانتی‌گراد در سه ضخامت 3، 5 و 7 میلی‌متر ورقه‌های کدوی سبز به ترتیب 33/64، 30/022، و 46/32 (kJ/mol) تعیین گردید.

سیب زمینی خشک در دامنه‌ی دمایی 50 تا 70 درجه‌ی سانتی‌گراد، $2-4/2 \times 10^{-10} m^2/s$ برای سیر خشک شده در دامنه‌ی دمایی 50 تا 90 درجه‌ی سانتی‌گراد، $10^{-10} m^2/s \times 5/65-7/53$ برای گوجه‌فرنگی خشک شده در دامنه‌ی دمایی 50 تا 70 درجه‌ی سانتی‌گراد و $1/544 \times 10^{-9} m^2/s$ تا $5/683 \times 10^{-10}$ برای گیلایس خشک شده در دامنه‌ی دمایی 60 تا 75 درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد (2، 6، 8، 16، 20، 21، 24، 25).



شکل 4- رابطه‌ی بین انتشار رطوبت و دمای مطلق به دست آمده از رابطه‌ی آرنیوس

جدول 4- مقادیر انتشار رطوبت مؤثر به دست آمده برای کدوی سبز در دمای و ضخامت‌های متفاوت

D_{eff} (m^2/s)	ضخامت (mm)	دما هوای ($^{\circ}C$)
0/0000085	3	
0/000007	5	60
0/0000058	7	
0/0000021	3	
0/0000011	5	70
0/0000087	7	
0/0000021	3	
0/0000013	5	80
0/0000011	7	

3-4- انرژی اکتیواسیون

مقادیر انرژی اکتیواسیون در دامنه‌ی دمایی 60 تا 80 درجه‌ی سانتی‌گراد در سه ضخامت 3، 5 و 7 میلی‌متر برای ورقه‌های

value of a melon seed beverage. *Food chemistry*, 52, 139- 141.

14-Kavak Akpınar, E. Bicer, Y. and Cetinkaya, F. 2006. Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun. *Journal of Food Engineering* .75. 308–315.

15-Krokida, M. K., Karathanos, V. T., Maroulis, Z. B., Marinos-Kouris, D. 2003. Drying kinetics of some vegetables. *Journal of Food Engineering* 59, 391-403.

16-Madamba, P. S., Driscoll, R. H., & Buckle, K. A. 1996. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29, 75–97.

17-Mwithiga, G. and Olwal, J. O. 2005. The drying kinetics of kale (*Brassica oleracea*) in a convective hot air dryer. *Journal of Food Engineering*, 71, 373–378.

18-Ponkham, K. Meeso, N. Soponronnarit, S. and Siriamornpun, S. 2011. Modeling of combined far-infrared radiation and air drying of a ring shaped-pineapple with/without shrinkage. *food and bioproducts processing*. 238.

19-Roberts, J. S., Kidd, D. R., Zakour, O. P. 2008. Drying kinetics of grape seeds. *Journal of Food Engineering* 89, 460–465.

20-Sacilik, K., Elicin, A. K. 2006. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *Journal of Food Engineering*, 73, 281–289.

21-Sacilik, K. R. Keskin, & A. K. Elicin. 2006. Mathematical modeling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of Food Engineering* 73, 231-238.

22-Simal, S., Mulet, A., Tarrazo, J., & Rosello', C. 1996. Drying models for green peas. *Food Chemistry*, 55, 121–128.

23-Togrul, H. 2005. Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices. *Journal of Food Engineering*. 71. 311–323.

24-Van Arsdel, N. B., Copley, M. J. 1963. Food Dehydration. AVI Publishing, Westpoint, CT.

25-Varadharaju, N., Karunanidhi, C., & Kailappan, R. 2001. Coffee cherry drying: A two-layer model. *Drying Technology*, 19, 709–715.

26-Xanthopoulos, G., Yanniotis, S. and Lambrinos, Gr., 2009, Water diffusivity and drying kinetics of air drying of figs. *Drying Technology*, 27(3): 502–512.

27-Zielinska, M. and Markowski, M. 2010. Air drying characteristics and moisture diffusivity

5- منابع

1-بهروزی خزائی، ن. و همکاران. 1386. بررسی شاخص‌های مهم خشک شدن انگور در روش خشک کردن با جریان هوای گرم به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی. پژوهش کشاورزی: آب، خاک و گیاه در کشاورزی. جلد هفتم. شماره‌ی سوم.

2-Ahrne', L., Prothon, F., & Funebo, T. 2003. Comparison of drying kinetics and texture effects of two calcium pretreatments before microwave-assisted dehydration of apple and potato. *International Journal of Food Science and Technology*, 38, 411–420.

3-Akanbi, C. T., Adeyemi, R. S., & Ojo, A. 2006. Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices. *Journal of Food Engineering*, 73, 141–146.

4-Akanbi, C. T., & Oludemi, F. O. 2003. Effect of processing and packaging on the lycopene content of tomato products. *International Journal of Food Properties*, 7(1), 139–152.

5-Akgun, N. A., Doymaz, I. 2005. Modelling of olive cake thin-layer drying process. *Journal of Food Engineering*, 68, 455–461.

6-Brennan, J. G., Butters, J. R., Cowell, N. D., & Lilly, A. E. V. 1981. *Food engineering operations* (2nd ed.). London: Applied Sciences Publishers.

7-Dermesonlouoglou, E. K., Giannakourou, M. C., Taoukis, P. S. 2007. Kinetic modelling of the degradation of quality of osmo-dehydrofrozen tomatoes during storage. *Journal of Food Chemistry* 103, 985–993.

8-Doymaz, I. 2004. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 61, 359–364.

9-Doymaz, I. 2005. Drying characteristics and kinetics of okra. *Journal of Food Engineering*, 69, 275–279.

10-Doymaz, I., 2007. Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering* 78, 1291–1297.

11-Doymaz, I., Ismail, O., 2010. Drying characteristics of sweet cherry. *Journal Of food and bioproducts processing* x x x, xxx–xxx.

12-Gupta, P., Ahmed, J., Shivhare, U. S., & Raghavan, G. S. V. 2002. Drying characteristics of red chilli. *Drying Technology*, 20, 1975–1987.

13-Karakaya, S., Kavas, A., Nehir El, S., Guduc, N., and Akdogan, L. 1995. Nutritive

