



مدل سازی ریاضی فرایند خشک کردن با هوای گرم برش‌های به با پیش تیمار آبگیری اسمزی: تعیین ضریب نفوذ موثر و انرژی فعال سازی

سیده شیوا حسنی^۱، مریم خاوریپور^{۲*}

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد آیت‌الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد آیت‌الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۷/۳/۱۷، تاریخ آخرین بازنگری: ۹۷/۴/۲۲، تاریخ پذیرش: ۹۷/۶/۴)

چکیده

پیش تیمار آبگیری اسمزی در فرایند خشک کردن با هوای گرم با هدف بهبود ویژگی‌های تغذیه‌ای، حسی و کیفی محصول نهایی خشک شده به کار می‌رود. در تحقیق حاضر، پیش تیمار آبگیری اسمزی برش‌های به و سپس خشک کردن آن با استفاده از هوای گرم انجام شد. آبگیری اسمزی در غلظت‌های ۴۰، ۴۵ و ۵۰٪ (w/w) ساکاروز و دمای خشک کردن با هوای گرم ۴۰، ۵۰ و ۶۰ °C صورت پذیرفت. نسبت نمونه به محلول اسمزی ۱:۱۰ و دمای محلول اسمزی ۳۰ °C در نظر گرفته شد. مدل سازی ریاضی با استفاده از مدل‌های نیوتن، پیچ، هندرسون و پاییس اصلاح شده، نفوذ فیک ساده شده، معادله دوم پیچ اصلاح شده، دو جمله‌ای نمایی، ونگ و سینگ، آغباشلو و لجستیک بررسی گردید. برازش داده‌های تجربی با مدل‌ها به منظور تعیین مدل بهینه جهت توصیف فرایند خشک کردن، تعیین ضریب نفوذ و انرژی فعال سازی انجام شد. زمان خشک کردن برای نمونه‌های تیمار نشده در دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ °C به ترتیب برابر با ۵۰۹/۶۷۱±۱/۵۲۷، ۴۹۱±۱/۷۳۲ و ۴۵۹±۰/۷۰۷ min بود. همچنین، برای نمونه‌ها با پیش تیمار آبگیری اسمزی، زمان خشک کردن در دماهای تحت بررسی خشک کردن با هوا با افزایش غلظت ساکاروز در محلول اسمزی کاهش یافت. مدل پیچ به عنوان بهترین مدل جهت توصیف سینتیک انتقال جرم طی خشک کردن به تعیین گردید. غلظت محلول اسمزی ۵۰٪ و دمای ۶۰ °C منجر به ضریب نفوذ موثر $2/817 \times 10^{-10}$ m²/s و زمان خشک کردن ۲۸۶±۱/۴۱۳ min شد. علاوه بر این، ضریب نفوذ موثر با افزایش دمای خشک کردن افزایش یافت. غلظت محلول اسمزی نیز با انرژی فعال سازی رابطه عکس داشت. ارزیابی حسی نشان داد افزایش غلظت محلول اسمزی منجر به افزایش امتیاز پذیرش کلی گردید.

واژه‌های کلیدی: "به"، "پیش تیمار اسمزی، خشک کردن، مدل سازی، ضریب نفوذ موثر، ارزیابی حسی.

۱. مقدمه

میوه "به" با نام علمی *Cydonia oblonga*، متعلق به تیره وردسانان و از خانواده سیب می‌باشد که دارای عطر دلپذیر و طعم و مزه‌ای متمایز است [۱]. ترکیبات آن آب حدود ۸۳٪، کربوهیدرات، پروتئین، چربی و فیبر می‌باشد. هم‌چنین، این میوه دارای کانی‌هایی مانند پتاسیم، کلسیم، فسفر، آهن، سدیم و ویتامین‌های C، A، B₁، B₂ و B₃ بوده و انواع اسیدهای آمینه از جمله لیسین، هسیتیدین، سرین، آلانین، والین، فنیل آلانین، لوسین و ایزولوسین را شامل می‌شود [۲، ۳]. میوه "به" به‌صورت تازه، یا در تهیه مربا، چای ترش، شربت، ژله، مارمالاد، برگه، شیرینی و برخی غذاها مانند آبگوشت و تاس کباب استفاده می‌شود [۴]. به‌علاوه، از آن اسانس و پکتین نیز استخراج می‌شود. میوه "به" برای درمان بسیاری از بیماری‌ها از جمله عفونت‌های روده‌ای و ورم حاد روده، اسهال به‌ویژه از نوع خونی، سوزش مجاری ادرار، تنگی نفس، سردردهای مزمن و التهاب‌های مختلف مفید است.

محتوی بالای رطوبت در مواد غذایی، پیدایش طعم نامناسب و کاهش ارزش تغذیه‌ای فراهم می‌آورد. لذا، کاهش رطوبت یا خشک کردن، به‌طور گسترده برای افزایش ماندگاری، تسهیل حمل و نقل و حفظ کیفیت طبیعی میوه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در فرایند خشک کردن میوه‌ها با هوای گرم، امکان ایجاد تغییرات نامطلوب در رنگ، طعم و مواد مغذی و چروکیدگی به‌دلیل زمان و دمای بالای فرایند وجود دارد [۳، ۵، ۶]. از این‌رو استفاده پیش‌تیمارها قبل از خشک کردن می‌تواند باعث بهبود رنگ، طعم، بافت و کیفیت میوه‌ها، کاهش مصرف انرژی و زمان خشک شدن گردد [۷]. آبگیری اسمزی، فرایند خارج‌سازی بخشی از آب بافت میوه بر اساس غوطه‌وری مواد غذایی در محلول هیپرتونیک است. این عملیات با هدف بیشینه‌سازی خروج آب، موجب افزایش پایداری ماده غذایی و کاهش فعالیت آبی می‌گردد. محلول هیپرتونیک دارای فشار اسمزی بالاتر و فعالیت آبی کم‌تری در مقایسه با مواد غذایی است. از آن‌جا که دیواره سلولی بسیاری از مواد غذایی می‌تواند به‌عنوان یک غشای نیمه تراوا عمل کند و به‌علت وجود گرادیان غلظت بین محلول اسمزی و مایعات داخل سلولی، نیروی محرک لازم برای خروج آب از ماده

غذایی به درون محلول اسمزی ایجاد می‌شود [۸]. با توجه به این‌که غلظت آب در ماده غذایی و غلظت عامل و یا عوامل اسمزی در محلول هیپرتونیک بالا می‌باشد، جریان آب از ماده غذایی به درون محلول اسمزی و نفوذ عامل و یا عوامل اسمزی به درون ماده غذایی صورت می‌گیرد. با نفوذ مواد جامد محلول به داخل ماده غذایی، فضاهای خالی ناشی از خروج رطوبت از محصول پر می‌شوند. در نتیجه، به‌میزان قابل توجهی بافت را محافظت کرده و میزان چروکیدگی و آسیب سلولی کاهش می‌یابد. علاوه‌براین، بهبود طعم ماده غذایی در آبگیری اسمزی فراهم می‌شود. فرایند آبگیری اسمزی به‌طور معمول در فشار محیط صورت می‌گیرد [۹].

خشک کردن محصولات کشاورزی، پدیده پیچیده‌ای است که در آن انتقال جرم و حرارت هم‌زمان رخ می‌دهد. بنابراین، مدل‌سازی یک روش مناسب برای درک پدیده‌های درگیر طی فرایندهای مختلف اعمال شده روی مواد غذایی و پیش‌بینی رفتار ماده تحت عوامل گوناگون درونی و بیرونی می‌باشد. مدل‌سازی به‌منظور افزایش کیفیت محصول خشک‌شده، طراحی‌هایی با قابلیت اطمینان بالا، بهینه‌سازی شرایط عملیات و طراحی‌ها و ارزیابی عملکرد فرایند انجام می‌گیرد.

پژوهش‌های متعددی در مورد مدل‌سازی ریاضی و سینتیک فرایند خشک کردن در محصولات مختلف کشاورزی از جمله انجیر [۱۰]، موز [۱۱]، فلفل قرمز [۱۲]، سیب [۱۳]، کدو تنبل [۱۴]، کدو سبز [۱۵] و میوه به [۱۶] انجام شده است. محمدی و همکاران فرایند خشک کردن برش‌های میوه به در ضخامت‌های ۳، ۵ و ۷ mm در دماهای ۶۰ تا ۸۰ °C توسط ۱۰ مدل سینتیکی خشک کردن مدل‌سازی کردند [۱۷]. نتایج نشان داد اعمال دمای ۷۱ °C در ضخامت ۷ mm منجر به کم‌ترین زمان خشک کردن (۲۰۸min) و بیش‌ترین ضریب نفوذ موثر ($6/74 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$) گردید. هم‌چنین، مدل میدلی بهترین مدل جهت برازش فرایند خشک کردن برش‌های به بود. با این وجود، در مورد مدل‌سازی فرایند خشک کردن محصولات با پیش‌تیمار آبگیری اسمزی و تاثیر پیش‌تیمار در مدت زمان خشک کردن، کیفیت و ارزیابی حسی محصولات گزارش‌های کمی ارائه شده است [۱۸، ۱۹]. لذا، تحقیق حاضر به بررسی تاثیر غلظت‌های مختلف محلول اسمزی

رطوبت نهایی ۴ تا ۶٪ توزین گردید. سرعت جابه‌جایی هوای داخل آون $1/2 \text{ m}^2/\text{s}$ بود. آزمایش‌ها سه بار تکرار شدند.

۴.۲. محاسبه نسبت رطوبت

این پارامتر، مقدار رطوبت نمونه‌ها را در هر لحظه نسبت به رطوبت اولیه و تعادلی بیان کرده و از معادله (۱) به دست می‌آید:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad M_t = \frac{w_t - w_d}{w_d} \quad (1)$$

که در آن MR ، $M_{(t)}$ ، $M_{(e)}$ و $M_{(0)}$ به ترتیب نسبت رطوبت، رطوبت بر مبنای خشک در لحظه t ، رطوبت تعادلی در مبنای خشک و رطوبت اولیه در مبنای خشک ($\frac{\text{kg moisture}}{\text{kg dry matter}}$) می‌باشد. w_t وزن اولیه نمونه و w_d وزن نمونه خشک می‌باشد [۱۷].

۵.۲. آزمون رنگ‌سنجی

رنگ‌سنجی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه رنگ‌سنج هانتربل Clorflex، مدل Cx1542، ساخت ایالات متحده و با توجه به شاخص‌های رنگی a به عنوان پارامتری که از مقادیر منفی برای ته رنگ سبز تا مثبت برای ته رنگ سرخ متغیر است، b به عنوان پارامتری که از مقادیر منفی برای ته رنگ آبی تا مقادیر مثبت برای ته رنگ زرد متغیر است و L که از رنگ سیاه ۰ تا رنگ سفید ۱۰۰ متغیر است و میزان شفافیت را نشان می‌دهد، مورد بررسی قرار گرفت. اختلاف میزان رنگ بین نمونه‌های خشک‌شده با نمونه اصلی با استفاده از شاخص‌های رنگی توسط معادله (۲) محاسبه گردید.

$$\Delta E = \sqrt{[(L-L_0)^2 + (a-a_0)^2 + (b-b_0)^2]} \quad (2)$$

که در آن، L ، a و b شاخص‌های رنگی نمونه‌ها بعد از خشک‌شدن و L_0 ، a_0 و b_0 خواص رنگی نمونه‌های اولیه می‌باشد [۲۲].

۶.۲. ارزیابی حسنی

آنالیز حسنی از روش هدونیک ۵ نقطه‌ای و از ۱۰ فرد که از قبل شرایط انجام آزمون و امتیازدهی به آن‌ها آموزش داده شده بود استفاده گردید. نمونه‌ها از نظر رنگ، چروکیدگی و پذیرش

و دمای فرایند خشک‌کردن بر مدت زمان خشک‌کردن می‌پردازد. همچنین، با برازش مدل‌های مختلف ریاضی با داده‌های آزمایشگاهی، ضرایب این مدل‌ها استخراج شده و در ادامه، ضریب نفوذ موثر و انرژی فعال‌سازی به دست می‌آید و نمونه‌ها از نظر ارزیابی حسنی با هم مقایسه می‌گردند.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. آماده‌سازی نمونه‌های "به"

در این تحقیق از میوه "به" رقم شرفخانه با قطر حدود ۷ cm و رطوبت بر پایه مرطوب حدود ۸۱-۷۹٪ و ساکاروز شرکت مرک، کشور آلمان با خلوص ۸۲/۵٪ استفاده شد. میوه "به" از بازار محلی خریداری و قبل از انجام آزمایش در دمای 4°C نگهداری گردید. ابتدا میوه "به" با آب شست‌وشو و توسط چاقوی تیز پوست‌گیری شد. سپس، نمونه‌ها در محلول اسید سیتریک ۵ gr/L به مدت ۱۰ min به منظور کاهش واکنش‌های قهوه‌ای-شدن قرار گرفت. در نهایت، آن‌ها شسته و به استوانه‌هایی با ضخامت ۲ mm و قطر ۴ cm توسط قالب استوانه‌ای برش داده شد. رطوبت اولیه نمونه توسط آون‌گذاری در دمای 105°C تا رسیدن به وزن ثابت، اندازه‌گیری شد [۲۰].

۲.۲. آبیگری اسمزی

محلول اسمزی مورد استفاده در این تحقیق محلول ساکاروز با غلظت‌های ۴۰، ۴۵ و ۵۰٪ (w/w) بود که از انحلال مقدار مورد نیاز ساکاروز با آب مقطر در دمای محیط تهیه گردید. نسبت نمونه به محلول اسمزی ۱:۱۰ در نظر گرفته شد. آبیگری اسمزی در دمای ثابت 30°C (دمای اتاق، کنترل با ترمومتر) به مدت ۳ h انجام شد. سپس، نمونه‌ها با آب مقطر شسته و رطوبت سطحی آن‌ها با کاغذ صافی گرفته شد [۲۱].

۳.۲. خشک‌کردن با هوای گرم

نمونه‌های آبیگری‌شده به روش اسمزی و همچنین نمونه شاهد درون پلیت‌های شیشه‌ای و درون آون جابه‌جایی هوای گرم مدل FN500، شرکت nuve، ساخت کشور ترکیه در سه دمای ۴۰، ۵۰ و 60°C قرار گرفت. نمونه‌های به در فواصل زمانی ثابت از آون خارج و با استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت $0.1 \pm$ gr مدل TE612، شرکت Sartorius، ساخت کشور آلمان تا رسیدن به

R^2 از ۰ تا ۱ تغییر می‌کند. R^2 بیان می‌کند که بین مقادیر پاسخ‌های مشاهده شده و مقادیر پاسخ‌های پیش‌بینی شده توسط مدل چه مقدار انحراف وجود دارد. هرچه مقدار R^2 به ۱ نزدیک باشد، مدل قوی‌تر خواهد بود و می‌تواند پاسخ را بهتر پیش‌بینی کند. بعد از سنجش میزان تطابق داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده با داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل، مدلی با بالاترین ضریب تبیین، کم‌ترین ریشه میانگین مربع خطا و حداقل مجموع مربعات خطا به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای توصیف سینتیک انتقال جرم طی خشک‌کردن برش‌های به انتخاب گردید.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{expi}} - MR_{\text{prei}})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{expi}} - MR_{\text{ave}})^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{pred } i} - MR_{\text{expi}})^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^N (MR_{\text{prei}} - MR_{\text{expi}})^2 \quad (5)$$

در این معادلات N تعداد داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد.

کلی مورد ارزیابی و امتیازدهی قرار گرفتند. در این آزمون امتیاز ۵ برای ویژگی بسیار خوب و امتیاز ۱ برای ویژگی بسیار بد در نظر گرفته شد. میانگین امتیازهای داده‌شده به هر واحد برای هر یک از ویژگی‌های حسی محاسبه گردید. سپس، با استفاده از روش مقایسه چند دامنه‌ای دانکن میزان معنی‌دار بودن اختلاف بین نمونه‌ها به‌دست آمد [۲۳].

۷.۲. مدل‌سازی ریاضی

مدل‌سازی ریاضی برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی رفتار خشک‌کردن لازم و ضروری است. هم‌چنین، مدل‌سازی یک ابزار مهم در طراحی خشک‌کن است که سهم به‌سزایی در فهم بهتر مکانیسم خشک‌کردن دارد. مدل‌های مورد استفاده در جدول (۱) آورده شده است. MR نسبت رطوبت، t زمان (s)، k، a، b، g، h، c، K_1 ، K_2 ، a_0 ضرایب مربوط به هر مدل و n توان مربوط به هر مدل می‌باشد. ارزیابی مدل و صحت برازش داده‌های تجربی با مدل توسط ضریب تبیین R^2 ، ریشه میانگین مربعات خطا RMSE و مجموع مربعات خطا SSE به‌ترتیب مطابق با رابطه‌های (۳-۵) انجام گردید. مقدار

جدول (۱) مدل‌های ریاضی جهت مدل‌سازی فرایند خشک‌کردن.

Table 1 Mathematical models for modeling of drying process.

شماره	نام مدل Model name	رابطه مدل Model equation	مرجع
1	نیوتن Newton	$MR = \exp(-kt)$	[24]
2	پیچ Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[25]
3	دو جمله‌ای نمایی Two-term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	[26]
4	ونگ و سینگ Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	[27]
5	هندرسون و پابیس اصلاح‌شده Modified Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	[28]
6	نفوذ فیک ساده‌شده Simplified Fick's Diffusion	$MR = a \exp[-c(t/L^2)]$	[29]
7	معادله دوم پیچ اصلاح‌شده Modified Page equation-II	$MR = \exp[-k(t/L^2)^n]$	[30]
8	آغباشلو Aghbashlo	$MR = \exp(-k_1 t / (1 + k_2 t))$	[31]
9	لجیستیک Logistic	$MR = a_0 / (1 + a \exp(kt))$	[32]

گازها (Kj/mol) و T دمای مطلق (K) می‌باشد. این معادله را می‌توان طبق رابطه (۱۰) خطی و انرژی فعال‌سازی را با رسم $\ln D_{\text{eff}}$ برحسب $1/T$ محاسبه کرد [۳۴]:

$$\ln D_{\text{eff}} = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (10)$$

۸.۲. روش تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۰ انجام شد. متغیرهای تحت بررسی، دمای آون در سه سطح ۴۰، ۵۰ و ۶۰ °C و غلظت محلول اسمزی در سه سطح ۴۰، ۴۵ و ۵۰٪ (w/w) در نظر گرفته شد. جهت مقایسه آماری از تجزیه واریانس یک طرفه ANOVA در قالب آزمون دانکن استفاده شد. تمامی نتایج به صورت میانگین \pm انحراف معیار ارائه گردید و مقایسه‌های آماری در سطح اطمینان ۹۵٪ انجام پذیرفت. جهت مدل‌سازی ریاضی از نرم‌افزار Matlab 17 استفاده شد.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. اثر پیش تیمار اسمزی و دمای هوای گرم بر مدت زمان خشک‌کردن

ماندگاری محصولات فصلی نسبتاً کوتاه است. افزایش پایداری انباری و مدت زمان نگهداری این مواد خام با ارزش، مهم است. برای افزایش کیفیت و ماندگاری این محصولات، فراوری و استفاده از پیش تیمار و روش‌های مناسب خشک‌کردن ضروری است. در این تحقیق، ۱۲ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت. مطابق با جدول (۲)، نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ بدون انجام فرایند آبیگری اسمزی در آون با دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ °C خشک شدند. سپس، آزمایش‌های بعدی با در نظر گرفتن فرایند آبیگری اسمزی در غلظت‌های ۴۰، ۴۵ و ۵۰٪ محلول اسمزی و به دنبال آن خشک‌کردن نمونه‌های "به" در آون تحت دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ °C انجام شد. مدت زمان ماند نمونه‌ها در محلول اسمزی با دمای ۳۰ °C، ۱ h بوده است. رطوبت نهایی نمونه‌ها در شرایط مختلف حدود ۴ تا ۶٪ بود. نتایج به‌دست آمده برای مدت زمان خشک‌کردن نمونه‌ها توسط هوای گرم در جدول (۲) نشان داده شده است.

باتوجه به نتایج، نمونه‌های به در دماهای بالاتر، به علت حذف سریع رطوبت، زمان خشک‌کردن کوتاه‌تری داشتند. هم‌چنین،

۱.۷.۲. محاسبه ضریب نفوذ مؤثر

در فرایند خشک‌کردن، نفوذ نشان‌دهنده جریان رطوبت به خارج از ماده می‌باشد. در طی نرخ کاهشی خشک‌کردن، انتقال رطوبت در غذا عمدتاً توسط نفوذ مولکولی است. نفوذ رطوبت توسط چروک‌خوردگی یا انقباض، سفت‌شدن در مدت خشک‌کردن، میزان رطوبت و دمای ماده تحت تاثیر قرار می‌گیرد. مدت نرخ کاهشی مواد بیولوژیکی به بهترین نحو توسط قانون دوم نفوذپذیری فیک توصیف می‌شود [۳۳]. فرض‌های توزیع یکنواخت رطوبت اولیه از میان نمونه، مقاومت خارجی قابل چشم‌پوشی در مقابل حرکت و رهاسازی یکسان رطوبت از بالا و پایین برش‌های به در نظر گرفته می‌شود. معادله فیک در معادله (۶) نشان داده شده است:

$$\frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2} \right] \quad (6)$$

که در آن M_t رطوبت بر مبنای خشک در هر لحظه از زمان، M_o رطوبت اولیه بر مبنای خشک، M_e محتوی رطوبتی تعادلی، t زمان (s)، D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر (m^2/s)، L ضخامت برش (m) و n عدد صحیح مثبت می‌باشد.

برای زمان‌های طولانی خشک‌کردن $n=1$ ، روابط طبق معادله‌های (۷) و (۸) ساده می‌شوند:

$$\frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp \left(-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2} \right) \quad (7)$$

$$\ln(MR) = \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \right) - \left(\frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4L^2} \right) t \quad (8)$$

ضریب نفوذ مؤثر D_{eff} را می‌توان با رسم شیب $\ln(MR)$ برحسب زمان محاسبه کرد.

۲.۷.۲. انرژی فعال‌سازی (اکتیواسیون)

در این مطالعه، از معادله آرنیوس در رابطه (۹) برای نشان دادن رابطه بین ضریب نفوذ مؤثر و دما و برای محاسبه انرژی فعال‌سازی برای خشک‌کردن استفاده شده است [۳۴]:

$$D_{\text{eff}} = A \exp \left(\frac{-E_a}{RT} \right) \quad (9)$$

که در آن E_a فعال‌سازی (Kj/mol)، A عدد ثابت، R ثابت عمومی

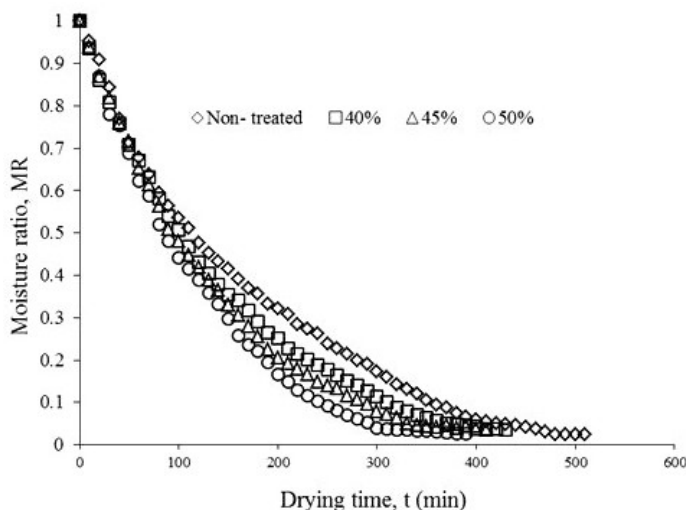
ساکاروز و دماهای خشک کردن را بر نسبت رطوبت و زمان خشک کردن نشان می‌دهد. در مراحل اولیه خشک کردن، حذف رطوبت از ماده سریع بوده و نسبت رطوبت به‌طور پیوسته با زمان خشک کردن کاهش می‌یابد. کاهش پیوسته در نسبت رطوبت نشان داد که نفوذ، کنترل کننده انتقال جرم داخلی است. نتایج مشابه توسط ایبیتوار و همکاران [۳۵] در مورد آلو و دوپماز و همکاران [۱] در مورد به گزارش شده است.

برای نمونه‌های پیش‌تیمارشده، زمان خشک کردن در همه دماهای خشک کردن با هوا با افزایش غلظت ساکاروز کاهش یافت. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار زمان خشک کردن برای نمونه ۴ با غلظت ۴۰٪ محلول اسمزی و دمای 40°C خشک کردن برابر با 432.000 ± 2.828 min و برای نمونه ۱۲ با غلظت ۵۰٪ محلول اسمزی و دمای 60°C خشک کردن برابر با 286.000 ± 1.413 min به‌دست آمد. شکل‌های ۱ تا ۳ اثر غلظت‌های مختلف محلول

جدول (۲) اثر پیش‌تیمار اسمزی و دمای خشک کردن بر مدت زمان خشک کردن.
Table 2 Effect of osmotic pretreatment and drying temperature on drying time.

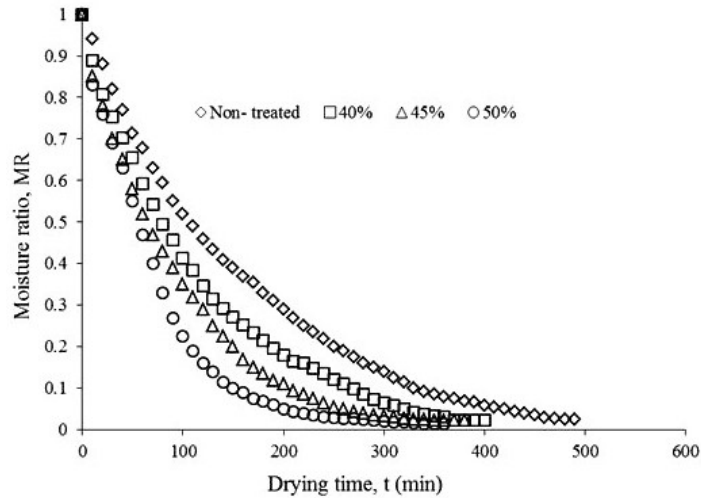
نمونه‌ها Samples	دما Temperature ($^{\circ}\text{C}$)		غلظت ساکاروز Sucrose concentration (%)	زمان خشک کردن Drying time (min)
	محلول اسمزی Osmotic solution	آون Oven		
1	-	40	-	509.671 ± 1.527^a
2	-	50	-	491.000 ± 1.732^b
3	-	60	-	459.500 ± 0.707^c
4	30	40	40	432.000 ± 2.828^d
5	30	40	45	411.000 ± 1.414^e
6	30	40	50	386.667 ± 1.527^e
7	30	50	40	399.500 ± 0.707^f
8	30	50	45	381.000 ± 1.414^g
9	30	50	50	364.672 ± 0.577^h
10	30	60	40	375.500 ± 0.710^g
11	30	60	45	349.330 ± 2.082^i
12	30	60	50	286.000 ± 1.413^j

*اعداد (انحراف معیار \pm میانگین) دارای حروف مشترک در هر ستون از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند ($p < 0.05$)



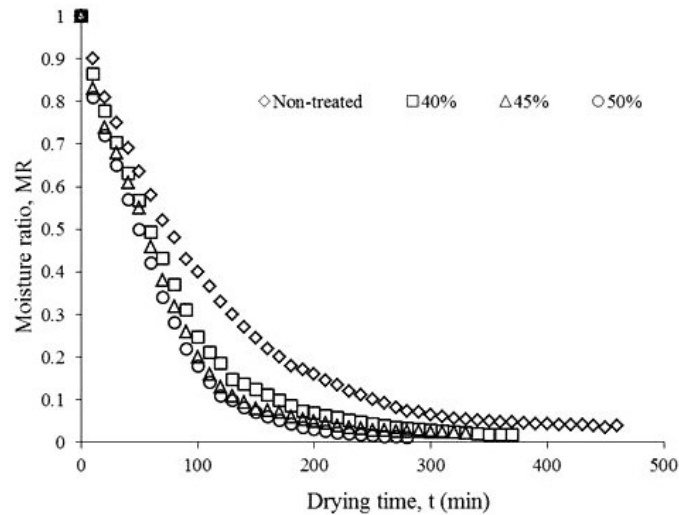
شکل (۱) اثر پیش‌تیمار اسمزی بر زمان خشک کردن در فرایند خشک کردن با هوای گرم در 40°C

Fig. 1 Effect of osmotic pretreatment on drying time at hot-air drying process at 40°C



شکل (۲) اثر پیش‌تیمار اسمزی بر زمان خشک‌کردن در فرایند خشک‌کردن با هوای گرم در 50°C

Fig. 2 Effect of osmotic pretreatment on drying time at hot-air drying process at 50°C



شکل (۳) اثر پیش‌تیمار اسمزی بر زمان خشک‌کردن در فرایند خشک‌کردن با هوای گرم در 60°C

Fig. 3 Effect of osmotic pretreatment on drying time at hot-air drying process at 60°C

L به ترتیب از $41/724$ به $40/132$ و $39/858$ به طور معنی‌داری کاهش یافته‌است ($p < 0.05$). در تمامی غلظت‌ها با افزایش دمای خشک‌کردن با هوا شاخص L^* کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش غلظت ساکاروز در محلول اسمزی در همه دماها شاخص L^* افزایش می‌یابد، به طوری که غلظت 50% در دمای 40°C و غلظت 40% در دمای 60°C به ترتیب از بیش‌ترین و کم‌ترین میزان شاخص L^* برخوردار می‌باشد ($p < 0.05$). آبیگری اسمزی با نفوذ قندها به داخل بافت محصول و حذف اکسیژن محلول از انجام واکنش‌های قهوه‌ای شدن آنزیمی و در نتیجه

۳.۲. نتایج آزمون رنگ‌سنجی

۳.۲.۱. آزمون شاخص L^*

رنگ ماده غذایی یکی از عوامل موثر در پذیرش محصول توسط مصرف‌کننده است. بنابراین، بهبود رنگ محصولات خشک شده از اهمیت زیادی در فرایند خشک‌کردن برخوردار است. جدول (۳) میانگین شاخص L^* را برای نمونه‌های تیمار نشده و تیمار شده با غلظت‌های 40% ، 45% و 50% محلول اسمزی در فرایند خشک‌کردن در دماهای 40°C ، 50°C و 60°C نشان می‌دهد. در نمونه‌های تیمار نشده با افزایش دما از 40°C به 50°C و 60°C ، شاخص رنگی

تخریب رنگ میوه‌ها جلوگیری به عمل می‌آورد.

۳،۲،۳. آزمون شاخص b*

میانگین شاخص b* برای نمونه‌های تیمار نشده و تیمار شده با غلظت‌های ۴۰، ۴۵ و ۵۰٪ محلول اسمزی در فرایند خشک‌کردن با هوا در دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰°C در جدول (۵) نشان داده شده است. نتایج تجزیه و تحلیل آماری شاخص b* نشان می‌دهد که در تمامی غلظت‌ها با افزایش دما شاخص b* کاهش یافته و غلظت‌های مختلف دارای اختلاف آماری معنی‌داری با یکدیگر هستند، به طوری که در نمونه‌های تیمار شده در تمامی غلظت‌ها، دماهای ۴۰ و ۶۰°C به ترتیب از بیش‌ترین و کم‌ترین میزان شاخص b* برخوردار می‌باشد ($p < 0/05$). هم‌چنین، در نمونه‌های تیمار شده، غلظت ۵۰٪ در دمای ۴۰°C و غلظت ۴۰٪ در دمای ۶۰°C به ترتیب از بیش‌ترین و کم‌ترین میزان شاخص b* برخوردار می‌باشد ($p < 0/05$).

۳،۲،۲. آزمون شاخص a*

جدول (۴) میانگین شاخص a* برای نمونه‌های تیمار نشده و تیمار شده در محلول اسمزی با غلظت‌های ۴۰، ۴۵ و ۵۰٪ و فرایند خشک‌کردن با هوا در دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰°C را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که برای نمونه‌های تیمار نشده، شاخص a* با افزایش دما افزایش می‌یابد. برای نمونه‌های تیمار شده نیز در تمامی غلظت‌ها با افزایش دما شاخص a* افزایش یافته و از اختلاف آماری معنی‌داری برخوردار می‌باشند. دمای ۵۰°C در غلظت ۴۵٪ و دمای ۴۰°C در غلظت ۴۰٪ به ترتیب از بیش‌ترین و کم‌ترین میزان شاخص a* برخوردار می‌باشد ($p < 0/05$). نتیجه مشابه توسط خواجوی و همکاران در مورد خشک‌کردن دانه هندوانه به دست آمد [۳۶].

جدول (۳) میانگین شاخص L* برای نمونه‌های به.

Table 3 Average of L* index for quince samples.

غلظت محلول اسمزی Concentration of osmotic solution (%)				دمای خشک‌کردن Drying Temperature (°C)
50	45	40	0	
48.262±0.100 ^a	46.905±0.100 ^a	45.681±0.100 ^a	41.724±0.100 ^a	40
47.501±0.100 ^b	45.289±0.152 ^b	44.121±0.100 ^b	40.132±0.100 ^b	50
47.072±0.050 ^c	45.073±0.081 ^c	43.866±0.100 ^c	39.858±0.050 ^c	60

*اعداد (انحراف معیار ± میانگین) دارای حروف مشترک در هر ستون از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند ($p < 0/05$)

جدول (۴) میانگین شاخص a* برای نمونه‌های به.

Table 4 Average of a* index for quince samples.

غلظت محلول اسمزی Concentration of osmotic solution (%)				دمای خشک‌کردن Drying Temperature (°C)
50	45	40	0	
-5.36±0.010 ^a	-4.201±0.100 ^a	-5.525±0.100 ^a	-5.916±0.100 ^a	40
-4.576±0.100 ^b	-3.215±0.100 ^b	-4.602±0.100 ^b	-5.279±0.100 ^b	50
-3.915±0.100 ^c	-5.514±0.100 ^c	-3.402±0.100 ^c	-3.345±0.100 ^c	60

*اعداد (انحراف معیار ± میانگین) دارای حروف مشترک در هر ستون از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند ($p < 0/05$)

جدول (۵) میانگین شاخص b* برای نمونه‌های به.

Table 5 Average of b* index for quince samples.

غلظت محلول اسمزی Concentration of osmotic solution (%)				دمای خشک‌کردن Drying Temperature (°C)
50	45	40	0	
49.821±0.100 ^a	48.901±0.010 ^a	48.517±0.100 ^a	47.345±0.200 ^a	40
49.020±0.010 ^b	47.945±0.010 ^b	46.452±0.010 ^b	46.984±0.100 ^b	50
47.821±0.001 ^c	46.114±0.001 ^c	45.012±0.100 ^c	44.878±0.100 ^c	60

*اعداد (انحراف معیار ± میانگین) دارای حروف مشترک در هر ستون از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند ($p < 0/05$)

سینگ، هندرسون و پاییس اصلاح شده، نفوذ فیک ساده شده، معادله دوم پیچ اصلاح شده، آغبا شلو و لجستیک در جدول (۷) مشاهده می شود. مدل با حداکثر ضریب تبیین، حداقل ریشه میانگین مربع خطا و حداقل مجموع مربعات خطا به عنوان مناسب ترین مدل برای تو صیف سینتیک فرایند خشک کردن "به" انتخاب شد. با توجه به نتایج، مقادیر R^2 برای همه مدل ها غیر از مدل های معادله دوم پیچ اصلاح شده و لجستیک بیش تر از ۰/۹ بود که نشان دهنده تطابق خوبی بین مدل ریاضی و نتایج آزمایشگاهی می باشد. مدل پیچ با مقادیر ضرایب همبستگی با دامنه ۰/۹۹۴ تا ۰/۹۹۹۲، بهترین تطابق را با نتایج آزمایشگاهی نشان داد. همچنین در مدل پیچ، تیمار شماره ۹ با غلظت محلول اسمزی برابر با ۵۰ و دمای خشک کردن برابر با ۵۰ °C دارای بالاترین مقدار R^2 برابر با ۰/۹۹۹۲، حداقل ریشه میانگین مربع خطا برابر با ۰/۰۰۸۱۰۵ و حداقل مجموع مربعات خطا برابر با ۰/۰۰۲۴۹۶ بود. در مطالعه یوسفی و همکاران، بهترین مدل برای خشک کردن خربزه درختی پایا با ماکروویو همراه با هوای داغ و پیش تیمار اسمزی، مدل پیچ در دمای ۵۰ و ۴۰ °C و مدل دو جمله ای در دمای ۶۰ °C به دست آمد [۳۹]. پیسالکار و همکاران، از میان ۵ مدل بررسی شده مدل پیچ را به عنوان بهترین مدل برای خشک کردن آلوئه ورا با هوای داغ همراه با پیش تیمار اسمزی معرفی کردند [۴۰]. در مطالعه میثمی اصل و رفیعی، از میان چهارده مدل ریاضی برای برازش با داده های تجربی، مدل میدلی به عنوان بهترین مدل برای خشک کردن سیب انتخاب شد [۴۱]. رواسکار و همکاران، پنج مدل ریاضی را برای پیش تیمار اسمزی برش های پیاز و سپس خشک کردن آن ها با هوا بررسی نمودند. با توجه به نتایج، مدل پیچ توانست به خوبی رفتار خشک کردن قطعه های پیاز را توصیف کند. ضریب همبستگی برای این مدل دامنه ای از ۰/۹۸۲۵ تا ۰/۹۹۳۹ داشت [۲۱].

۴.۲.۳. آزمون شاخص دلتا E

جدول (۶) میانگین شاخص دلتا E را برای نمونه های تیمار نشده و تیمار شده در غلظت های ۴۰، ۴۵ و ۵۰٪ محلول اسمزی و فرایند خشک کردن با هوا در دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ °C نشان می دهد. نتایج آنالیز واریانس نشان می دهد که در تمامی غلظت ها با افزایش دما شاخص دلتا E افزایش یافته و از اختلاف آماری معنی داری برخوردار می باشند. مقدار P. Value در هر یک از غلظت ها کوچک تر از ۰/۰۵ بوده و بین هر یک از گروه ها تفاوت آماری معنی داری وجود دارد. همچنین، با افزایش غلظت، دلتا E کاهش می یابد. به طوری که در نمونه های تیمار نشده دماهای ۴۰ و ۶۰ °C و در نمونه های تیمار شده غلظت ۵۰٪ در دمای ۴۰ °C و غلظت ۴۰٪ در دمای ۶۰ °C به ترتیب از کم ترین و بیش ترین میزان دلتا E برخوردار می باشند ($p < 0/05$). استفاده از پیش تیمار آبیگری اسمزی منجر به کاهش واکنش قهوه ای شدن و حفظ بهتر رنگ شده است. نتایج مشابه توسط کروکیدا و همکاران در مورد برش های سیب و موز [۳۷] و زونزیان و همکاران در مورد کدو حلوائی [۳۸] به دست آمد.

۳.۳. مدل سازی ریاضی

نسبت رطوبت به دست آمده از آزمایش های مختلف مربوط به ۱۲ نمونه با مدل های ریاضی مختلف خشک کردن مطابقت داده شد. میزان برازش داده های آزمایشگاهی با مقادیر پیش بینی شده توسط مدل ها با محاسبه معیارهای ارزیابی سنجیده شد. معیارهای ارزیابی ضریب تبیین، ریشه میانگین مربع خطا و مجموع مربعات خطا می باشد. اطلاعات به دست آمده از برازش داده های تجربی با مدل های نیوتن، پیچ، دو جمله ای نمایی، ونگو

جدول (۶) میانگین شاخص دلتا E برای نمونه های به.

Table 6 Average of ΔE index for quince samples.

غلظت محلول اسمزی				دمای خشک کردن Drying Temperature (°C)
Concentration of osmotic solution (%)				
50	45	40	0	
4.791±0.010 ^c	6.467±0.100 ^c	7.065±0.001 ^c	9.141±0.001 ^c	40
5.993±0.001 ^b	8.374±0.001 ^b	9.882±0.010 ^b	10.973±0.001 ^b	50
7.414±0.001 ^a	9.405±0.100 ^a	11.358±0.010 ^a	12.178±0.001 ^a	60

*اعداد (انحراف معیار ± میانگین) دارای حروف مشترک در هر ستون از لحاظ آماری تفاوت معنی داری با یکدیگر ندارند ($p < 0/05$)

جدول (۷) نتایج برازش داده‌های تجربی با مدل‌های ریاضی برای نمونه‌های به .

Table 7 Results of the fitted experimental data with mathematical models for quince samples

نام مدل Model name	پارامتر Parameter	نمونه ها (Samples)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
نیوتن	K	0.01567	0.006502	0.009204	0.007193	0.01287	0.007894	0.008752	0.01088	0.006384	0.01295	0.01396	0.01347
	R ²	0.9893	0.9979	0.9983	0.9982	0.9965	0.9974	0.9983	0.9980	0.9984	0.9954	0.0039	0.9932
	RMSE	0.03219	0.01266	0.01081	0.01141	0.01621	0.01134	0.01096	0.0120	0.01321	0.01798	0.02116	0.02389
	SSE	0.0172	0.00787	0.00538	0.0056	0.01245	0.0065	0.004803	0.005475	0.008934	0.01293	0.01612	0.01563
پیچ	K	0.006683	0.005571	0.008991	0.006586	0.009114	0.004333	0.9372	0.01143	0.004575	0.009312	0.09106	0.01065
	n	0.9786	1.03	0.9876	1.017	1.095	1.136	0.9862	0.9897	1.1	1.073	1.107	1.095
	R ²	0.996	0.9982	0.9985	0.9983	0.9958	0.9981	0.9984	0.998	0.9992	0.9966	0.0040	0.9953
	RMSE	0.01671	0.01185	0.01086	0.0112	0.01782	0.0128	0.01087	0.01206	0.008105	0.01577	0.0229	0.01952
	SSE	0.01061	0.006744	0.004601	0.005266	0.0111	0.006223	0.004607	0.005384	0.002496	0.009694	0.01678	0.01029
دوجمله‌ای نمایی	A	1.023	1.674	0.0923	1.342	1.654	1.09	1.015	0.02783	0.04520	1.544	0.25678	0.0989
	K	0.009323	0.009845	0.0112	0.007867	0.0124	0.007655	0.008754	0.3802	0.1291	0.01572	0.0121	0.0103
	R ²	0.9978	0.9723	0.9845	0.9985	0.9933	0.9984	0.0083	0.9986	0.9986	0.9967	0.9943	0.9935
	RMSE	0.01645	0.0324	0.02543	0.01056	0.01432	0.0123	0.0111	0.1028	0.01101	0.01545	0.01289	0.00947
	SSE	0.008546	0.004763	0.005696	0.004353	0.009465	0.005693	0.004803	0.003912	0.004333	0.009314	0.008543	0.004589
ونگ و سیق	a	-0.004832	-0.4753	-0.006083	-0.005334	-0.00569	-0.006136	-0.006188	-0.007199	-0.008393	-0.007634	-0.009043	-0.01024
	b	6.611×10 ⁻⁶	5.89×10 ⁻⁶	9.203×10 ⁻⁶	7.496×10 ⁻⁶	8.539×10 ⁻⁶	9.637×10 ⁻⁶	9.829×10 ⁻⁶	1.283×10 ⁻⁶	1.675×10 ⁻⁵	1.383×10 ⁻⁵	1.959×10 ⁻⁵	2.534×10 ⁻⁵
	R ²	0.9828	0.9825	0.9474	0.9829	0.9936	0.9932	0.9679	0.9571	0.9289	0.9127	0.94	0.9584
	RMSE	0.03469	0.03654	0.06042	0.03595	0.02303	0.02421	0.04879	0.05606	0.07312	0.07945	0.06811	0.058339
	SSE	0.04573	0.06409	0.1643	0.05427	0.02016	0.02227	0.09284	0.1163	0.1871	0.2462	0.1485	0.09204
هندرسون و پاپیس	a	1.678	0.1185	-6.501	-0.01923	1.5297	0.1067	-0.01185	0.1134	-0.00983	1.031	0.9857	-0.01869
	b	0.1435	1.006	6.521	0.9924	0.0956	1.0567	0.9778	0.9123	0.9843	0.1309	0.1539	0.08979
	c	-0.1834	-0.1245	0.9799	0.02679	-0.1747	-0.1279	0.03406	-0.1385	0.04834	-0.1623	-0.2534	0.02345
	g	1.23	0.006542	0.004768	0.007123	0.9549	0.006789	0.008555	0.006435	0.00943	0.8423	0.9944	0.006785
	h	1.548	0.9387	0.009017	0.7301	1.2891	1.0190	0.7296	0.9578	0.7248	0.969	0.9940	0.0209
	k	0.01219	0.7772	2.421	0.874	0.01365	0.5627	0.8739	0.7756	0.8721	0.01335	0.0209	2.342
	R ²	0.9930	0.9979	0.9985	0.9983	0.9932	0.9977	0.9988	0.9976	0.9989	0.9959	0.9944	0.9983
	RMSE	0.0213	0.01326	0.01062	0.01175	0.02435	0.01389	0.1016	0.01456	0.1145	0.01812	0.0209	0.01134
	SSE	0.02981	0.007738	0.004624	0.004829	0.02341	0.00796	0.003615	0.006785	0.003210	0.01149	0.01485	0.004587

آغلاشو	k_1	0.006027	0.01143	0.01269	0.00689	0.008957	0.007227	0.008716	0.01074	0.006742	0.009657	0.00780	0.01424
	k_2	3.999×10^{-5}	0.0009283	-0.0008904	-0.000218	-0.0009540	-0.0009085	-2.514×10^{-5}	-9.581×10^{-5}	-0.0006195	0.000312	0.0007295	-0.001289
	R^2	0.9958	0.9926	0.9955	0.9987	0.9933	0.999	0.9983	0.998	0.9995	0.9989	0.9912	0.9961
	RMSE	0.01707	0.0243	0.01838	0.009883	0.00215	0.009427	0.01108	0.01204	0.006432	0.008863	0.006784	0.008551
	SSE	0.01108	0.0198	0.01183	0.004103	0.0178	0.003377	0.00479	0.005364	0.001572	0.003535	0.00542	0.01424
پیچ اصلاح شده	k	0.001189	0.00983	0.00317	6.262	3.594×10^{-5}	0.00217	0.0142	1.004	0.07105	2.285	9.262	0.0262
	L	0.04451	6.898	0.005408	29.1	0.0001464	0.000871	-0.008896	5.22	7.307	13	23.3	-0.00985
	n	0.5957	0.678	0.456	1.017	0.4582	0.317	0.3123	0.976	1.094	1.073	1.45	0.4139
	R^2	0.9116	0.8356	0.7508	0.9983	0.794	0.794	0.69	0.9959	0.9958	0.9966	0.9983	0.79
	RMSE	0.07971	0.1236	0.1467	0.1133	0.1322	0.1756	0.1537	0.01816	0.01808	0.01597	0.1067	0.1649
SSE	0.2351	0.5683	1.151	0.005266	0.6467	1.141	0.8972	0.01352	0.01111	0.00964	0.00427	0.6972	
فیک ساده شده	a	0.993	1.036	1.087	1.006	1.033	1.04	1	0.998	1.05	1.005	1.025	1.056
	L	3.35	6.5420	3.342	1.538	5.223	8.26	1.192	6.45	1.182	1.222	3.345	2.347
	c	5.463	5.564	5.367	0.01713	0.2138	0.603	0.01244	0.450	0.01345	0.01944	0.49	0.41
	R^2	0.9959	0.9974	0.9979	0.9981	0.9973	0.9948	0.9983	0.9893	0.9983	0.9959	0.9886	0.9896
	RMSE	0.01717	0.01623	0.01342	0.01208	0.01502	0.0214	0.01128	0.0134	0.01134	0.01815	0.0139	0.0124
SSE	0.01091	0.008456	0.009235	0.005978	0.008351	0.01694	0.004838	0.00698	0.004354	0.01252	0.00967	0.009786	
لجستیک	k	0.00984	0.007206	0.01638	0.007929	0.01091	0.07552	0.008943	0.01152	0.01812	0.00903	0.01077	0.01093
	a_0	3467	5.091	3.632	4.931	1789	7.399	12.6	6.339	2.332	3859	3406	2405
	a	4587	4.17	5.383	4.053	2794	6.598	11.9	5.558	1.393	3932	4776	3720
	R^2	0.8976	0.9984	0.9985	0.9989	0.8572	0.9981	0.9987	0.9987	0.9967	0.9984	0.8966	0.8473
	RMSE	0.1236	0.01102	0.01756	0.0009382	0.1584	0.01721	0.009908	0.01001	0.01601	0.01065	0.09087	0.1139
SSE	0.156	0.005704	0.009109	0.003609	0.386	0.005605	0.003731	0.003605	0.008714	0.004989	0.256	0.3376	

۱.۳.۳. ضریب نفوذ مؤثر

۲.۳.۳. انرژی فعال‌سازی (اکتیواسیون)

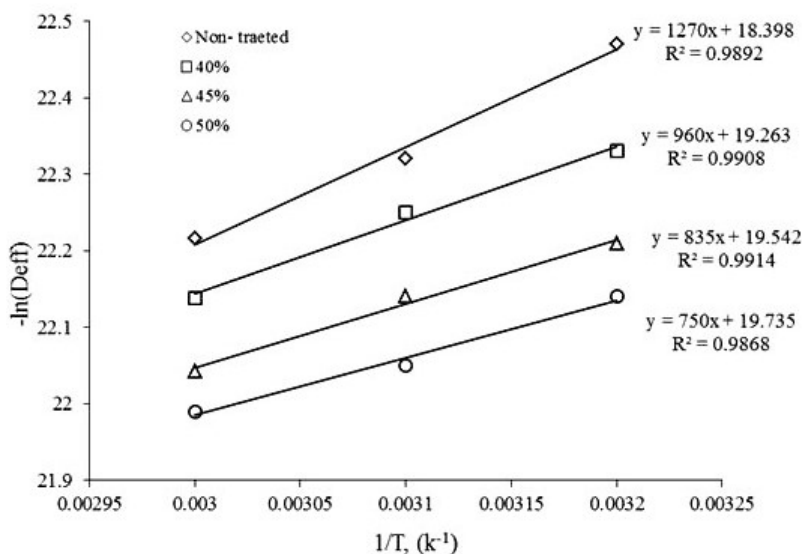
ارتباط بین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و دما برای غلظت‌های مختلف در شکل (۴) نشان داده شده است. این شکل از طریق رگرسیون خطی به‌دست آمده است. ضریب تبیین برای ارتباط بین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و دما برای نمونه‌ها، بین 0.9868 تا 0.9914 حاصل شد.

مقادیر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در جدول (۸) نشان داده شده است. ضریب نفوذ رطوبت مواد غذایی با مقدار رطوبت همانند دما تحت تاثیر قرار می‌گیرد. در مقادیر پایین تر رطوبت، نفوذپذیری کم‌تر از زمانی است که رطوبت بالا باشد. با توجه به نتایج، نفوذپذیری با افزایش دمای هوای خشک‌کردن در نمونه‌های تیمار شده و تیمار نشده افزایش می‌یابد. همچنین، نفوذپذیری مؤثر رطوبت برای نمونه‌های تیمار شده بیش‌تر از نمونه‌های تیمار نشده است و از $1.743 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $2.817 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ می‌باشد. در حقیقت، پیش‌تیمار آبدگیری اسمزی، انتقال جرم داخلی را در طول فرایند خشک‌کردن تحت تاثیر قرار داده است. افزایش نفوذپذیری مؤثر رطوبت با فرایند پیش‌تیمار آبدگیری اسمزی می‌تواند به علت نرم‌شدن ساختار سلولی سطح و شست‌وشوی بعضی از ترکیبات حل شده لایه‌های سلولی خارجی نمونه‌های "به" در طول فرایند خیساندن در محلول اسمزی باشد. در مطالعه پیسالکار و همکاران در مورد خشک‌کردن آلون‌ه‌ورا، ضریب نفوذ رطوبت بدون پیش‌تیمار اسمزی و با تیمار اسمزی در دمای 50 تا 80 °C به ترتیب بین $2.69 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ الی $4.59 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ و بین $2.93 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ الی $7.99 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ به‌دست آمد [۴۰]. رواسکار و همکاران، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت را برای خشک‌کردن با هوای داغ پیاز پیش‌تیمار شده با محلول اسمزی $1.743 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $2.817 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ گزارش نمودند [۲۱].

جدول (۸) ضریب نفوذ مؤثر برای نمونه‌های "به" در شرایط مختلف خشک‌کردن.

Table 8 Effective diffusivity coefficients for quince samples at various drying conditions.

نمونه‌ها Samples	ضریب نفوذ مؤثر Effective diffusivity coefficient (m^2/s)	R^2
1	1.743×10^{-10}	0.9783
2	2.025×10^{-10}	0.9856
3	2.247×10^{-10}	0.9845
4	2.005×10^{-10}	0.9956
5	2.261×10^{-10}	0.9923
6	2.425×10^{-10}	0.9965
7	2.170×10^{-10}	0.9896
8	2.424×10^{-10}	0.9931
9	2.653×10^{-10}	0.9929
10	2.430×10^{-10}	0.9960
11	2.627×10^{-10}	0.9848
12	2.817×10^{-10}	0.9962



شکل (۴) ارتباط بین ضریب نفوذ مؤثر و دما برای نمونه‌ها

Fig. 4 Relationship between the effective diffusivity coefficient and temperature for samples

۲.۴.۳. آزمون امتیاز چروکیدگی

جدول (۱۱) نتایج به دست آمده از آزمون امتیاز چروکیدگی نمونه های "به" را برای نمونه های تیمار نشده و تیمار شده با غلظت های ۴۰، ۴۵ و ۵۰٪ محلول اسمزی و فرایند خشک کردن با هوا در دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ °C نشان می دهد. با توجه به نتایج آنالیز واریانس، در تمامی غلظت ها با افزایش دمای مورد مطالعه به تدریج از امتیاز چروکیدگی کاسته می شود، به طوری که دماهای ۴۰ و ۶۰ °C به ترتیب از بیشترین و کمترین امتیاز چروکیدگی برخوردار می باشند ($p < 0.05$). هم چنین، در هر دما با افزایش غلظت، امتیاز چروکیدگی افزایش می یابد به طوری که غلظت ۵۰٪ محلول اسمزی در دمای ۴۰ °C خشک کردن از بیشترین امتیاز چروکیدگی برخوردار است ($p < 0.05$).

۳.۴.۳. آزمون امتیاز پذیرش کلی

جدول (۱۲) نتایج به دست آمده از آزمون امتیاز پذیرش کلی نمونه های "به" را نشان می دهد. نتایج آنالیز واریانس داده های حاصل از ارزیابی حسی پذیرش کلی نشان می دهد که در تمامی غلظت ها با افزایش دمای مورد مطالعه، امتیاز پذیرش کلی با داشتن اختلاف آماری معنی دار کاهش می یابد. هم چنین، در هر دما با افزایش غلظت، امتیاز پذیرش کلی افزایش می یابد. غلظت ۵۰٪ محلول اسمزی در دمای ۴۰ °C خشک کردن دارای بیشترین امتیاز پذیرش کلی می باشد ($p < 0.05$). نتایج به دست

جدول (۹) اثر غلظت های مختلف ساکاروز در محلول اسمزی را بر انرژی فعال سازی نشان می دهد. نتایج به دست آمده نشان داد غلظت محلول اسمزی با انرژی فعال سازی رطوبت رابطه عکس دارد. این امر به این دلیل است که در غلظت های کم تر به انرژی بیش تری برای خروج رطوبت نیاز می باشد.

جدول (۹) انرژی فعال سازی برای خشک کردن نمونه ها.

Table 9 Activation energy for samples drying.

غلظت Concentration (%)	انرژی فعال سازی Ea Activation energy Ea (Kj/mol)
-	10.558±0.502 ^a
40	7.981±0.412 ^b
45	6.942±0.673 ^c
50	6.235±0.239 ^d

*اعداد (انحراف معیار ± میانگین) دارای حروف مشترک در هر ستون از لحاظ آماری تفاوت معنی داری با یکدیگر ندارند ($p < 0.05$)

۴.۴.۳. ارزیابی حسی

۱.۴.۳. آزمون امتیاز رنگ

جدول (۱۰) نتایج آزمون امتیاز رنگ نمونه های "به" را در فرایند خشک کردن با هوا در دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ °C نشان می دهد. نتایج آنالیز واریانس نشان می دهد که غلظت ۵۰٪ محلول اسمزی و دمای ۴۰ °C خشک کردن بیشترین امتیاز رنگ را دارا می باشد ($p < 0.05$). مقدار P. Value برای تمامی نمونه ها تفاوت آماری معنی داری را نشان می دهد.

جدول (۱۰) میانگین امتیاز رنگ نمونه های به در ارزیابی حسی.

Table 10 Average of colour score for quince samples at sensory evaluation.

غلظت محلول اسمزی (%) Concentration of osmotic solution (%)				دمای خشک کردن (°C) Drying Temperature (°C)
50	45	40	0	
4.400±0.050 ^a	4.150±0.050 ^a	4.000±0.300 ^a	3.500±0.300 ^a	40
4.000±0.200 ^b	3.900±0.030 ^b	3.700±0.010 ^b	3.200±0.400 ^b	50
3.600±0.050 ^c	3.400±0.050 ^c	3.300±0.010 ^c	2.900±0.100 ^c	60

*اعداد (انحراف معیار ± میانگین) دارای حروف مشترک در هر ستون از لحاظ آماری تفاوت معنی داری با یکدیگر ندارند ($p < 0.05$)

جدول (۱۱) میانگین امتیاز چروکیدگی نمونه های به در ارزیابی حسی.

Table 11 Average of shrinkage score for quince samples at sensory evaluation.

غلظت محلول اسمزی (%) Concentration of osmotic solution (%)				دمای خشک کردن (°C) Drying Temperature (°C)
50	45	40	0	
4.500±0.010 ^a	4.300±0.100 ^a	4.200±0.100 ^a	3.600±0.010 ^a	40
4.400±0.010 ^{ab}	4.196±0.015 ^b	4.000±0.010 ^b	3.200±0.010 ^b	50
3.766±0.594 ^b	4.000±0.010 ^c	3.700±0.010 ^c	3.000±0.100 ^c	60

*اعداد (انحراف معیار ± میانگین) دارای حروف مشترک در هر ستون از لحاظ آماری تفاوت معنی داری با یکدیگر ندارند ($p < 0.05$)

جدول (۱۲) میانگین امتیاز پذیرش کلی نمونه‌های به در ارزیابی حسی.

Table 12 Average of overall acceptability score for quince samples at sensory evaluation.

غلظت محلول اسمزی				دمای خشک کردن
Concentration of osmotic solution (%)				Drying Temperature (°C)
50	45	40	0	
4.600±0.010 ^a	4.300±0.050 ^a	4.300±0.010 ^a	3.400±0.010 ^a	40
4.200±0.060 ^b	4.300±0.010 ^b	4.100±0.020 ^b	3.196±0.015 ^b	50
4.100±0.100 ^c	4.000±0.010 ^c	3.700±0.010 ^c	3.100±0.010 ^c	60

*اعداد (انحراف معیار ± میانگین) دارای حروف مشترک در هر ستون از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند (p<0/05)

انتخاب نمود. در این تحقیق، مدل‌سازی خشک کردن نمونه‌های میوه به پیش تیمار شده با فرایند اسمزی توسط مدل‌های ریاضی انجام و ضرایب نفوذ و انرژی فعال‌سازی به دست آمد. غلظت محلول اسمزی ۴۰، ۴۵ و ۵۰٪ و دمای فرایند خشک کردن ۴۰، ۵۰ و ۶۰ °C متغیرهای فرایند بودند. مدل پیچ با مقادیر ضرایب تبیین با دامنه ۰/۹۹۴ تا ۰/۹۹۹۲، بهترین تطابق را با نتایج آزمایشگاهی نشان داد و انرژی فعال‌سازی در غلظت‌های ۴۰، ۴۵ و ۵۰٪ ساکاروز به ترتیب ۷/۹۸۱، ۶/۹۴۲ و ۶/۲۳۵ KJ/mol به دست آمد. هم‌چنین، غلظت ۵۰٪ محلول اسمزی و دمای ۶۰ °C منجر به زمان خشک کردن ۲۸۵min و ضریب نفوذ ۱۰^{-۱۰}×۲/۸۱۷ m²/s شد. آزمون ارزیابی حسی نشان داد استفاده از آبگیری اسمزی به عنوان پیش تیمار باعث بهبود ویژگی‌های حسی نمونه‌های خشک شده به توسط جریان هوا گردید. به طور کلی، نتایج به دست آمده و مقایسه آن‌ها با تحقیقات گذشته نشان داد خشک کردن محصولات کشاورزی و مواد غذایی به روش و دامنه دمایی خشک کردن، نوع ماده غذایی و روش پیش تیمار اعمال شده روی آن‌ها وابسته است.

آمده از ارزیابی حسی نمونه‌های به با مطالعه علاءالدینی و امام جمعه مطابقت دارد [۴۲]. آن‌ها فرایند آبگیری اسمزی کیوی را به عنوان پیش تیمار فرایند خشک کردن توسط جریان هوا، مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که استفاده از آبگیری اسمزی به عنوان پیش تیمار باعث بهبود ویژگی‌های بافتی و حسی نمونه‌های خشک شده توسط جریان هوا می‌گردد.

۴. نتیجه‌گیری

هدف اصلی فرایند خشک کردن، افزایش ماندگاری محصول می‌باشد. فرایند خشک کردن باید به صورتی انجام گیرد که علاوه بر حفظ مواد غذایی در مقابل فساد، به شاخص‌های کیفی فرآورده از جمله رنگ، طعم، عطر و بافت کم‌ترین صدمه ممکن وارد گردد. استفاده از پیش فرایند آبگیری اسمزی با توجه به ایجاد تغییرات کم در عطر، طعم و افزایش کیفیت محصول نهایی می‌تواند در فرایند خشک کردن محصول با هوا موثر واقع شود. هم‌چنین، با بررسی سینتیک و مدل‌سازی ریاضی، می‌توان مناسب‌ترین روش خشک کردن و بهترین شرایط عملیاتی برای تولید محصول را

منابع

- [3] Koc, B., Eren, I., Ertekin, F. K. (2008). Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. *J. Food Eng.*, 85 (3), 340–349.
- [4] Akbarian, M., Ghanbarzadeh, B., Sowti, M., Dehghannya, J. (2014). Effects of pectin- CMC-based coating and osmotic dehydration pretreatments on microstructure and texture of the hot-air dried quince slices. *J. Food Process. Pres.*, 39, 260–269.
- [5] Patill, M. M., Kalse, S. B., Jain, S, K. (2012). Osmo-convective drying of onion slices. *Res. J. Rec. Sci.*, 1 (1), 51-59.
- [1] Doymaz, I., Demir, H., Yildirim, A. (2015). Drying of quince slices: Effect of pretreatments on drying and rehydration characteristics. *Chem. Eng. Commun.*, 202 (10), 1271–1279.
- [۲] اکبریان، م؛ قنبرزاده، ب؛ دهقان‌نیا، ج؛ صوتی خیابانی، م. (۱۳۹۶) بهینه‌سازی محلول اسمزی و بررسی اثرات آبگیری اسمزی بر ویژگی‌های بافتی و رنگی میوه (به) فرآیند شده با پوشش‌های پلی‌ساکاریدی فعال، پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی/ایران، جلد ۹، شماره ۲، ص ۱۶۵–۱۷۴.

- [۱۸] متولی، ع.؛ هدایتی، ف. (۱۳۹۶). بررسی تغییرات ضریب آهنگ ثابت خشک‌شدن در مدل‌های شبیه‌سازی با استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف، فصلنامه فناوری‌های نوین غذایی، سال چهارم، شماره ۱۵، ص ۳۹-۵۱.
- [۱۹] نایبندی آتشی، س.؛ مرتضوی، س. ع.؛ طباطبایی یزدی، ف.؛ محبی، م.؛ وریدی، م. ج. (۱۳۹۶). بهینه‌سازی فرایند آبیگری اسمزی و مدل‌سازی سینتیک انتقال جرم طی خشک‌کردن با هوای داغ گوشت شترمرغ، فصلنامه فناوری‌های نوین غذایی، سال چهارم، شماره ۱۵، ص ۶۵-۷۶.
- [20] AOAC. (1990). Official method of analysis, 15th ed. Association of official analytical chemists, Arlington, VA.
- [21] Revaskar, V.A., Pisalkar, P.S., Pathare, P.B., Sharma, G.P. (2014). Dehydration kinetics of onion slices in osmotic and air convective drying process. *Res. Agr. Eng.* 60 (3), 92-99.
- [22] Dadali, G., Demirhan, E. (2007). Color change kinetics of spinach undergoing microwave drying. *Drying Technol.*, (25), 1713-1723.
- [23] Saklar, S., Ugan, S., Katnas, S. (1999). Instrumental crispness and crunchiness of roasted hazelnuts and correlations with sensory assessment. *J. Food Sci.*, 64 (6), 1015-1019.
- [24] Bruce, D. M. (1985). Exposed-layer barley drying, three models fitted to new data up to 150°C. *J. Agri. Eng.*, (4), 337-347.
- [25] Page, G.E. (1949). Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. M.S. thesis, Department of Mechanical Engineering, Prude University, Prude, USA.
- [26] Henderson, S. M. (1974). Progress in developing the thin layer drying equation. *T. Am. Soc. Agr. Eng.*, 17 (6), 1167-1172.
- [27] Wang, C. Y., Singh, R. P. (1978). A single layer drying equation for rough rice. ASAE paper No: 78-3001, ASAE, St. Joseph, MI.
- [28] Karathanos, V. T. (1999). Correlation of water content of dried fruits by drying kinetics. *J. Food Eng.*, 39, 337-344.
- [29] Diamante, L. M., Munro, P. A. (1991). Mathematical modeling of hot air drying of sweet potato slices. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 26 (1), 99-109.
- [30] Diamante, L. M., Munro, P. A. (1993). Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Sol. Energy*, 51, 271-276.
- [31] Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., Khani, S., Ghasemi, M. (2009). Mathematical modeling of carrot thin-layer drying using new model. *Int. Agrophys.*, 23, 313-317.
- [32] Alibas, I. (2014). Microwave, Air and Combined Microwave-Air Drying of Grape Leaves (*Vitis vinifera* [۶] زیرجانی، ل.؛ توکلی‌پور، ح. (۱۳۸۹). مطالعه امکان تولید برگه موز توسط روش خشک‌کردن ترکیبی هوای داغ و مایکروویو، نشریه پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران، جلد ۶، شماره ۱، ص ۵۸-۶۷.
- [7] Fernandes, F., Rodrigues, S., Gaspareto, O., Oliviera, E. (2006). Optimization of osmotic dehydration of banana followed by air-drying. *J. Food Eng.*, 77, 188-193.
- [8] Monnerat, S. M., Pizzi, T. R. M., Mauro, M. A., Menegalli, F. C. (2010). Osmotic dehydration of apples in sugar/salt solutions: Concentration profiles and effective diffusion coefficients. *J. Food Eng.*, 100 (4), 604-612.
- [9] Dehghannya, J., Emam-jomeh, Z., Sotudeh-Gharebagh, R., Ngadi, M. (2006). Osmotic Dehydration of Apple Slices with Carboxy-Methyl Cellulose Coating. *Dry. Technol.*, 24, 45-50.
- [10] Sahin, U., Ozturk, H. K. (2016). Effects of pulsed vacuum osmotic dehydration (PVOD) on drying kinetics of figs (*Ficus carica* L), *Innov. Food Sci. Emerg.*, 36, 104-111.
- [11] da Silva, W. P., e Silva, C. M.D.P.S., Gama, F. J.A., Gomes, J. P. (2014). Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas. *J. Saudi Soc. Agr. Sci.*, 13 (1), 67-74.
- [12] Yang, X. H., Deng, Li. Z., Mujumdar, A. S., Xiao, H. W., Zhang, Q. Kan, Z. (2018). Evolution and modeling of colour changes of red pepper (*Capsicum annum* L.) during hot air drying, *J. Food Eng.*, 231, 101-108.
- [13] Rayaguru, K., Routray, W. (2012). Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of stone apple slices. *Int. Food Res. J.*, 19 (4), 1503-1510.
- [14] Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R. B., Nawi, N., Abdan, K. (2016). Evaluation of a suitable thin layer model for drying of pumpkin under forced air convection. *Int. Food Res. J.*, 23 (3), 1173-1181.
- [۱۵] مشکانی، س. م.، پورفلاح، ز.، توکلی‌پور، ح.، محمدی، م.؛ نهاردانی، م. (۱۳۹۱). بررسی سینتیک خشک‌کردن لایه‌ای نازک کدوی سبز با فرایند جابه‌جایی هوای داغ. مجله علوم و فناوری غذایی، سال چهارم، شماره سوم، ص ۷۵-۸۲.
- [16] Tzempelikos, D. A., Vouros, A. P., Bardakas, A. V., Filios, A. E., Margaris, D. P. (2014). Case studies on the effect of the air drying conditions on the convective drying of quinces. *Case Studies in Thermal Eng.*, 3, 79-85.
- [۱۷] محمدی، م.؛ پورفلاح، ز.؛ نهاردانی، م.؛ مشکانی، س. م. (۱۳۹۳). بهینه‌سازی ضریب نفوذ موثر رطوبت و مدل‌سازی ریاضی سینتیک خشک‌کردن برش‌های میوه به (*Cydonia oblonga*)، علوم غذایی و تغذیه، سال ۱۲، شماره ۱، ص ۴۹-۵۸.



L.) and the Determination of Some Quality Parameters. *Int. J. Food Eng.*, 10 (1), 69-88.

[33] Crank, J. (1975). The mathematics of diffusion. 2nd ed. Oxford University Press, Oxford, 104-106.

[34] Li, Z., Kobayashi, N. (2005). Determination of moisture diffusivity by thermo-gravimetric analysis under non-isothermal condition. *Drying Technol.*, 23 (6), 1331-1342.

[35] Ibitwar, B. B., Kaur, B., Arora, S., Pathare, P. B. (2008). Osmo-Convective Dehydration of Plum. *Int. J. Food Eng.*, 4 (8).

[۳۶] خواجوی، ر؛ شمس‌آبادی، ح؛ اصغری، ع. (۱۳۹۶) ارزیابی برخی از ویژگی‌های کیفی دانه هندوانه طی فرایند خشک‌کردن. *فصلنامه فناوری‌های نوین غذایی*، دوره ۵، شماره ۲، ص ۲۱۸-۲۰۳.

[37] Krokida, M., Karathanos, V., Maroulis, Z. (2000). Effect of osmotic dehydration on color and sorption characteristics of apple and banana. *Dry. Technol.*, 18, 937-950.

[38] Zenoozian, M. S., Feng, H., Razavi, S., Shahidi, F., Pourreza, H. (2008). Image analysis and dynamic modeling of thin-layer drying of osmotically dehydrated pumpkin. *J. Food Process. Pres.*, 32 (1), 88-102.

[39] Yousefi, A., Niakousari, M., Moradi, M. (2013). Microwave assisted hot air drying of papaya (Carica papaya L.) pretreated in osmotic solution, *Afr. J. Agr. Res.*, 8 (25), 3229-3235.

[40] Pisalkar, P. S., Jain, N. K., Pathare, P. B., Murumkar, R. P., Revaskar, V.A. (2014). Osmotic dehydration of aloe vera cubes and selection of suitable drying model. *Int. Food Res. J.*, 21 (1), 373-378.

[41] Meisami-asl, E., Rafiee, S. (2009). Mathematical Modeling of Kinetics of Thin-layer Drying of Apple. *Agricultural Engineering International: the CIGR E J.* Manuscript 1185.

[۴۲] امام‌جمعه، ز؛ علاء‌الدینی، ب. (۱۳۸۴) بهبود شاخص کیفی کیوی خشک‌شده و فرمولاسیون آن با استفاده از پیش‌فرایند اسمز، *مجله علوم کشاورزی/ایران*، جلد ۳۶، شماره ۶، ص ۱۴۲۷-۱۴۲۱.