

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

شاهین رفیعی ۱- تیمور توکلی هاشجین ۲- سیامک کاظم زاده حنانی ۳

## چکیده

خشک کردن مصنوعی شلتوک برنج یکی از روشهای متداول نگهداری این محصول است. خشک کردن سریع می تواند شکستگی و ترکهای داخلی در دانه ایجاد کند که این ترکها زمینه را برای شکسته شدن دانه در طول عملیات بعدی مساعد می کند. فرآیند خشک کردن باید معلوم و کنترل شده باشد، در نتیجه باید طراحی طوری 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 متقارن بودن دانه، دستگاه معادلات سیستم انتقال جرم فرمولبندی شده و به روش اجزاء محدود، مدلها (خطی و غیر خطی) حل شده اند. برای تأیید صحت مدلهای استخراج شده، بوسیله خشک کن 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 داده ها رطوبت شلتوک محاسبه گردید. مدلها نیز با توجه به ورودی های حاصل از شرایط آزمایشگاهی با گام یک دقیقه حل شد. متوسط انحراف نسبی داده های حاصل از مدل خطی و غیر خطی با داده های آزمایشگاهی به ترتیب ۴/۸۲٪ و ۱/۸۶٪ بود. در نتیجه مدل غیر خطی تقریب بهتری نسبت به مدل خطی با داده های آزمایشگاهی دارد و برای شبیه سازی رطوبت دانه شلتوک بینام می توان از این مدل استفاده کرد. با استفاده از برنامه نوشته شده بر اساس مدل غیر خطی می توان رطوبت دانه و گرادیان رطوبت را در داخل دانه در طی خشک شدن با توجه به شرایط خشک کردن بدست آورد. گرادیان رطوبت را می توان به طور مستقیم در تجزیه تنشهای وارد بر دانه شلتوک مورد استفاده قرار داد. مقادیر رطوبت محاسبه شده به کمک برنامه نوشته شده می تواند به منظور بررسی کیفیت و مطالعات شبیه سازی خشک کردن دانه شلتوک بکار رود.

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

۲- گروه مکانیک ماشینهای کشاورزی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳- گروه مکانیک سیالات دانشکده مکانیک دانشگاه صنعت شریف

## واژه های کلیدی

دانه شلتوک، خشک کردن، روش اجزاء محدود<sup>۳</sup>، شبیه سازی، 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 می کنند. بهرامی (۱۳۷۲) سطح زیر کشت این محصول در ایران را ۶۳۰۰۰ هکتار با تولید سالانه دو میلیون و پانصد و بیست هزارتن اعلام کرد. استغی و همکاران (۱۹۸۰) نشان دادند که یک کیلوگرم شلتوک شامل ۵۰، ۲۰، ۲۰، ۱۰ درصد به ترتیب، برنج سالم، برنج شکسته، پوست شلتوک و سبوس است. اگر متوسط قیمت برنج غیر سالم را یک سوم برنج سالم و قیمت متوسط برنج سالم را کیلویی ۵۰۰ تومان فرض کنیم در این صورت خسارت سالانه وارد به اقتصاد زارعان برنج بالغ بر ۴۲۰۰ میلیارد ریالمی گردد که رقم بسیار بالایی است. اگر بتوان با انجام تحقیقات زنجیره ای خسارت ناشی از شکستگی دانه برنج را از ۲۰٪ به (۱۰-۱۵)٪ کاهش داد می توان رقمی معادل (۲۱۰۰-۱۰۵۰) میلیارد ریال صرفه جویی کرد. در نتیجه، ضرورت این تحقیق از نظر اقتصادی امری بدیهی و آشکار 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 بعدی به برنج وارد می شود می تواند کاهش دهد. به هر حال خشک کردن سریع می تواند میزان تردی و ترکهای داخلی را که در عملیات بعدی منجر به شکستن برنج می شود افزایش دهد.

بکر و سالانسز نتیجه گرفتند که برای خشک کردن محصولات کشاورزی به طور عام و خشک کردن محصولات دانه ای به طور خصوصی کارهای تئوری و آزمایشگاهی قابل توجه ای انجام شده است (بکر و سالانسز، ۱۹۸۰).

توئی (۱۹۸۳) روی نرخهای خشک کردن، رطوبت، دما و توزیع فشار در یک ماده متخلخل موئینه غیر نمگیر تحقیقاتی را انجام داد و نتیجه گرفت که برای مواد سلولزی مانند بافت محصولات کشاورزی مکانیزم خشک کردن از پیچیدگی زیادی برخوردار است زیرا ساختمانهای مواد ناهمگن هستند و در اثر رطوبت منقبض می شوند وی پیشنهاد کرد که روی تغییرات فیزیکی و شیمیایی محصولات کشاورزی تحقیقات گسترده ای انجام گیرد. سخن سنج و بروس (۱۹۸۷) تعدادی از مدل های نیمه تئوری و نیمه تجربی را برای خشک کردن با فرض کروی بودن شکل بودن دانه استخراج کرد. حقیقی و سگرلین (۱۹۸۷) دو معادله حاکمه انتقال جرم و انتقال حرارت با ضرایب ثابت را جفت شده حل کردند و شبیه سازی انتقال حرارت و جرم با روش اجزاء محدود با استفاده از اجزاء کروی انجام شد. حقیقی و همکاران (۱۹۹۰) و ایرودیپاراج و

همکاران (۱۹۹۲) با جفت کردن معادلات حاکمه انتقال حرارت و جرم با ضرایب غیر خطی خشک کردن دانه را شبیه سازی کردند. لاگو و جنکینز (۱۹۹۱) روی دو معادله حاکمه جفت شده انتقال جرم و حرارت برای بررسی تنشهای حاصل از رطوبت و حرارت در طی فرآیند رشد دانه برنج تحقیق کردند. سارکر و همکاران (۱۹۹۲) کاهش رطوبت دانه های برنج در طول خشک کردن و افزایش رطوبت را در دوره های زمانی مختلف خشک کردن دانه برنج محاسبه و بلافاصله پس از هر دوره زمانی تعداد ترک و شکافهای ۱۵۰ دانه را بدست آوردند و رابطه بین شیبهای انتقال رطوبت و میزان ترکهای دانه های برنج را مشخص کردند. آنها با اجزاء محدود معادله توزیع دو بعدی را برای محاسبه شیبهای انتقال رطوبت در اندوسپرم دانه برنج حل کردند. یاماگوچی و مومودر (۱۹۹۲) آزمایشاتی با خشک کردن بستر نازک برنج قهوه ای با رطوبتها و درجه حرارتهای 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 منحنیهای کاهش رطوبت در طی خشک کردن بر اساس تئوری با تجربه مقایسه شد.

سارکر و همکارانش (۱۹۹۴) به منظور مقایسه انتشار رطوبت در اندوسپرم، 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 اندوسپرم، 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 روشهای 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 مختلف 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 داخلی 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 رطوبت دانه و تأثیر آن بر دمای دانه شبیه سازی شده و با داده های حاصل از آزمایشگاه مقایسه شده است. کن-چان و دا-ون (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 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. ایرودایاراج و یین (۱۹۹۹) همت خویش را مصروف شبیه سازی خشک شدن نشاسته مواد غذایی کردند و مدل استخراج شده با داده های آزمایشگاهی مقاسه شد.

در این پژوهش رطوبت دانه شلتوک برنج بینام که برنج متوسط<sup>۱</sup> به حساب می آید در طی خشک کردن با شرایط معین با در نظر گرفتن تغییرات دمای دانه و تأثیر آن بر رطوبت دانه بوسیله روش اجزاء محدود شبیه سازی شده و با داده های حاصل از آزمایشگاه مقایسه شده است.

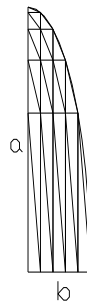
## مواد و روشها

این تحقیق در دو بخش عمده تحلیل تئوری مسئله و برنامه نویسی 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 می شود و دارای سه مختصات  $r, z, \theta$ .
- ب- معادلات انتقال حرارت و جرم گذرا (وابسته به زمان) هستند.
- پ- معادلات دارای ضرایب غیر خطی هستند.
- ت- معادلات دو بعدی هستند.
- ث- دو معادله انتقال حرارت و جرم به صورت جفت شده حل می شود.
- ج- شلتوک دارای تقارن محوری می باشد در نتیجه از جزء مثلث خطی اکسیسیمتریک<sup>۲</sup> استفاده کرده و فقط یک چهارم دانه شبیه سازی می شود (شکل ۱).



شکل (۱) نمای مقطع طولی یک چهارم دانه شلتوک شبکه بندی شده با ۲۱ گره و ۲۵ جزء

معادله حاکمه انتقال حرارت (حقیقی و همکاران، ۱۹۹۰)

$$\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \text{div}(K(r, z, t) \nabla T(r, z, t)) \quad (1)$$

$T(r, z, t)$ : دما در گره ای به مختصات  $(r, z)$  در زمان  $t$ ,  $(K)$

۱- ضرایب بر اساس دانه های کوتاه، متوسط و بلند تغییر می کند و به دانه هایی که طولشان بین ۷/۵ تا ۸/۵ میلی متر باشد دانه های شلتوک متوسط گفته می شود (Mohsenin, 1970)

$\mathcal{K}(r, z, t)$ : ضریب انتقال هدایتی حرارت در گره ای به مختصات  $(r, z)$  در زمان  $t$ ,  $(W/m.K)$

شرط اولیه:

$$(2)$$

$$T(r, z, t = 0) = T_0(r, z)$$

شرط مرزی:

$$K(r, z, t)A \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial n} = Ah(r, z, t)(T_a - T_s) - V\rho(r, z, t) \left[ L(r, z, t) + C(r, z, t)(T_a - T_s) \frac{\partial M(r, z, t)}{\partial t} \right] \quad (3)$$

$A$ : مساحت رویه دانه شلتوک ( $m^2$ )

$n$ : بردار عمود بر سطح دانه شلتوک

$h(r, z, t)$ : ضریب انتقال جابجایی حرارتی در گره ای به مختصات  $(r, z)$  در زمان  $t$ ,  $(W/m^2.K)$

$T_a$ : دمای محیط ( $K$ )

$T_s$ : دمای سطح دانه شلتوک ( $K$ )

$V$ : حجم دانه شلتوک ( $m^3$ )

$\rho(r, z, t)$ : چگالی در گره ای به مختصات  $(r, z)$  در زمان  $t$ ,  $(kg/m^3)$

$L(r, z, t)$ : گرمای نهان تبخیر در گره ای به مختصات  $(r, z)$  در زمان  $t$ ,  $(J/kg \text{ Water})$

$C(r, z, t)$ : گرمای ویژه در گره ای به مختصات  $(r, z)$  در زمان  $t$ ,  $(J/kg.K)$

$\mathcal{M}(r, z, t)$ : رطوبت در گره ای به مختصات  $(r, z)$  در زمان  $t$ , (بر پایه خشک، اعشاری)

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 گره ای به مختصات  $(r, z)$  در زمان  $t$ ,  $(m^2/s)$

شرط اولیه انتقال جرم:

$$(5)$$

$$M(r, z, t = 0) = M_0$$

شرط مرزی انتقال جرم:

$$\left[ n^t D(r, z, t) \nabla M(r, z, t) \right]_{es} = -h_d(r, z, t) \{ [M(r, z, t)]_{es} - M_e(t) \} \quad (6)$$

$n^t$ : ترانهاده ماتریس بردار عمود بر سطح دانه شلتوک

$h_d(r, z, t)$ : ضریب انتقال جابجایی رطوبت در گره ای به مختصات  $(r, z)$  در زمان  $t$ ,  $(m/s)$

$M_e(t)$ : رطوبت تعادلی در زمان  $t$  (بر پایه خشک، اعشاری)

$es$ : ارزیابی روی سطح دانه

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 دانه های شلتوک متوسط می باشد.

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 مطالب تنها مدل انتقال جرم استخراج و رطوبت در داخل دانه در طی خشک شدن شبیه‌سازی می‌شود<sup>۱</sup>.

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 روش گالرکین<sup>۲</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:

$$M^{(e)}(r, z, t) = \sum_{i=1}^{n+1} N_i(r, z, t) M_i^{(e)}(t) \quad (7)$$

که  $N_i$  را تابع شکل گویند. با توجه به معادله (7)، ثابت فرض کردن  $D$  و با استفاده از فرمول انتگرال زنجیره‌ای و فرمول دیورژانس، معادله ۴ بسط داده‌شده و شکل انتگرالی معادلات اجزاء بدست می‌آید:

$$2\pi \sum_{j=1}^n \left[ D \iint_A \left( \frac{\partial N_i(r, z)}{\partial r} r \frac{\partial N_j(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial N_i(r, z)}{\partial z} r \frac{\partial N_j(r, z)}{\partial z} \right) dr dz + h_m \oint_L N_i(r, z) r N_j(r, z) dL \right] M_j(t) \quad (8)$$

$$- 2\pi \sum_{j=1}^n \iint_A \left[ r N_j(r, z) N_j^T(r, z) \dot{M} \right] dr dz = 2\pi h_m \oint_L N_i(r, z) r M_\infty dL$$

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

$$K = \frac{2\pi D A r_c}{4A^2} \begin{bmatrix} b_1^2 + c_1^2 & b_1 b_2 + c_1 c_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 \\ b_2 b_1 + c_2 c_1 & b_2^2 + c_2^2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 \\ b_3 b_1 + c_3 c_1 & b_3 b_2 + c_3 c_2 & b_3^2 + c_3^2 \end{bmatrix} + \frac{2\pi h_m l_{12}}{6} \begin{bmatrix} (3r_1 + r_2) & (r_1 + r_2) & 0 \\ (r_1 + r_2) & (r_1 + 3r_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$C = \frac{\pi A}{30} \begin{bmatrix} 6r_1 + 2r_2 + 2r_3 & 2r_1 + 2r_2 + r_3 & 2r_1 + r_2 + 2r_3 \\ 2r_1 + 2r_2 + r_3 & 2r_1 + 6r_2 + 2r_3 & r_1 + 2r_2 + 2r_3 \\ 2r_1 + r_2 + 2r_3 & r_1 + 2r_2 + 2r_3 & 2r_1 + 2r_2 + 6r_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

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

پس از بازنویسی معادله سیستم انتقال جرم (8) با در نظر گرفتن فرمول پیشرو در تفاضل محدود و یک فرض کردن پارامتر آزادسازی معادله به صورت زیر خلاصه می‌گردد

$$(12)$$

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

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

۱- رفیعی و همکاران (۱۳۸۱) مدل انتقال حرارت در داخل دانه شلتوک را در طی خشک شدن مدل کردند.

## ۲-۱- ضرایب به کار رفته در حل انتقال جرم

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 برای دانه های شلتوک متوسط<sup>۱</sup> قابل استفاده می باشد. این ضرایب و پارامترها 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)

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

$h_m(t)$ : ضریب انتقال جرم از سطح دانه ( $m/s$ )

$V_{air}(t)$ : سرعت هوای محیط ( $m/s$ )

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

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

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

ضریب پخش جرم که در معادله ۲۶ ارائه شده است در طی خشک کردن وابسته به دما می باشد اگر این ضریب به عنوان یک عدد فرض شود معادله به صورت خطی حل شده و اگر ضریب به صورت معادله باشد که در هر گام زمانی مقدار جدیدی یابد معادله غیر خطی خواهد بود که مدل به هر دو صورت حل شد<sup>۲</sup>.

## ۳-۱- برنامه نویسی

با تخصصی تر شدن مباحث علمی ضرورت نوشتن برنامه های تخصصی که برای حل مسائل خاص و پیچیده مورد استفاده قرار می گیرد، بیشتر می شود. در نتیجه برای شبیه سازی خشک کردن محصولات کشاورزی نوشتن برنامه مدل سازی تخصصی لازم است. در این تحقیق برنامه شبیه سازی خشک کردن دانه برنج به زبان فرترن ۹۹ نوشته شد. در برنامه، با وارد کردن داده های ورودی، در فرآیند حل، اول مختصات گره ها مشخص شده و یک چهارم مقطع طولی دانه (شکل ۱) شبکه بندی می شود. ماتریسهای سختی، بار و ظرفیت رطوبتی برای هر یک از اجزاء محاسبه و سپس با مونتاژ اجزاء، ماتریسهای سختی،

<sup>۱</sup> ضرایب بر اساس دانه های کوتاه، متوسط و بلند تغییر می کند و دانه هایی که طولش بین ۷/۵ تا ۸/۵ میلیمتر باشد دانه های شلتوک متوسط گفته می شود (Mohsenin, 1970)

<sup>۲</sup> برای هر کدام برنامه جدا نوشته شده است.

بار و ظرفیت رطوبتی شبکه بدست می آید. با حل معادله (۱۲) رطوبت گره ها در زمان مورد نظر محاسبه می گردد.

## ۲- کار آزمایشگاهی

### ۲-۱- مواد و وسایل مورد استفاده

مواد و وسایل مورد استفاده در این تحقیق عبارت از خشک کن آزمایشگاهی<sup>۱</sup> با دمنده سانتریفوژ (حداکثر دور ۳۰۰۰ دور در دقیقه)، فشار استاتیک ۱۷۶۲ پاسکال و کوره الکتریکی، رطوبت و دما سنج هوا<sup>۲</sup> با محدوده اندازه گیری رطوبت نسبی ۱۰ تا ۹۵ درصد، سرعت سنج هوا از نوع سیم داغ<sup>۳</sup>، با حساسیت ۰/۰۱ متر بر ثانیه، دماسنج مادون قرمز<sup>۴</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.

### ۴-۲-۲- روش انجام آزمایش

از آنجا که لازم است صحت شبیه سازی تغییرات رطوبت بررسی شود باید با انجام آزمایش، داده های شبیه سازی را با داده های آزمایشگاهی مقایسه کرد. بدین منظور از خشک کن بستر نازک استفاده شد زیرا در خشک کن بستر نازک فرض بر این است که رطوبت و دمای توده برابر با رطوبت و دمای هر یک از دانه های موجود در توده است (استاندارد *ASAE*، ۲۰۰۰).

هوای جریان یافته بوسیله دمنده از کوره گذشته و گرم شده و بوسیله کانال به زیر توده شلتوک هدایت می شود. جریان هوا هنگامی که از توده می گذرد، رطوبت شلتوک را جذب کرده و باعث گرم شدن آن می شود.

توده شلتوک در مخزن بگونه ای ریخته می شود که ارتفاع توده یکسان و حداکثر ۱ سانتیمتر شود. جریان هوا با سرعت (که بوسیله دمنده ایجاد می شود) و دمایی (که بوسیله کوره ایجاد می شود) توده شلتوک را خشک می کند. وزن توده شلتوک در ۱۵ دقیقه اول هر دو دقیقه و ۲۰ دقیقه بعدی هر ۵ دقیقه و سپس تا چهار صد دقیقه پس از شروع خشک کردن هر ۱۰ دقیقه اندازه گرفته شد. در پایان خشک کردن توده در داخل آن قرار داده و طی ۲۴ ساعت با دمای ۱۰۴ درجه سانتیگراد کاملاً خشک و وزن شد که وزن نهایی وزن خشک دانه می باشد. بوسیله وزن اولیه و اوزان توده در طی خشک کردن و وزن خشک توده رطوبت بر پایه خشک توده بدست آمد. شرایط خشک شده آزمایشگاهی و تئوری برابر بوده و در جدول (۱) آورده شده است.

از آنجا که ضرایب مورد استفاده در معادله حاکمه برای دانه های شلتوک متوسط می باشد در آزمایش از رقم بینام استفاده می گردد و جامعه آماری مربوط به این رقم می باشد. 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 و دمای هوای ورودی، دما، رطوبت اولیه شلتوک و ...) رطوبت دانه

<sup>۱</sup> این دستگاه در کارگاه دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس توسط آقای مهندسی امیری چاپچان ساخته شده است.

<sup>۲</sup> مدل Loutron HT-3005 با سنسور از نوع T.F.C

3- Hot Wire  
4-Infrared Thermometer



بوسیله مدل تئوری تخمین زده می شود. این رطوبت تخمینی، داده های تئوری نامیده می شود. این داده ها به وسیله معادله (۱۸) متوسط گرفته شده که متوسط رطوبت دانه را در هر گام زمانی می دهد.

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

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

$\bar{M}$ : متوسط رطوبت دانه در زمان  $t$

برای صحت داده های تئوری لازمست بوسیله معادله (۱۹) متوسط انحراف نسبی این داده ها با داده های آزمایشگاهی محاسبه شود.

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

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

## نتایج و بحث

### الف - نتایج

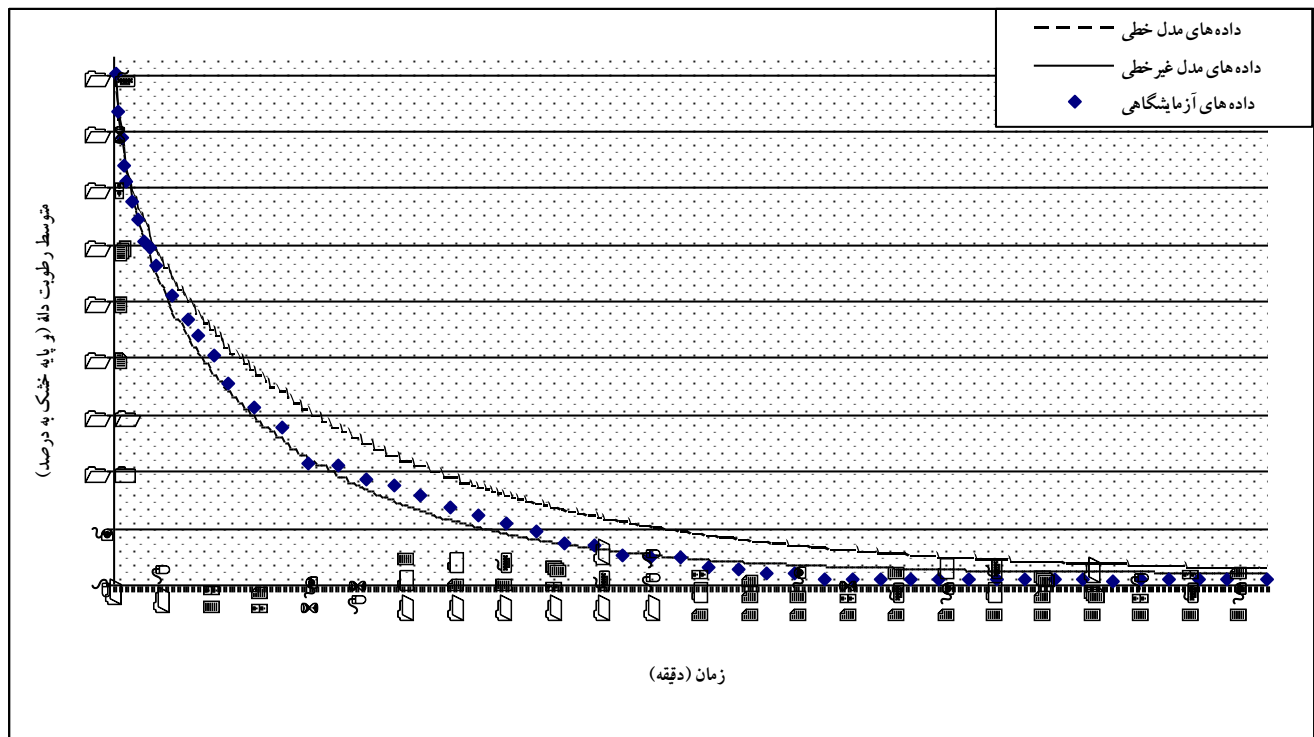
در آزمایش از برنج رقم بینام (دانه متوسط) استفاده شد و داده ها و ضرایب خطی ورودی در حل برنامه در جدول ۱ آورده شده است. ضریب پخش رطوبت در مدل خطی مقدار ثابتی فرض می شود که در جدول (۱) آورده شده است. ولی در مدل غیر خطی مقدار ضریب وابسته به دما بوده که با تغییر دما این ضریب نیز تغییر می کند.

داده های حاصل از مدل شبیه سازی شده به صورت خطی و غیر خطی با گام زمانی یک دقیقه و مقادیر بدست آمده به همراه داده های آزمایشگاهی در شکل ۲ ارائه شده است.

جدول (۱) مقدار ورودی های لازم برای حل مسئله

عنوان ورودی برنامه	مقدار ورودی برنامه	عنوان ورودی برنامه	مقدار ورودی برنامه
رطوبت محیط	۸۷ درصد	ضریب پخش رطوبت در داخل دانه	$0.118 \text{ m}^2/\text{s}$
دمای هوای محیط	$22^\circ\text{C}$	ضریب انتقال جابه جایی جرم	$47/64 \text{ W/m}^2.\text{K}$
دمای عامل خشک کننده	$69^\circ\text{C}$	تعداد اجزاء	۱۰۰
دمای اولیه دانه شلتوک	$15/4^\circ\text{C}$	تعداد گره ها	۶۶
قطر بزرگ بیضی	$0.1 \text{ m}$	رطوبت اولیه دانه شلتوک	$0.17$ بر پایه خشک،

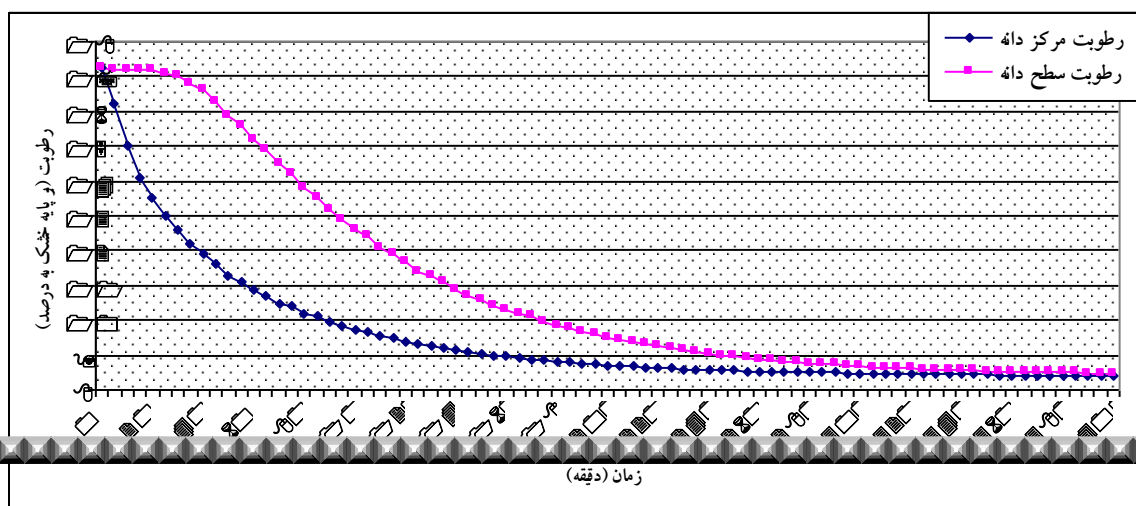
اعشاری			
$0.25 \text{ m/s}$	سرعت عامل خشک کننده	$0.002 \text{ m}$	قطر کوچک بیضی



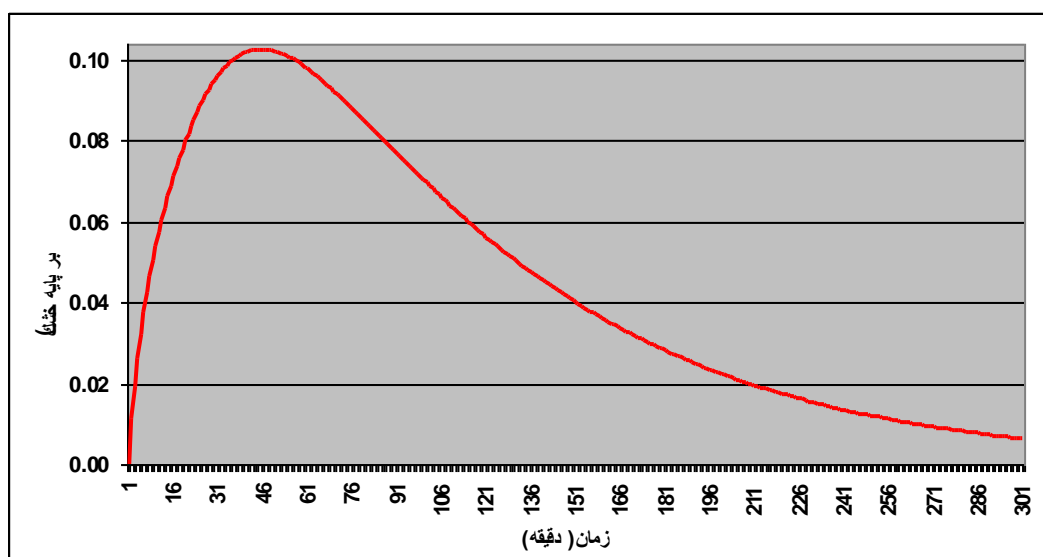
شکل (۲) منحنی متوسط رطوبت دانه شلتوک برنج بینام در طی خشک شدن با دمای  $69^{\circ}\text{C}$  هوای خشک کننده، حاصل از داده های آزمایشگاهی، مدل خطی و مدل غیر خطی

متوسط انحراف نسبی داده های تئوری خطی و غیر خطی با داده های آزمایشگاهی بوسیله معادله (۲۸) محاسبه شد و بر حسب درصد بدست آمد. متوسط انحراف نسبی داده های مدل خطی با آزمایشگاهی و داده های مدل غیر خطی با داده های آزمایشگاهی به ترتیب  $4.82\%$  و  $1.186\%$  بود. داده های مدل غیر خطی تقریب خوبی از داده های آزمایشگاهی می باشد در نتیجه داده های مدل غیر خطی را می توان به عنوان مدل مورد قبول برای شبیه سازی رطوبت دانه در طی خشک کردن دانه در نظر گرفت و برای بدست آوردن توزیع رطوبت در داخل دانه از این مدل استفاده کرد.

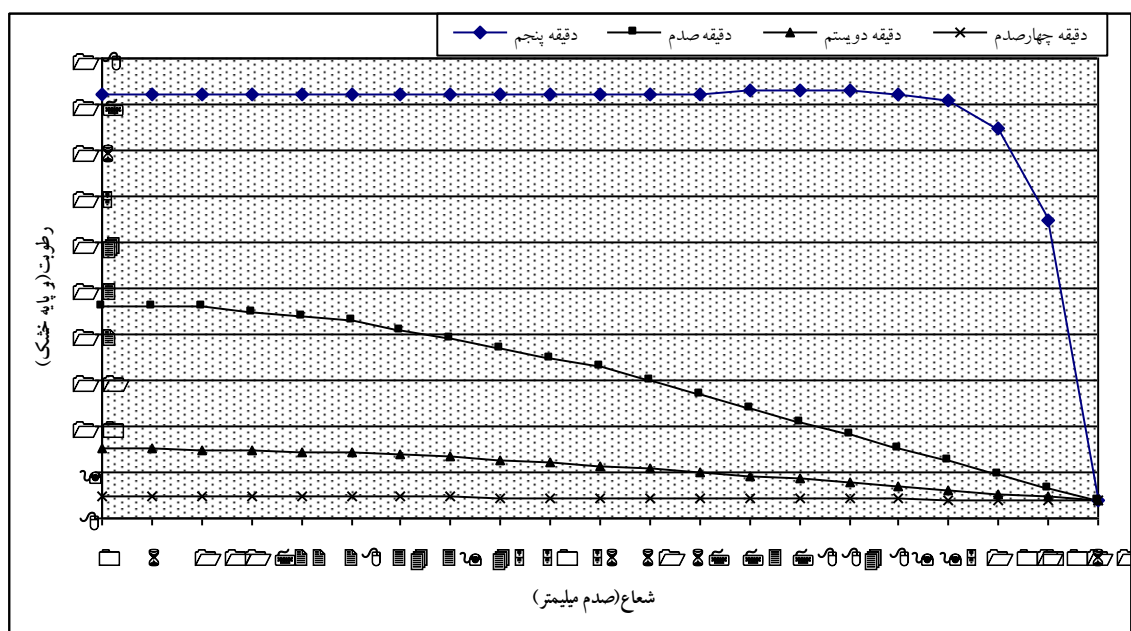
متوسط رطوبت دانه و رطوبت مرکز دانه شلتوک برنج بینام در چهار صد دقیقه اول خشک کردن بدست آمده از حل مدل غیر خطی نیز در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل (۳) منحنی تغییرات رطوبت در مرکز و سطح دانه شلتوک برنج بینام در طی خشک کردن با دمای  $69^{\circ}\text{C}$  هوای خشک کننده، حاصل از داده های غیر خطی اختلاف رطوبت مرکز و سطح دانه در طی خشک شدن دانه شلتوک در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل (۴) منحنی اختلاف رطوبت سطح و مرکز دانه شلتوک برنج (رقم بینام) در طی خشک شدن با دمای هوای خشک کننده  $69^{\circ}\text{C}$ ، حاصل از مدل غیر خطی توزیع رطوبت از مرکز دانه تا سطح دانه در دقایق پنجم، صدم، دویستم و چهار صدم در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل (۵) توزیع رطوبت از مرکز به سطح دانه شلتوک برنج بینام در دقایق پنجم، صدم، دویستم و چهارصدم خشک کردن، با دمای  $69^{\circ}\text{C}$  هوای خشک کننده، حاصل از داده های غیر خطی

## ب- بحث

در شکل ۲ دیده می شود که حل غیر خطی مدل از آنجا که ضرایب معادله انتقال جرم، با توجه به دما دانه در هر گام محاسبه شده و در مدل استفاده می شود تقریب بهتری نسبت به مدل خطی با داده های آزمایشگاهی می دهد.

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 سطح دانه می کند در نتیجه رطوبت مرکز دانه با تأخیر فاز ۲۰ دقیقه ای از شروع خشک کردن کاهش می یابد (شکل ۳).

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 می یابد و در نهایت به صفر می رسد (شکل ۴).

در شکل ۵ تأثیر کاهش رطوبت سطح دانه بر لایه های داخلی دانه دید می شود. در منحنی پنج دقیقه پس از شروع خشک کردن تقریباً ۰/۲ میلیمتر 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 به 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 اختلاف بسیار کمتر می شود. از آنجا که تنشهای رطوبتی وارد بر دانه در نتیجه این اختلاف رطوبت (گرادیان رطوبت) گره های مجاور است و با کاهش این اختلاف تنش نیز کاهش می یابد، انتظار می رود احتمال وارد شدن تنش بحرانی بر دانه در دقایق اولیه خشک کردن بیشتر باشد که می توان با کنترل دما و رطوبت هوا در ابتدای خشک کردن از میزان ترک وارد بر دانه برنج کاست.

## ج- توصیه و پیشنهاد

۱- با توجه به شدت خشک شدن و در نتیجه تنش رطوبتی زیاد محصول در آغاز خشک کردن توصیه می شود که دمای هوای خشک کننده در آغاز خشک کردن کمتر باشد و به مرور زمان افزایش یابد.

۲- از آنجا که تنشهای رطوبتی که منجر به شکسته شدن دانه می شود را می توان از شیب رطوبتی محاسبه کرد بنابراین با رطوبت گره های داخل دانه (بدست آمده از مدل غیر خطی) در طی خشک کردن، می توان تنشهای بحرانی را که موجب شکسته شدن دانه می شود، بدست آورد.

۳- با توجه به آنکه با افزایش دقت ضرایب بکار رفته در مدل می توان به نتایج دقیق تری دست یافت، می توان با انجام آزمایشهای دقیق مدل بدست آمده را اصلاح کرد.

سپاسگذاری: از جناب آقایان دکتر خوش تقاضا و مهندس امیری به خاطر همکاری در انجام آزمایشها

سپاسگزارم .

## منابع

- ۱- بهرامی، آ، آ، دهقان، ع م و مقیدخاهی، ز. ۱۳۷۲. بررسی آماری برنج در سالهای ۱۳۷۰-۱۳۷۱.
- 4- Abalone, R., A. Gaston and M. Lara. 2000. Determination of mass diffusivity coefficient of sweet potato. *Drying Technology*. 18(10):2273-2290.
- 5- ASAE standards. 2000. *American Society of Agricultural Engineers*, pp. 578-580.
- 6- Becker, H. A. and Sallans, H. R. (1955). A study of internal moisture movement in the drying of the wheat kernel. *Cereal Chemistry*, 32: 212-226.
- 7- 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,
- 8- 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.
- 9- 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.
- 10- Haghighi, K. and L. J. Segerlind. 1987. "Modelling simultaneous heat and mass transfer in an isotropic sphere - A finite element approach". *Transactions of the ASAE*, 31: 629-637.
- 11- Haghighi, K., J. Irudayaraj, R. L. Strohine and S. Sokhansanj. 1990. "Grain kernel drying simulation using the finite element method". *Transactions of the ASAE*, 33: 1957-1965.
- 12- Irudayaraj, J. and W. Yen. 1999. Numerical modelling of heat and mass transfer in starch systems. *Transactions of the ASAE*. 42(2): 449-455.
- 13- Irudayaraj, J., K. Haghighi and R. L. Srtoshine. 1992. "Finite element analysis of drying with application to cereal grain". *Jornal Agricultural Engineering Research*. 53: 209-229.
- 14- Lague, C. and B. M. Jenkins. 1991. "Modelling Pre-harvest stress-cracking of rice kernels part I: Development of a finite element method". *Transactions of the ASAE*, 34: 1797-1805.
- 15 - Mohsenin, N. 1970. "Physical ptoperties of plant and animal materials". *Gordon and Breach Science Publishers*, pp. 682.
- 16- Sarker, N., O. Kunze and T. Stroudoulis. 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.
- 17- Sarker N. , O. Kunze and T. Strouboulis. 1994. Finite element simulation of rough rice drying, *Drying Technology*, 12: 761-775.
- 18- Sokhansanj, S. and D. M. Bruce. 1987. "A conduction model to predict grain temperature in grain drying simulation". *Transactions of the ASAE*, 30: 1181-1184.
- 19- 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 ublishing co, Inc.
- 20- Strohine, R. and D. Hamann. 1994. "Physical properties of agricultural materials and food products". *Richard Strohine all right reserved. Purdue, U.S.A.*
- 21- Toei, R. 1983. "Drying mechanism of capillary porous bodies. In: *Advances in Drying*". A. S. Mujumdar(e.d.). Hemisphere Pub. Corp. , Washington, D. C., 2: 269-297.
- 22- Yamagushi, S. and Mujumder, A. 1992. Temperature and moisture dependent diffusivity of moisture in rice kernel. *International Drying Symposium, Montreal, Quebec Canada*, 1389-1398.
- 23- 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.*
- 24- Young, J. H. (1986). "simutaneous heat and mass transfer in a perous hygroscopic solid. Paper presented at the annual meeting of the American society of agricultural engineering at logan. no. 68-353, pp. 720-725.

## *Rough Rice (Binam) Kernel Moisture Simulation During Drying with Finite Element Method*

*S. Rafee, T. Tavakoli-Hashjin, S. Kazemzade-Hanae*

### *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 axisymmetric bodies is presented. Axisymmetric linear triangular elements with two degree 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.*