

مدل سازی چروکیدگی ورقه‌های سیب در خشک کردن همرفتی به منظور اعمال در شبیه‌سازی فرآیند انتقال رطوبت و گرما

سید صادق سیدلو^{۱*}، حبیبه نعلبندی^۱، حمیدرضا قاسم‌زاده^۱ و ناصر همدی^۲

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۶

تاریخ پذیرش: ۹۳/۳/۲۰

۱- گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

۲- گروه علوم و صنایع غذایی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان

*مسئول مکاتبه E-mail: ss_seidlo@yahoo.com

چکیده

شبیه‌سازی انتقال گرما و رطوبت یکی از تکنیک‌های مؤثر در اصلاح و بهینه‌سازی روش‌های مختلف خشک کردن مواد غذایی می‌باشد. دقت شبیه‌سازی‌ها و مدل‌سازی‌های مورد نظر تابع مقدار دقت در تعیین و اعمال شرایط واقعی مشخصه‌های مهندسی می‌باشد. یکی از موارد مهم و تأثیرگذار در دقت پیش‌بینی‌های پروفیل دما و رطوبت ماده، چروکیدگی و کاهش حجم محصول در طی فرآیند می‌باشد. هدف از این پژوهش، مدل‌سازی ریاضی سرعت چروکیدگی و یا سرعت حرکت مرز ورقه‌های سیب در خشک کردن همرفتی به صورت لایه‌نازک و نیز توسعه مدل ریاضی برای برآورد تغییرات ضخامت نمونه‌ها و فاصله نوده‌های داخلی در طی این فرآیند با استفاده از حل عددی معادله مربوط در محیط اجزای محدود بود. در این مطالعه، خشک کردن نمونه‌های سیب در سرعت های هوای ۰/۰۶، ۱/۲ و ۱/۸ متر بر ثانیه و در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتیگراد انجام شد. نتایج نشان داد که مقدار ضخامت نمونه ها از ۰/۰۵۳ متر در ابتدا به ۰/۰۱۴ متر در انتهای فرآیند خشک کردن کاهش می‌یابد. آهنگ کاهش ضخامت در دما و سرعت‌های بالاتر، از مقدار بالاتری برخوردار بود. همچنین، نتایج حاصل از مطالعه نشان داد که مدل نمایی می‌تواند تغییرات ضخامت نمونه را بهتر از سایر مدل‌های مورد مطالعه برآورد کند. سرعت حرکت مرز نیز به صورت نمایی مدل‌سازی شد و ضرایب آن به صورت تابعی از زمان، دما و سرعت هوای داغ مدل‌سازی شد. فاصله گره‌های داخلی به صورت تابعی از سرعت حرکت مرز بیرون و تابعی از زمان خشک کردن محاسبه شد. نتایج شبیه‌سازی چروکیدگی دارای انطباق خوبی با نتایج تجربی بود.

واژه‌های کلیدی: المان محدود، چروکیدگی، خشک کردن، سیب، شبیه‌سازی گرما و رطوبت.

۱-مقدمه

خشک کردن را در یک محیط مجازی مورد مطالعه قرار داد و تأثیر تغییر در عوامل متفاوت را بدون دخالت عوامل دیگر بررسی کرد. مدل-سازی ریاضی معمولاً یک روش کم‌هزینه برای بهینه‌سازی و افزایش بازده فرآیندها می‌باشد. دقت عملیات شبیه‌سازی وابسته به پیش‌بینی و یا محاسبه دقیق پارامترهای اعمالی در مدل‌های توسعه داده شده است. از جمله پارامترهای مهم در شبیه‌سازی انتقال جرم و گرما، ضریب انتشار مؤثر رطوبت، روند چروکیدگی در طی عملیات و به تبع آن پیش‌بینی دقیق فاصله گره‌ها در حل عددی مدل‌ها می‌باشد و مفروضات غالب مبنی بر ثابت بودن موارد مذکور به کاهش دقت پیش‌بینی‌ها منجر می‌شود (بیالویزیسیکی و همکاران ۲۰۰۸؛ جانجای و همکاران ۲۰۰۸؛ هادریچ و همکاران ۲۰۰۸ و کریم و هاوولادر ۲۰۰۵).

معمول‌ترین روش برای تعیین ضریب انتشار مؤثر رطوبت، روش مبتنی بر منحنی‌های هم دمای جذب و دفع و داده‌های خشک کردن است. در این روش، از قانون دوم انتشار فیک برای توصیف فرآیند

سیب یکی از میوه‌های مهم در ایران بوده و دارای تولید سالیانه بالایی است. این محصول ضمن داشتن درصد رطوبت بالا، از فعالیت متابولیکی زیادی نیز برخوردار می‌باشد که این عوامل موجب فساد محصول می‌شوند (بیلپائو- سینز و همکاران ۲۰۰۵). یکی از ساده‌ترین روش‌ها برای افزایش عمر انبارماتی میوه، کاهش درصد رطوبت آن با استفاده از روش‌های مختلف خشک کردن است. بطوریکه با خشک کردن میوه، فعالیت آبی آن کاهش یافته و پایدار بر آن نیز افزایش پیدا می‌کند. افزایش تقاضا برای محصولات خشک با کیفیت خوب موجب افزایش مطالعات در زمینه فرآیند خشک کردن شده است (باکر ۱۹۹۷). یکی از راهکارهای بهینه در طراحی خشک‌کن‌ها و نیز مطالعه اثرات عوامل متفاوت برای رسیدن به محصول با هزینه پایین و کیفیت بالا، شبیه‌سازی فرآیندهای انتقال است. با شبیه‌سازی می‌توان فرآیند

u سرعت حرکت هر کدام از گره‌ها در بدنه ورقه میوه در طی فرآیند خشک کردن می‌باشد. تفسیر مدل چروکیدگی به این صورت است که سرعت حرکت (u) هر نقطه از بدنه نمونه که دارای مختصات x می‌باشد، به صورت تابع خطی از مختصات آن نقطه است و به شکل $u = Ax$ بیان می‌شود. با این تفسیر و با توجه به اینکه A مقداری ثابت می‌باشد، سرعت حرکت نقاط نزدیک به سطح بالایی نمونه بیشتر از آن برای نقاط نزدیک به سطح پایینی نمونه خواهد بود. بنابراین، برای شبیه‌سازی چروکیدگی لازم است سرعت چروکیدگی (معادله ۳) و یا سرعت حرکت مرز نمونه (معادله‌ای که فاصله‌های داخلی را در روش اجزای محدود کنترل می‌کند) یافت شود.

$$\frac{\partial}{\partial x} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$u = \frac{\partial(\Delta x)}{\partial t} \quad (3)$$

در روابط فوق t بیانگر زمان خشک کردن بر حسب ثانیه و x فاصله هر نقطه از سطح مبنا بر حسب متر می‌باشد.
در این تحقیق اهداف زیر دنبال شد:

- مدل‌سازی و برآورد تغییرات ضخامت نمونه در طی فرآیند و انتخاب بهترین مدل چروکیدگی منطبق با داده‌های تجربی.
- تصحیح فاصله نودهای داخلی در هر گام زمانی عملیات خشک کردن در موقع شبیه‌سازی انتقال جرم و گرما.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

سیب مورد نیاز از واریته *Golden Delicious* و از باغی واقع در شهرستان مرند در استان آذربایجان شرقی تهیه شده و در دمای ۳ تا ۴ درجه سانتیگراد نگهداری شدند. حدود ۲ ساعت قبل از هر آزمایش، مقداری سیب از سردخانه به آزمایشگاه منتقل شد تا دمای آنها، هم دمای محیط آزمایشگاه شود. پس از پوست‌کنی، سیب‌ها به قطعات مکعب مستطیلی با ابعاد $2/5 \times 23 \times 38$ میلی‌متر برش داده شده و برای جلوگیری از تغییر رنگ و قهوه‌ای شدن غیرآنزیمی، در محلول اسید اسکوربیک ۱٪ قرار داده شدند. سپس، آب سطحی کلیه نمونه‌ها گرفته شده و در سینی‌های تفلونی به صورت تک‌لایه طوری چیده شدند که فاصله‌ای بین آنها وجود نداشته باشد.

۲-۲- اندازه‌گیری خصوصیات مورد نظر

۲-۲-۱- محتوی رطوبت

اندازه‌گیری مقدار رطوبت نمونه‌های سیب بر اساس استاندارد *AOAC* و در دمای 102 ± 1 درجه سانتیگراد انجام گرفت (۱۹۹۰ *AOAC*). آزمایش‌ها در ۴ تکرار انجام شدند. تا مقادیر مربوط به

انتشار رطوبت استفاده می‌شود. به این ترتیب، با حل تحلیلی قانون دوم فیک در حالت انتشارغیرپایا و برای موادی با اشکال هندسی مختلف می‌توان ضریب انتشار مؤثر رطوبت را در مرحله نزولی خشک کردن برآورد و محاسبه کرد. فرضیات مختلفی در قانون دوم فیک و محاسبه ضریب انتشار مؤثر رطوبت در نظر گرفته شده است که از جمله آنها می‌توان به فرض ثابت بودن دما و ضریب انتشار مؤثر رطوبت در طول فرآیند، طولانی بودن زمان خشک شدن و غالب بودن مکانیسم انتشار در انتقال رطوبت اشاره کرد. یکی دیگر از مفروضات حل تحلیلی قانون دوم فیک، فرض ثابت بودن حجم نمونه و یا ضخامت نمونه؛ در مطالعه یک بعدی انتقال رطوبت و گرما، می‌باشد (کرنک ۱۹۷۵).

با توجه به اینکه در طی عملیات خشک کردن چروکیدگی به طور مداوم اتفاق می‌افتد، بنابراین، در هر گام زمانی، ضخامت نمونه با گام زمانی قبلی متفاوت خواهد بود. تغییر ضخامت نمونه، تأثیر معنی‌داری روی ضریب انتشار مؤثر رطوبت از طریق تغییر تخلخل ماده و نیز تغییر مسافت حرکت رطوبت از مرکز تا سطوح مرزی ماده خواهد داشت و این موجب کاهش دقت پیش‌بینی شبیه‌سازی‌های انتقال جرم و گرما در مواد مختلف خواهد شد. روش‌های مختلفی در خصوص اعمال تغییرات چروکیدگی ماده برای افزایش دقت در پیش‌بینی ضریب انتشار مؤثر رطوبت ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به روش پیشنهادی توسط کرنک (۱۹۷۵) و شکل اصلاح شده آن توسط گیکاس و لامبرگ (۱۹۹۱) اشاره کرد که مقدار ضریب انتشار محاسبه شده توسط اعمال تغییرات حجم و یا ضخامت نمونه، اصلاح می‌شود. در این روش از رابطه (۱) استفاده می‌شود که در آن D_{ref} ضریب انتشار مؤثر برآورد شده از قانون دوم فیک با مفروضات معین D_{eff} ضریب انتشار مؤثر اصلاح شده با اعمال چروکیدگی، L_0 و L به ترتیب ضخامت اولیه و ضخامت در هر گام زمانی خشک کردن نمونه و به تبع آن در هر سطح رطوبتی از ماده است.

$$\frac{D_{ref}}{D_{eff}} = \left(\frac{L_0}{L} \right)^2 \quad (1)$$

بنابراین، برای برآورد واقع‌گرایانه ضریب انتشار مؤثر رطوبت لازم است تغییرات ضخامت ماده یا چروکیدگی آن در طی فرآیند خشک کردن مدل‌سازی شود که با اعمال مدل تغییرات ضخامت یا حجم می‌توان فواصل گره‌ها را در حل عددی معادلات انتقال جرم و گرما بصورت تابع زمان و یا رطوبت اصلاح نمود (بیالوبزوسکی ۲۰۰۶؛ بیالوبزوسکی و همکاران ۲۰۰۸؛ جانجای و همکاران ۲۰۰۸). مدل‌سازی تجربی تغییرات حجم یا چروکیدگی توسط محققین مختلف انجام شده است که از آن جمله می‌توان به مدل‌های خطی و غیرخطی اشاره کرد که تعدادی از این مدل‌ها در جدول (۱) آورده شده است (مایور و سرنو ۲۰۰۴).

یکی از روش‌های اعمال چروکیدگی محصول در شبیه‌سازی انتقال جرم و گرما در فرآیند خشک کردن استفاده از معادله لاپلاس است (معادله ۲) که این معادله تغییر شکل شبکه را کنترل می‌کند و در آن

(جدول ۱). منحنی‌های تغییرات ضخامت بدست آمده برای سیب در شرایط مختلف خشک‌کردن، روی ۶ مدل مذکور منطبق شده و ضرایب مدل‌ها بر اساس روش کمترین مربعات غیرخطی و بر اساس الگوریتم لونیبرگ-مورکوارت برآورد شدند. برآورد ضرایب مدل‌ها در محیط نرم افزار *MATLAB* و به کمک ابزار برازش منحنی صورت گرفت (سیدلو و همکاران ۲۰۱۰).

برای انتخاب مناسب‌ترین مدل توصیف‌کننده تغییرات ضخامت ورقه‌های سیب، معیارهای ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (*RMSE*) و مجموع مربعات خطا (*SSE*) بین داده‌های تجربی و نتایج پیش‌بینی شده توسط هر مدل، محاسبه و با مدل‌های دیگر مورد مقایسه قرار گرفتند. بهترین مدل با بالاترین مقدار R^2 و پایین‌ترین مقدار *RMSE* و *SSE* انتخاب شد.

ضرایب مدل توسعه داده شده با استفاده از آنالیز رگرسیون چند-گانه به صورت تابعی از دما و سرعت هوای مورد استفاده در خشک‌کردن، محاسبه و برازش شدند. مدلی که دارای بالاترین ضریب تبیین بوده و تأثیر دما و سرعت هوا روی ضرایب آن معنی‌دار باشد، به عنوان بهترین مدل انتخاب گردید.

جدول (۱): مدل‌های تجربی مورد استفاده در پیش‌بینی تغییرات

ضخامت ورقه‌های سیب (به نقل از مایور و سرنو ۲۰۰۴)

منبع	نوع مدل
کامینسکی و همکاران (۱۹۹۶)	$L = k_1 t + k_2$
	۱
	$L = k_1 \exp(k_2 t) + k_3 \exp(k_4 t)$
	۲
مایور و سرنو (۲۰۰۴)	$L = k_1 + k_2 t + k_3 t^2$
	۳
مایور و سرنو (۲۰۰۴)	$L = k_1 \exp(k_2 t)$
	۴
کامینسکی و همکاران (۱۹۹۶)	$L = k_1 + k_2 \exp(-k_3 t)$
	۵
واسکوئز و همکاران (۱۹۹۹)	$L = k_1 + k_2 t + k_3 t^{3/2} + k_4 \exp(k_5 t)$
	۶

۲-۴- محاسبه سرعت چروکیدگی (سرعت حرکت مرز)

همانطوریکه ذکر شد، در این تحقیق، برآورد چروکیدگی نقاط مختلف بدنه نمونه‌ها با استفاده از معادله لاپلاس در حالت یک بعدی توصیف می‌شود که این معادله تغییر شکل شبکه را کنترل می‌کند که در آن u سرعت حرکت هر نقطه از بدنه ورقه سیب در طی فرآیند خشک‌شدن می‌باشد. برای برآورد سرعت حرکت مرز در سطح بالایی نمونه ($x=L$) از بهترین مدل برازش شده تجربی برای توصیف تغییرات ضخامت نمونه‌ها استفاده شد. به این ترتیب که با مشتق‌گیری از رابطه به دست آمده، سرعت چروکیدگی یا حرکت مرز نمونه به صورت تابعی

محتوی رطوبت سیب‌ها با دقت بالایی محاسبه شود. محتوی رطوبت اولیه نمونه‌ها ۷/۵ گرم آب برگرم ماده خشک به دست آمد.

۲-۲- آزمایش‌های خشک‌کردن

برای انجام آزمایش‌ها، از یک خشک‌کن آزمایشگاهی قفسه‌ای استفاده شد. حدود یک ساعت قبل از شروع فرآیند خشک‌کردن نمونه‌های آماده‌شده سیب، دستگاه خشک‌کن روشن شد و بر اساس مشخصات هر آزمایش، سرعت و دمای هوای داخل خشک‌کن روی اعداد مورد نظر (سرعت‌های هوای ۰/۶، ۱/۲ و ۱/۸ متر بر ثانیه و دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتیگراد) تنظیم شد تا اینکه دمای هوای داخل خشک‌کن به حالت پایدار برسد. پس از این مرحله، یکی از سینی‌های آماده شده در داخل خشک‌کن روی قفسه‌ای که به طور مستقیم به ترازو متصل شده بود، قرار داده شد و وزن نمونه‌ها در فواصل زمانی تعیین شده برای اطلاع از روند کاهش رطوبت نمونه‌ها اندازه‌گیری و ثبت گردید. سینی دوم روی قفسه‌ای به فاصله ۱۰ سانتی‌متر از کف خشک‌کن قرار داده شد که این قفسه به ترازو متصل نبود. خشک‌کردن نمونه‌ها تا رسیدن به محتوی رطوبت ۰/۲۵ (خشک پایه) انجام شد

۲-۲-۳- تغییرات حجم ورقه‌های سیب طی زمان خشک‌کردن

برای مطالعه روند تغییرات حجم نمونه‌ها، حجم ورقه‌های سیب در طی خشک‌کردن و در رطوبت‌های مختلف اندازه‌گیری شد. در هر آزمایش و در هر سطح رطوبتی (۰/۳، ۰/۶۶، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶) گرم آب برگرم ماده خشک، سه نمونه سیب به صورت تصادفی از داخل قفسه پایین خشک‌کن بیرون آورده شدند و ضمن عکس‌برداری با دوربین آنالوگ (*Proline, PR-565S; UK*)، حجم آنها نیز اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری حجم نمونه‌ها با استفاده از روش جایجایی تولونن انجام گرفت (محسنین ۱۹۸۶؛ چاکراواری و پول ۲۰۰۱). قبل از شروع خشک‌کردن، حجم اولیه چند نمونه نیز به روش فوق اندازه‌گیری شد.

۲-۳- تغییرات ضخامت محصول طی خشک‌کردن و مدل‌سازی ریاضی آن

با استفاده از عکس‌های گرفته شده در حین فرآیند خشک‌کردن و در رطوبت‌های مختلف محصول، مقدار تغییرات مساحت سطوح بالایی و پائینی نمونه‌ها، ناشی از چروکیدگی محصول به وسیله نرم‌افزارهای پردازش تصویر (*MATLAB*) اندازه‌گیری شد. مقادیر ضخامت نمونه‌ها از تقسیم مقادیر حجم نمونه‌ها به مساحت آن‌ها محاسبه گردید. در نهایت، مقدار ضخامت نمونه در هر گام زمانی و به تبع آن در هر سطح رطوبتی از ماده، با استفاده از روش برازش منحنی مدل‌سازی شد. در این مطالعه، تعدادی از مدل‌های تجربی برای بررسی انطباق آن‌ها در توصیف تغییرات ضخامت ورقه‌های سیب مورد استفاده قرار گرفتند

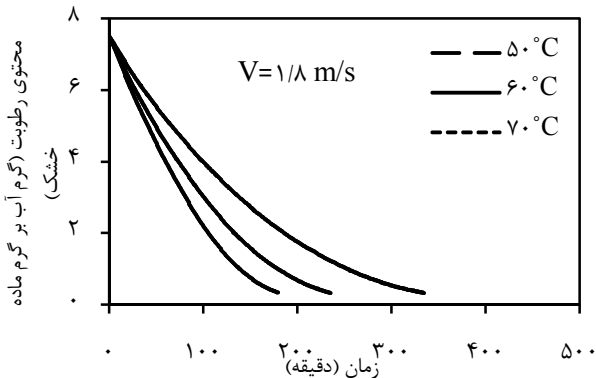
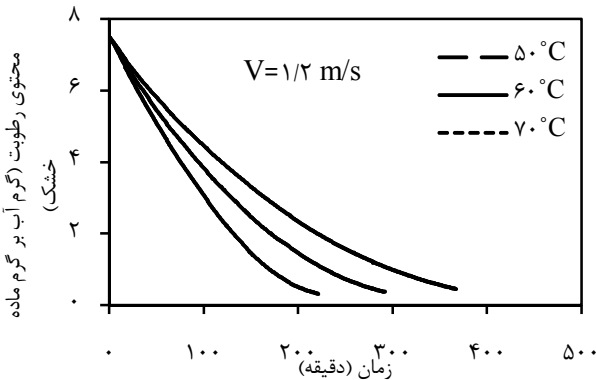
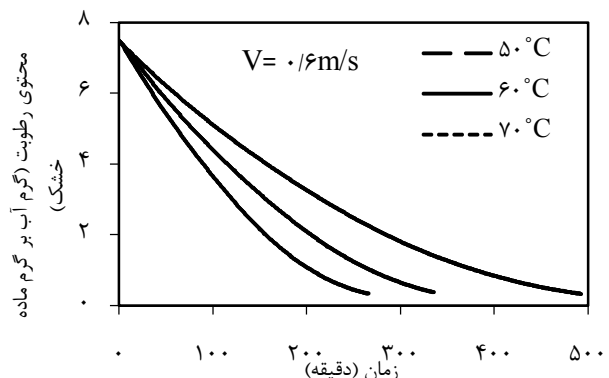
از زمان، دما و سرعت هوای داغ عبوری از سطح محصول بدست آمد (معادله ۴).

$$L = f(t, V, T) \Rightarrow u = \frac{\partial(\Delta x)}{\partial t} \quad (4)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- منحنی‌های خشک شدن

آزمایش‌های مربوط به خشک کردن نمونه‌های سیب در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتیگراد و در سرعت‌های هوای ۰/۶، ۱/۲ و ۱/۸ متر بر ثانیه تا رسیدن به رطوبت نهایی ۰/۳ گرم آب بر گرم ماده خشک انجام شد. منحنی‌های سینتیک افت رطوبت به صورت مقدار نسبت رطوبت (MR) در مقابل زمان در دماها و سرعت‌های مختلف هوا رسم گردید. شکل ۱ تغییرات نسبت رطوبت سیب را در دماها و سرعت‌های مختلف هوا نشان می‌دهد. این منحنی‌ها نشان می‌دهند که نسبت رطوبت نمونه‌ها به طور مداوم طی خشک کردن به صورت نمایی کاهش می‌یابد و زمان خشک شدن نمونه‌های سیب در دماها و سرعت‌های بالای هوا، کوتاه‌تر است. زمان مورد نیاز برای کاهش رطوبت از ۷/۵ به ۰/۳ گرم آب بر گرم ماده خشک در سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه هوا و در دماهای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتیگراد، به ترتیب برابر ۳۶۶، ۲۹۲ و ۲۲۱ دقیقه بود. کمترین زمان مورد نیاز برای کاهش رطوبت تا ۰/۳ گرم آب بر گرم ماده خشک مربوط به هوای ۷۰ درجه سانتیگراد و با سرعت ۱/۸ متر بر ثانیه بدست آمد. نتایج تجزیه واریانس اثر دما و سرعت هوا روی زمان کل رسیدن به رطوبت ۰/۳ گرم آب بر گرم ماده خشک محصول نشان داد که اثر هر دو متغیر روی این زمان در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود. کاهش زمان خشک کردن سیب با افزایش دما و سرعت هوا توسط محققین مختلف نیز گزارش شده است (دل وال و همکاران ۱۹۹۸؛ ولیک ۲۰۰۴؛ اکیای منگر و ارتکین ۲۰۰۶).

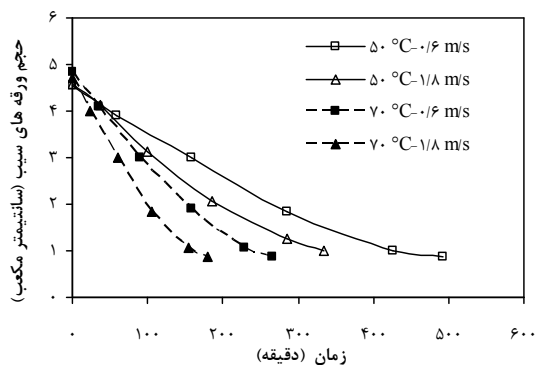


شکل (۱): منحنی‌های نسبت رطوبت نمونه‌های سیب در دماها و سرعت‌های مختلف هوا

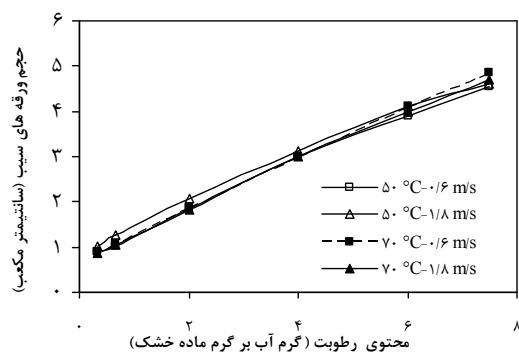
۳-۲- تغییرات حجم و سطح ورقه‌های سیب در طول خشک شدن

تغییرات حجم ورقه‌های سیب در طول فرآیند خشک شدن بصورت تابعی از زمان در شکل ۲ نشان داده شده است. با افزایش زمان خشک کردن و با کاهش محتوی رطوبت، حجم ورقه‌های سیب کاهش یافت. شیب خطوط در شکل‌های مذکور مبین آن است که آهنگ کاهش حجم ورقه‌های سیب در سرعت‌های بالاتر هوا، بیشتر است که این روند در کلیه دماهای مورد مطالعه نیز صادق می‌باشد. همچنین نتایج حاکی از آن بود که با افزایش دمای هوای داغ، آهنگ کاهش حجم ورقه‌های سیب از شیب بیشتری برخوردار می‌شوند. در شکل ۳، تأثیر همزمان دما و سرعت هوا روی تغییرات حجم ورقه‌های سیب نشان داده شده است. از شیب خطوط رگرسیونی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که تأثیر دما روی آهنگ کاهش حجم ورقه‌های سیب در سرعت‌های بالاتر هوا بیشتر می‌باشد. اسپولتز و همکاران (۲۰۰۷) نشان دادند که حجم سیب به صورت خطی متناسب با مقدار کاهش رطوبت آن در طی فرآیند خشک کردن همرفتی، کاهش می‌یابد. مایور و سرنو (۲۰۰۴) نیز به چنین نتیجه‌ای دست یافتند.

در اکثر مطالعات انجام شده در زمینه تغییرات حجم محصولات کشاورزی روند خطی کاهش حجم محصول نسبت به درصد رطوبت گزارش شده است که مطابق با نتایج تحقیق حاضر می‌باشد (شکل ۴) (موریرا و همکاران ۲۰۰۰ و کروکیدا و ماریولیس ۱۹۹۷). با این وجود،



شکل (۳): تأثیر همزمان دما و سرعت هوا روی تغییرات حجم ورقه‌های سیب



شکل (۴): تغییرات حجم ورقه‌های سیب نسبت به تغییرات محتوی رطوبت

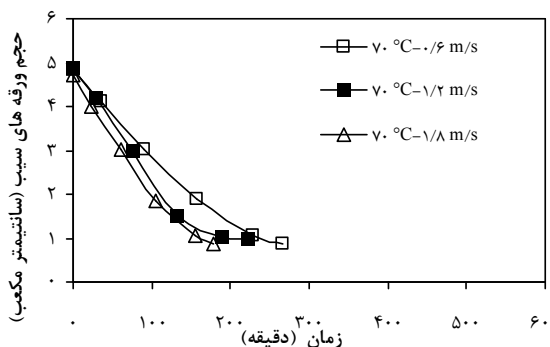
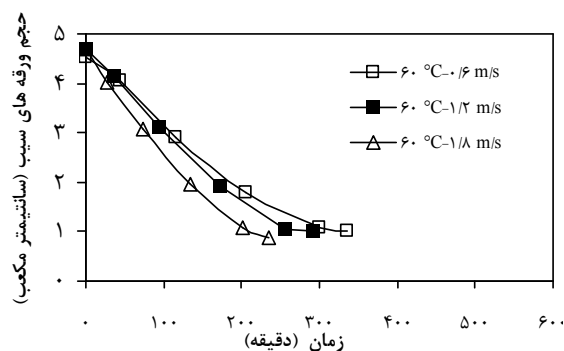
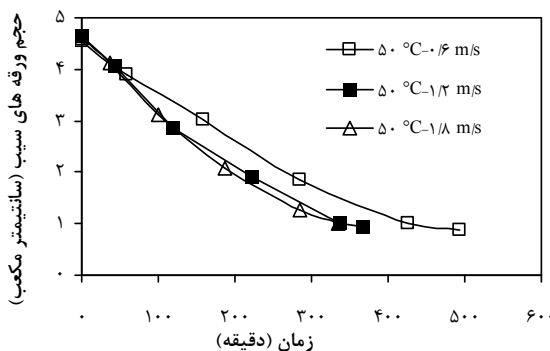
۳-۲- تغییرات ضخامت نمونه‌ها

ضخامت ورقه‌های سیب در طول فرآیند از تقسیم مقادیر حجم نمونه‌ها به سطح آنها بدست آمد. نمودارهای شکل ۵ تغییرات ضخامت نمونه‌ها را بصورت تابعی از زمان در دما و سرعت‌های مختلف هوای داغ نشان می‌دهد. همانطوریکه از نمودارها مشخص است با گذشت زمان خشک کردن، ضخامت نمونه‌ها کاهش یافت و بطور متوسط، مقدار ضخامت نمونه‌ها از ۰/۰۵۳ متر در ابتدا به ۰/۰۱۴ متر در انتهای فرآیند خشک کردن رسید. روند کاهش ضخامت در همه شرایط خشک کردن صادق بوده و در دماهای بالاتر و نیز در سرعت‌های بیشتر، از آهنگ بیشتری برخوردار بود. نتایج تجزیه واریانس نیز نشان داد که تأثیر متغیرهای مستقل، دما و سرعت هوای داغ، روی ضخامت نهایی ورقه‌های سیب معنی‌دار نیست و متوسط ضخامت نهایی در کلیه تیمارهای مورد مطالعه ۰/۰۱۴ متر بود. ولی آهنگ رسیدن به این ضخامت در تیمارهای مختلف متفاوت است که شیب متفاوت نمودارها نیز بیانگر این مطلب می‌باشد. بنابراین، سرعت نزدیکی گره‌های داخلی و بیرونی به یکدیگر در طی فرآیند خشک کردن و شبیه‌سازی آن در هر تیمار مختص خود می‌باشد.

مطالعات کوک و همکاران (۲۰۰۸) نشان داد که نوع روش خشک کردن نقش تعیین‌کننده‌ای در روند تغییرات حجم محصول در برابر محتوی رطوبت آن دارد. بطوریکه در خشک کردن به روش مادون قرمز و بستر سیال، تغییرات حجم نسبت به تغییرات محتوی رطوبت از رابطه خطی و در خشک کردن قفسه‌ای از رابطه نمایی تبعیت می‌کند.

مساحت سطوح بالایی و پائینی ورقه‌های سیب نیز رفتار مشابه با حجم را دارند؛ بطوریکه سطح محصول نیز در طی فرآیند خشک شدن و کاهش محتوی رطوبت محصول، کاهش می‌یابد. تغییرات مساحت نمونه‌ها بصورت تابعی از میزان رطوبت از معادله ۵ تبعیت می‌کند که در آن A مساحت ورقه‌های سیب بر حسب متر مربع و MC محتوی رطوبت بر حسب گرم آب بر گرم ماده خشک می‌باشد.

$$A = [0.366206 \times MC + 5/9.2448] \times 10^{-4} \quad (5)$$



شکل (۲): تغییرات حجم ورقه‌های سیب تابعی از زمان خشک کردن در دماها و سرعت‌های مختلف هوا

۳-۴- مدل سازی ریاضی تغییرات ضخامت ورقه های سیب بصورت تابعی از متغیرهای مورد مطالعه

مایو و سرنو (۲۰۰۴) مدل های مختلفی را برای مدل سازی چروکیدگی حجمی سیب به صورت تابعی از محتوی رطوبت مورد بررسی قرار دادند. مطالعات آنان نشان داد که مدل ارایه شده توسط راتی (۱۹۹۴) بهترین مدل برای توصیف چروکیدگی حجمی سیب است. مدل های خطی و مدل درجه ۲ ارایه شده توسط خود آنان در رتبه های بعدی قرار داشت. برتری این سه مدل برای سایر محصولات نیز به اثبات رسیده است (راتی ۱۹۹۴). مدل نمایی نیز در رتبه چهارم قرار داشت.

با توجه به اینکه در مراحل پایانی خشک کردن، حجم ورقه های سیب تغییرات ناچیزی از خود نشان می دهند و نمودارها از شیب کمتری برخوردار هستند، انتخاب مدل نمایی به عنوان بهترین مدل برای توصیف ضخامت نمونه ها در حین فرآیند خشک کردن به مدل های درجه دوم ارجحیت دارد.

تجزیه واریانس اثر دما و سرعت روی ضرایب مدل منتخب نشان داد که تأثیر پارامترهای مذکور روی این ضرایب در سطح احتمال یک درصد معنی دار می باشد. برای حصول یک مدل منفرد که بتواند تغییرات ضخامت نمونه های سیب را در دماها و سرعت های مختلف هوا توصیف کند، ضرایب مدل منتخب می بایست بصورت تابعی از شرایط خشک کردن محاسبه شود. بنابراین، با استفاده از آنالیز رگرسیون چندگانه، ضرایب مدل بصورت تابعی از متغیرها محاسبه و برازش شدند (جدول ۳ و ۴). روابط مربوط به ضرایب k_1 و k_2 و نیز فرم نهایی معادله مربوط به تغییرات ضخامت ورقه های سیب در خشک کردن همرفتی در زیر آورده شده است (معادله های ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱).

$$L = k_1 \times \text{EXP}[k_2 \times t] \quad (8)$$

$$k_1 = 0.003716 + 5/88 \times 10^{-6} \times T + 1/51 \times 10^{-5} \times V \quad (9)$$

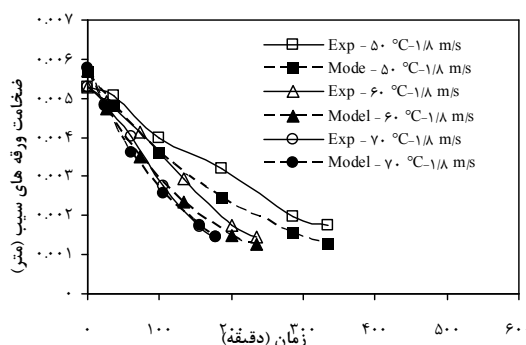
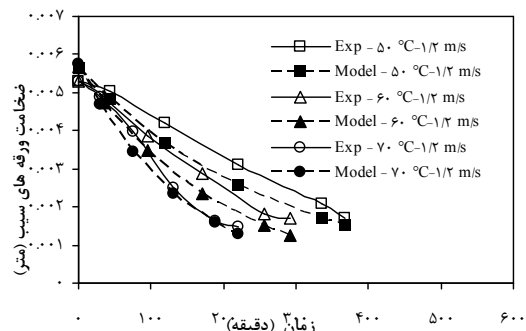
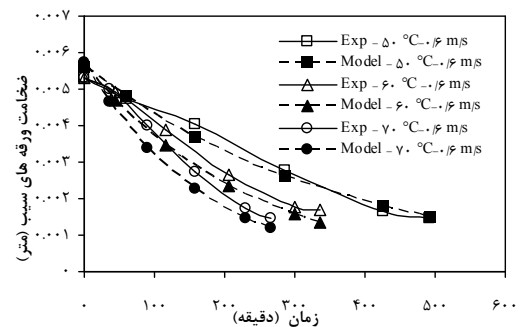
$$k_2 = 0.000843 - 2/7 \times 10^{-6} \times T - 2/5 \times 10^{-5} \times V \quad (10)$$

$$L = [0.003716 + 5/88 \times 10^{-6} \times T + 1/51 \times 10^{-5} \times V] \times \quad (11)$$

$$\text{EXP} \left[(0.000843 - 2/7 \times 10^{-6} \times T - 2/5 \times 10^{-5} \times V) \times t \right]$$

در این روابط L ضخامت ورقه های سیب بر حسب متر و V و T به ترتیب سرعت و دمای هوای داغ بر حسب متر بر ثانیه و درجه کلون می باشند.

به منظور مدل سازی ریاضی تغییرات ضخامت نمونه ها در طی فرآیند خشک کردن، ۶ مدل ریاضی شامل مدل های خطی و غیرخطی مختلف (جدول ۱) انتخاب شدند. داده های تجربی مربوط به مقادیر ضخامت نمونه ها که در طی فرآیند خشک کردن و در شرایط مختلف دما و سرعت هوا به دست آمده بودند، در نرم افزار *MATLAB* بر روی این ۶ مدل منطبق شدند. بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقدار *RSME* و *SSE* به عنوان معیارهای انتخاب بهترین مدل مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج حاصل از برازش منحنی ها در جدول ۲ ارایه شده است. همانطوریکه نتایج نشان می دهند، مدل های خطی و نمایی دارای بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقدار *RSME* و *SSE* می باشند؛ بنابراین، این مدل ها می توانند برای بیان تغییرات فاصله گره ها بصورت تابعی از زمان خشک کردن مورد استفاده قرار گیرند.



شکل (۵): تغییرات ضخامت ورقه های سیب تابعی از زمان خشک کردن در دماها و سرعت های مختلف هوا

جدول (۲): نتایج آماری ارزیابی ۶ مدل تغییرات ضخامت ورقه‌های سیب

مدل	سرعت هوا (متر بر ثانیه)	دمای هوای داغ (درجه سانتیگراد)								
		۵۰			۶۰			۷۰		
		R^2	RMSE	SSE	R^2	RMSE	SSE	R^2	RMSE	SSE
۱	۰/۶	۰/۹۹۶۷	۰/۰۱۰۱۱	۰/۰۰۰۴۰۸۹	۰/۹۹۰۴	۰/۰۰۰۱۷۱۹	۱/۱۸۳×۱۰ ^{-۷}	۰/۹۹۰۸	۰/۰۰۰۱۷۶۲	۱/۳۴۲×۱۰ ^{-۷}
	۱/۲	۰/۹۹۸۲	۷/۱۲۲×۱۰ ^{-۵}	۲/۰۲۹×۱۰ ^{-۸}	۰/۹۸۸۳	۰/۰۰۰۱۸۵۸	۱/۳۸۱×۱۰ ^{-۷}	۰/۹۹۰۵	۰/۰۰۰۱۸۰۸	۱/۳۰۷×۱۰ ^{-۷}
	۱/۸	۰/۹۹۷۸	۷/۹۲۶×۱۰ ^{-۵}	۲/۵۱۳×۱۰ ^{-۸}	۰/۹۹۹۵۶	۰/۰۰۰۱۲۰۹	۵/۸۴۶×۱۰ ^{-۸}	۰/۹۹۳۱	۰/۰۰۰۱۵۰۴	۹/۰۵۳×۱۰ ^{-۸}
۲	۰/۶	۰/۹۹۶۷	۰/۰۱۴۲۸	۰/۰۰۰۴۰۸۱	۰/۹۲۳۸	۰/۰۰۰۰۶۸۴۹	۹/۳۸۱×۱۰ ^{-۷}	۰/۹۹۹۲	۰/۰۰۰۰۷۱۲۵	۱/۰۱۵×۱۰ ^{-۸}
	۱/۲	۰/۹۹۵۵	۰/۰۰۰۱۰۱۶	۲/۰۶۴×۱۰ ^{-۸}	۰/۹۹۷۷	۰/۰۰۰۱۱۷۵	۲/۷۵۹×۱۰ ^{-۸}	۰/۹۵۸۲	۰/۰۰۰۵۳۶۸	۵/۷۶۲×۱۰ ^{-۷}
	۱/۸	۰/۹۹۴۷	۰/۰۰۰۱۷۵۳	۶/۱۴۴×۱۰ ^{-۸}	۰/۹۷۸۳	۰/۰۰۰۰۳۷۸	۲/۸۵۷×۱۰ ^{-۷}	۰/۸۳۸۵	۰/۰۰۰۱۳۱۴	۳/۴۵۳×۱۰ ^{-۶}
۳	۰/۶	۰/۹۹۶۷	۰/۰۱۱۶۶	۰/۰۰۰۴۰۸۱	۰/۹۹۳۱	۰/۰۰۰۱۶۸۴	۸/۵۱×۱۰ ^{-۸}	۰/۹۹۲۸	۰/۰۰۰۱۸۰۱	۹/۷۳۳×۱۰ ^{-۸}
	۱/۲	۰/۹۹۸۲	۸/۲۲۱×۱۰ ^{-۵}	۲/۰۲۷×۱۰ ^{-۸}	۰/۹۹۵۹	۰/۰۰۰۱۲۶۴	۴/۷۹۲×۱۰ ^{-۸}	۰/۹۹۱۵	۰/۰۰۰۱۹۷۲	۱/۱۶۷×۱۰ ^{-۷}
	۱/۸	۰/۹۹۷۸	۹/۱۴۹×۱۰ ^{-۵}	۲/۵۱۱×۱۰ ^{-۸}	۰/۹۹۶۴	۰/۰۰۰۱۲۵۹	۴/۷۵۳×۱۰ ^{-۸}	۰/۹۹۴۹	۰/۰۰۰۱۵	۶/۷۴۶×۱۰ ^{-۸}
۴	۰/۶	۰/۹۷۳۹	۰/۰۲۸۵۶	۰/۰۰۰۳۲۶۳	۰/۹۸۲۲	۰/۰۰۰۰۲۳۴۱	۲/۱۹۲×۱۰ ^{-۷}	۰/۹۷۶۵	۰/۰۰۰۰۲۸۱	۳/۱۵۸×۱۰ ^{-۷}
	۱/۲	۰/۹۸۰۱	۰/۰۰۰۲۳۹۶	۲/۲۹۶×۱۰ ^{-۷}	۰/۹۹۰۸	۰/۰۰۰۱۶۵	۱/۰۸۸۶×۱۰ ^{-۷}	۰/۹۷۲۸	۰/۰۰۰۰۳۰۶۵	۳/۷۵۸×۱۰ ^{-۷}
	۱/۸	۰/۹۷۹۴	۰/۰۰۰۲۴۳۷	۲/۳۷۵×۱۰ ^{-۷}	۰/۹۷۸۳	۰/۰۰۰۰۲۶۷۱	۲/۸۵۴×۱۰ ^{-۷}	۰/۹۷۸۶	۰/۰۰۰۰۲۶۶	۲/۸۳×۱۰ ^{-۷}
۵	۰/۶	۰/۹۹۶۶	۰/۰۱۱۸۶	۰/۰۰۰۴۲۱۸	۰/۹۲۶۲	۰/۰۰۰۰۵۵۰۵	۹/۰۹×۱۰ ^{-۷}	۰/۹۹۲۵	۰/۰۰۰۱۸۲۸	۱/۰۰۳×۱۰ ^{-۷}
	۱/۲	۰/۹۰۶۲	۰/۰۰۰۶۰۰۷	۱/۰۸۳×۱۰ ^{-۶}	۰/۸۲۶۲	۰/۰۰۰۰۸۲۶۱	۲/۰۴۸×۱۰ ^{-۶}	۰/۹۹۱۴	۰/۰۰۰۱۹۸۵	۱/۱۸۲×۱۰ ^{-۷}
	۱/۸	۰/۹۱۸۴	۰/۰۰۰۵۶۰۷	۹/۴۳×۱۰ ^{-۷}	۰/۹۹۶۳	۰/۰۰۰۱۲۶۹	۴/۸۳۱×۱۰ ^{-۸}	۰/۹۸۸۹	۰/۰۰۰۲۲۱۲	۱/۴۶۸×۱۰ ^{-۷}
۶	۰/۶	۰/۹۹۹۵	۰/۰۰۰۷۹۶۶	۰/۰۰۰۰۶۳۴۶	۰/۹۹۹۹	۰/۰۰۰۰۳۶۲۶	۱/۳۱۵×۱۰ ^{-۹}	۰/۹۷۴۷	۰/۰۰۰۵۸۳۲	۳/۴۰۲×۱۰ ^{-۷}
	۱/۲	۰/۹۵۸۸	۰/۰۰۰۶۸۹۵	۴/۷۵۴×۱۰ ^{-۷}	۰/۹۴۸۷	۰/۰۰۰۰۷۷۷۷	۶/۰۴۷×۱۰ ^{-۷}	۰/۹۹۹۱	۰/۰۰۰۱۱۲۵	۱/۲۶۵×۱۰ ^{-۸}
	۱/۸	۰/۹۹۸۶	۰/۰۰۰۱۲۵۳	۱/۵۶۹×۱۰ ^{-۸}	۰/۹۷۸۲	۰/۰۰۰۰۶۱۸۲	۳/۸۲۱×۱۰ ^{-۷}	۰/۹۹۸۱	۰/۰۰۰۱۵۶۵	۲/۴۴۸×۱۰ ^{-۸}

جدول (۳): نتایج آنالیز رگرسیون تأثیر دما و سرعت هوا روی ضریب k_1 مدل ضخامت ورقه‌های سیب

جدول	F	MS	SS	df	
۰/۲۸۹۸۷۱۱۶۴	۱/۵۳۳۰۰۶*	۱۰/۶×۱۰ ^{-۹}	۲/۱۳×۱۰ ^{-۸}	۲	رگرسیون
		۶/۹۳×۱۰ ^{-۹}	۴/۱۶×۱۰ ^{-۸}	۶	باقیمانده
			۶/۲۹×۱۰ ^{-۸}	۸	کل

* معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪

جدول (۴): نتایج آنالیز رگرسیون تأثیر دما و سرعت هوا روی ضریب k_2 مدل ضخامت ورقه‌های سیب

جدول	F	MS	SS	df	
۰/۰۰۰۱۳۸	۵۵/۱۰۸۶۲*	۲/۷۹×۱۰ ^{-۹}	۵/۵۹×۱۰ ^{-۹}	۲	رگرسیون
		۰/۰۵۰۷×۱۰ ^{-۹}	۰/۳۰۴×۱۰ ^{-۹}	۶	باقیمانده
			۵/۸۹×۱۰ ^{-۹}	۸	کل

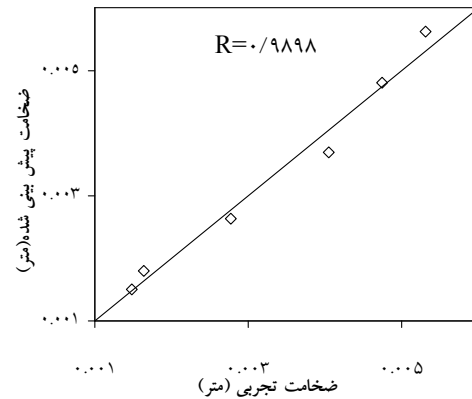
* معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪

بطوریکه مقادیر مذکور در اطراف خط مستقیم ۴۵° قرار دارند. بنابراین، می‌توان از مدل توسعه داده شده برای پیش‌بینی ضخامت ورقه‌های سیب استفاده نمود.

تغییرات ضخامت تجربی و پیش‌بینی شده توسط مدل منتخب به صورت تابعی از زمان خشک‌شدن در شکل ۵ آورده شده است. همانطوریکه مشاهده می‌شود مدل منتخب ضخامت نمونه‌ها را کمتر از مقادیر تجربی برآورد می‌کند. با این وجود، انطباق خوبی بین ضخامت اولیه و نهایی نمونه‌ها در دو حالت تجربی و پیش‌بینی شده توسط مدل، وجود دارد. همچنین، مقایسه مقادیر ضخامت پیش‌بینی شده توسط مدل منتخب و مقادیر ضخامت تجربی بدست آمده در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد و سرعت هوای ۰/۶ متر بر ثانیه در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطوریکه مشاهده می‌شود، انطباق خوبی بین ضخامت تجربی و پیش‌بینی شده توسط مدل، وجود دارد.

جدول (۵): ضرایب مدل نمایشی سرعت حرکت مرز در دما و

سرعت‌های مختلف هوا			
<i>b</i>	<i>a</i>	سرعت هوا (متر بر ثانیه)	دمای هوا (سانتیگراد)
$-4/55 \times 10^{-5}$	$-2/57 \times 10^{-7}$	۰/۶	۵۰
$-6/۰۵ \times 10^{-5}$	$-3/۳۹ \times 10^{-7}$	۱/۲	۶۰
$-۸/۴۷ \times 10^{-5}$	$-۴/۹۳ \times 10^{-7}$	۱/۸	۷۰
$-۵/۱۴ \times 10^{-5}$	$-۲/۹۳ \times 10^{-7}$	۰/۶	۵۰
$-6/۸۸ \times 10^{-5}$	$-3/۸۲ \times 10^{-7}$	۱/۲	۶۰
$-۱/۰۵ \times 10^{-5}$	$-6/۰۲ \times 10^{-7}$	۱/۸	۷۰
$-۵/۸۰ \times 10^{-5}$	$-3/۲۵ \times 10^{-7}$	۰/۶	۵۰
$-9/۵۲ \times 10^{-5}$	$-۵/۴۹ \times 10^{-7}$	۱/۲	۶۰
$-۱/۲۶ \times 10^{-5}$	$-7/۲۵ \times 10^{-7}$	۱/۸	۷۰



شکل (۶): مقادیر نسبت ضخامت تجربی و پیش‌بینی شده با مدل توسعه داده شده

۳-۶- شبیه‌سازی فرآیند خشک‌کردن سیب

پس از مدل‌سازی سرعت حرکت مرز بیرونی یا به عبارت دیگر سرعت چروکیدگی در ورقه‌های سیب، تغییرات ابعاد نمونه و به عبارت دیگر تغییرات فاصله گره‌های داخلی شبیه‌سازی شد. همانطوریکه قبلاً نیز اشاره شد، اگر u سرعت حرکت هر نقطه از بدنه ورقه سیب در یکی از جهت‌های اصلی در طی فرآیند خشک‌شدن باشد، مدل چروکیدگی با استفاده از معادله لاپلاس در حالت یک بعدی توصیف می‌شود که این معادله تغییر شکل شبکه یا حجم حوزه اصلی را کنترل می‌کند. از روش لاگرانژ-اولرین (ALE) برای اعمال مرز متحرک در مسئله استفاده شد (بیالوبزوسکی و همکاران ۲۰۰۸). معادلات روی شبکه‌های اصلی و اولیه حل شده و سپس نتایج به شبکه‌های قابل حرکت منتقل می‌شوند. در موقع استفاده از مدل ALE ، حرکت گره‌های داخلی تابع حرکت مرز بیرونی می‌باشد. بطوریکه در موقع استفاده از این روش، جابجایی مرز متحرک در داخل حوزه اصلی برای حصول تغییر شکل موزون و آرام شبکه در هر نقطه، توزیع می‌شود. برای این منظور از حل معادله PDE مربوطه به جابجایی شبکه- معادله لاپلاس- استفاده شد.

شرط مرزی در سطح بالایی نمونه ($x=L$) با استفاده از معادله ۱۶ توصیف شد. مفهوم این شرط مرزی آن است که سرعت چروکیدگی یا حرکت مرز نمونه به صورت تابعی از زمان، دما و سرعت هوای داغ عبوری از سطح محصول می‌باشد. در سطح پائینی ($x=0$) شرط مرزی به صورت معادله ۱۷ در نظر گرفته شد (شکل ۷).

$$x=0, \quad t>0: \quad u=0 \quad (17)$$

شرط اولیه برای حل معادله چروکیدگی به صورت معادله ۱۸ بود:

$$\forall x, \quad t=0: \quad u(x)=0 \quad (18)$$

معادلات در محیط نرم افزار $COMSOLMULTIPHYSICS$ 3.5 حل شدند که در این نرم افزار از الگوریتم عددی که بر اساس روش اجزای محدود می‌باشد، استفاده شد.

جابجایی شبیه‌سازی شده نقاط مختلف نمونه‌های سیب چروکیده شده در طی فرآیند خشک‌شدن در دماها و سرعت‌های مختلف هوا

۳-۵- مدل‌سازی ریاضی سرعت حرکت مرز

برای بدست آوردن سرعت حرکت مرز بیرونی یا به عبارت دیگر سرعت چروکیدگی از دو روش مختلف استفاده شد. روش اول: سرعت حرکت مرز بیرونی از مشتق‌گیری رابطه ۱۱ نسبت به زمان خشک‌شدن در طول فرآیند بدست آمد.

$$u = \frac{\partial L}{\partial t} = [0.003716 + 5/88 \times 10^{-6} \times T + 1/51 \times 10^{-5} \times V] \times \quad (12)$$

$$\times [0.000843 - 2/7 \times 10^{-6} \times T - 2/5 \times 10^{-5} \times V] \times \text{EXP} \left[(-0.000843 - 2/7 \times 10^{-6} \times T - 2/5 \times 10^{-5} \times V) \times t \right]$$

روش دوم: از معادله ضخامت ورقه‌های سیب در هر یک از شرایط خشک‌کردن (ترکیب دما و سرعت‌های مختلف هوا) به صورت جداگانه مشتق‌گیری شد. بطوریکه ضرایب مدل نمایشی سرعت حرکت مرز در دما و سرعت‌های مختلف هوا (۹ تیمار) به تفکیک در جدول ۵ ارائه شده است. در نهایت، ضرایب مدل سرعت حرکت مرز با روش مشابه ضرایب مدل ضخامت با استفاده از آنالیز رگرسیون چندگانه، بصورت تابعی از متغیرهای مورد مطالعه، محاسبه و برازش شدند. رابطه نهایی بدست آمده و ضرایب مربوطه به شرح زیر می‌باشند (معادله‌های ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶). مقایسه نتایج نشان داد که روش دوم دارای خطای محاسباتی کمتری نسبت به روش اول می‌باشد.

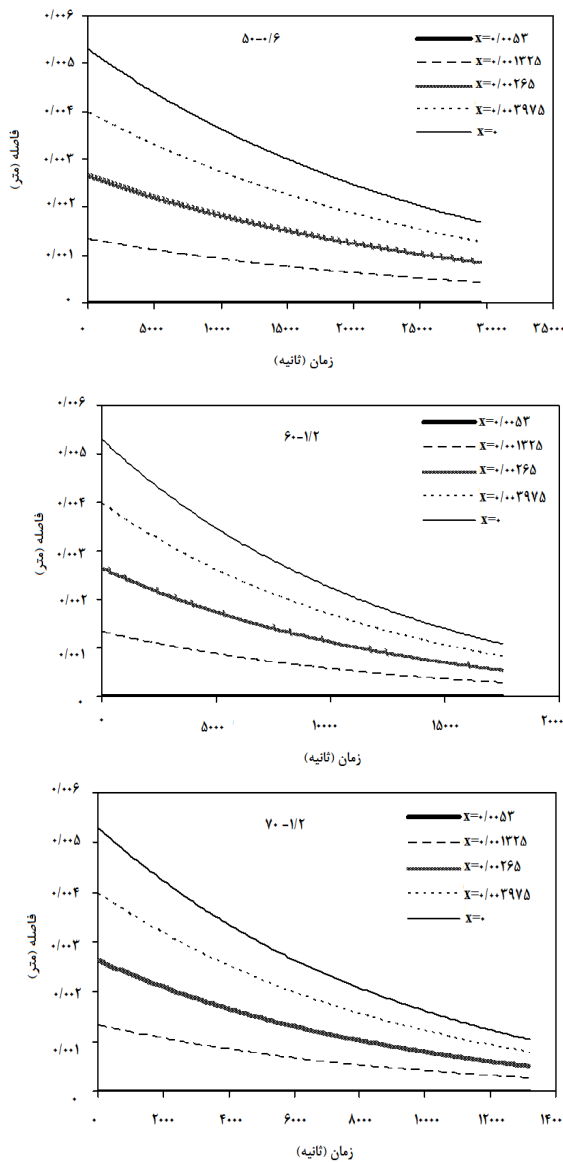
$$U = a \times \text{EXP}[b \times t] \quad (13)$$

$$a = 4/974.05 \times 10^{-6} - 1/5743 \times 10^{-8} \times T - 1/4154 \times 10^{-7} \times V \quad (14)$$

$$b = 0.0008432244 - 2/6745 \times 10^{-6} \times T - 2/45.9 \times 10^{-5} \times V \quad (15)$$

$$U = [4/974.05 \times 10^{-6} - 1/5743 \times 10^{-8} \times T - 1/4154 \times 10^{-7} \times V] \times \quad (16)$$

$$\text{EXP} \left[(0.0008432244 - 2/6745 \times 10^{-6} \times T - 2/45.9 \times 10^{-5} \times V) \times t \right]$$

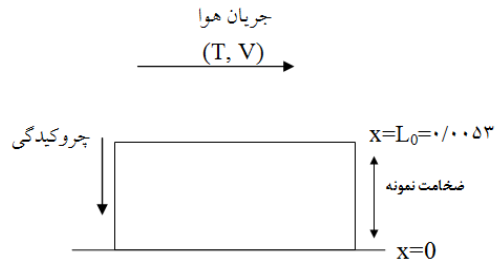


شکل (۸): جابجایی پیش‌بینی شده نقاط مختلف در نمونه‌ها طی چروکیده شدن در فرآیند خشک کردن

در شکل ۸ آورده شده است. چنانکه مشاهده می‌شود، در همه تیمارهای خشک کردن، تغییر شکل لایه بیرونی بسیار بیشتر از لایه‌ها و نقاط داخلی نمونه بود. بر اساس مدل چروکیدگی که توسط معادلات مذکور توصیف شده است، همه نقاط داخلی نمونه‌های سیب به محض شروع عملیات خشک کردن، شروع به حرکت می‌کنند. همانطوریکه شکل ۸ نشان می‌دهد، مقدار ضخامت پیش‌بینی شده نمونه‌ها از $5/3$ میلیمتر به $1/7$ میلیمتر در پایان فرآیند خشک کردن رسیده است.

۴- نتیجه‌گیری نهایی

نتایج حاصل از تحقیق حاضر نشان داد که علی‌رغم زیادبودن چروکیدگی نهایی (۸۱-۷۹٪)، اثر دما و سرعت هوای داغ در خشک کردن همرفتی سیب در محدوده مورد مطالعه بر مقدار چروکیدگی نهایی معنی‌دار نمی‌باشد. بنابراین، استفاده از پیش‌تیمار و یا استفاده از سایر منابع انرژی و یا خشک کردن به منظور مدیریت چروکیدگی پیشنهاد می‌شود. همچنین، مدل نمایی برای مدل‌سازی تجربی تغییرات ضخامت ورقه‌های سیب نسبت به سایر مدل‌های مورد مطالعه ارجحیت دارد. روش ارائه شده می‌تواند فاصله گره‌ها را به دقت کنترل کند و به طور یقین، شبیه‌سازی‌های انتقال رطوبت و چروکیدگی دارای دقت بالایی در مقایسه با روش‌های بدون اعمال چروکیدگی خواهد بود.



شکل (۷): مشخصات هندسی محصول

منابع مورد استفاده

- Anonymous. 1990. AOAC, *Official Method of Analysis*, Association of Official Analytical Chemists (No.934.06). Washington, DC.
- Baker, C. G. J. 1997. *Industrial Drying of Food*, Published by Blackie Academic and Professional.
- Bialobrzewski, I. 2006. *Simultaneous Heat and Mass Transfer in Shrinkable Apple Slab During Drying*. Drying Technology, Vol. 24.
- Bialobrzewski, I., M. Zielinska, A. S. Mujumdar, and M. Markowski. 2008. *Heat and Mass Transfer During Drying of a Bed of Shrinking Particles-Simulation for Carrot Cubes Dried in a Spout-Fluidized-Bed Drier*. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 51.
- Bilbao-Sainz, C., A. Andres, and P. Fito. 2005. *Hydration Kinetics of Dried Apple as Affected by Drying Conditions*. Journal of Food Engineering, Vol. 68.

- Chakraverty, A., and S. R. Poul. 2001. *Post Harvest Technology: Cereals, Pulses and Vegetables*. Science Publishers, Inc. India. pp: 183-188.
- Crank, J. 1975. *The Mathematics of Diffusion*. 2nd ed. Clarendon Press, Oxford.
- Del Valle, J. M., T. R. Cuadros and J. M. Agulera. 1998. *Glass Transitions and Shrinkage During Drying and Storage of Osmed Apple Pieces*", Food Research International, Vol. 31(3).
- Gekasand V., I. Iamberg. 1991. *Determination of Diffusion Coefficient in Volume Changing System- Application in the Case of Potato Drying*", Journal of Food Engineering, Vol. 14.
- Hardrich, B., N. Boudhrioua, and N. Kechaoa. 2008. *Drying of Tunisian Sardine (Sardinella Aurita) Experimental Study and Three-Dimensional Transfer Modeling of Drying Kinetics*. Journal of Food Engineering, Vol. 84.
- Janjai, S., N. Lamler, P. Intawee, B. Mahayothee, and M. Haewsung Charern. 2008. *Finite Element Simulation of Drying of Mango*", Biosystems Engineering, Vol. 99 (4).
- Karim, Md. A., and M. N. A. Hawlader. 2005. *Drying Characteristics of Banana: Theoretical Modeling and Experimental Validation*, Journal of Food Engineering, Vol. 70.
- Koc, B., I. Eren, and F. K. Ertekin. 2008. *Modelling Bulk Density, Porosity and Shrinkage of Quince During Drying: The Effect of Drying Method*", Journal of Food Engineering, Vol. 85.
- M. K. Krokida and Z. B. Maroulis, "Effect of drying method on shrinkage and porosity", Drying Technology, Vol. 15 (10), 1997.
- Mayor, L., and A. M. Sereno. 2004. *Modelling Shrinkage During Convective Drying of Food Materials: A Review*. Journal of Food Engineering, Vol. 61.
- Mohsenin, N. N. 1986. *Physical Properties of Plant and Animal Materials*, Gordon and Breach Sci. Publ, New York.
- Moreira, R., A. Figueiredo, and A. Sereno. 2002. *Shrinkage of Apple Disks During Drying by Warm Air Convection and Freeze Drying*, Drying technology, Vol. 18(1 and 2).
- Okyay Menges, H., and C. Ertekin. 2006. *Mathematical Modeling of Thin Layer Drying of Golden Apples*", Journal of Food Engineering, Vol. 77.
- Ratti, C. 1994. *Shrinkage During Drying of Food Stuffs*, Journal of Food Engineering, Vol. 23(1).
- Schultz, E. L., M. M. Mazzuco, R. A. F. Machado, A. Bolzan, M. B. Quadri, and M. G. N. Quadri. 2007. *Effect of Pre-Treatment on Drying, Density and Shrinkage of Apple Slices*. Journal of Food Engineering, Vol. 78.
- Seiedlou, S., H. R. Ghasemzadeh, N. Hamdami, F. Talati, and M. Moghaddam. 2010. *Convective Drying of Apple: Mathematical Modeling and Determination of Some Quality Parameters*, International Journal of Agriculture and Biology, vol. 12.
- Velic, D., M. Planinic, S. Tomas, and M. Bilic. 2004. *Influence of air Flow Velocity on Kinetics of Convection Apple Drying*. Journal of Food Engineering, Vol. 64.

Modeling of Apple Slices Shrinkage During the Convective Drying to Use in Simulation of Heat and Moisture Transfer

S.S. Seiedlou^{1*}, H. Nalbandi¹, H. R. Ghasemzadeh¹ and N. Hamdami²

Received: 25 Feb 2014

Accepted: 10 Jun 2014

¹Department of Agricultural Machinery Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

²Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

*Corresponding author: E-mail:ss_seiedlo@yahoo.com

Abstract

Simulation of the heat and moisture transfer is one of the effective techniques for modification and optimization in different food drying methods. One of the most important factors to improve the accuracy of the predicted temperature and moisture content profiles in a drying process is the shrinkage or volume reduction of products. The aim of this study was mathematical modeling of the shrinkage rate and the moving velocity of product boundary during drying process in order to prediction of slices thicknesses and the distance of inner nodes using numerical solution for related function by finite element method. The drying of apple slices was conducted in the air velocity of 0.6, 1.2 and 1.8 m s⁻¹ and the temperature of 50, 60 and 70 °C. Based on the results, the thickness of the samples reduced from 0.0053 to 0.0014 m. The exponential model showed a better fitness to the results for thickness and boundary moving velocity change in compare to the other studied models. The model coefficients were calculated as a function of drying time, temperature and velocity of hot air. The distance of domain internal nodes was predicted as a function of outer boundary velocity and drying time. A good fitness was observed between the experimental and simulation results in sample shrinkage.

Keywords: Apple, Drying, Finite element, Heat and moisture simulation, Shrinkage.