

مدل‌سازی ریاضی فرایند انتقال جرم دانه زیره سبز به‌منظور تعیین ضریب انتشار رطوبتی آن، طی فرایند خشک شدن

مهدی مرادی

استادیار مهندسی بیوسیستم، دانشگاه شیراز

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۱/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۷/۱۲

پیام‌نگار: moradih@shirazu.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، ضریب انتشار رطوبتی دانه گیاه زیره سبز طی فرایند خشک‌شدن لایه نازک به صورت تابعی از محتوای رطوبت آن با دو فرض صفحه‌ی دو بعدی و استوانه‌ای برای شکل دانه تعیین شد. سپس مدل‌سازی ریاضی فرایند انتقال رطوبت دانه حین خشک شدن با استفاده از روش عددی عنصر محدود انجام گرفته و نتایج حاصل از آن با محتوای رطوبت آزمایشگاهی دانه در شرایط مشابه مقایسه شد. مقدار ضریب همبستگی بین نتایج حاصل از مدل صفحه‌ی دو بعدی و داده‌های آزمایشگاهی معادل 0.992 ، و میزان مربعات خطا معادل 0.188 به دست آمد، در حالی که مقدار ضریب همبستگی بین نتایج مدل استوانه‌ای و داده‌های حاصل از آزمایش معادل 0.973 و میزان مربعات خطا معادل 0.11 به دست آورده شد. به این ترتیب، نتایج مطالعه حاضر بیانگر آن است که فرض صفحه‌ی دو بعدی برای دانه، همبستگی بیشتر و خطای کمتر نسبت به فرض شکل استوانه‌ای با داده‌های آزمایش را در پی دارد.

کلیدواژه‌ها: انتقال جرم، خشک کردن، زیره سبز، ضریب انتشار رطوبتی

۱. مقدمه

داشته باشد. بنابراین، در طراحی صحیح خشک‌کن‌ها باید راهی را به‌منظور خشک شدن آرام محصول جستجو کرد. از این رو، پی بردن به توصیف دقیق فرایند خشک شدن برای دستیابی به این منظور بسیار سودمند است [۵]. در دهه‌های اخیر، تحقیقات نظری و آزمایشگاهی گسترده‌ای به‌منظور تبیین و توصیف دقیق عمل خشک شدن محصولات کشاورزی و غذایی انجام گرفته است. در بیشتر فرایندهای خشک شدن، فرض می‌شود که انتشار رطوبت در درون محصول، آهنگ خشک شدن آن را تعیین می‌کند [۶ و ۷]. البته این فرض ناشی از آنجاست که اکثر عملیات خشک کردن در مرحله‌ای که با آهنگ نزولی صورت می‌گیرد، قابل قبول و منطقی است [۸].

خشک کردن محصولات کشاورزی، نوعی فرایند پس از برداشت به‌شمار می‌آید که مراحل آن را انجام همزمان عملیات انتقال حرارت و انتقال جرم تشکیل می‌دهند [۱ و ۲]. خشک کردن یکی از روشهای متعارف به‌منظور کم کردن رطوبت مواد است که طول عمر آنها را بیشتر و انتقال‌شان را به انبار، به دلیل کم شدن جرم، ساده‌تر می‌کند [۳ و ۴]. محصولاتی که به خوبی خشک می‌شوند، کمتر در معرض حمله باکتری‌های زیانبار قرار می‌گیرند و کیفیت آنها بهبود می‌یابد. خشک شدن سریع محصولات کشاورزی می‌تواند موجب ایجاد تنش‌های گرمایی و یا خشک شدن نایکنواخت آنها را به دنبال

* شیراز، دانشگاه شیراز، بخش مهندسی بیوسیستم

مرز میوه با هوای خشک کننده برابر با رطوبت مطلق هوای خشک کننده است.

در تحقیق دیگری، دو روش ریاضی را به منظور حل معادله انتقال جرم طی مرحله خشک شدن به کار گرفتند تا ضریب انتشار رطوبتی میوه موز به دست آورده شود. اولین روش، مطابق حل تحلیلی معادله انتقال جرم بود و روش دوم بر اساس حل عددی به طریق تفاضل محدود (روش ضمنی) استوار بود. در این شبیه سازی، شکل استوانه با طول بی نهایت برای موز انتخاب شد؛ بنابراین، معادله انتقال جرم، به صورت یک بعدی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آنان نیز از شرط مرزی تعادل رطوبتی به منظور ساده سازی حل معادله بهره بردند [۱۴].

در بررسی منابع، هیچ تحقیقی یافت نشد که به شبیه سازی فرایند انتقال جرم حین خشک شدن دانه زیره سبز، با فرض شکل های مختلف برای دانه، پردازد؛ از این رو، به منظور یافتن شکلی مناسب به منظور تبیین فرایند انتقال حرارت در دانه زیره سبز، دو فرض صفحه ای دوبعدی و استوانه ای اختیار شد. بنابراین، هدف از انجام تحقیق حاضر، تعیین ضریب انتشار رطوبتی دانه زیره سبز و حل معادله انتقال جرم در خلال خشک شدن با دو فرض مختلف برای شکل دانه و انتخاب بهترین حالت، به منظور تبیین نظریه فرایند خشک شدن است.

۲. مواد و روش ها

به منظور تعیین ضریب انتشار رطوبتی و حل معادله انتقال جرم درون محصول در حال خشک شدن، باید شکل هندسی آن معین باشد. اما دانه زیره سبز دارای شکل هندسی مشخصی نیست. مطابق تحقیقی که در مورد مشخصات فیزیکی دانه زیره سبز انجام گرفت، این دانه به طور متوسط دارای ابعاد $۵/۵۸ \times ۱/۰۵ \times ۱/۵۵$ میلی متر است [۱۵]. مشاهده می شود که طول دانه در مقایسه با عرض و ضخامت آن بیشتر است. برای ساده سازی مدل ریاضی، می توان با دقت قابل قبولی فرایند انتقال را فقط به منظور دو بعد کوچکتر لحاظ کرد [۱۶]. برای حل مسئله به صورت دو بعدی، دو حالت مختلف صفحه ای دوبعدی و استوانه ای (با طول بی نهایت و قطر $۱/۴۴$ میلی متر) برای شکل دانه زیره سبز فرض شد. نحوه به دست آوردن قطر استوانه از این قرار بود که با ضرب کردن

در یکی از پژوهشها، مدلی برای خشک شدن دانه ها پیشنهاد شد. در این مدل فرض شد، انتشار رطوبت از داخل دانه به سطح به صورت مایع انجام گرفته و مایع از روی سطح ماده به وسیله هوای داغ به بخار تبدیل می شود. در واقع، در تحقیق یادشده، به دمای داخل دانه و گرادیان رطوبتی در هر لحظه نیاز بود تا بتوان آهنگ خشک شدن را به طور دقیق پیش بینی کرد [۹]. ولی با تعریف معادله انتقال جرم برای حرکت رطوبت در داخل ماده، می توان به درصد رطوبت ماده و دمای آن در هر لحظه از زمان و در هر نقطه از ماده، دسترسی یافت. مهمترین هدف از مدل سازی فرآیند خشک شدن، پیش بینی آهنگ خشک شدن محصول است. به منظور پیش بینی بهتر فرآیند خشک شدن محصولات کشاورزی، روش لایه نازک بهترین حالت است [۱۰].

آهنگ خشک شدن دانه جو از طریق روش اجزای محدود، در تحقیقی بررسی شد [۱۱]. محصول را در دماهای متفاوت خشک کردند و توانستند از حل معادله انتقال جرم به سینتیک خشک شدن دسترسی پیدا کنند.

معمولاً، برای ساده سازی حل معادله، شرایط زیر را به عنوان شرایط مرزی و اولیه در نظر می گیرند [۱۳ و ۸]:

$$M = M_i \quad M(x_0, t) = M_e \quad (1)$$

در تحقیقی دیگر، میوه خربزه درختی با ابعاد $۵ \times ۲ \times ۰/۵$ سانتی متر مکعب در دمای ۴۵ درجه سلسیوس به کمک خشک کن کابینی از طریق جریان هوا با سرعت $۰/۹$ متر بر ثانیه و رطوبت نسبی ۳۰ درصد خشک شد. پس از آن ضریب انتشار رطوبتی محصول را در شرایط آزمایش تعیین کردند. سپس معادله مربوط به انتقال جرم با شرایط مرزی معلوم به صورت دو بعدی و بر اساس روش تفاضل محدود حل شد. در نهایت، ضریب بستگی بین رطوبت به دست آمده از نمونه های مورد آزمایش و رطوبت حاصل از حل معادله انتقال محاسبه شد که مقدار آن $۰/۹۹۶$ و میزان میانگین مربعات خطای حاصله $۰/۰۰۱۱۵$ بود [۱۳]. در تحقیق یادشده، ضریب انتشار رطوبتی محصول با استفاده از حل تحلیلی معادله انتقال جرم به دست آمد. برای حل معادله انتقال جرم در تحقیق یادشده، از روش عددی تفاضل محدود بهره بردند. فرض کردند که رطوبت بر روی

پرداخته شد. در معادله (۳)، مقدار نسبت رطوبتی دانه زیره سبز، در هر لحظه از فرایند خشک شدن، مطابق نتایج آزمایش معلوم بوده، و از این رو ضریب انتشار رطوبتی مجهول، با قرار دادن مقادیر محتوای رطوبت دانه در هر لحظه از فرایند خشک شدن، با کمک یک الگوریتم به دست آمد. این الگوریتم برای کمینه کردن خطا به کار گرفته شد تا مقدار ضریب مجهول در محتوای رطوبت‌های مختلف دانه به کمک نرم‌افزار برنامه‌نویسی MATLAB 2008b تعیین شود.

۲.۲ به‌دست آوردن ضریب انتشار رطوبتی برای جسم استوانه‌ای شکل

به‌منظور تعمیم معادله انتقال جرم در این حالت، یک استوانه با طول بی نهایت و قطری معادل ۱/۴۴ میلی‌متر فرض شد. جواب معادله انتشار رطوبتی برای این از این قرار [۸]:

$$MR = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\gamma_n^2} \exp\left[-\frac{\gamma_n^2 D_{eff} t}{r^2}\right] \quad (4)$$

که در این معادله:

γ_n : ریشه‌های معادله بسل مرتبه صفر

r : شعاع معادل دانه (m)

معادله (۴)، مانند معادله (۳)، فقط دارای یک مجموعه مجهول (ضرایب انتشار رطوبتی) است که با استفاده از الگوریتم کمینه‌سازی خطا، مقدار آن به صورت تابعی از محتوای رطوبت محصول به دست آمده است.

۲.۲ حل عددی معادله انتقال جرم

معادله انتقال جرم، معادله‌ای با مشتقات جزئی خطی از نوع سهموی است. در این معادله ضریب انتشار می‌تواند به صورت ضریب ثابت یا تابعی از محتوای رطوبتی محصول تعریف شود. معادله یادشده را به دو روش تحلیلی و عددی می‌توان حل کرد. حل تحلیلی این معادله در صورتی امکان‌پذیر است که ضریب انتشار رطوبتی ثابت باشد. ضریب انتشار رطوبتی در تحقیق حاضر، به صورت تابعی از محتوای رطوبتی به‌دست آورده شد؛ بنابراین، حل این معادله به روش عددی عنصر محدود مورد بحث قرار می‌گیرد. این روش عددی در مقایسه

ضخامت دانه در عرض آن، سطح مقطع را به دست آوردند که با فرض دایره‌ای بودن این سطح مقطع، قطر معادل ۱/۴۴ میلی‌متر به‌دست آمد. بنابراین، معادله انتقال جرم برای این محصول دانه‌ای با دو فرض صفحه‌ی دوبعدی و استوانه‌ای با طول بینهایت حل شد.

۲.۲ به‌دست آوردن ضریب انتشار رطوبتی برای صفحه‌ی دوبعدی

بنابر قانون فیک، معادله انتقال جرم در یک قطعه مکعب شکل در راستای ضخامت و طول آن به صورت معادله (۲) است [۱۷]:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

جواب تحلیلی این معادله از این قرار خواهد بود [۱۸]:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \left[\left(\sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp(-(2i+1)^2 \pi^2 D_{eff} \frac{t}{4L_1^2}) \right) \left(\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp(-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} \frac{t}{4L_2^2}) \right) \right] \quad (3)$$

که در آن:

MR: نسبت رطوبتی محصول؛ t : زمان (s)؛ L_1 و L_2 : ضخامت و عرض دانه (m)؛ D_{eff} : ضریب موثر انتشار رطوبتی دانه (m^2/s)؛ M : محتوای رطوبت محصول (d.b)؛ و M_0 : محتوای رطوبت اولیه محصول (d.b).

هرچند نسبت رطوبتی بنابر رابطه $MR = (M - M_e) / (M_0 - M_e)$ تعریف می‌شود، ولی مقدار رطوبت تعادلی (M_e) در مقایسه با M و M_0 بسیار کوچک است و می‌توان معادله را به رابطه $MR = M / M_0$ ساده کرد [۱۹، ۲۰]. دانه‌های زیره سبز در یک خشک کن کابینتی خورشیدی در شرایط مختلف خشک شدند که نتایج حاصل از آزمایش به تفصیل در تحقیق دیگری آورده شده است [۱۰]. زیره سبز گیاهی دارویی و دارای اسانس‌های مفیدی است. از این رو، خشک کردن این گیاه در دماهای کمتر موجب حفظ کیفیت آن خواهد شد. بنابراین، برای حفظ کیفیت آن به بررسی فرایند خشک شدن دانه زیره سبز تحت دمای هوای خشک‌کننده ۴۵ درجه سلسیوس (با رطوبت نسبی ۲۰ درصد)

۳. نتایج و بحث

در این تحقیق، به منظور حل عددی معادله انتقال جرم برای خشک شدن زیره سبزی به بهره‌گیری از دو روش استاندارد مبادرت شده است. به این ترتیب که دو فرض صفحه‌ی دوبعدی و استوانه با طول بی‌نهایت برای شکل دانه زیره سبزی در نظر گرفته شد. معادله انتقال جرم در هر دو حالت حل شد تا بهترین حالت برای توصیف نظریه‌ی فرایند خشک شدن معرفی شود.

قبل از حل کردن معادله، به ضریب انتشار رطوبتی نیاز بود که با روش توضیح داده شده به دست آورده شد.

ضریب انتشار رطوبتی برای مدل صفحه‌ی دوبعدی از این قرار به دست آمد:

$$D=7.623 \times 10^{-13}(M)^3 - 2.185 \times 10^{-10}(M) + 6.975 \times 10^{-11} \quad (11)$$

$$R^2=0.985$$

همچنین، ضریب انتشار رطوبتی برای مدل استوانه‌ای نیز به شکل معادله (۱۲) بود:

$$D=2.634 \times 10^{-13}(M)^3 - 7.767 \times 10^{-11}(M) + 2.494 \times 10^{-11} \quad (12)$$

$$R^2=0.987$$

به‌ازای زمانهای گوناگون در طی فرایند خشک شدن، نمودار توزیع رطوبت درون دانه در هر دو حالت صفحه‌ی دوبعدی و استوانه‌ای به دست آورده شد. شکل‌های (۱) تا (۵) توزیع رطوبت به دست آمده از مدل صفحه‌ی دوبعدی در درون دانه را، به ترتیب، در دقایق ۱۰، ۲۵، ۴۵، ۶۵ و ۹۰ ام پس از شروع آزمایش نشان می‌دهند. همان‌گونه که از این نمودارها بر می‌آید، مقدار رطوبت در مرکز صفحه‌ی دوبعدی بیشتر از سایر نقاط دانه‌اند. هر چند که با گذشت زمان اختلاف رطوبت در نقاط مختلف دانه کمتر می‌شود، این امر طبیعی است زیرا با گذشت زمان، رطوبت از مرکز دانه به سمت پوسته آن و در نهایت به هوای خشک کننده منتقل می‌شود. پس از به دست آوردن نمودار توزیع رطوبت، میانگین رطوبت داخل دانه در هر لحظه به دست می‌آید که نتایج آن را در شکل (۱۱) مشاهده می‌کنید.

با سایر روش‌های عددی دارای دقت بسیار خوبی است. در این تحقیق، از روش عنصر محدود به طریق محاسبه باقیمانده وزنی گالرکین به منظور حل معادله انتقال جرم بهره گرفته شد. در روش یادشده، انتگرال باقیمانده وزنی بر روی عناصر مختلف بینهایت کوچک جسم، معادل صفر قرار داده شده و از آنجا با کمک نظریه‌ی گرین^۱ و ساده کردن نتایج، محتوای رطوبت دانه به دست آورده می‌شود که به دلیل طولانی شدن، از ذکر جزئیات خودداری می‌کنیم و خواننده برای دسترسی به این جزئیات می‌تواند به کتابهای مرجع رجوع کند [۲۱]. شرایط اولیه و مرزی زیر برای حل معادله انتقال جرم در حالت صفحه‌ی دوبعدی به کار گرفته شد:

$$M(x,y,0)=0.435 \quad (5)$$

$$M(x_0,y,t)=M_e \quad (6)$$

$$M(0,y,t)=M_e \quad (7)$$

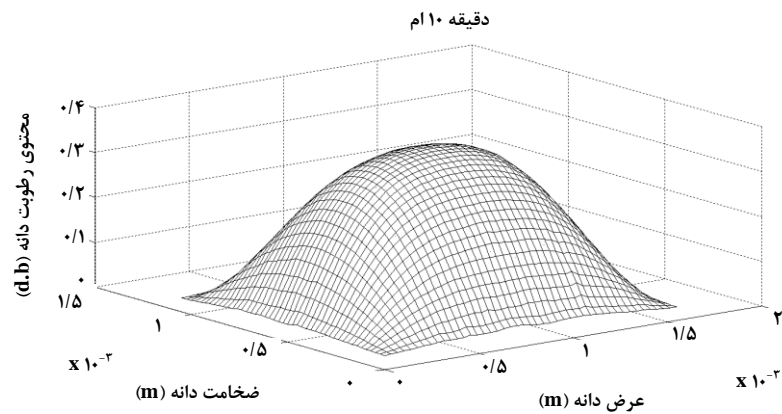
$$M(x,y_0,t)=M_e \quad (8)$$

$$M(x,y_0,t)=M_e \quad (9)$$

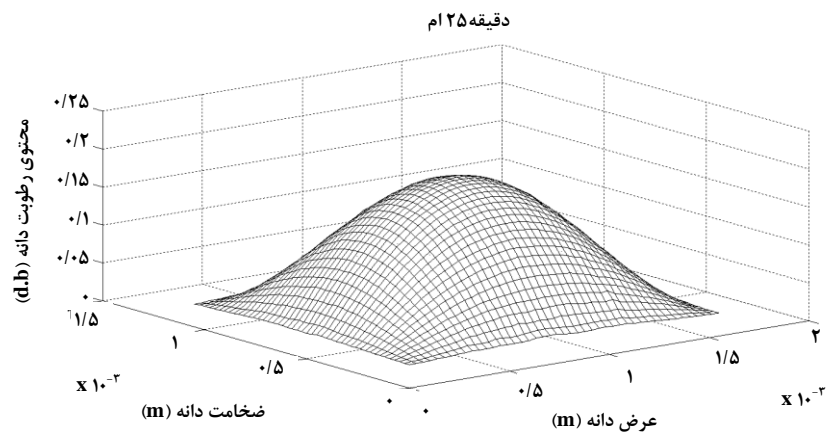
که، میزان رطوبت اولیه (M_0) بر مبنای خشک و x_0 معادل ۱/۵۵ میلی‌متر و y_0 معادل ۱/۰۵ میلی‌متر انتخاب شد. ولی اگر فرض شود دانه زیره سبزی به شکل استوانه با طول بی‌نهایت باشد، شعاع دایره معادل با آن تقریباً ۰/۷۲ میلی‌متر است. بنابراین، شرایط مرزی و اولیه در این حالت از این قرار خواهند بود [۱۷]:

$$M_0=0.435 \quad M(r_0,t)=M_e \quad (10)$$

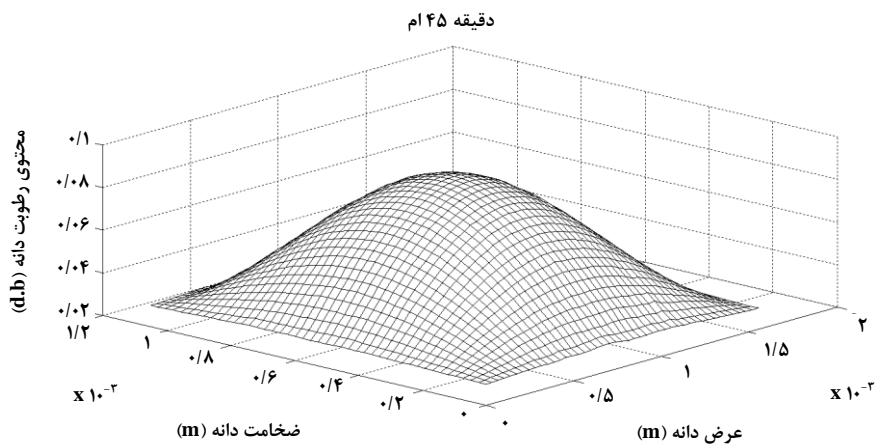
M_e ، مقدار رطوبت تعادلی است که بر اساس رطوبت نسبی محیط و دمای هوای خشک کننده معادل ۰/۰۳ کیلوگرم آب بر کیلوگرم هوا در نظر گرفته شد.



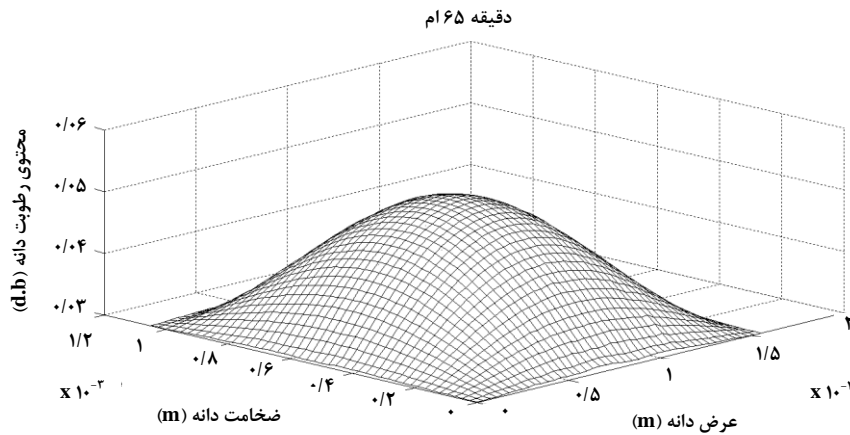
شکل ۱. توزیع رطوبت در راستای ضخامت و عرض دانه در دقیقه ۱۰ ام خشک شدن با فرض صفحه دوبعدی.



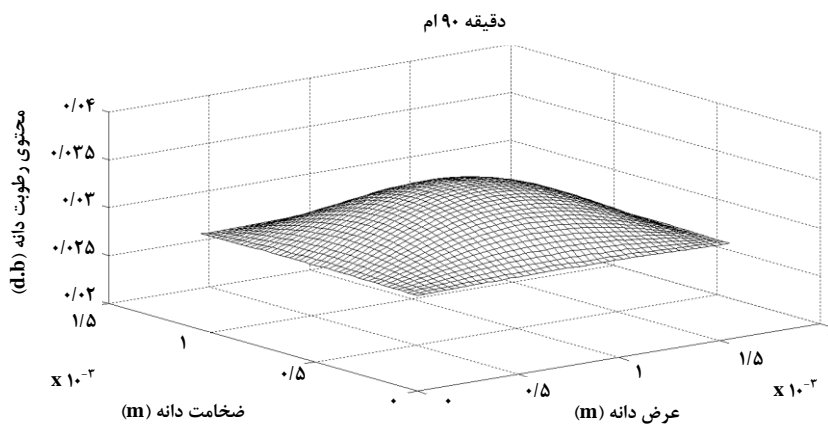
شکل ۲. توزیع رطوبت در راستای ضخامت و عرض دانه در دقیقه ۲۵ ام خشک شدن با فرض صفحه دوبعدی.



شکل ۳. توزیع رطوبت در راستای ضخامت و عرض دانه در دقیقه ۴۵ ام خشک شدن با فرض صفحه دوبعدی.



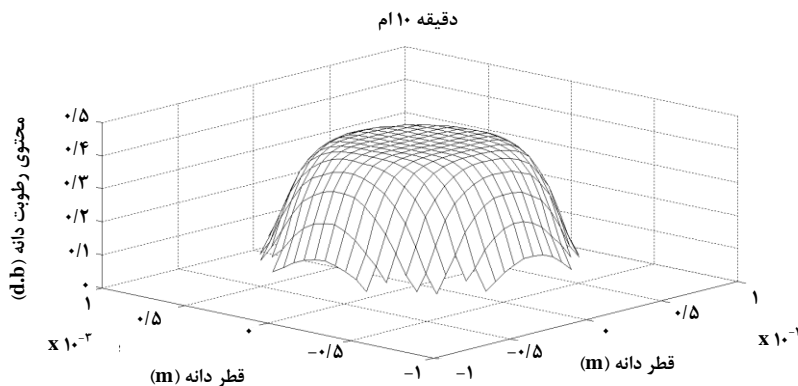
شکل ۴. توزیع رطوبت در راستای ضخامت و عرض دانه در دقیقه ۶۵ خشک شدن با فرض صفحه دوبعدی.



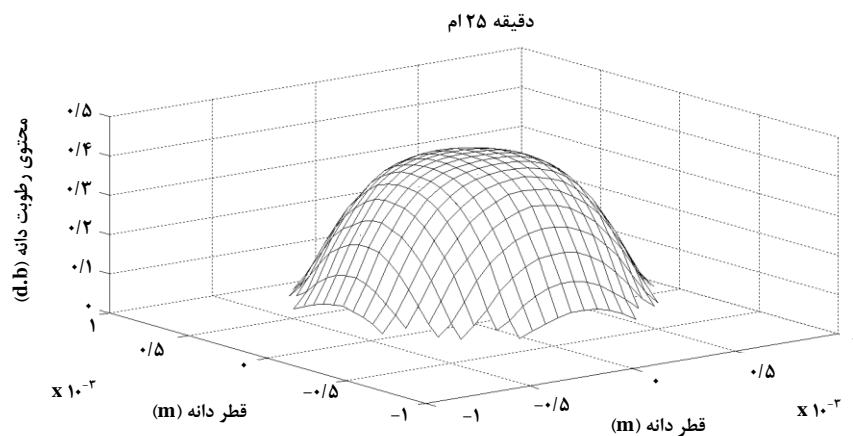
شکل ۵. توزیع رطوبت در راستای ضخامت و عرض دانه در دقیقه ۹۰ خشک شدن با فرض صفحه دوبعدی.

رطوبت در روی محیط دانه کمتر از مرکز آن است. همچنین، با گذشت زمان خشک شدن، اختلاف رطوبت بین مرکز و محیط دانه کمتر می‌شود. این امر کاملاً طبیعی است زیرا با گذشت زمان، رطوبت از مرکز دانه به سمت پوسته آن و در نهایت به هوای خشک کننده انتقال می‌یابد.

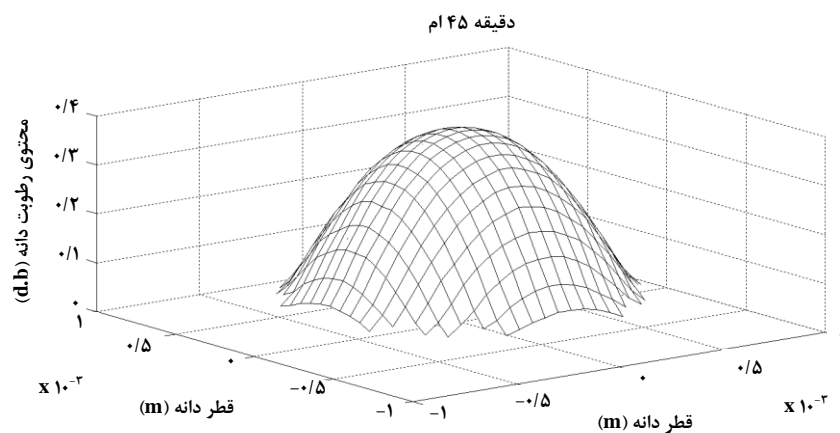
شکل‌های (۶) تا (۱۰)، توزیع رطوبت به دست آمده از مدل استوانه‌ای در درون دانه را، به ترتیب، در دقایق ۱۰، ۲۵، ۴۵، ۶۵ و ۹۰ ام پس از آغاز آزمایش نشان می‌دهند. در این نمودارها، محورهای x و y بیانگر قطر دانه و محور عمودی نمایانگر محتوای رطوبت دانه بر مبنای خشک است. در همه این نمودارها، مشاهده می‌شود که مقدار



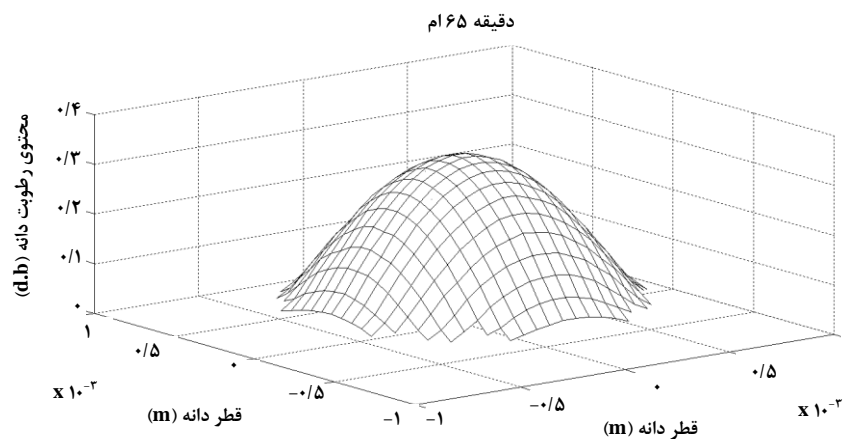
شکل ۶. توزیع رطوبت در راستای قطر دانه در دقیقه ۱۰ خشک شدن با فرض صفحه استوانه‌ای.



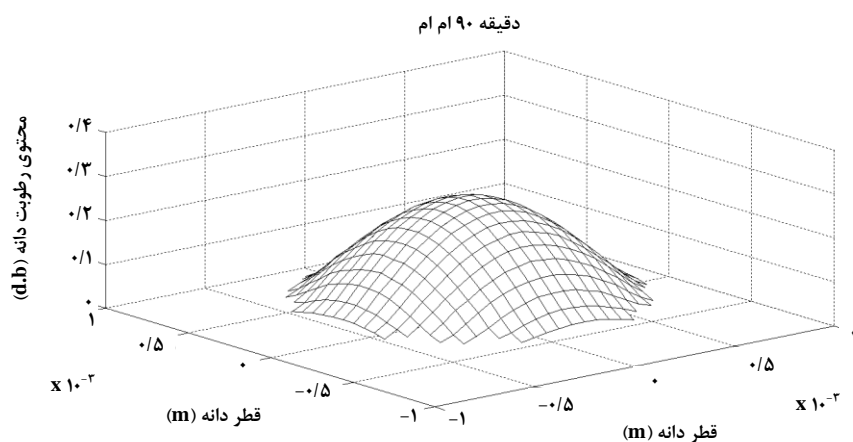
شکل ۷. توزیع رطوبت در راستای قطر دانه در دقیقه ۲۵ ام خشک شدن با فرض صفحه استوانه‌ای.



شکل ۸. توزیع رطوبت در راستای قطر دانه در دقیقه ۴۵ ام خشک شدن با فرض صفحه استوانه‌ای.



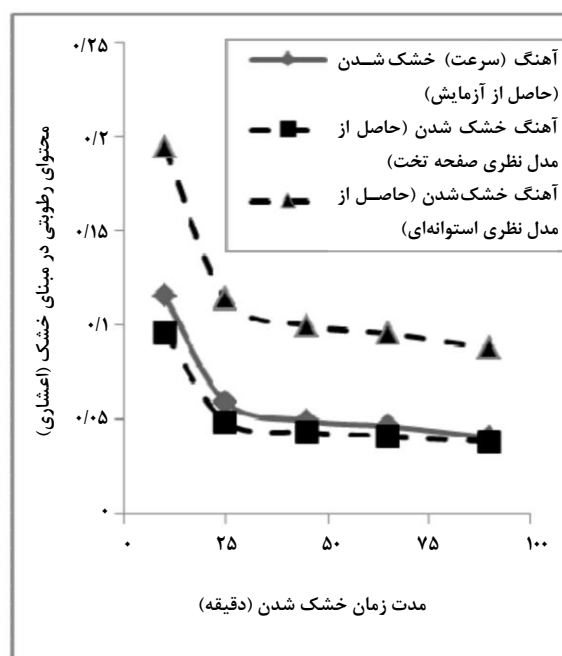
شکل ۹. توزیع رطوبت در راستای قطر دانه در دقیقه ۶۵ ام خشک شدن با فرض صفحه استوانه‌ای.



شکل ۱۰. توزیع رطوبت در راستای قطر دانه در دقیقه ۹۰ ام خشک شدن با فرض صفحه استوانه‌ای.

آورده شد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقدار خطای مدل صفحه‌ای دوبعدی در مقایسه با مدل استوانه‌ای کمتر است، که دلیل آن احتمالاً مربوط به شکل خاص دانه زیره سبز است، زیرا این دانه از دو سر دارای قطر بسیار کوچکی است و از این رو فرض صفحه‌ای دوبعدی برای آن نتایج واقعی‌تری در مقایسه با فرض شکل استوانه‌ای ارائه می‌دهد. بنابراین، مدل صفحه‌ای دوبعدی به عنوان مناسب‌ترین مدل به‌منظور تبیین انتشار رطوبت درون دانه زیره سبز انتخاب شد.

میانگین رطوبت دانه طی فرایند خشک شدن از لحاظ نظری (با دو مدل صفحه‌ای و استوانه‌ای) و آزمایشگاهی حاصل از نتایج واقعی خشک شدن را در شکل (۱۱) مشاهده می‌کنید. مقدار ضریب بستگی بین داده‌های به‌دست آمده از آزمایش و نتایج حاصل از مدل توسعه یافته در حالت صفحه‌ای دوبعدی معادل 0.992 و میزان مربعات خطا نیز معادل 0.188 به‌دست آمد. ولی مقدار ضریب بستگی بین داده‌های حاصل از آزمایش و نتایج مدل‌سازی در حالت استوانه‌ای معادل 0.973 و میزان مربعات خطا معادل 0.11 به‌دست



شکل ۱۱. مقایسه بین میانگین درصد رطوبت به‌دست آمده از نتایج آزمایش و دو مدل صفحه‌ای و استوانه‌ای.

۴. نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق، مدل سازی ریاضی فرایند انتقال جرم دانه زیره سبز به منظور تعیین ضریب انتشار رطوبتی آن در خلال خشک شدن انجام گرفت. برای این منظور، دو فرض مدل صفحه‌ای دوبعدی و استوانه‌ای برای شکل دانه زیره اختیار و معادله انتقال جرم در هر دو حالت با استفاده از روش عددی عنصر محدود حل شد. سرانجام، مدل صفحه‌ای دوبعدی به دلیل بیشترین بستگی و کمترین خطا نسبت به داده‌های آزمایشگاهی، به عنوان مناسب‌ترین مدل برای تبیین انتشار رطوبت درون دانه زیره سبز اختیار شد.

مراجع

- [11] Haghghi, K., Irudayaraj, J., Stroshine, R. L., Sokhansanj, S., "Grain kernel drying simulation using the finite element method", American Society of agricultural and Biological Engineers, Vol. 33(6), pp. 1957-1965, (1990).
- [12] Bruce, D. M., "Exposed layer barley drying: three models fitted to new data up to 150°C", J. Agric. Eng. Res, Vol. 32, pp. 337-347, (1985).
- [۱۳] خدابخش اقدام، ش.، مرادی، م.، یوسفی، ع.، "بررسی مقایسه‌ای فرایند انتقال جرم بر اساس روش عددی تفاضل محدود و نتایج آزمایشگاهی برای خشک شدن محصول خربزه درختی"، نشریه علوم و پژوهشهای صنایع غذایی ایران، شماره ۸ (۳)، صفحات ۳۱۶-۳۰۹، (۱۳۹۱).
- [14] Mariangela, A., Marlene, R. Q., "Mathematical methodologies for calculating the mass diffusion coefficient of Bananas during drying", Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Vol. 11(6), pp. 623-627, (2007).
- [15] Mollazade, K., Ahmadi, H., Khorshidi, J., Rajabipour, A., Mohtasebi, S. S., "Moisture-Dependent Physical and Mechanical Properties of Cumin (Cuminum cyminum L.) Seed", Int J Agric & Biol Eng, Vol. 2(2), pp. 49-56, (2009).
- [۱۶] مرادی، م.، زمردیان، ع.، "امکان سنجی ارتقاء فرایند خشک کردن دانه‌های ذرت با کمک ذرات بی‌اثر"، مجله پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی، ۱۸-۹: (۳)، (۱۳۹۲).
- [17] Pabis, S., Jayas, D. S., Cenkowski, S., "Grain drying: theory and practice", John Wiley press, (1998).
- [18] El-Aouar, A. A., Azoubel, P. M., Murr, F. E. X., "Drying kinetics of fresh and osmotically pre-treated papaya (CaricapapayaL.)", Journal of Food Engineering, Vol. 59, pp. 85-91, (2003).
- [19] Wang, Z., Sun, J., Liao, X., "Mathematical Modeling of Hot Air Drying of Thin Layer of Apple Pomace", Food Res. Int., Vol. 40, pp. 39-46, (2007).
- [20] Akgun, N., Doymaz, I., "Modeling of Olive Cake Thin-layer Drying Process", Journal of Food Engineering, Vol. 68, pp. 455-461, (2005).
- [21] Krishnamoorthy, C. S. Finite Element Analysis: Theory and Programming.. McGraw-Hill- second edition, (2007).
- [1] Barbosa-canovas, G. V., Vega-mercado, H., Dehydration of Foods, Springer Publications, (1996).
- [2] Fellows, P., Food processing technology, principles and practice, 2nd edition. Woodhead publishing, Cambridge England, 313-338, (2000).
- [3] Dennis, R., Heldman Daryl, B. L., Christina, S., Handbook of Food Engineering. CRC Press. (2007).
- [4] Ertakin, C., Yaldiz, O. "Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model", Journal of Food Engineering, Vol. 63, pp. 349-359, (2004).
- [5] Haghghi, K., Irudayaraj, J., stroshine, R. L., Sokhansanj S., Grain kernel drying simulation using the finite element method, American Society of Agricultural and Biological Engineers, Vol. 33(6), pp. 1957-1965, (1990).
- [6] Henderson, S. M., Perry, R. L. Agricultural process engineering, 2nd edition. Westport, CT: The AVI publishing company, Inc, 302-337, (1976).
- [7] Pabis, S., Henderson, S. M., Grain drying theory, a critical analysis of the drying curve for shelled maize, Journal of Agriculture Engineering Research, Vol. 6, pp. 272-277, (1961).
- [8] Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W., Hall, C. W., Drying and storage of grains and oilseeds, The AVI publishing company, Inc, (1992).
- [9] Sokhansanj, S., Bruce, D. M., "An improved heat transfer model for grain drying simulations", Div. Note DN 1334. Nat. Inst. Agric. Eng., Silso, England, (1986).
- [10] Zomorodian, A., Moradi, M., "Mathematical modeling of forced convection thin layer solar drying for Cuminum Cyminum", Journal of Agricultural Science and Technology, Vol. 12, pp. 401-408, (2010).