

مقایسه فرایند خشک شدن سیب در حالت واقعی و مدلسازی شده

ولی رسولی شریبانی^{۱*}، علی خرمی فر^۲، غلامحسین شاهقلی^۳

۱- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

۲- دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

۳- استاد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

*ایمیل نویسنده مسئول: vrasooli@uma.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۱

چکیده

تشکیل و سیر تکاملی منافذ یک پدیده فیزیکی رایج است که در طی فرایندهای دهیدراسیون متعدد در مواد غذایی مشاهده می‌شود. این تغییر بر فرایند انتقال حجم و حرارت و بسیاری از ویژگی‌های کیفی محصول خشک تاثیر دارد. مدل‌های ریاضی متعدد تجربی و کلاسیک به منظور پیش‌بینی تخریل در طی فرایند خشک کردن مواد غذایی پیشنهاد شده‌اند. مدل کلاسیک در مراحل نخستین خود می‌باشد، زیرا ویژگی‌های مواد مورد نیاز در طی خشک شدن برای تعیین مشخصات مواد در دسترس نیستند. مدل‌های تجربی و نیمه تجربی توسعه خوبی داشته و ارتباط خوبی بین سیر تکاملی منافذ و محتوای رطوبت و تعیین ضرایب مبتنی بر آزمایش دارند. با این حال، مدل‌های ساده‌ای برای در نظر گرفتن وضعیت فرایند و ویژگی‌های مواد برای پیش‌بینی تخریل وجود ندارند. هدف این مقاله، مقایسه فرایند خشک شدن سیب در حالت واقعی و مدلسازی شده می‌باشد. نتایج آزمایشات نشان داد ارتباط خوبی با نتایج شبیه‌سازی شده وجود دارد و در نتیجه مدل مورد تایید قرار گرفته است.

کلمات کلیدی

"سیب"، "مدلسازی"، "خشک کردن"، "تخریل"

۱- مقدمه

از سوی دیگر، مدلسازی نظری می‌تواند درک بهتری از انقباض ارائه دهد که همزمان با انتقال حرارت و حجم در طی خشک شدن رخ می‌دهد. با این حال، اقدامات محدودی در زمینه مدلسازی نظری انقباض میوه‌ها و سبزیجات انجام شده است و این امر به دلیل پیچیدگی ایجاد مدل‌های مبتنی بر فیزیک است. اولین مدل تخریل در دهه ۱۹۵۰ ارائه شد. کیلیپاتریک و همکارانش مدل ساده‌ای را با در نظر گرفتن انقباض حجمی میوه‌ها و سبزیجات در طی خشک شدن ارائه دادند. بسیاری از مدل‌های موجود در تحقیقات پیشین انقباض را به طور ایده آل در نظر گرفته‌اند که طی آن کاهش حجم هندسی محصول دقیقاً برابر با آب از دست رفته است. اما در واقع، این رابطه خطی بین کاهش حجم فیزیکی و حجم آب از دست رفته در طی دوره خشک شدن مشاهده نمی‌شود (Mayor et al., 2004). از بین رفتن سلول‌ها و انقباض بافت‌های غذایی در طی فرایند خشک شدن مواد غذایی رخ می‌دهد. تمایز دقیقی بین انقباض و از بین رفتن وجود دارد، بدین صورت که انقباض به کاهش حجم نمونه غذا اشاره دارد، ولی از بین رفتن بیانگر تجزیه غیرقابل بازگشت ساختار سلولی و بافتی می‌باشد. تغییرات ساختاری در سطح سلولی به دلیل پدیده انتقال در طی دوره خشک رخ می‌دهند. همانطور که پیشتر اشاره شد، ایجاد تخریل و انقباض در طی خشک شدن بر فرایند انتقال و همچنین سایر ویژگی‌های کیفی تاثیر دارد. پیش‌بینی دقیق تخریل و انقباض به طراحی سیستم خشک کردن پیشرفته به منظور اطمینان از محصولات با کیفیت کمک می‌کند (Gulati et al., 2015). مرور کامل پیشینه تحقیقات نشان می‌دهند که ویژگی‌های محصول و پارامترهای فرایند تاثیر قابل توجهی بر تشکیل منافذ و پیشرفت آن‌ها در طی خشک شدن مواد غذایی دارند. مطالعات پیشین از پارامترهای ساختاری نظیر ضریب انقباض حجمی، ضریب انقباض - انبساط و ضریب انقباض - شکست در مدل‌های خود استفاده کرده‌اند. با این حال، تعیین مقادیر این پارامترهای ساختاری نیازمند بررسی‌های تجربی می‌باشند. بنابراین،

ناهمگونی ساختاری میوه‌ها و سبزیجات درک تغییرات فیزیکی - شیمیایی مرتبطی که در طی خشک شدن رخ می‌دهند را دشوار می‌کنند. به دلیل ساختار ناهمگون، غذا یکی از انواع پیچیده مواد دگرپذیر پذیر است (Senadeera et al., 2005). ماهیت تخریلی و هیگروسکوپی میوه‌ها و سبزیجات منجر به افزایش انقباض آن‌ها در طی فرایند خشک شدن می‌گردد و این یک فرایند فیزیکی است که به طور رایج در طی خشک شدن مشاهده می‌شود (Kumar et al., 2018). انقباض تاثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های مکانیکی و بافتی میوه‌ها و سبزیجات دارد. مهم‌تر از همه، انقباض عامل مهمی است که تاثیر زیادی بر میزان خشکی و سینتیک خشکی دارد. به دلیل این عوامل، محققان غذا تاکید دارند که انقباض نباید در طی پیش‌بینی انتقال حجم و حرارت در طی خشک کردن نادیده گرفته شود (Aprajeeta et al., 2015). مدل دارای انقباض در مقایسه با مدل بدون انقباض تناسب بهتری با داده‌های تجربی در طی خشک شدن دارد. انقباض مواد غذایی به عوامل متعددی مانند ویژگی‌های مواد، ویژگی‌های مکانیکی و وضعیت فرایند بستگی دارد. دانش پیدایش تخریل در طی خشک شدن نیز می‌تواند به پیش‌بینی دقیق پدیده انتقال و ویژگی‌های کیفی کمک کند (Karunasena et al., 2014). برخی از محققان از معادلات ریاضی برای پیش‌بینی تخریل مواد غذایی به عنوان تابعی از محتوای رطوبت استفاده کرده‌اند که این مدل‌ها را می‌توان در دو رده طبقه‌بندی نمود: (۱) مدل‌های نظری که بر اساس شناخت فیزیک بنیادی و مکانیسم‌های دخیل در تشکیل منافذ ایجاد شده‌اند و (۲) مدل‌های تجربی که با استفاده از پارامترهایی در داده‌های تجربی ایجاد شده‌اند. بسیاری از مطالعات پیشین در مورد انقباض تجربی یا آزمایشگاهی هستند، این مطالعات تخریل را به صورت معادلات خطی، درجه دوم و نمایی پیش‌بینی کرده‌اند (Khallooufi et al., 2009).

دگرذیسی به کار می‌برند که شامل ویژگی‌های مواد هستند. با این حال، این ویژگی‌ها در تحقیقات پیشین موجود نیستند و همچنین این مدل‌ها ماهیت پیچیده‌ای داشته و نیازمند هزینه و زمان هستند. بررسی دقیق مدل‌های نظری و تجربی تخلخل نشانگر ضرورت مدل ساده‌ای هستند که می‌توانند برخی از محدودیت‌های مدل‌های نظری را جبران کرده و از آن‌ها برای محصولات و فرایندهای خشک شدن استفاده کرد. بنابراین هدف این مطالعه، ایجاد یک مدل انقباض واقعی با حداقل استفاده از ضرایب تجربی می‌باشد. مدل ساده‌ای با در نظر گرفتن شیب حرارتی و رطوبت، دمای انتقال شیشه و زمان خشک شدن می‌تواند روشی بالقوه برای پیش‌بینی تغییرات ساختاری در طی خشک شدن باشد. بنابراین، در این مطالعه، یک رویکرد جدید سرعت انقباض معرفی شده است. بنابراین، توجه به این پارامترها در سرعت انقباض، پارامترهای فرایند و ویژگی‌های مواد را در پیش‌بینی دگرذیسی در طی خشک شدن در نظر می‌گیرد. معنای فیزیکی سرعت انقباض بدین صورت است: سرعت سطح خارجی نمونه در طی خشک شدن.

۲- روش انجام تحقیق

• آماده‌سازی نمونه

سیب به عنوان نمونه مورد مطالعه در این تحقیق انتخاب شده است. سیب دارای تخلخل اولیه بالایی بوده و تغییر تخلخل در طی دوره خشک شدن از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. بنابراین، انتظار می‌رود که اندازه‌گیری تجربی تغییرات تخلخل و تأیید مدل پیشنهادی برای این نمونه بهتر باشد. سیب‌های نژاد گلاب که هنوز از یک سوپرمارکت محلی تهیه شده و در دمای ۲ درجه سانتیگراد در داخل یخچال نگهداری شدند. نمونه‌ها از یک جعبه انتخاب شده بودند تا درجه رسیدگی یکسانی داشته باشند. مرحله رسیدگی با استفاده از رفاکومتر مایعات محاسبه گردید (BPTR-100 V3.0). متوسط رسیدگی سیب‌ها برابر 14.20 ± 0.20 بود. محتوای رطوبت اولیه سیب تازه برابر $77 \pm 0.50\%$ wb محاسبه گردید. ۱۰ نمونه برای اندازه‌گیری محتوای رطوبت به کار برده شدند. سیب‌ها از یخچال خارج شده و بعد از شستشو به مدت یک و نیم ساعت در دمای محیط قرار گرفتند. پوست نمونه‌ها گرفته شده و به قطعات گرد با ضخامت ۱۰ میلی‌متر و قطر ۴۰ میلی‌متر برش داده شد. از خشک‌کننده هوای گرم دارای فن استفاده گردید. دمای خشک شدن از ۵۰ الی ۶۵ درجه سانتی‌گراد متغیر بوده و سرعت هوا نیز ۱ متر بر ثانیه تنظیم شد.

• چگالی ذره

چگالی ذره با استفاده از یک پیکنومتر گاز (هلیوم) اندازه‌گیری شد. استفاده از هلیوم برای اندازه‌گیری چگالی غذای مرطوب روشی تأیید شده برای محققان مواد غذایی می‌باشد. ۱۰ بار اندازه‌گیری با استفاده از این ابزار برای محاسبه متوسط مقدار چگالی ذره برای هر نمونه انجام شد (Serenio et al., 2007).

• چگالی توده

چگالی توده با استفاده از حجم توده و جرم آن اندازه‌گیری گردید، چگالی مهره‌های شیشه‌ای از وزن مهره‌های شیشه‌ای مورد نیاز محاسبه گردید (Serenio et al., 2007). فرایند تعیین چگالی مهره‌های شیشه‌ای سه بار تکرار شد. این فرایند با استفاده از تحلیل

این پارامترها کاملاً به فرایند بستگی داشته و در واقع نظریه‌ای بودن مدل‌ها را کاهش داده و به مدل‌های عمومی تبدیل می‌کنند (Ramos et al., 2003). برای رفع این کمبودها، مدل مکانیکی تخلخل توسط گولاتی و داتا ارائه شد. پارامترهای فرایند و ویژگی‌های مواد با استفاده از ویژگی‌های مکانیکی متغیر به منظور تعیین انقباض لحظه‌ای مواد در نظر گرفته شدند. در مدل ساختاری، آن‌ها از یک ماژول کشسانی مبتنی بر رطوبت استفاده کردند که از یانگ و ساکای گرفته شده بود. بررسی آثار یانگ و ساکای نشان می‌دهد که متغیر مبتنی بر رطوبت ماژول کشسانی (E) در دمای اتاق محاسبه شده و به این نتیجه رسید که افزایش E منجر به کاهش محتوای رطوبت می‌شود. متغیر E محاسبه شده در دمای اتاق را نمی‌توان در مواد غذایی در طی خشک شدن با هوای گرم استفاده کرد، زیرا دما بسیار بیشتر از دمای اتاق بوده و در طی خشک شدن تغییر می‌کند. علاوه بر این، در طی مدت خشک شدن، مواد به دلیل دمای بالای ماهیت پلاستیکی داشته و در نتیجه مقدار E باید همواره با کاهش محتوای رطوبت، افزایش یابد. ماژول‌های یانگ (E) همزمان با رسیدن نمونه به فاز شیشه‌ای، افزایش می‌یابد (Khan et al., 2016). ملاحظه پارامترهای مکانیکی در مدل مکانیکی می‌تواند پیش‌بینی دقیقی از دگرذیسی مواد ارائه دهد اما فقدان داده‌های آزمایشگاهی در مورد ویژگی‌های مکانیکی متغیر مواد غذایی گیاهی، استفاده از مدل‌های مکانیکی پیچیده در پیش‌بینی دگرذیسی را دشوار می‌سازد. از آنجایی که مدل‌های مکانیکی به ویژگی‌های مواد غذایی بستگی دارند، تعیین ویژگی‌های مواد برای ایجاد مدل نظری انقباض ضروری می‌باشد. در تحقیقات موجود، مدل‌های نظری بر اساس فرضیات ساده ایجاد شده بودند. این فرضیه‌ها مشکل را ساده‌تر می‌کنند، اما منجر به درک واقع‌گرایانه نمی‌شوند. فرضیه‌های ساده‌ای نیز در مورد رفتار میوه‌ها و سبزیجات وجود دارند که آن‌ها دارای ساختار کشسانی هستند. قانون هوک برای مواد غذایی نیز به کار برده شده است، اما این قانون برای مواد بیولوژیکی صدق نمی‌کند، زیرا در زمینه دگرذیسی‌های گسترده دارای محدودیت‌هایی می‌باشد (Joardder et al., 2013). انقباض میوه‌ها و سبزیجات به ویژگی‌های مکانیکی بستگی دارند. بسیاری از تحقیقات موجود ماژول کشسانی را به عنوان تابعی از محتوای رطوبت در نظر گرفته‌اند. با این حال، ماژول کشسانی نیز به دما و ساختار مواد بستگی دارند. علاوه بر این، ماژول رابطه کشسانی که به طور گسترده در تحقیقات کنونی به کار رفته است، بر اساس داده‌های دریافتی از آزمایشات در دمای اتاق می‌باشد. برای درک بهتر، رابطه دقیق ماژول کشسانی بر اساس داده‌هایی که در طی فرایند خشک شدن ایجاد شده‌اند، نیاز است، همچنین مقدار نسبت پواسون برای بسیاری از موارد به کار رفته است. این مقادیر به شدت به محتوای رطوبت و تغییرات دما در طی فرایند خشک شدن بستگی دارند. استفاده از نسبت نامناسب پواسون ممکن است منجر به پیش‌بینی نادرست دگرذیسی گردد، بنابراین توجه به نسبت دقیق پواسون برای میوه‌ها و سبزیجات مختلف برای پیش‌بینی بهتر انقباض مواد در طی خشک شدن ضروری می‌باشد (Halder et al., 2011). از بحث‌های فوق می‌توان بدین نتیجه رسید که مدل‌های تجربی و نظری دارای محدودیت‌های خاص خود هستند. مدل‌های تجربی قادر به درک دقیقی از پدیده‌های فیزیکی مربوط به انقباض نبوده و دارای کاربرد اندکی هستند. این موارد را نمی‌توان به سایر مواد در شرایط خشک شدن مختلف نسبت داد. مدل‌های نظری فرایند انتقال را برای پیش‌بینی

انقباض را می‌توان از جریان رطوبت و غلظت متوسط رطوبت در طی ضرب عامل نسبت چگالی تعیین کرد (Bolz et al., 1976). در نظر گرفتن دمای انتقال شیشه منجر به در نظر گرفتن تغییر فاز از حالت براق به حالت کشسان در طی خشک شدن می‌شود. بنابراین، در نظر گرفتن این دو پارامتر در سرعت انقباض منجر به دخالت دادن پارامترهای فرایند و ویژگی‌های مواد در پیش بینی دگرذیسی در طی خشک شدن می‌گردد. همچنین، نسبت چگالی نیز به منظور پیش بینی نسبت انقباض نمونه به دلیل جابجایی آب در طی دوره خشک شدن استفاده شده است. نسبت چگالی، نسبت چگالی آب و چگالی ذره می‌باشد. چگالی ذره در این مطالعه به عنوان چگالی مواد متشکل از آب و مواد جامد تعریف می‌شود. میزان انقباض به چگالی ذرات بستگی دارد و فرض می‌شود که اگر نسبت چگالی نزدیک به یکسانی باشد، انقباض کامل خواهد بود (Vega-Mercado et al., 2001).

• پراکندگی رطوبت موثر

پراکندگی به ویژگی‌های نمونه از جمله تخلخل اولیه، محتوای رطوبت و پارامترهای فرایند از جمله دمای هوای خشک کننده بستگی دارد. پارامترهای فرایند را می‌توان نسبت به ویژگی‌های نمونه به آسانی کنترل نمود. چندین نویسنده گزارش کرده‌اند که ضریب پراکندگی تابعی از دمای نمونه و محتوای رطوبت است. باینی و لانگرایش اعلام کرده‌اند که انقباض منجر به کاهش طول مسیر برای پراکندگی گردیده و این امر منجر به افزایش پراکندگی می‌شود. پراکندگی موثر به دلیل شیب رطوبت و دما در طول فرایند متغیر می‌باشد. علاوه بر این، رطوبت در غذاها توزیع فضایی ناهمگونی داشته و تغییرات قابل توجهی را از نظر ویژگی‌ها و واکنش پذیری نشان می‌دهد که این موارد به محیط‌های مولکولی بستگی دارند. بر اساس محتوای رطوبت و دما، پراکندگی موثر (Deff) را می‌توان به عنوان تابعی از دما و رطوبت (db) بیان نمود که در معادله زیر نشان داده شده است (Batista et al., 2007):

$$Deff = \frac{\left(D_{ref} e^{\frac{-E_a}{RT}} + D_{ref} \left(\frac{b}{b_0} \right)^2 \right)}{2}$$

که در آن:

Dref = پراکندگی مرجع (m²/s)

Ea = انرژی فعالسازی پراکندگی آب (J/mol)

X0 و X = محتوای رطوبت اولیه و لحظه ای

و D0 = ثابت ادغام بوده و به عنوان یک فاکتور تناوب در بررسی معادله آرنهوس مورد خطاب قرار می‌گیرد که در واحد m²/sec بیان می‌شود. انرژی فعالسازی از شیب ln(Dref) نسبت به نمودار (1/T) در شکل ۱ نشان داده شده است.

گر چگالی صورت گرفت (Quantacrome Autotap)، استاندارد (ASTM B527).

• دمای انتقال شیشه

نمونه‌های گلاب کهزن با وزن حدود ۱۰ میلی گرم در داخل ظروف آلومینیومی (۲۰ میکرولیتر) قرار داده شدند، وزن نمونه بعد از بسته‌بندی شدن محاسبه شد. در این مطالعه، DSC Q100 (TA Instruments، آمریکا)، برای اندازه‌گیری دمای انتقال شیشه و N₂ (50 ml/min) به عنوان گاز پاکسازی به کار گرفته شد. بعد از خنک کردن نمونه تا دمای 65- درجه سانتیگراد، منحنی‌های تحلیل گرمایی با گرم کردن نمونه به ۱۰۰ درجه سانتیگراد برای محاسبه دمای انتقال شیشه محاسبه شد.

• مدل ریاضی

فرضیه‌های زیر در فرمول‌های ریاضی به کار برده شده‌اند:

- ۱- نمونه به عنوان ماده همگن در نظر گرفته می‌شود.
- ۲- دمای یکپارچه و توزیع رطوبت در داخل نمونه وجود دارد.
- ۳- ویژگی‌های ترموفیزیکی با توجه به رطوبت مواد غذایی تغییر می‌کنند.
- ۴- رطوبت از داخل نمونه بواسطه مکانیسم‌های پخش به خارج نمونه منتقل می‌شود.
- ۵- هوای خشک کننده به طور مداوم و با سرعت ثابت به نمونه اعمال می‌شود.
- ۶- انتقال حرارت در داخل نمونه فقط به روش القایی انجام می‌گیرد.

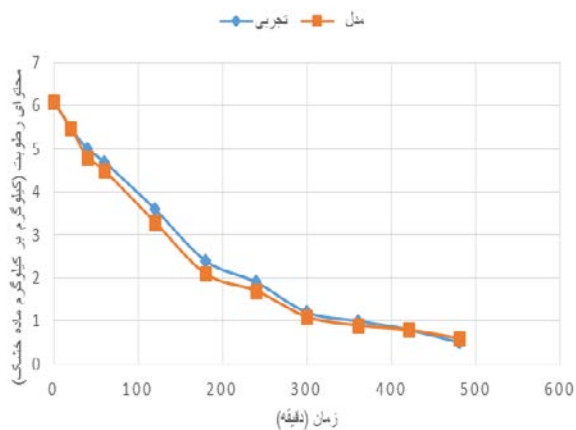
• تخلخل

در مرحله اول خشک شدن، انقباض حجمی به آب خارج شده نزدیک تر می‌باشد، زیرا در این مرحله از خشک شدن فقط آب از دست می‌رود. با این حال، انقباض بیشتر در بخش‌های بعدی خشک شده رخ می‌دهد که این امر به دلیل فشار در داخل سلول‌ها می‌باشد. کاهش فشار turgor نتیجه انتقال حجم بالای از آب سلول در بخش پایانی خشک شدن می‌باشد. تنش ایجاد شده توسط شیب رطوبت در طی دوره خشک شدن رخ می‌دهد، این در حالی است که تنش حرارتی در مراحل اولیه چشمگیرتر است. به عبارت دیگر، در آغاز خشک شدن، شیب دما در داخل نمونه چشمگیر بوده و این امر منجر به تنش حرارتی می‌شود. با پیشرفت خشک شدن، شیب دما کاهش یافته و این امر تأثیری بر انقباض محتوا ندارد. می‌توان بیان کرد که در مرحله پایان خشک شدن، تقریباً کل نمونه به دمای ثابتی می‌رسد که به دمای هوای خشک کننده نزدیک است. در نتیجه، در آن مرحله حرارت منتقل شده به سطح منجر به تبخیر رطوبت می‌گردد. بنابراین تنش ایجاد شده توسط شیب رطوبت یکی از عوامل اصلی انقباض در طی خشک شدن می‌باشد (Białobrzewski et al., 2006). ویژگی‌های مکانیکی متغیر از جمله مازول یانگ و نسبت پواسون در طول دوره خشک شدن در تحقیقات پیشین وجود ندارند. مدل‌های نظری برای حل مدل‌های ریاضی به این موارد نیاز دارند. فقدان پارامترهای مکانیکی که با شرایط خشک شدن تغییر می‌یابند، منجر به تأیید نادرست مدل‌های نظری انقباض می‌شوند. در این مطالعه، یک مدل پیش بینی تخلخل با در نظر داشتن شیب حرارتی و رطوبت، دمای انتقال شیشه و نسبت چگالی ارائه شده است. سرعت انقباض به عنوان تابعی از پراکندگی موثر، دمای انتقال شیشه برای پیش بینی تخلخل ایجاد شده است. سرعت

۳- نتایج

پراکنش محتوای متوسط رطوبت

مقایسه محتوای رطوبت به دست آمده از آزمایشات و شبیه سازی در شکل ۲ نشان داده شده است. در اولین دوره کاهش، میزان خشک شدن با کاهش محتوای رطوبت کاهش یافته است و این امر به دلیل مقاومت داخلی برای انتقال رطوبت و کاهش جریان حرارت می باشد.

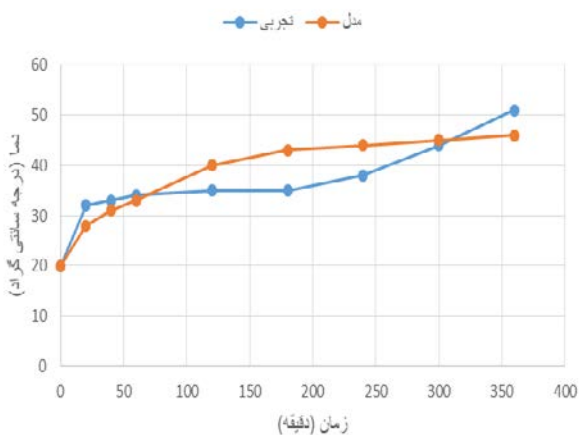


شکل ۲- پروفایل رطوبت نمونه در زمان خشک شدن

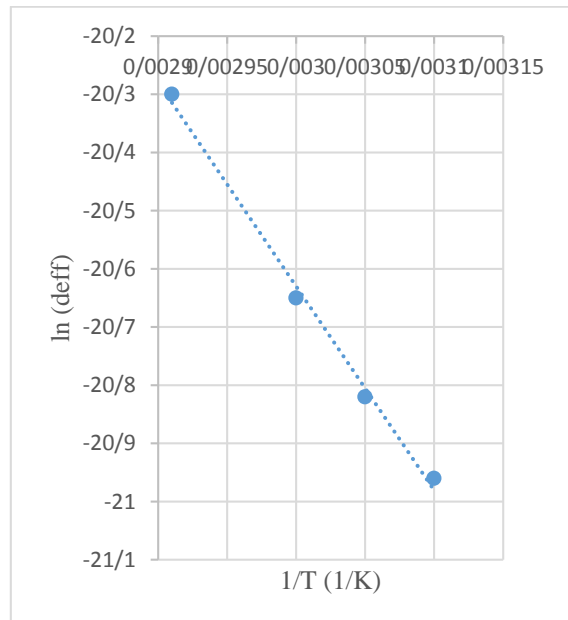
در دوره دوم کاهش، رطوبت از بخش های عمیق تر به سطح منتقل می شود که این امر به دلیل پراکندگی ناشی از شیب غلظت می باشد. میزان پراکندگی به دلیل انقباض و شیب کمتر رطوبت کاهش یافته و زمان خشک شدن طولانی می گردد. بررسی ها نشان می دهند که به منظور از بین بردن ۱۰٪ آب باقیمانده در میوه ها، به مدت زمانی برابر از بین بردن ۹۰٪ آب اولیه نیاز است. به منظور تعیین سطح تعامل بین مقادیر پیشنهادی و نتایج تجربی، ضریب ارتباط (R^2) تعیین شد. مقدار R^2 برابر 0.9959 تعیین شد که نشانگر تطابق خوب با مدل و داده های تجربی می باشد.

دما

نمودار دمای نمونه در آزمایشات و مدل در زمان فرایند خشک شدن در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- نمایه دمایی نمونه در زمان خشک شدن



شکل ۱- تعیین انرژی فعال سازی بافت سیب

از این نمودار، مقادیر $D_0=0.0004$ و $E_a=33.6\text{KJ/mol}$ به دست آمد. در معادله مذکور، b_0/b نسبت ضخامت و D_{ref} نیز پراکندگی موثر مرجع و b_0 و b نیز نیم ضخامت مواد به ترتیب در زمان ۰ و t هستند. شایان ذکر است که پارامترهای b_0 و b به محتوای رطوبت بستگی دارند. کومار و همکاران نحوه ارتباط b_0 و b با محتوای رطوبت را اعلام کرده اند.

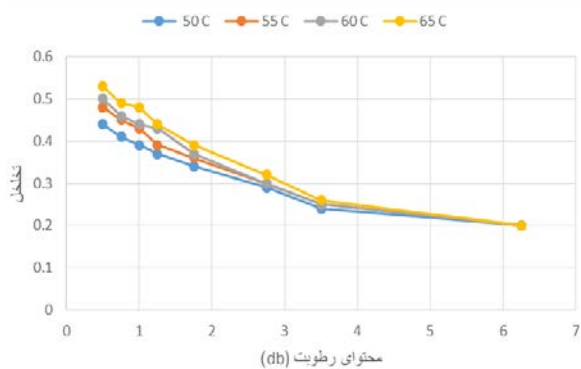
• ضرایب انتقال حرارت و حجم

محاسبه ضرایب انتقال حرارت و حجم بر اساس تحقیقات پیشین و شرایط تجربی به کار برده شده در این مطالعه هستند. محاسبه این ضرایب از رابطه نیمه تجربی عدد ناسلت، عدد رینولدز و عدد پراندتل دقیق می باشد، زیرا بسیاری از مدل های خشک شدن موجود در تحقیقات پیشین از این روابط استفاده کرده اند.

• روندهای شبیه سازی

شبیه سازی با استفاده از COMSOL Multiphysics Win/Linux 5.6.0.280 انجام شد. این نرم افزار تمام مراحل فرایند مدلسازی از جمله تعریف ساختاری هندسی، مشبک سازی، تعیین ابعاد فیزیکی، حل و نمایش نتایج را تسهیل می کند. COMSOL Multiphysics می تواند ویژگی های متغیری که تابعی از متغیرهای مستقل هستند را مدیریت کند. حالت تقارن دوبعدی نیز برای تسهیل روند شبیه سازی در نظر گرفته شده است. میزان اثر سه بعدی اندکی وجود خواهد داشت که می توان آن را نادیده گرفت، همچنین در نظر گرفتن سه بعدی منجر به پیچیده تر شدن مساله می شود. بنابراین، مدلسازی دو بعدی به منظور پیش بینی انتقال لحظه ای حجم و حرارت و تشکیل منفذ در طی فرایند خشک شدن مورد استفاده قرار گرفته است. رویکرد ALE با انتقال ماژول مش نرم افزار به منظور پیش بینی انقباض به کار برده شده است. از یک ایستگاه کاری مجهز به پردازنده Core i5 و ۸ گیگابایت رم استفاده شده است که دارای گام های زمانی ۱۰ ثانیه تا ۳۶۰۰۰ ثانیه می باشد.

مشاهده نمود که تخلخل با افزایش دمای هوای خشک کننده افزایش می‌یابد.



شکل ۵- تاثیر دمای خشک بر تخلخل سیب

در دماهای بالاتر، حالت براق و کشسان بر روی سطح خارجی مشاهده می‌شود و این امر به دلیل محتوای رطوبت کمتر می‌باشد که پوسته سفت متخلخل ایجاد می‌کند. در نتیجه رطوبت سطح به سرعت کاهش یافته و فشارهای داخلی در بافت ایجاد می‌شوند و تاثیری منفی بر انقباض داشته و منجر به ساختار داخلی به شدت متخلخل می‌شود، این پدیده را سفتی پوسته می‌نامند. نتایج تجربی از مطالعات مختلف نشان می‌دهند که تخلخل با دما افزایش می‌یابد. در مورد موز، در دماهای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتیگراد، بیشترین تخلخل مربوط به دمای ۵۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. برای سیب‌زمینی و بادمجان بیشترین تخلخل در دمای ۷۰ درجه به دست آمد. زمان خشک شدن یکی از عواملی است تاثیر قابل توجهی بر از بین رفتن سلول‌ها در طی فرایند خشک شدن دارد. بنابراین، دمای پایین خشک شدن (مدت زمان طولانی‌تر) می‌تواند منجر به آسیب ساختاری به محصول غذایی گردد. حالت کشسانی در بخش داخلی نمونه همچنان وجود داشته و فقط لایه نازکی از نمونه در حالت کشسان باقی می‌ماند. مدت زمان طولانی خشک شدن منجر به از بین رفتن داخلی نمونه می‌گردد. علاوه بر این، دمای خشک شدن عاملی ضروری برای انقباض است، دمای بالا منجر به میزان بالای انقباض می‌گردد. با این حال، از بین رفتن در دمای پایین بیشتر می‌باشد، زیرا نمونه برای مدت طولانی در شرایط خشکی باقی می‌ماند. مشاهده می‌شود که تفاوت بین دمای بالا و پایین با تفاوت دما نسبتی ندارد، بنابراین زمان خشک شدن طولانی منجر به از بین رفتن بافت‌های گیاهی حتی در صورت خشک شدن در دمای پایین می‌گردد، زیرا بافت‌های گیاهی دارای دمای انتقال شیشه بسیار پایینی می‌باشد.

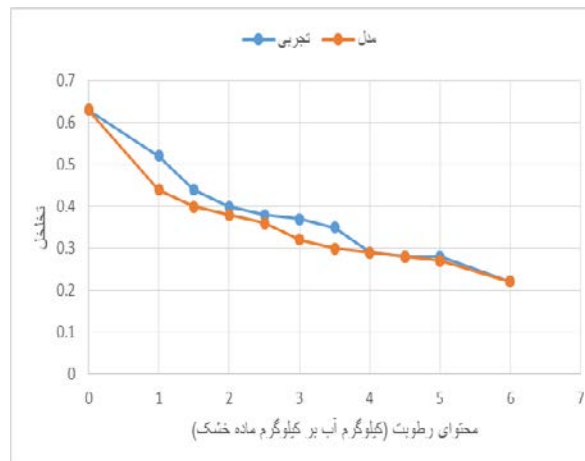
تاثیر سرعت هوا

محدوده‌ای از سرعت‌های هوا بین ۰٫۵ و ۱٫۰ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تاثیر سرعت هوا بر تخلخل در شکل ۶ نشان داده شده است.

نتایج شبیه‌سازی شده دما با داده‌های تجربی مقایسه شده و تطابق بسیار خوبی به دست آمد (مقدار R^2 برابر ۰٫۷۵۴۸).

تخلخل

شکل ۴ تخلخل نمونه در مقایسه با محتوای رطوبت را نشان می‌دهد. نتایج تجربی و پیش بینی شده نشان می‌دهند که تخلخل در ابتدا به تدریج افزایش یافته و سپس در مراحل پایانی خشک شدن با سرعت بیشتری افزایش می‌یابد. تخلخل متوسط اولیه برابر ۰٫۲۲ بوده و تخلخل پایانی به ۰٫۶۳ رسیده است. نتایج شبیه سازی شده تخلخل با داده‌های تجربی مقایسه شده و مقدار R^2 برابر ۰٫۹۴۹۳ محاسبه شد.



شکل ۴- تخلخل ورقه سیب در محتوای رطوبت مختلف در طی خشک شدن

این روند برای غذاهای گیاهی متعدد از جمله سیب‌زمینی، هویج و سیب گزارش شده است. با این حال با توجه به نمودار ۴ انحراف افزایشی بین نتایج شبیه سازی و نتایج آزمایشگاهی با پیشرفت خشک شدن مشاهده می‌شود. دلیل احتمالی انحراف می‌تواند این باشد که سرعت انقباض برای چگالی توده پیشنهادی در این مطالعه به طور مجزا به تاثیر آب آزاد و آب پیوسته نپرداخته است.

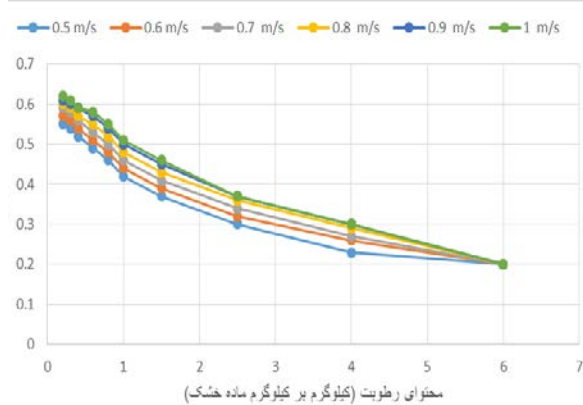
تحلیل حساسیت

یکی از مزایای اصلی مدلسازی، توانایی آن در تخمین تاثیر فرایندهای مختلف و ویژگی های نمونه بر پارامترهای کیفی بدون انجام آزمایشات پیچیده و پرهزینه می‌باشد. در این بخش، تاثیر دمای هوای خشک کننده، سرعت هوا و ضخامت نمونه بر تخلخل نمونه مورد بررسی قرار گرفته است.

تاثیر دمای هوا

محدوده دمایی (۵۰ تا ۶۵ درجه سانتی گراد) در نظر گرفته شد. زیرا این دماها در خشک کردن با هوا معمول هستند. دمای خشک شدن بر ساختار داخلی و بیرونی نمونه های غذایی تاثیر داشته و تخلخل یا عدم تخلخل ساختارهای داخلی و خارجی را تعیین می‌کند. شکل ۵ تاثیر دماهای مختلف بر تخلخل نمونه سیب را نشان می‌دهد و می‌توان

فرایند خشک شدن گردد. انقباض مواد غذایی به عوامل متعددی از جمله ویژگی‌های مواد، ریزساختار، ویژگی‌های مکانیکی و شرایط فرایند بستگی دارد. مدل‌های تجربی را می‌توان به سرعت ایجاد نموده که تاثیر بالایی دارند. اما، آن‌ها تغییرات فیزیکی فرایند را نشان نمی‌دهند. از سوی دیگر، مدل‌های مبتنی بر فیزیک نه تنها در خشک کردن مواد غذایی بلکه در سایر صنایع غذایی به عنوان مدل‌های پیش‌بینی به کار برده می‌شوند. با این حال، مدل نظری پیش‌بینی تخلخل اقدامی پیچیده است که این امر به دلیل نیازمندی به تعداد ویژگی‌های متعددی می‌باشد که در شرایط خشک شدن تغییر می‌کنند. در این مطالعه، به منظور مقابله با محدودیت‌های مدل‌های تجربی و نظری، مدل انقباض ساده‌ای بر اساس سرعت انقباض ایجاد شد که عوامل اصلی موثر بر تخلخل را در نظر می‌گیرند. نتایج نشان می‌دهند که مدل پیشنهادی به طور دقیق انقباض و تخلخل را پیش‌بینی می‌کند و این نشان می‌دهد که انقباض شبیه سازی شده سیب با نتایج تجربی در ارتباط می‌باشد. برای مثال، تخلخل از شبیه سازی نمونه سیب برابر ۰.۶ می‌باشد که با داده‌های آزمایشگاهی مطابقت دارد. تاثیر دمای هوای خشک کننده و سرعت هوا نیز مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان می‌دهند که پارامترهای فرایند (از جمله سرعت هوا و دما) تاثیر قابل توجهی بر تخلخل نهایی ماده غذایی خشک شده دارند. مدل تخلخل پیشنهادی در این مطالعه نیازمند کمترین پارامترهای تجربی هستند. تحقیقات آتی می‌توانند از این مدل برای بررسی سایر مواد غذایی استفاده کنند، زیرا ساختار مواد غذایی مختلف، متفاوت بوده و این امر بر مکانیسم تشخیص تخلخل تاثیر دارد. انواع مختلفی از شرایط فرایند را می‌توان در تحقیقات آتی به کار برد تا مدلی کلی برای تشکیل منافذ ایجاد شود.



شکل ۶- تاثیر سرعت هوا بر تخلخل ورقه های سیب در طی خشک شدن

از شکل ۶ می‌توان مشاهده کرد که تخلخل با افزایش سرعت هوا افزایش می‌یابد. راتی و همکاران همچنین به این نتیجه رسیدند که افزایش سرعت هوا منجر به افزایش تخلخل سیب زمینی، سیب و هویج می‌شود. این امر ممکن است به دلیل سرعت بالای خشک شدن در سرعت بالا باشد. در نتیجه، رطوبت سطحی به سرعت کاهش یافته و استرس داخلی در بافت ایجاد شده و منجر به فضای داخلی متخلخل تر می‌شود.

۴- نتیجه گیری

کیفیت فیزیکی مواد غذایی خشک شده به میزان دگرذیسی در طی خشک شدن بستگی دارد. انقباض نیز تاثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های مکانیکی و بافتی و همچنین سرعت و سینتیک خشک شدن دارد. پیش‌بینی دقیق انقباض می‌تواند منجر به کیفیت بهتر غذا و طراحی بهینه

منابع

- Van der Sman, R. G. M.; van der Goot, A. J. The Science of Food Structuring. *Soft Matter* 2009, 5, 501-510.
- De Kruif, C. G. Concluding Remarks: The Future of Soft Matter and Food Structure. *Faraday Discuss.* 2012, 158, 523-527.
- Kumar, C.; Joardder, M. U. H.; Farrell, T. W.; Karim, M. A. Multiphase Porous Media Model for Intermittent Microwave Convective Drying (IMCD) of Food. *Int. J. Therm. Sci.* 2016, 104, 304-314.
- Rahman, M. M.; Joardder, M. U. H.; Khan, M. I. H.; Pham, N. D.; Karim, M. A. Multi-Scale Model of Food Drying: Current Status and Challenges. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2018, 58, 858-876.
- Rahman, M. M.; Gu, Y. T.; Karim, M. A. Development of Realistic Food Microstructure considering the Structural Heterogeneity of Cells and Intercellular Space. *Food Struct.* 2018, 15, 9-16.
- Senadeera, W.; Bhandari, B. R.; Young, G.; Wijesinghe, B. Modeling Dimensional Shrinkage of Shaped Foods in Fluidized Bed Drying. *J. Food Process. Preserv.* 2005, 29, 109-119. DOI: 10.1111/j.1745-4549.2005.00017.x.
- Kumar, C.; Farrell, T. W.; M.U.H, J.; Millar, G. J.; Karim, M. A. A Mathematical Model for Intermittent Microwave Convective (IMCD) Drying of Food Materials. *Drying Technol.* 2015, 34, 962-973.
- Ghnimi, S.; Umer, S.; Karim, A.; Kamal-Eldin, A. Date Fruit (*Phoenix Dactylifera L.*): An Underutilized Food Seeking Industrial Valorization. *NFS J.* 2017, 6, 1-10.
- Kumar, C.; Joardder, M. U. H.; Farrell, T. W.; Karim, M. A. Investigation of Intermittent Microwave Convective Drying (IMCD) of Food Materials by a Coupled 3D Electromagnetics and Multiphase Model. *Drying Technol.* 2018, 36, 736-750.
- Aprajeta, J.; Gopirajah, R.; Anandharamakrishnan, C. Shrinkage and Porosity Effects on Heat and Mass Transfer during Potato Drying. *J. Food Eng.* 2015, 144, 119-128.

- Mahiuddin, M.; Khan, M. I. H.; Kumar, C.; Rahman, M. M.; Karim, M. A. Shrinkage of Food Materials during Drying: Current Status and Challenges. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2018, 17, 1113–1126.
- Karathanos, V. T.; Kanellopoulos, N. K.; Belessiotis, V. G. Development of Porous Structure during Air Drying of Agricultural Plant Products. *J. Food Eng.* 1996, 29, 167–183.
- Karunasena, H. C. P.; Senadeera, W.; Brown, R. J.; Gu, Y. T. A Particle Based Model to Simulate Microscale Morphological Changes of Plant Tissues during Drying. *Soft Matter* 2014, 10, 5249–5268.
- Lozano, J. E.; Rotstein, E.; Urbicain, M. J. Shrinkage, Porosity and Bulk Density of Foodstuffs at Changing Moisture Contents. *J. Food Sci.* 1983, 48, 1497–1502.
- Zogzas, N. P.; Maroulis, Z. B.; Marinou-Kouris, D. Densities, Shrinkage and Porosity of Some Vegetables during Air Drying. *Drying Technol.* 1994, 12, 1653–1666.
- Khalloufi, S.; Almeida-Rivera, C.; Bongers, P. A Theoretical Model and Its Experimental Validation to Predict the Porosity as a Function of Shrinkage and Collapse Phenomena during Drying. *Food Res. Int.* 2009, 42, 1122–1130.
- Lozano, J. E.; Rotstein, E.; Urbicain, M. J. Total Porosity and Open-Pore Porosity in the Drying of Fruits. *J. Food Sci.* 1980, 45, 1403–1407.
- Perez, M. G. R.; Calvelo, A. Modeling the Thermal Conductivity of Cooked Meat. *J. Food Sci.* 1984, 49, 152–156.
- Rapusas, R. S.; Driscoll, R. H. Thermophysical Properties of Fresh and Dried White Onion Slices. *J. Food Eng.* 1995, 24, 149–164.
- Bhatnagar, S.; Hanna, M. A. Modification of Microstructure of Starch Extruded with Selected Lipids. *Starch/Stärke*. 1997, 49, 12–20.
- Hutchinson, R. J.; Siodlak, G. D. E.; Smith, A. C. J. Influence of Processing Variables on the Mechanical Properties of Extruded Maize. *J. Mater. Sci.* 1987, 22, 3956–3962.
- Huang, C. T.; Clayton, J. T. Relationships between Mechanical Properties and Microstructure of Porous Foods: Part I. A Review. *Engineering of Food. Vol. 1. Phys. Prop. Process Contr.* 1990, 1, 352–360.
- Madamba, P. S.; Driscoll, R. H.; Buckle, K. A. Shrinkage, Density and Porosity of Garlic during Drying. *J. Food Eng.* 1994, 23, 309–319.
- Kilpatrick, P. W. Lowe, E.; Van Arsdell, W. B. Tunnel Dehydrators for Fruits and Vegetables. *Advances in Food Research*, E. M. Mrak, G.F. Stewart, Eds. Academic Press: New York; 1955, 6, 313–372.
- Rahman, M. S.; Perera, C. O.; Chen, X. D.; Driscoll, R. H.; Potluri, P. L. Density, Shrinkage and Porosity of Calamari Mantle Meat during Air Drying in a Cabinet Dryer as a Function of Water Content. *J. Food Eng.* 1996, 30, 135–145.
- Shafiur Rahman, M. A Theoretical Model to Predict the Formation of Pores in Foods during Drying. *Int. J. Food Prop.* 2003, 6, 61–72.
- Mayor, L.; Sereno, A. M. Modelling Shrinkage During Convective Drying of Food Materials: A Review. *J. Food Eng.* 2004, 61, 373–386.
- Madiouli, J.; Sghaier, J.; Orteu, J.-J.; Robert, L.; Lecomte, D.; Sammouda, H. Non-Contact Measurement of the Shrinkage and Calculation of Porosity During the Drying of Banana. *Drying Technol.* 2011, 29, 1358–1364.
- Gulati, T.; Datta, A. K. Mechanistic Understanding of Case-Hardening and Texture Development during Drying of Food Materials. *J. Food Eng.* 2015, 166, 119–138.
- Nghia, P. D.; Joardder, M. U. H.; Abesingse, N.; Ghnimi, S.; Karim, A. Effect of Process Parameters on Nutritional Quality in Intermittent Drying. In *Intermittent and Nonstationary Drying Technologies: Principles and Applications* Karim A., Law. C. L., Ed. CRC Press: Boca Raton, FL, 2017.
- Ramos, I. N.; Brandão, T. R. S.; Silva, C. L. M. Structural Changes During Air Drying of Fruits and Vegetables. *Food Sci. Technol. Int.* 2003, 9, 201–206.
- Devahastin, S.; Niamnuy, C. Invited Review: Modelling Quality Changes of Fruits and Vegetables during Drying: A Review. *Int. J. Food Sci. Technol.* 2010, 45, 1755–1767.
- Joardder, M. U. H.; Kumar, C.; Karim, M. A. Food Structure: Its Formation and Relationships with Other Properties. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2017, 57, 1190–1205.
- Joardder, M. U. H.; Karim, A.; Brown, R. J.; Kumar, C. Porosity: Establishing the Relationship between Drying Parameters and Dried Food Quality. Springer: Switzerland; 2016.

- Qiu, J.; Khalloufi, S.; Martynenko, A.; Van Dalen, G.; Schutyser, M.; Almeida-Rivera, C. Porosity, Bulk Density, and Volume Reduction during Drying: Review of Measurement Methods and Coefficient Determinations. *Drying Technol.* 2015, 33, 1681–1699.
- Yang, H.; Sakai, N.; Watanabe, A. Drying Model with Non-isotropic Shrinkage Deformation Undergoing Simultaneous Heat and Mass Transfer. *Drying Technol.* 2001, 19, 1441–1460.
- Khan, M. I. H.; Wellard, R. M.; Nagy, S. A.; Joardder, M. U. H.; Karim, M. A. Investigation of Bound and Free Water in Plant-Based Food Material Using NMR T2 Relaxometry. *Innovative Food Sci. Emerging Technol.* 2016, 38, 252–261.
- Niamnuy, C.; Devahastin, S.; Soponronnarit, S.; Vijaya Raghavan, G. S. Modeling Coupled Transport Phenomena and Mechanical Deformation of Shrimp During Drying in a Jet Spouted Bed Dryer. *Chem. Eng. Sci.* 2008, 63, 5503–5512. DOI: 10.1016/j.ces. 2008.07.031.
- Llave, Y.; Takemori, K.; Fukuoka, M.; Takemori, T.; Tomita, H.; Sakai, N. Mathematical Modeling of Shrinkage Deformation in Eggplant Undergoing Simultaneous Heat and Mass Transfer During Convection-Oven Roasting. *J. Food Eng.* 2016, 178, 124–136. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2016. 01.013.
- Khan, M. I. H.; Joardder, M. U. H.; Kumar, C.; & Karim, M. A. Multiphase porous media modelling: A novel approach to predicting food processing performance. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2018, 58, 528–546.
- Joardder, M. U. H.; Kumar, C.; Brown, R. J.; Karim, M. A. A Micro-Level Investigation of the Solid Displacement Method for Porosity Determination of Dried Food. *J. Food Eng.* 2015, 166, 156–164.
- Sereno, A. M.; Silva, M. A.; Mayor, L. Determination of Particle Density and Porosity in Foods and Porous Materials with High Moisture Content. *Int. J. Food Prop.* 2007, 10, 455–469.
- Rahman, M. S.; Al-Amri, O. S.; Al-Bulushi, I. M. Pores and Physico-chemical Characteristics of Dried Tuna Produced by Different Methods of Drying. *J. Food Eng.* 2002, 53, 301–313.
- Kumar, C.; Millar, G. J.; Karim, M. A. Effective Diffusivity and Evaporative Cooling in Convective Drying of Food Material. *Drying Technol.* 2015, 33, 227–237.
- Joardder, M. U. H.; Brown, R. J.; Kumar, C.; Karim, M. A. Effect of Cell Wall Properties on Porosity and Shrinkage of Dried Apple. *Int. J. Food Prop.* 2015, 18, 2327–2337.
- Joardder, M. H.; Karim, A.; Kumar, C.; Brown, R. Relationship Between Drying Conditions, Pore Characteristics, and Food Quality. In *Porosity*. Springer International Publishing, 2016; p. 65–68.
- Lewicki, P. P.; Pawlak, G. Effect of Drying on Microstructure of Plant Tissue. *Drying Technol.* 2003, 21, 657–683.
- Jayaraman, K. S.; Gupta, D. K. D.; Rao, N. B. Effect of Pretreatment with Salt and Sucrose on the Quality and Stability of Dehydrated Cauliflower. *Int. J. Food Sci. Technol.* 1990, 25, 47–60.
- Joardder, M. U. H.; Kumar, C.; Karim, M. A. Prediction of Porosity of Food Materials During Drying: Current Challenges and Future Directions. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2017, 1–12.
- Johari, G. P.; Hallbrucker, A.; Mayer, E. The Glassliquid Transition of Hyperquenched Water. *Nature* 1987, 330, 552–553.
- Bialobrzewski, I. Simultaneous Heat and Mass Transfer in Shrinkable Apple Slab During Drying. *Drying Technol.* 2006, 24, 551–559.
- Cengel, Y. A.; Boles, M. A. *Thermodynamics: an Engineering Approach*. McGraw-Hill Higher Education: 2006.
- Mattea, M.; Urbicain, M. J.; Rotstein, E. Prediction of Thermal Conductivity of Vegetable Foods by the Effective Medium Theory. *J. Food Sci.* 1986, 51, 113–115.
- Bolz, R. E.; Tuve, G. L. *Handbook of Tables for Applied Engineering Science*, 2nd ed.; CRC Press: Cleveland, 1976.
- Vega-Mercado, H.; Marcela Gongora-Nieto, M.; Barbosa-Canovas, G. V. Advances in Dehydration of Foods. *J. Food Eng.* 2001, 49, 271–289.
- Batista, L. M.; da Rosa, C. A.; Pinto, L. A. A Diffusive Model with Variable Effective Diffusivity Considering Shrinkage in Thin Layer Drying of Chitosan. *J. Food Eng.* 2007, 81, 127–132.
- Hassini, L.; Azzouz, S.; Peczkalski, R.; Belghith, A. Estimation of Potato Moisture Diffusivity from Convective Drying Kinetics with Correction for Shrinkage. *J. Food Eng.* 2007, 79, 47–56.
- Karim, M. A.; Hawlader, M. N. A. Mathematical Modelling and Experimental Investigation of Tropical Fruits Drying. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2005, 48, 4914–4925.

- Chandra Mohan, V. P.; Talukdar, P. Three Dimensional Numerical Modeling of Simultaneous Heat and Moisture Transfer in a Moist Object Subjected to Convective Drying. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2010, 53, 4638–4650.
- Bains, R.; Langrish, T. A. G. Choosing an Appropriate Drying Model for Intermittent and Continuous Drying of Bananas. *J. Food Eng.* 2007, 79, 330–343.
- Khan, M. I. H.; Kumar, C.; Joardder, M. U. H.; Karim, M. A. Determination of Appropriate Effective Diffusivity for Different Food Materials. *Drying Technol.* 2016, 35, 335–346.
- Mills, A. F. *Basic Heat and Mass Transfer*. Massachusetts: Irwin; 1995.
- Joardder, M. U. H.; Kumar, C.; Karim, M. A.; Brown, R. J. Determination of Effective Moisture Diffusivity of Banana Using Thermogravimetric Analysis. Paper presented at International Conference on Mechanical Engineering, Dhaka, Bangladesh, 2013.
- Joardder, M. U. H.; Kumar, C.; Karim, M. A. Better Understanding of Food Material on the Basis of Water Distribution Using Thermogravimetric Analysis. Paper presented at International Conference on Mechanical, Industrial and Materials Engineering, Rajshahi, Bangladesh, 2013.
- Halder, A.; Dhall, A.; Datta, A. K. Modeling Transport in Porous Media with Phase Change: Applications to Food Processing. *J. Heat Transf.* 2011, 133, 031010.
- Srikiatden, J.; Roberts, J. S. Moisture Transfer in Solid Food Materials: A Review of Mechanisms, models, and Measurements. *Int. J. Food Prop.* 2007, 10, 739–777.
- Karathanos, V. T.; Anglea, S. A.; Karel, M. Structural Collapse of Plant Materials During Freeze-Drying. *J. Therm. Anal.* 1996, 47, 1451–1461.
- Khan, M. I. H.; Wellard, R. M.; Nagy, S. A.; Joardder, M.; Karim, M. Experimental Investigation of Bound and Free Water Transport Process During Drying of Hygroscopic Food Material. *Int. J. Therm. Sci.* 2017, 117, 266–273.
- Khan, M. I. H.; Nagy, S. A.; Karim, M. A. Transport of Cellular Water During Drying: An Understanding of Cell Rupturing Mechanism in Apple Tissue. *Food Res. Int.* 2018, 105, 772–781.
- Khan, M. I. H.; Karim, M. Cellular Water Distribution, Transport, and Its Investigation Methods for Plant-based Food Material. *Food Res. Int.* 2017, 99, 1–14.
- Wang, N.; Brennan, J. G. Changes in Structure, Density and Porosity of Potato During Dehydration. *J. Food Eng.* 1995, 24, 61–76.
- Rahman, M. S.; Al-Zakwani, I.; Guizani, N. Pore Formation in Apple During Air-Drying as a Function of Temperature: Porosity and Pore-Size Distribution. *J. Sci. Food Agric.* 2005, 85, 979–989.
- Sturm, B.; Hofacker, W. C.; Hensel, O. Optimizing the Drying Parameters for Hot-Air-Dried Apples. *Drying Technol.* 2012, 30, 1570–1582.
- Aguilera, J. M. and D.W. Stanley. *Microstructural Principles of Food Processing and Engineering*, 2nd ed. Aspen publishers, Inc.: Gaithersburg, Maryland; 1999.
- Mercier, S.; Villeneuve, S.; Mondor, M.; Des Marchais, L. P. Evolution of Porosity, Shrinkage and Density of Pasta Fortified with Pea Protein Concentrate During Drying. *LWT - Food Sci. Technol.* 2011, 44, 883–890.
- Rahman, M. M.; Joardder, M. U. H.; Karim, A. Non-Destructive Investigation of Cellular Level Moisture Distribution and Morphological Changes During Drying of a Plant-Based Food Material. *Biosyst. Eng* 2018, 169, 126–138.
- Souraki, B. A.; Andres, A.; Mowla, D. Mathematical Modeling of Microwave-Assisted Inert Medium Fluidized Bed Drying of Cylindrical Carrot Samples. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* 2009, 48, 296–305.
- Katekawa, M. E.; Silva, M. L. C. Study of Porosity Behaviour in Convective Drying of Bananas. Paper presented at Drying 2004 – Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004), Sao Paulo, Brazil, 2004.
- Russo, P.; Adiletta, G.; Matteo, M. D. The Influence of Drying Air Temperature on the Physical Properties of Dried and Rehydrated Eggplant. *Food Bioprod. Process.* 2013, 91, 249–256.
- Karathanos, V.; Anglea, S.; Karel, M. Collapse of Structure During Drying of Celery. *Drying Technol.* 1993, 11, 1005–1023.
- Ratti, C. Shrinkage During Drying of Foodstuffs. *J. Food Eng.* 1994, 23, 91–105.

Comparison of real and modelled apple drying process

Vali Rasooli Sharabiani^{1*}; Ali Khorramifar²; Gholamhossein Shahgholi¹

*1. Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, IRAN

2. Ph.D. in Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, IRAN

*Email Address : vrasooli@uma.ac.ir

Abstract

Introduction

Structural heterogeneity of fruits and vegetables makes it difficult to understand the associated physicochemical changes that occur during drying. Due to its heterogeneous structure, food is one of the most complex types of metamorphic materials. The porosity and hygroscopic nature of fruits and vegetables increase their shrinkage during the drying process, which is a physical process commonly observed during drying. Shrinkage has a significant effect on the mechanical and textural properties of fruits and vegetables. Most importantly, shrinkage is an important factor that has a great impact on drought rate and drought kinetics. Because of these factors, food researchers emphasize that shrinkage should not be ignored when predicting volume and heat transfer during drying. The shrinkage model is better suited to the experimental data during drying than the non-shrinkage model. Food shrinkage depends on several factors such as material properties, mechanical properties, and process status. Knowledge of porosity during drying can also help to accurately predict the transfer phenomenon and quality characteristics. Some researchers have used mathematical equations to predict the porosity of food as a function of moisture content, which can be classified into two categories: (1) theoretical models based on understanding of fundamental physics and the mechanisms involved in pore formation have been established, and (2) experimental models have been developed using parameters in experimental data. Many previous studies on experimental or laboratory shrinkage have predicted porosity as linear, quadratic, and exponential equations. On the other hand, theoretical modeling can provide a better understanding of the shrinkage that occurs simultaneously with heat and volume transfer during drying. However, limited efforts have been made in the theoretical modeling of the contraction of fruits and vegetables, due to the complexity of creating physics-based models. The first porosity model was introduced in the 1950s. Kilpatrick and colleagues proposed a simple model considering the volumetric contraction of fruits and vegetables during drying. Many models in previous research have considered shrinkage to be ideal, during which the reduction of the geometric volume of the product is exactly equal to that of water lost. But in fact, this linear relationship between the decrease in physical volume and the volume of water lost during the drying period is not observed. Cell loss and shrinkage of food tissues occur during the drying process of food. There is a fine distinction between shrinkage and loss, in that shrinkage refers to a reduction in food sample size, but loss indicates irreversible breakdown of cellular and tissue structure. Structural changes at the cellular level occur due to the transfer phenomenon during the dry period. As mentioned earlier, porosity and shrinkage during drying affect the transfer process as well as other quality characteristics. Accurate prediction of porosity and shrinkage helps design an advanced drying system to ensure quality products. Careful examination of theoretical and experimental models of porosity indicates the need for a simple model that can compensate for some of the limitations of theoretical models and use them for drying products and processes. Therefore, the aim of this study is to create a real contraction model with minimal use of experimental coefficients. A simple model considering heat gradient and humidity, glass transfer temperature, and drying time can be a potential way to predict structural changes during drying. Therefore, in this study, a new approach to contraction velocity is introduced. Therefore, paying attention to these parameters in shrinkage rate, process parameters, and material properties are considered in predicting metamorphism during drying. The physical meaning of shrinkage velocity is as follows: The velocity of the outer surface of the specimen during drying.

Methodology

Apples were selected as the study sample in this study. Apples have high initial porosity and change of porosity during the drying period is very important. Therefore, it is expected that the experimental measurement of porosity changes and confirmation of the proposed model for this sample will be

better. Kohn rose apples were prepared from a local supermarket and stored in a refrigerator at 2 ° C. The apples were selected from a box to have the same degree of ripeness. The treatment step was calculated using a liquid refractometer (BPTR-100 V3.0). The average ripeness of apples was 14.20 ± 0.20 . The initial moisture content of fresh apples was calculated to be $77 \pm 0.50\%$ wb. 10 samples were used to measure the moisture content. Apples were removed from the refrigerator and washed at room temperature for one and a half hours. The skin of the samples was taken and cut into round pieces 10 mm thick and 40 mm in diameter. A hot air dryer with a fan was used. The drying temperature varied from 50 to 65 ° C and airspeed was set at 1 m / s. Particle density was measured using a gas (helium) pycnometer. The density of the mass was measured from the volume of the sample and the weight of the sample so that the sample was first coated with organic solvents to cover the open pores because there were numerous open pores that were large enough to be glass beads. They could have entered them. The density of the same sample was calculated before and after coating. The density of the glass beads was calculated from the weight of the required glass beads. The simulation was performed using COMSOL Multiphysics 5.6.0.280 Win / Linux. This software facilitates all stages of the modeling process including geometric structure definition, lattice, physical dimensioning, solving, and displaying results. COMSOL Multiphysics can manage variable properties that are a function of independent variables. A two-dimensional symmetry mode is also provided to facilitate the simulation process. There will be a small amount of 3D effects that can be ignored, and 3D consideration can complicate matters.

Conclusion

The physical quality of dried food depends on the degree of metamorphosis during drying. Shrinkage also has a significant effect on mechanical and textural properties as well as drying speed and kinetics. Accurate prediction of shrinkage can lead to better food quality and optimal drying process design. Food shrinkage depends on several factors including material properties, microstructure, mechanical properties, and process conditions. Experimental models can be created quickly that have a high impact. However, they do not show physical changes in the process. Physics-based models, on the other hand, are used as predictive models not only in food drying but also in other food industries. However, the theoretical model for predicting porosity is a complex one, due to the need for a number of properties that change under drying conditions. In this study, in order to counter the limitations of experimental and theoretical models, a simple shrinkage model based on the shrinkage rate was developed, which considers the main factors affecting porosity. The results show that the proposed model accurately predicts shrinkage and porosity, and this shows that the simulated shrinkage of the apple is related to the experimental results. For example, the porosity of the apple sample simulation is 0.6, which is consistent with laboratory data. The influence of desiccant air temperature and air velocity was also investigated. Studies show that process parameters (including air velocity and temperature) have a significant effect on the final porosity of the dried food. The porosity model proposed in this study requires the least experimental parameters. Future research could use this model to examine other foods because the structure of different foods is different, and this affects the porosity detection mechanism. Different types of process conditions can be used in future research to develop a general model for pore formation.

Keywords

Apple; Modeling; Drying; Porosity