

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

سید محمد مشکانی<sup>1</sup>، زهرا پورفلاح<sup>1</sup>، حمید توکلی پور<sup>2</sup>، مرتضی محمدی<sup>1\*</sup>، منیره نهاردانی<sup>1</sup>

<sup>1</sup> دانش آموخته‌ی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سبزوار، گروه علوم و صنایع غذایی، سبزوار، ایران

<sup>2</sup> 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 گل‌نر و گل‌ماده‌ی آن روی یک پایه قرار دارد. ریشه‌ی آن باریک و بلند است. کدو از جمله صیفی‌جاتی است که در کشورهای نظیر ترکیه و ایران در سطح وسیعی کشت می‌شود. تحقیقات باستان‌شناسی نشان می‌دهد که کشت صیفی‌جات قدمتی 4500 ساله دارد. علاوه بر مصرف گوشت آن، دانه‌ی کدوی تبیل 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 رسانند. 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 مدل‌سازی 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 مدل‌سازی 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 مدل‌سازی 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 پیچ نسبت 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 مدلینگ 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 مدل‌سازی 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 (ممرت<sup>1</sup>، ساخت کشور آلمان) استفاده گردید.

### 2-2- آماده سازی نمونه

در این تحقیق، نمونه های کدو سبز (تابستانی، زوکینی<sup>2</sup>) تازه از بازار محلی تهیه گردید. سپس از لحاظ رنگ، قطر و وزن درجه بندی شد. کلیه ی نمونه ها جهت کاهش میزان شدت تنفس و تغییرات فیزیولوژیکی و شیمیایی در یخچال با دمای 5 تا 6 °C نگهداری شدند. نمونه های کدو سبز با کمک اسلایسر (کالباس بر صنعتی) در سه ضخامت 5، 3 و 7 میلی متر ورقه ورقه گردید. میزان رطوبت اولیه ی نمونه های 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  $t+dt$  می باشد. مقدار رطوبت  $m_e$  در مقایسه با رطوبت های  $m_t$  یا  $m_0$  بسیار ناچیز بوده و این مساله سبب تشخیص راحت این دو از یکدیگر می گردد. در این تحقیق، رفتار کاهش رطوبت با گذشت زمان مورد مطالعه قرار گرفت. مدل های منحنی خشک کردن ورقه ای نازک کدو سبز بر اساس مدل های توصیه شده توسط محققانی که در این زمینه کار نموده اند طبق جدول 1 انتخاب گردید. در این مطالعه، عملکردها و مدل های ریاضی توسط نرم افزار Sigma Plot Ver 11 بررسی گردید. منحنی های خشک کردن توسط 10 مدل رطوبت نسبی مختلف که به طور وسیعی برای مواد بیولوژیکی و اکثر مواد غذایی به کار برده می شود مورد برآش قرار گرفت. این مدل ها از طریق ساده کردن قانون دوم فیک مشتق شده است.

جدول 1- مدل های دینامیکی مختلف ارائه شده توسط نویسندگان برای منحنی های 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

### 2-3- مدل سازی ریاضی منحنی های خشک کردن

در این تحقیق نسبت رطوبت نمونه ها و آهنگ سرعت خشک کردن کدو سبز توسط معادلات 1 و 2 محاسبه گردید.

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

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

### 2-4- آنالیز داده های خشک کردن

مدل های رگرسیونی تغییرات رطوبت در طی خشک کردن جهت به دست آوردن مقادیر ضرایب ثابت این مدل های توصیفی با استفاده از داده های آزمایشگاهی مربوط به سینتیک خشک کردن ورقه های نازک برش های کدوی سبز برآورد گردید. در این تحقیق برای انتخاب مناسب ترین مدل توصیف کننده ی سینتیک خشک کردن ورقه ای نازک برش های کدوی سبز، ضریب

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

حل معادله فیک برای یک تیغه<sup>6</sup> به صورت زیر می باشد:

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

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)،  $D_{\text{eff}}$  ضریب نفوذ مؤثر (بر حسب متر مربع بر ثانیه)،  $t$  زمان (بر حسب ثانیه)،  $\text{MR}$  نسبت رطوبت (بدون بُعد) و  $k_0$  شیب خط می باشد. ضریب نفوذ معمولاً با رسم داده های تجربی خشک کردن بر حسب  $\text{Ln}$   $\text{MR}$  نسبت به زمان تعیین می گردد. ضریب نفوذ مؤثر، همان شیب زاویه ی بخش خطی است.

## 2-5- محاسبه ی انرژی اکتیواسیون

وابستگی قابلیت نفوذ مؤثر در رطوبت با دما بر حسب معادله ی آرنیوس بیان می شود (17 و 21).

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

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

که در آن  $D_0$  ضریب پیش نمایی معادله ی آرنیوس  $E_a$  (kJ/mol) ثابت جهانی گازهای ایده آل  $T$ ، (kJ/mol.k) دمای مطلق بر حسب کلوین می باشد. انرژی فعال سازی را می توان با ترسیم  $\text{Ln } D_{\text{eff}}$  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 اولیه ی 93/05% در مبنای تر تا مقدار رطوبت نهایی 5% در مبنای تر برای دماهای 60، 70 و 80 درجه ی سانتی گراد در سه ضخامت 3، 5 و 7 میلی متر در شکل های 1 تا 3 به وضوح مشاهده می گردد. نتایج، نشان داد که دمای هوای خشک کردن تاثیر

همبستگی<sup>1</sup>  $(R^2)$ ، ریشه ی میانگین مربعات خطا<sup>2</sup>  $(\text{RMSE})$ ، مربع کای کاهش یافته<sup>3</sup>  $(\chi^2)$  و خطای انحراف میانگین ها<sup>4</sup>  $(\text{MBE})$  بین داده های تجربی و نتایج پیش بینی شده توسط هر مدل محاسبه و با مدل های دیگر مورد مقایسه قرار گرفت. این معیارها توسط معادلات 3-5 محاسبه شدند.

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

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

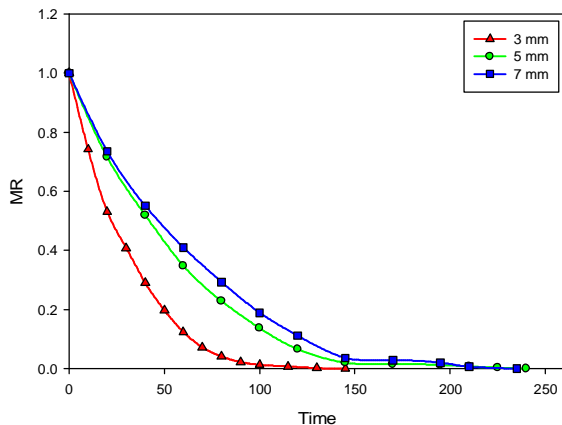
$$\text{MBE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{MR}_{\text{pre},i} - \text{MR}_{\text{exp},i}) \quad (5)$$

در این معادلات،  $\text{MR}_{\text{exp},i}$  نسبت رطوبت ورقه های کدوی سبز مشاهده شده در  $i$  امین اندازه گیری،  $\text{MR}_{\text{pre},i}$  نسبت رطوبت ورقه های کدوی سبز پیش بینی شده از مدل در  $i$  امین اندازه گیری،  $N$  تعداد مشاهدات (داده ها) و  $Z$  تعداد ضرایب ثابت به کار رفته در هر مدل می باشد. برای سنجش بهترین مدل جهت پیش بینی نحوه ی خشک شدن ورقه های کدوی سبز چهار معیار  $C^2$ ،  $\text{RMSE}$ ،  $R^2$  و  $\text{MBE}$  مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت، مدل مناسب خشک کردن با حداکثر همبستگی  $R^2$  و حداقل  $\text{RMSE}$ ،  $C^2$  و  $\text{MBE}$  به عنوان مدل مناسب برای توصیف سینتیک خشک کردن ورقه های 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 مکانیسم های انتقال رطوبت، گسترده و اغلب پیچیده است. پدیده ی انتقال معمولاً بر حسب نفوذ فشاری، نفوذ اجباری و نفوذ معمولی طبقه بندی می شود (انتقال خالص ماده بدون حرکت سیال، نفوذ معمولی نام دارد) (5). قانون فیک<sup>5</sup>، اغلب برای توصیف پدیده ی نفوذ رطوبت به کار می رود (10 و 20):

- 1-Determination of Coefficient ( $R^2$ )
- 2-Root Mean Square Error (RMSE)
- 3-Chi-square ( $\chi^2$ )
- 4-Mean Bias Error (MBE)
- 5-Fick's Law



شکل 3- تأثیر دما بر سینتیک خشک کردن برش های کدوی سبز در دمای 80 درجه سانتی گراد

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

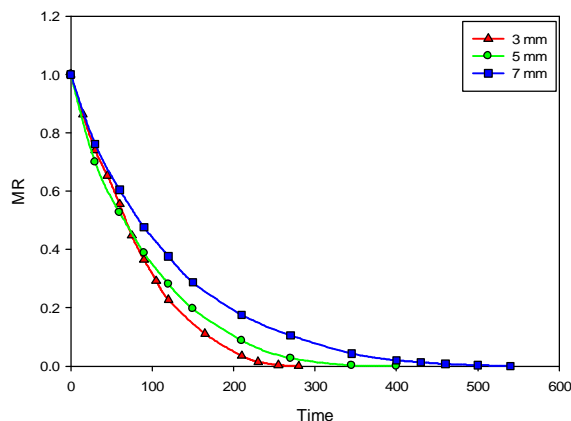
ضخامت های متفاوت

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	

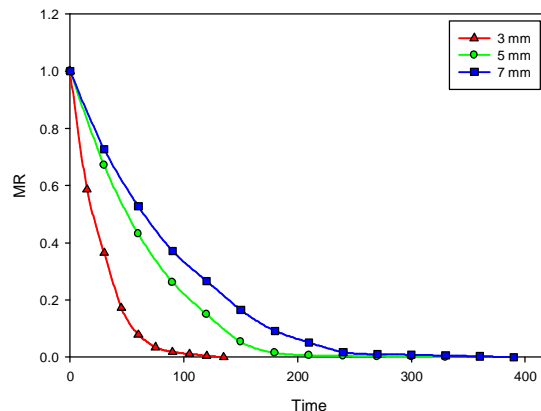
3-2- مدل سازی سینتیک خشک کردن

10 مدل دینامیکی خشک کردن لایه ای نازک ورقه های کدوی سبز در دامنه دمای 60 تا 80 درجه سانتی گراد در سه ضخامت 3، 5 و 7 میلی متر مورد برآزش قرار گرفت. در همه ی حالت ها مقدار  $R^2$  برای مدل های آماری مورد آزمون از 0/9862 بیش تر بود. همچنین، حداقل مقدار کای اسکور و ریشه ی میانگین مربعات خطا نیز برای اکثر مدل های آماری مورد برآزش به ترتیب 0/000035062 و 0/0014349 بود. نتایج آنالیز آماری، نشان داد که مدل میدلی<sup>1</sup> دارای بالاتری  $R^2$  و کم ترین  $\chi^2$

معنی داری روی زمان خشک کردن داشت به طوری که از نمودارهای خشک کردن می توان دریافت که زمان لازم جهت خشک کردن کدوی سبز در هر سه ضخامت 3، 5 و 7 میلی متر برای دمای 60 درجه سانتی گراد نسبت به دمای 70 درجه سانتی گراد و دمای 70 درجه سانتی گراد نسبت به دمای 80 درجه سانتی گراد، طولانی تر می باشد. 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 درجه سانتی گراد سبب افزایش آهنگ خشک کردن می گردد. مقادیر آهنگ خشک کردن کدوی سبز در دامنه دمای 60، 70 و 80 درجه سانتی گراد در سه ضخامت آزمون در جدول 2، نشان داده شده است.



شکل 1- تأثیر دما بر سینتیک خشک کردن برش های کدوی سبز در دمای 60 درجه سانتی گراد



شکل 2- تأثیر دما بر سینتیک خشک کردن برش های کدوی سبز در دمای 70 درجه سانتی گراد

جدول 3- نتایج آماری مدل‌های خشک کردن ورقه ای نازک کدوی سبز و مقادیر به دست آمده برای ضرایب ثابت مدل میدلی						
R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>	RMSE	MBE	ثابت‌های مدل میدلی	ضخامت (mm)	دما (°C)
0/9990	0/0001528	0/0104485	7/83014	b <sub>b</sub> -0/0001 <sub>a</sub> , 0/9871 <sub>n</sub> , 1/2023 <sub>k</sub> , 0/0043	3	60
0/9990	0/0001700	0/0100782	14/84	b <sub>b</sub> -0/0001 <sub>a</sub> , 0/9955 <sub>n</sub> , 0/9716 <sub>k</sub> , 0/012	5	
0/9997	0/0000351	0/005004454	15/306	-0/00004 <sub>a</sub> , 0/9966 <sub>n</sub> , 0/9734 <sub>k</sub> , 0/0093	7	
b						
0/9985	0/0002565	0/012406815	19/64	b <sub>b</sub> -0/00004 <sub>a</sub> , 0/997 <sub>n</sub> , 1/1204 <sub>k</sub> , 0/0241	3	70
0/9985	0/0002187	0/0120738	85/00	-0/00003 <sub>a</sub> , 0/9953 <sub>n</sub> , 1/2008 <sub>k</sub> , 0/0062	5	
0/9985	0/0001968	0/011856	47/25	-0/00004 <sub>a</sub> , 0/9931 <sub>n</sub> , 1/1394 <sub>k</sub> , 0/0059	7	
b						
0/9986	0/0001859	0/01152371158	42/32	b <sub>b</sub> -0/0001 <sub>a</sub> , 0/9942 <sub>n</sub> , 1/1011 <sub>k</sub> , 0/0220	3	80
0/9985	0/0002094	0/0120410	36/70	-0/00004 <sub>a</sub> , 0/9928 <sub>n</sub> , 1/1749 <sub>k</sub> , 0/0088	5	
0/9977	0/0003476	0/01522259	21/45	b <sub>b</sub> -0/0001 <sub>a</sub> , 0/9920 <sub>n</sub> , 1/1167 <sub>k</sub> , 0/0094	7	

خشک کردن دانه‌ی انگور را به طور مطلوب تری توصیف می‌نماید (19).

### 3-3- انتشار رطوبت موثر

مقادیر انتشار رطوبت مؤثر تعیین شده برای ورقه‌های کدوی سبز خشک شده در جدول 4 نمایش داده شده است. مقادیر  $D_{eff}$  برای ورقه‌های کدوی سبز در دامنه‌ی دمایی 60 تا 80 درجه‌ی سانتی‌گراد در دامنه‌ی  $(m^2/s)$   $5/81 \times 10^{-6}$  تا  $2/13 \times 10^{-5}$  قرار دارد. نتایج، نشان داد که با افزایش دمای خشک کردن و کاهش مقدار ضخامت برش‌ها مقدار انتشار رطوبت مؤثر افزایش می‌یابد که این مطلب از طریق حرکت یا انتقال جرم از منافذ مؤینه ماده‌ی غذایی توصیف می‌گردد. همان‌طور که در شکل 4 مشاهده می‌گردد در دمای 80 درجه‌ی سانتی‌گراد و ضخامت 3 میلی‌متر بالاترین مقدار انتشار رطوبت مؤثر مشاهده می‌گردد. مقادیر  $D_{eff}$  به طور مشابه توسط سایر نویسندگان برای کیوی و سایر سبزیجات گزارش گردید. به طوری که انتشار رطوبت برای کیوی با خشک‌کن جابه‌جایی هوا با سرعت 1/1 متر بر ثانیه در دامنه‌ی دمایی 40 تا 70 درجه‌ی سانتی‌گراد  $7/53 \times 10^{-12} m^2/s$  - 3/79 بود. بدین صورت که انتشار رطوبت برای گوجه‌فرنگی در دامنه‌ی دمایی 45-75 درجه‌ی سانتی‌گراد،  $12/27 \times 10^{-9} m^2/s$  - 3/72 ،  $1 \times 10^{-9} m^2/s$  - 0/87 برای گوجه‌فرنگی گیلانی در دامنه‌ی 40 تا 60 درجه‌ی سانتی‌گراد،  $2/17 \times 10^{-9} m^2/s$  - 0/87 برای سیب

RMSE می‌باشد. نتایج مشابه توسط سایر محققان بر روی سبزیجات مختلف مشاهده گردید (20 و 21). در جدول 3، مقادیر به دست آمده برای ضرایب ثابت مدل میدلی که بهترین برازش را از داده‌های خشک کردن برش‌های کدوی سبز داشت، آورده شده است.

در تحقیقاتی دیگر درمزن لوگلو و همکاران (2007) سینتیک مدل سازی و تخریب کیفیت گوجه‌فرنگی را در طی خشک کردن اسمزی را مورد بررسی قرار دادند (7). دویماز (2004) لایه‌های نازک هویج به ضخامت 0/5 سانتیمتر را در چهار دمای 50، 60، 65 و 70 درجه‌ی سانتی‌گراد با سرعت 0/5 تا 1 متر بر ثانیه به وسیله‌ی خشک‌کن آزمایشگاهی خشک نمود نشان داد که مدل پیچ نسبت به مدل هندرسون و پاییس، برازش بهتری از داده‌های خشک کردن داشت (8). دویماز و اسماعیل (2010) ویژگی‌های خشک کردن گیلان را مطالعه نمودند که تاثیر امولسیون‌های قلیایی و اتیل اولئات بر ویژگی‌های خشک کردن گیلان در سه سطح دمایی 60، 70 و 75 درجه‌ی سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت و در آن مدل پیچ به عنوان بهترین مدل برای توصیف ویژگی‌های خشک کردن گیلان ارائه شد. ضریب نفوذ موثر رطوبت در دامنه‌ی دمایی 60-75 درجه‌ی سانتی‌گراد  $5/683 \times 10^{-10}$  و  $1/544 \times 10^{-9} m^2/s$  اندازه‌گیری گردید (11). روبرت و همکاران (2008) سینتیک خشک کردن دانه‌ی انگور را مورد بررسی قرار داد. نتایج، نشان داد که مدل لویس ویژگی‌های

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 پیش تیمار اتیل اولئات قلیایی 2% و نمونه‌ی کنترل شده به ترتیب (17/40 kJ/mol) و (32/94 kJ/mol)، گیلاس خشک شده با پیش تیمار اتیل اولئات قلیایی 2% و نمونه‌ی کنترل شده به ترتیب (43/05 kJ/mol) و (49/17 kJ/mol)، انجیر خشک شده (12، 20، 21، 22، 26، 9، 8، 6) می‌باشد.

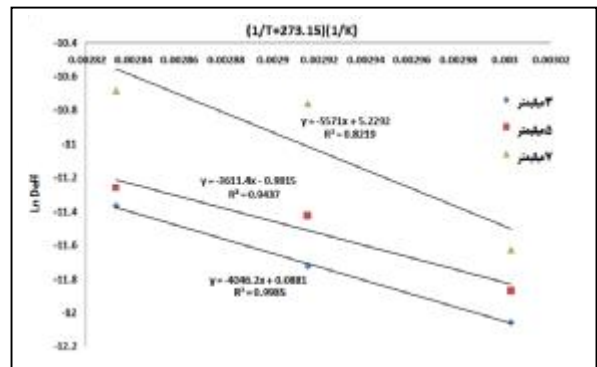
جدول 5- مقدار انرژی اکتیواسیون به دست آمده برای کدوی سبز

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  $\chi^2$  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 انرژی  $(m^2/s)$   $5/81 \times 10^{-6}$  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.

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،  $5/65-7/53 \times 10^{-10} m^2/s$  برای گوجه‌فرنگی خشک شده در دامنه‌ی دمایی 50 تا 70 درجه‌ی سانتی‌گراد و  $1/544 \times 10^{-9} m^2/s$  تا  $5/683 \times 10^{-10} m^2/s$  برای گیلاس 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 <sub>eff</sub> (m <sup>2</sup> /s)	ضخامت (mm)	دما هوای (°C)
0/0000085	3	60
0/000007	5	
0/0000058	7	
0/0000021	3	70
0/0000011	5	
0/0000087	7	
0/0000021	3	80
0/0000013	5	
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 کدوی سبز در جدول 5، نشان داده شده است. مقدار انرژی

14-Kavak Akpinar, 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 of carrots. *Chemical Engineering and Processing*. 49. 212–218.

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