



## مدل‌سازی هیدراتاسیون برنج (*Oryza Sativa*) توسط مدل‌های تجربی و نفوذ

محسن دلوی اصفهان\*

۱- استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ های مقاله :	<p>در این مطالعه ویژگی های جذب آب برنج سفید در حین خیساندن در دمای ۲۵-۶۵ درجه سانتی گراد تعیین شد. در مرحله بعد، کارایی مدل‌های بنیادی و تجربی برای پیش‌بینی میزان رطوبت دانه در حین خیساندن مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. مدل‌های بنیادی با استفاده از حل تحلیلی و عددی قانون دوم انتشار فیک بر اساس اشکال منظم (مکعب و استوانه) و هندسه واقعی برنج سفید به ترتیب توسعه داده شدند. ۵ مدل تجربی نیز (مدل هندرسون و پایس، مدل نمایی، مدل پیچ، مدل پیچ اصلاح شده و مدل نمایی دو جمله‌ای) برای توضیح رفتار خیساندن برنج نیز مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج مدل‌های مورد مطالعه نشان داد که مدل عددی به طور قابل توجهی از مدل تحلیلی در توصیف منحنی‌های جذب آب دقیق‌تر است. دقت بالاتر مدل عددی را می‌توان به این دلیل نسبت داد که این مدل شکل مناسبی را برای نشان دادن دانه های برنج در مدل ریاضی انتخاب کرد. مقدار متوسط ضریب نفوذ موثر در دامنه درجه حرارت ۲۵-۶۵ درجه سلسیوس <math>10^{-11} \times 8/83</math> (متر مربع بر ثانیه) با روش کمینه سازی خطا بین داده های تجربی و مدل به دست آمد. در بین مدل‌های تجربی، مدل نمایی دو جمله‌ای بهتر از سایر تغییرات رطوبت نمونه در طول خیساندن را پیش‌بینی کرد. به طور کلی، اگرچه هر دو رویکرد در مدل‌سازی قادر به پیش‌بینی تغییرات رطوبت نمونه در طول خیساندن بودند، مدل عددی مناسب‌تر بود، زیرا درک جامع‌تری از فیزیک فرآیند را ارائه داد و پارامترهای مدل مستقیماً با مقادیر فیزیکی قابل اندازه گیری مرتبط هستند.</p>
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۴	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۷	
کلمات کلیدی:	
برنج، جذب آب، مدل تحلیلی، مدل عددی، مدل تجربی.	
DOI: 10.22034/FSCT.20.134.87 DOR: 20.1001.1.20088787.1402.20.134.7.1	
* مسئول مکاتبات: dalvi@jahromu.ac.ir	

## ۱- مقدمه

برنج یکی از غلات اصلی تولید و مصرف شده در سراسر جهان در نظر شناخته می‌شود. تخمین زده می‌شود که روزانه نیمی از جمعیت جهان مصرف کنندگانی محصول هستند. قبل از هر نوع فراوری و پخت این محصول معمولاً یک فرایند جذب آب از طریق خیساندن صورت می‌گیرد. به طور کلی، عملیات جذب آب (هیدراتاسیون) به طور گسترده‌ای قبل از فرایندهای مختلفی از جمله استخراج، پخت، جوانه زنی، مشروط سازی و آسیاب مرطوب برای حبوبات و غلات استفاده می‌شود و شناخت رفتار جذب آب در این دسته از محصولات در هنگام هیدراتاسیون ضروری است، زیرا بر عملیات‌های بعدی فراوری و حتی کیفیت محصول نهایی تأثیر قابل توجهی می‌گذارد [۱]. برای مثال، عملیات خیساندن زمان پخت غلات را به میزان قابل توجهی کاهش داده و همچنین باعث نرم شدن ساختار دانه و حذف عوامل ضد تغذیه‌ای، ژلاتینه شدن نشاسته و دناتوره شدن پروتئین‌ها را هم بدنبال خواهد داشت. تعیین سرعت جذب آب در فرمولاسیون غذاها نیز اهمیت دارد. برای مثال، سرعت جذب آب می‌تواند بر ترتیب افزودن مواد خشک به مخلوط تأثیر بگذارد و یا از این شاخص می‌توانیم تلفات در حین عملیات شستشو و یا میزان انبساط دانه‌ها در قوطی کنسرو در طول فرآیند حرارتی تعیین کرد [۲]. در مورد برنج، این عملیات بر کیفیت پخت و بافت نهایی محصول هم به شدت اثر گذار است. علاوه بر این، فرایند خیساندن می‌تواند آلودگی این محصول به فلزات سنگین را هم به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. برای مثال Feng و همکاران (۲۰۲۲) گزارش دادند که عملیات خیساندن دانه‌های برنج بویژه در محیط اسیدی می‌تواند کادمیوم را بین ۴۵ تا ۸۵٪ کاهش دهد [۳]. مدت زمان خیساندن برای اکثر دانه‌های برنج، برای پخت در پلوپزهای برقی بین ۵-۳۰ دقیقه توصیه شده است ولی زمان خیساندن طولانی‌تر (تا چندین ساعت) برای برنج پخته شده فوری، آرد برنج و پودینگ برنج هم ممکن است مورد نیاز باشد [۴]. به طور معمول، دمای خیساندن کمتر از دمای ژلاتینه شدن نشاسته تعیین می‌شود و یک همبستگی مثبت با محتوای آب در برنج خیساندها نشان می‌دهد. با این حال، خیساندن برای مدت طولانی در دماهای پایین نمی‌تواند بافتی

مشابه با خیساندن در دمای بالاتر برای مدت زمان کوتاه تر داشته باشد، اگرچه میزانمحتوای رطوبت هر دو نمونه نهایتاً برابر باشد [۵]. با توجه به اینکه عملیات خیساندن در دماهای زیر دمای ژلاتینه شدن نشاسته صورت می‌گیرد. خیساندن برای مدت زمان طولانی می‌تواند به رشد میکروب‌ها نیز منجر شود و به همین دلیل زمان فرایند نمی‌تواند طولانی تعریف شود [۳].

جذب آب یک عملیات انتقال جرم محسوب می‌شود و از اصل انتشار یا جریان مویرگی بسته به ساختار و ترکیب دانه‌ها پیروی می‌کند. سینتیک هیدراتاسیون نیز یک پدیده پیچیده است که در مواد غذایی معمولاً دو رفتار متفاوت را نشان می‌دهد: شکل مقعر رو به بالا و شکل سیگموئیدی. شکل مقعر در اکثر دانه‌های غلات مشاهده می‌شود، جایی که در ابتدا سرعت جذب آب بسیار بالا است اما پس از رسیدن به رطوبت اشباع یا تعادلی کاهش چشمگیری می‌یابد. از سوی دیگر، رفتار سیگموئیدی به طور مطلق برای دانه‌های خانواده بقولات مشاهده شده است، جایی که در ابتدای فاز تاخیریمشاهده می‌شود و با هیدراتاسیون پوسته بذر پایان می‌یابد [۶]. مدل سازی فرایند جذب آب می‌تواند در دو شکل اصلی مدل‌های بنیادی<sup>۱</sup> و مدل‌سازی بر اساس روابط تجربی<sup>۲</sup> انجام شود در مدل سازی بنیادی که بر اساس قوانین انتشار آب استوار است، معمولاً از حل قانون دوم فیک به صورت تحلیلی و عددی استفاده می‌شود، در مدل‌های تجربی، از روابط ریاضی که بر پایه رگرسیون هستند، استفاده می‌شود. محققین زیادی کاربرد مدل‌های تجربی و بنیادی برای پیش‌بینی ویژگی‌های هیدراتاسیون دانه‌های غذایی را گزارش کرده‌اند [۷-۹].

اگر چه مدل‌سازی فرایند جذب آب برنج قبلاً مورد بررسی قرار گرفته است ولی مطالعاتی که شبیه سازی سه بعدی توسعه داده باشند، کمیاب هستند. این در حالیست که شبیه سازی سه بعدی می‌تواند به بهبود دانش ما در مورد این فرآیند کمک وسیع‌تری کند و درک درست‌تری در خصوص این فرایند به دست آوریم. علاوه بر این، مقایسه‌ای بین انواع مدل‌های بنیادی و تجربی هم در خصوص فرایند خیساندن صورت نگرفته است، در مطالعه حاضر، هدف بررسی تأثیر سه دمای مختلف در حین خیساندن بر

1. Fundamental  
2. Empirical

تحت تاثیر تغییر سایز برنج در حین فرایند نیست [۹ و ۱۰].  
\* ضریب نفوذ آب ثابت در هر دما ثابت در نظر گرفته شده و از اثر مقاومت خارجی در انتقال جرم صرف نظر شد.  
معادله انتشار در حالت تحلیلی برای دو شکل استوانه و مکعب به شکل یک سری نامتناهیمی باشد [۶].  
در حالت اسلب، معادله انتقال جرم برای هر یک از بعدهای مکعب از رابطه زیر به دست آمد و در نهایت با استفاده از قاعده اجتماع اثرها<sup>۴</sup> نتیجه برای مکعب به دست آمد.

$$\frac{C_s - C}{C_s - C_o} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \cos\left(\frac{(2n+1)\pi x}{2L}\right) \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4} Fo\right)$$

For Bi > 40 (۱)

$$\frac{C_s - C_{xyz}}{C_s - C_o} = \left(\frac{C_s - C_x}{C_s - C_o}\right)_x \left(\frac{C_s - C_y}{C_s - C_o}\right)_y \left(\frac{C_s - C_z}{C_s - C_o}\right)_z$$

(۲)

در رابطه فوق  $C_s, C_o, C_x$  به ترتیب میزان غلظت رطوبت در حالت اشباع، میزان غلظت اولیه رطوبت و مشخصه بعد در هر محور می باشد.  $Fo$  عدد فوریه بوده و از رابطه زیر به دست می آید.

$$Fo_x = \frac{Dt}{L_x^2} \quad (۳)$$

که در این رابطه  $D$  ضریب نفوذ رطوبت (متر مربع بر ثانیه) و  $t$  زمان بر حسب ثانیه می باشد.

برای شکل استوانه تغییرات غلظت رطوبت به عنوان تابعی از زمان از رابطه زیر به دست می آید.

$$\text{For Bi} > 40 \quad (۴)$$

$$\frac{C_s - C}{C_s - C_o} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\pi^2}{R^2 \delta_n^2} \exp(-R^2 \delta_n^2 Fo)$$

معادله دو و چهار هردو تحت شرایط، عدد بیوت بیش از ۴۰، شرط اولیه، غلظت اولیه یکنواخت و شرط مرزی، غلظت ثابت در سطح قابل استفاده هستند. شکل ۱، تصویر شماتیک هندسه مدل های تحلیلی در حالت بلوک و استوانه را نشان می دهد، همان طور که مشاهده می شود با توجه به شکل واقعی دانه برنج، هر دو هندسه تقریباً با شکل واقعی دانه مطابقت نشان می دهند.  
معادله انتقال جرم بر اساس رابطه قانون دوم فیک برای دانه برنج

میزان جذب آب برنج در دامنه حرارتی ۲۵-۶۵ درجه سلسیوس می باشد. در گام بعدی تحقیق، دو مدل بنیادی که با روش حل تحلیلی و عددی به دست خواهند آمد، توسعه داده خواهد شد و در مرحله بعد، ۵ مدل تجربی نیز برای برازش داده ها مورد استفاده قرار خواهد گرفت. و در نهایت بهترین مدل برای جذب آب برنج مشخص خواهد شد.

## ۲- مواد و روش ها

### ۲-۱- آماده سازی اولیه و خیساندن دانه ها

قبل از استفاده، دانه های برنج از مواد خارجی و هسته های شکسته تمیز شده و برای به دست آوردن نمونه هایی با اندازه یکنواخت تر غربال شدند. در مرحله بعد با استفاده از کولیس طول، عرض و ارتفاع حداقل ۵۰ دانه ها تعیین و میانگین آنها برای مدل سازی مورد استفاده قرار گرفت. فرآیند خیساندن دانه های برنج برابریک بازه زمانی متفاوت (۰ تا ۱۰۰ دقیقه) و شرایط دمایی (۲۵ تا ۶۵ درجه سانتیگراد) انجام شد. برای این فرآیند، ۱۰ گرم برنج (بدون هیچ گونه آسیبی) انتخاب و در کیسه های توری مختلف قرار داده شد. پس از آن، هر کیسه در بشر های جداگانه حاوی آب مقطر (نسبت دانه به آب ۱:۳ وزنی/حجمی) در سه دمای مختلف یعنی ۲۵، ۴۵ و ۶۵ درجه سانتیگراد خیس شد. در طی فرآیند جذب آب، دانه ها به صورت دوره ای در فاصله زمانیمعین تخلیه شدند، رطوبت سطحی آنها با دستمال کاغذی خشک شده و وزن شدند. دانه ها دوباره خیسانده شدند تا این فرآیند تا ۱۰۰ دقیقه ادامه یابد. میزان رطوبت در هر بازه بر اساس وزن مرطوب تعیین شد [۲ و ۷].

### ۲-۲- مدل سازی - قانون نفوذ ( فیک )

قانون دوم انتشار یا معادله فیک برای مدل سازی فرآیندهای انتقال آب در برنج استفاده شد.

فرضیات زیر در حل مدل های بنیادی در نظر گرفته شد.

\* برنج دارای ساختاری همگن<sup>۳</sup> است

\* شکل و ابعاد نمونه در حین عملیات تغییر نمی کند. (شایان ذکر است نتایج Bakalis و همکاران (۲۰۰۹) و Prakash و Pan (۲۰۱۲) نشان داد که مدل سازی فرایند جذب آب و خشک کردن دانه های برنج

4. Slab  
5. Principle of Superposition

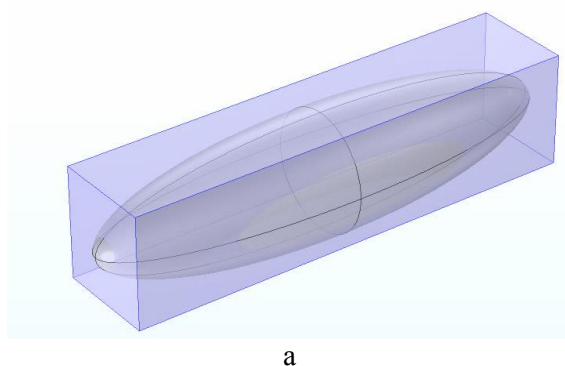
3. Isotropic

شرط اولیه:

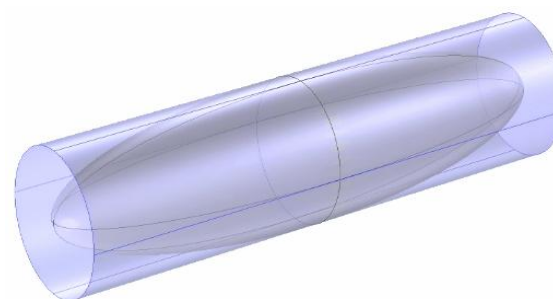
$$C(x, 0) = C_0 \quad (7)$$

که در این روابط  $C_0$  و  $C_e$  به ترتیب میزان رطوبت تعادلی و میزان رطوبت اولیه دانه های برنج می باشد [۹].

۵ مدل تجربی (نمایی، هندرسون-پابیس، پیچ، پیچ اصلاح شده و مدل نمایی دو جمله‌ای) برای توصیف جذب آب برنج در دماهای مختلف مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۱) [۸].



a



b

Fig 1 Schematic representation for the geometry of analytical models a) slab b) cylinder

روابط  $y_{pre,i}$  و  $y_{exp,i}$  به ترتیب مقادیر پیش بینی شده توسط مدل و مقادیر مشاهده شده را نشان می دهند و  $N$  تعداد کل مشاهدات می باشد [۱۱].

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{pre,i} - y_{exp,i})^2 \quad (8)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{pre,i} - y_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{pre,i} - y_{exp,i})^2} \quad (9)$$

### ۳- بحث و نتایج

رفتار جذب آب برنج در طول فرآیند هیدراتاسیون در شکل ۲ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود در ابتدای فرآیند سرعت جذب آب شدید است ولی با افزایش زمان سرعت جذب کاسته شده و در نهایت به سمت رطوبت تعادلی یا اشباع پیش می رود. میزان رطوبت تعادلی نمونه در این رقم برنج حدود ۳۰٪ بود که با نتایج کاشانی نژاد و همکاران (۱۳۸۷) که میزان جذب

از رابطه زیر تعیین می شود.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( rD \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{D}{r} \frac{\partial C}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( rD \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] \quad (5)$$

برای حل معادله فوق، شرط مرزی و شرط اولیه به شکل زیر تعیین شد.

شرط مرزی:

$$C(x, t) = C_e \quad (6)$$

برازش داده های آزمایشگاهی و مدل با استفاده از نرم افزار MATLAB و جعبه ابزار برازش منحنی<sup>۶</sup> صورت پذیرفت.

Table 1 Mathematical models applied to the rehydration curves

No	Model	Analytical Expression
1	Exponentia 1	$MR = \exp(-kt)$
2	Henderson & Pabis	$MR = A \exp(-kt)$
3	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
4	Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$
5	Two-term	$MR = A_0 \exp(-k_0 t) + A_1 \exp(-k_1 t)$

### ۲-۳ تجزیه و تحلیل آماری

برای ارزیابی ظرفیت برازش مدلها از دو معیار آماری میانگین مربعات خطای (MSE) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) استفاده شد. در این

6. Curve Fitting Toolbox<sup>TM</sup>

درجه سلسیوس به ترتیب  $10^{-11} \times 7/95 - 10^{-10} \times 1/04$  (متر مربع بر ثانیه) به دست آمد که با نتایج سایر محققین مطابقت نشان می‌دهد [۸ و ۱۶].

مقایسه بین نتایج میزان رطوبت نمونه در سه دمای مختلف با استفاده از معادلات تحلیلی و عددی در شکل ۳ آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، در هر سه دما نتایج حاصل از مدل عددی با دقت بالاتری توانسته است تغییرات رطوبت در نمونه را پیش بینی نماید، این موضوع از طریق معیارهای آماری ضریب تبیین و میانگین مربعات خطا نیز مشخص شده است (جدول ۲). دلیل این موضوع به دقت بالاتر در هندسه در نظر گرفته شده برای دانه برنج توسط مدل عددی بر می‌گردد. زیرا، همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها توضیح داده شد، دو مدل تحلیلی توسعه داده شده بر اساس شکل مکعب مستطیل و استوانه است ولی مدل عددی، دانه برنج را به صورت بیضی در نظر گرفته است. اهمیت انتخاب هندسه درست و دقیق در مورد دانه برنج، در مطالعات قبلی نیز مورد توجه قرار گرفته است، Prakash و همکاران (۲۰۱۲) گزارش دادند که استفاده از مدل‌هایی با شکل هندسی ساده‌تر (کره و استوانه) در مورد دانه برنج در حین خشک کردن منجر به خطا در پیش‌بینی ویژگی‌های خشک‌کردن مانند محتوای رطوبت و گرادیان رطوبت خواهد شد. این محققین بهترین شکل هندسی برای دانه برنج را بیضی معرفی کرده‌اند که با نتایج این تحقیق نیز مطابقت نشان می‌دهد [۱۰].

شکل ۴، تغییرات رطوبت نمونه در مرکز هندسی دانه برنج در سه دمای مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر سه دما روند یکسانی مشاهده می‌شود و سرعت جذب رطوبت در هندسه استوانه‌ای شکل، کمترین و در حالت مدل عددی که شکل واقعی دانه برنج را نشان می‌دهد، بیشترین سرعت جذب رطوبت را نشان می‌دهد. نکته دیگری که از شکل مشاهده می‌شود، سرعت جذب آب در مرکز بطنی و کندتر از میانگین جذب آب دانه برنج می‌باشد، که کاملاً منطقی به نظر می‌رسد، زیرا در این حالت هم آب باید فاصله بیشتری را طی کند تا به مرکز دانه نفوذ کند.

آب در سه رقم فجر، شفق و ندا را مطالعه کردند، مشابهت نشان می‌دهد ولی میزان جذب آب با نتایج Gong و همکاران اختلاف قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد دلیل این موضوع می‌تواند به نوع رقم، ترکیب و ساختار داخلی رقم مربوط باشد [۱۲ و ۱۳]. آمیلوپکتین به عنوان ماده اصلی تشکیل دهنده نشاسته، ساختاری با درجه انشعاب بالایی دارد که به آن اجازه می‌دهد تا به راحتی با مولکول‌های آب ترکیب شود و حالت بسیار منظمی در گرانول‌های نشاسته هیدراته ایجاد کند [۱۴]. به طوری که منحنی‌های جذب آب نیز میزان جذب آب و محتوای آمیلوپکتین را منعکس می‌کنند، به طوری که هر چه میزان آمیلوپکتین بیشتر باشد، جذب آب هم بیشتر است. Dutta و همکاران (۲۰۱۶) که گزارش دادند که واریته‌های مومی بیشترین جذب آب را در بین انواع برنج در طول خیساندن آب به دست آوردند. نکته دیگری که از شکل مشاهده می‌شود اثر دما بر میزان جذب می‌باشد، به طوری که با افزایش دما قدرت جذب آب در برنج بیشتر می‌شود که این موضوع می‌تواند به دلیل افزایش ضریب نفوذ ماده غذایی با افزایش دما مرتبط باشد [۱۵].

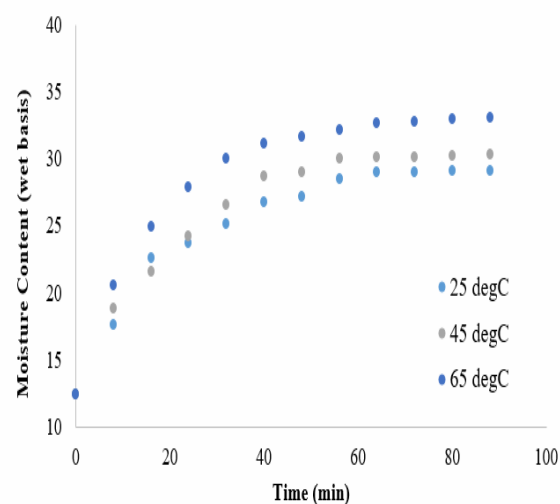
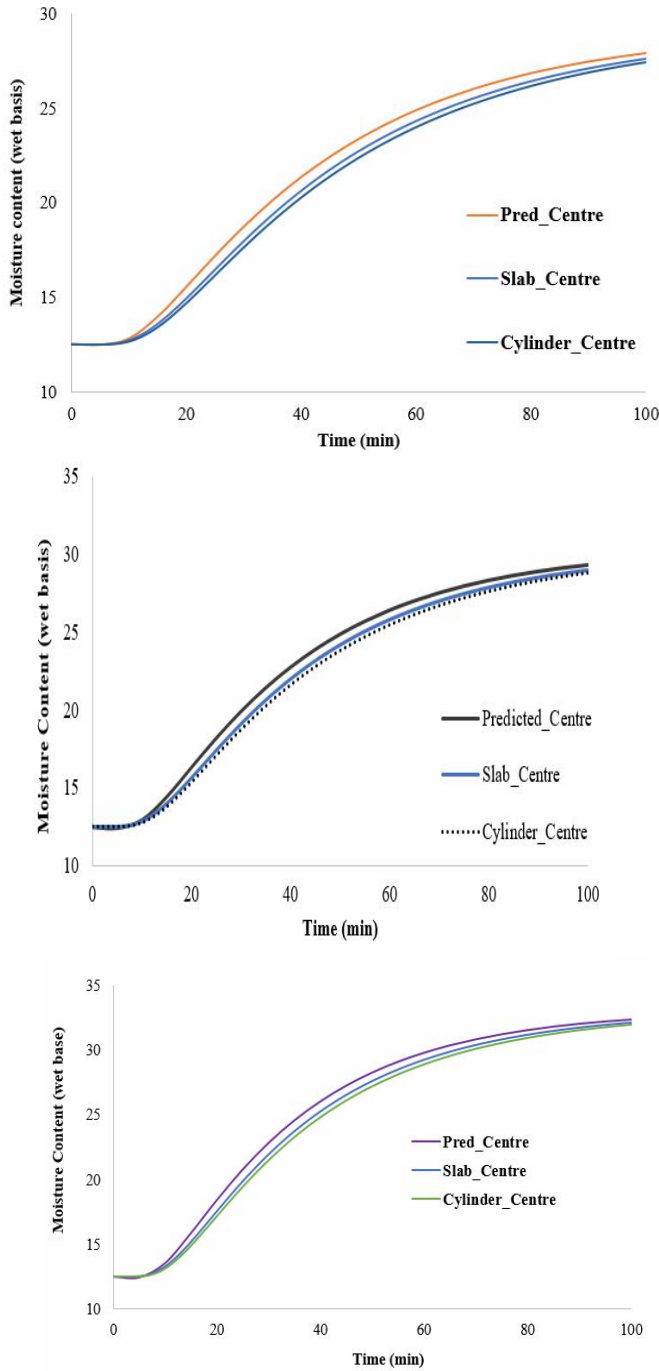


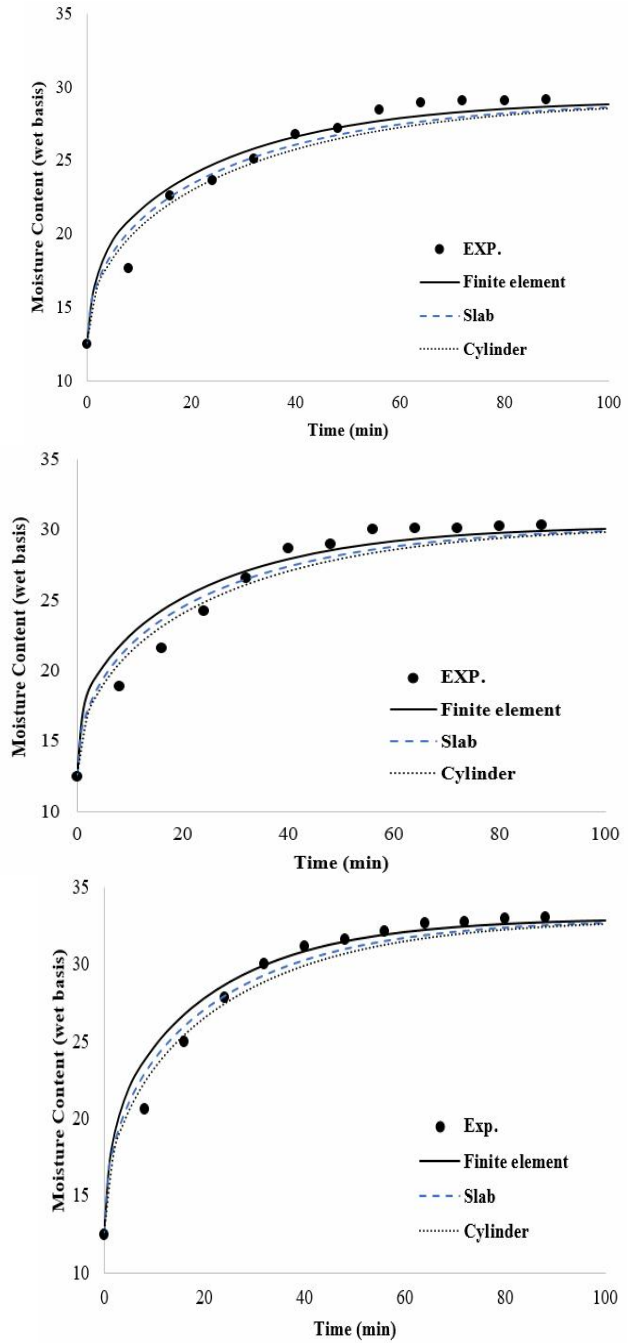
Fig 2 Kinetics of rice grain under different thermal conditions (25-65°C) during the soaking of the rice.

مقدار ضریب نفوذ موثر با به حداقل رساندن خطا بینداده‌های تجربی و عددی برآورد شد. این کار با استفاده از روش بهینه سازی سیمپلکس<sup>۷</sup> در نرم افزار MATLAB انجام شد [۹]. مقدار تخمین شده ضریب نفوذ موثر در دامنه درجه حرارت ۲۵-۶۵

## 7. Simplex Optimization Method



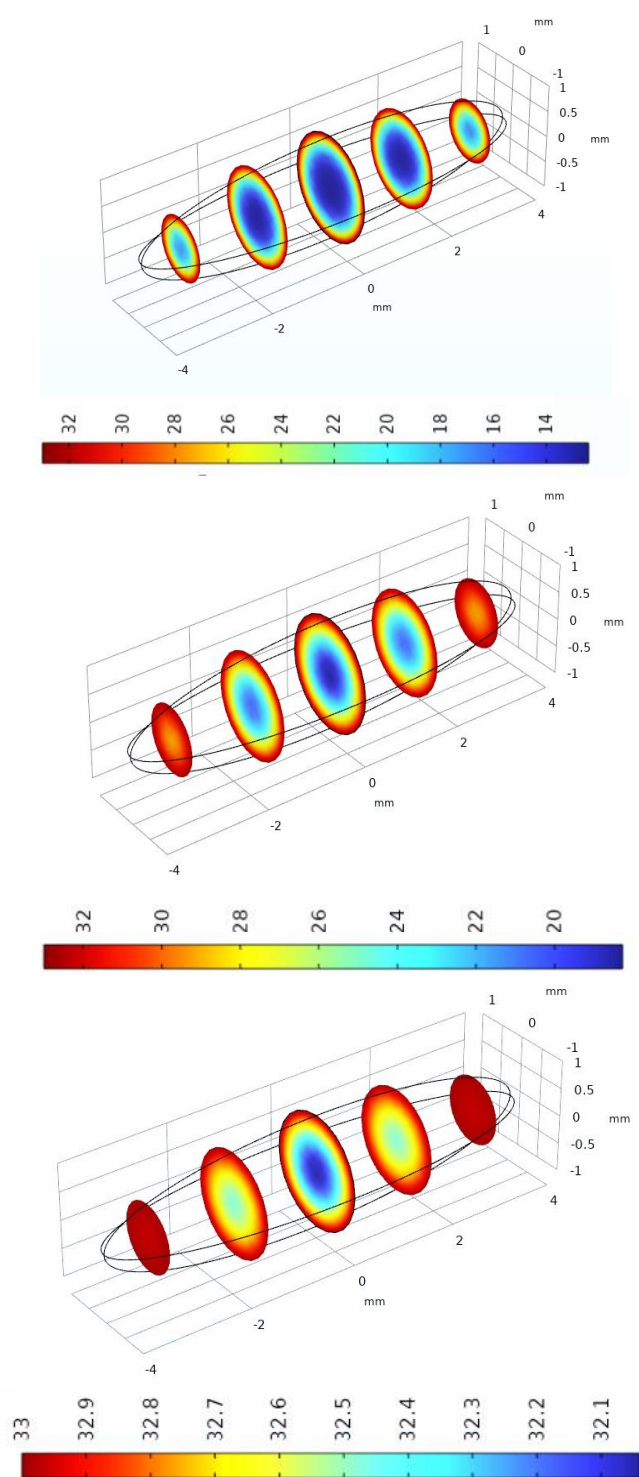
**Fig 4** Comparison of numerical and analytical predictions at centre point at three different temperatures (25, 45 and 60 °C)



**Fig 3** Comparison of numerical and analytical predictions with experimental results at 3 different temperatures (a= 25, b= 45 and c= 65 °C).

**Table 2** Statistical results obtained for two analytical and numerical models

Temp (°C)	Model	25		45		65	
		R <sup>2</sup>	MSE	R <sup>2</sup>	MSE	R <sup>2</sup>	MSE
	Numerical model	0.991	0.604	0.986	1.063	0.995	0.439
	Analytical model (Slab)	0.998	0.953	0.984	1.337	0.993	0.720
	Analytical model (Cylindrical)	0.990	1.13	0.986	1.398	0.994	0.815



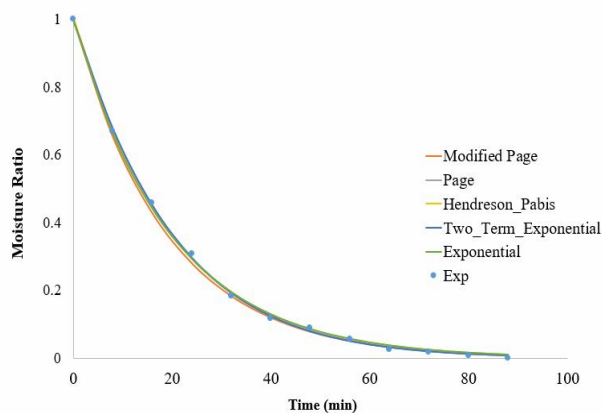
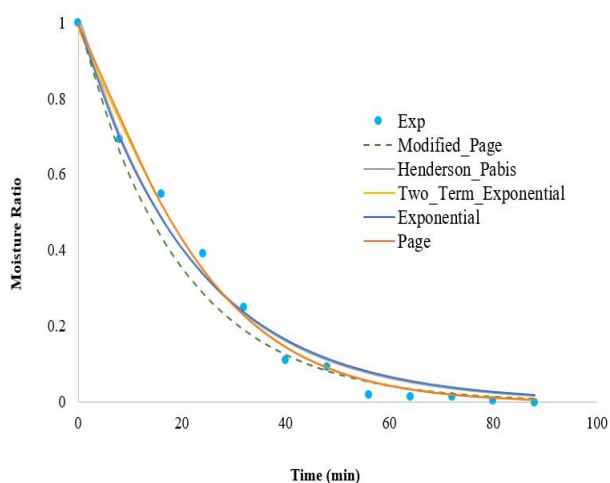
**Fig5** Contours of moisture content in the rice grains at 5, 20 and 90 minutes after soaking.

در شکل ۵ نمودارهای کانتور محتوای رطوبت در زمان‌های مختلف نشان داده شده است. می‌توان دید که رطوبت به آرامی توسط لایه مرزی جذب می‌شود و بیشترین و کمترین میزان رطوبت به ترتیب در لایه مرزی و مرکز هندسی دانه برنج قرار می‌گیرد. با افزایش مدت زمان خیساندن، جذب آب افزایش یافته و گرادیان اختلاف رطوبت بین نقاط مختلف به شدت کاسته می‌شود. برای مثال، بعد از ۵ دقیقه از شروع فرایند این اختلاف غلظت ۱۸ می‌باشد ولی با افزایش زمان خیساندن به ۹۰ دقیقه، این اختلاف به کمتر از یک واحد، می‌رسد که نشان دهنده رسیدن به حالت تعادلی در کلیه نقاط برنج می‌باشد. Takeuchi و همکاران (۱۹۹۷) با استفاده از رزونانس مغناطیسی هسته‌ای (NMR) جذب آب و توزیع رطوبت در دانه برنج را در حین جوشاندن مطالعه کردند و دریافتند که پروفیل رطوبت به دست آمده با حل معادله انتشار مشابه پروفیل رطوبت به دست آمده توسط دستگاه NMR است [۱۰ و ۱۸].

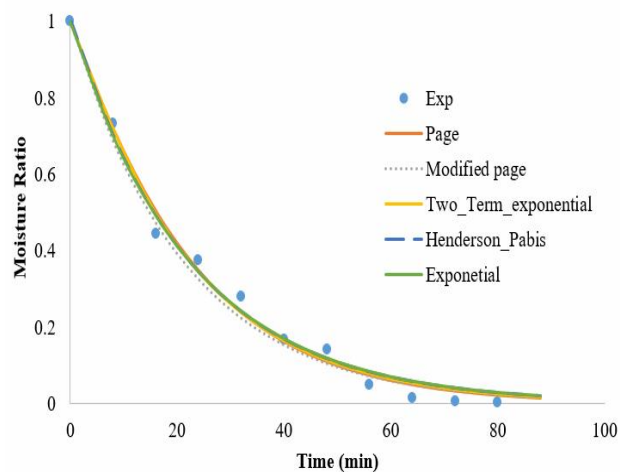
جدول ۳ و شکل ۶، مقادیر ضرایب ثابت ۵ مدل سینتیک جذب آب مورد مطالعه با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی برازش شده بودند را نشان می‌دهد. به منظور تعیین بهترین مدل از دو شاخص آماری ضریب تبیین (معادله ۸) و میانگین مربعات خطا (معادله ۹) استفاده شد. بر اساس این دو شاخص هر چه قدر ضریب تبیین بیشتر و میانگین مربعات خطا کمتر باشد، مدل مناسب‌تری برای توصیف تغییرات سینتیک جذب آب شناخته می‌شود [۱]. با توجه به دو شاخص فوق، اگر چه هر ۵ مدل، توانسته بودند با دقت خوبی تغییرات سرعت جذب آب نمونه را در دماهای مختلف پیش بینی نمایند، ولی بهترین مدل نمائی دو جمله‌ای انتخاب شد. ضرایب مدل دو جمله‌ای ( $A_1$  و  $A_0$ ) به ترتیب با افزایش دما روند کاهشی و افزایشی را نشان دادند.

**Table 3** Results of statistical analysis on the modeling of rehydration

Model	Temp. (°C)	Constant	R <sup>2</sup>	MSE
Exponential	25	k=0.044	0.991	9.48E-04
	45	k=0.045	0.989	1.42E-03
	60	k=0.050	0.999	1.03E-04
Henderson & Pabis	25	A=1.010 k= 0.044	0.990	9.35E-04
	45	A=1.022 k= 0.046	0.988	1.36E-03
	60	A=1.006 k=0.051	0.999	9.90E-05
Page	25	k=0.035 n= 1.065	0.990	8.56E-04
	45	k=0.023 n= 1.194	0.992	7.83E-04
	60	k=0.043 n=1.047	0.999	9.90E-05
Modified Page	25	k=0.0437 n=1.065	0.989	1.09E-04
	45	k=0.0433 n=1.192	0.980	2.49E-03
	60	k=0.0503 n= 1.047	0.998	1.69E-04
Two-term exponential	25	A <sub>0</sub> =-9.207 k <sub>0</sub> =0.061 A <sub>1</sub> =10.204 k <sub>1</sub> =0.059	0.991	8.34E-04
	45	A <sub>0</sub> =-9.424 k <sub>0</sub> =0.075 A <sub>1</sub> =10.410 k <sub>1</sub> =0.070	0.993	7.21E-04
	65	A <sub>0</sub> =-12.609 k <sub>0</sub> =0.067 A <sub>1</sub> =13.609 k <sub>1</sub> =0.066	0.999	5.44E-05



در مقایسه بین دو رویکرد در مدل سازی فرایند (بنیادی و تجربی)، مدل‌های بنیادی و بخصوص مدل عددی چون بر پایه تئوری فیزیکی، انتشار یا دیفوزیون استوار بودند، قادر به ارایه تحلیل دقیق‌تر در خصوص نحوه مکانیسم جذب رطوبت محصول بودند. در عین حال این مدل را می‌توان برای دانه های سایر غلات، با اندازه های متفاوت و شرایط اولیه و مرزی مختلف نیز براحتی تعمیم داد، ولی مدل‌های تجربی تنها در حدود شرایط مورد آزمون قابل استفاده هستند. علاوه بر این، در مدل های بنیادی بر خلاف مدل‌های تجربی، پارامترهای مدل، کمیته فیزیکی را ارائه می‌دهند که قابل اندازه گیری هستند، برای مثال پارامتر ضریب انتشار یا ضریب نفوذ [۱ و ۴].



**Fig 6** Comparison of moisture ratios determined by experimentation and prediction using different empirical models at three different temperatures (25, 45 and 65 °C)



بهترین برازش با داده های تجربی را نشان داد.  
 ۴- میزان ضریب نفوذ موثر با استفاده از روش معکوس برآورده شد و نتایج نشان داد که مقادیر این ضریب وابسته به درجه حرارت بوده و با افزایش دما روند صعودی را نشان داد. مقدار این ضریب در محدوده بین  $11 \times 10^{-11}$  -  $10^{-10}$  -  $10^{-10} \times 10^{-4}$  (متر مربع بر ثانیه) قرار داشت.  
 در ادامه این مطالعه به بررسی اثر انواع تیمارهای شیمیایی و مکانیکی و اثر آنها بر سرعت جذب آب و ضریب نفوذ پرداخته خواهد شد.

## ۵- منابع

- [1] Shafaei, S. M., Nourmohamadi-Moghadami, A., & Kamgar, S. (2016). Development of artificial intelligence based systems for prediction of hydration characteristics of wheat. *Computers and Electronics in Agriculture*, 128, 34-45.
- [2] Maskan, M. (2001). Effect of maturation and processing on water uptake characteristics of wheat. *Journal of Food Engineering*, 47(1), 51-57.
- [3] Feng, W., Fan, D., Li, K., Wang, T., Zhang, H., Zhou, X., Wan, J., & Wang, R. (2022). Removal of cadmium from rice grains by acid soaking and quality evaluation of decontaminated rice. *Food Chemistry*, 371, 131099.
- [4] Zhu, L., Cheng, L., Zhang, H., Wang, L., Qian, H., Qi, X., & Wu, G. (2019). Research on migration path and structuring role of water in rice grain during soaking. *Food Hydrocolloids*, 92, 41-50.
- [5] Maskan, M. (2002). Effect of processing on hydration kinetics of three wheat products of the same variety. *Journal of Food Engineering*, 52(4), 337-341.
- [6] Kalita, D., Jain, S., Srivastava, B., & Goud, V. V. (2021). Sono-hydro priming process (ultrasound modulated hydration): Modelling hydration kinetic during paddy germination. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105321.
- [7] Kashaninejad, M., Dehghani, A. A., & Kashiri, M. (2009). Modeling of wheat soaking using two artificial neural networks (MLP and RBF). *Journal of Food Engineering*, 91(4),

شکل ۷ تغییرات میزان رطوبت برنج به عنوان تابعی از زمان و قطر برنج را به صورت سه بعدی نشان می‌دهد. با استفاده از این نمودار می‌توان میزان رطوبت برنج در هر لحظه و به عنوان تابعی قطر دانه برنج معین نمود. همان‌طور که انتظار می‌رفت، با افزایش زمان میزان جذب آب نمونه افزایش نشان می‌دهد و بعد از حدود ۳۰ دقیقه به سمت شرایط تعادلی شدن پیش رفته است. علاوه بر این، سرعت جذب آب در نقطه مرکزی برنج کندتر از بقیه نقاط است و دیرتر به حالت تعادلی می‌رسد، در حالی که نقاط مرزی به سرعت جذب آب نموده است و بعد از مدت زمان بسیار کوتاهی به حالت تعادلی رسیده اند.

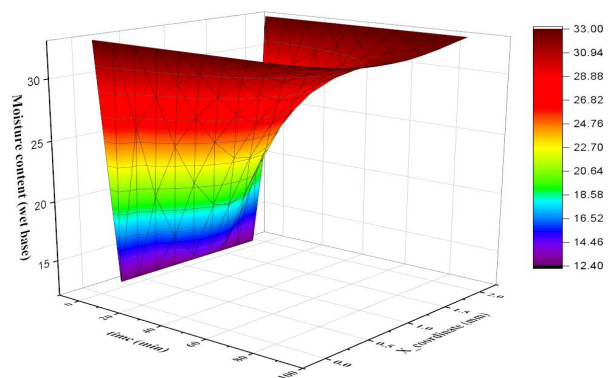


Fig 7 Predicted moisture content distribution during soaking at 45°C

## ۴- نتیجه گیری

در این مطالعه به بررسی فرایند جذب آب دانه برنج به عنوان تابعی از دمای ۲۵-۶۵ درجه سلسیوس پرداخته شد. در مرحله بعد دو رویکرد برای مدل‌سازی (بنیادی و تجربی) برای پیش بینی تغییرات میزان رطوبت به عنوان تابعی از دما و زمان توسعه داده شد. نتایج نشان داد که:

- ۱- با افزایش دما، سرعت جذب رطوبت و میزان رطوبت تعادلی دانه برنج افزایش نشان می‌دهد.
- ۲- در بین مدل‌های بنیادی، مدل عددی که بر اساس روش المان محدود حل شده بود، بهترین نتایج و تطابق با داده های تجربی را نشان داد. علت این موضوع می‌تواند به شکل هندسی دقیق‌تری که در این مدل مورد استفاده قرار گرفته بود، مرتبط باشد، زیرا بر اساس شکل واقعی نمونه توسعه داده شده بود.
- ۳- در بین ۵ مدل تجربی مورد آزمون، مدل نمایی دو جمله ای

- Journal of Cereal Science*, 91, 102855.
- [14] Yu, S., Ma, Y., Menager, L., & Sun, D.-W. (2012). Physicochemical Properties of Starch and Flour from Different Rice Cultivars. *Food and Bioprocess Technology*, 5(2), 626-637.
- [15] Dutta, H., Mahanta, C. L., Singh, V., Das, B. B., & Rahman, N. (2016). Physical, physicochemical and nutritional characteristics of Bhoja chaul, a traditional ready-to-eat dry heat parboiled rice product processed by an improvised soaking technique. *Food Chemistry*, 191, 152-162.
- [16] Roca, E., Broyart, B., Guillard, V., Guilbert, S., & Gontard, N. (2007). Controlling moisture transport in a cereal porous product by modification of structural or formulation parameters. *Food Research International*, 40(4), 461-469.
- [17] Takeuchi, S., Maeda, M., Gomi, Y.-i., Fukuoka, M., & Watanabe, H. (1997). The change of moisture distribution in a rice grain during boiling as observed by NMR imaging. *Journal of Food Engineering*, 33(3), 281-297.
- [18] Fan, D., Ma, S., Wang, L., Zhao, H., Zhao, J., Zhang, H., & Chen, W. (2013). <sup>1</sup>H NMR studies of starch-water interactions during microwave heating. *Carbohydrate Polymers*, 97(2), 406-412.
- [8] Kashaninejad, M., Maghsoudlou, Y., Rafiee, S., & Khomeiri, M. (2007). Study of hydration kinetics and density changes of rice (Tarom Mahali) during hydrothermal processing. *Journal of Food Engineering*, 79(4), 1383-1390.
- [9] Bakalis, S., Kyritsi, A., Karathanos, V. T., & Yanniotis, S. (2009). Modeling of rice hydration using finite elements. *Journal of Food Engineering*, 94(3), 321-325.
- [10] Prakash, B., & Pan, Z. (2012). Effect of Geometry of Rice Kernels on Drying Modeling Results. *Drying Technology*, 30(8), 801-807.
- [11] Dalvi-Isfahan, M. (2020). A comparative study on the efficiency of two modeling approaches for predicting moisture content of apple slice during drying. 43(11), e13527.
- [12] Kashaninejad, M., Chabra, D., Rafiee, Sh. Study of water absorption and physical properties changes of rice varieties during soaking process. 2008. *Journal of Agriculture and Natural Resources Sciences*. 15 (2). 163-175 [Persian].
- [13] Gong, M., Zhou, Z., Jin, J., Yu, Y., Liu, S., Han, X., Zhong, F., & Mao, J. (2020). Effects of soaking on physicochemical properties of four kinds of rice used in Huangjiu brewing. 602-607.



## Hydration Modeling of Rice (*Oryza Sativa*) by Empirical and Diffusion Models

Dalvi Isfahan, M. <sup>1\*</sup>

1. Assistant professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Jahrom University, Jahrom, Iran.

### ABSTRACT

In this study, water absorption characteristics of white rice during soaking at 25-65 °C was investigated. In the next step, the efficiency of fundamental and empirical models to predict the moisture content of grain during soaking were evaluated and compared. The fundamental models were developed by using analytical and numerical solutions of Fick's second law of diffusion based on regular shapes (cube and cylinder) and the real geometry of the white rice, respectively. Five empirical models (Henderson and Pabis model, exponential model, Page model, modified Page model and two-term exponential model) for explaining the soaking behavior of rice were also studied. The results of the studied models indicate that the numerical model were substantially more accurate than analytical model in describing the water absorption curves. The higher accuracy of numerical model can be attributed to the fact that this model selected appropriate shape to represent rice grains in the mathematical model. The average value of the effective water diffusivity at 25-65 °C was estimated to be in the order of  $8.83 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s, by minimizing the error between experimental and numerically predicted results. Among the empirical models, the two-term exponential model was better than others in predicting changes in sample moisture during soaking. Overall, although both modeling approaches were able to predict the changes in moisture content of the sample during soaking, the numerical model was found to be more appropriate because it provided a more comprehensive understanding of the underlying physics of the process and the model parameters were directly related to measurable physical quantities.

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received 2023/ 01/ 24

Accepted 2023/ 02/ 26

#### Keywords:

Rice,  
Hydration,  
Analytical model,  
Numerical model,  
Empirical model.

DOI: 10.22034/FSCT.20.134.87

DOR: 20.1001.1.20088787.1402.20.134.7.1

\*Corresponding Author E-Mail:  
dalvi@jahromu.ac.ir