

سینتیک خشک کردن برش‌های سیب‌زمینی ترشی (*Helianthus tuberosus* L.) با روش جابه‌جایی هوای داغ

زهرا پورفلاح^{1*}، منیره نهاردانی²، محمد سلامی نیا³، سیمین نوریان⁴، مرتضی محمدی⁵

^{1,2,4,5} دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد مهندسی کشاورزی علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سبزوار، سبزوار، ایران
³ کارشناس آزمایشگاه گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سبزوار، سبزوار، ایران

تاریخ پذیرش: 90/4/25

تاریخ دریافت: 90/2/19

چکیده

در این تحقیق، برش‌های سیب‌زمینی ترشی با ضخامت 3، 5 و 7 میلی‌متر توسط یک خشک‌کن جابه‌جایی در مقیاس آزمایشگاهی با هوای داغ در دامنه‌ی دمایی 60 °C، 70 و 80 خشک شدند. اثر دمای هوا و ضخامت بر روی پارامتر سینتیکی در حین خشک کردن و اثر دما و زمان خشک کردن و بر روی راندمان استخراج اینولین، بررسی شد. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت بین 5.13×10^{-9} تا 1.2×10^{-8} متغیر بود که با افزایش دما افزایش و با افزایش ضخامت، کاهش پیدا کرد. رابطه‌ی آرنیوس با مقادیر انرژی فعال سازی برای ضخامت 3، 5 و 7 میلی‌متر به ترتیب 23.37، 28.28، 31.93 kJ/mol اثر دما را بر روی نفوذ رطوبت بیان می‌کند. برای مدل سازی سینتیک خشک کردن از ده مدل مختلف استفاده گردید. این مدل‌ها براساس ضریب تبیین (R^2)، میانگین نسبی درصد انحراف (EMD)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و مربع کای (C^2) مقایسه شدند. مدل هندرسون و پاییس اصلاح شده، بهترین برازش را برای داده‌های خشک کردن سیب‌زمینی ترشی نشان داد. با افزایش دمای خشک کردن، اختلاف معنی‌داری بر روی راندمان استخراج اینولین مشاهده نگردید و با کاهش زمان خشک کردن درصد اینولین، افزایش از خود نشان داد.

واژه‌های کلیدی: سیب‌زمینی ترشی، خشک کردن با جابه‌جایی هوای داغ، سینتیک خشک کردن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، انرژی فعال سازی.

* مسوول مکاتبه: zahrapourfallah@yahoo.com

1- مقدمه

هر دو پدیده انتقال حرارت و انتقال جرم در این فرایند به طور همزمان اتفاق می افتد. ضریب انتقال جرم در این فرایند تابع، نوع ماده غذایی و توزیع رطوبت و دمای آن و نیز سرعت و دمای هوا است (1). از سوی دیگر، سینتیک خشک کردن بر مبنای نمایه تغییرات رطوبت محصول بر حسب زمان قرار دارد و تعیین پارامترهای آن در طراحی و بهینه سازی خشک کن کمک زیادی می کند. یافتن این داده ها از منابع، همیشه امکان پذیر نیست و در این موارد باید از آزمون های تجربی به دست آیند. پژوهشگران بسیاری بر روی انتقال جرم و سینتیک خشک کردن مواد غذایی و محصولات کشاورزی کار کرده اند (2). برای مثال، خانزاده و همکاران (10) خشک کردن با جابه جایی هوای داغ برش ترپ سفید ایرانی را در ضخامت 2 میلی متر در دامنه دمای 80 تا 100 درجه سانتی گراد را بررسی کردند. لی و کیم² (14)، خشک کردن تحت خلاء برش های ترپ سفید را در ضخامت های 4 و 6 میلی متر در دامنه دمای 40-60 درجه سانتی گراد مورد بررسی قرار دادند. بابالیس و همکاران³ (3) تحقیقاتی را بر روی خشک کردن انجیر در دامنه دمای 55-85 درجه سانتی گراد و محدوده سرعت هوای 0.5-3 متر در ثانیه در یک خشک کن تونلی انجام دادند. پژوهش هایی نیز در زمینه خشک کردن بامیه (19) در شرایط مختلف پیش فرایند، ضخامت و درجه حرارت و توت سفید (5) در دمای 50 درجه سانتی گراد، فلفل دلمه ای سبز (7) در دامنه دمای 30-70 درجه سانتی گراد و برخی سزیجات (9) مانند سیب زمینی، گوجه فرنگی، هویج، قارچ، سیر، پیاز و غیره صورت گرفته است.

هدف از این پژوهش، بررسی اثر خشک کردن با هوای داغ سیب زمینی ترشی و تعیین پارامترهای سینتیک خشک کردن این محصول است تا بهترین مدل را برای تشریح فرایند خشک کردن سیب زمینی ترشی ارزیابی نموده و ضریب نفوذ موثر رطوبت⁴ و انرژی فعال سازی⁵ سیب زمینی ترشی ارائه شوند.

2- مواد و روش ها

2-1- مواد

سیب زمینی ترشی تازه از فروشگاه های محلی از شهرستان محلات

سیب زمینی ترشی¹ با نام علمی *Helianthus tuberosus L.* از خانواده ی کاسنی می باشد. سیب زمینی ترشی یکی از سبزیجات ریشه ای بومی آسیا است که به صورت خشک، نمک دار شده، ترشی و محصولات تخمیر شده، مورد استفاده قرار می گیرد. این گیاه به سبب محتوی قند بالا، یکی از منابع عمده اینولین و امکان رشد در مناطق حاشیه ای بسیار سودمند است. سیب زمینی ترشی، منبع عالی از فروکتوز و مفید در صنایع غذایی و داروسازی می باشد. به دلیل خواص درمانی، سیب زمینی ترشی را در بیماران قندی و اورمی به کار می برند. علاوه بر این، آن را پس از خیساندن در سرکه و در سالاد به عنوان غذا مورد استفاده قرار می دهند. غده سیب زمینی ترشی محتوی 20.4 تا 30.9% ماده ی خشک است که ترکیب اصلی آن را کربوهیدرات تشکیل داده است. بیش تر این کربوهیدرات شامل اینولن محلول در آب است. غلظت اینولین 50 تا 56% وزن خشک یا 11.3 تا 14.2 گرم در 100 گرم جرم غده تازه می باشد. کربوهیدرات محلول، علاوه بر اینولن شامل مشتقات فروکتوالیگوساکاریدها و کمی قند، گلوکز و فروکتوز و دی ساکارید ساکارز می باشد. غده، علاوه بر کربوهیدرات غیر قابل حل محتوی فیبر خوراکی می باشد. به عنوان مثال، بخش سلولز غیر قابل حل (سلولز و لیگنین) و بخش سلولز قابل حل (پکتین و همی سلولز) (4). سیب زمینی ترشی به دلیل میزان رطوبت بالا، باید قبل از انبارمانی یا فراوری های بعدی سطح رطوبت آن تا حد ایمن کاهش یابد. خشک کردن آفتابی از قدیمی ترین روش های مورد استفاده برای نگه داری این گیاه می باشد. زمان خشک کردن در این روش، طولانی و وقت گیر بوده و تحت تاثیر شرایط آب و هوایی در طول روز قرار داشته که کنترل میزان رطوبت محصول نهایی را دشوار می سازد. علاوه بر این، در طی خشک کردن آفتابی، ممکن است محصول را به دلیل آلودگی و گرد و غبار هوا، حمله ی حشرات و جوندگان با افت کیفیت مواجه کند. خشک کردن با هوای داغ، یکی از روش های جایگزین برای خشک کردن آفتابی است. در این روش در مقایسه با خشک کردن آفتابی شرایط خشک کردن تحت کنترل بیش تر، زمان خشک کردن کوتاه تر و کیفیت محصول نهایی بالاتر است. انتقال حرارت توسط جابه جایی هوای گرم به طرف محصول صورت گرفته و باعث تبخیر رطوبت از محصول می شود. بنابراین،

1. Lee&kim

2. Babalis et al

4. Effective diffusion coefficient

5. Activation energy

1. Jerusalem artichoke

استفاده از نرم افزار سیگما پلات نسخه 10 انجام گرفت. ضریب تبیین R^2 (3) نخستین معیار جهت انتخاب بهترین مدل برای تشریح منحنی خشک کردن بود. علاوه بر این، برای دقت بیش تر از میانگین نسبی درصد انحراف (EMD) (4)، مجذور میانگین مربعات خطا⁵ (RMSE) و مربع کای کاهش یافته⁶ (C^2) برای تعیین کیفیت برازش برازش ها مورد استفاده قرار گرفتند. این پارامترها توسط معادلات (2-3) و (2-4) بیان می شوند:

$$EMD = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|My_{p,i} - My_{e,i}|}{My_{e,i}} \quad (3-2)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{p,i} - MR_{e,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4-2)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{p,i} - MR_{e,i})^2}{N - Z} \quad (5-2)$$

که $MR_{exp,i}$ نسبت رطوبت تجربی، $MR_{pre,i}$ نسبت رطوبت پیش بینی شده، N تعداد مشاهدات و Z تعداد ثابت ها در مدل است و وقتی یک مدل بهترین برازش را نشان می دهد که EMD، RMSE و (C^2) در حداقل مقدار و (R^2) حداکثر باشد.

4-2- نفوذ موثر رطوبت وانرژی فعال سازی

برش های سیب زمینی ترشی به صورت تیغه⁷ مدل سازی می شود و از قانون دوم فیک⁸ برای انتقال رطوبت در فرآیند خشک کردن محصول استفاده می شود (21):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \quad (6-2)$$

که M مقدار رطوبت در مبنای خشک، D_{eff} ضریب نفوذ موثر رطوبت z cm^2/s جهت انتقال رطوبت و t زمان خشک کردن است. حل معادله ی فیک برای یک تیغه به صورت زیر ارائه شده است (2):

$$(7-2)$$

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[- (2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right]$$

ضریب نفوذ موثر رطوبت را می توان از شیب خط راستی که از برازش دادن $\ln(MR)$ در مقابل زمان خشک کردن به دست می آید، محاسبه کرد. همچنین تابعیت دمایی ضریب نفوذ موثر رطوبت توسط رابطه ی آرنیوس بیان می شود:

$$D_{eff} = D_0 \exp \left(\frac{E_a}{RT} \right) \quad (8-2)$$

تهیه شد و قبل از استفاده در دمای اتاق نگهداری شدند. قبلاً از فرآیند آزدایی سیب زمینی ترشی ها به منظور حذف غبار و آلودگی های احتمالی به صورت دستی شسته شدند. سپس، سیب زمینی ترشی ها به وسیله ی دستگاه برش گیر (TEFAL) با ضخامت 3، 5 و 7 میلی متر برش خوردند تا به صورت تیغه های نازک تبدیل شوند. بلافاصله نمونه ها توزین شدند و بدون هیچ پیش تیماری در داخل آون جابه جایی هوای گرم (JEIO TECH, Type F-02G) قرار گرفتند. محتوی رطوبت اولیه ی نمونه های سیب زمینی ترشی به وسیله ی روش آون جابه جایی هوای گرم در $103 \pm 2^\circ C$ به مدت 16 ساعت تعیین شد (2).

2-2- آزمون خشک کردن

برش های سیب زمینی ترشی در دماهای 60، 70 و $80^\circ C$ و در 3 ضخامت 3، 5 و 7 میلی متر پس از رسیدن آون به شرایط پایدار، خشک شدند. برش ها به صورت لایه ی نازک در پلیت های شیشه ای گذاشته شده و سپس در داخل آون قرار گرفتند. وزن نمونه ها ابتدا در فاصله های زمانی 15 دقیقه ای و سپس در فاصله های زمانی 30 و 60 دقیقه ای توسط ترازوی دیجیتال سارتریوس با دقت 0.001 (ساخت کشور ژاپن) و پس از سرد شدن نمونه به مدت 10 دقیقه در دیسکاتور، توزین شد. هر آزمون در 3 تکرار انجام شد و میانگین نتایج برای آنالیز مورد استفاده قرار گرفت.

2-3- مدل سازی ریاضی¹

نسبت رطوبت² (MR) و آهنگ خشک کردن (DR) برش های سیب زمینی ترشی در طی خشک کردن به روش جابه جایی هوای گرم با استفاده از معادلات (2-1) و (2-2) محاسبه شدند:

$$MR = \frac{M(t) - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1-2)$$

$$DR = \frac{M(t+\Delta t) - M(t)}{\Delta t} \quad (2-2)$$

که $M(t)$ ، M_0 ، M_e ، $M(t+\Delta t)$ به ترتیب میزان رطوبت در هر لحظه، میزان رطوبت اولیه، میزان رطوبت تعادلی و میزان رطوبت در لحظه $t+\Delta t$ بر حسب میزان رطوبت در مبنای خشک (kgw/kgdm) و t زمان خشک کردن بر حسب دقیقه است.

ده مدل معروف خشک کردن لایه ی نازک در جدول 1 به منظور انتخاب بهترین مدل برای تشریح منحنی خشک کردن برش های سیب زمینی ترشی، مورد آزمون قرار گرفتند و آنالیز رگرسیون غیر خطی و محاسبه ی پارامترهای RMSE، EMD و (C^2) با

3 - Coefficient of determination

4 - Mean relative percent deviation

5 - Root mean square error

6 - Reduced chi- square

7- Slab

8- Fick's second law

1 - Mathematical modeling

2 - Moisture ratio

گردید. راندمان استخراج از رابطه‌ی (2-9) به دست آمد:

$$(9-2)$$

$$\text{راندمان استخراج اینولین} = \left[\frac{\text{مقدار مایع استخراج شده X محتوی اینولین}}{\text{جرم پودر سیب زمینی}} \right] \times 100$$

6-2- آنالیز آماری

آنالیز رگرسیون غیر خطی و محاسبه‌ی پارامترهای $RMSE$,

EMD و χ^2 و R^2 با استفاده از نرم افزار سیگما پلات نسخه‌ی 10

انجام گرفت. مقایسات میانگین با نرم افزار spss نسخه 16 در سطح 0.01 انجام گرفته است.

3- نتایج و بحث

3-1- منحنی خشک کردن سیب‌زمینی ترشی

برش‌های سیب‌زمینی ترشی به صورت تک لایه در آون جابه جایی هوای گرم و در دماهای 60°C ، 70°C ، 80°C و ضخامت 3، 5 و 7 میلی متر با رطوبت اولیه‌ی 3.926 کیلوگرم آب به ازای هر کیلوگرم ماده‌ی خشک تا رسیدن به محتوی رطوبت ثابت خشک شدند.

شکل 1(a) نشان دهنده‌ی تغییرات نسبت رطوبت بر حسب تابعی از زمان خشک کردن در دماهای 60°C ، 70°C ، 80°C است. از این شکل می‌توان مشاهده نمود که میزان رطوبت به طور پیوسته در طی زمان خشک کردن کاهش می‌یابد و همان طور که انتظار می‌رود افزایش دمای هوا باعث کاهش زمان خشک کردن می‌گردد. زمان مورد نیاز برای حذف مقدار 3.926 کیلوگرم آب به ازاء هر کیلوگرم ماده‌ی خشک، برای دماهای 60°C ، 70°C ، 80°C به ترتیب 900، 450 و 75 دقیقه بود که این بدان معنی است که افزایش در دمای هوای خشک کن از 60 به 70 و 80 درجه‌ی سانتی گراد زمان خشک کردن را کاهش می‌دهد. همین طور از شکل 1(b) تغییرات نسبت رطوبت بر حسب تابعی از زمان خشک کردن در ضخامت‌های مختلف 3، 5 و 7 میلی متر است که از این شکل می‌توان مشاهده نمود که میزان رطوبت به طور پیوسته در طی زمان خشک کردن کاهش می‌یابد و همان طور که انتظار

که D_0 ضریب پیش نمایی (m^2/s) ، E_a انرژی فعال سازی برای نفوذ رطوبت (kJ/mol) ، R ثابت جهانی گازها، T دمای مطلق $(8.3143 \times 10^{-3} \text{ kJ}/\text{mol.k})$ است. انرژی فعال سازی را می‌توان از شیب خط راستی که در اثر برازش $\text{Ln}D_{\text{eff}}$ بر حسب $1/T$ حاصل می‌شود، محاسبه نمود.

جدول 1 - مدل‌های خشک کردن لایه‌ی نازک مورد استفاده برای مدل سازی خشک کردن برش‌های سیب‌زمینی ترشی.

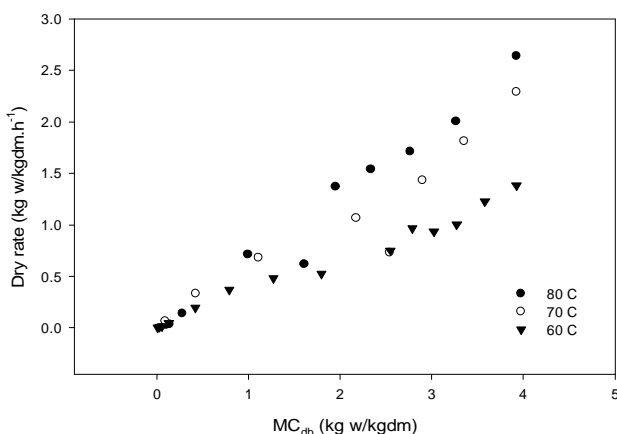
نام	مدل
نیوتنی ¹ (10)	$MR = \exp(-k.t)$
پیچ ² (11)	$MR = \exp(-k.t^n)$
پیچ اصلاح شده ³ (12)	$MR = \exp(-(k.t)^n)$
هندرسون و پابیس ⁴ (13)	$MR = a.\exp(-k.t)$
لگاریتمی ⁵ (14)	$MR = a.\exp(-k.t) + c$
دو جمله ای ⁶ (8)	$MR = a.\exp(-k.t) + b.\exp(-h.t)$
دوجمله ای نمایی ⁷ (15)	$MR = a.\exp(-k.t) + (1-a)\exp(-k.a.t)$
تقریب نفوذ ⁸ (16)	$MR = a.\exp(-k.t) + (1-a).\exp(-k.b.t)$
هندرسون و پابیس اصلاح شده ⁹ (17)	$MR = a.\exp(-k.t) + b.\exp(-g.t) + c.\exp(-k_0.t)$
میدلی ¹⁰ (18)	$MR = a.\exp(-k.(t^n)) + b.t$

5-2- راندمان استخراج اینولین

اسلایس‌ها تا رطوبت 6% خشک شد و به صورت پودر، مورد استفاده قرار گرفت. اینولین به روش هیدروترمال استخراج و در 4500g برای 10 دقیقه سانتریفوژ شد. ذرات معلق خارج و قسمت بالایی برای آزمون مورد استفاده قرار گرفت. کربوهیدرات کل به وسیله‌ی آزمون فنول سولفوریک اسید (اینولین به عنوان استاندارد) به روش لینگان و همکاران 2007 تعیین گردید و قند احیا با آزمون دی نیتروسالسیلیک اسید (D-(-) - فروکتوز $M_w = 180.16$.Fluka) به عنوان استاندارد) انجام گردید(13). محتوی اینولین از اختلاف کربوهیدرات کل و قند احیا محاسبه

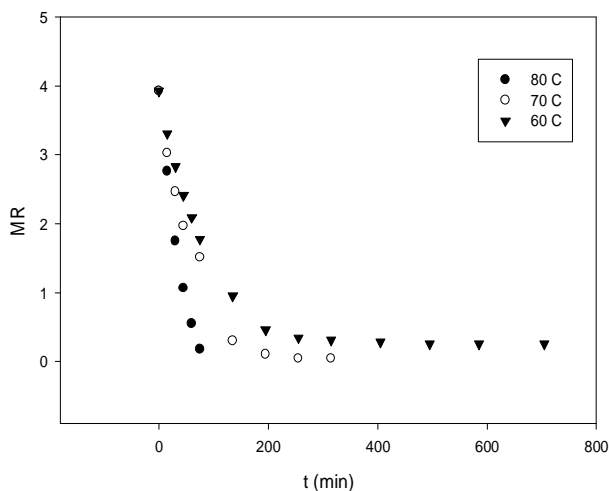
- 1-Newton
- 2-Page
- 3-Modified page
- 4-Henderson&pabis
- 5-Logarithmic
- 6-Twe term
- 7-Exponential two term
- 8-Approximation of diffusion
- 9-Modified Henderson&pabis
- 10-Midill et al

است. همان‌طور که مشاهده می‌شود آهنگ خشک کردن به‌طور پیوسته با کاهش میزان رطوبت یا افزایش زمان خشک کردن، کاهش می‌یابد. آهنگ خشک کردن برای برش‌های سیب‌زمینی ترشی که در دمای بالاتری خشک شده بودند نسبت به برش‌های سیب‌زمینی ترشی که در دمای پائین‌تری خشک شده بودند (در میزان رطوبت یکسان) بیش‌تر بود. همین‌طور آهنگ خشک کردن برای برش‌ها با ضخامت کم‌تر در یک دمای ثابت بالاتر بوده در نتیجه زمان خشک کردن در دماهای بالاتر و ضخامت کمتر کاهش می‌یابد چون رطوبت نسبی هوا با افزایش درجه حرارت خشک کردن، کاهش می‌یابد (11) و با کاهش ضخامت، خروج رطوبت آسان‌تر انجام می‌گردد. با توجه به شکل 2(a)، خشک کردن برش‌های سیب‌زمینی ترشی در دماهای 60°C ، 70 تا رطوبت 1.7% در مبنای خشک در مرحله‌ی آهنگ ثابت انجام می‌شود و مقاومت انتقال جرم خارجی کنترل‌کننده فرآیند خشک کردن است ولی در دمای 80°C درجه‌ی سانتی‌گراد احتمالاً به دلیل پدیده‌ی سخت شدن پوسته²، مرحله‌ی آهنگ ثابت، مشاهده نمی‌شود و به جای آن مرحله‌ی آهنگ کاهنده³ دیده می‌شود و مقاومت انتقال جرم داخلی کنترل‌کننده فرآیند خواهد بود. شکل 2(b)، خشک کردن برش‌های در ضخامت مختلف را نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت سرعت انتقال رطوبت از بافت ماده به سطح و تبخیر کاهش یافته در نتیجه سرعت خشک کردن در ضخامت‌های بالا کم‌تر است.

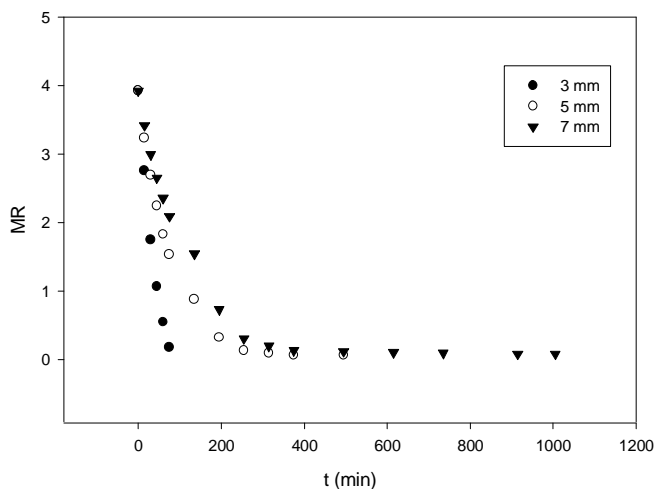


شکل 2 (a) - آهنگ خشک کردن در دماهای مختلف در ضخامت یکسان 5 میلی‌متر.

می‌رود افزایش ضخامت، باعث افزایش زمان خشک کردن می‌گردد.



شکل 1 (a) - منحنی خشک کردن در دماهای مختلف در ضخامت ثابت 3 میلی‌متر.



شکل 1 (b) - منحنی خشک کردن در ضخامت‌های مختلف در دمای ثابت 80°C .

3-2- آهنگ خشک کردن¹

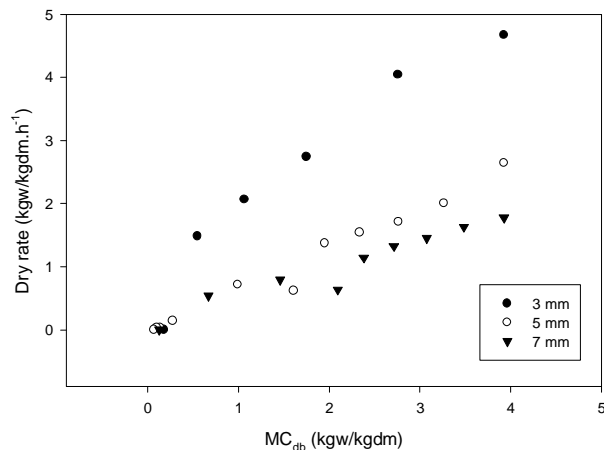
آهنگ خشک کردن برش‌های سیب‌زمینی ترشی با استفاده از معادله‌ی 2-2 محاسبه گردید. آهنگ خشک کردن بر حسب میزان رطوبت در مبنای خشک در شکل 2(a,b) نشان داده شده

مقادیر R^2 ، EMD، RMSE، (χ^2) برای مدل هندرسون و پایس اصلاح شده به ترتیب در دامنه‌ی 1-0.9938، 4.411398-0.000116-0.00051، 0.00822-0.027361، 109.5891 قرار دارد. جدول 4، پارامترهای خشک کردن را برای این مدل، نشان می‌دهد و منحنی خشک کردن برای مدل هندرسون اصلاح شده (شکل 3 (a,b)) همپوشانی مناسبی بین داده‌های اصلی و مدل انتخاب شده را نشان داده است.

3-4- ضریب نفوذ موثر رطوبت

مقادیر ضریب نفوذ موثر (D_{eff}) در ماه‌های مختلف با استفاده از معادله‌ی 2-8 به دست آمدند. این مقادیر در جدول 5 ارائه شده اند. مقادیر ضریب نفوذ موثر رطوبت برش‌های سیب‌زمینی ترشی در فرآیند خشک کردن در دامنه‌ی دمایی $60-80^\circ\text{C}$ از 5.13×10^{-9} تا 1.2×10^{-8} تغییر کرد. مقادیر D_{eff} به طور فزاینده ای با افزایش دمای هوای خشک کن افزایش یافت و با افزایش ضخامت مقادیر D_{eff} کاهش از خود نشان داد. در حالی که ضریب نفوذ موثر برای ترب سفید خشک شده تحت خلاء (14) در دامنه‌ی دمایی 40-60 درجه‌ی سانتی‌گراد و ضخامت 4 و 6 میلی‌متر در دامنه‌ی 5.37×10^{-9} - 6.92×10^{-9} m^2/s ایرانی (10) 5.37×10^{-9} - 1.49×10^{-9} قرار گرفت. علت کم‌تر بودن مقادیر ضریب نفوذ موثر نسبت به پژوهش حاضر این است که کاربرد دمای پایین برای بافت‌ترب سفید در هنگام خشک کردن سبب شده که آهنگ خشک شدن را نسبت به روش حاضر، کاهش می‌دهد.

پژوهش‌های زیادی نیز در مورد سایر محصولات کشاورزی انجام گرفته است. برای مثال، توکلی پور و همکاران (1) در دامنه‌ی دمایی 40-70 درجه‌ی سانتی‌گراد، مقدار ضریب نفوذ موثر را 2.10×10^{-9} - 7.06×10^{-10} m^2/s برای بامیه در دامنه‌ی دمایی 50-70 درجه‌ی سانتی‌گراد 1.165×10^{-8} - 7.131×10^{-9} m^2/s دویماز (5) برای توت سفید در 50°C و پیش‌فرآیندهای مختلف 2.231×10^{-10} - 6.909×10^{-10} m^2/s و فاستینو و همکاران (6) برای فلفل دلمه‌ای سبز در دامنه‌ی دمایی 30 تا 70°C ضریب نفوذ موثر را 8×10^{-9} - 9×10^{-10} m^2/s محاسبه کرده اند.



شکل 2 (b) - آهنگ خشک کردن در ضخامت‌های مختلف در دمای یکسان 80°C .

3-3- مدل‌های خشک کردن

اطلاعات محتوی رطوبتی که از آزمایش خشک کردن به دست آمده بودند به نسبت‌های رطوبتی (MR) تبدیل شدند و سپس با 10 مدلی که در جدول 1 ذکر شده اند برازش داده شدند. مدل‌های مختلف، توسط چهار معیار ضریب تبیین (R^2)، میانگین نسبی درصد انحراف (EMD)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و مربع کای (χ^2) با یکدیگر مقایسه شدند که نتایج آن در جدول 3، ارائه شده است. بر اساس این که کدام مدل بالاترین (R^2) و کم‌ترین EMD، RMSE، (χ^2) را داشته باشد، بهترین مدل تشریح خشک کردن لایه‌ی نازک برش‌های سیب‌زمینی ترشی انتخاب می‌شود. از جدول 3، مشخص است که به طور متوسط، بالاترین (R^2) و کم‌ترین EMD، RMSE، (χ^2) متعلق به مدل هندرسون و پایس اصلاح شده است. بنابراین، این مدل، بهترین برازش را انجام داده و به عنوان مدل برتر انتخاب می‌شود. خشک کردن مواد غذایی و محصولات کشاورزی به نوع فرآیند مقدماتی مثل بلانچینگ (آنزیم‌بری)، دامنه‌ی دمایی و نوع روش و روند خشک کردن وابسته است. برای مثال، ترب سفید ایرانی مدل میدلی و همکاران (10)، ترب سفید خشک شده تحت خلاء مدل لگاریتمی (22)، برای بامیه مدل پیچ اصلاح شده (19)، انجیر مدل نمایی دو جمله‌ای (3)، توت سفید مدل لگاریتمی (5) و فلفل دلمه‌ای سبز در ابتدای خشک کردن مدل پیچ و در انتهای خشک کردن نیوتن (6) پیشنهاد شده است.

جدول 3- نتایج آماری به دست آمده از مدل‌های مختلف خشک کردن.

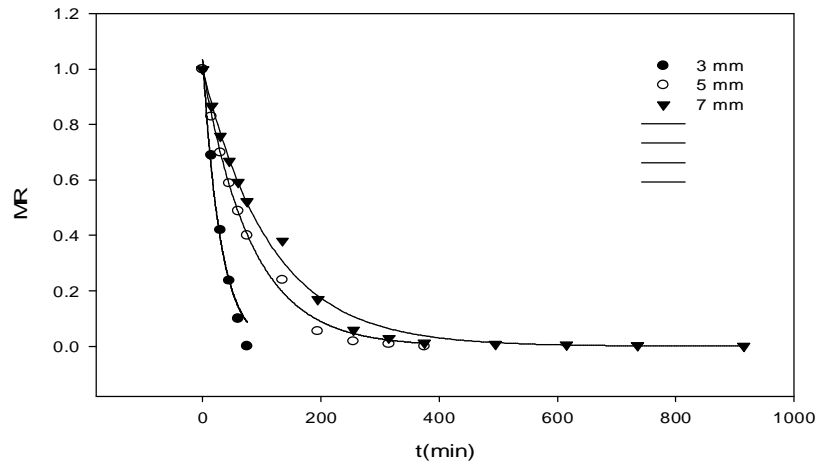
معیار				ضخامت	60°C
R ²	χ ²	RMSE	EMD		
0.9977	0.000306	0.016749	26.53519	3	نیوتنی
0.9962	0.000549	123.269	123.269	5	
0.9969	0.000417	0.019883	35.1349	7	
0.9988	0.000169	0.011856	13.86006	3	پیچ
0.9979	0.000319	0.016631	63.45956	5	
0.997	0.000429	0.019588	26.01177	7	
0.9987	0.000169	13.85999	13.85999	3	پیچ اصلاح شده
0.9979	0.000319	0.016631	63.45994	5	
0.997	0.000429	0.019588	26.01367	7	
0.9976	0.000314	0.016183	0.000169	3	هندرسون و پاییس
0.9965	0.000542	0.021678	113.5551	5	
0.997	0.000434	0.019709	37.54059	7	
0.9981	0.000255	0.013835	36.71219	3	لگاریتمی
0.998	0.000338	0.016437	117.6443	5	
0.9974	0.000395	0.018236	105.518	7	
0.999	0.000137	0.010692	13.63108	3	دو جمله ای
0.9987	0.000227	0.012913	109.9061	5	
0.9979	0.000345	0.016492	14.63039	7	
0.999	0.000137	0.010692	13.63108	3	دو جمله ای نمایی
0.9982	0.000272	0.015348	61.51169	5	
0.9973	0.000388	0.018633	16.73356	7	
0.9989	0.00014	0.010236	14.20032	3	تقریب نفوذ
0.9988	0.000206	0.012847	112.4099	5	
0.9977	0.000356	0.017306	75.63205	7	
0.999	0.000116	0.00822	19.94228	3	هندرسون و پاییس اصلاح شده
0.9987	0.000278	0.012912	109.5891	5	
0.9982	0.000341	0.015264	104.7988	7	
0.9986	0.00019	0.011243	20.49081	3	میدلی و همکاران
0.9985	0.000277	0.014245	60.1961	5	
0.9976	0.0004	0.017765	56.99022	7	

جدول 3- نتایج آماری به دست آمده از مدل‌های مختلف خشک کردن.

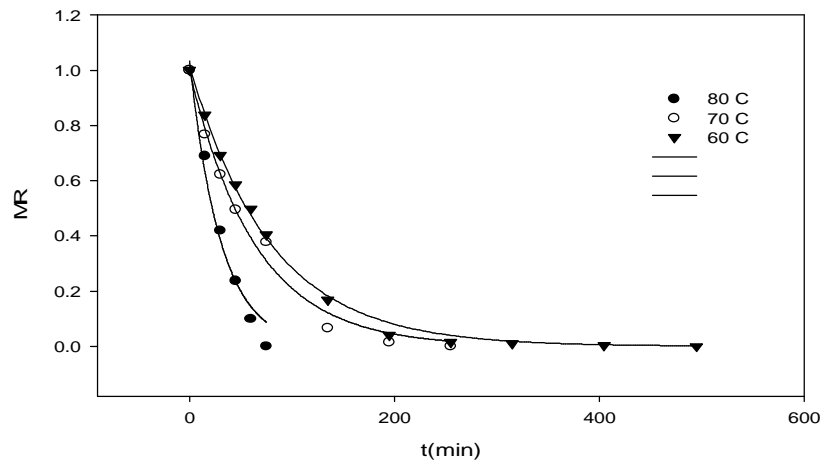
معیار				ضخامت	70°C
R ²	χ ²	RMSE	EMD		
0.9901	0.001374	0.034678	40.65543	3	نیوتنی
0.984	0.002317	0.045379	117.1726	5	
0.9945	0.000822	0.026821	29.67815	7	
0.9903	0.00157	0.034313	35.64598	3	پیچ
1	0.001782	0.037226	79.66563	5	
0.9958	0.000674	0.02341	28.89632	7	
0.9903	0.00157	0.034313	35.63704	3	پیچ اصلاح شده
1	0.001782	0.037226	79.66291	5	
0.9958	0.000674	0.02341	28.8959	7	
0.9901	0.001598	0.034617	41.42371	3	هندرسون و پاییس
1	0.002569	0.044701	112.8054	5	
0.9946	0.000876	0.02668	31.37992	7	
0.9928	0.001404	0.029621	17.06233	3	لگاریتمی
1	0.000979	0.02555	42.70814	5	
0.995	0.000871	0.025555	75.60845	7	
0.993	0.001697	0.029128	14.23275	3	دو جمله ای
1	0.000907	0.02459	39.65636	5	
0.9946	0.001028	0.026584	31.10829	7	
0.9908	0.001496	0.033492	32.66953	3	دو جمله ای نمایی
1	0.001681	0.036157	82.93412	5	
0.9963	0.000595	0.021989	28.288	7	
0.9925	0.001459	0.030195	14.43837	3	تقریب نفوذ
1	0.000973	0.025473	39.20458	5	
0.9964	0.000621	0.021575	28.80764	7	
0.9938	0.002995	0.027361	23.47317	3	هندرسون و پاییس اصلاح شده
1	0.001097	0.019118	4.411398	5	
0.9981	0.000511	0.015981	27.917	7	
0.9926	0.001799	0.029996	21.66318	3	میدلی و همکاران
1	0.00126	0.026454	44.92997	5	
0.9965	0.000665	0.021389	29.036	7	

جدول 3- نتایج آماری به دست آمده از مدل‌های مختلف خشک کردن.

معیار				ضخامت	80°C
R ²	χ ²	RMSE	EMD		
0.9768	0.002785	0.052769	11.29491	3	نیوتنی
0.9975	0.000313	0.016876	31.28945	5	
0.9946	0.000671	0.025899	0.809168	7	
0.9958	0.000752	0.022384	2.919101	3	پیچ
0.9976	0.000342	0.016718	27.98679	5	
0.9948	0.000749	0.025477	32.3785	7	
0.9958	0.000752	0.022384	2.919158	3	پیچ اصلاح شده
0.9976	0.000342	0.016718	27.98664	5	
0.9948	0.000749	0.025477	32.37859	7	
0.9788	0.003822	0.050478	10.94508	3	هندرسون و پاپیس
0.9975	0.000348	0.016875	31.35321	5	
0.9946	0.000773	0.025889	308.8141	7	
0.9996	0.000104	0.007226	0.004683	3	لگاریتمی
0.9981	0.000296	0.01467	14.64038	5	
0.995	0.000767	0.024773	77.41787	7	
0.9997	0.00012	0.006315	0.003283	3	دو جمله ای
0.9981	0.000295	0.014648	14.12142	5	
0.9958	0.000702	0.022693	69.74363	7	
0.9942	0.00104	0.026336	0.01592	3	دو جمله ای نمایی
0.9977	0.00033	0.016425	25.47917	5	
0.995	0.00071	0.024802	30.35892	7	
0.9996	8.57E-05	0.006544	0.003396	3	تقریب نفوذ
0.9981	0.000303	0.014856	13.78482	5	
0.9956	0.000679	0.023312	61.7775	7	
1	2.03E-06	0.001302	0.001816	3	هندرسون و پاپیس اصلاح شده
0.9983	0.000438	0.014118	16.45342	5	میدلی و همکاران
0.9946	0.001116	0.02588	36.41995	7	
0.9999	2.29E-05	0.002762	0.002473	3	
0.9981	0.000339	0.014681	16.56834	5	
0.995	0.000837	0.024772	49.7539	7	



شکل 3 (a) - برازش منحنی‌های خشک کردن با مدل هندرسون و پاییس اصلاح شده برای ضخامت‌های مختلف در دمای ثابت 80 °C



شکل 3 (b) - برازش منحنی‌های خشک کردن با مدل هندرسون و پاییس اصلاح شده برای دماهای مختلف در ضخامت ثابت 3 میلی متر.

جدول 4- پارامترهای خشک کردن برای مدل هندرسون و پاییس اصلاح شده.

k_0	c	g	b	k	a	ضخامت (mm)	دما (°C)
0.0272	1.137	-0.013	-0.0562	1.7545	-0.0808	3	80
0.0119	0.9993	-0.0088	-0.2138	0.207	-0.0089	5	
0.0087	0.9964	0.942	0.0723	12.4961	-0.0687	7	
0.0036	0.1534	0.0277	-3.5558	0.0233	4.4024	3	70
0.0095	1.4337	0.0095	-0.4337	2.9443	-2.09E-18	5	
0.0124	-4.4529	2.3553	0.0876	0.0107	5.3654	7	
0.0076	3.5534	0.0054	-3.6572	0.0036	1.1004	3	60
0.0043	2.8457	4.1176	-0.0007	0.0036	-1.8451	5	
0.0037	2.8114	13.2816	0.0255	0.0031	-1.8369	7	

جدول 6 - مقادیر انرژی فعال سازی در ضخامت‌های مختلف.

ضخامت (mm)	Ea(kj/mol)
3	23.375 ^b
5	28.288 ^{ab}
7	31.931 ^a

مقایسه میانگینها در سطح 0.01 انجام شد

3-6- راندمان استخراج اینولین

نتایج حاصل از بررسی راندمان استخراج اینولین در شکل 4، نشان داده شد. با افزایش دما راندمان استخراج افزایش آرامی از خود نشان داد اما نتایج حاصل از جدول تجزیه‌ی واریانس اختلاف معنی‌داری در سطح 0/05 از خود نشان نداد. این مطلب، گویای ناپذیر بودن اثر دمای خشک کردن (دمایی مناسب برای خشک کردن مواد غذایی) در راندمان استخراج و مناسب بودن دماهای مذکور جهت استخراج می‌باشد. از آن جا که سیب‌زمینی ترشی میزان رطوبت بالایی دارد، باید قبل از انبارمانی یا فرآوری‌های بعدی، سطح رطوبت آن تا حد ایمن کاهش یابد. بنابراین، دماهای مورد بررسی اثر منفی بر روی فروکتوالیگوساکاریدها موجود در آن نداشته است. همچنین مشاهده گردید که بیش‌ترین راندمان استخراج (74.26%)، مربوط به دمای 80°C است. لینگان و همکاران در سال 2007 از پودر سیب‌زمینی ترشی خشک شده برای استخراج اینولین استفاده کرده و بیش‌ترین راندمان استخراج آن‌ها 83.6 بود که در این پژوهش از اولتراسوند جهت افزایش راندمان استفاده گردیده است (13). درصد اینولین استخراجی با طولانی شدن زمان خشک کردن، آهنگ کاهش آرامی را از خود نشان داد اما اختلاف معنی‌داری در درصد اینولین استخراجی مشاهده نگردید (جدول 7). از این رو، بهترین حالت جهت خشک کردن، کوتاه‌ترین زمان و بالاترین درصد استخراج یعنی زمان 75 دقیقه و دمای 80°C می‌باشد.

نتایج، نشان داد که در دمای ثابت بین ضخامت 7 با ضخامت 3 و 5 میلی متر اختلاف معنی‌داری مشاهده شد (جدول 5) افزایش ضخامت با کم شدن ضریب نفوذ، همراه است. این به دلیل تغییر در آهنگ انتقال رطوبت از مرکز به سطح و تراکم بافت در ضخامت‌های بالاتر است و در ضخامت ثابت بین دماهای مختلف در ضریب نفوذ اختلاف معنی‌داری مشاهده شد که بالا رفتن دما باعث افزایش در مقدار ضریب نفوذ گشته که به سبب تغییر در گرمای نهان تبخیر و افزایش آهنگ انتقال جرم با افزایش دما می‌باشد.

جدول 5- مقادیر ضریب نفوذ رطوبت (m²/s) در دماهای مختلف خشک کردن و ضخامت‌های مختلف.

دما (°C)	7 mm	5 mm	3 mm
60	5.13×10 ⁻⁹ ^b _a	1.09×10 ⁻⁸ ^a _c	1.22×10 ⁻⁸ ^a _c
70	5.73×10 ⁻⁹ ^b _b	1.26×10 ⁻⁸ ^a _b	1.31×10 ⁻⁸ ^a _b
80	6.55402×10 ⁻⁹ ^c _a	1.57×10 ⁻⁸ ^b _a	2.36×10 ⁻⁸ ^a _a

توان: مقایسه‌ی میانگین در هر سطر، اندیس: مقایسه‌ی میانگین در هر ستون مقایسه‌ی میانگین در سطح 0.01 انجام شد

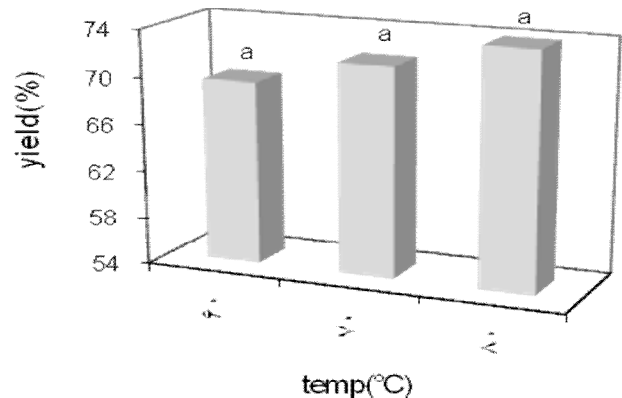
3-5- انرژی فعال سازی

وابستگی ضریب نفوذ موثر رطوبت D_{eff} با دمای خشک کردن با استفاده از رابطه‌ی آرنیوس (معادله‌ی 2-8) بیان می‌شود. از لگاریتم ضریب نفوذ موثر بر حسب عکس دمای مطلق و از روی شیب خط حاصل، مقدار انرژی فعال سازی، به دست آمده است که در جدول 6، مقادیر آن عنوان شده است. نتایج حاصل از مقایسه‌ی میانگین انرژی فعال سازی، اختلاف معنی‌داری بین ضخامت 3 با 5 نشان داد اما بین ضخامت 3 با 5 و ضخامت 5 با 7 اختلافی مشاهده نشد (جدول 6). با افزایش ضخامت میزان مقادیر Ea افزایش یافته که به دلیل سخت شدن پوسته و نفوذ مشکل آب از مرکز به سطح می‌باشد همچنین افزایش تراکم بافت سلولی بر هم کنش‌های بین ملکول‌های آب و ماده‌ی غذایی را افزایش می‌دهد. انرژی فعال سازی در فرآیند خشک کردن پسته 33.33kj/mol (1)، بامیه 22.43kj/mol (19)، فلفل دلمه‌ای سبز 47.10kj/mol (6) و ترب سفید ایرانی 70.20 kj/mol (10) محاسبه شده است.

5-منابع

- 1- توکلی پور، ح. کلباسی اشتری، ا. بصیری، ع. 1387. اثر پارامترهای خشک کردن بر شاخص‌های کیفی پسته‌ی دامغان و تعیین ضرایب نفوذ موثر در شرایط بهینه این فرآیند. *مجله علمی و صنایع غذایی*، دوره 5، شماره 4: 47-56.
- 2- توکلی پور، ح. 1385. اصول خشک کردن مواد غذایی و محصولات کشاورزی، انتشارات آبیژ، ویرایش دوم، صفحه 328.

- 3-Babalís, S. J. Papanicolaou, E. Kyriakis, N. Belessiotis, V.G. 2005. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). *Journal of Food Engineering*, 75: 205-214.
- 4-Danilcenko, H. Jariene, E. Aleknavičienė, P. Gajewski, M. 2008. Quality of Jerusalem Artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) tubers in relation to storage, *Not. Bot. Hort. Agrobot. Cluj* 36(2): 23-27.
- 5-Doymaz, I. 2004. Drying kinetics of white mulberry. *Journal of Food Engineering*, 61: 341-346.
- 6-Faustino, J.M.F. Barroca, M.J. Guine, R.P.F. 2007. Study of the drying kinetics of green bell pepper and chemical characterization. *Trans IChemE*, 58: 163-170.
- 7-Henderson, S. M. 1974. Progress in developing the thin-layer drying equation. *Transactions of the ASAE*, 17: 1167-1172.
- 8-Henderson, S. M. Pabis, S. 1961. Grain drying theory. II. Temperature effects on drying coefficients. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6: 169-174.
- 9-Krokida, M. K. Karathanos, V. T. Maroulis, Z. B. Marinou-Kouris, D. 2003. Drying kinetics of some vegetables. *Journal of Food Engineering*, 59: 391-403.
- 10- Khanzadeh, F. Tavakolipour, H. Rahmani, F. 2010. Convection Drying Kinetics of Asian White Radish (*Raphanus sativus* L.) Slices, *17th International Drying Symposium (IDS 2010)*, Magdeburg, Germany.
- 11-Kaleemullah, S. Kailappan, R. 2007. Monolayer moisture, free energy change and fractionation of bound water of red chillies. *Journal of Stored Products Research*, 43: 104-110.
- 12-Karathanos, V. T. 1999. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 39: 337-344.
- 13-Lingyun, w. Jianhua, w. Xiaodong, z. Da, T. Yalin, Y. Chenggang, C. Tianhua, F. Fan, Z. 2007. Studies on the extracting technical conditions of inulin from Jerusalem artichoke



شکل 4- اثر دما بر راندمان استخراج اینولین در پودر سیب‌زمینی ترشی

جدول 7 - درصد اینولین در طی زمان‌های مختلف خشک کردن.

زمان (دقیقه)	درصد اینولین
75	74.26 ^a
450	71.8 ^a
900	69.6 ^a

مقایسه‌ی میانگین‌ها در سطح 0.01 انجام شد.

4- نتیجه‌گیری

در سنتتیک خشک کردن برش‌های سیب‌زمینی ترشی، محتوی رطوبتی و آهنگ خشک کردن تحت تاثیر دمای هوای خشک کردن و ضخامت تیغه‌ها قرار داشتند. افزایش دمای هوای موجب کاهش زمان خشک کردن و افزایش آهنگ خشک کردن شد و افزایش ضخامت موجب افزایش زمان و کاهش آهنگ خشک کردن شد. در بین آنالیزهای رگرسیون انجام شده، مدل هندرسون و پاییس اصلاح شده با داشتن بالاترین R^2 و کم‌ترین EMD، RMSE، (χ^2) قابلیت لازم را برای تشریح رفتار خشک کردن لایه‌ی نازک برش‌های سیب‌زمینی ترشی نشان داد. ضریب نفوذ موثر رطوبت با افزایش دما افزایش و با افزایش ضخامت، کاهش یافت. تابعیت ضریب نفوذ موثر رطوبت بر حسب دما به وسیله‌ی رابطه آرنیوس بیان شد که با افزایش ضخامت مقدار آن افزایش از خود نشان داد. همچنین مشاهده گردید که مقادیر انرژی فعال‌سازی با افزایش ضخامت در حال افزایش است که به دلیل انتقال مشکل‌تر رطوبت از لایه‌ها و سلول‌های زیرین به سطح می‌باشد.

- tubers. *Journal of Food Engineering*, 79: 1087–1093.
- 14-Lee, J. H. Kim, H. J. 2009. Vacuum drying kinetics of Asian white radish (*Raphanus sativus L.*) slices. *LWT - Food Science and Technology* 42: 180-186.
- 15-Midilli, A. Kucuk, H. Yapar, Z. 2002. A new model for single layer drying. *Drying Technology*, 20(7): 1503-1513.
- 16-O'Callaghan, J. R. Menzies, D. J. Bailey, P. H. 1971. Digital simulation of agricultural dryer performance. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 16:223-244.
- 17-Overhults, D. D. White, G. M. Hamilton, M. E. Ross, I. J. 1973. Drying soybeans with heated air. *Transactions of the ASAE*, 16: 195-200.
- 18-Page, G. 1949. Factors influencing the maximum rates of air-drying shelled corn in thin layer. M.S. Thesis. Department of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN.
- 19-Sobukola, O. 2009. Effect of Pre-Treatment on the Drying Characteristics and Kinetics of Okra (*Abelmoschus esculentus (L.) Moench*) Slices. *International Journal of Food Engineering*, 5(2):20pp.
- 20-Sharaf-Eldeen, Y. I. Blasdel, J. L. Handy, M. Y. 1980. A model for ear corn drying. *Transactions of the ASAE*, 23: 1261-1271.
- 21-Vege Mercado, H. Barbosa Canovas, V. 1996. *Dehydration of Foods*. Chapman & Hall, New York:327pp.
- 22-Yagcioglu, A. Degirmencioglu, A. Cagatay, F. 1999. Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. In A. Bascetincelik (Ed.), *Proceedings of the 7th international congress on agricultural mechanization and energy*: 565-569.
- 23-Yaldiz, O. Ertekin, C. 2001. Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technology*, 19: 583-596.