اصلاح رطوبت تعادلی شلتوک برنج (سپیدرود) برای شبیه سازی خشک کردن توده بستر نازک

شاهین رفیعی[۱]

چکیده

خشک کردن سریع می‌تواند ترک‌های داخلی در دانه ایجاد کند که این ترک‌ها زمینه را برای شکسته شدن دانه در طول عملیات تبدیل مساعد می‌کند. فرایند خشک کردن باید کنترل شده باشد. این مسأله نیاز به شرح دقیق مکانیزم خشک کردن دارد. رطوبت تعادلی توده یکی از خصوصیاتی است که به طور مستقیم بر پدیده خشک شدن محصول دخالت دارد. اصلاح مقدار رطوبت تعادلی (Equilibrium moisture content) با افزایش دقت مدل‌سازی، منجر به بهینه‌سازی عملیات خشک کردن محصولات می‌گردد. حالت فوق به ویژه برای سیستم‌هایی که به کمک کامپیوتر به طور خودکار کنترل می‌شوند، حائز اهمیت می‌باشد. در این مقاله معادلات انتقال حرارت و جرم به صورت هم زمان با فرض متقارن بودن دانه، به روش اجزای محدود برای رطوبت‌های تعادلی مختلف (از ۷/۵ تا ۰/۱۲ درصد برپایه خشک)، رطوبت اولیه توده ۱۷/۲۳ درصد (بر پایه خشک) و دمای هوای ۶۹ $^{\circ}C$ حل شده‌اند. برای تأیید صحت مدل‌های استخراج شده، توده بستر نازک شلتوک برنج سپیدرود به وسیله خشک کن آزمایشگاهی خشک شد. در طول مدت خشک کردن، وزن توده شلتوک در زمان‌های مختلف اندازه گرفته شد و با داده‌های حاصل شده، رطوبت شلتوک محاسبه گردید. مقدار مجذور میانگین مربعات خطای برای رطوبت تعادلی ۷/۵ و ۱۱/۵ درصد (بر پایه خشک) به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار خطا را داشته که برابر با ۰/۱۰۲۵ و ۰/۰۰۹۱ و مقدار مدول میانگین انحراف نسبی به ترتیب برابر با ۵/۱۲۹ و ۱/۳۹۴ بود. با توجه به مقدار خطای مدل‌ها نسبت به داده‌های آزمایشگاهی رطوبت تعادلی توده برای ۱۱/۵ درصد (بر پایه خشک) بهترین نتیجه را به دست داد.

واژه‌های کلیدی: دانهٔ شلتوک، خشک کردن، روش اجزای محدود، شبیه سازی، انتقال جرم، رطوبت تعادلی

مقدمه

بهبود روش‌های شبیه‌سازی برای دست‌یابی به دقت بهتر در تخمین پدیده‌های طبیعی یکی از مباحث جدی در مهندسی می‌باشد. بدون شک یکی ابزارهای متداول که اکنون جای خود را در اکثر عرصه‌های مهندسی به خوبی باز نموده، روش اجزای محدود می‌باشد. از عوامل مهم و تأثیرگذار در فرایند مدل‌سازی، ضرایب و پارامترهای معادلات حاکم بر مسأله مورد نظر می‌باشد. رطوبت تعادلی بین دانه و هوای خشک کننده یکی از

۱. استادیار مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.3.14.3]

این عوامل در شبیه‌سازی رطوبت توده در فرایند خشک شدن است (۲).

لزوم شبیه‌سازی فرایند خشک شدن برای کنترل بیشتر و دقیق‌تر نحوه خشک شدن محصولات از نظر حفظ کیفیت ارزش غذایی و کاهش انرژی مصرفی در عملیات فراوری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شلتوک برنج نیز یکی از محصولاتی است که خشک کردن، نقش بسیار مهمی در میزان ضایعات در طول عملیات فراوری آن دارد. در نتیجه شبیه سازی فرایند خشک کردن شلتوک برنج امری ضروری است.

توی در سال ۱۹۸۳ برای نرخ‌های مختلف خشک کردن، رطوبت، دما و توزیع فشار در یک ماده متخلخل موئینه غیر نمگیر تحقیقاتی را انجام داد. او نتیجه گرفت که برای مواد سلولزی مانند بافت محصولات کشاورزی، مکانیزم خشک کردن از پیچیدگی زیادی برخوردار است. علت این امر ساختمان‌های ناهمگن مواد است. محصولات کشاورزی در اثر افت رطوبت منقبض می‌شوند. وی پیشنهاد کرد که در مورد تغییرات فیزیکی و شیمیایی محصولات کشاورزی در حین فرایند کاهش رطوبت در ا ثر خشک کردن، تحقیقات گسترده‌ای انجام گیرد (۱۷).

یاماگوشی و موجومدر آزمایش‌هایی با خشک کردن بستر نازک برنج قهوه‌ای با رطوبت‌ها و درجه حرارت‌های اولیه مختلف انجام دادند و با استفاده از روش اجزای محدود، معادله انتشار رطوبت در برنج قهوه‌ای را با شبیه سازی دانه برنج به شکل یک کره همگن حل کردند. آنان منحنی‌های کاهش رطوبت در طی خشک کردن به دست آمده از مدل‌های تئوری را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند (۱۹).

سارکر و همکارانش به منظور مقایسه انتشار رطوبت در اندوسپرم، سبوس و پوسته برنج، خشک کردن شلتوک را با روش اجزای محدود شبیه سازی کردند و نتیجه گرفتند که انتشار رطوبت به ترتیب در اندوسپرم، پوست و سبوس برنج کاهش می‌یابد آنها تغییرات درجه حرارت را مورد توجه قرار نداده بودند (۱۶).

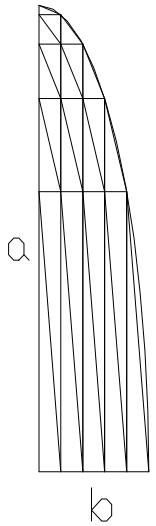
باسونیا و همکاران در سال ۱۹۹۸ گزارش دادند که برای افزایش دقت شبیه‌سازی خشک شدن توده بستر عمیق نیاز به اندازه‌گیری دقیق فرایند خشک شدن توده بستر نازک و تعمیم آن به توده بستر عمیق می‌باشد و اندازه‌گیری دقیق ضرایب انتقال جرم و خصوصیات تعادلی توده برای مدل‌سازی مورد نیاز است (۱۰).

والتون و همکاران نشان دادند که ضریب انتشار رطوبت در دانه‌ای با یک شکل هندسی را نمی‌توان برای شکل هندسی دیگر از همان دانه استفاده کرد (۱۸).

فو و هوا با استفاده از روش اجزای محدود، شلتوک را با دو جزء یک بعدی و دو بعدی با فرض آن که شلتوک از سه لایه تشکیل شده است برای دانه‌های بلند و کوتاه مدل کردند. اختلاف سرعت از دست دادن رطوبت، وقتی که شلتوک وقتی شلتوک با درجه حرارت بالا خشک می‌شد برای دو مدل بسیار کم بود. توزیع رطوبت و شیب آن برای هر دو مدل در طول خشک کردن برای روش‌های مختلف تعیین شد و آنها پیشنهاد کردند که بهتر است شرایط مرزی با توجه به تغییرات شیب رطوبتی اصلاح شود و نتیجه گرفتند دانه‌های مختلف شلتوک در طول مدت خشک کردن و تغییرات شیب ممکن است دچار خسارت شوند (۱۳). چن و همکاران به وسیله روش اجزای محدود رابطه بین کاهش بازده شلتوک سالم (HRY=Head Rice Yield) در طول خشک کردن با شیب رطوبت داخلی دانه را شبیه سازی کردند. در تحقیق آنها دمای دانه شلتوک برنج بینام که برنج متوسط به حساب می‌آید در طی خشک کردن با شرایط معین با در نظر گرفتن تغییرات رطوبت دانه و تأثیر آن بر دمای دانه شبیه‌سازی شده و با داده‌های حاصل از آزمایشگاه مقایسه شده است (۱۲). کان چان و داون خشک کردن دانه شلتوک را با فرض غیر خطی بودن بعضی از پارامترهای انتقال جرم و حرارت به روش اجزای محدود مدل کردند. انتقال رطوبت داخل دانه به صورت مایع و بخار فرض شده و مدل دوبعدی استخراج و حل شد. داده‌های تئوری با داده‌های آزمایشگاهی خشک کردن

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.3.14.3]



شکل ۱. نمای مقطع طولی یک چهارم دانه شلتوک شبکه‌بندی شده با ۲۱ گره و ۲۵ جزء

لایه نازک توده گندم مقایسه شد و جواب‌ها قابل قبول بود (۱۱). آبالون و همکاران نیز این شبیه سازی را برای سیب زمینی انجام داده و سپس ضریب انتشار رطوبت را در داخل سیب زمینی تخمین زدند (۳).

گاستون و همکاران مدل سینتیک خشک شدن توده بستر نازک گندم را به وسیله روش اجزای محدود با فرض دو شکل کروی و بیضوی دانه گندم استخراج کردند و به این نتیجه رسیدند که با توجه به داده‌های آزمایشگاهی مدل بیضوی دانه گندم فرایند خشک شدن را بهتر شبیه‌سازی می‌کند (۱۴).

در این تحقیق برای شبیه سازی دقیق تر خشک شدن شلتوک، رطوبت تعادلی که یکی از پارامترهای مهم در مدل‌سازی انتقال جرم می‌باشد اصلاح شد. برای منظور رطوبت دانه شلتوک واریته سپیدرود در طی خشک شدن به روش تجربی و عددی به دست آمد. سپس مدل عددی برای مقادیر مختلف رطوبت تعادلی حل شده و مقدار مجذور میانگین مربعات خطا و مدول میانگین انحراف نسبی داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌های عددی محاسبه گردید و براساس آن بهترین رطوبت تعادلی پیشنهاد شد.

مواد و روش‌ها

تئوری مسأله

معادله ۱ معادله حاکم انتقال جرم بر اساس مدل بیضوی را بیان می‌کند.

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \mathrm{div}\big(D(r,z,t)\nabla W(r,z,t)\big) \qquad [۱]$$

t : زمان (ثانیه)

D(r,z,t): ضریب انتشار رطوبت در مختصات (r,z) و زمان t (m^2/s)

W(r,z,t): رطوبت در مختصات (r,z) و زمان t (برپایه خشک)

[۲] شرط اولیه و مرزی انتقال جرم $W(t=۰) = W_۰, W_{es} = W_e$

[۳] شرط اولیه و مرزی انتقال حرارت $T(t=۰) = T_۰, T_{es} = T_\infty$

که W_e و $W_۰$ به ترتیب رطوبت تعادلی و رطوبت اولیه دانه (برپایه خشک، درصد) و T_∞ دمای هوای محیط است. در حل مسأله دو معادله انتقال حرارت و جرم به صورت هم‌زمان حل شدند، ولی از آنجا که در این مقاله شبیه سازی رطوبت دانه ارایه می‌شود، فقط معادله سیستم انتقال جرم استخراج می‌گردد. برای استخراج معادله سیستم از معادله حاکم بر انتقال جرم، از روش گالرکین (Galerkin method) استفاده شد. بدین منظور یک ربع دانه به اجزای محدودی که هر جزء دارای n گره است تقسیم می‌شود (شکل ۱). با استفاده از فرمول انتگرال زنجیره‌ای و فرمول دیورژانس شکل انتگرالی معادلات اجزا، برای مدل بیضوی به دست می‌آید. پس از انتگرال‌گیری و با توجه به فرمول پیشرو در تفاضل محدود و مقدار یک فرض کردن پارامتر آزادسازی معادله زیر به دست می‌آید.

$$\left(K_W + \frac{C}{\Delta t}\right)W^{n+۱} = \frac{C}{\Delta t}W^n + F_W \qquad [۴]$$

که K_W، C و F_W به ترتیب ماتریس‌های سختی، ظرفیت رطوبت و بار است. معادله ظرفیت بار از معادله ۵ به دست می‌آید.

$$F_w = \frac{۲\pi h_m W_e l_{۱۲}}{۶}\begin{bmatrix} ۲ & ۱ & ۰ \\ ۱ & ۲ & ۰ \\ ۰ & ۰ & ۰ \end{bmatrix}\begin{bmatrix} r_۱ \\ r_۲ \\ r_۳ \end{bmatrix} \qquad [۵]$$

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.3.14.3]

که h_m ترتیب ضریب انتقال جرم از سطح دانه (m/s)، l_{12} و r به ترتیب طول ضلع مجاور با سطح آزاد دانه و مختصات گره‌های یک جزء می‌باشد. معادله ۵ که ظرفیت بار در معادله ۴ می‌باشد اهمیت رطوبت تعادلی را نشان می‌دهد که با تغییر رطوبت تعادلی مقدار معادله ۵ تغییر کرده در نتیجه روند شبیه‌سازی خشک شدن دانه تغییر می‌کند.

با توجه شرایط خشک کردن مقدار رطوبت تعادلی براساس دو معادله ۶ و ۷ برای انتخاب حدود رطوبت تعادلی بود (۷ و ۸). با تغییر رطوبت تعادلی و حل مدل، خطای داده‌های شبیه سازی و داده‌های تجربی به دست آمد و بهترین مقدار رطوبت تعادلی انتخاب شد. برای دمای هوای خشک کن (T_{air}) ۳۴۲ درجه کلوین و رطوبت نسبی هوای ۰/۳۲، رطوبت تعادلی بر اساس معادلات ۶ و ۷ به ترتیب ۹/۳۰ و ۸/۰ درصد (بر پایه خشک) محاسبه شده و در نتیجه کمترین رطوبت تعادلی توده ۷/۵ درصد انتخاب شد.

$$Me = ۰/۲۹۳۹ - ۰/۰۴۶۰۲\ln(-(T_{air}(t) - ۲۷۳)\ln RH_{air}(t)) \quad [۶]$$

$$Me = ۰/۰۲۹۵ - ۰/۰۴۵\left[-\left(T + ۳۵/۰۱\right)\ln\left(RH\right)\right] \quad [۷]$$

برنامه شبیه‌سازی رطوبت دانه شلتوک، به روش اجزای محدود به زبان فرترن برای شبکه‌بندی با ۲۵۶ جزء و ۱۵۳ گره نوشته شد و در نهایت معادله ۴ حل و سپس با توجه به معادله زیر برای هر گام زمانی، متوسط رطوبت دانه شلتوک در زمان‌های مختلف خشک شدن به دست می‌آید:

$$\bar{W}(t) = \frac{\int_V W(r,z,t)dm}{\int_V dm} \quad [۸]$$

که در آن $\bar{W}(t)$ متوسط رطوبت دانه در زمان t دقیقه پس از شروع خشک کردن می‌باشد.

نرخ خشک شدن (Drying Rate)(DR) توده بستر نازک از فرمول زیر به دست می‌آید:

$$DR = \frac{W_{t+dt} - W_t}{dt} \quad [۹]$$

مدل بر اساس معادله ۴ و با تغییر رطوبت تعادلی حل شد. برای هر مقدار رطوبت تعادلی داده‌های شبیه سازی خشک شدن متفاوتی به دست آمد. از دو شاخص ریشه متوسط مربعات خطای داده‌ها (RMSE) (Root Mean Square Error) (۴) و مدول میانگین انحراف نسبی (The mean relative deviation modulus) (P) (۵ و ۱۵) برای ارزیابی نزدیکی مدل شبیه سازی شده و مدل حاصل از داده‌های آزمایشگاهی استفاده می‌گردد:

$$RMSE = \left[\frac{۱}{N}\sum_{I=۱}^{n}(W_{pre,i} - W_{exp,i})^۲\right]^{۱/۲} \quad [۱۰]$$

$$P = \frac{۱۰۰}{n}\sum_{i=۱}^{n}\frac{\left|W_{exp,j} - W_{pre,j}\right|}{W_{exp,j}} \quad [۱۱]$$

روش انجام آزمایش

مواد و وسایل مورد استفاده در این تحقیق، خشک کن آزمایشگاهی با دمنده سانتریفوژ (حداکثر دور ۳۰۰۰ دور در دقیقه)، فشار استاتیک ۱۷۶۲ پاسکال و کوره الکتریکی، رطوبت و دماسنج هوا با محدوده اندازه گیری رطوبت نسبی ۱۰ تا ۹۵ درصد، سرعت سنج هوا از نوع سیم داغ (Hot wire)، با حساسیت ۰/۰۱ متر بر ثانیه، دماسنج مدل Testo 925 با حساسیت ۰/۱ درجه سانتی گراد و دقت $\pm$ ۰/۲ °C و ترازوی دیجیتالی با حساسیت ۰/۰۰۱ گرم و ماده آزمایش شلتوک (رقم سپیدرود) بوده است. دمای خشک کن به وسیله ترموستات ثابت نگه داشته می‌شود.

به منظور صحت بررسی مدل شبیه سازی شده منحنی خشک شدن دانه لازم بود تا داده‌های حاصل از شبیه سازی با داده‌های آزمایشگاهی خشک کن شلتوک مقایسه شود. بدین منظور از خشک کن بستر نازک استفاده شد زیرا در خشک کن بستر نازک فرض بر این است که رطوبت و دمای توده برابر با رطوبت و دمای هر یک از دانه‌های موجود در توده است (۱ و ۹).

در خشک کن آزمایشگاهی که برای انجام آزمایش از آن استفاده شد، هوای جریان یافته به وسیله دمنده از کوره گذشته و گرم شده و به وسیله کانال به زیر توده بستر نازک شلتوک

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.3.14.3]

جدول ۱. مقدار ورودی‌های لازم برای حل مسأله

عنوان ورودی برنامه	مقدار ورودی برنامه	عنوان ورودی برنامه	مقدار ورودی برنامه
رطوبت محیط	۸۷ درصد	ضریب انتشار رطوبت دانه	۰/۰۵۷۱ m^2/s
دمای هوای محیط	۲۹ $^{\circ}C$	ضریب انتقال جابه جایی جرم	۴۷/۶۴ $W/m^2.K$
رطوبت اولیه دانه شلتوک	۱۷/۲۳ درصد	قطر بزرگ بیضی	۰/۰۱ m
دمای عامل خشک کننده	۶۹ $^{\circ}C$	قطر کوچک بیضی	۰/۰۰۲۲m
دمای اولیه دانه شلتوک	۱۵/۴$^{\circ}C$	سرعت عامل خشک کننده	۰/۲۵ m/s

هدایت می‌شود. گرادیان رطوبتی و حرارتی هوایی که از توده می‌گذرد به علت نازکی توده صفر است. جریان هوا هنگامی‌که از توده می‌گذرد، رطوبت دانه را جذب و باعث گرم شدن آن می‌شود. ۷۰ گرم شلتوک روی صفحه مشبک خشک کن به گونه‌ای ریخته می‌شود که ارتفاع توده یکسان و حداکثر یک سانتی‌متر باشد (۹). جریان هوا با سرعت ۰/۲۵ m/s (که به وسیله دمنده ایجاد می‌شود) و دمای ۶۹ $^{\circ}C$ (که به وسیله کوره ایجاد می‌شود) توده شلتوک را خشک می‌کند.

وزن توده شلتوک در زمان‌های مختلف به وسیله ترازوی دیجیتالی اندازه گرفته شد. در پایان خشک کردن توده در داخل آون قرار داده و طی ۲۴ ساعت با دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد کاملاً خشک و وزن شد که وزن نهایی وزن خشک دانه می‌باشد. به وسیله وزن اولیه و اوزان توده در طی خشک کردن و وزن خشک توده رطوبت توده بر پایه خشک به دست آمد. شرایط خشک شدن آزمایشگاهی و تئوری برابر بوده است (۶).

نتایج و بحث

داده‌ها و ضرایب خطی ورودی در حل برنامه در جدول ۱ آورده شده است (۲).

معادله ۴ با روش اجزای محدود برای مقادیر مختلف رطوبت تعادلی شلتوک حل و هم‌بستگی داده‌های به دست آمده با داده‌های تجربی محاسبه شد (جدول ۲). با استفاده از معادله ۱۰ و ۱۱ به ترتیب مقدار مجذور میانگین مربعات خطا و مدول میانگین انحراف نسبی بین هر یک از مدل‌ها با رطوبت‌های تعادلی متفاوت با داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است. مقدار RMSE برای رطوبت تعادلی ۷/۵ و ۱۱/۵ درصد (بر پایه خشک) به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار خطا را داشته که برابر با ۰/۱۰۲۵ و ۰/۰۰۹۱ و مقدار P به ترتیب برابر با ۵/۱۲۹ و ۱/۳۹۴ بود.

هم‌بستگی داده‌های مدل با داده‌های آزمایشگاهی بیش از ۹۳٪ است. اکپینار و همکاران نیز از شاخص RMSE برای سنجش میزان نزدیکی داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های تجربی استفاده کردند و نزدیک‌ترین مدل به داده‌های تجربی را به دست آوردند (۴).

منحنی خشک شدن داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی با رطوبت تعادلی متفاوت شلتوک در شکل ۲ نشان داده شده است. همان گونه که از شکل مشخص است روند تغییرات مدل‌های با رطوبت تعادلی شلتوک ۱۱، ۱۱/۵ و ۱۲ درصد (بر پایه خشک) نزدیک به و برای رطوبت تعادلی ۷/۵، ۸/۰ و ۸/۵ درصد نسبت دور از داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. مطابق با شکل هرچه رطوبت تعادلی افزایش یابد شیب منفی منحنی خشک شدن کاهش می‌یابد. علت این امر را می‌توان به وسیله معادله ۴ و ۵ توضیح داد که هر چه رطوبت تعادلی (W_e) افزایش یابد ظرفیت بار (F_w) و در نتیجه طرف دوم معادله ۴ نیز افزایش می‌یابد که در نهایت کاهش رطوبت شبیه سازی شده در گام‌های بعدی (W^{n+1}) خشک شدن کند می‌شود.

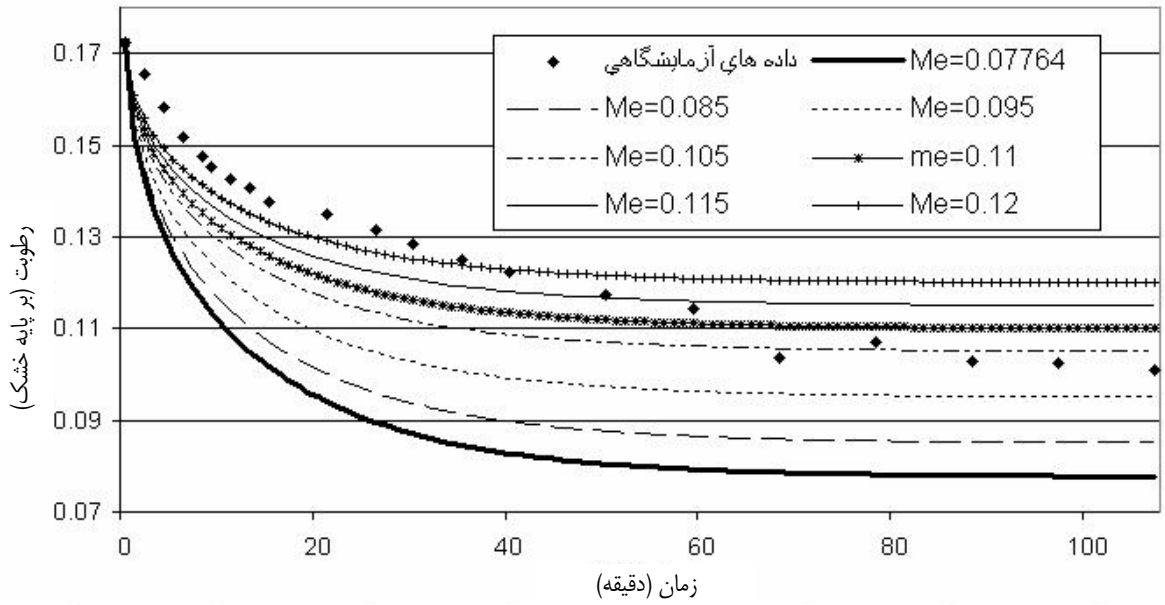
با توجه به جدول ۲ و شکل ۱ رطوبت تعادلی ۱۱/۵ درصد

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.3.14.3]

جدول ۲. مقدار دقت و هم‌بستگی داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های اصلاحی

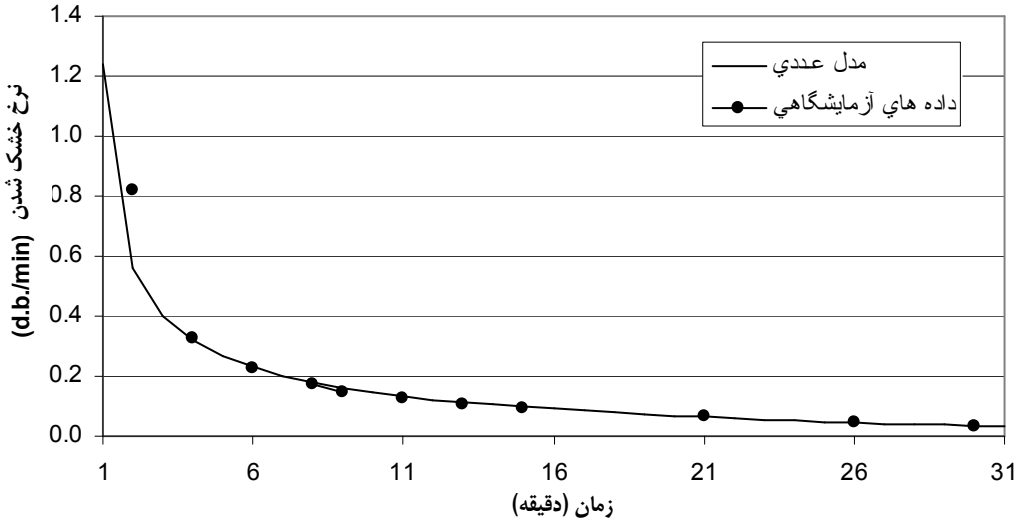
ردیف	رطوبت تعادلی توده بستر نازک (درصد، بر پایه خشک) شلتوک (سپیدرود) (d.b.)	RMSE	p	ضریب هم‌بستگی
۱	۷/۵	۰/۱۰۲۵	۵/۱۲۹	۰/۹۳۲۵۶
۲	۸/۰	۰/۰۳۰۶	۴/۸۱۸	۰/۹۳۲۵۸
۳	۸/۵	۰/۰۲۶۸	۴/۱۶۱	۰/۹۳۲۵۷
۴	۹/۰	۰/۰۲۳۰	۳/۵۰۲	۰/۹۳۲۵۷
۵	۹/۵	۰/۰۱۹۴	۲/۸۴۴	۰/۹۳۲۵۶
۶	۱۰/۰	۰/۰۱۵۹	۲/۱۸۷	۰/۹۳۲۵۶
۷	۱۰/۵	۰/۰۱۲۸	۱/۷۴۷	۰/۹۳۲۵۳
۸	۱۱/۰	۰/۰۱۰۴	۱/۵۳۸	۰/۹۳۲۵۶
۹	۱۱/۵	۰/۰۰۹۱	۱/۳۹۴	۰/۹۳۲۵۷
۱۰	۱۲/۰	۰/۰۰۹۶	۱/۳۷۹	۰/۹۳۲۵۶



شکل ۲. مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های خشک شدن توده بستر نازک برای رطوبت تعادلی مختلف

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.3.14.3]



شکل ۳. منحنی نرخ خشک شدن حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و مدل عددی (رطوبت تعادلی ۱۱/۵ درصد)

برای شبیه‌سازی رطوبت انتخاب شد. مدل‌های خشک شدن بر اساس رطوبت تعادلی ۱۱/۵ درصد تا شصت دقیقه اول خشک کردن داده‌های شبیه سازی را بیشتر از داده‌های آزمایشگاهی تخمین زده و سپس کمتر پیش بینی کرده است. با توجه دقت بسیار خوب مدل شبیه سازی شده با رطوبت تعادلی اصلاحی، منحنی خشک شدن شلتوک رقم سپیدرود را می‌توان با دقت خوبی پیش بینی نمود و گرادیان و تنش رطوبتی وارد بر دانه شلتوک را در طی خشک شدن شبیه سازی نمود.

با قرار دادن داده‌های به دست آمده از مدل اصلاح شده با رطوبت تعادلی ۱۱/۵ درصد و داده‌های تجربی در معادله ۹، نرخ خشک شدن به دست آمد و در شکل ۳ منحنی نرخ خشک شدن داده‌های تجربی و داه‌های مدل نشان داده شده است. همان طور که در این شکل دیده می‌شود، در شش دقیقه نخست، نرخ خشک شدن سریع کاهش یافت و سپس کاهش نرخ خشک شدن، با شیب کم کاهش یافته است. ضریب هم‌بستگی نرخ خشک شدن تجربی و مدل عددی با رطوبت تعادلی ۱۱/۵ درصد، ۹۳/۳٪ بود.

نتیجه‌گیری

۱. افزایش رطوبت تعادلی منجر به کاهش شیب منفی خشک شدن می‌گردد.

۲. برای رطوبت تعادلی ۱۱/۵ درصد مدل شبیه‌سازی برای تخمین منحنی خشک شدن توده بستر نازک شلتوک برنج سپیدرود مناسب است.

۳. هم‌بستگی داده‌های مدل با داده‌های آزمایشگاهی بیش از ۹۳٪ است.

۴. در شش دقیقه نخست، نرخ خشک شدن سریع کاهش یافته و سپس کاهش نرخ خشک شدن آب تمایل کمی کاهش می‌یابد.

منابع مورد استفاده

۱. توکلی هشتجین، ت.، ش. رفیعی و م. ه. خوش‌تقاضا. ۱۳۸۲. بررسی دمای دانه شلتوک برنج سپیدرود در طی فرایند خشک شدن. دانش کشاورزی ۲: ۱-۱۲.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.3.14.3]

۲. رفیعی، ش. ۱۳۸۱. شبیه‌سازی خشک کردن دانه شلتوک برنج با استفاده از روش اجزای محدود. پایان‌نامه دکتری مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

3. Abalone, R., A. Gaston and M. Lara. 2000. Determination of mass diffusivity coefficient od sweet potato. Drying Technol. 18(10):2273-2290.
4. Akpinar, E. K., Y. Bicer and C. Yildiz. 2003. Thin layer drying of red pepper. J. Food Eng. 59: 99-104.
5. Andrieu, J., A. Stamatopolous and M. Zafiropolous. 1985. Equation for fitting desorption isotherms for durum wheat pasta. J. Food Technol. 20(5): 651-658.
6. Anon. 2000. ASAE Standards. 47 th ed. MI, St. Joseph, MI, USA.
7. ASAE Standars. 1985. Moisture relationships of grains. D254.4. 33rd ed., St. Joseph, MI, ASAE.
8. ASAE Standars. 1999. Moisture relationships of plant-based agricultural products. D245.5., 46th ed., St. Joseph, Mich., ASAE.
9. ASAE standards. 2000. American Society of Agricultural Engineers. pp. 507-522.
10. Basunia, M. A. and T. Abe. 1998. Diffusion coefficients for predicting rough rice drying behavior from,low high tempratures. Agric. Eng. J. 7: 147-158.
11. Can chun, J., S. Da Wen and C. Chon Wen. 2000. Mathematical simulation of temperature and moisture fields within a grain kernel during drying. Drying Technol. 18(6):1305-1325,
12. Chen, H., T. Siebenmorgen and W. Yang. 1999. Finite element simulation to relate head rice yield reduction during drying to internal kenrnel moisture gradient and rice state transition. ASAE paper No. 99-6156.
13. Fu, Z. and Y. Hua. 1999. The analysis of moisture diffusion in rough rice with finite element method.Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, pp. 165-176.
14. Gaston, A. L., R. M., Abalone and S. A. Giner. 2002. Wheat drying kinetics. Diffusivities for sphere and ellipsoid by finite elements. J. Food Eng. 52: 313-322.
15. Madamba, P. S., R. H. Driscoll and K. A. Buckle. 1996. The thin layer drying characteristic of garlic slices. J. Food Eng. 29: 75-97.
16. Sarker N. , O. Kunze and T. Strouboulis. 1994. Finite element simulation of rough rice drying. Drying Technol. 12: 761-775.
17. Toei, R. 1983. Drying mechanism of capillary porous Bodies. PP: 269-297. *In*: A. S. Mujumdar(Ed.), Advances in Drying. Vol: 2, Hemispherev Pub. Corp, Washington D C.
18. Walton, L. R., G. M. White and I. J. Ross. 1988. A cellular diffusion based drying model for corn. Trans. ASAE 31(1): 279-283.
19. Yamagushi, S. and A. Mujumder. 1992. Temprature and moisture dependent diffusivity of moisture in rice kernel. International Drying Symposium, Montreal, Quebec, Canada.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-08-24]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.3.14.3]