

# شبیه سازی رطوبت در طی خشک شدن دانه پسته (رقم اوحدی) با درجه حرارت بالا بوسیله روش اجزاء محدود

شاهین رفیعی<sup>۱\*</sup> مهدی کاشانی نژاد<sup>۲</sup>

۱- استادیار گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲- استادیار گروه علوم و صنایع غذایی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

## چکیده

خشک کردن یکی از مهمترین مراحل فرآوری پسته است و بهینه سازی آن باعث بهبود کیفیت محصول نهایی می شود. تغییر پارامترهای خشک کردن مانند درجه حرارت، سرعت جریان، رطوبت نسبی هوا و رطوبت اولیه پسته تاثیر قابل ملاحظه ای بر خصوصیات کیفی، شیمیایی و میکروبی پسته خشک دارد در نتیجه کنترل روند بهینه سازی خشک کردن امری ضروری می باشد. این مسئله نیاز به شرح دقیق مکانیزم خشک کردن دارد، در این مقاله معادله انتقال جرم با فرض متقارن بودن دانه پسته، دستگاه معادله سیستم انتقال جرم فرمول بندی شده و به روش اجزاء محدود با ضرایب پخش جرم متفاوت حل شده اند. برای تأیید صحت مدل های استخراج شده، بوسیله خشک کن آزمایشگاهی، توده بستر نازک پسته (رقم اوحدی) با رطوبت اولیه ۰/۲۶ (بر پایه خشک) و با دمای هوای خشک کننده ۵۵ و ۷۰°C و رطوبت نسبی ۲۰٪ و سرعت جریان هوا ۱/۵ m/s خشک شد. در طول مدت خشک کردن بستر نازک، وزن توده پسته با فواصل زمانی یک دقیقه اندازه گیری شده و با این داده ها رطوبت پسته محاسبه گردید. مدل ها نیز با توجه به ورودی های حاصل از شرایط آزمایشگاهی با گام یک دقیقه حل شد. ضریب پخش جرم اصلاح شده در طی خشک شدن پسته با دمای هوای خشک کننده ۵۵ و ۷۰°C به ترتیب  $10^{-10} \times 7/5 \text{ m}^2/\text{s}$  و  $10^{-10} \times 5/0$  محاسبه شد که متوسط انحراف نسبی داده های شبیه سازی شده نسبت به داده های آزمایشگاهی برای دمای هوای خشک کننده ۵۵ و ۷۰°C با ضرایب پخش جرم اصلاح شده به ترتیب ۱/۸۷٪ و ۵/۳٪ محاسبه شد که قابل قبول بود. در نتیجه از مدل شبیه سازی شده می توان برای پیش بینی تغییرات رطوبت و گرادین رطوبتی در داخل دانه پسته در طی خشک کردن استفاده نمود.

**واژه های کلیدی:** دانه پسته، شبیه سازی خشک کردن، روش اجزاء محدود، ضریب پخش رطوبت

## ۱- مقدمه

پسته یکی از محصولات عمده صادراتی ایران است و کشور ما اولین تولید کننده و صادر کننده آن در جهان

است. ارزش غذایی بالا و خندان بودن پسته باعث گسترش مصرف آن به صورت خام و برشته در نقاط مختلف جهان شده است. افزایش کیفیت بهداشتی و پایین

\* مسئول مکاتبات مقاله: E-mail: [shahinrafiee@yahoo.com](mailto:shahinrafiee@yahoo.com)

لیبیدها را افزایش می‌دهد [۷]. از این رو بدست آوردن شرایط بهینه خشک کردن پسته برای جلوگیری از افت کیفیت محصول نهایی ضروری است. برای نیل به این هدف باید خشک کردن را مدل سازی نمود. دو هدف برای مدل سازی خشک کردن مد نظر است که اولین هدف برازش پارامترهای موثر بر خشک کردن (مانند ضریب پخش جرم در در داخل دانه و یا در لایه نازک محصول، گرمای ویژه و ...) بر اساس داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. دومین هدف از مدل سینتیک، پیش‌بینی منحنی خشک شدن است که مورد اخیر بیشتر برای استخراج مدل خشک کردن بستر عمیق یا برنامه شبیه سازی خشک‌کن استفاده می‌گردد [۶]. برای هدف‌اول، روشهای دقیق عددی اطلاعات بهتری می‌دهد و برای دومین هدف نیاز به مدل‌های تحلیلی، یا مدلهایی که به کمک نرم‌افزارهای کامپیوتری خیلی سریع حل می‌شوند می‌باشد. در بعضی از حالتها، مدل‌های پخش رطوبت بر اساس اطلاعات اصلاح شده از حرکت آب در داخل دانه استخراج می‌گردد [۲۲]. یکی از روشهای حل عددی انتقال جرم و حرارت، روش اجزاء محدود می‌باشد. در سال ۱۹۹۰ روی خشک شدن دانه جو و سویا بوسیله حل همزمان مدل انتقال حرارت و جرم و توجه به تغییر خصوصیت ماده در طی خشک کردن مطالعه شد [۱۱]. در سال ۲۰۰۲ مدل سینتیک خشک شدن توده بستر نازک گندم را بوسیله روش اجزاء محدود با فرض دوشکل کروی و بیضوی دانه گندم استخراج شد و نتیجه گرفته شد که با توجه به داده‌های آزمایشگاهی مدل بیضوی دانه گندم فرآیند خشک شدن را بهتر شبیه‌سازی می‌کند [۶].

رفیعی و همکاران در سال ۱۳۸۱ انتقال حرارت را در داخل دانه شلتوک برنج با استفاده از روش اجزاء محدود شبیه‌سازی کردند. دانه شلتوک برنج به صورت بیضوی مدل شده و معادلات انتقال جرم و حرارت به صورت همزمان بصورت مدل خطی و غیر خطی حل گردید. دمای

بودن میزان آفلاتوکسین و خصوصیات ظاهری پسته (خندان بودن و رنگ پوست استخوانی) و بسته‌بندی مناسب از فاکتورهای مهم در این زمینه محسوب می‌شود [۱۶]. پسته ایران به دلیل شرایط مناسب اقلیمی مرغوبیت بالایی دارد و تسریع در فرآوری بعد از برداشت به ویژه مراحل پوست‌گیری و خشک کردن اهمیت زیادی در کیفیت آن دارد. بهینه سازی 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. در این مرحله رطوبت پسته از ۶۷- ۵۹ درصد بر پایه خشک به ۶-۵ درصد بر پایه خشک کاهش یافته و قابلیت انبارداری آن افزایش می‌یابد. چنانچه این مرحله بخوبی انجام نشود و عوامل موثر در خشک کردن (درجه حرارت، سرعت جریان و رطوبت نسبی هوا) بطور صحیح کنترل نمی‌شود، علاوه بر کاهش کیفیت محصول نهایی، شرایط برای فعالیت کپک‌های تولید کننده آفلاتوکسین مهیا شده و میزان آلودگی آن افزایش می‌یابد.

کاشانی‌نژاد و همکاران اعلام داشتند که درجه حرارت هوا مهمترین عامل در کنترل خصوصیات کیفی پسته در حین خشک کردن است. تاثیر درجه حرارت و سرعت جریان هوا بر تعدادی از خصوصیات کیفی معنی دار بود در حالیکه اثر رطوبت نسبی هوا (در محدوده آزمایش شده) معنی دار نبود. فرآیند خشک کردن تاثیر قابل توجهی بر میزان خندان بودن پسته‌ها داشت و با افزایش درجه حرارت مقدار خندان بودن افزایش یافت [۱۴].

فرآیند خشک کردن تاثیر قابل توجهی بر کیفیت محصول خشک شده و قیمت آن دارد. محصولاتی که در درجه حرارت پایین‌تر خشک می‌شوند، خاصیت انبارمانی بهتری دارند اگر چه زمان خشک کردن آنها طولانی‌تر است. فعالیت آبی پائین‌تر اگر چه رشد میکروارگانیسم‌ها را متوقف کرده و یا به تأخیر می‌اندازد اما شدت اکسیداسیون

کردن دانه بر اساس روش اجزاء محدود در درجه حرارت‌های مختلف استفاده شد و میزان برازش داده‌های حاصل از حل عددی مسئله با داده‌های آزمایشگاهی بدست آمد.

## ۲- مواد و روشها

این تحقیق در دو بخش عمده کار آزمایشگاهی و تحلیل تئوری مسئله و برنامه نویسی به شرح زیر انجام گردید.

### ۲-۱- کار آزمایشگاهی

در این تحقیق از پسته رقم اوحدی استفاده گردید. قبل از انجام آزمایش، مقدار رطوبت پسته‌ها در محدوده ۵۸/۷-۵۶/۳ درصد (بر پایه خشک) 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  $5^{\circ}\text{C}$  قرار گرفتند تا به رطوبت تعادلی برسند. در طول دوره نگهداری در فواصل زمانی معین همزدن و تکان دادن نمونه‌ها ادامه یافت [۱۸ و ۱۹].

### ۲-۲- دستگاه خشک‌کن

شکل ۱ نمودار شماتیک خشک‌کن مورد استفاده برای خشک کردن نمونه‌های پسته را نشان می‌دهد. این خشک‌کن شامل بخش‌های مرطوب کننده هوا، دمنده سانتریفوژی، محفظه خشک‌کن و سینی‌های خشک‌کن بود. که توسط محققین دانشگاه ساسکاچوان ساخته شده بود. این دستگاه قادر بود هوایی با درجه حرارت  $17^{\circ}\text{C}$  تا  $200^{\circ}\text{C}$  و درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵ تا ۹۸ درصد تولید کند و حاوی میکروپروسسورهای با دقت دمای  $0.25^{\circ}\text{C} \pm$  و رطوبت نسبی  $2\% \pm$  درصد برای کنترل شرایط هوای خروجی بود.

بدست آمده در طی خشک کردن حاصل از مدل خطی و غیر خطی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید و بین داده‌های مدل غیر خطی و داده‌های آزمایشگاهی تفاوت معنی‌داری دیده نشد [۲ و ۳]. توکلی و همکاران در سال ۱۳۸۲ 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 [۱].

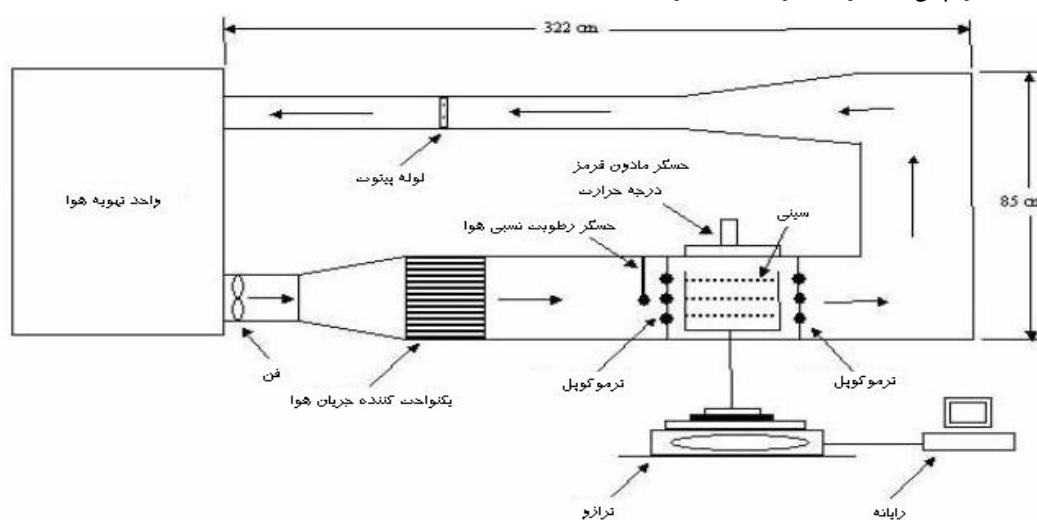
برای پسته که شکل غیر منظمی دارند، مدل‌سازی کار مشکلی است زیرا باید به شرایط آزمایشگاهی تعمیم داده شود و برای حل عددی باید فرضیاتی را برای ساده‌سازی مسئله در نظر گرفت از قبیل شکل دانه منظم (مانند کره یا بیضی) است، حجم دانه در طی خشک شدن ثابت است [۱۲]، حل مدل‌های تحلیلی برای پیش بینی منحنی خشک کردن با استفاده از حل تحلیلی سریهای متناهی انجام می‌گیرد [۲۰] و در طی خشک کردن پخش جرم در زمانهای کوتاه، در داخل دانه به صورت یکنواخت و آرام صورت می‌گیرد [۹ و ۱۰]. دمای زیاد هوای خشک‌کن نرخ خشک شدن محصول و پتانسیل شکستگی دانه را افزایش می‌دهد. مدل‌های سنتیک پخش رطوبت برای تفسیر پدیده خشک شدن مواد یا خشک کردن توده بستر نازک محصولات کشاورزی بکار می‌رود [۱۷]. 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. باوجود اینکه یک دانه در توده دانه تحت تأثیر تماس با دانه‌های اطراف خود می‌باشد ولی شبیه‌سازی دانه‌می‌تواند شاخصی از خشک شدن توده باشد.

در این مقاله شبیه‌سازی پخش رطوبت در دانه پسته بررسی شد. در پایان این تحقیق مدل پخش رطوبت وابسته به دمای خشک‌کن و مستقل از تمرکز موضعی رطوبت در طی خشک کردن پیشنهاد شد. مدل انتقال جرم برای پیش بینی خشک شدن دانه بوسیله برنامه تخصصی خشک

بر سینی‌ها دمیده می‌شد. سینی‌ها توسط یک میله فلزی بر روی ترازوی دیجیتالی قرار گرفته و تغییرات وزن نمونه در حین خشک‌کردن ثبت می‌گردید. کلیه سنسورها به کامپیوتر متصل شده و اطلاعات آنها توسط نرم‌افزار LABVIEW 6.0 (National Instruments, Austin, TX) در کامپیوتر ثبت می‌گردید [۱۵].

پس از مرطوب شدن هوا در محفظه مرطوب کننده و رسیدن به شرایط مورد نظر، هوای مرطوب شده توسط دمنده سانتریفوژی به داخل محفظه خشک کن دمیده می‌شد. سرعت دمنده سانتریفوژی با یک ترانزیستور الکترونیکی قابل کنترل بود و از اینرو سرعت جریان هوا در محدوده ۰-۵ m/s قابل تغییر بود.

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



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

محیط ( $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ) برسد. علاوه بر این قبل از شروع هر مرحله از خشک کردن، دستگاه خشک‌کن زودتر روشن شده و اجازه داده می‌شد تا به شرایط هوای مورد نظر برسد و برای پایداری سیستم به مدت ۲ ساعت در این حالت باقی ماند. سپس نمونه‌های پسته به صورت یک لایه بر روی سینی‌ها پخش شده و در داخل محفظه خشک‌کن قرار گرفت. فرآیند خشک‌کردن به محض رسیدن مقدار رطوبت نمونه‌ها به ۰.۵٪ (بر پایه خشک) قطع شد.

## ۳-۲- روش آزمایش

آزمایش در دو درجه حرارت ( $50^\circ\text{C}$  و  $70^\circ\text{C}$ )، سرعت جریان هوا ( $1/5\text{ m/s}$ ) و رطوبت نسبی ۲۰٪ انجام شد. برای کاهش میزان خطا در آزمایشات، هر آزمایش خشک‌کردن سه بار تکرار گردید. 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

ب-معادلات انتقال جرم گذرا (وابسته به زمان) است.

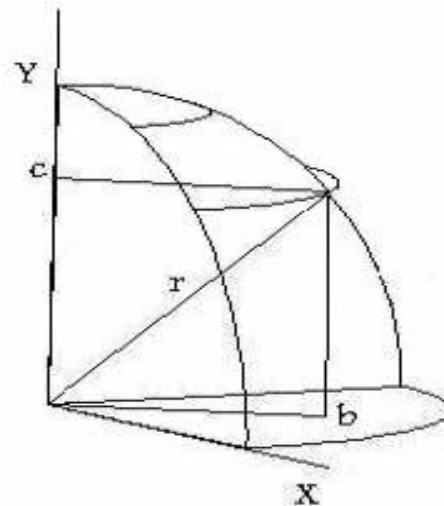
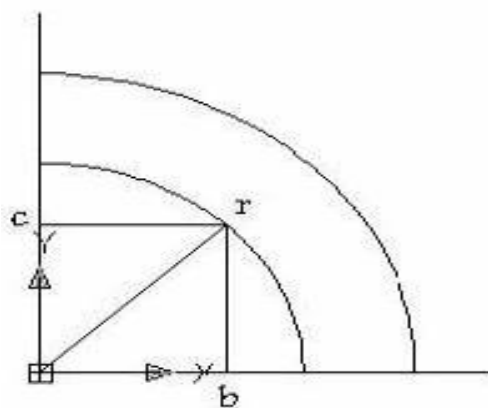
ج- معادله دو بعدی می باشد.

د- دانه پسته دارای تقارن محوری می باشد در نتیجه از جزء مثلث خطی اکسیسمتریک استفاده کرده و فقط یک چهارم دانه شبیه سازی می شود (شکل ۲).

## ۲-۴- تحلیل تئوری مسئله

مفروضات اولیه که برای حل مسئله در نظر گرفته شده عبارتند از:

الف- دانه پسته دارای مقطع کروی با قطر طولی ۲۳ می باشد و برای ساده سازی حل، مختصات نقاط براساس مدل بیضوی  $(x, y, \theta)$  بیان می گردد.



شکل (۲) الف- نمای مقطع طولی یک چهارم دانه پسته، ب- دانه پسته به صورت سه بعدی

تعادلی در زمان  $t$  (برپایه خشک، اعشاری) و  $es$ : ارزیابی روی سطح دانه است.

برای استخراج معادله سیستم از معادله حاکمه انتقال جرم، از روش گالرکین استفاده می شد. بدین منظور یک ربع دانه به اجزاء محدودی که هر جزء دارای  $n$  گره است، تقسیم می گردد.  $M^{(e)}(x, y, t)$  در جزء  $e$  بصورت زیر بیان می شود:

$$M^{(e)}(x, y, t) = \sum_{i=1}^{n+1} N_i(x, y, t) M_i^{(e)}(t) \quad (4)$$

که  $N_i$  را تابع شکل گویند. با توجه به معادله (۴)، ثابت فرض کردن  $D$  و با استفاده از فرمول انتگرال زنجیره ای و فرمول دیورژانس، معادله ۱ بسط داده شده و شکل انتگرالی معادلات اجزاء بدست آمد:

معادله حاکمه انتقال جرم:

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

$D$ : ضریب پخش رطوبت به صورت مایع ( $m^2/s$ )

شرط اولیه انتقال جرم:

$$M(x, y, t=0) = M_0 \quad (2)$$

شرط مرزی انتقال جرم:

$$(3)$$

$[n^t D \nabla M(x, y, t)]_{es} = -h_d \{ [M(x, y, t)]_{es} - M_e(t) \}$  که  $M(x, y, t)$ : رطوبت در گره ای به مختصات  $(x, y)$  در زمان  $t$ ، (بر پایه خشک، اعشاری)،  $n^t$ : ترانهاده ماتریس بردار عمود بر سطح دانه شلتوک،  $h_d$ : ضریب انتقال جابجایی رطوبت ( $m/s$ )،  $M_e(t)$ : رطوبت

کردن پارامتر آزادسازی معادله به صورت زیر خلاصه

(۵)

می‌گردد

$$\left(K + \frac{C_T}{\Delta t}\right) M^{n+1} = \frac{C}{\Delta t} M^n + F \quad (9)$$

معادله حاصل شکل جبری معادلات اجزاء محدود است و با مونتاژ اجزاء، معادله سیستم بدست می‌آید. ضریب مهم در حل مسئله ضریب پخش رطوبت است که براساس گزارش ارائه شده توسط کاشانی‌نژاد و همکاران برابر با  $7/5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  (D) اعلام گردید [۱۵].

برنامه شبیه‌سازی خشک کردن محصولات دانه‌ای به زبان فرترن ۹۹ نوشته شده است. در برنامه، با وارد کردن داده‌های ورودی، در فرآیند حل، اول مختصات گره‌ها مشخص شده و یک چهارم مقطع طولی دانه (شکل ۲) شبکه بندی شد. ماتریسهای سختی، بار و ظرفیت رطوبتی برای هر یک از اجزاء محاسبه و سپس با مونتاژ اجزاء، ماتریسهای سختی، بار و ظرفیت رطوبتی شبکه بدست آمد. با حل معادله (۹) رطوبت گره‌ها در زمان مورد نظر محاسبه گردید و سپس بوسیله معادله (۱۰) رطوبت متوسط دانه پسته بدست آمد.

$$\bar{M}(t) = \frac{\int_V M(r, z, t) dm}{\int_V dm} \quad (10) \text{ برای هر گام زمانی } (t)$$

که  $dm$  جرم هر المان بود. به منظور بررسی صحت داده‌های مدل شبیه‌سازی خشک شدن پسته به روش اجزاء محدود از دو معیار برای مقایسه داده‌های مدل با داده‌های آزمایشگاهی استفاده شد که عبارت از متوسط ریشه مربعات خطا (RMSE)<sup>۱</sup> و متوسط انحراف نسبی (MRD)<sup>۲</sup> بود. متوسط ریشه مربعات خطا بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های مدل شبیه‌سازی انتقال جرم بوسیله روش اجزاء محدود از معادله زیر بدست آمد [۵].

<sup>۱</sup> Root Mean Square Error

<sup>۲</sup> Mean of Relative Deviation

$$2\pi \sum_{j=1}^n \left[ D \iint_A \left( \frac{\partial N_i(x, y)}{\partial x} \frac{\partial N_j(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial N_i(x, y)}{\partial y} \frac{\partial N_j(x, y)}{\partial y} \right) \right]$$

$$dx dy + h_m \oint_L N_i(x, y) N_j(x, y) dL \Big] M_j(t)$$

$$- 2\pi \sum_{j=1}^n \iint_A \left[ N_j(x, y) N_j^T(x, y) \dot{M} \right]$$

$$dx dy = 2\pi h_m \oint_L N_i(x, y) M_\infty dL$$

که  $L$  لایه مرزی می باشد و حاصل شکل انتگرالی معادلات اجزاء است. پس از انتگرال‌گیری ضرایب  $\dot{M}, M_j$  و طرف دوم معادله بالا به ترتیب به نامهای ماتریس سختی، ظرفیت رطوبت و بار به صورت زیر تعریف می‌گردد:

(۶)

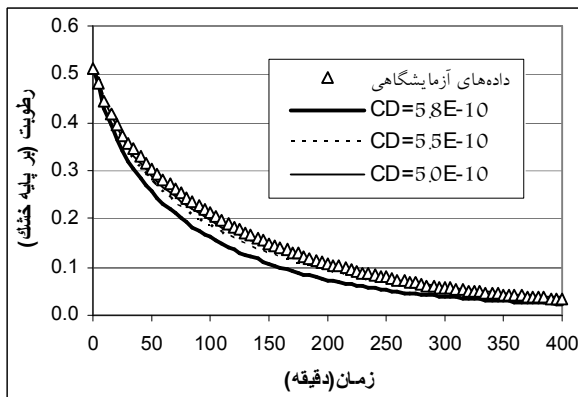
$$K = \frac{2\pi D A r_c}{4 A^2} \begin{bmatrix} b_1^2 + c_1^2 & b_1 b_2 + c_1 c_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 \\ b_2 b_1 + c_2 c_1 & b_2^2 + c_2^2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 \\ b_3 b_1 + c_3 c_1 & b_3 b_2 + c_3 c_2 & b_3^2 + c_3^2 \end{bmatrix} + \frac{2\pi h_m l_{12}}{6} \begin{bmatrix} (3r_1 + r_2) & (r_1 + r_2) & 0 \\ (r_1 + r_2) & (r_1 + 3r_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(۷)

$$C = \frac{\pi A}{30} \begin{bmatrix} 6r_1 + 2r_2 + 2r_3 & 2r_1 + 2r_2 + r_3 & 2r_1 + r_2 + 2r_3 \\ 2r_1 + 2r_2 + r_3 & 2r_1 + 6r_2 + 2r_3 & r_1 + 2r_2 + 2r_3 \\ 2r_1 + r_2 + 2r_3 & r_1 + 2r_2 + 2r_3 & 2r_1 + 2r_2 + 6r_3 \end{bmatrix}$$

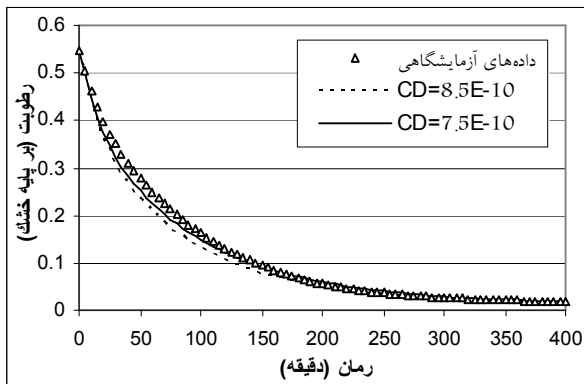
$$F = \frac{2\pi h_m M_\infty l_{12}}{3} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

پس از بازنویسی معادله سیستم انتقال جرم [۵] با در نظر گرفتن فرمول پیشرو در تفاضل محدود و یک فرض



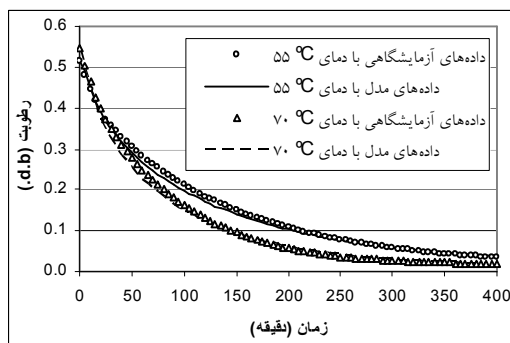
شکل ۳ - تغییر رطوبت در طی خشک شدن پسته با رطوبت اولیه

۵۳/۳۷٪ بر پایه خشک (دمای هوای خشک کن ۵۵ °C)



شکل ۴ - تغییرات رطوبت در طی خشک شدن پسته با رطوبت

اولیه ۵۴/۶۲٪ بر پایه خشک (دمای هوای خشک کن ۷۰ °C)



شکل ۵ - منحنی خشک شدن پسته (□) - داده‌های آزمایشگاهی

با رطوبت اولیه ۵۳/۳۷٪، دمای ۵۵ °C، (—) - داده‌های مدل با

رطوبت اولیه ۵۳/۳۷٪، دمای ۵۵ °C و ضریب پخش رطوبت

$5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ، (Δ) - داده‌های آزمایشگاهی با رطوبت اولیه

۵۴/۶۲٪، دمای ۷۰ °C، (=) - داده‌های مدل با رطوبت اولیه

۵۴/۶۲٪، دمای ۷۰ °C و ضریب پخش رطوبت

$7/5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{M}_{pre,i} - M_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

که  $\bar{M}_{pre,i}$ : رطوبت متوسط پیش‌بینی شده پسته در نوبت نمونه‌برداری  $i$ ام،  $M_{exp,i}$ : رطوبت متوسط آزمایشگاهی پسته در نوبت نمونه‌برداری  $i$ ام و  $N$ : تعداد نمونه‌برداری برای اندازه‌گیری رطوبت توده بستر نازک در طی خشک شدن، است.

برای محاسبه متوسط انحراف نسبی بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های مدل از معادله زیر استفاده شد (۴).

$$\delta = \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\bar{M}_{pre,i} - M_{exp,i}}{M_{exp,i}} \right)^2 / N \right]^{1/2} \quad (12)$$

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج

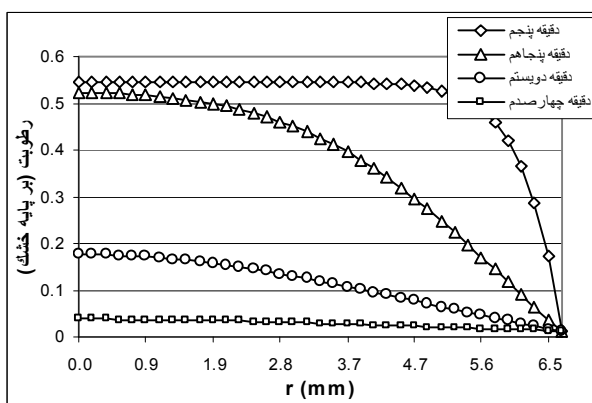
در طی خشک شدن در فواصل زمانی یک دقیقه وزن توده بستر نازک اندازه‌گیری شده و بر اساس وزن اولیه و خشک، رطوبت توده بر پایه خشک در طی فرآیند خشک شدن بدست آمد. مدل استخراج شده براساس روش اجزاء محدود بوسیله نرم‌افزار تخصصی خشک شدن که برای همین منظور نوشته شده بود یک چهارم دانه پسته را ۳۲۵ المان و ۵۷۶ گره شبکه‌بندی و با فرض شعاع متوسط  $0.00672 \text{ m}$  و ضریب پخش اولیه برای درجه حرارت‌های ۷۰ °C و ۵۵ °C به ترتیب  $9/29 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  و  $5/75 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  (کاشانی‌نژاد و همکاران، ۱۳۸۲) حل نمود. براساس داده‌های آزمایشگاهی ضریب پخش جرم در داخل دانه پسته اصلاح شده و در شکلهای ۳ و ۴ تغییرات رطوبت در طی خشک شدن به صورت آزمایشگاهی و مدل با ضریب پخشهای جرم اصلاح شده نشان داده شده است. نزدیکترین مدل با درجه حرارت‌های ۷۰ °C و ۵۵ °C با منحنی خشک شدن تجربی در شکل (۵) آورده شده است.

براساس معادله (۱۱) و (۱۲) محاسبه و در جدول (۱) آورده شده است. توزیع رطوبت از مرکز دانه تا سطح دانه در دقایق پنجم، پنجاهم، دویستم، سیصد و چهار صدم برای درجه حرارت‌های خشک‌کننده برای  $70^{\circ}\text{C}$  و  $55^{\circ}\text{C}$  به ترتیب در شکل ۶ و ۷ نشان داده شده است.

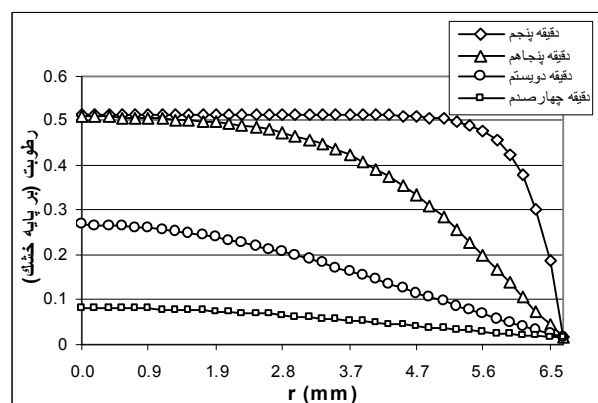
متوسط ریشه مربعات خطا (RMSE) و متوسط انحراف نسبی (MRD) بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های مدل شبیه‌سازی انتقال جرم بوسیله روش اجزاء محدود برای درجه حرارت هوای خشک‌کننده  $70^{\circ}\text{C}$  و  $55^{\circ}\text{C}$  با ضرایب متفاوت پخش رطوبت در داخل دانه پسته به ترتیب

جدول ۱- متوسط ریشه مربعات خطا و انحراف نسبی در درجه حرارت‌های و ضرایب پخش جرم مختلف

| درجه حرارت<br>هوای ( $^{\circ}\text{C}$ ) | ضریب پخش جرم<br>( $\text{m}^2/\text{s}$ ) | متوسط ریشه مربعات<br>خطا | متوسط انحراف نسبی |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------|-------------------|
| ۵۵                                        | $5/7 \times 10^{-10}$                     | ۰/۰۴۱۹                   | ٪۲۲/۸             |
|                                           | $5/5 \times 10^{-10}$                     | ۰/۰۲۲۲                   | ٪۱۱/۷             |
|                                           | $5/0 \times 10^{-10}$                     | ۰/۰۱۱۱                   | ٪۵/۳              |
| ۷۰                                        | $9/29 \times 10^{-10}$                    | ۰/۰۳۳۲                   | ٪۲۳/۷             |
|                                           | $8/5 \times 10^{-10}$                     | ۰/۰۲۴۵                   | ٪۱۴/۶             |
|                                           | $7/5 \times 10^{-10}$                     | ۰/۰۱۳۴                   | ٪۸/۴              |



کل ۷- تغییرات رطوبت از مرکز به سطح دانه با رطوبت اولیه ۵۴/۶۲٪، دمای  $70^{\circ}\text{C}$  و ضریب پخش رطوبت ( $7/5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ )



شکل ۶- تغییرات رطوبت از مرکز به سطح دانه با رطوبت اولیه ۵۳/۳۷٪، دمای  $55^{\circ}\text{C}$  و ضریب پخش رطوبت ( $5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ )

### ۳-۲- بحث

خشک‌کن  $55^{\circ}\text{C}$  با تغییر ضریب پخش جرم از  $5/7 \times 10^{-10}$  به  $5/0 \times 10^{-10}$  متوسط ریشه مربعات خطا داده‌های مدل نسبت به داده‌های آزمایشگاهی به ترتیب از

با توجه به شکل ۳ و ۴ با اصلاح ضریب پخش رطوبت در داخل پسته، می‌توان شبیه‌سازی خشک شدن پسته را به نتایج تجربی نزدیک نمود بطوری که در درجه حرارت



مطابق شکل ۷- بعثت افزایش دمای هوای خشک کن به  $70^{\circ}\text{C}$  روند کاهش رطوبت از سطح به مرکز دانه افزایش یافته بطوری که در دقیقه پنجم خشک شدن چهار میلیمتر از سطح دانه تحت تأثیر کاهش رطوبت قرار گرفته است و در دقیقه چهارصدم خشک کردن اختلاف رطوبت بین سطح و مرکز برای دمای هوای خشک کن  $55^{\circ}\text{C}$  و  $70^{\circ}\text{C}$  به ترتیب  $6/5\%$  و  $2/5\%$  (بر پایه خشک بر حسب درصد) بود.

#### ۴- نتیجه گیری

الف- با تغییر ضریب پخش رطوبت در داخل پسته با توجه به داده‌های آزمایشگاهی می‌توان شبیه‌سازی خشک شدن پسته را اصلاح نمود.

ب- مدل شبیه‌سازی خشک شدن دانه پسته قابل استناد می‌باشد و می‌توان برای مدلسازی شرایط مختلف خشک شدن استفاده شود.

ج- تغییرات رطوبت در داخل دانه را می‌توان با استفاده مدلسازی بدست آورد.

#### ۵- منابع

- [۱] توکلی هشتجین، ت. رفیعی، ش. و خوش تقاضا، م. ه. ۱۳۸۲. بررسی دمای دانه شلتوک برنج سپیدرود در طی فرآیند خشک کردن. مجله دانش کشاورزی. جلد ۱۳ شماره ۲. ص: ۱-۱۲.
- [۲] رفیعی، ش. ۱۳۸۱. شبیه‌سازی خشک شدن دانه شلتوک برنج به استفاده از روش اجزاء محدود. رساله دکتری. دانشگاه تربیت مدرس. ص. ۱۰۰-۱۰۳.

$0/0419$  به  $0/0111$ ، متوسط انحراف نسبی از  $22/8\%$  به  $5/3\%$  کاهش یافت و در درجه حرارت خشک کن  $70^{\circ}\text{C}$  با تغییر ضریب پخش جرم از  $10-9/29 \times 10$  و  $10-7/5 \times 10$  متوسط ریشه مربعات خطا داده‌های مدل نسبت به داده‌های آزمایشگاهی به ترتیب از  $0/0332$  به  $0/0134$  متوسط انحراف نسبی از  $23/7\%$  به  $8/4\%$  کاهش یافت (جدول ۱). با توجه به روند تغییرات رطوبت شبیه‌سازی شده به داده‌های آزمایشگاهی نزدیک بوده (شکل ۵) و میزان خطا داده‌های مدل نسبت به داده‌های آزمایشگاهی مدل شبیه‌سازی شده قابل قبول بود [۱۳ و ۱۴]. لذا از مدل شبیه‌سازی برای پیش‌بینی تغییرات رطوبت در داخل دانه می‌توان استفاده نمود.

در شکل ۶- روند کاهش رطوبت از سطح دانه به مرکز دانه پسته در دمای هوای خشک کن  $55^{\circ}\text{C}$  نشان داده شده است. مطابق منحنی دقیقه پنجم خشک کردن فقط رطوبت دو میلیمتر از سطح دانه تحت تأثیر کاهش رطوبت سطح دانه قرار گرفته و از مرکز تا لایه دو میلیمتری سطح دانه رطوبت کاهش نیافته است. در دقیقه پنجاهم خشک کردن انتقال رطوبت از لایه های داخلی تر آغاز می شود که منجر به کاهش رطوبت لایه های داخلی دانه می‌شود اما اختلاف گره های مجاور کمتر از دقایق اولیه است بطوریکه از مرکز تا شعاع دو میلیمتری از مرکز کاهش رطوبت کم و به سمت سطح دانه کاهش رطوبت افزایش می‌یابد. با گذشت زمان خشک کردن رطوبت از مرکز دانه به سمت سطح دانه پیش رفته بطوریکه در دقایق سیصدم و چهارصدم خشک کردن تغییر سطح دانه نسبت به مرکز دانه کاهش یافته است. بعثت آنکه ضریب پخش جرم در داخل دانه پسته که مقدارش نسبت به انتقال رطوبت از سطح دانه بر اثر انتقال جابجایی رطوبت بسیار کوچک است انتقال رطوبت از مرکز به سطح دانه کند صورت می‌گیرد.

- [12] Jayas, D.S., S. Cenkowski, S. Pabis & Muir, W.E. 1991. Review of thin layer drying and wetting equations. *Drying Technology*, 9(3): 551-588.
- [13] 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,
- [14] Kashaninejad, M. & Tabil, L.G. 2004. Drying characteristics of purslane. *Drying Technology*, 22(9), 2183-2200.
- [15] Kashaninejad, M., L.G. Tabil, A. Murtazavi & Safekordi, A. 2003. Effect of drying methods on quality of pistachio nuts. *Drying Technology*. 21(5), 821-838.
- [16] Maskan, M. and S. Karatas. 1998. Fatty acid oxidation of pistachio nuts stored under various atmospheric conditions and different temperatures. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 77, 334-340.
- [17] 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.
- [18] Palipane, K. B. and R. S. Driscoll. 1994. The thin layer drying characteristics of macadamia in-shell nuts and kernels. *Journal of Food Engineering*, 23, 129-144.
- [19] Pathak, P. K., Agrawal, Y. C. and B. P. N. Singh. 1991. Thin layer drying model for rapeseed. *Transactions of ASAE* 34(6), 2505-2508.
- [20] Sun, D.W. And Woods, J. L. 1994. Low temperature moisture transfer characteristics of barely: Thin layer models and equilibrium isotherms. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 59(4):273-283.
- [21] Yang W, C. Jia, T.J. Siebenmorgen, T.A. Howell & Cnossen A.G. 2002. Intra-kernel moisture responses of rice to drying and tempering treatments by finite element simulation. *Transaction of the ASAE*. 45(4): 1037-1044.
- [22] Zogzas, N.P., Z.B. Maroulis & Marinou-Kouris d. 1996. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology*, 14(10): 2225-2254.
- [۳] رفیعی، ش.، توکلی هشتجین، ت. و کاظم‌زاده حنائی، س. ۱۳۸۱. شبیه‌سازی دمای دانه شلتوک برنج رقم بینام در فرآیند خشک شدن به‌وسیله روش اجزاء محدود. *مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی*. ۱۰(بهار): ص. ۱-۱۸.
- [4] Abalone, R. , A. Gaston and M. Lara. 2000. Determination of mass diffusivity coefficient of sweet potato. *Drying Technology*. 18(10):2273-2290.
- [5] Akpınar, E. K., Y. Bicer and C. Yildiz. 2003. Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*. 59: 99-104.
- [6] Brooker, D. B. , F. W. Bakker-Arkema and Hall, C. W. 1992. *Drying and storage of Grains and oilseeds*. Van Nostrand Reinhold. New York, NY.
- [7] Fennema, O. 1985. Chemical changes in food during processing. An Overview. In: *Chemical changes in food during processing*. T. Richardson & J. W. Fineley (ed.), AVI Publishing Company Inc., Westport, CT., pp.1-16.
- [8] Gaston, A.L., R. M., Abalone, S. A. Giner. 2002. Wheat drying kinetics. Diffusivities for sphere and ellipsoid by finite elements. *Journal of Food Engineering*. 52: 313-322.
- [9] Giner, S.A. & Mascheroni, R.H. 2001a. Diffusive drying kinetics in wheat, part 1: potential for a simplified analytical solution. *Journal of Agricultural Engineering Research* (doi: 10.1006/jaer 2001.0753)
- [10] Giner, S.A. & Mascheroni, R.H. 2001b. Diffusive drying kinetics in wheat, part 1: Applying the simplified analytical solution to experimental data. *Journal of Agricultural Engineering Research* (doi: 10.1006/jaer 2001.0753)
- [11] Haghighi, K., J. Irudayaraj, R. L. Strochine and S. Sokhansanj. 1990. "Grain kernel drying simulation using the finite element method". *Transactions of the ASAE*, 33: 1957-1965.

## Pistachio Nut (Ohadi) Moisture Simulation During Drying with High Temperature Finite Element Method

S. Rafiee<sup>1\*</sup>, M. Kashaninejad<sup>2</sup>

1- Assistant Professor, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.

2- Assistant Professor, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.

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 37-40 % (w.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. Thus the drying process must be understood and 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 simulation of axisymmetric bodies is presented. Model was solved with improvement moisture diffusivity ( $7.5E-10$  m<sup>2</sup>/s for 70°C and  $5E-10$  m<sup>2</sup>/s for 55 °C). 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. Good agreement has been observed when the output of model was compared to experimental data. Relative deviance average that calculated of improvement model for air temperature 55 and 70°C with experimental data, respectively were 5.3% and 8.4%. This result shows that simulation model is near experimental data. Model is used for moisture simulation of pistachio nut drying. The simulated moisture profile and gradient are directly usable for stress cracking analyses of pistachio nut. The results of the finite element analysis can be used for pistachio nut quality evaluation and drying simulation studies.

**Keywords:** Pistachio nut, Drying simulation, Finite element method, Moisture diffusivity

---

\* Corresponding author e-mail address: [shahinrafiee@yahoo.com](mailto:shahinrafiee@yahoo.com)