



## تأثیر هندسه محصول بر روی مدل سازی دقیق انتقال حرارت میوه های دارای شکل نامنظم در حین فرایند آنزیم‌بری

محسن دلوی اصفهان<sup>۱\*</sup>، عبدالله همتیان<sup>۲</sup>

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

### چکیده

### اطلاعات مقاله

اُفت کیفیت در حین فرایند آنزیم‌بری را با انتخاب برنامه دما- زمان مناسب می‌توان به حداقل رساند. در این مطالعه، فرآیند آنزیم‌بری میوه توت سیاه در ۳ درجه حرارت منتخب بررسی شد. خصوصیات ترموفیزیکی بر اساس ترکیب شیمیایی نمونه تخمین زده شد. ضریب انتقال گرما همرفتی نیز با استفاده از یک تکنیک جدید به نام روش مسئله معکوس برآورد شد. به منظور تعیین بهترین مدلی که بتواند شکل میوه را توصیف کند و تغییرات دمایی را به طور دقیق پیش بینی کند، سه مدل تحلیلی بر اساس راه حل قانون دوم فوریه برای انتقال گرما روی اشکال منظم (کُره، مستطیل ۲ بعدی و استوانه محدود) و یک مدل عددی بر اساس هندسه واقعی نمونه توسعه داده شد. نتایج نشان داد که در بین مدل های تحلیلی، شکل مستطیل (دو بعدی) بهتر توانست تغییرات دما را در نقطه مرکزی نمونه پیش بینی کند. با این وجود، مدل عددی توسعه یافته به دلیل بالاترین ضریب تبیین ( $R^2 > 99$ ) و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا ( $RMSE=0.37$ ) به عنوان بهترین مدل شناخته شد. با استفاده از این مدل، تغییرات دما در میوه را می‌توان با دقت بالا به عنوان تابعی از متغیرهای داخلی (ضخامت و ترکیب شیمیایی) و خارجی (دما و سرعت حمام آب) پیش بینی کرد.

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۲

کلمات کلیدی:

توت سیاه،

آنزیم‌بری،

مدل سازی.

DOI: 10.52547/fsct.18.120.11

DOR: 20.1001.1.20088787.1400.18.120.11.3

مسئول مکاتبات:

[dalvi@jahromu.ac.ir](mailto:dalvi@jahromu.ac.ir)

## ۱- مقدمه

توت سیاه به عنوان یک منبع عالی از ترکیبات فعال زیستی از جمله آنتوسیانین و انواع فلاونوئیدها شناخته می‌شود. این ترکیبات به دلیل اثرات ضد التهابی و آنتی اکسیدانی قادر به کاهش و یا حتی پیشگیری بسیاری از بیماری‌ها از جمله انواع سرطان، دیابت و بیماری‌های قلبی هستند. در این بین، برخی عوامل از جمله نور، pH و بویژه برخی آنزیم‌ها از جمله پراکسیدازها و پلی فنل اکسیدازها قادر به تخریب این ترکیبات فعال زیستی هستند. بنابراین قبل از ذخیره سازی و یا انجام هر نوع عملیات واحدی در صنعت غذا، غیرفعال سازی این آنزیم‌ها از اهمیت برخوردار است. فرایند بلانچینگ یا آنزیم بری، یک تیمار حرارتی محسوب می‌شود که معمولاً قبل از فراوری محصول صورت می‌گیرد و علاوه بر حفظ رنگ، بافت و ارزش غذایی محصول، در کاهش تعداد میکروارگانیسم‌ها و حذف آنزیم‌های مخرب نیز موثر است [۱]. در مقابل این مزایا، اگر مدت زمان و دمای این فرایند به درستی تعیین نشود، می‌تواند باعث افت ارزش غذایی و تخریب مواد زیستی فعال، تخریب بافت و رنگ محصول نیز بشود. ذکر این نکته نیز حائز اهمیت است که در بسیاری موارد افت ارزش غذایی در مراحل آماده سازی میوه‌ها و سبزیجات بیشتر از فرایند اصلی مثل خشک کردن و یا انجماد می‌باشد برای مثال، میزان افت ویتامین ث به عنوان یک ترکیب محلول در آب در میوه‌ی سیب در حین آنزیم بری حدود ۶۲٪ گزارش شده است در حالی که میزان افت این ماده مغذی در حین فرایند اصلی خشک کردن صرفاً حدود ۵٪ گزارش شده است [۲]. مدل سازی ریاضی ابزاری بسیار مفید برای مطالعه تأثیر متغیرهای فرایند بر ایمنی محصول و حفظ کیفیت محصولات غذایی است و مدل سازی فرایندهای حرارتی انتقال حرارت می‌تواند به انتخاب شرایط بهینه فرایند و جلوگیری از فراوری بیش از حد<sup>۱</sup> و یا فراوری ناقص<sup>۲</sup> کمک شایانی نماید [۳]. Fasina و Fleming (۲۰۰۱) با حل معادله انتقال حرارت (قانون دوم فوریه) به روش عددی (تفاضل محدود) در مختصات استوانه‌ای توانستند تغییرات دما در حین آنزیم بری

خیار را تعیین نمایند [۴]. Buyel (۲۰۱۶) نیز از شبیه سازی عددی برای توصیف آنزیم بری برگ‌های تنباکو به طور موفقیت آمیزی استفاده کرد [۵].

مرحله اول برای مدل سازی، رسم هندسه<sup>۳</sup> محصول است، که می‌تواند چالش‌هایی نیز همراه داشته باشد. در ساده‌ترین حالت، شکل جسم با برخی اشکال ساده هندسی (استوانه، گره، مکعب و...) تقریب زده می‌شود ولی امروزه روشهای جدیدتری از جمله اسکن با لیزر<sup>۴</sup> [۶]، سی تی اسکن<sup>۵</sup> [۷]، بینایی رایانه‌ای [۸]، روش مهندسی معکوس مبتنی بر طراحی مقطع عرضی<sup>۶</sup> [۹]، تصویربرداری رزونانس مغناطیسی<sup>۸</sup> [۱۰]، و استفاده از چاپگرهای سه بعدی برای اشکال غیر منظم در صنایع غذایی توسعه داده شده است. استفاده از هندسه های ۳-بعدی اگر چه دقت محاسبات را به شدت افزایش می‌دهد ولی باعث افزایش قابل توجه زمان محاسبات نیز می‌شود [۱۱]. در حوزه مهندسی صنایع غذایی این موضوع تحت عنوان، مدل سازی هندسی<sup>۹</sup> شناخته می‌شود که طبق تعریف، فرآیندی است که هدفش توصیف ریاضی از شکل واقعی یک جسم می‌باشد، این مرحله در مدل سازی ریاضی فرآیندهای مواد غذایی برای اهداف بیشتر طراحی و بهینه سازی مورد نیاز است [۱۱].

بعد از شکل و هندسه، عامل بعدی که به شدت بر روی دقت مدل‌های فرایند حرارتی موثر است، تخمین و برآورد پارامترهای مدل (هدایت حرارتی، گرمای ویژه و دانسیته) و بویژه ضریب انتقال حرارت همرفتی می‌باشد. بر اساس مطالعه انجام شده توسط Becker و Fricke (۲۰۰۶) مهمترین منبع خطا در حین مدل سازی فرایند مواد غذایی، تعیین دقیق ضریب انتقال حرارت همرفتی می‌باشد [۱۲]. این ضریب به عوامل بسیاری بستگی دارد که آن‌ها را می‌توان به سه دسته کلی (۱) هندسه سطح جامد (۲) سرعت و ویژگی‌های حرارتی سیال و (۳) اختلاف دمای بین سیال و سطح جامد تقسیم بندی نمود ولی به جز عوامل فوق پارامترهای دیگری از جمله جهت جریان گرما و موقعیت سیال

3. Geometry
4. Laser scanning
5. Computed tomography scanning
6. Computer vision
7. Reverse engineering method based on surface cross-sectional design
8. Magnetic resonance imaging
9. Geometrical modeling

1. Over processing
2. Under processing

دقیقه قبل از شروع آزمون روشن شد و از اختلاط و اغتشاش حمام در حین آزمون جلوگیری به عمل آمد [۱۳].

## ۲-۲- تعیین ضریب انتقال حرارت در سطح

برای تعیین ضریب انتقال حرارت در سطح از روش مسئله معکوس و الگوریتم SQP<sup>۲</sup> استفاده شد، در الگوریتم حل مذکور از روش های گرادیانی بهره گرفته می شود، بطوری که مشتقات جزئی مرتبه اول را به عنوان ورودی دریافت می کند و برای محاسبه مشتقاتی که در دسترس نیستند، از روش تفاضل محدود استفاده می کند. برای آنزیم بری در حمام آب گرم با توجه به منابع، محدوده جستجو بین ۳۰۰-۶۰۰ وات بر مترمربع کلوین تعیین شد. این الگوریتم در نرم افزار متلب و یا فملب قابل اجرا است [۱۵].

## ۲-۳- تعیین خصوصیات ترموفیزیکی محصول

میزان هدایت حرارتی محصول به عنوان تابعی از دما و ترکیب شیمیایی نمونه با استفاده از دو مدل سری و موازی تخمین و مقدار متوسط در مدل مورد استفاده قرار گرفت.

$$k_{pa} = \sum_{i=1}^N k_i v_i \quad (1)$$

$$k_{se} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{v_i}{k_i}} \quad (2)$$

$$v_i = \frac{x_i / \rho_i}{\sum (x_i / \rho_i)} \quad (3)$$

در روابطه فوق  $k$  و  $\rho$  هدایت حرارتی و دانسیته محصول،  $k_i$  و  $\rho_i$  هدایت حرارتی و دانسیته اجزای شیمیایی تشکیل دهنده توت سیاه،  $x_i$  کسر جرمی ترکیبات شیمیایی و  $v_i$  کسر حجمی ترکیبات می باشند. دانسیته و گرمای ویژه میوه نیز با توجه به ترکیب شیمیایی محصول و با استفاده از روابط ۴ و ۵ معین شدند [۱۶].

$$\rho = \frac{1}{\sum x_i / \rho_i} \quad (4)$$

$$Cp = \sum Cp_i x_i \quad (5)$$

در رابطه فوق،  $Cp$  و  $Cp_i$  به ترتیب گرمای ویژه محصول و گرمای ویژه تک تک اجزای محصول می باشد.

روی سطح ماده جامد (به خصوص در اشکال نامنظم) موجب شده است که اندازه گیری و تخمین این پارامتر با دشواری بسیار همراه باشد [۱۳] و روش هایی از جمله تخمین با روابط تجربی و یا اندازه گیری دمای گذار با خطای همراه باشد. اخیراً استفاده از روش مسئله معکوس برای تخمین این پارامتر پیشنهاد شده است. در یک مسئله معکوس از طریق اندازه گیری های گسسته ای از متغیر وابسته در داخل دامنه با شرایط اولیه و مرزی مشخص، تلاش می شود ثابت های نامعلوم (ضریب انتقال حرارت در سطح) تعیین شود، این روش به طور موفقیت آمیزی توسط Ebrahimnia-Bajestan و همکاران (۲۰۱۲) بکارگرفته شده است [۱۴].

هدف از این تحقیق، تعیین توسعه یک مدل انتقال حرارت گذرا برای فرایند آنزیم بری میوه توت سیاه بر اساس شکل واقعی میوه می باشد، بدین منظور چندین مدل مختلف تحلیلی و یک مدل عددی که در نرم افزار COMSOL توسعه داده شده است با هم مقایسه خواهند شد، برای تعیین ضریب انتقال حرارت در سطح نیز از روش تخمین پارامتر (مسئله معکوس) استفاده شده است.

## ۲- مواد و روش ها

### ۲-۱- آنزیم بری

میوه توت سیاه از بازار محلی در اصفهان تهیه شد. میزان رطوبت، پروتئین، چربی و خاکستر نمونه با استفاده از روش های آون گذاری، کلدال، سوکسله و کوره الکتریکی تعیین شد، میزان محتوای کربوهیدراتی نمونه از اختلاف جمع سایر اجزاء از صد درصد تخمین زده شد، جدول (۱) متوسط ترکیب شیمیایی نمونه را بعد از سه تکرار نشان می دهد. ترموکوپل نوع (K) در نقطه مرکزی نمونه قرار گرفت ولی به دلیل نرم بودن بافت محصول، محل دقیق ترموکوپل بعد از آزمون و با استفاده از کولیس مشخص شد. اندازه گیری دما در فواصل ۵ ثانیه یکبار و توسط ثبات شرکت تستو<sup>۱</sup> مدل ۱۷۶۳ اندازه گیری شد. آزمون آنزیم بری در حمام آب گرم با دمای ۷۰، ۸۰ و ۹۰ (دقت  $\pm 2$ ) درجه سلسیوس انجام شد. به منظور یکنواختی دما، حمام به مدت ۲۰

## ۲-۴- مدل سازی

برای بخش مدل سازی از دو روش مدل تحلیلی و مدل عددی استفاده شد، که در ادامه توضیح داده می شود.

### ۲-۴-۱- مدل سازی انتقال حرارت به روش تحلیلی<sup>۱</sup>

به منظور حل معادله انتقال حرارت در شرایط گذرا (ناپایا) از حل تحلیلی معادله دوم فوریه استفاده شد و با توجه به شکل توت سیاه و به منظور تعیین بهترین شکلی که بتواند تغییرات دما در توت سیاه در حین آنزیم بری را توصیف کند، معادله تحلیلی برای سه شکل منظم (مستطیل، گره و استوانه محدود) استفاده شد. شکل کلی معادله تحلیلی که تغییرات دما در میوه را به عنوان تابعی از زمان و مکان نشان می دهد در معادله ۶ آورده شده است.

$$\frac{T(x,t)-T_{\infty}}{T_o-T_{\infty}} = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ C_n(x) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{\alpha t}{L^2}\right) \right] \quad (6)$$

که در رابطه فوق، جمله  $C_n$  با توجه به شکل هندسی مورد نظر متفاوت می باشد و معادلات ۷-۹ به ترتیب برای اشکال صفحه، استوانه نامحدود و گره استفاده می شود [۱۷].

(۷)

$$C_n(x) = \frac{2[\sin(\mu_n) - \mu_n \cos(\mu_n)]}{\mu_n - \sin(\mu_n) - \cos(\mu_n)} \cdot \frac{\sin\left(\mu_n \cdot \frac{x}{L}\right)}{\mu_n \cdot \frac{x}{L}} \quad (8)$$

$$C_n(x) = \frac{2J_1(\mu_n)}{\mu_n + [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]} J_0^2\left(\mu_n \cdot \frac{x}{L}\right) \quad (9)$$

$$C_n(x) = \frac{2\sin(\mu_n)}{\mu_n + \sin(\mu_n)\cos(\mu_n)} \cos\left(\mu_n \cdot \frac{x}{L}\right)$$

در رابطه های بالا  $\mu_n$ ، ریشه های معادلات ۱۰-۱۲ می باشد. که در این معادلات  $B_i$  عدد بیوت<sup>۲</sup> و  $J_0$  و  $J_1$  توابع بسل<sup>۳</sup> از درجه صفر و یک می باشد [۱۸].

$$N_{Bi} = \mu \cdot \tan(\mu) \quad (10)$$

$$N_{Bi} = \mu \cdot \frac{J_1(\mu)}{J_0(\mu)} \quad (11)$$

$$N_{Bi} = 1 - \frac{\mu}{\tan(\mu)} \quad (12)$$

اگر شکل هندسی جسم مورد نظر، استوانه محدود و یا مستطیل (دو بعدی) باشد می توان به ترتیب از رابطه های ۱۳ و ۱۴ استفاده نمود. برای مثال، استوانه محدود را می توان از تقاطع یک استوانه بی نهایت با یک صفحه بی نهایت بدست آورد.

(۱۳)

$$\frac{T(x,r,t)-T_{\infty}}{T_o-T_{\infty}} = \left(\frac{T(x,t)-T_{\infty}}{T_o-T_{\infty}}\right)_x \times \left(\frac{T(r,t)-T_{\infty}}{T_o-T_{\infty}}\right)_r$$

(۱۴)

$$\frac{T(x,y,t)-T_{\infty}}{T_o-T_{\infty}} = \left(\frac{T(x,t)-T_{\infty}}{T_o-T_{\infty}}\right)_x \times \left(\frac{T(y,t)-T_{\infty}}{T_o-T_{\infty}}\right)_y$$

### ۲-۴-۲- مدل سازی انتقال حرارت به روش عددی<sup>۴</sup>

در مدل سازی عددی ابتدا هندسه میوه طراحی شد بدین منظور قطر و طول بیش از ۵۰ میوه با استفاده از کولیس اندازه گیری شد و قطر و طول میانگین میوه ها برای هندسه نهایی در نظر گرفته شد. معادلات حاکم، شرایط مرزی و شرط اولیه به صورت زیر در نظر گرفته شد.

الف) معادله حاکم

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) \quad (15)$$

ب) شرایط مرزی

$$T(r,l,t) = h_m \Delta(T) \quad (16)$$

ج) شرط اولیه

$$T = T_o \quad (17)$$

کلیه معادلات انتقال حرارت در نرم افزار COMSOL 5.5 مدل سازی شد. وابستگی دمایی معادلات مذکور به خصوصیات ترموفیزیکی به جز ضریب انتقال حرارت در سطح در مدل در

4 Numerical method

1 Analytical method  
2 Biot number  
3 Bessel function

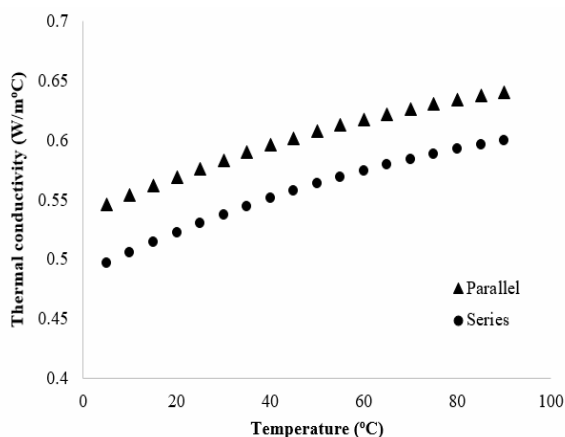
دهد، ویژگی‌های حرارتی میوه در جدول (۲) نشان داده شده است. همانطور که در بخش مواد و روش‌ها توضیح داده شد، هدایت حرارتی میوه با استفاده از دو مدل سری و موازی تخمین زده شد. با توجه به اینکه مدل موازی، حد بالا و یا حداکثر میزان ضریب هدایت حرارتی و مدل سری حداقل یا حد پایین این ضریب را برآورد می‌کند (شکل ۲)، می‌توان توقع داشت که مقدار واقعی در حد فاصل بین دو حد قرار می‌گیرد، بدین منظور متوسط یا میانگین این دو حد به عنوان مقدار هدایت حرارتی در مدل مورد استفاده قرار گرفت [۱۶].

**Table 1** Chemical composition of sample

Chemical composition	Percentage (%)
Moisture	87.3±0.20
Protein	1.35±0.15
Total lipid	0.5±0.11
Ash	0.37±0.14
Total carbohydrate*	10.48
±std 100-(Moisture+protein+lipid+ash)	

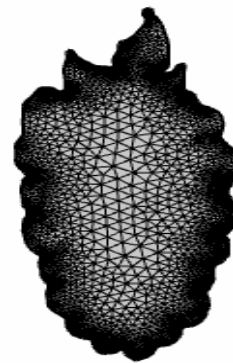
**Table 2** Parameters used in the model

Parameter	Value
Initial freezing point	-0.59 °C
Thermal conductivity	0.582 W/m. °C
Specific heat	3.875 kJ/kg. °C
Density	1038 kg/m <sup>3</sup>
Convective heat transfer coefficient	401.5 W/m <sup>2</sup> °C
Initial temperature	25 °C
Ambient temperature	70, 80 and 90 °C



**Fig 2** variations of thermal conductivity predicted by series and parallel models as a function of temperature

نظر گرفته شد. کلیه پارامترهای مورد استفاده در مدل در جدول ۲ آورده شده است. برای مش بندی ۹۱۴۹ مش مثلثی با توجه به دو بعدی بودن شکل در نظر گرفته شد. شکل (۱) هندسه و مش بندی نهایی بکار گرفته شده برای مدل سازی عددی را نشان می‌دهد [۱۹].



**Fig 1** Geometry and meshing of the fruit

## ۲-۵- تجزیه و تحلیل آماری

دو معیار آماری، ضریب تبیین ( $R^2$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای ارزیابی تناسب بین مدل با داده های تجربی (آزمایشی) مورد استفاده قرار گرفت [۱۱].

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (T_{pre,i} - T_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (T_{pre,i} - T_{pre,i})^2} \quad (18)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_{exp,i} - T_{pre,i})^2}{N}} \quad (19)$$

در روابط بالا  $T_{pre,i}$  و  $T_{exp,i}$  به ترتیب دمای پیش بینی شده توسط مدل های تحلیلی و یا عددی و دمای اندازه گیری شده و N تعداد مشاهدات می باشد.

## ۳- نتایج و بحث

ترکیب شیمیایی میوه در جدول (۱) نشان داده شده است، همان طور که انتظار می رفت دو ترکیب اصلی در میوه رطوبت و کربوهیدرات می باشد. میزان بالای رطوبت در میوه باعث می شود که میزان هدایت حرارتی محصول افزایش قابل توجهی نشان

تحت تأثیر ضریب انتقال حرارت در محدوده ۵۰۰ و ۶۰۰۰ وات بر متر مربع تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد [۴]. شکل (۳، ۴ و ۵)، مقایسه بین تغییرات دمای اندازه‌گیری شده با مقادیر پیش بینی شده با مدل‌های تحلیلی و عددی در سه دمای مختلف آنزیم بری (۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سانتیگراد) را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد بهترین مدل تحلیلی که قادر است

تغییرات دما در حین فرایند آنزیم بری میوه را پیش بینی نماید، شکل مستطیل است. به عبارت دیگر بین سه شکل استوانه محدود، گره و مستطیل، شکل میوه توت سیاه حالت مستطیل دارد. در ضمن در همه دماها، مدل تحلیلی بر مبنای شکل استوانه محدود حد بالای دما و مدل تحلیلی بر مبنای شکل گره، حد پایین تغییرات دما در نمونه را پیش بینی می‌نماید.

در مقایسه بین مدل تحلیلی و مدل عددی، مدل عددی بهتر توانسته است تغییرات دما را پیش بینی نماید به طوریکه کمترین میزان ضریب تبیین ( $R^2$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی به ترتیب بالای ۰/۹۹ و ۰/۳۷ برای دمای ۹۰ سانتیگراد می‌باشد در حالی که این دو شاخص برای مدل تحلیلی (مستطیل) به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۵۴ در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد است. همان‌طور که از اشکال دیده می‌شود با افزایش دما، انطباق بین داده‌های تجربی و داده‌های پیش‌بینی شده کمی کاهش یافته است که این موضوع می‌تواند به دلایل متفاوتی از جمله افزایش نرمی بافت میوه در حین حرارت دهی و بخصوص با افزایش درجه حرارت حمام مرتبط باشد که محل قرارگیری ترموکوپل در مرکز نمونه را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲۲]. منبع دیگر خطا نیز می‌تواند به دلیل ثابت فرض کردن ضریب انتقال حرارت همرفتی در تمامی شبیه سازی‌ها مرتبط باشد، همان‌طور که می‌دانیم با افزایش اختلاف دمای بین سیال (آب) و دمای سطح ماده غذایی، مقدار این ضریب افزایش نشان می‌دهد. نتایج مشابهی توسط Uyar و Erdogdu (۲۰۱۲) گزارش شد، که مقادیر RMSE را بین ۰/۲۶ - ۰/۴۹ گزارش نمودند.

با توجه به فاکتورهای زیادی که بر روی ضریب انتقال حرارت همرفتی اثر می‌گذارد، از روش مسئله معکوس برای برآورد این ضریب استفاده شد. پایان کار این الگوریتم، می‌تواند بر اساس تعداد تکرار<sup>۱</sup> و یا رسیدن به خطای مشخص تعریف شده در الگوریتم تعیین شود. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود بعد از ۶ بار تکرار، میزان خطا به حدود ۰/۰۰۰۲۲۷ رسیده است که پایان الگوریتم را باعث شده است بر اساس این روش مقدار ضریب انتقال حرارت همرفتی عدد ۴۰۱/۵ وات بر متر مربع کلونین تعیین شده است بر اساس منابع، Scheerlinck و همکاران (۲۰۰۴) مقدار این ضریب را در حین گرمایش توت فرنگی به منظور حذف آلودگی سطحی با آب گرم ۵۹۰ وات بر متر مربع کلونین گزارش دادند [۲۰]. Alhamdan و Sastry (۱۹۹۰) نیز میزان این ضریب را بین ۷۵-۳۱۰ وات بر متر مربع کلونین گزارش کردند [۲۱].

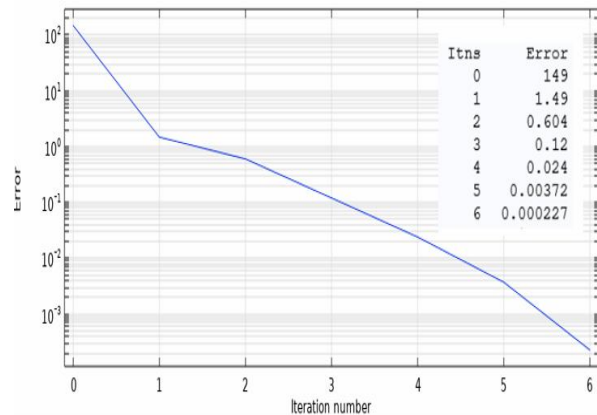
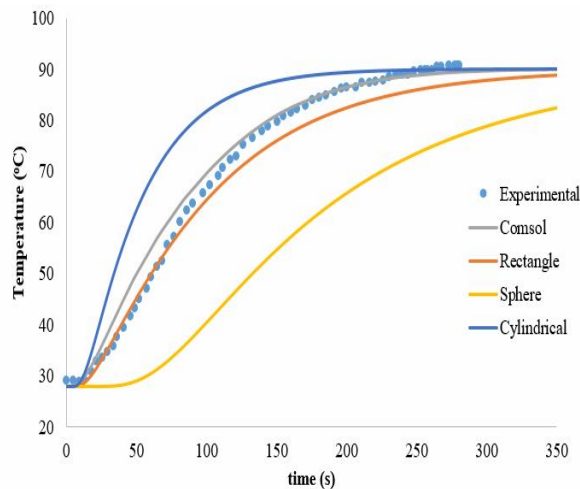


Fig 3 The relationship curve of Error and iteration number

اختلاف بین نتایج بستگی به فاکتورهای مختلفی از جمله مجهز بودن حمام به سیرکولاتور، دما، ابعاد نمونه و ... دارد. Fasina و Fleming (۲۰۰۱) نیز در مطالعه خود نشان دادند که در حین آنزیم بری خیار در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد، دمای متوسط خیار

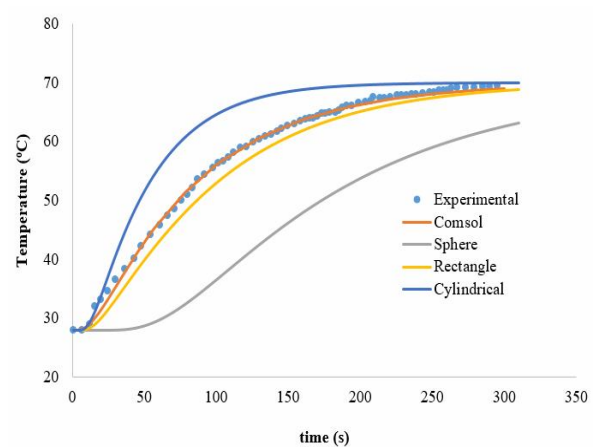


**Fig 6** Comparison of temperature determined by experimentation and prediction using analytical and numerical models at 90 °C

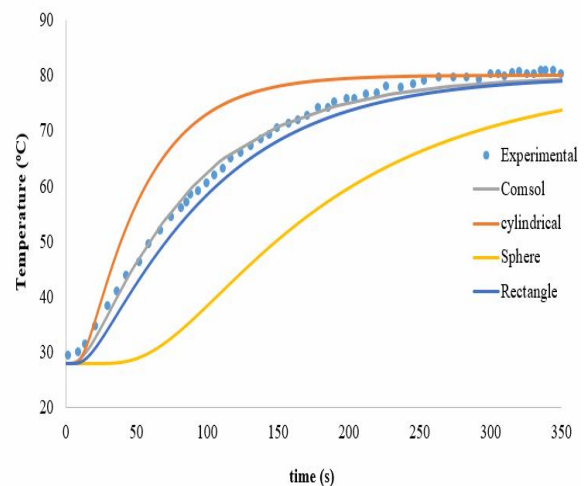
شکل (۷)، توزیع دمای به دست آمده از مدل عددی در حین آنزیم بری میوه در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد پس از مدت زمان، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ ثانیه را نشان می‌دهد. همان‌طور که از تصاویر مشاهده می‌شود دمای نقطه سرد از ۶۹/۶ درجه سانتیگراد در پایان ۱۰۰ ثانیه اول گرمایش به ۸۹/۶۵ درجه سانتیگراد در پایان زمان فرایند حرارتی (۳۰۰ ثانیه) افزایش یافته است. نکته دیگری که از شکل مشاهده می‌شود، شکل توزیع دما حالت سهموی نشان را می‌دهد که به دلیل هندسه و شکل میوه می‌باشد، نتایج مشابهی توسط Francisco و Mauricio (۲۰۱۷) گزارش شده است [۲۳]. چنین نموداری این امکان را در اختیار قرار می‌دهد که مقدار دمای هر نقطه از نمونه را به عنوان تابعی از زمان فرایند براحتی تعیین نمود.

نمودار (۸) نیز که تغییرات دما در حین فرایند حرارتی در راستای طول میوه را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. مهمترین کاربرد این نمودار در تعیین زمان پایان فرایند حرارتی می‌باشد، همان‌طور که از شکل نیز مشخص است بعد از ۲۴۰ ثانیه از فرایند حرارتی در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد تغییرات دما در نقاط

در تحقیق دیگری که توسط Francisco و Mauricio (۲۰۱۷) برای مدل سازی آنزیم بری دو سبزی لوج ۱ و سیب زمینی با روش مدل سازی عددی (تفاضل محدود<sup>۲</sup>) و بر مبنای شمای صریح<sup>۳</sup> صورت گرفته است، نتایج از همگرایی خوب بین نتایج مدل و نتایج آزمایشگاهی خبر می‌دهد به طوری که میزان ریشه میانگین مربعات خطا در این سیستم نیز در محدوده (۰/۳۲۹ - ۵/۱۱۹) گزارش شده است، البته در این مطالعه نمونه سبزیجات به صورت مکعب، برش زده شده بود [۲۳].



**Fig 4** Comparison of temperature determined by experimentation and prediction using analytical and numerical models at 70 °C



**Fig 5** Comparison of temperature determined by experimentation and prediction using analytical and numerical models at 80 °C

1. loche (*Cucurbita moschata* Duch.)
2. Finite difference
3. Explicit scheme

مختلف میوه کامل روند یکسانی را نشان می دهد، به عبارت دیگر

دما در نقاط مختلف نمونه نشان نمی دهد.

افزایش مدت زمان فرایند از این زمان به بعد تاثیری در تغییرات

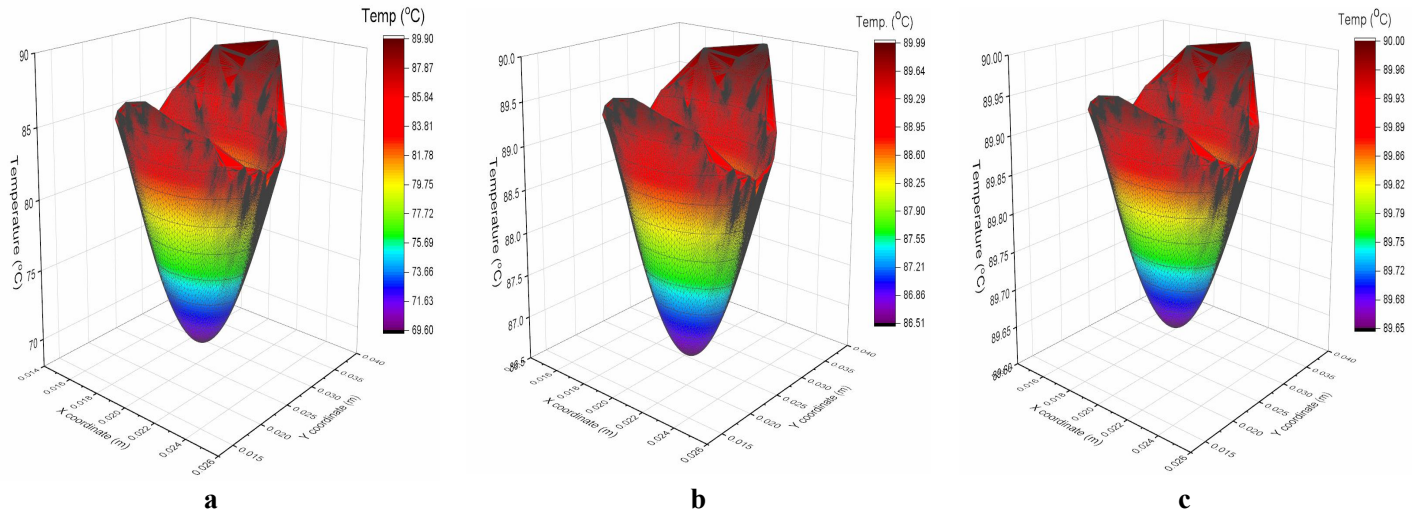


Fig 7 Predicted temperature distribution during blanching at 90°C after (a) 100 s, (b) 200 s, and (c) 300 s.

#### ۴- نتیجه گیری

با استفاده از داده های چنین نموداری روند غیرفعال سازی آنزیم هایی چون پراکسیداز و پلی فنل اکسیداز در نمونه را می توان براحتی برآورد نمود.

در این مطالعه به بررسی اثر شکل و هندسه میوه در پیش بینی تغییرات دمای میوه توت سیاه در حین آنزیم بری پرداخته شد. نتایج نشان داد که در بین مدل های تحلیلی، مدلی که شکل نمونه را به صورت مستطیل در نظر می گرفت بهتر توانست تغییرات دما را پیش بینی نماید، ولی مدل عددی بدلیل آنکه شکل دقیق تری از میوه را در محاسبات عددی در نظر گرفته است، بالاترین دقت را در پیش بینی دما نشان داد. با بکارگیری این مدل می توان تغییرات دما در حین فرایند های حرارتی میوه را به عنوان تابعی از عوامل مختلف از جمله ضخامت، ترکیب شیمیایی، درجه حرارت حمام، سرعت آب در حمام و.. به سادگی تعیین نمود. چنین مدلی علاوه بر آنکه دید بهتری در خصوص مکانیسم انتقال حرارت در محصول در اختیار قرار می دهد، بر اهمیت تعیین شکل درست در محاسبات و مدل های انتقال حرارت نیز تاکید دارد. در ادامه این پژوهش و با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق به بررسی سینتیک تخریب آنتوسیانین ها به عنوان مهمترین مواد زیستی فعال در این میوه و همچنین سینتیک غیرفعال سازی آنزیم پراکسیداز در حین فرایند حرارتی آنزیم بری پرداخته خواهد شد.

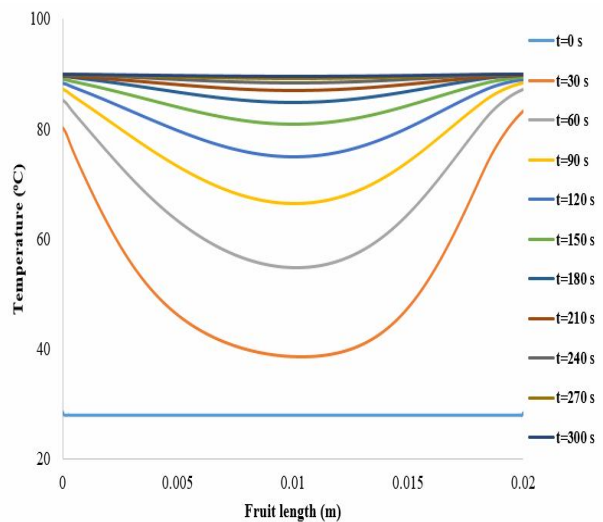


Fig 8 Results obtained from numerical model in predicting temperature in a fruit sample as a function of time and Sample height at 90°C



## ۵- فهرست علائم و اختصارات

NOMENCLATURE		
Bi	Biot number	عدد بیوت
C <sub>p</sub>	Specific heat (kJ/kg K)	گرمای ویژه (kJ/kg K)
h <sub>m</sub>	Convective heat transfer coefficient (W/m <sup>2</sup> K)	ضریب انتقال حرارت همرفتی (W/m <sup>2</sup> K)
J <sub>0</sub> , J <sub>1</sub>	Bessel function of zero and first order	تابع بسل درجه صفر و یک
k	Thermal conductivity (W/m K)	هدایت حرارتی (W/m K)
l	Axial coordinates	مختصات محوری
L	Length (m)	طول (متر)
N	Number of observations	تعداد مشاهدات
r	Radial coordinates	مختصات شعاعی
R <sup>2</sup>	Coefficient of determination	ضریب تبیین
RMSE	Root mean square error	ریشه میانگین مربعات خطا
T	Temperature (°C)	دما (°C)
t	Time (s)	زمان (s)
x	Mass fraction of fruit component	کسر جرمی اجزای میوه
<b>Greek Letters</b>		
α	Thermal diffusivity (m <sup>2</sup> /s)	نفوذ حرارتی (m <sup>2</sup> /s)
v	Volume fraction of fruit component	کسر حجمی اجزای میوه
ρ	Density (kg/m <sup>3</sup> )	دانسیته (kg/m <sup>3</sup> )
μ	Eigenvalues (or roots) of equation	مقادیر ویژه (ریشه های) معادلات
∞	Ambient	محیط
<b>Subscripts</b>		
i	Initial, ingredient	اولیه، اجزاء
exp	experimental	آزمایشی
pa	Parallel	موازی
pre	predicted	پیش بینی شده
se	Series	سری

*Technology (Third Edition)* (pp. 481-524): Woodhead Publishing.

- [3] Pitarch, J. L., Vilas, C., de Prada, C., Palacín, C. G., & Alonso, A. A. (2021). Optimal operation of thermal processing of canned tuna under product variability. *Journal of Food Engineering*, 304, 110594. doi:

## ۶- منابع

- [1] Fellows, P. J. (2009a). 11 - Blanching. In P. J. Fellows (Ed.), *Food Processing Technology (Third Edition)* (pp. 369-380): Woodhead Publishing.
- [2] Fellows, P. J. (2009b). 16 - Dehydration. In P. J. Fellows (Ed.), *Food Processing*

- <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.07.005>
- [13] Salas-Valerio, W., Solano-Cornejo, M., Zelada-Bazán, M., & Vidaurre-Ruiz, J. (2019). Three-dimensional modeling of heat transfer during freezing of suspended and in-contact-with-a-surface yellow potatoes and ullucus. *42(6)*, e13174. doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13174>
- [14] Ebrahimnia-Bajestan, E., Niazmand, H., Etminan-Farooji, V., & Ebrahimnia, E. (2012). Numerical Modeling of the Freezing of a Porous Humid Food inside a Cavity due to Natural Convection. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, *62(3)*, 250-269. doi: [10.1080/10407782.2012.691050](https://doi.org/10.1080/10407782.2012.691050)
- [15] Murray, G. P. E., & Saunders, M. A. (2002). "SNOPT: An SQP Algorithm for Large-Scale Constrained Optimization". *SIAM Journal on Optimization*, *12(4)*, 979-100
- [16] Dalvi, M., & Hamdami, N. (2011). Characterization of Thermophysical Properties of Iranian Ultrafiltrated White Cheese: Measurement and Modeling. *Journal of Agricultural Science and Technology*. *13(1)*, 67-78.
- [17] Erdogdu, F., & Turhan, M. (2008). Analytical solutions in conduction heat transfer problems. In F. Erdogdu (Ed.), *Optimization in Food Engineering* (pp. 19-29). FL: CRC Press, Boca Raton.
- [18] Ozisik, M. N. (1993). *Heat Conduction*. 2nd ed. Wiley, New York.
- [19] Iribe-Salazar, R., Caro-Corrales, J., Hernández-Calderón, Ó., Zazueta-Niebla, J., Gutiérrez-Dorado, R., Carrasco-Escalante, M., & Vázquez-López, Y. (2015). Heat Transfer during Blanching and Hydrocooling of Broccoli Florets. *80(12)*, E2774-E2781. doi: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13109>
- [20] Scheerlinck, N., Marquenie, D., Jancsó, P. T., Verboven, P., Moles, C. G., Banga, J. R., & Nicolai, B. M. (2004). A model-based approach to develop periodic thermal treatments for surface decontamination of strawberries. *Postharvest Biology and Technology*, *34(1)*, 39-52. doi: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2004.04.004>
- <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110594>
- [4] Fasina, O. O., & Fleming, H. P. (2001). Heat transfer characteristics of cucumbers during blanching. *Journal of Food Engineering*, *47(3)*, 203-210. doi: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00117-5](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00117-5)
- [5] Buyel, J. F. (2016). Numeric simulation can be used to predict heat transfer during the blanching of leaves and intact plants. *Biochemical Engineering Journal*, *109*, 118-126. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2016.01.009>
- [6] Crocombe, J., Lovatt, S., & Clarke, R. (1999). *Evaluation of chilling time shape factors through the use of three-dimensional surface modeling*. Paper presented at the Proceedings of 20th International Congress of Refrigeration, IIR/IIF, Sydney.
- [7] Du, Z., Hu, Y., Ali Buttar, N., & Mahmood, A. (2019). X-ray computed tomography for quality inspection of agricultural products: A review. *7(10)*, 3146-3160. doi: <https://doi.org/10.1002/fsn3.1179>
- [8] Zhu, L., Spachos, P., Pensini, E., & Plataniotis, K. N. (2021). Deep learning and machine vision for food processing: A survey. *Current Research in Food Science*, *4*, 233-249. doi: <https://doi.org/10.1016/j.crf.2021.03.009>
- [9] Goñi, S. M., Purlis, E., & Salvadori, V. O. (2007). Three-dimensional reconstruction of irregular foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, *82(4)*, 536-547. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.03.021>
- [10] Goñi, S. M., Purlis, E., & Salvadori, V. O. (2008). Geometry modelling of food materials from magnetic resonance imaging. *Journal of Food Engineering*, *88(4)*, 561-567. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.03.020>
- [11] Uyar, R., & Erdogdu, F. (2012). Numerical Evaluation of Spherical Geometry Approximation for Heating and Cooling of Irregular Shaped Food Products. *77(7)*, E166-E175. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02769.x>
- [12] Fricke, B. A., & Becker, B. R. (2006). Sensitivity of freezing time estimation methods to heat transfer coefficient error. *Applied Thermal Engineering*, *26(4)*, 350-362. doi:

- and Technology*, 37(3), 309-315. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2003.07.008>
- [23] Mauricio, V.-R. J., & Francisco, S.-V. W. (2017). Modeling Heat Transfer During Blanching of Cubic Particles of Loche (*Cucurbita moschata* Duch.) and Potato (*Solanum tuberosum* L.) Using Finite Difference Method. 40(3), e12451. doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.12451>.
- [21] Alhamdan, A., & Sastry, S. K. (1990). Natural convection heat transfer between non-newtonian fluids and an irregular shaped particle1. *Journal of Food Process Engineering*, 13(2), 113-124. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.1990.tb00062.x>
- [22] Garrote, R. L., Silva, E. R., Bertone, R. A., & Roa, R. D. (2004). Predicting the end point of a blanching process. *LWT - Food Science*



## Impact of product geometry on accurate heat transfer modelling of irregular shaped fruit during blanching process

Dalvi Isfahan, M.<sup>1\*</sup>, Hematian, A.<sup>2</sup>

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

### ARTICLE INFO

### ABSTRACT

#### Article History:

Received 2021/07/17  
Accepted 2021/10/04

#### Keywords:

Blackberry,  
Blanching,  
Modeling.

DOI: 10.52547/fsct.18.120.111

DOR: 20.1001.1.20088787.1400.18.120.11.3

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

Quality losses during blanching can be minimized by adequately selecting the time-temperature schedule. In this study, the blanching process of blackberry fruits at 3 selected temperatures was investigated. The thermophysical properties were estimated based on the chemical composition of the sample. Convective heat transfer coefficient was also estimated using a new novel technique called inverse problem method. In order to determine the best model that can describe the shape of the fruit and predict accurately temperature changes during blanching, three analytical models based on solution of Fourier's second law for heat transfer on regular shapes (sphere, 2D rectangle and finite cylinder) and a numerical model based on the real geometry of the sample were developed. The results showed that among the analytical models, the two-dimensional rectangle can better predict temperature changes at the center point of the sample than others. However, the developed numerical model was recognized as the best model due to the highest coefficient of determination ( $R^2 > 99$ ) and the lowest root mean square error (RMSE=0.37). By applying this model, temperature variations in the fruit can be predicted with high accuracy as a function of internal (thickness, and chemical composition) and external variables (temperature, and water bath velocity).