

شبیه‌سازی پخش رطوبت در دانه پسته (اوحدی) در طی خشک شدن با درجه حرارت بالا

*شاهین رفیعی^۱ و مهدی کاشانی‌نژاد^۲

^۱عضو هیأت علمی سابق گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان،

^۲عضو هیأت علمی گروه صنایع غذایی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

تاریخ دریافت: ۸۳/۱۲/۵؛ تاریخ پذیرش: ۸۵/۳/۷

چکیده

یکی از مهمترین مراحل فرآوری پسته، خشک کردن می‌باشد. نحوه خشک کردن پسته بر خصوصیات کیفی، شیمیایی و میکروبی محصول نهایی تأثیر دارد، در نتیجه تعیین شرایط بهینه خشک کردن امری ضروری می‌باشد. به منظور خندان نمودن دانه‌های پسته باید تحت تنش‌های رطوبتی و حرارتی قرار گیرد. بدین منظور باید از تغییرات رطوبت و حرارت در طی خشک شدن آگاه بود. در این مقاله تغییرات رطوبت دانه پسته در طی خشک شدن بوسیله روش اجزاء محدود شبیه‌سازی شد. به منظور بررسی صحت داده‌های حاصل از مدل، بوسیله خشک کن آزمایشگاهی، توده بستر نازک پسته (رقم اوحدی) با دمای ۵۵ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب با رطوبت اولیه ۵۴/۶۲ و ۵۱/۳۷ درصد (بر پایه خشک) و رطوبت نسبی ۲۰ درصد و سرعت جریان هوا ۱/۵m/s خشک شد. در طول مدت خشک کردن، وزن توده پسته با فواصل زمانی یک دقیقه اندازه‌گیری شده و با توجه به وزن خشک توده، رطوبت توده بستر نازک پسته محاسبه گردید. دو مدل براساس شکل کروی و بیضوی دانه پسته با توجه به ورودی‌های حاصل از شرایط آزمایشگاهی با گام یک دقیقه حل شد. مدول متوسط انحراف نسبی و متوسط ریشه مربعات خطای داده‌های شبیه‌سازی شده براساس دو مدل نسبت به داده‌های آزمایشگاهی محاسبه شد که هر دو مدل و هر دو دما مقادیر قابل قبولی را نشان دادند و با توجه به دقت بیشتر مدل بیضوی، داده‌های شبیه‌سازی قابل استناد می‌باشد. در نتیجه از این مدل شبیه‌سازی شده برای مدل‌سازی نحوه پخش و توزیع رطوبت در طی خشک شدن استفاده شده و خطوط هم رطوبت در زمان‌های مختلف خشک شدن دانه پسته به دست آمد و مشاهده شد که با مرور زمان که از خشک کردن می‌گذرد اختلاف رطوبت بین سطح و مرکز افزایش و سپس کاهش می‌یابد. از شبیه‌سازی توزیع رطوبت در طی خشک شدن در داخل دانه پسته برای محاسبه گرادیان رطوبت و تنش‌های رطوبتی می‌توان استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: پسته، شبیه‌سازی خشک‌کردن، روش اجزاء محدود، منحنی هم رطوبت، دمای بالا

مقدمه

خشک کردن به روش اجزاء محدود برای دانه پسته انجام نشده است به همین دلیل به منابعی که از این روش برای محصولات دیگر استفاده کرده‌اند، اشاره می‌گردد.

رفیعی و همکاران در سال ۱۳۸۱ انتقال حرارت و در سال ۱۳۸۳ انتقال جرم را در داخل دانه شلتوک برنج (رقم بینام) به شکل بیضوی با استفاده از روش اجزاء محدود شبیه‌سازی کردند. دمای به‌دست آمده در طی خشک کردن حاصل از مدل خطی و غیرخطی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید و بین داده‌های مدل غیرخطی و داده‌های آزمایشگاهی تفاوت معنی‌داری دیده نشد. در طی خشک کردن پخش جرم در زمان‌های کوتاه، در داخل دانه به‌صورت یکنواخت و آرام صورت می‌گیرد (جینر و ماسچرونی، ۲۰۰۱).

خشک کردن را می‌توان به دو محدوده خشک کردن با دمای بالا و پایین تقسیم نمود. خشک کردن محصولات با درجه حرارت بالا بیان‌کننده خشک کردن با دمای بین ۳۰۰-۵۰ درجه سانتی‌گراد است (بروکر و همکاران، ۱۹۹۲).

مانتروس و مایر (۲۰۰۰) خشک شدن توده ذرت با درجه حرارت بالا را شبیه‌سازی نمودند (از دمای بالای ۷۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد).

کنوزین و همکاران (۲۰۰۳) دمای زیر ۴۰ درجه را دمای پایین خشک کردن اعلام نمودند و در آزمایش خود از دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد که دمای بالای خشک کردن است، استفاده نمودند.

در تحقیقاتی که اخیراً انجام گرفته توزیع رطوبت در داخل دانه را به‌صورت خطوط یا سطوح هم رطوبت ارائه داده‌اند (وو و همکاران، ۲۰۰۴). در این مقاله صحت روش اجزاء محدود برای مدل‌سازی خشک شدن دانه پسته اثبات شد. از این روش برای شبیه‌سازی پخش و توزیع رطوبت در داخل دانه پسته در طی خشک شدن دانه پسته (رقم اوحدی) استفاده شد. سپس خطوط هم رطوبت در داخل دانه پسته در زمان‌های مختلف خشک شدن رسم گردید.

کشور ایران اولین تولیدکننده و صادرکننده پسته در جهان است. ارزش غذایی بالا و خندان بودن پسته باعث گسترش مصرف آن به‌صورت خام و برشته در نقاط مختلف جهان شده است. مراحل مختلف پس از برداشت بویژه پوست‌گیری و خشک کردن در حفظ و نگهداری مرغوبیت و کیفیت پسته اهمیت زیادی دارد. بهبود و اصلاح مراحل مختلف فرآوری پسته نقش قابل توجهی در دستیابی به کیفیت مطلوب، افزایش صادرات و درآمد ارزی کشور دارد. خشک کردن یکی از مراحل مهم فرآوری پسته است. چنانچه این مرحله بخوبی انجام نشود و عوامل مؤثر در خشک کردن (دما، سرعت جریان و رطوبت نسبی هوا) به‌طور صحیح کنترل نشود، علاوه‌بر کاهش کیفیت محصول نهایی، شرایط برای فعالیت کپک‌های تولیدکننده آفلاتوکسین مهیا شده و میزان آلودگی آن افزایش می‌یابد. کاشانی‌نژاد و همکاران (۲۰۰۳) اعلام داشتند که دمای هوا مهمترین عامل در کنترل خصوصیات کیفی پسته در حین خشک کردن است. فرآیند خشک کردن تأثیر قابل توجهی بر میزان خندان بودن پسته‌ها داشت و با افزایش درجه حرارت مقدار خندان بودن افزایش یافت.

سرینیواس و همکاران (۱۹۷۷) نشان دادند هنگامی که دانه تحت جذب رطوبت است بیشتر در معرض تنش قرار می‌گیرد. در نتیجه، از این پدیده باید در طی خشک کردن حذر کرد و بایستی شرایط خشک کردن تحت کنترل باشد در نتیجه روش‌های شبیه‌سازی یکی از راه‌های کنترل نحوه خشک کردن است و یکی از روش‌های شبیه‌سازی اجزاء محدود است (سرینیواس و همکاران، ۱۹۷۷).

شبیه‌سازی انتقال حرارت و جرم به روش اجزاء محدود به‌صورت یک بعدی از سه دهه قبل آغاز شد (هی و کورد، ۱۹۶۸؛ لويس و گامر، ۱۹۷۱) ولی انتقال جرم در توده در طی خشک کردن، از دو دهه قبل و به‌صورت دو بعدی شبیه‌سازی شد (کومینی و لويس، ۱۹۷۶؛ گاهودو و باکون، ۱۹۷۹؛ و فو و هاو، ۱۹۹۹). تاکنون شبیه‌سازی

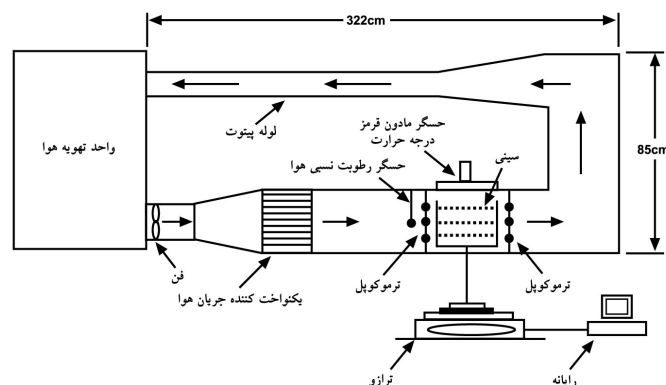
مواد و روش‌ها

مرحله آزمایشگاهی: در این تحقیق از دانه پسته (مغز با پوست سخت) رقم اوحدی استفاده گردید. قبل از انجام آزمایش، مقدار رطوبت پسته‌ها در محدوده ۵۹/۷۵-۵۶/۵۴ درصد (بر پایه خشک، d.b.، اعشاری) تنظیم گردید. برای این منظور نمونه‌ها را در یک ظرف شیشه‌ای قرار داده و مقدار محاسبه شده آب مقطر به آنها افزوده شد. نمونه‌ها به مدت ۱۰ روز در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا به رطوبت تعادلی برسند. در طول دوره نگهداری در فواصل زمانی معین همزدن و تکان دادن نمونه‌ها ادامه یافت (پالپین و دریسکول، ۱۹۹۴؛ پاتکن و همکاران، ۱۹۹۱). شکل ۱ نمودار شماتیک خشک‌کن مورد استفاده برای خشک کردن نمونه‌های پسته را نشان می‌دهد. سینی‌های خشک‌کن (سه سینی) که از شبکه‌های توری مانند ساخته شده بودند در بخش میانی محفظه خشک‌کن قرار گرفته و هوا پس از عبور از لوله‌های یکنواخت کننده بر سینی‌ها دمیده می‌شد. سینی‌ها توسط یک میله فلزی بر روی ترازوی دیجیتالی قرار گرفته و تغییرات وزن نمونه در حین خشک کردن ثبت می‌گردید (کاشانی نژاد و تایل، ۲۰۰۴).

آزمایش در دو دمای ۵۵ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت جریان هوا ۱/۵m/s، رطوبت نسبی ۲۰ درصد و سه تکرار انجام شد. قبل از شروع هر آزمایش خشک کردن، ۶۰۰ گرم نمونه پسته از یخچال خارج شده و پس

از قرار دادن در پاکت پلاستیکی در محیط آزمایشگاه گذاشته شد تا دمای نمونه‌ها به درجه حرارت محیط (23 ± 2) برسد. سپس نمونه‌های پسته به صورت یک لایه بر روی سینی‌ها پخش شده و در داخل محفظه خشک‌کن قرار گرفت. فرآیند خشک کردن به محض رسیدن مقدار رطوبت نمونه‌ها به ۵٪ (d.b.) قطع شد. در طی خشک شدن توده بستر نازک پسته، وزن توده هر دقیقه بوسیله ترازوی دیجیتالی در داخل رایانه ثبت شد، در نتیجه رطوبت توده در طی خشک شدن به دست آمد.

مدل توری: روش اجزاء محدود^۱ یک روش عددی است که می‌توان آن را برای حل مسائل متعدد و متنوع مهندسی در حالات مختلف پایدار، گذرا، خطی و غیرخطی مانند تحلیل تنش، انتقال حرارت و جرم، الکترومغناطیس، ارتعاشات و تحلیل دینامیکی حرکت و جریان سیال بکار برد. این روش که ریشه‌های آن به سال‌های اولیه ۱۹۰۰ میلادی باز می‌گردد، به‌طور عملی در دهه ۶۰ میلادی به صورت کلاسیک مدون داخل مباحث مهندسی و سازه شد و در دو دهه آخر قرن هزاره دوم به‌طور شگفت‌آوری در مراکز علمی و صنعتی جهان رسوخ نمود. حل مسائلی که توسط روش معمول تحلیلی غیرممکن می‌نمود، قابلیت مدلسازی مراحل واقعی صنعتی با کمترین ساده سازی‌ها، توانمندی روش در ارایه نتایج قابل اطمینان باعث گردید تا این روش به عنوان جزء لاینفک پیشرفت صنعتی درآید (مجدوبی و فریبا، ۱۳۷۶).



شکل ۱- شماتیک خشک کن مورد استفاده برای خشک کردن پسته.

شکل، ثابت فرض کردن D ، استفاده از فرمول انتگرال زنجیره‌ای و فرمول دیورژانس و استخراج ماتریس سختی، ظرفیت رطوبت و با فرمول پیشرو در تفاضل محدود و با فرض مقدار یک برای پارامتر آزادسازی در نهایت معادله (۱) به زیر صورت به دست می‌آید.

$$\left(K + \frac{C}{\Delta t}\right)W^{n+1} = \frac{C}{\Delta t}W^n + F \quad (4)$$

که n, K, C, F و Δt به ترتیب شماره گام‌های زمانی، ماتریس سختی، ظرفیت رطوبتی، ماتریس بار و گام زمانی بود. معادله حاصل شکل جبری معادلات اجزاء محدود است و با مونتاژ اجزاء، معادله سیستم به دست می‌آید. برنامه شبیه‌سازی خشک کردن محصولات دانه‌ای به زبان فرترن ۹۹ نوشته شده است.

معادله (۴) براساس دو شکل کروی و بیضوی دانه پسته حل شد. برای هر یک از دو مدل، رطوبت گره‌ها در زمان مورد نظر محاسبه گردید و سپس بوسیله معادله (۵) رطوبت متوسط دانه پسته به دست آمد:

$$\bar{W}(t) = \frac{\int_V W dm}{\int_V dm} \quad (5) \text{ برای هر گام زمانی (t)}$$

خشک شدن دانه پسته که به عنوان یک جسم همگن فرض شده بوسیله روش اجزاء محدود شبیه‌سازی شد. دانه پسته با فرض خندان بودن و مقطع کروی و بیضوی با جزء مثلث خطی اکسیسیمتریکی مدل شد (شکل ۲) و معادلات انتقال جرم وابسته به زمان و به صورت دو بعدی فرض گردید. معادله حاکمه انتقال جرم عبارت از:

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

که D : ضریب پخش رطوبت به صورت مایع (m^2/s) بود. شرط اولیه انتقال جرم:

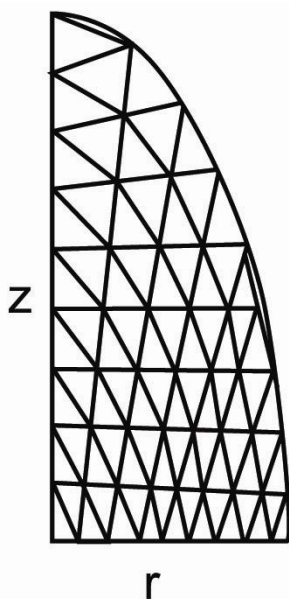
$$W(t=0) = W_0 \quad (2)$$

شرط مرزی انتقال جرم:

$$\left[n^t D\nabla W\right]_{es} = -h_d \{[W]_{es} - W_e\} \quad (3)$$

که W : رطوبت هر یک از گره‌ها (d.b.)، n^t : ترانهاده ماتریس بردار عمود بر سطح دانه، h_d : ضریب انتقال جابجایی رطوبت (m/s)، W_e : رطوبت تعادلی پسته (d.b.) و es : ارزیابی روی سطح دانه است.

پس از گسسته‌سازی دانه به n جزء، انتخاب تابع



شکل ۲- نمای مقطع طولی یک چهارم دانه پسته شبکه‌بندی شده با ۵۵ گره و ۸۱ جزء.

فرض شکل کرووی (شعاع متوسط دانه ۶/۷۲mm) و بیضوی (شعاع ۶/۰۴mm و ۸/۳۴) دانه پسته حل شد. یک چهارم دانه پسته به ۳۲۵ المان و ۵۷۶ گره شبکه‌بندی شد. ضریب پخش جرم برای دمای ۵۵ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب $5/0 \times 10^{-10}$ و $7/5 \times 10^{-10}$ m²/s و رطوبت اولیه دانه به ترتیب ۵۱/۳۷ درصد و ۵۴/۶۲ درصد (d.b.) فرض شد. در شکل ۳ تغییرات رطوبت متوسط دانه در طی خشک شدن پسته براساس داده‌های آزمایشگاهی و مدل با فرض شکل کرووی و بیضوی دانه نشان داده شده است. متوسط ریشه مربعات خطا (RMSE) و مدول متوسط انحراف نسبی (P) داده‌های تئوری با شکل کرووی و بیضوی دانه با داده‌های آزمایشگاهی براساس معادله (۸) و (۹) برای دمای ۵۵ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد محاسبه و در جدول ۱ آورده شده است. با توجه مقادیر کوچکی خطا، مدل شبیه‌سازی مورد پذیرش بود. در نتیجه برای شبیه‌سازی پخش و توزیع رطوبت در داخل دانه پسته که به‌طور آزمایشگاهی نمی‌توان به‌دست آورد از روش اجزاء محدود استفاده شد (جیا و سان، ۲۰۰۰؛ رفیعی، ۱۳۸۱).

با توجه به شبیه‌سازی توزیع رطوبت در طی خشک شدن دانه، خطوط هم رطوبت در داخل دانه در دقایق دهم، صدم، دویستم و سیصدم برای دمای ۵۵ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. به منظور نمایش تفاوت نحوه تغییرات رطوبت در داخل دانه پسته با دو مای خشک کردن ۵۵ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد خطوط هم رطوبت در دقیقه ۵۰ ام در شکل ۷ نشان داده شده است.

توزیع رطوبت از مرکز دانه تا سطح دانه در جهت محور Z (جهت محور در شکل ۲ نشان داده شده است) بوسیله روش اجزاء محدود در دقایق پنجم، پنجاهم، صدم، دویستم و چهار صدم برای دمای خشک‌کن ۵۵ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد شبیه‌سازی شده و در شکل ۴ نشان داده شده است.

که dm جرم هر المان بود. به‌منظور بررسی صحت داده‌های مدل شبیه‌سازی خشک شدن پسته به روش اجزاء محدود از دو معیار برای مقایسه داده‌های مدل کرووی و بیضوی با داده‌های آزمایشگاهی استفاده شد که عبارت از متوسط ریشه مربعات خطا (RMSE)^۱ و مدول متوسط انحراف نسبی (P)^۲ بود (پالیپان و دریسکول، ۱۹۹۴؛ مادامبا و همکاران، ۱۹۹۶). متوسط ریشه مربعات خطا بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های مدل شبیه‌سازی انتقال جرم براساس شکل کرووی و بیضوی دانه بوسیله روش اجزاء محدود از معادله زیر به‌دست آمد (آبدالا و سینگ، ۱۹۸۴):

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{W}_{pre,i} - W_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

که $\bar{W}_{pre,i}$: رطوبت متوسط پیش‌بینی شده پسته در نوبت نمونه‌برداری $\bar{W}_{exp,i}$ ، $\bar{W}_{exp,i}$: رطوبت متوسط آزمایشگاهی پسته در نوبت نمونه‌برداری $\bar{W}_{exp,i}$ و N: تعداد نمونه‌برداری برای اندازه‌گیری رطوبت توده بستر نازک در طی خشک شدن، است. برای محاسبه مدول متوسط انحراف نسبی بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های مدل‌ها از معادله زیر استفاده شد (اکپینار و همکاران، ۲۰۰۳):

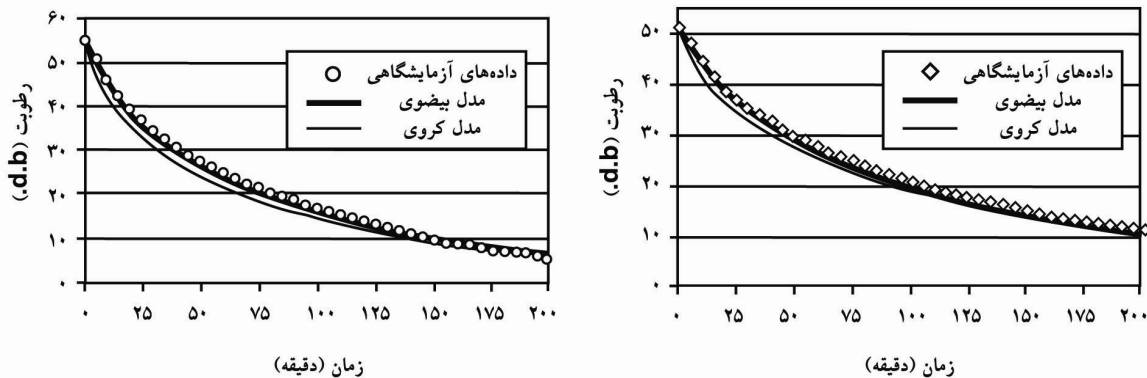
$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\bar{W}_{pre,i} - W_{exp,i}|}{W_{exp,i}} \quad (7)$$

نتایج و بحث

نتایج: به‌منظور بررسی صحت داده‌های حاصل از شبیه‌سازی، توده بستر نازک دانه پسته با رطوبت نسبی ۲۰ درصد و سرعت جریان هوا ۱/۵m/s خشک شد. در طی خشک شدن در فواصل زمانی یک دقیقه وزن توده اندازه‌گیری شده و بر اساس وزن اولیه و خشک، رطوبت توده بر پایه خشک در طی فرآیند خشک شدن به‌دست آمد. مدل استخراج شده براساس روش اجزاء محدود با

1- Root Mean Square Error

2- The Mean Relative Deviation Modulus



شکل ۳- تغییرات رطوبت متوسط دانه در طی خشک شدن با:

الف- رطوبت اولیه ۵۱/۳۷ درصد، دمای ۵۵ درجه سانتی گراد

ب- رطوبت اولیه ۵۴/۶۲ درصد، دمای ۷۰ درجه سانتی گراد

جدول ۱- متوسط ریشه مربعات خطا و مدول متوسط انحراف نسبی بین مدل کروی و بیضوی با داده‌های آزمایشگاهی.

مدل	دما (درجه سانتی گراد)	متوسط ریشه مربعات خطا	مدول متوسط انحراف نسبی
کروی	۵۵	٪۲/۰۶	۰/۰۸۰
	۷۰	٪۲/۵۱	۰/۰۸۴
بیضوی	۵۵	٪۱/۱۴	۰/۰۵۰
	۷۰	٪۱/۰۹	۰/۰۶۲

بحث

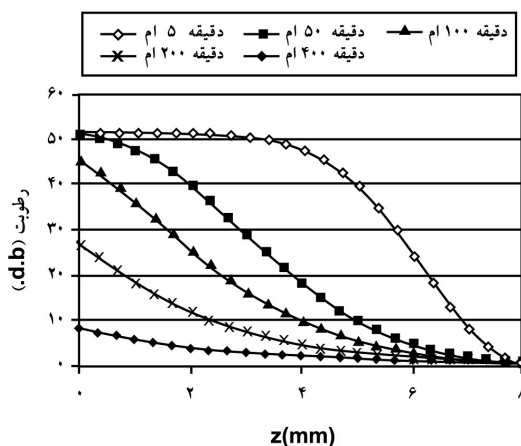
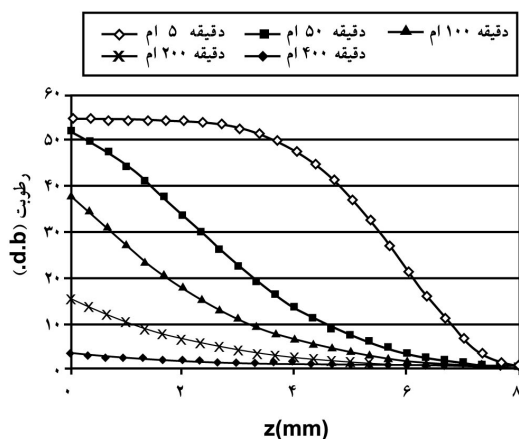
کروی و بیضوی با داده‌های آزمایشگاهی را می‌توان به ضریب کروی دانه پسته (۸۱ درصد) که نسبت به بعضی از محصولات کشاورزی مانند برنج، جو، گندم و ذرت بیشتر است، دانست. حقیقی و همکاران (۱۹۹۰) به این نتیجه رسیدند که با شبیه‌سازی دانه به صورت بیضوی نسبت به کروی، دقت مدل دانه جو به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد که این نتیجه را می‌توان به علت درصد کروی کم (۳۳ درصد) دانه جو دانست.

میزان ضریب پخش رطوبت در داخل دانه مقدار بسیار کوچکی (حدود $10^{-10} m^2/s$) می‌باشد، در نتیجه حرکت رطوبت در داخل دانه پسته بسیار کند صورت می‌گیرد در نتیجه کاهش رطوبت در اثر خشک کردن دانه پسته از سطح به مرکز دانه در جهت محور Z به آرامی انجام می‌شود که این روند در شکل (۴-الف) برای دمای ۵۵ درجه سانتی گراد نشان داده شده است (رفیعی، ۱۳۸۱). مطابق منحنی، دقیقه پنجم خشک کردن فقط رطوبت چهار میلی‌متر از لایه سطحی دانه کاهش رطوبت نشان

با توجه به شکل ۳ روند تغییرات رطوبت حاصل از مدل‌ها (با فرض شکل کروی و بیضوی دانه پسته) نزدیک به داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. متوسط ریشه مربعات خطا بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های شبیه‌سازی رطوبت دانه پسته به شکل کروی و بیضوی برای دمای ۵۵ درجه سانتی گراد به ترتیب ۲/۰۶ درصد و ۱/۱۴ درصد و برای ۷۰ درجه سانتی گراد به ترتیب ۲/۵۱ درصد و ۱/۰۹ درصد بود و مدول متوسط انحراف نسبی بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های شبیه‌سازی رطوبت دانه پسته به شکل کروی و بیضوی برای دمای ۵۵ درجه سانتی گراد به ترتیب ۸/۰ درصد و ۵/۰ درصد و برای ۷۰ درجه سانتی گراد به ترتیب ۸/۴ درصد و ۶/۲ درصد بود که بیان کننده قابل استناد بودن داده‌های حاصل از شبیه‌سازی می‌باشد (جیا و سان، ۲۰۰۰؛ رفیعی، ۱۳۸۱)، بنابراین از مدل شبیه‌سازی برای پیش‌بینی تغییرات رطوبت در داخل دانه می‌توان استفاده نمود. علت تفاوت کم بین مدل‌های

می‌دهد و لایه‌های داخلی‌تر به سمت مرکز دانه کاهش رطوبت مشاهده نمی‌شود. کاهش رطوبت در دقیقه ۵۰ام تا مرکز دانه تأثیر گذاشته اما اختلاف رطوبت در سطح دانه کمتر از دقایق اولیه است و در دقایق ۲۰۰ام رطوبت داخل دانه از ۵۱/۳۷ درصد به ۲۶/۶۳ درصد کاهش یافته است و در دقایق ۴۰۰ام تقریباً رطوبت داخل دانه یکنواخت

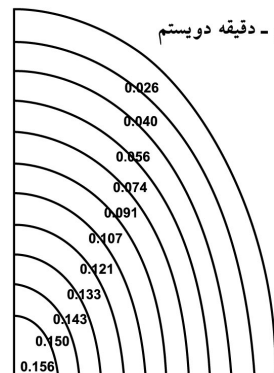
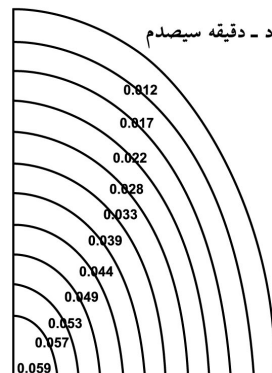
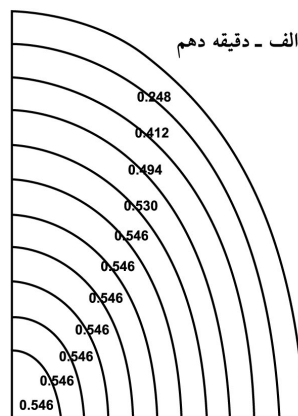
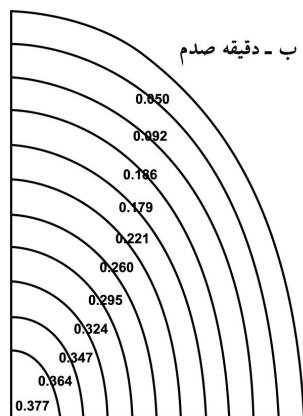
می‌گردد. در شکل (۴-ب) به علت افزایش دمای خشک کن به ۷۰ درجه سانتی‌گراد، روند کاهش رطوبت از سطح به مرکز دانه افزایش یافته به طوری که در دقیقه پنجم خشک شدن، پنج میلی‌متر از سطح دانه تحت تأثیر کاهش رطوبت قرار گرفته است.



شکل ۴- تغییرات رطوبت از مرکز به سطح دانه پسته حاصل از روش اجزاء محدود با

ب- رطوبت اولیه ۵۴/۶۲ درصد، دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد

الف- رطوبت اولیه ۵۱/۳۷ درصد، دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد



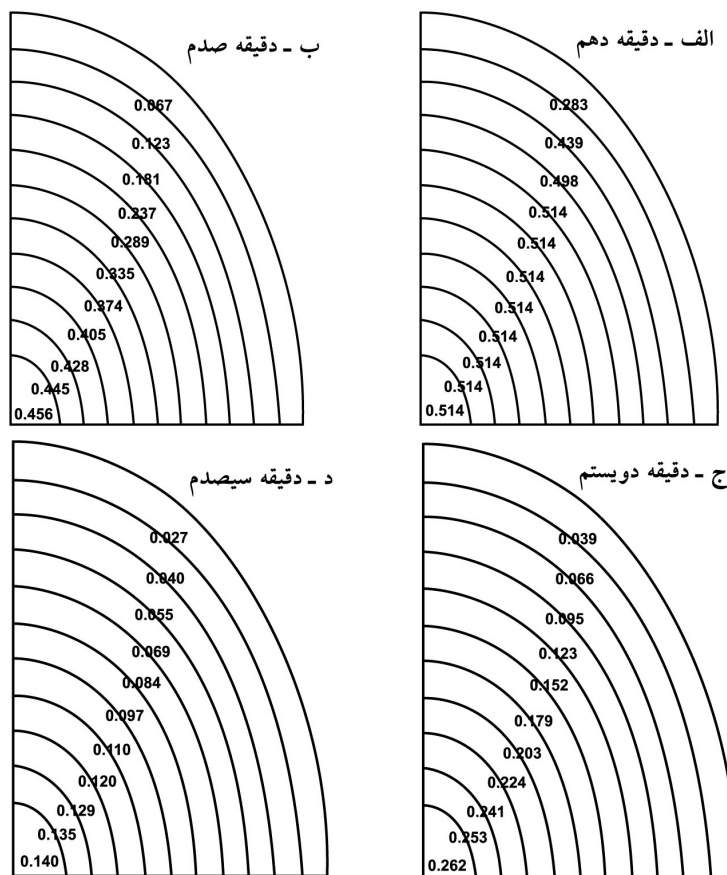
شکل ۵- شبیه‌سازی خطوط هم رطوبت در داخل دانه پسته با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در زمان‌های

الف- ۱۰ ام، ب- ۱۱۰۰ ام، ج- ۲۰۰ ام و د- ۳۰۰ ام

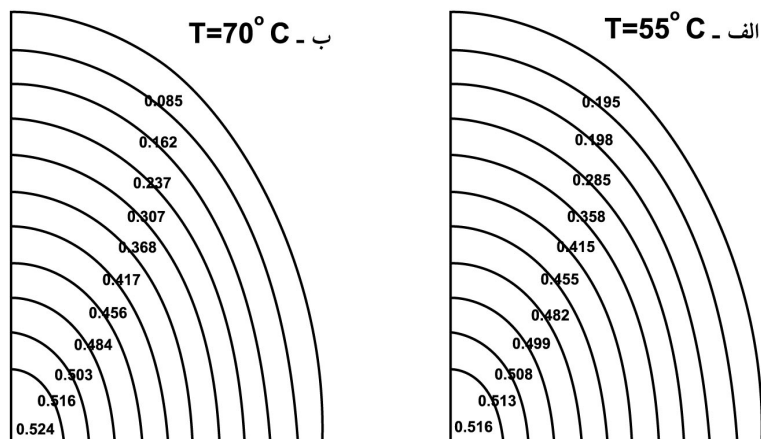
نشان داده شده است. مطابق شکل تفاوت رطوبت بین لایه سطحی و مرکز دانه برای دقایق ۱۰ام، ۱۰۰ام، ۲۰۰ام و ۳۰۰ام به ترتیب (d.b.) ۲۳/۱، ۳۸/۹، ۲۲/۳ و ۱۱/۳ درصد بود که نشان‌دهنده روند صعودی از دقیقه ۱۰ام تا ۱۰۰ام و روند نزولی از ۲۰۰ام و ۳۰۰ام می‌باشد. رطوبت بیشتر در لایه‌های داخلی دانه پسته‌ای که در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد (شکل ۷-ب) خشک شده‌اند نسبت به دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد (شکل ۷-الف) به علت رطوبت اولیه بیشتر نمونه مربوطه می‌باشد به طوری که رطوبت اولیه برای دمای خشک کن ۷۰ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۵۴/۶۲ و ۵۱/۳۷ درصد (بر پایه خشک) بود. وو و همکاران (۲۰۰۴)، توزیع رطوبت در داخل دانه شلتوک برنج و جیا و سان (۲۰۰۰) توزیع رطوبت در داخل دانه گندم در طی خشک شدن را شبیه‌سازی کردند.

به منظور محاسبه تنش‌های رطوبتی وارد بر دانه در طی خشک شدن لازم است از توزیع رطوبت در طی خشک شدن آگاه بود (حقیقی و همکاران، ۱۹۹۰؛ جیا و سان، ۲۰۰۰). نحوه توزیع رطوبت در داخل دانه در دقایق مختلف خشک شدن در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق شکل تفاوت رطوبت بین لایه سطحی و مرکز دانه برای دقایق ۱۰ام، ۱۰۰ام، ۲۰۰ام و ۳۰۰ام به ترتیب (d.b.) ۲۹/۸، ۳۲/۷، ۱۳/۰ و ۴/۷ درصد بود. به عبارتی، در دقیقه ۱۰۰ام نسبت به دقایق دیگر مقدار اختلاف رطوبت بین سطح و مرکز دانه بیشتر بوده که نشان‌دهنده مقدار بیشتر گرادیان دانه و در نهایت تنش بیشتر وارد بر دانه می‌باشد و در دقیقه ۱۴۰۰ام این مقدار کاهش زیادی نشان می‌دهد.

نحوه توزیع رطوبت در داخل دانه در دقایق مختلف خشک شدن در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد در شکل ۶



شکل ۶- شبیه‌سازی منحنی هم رطوبت در داخل دانه پسته با دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد در زمان‌های الف- ۱۰ام، ب- ۱۰۰ام، ج- ۲۰۰ام و د- ۳۰۰ام



شکل ۷- شبیه‌سازی منحنی هم رطوبت در داخل دانه پسته در دقیقه ۵۰ام خشک شدن با دمای الف- ۵۵ درجه سانتی‌گراد و ب- ۷۰ درجه سانتی‌گراد

قابل توجه‌ای وجود ندارد.

ج - با گذشت زمان از شروع خشک شدن اختلاف رطوبت بین سطح و مرکز افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

الف- داده‌های حاصل از شبیه‌سازی خشک کردن به روش اجزاء محدود قابل استناد است.

ب- بین مدل براساس شکل کرووی و بیضوی دانه اختلاف

منابع

۱. رفیعی، ش. ۱۳۸۱. شبیه‌سازی خشک شدن دانه شلتوک برنج به استفاده از روش اجزاء محدود. رساله دکتری. دانشگاه تربیت مدرس. ۹۳-۱۰۳.
۲. رفیعی، ش.، توکلی هشتجین، ت. و کاظم‌زاده حنائی، س. ۱۳۸۱. شبیه‌سازی دمای دانه شلتوک برنج رقم بینام در فرآیند خشک شدن به وسیله روش اجزاء محدود. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۱۰ (بهار): ۱-۱۸.
۳. رفیعی، ش.، توکلی هشتجین، ت. و کاظم‌زاده حنائی. ۱۳۸۳. شبیه‌سازی رطوبت دانه شلتوک (رقم بینام) در طی خشک کردن به روش اجزاء محدود. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۴۵-۵۳.
۴. مجذوبی، غ. و فریبا، ف. ۱۳۷۶. روش اجزاء محدود در مهندسی. دانشگاه بوعلی سینا، ۳.
5. Abdalla, H., and Singh, R.P. 1984. Simulation of thawing of foods using finite element method. Journal Food Process Engineering. 4: 273-287.
6. Akpinar, E.K., Bicer, Y., and Yildiz, C. 2003. Thin layer drying of red pepper. Journal of Food Engineering. 59: 99-104.
7. Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W., and Hall, C.W. 1992. Drying and Storage of Grains and Oilseeds. New York, N.Y.: Avi Books, Van Nostrand Reinhold.
8. Cnossen, A.G., Jimenez, M.J., and Siebenmorgen, T.J. 2003. Rice fissuring response to high drying and tempering temperatures. Journal of Food Engineering 59:61-69.
9. Comini, G., and Lewis, R.W. 1976. A numerical solution of two-dimensional problems involving heat and mass transfer. International Journal Heat Mass Transfer, 19: 1387-1392.
10. Fu, Z., and 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.
11. Gaudu, R., and Bacon, G. 1979. Numerical simulation of heat and mass transfer in unsaturated porous media. In ptoc. 1st International Conferens On Numerical Method in Thermal Problems, Swansea, Wales, pp. 1122-1130.
12. Giner, S.A., and Mascheroni, R.H. 2001. Diffusive drying kinetics in wheat, part 1: potential for a simplified analytical solution. Journal of Agricultural Engineering Research (doi: 10.1006/jaer

2001.0753)

13. Hahgihgi, K., Irudayaraj, J., Stochine, R.L., and Sokansanj, S. 1990. Grain kernel drying simulation using the finite element method. *Transactions of the ASAE*, 33: 1957-1965.
14. Hays, D.F., and Curd, H.N. 1968. Heat conduction in solids: Temperature dependent thermal conductivity. *International Journal Heat and Mass Transfer*. 11: 285-295.
15. Jia, C.C., and Sun, D.W. 2000. Mathematical simulation of temperature and moisture fields within a grain kernel during drying. *Drying Technology*. 18(6):1305-1325,
16. Kashaninejad, M., Tabil, L.G., Murtazavi, A., and Safekordi, A. 2003. Effect of drying methods on quality of pistachio nuts. *Drying Technology*. 21(5), 821-838.
17. Lewis, R.W., and 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.
18. Madamba, P.S., Driscoll, R.H., and Buckle, K.A. 1996. The Thin layer drying characteristic of apple slices. *Journal of Food Engineering*, 29, 75-97.
19. Montross, M.D., and Maie, D.E. 2000. Simulated performance of conventional high-temperature drying, dryeration and combination drying of shelled corn with automatic conditioning. *Transactions of the ASAE* 43(3): 691-699.
20. Palipane, K.B., and Driscoll, R.S. 1994. The thin layer drying characteristics of macadamia in-shell nuts and kernels. *Journal of Food Engineering*, 23, 129-144.
21. Pathak, P.K., Agrawal, Y.C., and Singh, B.P.N. 1991. Thin layer drying model for rapeseed. *Transactions of ASAE* 34(6), 2505-2508.
22. Srinivas, T., Bhashyam, M.K., Mahadevappa, M., and Desikachar, H.S.R. 1977. Varietal differences in crack formation due to weathering and wetting stress in rice. *Indian Journal of Agricultural Science*, 47: 27-31.
23. Wu, B., Yang, W., and Jia, C. 2004. A Three-dimensional Numerical simulation of Transient Heat and Mass Transfer inside a Single Rice Kernel during the Drying Process. *Biosystems Engineering*. 87 (2), 191-200.

Simulation of moisture diffusion within nut pistachio (Ohadi) during drying with high temperature

S. Rafee¹, M. Kashaninejad²

¹Former Faculty member of Dept. of ²Agricultural machinery and Assistant Professor, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran.

Abstract

Pistachio nut is an edible seed produced by the pistachio tree. Drying is an important operation in pistachio processing. The moisture content of pistachio nuts decreases from 58.5-67 % (d.b.) to 5-6 % during drying process. The high quality of pistachio nuts depends on fast and efficient handling and drying operation. Drying conditions (drying air temperature, air velocity, relative humidity and initial moisture content) of pistachio nut affect on quality, chemical and microbial attributes of dried nuts. Hence, the drying process must be controlled. This requires an accurate description of the drying mechanism. In this study the finite element formulation and solution of diffusive moisture transfer equations to improve grain drying with high temperature simulation of ax symmetric bodies is presented. Model was solved for ellipsoid and spherical shape of nut. For experiment, thin layer Pistachio nut, 'ohadi', was dried with two drying air temperature (55 and 70°C) and during drying air velocity and relative humidity were 1.5 m/s and 20% , respectively. During drying, moisture was measured every minute. The root mean square error and the mean relative deviation modulus between data of two models and experimental data were calculated. Good agreement has been observed when the output of two models was compared to experimental data. This result shows that a simulation model is near experimental data then model of ellipsoid shape of nut was used for moisture simulation of pistachio nut drying. Distribution of moisture and Line of equal moisture inside the nut pistachio were obtained. Distribution of moisture in pistachio nut used for gradient calculation and stress moisture analysis of nut.

Keywords: Pistachio nut; Drying simulation; Finite element method; Moisture diffusivity