

شبیه‌سازی عددی رطوبت دانه شلتوک (رقم علی کاظمی) در طی خشک کردن

شاهین رفیعی*، تیمور توکلی هاشجین^۲ و محمدهادی خوش تقاضا^۲

۱، دانشیار، دانشکده مهندسی بیوسیستم کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲، ۳، استاد و دانشیار، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت: ۸۵/۴/۲۹ - تاریخ تصویب: ۸۶/۸/۲۳

چکیده

شبیه سازی فرآیند خشک شدن شلتوک برنج یکی از روشهای پیش بینی نحوه توزیع رطوبت در طی فرآیند بوده و منجر به بهبود و حفظ کیفیت شلتوک می‌شود. تغییر شرایط خشک کردن تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر میزان ضایعات مراحل مختلف شالیکوبی دارد در نتیجه کنترل شرایط خشک کردن امری ضروری می‌باشد. در این مقاله به روش اجزاء محدود، انتقال رطوبت در طی خشک شدن در داخل دانه شلتوک (رقم علی کاظمی) با فرض متقارن بودن دانه شلتوک شبیه سازی شد. برای تأیید صحت مدل‌های استخراج شده، بوسیله خشک کن آزمایشگاهی، توده بستر نازک شلتوک برنج دانه بلند (رقم علی کاظمی) با رطوبت اولیه ۳۲/۹۸۶٪ (بر پایه خشک، d.b.) خشک شد. در طی خشک شدن، دمای، رطوبت نسبی و سرعت هوا به ترتیب ۴۰°C، ۳۲٪ و ۱/۵ m/s بود. در طول مدت خشک کردن بستر نازک، وزن توده شلتوک برنج با فواصل زمانی ده دقیقه اندازه‌گیری شده و با این داده‌ها رطوبت شلتوک محاسبه گردید. مدل‌ها نیز با توجه به ورودی‌های حاصل از شرایط آزمایشگاهی با گام یک دقیقه حل شد. ریشه مجموع مربعات خطا و درجه تاثیر مدل داده‌های شبیه سازی نسبت به داده‌های آزمایشگاهی به ترتیب ۰/۱ و ۰/۹۹۰۸ بود. در نتیجه مدل، تقریب خوبی نسبت به داده‌های آزمایشگاهی داشته و برای شبیه‌سازی رطوبت دانه شلتوک علی کاظمی می‌تواند استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: دانه شلتوک، رقم علی کاظمی، خشک کردن، روش اجزاء محدود، شبیه سازی، انتشار رطوبت

مقدمه

می‌شود که در ایجاد ترک موثر است. Srinivas et al. (۱۹۷۷)

نشان دادند که دانه هنگامی که تحت جذب رطوبت است بیشتر در معرض تنش قرار می‌گیرد. در نتیجه، از این پدیده باید در طی خشک کردن حذر کرد.

Becker & Sallans (۱۹۵۵) نتیجه گرفتند که برای خشک

کردن محصولات کشاورزی به طور عام و خشک کردن محصولات دانه‌ای به طور خاص کارهای تئوری و آزمایشگاهی قابل توجهی انجام شده است. شبیه‌سازی انتقال حرارت و جرم به روش اجزاء محدود به صورت یک بعدی از سه دهه قبل آغاز شد (Beckett & Chu, 1973; Ertekin, 2002; Irudayaraj et al., 1992; Lewis & Gamer, 1971; Sidiropoulos & Zimopoulos, 1983; Wilson et al., 1974)

در توده در حال خشک شدن، از دو دهه قبل و به صورت دو بعدی شبیه‌سازی شد (Abdalla & Singh, 1984; Ertekin, 2002; Gaudu & Bacon, 1979; Haghghi & Segerlind, 1987.; Hays & Curd, 1968; Irudayaraj & Yen, 1999; Sarker et al., 1992; Srinivas et al., 1977; Tamma & Railkar, 1987) Jia & Sun (۲۰۰۰) خشک کردن دانه

شلتوک برنج را با فرض غیر خطی بودن بعضی از پارامترهای انتقال جرم و حرارت به روش اجزاء محدود مدل کردند در این انتقال رطوبت داخل دانه به صورت مایع و بخار فرض شده و

یکی از پر مصرف‌ترین محصول کشاورزی در جهان برنج می‌باشد. شکست دانه شلتوک برنج در طی مراحل شالیکوبی باعث کاهش ارزش اقتصادی این محصول می‌شود به طوری که تحقیقات زیادی در زمینه دستیابی به روش‌های کاهش خسارات محصول در طی خشک شدن انجام گرفته است. خشک کردن مصنوعی تولیدات کشاورزی یکی از روش‌های متداول برای نگهداری آنها است. روش‌های مناسب خشک کردن مقدار زیادی از خساراتی را که در مراحل فرآوری به برنج وارد می‌شود می‌تواند کاهش دهد و خشک کردن سریع می‌تواند میزان تردی و ترک‌های داخلی را که در عملیات فرآوری منجر به شکستن برنج می‌شود افزایش دهد (Tabatabaeifar & Rafiee, 2002).

در طول خشک کردن اگر روش خشک کردن مناسب نباشد و دمای هوای خشک کن از دمای تعادلی شلتوک کمتر شود محصول برخلاف انتظار رطوبت جذب می‌کند که باعث تغییر کیفیت محصول شده و با توجه به جذب و دفع رطوبت دانه شلتوک منبسط و منقبض شده و در آن تنش‌هایی ایجاد

* نویسنده مسئول
تلفن: ۰۲۶۱-۲۸۰۱۰۱۱
E-mail: shahinrafiee@ut.ac.ir

مواد و روش‌ها

استخراج مدل ریاضی

برای شبیه سازی خشک شدن دانه شلتوک از معادله انتشار فیک^۳ که فرآیند انتقال جرم را بیان می‌کند استفاده شد که به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \text{div}(D \nabla M) \quad (1)$$

که M رطوبت دانه برنج (g/g, d.b.%) در زمان t (ثانیه)، D ضریب انتشار (m^2/s) است.

نحوه انتقال حرارت و جرم در طی فرآیند خشک شدن محصولات کشاورزی در سطح محصول به صورت جابه‌جایی و در داخل به صورت هدایتی (انتشار) می‌باشد. اگر فرض شود که انتقال جرم در داخل دانه به صورت مایع و در سطح دانه به صورت بخار انجام می‌شود معادله انتقال حرارت را می‌توان بیان نمود:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(k \nabla T) + L \rho \frac{\partial M}{\partial t} \quad (2)$$

که ρ ، چگالی دانه (kg/m^3)، c ، گرمای ویژه ($\text{J}/\text{kg K}$)، T ، دمای دانه (K)، k ، ضریب انتشار حرارت و L ، گرمای نهان تبخیر ($\text{J}/\text{kg Water}$) است.

شرایط مرزی و اولیه برای انتقال جرم و حرارت عبارتند از:

$$D \left(\frac{\partial M}{\partial n} \right) + h_m (M - M_e) = 0 \quad (3)$$

که n بردار عمود بر سطح دانه، h_m ضریب انتقال جا به جایی رطوبت از سطح دانه (m/s) و M_e رطوبت تعادلی دانه (g/g, d.b.%) است.

$$k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) + h (T_s - T_e) = 0 \quad (4)$$

که h ضریب انتقال جا به جایی حرارتی ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)، T_s ، دمای هوای خشک کن (K) و T_e ، دمای سطح دانه (K) است.

$$T = T_0, M = M_0 \quad t=0 \quad (5)$$

که T_0 و M_0 به ترتیب دما و رطوبت اولیه دانه شلتوک برنج است.

از آنجا که در این تحقیق فقط به موضوع انتشار جرم در داخل دانه پرداخته می‌شود لذا معادله انتقال جرم فرمول بندی می‌گردد. سیستم مختصاتی که مورد استفاده قرار می‌گیرد مختصات استوانه‌ای است که دارای مولفه‌های r ، Z و θ است و با توجه به اینکه دانه به صورت بیضوی مدل شده که دارای تقارن محوری می‌باشد در نتیجه تغییرات رطوبت فقط وابسته به تغییرات مولفه‌های مختصاتی r و Z و نسبت به θ مستقل

مدل دو بعدی استخراج و حل شد. داده‌های تئوری با داده‌های آزمایشگاهی خشک کردن لایه نازک توده گندم مقایسه شد و جواب‌ها قابل قبول بود. Abalone et al. (۲۰۰۰) نیز این شبیه‌سازی را برای سیب‌زمینی انجام داده و سپس ضریب انتشار رطوبت را در داخل سیب‌زمینی تخمین زدند. Irudayaraj & Yen (۱۹۹۹) همت خویش را مصروف شبیه سازی خشک شدن نشاسته مواد غذایی کردند و مدل استخراج شده با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد.

مدلهای سنتیک انتشار رطوبت برای تفسیر پدیده خشک شدن مواد یا خشک کردن توده بستر نازک محصولات کشاورزی بکار می‌رود (Nellist & Bruce, 1995). مطالعه انتقال جرم و حرارت در دانه به جای بررسی توده دانه کمک بهتری بر بیان فرآیند خشک کردن و اثر آن بر دانه دارد. با وجود آنکه یک دانه در توده دانه تحت تأثیر تماس با دانه‌های اطراف خود می‌باشد ولی شبیه‌سازی دانه می‌تواند شاخصی از خشک شدن توده باشد (Yang et al. 2002).

Rafiee et al. (۲۰۰۲) انتقال حرارت را در داخل دانه شلتوک برنج به شکل بیضوی با استفاده از روش اجزاء محدود شبیه‌سازی کردند. دمای به دست آمده در طی خشک کردن حاصل از مدل خطی و غیرخطی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید و بین داده‌های مدل غیر خطی و داده‌های آزمایشگاهی تفاوت معنی‌داری دیده نشد. Tavakoli-Hashijin et al. (۲۰۰۳) با مدلسازی انتقال حرارت در داخل دانه شلتوک برنج سپیدرود و اصلاح ضرایب معادله گرمای نهان تبخیر که باعث غیر خطی شدن معادله انتقال حرارت می‌شد مدل شبیه‌سازی را بهبود بخشیدند. Rafiee et al. (۲۰۰۴) انتقال جرم را در داخل دانه شلتوک برنج رقم بینام که برنجی متوسط محسوب می‌گردد شبیه سازی کردند. آنها برای استخراج معادله سیستم از معادله انتقال جرم از روش گالرکین^۱ استفاده کردند و در سال ۲۰۰۵ انتقال جرم و گرادیان رطوبتی وارد بر دانه پسته مورد بررسی قرار گرفت (Rafee & Kashaninejad, 2005b; Tamma & Railka, 1987).

در این تحقیق علاوه بر رطوبت دانه شلتوک برنج علی‌کاملی که برنج دانه بلند محسوب می‌گردد، آهنگ خشک شدن نیز در طی خشک شدن مدل‌سازی شد و از روش وریشن^۲ برای بسط معادله انتقال جرم استفاده شد.

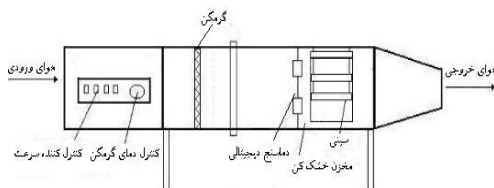
1. Galerkin method
2. The Variation Calculus Method

3. Fick's diffusion equation

کار آزمایشگاهی

به منظور بررسی صحت داده‌های حاصل از شبیه سازی انتقال جرم در داخل دانه، توده بستر نازک شلتوک رقم علی کاظمی به روش آزمایشگاهی خشک شد و در طی خشک شدن رطوبت براساس وزن کردن توده در طی خشک شدن به دست آمد و با داده‌های مدل‌سازی مقایسه شد.

برای انجام آزمایش از دستگاه خشک کن آزمایشگاهی توده لایه نازک استفاده شد (شکل ۱). خشک کن آزمایشگاهی دارای دمنده سانتریفوژ (حداکثر دور ۳۰۰۰ دور در دقیقه) و گرمکن الکتریکی با ۴ المنت با مجموع توان ۴۰۰۰ وات بود. محدوده سرعت هوای عبوری از کانال خشک کن بین ۰/۳ تا ۲/۵ متر بر ثانیه بود. رطوبت سنج مورد استفاده برای اندازه‌گیری رطوبت هوا با محدوده اندازه‌گیری رطوبت نسبی ۱۰٪ تا ۹۵ درصد و با حساسیت ۳ تا ۷۰ درصد، سرعت سنج هوا از نوع سیم داغ^۴ با حساسیت ۰/۰۱ متر بر ثانیه و ترازوی دیجیتالی با حساسیت ۰/۰۰۱ گرم بود.



شکل ۱- طرحواره خشک کن آزمایشگاهی

نحوه خشک کردن بدین صورت است که هوای جریان یافته به وسیله دمنده از گرمکن گذشته و ضمن گرم شدن به وسیله کانال هدایت شده و به طور موازی با دو سینی از روی توده محصول عبور می‌کند. جریان هوا هنگامی که از توده می‌گذرد، رطوبت شلتوک را جذب و باعث گرم شدن آن می‌شود. توده شلتوک در مخزن به صورت دو طبقه‌ای بگونه‌ای ریخته شد که ارتفاع توده هر یک از طبقه‌ها یکسان و حداکثر ۱ سانتی‌متر باشد (Anon., 2000b). جریان هوا با عبور از گرمکن، توده شلتوک را خشک می‌کند.

در این تحقیق پس از انجام کارهای تئوری و شبیه سازی خشک کردن دانه شلتوک، در طی خشک کردن در زمان‌های دلخواه با توجه به اطلاعات ورودی (ابعاد دانه شلتوک، سرعت، رطوبت نسبی و دمای هوای ورودی، دمای دانه، رطوبت اولیه شلتوک) رطوبت دانه بوسیله مدل تئوری تخمین زده شد. این رطوبت تخمینی، داده‌های تئوری نامیده می‌شود. این داده‌ها به

می‌باشد به عبارتی معادله (۱) را می‌توان به صورت زیر دوباره‌نویسی کرد:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{D}{r} \frac{\partial M}{\partial r} + D \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \quad (6)$$

برای استخراج معادله سیستم از معادله حاکمه انتقال جرم از روش محاسباتی وریشن استفاده و معادله (۶) به صورت زیر بر اساس متغیر رطوبت (M) نوشته می‌شود (۷):

$$J = \int_{\frac{1}{2}}^1 \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{D}{r} \frac{\partial M^{(e)}(r, z, t)}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial M^{(e)}(r, z, t)}{\partial z} \right) + 2 \left(\frac{\partial M^{(e)}(r, z, t)}{\partial t} \right) M^{(e)} \right] \times dV + \frac{h_m}{2} (M - M_e)^2 ds$$

براساس روش اجزاء محدود و انتخاب المان مثلثی خطی و فرمول پیشرو در تفاضل جزئی، شکل جبری معادلات اجزاء به دست آمده و با مونتاژ اجزاء، معادله سیستم به دست آمد. برنامه شبیه سازی انتشار رطوبت در طی خشک شدن دانه شلتوک برنج به زبان فرترن^۱ نوشته شد که با انتخاب تعداد گره‌ها، شبکه و مونتاژ المانها، ماتریس‌های سختی، ظرفیت دما، ظرفیت رطوبت و بار بوسیله برنامه به دست آمد و سپس با قرار دادن در معادله سیستم انتقال جرم مسئله حل شد.

با توجه به اینکه خشک شدن بیشتر محصولات کشاورزی در مرحله آهنگ کاهنده خشک شدن^۲ است خشک شدن بستگی به نحوه انتشار رطوبت در داخل دانه دارد و تقریباً مستقل از انتقال جرم از سطح دانه می‌باشد. برای شبیه سازی از معادله ضریب انتشار جرم زیر استفاده شد (Verma et al., 1985).

$$D^m(r, z, t) = 1.53 \times 10^{-4} e^{-\left(\frac{3818}{T^m(r, z, t)}\right)} \quad (8)$$

$D^m(r, z, t)$: ضریب انتشار جرم متوسط در جزء m در زمان t، (m²/s)

$$T^m(r, z, t)$$
: دمای متوسط دانه در جزء m در زمان t، (K)

و رطوبت تعادلی برای برنج دانه بلند نیز از معادله (۹) به دست می‌آید (Anon., 2000a):

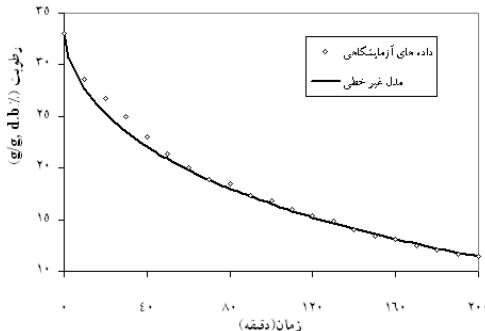
$$M_e = \left(\frac{-\ln(1 - RH)}{0.00004127(T + 49.828)} \right)^{2.1191} \quad (9)$$

که RH رطوبت نسبی هوای ورودی به توده می‌باشد (kg/kg). در هر بار از حل مدل محاسبه ضریب انتشار جرم به دمای گره‌ها نیاز دارد در نتیجه در هر گام زمانی معادله انتقال حرارت به طور هم زمان با انتقال جرم حل شد و دمای هر گره برای محاسبه ضریب انتشار همان گره استفاده شد.

3. Hygrometer (Testo 610, Germany)
4. Hot Wire (Testo, 405 V1, Germany)

1. Fortran power station version 4.0
2. Falling rate drying period

ریشه مجموع مربعات خطا و درجه تاثیر مدل داده‌های تئوری نسبت به داده‌های آزمایشگاهی بوسیله معادلات (۱۱) و (۱۲) محاسبه شد که به ترتیب ۰/۱ و ۰/۹۹۰۸ بود و نشان دهنده تقریب خوب داده‌های تئوری و داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. در نتیجه می‌تواند از مدل برای شبیه سازی خشک شدن دانه شلتوک رقم علی کاظمی که یک رقم دانه بلند است استفاده کرد.



شکل ۲- منحنی متوسط رطوبت دانه شلتوک برنج علی کاظمی در طی خشک شدن با دمای ۴۰°C هوای خشک کننده، حاصل از داده‌های آزمایشگاهی، داده‌های مدل

شبیه سازی انتقال جرم در دانه براساس روش اجزاء محدود، نحوه انتشار رطوبت در داخل دانه در طی خشک شدن را می‌تواند مدلسازی کند. محققین زیادی توزیع رطوبت و حرارت در داخل دانه را بوسیله روش اجزاء محدود شبیه‌سازی کردند. برای مثال انتقال حرارت در داخل دانه شلتوک رقم سپیدرود بوسیله Tavakoli-Hashjin et al. (۲۰۰۳)، خشک شدن دانه شلتوک رقم سپیدرود و بینام بوسیله Rafiee (۲۰۰۲)، انتقال حرارت و انتقال جرم دانه شلتوک رقم بینام توسط Rafiee et al. (۲۰۰۲، ۲۰۰۴)، مدل ریاضی انتقال جرم و حرارت در دانه بوسیله Jia & Sun (۲۰۰۰)، انتقال جرم و حرارت در ماده متخلخل بوسیله Gaudu & Bacon (۱۹۷۹)، Haghghi & Segerlind (۱۹۸۷) انتقال حرارت و جرم را در دانه‌های کروی، Irudayaraj & Yen (۱۹۹۲) خشک شدن غلات، Lewis et al. (۱۹۷۵) انتقال جرم و حرارت را در داخل دانه‌های متخلخل، Rafee & Kashaninejad (۲۰۰۵a، ۲۰۰۵b) جرم و گرادیان رطوبتی در داخل دانه پسته را در طی خشک شدن شبیه‌سازی کردند.

شکل (۲) نشان می‌دهد تا ۱۴۵ دقیقه اول خشک شدن توده لایه نازک شلتوک، مدل رطوبت را کمتر از داده‌های آزمایشگاهی تخمین می‌زند و سپس رطوبت را بیش از داده‌های آزمایشگاهی شبیه سازی می‌کند. علت را می‌توان در ضریب انتشار رطوبت دانه دانست که در ۱۴۵ دقیقه اول خشک شدن

وسیله معادله (۱۰) متوسط گرفته شد که حاصل این معادله متوسط رطوبت دانه در هر گام زمانی را ارائه می‌دهد.

$$M_{j,pre} = \frac{\int_V M(r, z, t) dm}{\int_V dm} \quad (10)$$

M (r,z,t): رطوبت گره با مختصات (r,z) در زمان t (بر پایه خشک، اعشاری)

M_{j,pre}: متوسط رطوبت دانه در گام زمانی ژام

از ریشه مجموع مربعات خطا (RMSE) و درجه تاثیر مدل (EF) داده‌های تئوری نسبت به داده‌های آزمایشگاهی معیاری برای سنجش میزان تقریب محاسبات استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (M_{j,pre} - M_{exp})^2}{n}} \quad (11)$$

$$EF = \frac{\sum_{j=1}^n (M_{j,exp} - M_{exp,mean})^2 - \sum_{j=1}^n (M_{j,pre} - M_{exp})^2}{\sum_{j=1}^n (M_{j,exp} - M_{exp,mean})^2} \quad (12)$$

که n: تعداد نمونه‌های جفتی، M_{j,exp}: رطوبت متوسط آزمایشگاهی (d.b.) در گام ژام، M_{j,pre}: رطوبت متوسط بر پایه خشک در گام ژام و M: متوسط رطوبت دانه در طی خشک کردن.

آهنگ خشک شدن (DR, g/g.min) دانه شلتوک برنج علی کاظمی بر اساس مدل تئوری بوسیله معادله زیر محاسبه شد.

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (13)$$

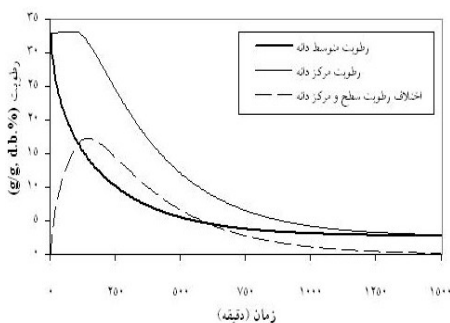
نتایج و بحث

در آزمایش از برنج رقم علی کاظمی (دانه بلند) استفاده شد. برای حل معادله انتقال جرم ابعاد دانه (دانه به شکل بیضی‌وار با قطر بزرگ ۰/۱۰۶۳ (متر) و قطر کوچک ۰/۰۲۰۷ (متر))، رطوبت و دمای اولیه دانه (۱۷/۰) (۱۵/۴°C d.b.)، ضریب انتشار رطوبت و رطوبت تعادلی دانه به ترتیب به وسیله معادلات ۸ و ۹ به عنوان ورودی به برنامه داده می‌شود. داده‌های حاصل از مدل شبیه سازی شده رطوبت شلتوک با گام زمانی یک دقیقه به همراه داده‌های آزمایشگاهی حاصل از خشک کردن لایه نازک شلتوک رقم علی کاظمی در شکل ۲ ارائه شده است. خشک شدن دانه برنج تا رطوبت نهایی ۳ درصد برپایه خشک ادامه داشت که مدت ۱۵۰۰ دقیقه طول کشید ولی در شکل ۲ تا دقیقه ۲۰۰ نشان داده شده است.

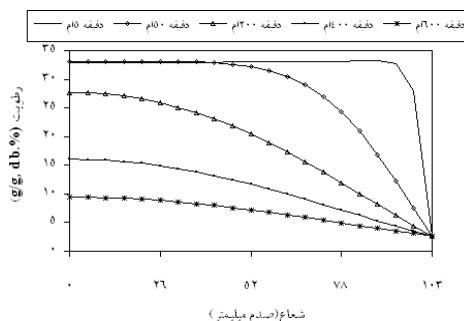
1. Root mean square error
2. Modelling efficiency
3. Dry basis
4. Drying rate

کاهش می‌یابد و باعث وارد آمدن تنش رطوبتی زیاد در دقایق اولیه خشک شدن می‌شود که می‌تواند منجر به شکستن دانه شود در نتیجه بهتر است در دقایق اولیه خشک کردن دانه با دمای کمتر خشک شده و به تدریج این دما افزایش یابد.

Jia & Sun (۲۰۰۰)، خشک شدن دانه گندم با رطوبت اولیه ۲۱ درصد و دمای هوای خشک کن 47°C را به صورت دو بعدی شبیه‌سازی کردند. توزیع رطوبت در دانه گندم در زمانهای ۱۵، ۴۵ و ۶۰ دقیقه پس از شروع خشک شدن مدلسازی شد و به این نتیجه رسیدند که انتقال جرم از مرکز دانه گندم به سطح دانه، به آرامی انجام می‌گیرد به طوری که رطوبت مرکز دانه پس از ۶۰ دقیقه به ۱۶ درصد رسید.



شکل ۴- منحنی تغییرات متوسط رطوبت دانه و رطوبت مرکز دانه و اختلاف رطوبت سطح و مرکز دانه در طی خشک شدن با دمای 40°C هوای خشک‌کننده



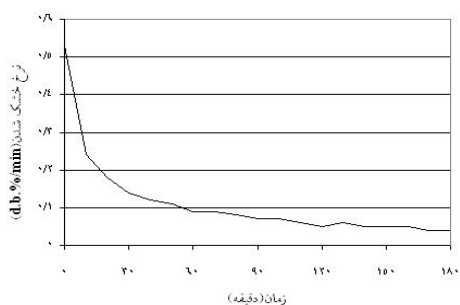
شکل ۵- توزیع رطوبت از مرکز به سطح دانه شلتوک برنج رقم علی کاظمی در دقایق ۱۵، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ دقیقه خشک کردن، با دمای 40°C ، حاصل از داده‌های شبیه سازی شده

نتیجه گیری کلی

براساس روش اجزاء محدود و با استفاده از المان مثلثی خطی می‌توان انتقال جرم را در داخل دانه شلتوک رقم علی کاظمی شبیه سازی کرد. شدت خشک شدن شلتوک رقم علی کاظمی براساس شرایط خشک کردن با دقت مناسب شبیه سازی شد. توزیع رطوبت در داخل شلتوک در طی خشک شدن مدلسازی شد.

ضریب انتشار جرم (D) به دست آمده از معادله (۸) بیش از ضریب انتشار واقعی دانه بوده در نتیجه آهنگ خشک شدن مدل شبیه سازی بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی می‌باشد و پس از ۱۴۵ دقیقه ضریب انتشار به دست آمده از معادله (۸) از ضریب انتشار شلتوک کمتر است و آهنگ خشک شدن مدل کمتر از خشک شدن توده لایه نازک شلتوک است.

آهنگ خشک شدن دانه شلتوک برنج نسبت به زمان خشک شدن بر اساس داده‌های مدل و به وسیله معادله ۱۳ محاسبه شده و در شکل ۳ رسم شده است. همان گونه که در شکل دیده می‌شود تا ۱۰ دقیقه اول خشک شدن توده لایه نازک شلتوک آهنگ خشک شدن با شیب زیادی کاهش یافته سپس تا ۲۰ دقیقه شیب کمتر و پس از آن به مقدار قابل توجهی آهنگ خشک شدن کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه گرادیان رطوبتی وارد بر دانه که منجر به شکسته دانه می‌گردد متناسب با آهنگ خشک شدن است در نتیجه ۱۰ دقیقه اول خشک شدن بیشترین تنش رطوبتی به دانه وارد شده و در ۱۰ دقیقه اول خشک شدن دانه بیشتر در معرض شکست یا ترک می‌باشد (Shei & Chen, 2002).



شکل ۶- تغییرات آهنگ خشک شدن دانه شلتوک برنج رقم علی کاظمی نسبت به زمان

متوسط رطوبت دانه، رطوبت مرکز دانه شلتوک برنج و اختلاف رطوبت سطح و مرکز دانه در ۱۵۰۰ دقیقه اول خشک کردن به دست آمده از حل مدل در شکل ۴ ارایه شده است. رطوبت داخل دانه در حدود ۲۲ دقیقه اول ثابت و سپس به علت ایجاد گرادیان رطوبت از سطح دانه به مرکز، انتقال جرم از مرکز به سمت سطح دانه آغاز می‌گردد در نتیجه رطوبت مرکز دانه با تأخیر فاز ۲۲ دقیقه ای از شروع خشک کردن کاهش می‌یابد.

برای بررسی توزیع تنش رطوبتی وارد بر دانه در طی خشک شدن لازم است از نحوه توزیع رطوبت در داخل دانه مطلع شد. توزیع رطوبت در داخل دانه در دقایق ۱۵، ۴۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۱۰۰۰ دقیقه نشان داده شده است. همان گونه که دیده می‌شود رطوبت لایه‌های سطحی دانه در دقایق اولیه به شدت

REFERENCES

- Abalone, R., A. Gaston & Lara, M. (2000). Determination of mass diffusivity coefficient of sweet potato. *Drying Technology*, 18(10), 2273-2290.
- Abdalla, H. & Singh, R.P. (1984). Simulation of thawing of foods using finite element method. *Journal Food Process Engineering*, 4, 273-287.
- Anonymous. (2000a). ASAE standards. *American Society of Agricultural Engineers*. pp. 521.
- Anonymous. (2000b). ASAE standards. *American Society of Agricultural Engineers*. pp. 578-580.
- Becker, H.A. & Sallans, H.R. (1955). A study of internal moisture movement in the drying of the wheat kernel. *Cereal Chemistry*, 32, 212-226.
- Beckett, R.E. & Chu, S.C. (1973). FEM applied to heat conduction in solids with nonlinear boundary condition. *ASME Journal of Heat Transfer*, 195, 126-129.
- Comini, G. & Lewis, R.W. (1976). A numerical solution of two-dimensional problems involving heat and mass transfer. *International Journal Heat Mass Transfer*, 19, 1387-1392.
- Ertekin, C. (2002). Drying methods of some vegetables and fruits. Workshop on *drying technique of agricultural products*, Izmir, Turkey (in Turkish).
- Fu, Z. & Hua, Y. (1999). The analysis of moisture diffusion in rough rice with finite element method. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. pp. 165-176.
- Gaudu, R. & Bacon, G. (1979). Numerical simulation of heat and mass transfer in unsaturated porous media. In ptoc. In proceedings of *1st International Conferens On Numerical Method in Thermal Problems, Swansea, Wales*, pp. 1122-1130.
- Haghighi, K. & Segerlind, L.J. (1987). Modelling simultaneous heat and mass transfer in an isotropic sphere – A finite element approach. *Transactions of the ASAE*, 31, 629-637.
- Hays, D.F. & Curd, H.N. (1968). Heat conduction in solids: Temperature dependent thermal conductivity. *International Journal Heat and Mass Transfer*, 11, 285-295.
- Irudayaraj, J., Haghighi, K. & Srtoshine, R.L. (1992). Finite element analysis of drying with application to cereal grain. *Journal Agricultural Engineering Research*, 53, 209-229.
- Irudayaraj, J. & Yen, W. (1999). Numerical modelling of heat and mass transfer in starch systems. *Transactions of the ASAE*, 42(2), 449-455.
- Jia, C. C. & Sun, D. W. (2000). Mathematical simulation of temperature and moisture fields within a grain kernel during drying. *Drying Technology*, 18(6), 1305-1325.
- Lewis, R.W., Comini, G. & Humpheson, C. (1975). Finite element application to heat and mass transfer problems in porous bodies (in Russian). *Inzh. Fiz. Zh.* 29, 483-489.
- Lewis, R.W. & Gamer, R.W. (1971). A finite element solution of coupled electrokinetic and hydrodynamic flow in porous media. *International Journal Numerical Method. Engineering*, 5, 41-55.
- Nellist M.E. & Bruce D.M. 1995. Heated-air grain drying. In D.S. Jayas, N.D.G. White & W.E. Muir (Eds), *Stored Grain Ecosystems* (Chap. 16, pp. 609-659). New York: Marcel Dekker.
- Rafiee, S., & Kashaninejad, M. (2005a). Simulation of moisture diffusion within nut pistachio during drying with high temperature. In proceedings of *IV International Symposium on Pistachio and Almonds*, Book of Abstracts. Tehran, IRAN, 22-25 May. P.162.
- Rafiee S. & Kashaninejad M. (2005b). Transient Moisture Gradients in Pistachio Nut with Finite Element Model during High Temperature Drying. In proceedings of *IV International Symposium on Pistachio and Almonds*, Book of Abstracts. Tehran, IRAN, 22-25 May. P.177.
- Rafiee, S. 2002. *Rough Rice Kernel Drying Simulation Using Finite Element Method*. Ph. D. dissertation, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran.
- Rafiee, S., Tavakoli-Hashjin, T. & Kazemzade-Hanani, S. (2002). Simulating binam rice temperature through drying process using finite element method. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 3(10), 1-17.
- Rafiee, S., Tavakoli-Hashjin, T. & Kazemzade-Hanani, S. (2004). Rough rice (Binam) kernel moisture simulation during drying with finite element method. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 11(2), 43-53.
- Sarker, N., Kunze, O. & Stroudoulis, T. (1992). Fissuring of rough rice grains due to transient moisture grains from heated air riced. *American Society of Agricultural Engineering*. Paper No. 92-6617.17pp.
- Shei, H. J. & Chen, Y. L. (2002). Computer simulation on intermittent drying of rough rice. *Drying Technology*, 20(3), 615-636.
- Sidiropoulos, E. & Tzimopoulos, C. (1983). Sensitivity analysis of a coupled heat and mass transfer model in unsaturated porous media. *Journal of Hydrology*, 64, 281-298.
- Srinivas, T., Bhashyam, M. K., Mahadevappa M. & Desikachar, H.S.R. (1977). Varjetal differences in crack formation due to weathering and wetting stress in rice. *Indian Journal of Agricultural Science*, 47, 27-31.
- Tabatabaeefar, A. & Rafiee, S. (2002). Moisture content distribution across a batch-type rough rice dryer. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 33(4), 755-761.
- Tamma, K.K. & Raikar, S.B. (1987). Recent advances in the development of finite element formulation for nonlinear/linear transient thermal problems. In *Proceeding of the Fifth International Conference on Numerical Method in Thermal Problems*. Vol. 5. Part 2, 1231-1241.
- Tavakoli-Hashjin, T., Rafiee, S. & Khoshtaghaza, M. H. (2003). Rough rice kernel temperature simulation during drying (Sepidrod) by using finite element method. *Agricultural*

- Science*.13(2), 1-12.
- Verma, R. L., Bucklin, J. B., Endan, J. B., & Wratten, F. T. (1985). Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of the ASAE*, 28(1), 296-301.
- Wilson, E. L., Bathe, K.J. & Peterson, F.E. (1974). FEM of linear and non-linear heat transfer. *Nuclear Engineering and Design*. 29, P. 110-124.
- Yamagushi, S. & Mujumder, A. (1992). Temperature and moisture dependent diffusivity of moisture in rice kernel. *International Drying Symposium*, Montreal, Quebec Canada, 1389-1398.
- Yang W., Jia, C., Siebenmorgen, T.J., Howell, T.A. & Cnossen A.G. (2002). Intra-kernel moisture responses of rice to drying and tempering treatments by finite element simulation. *Transactions of the ASAE*. 45(4), 1037-1044.