

## بررسی اثر پارامترهای برشی بر مدل‌سازی فرایند خشک شدن هویج

مریم نقی پورزاده ماهانی<sup>۱</sup>، عباس روحانی<sup>۲\*</sup>، محمدحسین آق‌خانی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری، مکانیک ماشین‌های کشاورزی پردیس بین‌الملل فردوسی مشهد

۲. استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

۳. استاد، گروه مهندسی بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۴/۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۱۲/۴)

### چکیده

فرایند خشک شدن یک محصول، علاوه بر شرایط بیرونی مانند دما و جریان هوا به بافت داخلی آن نیز بستگی دارد. برش هویج در جهات مختلف قطعاتی با ساختار سلولی متفاوت ایجاد می‌کند که می‌تواند در رفتار خشک شدن این محصول اثرگذار باشد. در این پژوهش اثر عواملی مانند نوع تیغه در سه مدل لبه صاف، اره‌ای و کنگره‌ای، جهت برش در سه جهت افقی و مورب و عمودی و در دو ضخامت ۳ و ۶ میلی‌متر بر مدل‌های سینتیک خشک شدن بررسی شد. پس از انجام آزمایشات داده‌ها در ۷ مدل رایج خشک کردن برازش شد. نتایج نشان داد در تمام تیمارها مدل لگاریتمی با  $R^2 \geq 0.98$ ،  $RMSE \leq 0.04$  و  $SSE \leq 0.02$  فرایند خشک شدن را بهتر تفسیر می‌کند. همچنین ضرایب انتشار رطوبت بدست آمده نشان داد در قطعاتی با ضخامت ۶ میلی‌متر بیشترین ضریب نفوذ  $5/07$  مترمربع بر ثانیه برای تیغه کنگره‌دار در جهت مورب و در ضخامت ۳ میلی‌متر بیشترین ضریب نفوذ  $2/55$  مترمربع بر ثانیه برای برش با تیغه کنگره‌دار در جهت طولی به دست آمد که می‌توان این روش را به عنوان روش مناسب برش برای تهیه هویج خشک پیشنهاد کرد.

واژه‌های کلیدی: برش، خشک کردن، ضریب نفوذ، مدل‌سازی، هویج

### مقدمه

یکی از فرایندهای مهم در فناوری پس از برداشت، خشک کردن محصولات کشاورزی است که یکی از اهداف اصلی آن افزایش انبارمانی تولیدات کشاورزی می‌باشد. با کاهش رطوبت محصول در فرایند خشک شدن فعالیت‌های میکروارگانیسمی کاهش یافته و ماندگاری محصول افزایش می‌یابد. اهمیت محصولات خشک به عنوان تأمین‌کننده بخشی از غذای بشر باعث شده است تا همواره مطالعات بسیاری در زمینه خشک کردن محصولات کشاورزی، بررسی سینتیک خشک شدن و مدلسازی فرایند انجام شود. ویژگی‌های متفاوت محصولات مانند اندازه، شکل و بافت درونی آن‌ها باعث تفاوت در فرایند خشک شدن آن‌ها می‌شود. همچنین تفاوت بافت سلولی و ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی، باعث ایجاد مدل‌های مختلفی در فرایند خشک شدن محصولات کشاورزی شده است که این مدل‌ها در پیش‌بینی زمان لازم برای خشک شدن محصول اهمیت بسزایی دارد. در زمینه مدلسازی فرایند خشک شدن محصولات کشاورزی مطالعات بسیاری انجام شده است. در مطالعه‌ای خشک کردن دانه‌های ذرت در دماهای مختلف بررسی و مدل

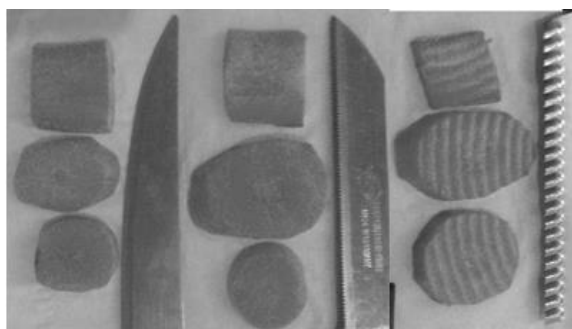
میدلی برای خشک شدن این محصول پیشنهاد شد (Dadali et al., 2007). محققانی دیگر رفتار خشک کردن بامیه را بررسی کردند و مدل پیچ را برای این محصول مناسب ارزیابی کردند (Amiri Chayjan et al., 2011). در مطالعه‌ای فرایند خشک کردن هویج در سطوح مختلفی از دما و جریان هوای بررسی شد و مدل پیچ برای خشک شدن این محصول معرفی شد (Aghbashlo et al., 2011).

یکی از پیش‌فرایندهای مهم در خشک کردن اغلب محصولات کشاورزی، برش میوه و سبزیجات بر اساس نوع مصرف می‌باشد. برش و خرد کردن باعث تسریع فرایند خشک شدن و بهبود کیفیت محصول خشک شده می‌شود. انجام عملیاتی مانند پوست‌گیری، برش و خرد کردن میوه و سبزیجات، باعث تغییر در سوخت و ساز، تنفس و تولید اتیلن در قطعات می‌شود (Toivonen et al., 2008). بسیاری از میوه‌ها و سبزیجات دارای بافت سلولی ناهمگن هستند و برش آن‌ها در جهات مختلف قطعاتی با ساختار متفاوت ایجاد می‌کند. این تفاوت ساختاری، می‌تواند بر فرایند خروج رطوبت از محصول و بر کیفیت و رفتار خشک شدن آن اثرگذار باشد.

هویج گیاهی دو ساله با نام علمی *Daucus carota* و از خانواده چتریان و دارای بافت ناهمگن است. این گیاه منبع مهم

\* نویسنده مسئول: arohnai@um.ac.ir

برش‌ها دستی و در سه جهت طولی، عرضی و مورب انجام شد (شکل ۱).



شکل ۱. نمونه‌های برش خورده برای آزمایش خشک کردن، الف- تیغه کنگره‌ای ب- تیغه اره‌ای ج- تیغه لبه صاف

#### اندازه‌گیری میزان رطوبت

اندازه‌گیری رطوبت اولیه هویج با قرار دادن نمونه‌ها در آون با دمای  $105 \pm 2^\circ\text{C}$  و خشک کردن آن‌ها تا زمان ثابت شدن وزن نمونه‌ها انجام شد (Aghbashlo *et al.*, 2011). پس از رسیدن وزن نمونه‌ها به مقدار ثابت، مقدار رطوبت اولیه نمونه‌ها بر حسب وزن تر محاسبه شد.

#### خشک کردن نمونه‌ها

برای خشک کردن نمونه‌ها از یک خشک کن آزمایشگاهی مدل FaterU-630 مجهز به کنترل کننده دما در گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه شهید باهنر استفاده شد. هویج‌های برش خورده با قرار گیری روی سینی خشک کن در طبقه وسط خشک کن قرار گرفت. از یک ترازوی دیجیتال مدل SARTORIUS GE1302 با دقت  $0.1\%$  برای وزن کردن نمونه‌ها طی خشک شدن استفاده شد. یک ساعت قبل از قرار دادن نمونه‌ها در آون دمای آون روی  $70^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس تنظیم شد. پیش از قرار دادن نمونه‌ها در خشک کن، وزن اولیه آن‌ها اندازه‌گیری و ثبت شد. خشک کردن در دمای  $70^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس تا رسیدن نمونه‌ها به رطوبت  $8\%$  بر پایه تر انجام شد (Hui, 2006) و توزین نمونه‌ها در زمان‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ دقیقه تا رسیدن به رطوبت مطلوب انجام شد. رطوبت نسبی نمونه‌ها با استفاده از رابطه (۱) به دست می‌آید. نسبت رطوبت به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه طی خشک شدن وابسته است.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در رابطه (۱) MR، نسبت رطوبت (بدون بعد)، M،

ویتامین، مواد معدنی و سایر مواد غذایی با ارزش است که باید در رژیم غذایی روزانه انسان قرار گیرد. در این گیاه ریشه که قسمت خوراکی محسوب می‌شود، از دو ناحیه حلقه خارجی و حلقه داخلی تشکیل شده است. حلقه خارجی از یک اپیدرم نازک، لایه ای از سلول‌های چوب پنبه‌ای و باند عریضی از آوندهای آبکش اولیه تشکیل شده است. حلقه داخلی نیز از آوند چوبی و مغز تشکیل شده است. بنابراین برش هویج در جهات مختلف، قطعاتی با ساختار سلولی متفاوت ایجاد خواهد کرد. این تفاوت ساختاری باعث تغییر فعالیت‌های شیمیایی و فیزیولوژی در محصول خرد شده می‌شود. تحقیقات انجام شده اثر شکل برش هویج را بر تغییرات فیزیولوژی قطعات گزارش داده‌اند (Izumi *et al.*, 1996). همچنین مطالعاتی در زمینه اثر شکل برش محصولاتی مانند هویج، کدو، تربچه و طالبی بر میزان تنفس قطعات انجام شد و نتایج نشان داد میزان تنفس در برش‌های طولی به طور معنی‌داری از برش‌های عرضی بیشتر است (Suwannarak *et al.*, 2014). مطالعه‌ی انجام شده در زمینه بررسی اثر جهت برش نشان داد این عامل بر کیفیت هویج خشک اثرگذار است (Naghipour *et al.*, 2016). در برش محصولات کشاورزی نوع تیغه اهمیت ویژه‌ای دارد به طوری که بر میزان تخریب سلولی سطح برش خورده اثر گذار است و بر ماندگاری و کیفیت محصول اثر می‌گذارد. در مطالعات بسیاری خشک شدن انواع محصولات کشاورزی مدلسازی شده است اما در هیچ یک اثر پارامترهای برشی که باعث ایجاد قطعاتی با بافت سلولی متفاوت می‌شود؛ بر مدل خشک شدن بررسی نشده است. با توجه به اهمیت جهت برش از نظر ایجاد قطعاتی با بافت متفاوت و نوع تیغه که بر سطح برش اثرگذار است؛ در این پژوهش اثر این پارامترها بر مدل خشک شدن قطعات هویج و اثر این عوامل بر ضریب نفوذ رطوبت مورد مطالعه قرار گرفت.

#### مواد و روش‌ها

##### تهیه و نگهداری ماده اولیه

در این پژوهش از هویج فرنگی رقم *cv. Danverse* کشت شده در جیرفت، برای آزمایشات استفاده شد. هویج‌ها از بازار تهیه و تا زمان انجام آزمایشات در یخچالی با دمای  $5^\circ\text{C}$  نگهداری شدند. حدود ۴ تا ۵ ساعت قبل از انجام فرایند خشک شدن، هویج‌ها، برای رسیدن به دمای محیط از یخچال خارج شدند. پس از رسیدن نمونه‌ها به دمای تعادل، هویج‌ها پوست گیری و برای برش آماده شد. از سه نوع تیغه رایج لیه صاف، اره‌ای و کنگره‌ای که کاربرد بیشتری در برش میوه و سبزیجات دارد، برای برش قطعاتی با دو ضخامت ۳ و ۶ میلی‌متر استفاده شد.

طولانی مدت، رابطه (۳) برای تعیین ضریب نفوذ به دست می‌آید.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \frac{B}{\pi^2} \exp\left(\frac{-\pi^2 Deff t}{4L^2}\right) \quad (\text{رابطه ۳})$$

ضریب نفوذ موثر Deff، از شیب (K) نمودار Ln(MR) نسبت به زمان به با استفاده از رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$K = \frac{\pi^2 Deff}{4L^2} \quad (\text{رابطه ۴})$$

در رابطه (۴)، Deff ضریب نفوذ موثر (m<sup>2</sup>/s)، L نصف ضخامت هر نمونه می‌باشد.

### مدل سازی

به منظور مدل‌سازی فرآیند خشک شدن، رطوبت نسبی هویج در تیمارهای مختلف به کمک رابطه محاسبه شد. پس از تعیین مقادیر رطوبت نسبی، داده‌ها با ۷ مدل ریاضی در نرم افزار MATLAB 7.12 برازش شدند (جدول ۱).

جدول ۱. مدل‌های مورد استفاده در خشک شدن لایه نازک میوه و سبزیجات

منبع	معادله	مدل
Liu and Bakker-Arkema (1997)	$\exp(-kt)$	نیوتن
Zhang and Litchfield (1991)	$\exp(-kt^n)$	بیچ
Overhults et al (1973)	$\exp((-kt)^n)$	بیچ اصلاح شده
Chhinman (1984)	$a \exp(-kt)$	هندرسون
Yaldiz et al. (2001)	$a \exp(-kt) + c$	لگاریتمی
Henderson (1974)	$a \exp(-kt) + b \exp(ct)$	دو جمله ای
Karathanos (1999)	$a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	هندرسون اصلاح شده

که در این روابط  $MR_{exp}$ ، نسبت رطوبت بدست آمده،  $MR_{pre}$ ، نسبت رطوبت پیش بینی شده و  $\overline{MR}$  میانگین رطوبت نسبی و n تعداد مشاهدات می‌باشد.

### نتایج و بحث

پس از تعیین رطوبت نسبی در زمان‌های مختلف نمودار تغییرات رطوبت بر حسب زمان برای تیمارهای مختلف ترسیم شد (شکل ۲). نتایج نشان داد، نمونه‌هایی با ضخامت بزرگتر در زمان طولانی‌تری خشک می‌شوند. علت این امر پدیده سخت شدن سطح برش می‌باشد که این باعث دشواری انتقال رطوبت از درون بافت جسم و در نهایت بیشتر شدن زمان خشک شدن می‌باشد. در مطالعات انجام شده دیگر نتایج مشابهی به دست آمد (Zirjani and Tavakolipour, 2010; Eshraghi et al., 2012). بررسی نمودارها، کاهش سریع رطوبت را در فرایند

رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه بر پایه تر (w.b)،  $M_e$ ، رطوبت تعادلی نمونه‌ها (w.b)،  $M_o$ ، رطوبت اولیه نمونه‌ها (w.b) می‌باشد.

### محاسبه ضریب نفوذ و انرژی فعالسازی

قانون دوم فیک به طور گسترده‌ای برای توصیف نفوذ در فرایند خشک شدن محصولات کشاورزی استفاده می‌شود (رابطه ۲) (Doymaz, 2010).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = Deff \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (\text{رابطه ۲})$$

در رابطه ۲، M مقدار رطوبت موضعی بر مبنای خشک، t زمان و x شاخص فضایی است که برای استفاده از این قانون در موارد غذایی فرض می‌شود که فرآورده غذایی تک بعدی است (Salehi et al, 2015).

پس از بسط رابطه (۲) و اعمال شرایط خشک شدن در

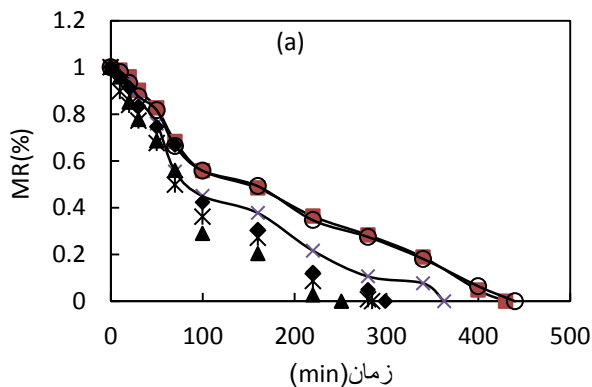
یکی از مهم‌ترین معیارهای تعیین بهترین مدل، ضریب تبیین ( $R^2$ ) می‌باشد و برازش مناسب با شاخص‌های خطای ریشه مجموع مربعات خطا (RMSE) و مجموع مربعات خطای SSE تعیین می‌شود. مدلی که بیشترین مقدار ضریب تبیین ( $R^2$ ) و کمترین مقادیر RMSE و SSE را داشته باشد بهترین مدل برای تیمار مورد نظر خواهد بود که این مقادیر از روابط ۵، ۶ و ۷ محاسبه می‌شوند.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre})^2} \quad (\text{رابطه ۵})$$

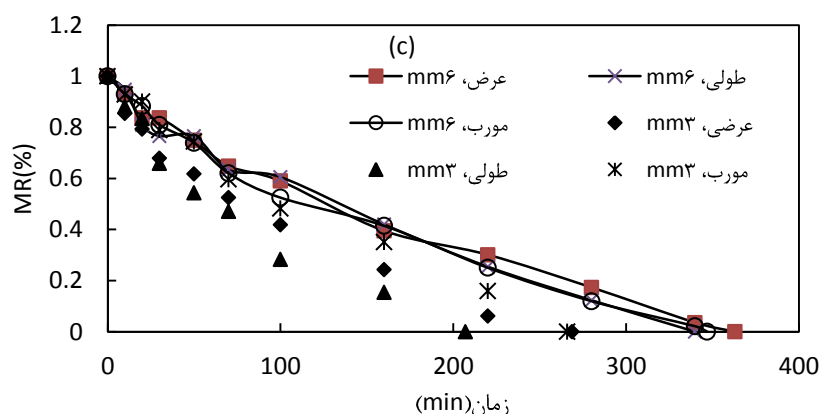
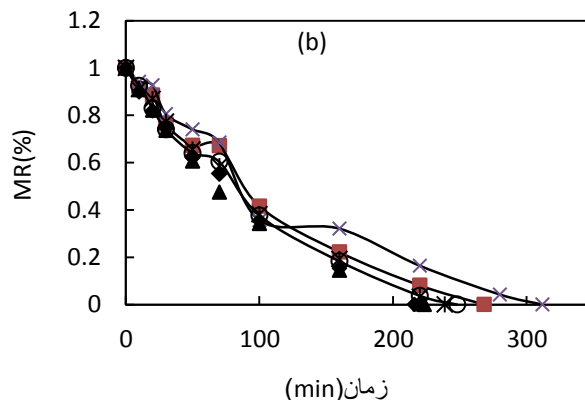
$$RMSE = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right)^{0.5} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{pre})^2 \quad (\text{رابطه ۷})$$

و در نهایت افزایش انتقال رطوبت سطحی و کاهش زمان خشک شدن می‌شود. همچنین نتایج بیانگر آن است که جهت برش نیز بر فرآیند خشک شدن تاثیر گذار است، بطوریکه ورقه های هویچ با برش طولی نسبت به سایر تیمارهای در زمان کوتاه تری خشک شده است. در مقابل ورقه های با جهت برش طولی، مدت طولانی تر سپری شده تا فرآیند خشک شدن کامل گردد.



خشک شدن نمونه‌هایی که با تیغه کنگره ای برش خوردند نشان داد (شکل ۲-ب). بخشی از فرایند خشک شدن به صورت انتقال رطوبت سطحی انجام می‌شود. بنابراین هر چه سطح مجاور با هوا بیشتر باشد، انتقال رطوبت بیشتری انجام می‌شود. در برش با تیغه کنگره ای به دلیل شکل لبه تیغه، شیارهایی در سطح برش ایجاد می‌شود که باعث افزایش نسبت سطح به حجم



شکل ۲. نمودار تغییرات رطوبت نسبی در خشک شدن هویچ به کمک تیغه اره‌ای (a)، تیغه کنگره‌ای (b) و تیغه لبه صاف (c)

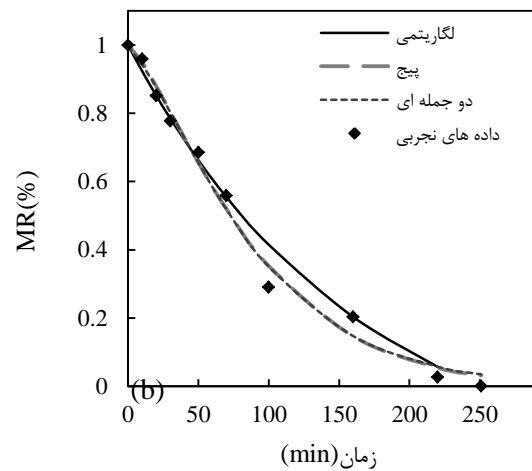
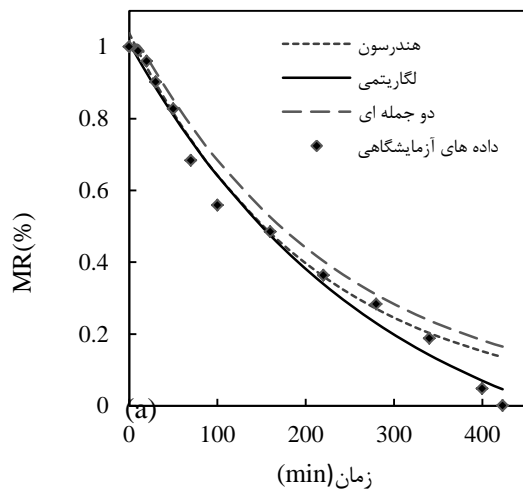
طولی و عرضی، طبق شاخص‌های آماری بهترین مدل به ترتیب دو جمله ای و هندرسون به دست آمد اما بررسی نموداری آن‌ها نشان داد مدل لگاریتمی با  $R^2 \geq 0.98$  و  $RMSE \leq 0.04$  و  $SSE \leq 0.02$  فرایند خشک شدن را بهتر تفسیر می‌کند (شکل ۳).

همچنین در نمونه‌هایی که با تیغه کنگره ای در جهت عرضی با ضخامت ۳ میلی متر و نمونه‌ای که با تیغه صاف در جهت عرضی و ضخامت ۶ تهیه شدند مدل نیوتن بهترین شاخص آماری را داشت اما نمودار خشک شدن آن‌ها نشان داد مدل لگاریتمی با  $R^2 \geq 0.99$  و  $RMSE \leq 0.01$  و  $SSE \leq 0.001$  برای تیغه کنگره ای در جهت عرضی با ضخامت ۳ میلی متر و با  $R^2 \geq 0.99$  و  $RMSE \leq 0.02$  در جهت عرضی با ضخامت ۳ میلی متر و با  $R^2 \geq 0.99$  و  $RMSE \leq 0.007$  برای تیغه صاف در جهت عرضی و ضخامت ۶ فرایند خشک شدن را بهتر تفسیر می‌کند (شکل ۴).

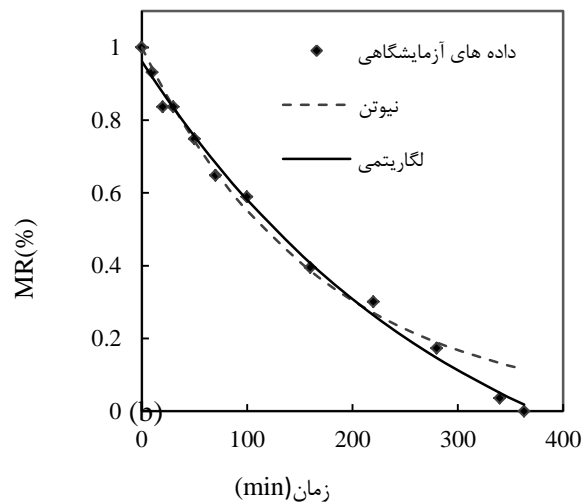
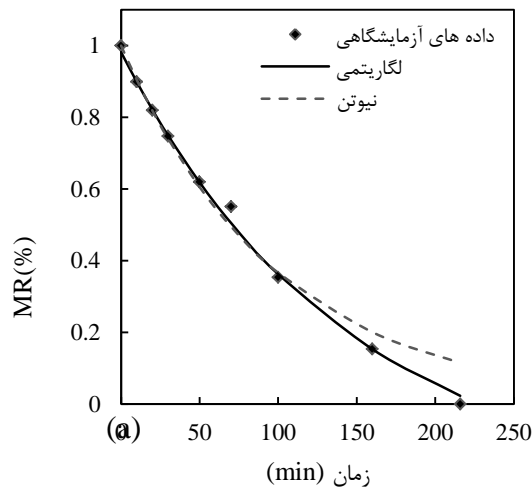
پس از تعیین رطوبت نسبی در تیمارها و برازش مدل‌ها با داده‌های آزمایشگاهی، میزان ضریب تبیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و SSE برای هر تیمار به دست آمد (جدول ۲). نتایج نشان داد در اکثر تیمارها مدل لگاریتمی با  $R^2 \geq 0.98$  و  $RMSE \leq 0.04$  و  $SSE \leq 0.02$  داده‌های واقعی را بهتر تفسیر می‌کند و در تیمارهایی که سایر مدل‌ها شاخص آماری بهتری داشتند با رسم نمودار آن‌ها مشاهده شد که مدل انتخابی، فرایند طبیعی خشک شدن را در مقایسه با داده‌های تجربی به خوبی نشان نمی‌دهد. در این تیمارها سایر مدل‌هایی که از نظر شاخص‌های آماری شرایط بهتری داشتند انتخاب و نمودار آن‌ها رسم شد و در نهایت مدلی که شاخص آماری قابل قبول داشت و فرایند طبیعی خشک شدن را بهتر نشان می‌داد، انتخاب شد. در برش با تیغه اره‌ای در ضخامت ۶، در جهت

جدول ۲. نتایج برازش داده آزمایشگاهی حاصل از خشک شدن قطعات هویج

مورب			طولی			عرضی			مدل	ضخامت (mm)	نوع تیغه
R <sup>2</sup>	RMSE	SSE	R <sup>2</sup>	RMSE	SSE	R <sup>2</sup>	RMSE	SSE			
۰/۹۸۶	۰/۰۴۴	۰/۰۲۰	۰/۹۶۸	۰/۰۶۲	۰/۰۳۵	۰/۹۹۰	۰/۰۳۵	۰/۰۱۲	پیچ	۶	صاف
۰/۹۹۹	۰/۰۱۳	۰/۰۰۲	۰/۹۶۹	۰/۰۵۹	۰/۰۳۵	۰/۹۹۹	۰/۰۱۴	۰/۰۰۲	نیوتن		
۰/۹۹۵	۰/۰۲۸	۰/۰۰۷	۰/۹۸۷	۰/۰۴۳	۰/۰۱۵	۰/۹۹۵	۰/۰۲۸	۰/۰۰۷	لگاریتمی		
۰/۹۹۶	۰/۰۲۴	۰/۰۰۶	۰/۹۶۸	۰/۰۶۳	۰/۰۳۵	۰/۹۹۵	۰/۰۲۶	۰/۰۰۶	هندرسون		
۰/۹۸۴	۰/۰۵۴	۰/۰۲۳	۰/۹۶۹	۰/۰۷۰	۰/۰۳۴	۰/۹۸۱	۰/۰۵۶	۰/۰۲۵	دوجمله ای		
۰/۹۸۹	۰/۰۵۲	۰/۰۱۶	۰/۹۶۹	۰/۰۸۳	۰/۰۳۴	۰/۹۸۸	۰/۰۵۳	۰/۰۱۶	هندرسون اصلاح شده		
۰/۹۸۸	۰/۰۴۰	۰/۰۱۳	۰/۹۸۸	۰/۰۴۰	۰/۰۱۱	۰/۹۸۴	۰/۰۴۵	۰/۰۱۶	پیچ	۳	کنگره ای
۰/۹۸۷	۰/۰۳۹	۰/۰۱۴	۰/۹۸۷	۰/۰۳۹	۰/۰۱۳	۰/۹۸۴	۰/۰۴۳	۰/۰۱۶۳	نیوتن		
۰/۹۹۲	۰/۰۳۵	۰/۰۰۹	۰/۹۹۱	۰/۰۳۷	۰/۰۰۸	۰/۹۹۶	۰/۰۲۵	۰/۰۰۴	لگاریتمی		
۰/۹۸۳	۰/۰۴۷	۰/۰۲۰	۰/۹۹۰	۰/۰۴۲	۰/۰۱۳	۰/۹۹۰	۰/۰۴۳	۰/۰۱۵	هندرسون		
۰/۹۸۳	۰/۰۵۴	۰/۰۱۸	۰/۹۸۷	۰/۰۴۹	۰/۰۱۲	۰/۹۸۷	۰/۰۵۰	۰/۰۱۴	دوجمله ای		
۰/۹۷۸	۰/۰۷۵	۰/۰۲۳	۰/۹۹۰	۰/۰۶۱	۰/۰۱۱	۰/۹۹۲	۰/۰۴۴	۰/۰۰۷	هندرسون اصلاح شده		
۰/۹۸۷	۰/۰۴۴	۰/۰۱۵	۰/۹۹۰	۰/۰۳۷	۰/۰۱۳	۰/۹۹۰	۰/۰۴۲	۰/۰۱۴	پیچ	۶	کنگره ای
۰/۹۸۱	۰/۰۵۰	۰/۰۲۳	۰/۹۸	۰/۰۵۸	۰/۰۲۳	۰/۹۷۶	۰/۰۵۱	۰/۰۲۸	نیوتن		
۰/۱۰۰	۰/۰۲۳	۰/۰۰۴	۰/۹۹۷	۰/۰۲۱	۰/۰۰۴	۰/۹۹۴	۰/۰۲۸	۰/۰۰۵	لگاریتمی		
۰/۹۷۹	۰/۰۵۶	۰/۰۲۵	۰/۹۸۱	۰/۰۵۵	۰/۰۲۶	۰/۹۷۴	۰/۰۶۱	۰/۰۳۰	هندرسون		
۰/۹۸۹	۰/۰۴۷	۰/۰۱۳	۰/۹۸۳	۰/۰۵۸	۰/۰۲۳	۰/۹۷۴	۰/۰۷۱	۰/۰۳۰	دوجمله ای		
۰/۹۹۰	۰/۰۵۴	۰/۰۱۲	۰/۹۸۳	۰/۰۶۸	۰/۰۲۳	۰/۹۸۲	۰/۰۷۴	۰/۰۲۲	هندرسون اصلاح شده		
۰/۹۹۲	۰/۰۳۵	۰/۰۱۰	۰/۹۹۴	۰/۰۳۰	۰/۰۰۷	۰/۹۹۰	۰/۰۳۸	۰/۰۱۰	پیچ	۳	کنگره ای
۰/۹۷۷	۰/۰۵۶	۰/۰۲۸	۰/۹۹۹	۰/۰۱۳	۰/۰۰۱	۰/۹۹۸	۰/۰۱۵	۰/۰۰۰	نیوتن		
۰/۹۹۸	۰/۰۱۹	۰/۰۰۲	۰/۹۹۹	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰	۰/۹۹۸	۰/۰۱۸	۰/۰۰۰	لگاریتمی		
۰/۹۸۰	۰/۰۶۰	۰/۰۲۴	۰/۹۸۸	۰/۰۴۳	۰/۰۱۴	۰/۹۹۴	۰/۰۲۷	۰/۰۰۱	هندرسون		
۰/۹۸۲	۰/۰۶۰	۰/۰۲۲	۰/۹۹۵	۰/۰۳۲	۰/۰۰۶	۰/۹۸۲	۰/۰۵۷	۰/۰۲۰	دوجمله ای		
۰/۹۸۲	۰/۰۷۴	۰/۰۲۱	۰/۹۹۵	۰/۰۳۸	۰/۰۰۶	۰/۹۹۳	۰/۰۴۸	۰/۰۴۸	هندرسون اصلاح شده		
۰/۹۸۴	۰/۰۴۷	۰/۰۲۴	۰/۹۸۶	۰/۰۴۷	۰/۰۲۲	۰/۹۸۲	۰/۰۵۱	۰/۰۲۸	پیچ	۶	کنگره ای
۰/۹۸۲	۰/۰۴۸	۰/۰۲۷	۰/۹۸۱	۰/۰۵۲	۰/۰۳۰	۰/۹۷۷	۰/۰۵۵	۰/۰۳۷	نیوتن		
۰/۹۹۰	۰/۰۴۱	۰/۰۱۷	۰/۹۸۷	۰/۰۴۷	۰/۰۲۰	۰/۹۹۰	۰/۰۴۵	۰/۰۲۰	لگاریتمی		
۰/۹۸۳	۰/۰۴۷۹	۰/۰۲۵	۰/۹۸۶	۰/۰۴۷	۰/۰۲۲	۰/۹۹۵	۰/۰۲۶	۰/۰۰۱	هندرسون		
۰/۹۸۴	۰/۰۵۲	۰/۰۲۴	۰/۹۹۰	۰/۰۴۶	۰/۰۱۸	۰/۹۸۲	۰/۰۵۶	۰/۰۲۸	دوجمله ای		
۰/۹۸۴	۰/۰۵۸۹	۰/۰۲۴	۰/۹۸۹	۰/۰۵۴	۰/۰۱۷	۰/۹۸۰	۰/۰۶۳	۰/۰۲۸	هندرسون اصلاح شده		
۰/۹۹۱	۰/۰۳۸	۰/۰۱۳	۰/۹۹۰	۰/۰۴۰	۰/۰۱۳	۰/۹۹۵	۰/۰۲۷	۰/۰۰۶	پیچ	۳	کنگره ای
۰/۹۸۸	۰/۰۴۱	۰/۰۱۷	۰/۹۷۳	۰/۰۶۲۲	۰/۰۳۵	۰/۹۷۴	۰/۰۳۷	۰/۰۶۱	نیوتن		
۰/۹۹۴	۰/۰۳۲	۰/۰۱۶	۰/۹۹۵	۰/۰۳۰	۰/۰۰۶	۰/۹۹۸	۰/۰۱۷	۰/۰۰۲	لگاریتمی		
۰/۹۹۰	۰/۰۴۲	۰/۰۱۶	۰/۹۷۹	۰/۰۵۸	۰/۰۲۷	۰/۹۸۰	۰/۰۵۶	۰/۰۲۸	هندرسون		
۰/۹۸۸	۰/۰۴۷	۰/۰۱۶	۰/۹۹۰	۰/۰۴۷	۰/۰۱۳	۰/۹۸۴	۰/۰۵۷	۰/۰۲۳	دوجمله ای		
۰/۹۸۸	۰/۰۵۶	۰/۰۱۶	۰/۹۹۰	۰/۰۵۷	۰/۰۱۳	۰/۹۸۴	۰/۰۶۸	۰/۰۲۳	هندرسون اصلاح شده		



شکل ۳. نمودار کاهش رطوبت هویج برش خورده با تیغه اره ای و ضخامت ۶ میلی متر برای برش عرضی (a) و برش طولی (b)



شکل ۴. نمودار کاهش رطوبت در برش عرضی هویج برای برش با تیغه کنگره ای در ضخامت ۲ میلی متر (a)، برش با تیغه صاف در ضخامت ۶ میلی متر (b)

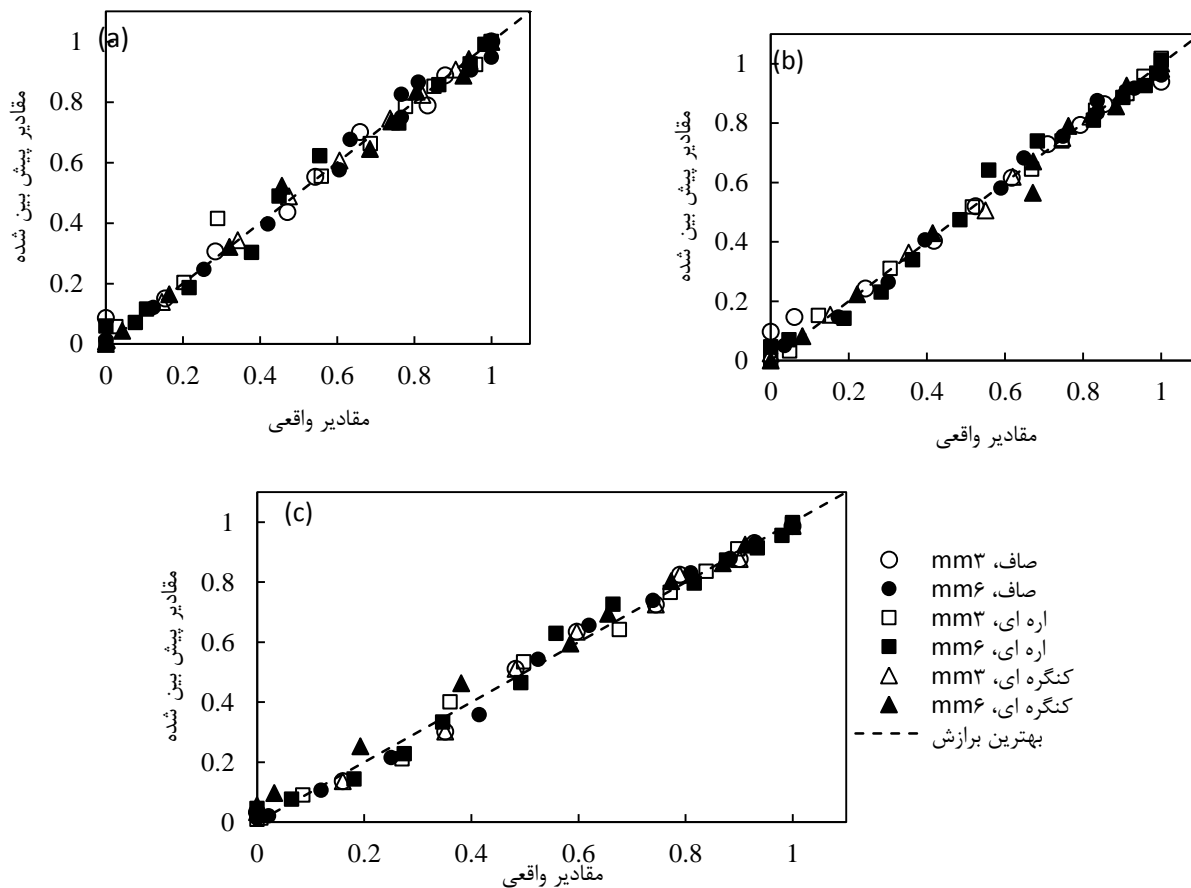
خرد شده به شکل مکعب را در خشک کن بستر جریان سیال خشک کردند؛ مدل پیچ و دو جمله ای برای خشک شدن هویج مناسب ارزیابی شد (Zielinska and Markowski, 2010). از آنجا که در مطالعات فوق، مدل لگاریتمی که مدلی رایج در خشک کردن سبزیجات می باشد؛ مورد بررسی قرار نگرفته است و با توجه به نتایج این پژوهش می توان مدل لگاریتمی را به عنوان بهترین مدل خشک شدن هویج معرفی کرد. مدل لگاریتمی مدلی است که متعدد برای توصیف فرآیند خشک شدن محصولاتی مانند توت سفید (Doymaz, 2004)، آلو (Goyal et al., 2007)، هلو (Kingsly et al., 2007)، کدوتنبلی (Sacilik, 2007) و ترب سفید (Lee and Kim, 2009) استفاده

نتایج حاصل شده تا اینجا بیانگر این مطالب است که، مدل لگاریتمی برای خشک شدن هویج می تواند بهترین گزینه باشد. میزان انطباق آن با داده های آزمایشگاهی در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می شود که مقادیر پیش بینی شده نزدیک به داده های آزمایشگاهی تغییر می کند که این امر مبین انطباق مناسب مقادیر پیش بینی شده با داده های آزمایشگاهی بوده و مدل لگاریتمی را برای خشک کردن هویج مناسب است.

در مطالعه ای که خشک شدن لایه نازک هویج در دما و جریان هوای مختلف خشک کن، بررسی و مدلسازی شد مدل پیچ به عنوان بهترین مدل معرفی شد (Aghbashlo et al., 2011). همچنین در مطالعه مشابه پس از آنکه که هویج های

برمدل خشک شدن اثر گذار نیست. پس از تعیین مدل مناسب، ضرایب ثابت این مدل برای همه تیمارها به دست آمد (جدول ۳).

شده است. یکسان بودن مدل در تمام تیمارها مبین این حقیقت است که ضخامت، تفاوت بافت سلولی قطعات هویج، متأثر از جهت برش و میزان تخریب سلولی سطح، متأثر از لبه تیغه،



شکل ۵. نمودار پراکندگی داده‌های آزمایشگاهی رطوبت نسبی با مقادیر پیش بینی شده با مدل لگاریتمی برای برش طولی (a)، برش عرضی (b) و برش مورب (c)

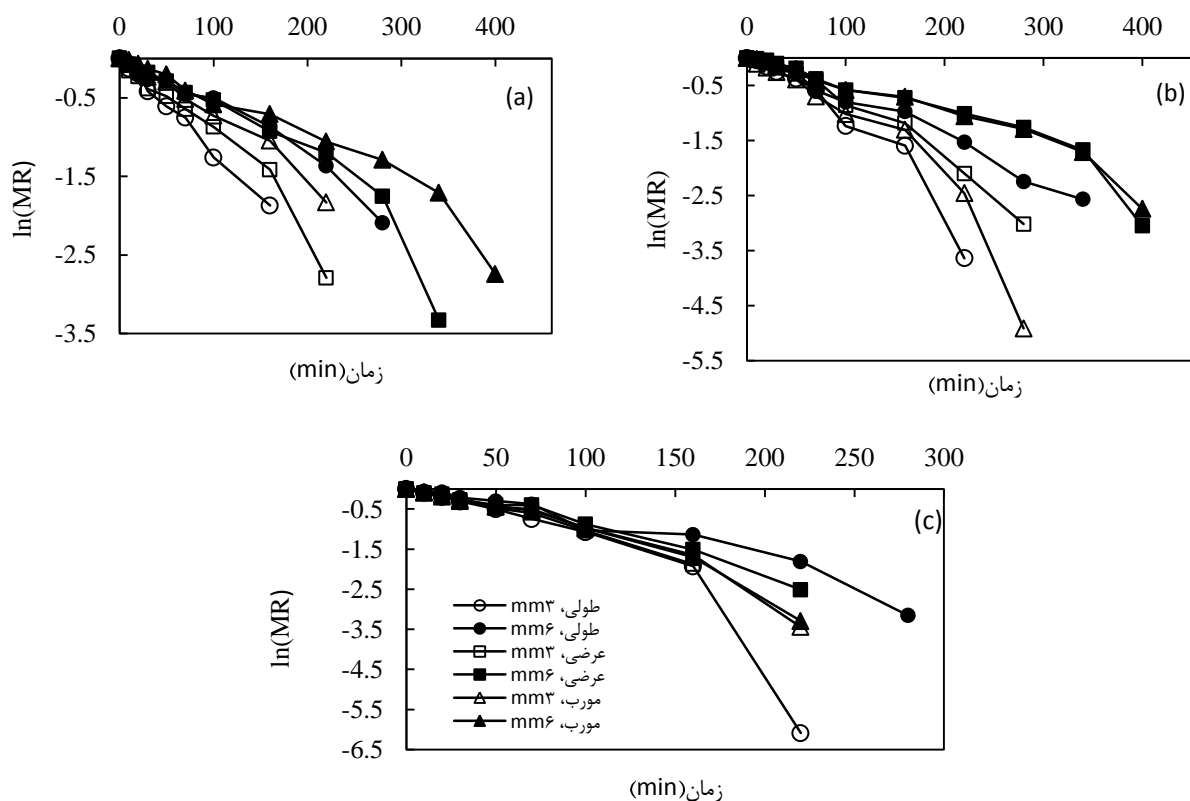
جدول ۳. ضرایب مدل لگاریتمی در خشک شدن هویج

ضخامت ۶ میلی متر		ضخامت ۳ میلی متر		جهت برش	نوع تیغه
$a = 1/243, c = -0.2599, k = 0.004371$	$a = 1/482, c = -0.4952, k = 0.003881$			مورب	صاف
$a = 1/348, c = -0.3863, k = 0.003316$	$a = 1/189, c = -0.2837, k = 0.005379$			عرضی	
$a = 1/513, c = -0.5644, k = 0.002832$	$a = 1/11, c = -0.118, k = 0.009798$			طولی	
$a = 1/193, c = -0.1947, k = 0.007338$	$a = 1/333, c = 0.3345, k = 0.005839$			مورب	کنگره‌ای
$a = 1/231, c = -0.2311, k = 0.006237$	$a = 1/288, c = -0.3014, k = 0.006642$			عرضی	
$a = 1/27, c = -0.3705, k = 0.004278$	$a = 1/197, c = -0.1989, k = 0.008003$			طولی	
$a = 1/194, c = -0.1953, k = 0.003702$	$a = 1/112, c = -0.1196, k = 0.007586$			مورب	اره‌ای
$a = 1/246, c = -0.2348, k = 0.003522$	$a = 1/368, c = -0.3503, k = 0.004555$			عرضی	
$a = 1/1, c = -0.06165, k = 0.006625$	$a = 1/269, c = -0.2691, k = 0.00618$			طولی	

ضرایب نفوذ

ضرایب نفوذ رطوبت به دست آمده برای هویج بین  $10^{-8}$  و  $0.63 \times 10^{-8}$  مترمربع بر ثانیه بدست آمد (جدول ۴). این مقادیر در محدوده  $10^{-9}$  و  $10^{-11}$  که برای مواد غذایی مختلف تعیین شده است به دست آمد (Panagiotou et al., 2004).

فرایند انتقال رطوبت از بافت محصولات کشاورزی با قانون دوم انتشار فیک بیان می‌شود و با رسم نمودار  $\ln(MR)$  نسبت به زمان و تعیین شیب (K) برای هر تیمار، ضریب نفوذ از رابطه ۴ بدست آمد (شکل ۶).



شکل ۶. نمودار تغییرات  $\ln(MR)$  در مقابل زمان خشک شدن هویج برای تیغه صاف (a)، تیغه اره (b) و تیغه کنگره ای (c)

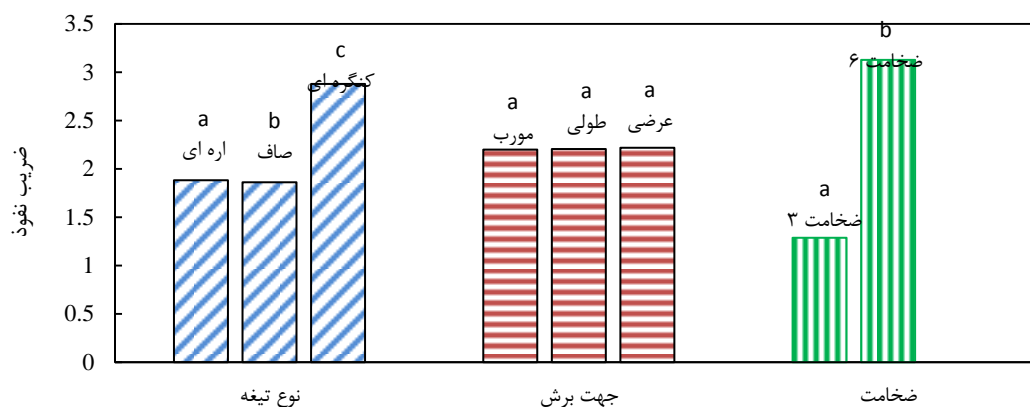
جدول ۴. ضرایب نفوذ در فرایند خشک شدن هویج

ضخامت (mm)				جهت برش	نوع تیغه
۶		۳			
$R^2$	$D_{eff} * 10^{-8} (m^2/s)$	$R^2$	$D_{eff} * 10^{-8} (m^2/s)$		
۰/۹۶	۲/۴۸۲۹	۰/۹۹	۱/۰۷۷۱	طولی	صاف
۰/۹۰	۲/۹۲۱	۰/۹۴	۱/۰۳۱۵	عرضی	
۰/۹۰	۳/۲۸۶۱	۰/۹۷	۰/۶۳۹	مورب	
۰/۹۸	۲/۵۵۵۹	۰/۹۲	۱/۳۶۹۲	طولی	اره ای
۰/۹۰	۲/۲۶۳۸	۰/۹۷	۱/۹۱۲۸	عرضی	
۰/۹۴	۱/۸۲۵۶	۰/۸۹	۱/۳۶۹۲	مورب	
۰/۹۴	۳/۷۲۴۳	۰/۸۳	۲/۰۹۹۵	طولی	کنگره ای
۰/۹۶	۴/۰۱۶۴	۰/۹۸	۱/۰۴۹۷	عرضی	
۰/۹۴	۵/۰۷۵۳	۰/۹۳	۱/۳۰۵۳	مورب	

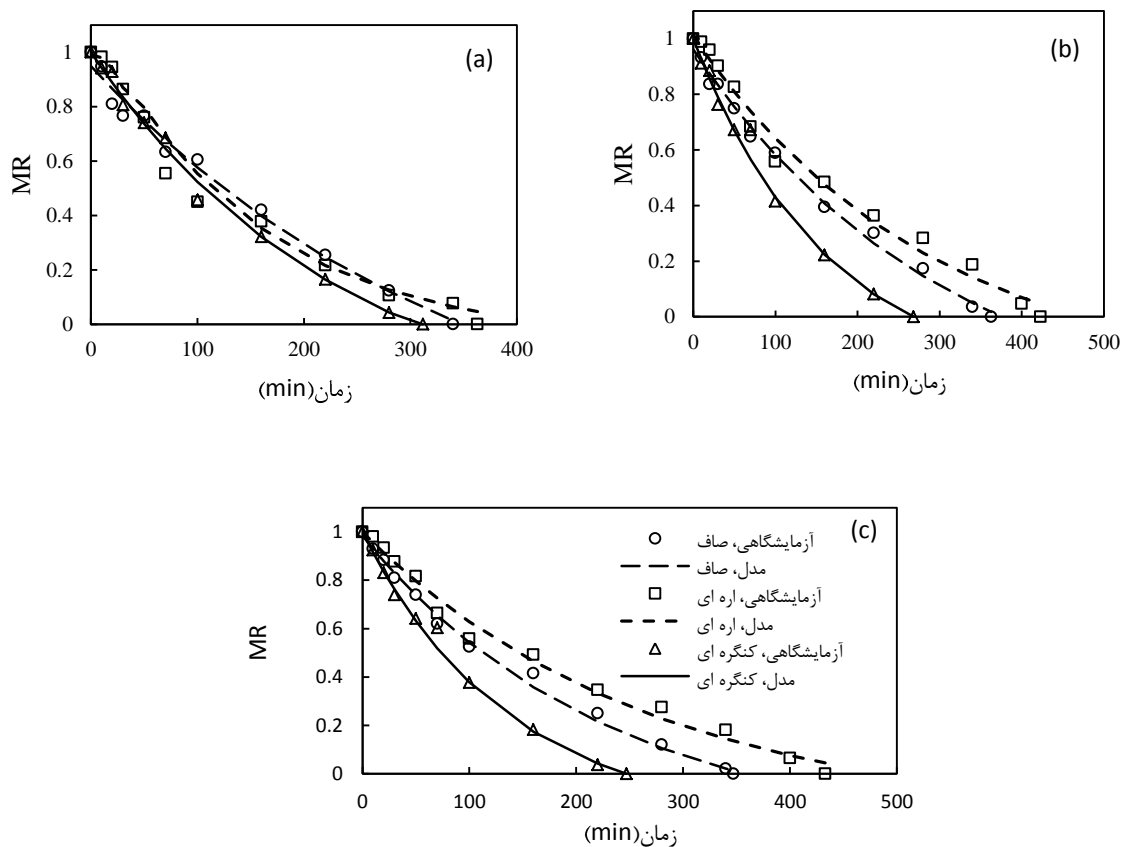
بیشترین مقادیر ضریب نفوذ در برش قطعاتی با تیغه لبه کنگره ای بدست آمد (جدول ۳). همانطور که اشاره شد این تیغه‌ها با ایجاد شیار در سطح برش باعث افزایش سطح تماس با هوا و در نتیجه افزایش تبخیر سطحی می‌شود. تبخیر سطحی باعث ایجاد کشش در بافت داخلی محصول می‌شود که این امر باعث افزایش انتقال جرم داخلی و ضریب دیفوزیون خواهد شد. بررسی سینتیک خشک شدن هویج نیز مبین این نتیجه است (شکل ۸).

نتیجه مقایسه ضرایب نفوذ به روش حداقل اختلاف معنی‌دار در سطح معنی داری ۵ درصد در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که نتایج مقایسه میانگین نشان می‌دهد، اثر جهت برش بر ضریب نفوذ معنی دار نشده است ولی اثر نوع تیغه و ضخامت در سطح ۵ درصد معنی دار شدند. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، بیشترین ضریب نفوذ برای ضخامت ۶ میلی‌متر و نوع تیغه اره‌ای شکل است.





شکل ۷. مقایسه آماری میانگین ضریب نفوذ به ازای نوع تیغه، جهت برش و ضخامت



شکل ۸. تغییرات رطوبت نسبی در زمان خشک شدن هویج در برش طولی (a)، عرضی (b) و مورب (c)

برش هویج در جهت طولی که در راستای بافت آوندی می‌باشد؛ مقاومت به انتقال جرم کمتر می‌باشد. در ضخامت ۶، در اکثر تیمارها جهت مورب و عرضی بیشترین ضرایب انتشار بدست آمد که نشان می‌دهد مقاومت به انتقال جرم در این جهات کمتر است. با افزایش ضخامت به دلیل افزایش مسیر خروج رطوبت فرایند خشک شدن طولانی‌تر خواهد بود. بنابراین بافت داخلی محصول در انتقال رطوبت می‌تواند نقش بسزایی داشته باشد. در برش هویج به صورت عرضی و مورب، سطح برش

در بررسی جهت برش که قطعاتی با ساختار سلولی متفاوت ایجاد می‌کند بررسی نتایج نشان داد در ضخامت ۳، هویج‌هایی که در جهت طولی برش خورده‌اند بیشترین ضریب نفوذ را دارند و این باعث کاهش سریع‌تر رطوبت می‌شود. این روند در شکل ۲ به خوبی قابل مشاهده می‌باشد. مطالعات انجام شده نشان داده است که زمان خشک شدن در دوره سرعت نزولی را مقاومت به انتقال جرم داخلی کنترل می‌کند (Wang et al., 2007). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در لایه‌های نازک در

معرفی شد می توان نتیجه گرفت که نوع مدل خشک شدن هویج مستقل از پارامترهای برشی مانند ضخامت و جهت برش هویج و نوع لبه تیغه است.

برای همه تیمارها مدل لگاریتمی با  $R^2 \geq 0.98$  و  $RMSE \leq 0.04$  و  $SSE \leq 0.02$  به عنوان بهترین مدلی که فرایند طبیعی خشک شدن این محصول را تفسیر می کند؛ پیشنهاد شد.

در ضخامت ۶ میلی متر بیشترین ضریب نفوذ  $5/07$  مترمربع بر ثانیه برای تیغه کنگره ای در جهت مورب بدست آمد.

در ضخامت ۳ میلی متر بیشترین ضریب نفوذ  $2/55$  مترمربع بر ثانیه برای برش با تیغه کنگره ای در جهت طولی به دست آمد.

به منظور کاهش زمان فرایند خشک شدن هویج می توان از روشی که بیشترین ضریب نفوذ را دارد برای برش هویج انتخاب کرد.

خورده آوندها در مجاورت با هوا قرار میگیرد. در این حالت انتقال رطوبت از بافت داخلی هویج به سطح آن هم مسیر با لوله های موئین و بافت آوندی صورت می گیرد که این باعث کاهش مقاومت درونی به انتقال جرم شده و در نهایت ضریب انتشار رطوبت در این حالت بیشتر می باشد. بطور کلی در ضخامت ۶ میلی متر بیشترین ضریب نفوذ  $5/07$  مترمربع بر ثانیه به ترتیب برای تیغه کنگره ای در جهت مورب و در ضخامت ۳ میلی متر بیشترین ضریب نفوذ  $2/55$  مترمربع بر ثانیه برای برش با تیغه کنگره ای در جهت طولی به دست آمد که بررسی سینتیک خشک شدن نیز مبین این نتیجه است (شکل ۲-ا). می توان با توجه به ضخامت مورد نظر، روش مناسب برش هویج را به منظور کاهش زمان خشک شدن و بدنبال آن کاهش انرژی مصرفی انتخاب کرد.

## نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد:

با توجه به اینکه در همه تیمارها مدل لگاریتمی بهترین مدل

## REFERENCES

- Aghbashlo, M., Mohammad Hossien Kianmehr, M.H., Arabhosseini, A. & Nazghelichi, T. (2011). Modelling the Carrot Thin-Layer Drying in a Semi-Industrial Continuous Band Dryer. *zech J. Food Sci.* 29(5), 528-538.
- Amiri Chayjan, R., Amiri Parian, J. & Esna-Ashari, M. (2011). Modeling of moisture diffusivity, activation energy and specific energy consumption of high moisture corn in a fixed and fluidized bed convective dryer. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(1), 28-40.
- Dadali, G., Kilic, D. & Ozbek, B. (2007). Microwave drying kinetics of Okra. *Drying technology*, 25, 917-924
- Doymaz, I. (2010). Drying of thyme (*Thymus Vulgaris L.*) and Selection of a suitable thin-layer drying model. *J Food Processing and Preservation*. 35, 458-465.
- Doymaz, I. (2004). Drying Kinetics of White Mulberry. *J. Food Eng*, 61, 341-346.
- Eshraghi, E., Maghsudlu, Y., Kashani Nejad, M., Beyraghi, S.H. & Alami, M. (2012). Effect of ultrasonic pretreatment on drying Kiwi layer. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*. 7(4), 273-279. (In Farsi)
- Goyal, R. K., Kingsly, A. R. P., Manikantan, M. R. & Ilyas, S. M. (2006). Thin-layer Drying Kinetics of Raw Mango Slices. *Biosys. Eng*, 95, 43-49.
- Hui, Y. H. (2006). *Hand book of food science technology and engineering*, Volume 3. 13:113-114
- Izumi, H., A. E. Watada, N. P. K. & Douglas, W. (1996). Controlled atmosphere storage of carrot slices, sticks and shreds. *Postharvest Biology and Technology*, 9, 165-172. 10.1016/S0925-5214(96)00045-2
- Kingsly, R. P., Goyal, R. K., Manikantan, M. R., & Ilyas, S. M. (2007). Effects of pretreatments and drying air temperature on drying behaviour of peach slice. *International journal of food science & technology*, 42(1), 65-69.
- Lee, J. H. and Kim, H. J. (2009). Vacuum Drying Kinetics of Asian White Radish (*Raphanus sativus L.*) Slices. *LWT-Food Sci. Technol*, 42, 180-186.
- Naghypour zade mahani, M. & Aghhkani, M.H. (2016). The effect of slicing type on drying kinetics and quality of dried carrot. *Journal of Agricultural Machinery*, 6(1), 224-235.
- Panagiotou, N.M., Krokida, M.K., Maroulis, Z.B. & Saravacos, G.B. (2004). Moisture diffusivity: literature data compilation for foodstuffs. *Int. J. Food Prop*, 7, 273-299.
- Sacilik, K. (2007). Effect of Drying Methods on the Thin-Layer Drying Characteristics of Hull-Less Seed Pumpkin (*Cucurbita pepo L.*). *J. Food Eng*, 79, 23-30.
- Salehi, F., Kashani nejad, M. & Asadi Amir Abadi, A. (2016). Evaluation of mass transfer kinetic in hot air-infrared dryer of eggplant slices. *New Technology of Food*, 2(7), 53-60.
- Suwanarak, J., Phanumong, P. & Rattanapanone, N. (2014). Physiological Changes of Fruit and vegetable Carving. *CMU. J. Nat. Sci.* 13 (1).
- Toivonen, P.M.A. & Brummell, D. A. (2008).

- Biochemical bases of appearance and texture changes in fresh-cut fruit and vegetable. *Postharvest Biology and Technology*, 48, 1-14.
- Wang, Z., Sun, J., Chen, F., Liao, X. & Hu, X. (2007). Mathematical modeling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. *Journal of Food Engineering*, 80, 536-544.
- Wong, J. Y. (2001). *Theory of Ground Vehicles*. (3rd ed). John Wiley and Sons, Inc
- Zielinska, M. & Markowski, M. (2010). Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots. *Chemical Engineering and Processing*, 49, 212-218.
- Zirjani, L. & Tavakolipour, H. (2010). The study of enables the production of banana layer by hot air drying method combines microwave. *Iranian Food Science Research*, 6(1), 58-67. (In Farsi).