

شبیه‌سازی عددی فرآیندهای انتقال رطوبت و گرما در خشک کردن همرفتی هویج پیش‌تیمار شده با امواج اولتراسوند و مایکروویو

رضا رستمی باروجی^۱ - سیدصادق سیدلو هریس^{۲*} - جلال دهقان‌نیا^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۶/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۲۴

چکیده

خشک کردن مواد غذایی، میوه‌ها و سبزی‌ها یک روش مناسب برای کاهش ضایعات پس از برداشت این محصولات می‌باشد. هدف از این پژوهش، مطالعه عددی و تجربی انتقال گرما و رطوبت طی فرآیند خشک کردن همرفتی هویج بود. نمونه‌های هویج تحت پیش‌تیمار اولتراسوند با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز به مدت ۱۰ دقیقه و نیز پیش‌تیمار مایکروویو با توان یک وات بر گرم به مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفتند. شبیه‌سازی ناپایا و سه بعدی انتقال همزمان رطوبت و گرما با مجموعه‌ای از شرایط اولیه و مرزی با روش اجزا محدود صورت گرفت. تأثیر پیش‌تیمارهای مذکور در قالب ضریب انتشار مؤثر رطوبت اصلاح شده در معادلات انتقال جرم و حرارت لحاظ شد. نتایج نشان داد که استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند باعث افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت و استفاده از پیش‌تیمار مایکروویو باعث کاهش رطوبت اولیه محصول و افزایش جزئی این ضریب می‌شود، به طوری که ضریب انتشار رطوبت در بدون استفاده از پیش‌تیمار به مقدار ۷/۶۲ مترمربع بر ثانیه و در استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند و مایکروویو به ترتیب ۹/۰۹ و ۷/۷۲ متر مربع بر ثانیه بود. زمان خشک شدن نمونه‌ها به‌طور میانگین با استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند ۱۵/۳ درصد (۳۱ دقیقه) کاهش یافت. مقایسه نتایج تجربی و پیش‌بینی شده پروفیل‌های رطوبت و گرما نشان دادند که مدل‌سازی مذکور توانسته با دقت قابل قبولی، ضریب همبستگی بالای ۹۹/۹۰ درصد و خطای متوسط ۹ درصد، پدیده‌های انتقال جرم و حرارت را پیش‌بینی نماید. بنابراین این مدل می‌تواند به‌عنوان ابزار مناسب در بهینه‌سازی طراحی و تعیین بهینه پارامترهای عملکردی خشک‌کن استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: انتقال جرم و حرارت، اولتراسوند، ضریب نفوذ رطوبت، مدل‌سازی

مقدمه

همزمان گرما و رطوبت ما بین هوای گرم و ماده غذایی جهت تبخیر آب و رسیدن رطوبت آن به حد مورد نظر می‌باشد. خشک کردن با جریان هوای گرم علاوه بر داشتن مزایایی مانند امکان کنترل دقیق دما، صرف نظر از اندازه و شکل محصول و عدم نیاز به تماس مستقیم دارای معایبی نیز می‌باشد. از جمله این معایب، می‌توان به زمان طولانی و دمایی بالا برای خشک کردن محصول طی دوره سرعت نزولی اشاره کرد. علاوه بر این، دماهای بالا باعث کاهش ارزش تغذیه‌ای و مصرف انرژی بالا می‌شود (Gowen *et al.*, 2006). استفاده از پیش‌تیمارهایی که سبب کاهش رطوبت اولیه ماده غذایی و نیز اصلاح بافت ماده غذایی برای تسریع انتقال رطوبت و کاهش زمان خشک کردن می‌شوند، بسیار مفید خواهد بود (Fernandes and Rodrigues, 2007).

پیش‌تیمار اولتراسوند با غوطه‌ور کردن میوه در آب مقطر یا محلول آبی هایپرتونیک^۴ و اعمال امواج اولتراسوند صورت می‌گیرد.

میوه‌ها و سبزی‌ها با محتوای رطوبت حدود ۸۰ درصد به‌عنوان مواد بسیار فاسدشدنی طبقه‌بندی می‌شوند. سالیانه حدود ۱/۳ میلیارد تن از مواد غذایی که حدود یک سوم از تولید جهانی آن می‌باشد، به دلیل عدم فرآوری مناسب هدر می‌رود. خشک کردن با پتانسیل بسیار بالا یکی از عمومی‌ترین و رایج‌ترین روش‌ها جهت حفظ، نگهداری و افزایش بهره‌وری مواد غذایی می‌باشد (Kumar *et al.*, 2012). متداول‌ترین روش خشک کردن مواد غذایی استفاده از جریان هوای داغ است که نیازمند هوای گرم برای فراهم کردن انتقال

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه

تبریز، تبریز

۲- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تبریز، تبریز

(*)- نویسنده مسئول: (Email: ss_seiedlo@yahoo.com)

۳- دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه تبریز، تبریز

DOI: 10.22067/jam.v7i1.38881

(Azarpazhooch and Ramaswamy, 2011).

در کنار استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف در جهت کاهش انرژی مصرفی و افزایش کیفیت و بازده سیستم، مدل‌سازی ریاضی نیز در بهینه‌سازی طراحی‌ها و افزایش بازده در عملیات خشک‌کردن نقش به‌سزایی دارد. مدل‌سازی ریاضی یکی از مفیدترین ابزارها برای مطالعه سریع و کم‌هزینه اثر سیستم‌های مختلف و پارامترهای فرآیند روی خروجی یک فرآیند می‌باشد (Chandra Mohan and Talukdar, 2010). اگرچه مطالعات آزمایشگاهی یک ضرورت در توسعه تکنیک خشک‌کردن می‌باشد، ولی به دلیل هزینه بالا و صرف وقت بیش‌تر در این مطالعات، تحقیقات تئوریک به کمک مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی عددی، یک ابزار قدرتمند و مناسب جهت آنالیز روند انتقال جرم و گرما تحت شرایط واقعی خشک‌کردن را فراهم می‌کند. مدل‌سازی عملیات خشک‌کردن به دلیل همزمانی انتقال جرم و گرما بین ماده خشک شونده و حامل انرژی، پیچیده است. مدل مربوطه آگاهی کافی را در مورد پدیده‌های درگیر در فرآیند خشک‌کردن ارائه می‌کند (Mihoubi et al., 2009). پژوهش‌های قابل توجهی در زمینه به‌کارگیری برنامه‌های کامپیوتری کارآمد جهت حل عددی صورت گرفته است. آورسا و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از روش اجزاء محدود، خشک‌کردن ورقه‌های هویج را با استفاده از مدلی دو بعدی که بیانگر رفتار انتقال گرما و رطوبت با پارامترهای متغیر، شبیه‌سازی نمودند. نتایج مطالعات نشان داد که همبستگی خوبی بین مقادیر پیش‌بینی شده و تجربی در دو ساعت اول وجود داشته و در مراحل پایانی به دلیل غالب بودن اثر چروکیدگی بر روی پارامترها، خطا افزایش یافته است (Aversa et al., 2007). نتایج شبیه‌سازی خشک‌کردن هویج در خشک‌کن بستر سیال بیالوبزوسکی و همکاران (۲۰۰۸) با در نظر گرفتن چروکیدگی حاکی از آن بود که تفاوت معنی‌داری بین مقادیر پیش‌بینی شده با در نظر گرفتن چروکیدگی و بدون در نظر گرفتن آن مشاهده نشده است و همچنین مدل به‌خوبی نتوانسته، تغییرات دمایی نمونه‌ها را پیش‌بینی کند (Białobrzewski et al., 2008).

توسعه مدل فیزیکی در برگزیده تأثیر پیش‌تیمارهای مختلف بر روند انتقال گرما و رطوبت ماده غذایی در طی فرآیند خشک‌کردن به درک صحیح فرآیند و استفاده کاربردی از آن‌ها منجر می‌شود. دقت در بیان خصوصیات مهندسی به‌صورت تابعی از عوامل درونی و بیرونی ماده غذایی و همچنین مدل‌سازی سه بعدی، شبیه‌سازی دقیق‌تر را به دنبال خواهد داشت.

مواد و روش‌ها

تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های هویج تازه از بازار محلی تهیه شد و در سردخانه با

امواج اولتراسوند باعث یکسری انقباض‌ها و انبساط‌های متناوب سریع روی دیواره سلولی شده (اثر اسفنجی^۱) که این عمل موجب ایجاد کانال‌های میکروسکوپی در ساختار ماده شده و امکان انتقال رطوبت از ماده به حامل انرژی را افزایش می‌دهد. بدین صورت که با ایجاد کانال‌های میکروسکوپی در ساختار ماده، موجب کاهش لایه مرزی نفوذ و تشدید مکانیزم انتقال جرم جابه‌جایی در ماده می‌گردد. همچنین انرژی فراصوتی موجب تشدید پدیده کاویتاسیون و تسریع در دست دادن آب پیوندی قوی در درون ماده می‌شود (Azoubel et al., 2010). مزیت دیگر استفاده از اولتراسوند، نیاز به افزایش کمتر دما در طول فرآیند خشک‌کردن می‌باشد. در نتیجه، اولتراسوند بدون داشتن اثرات سوء روی ویژگی‌های کیفی ماده غذایی می‌تواند به‌عنوان یک پیش‌تیمار در خشک‌کردن محصولات غذایی حساس به حرارت به کار رود؛ چراکه باعث افزایش سرعت و کاهش دمایی مورد نیاز برای خشک‌کردن می‌شود (Mason et al., 2005). تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر در زمینه کاربرد اولتراسوند در پیش‌تیمار مواد غذایی قبل از خشک‌شدن حاکی از آن بود که تأثیر پیش‌تیمار بر روی مواد مختلف متفاوت می‌باشد. در تحقیقی روی اثر پیش‌تیمار اولتراسوند با فرکانس ۲۵ کیلوهرتز، شدت ۴۸۷۰ وات بر مترمربع و زمان ۲۰ دقیقه روی چند میوه نشان داد که این پیش‌تیمار موجب افزایش ضریب انتشار مؤثر به میزان ۱۴/۴ و ۲۸/۸ درصد به ترتیب در موز و انبه هندی شد. نیز افزایش ۱۴/۴ و ۴۵/۱ درصدی ضریب نفوذ رطوبت را به ترتیب در موز و آناناس با پیش‌تیمار اولتراسوند فرکانس ۲۵ کیلوهرتز، شدت ۴۸۷۰ وات بر متر مربع و زمان ۲۰ دقیقه مشاهده کردند (Fernandes and Rodrigues, 2007).

امواج مایکروویو باعث نوسان مولکول‌های دو قطبی نظیر مولکول‌های آب شده و نوسان مولکول‌های آب در ماده غذایی، باعث اصطکاک بین مولکول‌ها و ایجاد گرما می‌شوند. در نتیجه تمام قسمت‌های ماده غذایی به‌طور یکنواخت، انرژی مایکروویو را جذب کرده و گرم می‌شوند و باعث کاهش رطوبت اولیه ماده در مدت زمان کوتاه می‌گردد (Azarpazhooch and Ramaswamy, 2011). متولی و مینایی (۲۰۱۲) تأثیر پیش‌تیمار مایکروویو ۱۰۰ و ۲۰۰ وات بر هر گرم ماده خشک شونده و به مدت ۱۰ و ۲۰ دقیقه را به ترتیب روی انرژی و اکسرژی فرآیند خشک‌کردن همرفتی انار ترش بررسی کردند، نتایج نشان داد که استفاده از توان مایکروویو باعث کاهش مصرف انرژی و افزایش بازده انرژی می‌شود (Motevali and Minaei, 2012). همچنین در تحقیقی دیگر، اثر پیش‌تیمار مایکروویو و اسمزی بر روی سیب بررسی شد و نشان داد که استفاده ترکیبی از پیش‌تیمارهای اسمزی و مایکروویو، باعث بهبود تغییرات رنگ و همچنین بافت محصول خشک شده‌ی سیب می‌گردد

محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

جهت محاسبه ضریب نفوذ رطوبت از قانون دوم فیک^۱ در فرم ورقه نامتناهی استفاده شد. فرم ساده شده حل تحلیلی قانون دوم فیک در رابطه (۱) آورده شده است (Seiedlou Heris *et al.*, 2010).

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp \left[\frac{-\pi^2 \cdot D_{eff} \cdot t}{l_0^2} \right] \quad (1)$$

که در آن MR نسبت رطوبت بدون بعد، D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برحسب مترمربع بر ثانیه، l_0 ضخامت ورقه‌ها بر حسب متر و t زمان خشک‌شدن بر حسب ثانیه می‌باشد. با در نظر گرفتن $F_0 = \frac{t \cdot D_{eff}}{L_0^2}$ و با لگاریتم‌گیری از طرفین رابطه (۱)، رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$F_0 = -0.101 \ln(MR) - 0.0213 \quad (2)$$

با استفاده از داده‌های مقدار رطوبت هویج در زمان‌های مختلف خشک‌کردن و رابطه (۲) ضریب نفوذ در رطوبت‌های مختلف از داده‌های آزمایشی حاصل از خشک‌کردن هویج حاصل شد. سپس ضریب نفوذ به صورت تابعی از رطوبت به صورت فرم کلی رابطه (۳) ضرایب مربوطه محاسبه شد (Azzouz *et al.*, 2002).

$$D_{eff}(c) = D_0 \exp(D_a c) \quad (3)$$

که در آن $D_{eff}(c)$ ضریب نفوذ تابعی از رطوبت، D_0 و D_a ضرایب مدل و C مقدار رطوبت محصول (بر پایه خشک) می‌باشد.

طرح آماری آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در دو دمای هوا، شامل ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس، سرعت هوای گرم معادل ۱/۲ متر بر ثانیه و در دو ضخامت ۴ و ۶ میلی‌متری و با اعمال یا عدم اعمال پیش‌تیمارهای ذکر شده در سه تکرار اجرا شدند. در مطالعه، اندازه‌گیری و محاسبه مشخصه‌های ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، زمان صرف شده جهت خشک‌کردن در فرآیند و تغییرات حجم و دانسیته نهایی، آزمون‌ها به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شدند. فاکتورها عبارت بودند از:

دمای خشک‌کردن در دو سطح (۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس)، ضخامت نمونه‌ها در دو سطح (۴ و ۶ میلی‌متر) و اعمال و عدم اعمال پیش‌تیمار در سه سطح (بدون پیش‌تیمار، پیش‌تیمار اولتراسوند با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز به مدت ۱۰ دقیقه و نیز پیش‌تیمار مایکروویو با توان یک وات بر گرم به مدت ۱۵ دقیقه بود.

دمای ۴ درجه سلسیوس تا زمان انجام آزمایش‌ها نگهداری شدند. قبل از انجام آزمایش خشک‌کردن، نمونه‌ها در ابعاد ۴ و ۶ میلی‌متر ضخامت و قطر ۲۰ میلی‌متر برش داده شد و اندازه‌گیری رطوبت اولیه در هر آزمایش براساس استاندارد AOAC (۲۰۰۰)، در آن ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت انجام شد.

خشک‌کردن نمونه‌ها

خشک‌کردن نمونه‌های آماده شده توسط یک خشک‌کن همرفتی سینی‌دار در دو سطح دمایی ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و در سرعت هوای ۱/۲ متر بر ثانیه در سه تکرار انجام شد. پیش‌تیمار اولتراسوند با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز به مدت ۱۰ دقیقه و پیش‌تیمار مایکروویو یک وات بر گرم به مدت ۱۵ دقیقه برای ورقه‌های نازک هویج و در سه تکرار انجام شد. هویج‌ها به قطعات استوانه‌ای به قطر ۲۰ میلی‌متر و ضخامت‌های ۴ و ۶ میلی‌متر برش داده شد و سپس پیش‌تیمار اولتراسوند و یا مایکروویو روی آنها اعمال گردید. برای پیش‌تیمار مایکروویو از یک دستگاه مایکروویو مدل سامسونگ با توان متغیر ۱۰۰ تا ۹۰۰ وات استفاده شد و جهت پیش‌تیمار اولتراسوند از یک حمام اولتراسوند با فرکانس متغیر و مدت زمان قابل تنظیم استفاده شد. تعدادی نمونه نیز بدون اعمال پیش‌تیمار در ضخامت‌ها و سطوح دمایی ذکر شده جهت مقایسه میزان تأثیرگذاری پیش‌تیمارهای اعمالی، مورد آزمایش قرار گرفت. خشک‌کن آزمایشگاهی به یک سامانه داده‌برداری به همراه یک واحد کنترل مجهز بود. اندازه‌گیری دمای هوای داخل خشک‌کن توسط سنسورهای دمایی با مشخصات PT100، درصد رطوبت نسبی هوا گرم توسط رطوبت‌سنج SAMWAN ENG, Taiwan، کنترل سرعت جریان هوای گرم توسط سرعت‌سنج پره‌ای AM-4202-Lutron و نهایتاً کنترل این متغیرها توسط تابلو و مدار فرمان صورت گرفت. جرم نمونه‌های روی قفسه‌های خشک‌کن با استفاده از یک دستگاه ترازوی دیجیتال در فواصل زمانی ۳ دقیقه و با دقت ± 0.1 گرم اندازه‌گیری و ثبت شد. برای اندازه‌گیری دمای ورقه‌های هویج در نقاط مختلف آن از ترموکوپل‌های نوع k متصل به یک واحد دیتالاگر (انگلستان، DeleaT) در فواصل زمانی یک دقیقه استفاده شد.

همزمان نمونه‌های هویج روی سینی جداگانه خشک شدند که این نمونه‌ها جهت آزمایش‌های حجم‌سنجی در طی فرآیند خشک‌کردن استفاده می‌شدند. اندازه‌گیری حجم نمونه‌ها و به تبع آن محاسبه چگالی ظاهری، چگالی ماده خشک در طی فرآیند خشک‌کردن، با استفاده از پیکنومتر و روش جابجایی تولوئن و در رطوبت‌های مختلف ماده صورت گرفت. حجم نمونه‌های استوانه‌ای هویج در طی خشک‌کردن در محتوای رطوبت ۷/۸، ۵، ۲/۵ و ۰/۳۴ (گرم آب بر گرم ماده خشک) اندازه‌گیری شد (Seiedlou Heris *et al.*, 2010).

معادلات حاکم و حل عددی

در تحقیق حاضر، انتقال همزمان گرما و رطوبت در خشک کردن لایه نازک مواد غذایی در نظر گرفته شد و مدل ریاضی توصیف کننده پدیده‌های انتقال درگیر در فرآیند خشک کردن هویج توسعه داده شد. با توجه به پیچیدگی توصیف پدیده‌های انتقال در فرآیند خشک کردن، جهت توسعه مدل فرضیه‌هایی در نظر گرفته شد که عبارت بودند از:

- توزیع اولیه رطوبت و گرما در داخل ماده، یکنواخت می‌باشد.
- ماده مورد مطالعه دو فازي بوده که شامل آب و مواد جامد است.

- تغییر حجم نمونه در طی خشک کردن وجود ندارد.

- در مرزهای ماده انتقال گرما و رطوبت به صورت جابه‌جایی می‌باشد.

- ضریب انتقال گرما و رطوبت سطحی میانگین، در سطح تبادل گرما و رطوبت در نظر گرفته شد.

- انتقال رطوبت و گرما در داخل ماده به ترتیب به صورت مکانیزم‌های نفوذ و هدایت در نظر گرفته شد.

فرض شد که به محض قرار گرفتن ورقه‌های هویج در معرض هوای گرم خشک کن، گرما به صورت همرفتی از حامل انرژی به تمامی سطوح ماده غذایی انتقال می‌یابد. شدت انتقال گرما در سطح ورقه‌ها، توسط گرادیان دمایی بین دمای سطح و دمای هوای گرم و نیز ضریب انتقال گرمای سطحی (h) کنترل می‌شود. مقدار و شدت تبخیر در سطح نمونه، توسط ضریب تبادل رطوبت سطحی (h_m) و گرادیان فشار بخار ما بین سطح نمونه و هوای گرم خشک کن کنترل می‌گردد. سپس به دنبال انتقال رطوبت در سطح، نفوذ غیرپایدار رطوبت در داخل نمونه رخ می‌دهد و رطوبت از همه نقاط داخلی ماده به طرف سطح نفوذ می‌کند.

مدل انتقال گرما

معادله اصلی انتقال گرما در این پژوهش از رابطه (۴) پیروی می‌کند: (Aversa et al., 2007)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{k}{\rho \cdot c_p} \nabla T \right) \quad (4)$$

که در آن شرایط اولیه براساس رابطه (۵) است:

$$T = T_0 \quad t = 0 \quad (5)$$

شرایط مرزی

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_a - T_{surf}) - \dot{m} \times L_{v,surf} \quad (6)$$

$$\dot{m} = -\rho_s D_{eff} \frac{\partial c}{\partial n} = h_m (P_s(T_s) - P_a(T_a)) \quad (7)$$

$$= h_m (P_{sat}(T_s) \cdot a_w - P_{sat}(T_a) \cdot RH)$$

در روابط (۶) و (۷) k ، c_p ، ρ و \dot{m} به ترتیب چگالی ظاهری

($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)، گرمای ویژه ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)، ضریب هدایت گرمای هویج ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) و زمان (s) می‌باشد و h : ضریب انتقال گرمای سطحی ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)، h_m : ضریب انتقال رطوبت سطحی ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)، چگالی ماده خشک هویج ($\text{kg}(\text{dry mater}) \cdot \text{m}^{-3}$)، $P_{sat}(T_s)$ و $P_{sat}(T_a)$: به ترتیب فشار بخار اشباع در سطح آزاد در هوا و ماده P_s و P_a : به ترتیب فشار بخار آب در سطح ماده و هوا (Pa)، $L_{v,surf}$: گرمای نهان تبخیر آب ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)، \dot{m} : نرخ تبخیر رطوبت ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)، a_w : فعالیت آبی (بدون واحد) و RH : رطوبت نسبی هوای خشک کننده برحسب درصد که در این تحقیق ثابت فرض شده است.

مدل انتقال رطوبت

مدل نفوذ فیک جهت توصیف انتقال رطوبت وابسته به زمان و پیش‌بینی پروفیل‌های رطوبتی محلی ورقه‌های هویج به کار برده شد. این مدل عبارت است از:

رابطه اصلی

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{eff}(c) \nabla c) \quad (8)$$

شرایط اولیه

$$c(n, t) = c_0 \quad t = 0 \quad (9)$$

شرایط مرزی

$$-D_{eff} \frac{\partial c}{\partial n}(surf, t) = \frac{h_m \Delta P}{\rho_s} \quad t > 0 \quad (10)$$

$$-D_{eff} \frac{\partial c}{\partial n}(surf, t) = \frac{h_m}{\rho_s} (P_s(T_s) - P_a(T_a)) \quad (11)$$

$$-D_{eff} \frac{\partial c}{\partial n}(surf, t) = h_m (P_{sat}(T_s) \cdot a_w - P_{sat}(T_a) \cdot RH) \quad (12)$$

روش حل

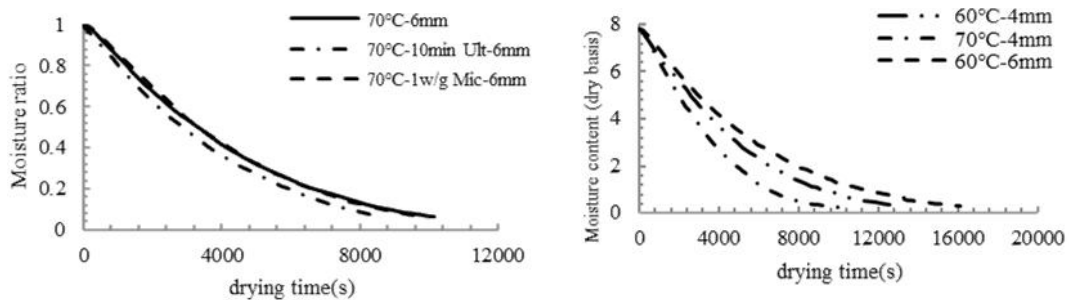
معادلات اصلی دیفرانسیلی مذکور به صورت کوپل با در نظر گرفتن شرایط مرزی و اولیه در محیط نرم افزار COMSOL MULTIPHYSICS 3.5 حل شدند. پایه حل معادلات در این نرم‌افزار روش حل عددی براساس اجزای محدود می‌باشد. مدل ایجاد شده قادر است بر مبنای ورودی‌های مختلف از قبیل خصوصیات هوای گرم، خواص فیزیکی محصول، دما و رطوبت اولیه، تعداد المان‌های مورد نظر و نیز زمان‌های خشک کردن مختلف، مقادیر رطوبت و گرما را به عنوان تابعی از زمان و مکان و در نهایت افت کلی وزن را در طی خشک کردن پیش‌بینی نماید.

نتایج و بحث

منحنی‌های خشک شدن

و کاهش رطوبت اولیه محصول در مدت زمان کم به دلیل اعمال مایکروویو می‌باشد که باعث تسهیل خروج رطوبت شده و در نتیجه زمان خشک‌شدن کاهش پیدا می‌کند. نتایج ارائه شده توسط سایر محققین در مورد کاهش زمان خشک‌کردن با استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند و مایکروویو، تأییدکننده نتایج این تحقیق است (Fernandes and Rodrigues, 2007; Ozbek and Dadali, 2007).

شکل ۱، منحنی‌های سینتیک خشک‌شدن نمونه‌ها تا رطوبت ۰/۳۴ را به صورت محتوی رطوبت بر پایه خشک (گرم آب بر گرم ماده خشک) و نیز نسبت رطوبت نمونه‌ها در طول زمان خشک‌شدن و در سطوح مختلف آزمایشی نشان می‌دهد. این منحنی‌ها نشان می‌دهند که محتوای رطوبت نمونه‌های هویج در طول خشک‌شدن به صورت مداوم و نمایی کاهش می‌یابد. چنانچه در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، استفاده از اولتراسوند و مایکروویو، زمان خشک‌شدن را در مقایسه با حالت بدون پیش‌تیمار کاهش می‌دهند، که علت آن پدیده کاویتاسیون و تشکیل کانال‌های میکروسکوپی در اثر اولتراسوند



شکل ۱- منحنی‌های کاهش رطوبت نمونه‌های هویج در الف) مقایسه با و بدون پیش‌تیمار، ب) مقایسه سطوح مختلف دمایی
Fig.1. Carrot samples moisture loss curves A) with and without pretreated comparison, B) different temperatures comparison

جدول ۱- تجزیه واریانس زمان خشک‌شدن و D_{eff} براساس سه فاکتور دما، ضخامت و پیش‌تیمار

Table 1- ANOVA results of drying time and D_{eff} based on three factors: temperature, thickness and pretreatment

منابع تغییرات Source of variations	درجه آزادی Degrees of freedom	مجموع مربعات Sum of squares	میانگین مربعات Mean squar	F
دما Temperature	1	30976	D_{eff} 70.2 T 30976	t 90.5* D_{eff} 69.1*
ضخامت Thickness	1	17689	143/8	17689 143.8 51.7* 141.6*
پیش‌تیمار Pretreatment	2	5869.5	16	293.7 8 8.5* 7.9*
دما × ضخامت Temperature × Thickness	1	361	0.1	361 0.1 1 0.1
دما × پیش‌تیمار Temperature × Pretreatment	2	921.5	1	460.7 0.5 1.3 0.5
ضخامت × پیش‌تیمار Pretreatment × Thickness	2	264.5	1.4	132.2 0.7 0.4 0.7
دما × ضخامت × پیش‌تیمار Temperature × Pretreatment × Thickness	2	354.5	1.1	177.2 0.5 0.5 0.5
خطای آزمایش Error of experimental	22	752.5	22.3	34 1
کل Total	35	64008	256.4	

*Significant at 0.01 probability level

* تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

از پیش تیمار موجب کاهش زمان خشک شدن شده اما تأثیر معنی‌داری نداشته است. از آن جایی که استفاده از پیش تیمار اولتراسوند، باعث افزایش سهولت خروج رطوبت از طریق تخریب بافت سلولی، باز شدن مسیر لوله‌های موئین و همچنین ایجاد پدیده کاویتاسیون می‌شود، بنابراین استفاده از اولتراسوند منجر به انتقال سریع رطوبت از نمونه‌های هویج به هوای گرم در داخل خشک‌کن می‌شود. به‌طور میانگین با استفاده از پیش تیمار اولتراسوند زمان مورد نیاز برای خشک شدن ورقه‌های هویج ۱۵/۳ درصد (۳۱ دقیقه) کاهش یافت.

تجزیه واریانس زمان خشک شدن در تیمارهای مختلف

جدول ۱، تجزیه واریانس زمان خشک شدن براساس سه فاکتور دما، ضخامت و پیش تیمار را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که اثر عوامل دما، ضخامت و پیش تیمار بر روی مدت زمان خشک شدن در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار می‌باشد.

مقایسه میانگین‌های زمان خشک شدن براساس نوع پیش تیمار به‌وسیله آزمون بونفرونی انجام شد و نتایج در جدول ۲ آورده شده است. مطابق با این جدول، زمان خشک شدن با استفاده کردن از اولتراسوند نسبت به استفاده از مایکروویو و همچنین عدم استفاده از پیش تیمار کمتر می‌باشد. استفاده از مایکروویو نسبت به عدم استفاده

جدول ۲- مقایسه میانگین زمان خشک شدن در تیمارهای مختلف به وسیله آزمون بونفرونی

Table 2- Mean comparison drying time in different treatments by Bonferroni test

تیمار Treatment	بدون اعمال پیش تیمار Without pretreatment	اعمال پیش تیمار مایکروویو $1w\ gr^{-1}$ Applying microwave pretreatment	اعمال پیش تیمار اولتراسوند به مدت ۱۰ دقیقه Applying ultrasonic pretreatment for 10 min
زمان خشک شدن (min) Drying time	202.25 ^a	193 ^a	171.75 ^b

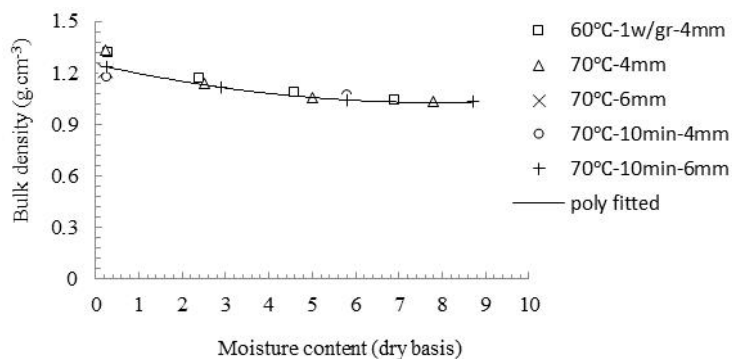
حروف مشابه نشانگر عدم اختلاف معنی‌دار و حروف غیر مشابه بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد است.

Similar characters indicate no significant differences and dissimilar characters indicate significant differences in the level of five percent.

تغییرات چگالی ظاهری در طی خشک کردن

داده‌های تجربی به‌دست آمده برای چگالی ظاهری ورقه‌های هویج به‌صورت تابعی از محتوی رطوبت آن‌ها در حین خشک شدن در تیمارهای مختلف در شکل ۲ آورده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، مقدار چگالی ظاهری نمونه‌های هویج با کاهش محتوی رطوبت آن‌ها، افزایش پیدا می‌کند.

نتایج مشابهی توسط فرناندز و رودریگز (Fernandes and Rodrigues, 2007) در خشک کردن با هوای گرم نمونه‌های موز، آناناس و انبه هندی پیش تیمار شده با اولتراسوند، گزارش گردید. آن‌ها در کاربرد اولتراسوند به‌عنوان پیش تیمار به این نتیجه رسیدند که استفاده از پیش تیمار اولتراسوند موجب کاهش زمان خشک شدن به مقدار ۳۱ دقیقه در آناناس، در موز به مقدار ۸۶ دقیقه و در انبه هندی به مقدار ۳۵ دقیقه نسبت به تیمار بدون اعمال اولتراسوند گردیده است.

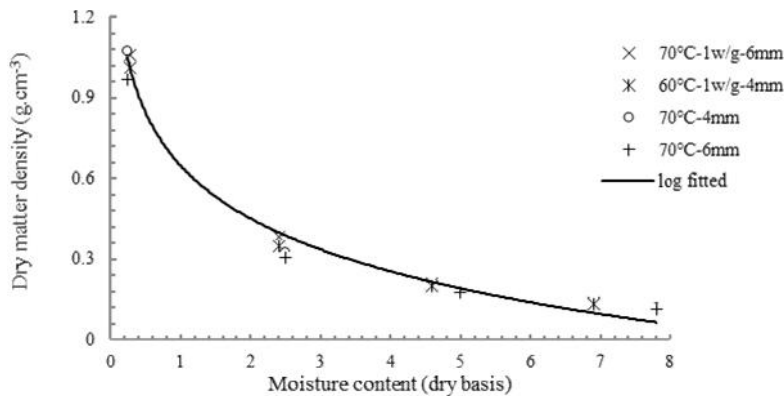


شکل ۲- چگالی ظاهری نمونه‌های هویج به‌صورت تابعی از محتوی رطوبت در شرایط آزمایشی

Fig. 2. Bulk density samples of carrot as a function of moisture content in the different experimental conditions

هویج به‌صورت تابعی از محتوی رطوبت آن‌ها در حین خشک‌شدن در شرایط مختلف آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده است. برای هر آزمایش تغییرات چگالی ماده خشک (ρ_s) برای رطوبت‌های مختلف محاسبه شد. با بررسی داده‌های حاصل از خشک‌کردن همرفتی نمونه‌های هویج تغییرات ρ_s در طی آزمایش برای تمامی تیمارها وابسته به میزان رطوبت نمونه‌ها، به‌صورت رابطه (۱۴) برآورد شد.

$$\rho_s = -217.4 \ln(c) + 540.18 \quad R^2=0.989 \quad (14)$$



شکل ۳- چگالی ماده خشک نمونه‌های هویج به‌صورت تابعی از محتوی رطوبت در شرایط مختلف آزمایشی
Fig.3. Density of dried carrot samples as a function of moisture content in the different experimental conditions

جدول ۳ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اثر دما، ضخامت و استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند روی مقدار D_{eff} رطوبت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. میانگین D_{eff} براساس استفاده از پیش‌تیمار به‌وسیله آزمون بونفرونی مقایسه شد و نتایج در جدول ۵ آورده شده است. مطابق با این جدول، D_{eff} با استفاده از اولتراسوند نسبت به استفاده از مایکروویو و همچنین عدم استفاده از پیش‌تیمار بیشتر می‌باشد. مقدار D_{eff} در حالت استفاده از مایکروویو نسبت به عدم استفاده از پیش‌تیمار بیشتر بوده، اما مایکروویو تأثیر معنی‌داری روی D_{eff} نمونه‌ها در مقایسه با بدون پیش‌تیمار نداشت. از آنجایی که استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند باعث افزایش نفوذ رطوبت می‌شود، بنابراین استفاده از اولتراسوند منجر به تسریع انتقال جرم داخلی نمونه‌های هویج می‌شود. به‌طور میانگین با استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند D_{eff} ورقه‌های هویج ۱۹/۲۶ درصد نسبت به تیمار بدون اعمال پیش‌تیمار افزایش یافت. نتایج مشابهی توسط فرناندز و رودریگز (Fernandes and Rodrigues, 2007) در خشک‌کردن با هوای گرم نمونه‌های موز، آناناس و انبه هندی پیش‌تیمار شده با اولتراسوند، گزارش گردید. گارسیا پرز و همکاران (García-Pérez et al., 2009) تأثیر پیش‌تیمار اولتراسوند را روی

برای هر آزمایش تغییرات چگالی ظاهری (ρ_m) و در رطوبت‌های مختلف محاسبه شد. با بررسی داده‌های حاصل از خشک‌کردن همرفتی نمونه‌های هویج تغییرات ρ_m در طی آزمایش برای تمامی تیمارها، به‌خوبی توسط تابع درجه دوم وابسته به میزان رطوبت نمونه‌ها به‌صورت رابطه (۱۳) برآورد شد.

$$\rho_m = 5.51c^2 - 74.11c + 1269 \quad R^2=0.99 \quad (13)$$

تغییرات چگالی ماده خشک در طی خشک‌کردن
 داده‌های تجربی به‌دست آمده برای چگالی ماده خشک ورقه‌های

ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

مقادیر ضریب نفوذ ثابت و وابسته به رطوبت با استفاده از داده‌های خشک‌کردن برای تیمارهای مختلف برآورد شدند که ضرایب نفوذ ثابت برآورد شده در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. گستره مقادیر D_{eff} محاسبه شده برای شرایط مختلف در حالت فرض ورقه نامتناهی بین $4/66 \times 10^{-10}$ و $12/81 \times 10^{-10}$ مترمربع بر ثانیه متغیر بود. این مقادیر نزدیک به مقادیر به‌دست آمده برای هویج می‌باشد که توسط زیلینسکا و مارکویسکی (Zielinska and Markowski, 2010) گزارش شده است که مقادیر گزارش شده توسط آن‌ها در گستره $2/58 \times 10^{-10}$ تا $17/90 \times 10^{-10}$ مترمربع بر ثانیه برای دمای ۶۰-۹۰ درجه سلسیوس متغیر بود. همچنین مقادیر D_{eff} به‌دست آمده برای هویج، در دامنه اعداد مربوط به ضریب نفوذ هویج و سیب زمینی، 10×10^{-11} تا 11×10^{-9} مترمربع بر ثانیه بود (Mulet, 1994). تغییرات D_{eff} به‌صورت تابعی از رطوبت نمونه‌ها با رابطه (۳)، توصیف گردید. مقادیر ثابت رابطه مذکور در برای تمامی شرایط آزمایشی آورده شده است.

نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر دما، ضخامت، استفاده از پیش‌تیمار روی ضرایب نفوذ مؤثر رطوبت در نمونه‌های هویج در

خشک کردن پوست لیمو ترش و هویج بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که ضریب نفوذ به‌دست آمده از نمونه‌های پیش‌تیمار شده با اولتراسوند تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد نسبت به نمونه شاهد داشته است. به عبارتی اولتراسوند باعث افزایش ضریب نفوذ می‌شود.

جدول ۳- تغییرات D_{eff} در شرایط مختلف آزمایشی

Table 3- Changes D_{eff} in the different experimental conditions

نوع پیش‌تیمار Pretreatment types	ضخامت نمونه‌ها (mm) Thickness of samples	دما (T) Temperature	$D_{eff} \times 10^{-10}$
بدون پیش‌تیمار Without pretreatment	4	60	4.660
	6	60	6.847
	4	70	8.130
	6	70	10.880
پیش‌تیمار اولتراسوند Ultrasound pretreatment	4	60	5.000
	6	60	7.963
	4	70	9.930
	6	70	12.810
پیش‌تیمار مایکروویو Microwave pretreatment	4	60	4.770
	6	60	6.997
	4	70	7.607
	6	70	11.117

جدول ۴- ثابت‌های رابطه (۳)

Table 4- Constants of equation 3

نوع پیش‌تیمار Pretreatment types	دما (T) Temperature	ضخامت نمونه‌ها (mm) Thickness of samples	D_a	$D_c \times 10^{-15}$
بدون پیش‌تیمار Without pretreatment	60	4	-0.2415	5.04729
		6	1707.-0	8.72202
	70	4	1629.-0	7.14099
		6	-0.3443	12.9727
پیش‌تیمار اولتراسوند Ultrasound pretreatment	60	4	-0.1635	6.57222
		6	1987.-0	8.6611
	70	4	-0.1635	8.11611
		6	-0.1657	12.3524
پیش‌تیمار مایکروویو Microwave pretreatment	60	4	-0.2668	5.2323
		6	-0.2353	7.91572
	70	4	-0.23	6.25168
		6	-0.2582	11.3913

جدول ۵- مقایسه میانگین D_{eff} در تیمارها براساس آزمون بونفرونی (در سطح ۵٪)

Table 5- Mean comparison D_{eff} in the treatment by Bonferroni test (at 5%)

تیمار Treatment	بدون اعمال پیش‌تیمار Without pretreatment	اعمال پیش‌تیمار مایکروویو $1w\ gr^{-1}$ Applying microwave pretreatment	اعمال پیش‌تیمار اولتراسوند به مدت ۱۰ دقیقه Applying ultrasonic pretreatment for 10 min
$D_{eff} (m^2 s^{-1})$	7.62 ^a	7.72 ^a	9.09 ^b

حروف مشترک نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌داری و حروف غیر مشترک بیانگر اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد

Similar characters indicate no significant differences and dissimilar characters indicate significant differences in the level of five percent

استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند مقدار D_{eff} افزایش می‌یابد.

مقادیر ضریب انتقال گرما و رطوبت سطحی

مقادیر ضریب انتقال گرما و رطوبت سطحی در هویج در دماها و سرعت‌های مختلف هوا به روش اندازه‌گیری دمای گذرا مقایسه شد

بر این اساس نتایج مقایسه میانگین داده‌های D_{eff} رطوبت، بیشترین مقدار این ضریب در بالاترین سطوح از نظر دما، ضخامت و استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند و کمترین مقدار آن در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و ضخامت چهار میلی‌متر و بدون استفاده از پیش‌تیمار به‌دست آمد. این نتایج بیانگر آن است که با افزایش دما، ضخامت و

که نمونه‌ای از نتایج در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶- ضرایب انتقال گرما و رطوبت سطحی در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه به روش اندازه‌گیری دمای گذرا
Table 6- Surface heat and moisture transfer coefficient in temperature 60°C and speed 1.2 m s⁻¹ based on transient temperature measurement method

مقدار Value	ضرایب انتقال گرما و رطوبت Heat and moisture transfer coefficients
15.323	$h_T (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$
15.63×10^{-3}	$k_m (m \cdot s^{-1})$
1.19×10^{-7}	$h_m (s \cdot m^{-1})$

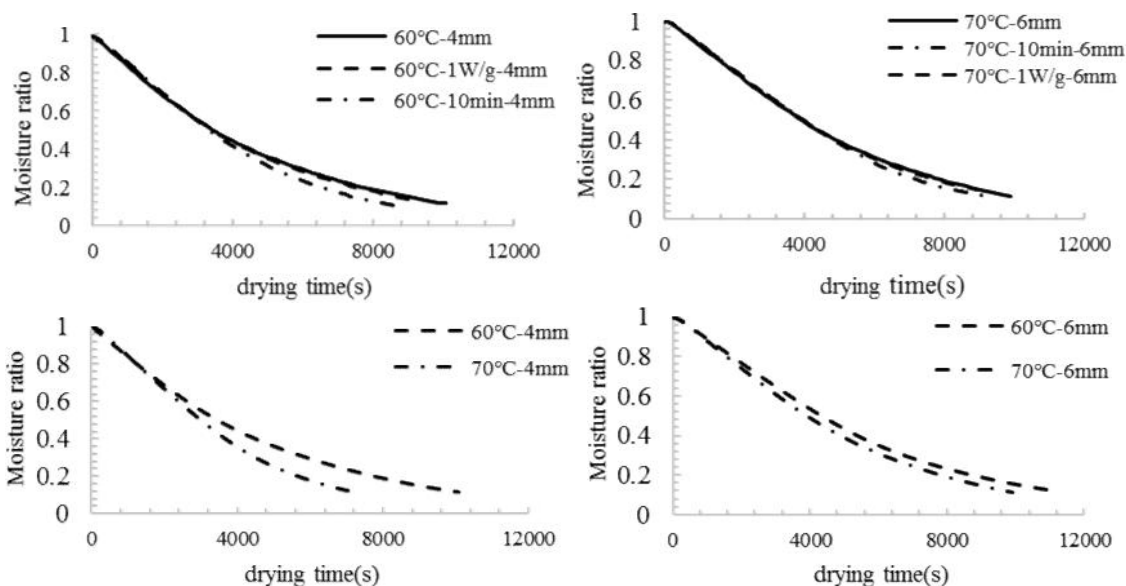
همچنین استفاده از پیش‌تیمار، محتوی رطوبت با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد.

بررسی اعتبار مدل در پیش‌بینی رطوبت

تغییرات محتوی رطوبت میانگین تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل کوپل، به‌صورت تابعی از زمان خشک‌کردن ورقه‌های هویج در شکل ۵ آورده شده است. در همه شرایط مورد مطالعه انطباق خوبی بین مقادیر تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل کوپل وجود داشت. ضریب همبستگی بین داده‌ها در محدوده ۹۹/۸۷ تا ۹۹/۹۸ درصد بود و مقدار خطای بین مقادیر پیش‌بینی شده و آزمایش در محدوده ۳/۵٪ تا ۱۲٪ بود.

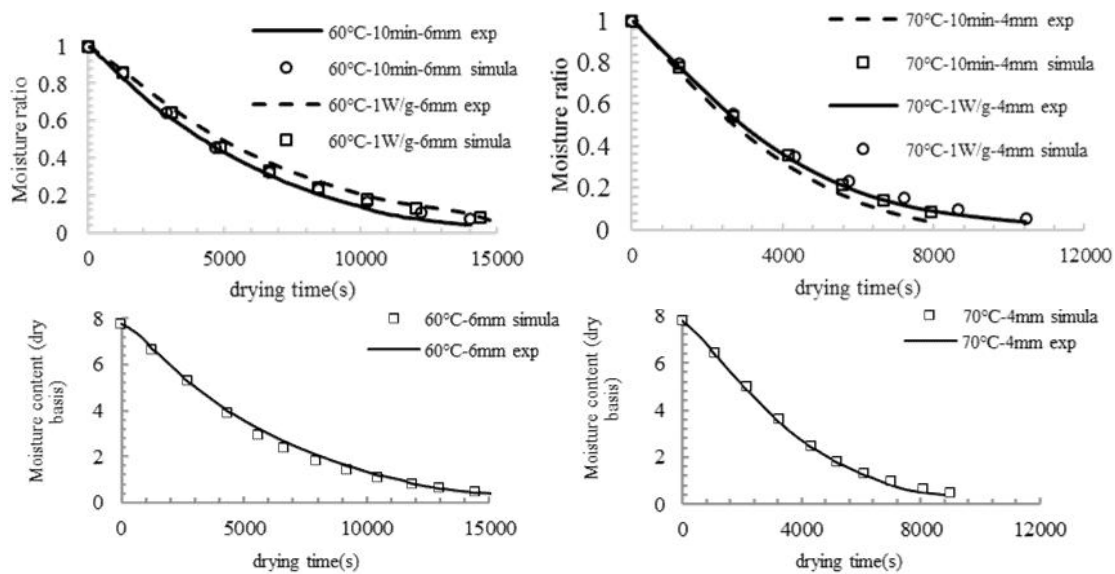
نتایج پیش‌بینی توزیع رطوبت در نمونه‌ها توسط مدل توسعه داده شده

نتایج شبه‌سازی کاهش رطوبت متوسط نمونه‌های هویج در دماها و ضخامت‌های مختلف، با و بدون اعمال پیش‌تیمار با ورودی‌های، مقدار رطوبت اولیه نمونه آزمایشی، D_{eff} تابعی از رطوبت، دانسیته ظاهری، دانسیته ماده خشک و زمان خشک شدن جداگانه برای هر شرایط آزمایشی به‌دست آمد. شکل ۴- نمودار کاهش رطوبت پیش‌بینی شده در دماها، ضخامت‌ها و پیش‌تیمار مختلف، را نشان می‌دهد. به‌دلیل متفاوت بودن رطوبت اولیه در نمونه‌های پیش‌تیماری مختلف جهت مقایسه مناسب، از نسبت رطوبت به‌جای محتوی رطوبت در رسم نمودارها استفاده گردید. نتایج حاصل از مدل برای انتقال رطوبت نشان داد که با افزایش ضخامت در یک دمای هوای خاص و افزایش دما در یک ضخامت خاص و



شکل ۴- نمودار کاهش رطوبت پیش‌بینی شده در دماها، ضخامت‌ها و پیش‌تیمار مختلف

Fig. 4. Predicted moisture reduction in different temperature, thickness and pretreatment



شکل ۵- مقایسه محتوی رطوبت اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با مدل در تیمارهای مختلف

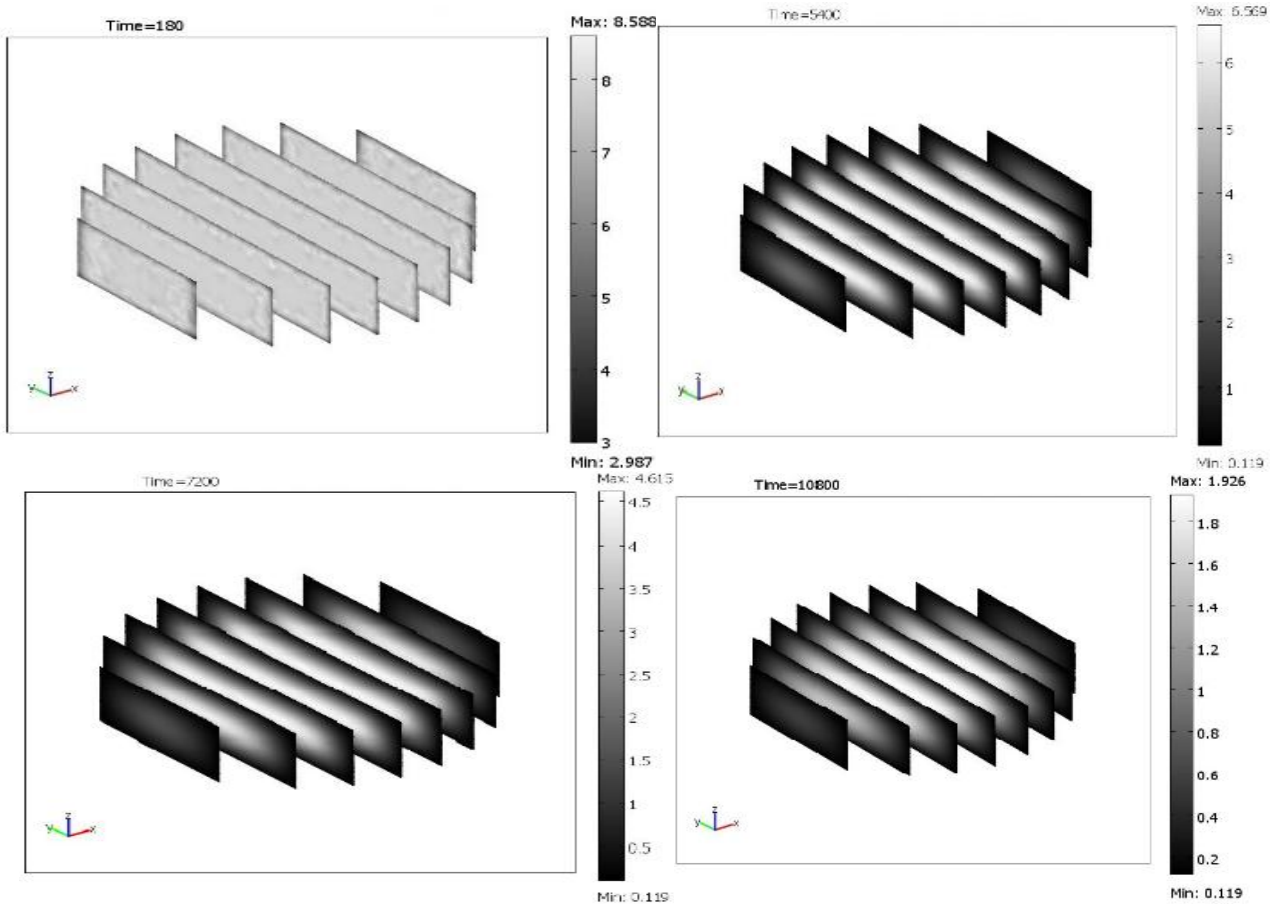
Fig. 5. Comparison of measured and predicted moisture content whit model in different treatments

هویج به صورت سه بعدی با پیشرفت زمان خشک شدن در شکل ۶ آورده شده است. وقتی ماده غذایی در معرض هوای گرم قرار می‌گیرد، رطوبت سطح ماده آن بخار می‌شود. با بخار شدن آب سطحی، گرادیان فشار بخار بین سطح و داخل ماده غذایی موجب نفوذ رطوبت از نقاط داخلی به سطح و بخار شدن آن می‌شود. به دلیل طول مسیر نفوذ کمتر، نقاط نزدیک به سطح، رطوبت بیشتری نسبت به مرکز از دست می‌دهند. بنابراین مرکز در انتهای فرآیند بیشترین مقدار رطوبت را خواهد داشت. رنگ‌های متفاوت بیان‌کننده تفاوت محتوی رطوبت می‌باشد. همچنین مسیر خروج رطوبت در راستای شعاعی و محوری برای نقاط مختلف داخلی نمونه‌ها در شکل ۷ آورده شده است. با پیشرفت خشک‌شدن، محتوی رطوبت در همه نقاط ماده کاهش می‌یابد، ولی مقدار کاهش رطوبت در نقاط سطحی سریع‌تر از نقاط داخلی بود و در ۲۰۰۰ ثانیه اول به رطوبت تعادلی رسید. بدین معنی که مقاومت بیرونی در انتقال جرم از لایه مرزی از همان مراحل اولیه فرآیند، کم بوده است. در این شکل‌ها می‌توان مشاهده نمود که هرچه فاصله نقاط ماده از سطح میانی ورقه هویج زیاد می‌شود، مقدار رطوبت آن نقاط در هر زمان نسبت به سطح میانی کمتر خواهد شد. در سطح محصول که مستقیماً در تماس با هوای گرم بود، رطوبت سریعاً افت کرده است. حرکت رطوبت از نقاط داخلی ماده به طرف سطح بالایی آن تابع D_{eff} رطوبت بوده که دارای مقدار بسیار کوچکی نسبت به تخییر رطوبت سطحی ماده غذایی که تابع ضریب انتقال جرم سطحی است. از طرف دیگر فاصله رطوبت موجود در نقاط داخلی تا سطح محصول، زیادتر از نقاط مرزی بود، بنابراین خروج رطوبت از نقاط داخلی، نیازمند صرف زمان بیشتری بوده است.

نتایج حاصل بیانگر این مطلب است که استفاده از ضریب نفوذ به صورت تابعی از رطوبت و همچنین شبیه‌سازی سه بعدی به همراه استفاده از خواص انتقالی و گرمایی متغیر در معادلات و همچنین دخیل کردن تأثیر پیش تیمار در ضریب نفوذ رطوبت، توانسته است روند کاهش رطوبت نمونه‌های پیش تیمار شده را به خوبی و با اعتبار بالایی پیش‌بینی نماید. اورسا و همکاران (Aversa et al., 2007) گزارش کردند که مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل کوپل و مقادیر تجربی انطباق خوبی در دو ساعت اول داشته و بعد از دو ساعت اول به دلیل غالب بودن اثر چروکیدگی اختلاف بین داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده بیشتر شد. سربکاتدن و روبرت (Srikiatden and Roberts, 2008) در پیش‌بینی پروفیل‌های رطوبت در دماهای مختلف به این نتیجه رسیدند که بیان D_{eff} به صورت متغیر تأثیر زیادی در پیش‌بینی پروفیل‌های دمای دارد. نیلنوت و همکاران (Nilonnt et al., 2012) در مدل‌سازی خشک‌کردن قهوه به این نتیجه رسیدند که استفاده از ضریب نفوذ به صورت تابعی از دما، دقت پیش‌بینی‌ها را نسبت به حالت استفاده از ضریب نفوذ متوسط، بالا می‌برد. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که مدل توسعه داده شده بدون در نظر گرفتن چروکیدگی و با احتساب ضریب نفوذ به صورت تابعی از دما، دقت بالاتری نسبت به حالت لحاظ کردن چروکیدگی با ضریب نفوذ متوسط داشته است.

بررسی پروفیل‌های رطوبت در شرایط آزمایشی مختلف

تغییرات مقادیر محتوی رطوبت محلی شبیه‌سازی شده ورقه‌های

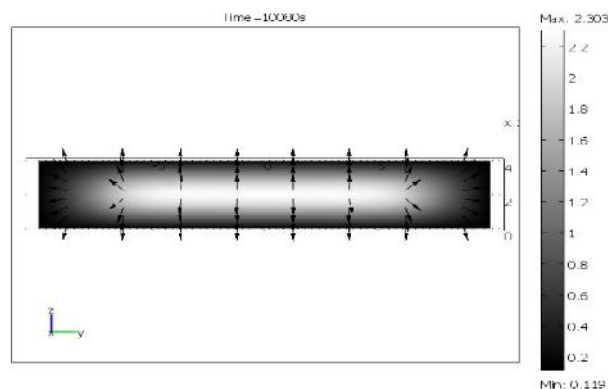


شکل ۶- پروفیل‌های رطوبتی در زمان‌های مختلف
Fig.6. Moisture profiles at different times

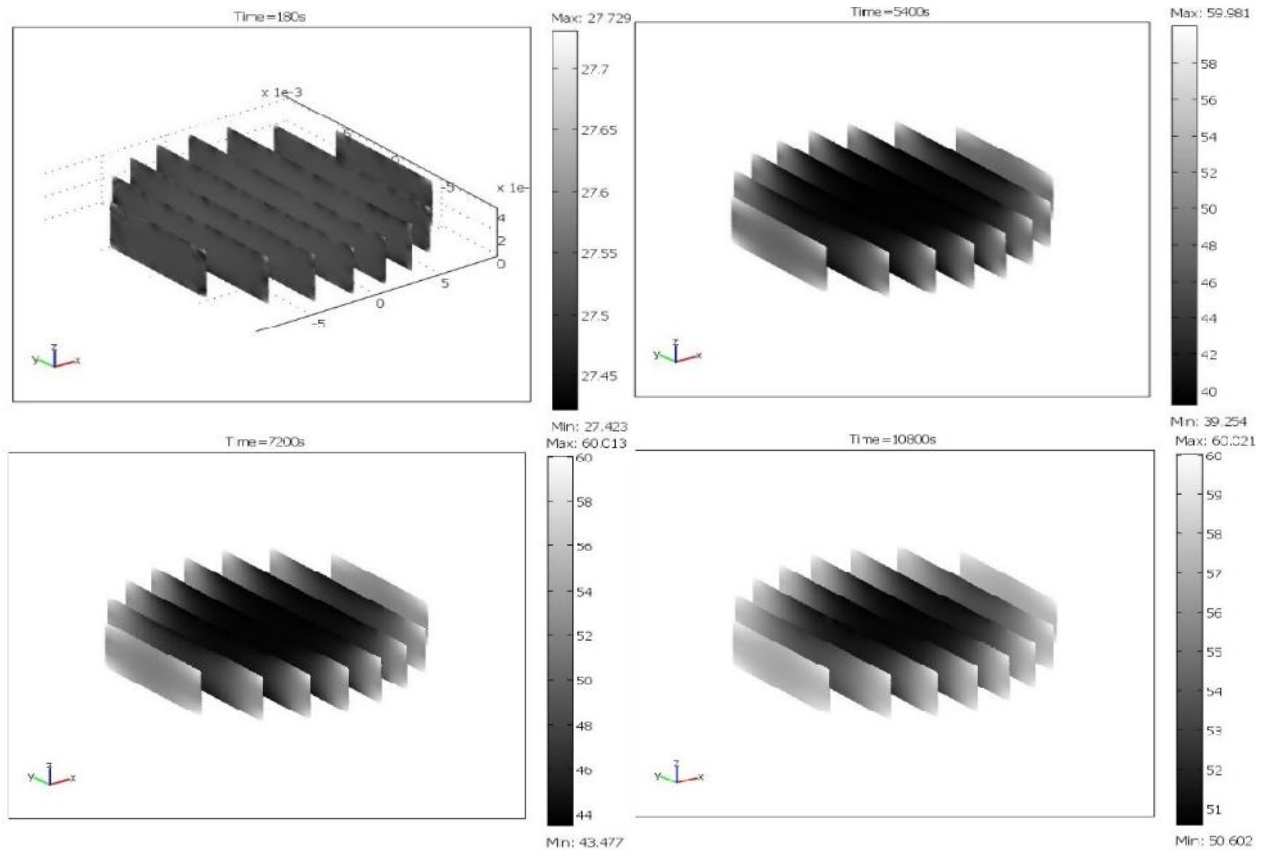
موارد نیز نتیجه مشابه را موجب شده‌اند. مدل شبیه‌سازی شده در دمای ۶۰ درجه سلسیوس هوای خشک‌کن دو ناحیه را به‌روشنی متمایز می‌کند.

شبییه‌سازی توزیع گرما

یک نمونه از شبیه‌سازی پخش سه‌بعدی گرما در داخل نمونه‌های هویج و در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند در شکل نشان داده شده است. پیش‌بینی دما در سایر



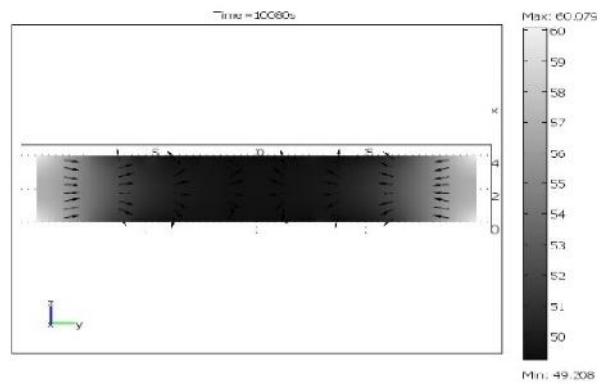
شکل ۷- مسیر نفوذ آب در داخل ماده غذایی
Fig.7. Direction of water diffusion in food



شکل ۸- پروفیل‌های دمایی پیش‌بینی شده
Fig.8. Predicted temperature profiles

ماده غذایی در راستای شعاع و محور نمونه‌های استوانه‌ای نشان می‌دهد. گرمای انتقال یافته از حامل انرژی به سطح ماده غذایی موجب بخار شدن آب سطحی و همچنین باعث ایجاد گرادیان بیشتر فشار بخار بین سطح ماده و هوای اطراف و نیز بین داخل ماده غذایی و سطح آن می‌شود که به‌موجب آن جریان رطوبت از داخل ماده به سطح ماده و نیز خروج رطوبت به‌صورت بخار از سطح ماده می‌شود.

دمای نقاط مرکزی نمونه، در پایان زمان خشک‌کردن (درصد رطوبت متوسط ۰/۴)، در حدود ۵۵ درجه سلسیوس بوده در حالی که دمای نقاط کناری نمونه در حدود ۵۷ درجه سلسیوس بوده است. شکل ۹ پخش حرارتی پیش‌بینی شده و جریان گرما را در داخل ماده غذایی در راستای محور Y (شعاع نمونه استوانه‌ای) و در راستای محور Z (محور نمونه استوانه‌ای) نشان می‌دهد. شکل ۹ پخش حرارتی پیش‌بینی شده و جریان گرما را در داخل



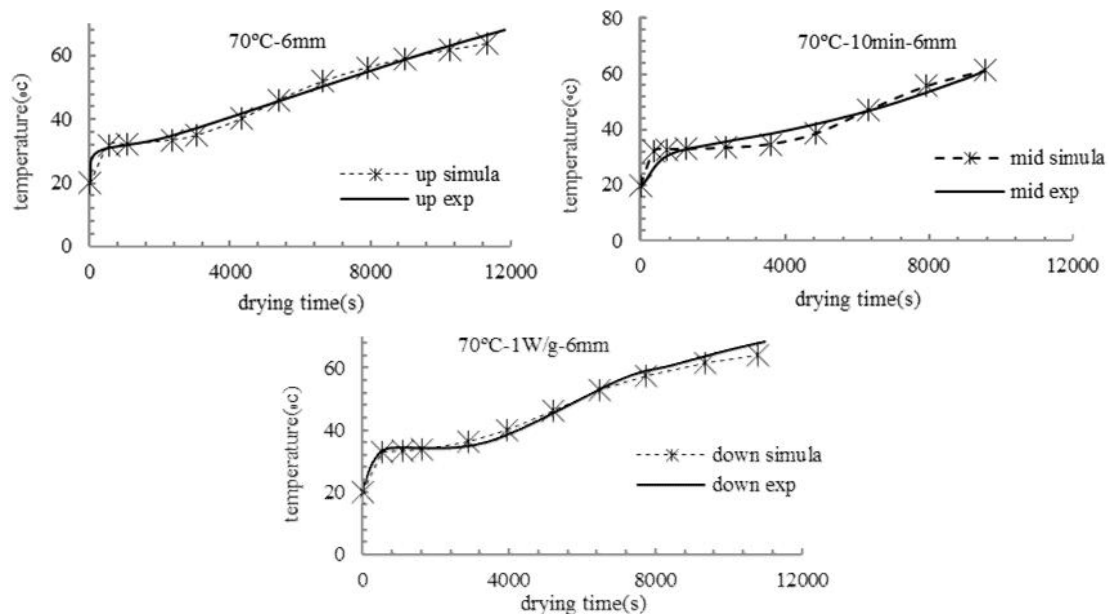
شکل ۹- جریان گرما در داخل ماده در راستای محوری و شعاعی (Y و Z)
Fig.9. Heat flow into the material along the radial and axial

دقت بالایی برخوردار بود. به طوری که روئیز لوپز و همکاران (Ruiz- López *et al.*, 2004). انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده دما از مقادیر تجربی را بسیار بالا برآورد کرده و دلیل این امر را در عدم محاسبه خواص ترموفیزیکی، توسط خود محقق بیان کرده و استفاده از مدل سایر محققین را عامل اصلی انحراف در پیش‌بینی دما دانسته است. بیالوبزوسکی (Białobrzewski, 2006) میزان انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده دما از مقادیر پیش‌بینی شده در نمونه‌های سیب را بسیار بالا ارزیابی نمود. همچنین بیالوبزوسکی و همکاران (Białobrzewski *et al.*, 2008) نشان دادند که نتایج پیش‌بینی توزیع دما در خشک کردن قطعات هویج از دقت پایین و در محدوده صفر تا ۷۰ درصد برخوردار است و اگر پیش‌بینی دما در داخل ماده یک امر بحرانی نباشد، می‌توان از مدل توسعه داده شده استفاده کرد. در غیر این صورت مدل توسعه داده شده آن‌ها نمی‌تواند در کاربردهای دقیق تر مؤثر باشد. سیدلو هریس (Seiedlou Heris, 2009) در شبیه‌سازی یک بعدی انتقال گرما و رطوبت در خشک کردن همرفتی نمونه‌های سیب، میزان انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده از مقادیر پیش‌بینی شده را در حدود صفر تا ۱۲ درجه سیلسیوس بیان کرده و دلیل این اختلاف را در عدم نصب دقیق سنسورها در داخل ماده و همچنین به دلیل بالا بودن ضریب انتقال گرمای محاسبه شده نسبت به مقدار واقعی بیان کرد.

به دلیل این که فرآیند بخار شدن ماده غذایی بیشتر در سطح بالا و پایین ماده غذایی صورت می‌گیرد. بنابراین بیشتر انرژی گرمایی در سطح بالا و زیر ماده غذایی صرف گرمای نهان تبخیر می‌شود. نقاط کناری رطوبت خود را سریعاً از دست داده و گرما بیشتر صرف گرم کردن این نقاط می‌شود و به دلیل گرادیان دمایی ایجاد شده بین کناره‌ها و وسط جریان گرما از کناره‌ها به سمت داخل صورت می‌گیرد.

بررسی اعتبار مدل در پیش‌بینی پروفیل‌های گرمایی

تغییرات دما در نقاط مختلف نمونه‌های هویج به صورت تابعی از زمان عملیات، در هر دو حالت تجربی و پیش‌بینی شده و در دماها، ضخامت‌ها و پیش‌تیمارهای مختلف به صورت نمونه در شکل ۱۰ آورده شده است. سایر آزمایش‌ها و مقادیر پیش‌بینی شده مشابه این نمودارها بودند. مطالعه مقدار خطای بین داده‌های حاصل از شبیه‌سازی و تجربی حاکی از آن بود که مقدار خطا پایین‌تر از ۱۵ درصد بوده است. بنابراین مدل توسعه داده شده، مقادیر افزایش دما در داخل نمونه را به خوبی پیش‌بینی کرده است. تفاوت جزئی مشاهده شده بین مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده می‌تواند ناشی از عدم قرارگیری دقیق و صحیح ترموکوپل در لایه‌های سطحی و یا دقیقاً در وسط یا متمایل به کناره‌های نمونه‌های استوانه‌ای هویج باشد. نتایج شبیه‌سازی حاضر در مقایسه با نتایج منتشر شده در منابع مختلف، از



شکل ۱۰- تغییرات دمای اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده در مرکز (mid) و سطح بالایی (up) و سطح پایینی (down) نمونه‌های هویج
Fig.10. Changes of measured and predicted temperature in the center (mid), upper (up) and low (down) surface of Carrot samples

نتیجه‌گیری

دارد و خشک‌شدن در دو دوره نزولی اتفاق می‌افتد. اعمال D_{eff} به صورت تابعی از رطوبت و نیز اعمال اثر پیش‌تیمار به صورت تغییرات D_{eff} و کاربرد آن در مدل، به دقت پیش‌بینی کمک می‌کند. شبیه‌سازی انتقال گرما و رطوبت نشان داد که مدل توسعه داده شده می‌تواند، پروفیل‌های دمایی را با خطای حداکثر ۱۵ درصد و پروفیل‌های رطوبتی را با دقت ۳ الی ۱۲ درصد در نمونه‌های با و بدون پیش‌تیمار شده پیش‌بینی کند.

هدف اصلی این تحقیق، توسعه مدل کوپل شبیه‌سازی شده انتقال گرما و رطوبت در طی فرآیند خشک‌کردن قطعات هویج تحت اعمال پیش‌تیمار، جهت بهینه‌سازی فرآیند بود. نتایج بررسی داده‌های آزمایشگاهی تغییرات رطوبت مطلق نمونه‌های هویج در حین خشک‌شدن به صورت لایه نازک در دماها، ضخامت‌ها و حالت‌های مختلف کاربرد پیش‌تیمارها نشان داد که دمای هوا و ضخامت و استفاده از پیش‌تیمار تأثیر معنی‌داری روی سرعت خشک‌شدن نمونه‌ها

References

1. Aversa, M., S. Curcio, V. Calabrò, and G. Iorio. 2007. An analysis of the transport phenomena occurring during food drying process. *Journal of Food Engineering* 78: 922-932.
2. Azarpazhooh, E., and H. Ramaswamy. 2011. Optimization of Microwave-Osmotic Pretreatment of Apples with Subsequent Air-Drying for Preparing High-Quality Dried Product. *International Journal of Microwave Science and Technology*.
3. Azoubel, P. M., M. D. A. M. Baima, M. D. R. Amorim, and S. S. B. Oliveira. 2010. Effect of ultrasound on banana cvPacovan drying kinetics. *Journal of Food Engineering* 97: 194-198.
4. Azzouz, S., A. Guizani, W. Jomaa, and A. Belghith. 2002. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. *Journal of Food Engineering* 55: 323-330.
5. Białobrzewski, I. 2006. Simultaneous Heat and Mass Transfer in Shrinkable Apple Slab during Drying. *Drying Technology* 24: 551-559.
6. Białobrzewski, I., M. Zieli ska, 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* 51: 4704-4716.
7. Chandra Mohan, V. P. and P. Talukdar. 2010. Three dimensional numerical modeling of simultaneous heat and moisture transfer in a moist object subjected to convective drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53: 4638-4650.
8. Fernandes, F. A. N. and S. Rodrigues. 2007. Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. *Journal of Food Engineering* 82: 261-267.
9. García-Pérez, J. V., J. A. Cárcel, E. Riera, and A. Mulet. 2009. *Drying Technology* 27: 281-287.
10. Gowen, A., N. Abu-Ghannam, J. Frias and J. Oliveira. 2006. Optimisation of dehydration and rehydration properties of cooked chickpeas (*Cicer arietinum* L.) undergoing microwave-hot air combination drying. *Trends in Food Science and Technology* 17: 177-183.
11. Kumar, C., A. Karim, S. C. Saha, M. U. H. Joardder, R. J. Brown, and D. Biswas. 2012. Multiphysics Modelling of convective drying of food materials. *Proceedings of the Global Engineering, Science and Technology Conference: Global Institute of Science and Technology*.
12. Mason, T. J., E. Riera, A. Vercet, and P. Lopez-Buesa. 2005. 13 - Application of Ultrasound. Pages 323-351 in Da-Wen S, ed. *Emerging Technologies for Food Processing*. London: Academic Press.
13. Mihoubi, D., S. Timoumi, and F. Zagrouba. 2009. Modelling of convective drying of carrot slices with IR heat source. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 48: 808-815.
14. Motevali, A., and S. Minaei. 2012. Effects of microwave pretreatment on the energy and exergy utilization in thin-layer drying of sour pomegranate arils. *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly* 18: 63-72.
15. Mulet, A. 1994. Drying modeling and water diffusivity in carrots and potatoes. *Journal of Food Engineering* 22: 329-348.
16. Nilnont, W., S. Thepa, S. Janjai, N. Kasayapanand, C. Thamrongmas, and B. K. Bala. 2012. Finite element simulation for coffee (*Coffea arabica*) drying. *Food and Bioproducts Processing* 90: 341-350.
17. Ozbek, B. and G. Dadali. 2007. Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves

- undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering* 83: 541-549.
18. Ruiz-López, I. I., A. V. Córdova, G. C. Rodríguez-Jimenes, and M. A. García-Alvarado. 2004. Moisture and temperature evolution during food drying: effect of variable properties. *Journal of Food Engineering* 63: 117-124.
 19. Seiiedlou Heris, S. 2009. Experimental Study and Mathematical Simulation of Drying Process in Convective Air-Dried Apples.
 20. Seiiedlou Heris, 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* 12: 171-178.
 21. Srikiatden, J., and J. S. Roberts. 2008. Predicting moisture profiles in potato and carrot during convective hot air drying using isothermally measured effective diffusivity. *Journal of Food Engineering* 84: 516-525.
 22. Zielinska, M., and M. Markowski. 2010. Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 49: 212-218.

Mathematical simulation of heat and mass transfer in convectional drying of carrot, pretreated by ultrasound and microwave

R. Rostami Baroji¹ - S. S. Seiedlou Heris^{2*} - J. Dehghannya³

Received: 30-08-2014

Accepted: 15-09-2015

Introduction

Drying foods, fruits and vegetables is a suitable method to reduce post-harvest losses of the crops. Drying is considered as a simultaneous heat and mass transfer process. Various physical, chemical and nutritional changes occur during drying of foods and are affected by a number of internal and external heat and mass transfer parameters. External parameters may include temperature, velocity and relative humidity of the drying medium (air), while internal parameters may include density, permeability, porosity, sorption-desorption characteristics and thermo physical properties of the material being dried. In this regard, understanding the heat and mass transfer in the product will help to improve drying process parameters and hence the quality. The mathematical model that reflects the drying process physics is a complex model. Particularly because of the process of convection drying of materials with high initial water content, boundary conditions should be assumed in the model describing heat and mass transfer. Ruiz-López and García-Alvarado (2007) proposed a model that provides a simple mathematical description for food drying kinetics and considered both shrinkage and a moisture dependent diffusivity. Food temperature was considered constant. The objectives of this work are: (a) to develop a mathematical model for simulating simultaneous moisture transport and heat transfer of pretreated carrot sample; (b) to study numerically the effect of the air drying conditions and pretreated on the drying of carrot and (c) to calculate the density and effective diffusion coefficients of carrot under various conditions.

Materials and Methods

In order to compare experimental and numerical analysis results, a laboratory scale convection dryer was used for experimental work. Cylindrical samples before entering the dryer were pretreated with ultrasound at frequency of 28 kHz for 10 min and microwave at 1 W g⁻¹ power for 15 min. Experimental results of moisture evolution and volume changes during drying were used to estimate moisture diffusivity and product density. Transient three-dimensional simulation of heat and mass transfer was performed with a set of initial and boundary conditions using the finite element method. The effect of the aforementioned pretreatments was applied in terms of the modified effective moisture diffusion coefficient in the heat and mass transfer equations.

Results and Discussion

The effect of the ultrasonic pretreatment on drying was mainly observed during the air-drying stage where a significant increase in water effective diffusivity was found. Ultrasonic waves can cause a rapid series of alternative compressions and expansions, in a similar way to a sponge when it is squeezed and released repeatedly (sponge effect). Microwave pretreatment reduced the initial moisture content and slightly increased the coefficient. The values of moisture diffusivity found in this study was in the order of 4.66×10^{-10} - 12.81×10^{-10} m² s⁻¹ which is typical value for drying of agricultural product (Zielinska and Markowski, 2010). Comparison of the experimental and predicted moisture and temperature profiles showed that the model could predict the heat and mass transfer phenomena with good accuracy. In this section, some simulation results are presented. The simulated moisture contents in the center and on the surface during drying showed that moisture content on the surface decreases rapidly for a short time due to the evaporation during precooling. Then it starts to increase because of the moisture diffusion from the layers under the surface towards. The temperature inside the object increases with an increase in the drying time since the temperature of the drying air is higher than that of the object. As a result of these transient and non-uniform temperature distributions, the moisture diffusivity which depends on the moisture will vary and in turn the rate of the moisture diffusion inside the object. As seen

1- M.Sc. Graduated Student, Agricultural Machinery Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Tabriz University, Tabriz, Iran

3- Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Tabriz University, Tabriz, Iran

(*- Corresponding Author Email: ss_seiedlo@yahoo.com)

in the figure, the distributions appear not to be symmetrical. Higher temperature and moisture gradients are obtained at the side wall due to the upstream of the drying air.

Conclusions

A theoretical analysis of pretreated and non-pretreated carrot drying process was presented. The main innovation introduced by this study was represented by the model formulation. This, in fact, simulated the simultaneous three dimensional heat and moisture transfer accounting for the variation of both air and food physical properties as functions of local values of temperature and moisture content. Moisture diffusivities of pretreated and non-pretreated carrot have been determined experimentally and moisture diffusivities of pretreated and non-pretreated carrot were found to increase with using of ultrasound pretreated. The effect of the aforementioned pretreatments was applied in terms of the modified effective moisture diffusion coefficient in the heat and mass transfer equations. Comparison of the experimental and predicted moisture and temperature profiles showed that the model could predict the heat and mass transfer phenomena with good accuracy. The model can be used as a proper tool in the design optimization and the optimal determination of the dryer performance parameters.

Keywords: Heat and mass transfer, Modeling, Moisture diffusivity, Ultrasound