

تعیین و اعتبارسنجی ضریب انتشار رطوبتی دانه گیاه زیره سبز طی فرایند خشک شدن به روش لایه نازک

مهدی مرادی^{*}، علی زمردیان^۱

^۱ بخش مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

تاریخ دریافت: ۹۴/۶/۱۵ تاریخ پذیرش: ۹۵/۳/۲۵

چکیده

گیاه زیره سبز با استفاده از یک خشک کن خورشیدی کابینتی به صورت لایه نازک تحت شرایط مختلف خشک گردید. معادله انتقال جرم حین خشک شدن دانه زیره سبز در حالت های مختلف خشک شدن به روش تحلیلی حل شده و ضرایب انتشار رطوبتی دانه زیره سبز بر مبنای داده های آزمایشگاهی به صورت توابعی از رطوبت دانه به دست آورده شد. جهت ارزیابی این توابع، معادله انتقال جرم حاوی ضرایب انتشار رطوبتی حاصله، در حالت های مختلف خشک شدن با کمک روش عددی تفاضل محدود حل گردیده و محتوای رطوبت دانه تعیین و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. نتایج حاصل از این شبیه سازی عددی نشان داد که همبستگی بالا و خطای کمی بین تغییرات محتوای رطوبت دانه زیره طی فرایند خشک شدن به روش آزمایشگاهی و نتایج حاصل از مدل سازی وجود دارد. بنابراین ضرایب انتشار رطوبتی به دست آمده دارای اعتبار مناسب می باشند.

واژه های کلیدی: انتقال جرم، ضریب انتشار رطوبتی، خشک شدن، زیره سبز، شبیه سازی عددی.

۱- مقدمه

$$M_s = e^{-\gamma t} (M_i - M_e) + M_e, \quad t \geq 0 \quad (۳)$$

$$M_e = 0.272 - 0.0966 \ln(1 - RH) - 0.0544 \ln(T_a) \quad (۴)$$

$$\gamma = j + pM_i + qT_a \quad (۵)$$

M_i : رطوبت اولیه محصول (اعشاری)، T_a : دمای هوای خشک کننده (درجه سانتیگراد)، M_s : رطوبت در سطح دانه (اعشاری)، t : زمان (ثانیه)، M_e : رطوبت تعادلی (اعشاری)، RH : رطوبت نسبی هوای خشک کننده (اعشاری).

ضرایب j, p, q به گونه ای انتخاب شدند که با نتایج آزمایش بیشترین برازش را داشته باشند (۶).

در تحقیقی دیگر، میوه خربزه درختی با ابعاد $۵ \times ۲ \times ۰/۵$ سانتی متر مکعب در دمای ۴۵ درجه سلسیوس توسط خشک کن کابینی بوسیله جریان هوا با سرعت $۰/۹$ متر بر ثانیه و رطوبت نسبی ۳۰ درصد خشک گردید. پس از آن ضریب انتشار رطوبتی محصول در شرایط آزمایش تعیین شد. سپس معادله مربوط به انتقال جرم با شرایط مرزی معلوم به صورت دو بعدی بر اساس روش تفاضل محدود حل گردید. در نهایت ضریب همبستگی بین رطوبت بدست آمده از نمونه های مورد آزمایش و رطوبت حاصل از حل معادله انتقال محاسبه شد که مقدار آن $۰/۹۹۶$ و میزان میانگین مربعات خطا^۱ حاصله $۰/۰۱۱۵$ بود (۲). در تحقیق مذکور، ضریب انتشار رطوبتی محصول با استفاده از حل تحلیلی معادله انتقال جرم به دست آورده شد. برای حل معادله انتقال جرم در تحقیق مذکور از روش عددی تفاضل محدود استفاده شد. آنها فرض کردند که رطوبت در روی مرز میوه با هوای خشک کننده برابر با رطوبت مطلق هوای خشک کننده است. هر چند که این فرض موجب پایین آمدن دقت حل مسئله می شود اما معمولاً برای ساده سازی در تحقیقات مختلفی از آن استفاده می شود (۵).

در تحقیق دیگری، دو روش ریاضی جهت حل معادله انتقال جرم طی خشک شدن مورد استفاده قرار گرفت تا ضریب انتشار رطوبتی میوه موز به دست آورده شود. اولین روش مطابق حل تحلیلی معادله انتقال جرم و روش دوم بر اساس حل عددی به طریق تفاضل محدود (روش ضمنی) بودند. در این شبیه سازی، شکل استوانه با طول بی نهایت برای موز انتخاب گردید بنابراین معادله انتقال جرم، به صورت یک بعدی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آنها نیز از شرط مرزی تعادل رطوبتی جهت ساده سازی حل معادله استفاده کردند (۱۶).

یکی از مهمترین روش های نگهداری مواد غذایی و محصولات کشاورزی خشک کردن صنعتی آنها می باشد. تفهیم و کنترل صحیح فرایند خشک شدن به طراحی خشک کن مناسب برای محصولات کشاورزی کمک بسیاری می کند (۱۱). برای کاهش آسیب دیدگی مواد غذایی، بهتر است به رفتار این مواد حین خشک شدن به طور صحیح پی برده شود که این کار با توصیف دقیق مکانیزم خشک شدن امکان پذیر است. در دهه های اخیر کارهای تئوری و آزمایشگاهی بسیار زیادی جهت توصیف دقیق فرآیند خشک شدن انجام گرفته است. در بیشتر این تحقیقات فرض بر این بوده است که انتشار رطوبت در داخل محصول، تعیین کننده نرخ خشک شدن آن باشد (۲۲، ۱۸، ۱۴، ۱۲). البته این فرض به دلیل اینکه اکثر عملیات خشک کردن محصولات کشاورزی در مرحله خشک شدن با نرخ نزولی صورت می پذیرد، قابل قبول و منطقی است (۵). در یک تحقیق، 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 توسط هوای داغ به بخار تبدیل می شود. در حقیقت در تحقیق مذکور، به دمای داخل دانه و گرادیان رطوبتی در هر لحظه نیاز بود تا بتوان نرخ خشک شدن را به طور دقیق پیش بینی کرد (۱۹). ولی با تعریف معادله انتقال جرم برای حرکت رطوبت در داخل ماده می توان به درصد رطوبت ماده و درجه حرارت آن در هر لحظه از زمان و در هر نقطه از ماده، دسترسی پیدا کرد.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla(D_{eff} \nabla M) \quad (۱)$$

در این رابطه:

M : محتوی رطوبت دانه $D, (kg/kg, d.b)$: ضریب انتشار رطوبت موثر (m^2/s) و t : زمان (ثانیه) هستند.

ضریب انتشار رطوبتی می تواند به صورت تابعی از محتوی رطوبتی و درجه حرارت هوای خشک کننده به دست آورده شود. نرخ خشک شدن دانه ی جو بوسیله ی روش اجزا محدود در تحقیقی بررسی شد (۱۰). در این تحقیق، محصول در دماهای متفاوت خشک شد و از حل معادله ی انتقال جرم، ستیک خشک شدن حاصل گردید. شرایط اولیه و مرزی که برای معادله ی انتقال جرم در نظر گرفته شد به صورت زیر بود:

$$M = M_i, \quad t = 0 \quad (۲)$$

^۱ RMSE

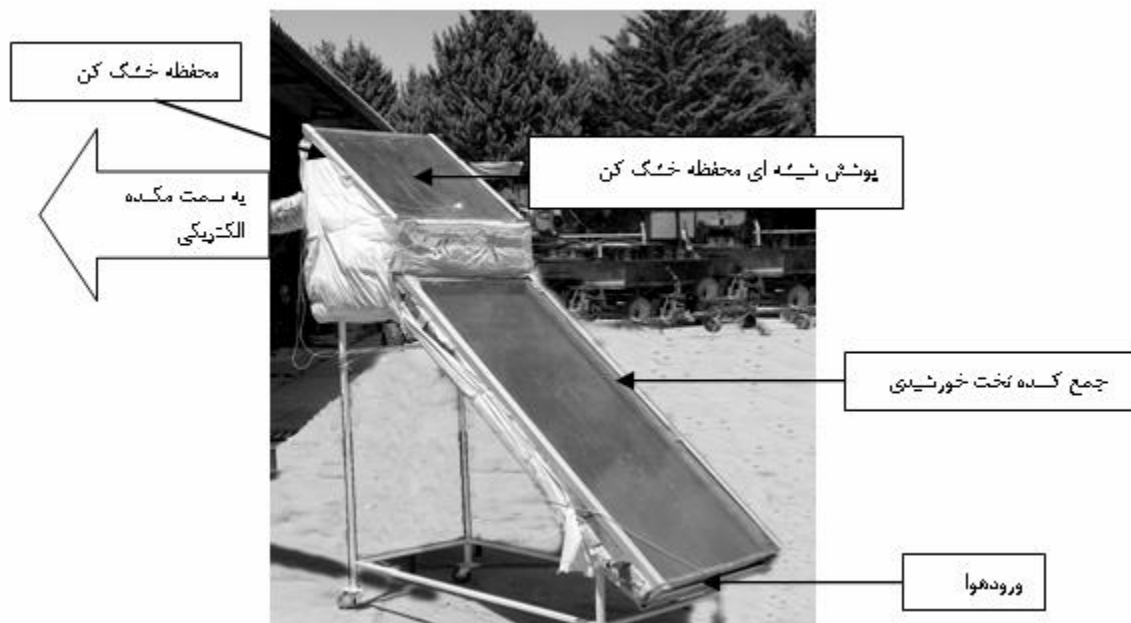
خشک شدن اندازه گیری و مقادیر روبرو به دست آورده شد (۴۳)، ۴۸، ۵۰/۵، ۵۲، ۵۳/۵ و ۵۵ درجه سلسیوس). زمان خشک شدن برابر ۹۰ دقیقه برای هر آزمایش بوده و نمونه گیری از دانه های داخل خشک کن جهت اندازه گیری رطوبت آنها در دقیقه های ۱۰، ۲۵، ۴۵، ۶۵ و ۹۰ انجام می گرفت. رطوبت اولیه دانه های زیره سبزی ۴۳/۵ درصد بر مبنای خشک بود.

در آزمایشی که جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی دانه گیاه زیره سبزی انجام گرفت، سه بعد اصلی آن به طور متوسط برابر ۵/۶۱، ۱/۷۷ و ۱/۵۵ میلی متر بدست آمد و کرویت دانه زیره به طور متوسط ۳۶ درصد گزارش شد که نشان دهندهی شکل غیر کروی دانه می باشد (۱۷). بنابراین جهت شبیه سازی فرایند انتقال جرم دانه ی زیره حین خشک شدن فرض شکل کروی برای دانه غیر منطقی به نظر می رسد. از این روال در تحقیق حاضر شکل متوازی السطوح برای دانه ی زیره فرض شد ولی از آنجایی که مطابق تحقیق مذکور، یکی از ابعاد خیلی بزرگتر از دو بعد دیگر می باشد، با دقت قابل قبولی می توان فرض کرد که رطوبت در راستای دو بعد کوچکتر انتقال می یابد (۷، ۳، ۲). بنابراین معادله ی انتقال جرم به صورت دو بعدی حل گردید. با حل تحلیلی معادله انتقال جرم به صورت دو بعدی می توان ضریب انتقال جرم را به دست آورد.

شبیه سازی دقیق و صحیح فرایندهای مختلف مواد غذایی از جمله خشک کردن می تواند به طراحی بهتر سامانه های فراوری مواد غذایی کمک شایانی کند. بدین منظور در تحقیق حاضر، به بررسی نظری فرایند انتقال جرم حین خشک شدن دانه های زیره سبزی به صورت لایه نازک پرداخته می شود. ضریب انتشار رطوبتی دانه تحت شرایط متفاوت خشک شدن تعیین و براساس آن معادله ی فرایند انتقال جرم با شرایط مرزی دقیق حل شده و نتایج حاصله با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می شود.

۲- مواد و روش ها

محصول زیره سبزی در یک خشک کن کابینتی خورشیدی در سه دبی مختلف هوای خشک کننده (۰/۱۲۷، ۰/۰۸۴، ۰/۱۵۵ مترمکعب بر ثانیه) و دو حالت تابش مختلط و غیرمستقیم خورشید خشک شدند (شکل ۱). تابش مختلط حالتی است که محصول در معرض تابش مستقیم نور خورشید بوده ضمن این که جریان هوای گرم خروجی از جمع کننده خورشیدی نیز از روی محصول عبور می کند. اما در حالت غیر مستقیم، محصول فقط در معرض جریان هوای گرم خروجی از جمع کننده خورشیدی قرار می گیرد. شش حالت مختلف در این خشک کن برای خشک کردن محصول زیره سبزی مورد استفاده قرار گرفت. متوسط دمای هوای خشک کننده ی داخل کابین برای حالت های مختلف



شکل ۱- خشک کن خورشیدی مورد استفاده

حل کرد. اما در روش تفاضل محدود، حل معادلات بر مبنای سری تیلور بوده که مشتقات با استفاده از جملات اول سری مذکور نوشته می شوند. لذا روش تفاضل محدود به صورت ساده تری معادلات را بیان می کند. ضمن این که از دقت قابل قبولی نیز برخوردار است (۸، ۴). بنابراین در این پژوهش به دلیل پیچیدگی کمتر و دقت نسبتاً خوب، روش تفاضل محدود انتخاب شده است (۱، ۲). در این روش، مقدار رطوبت در هر گره را می توان به سه صورت تفاضل پیش رو^۳، تفاضل پس رو^۴ و تفاضل مرکزی^۵ تعریف کرد (۱۵). در این پژوهش از روش تفاضل پیش رو استفاده گردید. در این روش، مقدار دما در نقطه ی بعدی را با استفاده از رطوبت نقطه ی موجود به دست می آید. همچنین روش تفاضل محدود از نظر المان بندی زمانی می تواند به دو طریق ضمنی و صریح بیان گردد که در تحقیق حاضر از روش صریح استفاده گردید. در این شیوه، رطوبت در زمان $t+dt$ به طور مستقیم از رطوبت زمان t بدست می آید (۱۳). به منظور شبیه سازی فرایند انتقال جرم، دانه زیره سبز در حالت دوبعدی به ۲۵ گره تقسیم بندی شد. معادله ی انتقال جرم با شرایط مرزی و اولیه زیر تعریف شدند:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad (۷)$$

شرط اولیه:

$$M = M_0 \quad (۸)$$

شرط مرزی به صورت همرفتی در دو بعد مانند زیر ارائه گردید:

$$-D_{eff} \left(\frac{\partial M}{\partial x} \right)_{x=x_0} = h_D [M_{surf} - M_e] \quad (۹)$$

$$-D_{eff} \left(\frac{\partial M}{\partial y} \right)_{y=y_0} = h_D [M_{surf} - M_e] \quad (۱۰)$$

در این روابط، h_D ضریب همرفتی انتقال جرم (m/s)، D_{eff} ضریب انتشار رطوبتی دانه زیره سبز (m^2/s)، M_e رطوبت تعادلی و M_0 محتوای رطوبت اولیه دانه زیره (برابر ۴۳/۵ درصد بر مبنای خشک) می باشند. رطوبت تعادلی را می توان با داشتن رطوبت نسبی و دمای هوای خشک کننده از جدول سایکومتریک به آسانی به دست آورد (۵).

حل تحلیلی این معادله برای صفحه دوبعدی در صورتی که ضریب انتشار رطوبتی ثابت باشد، از رابطه زیر به دست می آید (۹).

رابطه (۶)

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

که در این رابطه:

MR: نسبت رطوبت محصول، D_{eff} : ضریب موثر انتشار رطوبتی محصول، t : زمان خشک شدن (ثانیه) و L_1 و L_2 : دو بعد کوچکتر محصول که بیشترین انتقال در راستای آنها انجام می گیرد.

نسبت رطوبت از رابطه $MR = (M - M_e) / (M_0 - M_e)$ به دست می آید. اما مقدار رطوبت تعادلی (M_e) در مقایسه با رطوبت اولیه (M_0) و (M) بسیار کوچک تر می باشند. بنابراین رابطه ی مذکور به شکل $MR = M / M_0$ ساده شد (۲۱، ۲۳). در رابطه ی (۶) نسبت رطوبت از نتایج آزمایشگاهی به دست آمد. با توجه به رابطه ی مذکور فقط ضریب انتشار رطوبتی مجهول بوده و می توان آن را متناسب با زمان های مختلف خشک شدن به دست آورد. بنابراین در آزمایش های مختلف خشک شدن گیاه زیره سبز، ضریب موثر انتشار رطوبتی طبق رابطه (۶) به دست آورده شد (۲، ۹). پس از به دست آوردن ضریب انتشار رطوبتی در حالت های مختلف خشک شدن، روابطی رگرسیونی برای این ضریب بر اساس رطوبت محصول در دماهای مختلف هوای خشک کننده ایجاد شد. جهت ارزیابی و تایید این روابط، معادله انتقال جرم با قرار دادن ضرایب مذکور در آن حل گردیده و سپس نتایج حاصله با داده های آزمایش مقایسه شدند. به دلیل این که ضریب انتشار ثابت نبوده و تابعی از دمای هوای خشک کننده و رطوبت محصول است، معادله انتقال جرم فقط به روش عددی قابل حل خواهد بود. برای حل معادلات مشتقات جزئی به شیوه ی عددی، روش های زیادی وجود دارد که مهمترین آنها المان محدود^۱ و تفاضل محدود^۲ هستند. روش المان محدود، با بهره گیری قضایای گوناگون ریاضی از یک معادله ی دیفرانسیل پاره ای با شرایط معین، دستگاه (ماتریس) معادلات خطی یا غیر خطی می سازد که جهت بدست آوردن میدان حل آن باید دستگاه (ماتریس) را

³Forward finite difference

⁴Backward finite difference

⁵Central finite difference

¹ Finite element method

² Finite difference method

که در این رابطه، سرنویس های M (رطوبت) نشان دهنده نموهای زمانی و پانویس ها نشان دهنده نموهای مکانی (m مربوط به نمو x و n مربوط به نمو y) و dt نشان دهنده گام زمانی هستند. برای اینکه حل این معادله حالت پایدار داشته باشد باید $(dx)^2/(D_{eff}dt)$ و $(dy)^2/(D_{eff}dt)$ هر کدام بیشتر یا مساوی ۴ باشند (۱۳).

بنابراین با توجه به مقادیر معلوم dx و dy و بیشترین مقدار ضریب انتشار رطوبتی گام زمانی برابر ۱ ثانیه در نظر گرفته شد تا شرط پایداری رعایت گردد. به این ترتیب کمترین مقدار عبارات فوق در حالتی است که dy و بیشترین مقدار ضریب انتشار رطوبتی ($10^{-1} \times 1/15$ متر مربع بر ثانیه) مورد استفاده قرار گیرد که در این صورت مقدار عبارت فوق مساوی ۱۳۰۵ خواهد بود. در ادامه نتایج حاصل از این شبیه سازی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی آورده شده است.

۳- نتایج و بحث

در جدول ۱، ضرایب انتشار رطوبتی دانه زیره سبزی در دماها و زمان های مختلف خشک شدن، آورده شده است. این ضرایب از حل تحلیلی معادله انتقال جرم در حالت دوبعدی بر مبنای نتایج آزمایشگاهی خشک شدن بدست آمده است. همان گونه که مشاهده می شود، در همه آزمایش ها با گذشت زمان، به جز در زمان دوم ضریب انتشار رطوبتی کاهش می یابد. این قضیه کاملاً طبیعی است زیرا با کم شدن رطوبت محصول، اختلاف محتوای رطوبت هوای خشک کننده و دانه کمتر شده و بنابراین سرعت حرکت رطوبت از درون محصول به سمت هوای خشک کننده کمتر می شود. اما در برخی از آزمایشات در زمان دوم، ضریب موثر انتشار رطوبتی مقداری افزایش می یابد. این پدیده ممکن است به دلیل اثرات دمایی باشد. به عبارت دیگر برای اینکه دانه و هوای خشک کننده به تعادل دمایی برسند، مقداری زمان مورد نیاز است. بنابراین ممکن است در برخی از آزمایش ها، در زمان دوم نمونه برداری به دلیل دمای بالاتر دانه نسبت به زمان اول نمونه برداری، ضریب انتشار مقداری بالاتر باشد. زیرا ضریب انتشار رطوبتی با افزایش دما، افزایش می یابد.

ضریب همرفتی انتقال جرم، با استفاده از روابط زیر به دست آمد (۲۰).

$$Sh = 2 + \left[0.4(Re_d)^{0.5} + 0.06(Re_d)^{0.667} \right] Sc^{0.4} \quad (11)$$

$$Re_d = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (12)$$

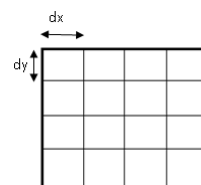
$$Sh = \frac{h_D d}{D_{AB}} \quad (13)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (14)$$

که در این روابط، Re_d : عدد رینولدز، ν : ویسکوزیته سینماتیکی هوای خشک کننده (m^2/s)، D_{AB} : ضریب انتشار رطوبتی هوای خشک کننده (m^2/s)، Sc : عدد اشویت (بی بعد)، Sh : عدد شروود، h_D : ضریب همرفتی انتقال جرم (m/s)، V : سرعت هوای خشک کننده (m/s)، d : قطر دانه (m)، ρ : دانسیته دانه (kg/m^3) و μ : ویسکوزیته هوای خشک کننده ($pa-s$) می باشند. میانگین قطر هندسی دانه برابر $1/99$ میلی متر و میانگین دانسیته دانه مساوی $975 kg/m^3$ در نظر گرفته شد (۱۷).

در هر حالت خشک شدن، ضریب همرفتی انتقال جرم با کمک روابط بالا به دست آورده شد. پس از به دست آمدن ضریب انتقال جرم، در حالت های مختلف خشک شدن، به حل معادله انتقال جرم مبادرت گردید.

جهت x و y دانه زیره هر کدام به ۴ قسمت تقسیم شده و بنابراین صفحه دو بعدی دانه زیره به ابعاد $(1/77 \times 1/55)$ به 16 المان تقسیم گردید (شکل ۲). به این ترتیب $dx = 4/425 \times 10^{-4} m$ و $dy = 3/875 \times 10^{-4} m$ به دست آورده شدند.



شکل ۲- المان بندی دانه زیره سبزی

معادله انتقال جرم به روش تفاضل محدود به صورت زیر نوشته شد.

$$\left[\frac{M_{m+1,n}^p + M_{m-1,n}^p - 2M_{m,n}^p}{(dx)^2} + \frac{M_{m,n+1}^p + M_{m,n-1}^p - 2M_{m,n}^p}{(dy)^2} \right] D_{eff} = \frac{M_{m,n}^{p+1} - M_{m,n}^p}{dt} \quad (15)$$

جدول ۱- ضریب انتشار رطوبتی دانه زیره سبز، در دمای ۵۹°C هوای خشک کننده

ضریب انتشار ($\times 10^{-11} m^2/s$)	زمان (s)	دما (°C)	ضریب انتشار ($\times 10^{-11} m^2/s$)	زمان (s)	دما (°C)
۷/۷۹	۶۰۰	۵۵	۱۱/۴	۶۰۰	۵۵
۸/۱۸	۱۵۰۰	۵۵	۱۱/۵	۱۵۰۰	۵۵
۵/۹۴	۲۷۰۰	۵۵	۷/۸۵	۲۷۰۰	۵۵
۴/۴۷	۳۶۰۰	۵۵	۵/۶۲	۳۶۰۰	۵۵
۳/۴۴	۵۴۰۰	۵۵	۴/۴۲	۵۴۰۰	۵۵
۷/۲۳	۶۰۰	۵۳/۵	۱۱/۱	۶۰۰	۵۳/۵
۶/۵۸	۱۵۰۰	۵۳/۵	۱۱/۲	۱۵۰۰	۵۳/۵
۵/۲۶	۲۷۰۰	۵۳/۵	۷/۴۶	۲۷۰۰	۵۳/۵
۴/۱۳	۳۶۰۰	۵۳/۵	۵/۴۸	۳۶۰۰	۵۳/۵
۳/۲۳	۵۴۰۰	۵۳/۵	۴/۱۳	۵۴۰۰	۵۳/۵
۶/۲۹	۶۰۰	۵۲	۱۰/۷	۶۰۰	۵۲
۵/۸۶	۱۵۰۰	۵۲	۷/۹۴	۱۵۰۰	۵۲
۳/۹۴	۲۷۰۰	۵۲	۵/۷۴	۲۷۰۰	۵۲
۳/۱۷	۳۶۰۰	۵۲	۴/۸۴	۳۶۰۰	۵۲
۲/۷۶	۵۴۰۰	۵۲	۳/۹۶	۵۴۰۰	۵۲

بالای ۰/۹ می توانند ضریب موثر انتشار رطوبتی را پیش بینی کنند. در جدول ۳ ضرایب همرفتی هوای خشک کننده در حالت های متفاوت خشک شدن با استفاده از روابط ۱۱ تا ۱۴ بدست آورده شده است.

با به کارگیری ضرایب بدست آمده از جدول (۱) و با استفاده از تحلیل رگرسیونی، ضرایب انتشار به صورت توابعی از رطوبت دانه برای حالت های مختلف خشک شدن بدست آمد (جدول ۲). همانگونه که مشاهده می شود، این معادلات با ضریب تعیین^۱

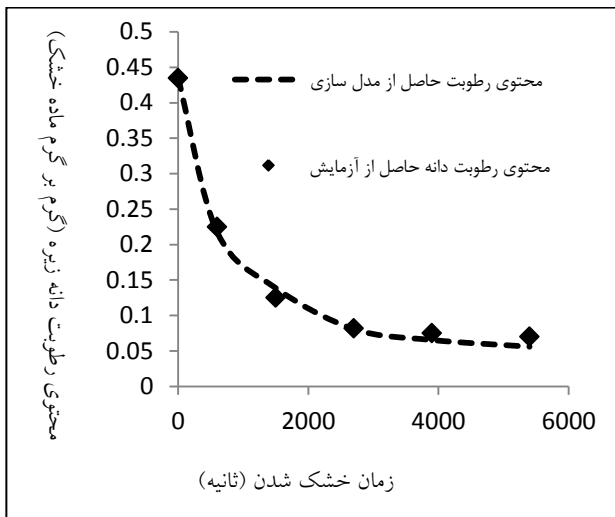
جدول ۳- ضرایب انتقال جرم همرفتی هوای خشک کننده

حالت خشک شدن	نرخ جریان	متوسط	ضریب
شدن	حجمی هوای	دمای هوای	همرفتی هوای
	خشک کننده	خشک کننده	خشک کننده
	(m^3/s)	(°C)	(m/s)
مختلط	۰/۰۸۴	۵۵	۰/۰۰۰۷۵
مختلط	۰/۱۲۷	۵۳/۵	۰/۰۰۰۰۷
مختلط	۰/۱۵۵	۵۲	۰/۰۰۰۰۶
غیرمستقیم	۰/۰۸۴	۵۰/۵	۰/۰۰۰۰۴۵
غیرمستقیم	۰/۱۲۷	۴۸	۰/۰۰۰۰۴
غیرمستقیم	۰/۱۵۵	۴۳	۰/۰۰۰۰۲

جدول ۲- ضریب انتشار رطوبتی دانه زیره سبز بر اساس محتوای رطوبت دانه در دماهای مختلف هوای خشک کننده

T (°C)	معادله ضریب انتشار رطوبتی	ضریب تعیین
۵۵	$D = -1 \times 10^{-8} (M)^2 + 4 \times 10^{-9} M - 2 \times 10^{-10}$	۰/۹۸
۵۳/۵	$D = -1 \times 10^{-8} (M)^2 + 4 \times 10^{-9} M - 2 \times 10^{-10}$	۰/۹۹
۵۲	$D = -9 \times 10^{-10} (M)^2 + 7 \times 10^{-10} M - 9 \times 10^{-12}$	۰/۹۹
۵۰/۵	$D = -5 \times 10^{-9} (M)^2 + 2 \times 10^{-9} M - 1 \times 10^{-10}$	۰/۹۸
۴۸	$D = -2 \times 10^{-9} (M)^2 + 1 \times 10^{-9} M - 5 \times 10^{-11}$	۰/۹۸
۴۳	$D = -2 \times 10^{-9} (M)^2 + 9 \times 10^{-10} M - 6 \times 10^{-11}$	۰/۹۱

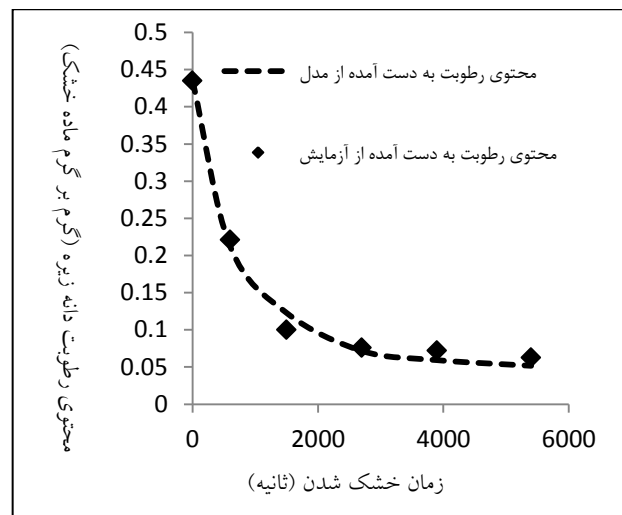
¹ Coefficient of determination



نمودار ۲- مقایسه محتوای رطوبت دانه زیره طی خشک شدن با دو روش آزمایش و مدل سازی تحت دمای متوسط هوای خشک کننده ۵۳/۵ درجه سلسیوس

تغییرات محتوای رطوبت دانه زیره سبز طی خشک شدن با دو روش آزمایشگاهی و تئوری با میانگین دمای هوای خشک کننده ۵۲ درجه سلسیوس در نمودار ۳ آورده شده است. ضریب تعیین و میانگین مربعات خطای ناشی از مدل سازی تحت شرایط مذکور به ترتیب عبارتند از ۰/۹۹۵ و ۰/۰۲۲. در نمودار ۴، میانگین محتوای رطوبت دانه زیره سبز در دو حالت استفاده از آزمایش خشک شدن و شبیه سازی با کمک مدل تئوری برای دمای هوای خشک کننده ۵۰/۵ درجه سلسیوس آورده شده است. ضریب تعیین و میانگین مربعات خطا برای این حالت به ترتیب برابر ۰/۹۸۷ و ۰/۰۳۸۹ به دست آمدند که نشان دهنده میزان دقت نسبتاً خوب مدل تئوری و ضرایب انتشار رطوبتی و همرفتی جرمی هوای خشک کننده می باشد. در نمودار ۵، متوسط رطوبت دانه زیره سبز در دو حالت خشک شدن به روش آزمایشگاهی و روش تئوری در دمای ۴۸ درجه سلسیوس با همدیگر مقایسه شده اند. ضریب تعیین و میانگین مربعات خطا ناشی از این مدل سازی به ترتیب برابر ۰/۹۹۱ و ۰/۰۱۳۸ به دست آمدند. در نمودار ۶، تغییرات میانگین محتوای رطوبت دانه زیره سبز در حالت خشک شدن به روش آزمایشگاهی تحت دمای هوای خشک کننده ۴۳/۵ درجه سلسیوس در مقایسه با مدل تئوری آن مقایسه شده است. ضریب تعیین و میانگین مربعات خطای حاصل از مدل سازی به ترتیب برابر ۰/۹۸۸ و ۰/۰۱۵ به دست آمد.

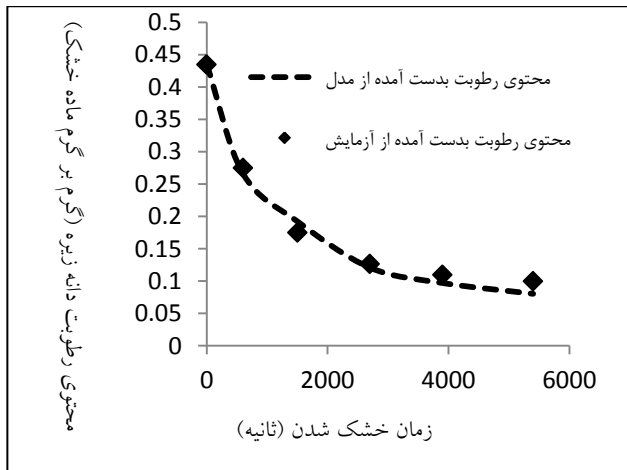
پس از به دست آوردن معادله های مربوط به ضرایب انتشار رطوبتی و همرفتی انتقال جرم، معادله انتقال جرم در حالت های مختلف خشک شدن با استفاده از روش تفاضل محدود، حل گردید. نتایج حاصله در نمودارهای مختلف آورده شده است. در نمودار ۱، تغییرات محتوای رطوبت دانه زیره سبز در دو حالت خشک شدن به روش آزمایشگاهی و خشک شدن به روش تئوری با دمای هوای خشک کننده ۵۵ درجه سلسیوس نشان شده است. میزان ضریب تعیین و میانگین مربعات خطا^۱ برای این حالت به ترتیب مساوی ۰/۹۹۲ و ۰/۰۱۳۴ بودند. بنابراین همبستگی خوبی بین داده های حاصل از آزمایش و داده های به دست آمده از مدل وجود دارد.



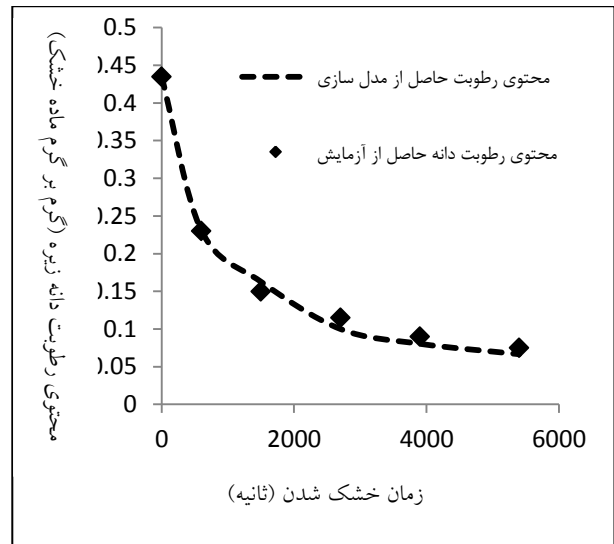
نمودار ۱- مقایسه محتوای رطوبت دانه زیره طی خشک شدن با دو روش آزمایش و مدل سازی تحت دمای متوسط هوای خشک کننده ۵۵ درجه سلسیوس

در نمودار ۲، تغییرات محتوای رطوبت دانه زیره سبز برای دو حالت نظری و آزمایشگاهی خشک شدن با دمای هوای خشک کننده ۵۳/۵ درجه سلسیوس آورده شده است. ضریب تعیین بین داده های حاصل از آزمایش و داده های به دست آمده از مدل و میانگین مربعات خطا به ترتیب برابر ۰/۹۹۶ و ۰/۰۱۰ به دست آمدند. همان گونه که مشاهده می شود، مدل نظری به دست آمده دارای دقت قابل قبولی برای پیش بینی محتوای رطوبت دانه زیره سبز طی خشک شدن می باشد.

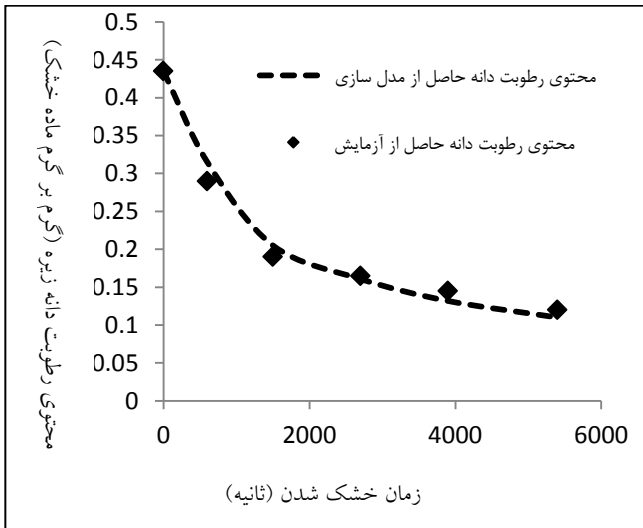
¹ RMSE



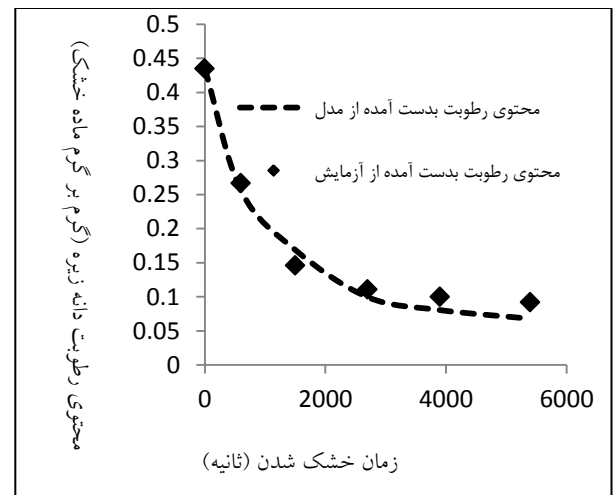
نمودار ۵- مقایسه محتوای رطوبت دانه زیره طی خشک شدن با دو روش آزمایش و مدل سازی تحت دمای متوسط هوای خشک کننده ۴۸ درجه سلسیوس



نمودار ۳- مقایسه محتوای رطوبت دانه زیره طی خشک شدن با دو روش آزمایش و مدل سازی تحت دمای متوسط هوای خشک کننده ۵۲ درجه سلسیوس



نمودار ۶- مقایسه محتوای رطوبت دانه زیره طی خشک شدن با دو روش آزمایش و مدل سازی تحت دمای متوسط هوای خشک کننده ۴۳ درجه سلسیوس



نمودار ۴- مقایسه محتوای رطوبت دانه زیره طی خشک شدن با دو روش آزمایش و مدل سازی تحت دمای متوسط هوای خشک کننده ۵۰/۵ درجه سلسیوس

۴- نتیجه گیری

جهت دستیابی به روشی تئوری و کم هزینه برای طراحی دقیق سامانه‌های فرایند خشک شدن، ضرایب انتشار رطوبتی دانه‌ی زیره سبز و ضرایب همرفتی تحت شرایط مختلف هوای خشک کننده با کمک داده‌های آزمایشگاهی به دست آورده شد. برای اعتبارسنجی این ضرایب، توزیع رطوبت درون دانه زیره سبز به صورت تئوری با قرار دادن آنها در معادله انتقال جرم و حل آن، تعیین گردیده و نتایج حاصل با میانگین رطوبت آزمایشگاهی دانه زیره در زمان‌های متناظر مقایسه شد. در نهایت چنین نتیجه گرفته شد که به دلیل همبستگی بالا و خطای کم بین داده‌های تئوری و

به این ترتیب نتیجه گرفته می شود که ضرایب انتشار رطوبتی و انتقال جرم همرفتی دارای دقت قابل قبولی بوده که می توان با بکارگیری آنها و بدون کاربرد روش‌های آزمایشگاهی به محتوای رطوبت دانه زیره سبز تحت شرایط مختلف خشک شدن دست یافت که این روش کمک شایانی به طراحی کم هزینه، صحیح و دقیق سامانه‌ی خشک کردن دانه های زیره سبز خواهد کرد.

Element Method. ASABE, 33(6): 1957-1965.

11. Haghghi, K. and Segerlind, L. J. 1988. Modeling Simultaneous Heat and Mass Transfer in an Isotropic Sphere- A Finite Element Approach. Transactions of the ASAE, 31(2): 629-637.
12. Henderson, S.M. and Perry R.L. 1976. Agricultural Process Engineering, 2nd edition. Westport, CT: The AVI publishing company, Inc, 302-337.
13. Holman, J.P. 2002. Heat Transfer, 9th edition. McGraw-Hill, New York.
14. Hosain, A., Chen, C.S. and Clayton, J.T. 1973. Simultaneous Heat and Mass Diffusion in Biological Materials. Journal of Agriculture Engineering Research, 18:343-354.
15. Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L. and Lavine, T.L. 2005. Introduction to Heat Transfer, John Wiley & sons.
16. Mariangela, A. and Marlene, R.Q. 2007. Mathematical methodologies for calculating the mass diffusion coefficient of Bananas during Drying. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 11(6): 623-627.
17. Mollazade, K., Ahmadi, H., Khorshidi, J., Rajabipour, A. and Mohtasebi, S.S. 2009. Moisture dependent physical and mechanical properties of cumin (CuminumcyminumL.) seed. Int J Agric & Biol. Eng. 2(2): 49-56.
18. Pabis, S. and Henderson, S.M. 1961. Grain drying theory, a critical analysis of the drying curve for shelled Maize. Journal of Agriculture Engineering Research, 6:272-277.
19. Sokhansanj, S. and Bruce, D.M. 1986. An improved heat transfer model for grain drying simulations. Div. Note DN 1334. Nat. Inst. Agric. Eng., Silso, Engeland.
20. Treybal, R.L. 2009. Mass Transfer Operations, 3th edition. McGraw-Hill, New York.
21. Wang, Z., Sun, J. and Liao, X. 2007. Mathematical modeling of hot air drying of thin layer of Apple pomace. Food Res.Int., 40: 39-46.
22. Young, J.H. and Whitaker, T.B. 1971. Evaluation of the diffusion equation for describing thin layer drying of Peanuts in the hull. Transaction of the ASAE, 14:309-312.
23. Zomorodian, A. and Moradi, M. 2010. Mathematical Modeling of Forced Convection Thin Layer Solar Drying for

آزمایشگاهی، توابع مبین ضریب انتشار رطوبتی زیره سبز از دقت بسیار خوبی برخوردار بوده و قابل استناد هستند.

۵- منابع

۱. افجه ای، ا. ۱۳۸۵. محاسبات عددی. انتشارات دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ۴۰۵ صفحه.
۲. خدابخش اقدام، ش. مرادی، م. و یوسفی، ع.ر. ۱۳۹۱. بررسی مقایسه ای 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، جلد ۸، شماره ۳، ۳۱۶-۳۰۹.
۳. مرادی، م. و زمردیان، ع. ۱۳۸۸. بررسی سنتیک خشک شدن زیره سبز در یک خشک کن خورشیدی در دو حالت تابش مختلط و غیرمستقیم. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۱۳، شماره ۴۸، ۲۷۳-۲۸۲.
۴. مرادی، م. و زمردیان، ع. ۱۳۹۲. امکان سنجی ارتقاء فرایند خشک کردن دانه های ذرت با کمک ذرات بی اثر. نشریه پژوهش های مکانیک ماشین های کشاورزی، جلد ۲، شماره ۳، ۱۸-۹.
5. Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W. and Hall, C.W. 1992. Drying and Storage of Grains and Oilseeds, The AVI publishing company, Inc.
6. Bruce, D.M. 1985. Exposed Layer Barley Drying: Three Models Fitted to New Data up to 150 °C, J. Agric. Eng. Res, 32: 337-347.
7. Chen, X.D. 2007. Moisture Diffusivity in Food and Biological Materials, Drying Technology, 25: 1203-1213.
8. Edward, M.K. 1996. Comparison of Finite Difference and Finite Element Hydrodynamic Models Applied to the Laguna Madre Estuary, M Sc. Thesis, Texas A&M university.
9. El-Aouar, A.A., Azoubel, P.M. and Murr, F. E.X. 2003. Drying Kinetics of Fresh and Osmotically Pre-Treated Papaya (CaricapapayaL.). Journal of Food Engineering, 59:85-91.
10. Haghghi, K. Irudayaraj, J., stroshine, R.L. and Sokhansanj, S. 1990. Grain Kernel Drying Simulation Using the Finite

CuminumCyminum. Journal of
Agricultural Science and Technology, 12:
401-408.