

## شبیه‌سازی رطوبت دانه شلتوک (رقم بینام) در طی خشک کردن به روش اجزاء محدود

شاهین رفیعی<sup>۱</sup>، تیمور توکلی هاشجین<sup>۲</sup>، سیامک کاظم‌زاده حنانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، <sup>۲</sup>گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، <sup>۳</sup>گروه مکانیک سیالات دانشگاه صنعتی شریف.

تاریخ دریافت: ۸۱/۲/۳۱؛ تاریخ پذیرش: ۸۲/۱۲/۱۰

### چکیده

خشک کردن مصنوعی شلتوک برنج یکی از روش‌های متداول نگهداری این محصول است. خشک کردن سریع می‌تواند شکستگی و ترک‌های داخلی در دانه ایجاد کند که این ترک‌ها زمینه را برای شکسته شدن دانه در عملیات بعدی مساعد می‌کند. فرآیند خشک کردن باید معلوم و کنترل شده باشد، در نتیجه باید طراحی توری انجام و یا اصلاح شود که مقدار خسارت حاصل از خشک کردن کاهش یافته یا حداقل شود. این مسئله نیاز به شرح دقیق مکانیزم خشک کردن دارد. در این مقاله معادلات انتقال حرارت و جرم (به صورت خطی و غیر خطی) با هم جفت شده و با فرض مقارن بودن دانه، دستگاه معادلات سیستم انتقال جرم فرمول‌بندی شده و به روش اجزاء محدود مدلها (خطی و غیر خطی) حل شده‌اند. برای تایید صحت مدل‌های استخراج شده، بوسیله خشک‌کن آزمایشگاهی، توده بستر نازک شلتوک برنج بینام خشک شد. در طول مدت خشک کردن بستر نازک، وزن توده شلتوک با فواصل زمانی ۲، ۵ و ۱۰ دقیقه اندازه گرفته شد و با این داده‌ها رطوبت شلتوک محاسبه گردید. مدلها نیز با توجه به ورودی‌های حاصل از شرایط آزمایشگاهی با گام یک دقیقه حل شد. متوسط انحراف نسبی داده‌های حاصل از مدل خطی و غیر خطی با داده‌های آزمایشگاهی به ترتیب ۴/۸۲ درصد و ۱/۸۶ درصد بود. در نتیجه مدل غیر خطی تقریب بهتری نسبت به مدل خطی با داده‌های آزمایشگاهی دارد و برای شبیه‌سازی رطوبت دانه شلتوک بینام می‌توان از این مدل استفاده کرد. با استفاده از برنامه نوشته شده بر اساس مدل غیر خطی می‌توان رطوبت دانه و گرادیان رطوبت را در داخل دانه در طی خشک شدن با توجه به شرایط خشک کردن بدست آورد. گرادیان رطوبت را می‌توان به‌طور مستقیم در تجزیه تشهای وارد بر دانه شلتوک مورد استفاده قرار داد. مقادیر رطوبت محاسبه شده به کمک برنامه نوشته شده می‌تواند به منظور بررسی کیفیت و مطالعات شبیه‌سازی خشک کردن دانه شلتوک بکار رود.

**واژه‌های کلیدی:** دانه شلتوک، خشک کردن، روش اجزاء محدود، شبیه‌سازی، انتقال جرم

### مقدمه

برنج پس از گندم پر مصرفترین محصول کشاورزی در جهان است و بیش از دو سوم جمعیت جهان از این محصول استفاده می‌کنند. بهرامی (۱۳۷۲) میزان تولید

سالیانه این محصول را در دو میلیون و پانصد و بیست هزار تن اعلام کرد. استفی و همکاران (۱۹۸۰) نشان دادند که یک کیلوگرم شلتوک شامل ۵۰، ۲۰، ۲۰، ۱۰ درصد به ترتیب برنج سالم، برنج شکسته، پوست شلتوک و



به منظور مقایسه انتشار رطوبت در اندوسپریم، سبوس و پوست برنج، خشک کردن شلتوک برنج را با روش اجزاء محدود شبیه سازی کردند و نتیجه گرفتند که انتشار رطوبت به ترتیب در اندوسپریم، پوست و سبوس برنج کاهش می یابد، البته تغییرات درجه حرارت را مورد توجه قرار ندادند.

فو و هاو (۱۹۹۹) با استفاده از روش اجزاء محدود شلتوک را با دو جزء یک بعدی و دو بعدی با فرض آنکه شلتوک از سه لایه تشکیل شده است برای دانه های بلند و کوتاه مدل کردند. اختلاف سرعت از دست دادن رطوبت شلتوک وقتی شلتوک با درجه حرارت بالا خشک می شد بسیار کم بود. توزیع رطوبت و شیب آن برای هر دو مدل در طول خشک کردن برای روش های مختلف تعیین شد و آنها پیشنهاد کردند که بهتر است، شرایط مرزی با توجه به تغییرات شیب رطوبتی اصلاح شود و نتیجه گرفتند دانه های شلتوک در طول مدت خشک کردن و تغییرات شیب ممکن است دچار خسارت شوند. چن و همکاران (۱۹۹۹) بوسیله روش اجزاء محدود رابطه بین کاهش بازده شلتوک سالم در طول خشک کردن با شیب رطوبت دانه را شبیه سازی کردند. در این مقاله دمای دانه شلتوک برنج بینام که برنج متوسط به حساب می آید، در طی خشک کردن با شرایط معین با در نظر گرفتن تغییرات دانه و تاثیر آن بر دمای دانه شبیه سازی شده و با داده های حاصل از آزمایشگاه مقایسه شده است. کن - چان و داوون (۲۰۰۰) خشک کردن دانه شلتوک برنج را با فرض غیرخطی بودن بعضی از پارامترهای انتقال جرم و حرارت به روش اجزاء محدود مدل کردند در این انتقال رطوبت داخل دانه به صورت مایه و بخار فرض شده و مدل دوبعدی استخراج و حل شد. داده های تئوری با داده های آزمایشگاهی خشک کردن لایه نازک توده گندم مقایسه شد و جوابها قابل قبول بود و آبالون و همکاران (۲۰۰۰) نیز این شبیه سازی را برای سیب زمینی انجام داده و سپس ضریب پخش رطوبت را در داخل سیب زمینی تخمین زدند. ایرودایارج و بن (۱۹۹۹) همت خویش را مصروف

سبوس است. اگر متوسط قیمت برنج غیرسالم را یک سوم برنج سالم و قیمت متوسط برنج سالم را کیلویی ۵۰۰ تومان فرض کنیم در این صورت خسارت سنالیانه وارد به اقتصاد زارعان برنج بالغ بر ۴۲۰۰ میلیارد ریال می گردد که رقم بسیار بالایی است. اگر بتوان با انجام تحقیقات زنجیره ای خسارت ناشی از شکستگی دانه برنج را از ۲۰ درصد به (۱۰-۱۵) درصد کاهش داد می توان رقمی معادل (۲۱۰۰-۱۰۵۰) میلیارد ریال صرفه جویی کرد. در نتیجه این تحقیق از نظر اقتصادی امری بدیهی و آشکار است.

خشک کردن مصنوعی تولیدات کشاورزی یکی از روش های متداول برای نگهداری آنها است. روش های مناسب خشک کردن مقدار زیادی از خساراتی را که در مراحل بعدی به برنج وارد می شود می تواند کاهش دهد. به هر حال خشک کردن سریع می تواند میزان تردی و ترک های داخلی را که در عملیات بعدی منجر به شکستن برنج می شود افزایش دهد.

بکر و سلانسیز (۱۹۸۰) نتیجه گرفتند که برای خشک کردن محصولات کشاورزی به طور عام و خشک کردن محصولات دانه ای به طور خصوصی کارهای تنوری و آزمایشگاهی قابل توجه ای انجام شده است که تحقیقات نسبتاً جدید در زمینه ارایه می گردد:

حقیقی و همکاران (۱۹۹۰) و ایرودایارج و همکاران (۱۹۹۲) با جفت کردن معادلات حاکمه انتقال حرارت و جرم با ضرایب غیرخطی خشک کردن دانه را شبیه سازی کردند. لاگو و جنکینز (۱۹۹۱) روی دو معادله حاکمه جفت شده انتقال جرم و حرارت برای بررسی تنش های حاصل از رطوبت و حرارت در طی فرآیند رشد دانه برنج تحقیق کردند. یاماگوچی و مومدر (۱۹۹۲) آزمایشاتی با خشک کردن بستر نازک برنج قهوه ای با رطوبتها و دمای اولیه مختلف انجام دادند و با استفاده از روش اجزاء محدود، معادله پخش رطوبتی در برنج قهوه ای را با شبیه سازی دانه برنج بشکل یک کره همگن حل کردند و منحنی های کاهش رطوبت در طی خشک کردن بر اساس تئوری با تجربه مقایسه شد و سارکر و همکارانش (۱۹۹۴)



شبه‌سازی خشک‌کردن نشاسته مواد غذایی گردند و مدل استخراج شده با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. در این پژوهش رطوبت دانه شلتوک برنج بینام که برنج متوسط<sup>۱</sup> به حساب می‌آید در طی خشک کردن با شرایط معین با در نظر گرفتن تغییرات دمای دانه و تاثیر آن بر رطوبت دانه بوسیله روش اجزاء محدود شبه‌سازی شده و با داده‌های حاصل از آزمایشگاه مقایسه شده است، سپس توزیع رطوبت در داخل دانه شبه‌سازی شد.

### مواد و روشها

این تحقیق در دو بخش عمده تحلیل تئوری مسئله و برنامه‌نویسی و کار آزمایشگاهی به شرح زیر انجام شده است.

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

الف- دانه شلتوک دارای مقطع بیضی با قطر طولی  $2a$  و قطر عرضی  $2b$  بوده و از دوران بیضی حول محور طولی حاصل می‌شود و دارای سه مختصات  $\theta, z, r$  است.  
ب- معادلات انتقال حرارت و جرم‌گذرا (وابسته به زمان) هستند.

پ- معادلات دارای ضریب غیرخطی هستند.

ت- معادلات دو بعدی هستند.  
ث- دو معادله انتقال حرارت و جرم به صورت جفت شده حل می‌شود.

ج- شلتوک دارای تقارن محوری می‌باشد در نتیجه از جزء مثلث خطی اکسی‌سیمتریک<sup>۲</sup> استفاده کرده و فقط یک چهارم دانه شبه‌سازی می‌شود (شکل ۱).

معادله حاکمه انتقال حرارت (حقیقی و همکاران، ۱۹۹۰). (۱)

$$\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \text{div}(K(r, z, t)\nabla T(r, z, t))$$

که  $T(r, z, t)$ : دما در زمان  $t$ ،  $K$  و  $K(r, z, t)$ : ضریب انتقال هدایتی حرارت در زمان  $t$ ،  $(W/m.K)$  است. شرط اولیه:

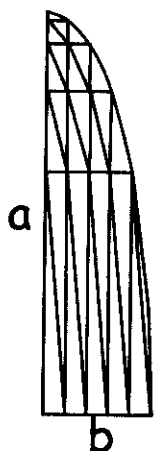
$$T(r, z, t=0) = T_0(r, z) \quad (2)$$

شرط مرزی:

$$(3)$$

$$K(r, z, t)A \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = A(r, z, t)(C_a - T_s) - V(r, z, t) \left[ I(r, z, t) + C(r, z, t)(C_a - T_s) \frac{\partial m(r, z, t)}{\partial t} \right]$$

که  $A$ : مساحت رویه دانه شلتوک  $(m^2)$ ،  $n$ : بردار عمود بر سطح دانه شلتوک،  $h(r, z, t)$ : ضریب انتقال جابجایی حرارتی در زمان  $t$ ،  $(W/m^2.K)$ ،  $T_a$ : دمای محیط  $(K)$ .



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

۱- ضرایب بر اساس دانه‌های کوتاه، متوسط و بلند تغییر می‌کند و به دانه‌هایی که طولشان بین ۷/۵ تا ۸/۵ میلی‌متر باشد دانه‌های شلتوک متوسط گفته می‌شود (Mohsenin, 1970)

روش گالریکین<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. بدین منظور یک ربع دانه به اجزاء محدودی که هر جزء دارای  $n$  گره است، تقسیم می‌گردد.  $M^{(e)}(r, z, t)$  در جزء  $e$  بصورت زیر بیان می‌شود:

$$M^{(e)}(r, z, t) = \sum_{i=1}^{n+1} N_i(r, z, t) M_i^{(e)}(t) \quad (V)$$

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

(A)

$$2\pi \sum_{i=1}^n \left[ D \left( \frac{\partial N_i(r, z)}{\partial r} \frac{\partial N_j(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial N_i(r, z)}{\partial z} \frac{\partial N_j(r, z)}{\partial z} \right) dr dz + h_m \int N_i(r, z) N_j(r, z) dt \right] M_j(t) \\ - 2\pi \sum_{i=1}^n \left[ \int N_i(r, z) M_j^{(e)}(r, z) dt \right] dr dz + 2\pi h_m \int N_i(r, z) M_j dt$$

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

(۹)

$$K = \frac{2\pi D A r_c}{4A^2} \begin{bmatrix} b_1^2 + c_1^2 & b_1 b_2 + c_1 c_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 \\ b_2 b_1 + c_2 c_1 & b_2^2 + c_2^2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 \\ b_3 b_1 + c_3 c_1 & b_3 b_2 + c_3 c_2 & b_3^2 + c_3^2 \end{bmatrix} + \frac{2\pi h_m l_{12}}{6} \begin{bmatrix} (3r_1 + r_2) & (r_1 + r_2) & 0 \\ (r_1 + r_2) & (r_1 + 3r_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$C = \frac{\pi A}{30} \begin{bmatrix} 6r_1 + 2r_2 + 2r_3 & 2r_1 + 2r_2 + r_3 & 2r_1 + r_2 + 2r_3 \\ 2r_1 + 2r_2 + r_3 & 2r_1 + 6r_2 + 2r_3 & r_1 + 2r_2 + 2r_3 \\ 2r_1 + r_2 + 2r_3 & r_1 + 2r_2 + 2r_3 & 2r_1 + 2r_2 + 6r_3 \end{bmatrix} \\ F = \frac{2\pi h_m M_\infty l_{12}}{3} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

پس از بازنویسی معادله سیستم انتقال جرم (۸) با در نظر گرفتن فرمول پیشرو در تفاضل محدود و یک فرض کردن پارامتر آزادسازی معادله به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

$$\left( K + \frac{C_T}{\Delta t} \right) M^{n+1} = \frac{C}{\Delta t} M^n + F \quad (12)$$

معادله حاصل شکل جبری معادلات اجزاء محدود است و با مونتاژ اجزاء، معادله سیستم بدست می‌آید.

$T_s$ : دمای سطح دانه شلتوک ( $K$ ),  $V$ : حجم دانه شلتوک ( $m^3$ ),  $p(r, z, t)$ : چگالی در کره‌ای به مختصات ( $r, z$ ) در زمان  $t$ ,  $L(r, z, t)$ : گرمای نهان تبخیر در زمان  $t$ ,  $C(r, z, t)$ : گرمای ویژه در زمان  $t$ ,  $M(r, z, t)$  و  $(j/kg, K)$ : رطوبت در گره‌ای به مختصات ( $r, z$ ) در زمان  $t$ , (بر پایه خشک، اعشاری) می‌باشد.

معادله حاکمه انتقال جرم

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \text{div}(D(r, z, t) \nabla M(r, z, t)) \quad (4)$$

$D(r, z, t)$ : ضریب پخش رطوبت به صورت مایع در گره‌ای به مختصات ( $r, z$ ) در زمان  $t$ , ( $m^2/s$ ) شرط اولیه انتقال جرم:

$$M(r, z, t = 0) = M_0 \quad (5)$$

شرط مرزی انتقال جرم:

(۶)

$\left[ n^T D(r, z, t) \nabla M(r, z, t) \right]_{es} = -h_d(r, z, t) [M(r, z, t)]_{es} - M_0(t)$  که  $n^T$  ترانواده ماتریس بردار عمود بر سطح دانه شلتوک،  $h_d(r, z, t)$ : ضریب انتقال جابجایی رطوبت در زمان  $t$ ,  $M_0(t)$ , ( $m/s$ ): رطوبت تعادلی در زمان  $t$  (بر پایه خشک، اعشاری) و  $es$ : ارزیابی روی سطح دانه می‌باشد.

مقدار و نحوه تغییرات ضرایب و پارامترها در طی مدت خشک کردن بر دقت حل معادلات تاثیر مهمی دارند، در نتیجه مقدار ضرایب و پارامترها از جدیدترین تحقیقات در دسترس استخراج شده است. ضرایب انتخابی بر اساس دانه‌های شلتوک متوسط می‌باشد.

در شبیه‌سازی خشک شدن دانه برنج، معادلات انتقال حرارت و جرم به صورت جفت شده حل شده است ولی در این مجال به علت گستردگی مطلب تنها مدل انتقال جرم استخراج و رطوبت در داخل دانه در طی خشک شدن شبیه‌سازی می‌شود.

از آنجا که شبیه‌سازی رطوبت دانه ارایه می‌شود فقط معادله سیستم انتقال جرم استخراج می‌گردد. برای استخراج معادله سیستم از معادله حاکمه انتقال جرم، از

برنامه‌نویسی: برای شیبه‌سازی خشک کردن محصولات کشاورزی نوشتن برنامه مدل‌سازی تخصصی با توجه به پیچیدگی مسئله لازم است. در این تحقیق برنامه شیبه‌سازی خشک کردن دانه برنج به زبان فرترن ۹۹ نوشته شد. در برنامه، با وارد کردن داده‌های ورودی، در فرآیند حل، اول مختصات گره‌ها مشخص شده و یک چهارم مقطع طولی دانه (شکل ۱) شبکه‌بندی می‌شود. ماتریسهای سختی، بار و ظرفیت رطوبتی برای هر یک از اجزاء محاسبه و سپس با مونتاز اجزاء، ماتریسهای سختی، بار و ظرفیت رطوبتی شبکه بدست می‌آید. با حل معادله (۱۲) رطوبت گره‌ها در زمان مورد نظر محاسبه می‌گردد.

### کار آزمایشگاهی

**مواد و وسایل مورد استفاده:** مواد و وسایل مورد استفاده در این تحقیق عبارت از خشک‌کن آزمایشگاهی<sup>۲</sup> با دمنده سانتریفوژ (حداکثر دور ۳۰۰۰ دور در دقیقه)، فشار استاتیک ۱۷۶۲ پاسکال و کوره الکتریکی، رطوبت و دماسنج هوا<sup>۳</sup> با محدوده اندازه‌گیری رطوبت نسبی ۱۰ تا ۹۵ درصد، سرعت سنج هوا از نوع سیم داغ<sup>۴</sup>، با حساسیت ۰/۰۱ متر بر ثانیه، دماسنج مادون قرمز<sup>۵</sup> با محدوده دمای ۳۲- تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و ترازوی دیجیتالی با حساسیت ۰/۰۰۱ گرم و ماده آزمایش شلتوک برنج (رقم بینام) بود.

### روش انجام آزمایش

از آنجا که لارم است صحت شیبه‌سازی تغییرات رطوبت بررسی شود باید با انجام آزمایش، داده‌های شیبه‌سازی را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کرد. بدین منظور از خشک‌کن بستر نازک استفاده شد. زیرا در خشک‌کن بستر نازک فرض بر این است که رطوبت و

ضرایب به کار رفته در حل انتقال جرم: مقدار و نحوه تغییرات ضرایب و پارمترها در طی مدت خشک کردن بر دقت حل معادلات تاصیر مهمی دارند، در نتیجه مقدار ضرایب و پارمترها از جدیدترین تحقیقات در دسترس استخراج شده است. ضرایب برای دانه‌های شلتوک متوسط قابل استفاده می‌باشد. این ضرایب و پارمترها عبارتند از:

۱- حجم (V) و مساحت رویه دانه شلتوک (A) با فرض بیضوی بودن شلتوک (استروشاین و هامن، ۱۹۹۴).

$$V = \frac{4\pi}{3} ab^2 \quad (13)$$

$$A = 2\pi b^2 + \frac{2\pi ab}{e} \sin^{-1}(e) \quad (14)$$

$$e = \left[ 1 - \left( \frac{b}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

۲- ضریب انتقال جرم از سطح دانه (لاگیو و جنکینز، ۱۹۹۱ به نقل از یاماگوشی و همکاران، ۱۹۸۵).

$$h_m(t) = 0.01959 + 0.08073(V_{air}(t))^{0.553} \quad (16)$$

که  $h_m(t)$ : ضریب انتقال جرم از سطح دانه (m/s)،  $V_{air}(t)$ : سرعت هوای محیط (m/s) است.

۳- ضریب پخش جرم (لاگیو و جنکینز، ۱۹۹۱ به نقل از استفی و همکاران، ۱۹۸۰).

$$D^m(t) = 7.139 \times 10^{-7} e^{-\left( \frac{2830}{T^m(t)} \right)} \quad (17)$$

$D^m(t)$ : ضریب پخش جرم متوسط در جزء m در زمان t. ( $m^2/s$ )

ضریب پخش جرم که در معادله ۲۶ ارایه شده است در طی خشک کردن وابسته به دما می‌باشد، اگر این ضریب به‌عنوان یک عدد فرض شود، معادله به‌صورت خطی حل شده و اگر ضریب به‌صورت معادله باشد که در هر گام زمانی مقدار جدیدی باید معادله غیرخطی خواهد بود که مدل به هر دو صورت حل شد<sup>۱</sup>.

۲- این دستگاه در کارگاه دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس توسط آقای مهندسی امیری چایجان ساخته شده است.

۳- مدل Loutron HT-3005 با سنسور از نوع T.F.C

4- Hot Wire

5-Infrared Thermometer

۱- برای هر کدام برنامه جدا نوشته شده است.



جریان هوا هنگامی که از توده می‌گذرد، رطوبت شلتوک را جذب کرده و باعث گرم‌شدن آن می‌شود.

توده شلتوک در مخزن بگونه‌ای ریخته می‌شود که ارتفاع توده یکسان و حداکثر ۱ سانتی‌متر شود. جریان هوا با سرعت (که بوسیله دمنده ایجاد می‌شود) و دمایی (که بوسیله کوره ایجاد می‌شود) توده شلتوک را خشک می‌کند. وزن توده شلتوک در ۱۵ دقیقه اول هر دقیقه و ۲۰ دقیقه بعدی هر ۵ دقیقه و سپس تا چهار صد دقیقه پس از شروع خشک کردن هر ۱۰ دقیقه اندازه‌گیر شد. در پایان خشک کردن توده در داخل آون قرار داده و طی ۲۴ ساعت با دمای ۱۰۴ درجه‌سانتی‌گراد کاملاً خشک و وزن شد که وزن نهایی وزن خشک دانه می‌باشد. بوسیله وزن اولیه و اوزان توده در طی خشک کردن و وزن خشک توده رطوبت بر پایه خشک توده بدست آمد. متوسط ۱۶ آزمایش به‌عنوان داده‌های آزمایشگاهی در نظر گرفته شد. شرایط خشک‌شده آزمایشگاهی و تئوری برابر بوده و در جدول (۱) آورده شده است.

دمای توده برابر با رطوبت و دمای هر یک از دانه‌های موجود در توده است (استاندارد ASAE, 2000).

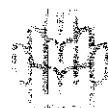
نحوه تهیه نمونه بدین شکل بود که درصد رطوبت اولیه شلتوک بدست آمد<sup>۱</sup> که برای رقم بینام ۱۳/۵ درصد بر پایه خشک بود. از توده شلتوک ۴ نمونه ۸۰۰ گرمی انتخاب شد و در داخل سه کیسه پلاستیکی قرار داده شد تا با محیط هیچگونه تبادل رطوبتی نداشته باشد. بوسیله سرنگ مقداری آب در داخل کیسه پاشیده شد. مقدار آب پاشیده شده با توجه به مقدار رطوبت اولیه نمونه و رطوبت مورد نظر تعیین می‌شود. برای یکنواخت شدن رطوبت توده، نمونه طی ۷۲ ساعت در داخل یخچال نگهداری گردید و برای یکنواختی بهتر توده، در طی این مدت چندین بار نمونه بهم زده شد تا رطوبت به‌طور یکنواخت در توده نفوذ کند. هر نمونه ۸۰۰ گرمی به چهار زیر نمونه مساوی (۱۰۰ گرمی) تقسیم شد. در نتیجه تعداد زیرنمونه‌ها ۱۶ عدد (تکرار) بود. هر نمونه تحت شرایط یکسان خشک شد.

هوای جریان یافته بوسیله دمنده از کوره گذشته، گرم شده و بوسیله کانال به زیر توده شلتوک هدایت می‌شود.

جدول ۱- مقدار ورودی‌های لازم برای حل مسئله.

عنوان ورودی برنامه	مقدار ورودی برنامه	عنوان ورودی برنامه	مقدار ورودی برنامه
رطوبت اولیه دانه	۱۷ درصد	ضریب پخش رطوبت در داخل دانه	$0.18 \text{ m}^2/\text{s}$
دمای هوای محیط	۲۲ درجه‌سانتی‌گراد	ضریب انتقال جابجایی جرم	$47.74 \text{ W/m}^2.\text{K}$
دمای عامل خشک‌کننده	۶۹ درجه‌سانتی‌گراد	تعداد اجزاء	۱۰۰
دمای اولیه دانه شلتوک	۱۵/۴ درجه‌سانتی‌گراد	تعداد گره‌ها	۶۶
قطر بزرگ بیضی	۰۰۰۱ میلی‌متر	رطوبت اولیه دانه شلتوک	۰/۱۷ بر پایه خشک، اعشاری
قطر کوچک بیضی	۰/۰۰۲ میلی‌متر	سرعت عامل خشک‌کننده	۰/۲۵ m/s

۱- نحوه محاسبه رطوبت بدین صورت است که نمونه وزن شده و در اجاق برقی قرار داده و با دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد در طی ۲۴ ساعت کاملاً خشک می‌شود و دوباره وزن می‌گردد. از محاسبه تفاضل این دو وزن تقسیم بر وزن خشک نمونه درصد، رطوبت بدست می‌آید (Anonymous, 2000)



رطوبت در مدل خطی مقدار ثابتی فرض می‌شود. ولی در مدل غیرخطی مقدار ضریب وابسته به دما بوده که با تغییر دما این ضریب نیز تغییر می‌کند. داده‌های حاصل از مدل شبه‌سازی شده به صورت خطی و غیرخطی با گام زمانی یک دقیقه و مقادیر بدست آمده به همراه داده‌های آزمایشگاهی در شکل ۲ ارائه شده است. متوسط انحراف نسبی داده‌های تئوری خطی و غیرخطی با داده‌های آزمایشگاهی بوسیله معادله (۱۹) محاسبه شد و بر حسب درصد بدست آمد. متوسط انحراف نسبی داده‌های مدل خطی با آزمایشگاهی و داده‌های مدل غیرخطی با داده‌های آزمایشگاهی به ترتیب ۴/۸۲ درصد و ۱/۸۶ درصد بود. داده‌های مدل غیرخطی تقریب خوبی از داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد، در نتیجه داده‌های مدل غیرخطی را می‌توان به عنوان مدل مورد قبول برای شبه‌سازی رطوبت دانه در طی خشک کردن دانه در نظر گرفت و برای بدست آوردن توزیع رطوبت در داخل دانه از این مدل استفاده کرد. کن - چان و داون (۲۰۰۰) در شبه‌سازی دانه گندم به دقت مشابهی دست یافتند.

متوسط رطوبت دانه و رطوبت مرکز دانه شلتوک برنج بینام در چهار صد دقیقه اول خشک کردن بدست آمده از حل مدل غیرخطی نیز در شکل ۳ ارائه شده است.

اختلاف رطوبت مرکز و سطح دانه در طی خشک شدن دانه شلتوک در شکل ۴ نشان داده شده است. توزیع رطوبت از مرکز دانه تا سطح دانه در دقایق پنجم، صدم، دویستم و چهارصدم در شکل ۵ ارائه شده است.

ب - بحث: از آنجا که ضرایب معادله انتقال جرم، با توجه به دمای دانه در هر گام محاسبه می‌شود، مدل غیرخطی استفاده می‌شود که تقریب بهتری نسبت به مدل خطی با داده‌های آزمایشگاهی بدست می‌دهد (شکل ۲).

رطوبت داخل دانه در حدود ۲۰ دقیقه اول ثابت و سپس بعلت ایجاد گرادیان رطوبت از سطح دانه به مرکز، رطوبت از مرکز دانه شروع به مهاجرت به سمت دانه می‌کند، در نتیجه رطوبت مرکز دانه با تأخیر فاز ۲۰ دقیقه‌ای از شروع خشک کردن کاهش می‌یابد (شکل ۳).

از آنجا که ضرایب مورد استفاده در معادله حاکمه برای دانه‌های شلتوک متوسط می‌باشد در آزمایش از رقم بینام استفاده گردید و جامعه آماری مربوط به این رقم می‌باشد. در این تحقیق پس از انجام کارهای تئوری و شبه‌سازی خشک کردن دانه شلتوک، در طی خشک کردن در زمانهای دلخواه با توجه به اطلاعات ورودی (ابعاد دانه شلتوک، سرعت و دمای هوای ورودی، دمای هوای ورودی، دما، رطوبت اولیه شلتوک و ...) رطوبت دانه بوسیله مدل تئوری تخمین زده می‌شود. این رطوبت تخمینی، داده‌های تئوری نامیده می‌شود. این داده‌ها به وسیله معادله (۱۸) متوسط گرفته شده که متوسط رطوبت دانه را در هر گام زمانی می‌دهد.

$$\bar{M} = \frac{\int_v M(r, z, t) dm}{\int_v dm} \quad (18)$$

که  $M(r, z, t)$ : رطوبت گره با مختصات  $(r, z)$  در زمان  $t$  (بر پایه خشک، اعشاری) و  $\bar{M}$ : متوسط رطوبت دانه در زمان  $t$  می‌باشد. برای صحت داده‌های تئوری لازمست بوسیله معادله (۱۹) متوسط انحراف نسبی این داده‌ها با داده‌های آزمایشگاهی محاسبه شود (آلبالون و همکاران، ۲۰۰۰).

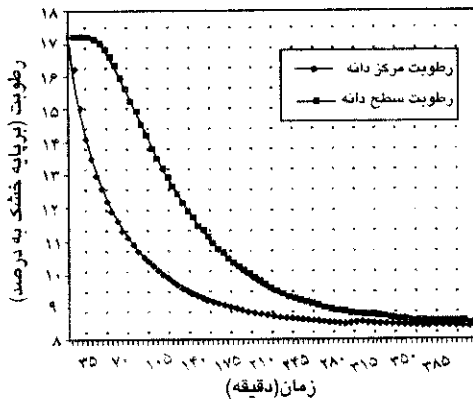
$$\delta = \left[ \frac{\sum_{j=1}^n \left( \frac{M_j - M_{exp}}{M_{exp}} \right)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (19)$$

که  $n$ : تعداد نمونه‌های جفتی،  $M_j$ : رطوبت متوسط دانه بر پایه خشک در گام  $j$ ام،  $M_{exp}$ : رطوبت متوسط آزمایشگاهی بر پایه خشک در گام  $j$ ام و  $\delta$ : متوسط انحراف نسبی داده‌های آزمایشگاهی با داده‌های تئوری است.

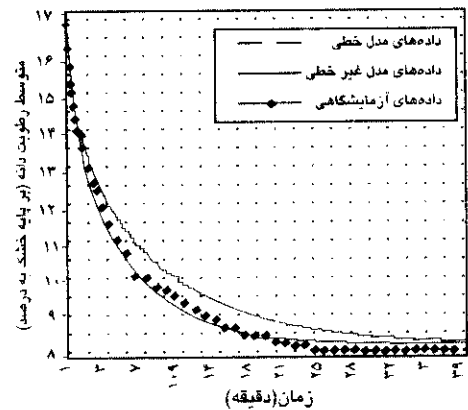
## نتایج و بحث

داده‌ها و ضرایب خطی ورودی در حل برنامه برای برنج بینام در جدول ۱ آورده شده است. ضریب پخش

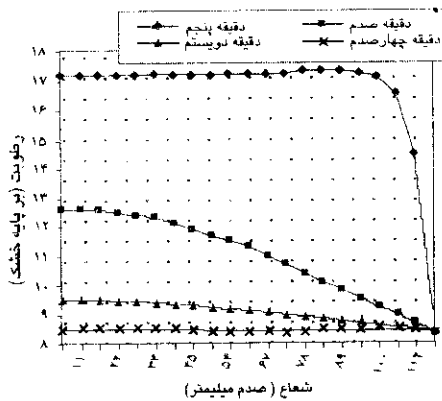




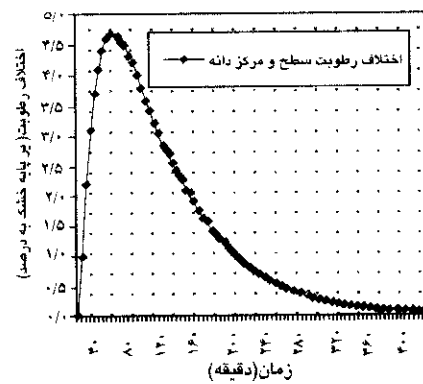
شکل ۳- منحنی تغییرات رطوبت در مرکز و سطح دانه شلتوک برنج بینام در طی خشک کردن با دمای ۶۹ درجه سانتی گراد هوای خشک کننده، حاصل از داده های غیرخطی



شکل ۲- منحنی متوسط رطوبت دانه شلتوک برنج بینام در طی خشک شدن با دمای ۶۹ درجه سانتی گراد هوای خشک کننده، حاصل از داده های آزمایشگاهی، مدل خطی و مدل غیر خطی



شکل ۵- توزیع رطوبت از مرکز به سطح دانسه شلتوک برنج بینام در دقایق پنجم، دویستم و چهارصدم خشک کردن، با دمای ۶۹ درجه سانتی گراد هوای خشک کننده، حاصل از داده های غیرخطی



شکل ۴- منحنی اختلاف رطوبت سطح و مرکز دانه شلتوک برنج (رقم بینام) در طی خشک شدن با دمای هوای خشک کننده ۶۹ درجه سانتی گراد حاصل از مدل غیرخطی

در شکل ۵ تأثیر کاهش رطوبت سطح دانه بر لایه های داخلی دانه دیده می شود. پنج دقیقه پس از شروع خشک کردن تقریباً ۰/۲ میلی متر از سطح دانه تحت تأثیر خشک کردن می باشد و اختلاف رطوبت زیادی در لایه سطحی دانه ایجاد می شود که احتمال وارد آوردن تنش بحرانی بر دانه که منجر به ترک در سطح دانه می شود، افزایش می یابد. در دقیقه صدم از شروع خشک کردن انتقال رطوبت از لایه های داخلی تر آغاز می شود که منجر کاهش رطوبت لایه های داخلی دانه می شود اما اختلاف گره های مجاور کمتر از دقایق اولیه است به طوری که در دقایق دویستم و چهارصدم از شروع خشک کردن این

در ابتدای خشک کردن شلتوک، رطوبت سطح دانه کاهش می یابد و رطوبت مرکز دانه ثابت می ماند، پس از تقریباً ۲۰ دقیقه پس از شروع خشک کردن، رطوبت مرکز دانه شروع به کاهش می کند، در نتیجه در ابتدای خشک کردن اختلاف سطح رطوبت دانه و رطوبت مرکز دانه افزایش یافته و سپس با گذشت زمان این اختلاف کاهش یافته و در نهایت به صفر می رسد (شکل ۴). نتایج بدست آمده از پژوهشهای حقوقی و همکاران (۱۹۹۰)، ایرو دیاراج و ین (۱۹۹۹) و لاگیو و جنکینز (۱۹۹۱) نتایج این تحقیق را تأیید می کنند.





دمای هوای خشک‌کننده در آغاز خشک کردن کمتر باشد و به مرور زمان افزایش یابد.

۲- از آنجا که تنشهای رطوبتی که منجر به شکسته شدن دانه می‌شود را می‌توان از شیب رطوبتی محاسبه کرد بنابراین با رطوبت گره‌های داخل دانه (بدست آمده از مدل غیرخطی) در طی خشک کردن، می‌توان تنشهای بحرانی را که موجب شکسته شدن دانه می‌شود، بدست آورد.

۳- با توجه به آنکه با افزایش دقت ضرایب بکار رفته در مدل می‌توان به نتایج دقیق‌تری دست یافت، می‌توان با انجام آزمایشهای دقیق مدل بدست آمده را اصلاح کرد. سپاسگزاری: از جناب آقایان دکتر خوش تقاضا و مهندس امیری به خاطر همکاری در انجام آزمایشها سپاسگزارم.

اختلاف بسیار کمتر می‌شود. از آنجا که تنشهای رطوبتی وارد بر دانه در نتیجه این اختلاف رطوبت (گرادیان رطوبت) گره‌های مجاور است و با کاهش این اختلاف تنش نیز کاهش می‌یابد، انتظار می‌رود احتمال وارد شدن تنش بحرانی بر دانه در دقایق اولیه خشک کردن بیشتر باشد که می‌توان با کنترل دما و رطوبت هوا در ابتدای خشک کردن از میزان ترک وارد بر دانه برنج کاست کن - چان و داون (۲۰۰۰) نیز به نتیجه مشابهی در شبه‌سازی دانه گندم دست یافتند.

### ج - توصیه و پیشنهاد

۱- با توجه به شدت خشک شدن و در نتیجه تنش رطوبتی زیاد محصول در آغاز خشک کردن توصیه می‌شود که

### منابع

۱. بهرامی، آ، آ، دهقان، م.ع. و مقیدخاهی، ز. ۱۳۷۲. بررسی آماری برنج در سالهای ۱۳۷۱-۱۳۷۰، صفحه ۳۹-۱۷.
۲. رفیعی، ش.، توکلی هشتجین، ت.، کاظمزاده حنانی، س. ۱۳۸۱. شبه‌سازی دمای دانه شلتوک برنج رقم بینام در فرآیند خشک شدن بوسیله روش اجزای محدود. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. جلد ۳، شماره ۱۰، صفحه ۱۷-۱.
3. Abalone, R., A. Gaston and M. Lara. 2000. Determination of mass diffusivity coefficient on sweet potato. *Drying Technology*. 18 (10) : 2273-2290.
4. ASAE standards. 2000. American Society of Agricultural Engineers, Pp: 578-580.
5. Becker, H. A. and H. R. Sallans, 1955. A study of internal moisture movement in the drying of the wheat kernel. *Cereal Chemistry*, 32:212-226.
6. 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 technology*. 18(6): 1305-1325.
7. chen, H., Siebenmorgen T. and Yang, W. 1999. Finite element simulation to relate head rice yield reduction during drying to internal kernel moisture gradient and rice state transition. *ASAE paper No. 99-6156*.
8. 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.
9. Haghghi, K., J. Irudayaraj, R.L. Strichine and S. Sokhansanj. 1990. "Grain kernel frying simulation using the finite element method". *Transactions of the ASAE*, 33: 1957-1965.
10. Irudayaraj, J. and W. Yen. 1999. Numerical modeling of heat and mass transfer in starch systems. *Transactions of the ASAE*. 42(2): 449-455.
11. Lague, C. and B.M. Jenkins. 1991. "Modeling Ore-harvest stress-cracking of rice kernels part I: Development of a finite element method". *Transactions of the ASAE*, 34:1797-1805.
12. Mohsenin, N. 1970. "Physical properties of plant and animal materials". Gordon and Breach Science Publishers, Pp: 682.
13. Sarker N., O. Kunze and T. Strouboulis. 1994. Finite element simulation of rough rice drying, *Drying Technology*, 12:761-775.
14. Steffe, J.F., R.P. Singh and G. E. Miller. 1980. Harvest, drying and Storage of rough rice. In *Rice: Production and Utilization*, ed. B. S. Luth. Westport, CT: The AVI publishing co, Inc.
15. Strohshine, R. and D. Hamann. 1994. *Physical properties of agricultural materials and food products*. Richard Strohshine all right reserved. Purdue, U.S.A.



16. Yamagushi, S. and Mujumder, A. 1992. Temperature and moisture dependent diffusivity of moisture in rice kernel. International Drying Symposium, Montreal, Quebec Canada, 1389-1398.
17. Yamagushi, S. Wakabarashi, S. and S. Yamazawa. 1985. "Properties of brown rice kernel for calculation of drying stresses". In advances Drying, 80, Pp: 438-444. New York: Hemisphere Publishing Corp.
18. Young, J.H. (1986). "Simultaneous heat mass transfer in a porous hygroscopic solid. Paper presented at the annual meeting of the American society of agricultural engineering at login. No. 68-353, Pp: 720-725."



---

---

## Rough rice (Binam) kernel moisture simulation during drying with finite element method

<sup>1</sup>S. Rafiee, T.Tavakoli Hashjin and <sup>3</sup>S.Kazemzadeh hanani

<sup>1</sup>Dept. of Mechanics of Agricultural Machinery, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, <sup>2</sup>Tarbiat Modarres University, <sup>3</sup>Dept. of Fluid Mechanics, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

---

---

### Abstract

Artificial drying of rough rice products is one of the most common methods of its preservation. Rapid drying can increase brittleness and induce internal cracks which predispose the product to breakage during subsequent activities. The drying process must be understood and controlled so that design guidelines which reduce or minimize drying damage to rough rice can be established and improved. This requires an accurate description of the drying mechanism. A finite element formulation and solution of a set of linear and nonlinear coupled conductive heat and diffusive moisture transfer equations to improve grain drying simulation of ax symmetric bodies is presented. Ax symmetric linear triangular elements with two degrees of freedom per node are used to discretize the rice grain in both models. One medium grain, "Binam", was used. During the thin layer drying, moisture was measured every minute. Good agreement has been observed when the output of nonlinear model was compared to experimental data obtained by others. Relative deviance average that calculated of linear and nonlinear model with experimental data, respectively 10.5% and 3.5%. This result shows that nonlinear is near experimental data. Nonlinear model is used for moisture simulation of rough rice drying. The simulated moisture profile and gradient are directly usable for stress cracking analyses of rough rice. The results of the finite element analysis can be used for rough rice quality evaluation and drying simulation studies.

**Keywords:** Rough rice Kernel; Drying; Finite element Method; Simulation; Mass transfer

۵۲

