

شبیه‌سازی سه بعدی پدیده‌های انتقال گرما و رطوبت در طی خشک‌کردن همرفتی هویج

حبیبه نعلبندی^{۱*}، سیدصادق سیدلو^۲، جلال دهقان‌نیا^۳ و رضا رستمی^۴

چکیده

هدف از تحقیق حاضر شبیه‌سازی سه بعدی فرآیند انتقال هم‌زمان گرما و رطوبت در عملیات خشک‌کردن همرفتی مواد غذایی از جمله هویج بود که این فرآیندها روی پدیده‌های تبعی مانند ترک تأثیرگذار است. مدل هندسی ورقه‌های هویج در محیط نرم‌افزار Comsol Multiphysics 3.5 ترسیم شد و سپس به تعداد ۱۰۰۱۷ عنصر و با درجه آزادی ۳۰۵۵۰ گسسته‌سازی شد. توسعه مدل با حل عددی معادلات دیفرانسیل حاکم به روش اجزاء محدود در محیط نرم‌افزار مذکور تحت دماهای مختلف هوای گرم انجام شد. در حل معادلات حاکم، خصوصیات مهندسی هویج به صورت متغیر در نظر گرفته شده و نگاشت‌های دما و رطوبت در شرایط مختلف خشک‌کردن پیش‌بینی شد. همچنین آزمایش‌هایی برای به‌دست آوردن مقادیر خصوصیات مهندسی از قبیل چگالی واقعی و ظاهری و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و سینتیک خشک‌شدن، با استفاده از خشک‌کن قفسه‌ای مجهز به ابزارهای مختلف اندازه‌گیری، در دماهای مختلف هوای گرم و ضخامت‌های مختلف نمونه‌ها انجام شد. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشی حاصل از خشک‌کردن هویج مقایسه گردید. نتایج نشان داد که مدل توسعه یافته توانسته است با دقت بالایی روند کاهش رطوبت و افزایش دما را در داخل نمونه‌ها پیش‌بینی نماید. دقت پیش‌بینی‌ها در محدوده ۹۹/۸۷ تا ۹۹/۹۸ درصد قرار داشت. بنابراین شبیه‌سازی توسعه‌یافته می‌تواند برای پیش‌بینی نگاشت‌های دما و رطوبت در فرآیند خشک‌کردن محصولات کشاورزی مختلف با خواص مهندسی مشابه و با دقت بالا به منظور بررسی تأثیر عملیات خشک‌کردن روی خواص کیفی نهایی و رسیدن به بالاترین کیفیت محصول، مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: انتقال گرما و رطوبت، خشک‌کردن همرفتی، شبیه‌سازی، کیفیت، مواد غذایی.

ارجاع: نعلبندی ح. سیدلو س. ص. دهقان‌نیا ج. و رستمی ر. ۱۴۰۲. شبیه‌سازی سه بعدی پدیده‌های انتقال گرما و رطوبت در طی خشک‌کردن همرفتی هویج. ۲۷: ۳۹-۵۱. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2023.13861.586>

۱- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تبریز.

۲- استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تبریز.

۳- استاد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه تبریز.

۴- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تبریز.

* نویسنده مسئول: h.nalbandi@tabrizu.ac.ir; habibehnalbandi@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۹

مقدمه

خشک‌کردن یکی از روش‌های معمول و با کاربرد وسیع در فرآوری پس از برداشت محصولات کشاورزی است. دستیابی به محصولی با ارزش حسی بالا و میزان انرژی مصرفی پایین، نیازمند درک صحیح از روند خشک‌کردن و مؤلفه‌های تأثیرگذار در این فرآیند است. اساس عملیات خشک‌کردن، تبادل رطوبت و گرما در بین ماده غذایی و حامل انرژی است (Chandra Mohan & Talukdar, 2010). زمانی که هوای گرم با یک دبی مشخص از روی ماده غذایی عبور می‌کند، انتقال گرما از حامل انرژی به ماده غذایی موجب تبخیر رطوبت سطحی شده و به دنبال آن فشار بخار آب در سطح ماده خشک‌شونده کاهش یافته و این امر موجب ایجاد گرادیان فشار بخار آب بین سطح و نقاط داخلی ماده می‌شود. به دلیل گرادیان ایجاد شده، رطوبت از داخل ماده توسط سازوکارهای مختلف از جمله خاصیت موئینگی، اختلاف غلظت مواد محلول و نفوذ بخار آب، به سطح ماده منتقل شده و بخار می‌شود (Rao *et al.*, 2005). در طی فرآیند خشک‌کردن ممکن است یک یا چند سازوکار مذکور به‌طور هم‌زمان عمل کنند؛ ولی با پیشرفت مراحل خشک‌شدن، اثر و اهمیت نسبی آنها ممکن است تغییر کند (Hamdami *et al.*, 2004). هم‌زمان با انتقال رطوبت، نفوذ گرما به داخل ماده غذایی صورت می‌گیرد. شدت تبادل گرما بستگی به اختلاف دما در لایه‌های مختلف ماده غذایی دارد (Curcio *et al.*, 2008). تغییرات فیزیکی و شیمیایی متعددی در حین عملیات خشک‌شدن اتفاق می‌افتد و این تغییرات عموماً تابعی از دما و رطوبت و به تبع آن‌ها، زمان صرف شده جهت خشک‌کردن است. بنابراین واپایش و کاهش تغییرات نامطلوب در محصول و در طی فرآیند خشک‌کردن و نیز کمینه‌کردن میزان انرژی مصرفی با پیش‌بینی دقیق توزیع دما و رطوبت در محصول قابل حصول است (Mihoubi *et al.*, 2009). درک صحیح و واپایش دقیق روند خشک‌شدن می‌تواند منجر به ایجاد یک طرح مناسب جهت خشک‌کردن شود. اگرچه مطالعات آزمایشگاهی، یک ضرورت در توسعه روش‌های خشک‌کردن است اما به دلیل هزینه‌بر بودن این مطالعات، تحقیقات تئوری به کمک مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی عددی، یک ابزار قدرتمند برای حصول و اطلاع از پدیده‌های پیچیده درگیر در روند خشک‌کردن بوده و

هم‌چنین ابزاری مناسب برای بررسی روند انتقال رطوبت و گرما به منظور طراحی بهینه خشک‌کن تحت شرایط واقعی است که میزان آزمون‌های آزمایشگاهی را کاهش می‌دهد (Nilnont *et al.*, 2012). مدل‌سازی عملیات خشک‌کردن یک فرآیند پیچیده است؛ به دلیل اینکه دو فرآیند انتقال رطوبت و گرما با یک دیگر مرتبط هستند و دلیل وجود این ارتباط، این است که نه تنها گرادیان رطوبتی به عنوان عامل محرک در انتقال رطوبت محسوب می‌شود، بلکه گرادیان دمایی ماده نیز در انتقال رطوبت مؤثر است. هم‌چنین تبخیر آب از ماده موجب تغییر در دمای ماده می‌شود. همه این موارد خصوصیات مهندسی مرتبط با محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Bialobrzeski, 2006). برای تفسیر یا پیش‌بینی پدیده‌های انتقال، سه روش شامل به‌کارگیری روش تفسیر ایزوترم‌های جذب و دفع، توسعه مدل‌های تجربی و تعیین توزیع دمایی با استفاده از شبیه‌سازی هم‌زمان انتقال رطوبت و گرما، متداول است. در بین سه روش ذکر شده، روش سوم اطلاعات اساسی در خصوص تئوری خشک‌شدن ارائه می‌دهد. لازم به ذکر است مدل‌سازی و شبیه‌سازی انتقال گرما و رطوبت در سطوح مختلف پیچیدگی و با دقت‌های متفاوت توسط محققین ارائه شده است (Barati & Esfahani, 2012).

در پژوهشی مدل تک بعدی انتقال گرما و رطوبت در ماده غذایی مفروض توسط Barati & Esfahani (2011) با فرض خواص مهندسی ثابت به روش تحلیلی توسعه داده شد. آنها گرمای نهان تبخیر را در سطح ماده غذایی در نظر گرفتند که تطابق خوبی بین نتایج حاصل از حل عددی با حل تحلیلی به دست آمد. در مطالعه دیگری پدیده انتقال رطوبت در فرآیند خشک‌کردن دانه قهوه به روش عددی و با در نظر گرفتن چروکیدگی و نیز ضریب نفوذ متفاوت برای هر کدام از پوست و دانه قهوه توسط Nilnont *et al.* (2012) شبیه‌سازی شد. همبستگی بالایی بین داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده نفوذ رطوبت مشاهده شد، به‌طوری‌که RMSE بین داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده در محدوده ۰/۰۸ الی ۰/۱۵ قرار داشت. بهترین پیش‌بینی در مدلی به دست آمد که چروکیدگی و ضریب نفوذ متفاوت برای پوسته و دانه قهوه در نظر گرفته شده بود. آنان هم‌چنین استفاده از ضریب نفوذ به صورت تابعی از دما را برای تخمین دقیق در شبیه‌سازی ضروری

در پیش‌بینی تغییرات دما به دست آمد. انتقال جرم و گرما در فرایند خشک‌کردن همرفتی دانه نیز توسط Wei *et al.* (2019) شبیه‌سازی گردید. در این تحقیق دانه ذرت به صورت یکنواخت و غیریکنواخت (متشکل از قسمت‌های مختلف مانند آندوسپرم نرم، آندوسپرم سخت و جوانه) فرض و شبیه‌سازی در حالت‌های مختلف انجام شد. نتایج نشان داد، با لحاظ قسمت‌های مختلف تشکیل‌دهنده دانه در مدل، شبیه‌سازی از دقت بالایی برخوردار است، زیرا این بخش‌ها دارای آهنگ‌های مختلف از انتقال رطوبت و گرما بودند که این امر نتایج را تحت تأثیر قرار می‌داد. برخی از محققین مانند Bialobrzewski *et al.* (2008) نشان دادند که اعمال چروکیدگی در فرآیند خشک‌کردن بستر سیال قطعات هویج، تغییری در نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل در دو حالت اعمال چروکیدگی و عدم اعمال آن در معادلات انتقال، ایجاد نکرد.

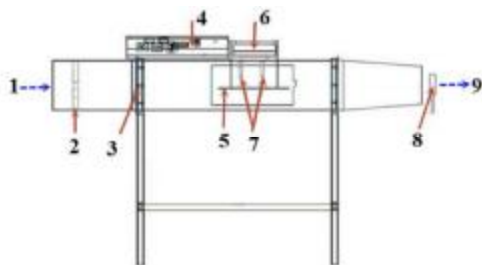
فرآیند انتقال گرما و رطوبت طی خشک‌کردن همرفتی ورقه‌های هویج با پیش‌تیمارهای مختلف مانند ریزموج و فراصوت نیز توسط Rostami *et al.* (2017) مدل‌سازی شد. آنان ضریب نفوذ مؤثر رطوبت را به صورت تابعی از محتوی رطوبت هویج در نظر گرفتند. در تحقیق آنان، از چروکیدگی صرف‌نظر و همه خصوصیات انتقالی و فیزیکی - حرارتی هویج ثابت فرض شده بود. خطای بین داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده بین ۳/۵ الی ۱۲ درصد قرار داشت.

چنان‌که ملاحظه شد مدل‌های متعددی در شرایط مختلف آزمایشی و با فرضیه‌های متفاوت توسعه‌یافته است. تفاوت اصلی آنها در دقت پیش‌بینی نداشت‌های دمایی و رطوبتی ماده در کل بازه زمانی فرآیند است. منشاء و دلیل توسعه مدل‌های جدید این است که آیا مدل در سایر شرایط و سایر محصولات می‌تواند برای پیش‌بینی نداشت‌های دمایی و رطوبتی و به تبع آن پیش‌بینی رفتار تبعی ماده مانند تغییرات کیفی مورد استفاده قرار گیرد.

فقدان یک ابزار تحلیلی قوی و در عین حال ساده برای شبیه‌سازی سه بعدی توزیع گرما و رطوبت در شرایط واقعی خشک‌کردن همرفتی مواد غذایی مانند میوه‌ها و سبزیجات و با دقت بالا و نیز عدم جامع بودن مدل‌های توسعه‌داده شده قبلی، انگیزه اصلی این تحقیق بود.

دانستند. محققین دیگری نیز مانند (Ruiz-Lopez & Garcia-Alvarado (2007 و Hadrach & Kechaou (2009) مدل انتقال رطوبت، با فرض دمای ثابت در طی فرآیند خشک‌کردن مواد غذایی و با در نظر گرفتن چروکیدگی نمونه‌ها و ضریب نفوذ متغیر رطوبت را توسعه دادند.

در تحقیقی فرآیند خشک‌شدن نخودفرنگی در دمای هوای گرم و شدت تابش مختلف در خشک‌کن ترکیبی هوای گرم - مادون‌قرمز توسط Zare *et al.* (2019) شبیه‌سازی شد. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که در شرایط مورد مطالعه، خطای پیش‌بینی توسط شبیه‌ساز بین ۲/۲۱ الی ۳/۷۷ درصد قرار داشت. شبیه‌سازی با استفاده از ضریب انتشار متغیر و ثابت توسط Maghsoudlou Kamali *et al.* (2021) نیز انجام شد. آنان معادلات انتشار رطوبت و گرما را به صورت هم‌زمان در محیط نرم‌افزار MATLAB به صورت عددی حل کرده و فرآیند خشک‌کردن چغندر لبویی را شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد استفاده از ضریب انتشار متغیر منجر به برازش مناسب‌تر گردید. در تحقیق انجام شده دیگری توسط Aversa *et al.* (2007) انتقال گرما و رطوبت در ورقه‌های هویج در طول فرآیند خشک‌کردن به صورت دو بعدی و با استفاده از خصوصیات مهندسی متغیر شبیه‌سازی شد. نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که مدل توسعه‌یافته در ۲ ساعت اول خشک‌کردن، با ۵ درصد خطا به خوبی نداشت‌های دما و رطوبت را تخمین زده بود. ولی در مراحل پایانی خشک‌کردن از دقت کافی برخوردار نبود. آنان علت کاهش دقت مدل را صرف‌نظر نمودن از چروکیدگی ورقه‌های هویج بیان داشتند، زیرا در مراحل پایانی خشک‌کردن مقدار چروکیدگی افزایش می‌یافت. نداشت‌های دمایی و رطوبتی درون سیب‌زمینی و هویج نیز توسط Srikatden & Roberts (2008) با در نظر گرفتن ضریب نفوذ هم‌دما پیش‌بینی شده است. آنان بیان داشتند که در نظر گرفتن ضریب نفوذ مؤثر رطوبت به صورت تابعی از متغیرهای مورد مطالعه، تأثیر بسزایی در تخمین نداشت‌های رطوبت دارد. در پژوهشی Ruiz-Lopez *et al.* (2004) مدل انتقال گرما و رطوبت را به صورت هم‌زمان و با فرض ثابت و متغیر بودن خواص مهندسی محصول هویج توسعه دادند. نتایج حاصل در پیش‌بینی کاهش رطوبت قابل قبول بود، اما نتایج ضعیفی



شکل ۱- طرح‌واره خشک‌کن همرفتی: (۱) ورودی هوا؛ (۲) فن؛ (۳) گرم‌کن؛ (۴) واپایش‌کننده دما و سرعت هوا؛ (۵) سینی مشبک؛ (۶) ترازوی رقمی، (۷) حسگر دما و رطوبت؛ (۸) سرعت‌سنج رقمی هوا؛ (۹) خروجی هوا

هم‌زمان نمونه‌های هویج داخل همان خشک‌کن روی سینی جداگانه خشک شدند. این نمونه‌ها متصل به ترازو نبودند و برای آزمایش‌های حجم‌سنجی و اندازه‌گیری دمای نمونه‌ها در طی خشک‌کردن استفاده شدند. برای محاسبه چگالی ظاهری، حجم نمونه‌ها در طی خشک کردن و در رطوبت‌های ۷/۸، ۵، ۲/۵ و ۰/۳۴ (گرم آب بر گرم ماده خشک) اندازه‌گیری شد (Yan, 2008). در هر آزمایش و در هر سطح رطوبتی سه نمونه به صورت تصادفی از داخل خشک‌کن بیرون آورده شدند و حجم آن‌ها نیز اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری حجم نمونه‌ها با استفاده از روش جابجایی تولون و به وسیله پیکنومتر صورت گرفت (Chakraverty & Poul, 2001; Mohsenin, 1986). در ابتدا پیکنومتر حاوی تولون و به صورت کاملاً پر توزین شد. سپس نمونه‌ها توزین و در داخل پیکنومتر حاوی تولون قرار داده شدند و تولون اضافی از پیکنومتر خارج شد. بعد از توزین پیکنومتر حاوی تولون و نمونه‌ها، از معادله‌های (۱) و (۲) برای محاسبه جرم و حجم تولون جابجا شده و به تبع آن محاسبه حجم و چگالی نمونه‌ها استفاده شد.

$$V = \frac{M}{\rho_{to}} = \frac{(m+m')-m''}{\rho_{to}} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

که در این معادلات:

V : حجم تولون جابجا شده = حجم نمونه‌ها (m^3)
 m, m' : به ترتیب جرم پیکنومتر حاوی تولون و جرم نمونه‌ها (kg)

m'' : جرم پیکنومتر حاوی تولون و نمونه‌ها (kg)

M : جرم تولون جابجا شده (kg)

ρ_{to} : چگالی تولون (kg/m^3)

بنابراین هدف اصلی این تحقیق توسعه مدل جامع انتقال جرم و گرما در حین خشک‌کردن هویج در حالت سه بعدی بود که نتایج آن را بتوان در پیش‌بینی تغییرات کیفی ساختاری و رئولوژی محصول در حین خشک‌شدن مورد استفاده قرار داد. عملکرد مدل‌های سه بعدی بهتر از مدل‌های تک بعدی خواهد بود.

مواد و روش‌ها

تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

دو روز قبل از شروع آزمایش‌ها، نمونه‌های هویج تازه از بازار محلی تهیه و داخل کیسه‌های پلاستیکی منفذدار (برای جلوگیری از تعرق) در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شدند. قبل از انجام آزمایش خشک‌کردن، نمونه‌ها که دارای قطر ۲۰ میلی‌متر بودند، با ضخامت ۴ و ۶ میلی‌متر برش داده شدند. اندازه‌گیری رطوبت اولیه در هر آزمایش براساس استاندارد AOAC در آون و در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت انجام شد (AOAC, 1990).

خشک‌کردن نمونه‌ها

خشک‌کردن نمونه‌های آماده شده توسط یک خشک‌کن همرفتی سینی‌دار و در دو سطح دمایی ۶۰ و ۷۰ درجه سلسیوس و در سرعت هوای ۱/۲ متر بر ثانیه، در سه تکرار انجام شد. خشک‌کن آزمایشگاهی به یک واحد سامانه داده‌برداری به همراه یک واحد واپایش مجهز بود. اندازه‌گیری دمای هوای داخل خشک‌کن توسط حسگرهای PT100، درصد رطوبت نسبی هوای گرم توسط حسگر SAMWAN ENG، واپایش سرعت جریان هوای گرم توسط سرعت‌سنج پره‌ای (AM-4202-Lutron) و نهایتاً واپایش این متغیرها توسط مدار فرمان و رایانه مرکزی (شکل ۱) صورت می‌گرفت.

جرم نمونه‌های روی قفسه‌ها با استفاده از یک دستگاه ترازوی رقمی AND (مدل GF 3000، ژاپن) که با یک اتصال RS232 به یک رایانه متصل بود، در فواصل زمانی سه دقیقه و با دقت ± 0.1 گرم اندازه‌گیری و ثبت می‌شد. برای اندازه‌گیری دمای ورقه‌های هویج در نقاط مختلف آن از ترموکوپل‌های نوع k متصل به یک جمع‌کننده داده (انگلستان، DeleaT) در فواصل زمانی یک دقیقه استفاده شد.

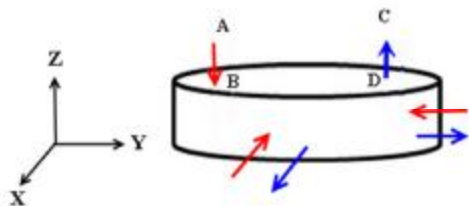
$$D_{\text{eff}}(C) = D_{01} \exp(D_{a1}C) \quad (5)$$

$$D_{\text{eff}}(C, T, L) = D_{02} \exp(D_{a2}C) \quad (6)$$

$$D_{02} = f(T, L), \quad D_{a2} = f(T, L)$$

مدل‌سازی ریاضی

در تحقیق حاضر، انتقال هم‌زمان گرما و رطوبت در خشک‌کردن لایه نازک مواد غذایی در نظر گرفته و مدل ریاضی توصیف‌کننده پدیده‌های انتقال درگیر در فرآیند خشک‌کردن هویج توسعه داده شد. سامانه مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- سیستم حاکم بر پدیده انتقال جرم و گرما: (A) جریان گرما - جابجایی؛ (B) جریان گرما - هدایت گرما؛ (C) جریان جرم - جابجایی و (D) جریان جرم - دیفوزیون

در شکل ۲ انتقال گرمای A در لایه سطحی و مرزی به صورت انتقال گرما در مایع (Convection) اجباری بود و انتقال گرمای B در درون ماده به صورت هدایت انتقال می‌یابد. هم‌چنین انتقال جرم در درون ماده به طرف سطح بیرونی آن D با استفاده از سازوکار نفوذ و انتقال جرم از سطح بیرونی ماده به هوای اطراف C با استفاده از جابجایی و به دلیل گرادیان فشاربخار صورت می‌گیرد. با توجه به پیچیدگی توصیف پدیده‌های انتقال در فرآیند خشک‌کردن، جهت توسعه مدل فرض‌هایی در نظر گرفته شد که عبارتند از:

توزیع اولیه رطوبت و گرما در داخل ماده، یکنواخت است. ماده مورد مطالعه دو فازی و شامل آب و مواد جامد است. تغییر حجم نمونه در طی خشک‌کردن قابل اغماض فرض شد.

در مرزهای ماده انتقال گرما و رطوبت به صورت جابجایی است.

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 سازوکارهای نفوذ و هدایت در نظر گرفته شد.

p: چگالی ظاهری نمونه‌های هویج (kg/m^3) است.

چگالی ماده خشک اولیه نمونه‌ها نیز در ابتدای فرآیند بر اساس محتوی رطوبت و حجم اولیه نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

سینتیک خشک‌شدن نمونه‌ها در تیمارهای مختلف با استفاده از داده‌های ترازوی رقمی در طول فرآیند و به صورت رطوبت ماده در مقابل زمان یا نسبت رطوبت ماده در مقابل زمان ترسیم شد. رطوبت نمونه‌ها نیز با نمونه‌برداری در بازه‌های زمانی مختلف و در تیمارهای مختلف، با استفاده از روش استاندارد AOAC انجام گرفت. خواص فیزیکی - حرارتی مانند ضریب هدایت گرمایی و گرمای ویژه با استفاده از مدل‌های تجربی موجود و تحلیل ترکیبات هویج محاسبه شد.

محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

جهت محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت از قانون دوم نفوذ فیک در فرم ورقه نامتناهی استفاده شد. فرم ساده شده حل تحلیلی قانون دوم فیک در معادله (۳) ارائه شده است. در این معادله MR نسبت رطوبت بدون بعد، D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برحسب m^2/s ، L_0 نصف ضخامت ورقه‌ها بر حسب متر و t زمان خشک‌شدن بر حسب ثانیه است. با لگاریتم‌گیری از طرفین معادله (۳)، معادله (۴) به دست آمد. از ترسیم $\ln(MR)$ تابعی از $\frac{\pi^2 \cdot t}{4L_0^2}$ در هر محدوده رطوبتی مقدار D_{eff} از شیب منحنی در آن محدوده رطوبتی حاصل شد. با توجه به محدوده‌های رطوبتی مختلف می‌توان D_{eff} ‌های مختلفی به دست آورد. بر اساس معادله (۵) مقدار D_{eff} تابعی از محتوی رطوبت (C) حاصل شد.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp \left[-\frac{\pi^2 \cdot D_{\text{eff}} \cdot t}{4L_0^2} \right] \quad (3)$$

$$\ln(MR) = \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \right) - \left[\frac{\pi^2 \cdot t \cdot D_{\text{eff}}}{4L_0^2} \right] \quad (4)$$

در ادامه، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت به صورت تابعی از رطوبت محصول (معادله (۵)) نوشته شده و ضرایب مربوطه محاسبه شد که در آن $D_{\text{eff}}(C)$ ضریب نفوذ تابعی از رطوبت، D_0 و D_a ضرایب مدل و C مقدار رطوبت محصول (خشک پایه) است (Azzouz, et al., 2002). هم‌چنین ضرایب مدل به صورت تابعی از دما و ضخامت ورقه‌های هویج با استفاده از رگرسیون چندگانه مدل‌سازی شد (معادله (۶)).

مدل انتقال رطوبت

از قانون دوم فیک در انتشار (معادله (۱۱)) برای مدل‌سازی انتقال رطوبت در ماده استفاده گردید. شرط اولیه مطابق معادله (۱۲) در نظر گرفته و از شرط مرزی نوع سوم (همرفتی یا جایجایی) برای مدل انتقال رطوبت در تمام مرزهای نمونه که در تماس با هوای گرم بودند، استفاده شد. معادله (۱۳) به صورت معادلات (۱۴) (۱۵) بازنویسی شدند.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{D}_{eff} \nabla C) \quad (11)$$

$$C(\mathbf{n}, t) = C_0 \quad t = 0 \quad (12)$$

$$-\mathbf{D}_{eff} \frac{\partial C}{\partial \mathbf{n}}(\text{surf}, t) = \frac{h_m \Delta P}{\rho_s} \quad t > 0 \quad (13)$$

$$-\mathbf{D}_{eff} \frac{\partial C}{\partial \mathbf{n}}(\text{surf}, t) = \frac{h_m}{\rho_s} (P_s(T_s) - P_a(T_a)) \quad (14)$$

$$-\mathbf{D}_{eff} \frac{\partial C}{\partial \mathbf{n}}(\text{surf}, t) = h_m (P_{sat}(T_s) a_w - P_{sat}(T_a) RH) \quad (15)$$

خواص انتقالی و فیزیکی - حرارتی هویج

به منظور افزایش دقت مدل و شبیه‌سازی دقیق انتقال رطوبت و گرما در طی فرآیند خشک‌کردن مواد غذایی، بیان خصوصیات انتقالی و فیزیکی-حرارتی به صورت متغیر و تابعی از دما و رطوبت ضروری است و یکی از وجوه تمایز تحقیق حاضر با کارهای قبلی همین موضوع است. این خصوصیات معمولاً به صورت مستقیم اندازه‌گیری و یا با استفاده از مدل‌های ارائه شده در منابع محاسبه می‌گردند. در تحقیق حاضر مقادیر برخی خصوصیات از قبیل چگالی ظاهری، چگالی ماده خشک و ضریب نفوذ مؤثر رطوبت به صورت تجربی و از داده‌های آزمایشی اندازه‌گیری شد که در بخش‌های قبلی توصیف آن آورده شده است. سایر خصوصیات ذکر شده در جدول ۱ نیز از مدل‌های مختلف موجود در خصوص هویج محاسبه شد. تعدادی از مدل‌ها وابسته به دما بوده و برخی دیگر وابسته به رطوبت هستند. همچنین معادله مورد استفاده در خصوص فعالیت آبی از معکوس معادله GAB که برای محاسبه رطوبت تعادلی ماده در رطوبت‌ها و دماهای مختلف توسعه داده شده است به دست آمد (Thorpe, 2003; Seiedlou, 2009). ثابت موجود در مدل GAB در خصوص هویج، در دماهای مختلف توسط Mihoubi *et al.* (2009) گزارش شده است که در شبیه‌سازی استفاده شد.

برای شبیه‌سازی پدیده‌های انتقال گرما و رطوبت در فرآیند خشک‌کردن، فرض شد که به محض قرار گرفتن ورقه‌های هویج در معرض هوای گرم خشک‌کن، گرما به صورت همرفتی از حامل انرژی به تمامی سطوح هویج 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_m) واپایش می‌شود. مقدار و شدت تبخیر در سطح نمونه، توسط ضریب تبادل رطوبت سطحی (K_g) و گرادیان فشار بخار ما بین سطح نمونه و هوای گرم خشک‌کن واپایش می‌گردد. سپس به دنبال انتقال رطوبت در سطح، نفوذ غیرپایدار رطوبت در داخل نمونه رخ داده و رطوبت از همه نقاط داخلی ماده به طرف سطح نفوذ می‌کند.

مدل انتقال گرما

معادله (۷) برای توصیف انتقال گرما در ورقه‌های هویج در طول فرآیند خشک‌شدن است. شرط اولیه مطابق معادله (۸) و شرط مرزی نوع سوم معادلات (۹) و (۱۰)، برای کلیه سطوح در تماس با هوای گرم در خشک‌کن استفاده شد.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{k} \nabla T) \quad (7)$$

$$T = T_0 \quad t = 0 \quad (8)$$

$$\mathbf{k} \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = h_m (T_a - T_{surf}) - \dot{m} \times \mathbf{I}_{v,surf} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{m} &= -\rho_s \mathbf{D}_{eff} \frac{\partial C}{\partial \mathbf{n}} = K_g (P_s(T_s) - P_a(T_a)) \\ &= K_g (P_{sat}(T_s) \cdot a_w \\ &\quad - P_{sat}(T_a) \cdot RH) \end{aligned} \quad (10)$$

در این معادلات، C_p ، T ، k ، t به ترتیب گرمای ویژه ($J/kg.K$)، ضریب هدایت گرمایی هویج ($W/m.K$)، دما (K) و زمان (s) هستند. همچنین h_m و K_g به ترتیب ضریب انتقال گرمای سطحی ($W/m^2.K$) و ضریب انتقال رطوبت سطحی (s/m) هستند. ρ_s چگالی ماده خشک هویج (kg_{dry})، $\mathbf{I}_{v,surf}$ ($matter/m^3$)، $P_{sat}(T_a)$ و $P_{sat}(T_s)$ به ترتیب فشار بخار اشباع در سطح آزاد در هوا و ماده (Pa)، P_a و P_s به ترتیب فشار بخار آب در سطح ماده و هوا (Pa)، $L_{v,surf}$ گرمای نهان تبخیر آب (J/kg)، \dot{m} نرخ تبخیر رطوبت ($kg/m^3.s$)، a_w فعالیت آبی (بدون واحد) و RH رطوبت نسبی هوای خشک‌کننده (اعشار) و ثابت فرض شده است.

$$K_g = \frac{\rho_a M_{water}}{P_{atm} M_a} K_m \quad (18)$$

$$\alpha_a = 1.43818 \times 10^{-7} T - 2.01567 \times 10^{-5} \quad (19)$$

$$D_{AB} = 1.87 \times 10^{-15} \left(\frac{T}{P_{atm}} \right)^{2.072} \quad (20)$$

در این معادلات، مقادیر A ، M_{al} ، Cp_{al} به ترتیب مساحت سطح بالایی قطعه آلومینیومی (m^2)، جرم (kg) و گرمای ویژه (J/kgK) آلومینیوم است. D_{AB} و α_a به ترتیب پخشندگی جرمی آب در هوا (m^2/s) و ضریب نفوذ حرارتی هوا در دمای مورد نظر (m^2/s) است.

ضریب انتقال حرارت سطحی برای دمای $60^\circ C$ و $70^\circ C$ به ترتیب برابر $15/84 W/m^2K$ و $15/34 W/m^2K$ به دست آمد و ضریب انتقال جرم نیز در دماهای مذکور برابر 10^{-7} و $1/233 \times 10^{-7}$ ثانیه بر متر محاسبه شد (Seiiedlou, 2009).

ضریب انتقال گرما و رطوبت سطحی

برای به دست آوردن ضریب انتقال گرما در سطح نمونه‌ها و در داخل خشک‌کن مورد استفاده، تغییرات دمای سطح و مرکز یک قطعه آلومینیومی در دماهای مختلف هوای گرم خشک‌کن اندازه‌گیری شد. ضریب انتقال گرمای سطحی با استفاده از رسم نمودار $\ln(T-T_{al})$ نسبت به زمان و شیب بخش خطی این نمودار (slope) به وسیله معادله (۱۶) محاسبه گردید. سپس ضریب انتقال رطوبت سطحی (K_g و K_m) نیز از معادله کلیورن- شیلتون (معادلات (۱۷) و (۱۸)) به دست آمد. معادلات (۱۹) و (۲۰) نیز به ترتیب ضریب نفوذ گرما در ماده و ضریب پخشندگی بخار آب در هوا را نشان می‌دهند (Seiiedlou, 2009).

$$h_m = \frac{M_{al} Cp_{al} slope}{A} \quad (16)$$

$$K_m = \frac{h_m}{\rho_a Cp_a \left[\frac{\alpha_a}{D_{AB}} \right]^{2/3}} \quad (17)$$

جدول ۱- خصوصیات ترموفیزیکی و انتقالی هویج

منبع	معادله	خصوصیت
Thorpe (2003)	$L_{v,surf}(kJ/kg) = 2501.3 - 2.301T - 0.00142T(^\circ C)^2$	گرمای نهان تبخیر
Bialobrzewski <i>et al.</i> (2008)	$C_p(kJ/kg K) = 1.4 + 3.22 \frac{C}{1+C}$	گرمای ویژه
Ruiz-Lopez (2004)	$k(W/m K) = 0.49 - 0.443 \exp(-0.206C)$	ضریب هدایت گرما
Rizvi (1986)	$X_{eq} = \frac{x_m k b a_w}{(1 - k a_w)(1 - k a_w + k b a_w)}$	رطوبت تعادلی، X_{eq} بر پایه خشک
Zhang <i>et al.</i> (1996)	$a_w = \frac{\left[\left(\frac{(2-b)C}{x_m} + b \right) - b \left(\frac{-1+C}{x_m} \right)^2 + \frac{4C}{b x_m} \right]^{1/2}}{c(1-b)k'}$ $x_m = 0.014 \times \exp\left(\frac{695.67}{T}\right)$	فعالیت آبی (معکوس معادله GAB)
Mihoubi <i>et al.</i> (2009)	$b = 1.05 \times 10^{-6} \cdot \exp\left(\frac{6313.74}{T}\right)$ $k' = 1.18 \times \exp\left(\frac{-60.60}{T}\right)$	ضرایب مدل GAB صورت تابعی از دما
در این تحقیق	$P_{sat}(Pa) = 611 * 10^{(7.5 * (-273.15 + T)/(-35.45 + T))}$	فشار بخار اشباع

ورقه هویج در ضخامت ۴ میلی‌متر به ترتیب برابر 10^{-6} و $1/242$ متر مکعب و 10^{-4} و $8/717$ مترمربع محاسبه شد. هندسه مذکور به تعداد ۱۰۰۱۷ عنصر گسسته‌سازی شد و درجه آزادی مدل نیز برابر ۳۰۵۵۰ به دست آمد (شکل ۳).

پس از حصول نگاهت‌های دما و رطوبت، مقادیر حاصل در هر شرایطی از آزمایش‌ها با نتایج حاصل از آزمایش‌های

حل عددی معادلات حاکم

معادلات دیفرانسیلی حاکم باهم و با در نظر گرفتن شرایط مرزی و اولیه در محیط نرم‌افزار Comsol Multiphysics 3.5 حل شدند. پایه حل معادلات در این نرم‌افزار روش حل عددی براساس اجزای محدود است. مدل هندسی سه بعدی ورقه‌های هویج برای شبیه‌سازی استفاده شد. به‌عنوان نمونه حجم و مساحت سطح هر

ماده خشک به مقدار ۱۲۵۰ و ۹۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب افزایش یافت.

ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

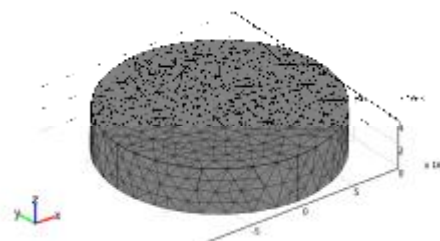
ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در تمامی شرایط آزمایش (در دماها و ضخامت‌های مختلف) و به صورت تابعی از رطوبت نمونه‌ها محاسبه و مدل ریاضی ضریب نفوذ مطابق معادله (۶) استخراج شد. ضرایب مدل مذکور در شرایط مختلف خشک‌کردن در جدول ۲ ارائه شده است. در نهایت ضرایب مدل به صورت تابعی از دما و ضخامت نمونه‌ها مدل‌سازی شد. معادله (۲۲) وابستگی ضریب D_{02} به ضخامت ورقه‌های هویج و دما را نشان می‌دهد. اثر دما و ضخامت ورقه‌های هویج روی ضریب D_{a2} معنی‌دار نبود. بنابراین در توسعه مدل از مقدار متوسط آن استفاده شد. مدل نهایی D_{eff} در معادله (۲۳) نشان داده شده است.

$$D_{02} = 10^{-10}(0.2087T + 366.9L - 71.8164) \quad (22)$$

$$D_{eff} = \{10^{-10}(-71.8164 + 0.2087T + 366.9L)\}e^{(-0.203C)} \quad (23)$$

تجربی مقایسه شدند. معیار مقایسه نتایج عددی و تجربی میزان خطا بود که با استفاده از معادله (۲۱) محاسبه شد.

$$E(\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|C_{exp,i} - C_{simu,i}|}{C_{exp,i}} \times 100 \quad (21)$$



شکل ۳- مدل هندسی و عنصربندی ورقه هویج

نتایج و بحث

چگالی ظاهری و ماده خشک

مقدار چگالی ظاهری و ماده خشک در رطوبت اولیه معادل ۷/۸ گرم آب بر گرم ماده خشک، به ترتیب برابر ۱۰۲۳ و ۱۱۶ کیلوگرم بر مترمکعب بود و پس از خشک‌شدن و رسیدن به رطوبت ۰/۳۴ گرم آب بر گرم

جدول ۲- ضرایب مدل ریاضی ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در شرایط مختلف خشک‌کردن

RMSE	D_a	$D_0 \times 10^{-10}$	شرایط آزمایش	
			ضخامت (mm)	دما ($^{\circ}C$)
$2/960 \times 10^{-11}$	-۰/۲۴۱	۵/۰۴۷	۴	۶۰
$10/34 \times 10^{-11}$	-۰/۱۷۰	۸/۷۲۲	۶	
$7/719 \times 10^{-11}$	-۰/۱۶۲	۷/۱۴۰	۴	۷۰
$6/063 \times 10^{-11}$	-۰/۲۲۹	۱۰/۸۰۳	۶	

می‌دهد که به دلیل آهنگ بالای تبخیر رطوبت سطحی در مراحل ابتدایی خشک‌شدن به دلیل نوع اتصالات آب، دمای ماده غذایی در ابتدا پایین بوده و با ادامه روند خشک‌شدن دما افزایش می‌یابد، تا اینکه در مراحل پایانی فرآیند خشک‌کردن دمای نمونه‌ها به دمای هوای گرم ($^{\circ}C$) نزدیک می‌گردد. بعد از گذشت ۱۸۰ دقیقه از شروع فرآیند دمای سطح به $58^{\circ}C$ رسیده است.

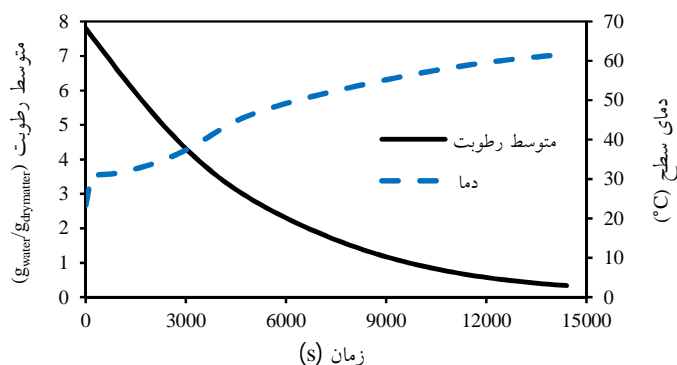
شکل ۵- الف توزیع رطوبت را در راستای شعاع و در مرکز ورقه هویج و در زمان‌های مختلف خشک‌شدن نشان می‌دهد. آهنگ کاهش رطوبت در سطح نمونه نسبت به مرکز آن سریع‌تر بود. این امر موجب کاهش سریع رطوبت در سطح نمونه‌ها و ایجاد گرادیان رطوبتی بین سطح و داخل ماده غذایی شده و محرک اصلی نفوذ در درون ماده

پیش‌بینی توزیع رطوبت و دما در ورقه‌های هویج

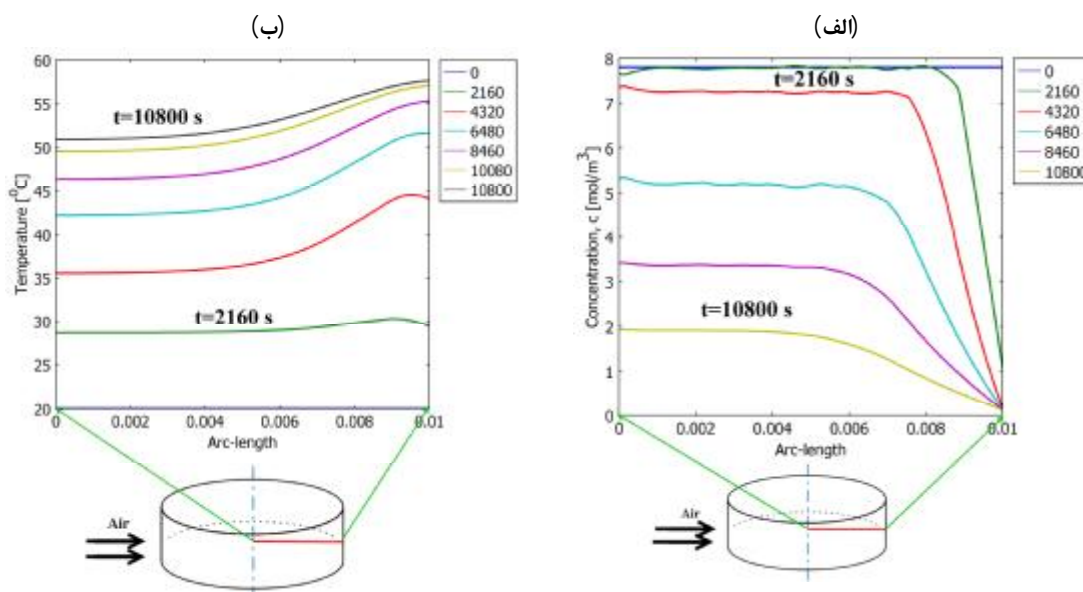
شبیه‌سازی فرآیند انتقال گرما و رطوبت در ورقه‌های هویج در دماهای مختلف هوای گرم و ضخامت‌های مختلف نمونه‌ها انجام شد. به عنوان نمونه در شکل ۴ تغییرات دمای سطح و نیز تغییرات متوسط رطوبت ورقه هویج در طول خشک‌شدن در دمای $60^{\circ}C$ و ضخامت ۴ میلی‌متر نشان داده شده است. تغییرات رطوبت نشان می‌دهد که خشک‌شدن در مرحله نزولی آهنگ افت رطوبت اتفاق افتاده است. بنابراین آهنگ خشک‌شدن وابسته به مقدار ضریب نفوذ مؤثر رطوبت بوده و با آن واپایش می‌گردد. زمان لازم برای کاهش محتوای رطوبت از ۷/۸ تا ۰/۳۴ گرم آب بر گرم ماده خشک، ۲۴۰ دقیقه پیش‌بینی شده است. نگاهت دمای نمونه‌ها نیز نشان

است. در همه مراحل خشک کردن رطوبت مرکز بیشتر از سطح آن بوده است. کاهش متوسط رطوبت در محصول بعد از گذشت ۱۲۰ دقیقه از شروع فرآیند، ۶/۰۲ گرم آب بر گرم ماده خشک بود. در حالی که بعد از گذشت ۱۲۰ دقیقه بعدی در آخر فرآیند، این کاهش ۱/۴۴ گرم آب بر گرم ماده خشک به دست آمد و دلیل اصلی آن وابستگی D_{eff} به رطوبت بود که با کاهش محتوی رطوبت، مقدار نفوذ و به تبع آن میزان کاهش رطوبت کندتر می‌شد. نتایج سایر محققین نیز با نتایج حاصل از این تحقیق مشابه است (Mihoubi et al., 2009; Rostami et al., 2017).

شکل ۵- ب نشان داده شده است. با شروع فرآیند خشک کردن، آب سطحی نمونه‌ها سریع تبخیر شده و دمای سطح بعد از گذشت ۷۵ دقیقه تا 45°C بالا می‌رود و گرادپان دمایی بین سطح و درون ماده غذایی ایجاد می‌گردد که انتقال دما در راستای شعاع با استفاده از سازوکار هدایت ادامه می‌یابد. بدیهی است که نرخ افزایش دما در درون ماده به میزان کاهش رطوبت نقاط داخلی نمونه‌ها وابسته است.



شکل ۴- تغییرات متوسط رطوبت و دمای سطح ورقه هویج با ضخامت ۴ میلی‌متر و در دمای هوای گرم 60°C (Rostami et al. (2017)

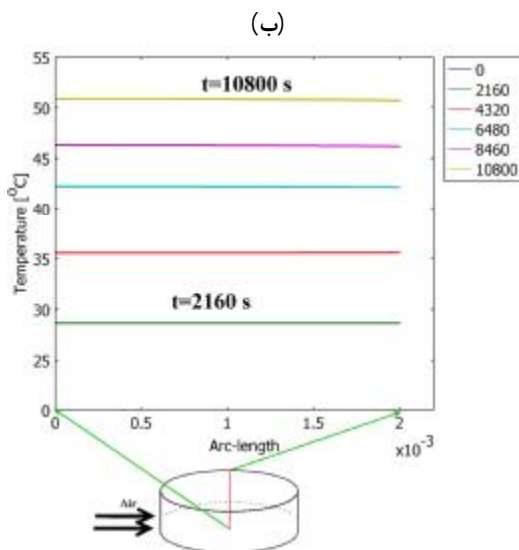


شکل ۵- الف) نگاشت رطوبت و ب) نگاشت دمای مرکز ورقه هویج در راستای شعاع و در زمان‌های مختلف فرآیند خشک کردن

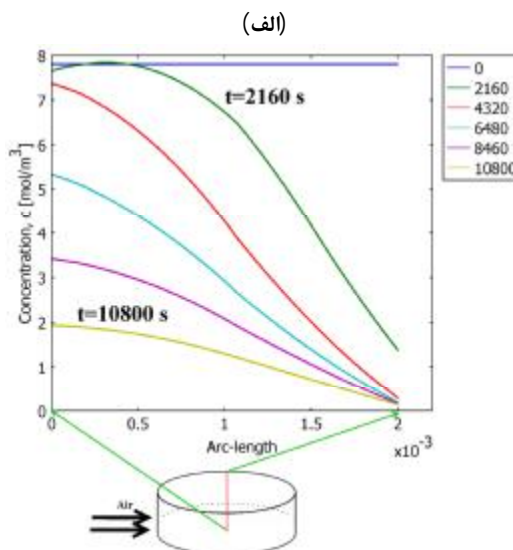
در مراحل ابتدایی خشک شدن بیشتر بوده و این روند با پیشرفت زمان خشک شدن کاهش می‌یابد. شکل ۶- ب توزیع دمای مرکز نمونه را در راستای ضخامت (z) نشان

شکل ۶- الف نیز توزیع رطوبت در راستای ضخامت ورقه هویج (z) را نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود نرخ خشک شدن در سطح نمونه نسبت به نقاط داخلی و

یکدیگر نزدیک است. ولی با توجه به قطر نمونه، نقاط مختلف شعاعی متفاوتی را در دمای خود نشان می‌دهند. به طوری که افزایش دمای نقاط کناری بیشتر از نقاط درونی نمونه‌ها بوده است (شکل ۵-ب).



می‌دهد. نمودارها نشان می‌دهند که نقاط مختلف در راستای ضخامت نمونه‌ها، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر از نظر دما در طول فرآیند ندارند و دلیل اصلی آن پایین بودن ضخامت نمونه‌ها است که با وجود ضریب حرارتی به مقدار ۰/۵ برای هویج، دمای نقاط مختلف تقریباً به



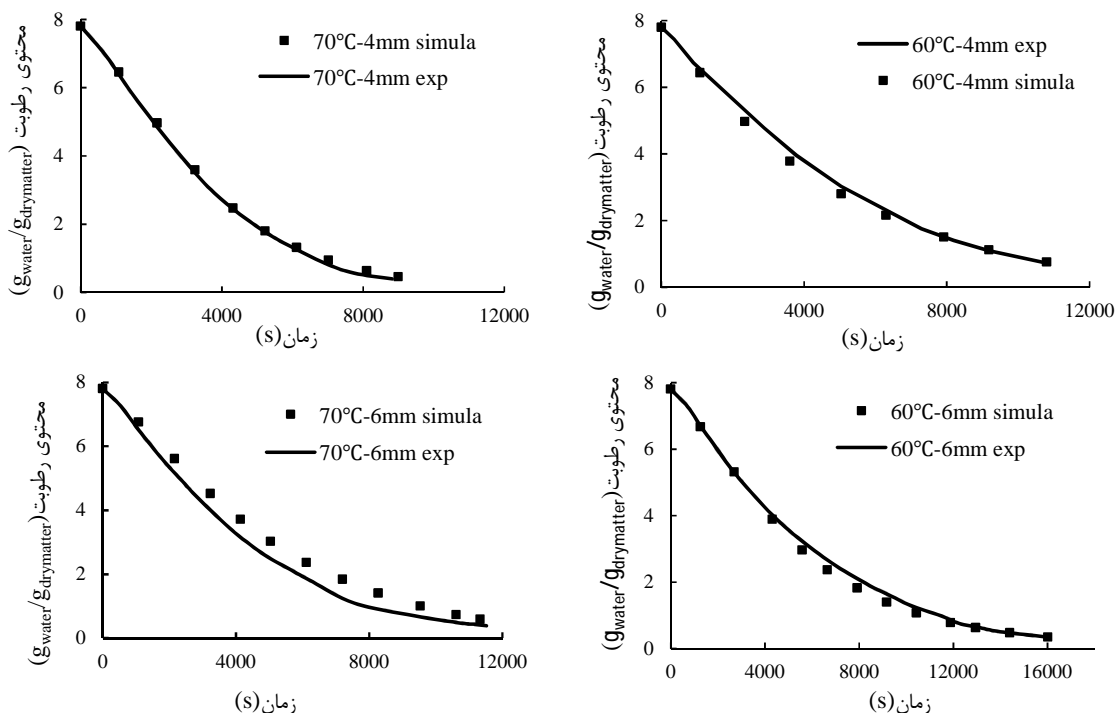
شکل ۶- الف: نداشت رطوبت و ب: نداشت دمای مرکز ورقه هویج در راستای ضخامت در زمان‌های مختلف فرآیند خشک‌کردن

میزان خطا در دمای 60°C و ضخامت‌های ۴ و ۶ میلی‌متر به ترتیب $3/5$ و $4/45$ درصد و در دمای 70°C و ضخامت‌های ۴ و ۶ میلی‌متر به ترتیب $6/7$ و 19 درصد بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که شبیه‌سازی انجام شده به خوبی توانسته است رطوبت نمونه‌ها را در طی خشک‌کردن پیش‌بینی کند. خطای پیش‌بینی داده‌ها توسط شبیه‌سازها اغلب در آزمایش‌های مختلف متفاوت گزارش شده است. به طوری که (2008) *et al.* Białobrzewski در پیش‌بینی کاهش رطوبت در دماهای مختلف، خطای بین مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده را در محدوده صفر تا ۹۸ درصد به دست آوردند. همچنین (2007) *Aversa et al.* نیز وجود خطای ۵٪ را در پیش‌بینی رطوبت محصول در دو ساعت اولیه فرآیند گزارش کرده‌اند و مهم‌تر اینکه این خطا در مراحل بعدی و انتهایی فرآیند افزایش یافته است.

اعتبارسنجی شبیه‌ساز توسعه‌یافته در پیش‌بینی

تغییرات رطوبت در طی فرآیند خشک‌کردن هویج

بررسی اعتبار شبیه‌ساز توسعه داده شده از طریق مقایسه بین مقادیر متوسط رطوبت پیش‌بینی شده توسط شبیه‌ساز و داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های تجربی صورت گرفت. در شکل ۷ تغییرات رطوبت ورقه‌های هویج در آزمایش‌های تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده آن را در دماهای هوای گرم 60°C و 70°C و ضخامت ورقه‌های ۴ و ۶ میلی‌متر نشان داده شده است. بر اساس نتایج، شبیه‌ساز توسعه‌یافته به خوبی توانسته است محتوای رطوبت نمونه‌ها را در شرایط مختلف خشک‌کردن پیش‌بینی نماید. ضریب همبستگی بین نتایج تجربی و پیش‌بینی در شرایط مختلف آزمایش در محدوده $99/87$ تا $99/98$ درصد به دست آمد که بیشترین و کمترین ضریب همبستگی در دمای هوای گرم 70°C و به ترتیب در ورقه‌هایی با ضخامت ۴ و ۶ میلی‌متر به دست آمد.

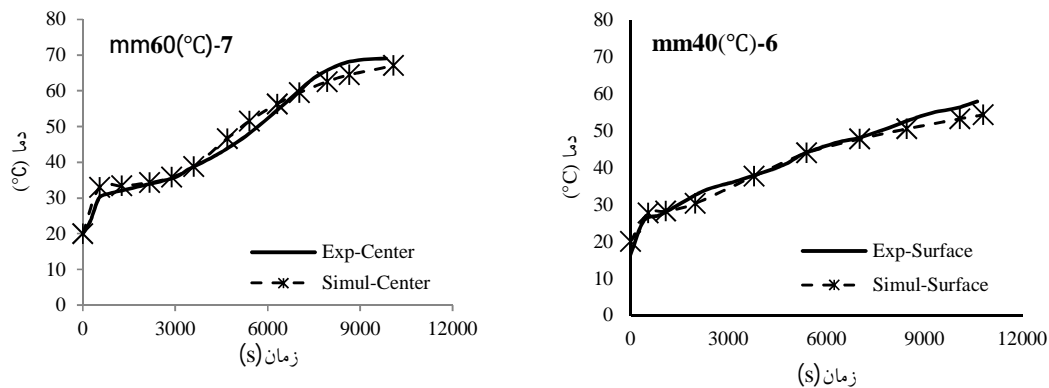


شکل ۷- مقایسه رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل با داده‌های تجربی در دماهای هوای گرم ۶۰°C و ۷۰°C و در ضخامت های ۴ و ۶ میلی‌متر ورقه های هویج

مقادیر پیش‌بینی شده و تجربی کمتر از ۱۵ درصد بود. بنابراین مدل توسعه یافته توانست تغییرات دما را در داخل نمونه به خوبی پیش‌بینی نماید. تفاوت جزئی مشاهده شده بین مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده دما می‌تواند ناشی از عدم قرارگیری خیلی دقیق ترموکوپل‌ها دقیقاً در مرکز یا سطح در داخل نمونه‌های استوانه‌ای هویج با ضخامت‌های کم باشد.

اعتبارسنجی مدل در پیش‌بینی دما

تغییرات دما در نقاط مختلف نمونه‌های هویج به صورت تابعی از زمان خشک‌کردن، در هر دو حالت تجربی و پیش‌بینی شده در شرایط آزمایشی منتخب در شکل ۸ ارائه شده است. دمای اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در دماهای مختلف خشک‌کردن و ضخامت‌های متفاوت نمونه‌ها و نیز در نقاط مختلف نمونه‌ها از جمله سطح و مرکز آن‌ها، دارای انطباق خوبی بودند و خطای موجود بین



شکل ۸- مقایسه دمای پیش‌بینی شده سطح و مرکز ورقه‌های هویج با داده‌های تجربی در هوای گرم ۶۰°C و ۷۰°C و در ضخامت های نمونه ۴ و ۶ میلی‌متر

توانسته است با دقت خوبی پدیده‌های انتقال هم‌زمان گرما و رطوبت را در طی فرآیند خشک‌کردن هویج پیش‌بینی نماید.

منابع

- AOAC. (1990). *Official method of analysis. Association of Official Analytical Chemists* (No. 934.06), Arlington, VA.
- Aversa, M., Curcio, S., Calabro, V., & Iorio, G. (2007). An analysis of the transport phenomena occurring during food drying process. *Journal of Food Engineering*, 78: 922-932.
- Azzouz, S., Guizani, A., Jomaa, W., & Belghith, A. (2002). Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. *Journal of Food Engineering*, 55: 323-330.
- Barati, E., & Esfahani, J. (2011). Mathematical modeling of convective drying, Lumped temperature and spatially distributed moisture in slab. *Energy*, 36: 2294-2301.
- Barati, E., & Esfahani, J. (2012). Mathematical simulation of convective drying, Spatially distributed temperature and moisture in carrot slab. *International Journal of Thermal Sciences*, 56, 86-94.
- Bialobrzewski, I. (2006). Simultaneous heat and mass transfer in shrinkable apple slab during drying. *Drying Technology*, 24: 551-559.
- Bialobrzewski, I., Zielinska, M., Mujumdar, A., & Markowski, M. (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.
- Chakraverty, A., & Poul, S.R. (2001). *Post Harvest Technology: Cereals, Pulses and Vegetables*. Science Publishers, Inc. India. pp. 183-188.
- Chandra Mohan, V., & Talukdar, P. (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.
- Curcio, S., Aversa, M., Calabro, V., & Iorio, G. (2008). Simulation of food drying, FEM analysis and experimental validation. *Journal of Food Engineering*, 87: 541-553.
- Hamdami, N., Monteau, J.Y., & Le Bail, A. (2004). Simulation of coupled heat and mass transfer during freezing of a porous humid matrix. *Journal of Food Engineering*, 27: 595-603.

نتایج پیش‌بینی نگاشت‌های دمایی در این تحقیق در مقایسه با نتایج منتشر شده در منابع مختلف از دقت بالایی برخوردار است. به‌طوری‌که Ruiz-Lopez *et al.* (2004) انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده دما از مقادیر تجربی را بالا برآورد کرد. انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده دما از مقادیر پیش‌بینی شده در نمونه‌های سیب نیز توسط Bialobrzewski (2006) بسیار بالا گزارش شد. هیچ‌کدام از این محققین مقادیر خطا را گزارش نکردند. هم‌چنین Bialobrzewski *et al.* (2008) نشان دادند که نتایج پیش‌بینی شده توزیع دما در خشک‌کردن قطعات هویج از دقت پایینی برخوردار است. آنان خطای موضعی را در محدوده صفر تا ۷۰ درصد گزارش کردند و بیان داشتند که اگر پیش‌بینی دما در داخل ماده از اهمیت زیادی برخوردار نباشد، می‌توان از مدل توسعه داده شده استفاده کرد. در غیر این صورت مدل توسعه داده شده توسط آن‌ها نمی‌تواند برای کاربردهای دقیق‌تر استفاده شود. این در حالی است که طراحی سامانه‌های مختلف حرارتی از جمله خشک‌کن‌ها و رسیدن به محصولی با کیفیت بالا و هزینه اقتصادی مناسب، تابع اطلاع دقیق از نگاشت رطوبتی محصول و به‌ویژه نگاشت‌های دمایی است. چرا که کاهش کیفیت رنگ، از دست دادن آروما، حدوث ترک و نیز چروکیدگی محصول تابعی از نگاشت‌های دما و رطوبت و نیز آهنگ‌های خشک‌شدن در ابتدا و انتهای فرآیند است. پس دقت شبیه‌سازی، رسیدن به نتایج بالا را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق معادلات انتقال گرما و رطوبت به صورت هم‌زمان و به صورت عددی در نرم‌افزار Comsol Multiphysics 3.5 حل شدند. برای توسعه شبیه‌سازی با دقت بالا، استفاده از خصوصیات مهندسی و فیزیکی - حرارتی متغیر ضروری است. از طرف دیگر استفاده از ضریب نفوذ مؤثر رطوبت تابعی از رطوبت محصول و نیز توسعه مدل به صورت سه بعدی برای افزایش دقت پیش‌بینی‌ها لازم است. برای این منظور خصوصیات مهندسی هویج به صورت متغیر و تابع دما در نظر گرفته شدند. مدل توسعه‌یافته به وسیله داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی اعتبارسنجی شد. نتایج نشان داد که مدل توسعه‌یافته در مقایسه با مدل‌های سایر محققین

- Thorpe, G. (2003). *Encyclopedia of agricultural, food and biological engineering*. New York, Marcel Dekker.
- Wei, Sh., Wang, Zh., Wang, F., Xie, W., Chen, P. & Yang, Y. (2019). Simulation and experimental studies of heat and mass transfer in corn kernel during hot air drying. *Food and Bioproducts Processing*, 117: 360–372.
- Yan, Z., Sousa-Gallagher, M. J., & Oliveira, F. A. R. (2008). Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. *Journal of Food Engineering*, 84: 430-440.
- Zare, D., Akbarzadeh, A., Loghavi, M. & Nematollahi, M. A. (2019) Two-dimensional Finite Element Modelling of Green Peas Drying in a Hot Air-Infrared Dryer. *Iranian Journal of Biosystem engineering*, 4(50): 761-770.
- Zhang, X. W., Liu, X., Gu, D., Zhou, W., Wang, R. L., & Liu, P. (1996). Desorption isotherms of some vegetables. *Journal of Food Engineering*, 70: 303-306.
- Hadrich, B., & Kechaou, N. (2009). Mathematical modeling and simulation of shrunk cylindrical material's drying kinetics—Approximation and application to banana. *Food and Bioproducts Processing*, 87: 96–101.
- Maghsoudlou Kamali, D., Esmaeili, Gh., Shahidi, S. A. & Maghsoudlou Kamali, D. (2021). Heat and moisture transfer and shrinkage simulation of beetroot (*Beta vulgaris*) drying. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 18(114): 263-275.
- Mohsenin, N.N. (1986). *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. Gordon and Breach Sci. Publ, New York.
- Mihoubi, D., Timoumi, S., & Zagrouba, F. (2009). Modelling of convective drying of carrot slices with IR heat source. *Journal of Food Engineering*, 49: 808–815.
- Nilnont, W., Thepa, S., Janjai, S., Kasayapanand, N., Thamrongmas, C., & Bala, B.K. (2012). Finite element simulation for coffee (*Coffea arabica*) drying. *Food and Bioproducts Processing*, 90, 341-350.
- Rao, M., Rizvi, S., & Datta, A. (2005). *Engineering properties of foods*. Taylor & Francis Group.
- Rizvi, S.S.H. (1986). *Thermodynamic properties of foods in ddehydration, engineering properties of foods*. New York, Marcel Dekker.
- Rostami Baroji, R., Seiedlou Heris, S., & Deghanny, J. (2017). Mathematical simulation of heat and mass transfer in convectional drying of carrot, pretreated by ultrasound and microwave. *Journal of Agricultural Machinery*, 7(1): 97-113.
- Ruiz-Lopez, I., & Garcia-Alvarado, M. (2007). Analytical solution for food-drying kinetics considering shrinkage and variable diffusivity. *Journal of Food Engineering*, 79: 208–216.
- Ruiz-Lopez, I., Cordova, A., Rodriguez-Jimenes, G., & Garcia-Alvarado, M. (2004). Moisture and temperature evolution during food drying, effect of variable properties. *Journal of Food Engineering*, 63: 117–124.
- Seiedlou, S. (2009). Experimental Study and Mathematical Simulation of Drying Process in Convectional Air- Dried Apples. Ph.D thesis. Faculty of Agriculture, University of Tabriz (In Persian)
- Srikiatden, J., & Roberts, J. (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.

