

## مطالعه سینتیک خشک شدن و چروکیدگی ورقه‌های نازک سیب‌زمینی در خشک‌کن جریان هوای موازی

امید رضا روستاپور<sup>۱\*</sup>، ندا مفتون آزاد<sup>۱</sup>، احمد خالواحمدی<sup>۲</sup>

۱- استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی فارس، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی  
 ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اقلید، عضو باشگاه پژوهش‌گران جوان  
 (تاریخ دریافت: ۹۰/۹/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۱/۲/۸)

### چکیده

سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum*) یکی از محصولات مهم کشاورزی است که به دلیل ذخیره سازی نامطلوب در انبارها و فرآوری نامناسب دچار ضایعات فراوانی می‌شود. خشک کردن این محصول باعث افزایش عمر مفید آن می‌شود. در این تحقیق، ورقه‌های نازک سیب‌زمینی در یک خشک‌کن جریان هوای موازی خشک شده و سینتیک خشک شدن و چروکیدگی آن در طی فرایند مورد مطالعه قرار گرفته است. آزمایش‌ها در سه سطح ضخامت ۳، ۶ و ۹ میلی‌متر در دماهای ۵۰ و ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس انجام شد. جریان هوای خشک‌کن در همه آزمون‌ها مقدار ثابت ۰/۰۱۲ متر مکعب بر ثانیه در نظر گرفته شد و شدت خشک شدن، نرخ کاهش رطوبت، تغییرات مساحت و گردی مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس نتایج، بیشترین شدت خشک شدن مربوط به دمای ۷۰ درجه سلسیوس و ضخامت ۳ میلی‌متر بوده است. چروکیدگی ورقه‌های سیب‌زمینی نیز با بررسی تغییرات مساحت و کرویت در طی فرایند خشک شدن مطالعه شد. نتایج نشان داد که با افزایش دما و کاهش ضخامت محصول، چروکیدگی افزایش یافته است.

**کلید واژه‌گان:** سینتیک خشک شدن، سیب‌زمینی، شدت خشک شدن، نسبت مساحت، کرویت

\* مسئول مکاتبات: roustapour@farsagres.ir

## ۱- مقدمه

مواد غذایی از زمان برداشت در معرض فساد و بروز ضایعات متنوع قرار می‌گیرند که با توجه به نوع ماده غذایی میزان ضایع شدن آن‌ها متغیر بوده و گاهی ممکن است در مدت چند ساعت، مواد غذایی به کلی غیر قابل مصرف شود. خشک کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌ها برای حفظ محصولات کشاورزی و غذایی بوده است. یکی از اساسی‌ترین اهداف خشک کردن محصولات کشاورزی، انتقال آب در بافت جامد به طرف سطح رویه محصول تا یک سطح (تراز) خاص بوده بطوری که ضایعات میکروبی و زوال فعل و انفعالات شیمیایی به طور اساسی به حداقل مقدار ممکن برسد. سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum*) یک گیاه یک ساله است. سرمنشاء اصلی سیب‌زمینی آمریکای جنوبی و کشورهای پرو، بولیوی، شیلی و اکوادور می‌باشد. تاریخچه کاشت این محصول بر اساس مطالعات باستان شناسی به حدود ۷۰۰۰ سال قبل از میلاد مسیح می‌رسد و در جیره غذایی مورد استفاده قرار می‌گرفته است. تاریخچه کشت سیب‌زمینی در ایران به دوران سلطنت فتحعلی شاه قاجار بر می‌گردد. به‌طور کلی فرآورده‌های سیب‌زمینی خشک شده به دو دسته سیب‌زمینی خشک شده از سیب‌زمینی پخته و خام تقسیم می‌شوند. گروه اول شامل پوره سیب‌زمینی خشک شده است که به صورت گرانول، پرک و آگلومره در می‌آید و گروه دوم شامل برش سیب‌زمینی خشک شده، حبه سیب‌زمینی خشک شده و گریت سیب‌زمینی خشک شده می‌باشد.

سیب‌زمینی به علت دارا بودن آب زیاد، از فساد پذیری بالایی برخوردار است. سلیمی و همکاران اثر رقم سیب‌زمینی (آگریا و ساتینا و کنیک از ارقام عمده استان گلستان) در دو نوع خشک‌کن آون هوای گرم و ماکروویو آون و توانایی باز جذب فرآورده‌های سیب‌زمینی را مورد بررسی قرار دادند [۱]. امیر یوسفی و محبی [۲] فرایند خشک شدن اسمزی سیب‌زمینی را با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد بررسی و تحلیل قرار دادند و یداللهی‌نیا و جهانگیری [۳] چروکیدگی سیب‌زمینی رقم سانتانا را مطالعه کردند و سرعت هوا را در دو جهت موازی و عمود بر ورقه‌ی سیب‌زمینی بررسی کردند. چیه‌شیه و همکاران [۴] تغییرات آنتی‌اکسیدان و فیزیولوژی سیب‌زمینی شیرین زرد و نارنجی را در خشک‌کن هوای داغ بررسی کردند.

امروزه علم پردازش تصویر در علوم مختلف به علت دارا بودن خصوصیات منحصر به فرد خود از ویژگی بالایی برخوردار است. تحقیقات زیادی در زمینه کاربرد این علم در مهندسی صنایع غذایی انجام شده است. در مطالعه‌ای اندازه‌گیری ضریب کرویت<sup>۱</sup> گردو با استفاده از پردازش تصویر و مقایسه این روش با روش مکانیکی و استفاده از کولیس انجام پذیرفت. در این تحقیق مرکز ثقل هر گردو به طور جداگانه مشخص شده و فواصل پیکسل‌های روی لبه هر گردو با مرکز ثقل آن محاسبه گردید، مقادیر بیشینه و کمینه قطرهای هر گردو مشخص و ضریب کرویت (تغییر شکل) محاسبه شد. بین این دو روش همبستگی بالایی وجود داشت [۵].

یک تحقیق در زمینه شناسایی واریته‌های گیاهان با استفاده از آنالیز تصاویر حاصل از برگ گیاهان انجام پذیرفت. جهت شناسایی واریته‌های گیاهان، برگ‌هایی از آنها جدا شد و بصورت مجزا عکس گرفته شد. نتایج نشان داد که جداسازی با ماشین بینایی و با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر نسبت به حالتی که اطلاعات بصورت چشمی و با تکرار بدست می‌آید، سریعتر است [۶].

در مطالعات انجام شده بین دو ارزیابی حسی و پردازش تصویر در ارزیابی کیفی زرشک مشخص گردید که اختلاف بین این دو روش معنادار می‌باشد [۷]. بررسی خواص رنگی و ظاهری برگ‌های سه نمونه گردوی تجاری با استفاده از ماشین بینایی انجام شد [۸]. همچنین تحقیق دیگری در ارتباط با شناسایی گونه برنج با استفاده روش‌های پردازش تصویر و شبکه عصبی انجام پذیرفت [۹].

لیرا تاناراک و همکاران [۱۰] درمورد خشک کردن ورقه‌های سیب‌زمینی با ضخامت ۳ و ۵ میلی‌متر به دو روش استفاده از بخار فوق گرم با فشار پایین و خشک‌کن با هوای داغ مطالعه کردند و تاثیرات درجه حرارت را در بافت، رنگ و زمان خشک‌شدن بررسی کردند. بر اساس نتایج، در دمای بالاتر از ۸۰ درجه سلسیوس مدت زمان خشک شدن در روش بخار فوق گرم کمتر از خشک شدن با هوای داغ بود.

تحلیل و بررسی تاثیرات خواص فیزیکی، بیوشیمی و میکروبیولوژی مواد غذایی که به نوبه خود تعیین کننده کیفیت مواد غذایی می‌باشد، براساس جذب هم‌دمای مواد انجام می‌گردد. منحنی‌های جذب هم‌دما اطلاعاتی را در مورد

شدت تاثیر عوامل خارجی نیز به تدریج کاسته می‌شود. در این مرحله، خشک شدن صرفاً به خواص ماده مربوط می‌شود [۱۸]. در این تحقیق ارزیابی تاثیر تغییرات دما در سه سطح ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس بر روی سینتیک خشک شدن ورقه‌های نازک سیب‌زمینی در سه سطح ضخامت ۳، ۶ و ۹ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا تغییرات رطوبت در زمان و آهنگ خشک شدن بر اساس تغییرات رطوبت نمونه‌ها تعیین گردید. با توجه به اهمیت علم پردازش تصویر در علوم مختلف و گسترش این علم مهندسی کشاورزی و صنایع غذایی، از اهداف دیگر این تحقیق بررسی تغییرات چروکیدگی سیب‌زمینی با استفاده از روش پردازش تصاویر می‌باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها از محصول سیب زمینی رقم نیلوا که در استان فارس کشت می‌شود، استفاده شد. آزمایش‌ها در سه سطح دمایی ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ورودی ۱/۵ متر بر ثانیه و ضخامت‌های ۳، ۶ و ۹ میلی‌متر برای ورقه‌های نازک سیب‌زمینی انجام شد. برای تهیه ورقه‌های نازک سیب زمینی با ضخامت‌های مدنظر از دستگاه ورقه‌بر (کالباس‌بر) استفاده گردید. برای جلوگیری از تغییر رنگ محصول در طی خشک شدن از محلول اسید سیتریک ۵ درصد استفاده شد. در این حالت نمونه برش یافته در محلول فرو برده شد و به مدت ۲۰ دقیقه نگهداری گردید. نمونه‌ها به مدت ۳ الی ۵ دقیقه رها شده تا رطوبت اضافی حاصل از محلول اسید سیتریک، از محصول جدا شود. سپس نمونه‌ها با ترازوی دقیق توزین و در خشک‌کن قرار داده شدند. ورقه‌های سیب‌زمینی بر روی یک سینی توری آلومینیمی مربعی به ابعاد ۲۵ سانتی‌متر به صورت تک لایه قرار داده شد. در طی خشک شدن تغییرات وزن نمونه‌ها به وسیله ترازو هر ۱۰ دقیقه و رطوبت و دمای هوای خشک‌کن در هر آزمایش ثبت گردید. خشک شدن تا زمان ثابت شدن تقریبی وزن نمونه‌ها ادامه داشت. سپس نمونه‌ها در داخل آون با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت یک ساعت قرار داده شدند [۱۹] و پس از خشک شدن کامل، وزن خشک نمونه‌ها به دست آمد. در نهایت رطوبت ورقه‌ها طی خشک شدن توسط رابطه (۱) محاسبه شد [۱۷، ۲۰-۲۲].

$$X = \frac{(M_w - M_s)}{M_s} \quad (1)$$

مکانیزم جذب و اندرکنش اجزاء تشکیل دهنده ماده با آب آشکار می‌کند. این منحنی‌ها همچنین جهت طراحی و بهینه سازی خشک‌کن‌ها بسیار مهم می‌باشند [۱۱]. له‌سسانی و همکاران [۱۲] سینتیک خشک شدن گلابی در خشک‌کن خورشیدی را بررسی کردند. در این مطالعات درجه حرارت فاکتور اصلی بوده و مدل ریاضی خشک شدن در این راستا بدست آمده است. ساسیلیک و الیسین [۱۳] ورقه‌های نازک سیب را با ضخامت‌های ۵ و ۹ میلی‌متر در دماهای ۴۰ و ۶۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه خشک کردند. محصول ۲۴۰ تا ۴۶۰ دقیقه تحت شرایط خشک شدن قرار داشت. بر اساس تحلیل رگرسیون، مدل لگاریتمی نسبت به سایر مدل‌ها برازش بهتری نشان داد. رفیعی و مقصدلو [۱۴] شبیه‌سازی مدل سینتیک خشک کردن لایه نازک دانه گندم رقم تجن را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق از روش اجزاء محدود و با فرض اینکه در داخل دانه پخش رطوبت به صورت مایع و در مرز به صورت بخار می‌باشد، برای حل عددی معادله انتقال جرم در طی فرآیند خشک شدن استفاده شد. کویانکو و همکاران [۱۵] سینتیک خشک شدن دو نوع محصول زازالک زرد و قرمز در خشک‌کن هوای داغ در دمای ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس با سرعت هوای ۰/۲۵ متر بر ثانیه بررسی کردند. مطابق با نتایج بدست آمده میوه زازالک زرد در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۰/۲۵ متر بر ثانیه کمترین انرژی و زمان را نیاز دارد. منحنی آهنگ خشک شدن برای هر ماده در یک سری شرایط از طریق آزمایش بدست می‌آید و اغلب برای شرایط دیگر تصحیح می‌شود. این منحنی اطلاعات کاملی را در مورد تعادل‌های انرژی و جرم که در مدل سازی، شبیه‌سازی و طراحی یک خشک‌کن مورد استفاده قرار می‌گیرند را ارائه می‌دهد [۱۶ و ۱۷]. منحنی آهنگ خشک شدن معمولاً دارای دو مرحله مجزا است. در مرحله اول با آهنگ ثابت خشک شدن، سطح ماده بوسیله مایع کاملاً مرطوب است و خشک شدن در سطح آن صورت می‌گیرد. در این مرحله آهنگ خشک شدن کلاً توسط عوامل بیرونی از قبیل سرعت، دما و رطوبت هوا کنترل می‌شود بنابراین اگر این شرایط ثابت باشند آهنگ خشک شدن نیز ثابت است. مرحله بعدی، مرحله خشک شدن با آهنگ نزولی<sup>۲</sup> است. در این مرحله سطح مواد کاملاً مرطوب نیست و آهنگ انتقال رطوبت به سطح ماده کاهش می‌یابد و از

1. Constant drying rate
2. Falling drying rate

شدن محصول در طی کاهش رطوبت ماده در فرایند خشک شدن تعیین می‌گردد. آهنگ خشک شدن از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$N = \frac{-Ms}{A} \frac{dX}{dt} \quad (2)$$

اگر سطح تبخیر (A) نامشخص باشد و به عبارتی در طی تبخیر ثابت نباشد آهنگ تبخیر (N) به صورت کیلوگرم آب تبخیر شده در واحد زمان بیان می‌شود. در جامدات متخلخل رطوبت بیشتر به علت خاصیت موینگی جریان می‌یابد. در منحنی خشک شدن در ابتدای امر چون خلل و فرج پر از آب است آهنگ تبخیر ثابت می‌ماند. در نقطه بحرانی اول، که نقطه شروع یک محدوده از مراحل بعدی است رطوبت شروع به عقب نشینی به درون جامد می‌کند. در این محدوده کسری از سطح که خشک است افزایش می‌یابد. در این محدوده آب در حفره‌ها به صورت فاز پیوسته و هوا بصورت فاز گسسته است. این محدوده معمولاً خطی است. وقتی که هوا بصورت فاز پیوسته درآید و آب متفرق شود و آب باقیمانده به منافذ منفرد واگذار شود آهنگ خشک شدن بطور ناگهانی سقوط می‌کند. این نقطه را نقطه بحرانی دوم می‌گویند. منحنی آهنگ خشک شدن بعد از این نقطه طبق مدل انتشار و معمولاً مقعر می‌باشد. در طراحی خشک‌کن‌ها زمان کمیت مهم برای خشک شدن ماده تحت شرایط موجود خشک‌کن است. این کمیت اندازه دستگاه لازم را برای ظرفیت معین مشخص می‌سازد. اگر منحنی تغییرات آهنگ خشک شدن (N) بصورت تابعی از رطوبت (X) رسم شود، زمان لازم برای کاهش مقدار رطوبت از  $X_1$  به  $X_2$  از رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$t_f = - \int_{X_1}^{X_2} \frac{M_s}{A} \cdot \frac{dX}{N} \quad (3)$$

برای تعیین منحنی آهنگ خشک شدن، پس از تعیین وزن و رطوبت اولیه نمونه‌ها، سینی حاوی نمونه‌ها در داخل خشک‌کن قرار داده شده و پس از ۱۰ دقیقه خارج و توزین شدند. تغییرات رطوبت و همچنین آهنگ خشک شدن و به عبارتی تغییرات وزن در این فاصله زمانی محاسبه گردیدند. توزین نمونه‌ها تا ثابت شدن وزن آن‌ها، در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه

آزمایش‌ها با یک خشک‌کن تونلی آزمایشگاهی با جریان هوای موازی که دارای سیستم ابزار دقیق جهت کنترل و ثبت دما بود، انجام شد. کانال هوای گرم این خشک‌کن دارای ابعاد  $100 \times 70 \times 70$  سانتی‌متر بود. شکل ۱ نمای روبروی کانال هوای گرم خشک‌کن را نشان می‌دهد.



شکل ۱ نمای داخلی خشک‌کن تونلی

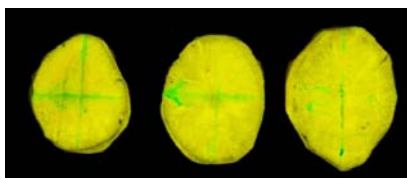
## ۲-۱- تعیین سینتیک خشک شدن ورقه‌های

### سیب‌زمینی

رطوبت اولیه محصول بر پایه‌تر توسط یک دستگاه رطوبت سنج ساخت شرکت R&D ژاپن اندازه‌گیری و ۷۵ تا ۸۰ درصد بدست آمد. برای اندازه‌گیری سرعت جریان هوا در کانال خروجی هوا از یک سرعت‌سنج سیم داغ<sup>۱</sup> ساخت شرکت Letron با حساسیت  $\pm 0.01$  متر برثانیه استفاده شد. نحوه اندازه‌گیری بدین صورت بود که حسگر در نقاط مختلف از کانال خروجی هوا از لبه کانال تا مرکز آن قرار داده شده و متوسط آن به‌عنوان سرعت جریان هوا منظور شد. برای رسیدن شرایط سیستم به حالت پایدار، کلیه آزمایش‌ها ۳۰ دقیقه بعد از روشن کردن دمنده و گرم‌کن‌های خشک‌کن شروع شد لذا سینی‌های حاوی نمونه‌ها بعد از این مدت زمان در محفظه خشک‌کن مستقر گردید.

یکی از منحنی‌های سینتیک منحنی تغییرات رطوبت نمونه در زمان می‌باشد. با توزین نمونه‌ها در طی خشک شدن و در فواصل زمانی مشخص و در نهایت تعیین رطوبت با محاسبه تغییرات وزن در بازه زمانی (۱۰ دقیقه)، می‌توان روند تغییرات رطوبت در زمان را تعیین نمود. دیگر منحنی سینتیک منحنی آهنگ (شدت) خشک شدن است. در این راستا آهنگ خشک

1. Hot wire anemometer

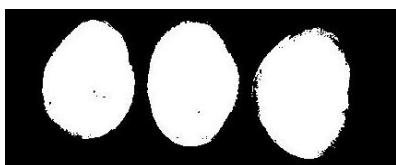


(ب)

شکل ۳ الف- تصویر ورقه‌های سیب زمینی با سایه، ب- تصویر

ورقه‌های سیب زمینی بدون سایه

بعد از فراخوانی تصویر، جهت کاربرد دستورات هموارسازی و آستانه‌گیری، تصاویر رنگی به صورت خاکستری تبدیل شدند. هر تصویر دارای زمینه و شی (ورقه‌های سیب‌زمینی) است. برای استخراج اطلاعات لازم بود که ورقه‌های سیب زمینی از زمینه جدا شوند. این کار که قطعه‌بندی تصویر نامیده می‌شود بر اساس آستانه‌گیری انجام گردید. پس از آستانه‌گیری از تصویر، مقادیر پیکسل‌های تصویر رنگی به دو مقدار صفر برای زمینه و ۲۵۵ برای ورقه‌های سیب زمینی تغییر خواهد کرد. بعد از این عملیات تصویر رنگی با مقادیر صفر و ۲۵۵ به تصویر باینری با دو مقدار صفر و یک تبدیل شدند (شکل ۴). همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود تصویر از کیفیت خوبی برخوردار نیست بنابراین برای از بین بردن حفره‌ها از ماسک (فیلتر) استفاده شد. شکل ۵ یک تصویر از ورقه‌های سیب‌زمینی بعد از اعمال فیلترینگ مکانی را نشان می‌دهد.



شکل ۴ تصویر باینری ورقه‌های سیب‌زمینی قبل از فیلترگذاری



شکل ۵ تصویر باینری ورقه‌های سیب‌زمینی بعد از فیلترگذاری

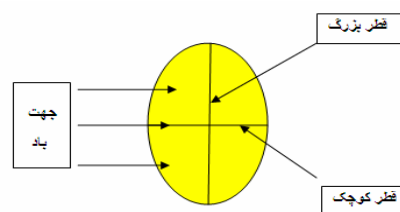
استخراج مرزهای تصویر اندازه‌گیری و تعیین خصوصیات تصویر از مراحل هستند که بعد از هموارکردن تصویر بدست آمدند. در این مرحله، تحلیل تغییر مساحت و کرویت ورقه‌های سیب‌زمینی در طی فرایند خشک شدن صورت گرفت. برای اندازه‌گیری کرویت از رابطه (۴) استفاده شد.

ادامه یافت. یادآور می‌گردد که بعد از هر مرحله توزین، نمونه‌ها سریعاً به خشک‌کن بازگشت داده شد تا خطای حاصل از جذب رطوبت به حداقل ممکن کاهش یابد.

## ۲-۳- بررسی چروکیدگی ورقه‌های سیب

### زمینی با روش پردازش تصویر

آزمایش‌های تعیین چروکیدگی ورقه‌های سیب‌زمینی، با استقرار قطر کوچکتر این ورقه‌ها در دو جهت موازی و عمود بر جهت جریان هوای گرم انجام گرفت. قطرهای بزرگ و کوچک ورقه‌ها با توجه به جهت جریان باد در شکل ۲ به صورت شماتیک نشان داده شده است.



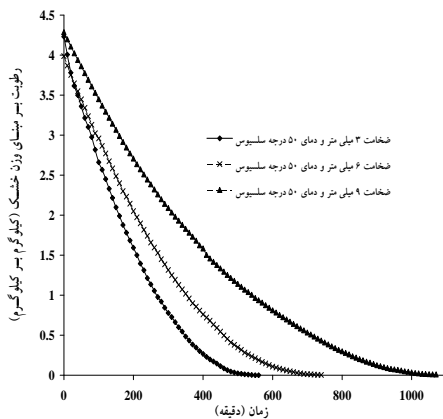
شکل ۲: امتداد قطرهای ورقه‌های سیب زمینی در جهت باد

تصویر برداری از نمونه‌ها هر ۱۰ دقیقه با در آوردن آن‌ها از خشک‌کن انجام گرفت. برای جلوگیری از ایجاد اغتشاش توسط نور محیط در حین گرفتن تصویر از ورقه‌های سیب‌زمینی، از یک جعبه مکعب مستطیلی به ابعاد ۶۰×۶۰×۵۰ سانتی‌متر با نور قابل تنظیم استفاده شد. تصویر با اندازه ۲۸۱۶×۲۱۱۲ پیکسل توسط دوربین دیجیتالی مدل Canon G7 که در بالای جعبه نصب بود، گرفته شد. بعد از این مرحله تصاویر بر روی حافظه دوربین ذخیره شده و به کامپیوتر منتقل گردید. در مرحله پیش‌پردازش برای ارتقاء و بهبود کیفیت تصویر حذف مولفه‌های غیر ضروری از تصویر، اندازه‌های ۳۵۰×۶۵۰ پیکسل از تصاویر جدا شد. تصاویر به علت دارا بودن سایه در مرزها، در هنگام پردازش باعث ایجاد خطا در محاسبات می‌شود (شکل ۳ الف) لذا برای حذف این خطا و از بین بردن سایه‌ها، تصاویر با استفاده از نرم افزار فتوشاپ پردازش شدند (شکل ۳ ب).

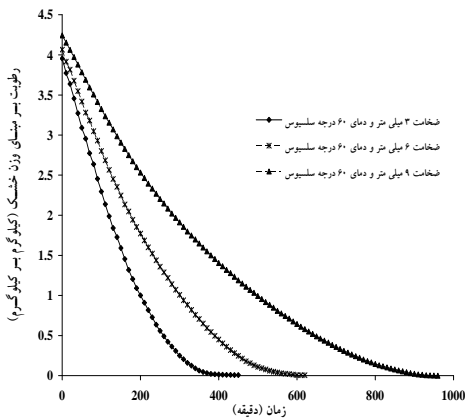


(الف)

برخوردار بود. ضریب تبیین برای هر سه مدل بیش از ۹۵ درصد بوده و حاکی از برازش قابل قبولی می‌باشند [۲۰]. شکل ۶ (الف، ب و ج) روند تغییرات رطوبت ورقه‌های سیب‌زمینی در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس برای سه ضخامت ۳، ۶ و ۹ میلی‌متر را نشان می‌دهد. ضخامت عامل مهمی در فرآیند خشک شدن می‌باشد به طوری که با افزایش ضخامت شیب منحنی‌های خشک شدن کاهش یافته و زمان لازم برای خشک شدن افزایش یافته است [۱۳].



(الف)



(ب)

شکل ۶ روند تغییرات رطوبت نمونه‌ها با ضخامت‌های مختلف،

الف- دما ۵۰ °C - ب- دما ۶۰ °C

$$R = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (۴)$$

تجزیه و تحلیل آماری با بررسی اثرات دما و ضخامت و جهت باد با استفاده از آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. داده‌های بدست آمده به کمک نرم افزار SPSS تجزیه و تحلیل و اختلاف بین میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح ۱٪ و ۵٪ مقایسه شد.

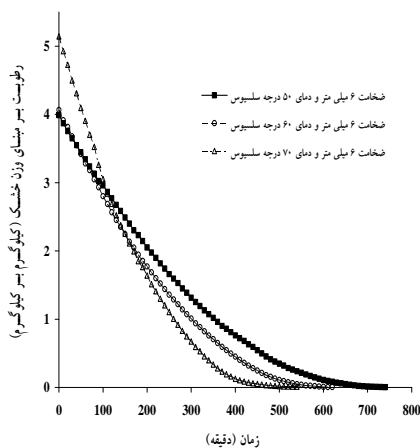
نمادها		
A	سطح تبخیر	m <sup>2</sup>
A	مساحت ورقه‌های سیب‌زمینی	cm <sup>2</sup>
A0	مساحت اولیه ورقه‌های سیب‌زمینی	cm <sup>2</sup>
M <sub>s</sub>	جرم ماده خشک	kg
M <sub>w</sub>	جرم ماده تر در هر مرحله توزین	kg
N	آهنگ خشک شدن	kg/m <sup>2</sup> .s
P	محیط ورقه‌های سیب‌زمینی	cm
R	کرویت	-
R0	کرویت اولیه	-
t (t <sub>f</sub> )	زمان خشک شدن	s
X	رطوبت برپایه خشک	Kg/kg
X0	رطوبت اولیه برپایه خشک	Kg/kg

### ۳- نتایج و بحث

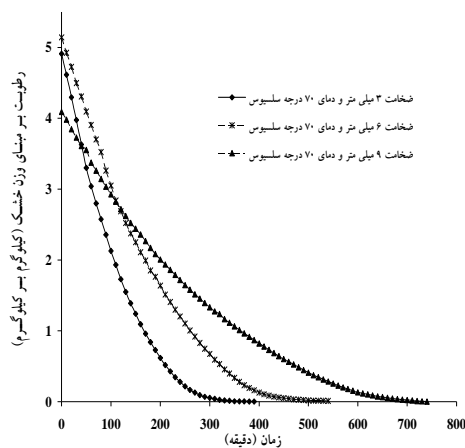
#### ۳-۱- سینتیک خشک شدن ورقه‌های نازک

##### سیب‌زمینی

با توجه به تغییرات جرم نمونه‌های سیب زمینی در طی فرآیند خشک شدن و کاهش رطوبت در آن‌ها در طی زمان و همچنین جرم ماده خشک، منحنی‌های تغییرات آهنگ خشک شدن بر اساس رطوبت ماده بر پایه خشک در سطوح مختلف دمایی بدست آمد و نمودارهای آن با استفاده از نرم افزار Excel ترسیم گردید. برای پیش‌بینی رابطه آهنگ تبخیر و میزان رطوبت، بر داده‌های حاصل از آزمایش انواع منحنی برازش شد که منحنی‌های برازش شده از بیشترین ضریب تبیین



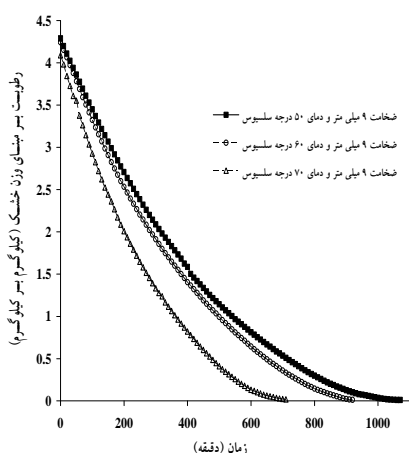
(ب)



(ج)

شکل ۶ روند تغییرات رطوبت نمونه‌ها با ضخامت‌های مختلف،

ج- دما ۷۰ °C



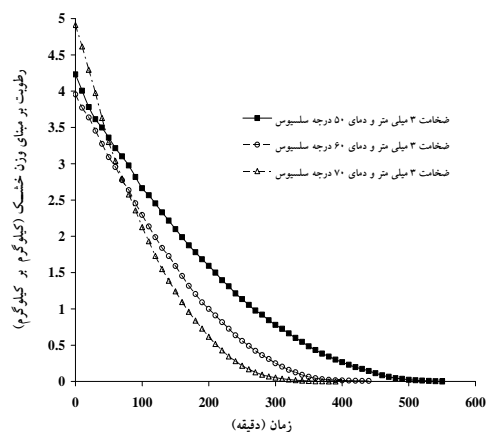
(ج)

شکل ۷ مقایسه تاثیر دما بر روند تغییرات رطوبت، ب- ضخامت

۹ mm ج- ضخامت ۶ mm

شکل ۸ (الف، ب و ج) نمودار آهنگ خشک شدن ورقه‌های

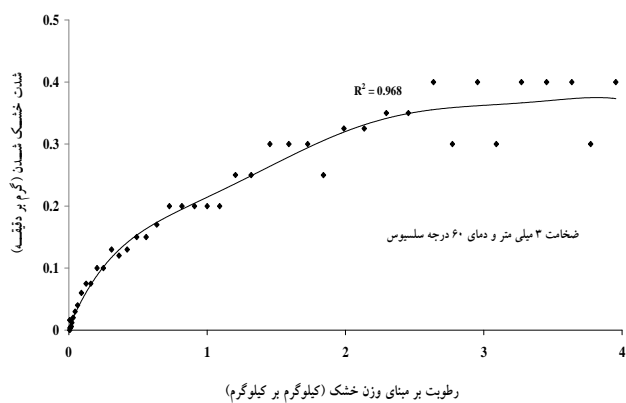
سیب‌زمینی با ضخامت ۳ میلی‌متر را به ترتیب در دماهای ۵۰، ۶۰، و ۷۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. همانطور که بیان گردید، منحنی آهنگ خشک شدن شامل؛ رسیدن دمای محصول به دمای تبخیر تعادلی، مرحله اول خشک شدن یا خشک شدن با آهنگ ثابت و مرحله دوم یا خشک شدن با آهنگ نزولی است. همانگونه که مشاهده می‌شود درصد بیشتر فرآیند مربوط به مرحله دوم خشک شدن می‌باشد [۱۰]. این نشان می‌دهد که انتشار مکانیزم غالب بوده و حرکت رطوبت در داخل نمونه را مدیریت کرده است. در دمای ۵۰ درجه سلسیوس، مرحله اول قابل اغماض بوده و فرآیند خشک شدن با آهنگ نزولی ادامه یافته است. در منحنی آهنگ خشک شدن



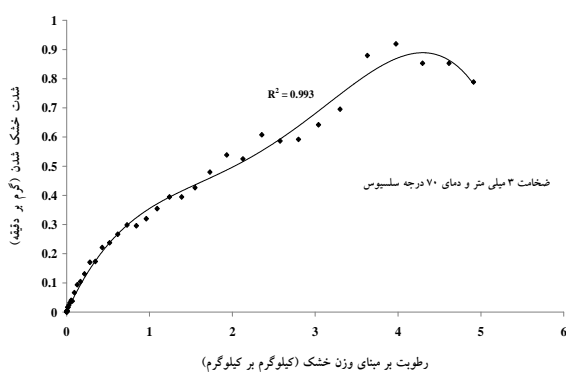
(الف)

شکل ۷ مقایسه تاثیر دما بر روند تغییرات رطوبت، الف- ضخامت

۳ mm



(ب)



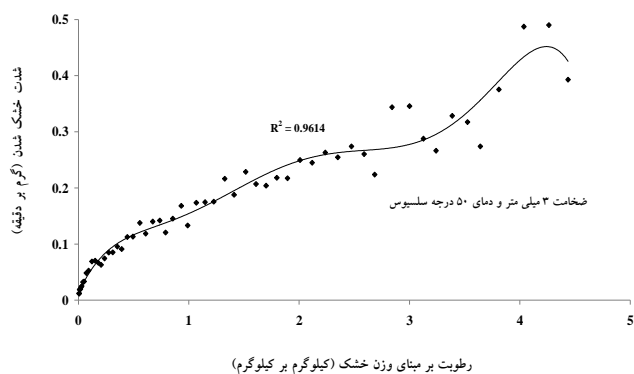
(ج)

شکل ۸ آهنگ خشک شدن ورقه‌های نازک سیب‌زمینی با ضخامت ۳

میلی‌متر - دما ۶۰ °C - دما ۷۰ °C

آهنگ خشک شدن لایه نازک سیب‌زمینی با ضخامت ۶ میلی‌متر در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس در شکل ۹ (الف، ب و ج) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که آهنگ خشک شدن با افزایش دمای هوای خشک‌کن بیشتر گردیده است. مراحل مختلف خشک شدن در این منحنی‌ها نیز مشاهده می‌شود. تبخیر با آهنگ ثابت را می‌توان در منحنی‌های سینتیک خصوصاً در دماهای ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس مشاهده نمود، بطوری‌که این مرحله در محدوده کاهش رطوبت ۲/۸ تا ۴ درصد در دمای ۶۰ درجه و ۳/۸ تا ۵ درصد در دمای ۷۰ درجه سلسیوس رخ می‌دهد. با کاهش رطوبت ماده از حد بحرانی، از فشار بخار بالای سطح ماده بتدریج کاسته می‌شود. در انتهای فرآیند خشک شدن در مرحله نزولی، آهنگ خشک شدن کاهش می‌یابد زیرا انرژی بیشتری برای جدایش رطوبت

در دمای ۶۰ درجه سلسیوس (شکل ۸-ب)، ابتدا آب سطحی تبخیر و فرآیند با آهنگ ثابت رخ داده است. این مرحله تا رطوبت تعادلی حدود ۲/۸ درصد بر پایه خشک ادامه یافته است. بعد از این مرحله آب غیرپیوندی از بافت محصول جدا شده و فرآیند با آهنگ نزولی ادامه یافته است. در این مرحله حرارت بیشتر صرف افزایش دمای محصول شده و تبخیر ناچیز بوده است. منحنی آهنگ خشک شدن در دمای ۷۰ درجه سلسیوس (شکل ۸-ج) نشانگر هر سه مرحله خشک شدن می‌باشد. در مرحله اول خشک شدن بدنه محصول و سطح آن از یک لایه مایع پوشیده شده و دارای کمتر از دمای تبخیر تعادلی است، لذا آهنگ خشک شدن در این مرحله افزایش یافته است. این مرحله کوتاه در طی کاهش رطوبت از ۴/۸ تا ۵ درصد می‌باشد. مرحله بعد خشک شدن با آهنگ ثابت است. این مرحله در طی کاهش رطوبت از ۴/۲ تا ۴/۸ درصد ادامه یافته و در عمل قابل اغماض است [۱۶ و ۲۱]. نتایج حاصل از مقایسه منحنی‌های آهنگ خشک شدن در سه سطح دما نشانگر افزایش آهنگ خشک شدن با افزایش دمای هوای خشک‌کن می‌باشد [۲۳].



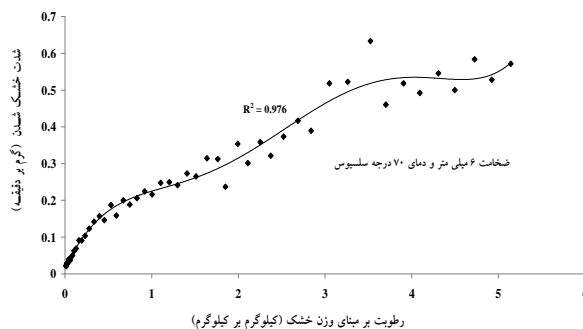
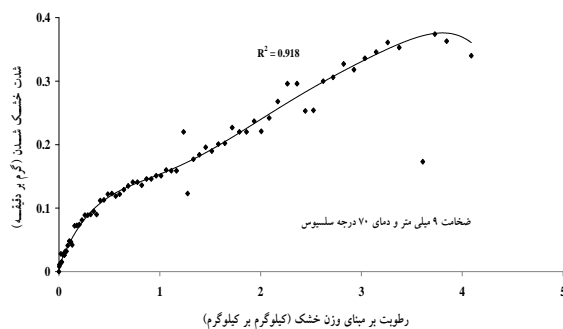
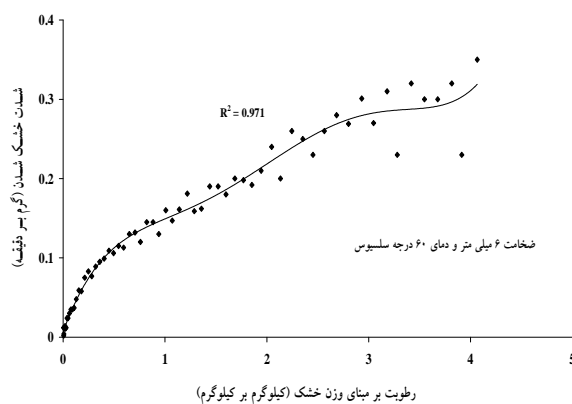
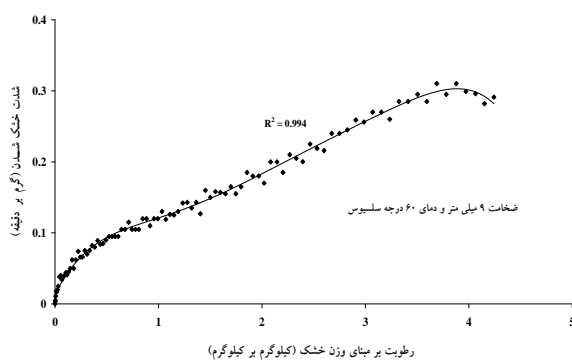
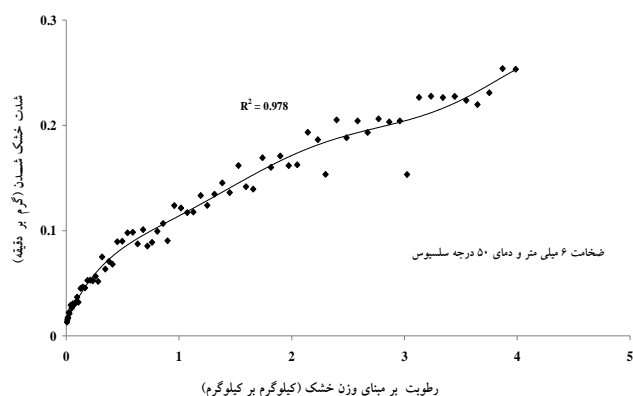
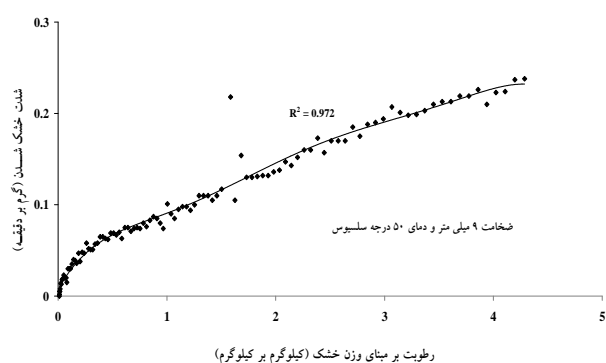
(الف)

شکل ۸ آهنگ خشک شدن ورقه‌های نازک سیب‌زمینی با ضخامت ۳

میلی‌متر، الف- دما ۵۰ °C



در ناحیه اول حرارت بیشتر صرف افزایش دمای محصول شده و تبخیر ناچیز بوده است. این مرحله در فرایند خشک شدن ورقه‌های سیب‌زمینی در دماهای ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس در کاهش رطوبت ۴ تا ۴/۳ درصد مشاهده شده و قابل اغماض می‌باشد. بعد از این مرحله تبخیر با آهنگ ثابت رخ می‌دهد، تبخیر با آهنگ ثابت را می‌توان در منحنی‌های سینتیک خصوصاً در دماهای ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس مشاهده نمود که مدت زمان آن ناچیز بوده است. مرحله سوم تبخیر از رطوبت بحرانی نزدیک ۳/۸ تا ۴ درصد در دماهای مختلف شروع گردیده است.



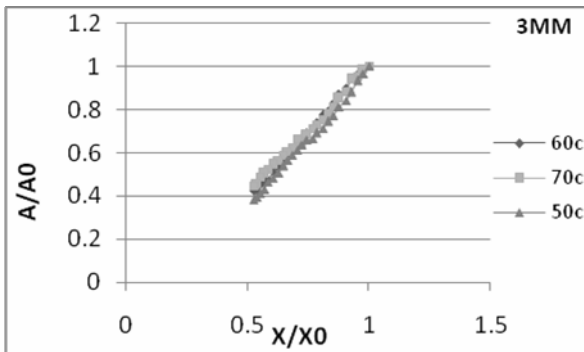
شکل ۱۰ آهنگ خشک شدن ورقه‌های نازک سیب‌زمینی با ضخامت ۹ میلی‌متر، الف- دما ۵۰ °C، ب- دما ۶۰ °C، ج- دما ۷۰ °C

شکل ۹ آهنگ خشک شدن ورقه‌های نازک سیب‌زمینی با ضخامت ۶ میلی‌متر، الف- دما ۵۰ °C، ب- دما ۶۰ °C، ج- دما ۷۰ °C

## ۲-۳- چروکیدگی ورقه‌های نازک سیب‌زمینی

نتایج اندازه‌گیری‌ها و مقایسه‌های انجام شده در تغییرات مساحت پس از اعمال تیمارهای مختلف خشک‌کردن ورقه‌های سیب‌زمینی (دما، ضخامت و جهت باد) و اثرات متقابل آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که دما و اثر متقابل ضخامت  $\times$  جهت باد در چروکیدگی سیب‌زمینی تاثیر معنی‌داری در سطح ۱٪ و اثرات متقابل دما  $\times$  ضخامت و دما  $\times$  ضخامت  $\times$  جهت باد تاثیر معنی‌داری در سطح ۵٪ داشته‌اند. در واقع این تیمارها اثرات معنی‌داری در کاهش مساحت داشتند. در این راستا، محققان خود نشان دادند که جهت باد بر روی خشک شدن سیب‌زمینی معنی‌دار است [۲۴]. مقایسه‌ها نشان داد که ضخامت و جهت باد و اثرات متقابل دما و جهت باد تفاوت معنی‌داری در چروکیدگی سیب‌زمینی نداشتند.

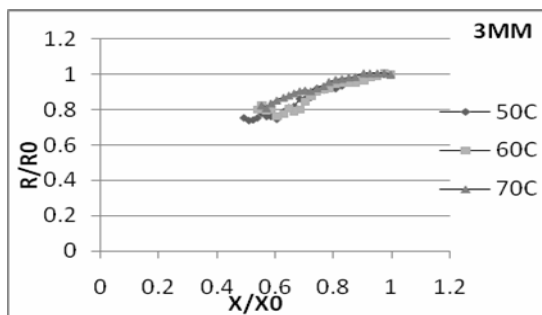
شکل ۱۱ تغییرات مساحت ورقه‌های سیب‌زمینی با ضخامت ۳ میلی‌متر را در سه دمای ۵۰ و ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس با تغییرات نسبت رطوبت (رطوبت در هر مرحله نسبت به رطوبت اولیه،  $x/x_0$ ) را وقتی که قطر بزرگ در جهت باد قرار دارد نشان می‌دهد. در این شکل تغییر مساحت تا نسبت رطوبت ۰/۷ در هر سه دما یکسان بود و بعد از آن تغییرات در دمای ۷۰ درجه سلسیوس بیشترین چروکیدگی را نسبت به دمای ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس از خود نشان داد. شکل ۱۲ تغییرات مساحت ورقه‌های سیب‌زمینی با ضخامت ۳ میلی‌متر در سه دمای ۵۰ و ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس نسبت را وقتی که قطر کوچک در جهت باد قرار دارد، نشان می‌دهد.



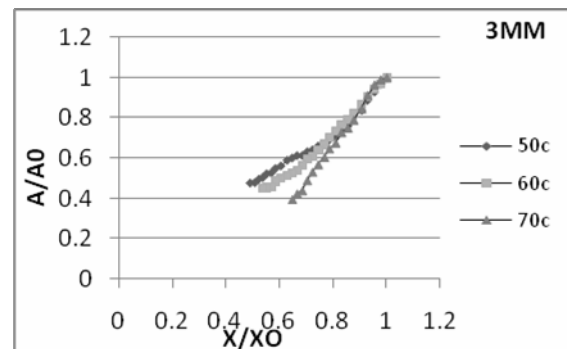
شکل ۱۲ تغییرات مساحت (قطر کوچک در جهت باد)

نتایج حاصل از مقایسه تاثیرات فاکتورهای دما و جهت باد و ضخامت در تغییرات نسبت کرویت نشان داد که دما و اثرات متقابل دما  $\times$  ضخامت  $\times$  جهت باد تاثیر معنی‌داری در سطح ۱٪ و ضخامت و اثرات متقابل دما  $\times$  ضخامت دارای اثر معنی‌داری در سطح ۵٪ می‌باشند. در واقع این فاکتورها اثر معنی‌داری در تغییرات نسبت کرویت ورقه‌های سیب‌زمینی داشتند. علت این امر این است، که با افزایش دما و کاهش ضخامت ورقه‌های سیب‌زمینی، زمان خشک‌شدن کاهش یافته است [۲۵] و در نتیجه تغییر شکل بیشتری در ورقه‌ها بوجود می‌آید. مقایسه‌ها نشان داد که جهت باد و اثر متقابل دما  $\times$  جهت باد و ضخامت  $\times$  جهت باد تفاوت معنی‌داری در تغییر نسبت کرویت ورقه‌های سیب‌زمینی ندارند.

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ تغییر کرویت در طی کاهش رطوبت ورقه‌های سیب‌زمینی با ضخامت ۳ میلی‌متر در جهات مختلف باد را نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود، زمانی که قطر کوچک در جهت باد قرار دارد و دما ۷۰ درجه سلسیوس است، در نسبت رطوبت کمتر از ۰/۸ کرویت کاهش یافته است.



شکل ۱۳ تغییرات کرویت (قطر بزرگ در جهت باد)

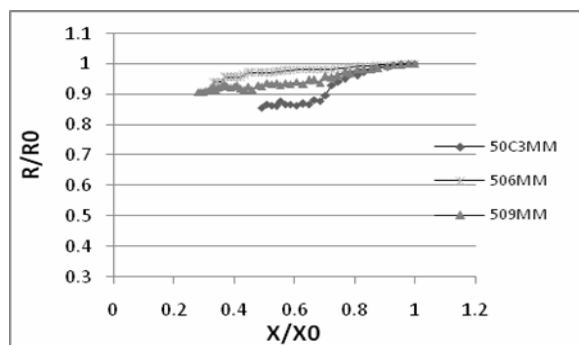


شکل ۱۱ تغییرات مساحت (قطر بزرگ در جهت باد)

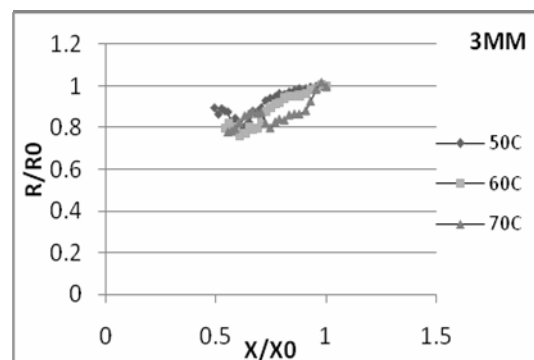
جدول ۱ تاثیر ضخامت دما و جهت باد و اثر متقابل آنها در تغییرات مساحت ورقه‌های سیب‌زمینی

مقدار F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منابع تغییر
۵۹/۷**	۰/۰۲۷	۰/۰۵۵	۲	ضخامت
۰/۲۱۹**	۰	۰	۲	دما
۵/۸۳**	۰/۰۰۳	۰/۰۱۱	۴	دما×ضخامت
۰/۶۸۷ <sup>ns</sup>	۰	۰	۱	جهت باد
۷/۷۳**	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲	۲	دما × جهت باد
۲/۲۶ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۱	۰/۰۰۷	۲	ضخامت×جهت باد
۲/۰۶ <sup>ns</sup>	۰	۰/۰۰۴	۴	ضخامت×دما×جهت باد
		۰/۰۱۶	۳۶	خطا
		۰/۰۹۵	۵۳	تعدادکل

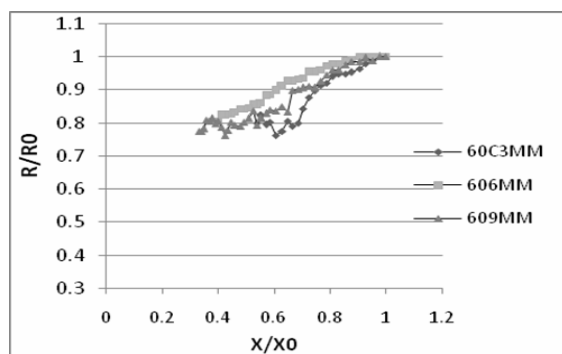
\*\* اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪ ns: عدم وجود اختلاف معنی‌دار



(الف)



شکل ۱۴ تغییرات کرویت (قطر کوچک در جهت باد)



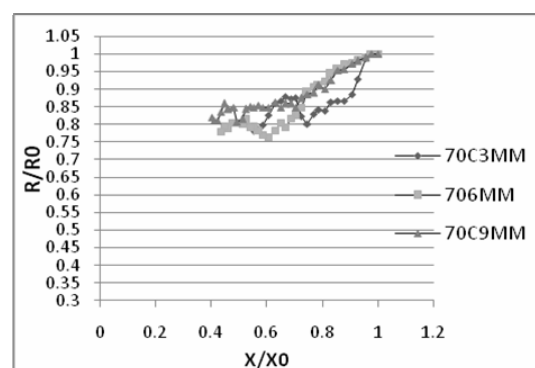
(ب)

شکل ۱۵ تغییر کرویت با کاهش رطوبت، الف- دما ۵۰°C ب- دما ۶۰°C

شکل ۱۵ (الف، ب و ج) تغییر نسبت کرویت برای سه ضخامت ۳ و ۶ و ۹ میلی‌متر در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود بیشترین میزان کاهش کرویت در ضخامت ۳ میلی‌متر و سپس ۶ و ۹ میلی‌متر بوده است. همچنین، شدت کاهش نسبت کرویت در دمای ۷۰ درجه سلسیوس بیشترین میزان را نسبت به دو سطح دیگر دما داشته است [۲۵].

## ۵- منابع

- [1] Salimi, A., Maghsoudlou, Y., Mirzai, H. and Kashaninejad, M. 2009. Effect of drier type, cultivar, product and water temperature on major components and rehydration ratio of dried potato products. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*. 16(1): 119-130.
- [2] Amiryousefi, M.R. and Mohebbi, M. Modeling of mass transfer during osmosis dehydration of potato slices by neural networks. The 18<sup>th</sup> National Congress of Food Science and Technology. Ferdowsi University of Mashhad. Iran. 15-16 Oct, 2008.
- [3] Yadollahinia, A. and Jahangiri, M. 2009. Shrinkage of potato slices during drying. *Journal of Food Engineering*. 94:52-58.
- [4] Chih shih, M., Chuan kuo, C. and Chiang, W. 2009. Effects of drying and extrusion on color, chemical composition, antioxidant activities and mitogenic response of spleen lymphocytes of sweet potatoes. *Journal of Food Engineering*. 117: 114-121.
- [5] Hajizadeh, M. and Kasrai, M. Determination of walnut roundness by using image processing technique. The 18<sup>th</sup> National Congress of Food Science and Technology. Ferdowsi University of Mashhad. Iran. 15-17 Oct, 2008.
- [6] Tshoko, R., 2007. Discrimination of Plant Species Using Co-occurrence Matrix of Leaves. pp. 12.
- [7] Rejai, B. and Norbakhsh, R. Using image processing technique in evaluation of barberry quality properties. The 18<sup>th</sup> National Congress of Food Science and Technology. Ferdowsi University of Mashhad. Iran. 15-17 Oct, 2008.
- [8] Mahmoudi, M., Khazai, J. Vahdati, K. Identification of walnut biotypes using image processing and neural network techniques. The 5<sup>th</sup> National Conference on Agricultural Machinery Engineering & Mechanization. Ferdowsi University of Mashhad. Iran. 27-28 Aug., 2008.
- [9] Zhao-yan, L. and Fang, C. 2005. Identification of rice seed varieties using neural network. *Journal of Zhejiang University Science*, 6.
- [10] Leeratanarak, N., Devahastin, S. Chiewchan, n. 2006. Drying kinetics and quality of potato chips undergoing different drying techniques. *Journal of Food Engineering*. 77: 635-643.



(ج)

شکل ۱۵ تغییر کرویت با کاهش رطوبت، ج- دما ۷۰ °C

## ۴- نتیجه گیری

نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان داد که منحنی‌های خشک شدن ورقه‌های نازک سیب‌زمینی بیشتر تحت تاثیر دمای هوا قرار دارند. منحنی‌های تغییرات رطوبت در زمان ورقه‌های سیب زمینی نشانگر این است که در ابتدای فرآیند تبخیر با آهنگ بیشتری رخ داده و در ادامه با خروج رطوبت بیشتر از محصول از شدت تبخیر کاسته می‌شود. در شروع فرآیند گرمای دریافتی صرف افزایش دمای نمونه‌ها تا درجه حرارت تعادلی گردیده لذا آهنگ خشک شدن افزایش اندکی داشته است. این مرحله بسیار کوتاه و قابل چشم‌پوشی است. بعد از این مرحله تبخیر با آهنگ ثابت شروع شده و طی آن رطوبت آزاد موجود در نمونه‌ها با آنتالپی ثابتی از نمونه خارج شد. این مرحله نیز کوتاه است بطوری‌که در فرایندها این مرحله مشاهده نگردید. بعد از این مرحله تبخیر با آهنگ نزولی شروع شده و جدایش رطوبت غیرپیوندی با حرکت در منافذ ماده رخ خواهد داد. در انتهای این مرحله، کاهش آهنگ تبخیر مشاهده گردید. نتایج نشان داد که بیشترین شدت خشک شدن در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و ضخامت ۳ میلی‌متر نمونه‌های محصول بوده است. همچنین کمترین مدت زمان خشک شدن در دمای ۵۰ وضخامت ۹ میلی‌متر می‌باشد. نتایج حاصل از مطالعه تغییرات نسبت مساحت و کرویت در طی فرآیند خشک شدن نشان داد که میزان چروکیدگی سیب‌زمینی با کاهش رطوبت در طول دوره خشک شدن در هر سه دما افزایش یافته است. با کاهش دما و افزایش ضخامت، چروکیدگی کمتر شد، بطوری‌که بیشترین میزان چروکیدگی در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و ضخامت ۳ میلی‌متر و کمترین میزان چروکیدگی در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و ضخامت ۹ میلی‌متر بوده است.

- [19] AOAC. 1990. Official methods of analysis (15th Edn). Association of Official Analytical Chemists. Washington DC, USA.
- [20] Chaji, H., Ghasem zadeh, H. and Ranjbar, I. 2008. Effect of Pre- treatments using ethyloleate, hot & warm water on drying characteristics of barberry. The 5<sup>th</sup> National conference on Agricultural Machinery Engineering & Mechanization. Ferdowsi University of Mashhad. Iran. 27-28 Aug., 2008.
- [21] Mohammadi, A., Rafiee, Sh., Kayhani, A. and Emam-Djomeh, Z. 2008. Drying kinetics modeling of kiwifruit (cv. Hayward) slices in thin layer dryer. The 5<sup>th</sup> National conference on Agricultural Machinery Engineering & Mechanization. Ferdowsi University of Mashhad. Iran. 27-28 Aug., 2008.
- [22] Rodrigues, S. and Fernandes, F. 2006. Dehydration of melons in a ternary system followed by air-drying. Journal of Food Engineering. 77: 423-433.
- [23] Gazor, H.R. and Minaee, S. Influence of temperature and air velocity on canola drying kinetic. The 5<sup>th</sup> National Conference on Agricultural Machinery Engineering & Mechanization. Ferdowsi University of Mashhad. Iran. 27-28 Aug., 2008.
- [24] Yadollahinia, A. and Jahangiri, M. 2009. Shrinkage of potato slices during drying. Journal of Food Engineering. 94: 52-58.
- [25] Roustapour, O.M., Maftoonazad, N., Khadem, M.R. and Khaloahmadi, A. Determination of drying kinetics of materials in cabinet dryer. National Conference on New Technologies in Mechanical Engineering. Islamic Azad University, Shiraz Branch. 23-24 Feb., 2011.
- [11] Tsami, E., Marinos- Kouris, D. and Maroulis, Z.B. 1990. Water sorption isotherms of raisins, currants, figs, prunes and apricots. Journal of Food Science. 55(3): 1594-1597 and 1625.
- [12] Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrous, M. and Jaouhari, J.T. 2004. Drying kinetics of prickly pear fruit (opuntia ficus indica). Journal of Food Engineering. 61:173-180.
- [13] Sacilik, K. and Elicin, A. 2006. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. Journal of Food Engineering. 73: 281-289.
- [14] Rafiee , Sh. and Maghsoudlou, Y. 2005. Simulation of wheat (Tagan) kernel drying kinetics model. Iranian Journal of Food Science and Technology. 2(3): 49-58 (In Persian).
- [15] Koyuncu, T., Pinar, y. and Lule, F. 2007. Convective drying characteristics of azarole red and yellow fruits. Journal of Food Engineering. 78: 1471-1475.
- [16] Roustapour, O.R., Hosseinalipour, M., Ghobadian, B., Mohaghegh, F. and Maftoon Azad, N. 2009. A proposed numerical-experimental method for drying kinetics in a spray dryer. Journal of Food Engineering. 90: 20-26.
- [17] Ghasemi Kadijani, H. 1997. Spray dryer modeling and design for drying of single cell protein. Thesis for M.S. degree. Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran (In Persian).
- [18] Strumilo, C. and Kudra, T. 1998. Drying: Principles, Applications and Design. Pahlevanzadeh, H. Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran.

## Study of drying kinetics and shrinkage of potato slice in a parallel flow dryer

Roustapour, O. R. <sup>1\*</sup>, Maftoonazad, N. <sup>2</sup>, Khaloahmadi, A. <sup>3</sup>

1. Assistant Professor, Fars Center for Agriculture Research and Natural Resources, Agricultural Engineering Research Institute
2. Research Scholar, Department of Agricultural Machinery Engineering, Islamic Azad University, Branch of Eghlid, Member of Young Researchers Club, Shiraz, Iran.

(Received: 90/9/23 Accepted: 91/2/8)

Potato (*Solanum tuberosum*) is one of the most important agriculture products which damage soon because of inappropriate storage and processing conditions. Drying process causes to increase the shelf life of potato. In current research, potato slices dried in a parallel flow dryer and its kinetics of drying and shrinkage was studied. The experiments were accomplished in three levels of slices thickness; 3, 6 and 9 mm and three levels of temperature; 50, 60 and 70 c. Air flow was considered as 0.012 m<sup>3</sup>/s in all tests. Drying rate, moisture reduction, variation of area and roundness of samples were investigated during drying period. Results showed the maximum drying rate has been occurred when temperature was 70 c and thickness was 3 mm. Area and roundness variation was increased while temperature increased and thickness decreased.

**Keywords:** Kinetics of drying, Potato, Drying rate, Area, Roundness

---

\* Corresponding Author E-Mail Address: roustapour@farsagres.ir