



شبیه‌سازی عددی فرآیند انتقال حرارت در سیب‌زمینی تحت دمای بالا به روش اجزا محدود

زهرا خداکریمی فرد^{۱*}، محمد جواد حسین زاده^۲، علیرضا شیرازی نژاد^۳

۱- دانشجوی دکتری تخصصی، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد سروستان، دانشگاه آزاد اسلامی، سروستان، ایران.

۲- مدرس، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد سروستان، دانشگاه آزاد اسلامی، سروستان، ایران.

۳- استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، واحد سروستان، دانشگاه آزاد اسلامی، سروستان، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۵

کلمات کلیدی:

المان محدود،

انتقال حرارت،

سیب‌زمینی،

مدل‌سازی عددی،

مواد غذایی.

DOI: 10.52547/fsct.18.116.337

* مسئول مکاتبات:

khodakaramizahra@yahoo.com

در این مقاله به بررسی موضوع انتقال حرارت در اجسام جامد سه‌بعدی، به صورت خاص با هندسه استوانه‌ای، به کمک روش عددی اجزا محدود توسط نرم‌افزار تجاری آباکوس پرداخته شده است. حرارت دادن و سرد کردن در فراوری مواد غذایی فعالیت‌های معمول هستند، حرارت دادن مواد غذایی با اهداف مختلفی نظیر کاهش تجمع میکروبی، غیرفعال کردن آنزیم‌ها، کاهش مقدار آب ماده غذایی، اصلاح ویژگی عملکردی یک ترکیب خاص و پختن انجام می‌شود که انتقال حرارت نقش محوری در تمامی این عملیات‌ها دارد. در این مقاله به‌منظور بررسی تغییرات دمایی خلال سیب‌زمینی واقع در روغن با دمای بالا، نمونه با هندسه استوانه‌ای برای مدل‌سازی در نظر گرفته شده است که در دمای روغن برابر دویست درجه سانتی‌گراد قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی عددی خلال سیب‌زمینی در روغن با دمای بالا نشان می‌دهد که آهنگ تغییرات در قسمت‌های لبه‌ای مدل بیشتر از سایر قسمت‌های آن است که این خود عاملی برای سوختگی لبه‌های خلال سیب‌زمینی می‌باشد. همچنین تغییرات دمایی در مرکز مدل کمترین آهنگ تغییرات را دارد به عبارتی توزیع انتقال حرارت در شعاع استوانه به‌صورت لگاریتمی انجام می‌شود. بعلاوه با بیشتر شدن زمان در معرض قرار گرفتن نمونه خلال سیب‌زمینی در روغن با دمای بالا، تقریباً تمام مدل به شرایط دمایی یکسانی می‌رسد.

۱- مقدمه

در فرایندهای بیولوژیکی، غذایی و شیمیایی مشابهت‌های زیادی وجود دارد که در همه آن‌ها مواد ورودی به فرایند یا تبدیل می‌شوند یا تغییر شکل پیدا می‌کنند تا به شکل یک محصول نهایی بیولوژیک و شیمیایی دربیایند. همه این فرایندها مراحل مشخصی دارند که از این مراحل به عنوان واحد عملیاتی نام‌برده می‌شود. گاهی هدف از واحدهای عملیاتی بیشتر فرایندهای جداسازی در مهندسی شیمی است. درحالی‌که در مهندسی مواد غذایی فرایندهای نگه‌دارنده‌ای مانند استریل کردن، پاستوریزاسیون، نمک‌سود کردن، تبرید و ... جزو واحدهای عملیاتی محسوب می‌شوند هرچند این‌ها فرایندهای جداسازی نیستند. اغلب این فرایندها از مکانیسم یا مبنای عمومی برخوردارند به‌طور مثال خشک‌کردن مواد غذایی و فرایندهای اسمزی، جداسازی‌های غشایی یا عبور گاز در بسته‌های قابل انعطاف توأم با انتقال جرم و مکانیسم دیفیوژیون است درحالی‌که در فرایندهای حرارتی مثل خشک‌کردن، تغلیظ، پاستوریزاسیون، پختن و سایر فرایندهای نگه‌دارنده مواد غذایی انتقال حرارت رخ می‌دهد. این فرایندها در حالت کلی اساس پدیده‌های انتقال هستند.

حرارت دادن و سرد کردن در فراوری مواد غذایی فعالیت‌های معمول هستند حرارت دادن مواد غذایی با اهداف مختلفی نظیر کاهش جمیع میکروبی غیرفعال کردن آنزیم‌ها، کاهش مقدار آب ماده غذایی اصلاح ویژگی عملکردی یک ترکیب خاص و پختن انجام می‌شود. انتقال حرارت نقش محوری در تمامی این عملیات دارد مدل‌سازی به روش اجزا محدود (FEM)^۱ انتقال حرارت در مواد غذایی دشوار است. اغلب دو یا حتی سه حالت انتقال حرارت در یک سیستم به‌طور هم‌زمان صورت می‌گیرد. برخی ویژگی‌های حرارتی مواد غذایی همراه با تغییر دما تغییر می‌یابند. فرایندهای انتقال جرم و حرارت از مهم‌ترین پدیده‌های فیزیکی هستند که در طول تولید و فراوری مواد غذایی روی می‌دهند. در نتیجه این فرایندها، چندین متغیر مهم مانند دما و میزان رطوبت موجود در مواد غذایی به زمان و همین‌طور به جایگاه درونی سیستم ماده غذایی وابسته هستند. از آنجاکه بسیاری از ویژگی‌های فرآورده‌های غذایی و خواص کیفی آن‌ها نظیر بار میکروبی، ارزش غذایی، بافت و کیفیت حسی به شدت تحت تأثیر این متغیرها قرار می‌گیرند، این

ویژگی‌ها نیز به زمان و فضا وابسته هستند.

محاسبات انتقال حرارت در مواد غذایی معمولاً به تحلیل‌های ناپایداری نیاز دارد که برای این محاسبات ضریب انتقال حرارت^۲ (k) به عنوان تابعی از دما باید مشخص باشد. نکته قابل‌ذکر در هنگام مطالعه عددی پخت سیب‌زمینی با ضریب انتقال حرارت ثابت، عدم پیش‌بینی درست دمای آن در برابر زمان است [۱]. کالیفانو و کالولو تحقیقی بر روی ضریب انتقال حرارت در سیب‌زمینی بین دمای ۵۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام دادند. نتایج تحقیق آن‌ها حاکی از آن است که ضریب انتقال حرارت سیب‌زمینی عملاً وابسته به تغییرات دمایی است [۲]. چمخی و زاگروبا به بررسی خصوصیات تکه‌های سیب‌زمینی حین خشک شدن شامل: چگالی، خزش و ترمودینامیک جذب پرداختند که نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که مدل‌سازی فرآیند خشک شدن مواد غذایی نه تنها به خصوصیات جذب نیاز دارد بلکه شناخت رفتار مکانیکی نیز لازم است [۳]. چوولی و فابری به مطالعه مدل‌سازی انتقال حرارت در بسته بندی سالاد میوه تازه در شرایط غیرانجماد پرداختند که متغیرهای مدل‌سازی آن‌ها شامل مواد و هندسه بسته‌بندی می‌باشد. نتایج تحقیق آن‌ها حاکی از تطابق بسیار مناسب نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی است [۴]. فادیجی و همکاران مطالعه جامعی بر روی اثر تحلیل به روش اجزا محدود به عنوان ابزاری برای طراحی بسته‌بندی مواد غذایی پرداختند. تحقیق آن‌ها نشان‌دهنده قدرت بسیار بالای ابزار اجزا محدود در شبیه‌سازی فرایندهای مربوط به صنایع مواد غذایی دارد [۵].

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل‌سازی عددی

به‌منظور مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار تجاری اجزا محدود آباکوس (ABAQUS/CAE 6.14)، استفاده شده است. حل گر مورد استفاده در نرم‌افزار آباکوس، حل گر استاندارد (Abaqus/Standard) می‌باشد. با استفاده از این حل گر تحلیل انتقال حرارت پایا^۳ و گذرا^۴ که در آن‌ها با فرض صلب بودن جسم، تنها میدان دما حل می‌شود.

2. Thermal Conductivity Coefficient
3. Steady State
4. Transient

1. Finite Element Method

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(kr \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad \text{رابطه (۳)}$$

شرایط مرزی معادله (۳) را می‌توان به صورت معلوم بودن دماهای سطح خارجی و داخلی استوانه در نظر گرفت، که با حل معادله دیفرانسیلی آن و با اعمال شرایط مرزی به رابطه (۴) منتج می‌شود، که بیانگر توزیع دما در استوانه است. در شکل (۲)، به متغیرهای رابطه (۴) اشاره شده است.

$$T(r) = \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \ln \frac{r}{r_2} + T_2 \quad \text{رابطه (۴)}$$

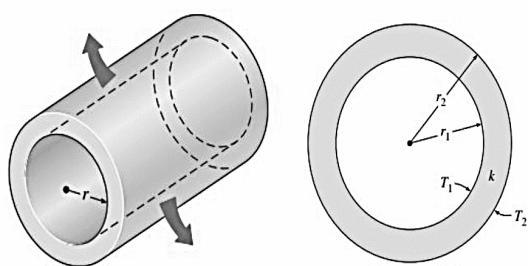


Fig 2 Variables of temperature distribution relationship in cylinder

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در یک استوانه توزیع دما در انتقال حرارت هدایتی به شکل لگاریتمی است، که در نتیجه نرخ انتقال حرارت در استوانه به صورت رابطه (۵) است.

رابطه (۵)

$$q_r = -kA \frac{dT}{dr} = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr} = \frac{2\pi Lk(T_1 - T_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

۳-۲- فرضیات مدل‌سازی

فرضیات مربوط به این مطالعه به شرح ذیل می‌باشد:

۱- از انتقال جرم در ماده صرف‌نظر می‌شود، ۲- مسئله به صورت زمانمند شبیه‌سازی می‌شود، ۳- ماده غذایی به شکل یک استوانه یکپارچه و همگن فرض می‌شود، ۴- خواص ماده غذایی (سیب‌زمینی) مانند ضریب انتقال حرارت، گرمای ویژه و دانسیته وابسته به دما است.

۴-۲- صحت سنجی^۹

به منظور بررسی صحت مدل‌سازی عددی، موضوع مورد بررسی سوولی و همکاران که به بررسی عددی فرآیند ذوب سبزیجات

۲-۲- انتقال حرارت

انتقال گرما، به تبادل انرژی گرمایی میان دو یا چند جسم یا سامانه (سیستم) فیزیکی گفته می‌شود. انتقال گرما به سه روش روی می‌دهد؛ رسانش^۶، همرفت^۷، و تابش^۸. انتقال گرما با تغییر انرژی درونی ماده همراه است و بر پایه قانون دوم ترمودینامیک همیشه از جسم گرم‌تر به جسم سردتر روی می‌دهد. تعادل گرمایی زمانی به دست آمده که جسم‌های درگیر و پیرامونشان به دمایی یکسان برسند.

معادله نرخ هدایت حرارتی با استفاده از معادله فوریه به شکل رابطه (۱) بیان می‌شود.

$$q_x = -k \frac{dT}{dx} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در این رابطه k ضریب هدایت حرارتی نامیده می‌شود. شکل معادله انتقال حرارت هدایت در سیستم مختصات استوانه‌ای به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود که در شکل (۱)، حجم کنترل دیفرانسیلی، $dz, d\phi, dr$ برای تحلیل هدایت در سیستم مختصات استوانه‌ای نشان داده شده است.

رابطه (۲)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

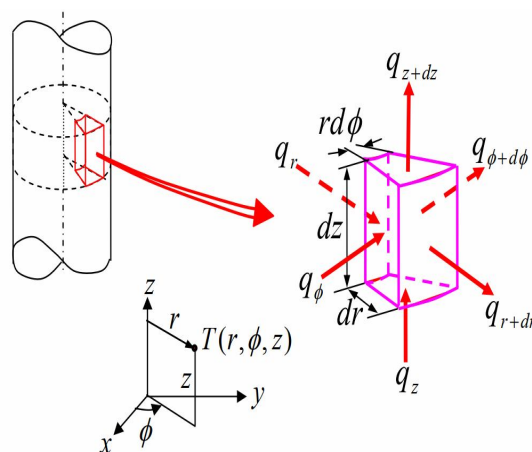


Fig 1 Differential Control Volume in the Conduction Heat Transfer Equation in a Cylindrical System

معادله توزیع دمای یک‌بعدی بدون تولید گرما و شرایط دائم در استوانه به صورت رابطه (۳) خواهد شد:

5. Heat Transfer
6. Conduction
7. Convection
8. Radiation

تحت دمای محیط کاری پرداختند، در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و تحلیل گردیده است [۶]. در بررسی آن‌ها که به صورت عددی و آزمایشگاهی انجام گرفته است بر روی سه ماده غذایی بادمجان، نخودفرنگی و اسفناج فرآیند ذوب بررسی گردیده است که تمام فرضیات مقاله در نرم‌افزار اعمال گردیده است. در جدول (۱) خصوصیات مربوط به این نوع مواد غذایی به عنوان معرفی در نرم‌افزار آباکوس ارائه شده است. همچنین نتایج حاصل از تحقیق آن‌ها با نتایج به دست آمده از نرم‌افزار آباکوس مقایسه شده است. نتایج به دست آمده

نشان‌دهنده تطابق خوب مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس و نتایج تحقیق سوولی و همکاران است. در شکل (۳)، نتایج حاصل از تحقیق سوولی و همکاران و نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس نشان داده شده است. شرایط مرزی یا ضریب انتقال حرارت جابجایی، بر اساس یافته‌های محققین و سایر مطالعات برای شبیه‌سازی اجسامی که به شکل مکعب در نظر گرفته می‌شود به طور تقریبی ۳۷/۰۵ و برای اجسام استوانه‌ای ۳۹/۴ در نظر گرفته می‌شود [۷].

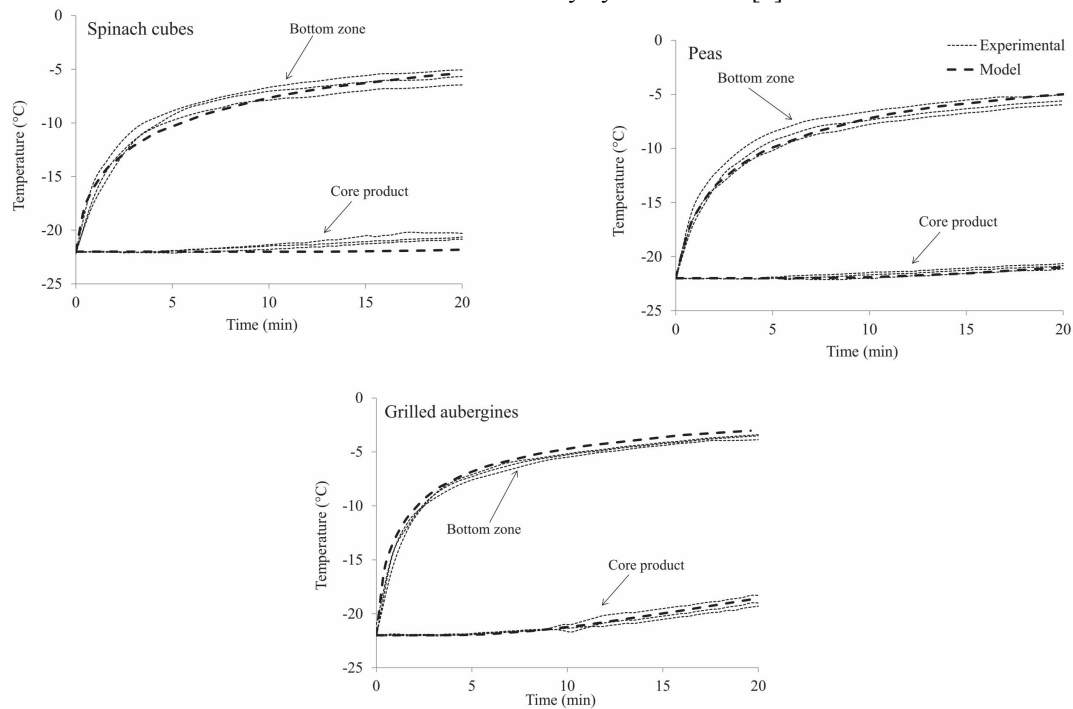
Table 1 Physical and Thermodynamic Properties of Peas, Spinach and Eggplants in the Studies of Cevoli et al. [6]

samples	Temperature (C°)	heat transfer coefficient (Wm ⁻¹ k ⁻¹)	density (kgm ⁻³)	heat capacity (kJ.Kg ⁻¹)
Peas	-20	1.32	513	263
	-15	1.26	518	
	-7	1.04	535	
	-3	0.8	590	
	3	0.52	620	
Spinach	-20	1.51	360	306
	-15	1.25	366	
	-7	1.12	379	
	-3	0.89	389	
	3	0.51	392	
Grilled aborigines	-20	1.2	190	300
	-15	1.15	192	
	-7	1.08	195	
	-3	0.71	207	
	3	0.48	209	

پس از صحت سنجی مدل مطالعات سوولی و همکاران، مدل سیب‌زمینی مورد بررسی در این مقاله به صورت استوانه‌ای با شعاع ۱،۱ سانتی‌متر و طول ۶ سانتی‌متر برای مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. دمای روغن برابر ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد فرض شده است. مدت زمان مؤثر، برای قرارگیری خلال سیب‌زمینی تحت دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۱۵ دقیقه تخمین زده شده است. در این پژوهش تغییرات دمایی در طول مدت ۱۵ دقیقه در سطح و مرکز خلال سیب‌زمینی مورد بررسی قرار گرفته است. ضریب انتقال حرارت در سیب‌زمینی به صورت تابعی از دما در شکل (۴) نشان داده شده است [۲].

همچنین در شکل (۵) تخمین چگالی سیب‌زمینی با استفاده از میزان آب موجود در آن ارائه شده است [۳]. لازم به ذکر است، ظرفیت گرمایی ویژه سیب‌زمینی ۳۶۳ kJ.kg⁻¹ در نظر گرفته شده است [۸]. جهت مش بندی مدل استوانه‌ای سیب‌زمینی در نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس از المان DC3D10 (المان ده گره‌ای انتقال حرارتی با هندسه چهاروجهی) استفاده شده است. در شکل (۶)، مش بندی مدل استوانه‌ای سیب‌زمینی در نرم‌افزار آباکوس نشان داده شده است [۹]. ابعاد مش بندی نیز برابر ۰،۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

A: The results of the study by Cevoli et al [6]



B: Modeling results in ABAQUS software

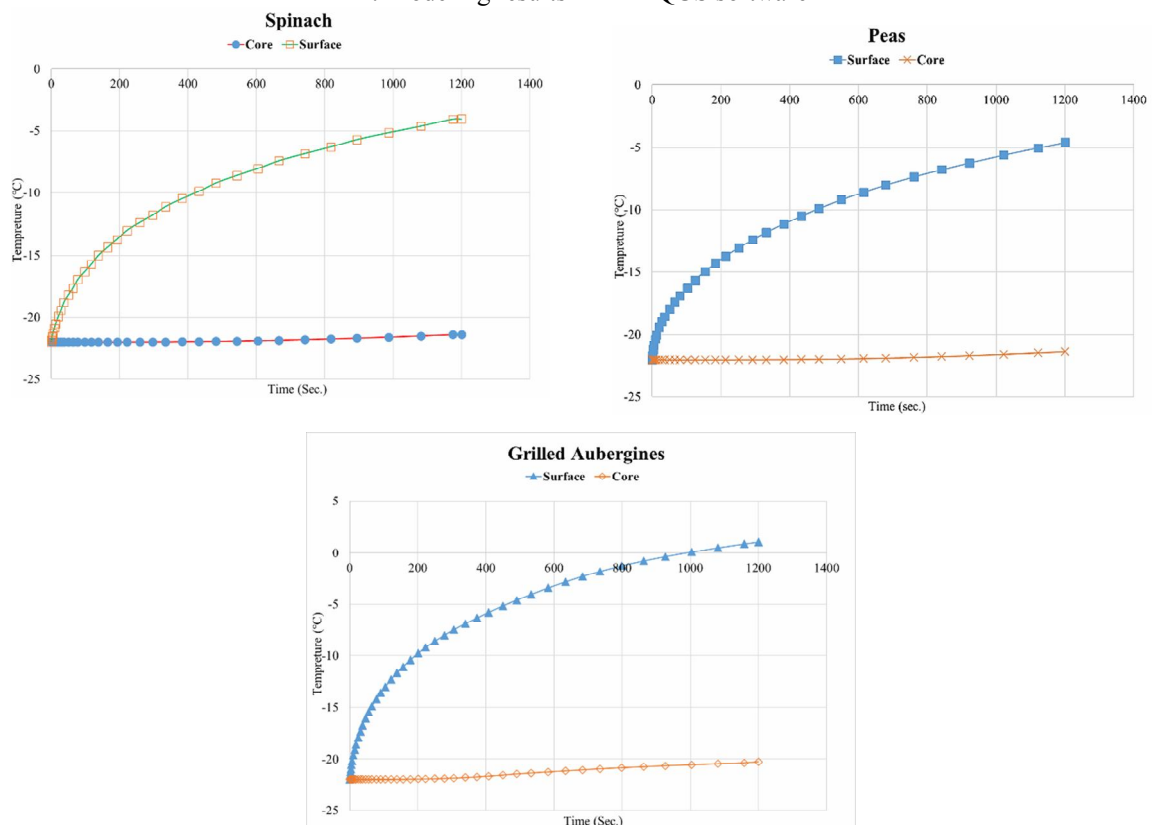


Fig 3 Comparison of the results of (A) Cevoli et al. Research and (B) Modeling in ABAQUS software.

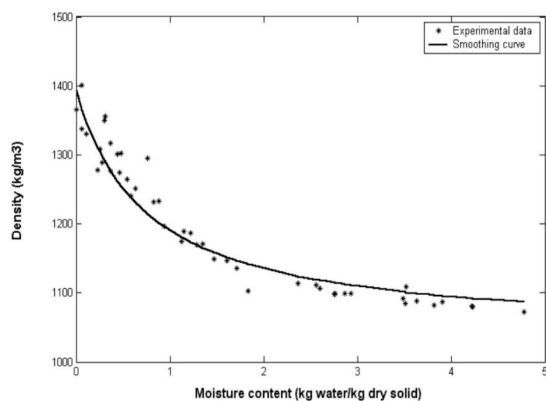


Fig 5 Estimate the density of potato by using the amount of water available in it [3].

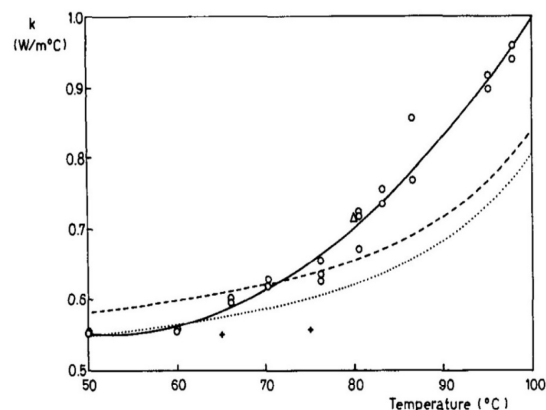


Fig4 Potato heat transfer coefficient [2].

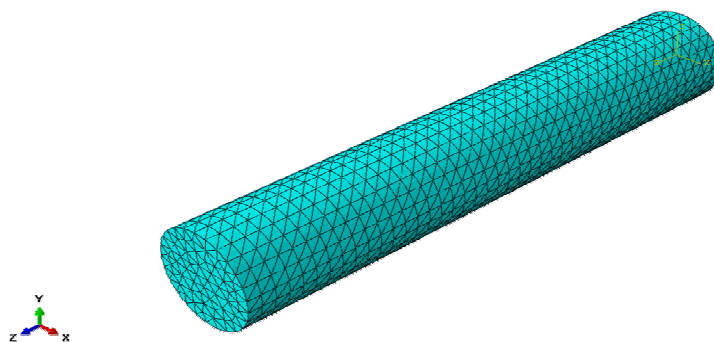


Fig 6 Meshing of Cylindrical modeling of potato in ABAQUS software.

۳- نتایج و بحث

دقیقه و در زمان ۱۵ دقیقه در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور در شکل (۷-الف) مشخص است دزمان اولیه دمای مدل در تمامی قسمت‌ها برابر ۲۲ درجه سانتی گراد است. باگذشت زمان ۵ دقیقه، همان‌طور که در شکل (۷-ب) مشخص است، تغییرات دمایی در لایه‌های خارجی مدل استوانه‌ای سیب‌زمینی بیشتر شده است. نرخ این تغییرات دمایی در لبه‌های بیرونی مدل بیشتر از سایر نقاط بوده است به‌نوعی که دمای آن از ۲۰ درجه سانتی گراد به ۷۲٫۵ درجه سانتی گراد رسیده است و کمترین نرخ تغییرات دمایی مربوط به مرکز مدل می‌باشد که همان‌طور مشاهده می‌شود دمای آن از ۲۰ درجه سانتی گراد تقریباً به ۲۵ درجه سانتی گراد رسیده است. در زمان ۱۰ دقیقه، همان‌طور که در شکل (۷-ج) مشخص است، دمای لبه‌های مدل تقریباً به ۹۰ درجه سانتی گراد و دمای مرکز مدل به ۴۰ درجه سانتی گراد رسیده است. همان‌طور که مشخص است نرخ تغییرات در مرکز مدل باگذشت زمان نیز بیشتر شده است.

در زمان پایانی تحلیل مدل یعنی ۱۵ دقیقه، دمای لبه‌های خارجی مدل تقریباً به ۱۰۰ درجه سانتی گراد و دمای داخلی مدل به ۵۵ درجه رسیده است. از این تغییرات دمایی می‌توان برداشت که در زمان پایانی تحلیل نیز بیشترین نرخ تغییرات

قانون لامبرت بر اساس تحقیقات انجام گرفته توسط اولویرا و فرانس (۲۰۰۲) نباید برای اجسام و مواد غذایی با شعاع بسیار کوچک استفاده شود [۱۰ و ۷]. در شکل (۴)، همان‌گونه که اشاره شد، پارامتر ضریب انتقال حرارت به صورت تابعی از دما بیان گردید که نتیجه آن نزدیک به واقعیت است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دما، ضریب انتقال حرارت سیب‌زمینی نیز بیشتر شده که این امر طبق رابطه (۱) موجب افزایش انتقال حرارت بیشتر در مدل عددی می‌شود. موضوع دیگر، وابستگی چگالی به میزان آب موجود در سیب‌زمینی می‌باشد، که همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است با افزایش میزان آب موجود در سیب‌زمینی، چگالی آن کاهش می‌یابد.

همان‌طور که روابط مربوط به انتقال حرارت مشخص است، توزیع انتقال حرارت در شعاع استوانه به صورت لگاریتمی انجام می‌شود. همچنین با دور شدن از مرکز استوانه و نزدیک شدن به شعاع خارجی آن، نرخ تغییر دما افزایش می‌یابد. شکل‌های سه‌بعدی حاصل از تجزیه و تحلیل نمونه استوانه‌ای سیب‌زمینی در نرم‌افزار آباکوس در دو حالت کامل و برش طولی داده شده در زمان اولیه، در زمان ۵ دقیقه، در زمان ۱۰

به مرکز بیشتر است که این موضوع در (۸) محسوس است، به نوعی که دمای لایه‌های بیرونی مدل استوانه‌ای از دمای اولیه (۲۲ درجه سانتی گراد) به دمای نهایی (۱۰۰ درجه سانتی گراد) رسیده است. اما در مرکز استوانه از دمای اولیه (۲۲ درجه سانتی گراد) به دمای نهایی (۵۵ درجه سانتی گراد) رسیده است که مبین این قضیه می‌باشد که نرخ تغییرات دمای سطوح خارجی نسب به مرکز استوانه تقریباً دو برابر شده است. که همان‌طور مشخص است، لبه‌های مدل استوانه‌ای کاملاً در معرض سوختگی قرار دارند.

مربوط به لایه‌های خارجی استوانه مدل‌سازی شده است و کمترین نرخ تغییرات در مرکز مدل است. همچنین مطابق برش طولی از مدل استوانه‌ای در که در شکل (۷-د) نشان داده شده است، احتمال سوختگی در لبه‌های استوانه بیشتر از سایر نقاط مدل است.

در شکل (۸)، برش عرضی سه‌بعدی تغییرات دمایی در مرکز مدل استوانه‌ای سیب‌زمینی در زمان ۱۵ دقیقه، ارائه شده است. همان‌طور که نشان داده شده است، افزایش دما در سطوح خارجی استوانه مدل‌سازی شده تقریباً دو برابر مرکز استوانه است. طبق رابطه (۴)، گرادیان تغییر دما با افزایش شعاع نسبت

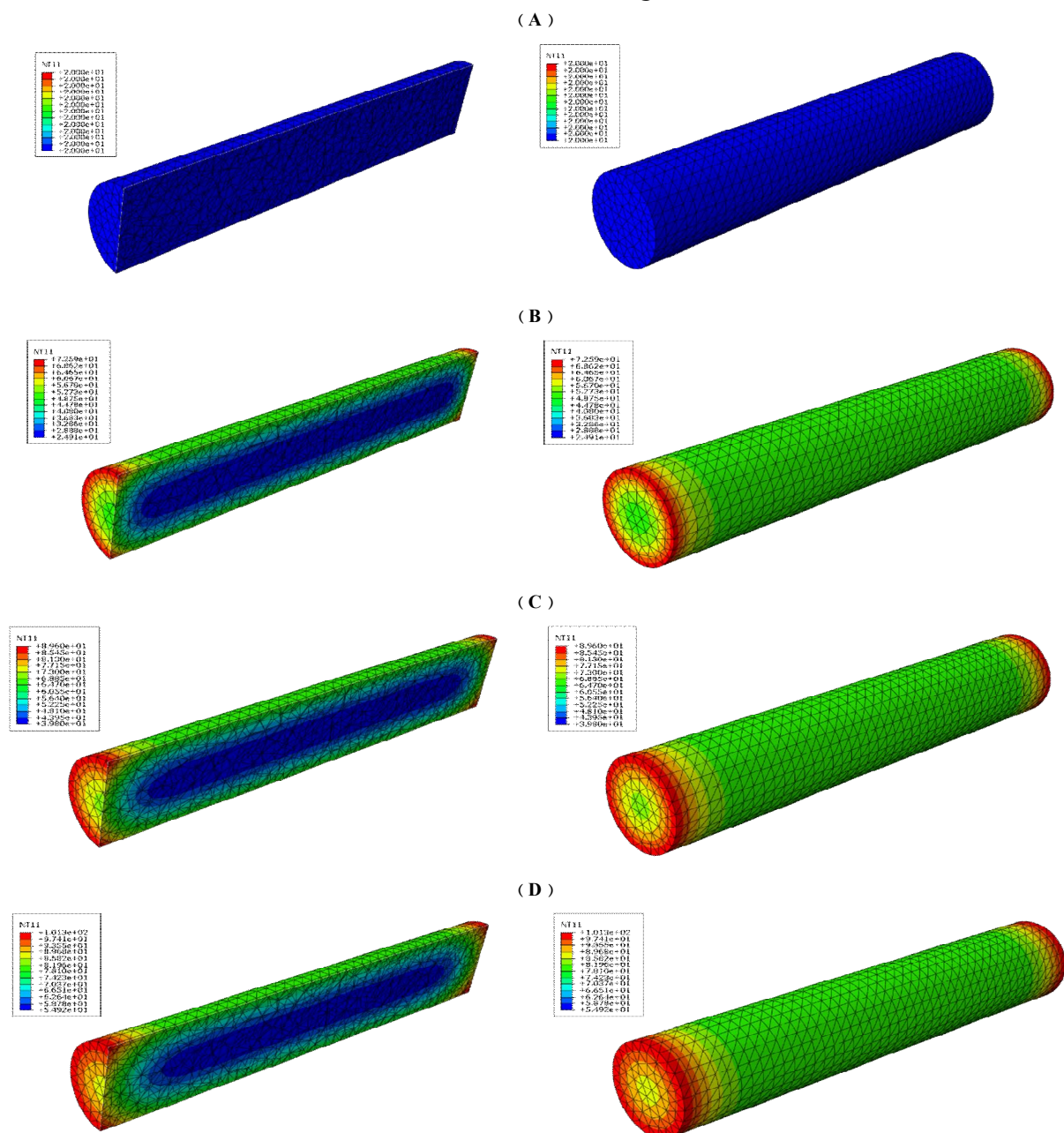


Fig 7 The 3D shapes obtained from the analysis of simulated cylindrical potato specimen in ABAQUS software in full view and longitudinal section are shown (A) initial state of specimen (B) after 5 minutes (C) after 10 minutes (D) after 15 minutes.

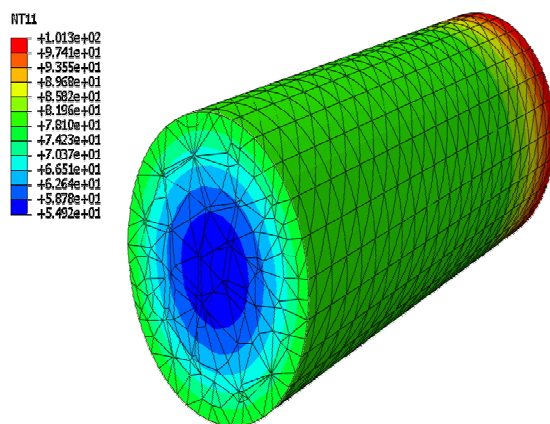


Fig 8 3D view of temperature variation in the center of the cylindrical potato model after 15 minutes

تحلیل بسیار بیشتر از زمان های دیگر تحلیل است. اما باگذشت زمان تحلیل مدل سازی، نرخ تغییرات دمایی کاهش یافته و از زمان ۸۰۰ ثانیه به بعد، تقریباً دمای ثابتی (۱۰۰ درجه سانتی گراد) در مدل مشاهده می شود. نکته قابل ذکر در این قسمت این است که نرخ تغییرات دما در ۱۰۰ ثانیه ابتدایی تحلیل حدود ۳۰ درجه سانتی گراد بوده است، به عبارتی در ۱۰۰ ثانیه ابتدایی تحلیل، حدود ۴۰ درصد تغییرات دمایی کل مدل سازی رخ داده است.

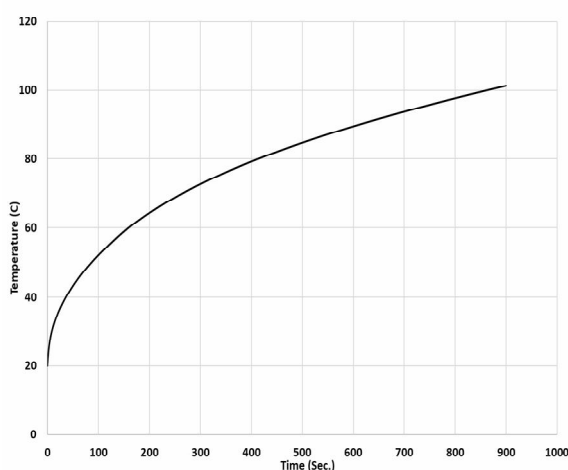


Fig 10 Temperature variation diagram at the edges of the numerical cylindrical potato model

۴- نتیجه گیری

از نتایج بالا می توان چنین استنباط کرد که، گرادیان دما در لبه های مدل استوانه ای سیب زمینی در نرم افزار اجرا محدود آبکوس، در قسمت های میانی بسیار کمتر قسمت های بیرونی آن به ویژه در لبه های استوانه مدل سازی شده می باشد. گرادیان

در شکل (۹)، نمودار تغییرات دما در مرکز مدل عددی استوانه ای سیب زمینی در زمان تحلیل نشان داده است. مطابق نتایج به دست آمده از تحلیل دمای مرکز مدل، تا زمان تقریباً ۱۵۰ ثانیه ثابت بوده است. به عبارتی گرادیان دما در مرکز مدل با توجه دور بودن از سطح تغییرات دما، ثابت مانده است. نکته قابل ذکر دیگر، زیاده شدن شیب نمودار بعد از گذشت ۲۰۰ ثانیه است که این موضوع مبین یکنواختی نرخ افزایش دما در مرکز استوانه شبیه سازی در نرم افزار آبکوس است. به بیان دیگر تغییرات دما تا زمان ۲۰۰ ثانیه حدود ۲ درجه سانتی گراد بوده است، در حالی که زمان ۲۰۰ تا زمان پایانی تحلیل یعنی ۹۰۰ ثانیه، تغییرات دما حدود ۳۵ درجه سانتی گراد است.

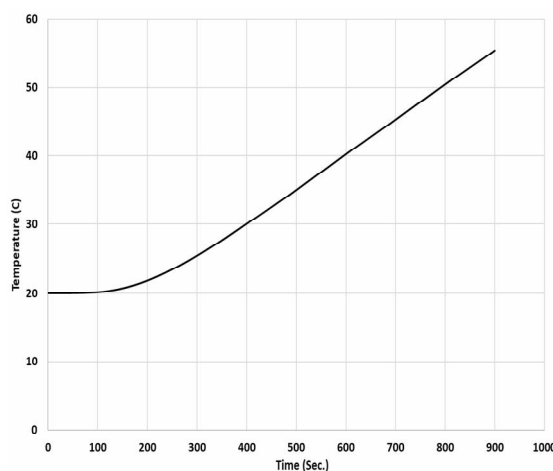


Fig 9 Temperature variation diagram at the center of the numerical cylindrical potato model

در شکل (۱۰)، نمودار تغییرات دما در لبه های خارجی مدل عددی استوانه ای سیب زمینی در زمان تحلیل ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، گرادیان دما در زمان های ابتدایی

- [3] F. Chemkhi, S. & Zagrouba, "Characterisation of Potato Slices During Drying: Density, Shrinkage, and Thermodynamic of Sorption," *International Journal of Food Engineering*, vol. 7. 2011.
- [4] C. Cevoli and A. Fabbri, "Heat transfer finite element model of fresh fruit salad insulating packages in non-refrigerated conditions," *Biosyst. Eng.*, vol. 153, pp. 89–98, Jan. 2017.
- [5] T. Fadji, C. J. Coetzee, T. M. Berry, A. Ambaw, and U. L. Opara, "The efficacy of finite element analysis (FEA) as a design tool for food packaging: A review," *Biosyst. Eng.*, vol. 174, pp. 20–40, Oct. 2018.
- [6] C. Cevoli, A. Fabbri, U. Tylewicz, and P. Rocculi, "Finite element model to study the thawing of packed frozen vegetables as influenced by working environment temperature," *Biosyst. Eng.*, vol. 170, pp. 1–11, Jun. 2018.
- [7] Y. E. Lin, R. C. Anantheswaran, and V. M. Puri, "Finite element analysis of microwave heating of solid foods," *J. Food Eng.*, vol. 25, no. 1, pp. 85–112, Jan. 1995.
- [8] S. Sahin and S. G. Sumnu, "Thermal Properties of Foods," in *Physical Properties of Foods*, New York, NY: Springer New York, 2006, pp. 107–155.
- [9] Manual ABAQUS, "Getting Started with ABAQUS." 2016.
- [10] E. C. M. Sanga, A. S. Mujumdar, and G. S. V. Raghavan, "Simulation of convection-microwave drying for a shrinking material," *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 41, no. 6, pp. 487–499, Jul. 2002.

دمایی در زمان‌های ابتدایی (از زمان اولیه تا زمان ۱۰۰ ثانیه) تحلیل نسبت به سایر زمان‌های تحلیل (از زمان ۱۰۰ ثانیه تا زمان ۹۰۰ ثانیه) محسوس‌تر است. همان‌طور که از روابط مربوط به انتقال حرارت مشخص است، توزیع انتقال حرارت در شعاع استوانه به‌صورت لگاریتمی انجام می‌شود. همچنین با دور شدن از مرکز استوانه و نزدیک شدن به شعاع خارجی آن، نرخ تغییر دما افزایش می‌یابد. همچنین در زمان‌های پایانی تحلیل (از زمان ۸۰۰ ثانیه به بعد) در لبه‌های مدل استوانه‌ای سیب‌زمینی، دما نسبتاً نرخ ثابتی به خود گرفته و به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. همان‌طوری که در نتایج شبیه‌سازی مشاهده گردید، گرادیان دما در مرکز مدل استوانه سیب‌زمینی حدود ۴ درجه سانتی‌گراد ولی در لبه‌های مدل استوانه‌ای سیب‌زمینی، حدود ۸۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. که می‌توان نتیجه گرفت نرخ تغییرات دما در سطوح خارجی استوانه مدل سازه شده بیشتر از سطوح داخلی بوده است. که این خود به‌احتمال سوختگی در لبه‌های مدل اشاره دارد.

۵- منابع

- [1] I. LAMBERG and B. HALLSTRÖM, "Thermal properties of potatoes and a computer simulation model of a blanching process," *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 21, no. 5, pp. 577–585, 1986.
- [2] A. N. CALIFANO and A. CALVELO, "Thermal Conductivity of Potato between 50 and 100°C," *J. Food Sci.*, vol. 56, no. 2, pp. 586–587, 1991.



Numerical Simulation of the Heat Transfer Process Potato Subjected to high temperature with Finite Element Method

Khodakaramifard, Z. ^{1*}, Hosseinzadeh, M. J. ², Shirazinejad, A. ³

1. Ph.D. student, Department of Food Science and Technology, Sarvestan Branch, Islamic Azad University, Sarvestan, Iran.
2. Lecture, Department of Food Science and Technology, Sarvestan Branch, Islamic Azad University, Sarvestan, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Sarvestan Branch, Islamic Azad University, Sarvestan, Iran.

ARTICLE INFO

Article History:

Received 2021/ 03/ 13

Accepted 2021/ 05/ 26

Keywords:

Finite Element,
Heat Transfer,
Potato,
Numerical Modeling,
Foodstuffs.

DOI: 10.52547/fsct.18.116.337

*Corresponding Author E-Mail:
khodakaramizahra@yahoo.com

ABSTRACT

In this paper, the issue of heat transfer in three-dimensional solid objects, a special form with cylindrical geometry, is investigated using the numerical finite element method by the commercial software Abaqus. Heating and cooling in food processing are common activities, heating food for a variety of purposes such as reducing microbial aggregation, inactivating enzymes, reducing the amount of nutrient water, modifying the functional properties of a particular compound, and cooking when heat transfer is performed. It plays a central role in all these operations. In this paper, a cylindrical geometry specimen with a temperature of 200 °C is used to investigate the temperature variations of potatoes in high-temperature oil. The results of numerical modeling of potato slices in high-temperature oil show that the rate of changes in the edges of the model is higher than in other parts of the model, which is a factor for the burns of potato edges. Also, the temperature variations in the center of the model have the lowest changes in the logarithmic distribution of heat transfer in the cylinder radius. In addition, with the increase in an exposure time of potato samples in high-temperature oil, almost all models reach the same temperature conditions.