

مدل ریاضی سینتیک خشک شدن لایه نازک هویج (*Daucus carota L.*) در طول خشک کن نواری مداوم (۵۱۶)

طیب نازقلیچی^۱، محمد حسین کیانمهر^۲، مرتضی اغباشلو^۳، اکبر عرب حسینی^۴

چکیده

این مقاله، مدلی ریاضی از فرآیند خشک شدن تکه های هویج را در طول خشک کن نواری مداوم نیمه صنعتی ارائه می دهد. تکه های هویج مورد استفاده در آزمایشات ۵ میلی متر ضخامت داشت. آزمایشات در سه دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتیگراد، سه سرعت ۰٫۵، ۱ و ۱٫۵ متر بر ثانیه و سه سرعت خطی زنجیر^۴ $۲٫۳۸ \times 10^{-۴}$ ، $۲٫۷۸ \times 10^{-۴}$ و $۳٫۳۳ \times 10^{-۴}$ متر بر ثانیه و با سه تکرار انجام گرفت. مدل لویس، هندرسون و پاییس، مدل ساده شده فیک و مدل پیچ برای برازش منحنی های خشک شدن (رطوبت نسبی در برابر موقعیت تکه ها در طول نوار) مورد استفاده قرار گرفت. مدل های مورد استفاده به داده های حاصل از آزمایشات با استفاده از روش آنالیز رگرسیون غیر خطی در نرم افزار MATLAB برازش شدند. مدل ها بر اساس ضرایب رگرسیون بالا ($R^2 > 0.99$) و «چی دو» کمتر (χ^2) و RMSE، بین داده های حاصل از آزمایشات و رطوبت نسبی پیش بینی شده مقایسه گردیدند. نتایج، مناسب بودن مدل پیچ برای پیش بینی رطوبت نسبی، در طول خشک کن نواری مداوم را نشان داد. رابطه ثابت های مدل پیچ با متغیرهای T ، U_a و U_c تعیین گردید. ضریب پخش موثر بین 3.21×10^{-7} و 8.98×10^{-7} متر بر ثانیه متغیر بود. انرژی فعالسازی بین 23.02 و 28.1 کیلو ژول بر مول متغیر بود.

کلیدواژه: هویج، خشک کردن لایه نازک، مدلسازی ریاضی، خشک کن نواری مداوم، انتشار رطوبت موثر

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان، پست الکترونیک: nazghelichi@ut.ac.ir

۲- استادیار گروه مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان

۴- استادیار گروه مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان

مقدمه

هوپیج یکی از معمولترین سبزیجات مورد استفاده در تغذیه بشر بواسطه محتوی زیاد فیبر و ویتامین می باشد [۱]. هوپیج یک منبع عالی برای بتا کارتنوئید، موثر در پیش گیری از سرطان، ویتامین A و محتوی پکتین کاهنده کلسترول، ویتامین C، ویتامین B6، تیامین، فولیک اسید و منیزیم می باشد. هوپیج خشک شده، در سوپهای خشک، به شکل پودر در شیرینی پزی و چاشنی های غذا کار برد دارد [۲]. خشک کردن غذا، میوه، گوشت و سایر محصولات کشاورزی به قبل از کشف آتش بر میگردد. خشک کردن با هوا متداولترین راه مورد استفاده برای حذف رطوبت در صنایع غذایی است [۳]. موضوع اصلی در خشک کردن محصولات کشاورزی، کاهش محتوی رطوبتی تا سطحی است که اجازه ذخیره سازی سالم درمدت زمان طولانی را بدهد. که این عمل بطور ذاتی، وزن، حجم، اندازه بسته بندی، انبار و هزینه نقل و انتقال را کاهش می دهد [۴]. جنبه مهم تکنولوژی خشک کردن، مدلسازی ریاضی فرآیند های خشک شدن می باشد [۵]. مدل سازی فرآیند خشک کردن، برای طرحهای نو، ارتقاء سیستم های خشک کردن موجود، پیش بینی چگونگی جریان هوا روی محصولات یا حتی برای کنترل این فرآیند کاربرد دارد [۶] و [۷]. اخیراً مدلسازی ریاضی خشک کنهای بستر ثابت غذا و محصولات کشاورزی، گزارش شده توسط محققین، در مقالات متعدد منتشر شده است [۱]، [۴]، [۸]، [۹]، [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۱۳] و [۱۴]. اما اطلاعات کمی در مورد مدلسازی ریاضی سینتیتیک خشک شدن در خشک کنهای مداوم در دسترس است. با داشتن مزیت‌های زیاد خشک کنهای نواری بر انواع بستر ثابت، در کاهش رطوبت غذاها، میوه ها و سبزیجات، خشک کن نواری، موثرتر، دارای محصولات با کیفیت تر و مصرف انرژی پایین می باشند. اهداف اصلی مقاله حاضر عبارتست از:

- ۱- ارزیابی تاثیر متغیرهای آزمایشات بر سینتیتیک خشک شدن.
- ۲- ارزیابی مدل‌های لوپس، هندرسون، پاییس، مدل ساده شده انتشار فیک و مدل پیچ برای توصیف سینتیتیک خشک شدن تکه های هوپیج در طول خشک کن نواری.
- ۳- ایجاد مدل ریاضی واحد برای خشک شدن هوپیج در طول خشک کن نواری.
- ۴- محاسبه تاثیر انتشار رطوبت و انرژی فعالسازی و محاسبه تاثیر متغیرهای آزمایشات بر آنها.

۲- مواد و روشها

۲-۱ آماده سازی نمونه و تعیین رطوبت اولیه هوپیج

هوپیجها از فروشگاه محلی خریداری شده و در یخچال در دمای ۵ درجه سانتیگراد نگهداری گردید. حدود ۵۰ گرم از نمونه در داخل آون در دمای 105 ± 2 درجه سانتیگراد بمدت ۲۴ خشک گردید. و آزمایشات سه بار تکرار شد.

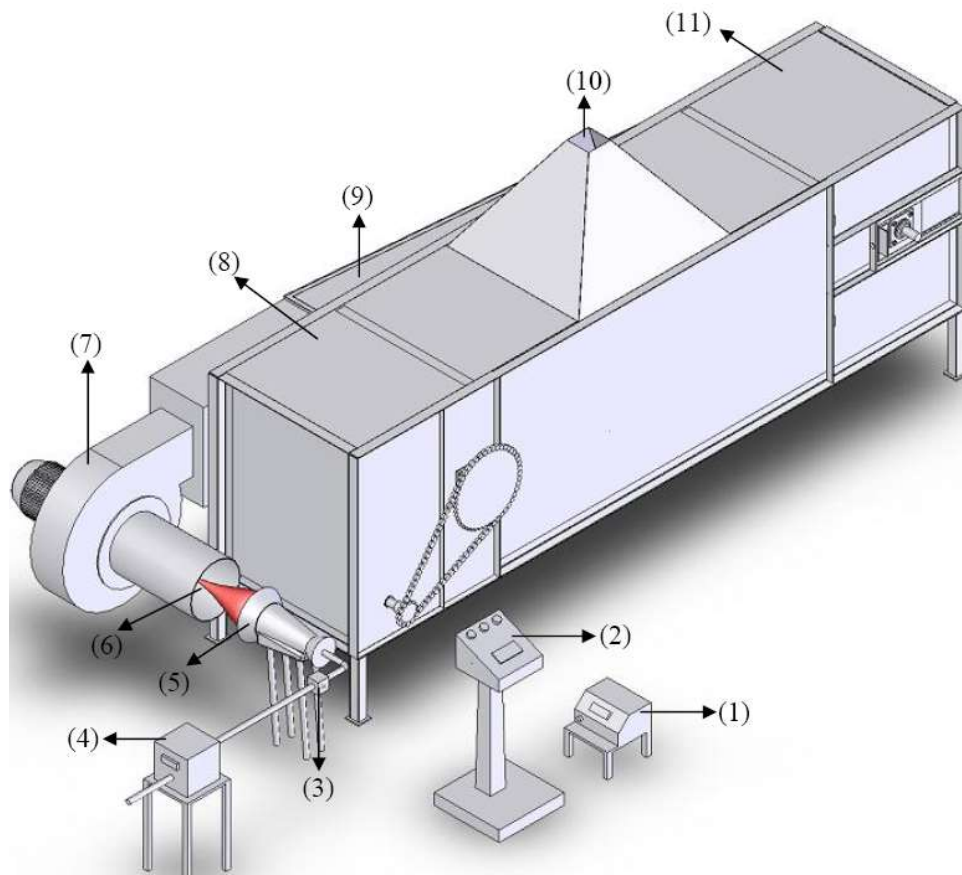
۲-۲ تجهیزات خشک کن

تصویر ۱ و ۲ یک خشک کن واری مداوم نیمه صنعتی را که در کارگاه فنی مهندسی کشاورزی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران (ایران) ساخته شد را نشان می دهد، که برای این مطالعه استفاده گردید. قطعات اصلی سیستم خشک کن شامل یک دمنده سانتیفوژی قابل تنظیم، محفظه گرمایش هوا (هیتر مستقیم)، کانال هوا (برای توزیع یکنواخت هوای داغ)، محفظه خشک کن، نوارها یا صفحات مشبک ($20\text{ cm} \times 50\text{ cm}$)، اسپراکتها (چرخ گرداننده)، زنجیر، تابلوی کنترل، دو عدد اینورتور^۱، سنسورهای رطوبت و دما، موتور الکتریکی، بخش رویی قابل جابجایی، شفت و راهنمای زنجیر می باشد. طول مفید خشک کن ۲ متر، و جهت هوای داغ بر نمونه عمودی بود. خشک کن یک کنترل کننده دمای اتوماتیک با دقت ± 1 درجه سانتیگراد داشت. سرعت هوا با استفاده از یک سرعت سنج^۲ با دقت ± 0.05 متر بر ثانیه اندازه گیری شد. یک اینورتور که بطور مستقیم بر موتور دمنده عمل می کرد، سرعت هوا را ثابت نگه داشت. سرعت خطی زنجیر با استفاده از اینورتور دیگری که بطور مستقیم بر موتور الکتریکی عمل

1 -Lenze 8300, Germany

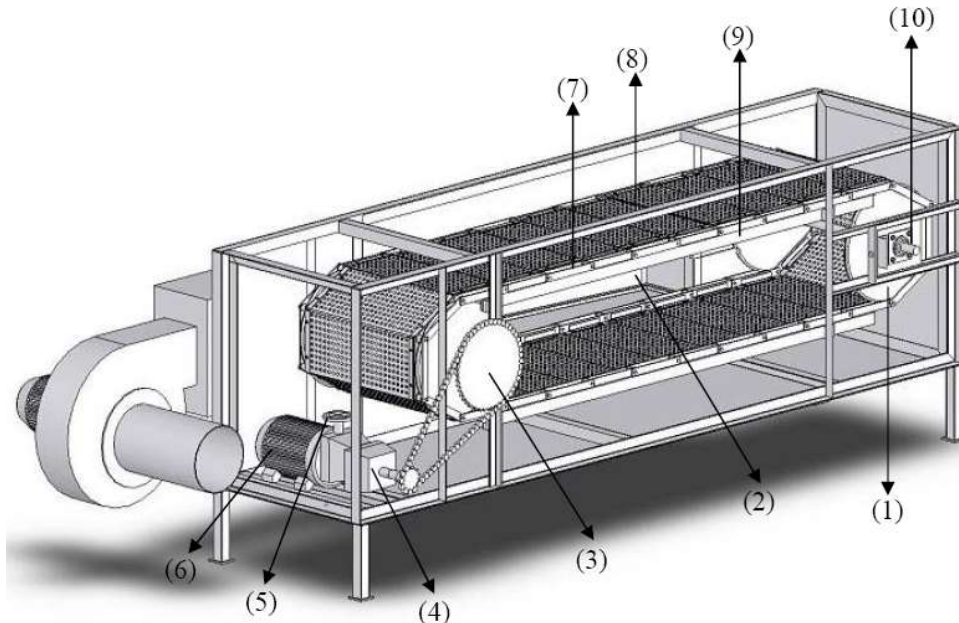
2 -PROVA AVM-07

می کرد و یک چرخنده بزرگ که سرعت چرخش اسپرکت را کم می کرد، کاهش یافت. سنسور های دما^۱ در موقعیتهای مختلف خشک کن جاسازی شدند (بدنه خشک کن، کانال هوا، زیر نوار). دمای هوا براساس سنسور جاسازی شده در زیر نوار بالایی کنترل شد.



شکل ۱. شماتیک خشک کن: اینورتور (۱)، برد کنترل (۲)، کنترل کننده دبی گاز (۳)، کنترل کننده گاز (برای دامنه گسترده) و کنترل گاز (۴)، هیتر (۵)، کانال مکندۀ هوای داغ بوسیله فن (۶)، فن (۷)، قسمت ورودی (۸)، کانال هوا (۹)، خروجی هوا و مکان سنسورهای دما و رطوبت (۱۰)، قسمت خروجی (۱۱).

1 -PT100 type



شکل ۲. شماتیک خشک کن: اسپرکت (چرخ گرداننده) (۱)، مکان سنسور اصلی ما (زیر نوار فوقانی) (۲)، چرخنده بزرگ (۳)، جعبه دنده (۴)، کنترل کننده دستی سرعت دورانی (در رنج زیاد) (۵)، موتور الکتریکی (۶)، زنجیر (۷)، صفحات مشبک (۸)، هادی زنجیر (۹)، شفت (۱۰).

۲-۳ طرز کار آزمایش و روش نمونه گیری

قبل از شروع آزمایشات، هویچها با استفاده از برنده مکانیکی به تکه های ۵ میلیمتری بریده شدند. قبل از شروع هر آزمایش، خشک کن به مدت یک ساعت روشن می شد تا بحالت مطلوب و پایدار برسد. بعد از این مرحله هر باند (صفحه مشبک) از خشک کن مرتبا با ۲۵۰ گرم از تکه های هویچ در فاصله زمانی مشخص، بصورت لایه نازک، در قسمت ورودی خشک کن پر شد. زمان پر شدن باندها به سرعت خطی زنجیر وابسته بود. بعد از اینکه اولین باند به انتهای خشک کن می رسید درب رویی خشک کن برداشته می شد و ۴۰ گرم نمونه از روی هر باند، جهت تعیین محتوی رطوبتی به آون در دمای 105 ± 2 برداشته می شد. فاصله بین دو نمونه برداری ۲۰ سانتیمتر بود. آزمایشات در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتیگراد، سرعت هوای ۰٫۵، ۱ و ۱٫۵ متر بر ثانیه و سرعت خطی زنجیر $2,38 \times 10^{-4}$ ، $2,78 \times 10^{-4}$ و $3,33 \times 10^{-4}$ متر بر ثانیه و با سه تکرار انجام شدند.

۲-۴ طرح آزمایش

تمام نمونه های آزمایشی در این مقاله با سه تکرار و در سه سرعت هوا و سه دما و سه سرعت زنجیر انجام شدند. تاثیرات ($P < 0,05$) متغیرها (دمای هوا، سرعت هوا و سرعت خطی زنجیر) بر رطوبت بی و تاثیر ضریب پخش رطوبت بر پایه سه فاکتور طرح مجزا ($3 \times 3 \times 3$)، با پیروی از روش آنالیز واریانس (ANOVA) با استفاده از نرم افزار کامپیوتری ¹MATLAB، تحلیل شدند.

۳- محاسبات تئوری

۳-۱ منحنی خشک شدن

محتوی رطوبت تکه های هویچ در طی آزمایشات، با معادله زیر بدست مد:

1 - The Math Works, Inc, Natick, U.S.A

$$MC_X = \frac{W_X - W_d}{W_d} \quad (1)$$

که MC_X محتوی رطوبت در موقعیت طولی نوار X (کیلوگرم آب بر کیلوگرم جامد خشک) و W_X وزن نمونه در موقعیت X (کیلوگرم) و W_d وزن خشک نمونه بدست آمده در موقعیت X (کیلوگرم) می باشد. رطوبت نسبی تکه های هویچ در طی آزمایشات خشک کردن با معادله زیر بدست مد:

$$MR = \frac{MC_X - MC_e}{MC_o - MC_e} \quad (2)$$

که MR رطوبت تعادلی (بی بعد)، MC_X محتوی رطوبت اولیه (کیلو گرم آب بر کیلو گرم جامد خشک)، MC_e محتوی رطوبت تعادلی (کیلو گرم آب بر کیلو گرم جامد خشک) و MC_o محتوی رطوبت اولیه است. داده های محتوی رطوبت آزمایشی تکه های هویچ که از روابط بالا بدست آمده به چهار مدل متداول خشک کردن لایه نازک در

جدول ۱ برآزش شد. که بوسیله رگرسیون غیر خطی حد اقل مربعات با روش عددی لونبرگ مارگواردت^۱ حل شد و X فاصله از مکان ورودی (موقعیت دهانه) محصول است.

منابع	معادله	مدل
[۱۷] [۱۹]	$MR = \exp(-kx)$	لویس
[۱] [۱۴]	$MR = a \exp(-kx)$	هندرسون و پاییس
[۲۲]	$MR = a \exp(-kx / l^2)$	انتشار ساده شده فیک
[۷] [۱۹]	$MR = \exp(-kx^m)$	پیچ

سه معیار برای انتخاب بهترین مدل برای توضیح سینیتیک خشک شدن هویچ در طول خشک کن مداوم مورد استفاده قرار گرفتند: ضریب همبستگی R^2 ، چی دو کاهش یافته χ^2 ، و خطای مربع میانگین ریشه (RMSE). ضریب تشخیص، چی-دو و RMSE با معادلات زیر محاسبه شدند:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{pred} - MR_{exp,i})^2} \quad (3)$$

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

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

1- Levenberg-Marguardt

$$D_{eff} = D_o \exp\left(-\frac{E_a}{R_g T_{abs}}\right) \quad (10)$$

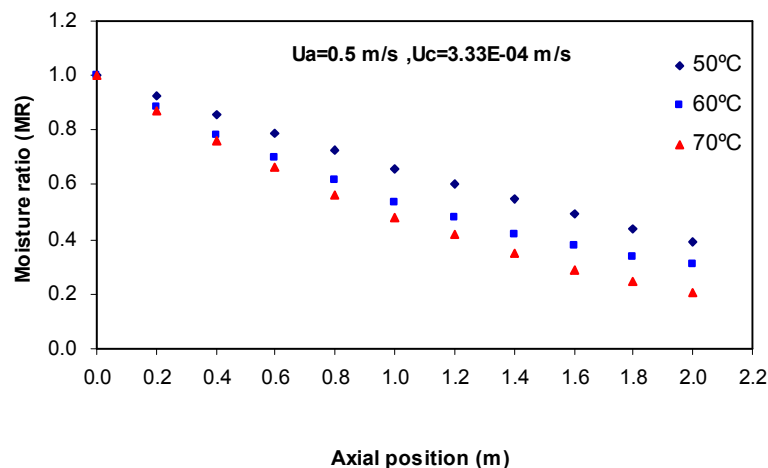
که E_a انرژی فعالسازی، R_g ثابت عمومی گازها (۸,۳۱۴۳ کیلو ژول بر مول درجه کلونین)، T_{abs} دمای مطلق هوا (درجه کلونین) و D_o ثابت می باشد. از معادله ۱۰ یک نمودار از $\ln D_{eff}$ در برابر $1/T_{abs}$ شیب خط مستقیم (K_2) را میدهد:

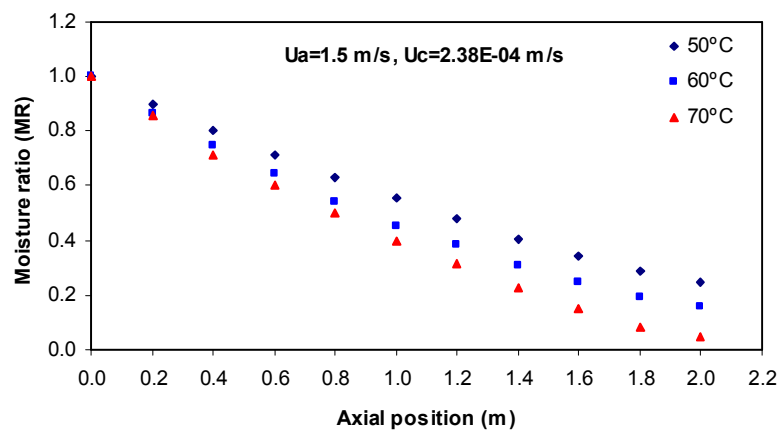
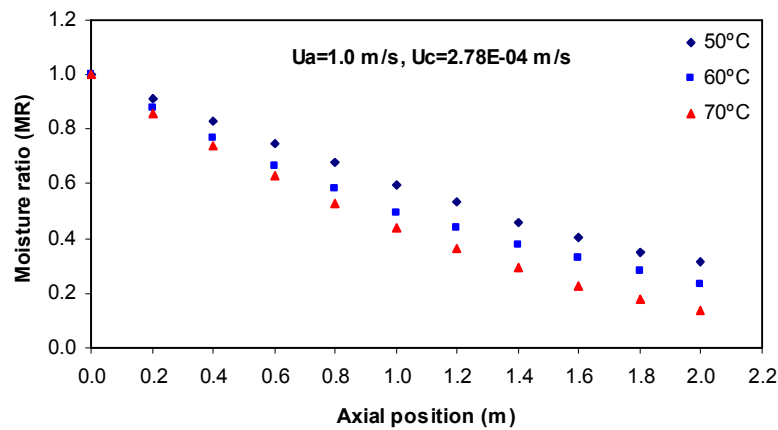
$$K_2 = \frac{E_a}{R_g} \quad (11)$$

۴- نتایج و بحث

محتوی رطوبت اولیه هویچ $۸,۳ \pm ۰,۳۶$ (کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک) محاسبه شد. رطوبت تعادلی تکه های هویچ در دمای $۵۰-۶۰-۷۰$ درجه سانتیگراد مقادیر $۰,۳۱ \pm ۰,۰۲۸۴$ ، $۰,۳۵ \pm ۰,۰۱۹۸$ و $۰,۱۳۳ \pm ۰,۰۱۹$ بود. داده های رطوبت در شرایط مختلف خشک کن، به عبارت مفید رطوبت نسبی (MR) تبدیل شد.

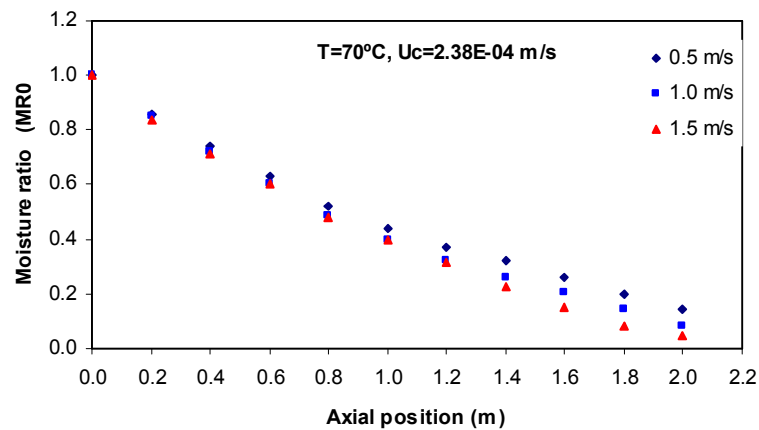
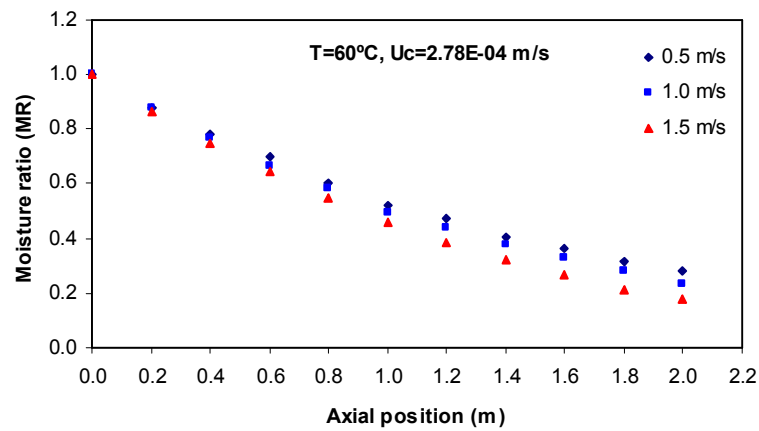
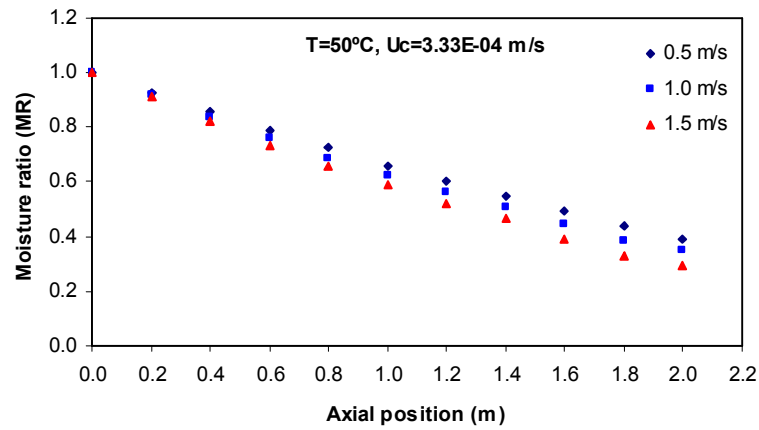
شکل ۳ تاثیر دما در سینتیک خشک شدن در سطوح مختلف سرعت ها و سرعت خطی زنجیر را نشان می دهد. افزایش دمای هوا، رطوبت نسبی (MR) و در نتیجه زمان خشک شدن را کاهش داد. زیرا دمای بالاتر هوا کاهش محتوی رطوبت را سبب میشود. به عبارت دیگر در دمای بالا انتقال جرم و حرارت بیشتر است و میزان از دست دادن آب بالا می رود. نمودارها نشان دادند که هویچ، بیشتر رطوبت خود را به سرعت در فاصله کوتاهی از ورودی دستگاه از دست داد. و از دست دادن رطوبت باقیمانده در فاصله طولانی تری اتفاق افتاد. آنالیز واریانس نشان داد که محتوی رطوبت با افزایش دمای خشک کن برای تمام سرعتهای هوا و سرعت خطی زنجیر کاهش یافت ($P < ۰,۰۵$).





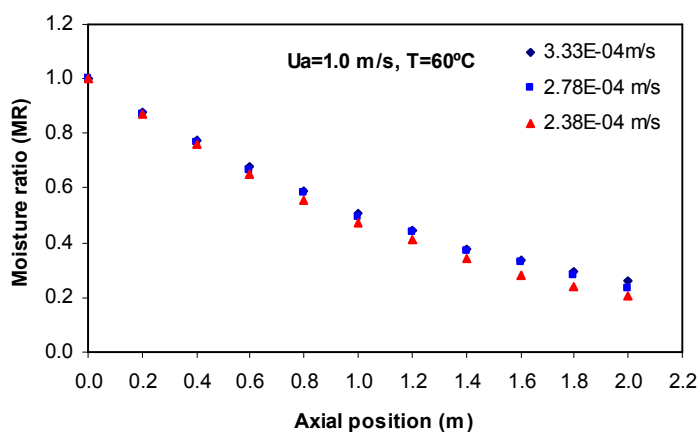
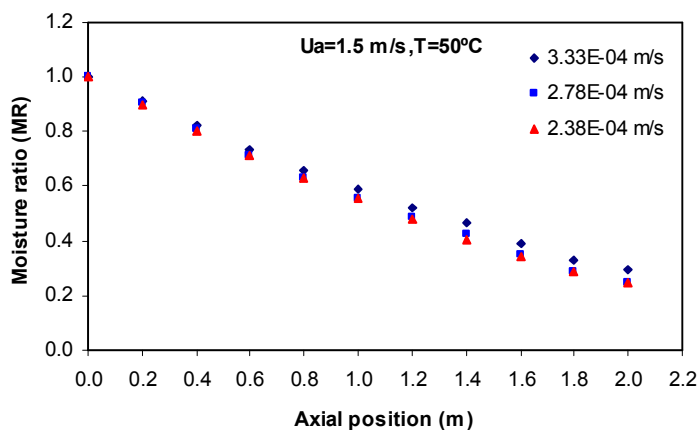
شکل ۳. تاثیر دما بر رطوبت نسبی در سطوح مختلف سرعت هوا و سرعت خطی زنجیر در طی خشک شدن تکه های هویج در خشک کن مداوم را نشان میدهد.

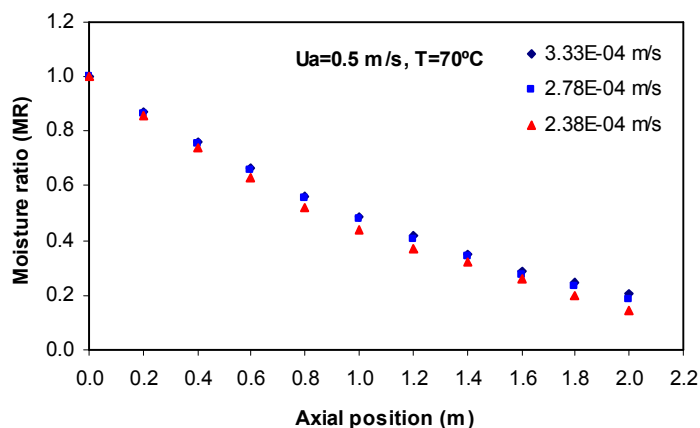
شکل ۴. تاثیر سرعت هوا بر سینتیک خشک شدن را در سطوح مختلف دمای هوا و سرعت خطی زنجیر را نشان میدهد. افزایش در سرعت هوای خشک کن، رطوبت نسبی و در نتیجه زمان خشک شدن را کاهش داد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که با افزایش سرعت هوا برای تمامی دماها و سرعتهای زنجیر، رطوبت نسبی کاهش می یابد ($P < 0,05$).



شکل ۴ تاثیر سرعت خطی زنجیر بر سینیتیک خشک شدن در دماهای مختلف هوا و سرعتهای مختلف هوا را نشان می دهد.

کاهش در سرعت خطی زنجیر، رطوبت نسبی را کاهش می دهد. زیرا کاهش در سرعت خطی زنجیر با افزایش مدت زمان ماندن محصول درون خشک کن همراه است. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که رطوبت نسبی با کاهش سرعت خطی زنجیر، در تمام سرعتهای هوا و دماهای هوا کاهش می یابد ($P < 0.05$).

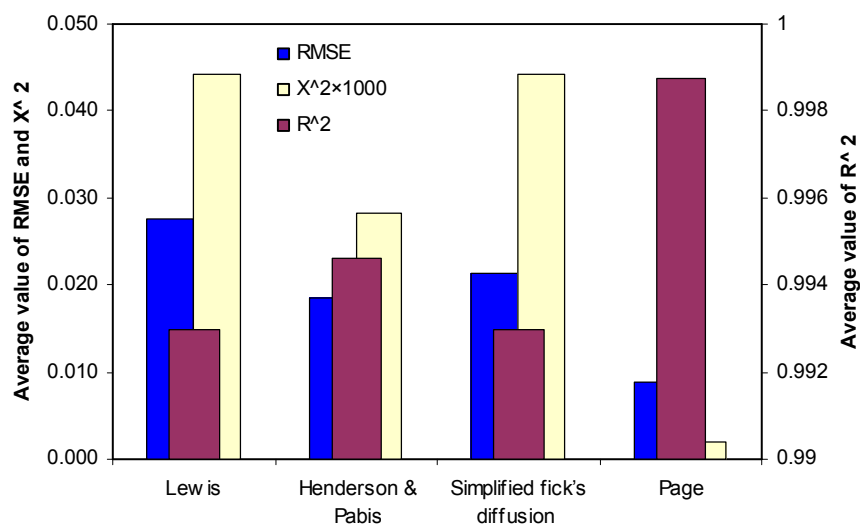




شکل ۵ تاثیر سرعت خطی زنجیر بر رطوبت نسبی را در سطوح مختلف دمای هوا و سرعت هوا در طی خشک شدن تکه های هویج در خشک کن مداوم را نشان می دهد.

مدلهای لوئیس، هندرسون و پاپیس، ساده شده انتشار فیک و مدل پیچ، با نرم افزار MATLAB با داده های خشک شده برآزش شد.

مدلهای بدست آمده به ترتیب نزولی R^2 و صعودی χ^2 و RMSE فهرست شدند. مقادیر میانگین ضریب همبستگی، چی دو، RMSE در شکل ۶ نشان داده شده اند. مدل پیچ، بهترین برآزش را برای مدلسازی سینیتیک خشک شدن لایه نازک هویج در طول خشک کن نواری مداوم را نشان داد.



شکل ۶. مقادیر میانگین R^2 ، χ^2 و RMSE برای مدل مورد استفاده.

جدول ۲ نتایج برازش R^2 ، χ^2 ، RMSE، k و n را برای مدل پیچ نشان می دهد. بطور کلی مقادیر R^2 ، χ^2 ، RMSE، k و n بدست آمده برای مدل پیچ در رنج 0.9935 تا 0.9998، 1.08×10^{-8} تا 3.58×10^{-5} ، 0.027114 تا 0.003575 (بر متر)، 0.4174 تا 0.9916 و 0.9845 تا 1.31 انتخاب شده بود.

جدول ۲: نتایج برازش مدل پیچ برای شرایط مختلف خشک کن.

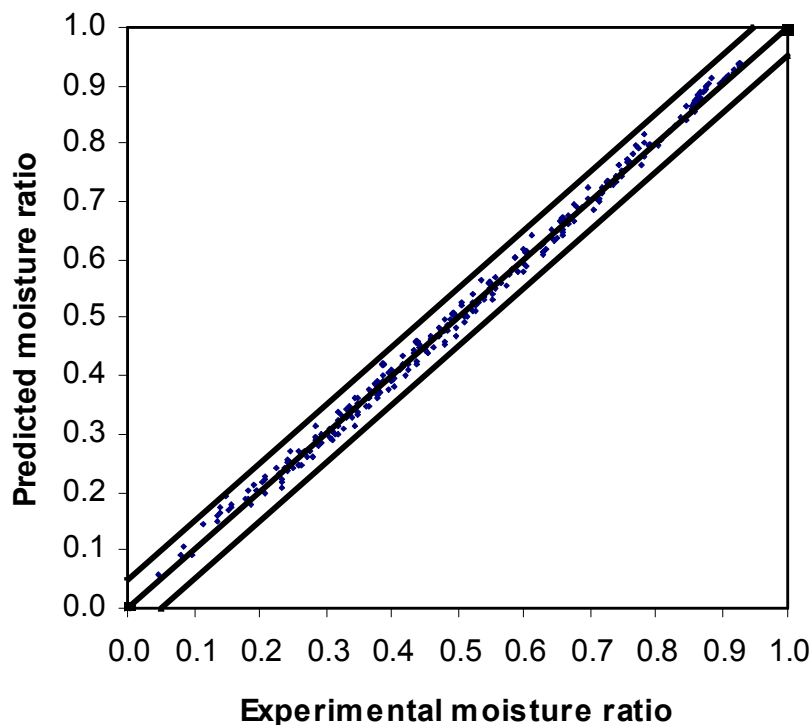
Air velocity (m/s)	Temperature (°C)	Chain linear velocity $\times 10^4$ (m/s)	k (m^{-1})	n	R^2	RMSE	χ^2
0.5	50	3.33	0.4174±0.009	1.148±0.091	0.9993	0.005599	6.51E-08
		2.78	0.4367±0.011	1.169±0.024	0.9991	0.006581	1.24E-07
		2.38	0.4601±0.008	1.176±0.095	0.9984	0.009195	4.74E-07
	60	3.33	0.6087±0.014	0.984±0.052	0.9994	0.005805	7.53E-08
		2.78	0.6339±0.007	1.020±0.056	0.9994	0.005695	6.97E-08
		2.38	0.6695±0.005	1.044±0.085	0.9997	0.003970	1.65E-08
	70	3.33	0.7293±0.007	1.096±0.059	0.9994	0.006734	1.36E-07
		2.78	0.7526±0.018	1.108±0.012	0.9989	0.009063	4.47E-07
		2.38	0.8260±0.020	1.113±0.014	0.9981	0.012686	1.72E-06
1.0	50	3.33	0.4791±0.016	1.123±0.097	0.9990	0.006992	1.60E-08
		2.78	0.5224±0.006	1.157±0.022	0.9991	0.007259	1.84E-07
		2.38	0.5582±0.009	1.174±0.084	0.9990	0.007889	2.57E-07
	60	3.33	0.6709±0.021	1.024±0.029	0.9996	0.004606	2.98E-08
		2.78	0.6906±0.007	1.040±0.096	0.9998	0.003575	1.08E-08
		2.38	0.7478±0.009	1.086±0.045	0.9996	0.005429	5.76E-08
	70	3.33	0.8063±0.010	1.150±0.095	0.9988	0.009948	6.49E-07
		2.78	0.8445±0.016	1.163±0.075	0.9986	0.011109	1.01E-06
		2.38	0.9387±0.012	1.179±0.068	0.9975	0.015506	3.83E-06
1.5	50	3.33	0.5414±0.017	1.158±0.087	0.9987	0.008784	3.95E-07
		2.78	0.6002±0.007	1.176±0.068	0.9985	0.010201	7.18E-07
		2.38	0.6086±0.008	1.180±0.013	0.9989	0.008530	3.51E-07
	60	3.33	0.7223±0.013	1.047±0.049	0.9996	0.004863	3.71E-08
		2.78	0.7865±0.004	1.105±0.073	0.9994	0.006640	1.29E-07
		2.38	0.8083±0.003	1.156±0.061	0.9989	0.009785	6.08E-07
	70	3.33	0.8793±0.006	1.193±0.057	0.9981	0.013444	2.16E-06
		2.78	0.9445±0.016	1.206±0.069	0.9985	0.012141	1.44E-06
		2.38	0.9916±0.017	1.310±0.081	0.9935	0.027114	3.58E-05

ثابت های مدل پیچ k و m در مقابل ثابتهای خشک شدن، با استفاده از آنالیز رگرسیون چندگانه برازش شدند. که نتایج زیر بدست آمد:

$$k = (0.0172T + 0.1497U_a - 872.31U_c - 0.2408) \quad R^2=0.9869 \quad (12)$$

$$m = (0.001092T^2 + 0.04388U_a^2 + 3322701U_c^2 - 0.13075T - 0.01306U_a - 2475.62U_c + 5.36) \quad R^2=0.8547 \quad (13)$$

در معادله (۱۲) ضرایب دمای هوا و سرعت هوا مثبت هستند. این نشان می دهد که k با افزایش سرعت و دمای هوا، افزایش دارد. رطوبت نسبی هویج در طی فرآیند خشک شدن، با مدل پیچ قابل تخمین خواهد بود. شکل ۷ داده های آزمایشی برازش شده را در مقابل مقادیر پیش بینی شده، که با مدل پیچ محاسبه شده را نشان می دهد. نقاط متناظر داده ها حول خط صاف با شیب ۴۵ درجه متمرکز شدند که برتری مدل پیچ در توضیح رفتار خشک شدن لایه نازک هویج در طول خشک نواری مداوم را نشان می دهد.



شکل ۷. مقادیر رطوبت نسبی پیش بینی شده با استفاده از مدل پیچ برای دمای هوا و سرعت هوا و سرعت خطی زنجیر متفاوت برای لایه نازک هویج در طول خشک کن نواری مداوم است.

D_{eff} با استفاده از معادله ۹ محاسبه شد. مقادیر D_{eff} برای هر آزمایش در جدول ۳ گزارش شده است. مقدار کمینه ضریب انتشار رطوبت مقدار 3.21×10^{-7} در دمای ۵۰ درجه و سرعت هوای ۰٫۵ متر بر ثانیه و سرعت خطی زنجیر 2.38×10^{-4} بود. مقدار بیشینه ضریب انتشار رطوبت مقدار 8.98×10^{-7} در دمای ۷۰ درجه و سرعت هوای ۱٫۵ متر بر ثانیه و سرعت خطی زنجیر 3.33×10^{-4} بود. مقادیر بدست آمده، در رنج مناسب، برای محصولات مشابه گزارش شده در مقالات بود [۱]، [۴]، [۹]، [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۱۷] و [۱۹].

نتیجه تجزیه واریانس نشان داد که ضریب انتشار موثر رطوبت بطور معنی داری با دما، سرعت ه_a و سرعت خطی زنجیر تاثیر می پذیرد. در دمای هوای ثابت و یک سرعت خطی زنجیر، ضریب انتشار موثر رطوبت افزایش می یابد ($P < 0.05$). با افزایش سرعت هوا در یک سرعت هوای ثابت و یک سرعت خطی زنجیر ضریب انتشار موثر رطوبت با افزایش دما افزایش می یابد ($P < 0.05$) در یک دمای هوا و سرعت هوای ثابت، ضریب انتشار موثر رطوبت با کاهش سرعت خطی زنجیر، افزایش یافت ($P < 0.05$). یافته های مشابه برای تاثیر دما و سرعت هوا بر ضریب انتشار موثر رطوبت با بعضی محققین گزارش شده است [۱۰]، [۱۸] و [۲۰].

جدول ۳. انتشار رطوبت موثر برای هر آزمایش.

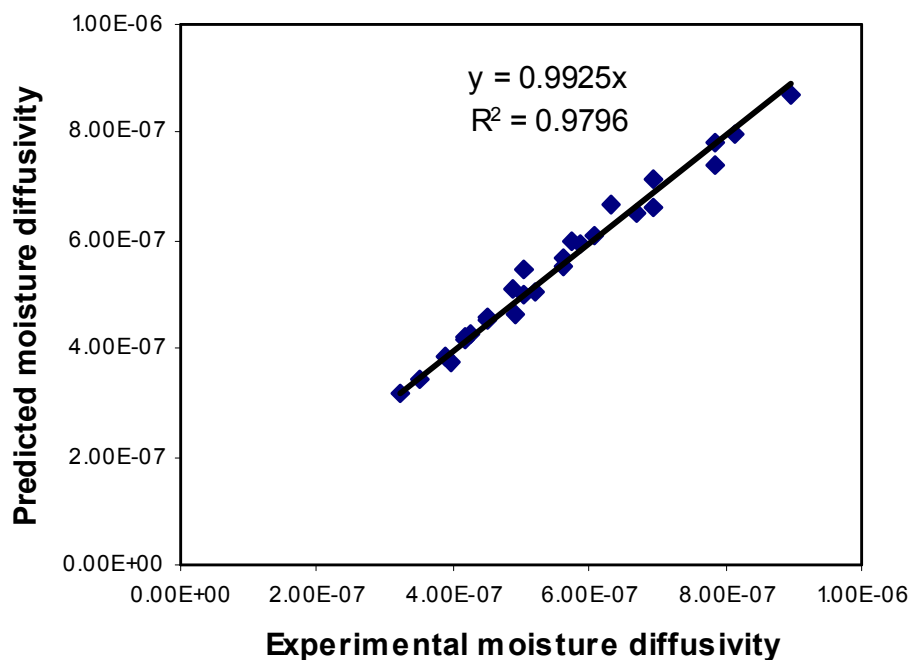
Air velocity (m/s)	Temperature (°C)	Chain linear velocity × 10 ⁴ (m/s)	D _{eff} × 10 ⁷ (m ² /s)	R ²
0.5	50	3.33	3.97±0.09	0.9942
		2.78	3.52±0.11	0.9926
		2.38	3.21±0.07	0.9898
	60	3.33	5.04±0.16	0.9985
		2.78	4.51±0.14	0.9994
		2.38	4.18±0.05	0.9993
	70	3.33	6.69±0.08	0.9972
		2.78	5.85±0.07	0.9947
		2.38	5.63±0.16	0.9868
1	50	3.33	4.48±0.21	0.9950
		2.78	4.16±0.06	0.9946
		2.38	3.86±0.21	0.9934
	60	3.33	5.74±0.09	0.9994
		2.78	5.04±0.14	0.9991
		2.38	4.85±0.08	0.9978
	70	3.33	7.83±0.07	0.9918
		2.78	6.96±0.13	0.9890
		2.38	6.49±0.14	0.9718
1.5	50	3.33	5.22±0.04	0.9922
		2.78	4.91±0.19	0.9899
		2.38	4.26±0.08	0.9918
	60	3.33	6.30±0.08	0.9991
		2.78	6.08±0.16	0.9961
		2.38	5.62±0.15	0.9919
	70	3.33	8.98±0.20	0.9845
		2.78	8.12±0.14	0.9849
		2.38	7.86±0.09	0.9801

تاثیر متغیرها (شرایط هوا و سرعت خطی زنجیر) بر ضریب انتشار موثر رطوبت، بطور کلی با استفاده از معادله آرنیوس توضیح داده شد. معادله زیر تاثیر متغیرها بر ضریب انتشار موثر رطوبت خشک کردن هویج در سطح معنی داری آماری ۱٪ را نشان میدهد:

$$D_{eff} = f(U_a, U_c, T_{abs}) = 0.2466 U_a^{0.2472} U_c^{0.4824} \exp\left(-\frac{3016.77}{T_{abs}}\right) \quad R^2=0.9821 \quad (14)$$

معادله مشابه برای تایید تاثیر متغیرهای خشک کردن بر ضریب انتشار موثر رطوبت، در طی خشک کردن تکه های سیب زمینی بوسیله آکپینار^۱ بدست آمد.

شکل ۸ نمودار داده های آزمایشی انتشار رطوبت را در برابر مقادیر پیش بینی شده با معادله ۱۴ نشان می دهد. نقاط متناظر با داده ها حول خط مستقیم با شیب ۴۵ درجه تجمع یافته اند. که این بیانگر برتری مدل برای پیش بینی انتشار رطوبت موثر خشک کردن هویج در طول خشک کن نواری مداوم بود.



شکل ۸. مقادیر انتشار رطوبت آزمایشی در برابر مقادیر پیش بینی شده با معادله ۱۴ برای دماها و سرعتهای مختلف هوا و سرعتهای خطی زنجیر در طول خشک کن نواری مداوم.

$Ln D_{eff}$ در مقابل $1/T_{abs}$ رسم شد و انرژی فعالسازی با استفاده از معادله (۱۱) محاسبه گردید. برای هر مقداری از سرعت هوا و سرعت خطی زنجیر، انرژی فعالسازی تست شده و محاسبه گردید که جدول ۴ بیانگر آن است. انرژی فعالسازی بطور کلی در گستره ۱۲٫۷-۱۱۰ کیلو ژول بر مول برای اغلب مواد غذایی باقی ماند [۲۱]. بابالیس و بلسیوتیس (۲۰۰۴) مقادیر انرژی فعالسازی را در محدوده ۳۰٫۸ تا ۴۸٫۴۷ کیلو ژول بر مول برای انجیر گزارش دادند. انرژی فعالسازی برای تکه های هویج از ۲۳٫۰۲ تا ۲۸٫۱۰ کیلو ژول بر مول برای سرعتهای هوا در گستره ۰٫۵-۱٫۵ متر بر ثانیه و سرعت خطی زنجیر در گستره $۲٫۳۸ \times 10^{-۴}$ تا $۳٫۳۳ \times 10^{-۴}$ متر بر ثانیه تغییر کرد.

جدول ۴. انرژی فعالسازی در سرعت های مختلف هوا و زنجیر.

Air velocity (m/s)	Chain linear velocity $\times 10^4$ (m/s)	Energy activation (kJ/mol)	Ln (D_0)	R^2
0.5	3.33	24.02 \pm 0.45	5.80 \pm 0.14	0.9953
	2.78	23.36 \pm 0.53	6.14 \pm 0.17	0.9991
	2.38	25.85 \pm 0.44	5.32 \pm 0.17	0.9977
1.0	3.33	25.60 \pm 1.57	5.08 \pm 0.54	0.9935
	2.78	23.61 \pm 0.33	5.91 \pm 0.13	0.9743
	2.38	26.85 \pm 0.84	4.78 \pm 0.28	0.9792
1.5	3.33	24.77 \pm 0.79	5.23 \pm 0.30	0.9638
	2.78	23.02 \pm 0.58	5.93 \pm 0.18	0.9887
	2.38	28.10 \pm 0.07	4.20 \pm 0.01	0.9946

۵- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر ، رفتار رطوبتی تکه های هویج در طول خشک کن نواری مداوم مطالعه شد. محتوی رطوبت هویج بطور پیوسته در طول خشک کن کاهش یافت. نتیجه آزمایشات نشان میدهد که متغیرها، تاثیر معنی داری بر سینیتسک خشک شدن دارد. مدل پیچ، بطور مناسب محتوی رطوبت هویج را، بواسطه هوای خشک کننده، در دمای بین ۵۰ تا ۷۰ درجه سانتیگراد، سرعت های بین ۰.۵ تا ۱.۵ و سرعت خطی زنجیر ۳.۳۸×10^{-4} تا ۳.۳۳×10^{-4} متر بر ثانیه پیش بینی می کند.

پارامترهای شکل و مقیاس مدل پیچ میتواند بعنوان تابعی از دمای هوا، سرعت آن و سرعت خطی زنجیر پیش بینی شود. در نتیجه یک معادله جنرال برای رطوبت نسبی تکه های هویج، بعنوان تابعی از شرایط هوا سرعت خطی زنجیر و موقعیت محوری بدست آمد.

تاثیر متغیرها بر ضریب انتشار موثر با معادله آرنیوس ارائه شد. نتایج نشان دادکه متغیرهای آزمایشات تاثیر معنی داری بر ضریب انتشار موثر رطوبت دارد.

۶- منابع

- [1] Doymaz, I. (2004). Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 61,359–364.
- [2] Erenturk, S., & Erenturk, K. (2007). Comparison of genetic algorithm and neural network approaches for the drying process of carrot. *Journal of Food Engineering*, 78, 905–912.
- [3] Gornicki, K., & Kaleta, A. (2007). Drying curve modeling of blanched carrot cubes under natural convection condition. *Journal of Food Engineering*, 82, 160–170.
- [4] Doymaz, I. (2007). Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, 78, 1291–1297.



- [5] Demir, V., Gunhan, T., & Yagcioglu, A. K. (2007). Mathematical modeling of convection drying of green table olives. *Biosystems Engineering*, 98, 47–53.
- [6] Xia, B., & Sun, D.W. (2002). Application of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. *Computer and Electronics in Agriculture*, 34, 5–24.
- [7] Babalis, S.J., Papanicolaou, E., Kyriakis, N., & Belessiotis, V.G. (2006). Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). *Journal of Food Engineering*, 75, 205–214.
- [8] Ozdemir, M. & Devres, Y.O. (1999). The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*, 42, 225±233.
- [9] Ertekin, C., & Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63, 349–359.
- [10] Sacilik, K., & Unal, G. (2005). Dehydration Characteristics of Kastamonu Garlic Slices. *Biosystems Engineering*, 92 (2), 207–215.
- [11] Doymaz, I. (2005). Influence of pretreatment solution on the drying of Sour-Cherry. *Journal of Food Engineering*, 78, 591-596.
- [12] Menges, H.O., & Ertekin, C. (2006). Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples. *Journal of Food Engineering*, 77, 119–125.
- [13] Celma, A. R., Rojas, S., Lopez, F., Montero, I., & Miranda, T. (2007). Thin-layer drying behaviour of sludge of olive oil extraction. *Journal of Food Engineering*, 80, 1261–1271.
- [14] Doymaz, I. (2008). Convective drying kinetics of strawberry. *Chemical Engineering and Processing*, 47, 914–919.
- [15] Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion* (2nd ed.). Oxford, UK: Clarendon Press.



- [16] Babalis, S.J., & Belessiotis, V.G. (2004). Influence of drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering*, 65,449–458.
- [17] Akpınar, E., Midilli, A., & Bicer, Y. (2003). Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. *Energy Conversion and Management*, 44, 1689–1705.
- [18] Corzo, O., Bracho, N., & Alvarez, C. (2008). Water effective diffusion coefficient of mango slices at different maturity stages during air drying. *Journal of Food Engineering*, in press.
- [19] Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A., & Tabil, L.G. (2007). Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of Food Engineering*, 78, 98–108.
- [20] Goyal, R.K., Kingsly, A.R.P., Manikatan, M.R., & Ilyas, S.M. (2007). Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 176-180.
- [21] Zogzas, N.P., Maroulis, Z.B., & Marinos-Kouris, D. (1996). Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology*, 14 (10), 2225–2253.
- [22] Diamante, L. M., & Munro, P. A. (1993). Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy*, 51(4), 271–276.
- [23] Aghbashlo, M., Kianmehr, M.H. & Samimi-Akhijahani, H. (2008). Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (*Berberis Vulgaris*). *Energy conversion and management*. (In press).