بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده کشاورزی

تعیین فرایند حرارتی و مدل سازی انتقال حرارت در دو نوع خوراک ایرانی در بسته‌بندی نیمه‌سخت آلومینیومی

رساله دکتری علوم و صنایع غذایی

نفیسه زمین‌دار

استاد راهنما

دکتر محمد شاهدی

۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده کشاورزی

رساله دکتری علوم و صنایع غذایی خانم نفیسه زمین‌دار

تحت عنوان:

تعیین فرایند حرارتی و مدل سازی انتقال حرارت در دو نوع خوراک ایرانی در بسته‌بندی نیمه‌سخت آلومینیومی

در تاریخ ۹۰/۲/۲۸ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای رساله	دکتر محمد شاهدی
۲- استاد مشاور رساله	دکتر محمود شیخ زین‌الدین
۳- استاد مشاور رساله	دکتر علی نصیرپور
٤- استاد داور خارجی	دکتر فخری شهیدی
٥- استاد داور خارجی	دکتر جواد حصاری
٦- استاد داور داخلی	دکتر مهدی کدیور
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر احمد ریاسی

تقدیر و تشکر :

عطاییست هر موی ازو بر تنم　　چگونه به هر موی شکری کنم؟
ستایش خداوند بخشنده را　　که موجود کرد از عدم بنده را
کرا قوت وصف احسان اوست؟　　که اوصاف، مستغرق شأن اوست
چو آید به کوشیدنت خیر پیش　　به توفیق حق دان نه از سعی خویش

پس از سپری شدن سالهایی از عمرم که صرف تحصیل علم و دانش شده، اینک زمان آن رسیده که از بزرگانی که در فراگیری اندوخته هایم مرا یاری کرده اند و همواره چون مشعلی مسیر رسیدن را برایم روشن ساخته اند تشکر و قدردانی کنم.

از همسر عزیز و مهربانم که همواره از همراهی وحمایتش برخوردار بودم و از دو استاد ارجمند زندگی ام ، پدر و مادر عزیزم سپاسگزارم و امیدوارم روزی بتوانم قطره ای از دریای بی کران زحماتشان را جبران کنم.

از جناب آقای دکتر شاهدی، استاد راهنمای اندیشمند و فرهیخته که پیوسته از راهنمایی های حکیمانه شان بهره برده ام، سپاسگزارم.

از جناب آقای دکتر شیخ زین الدین و جناب آقای دکتر نصیرپور، استادن مشاور بزرگوار و گرانقدر که از تجارب ارزنده شان استفاده کرده ام، سپاسگزارم.

از جناب آقای مهندس ایل بیگی که همیشه از دقت نظر و مساعدت صمیمانه شان برخوردار بوده ام، سپاسگزارم، همچنین از مدیریت محترم واحد صنایع غذایی چیکا و پرسنل محترم تحقیق و توسعه آن واحد قدردانی می کنم.

از استادان محترم و گرامی گروه صنایع غذایی آقای دکتر دخانی، آقای دکتر کبیر، آقای دکتر شکرانی، آقای دکتر کرامت، آقای دکتر کدیور، خانم دکتر سلیمانیان زاد و آقای دکتر همدمی و سایر اساتید گرانقدر که در محضرشان دانش آموخته ام، کمال تشکر و سپاس را دارم.

از پرسنل محترم آزمایشگاه‌های صنایع غذایی بویژه جناب آقای مهندس بهرامی که همیشه از تجارب ارزنده-شان بهره برده‌ام، کمال تشکر را دارم، همچنین از خانم مهندس ستاری و آقای دهقانی و آقای مولایی نیز سپاسگزارم.

در پایان از تمامی دوستان و سرورانی که در این پژوهش از لطف و عنایتشان برخوردار شدم قدردانی می نمایم.

نفیسه زمین‌دار
تیر ماه ۱۳۹۰

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این
رساله متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به همسر عزیزم

و

خانواده مهربانم

به پاس حمایت‌هایشان

فهرست مطالب

عنوان.....**صفحه**
فهرست مطالب.....هشت
چکیده.....۱
فصل اول: مقدمه.....۳
۱-۱ مقدمه.....۳
فصل دوم: بررسی منابع.....۷
۲-۱ مکانیزمهای انتقال گرما.....۷
۲-۱-۱ رسانایی.....۸
۲-۱-۲ جابه جایی.....۸
۲-۱-۳ انتقال گرما به صورت تابش ۱۰
۲-۲ بقای انرژی برای حجم کنترل شده.....۱۰
۲-۳ ویژگی‌های ترموفیزیکی.....۱۱
۲-٤ ظرفیت گرمایی.....۱۱
۲-٤-۱پیش‌بینی گرمای ویژه. ۱۲
۲-۵ هدایت حرارتی. ۱۷
۲-۵-۱ قانون فوریه. ۱۷
۲-۵-۲ هدایت حرارتی در مواد غذایی.....۱۹
۲-٦ اندازه گیری هدایت حرارتی. ۱۹
۲-٦-۱صفحه داغ عایق بندی شده. ۲۰
۲-٦-۲ روش سیم داغ. ۲۰
۲-٦-۳ اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی به روش پروب ۲۱
۲-۷ روش‌های غیر مستقیم اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی ۲۷
۲-۸ مدل‌های هدایت حرارتی. ۲۷
۲-۹ دانسیته.....۲۸
۲-۱۰ معادله انتشار گرما ۳۰
۲-۱۱ رسانایی گرمای پایا و یک بعدی. ۳۱
۲-۱۲ رسانایی گرمای پایا و دو بعدی. ۳۱
۲-۱۳ حل معادله رسانایی گرما ۳۲
۲-۱٤ معادله‌های تفاضل محدود. ۳۲
۲-۱٤-۱ شبکه گره‌ها. ۳۲
۲-۱٤-۲ حل معادله‌های تفاضل محدود. ۳۳
۲-۱۵ رسانایی گرمای گذرا (ناپایا). ۳۳
۲-۱۵-۱ گسسته سازی معادله گرما: روش صریح.....۳٤

۲-۱۵-۲ گسسته سازی معادله گرما: روش ضمنی. ۳٤
۲-۱۵-۳ خطی سازی: روش ضمنی در برابر روش صریح. ۳۵
۲-۱٦ انتقال حرارت گذرا در غذا.. ..... ۳۵
۲-۱۷ روش‌های حل. ۳٦
۲-۱۸ انتقال حرارت ۳۸
۲-۱۸-۱ جابجایی طبیعی..... ۳۸
۲-۱۹ فرایند حرارتی. ۳۹
۲-۱۹-۱ انتقال حرارت در فرایند حرارتی غذا. ٤۰
۲-۲۰ روش‌های استرلیزاسیون ٤۰
۲-۲۰-۱ ناحیه کند حرارتی. ٤۲
۲-۲۱ معادلات اصلی برای CFD..... ٤۲
۲-۲۱-۱ مدل بوزینسک.. ..... ٤۳
۲-۲۲ شرایط مرزی. ٤۳
۲-۲۳ انتقال حرارت در مواد غذایی کنسروشده. ٤٤
۲-۲٤ چالش‌های مربوط به مدل سازی. ٤٦
۲-۲٤-۱ ضریب انتقال حرارت سطح. ٤٦
۲-۲٤-۲ ویژگی‌های مواد غذایی.. ..... ٤٦
۲-۲٤-۳ جمع شدن مواد غذایی در فرایند حرارتی.. ..... ٤٦
۲-۲۵ مراحل حل مسأله با توجه به دینامیک سیالات محاسباتی ٤٦
۲- ۲٦ اهمیت هندسه و شبکه مناسب..... ٤۷
۲-۲۷ لزوم انجام این مطالعه. ٤۷
۲-۲۸ اهداف انجام این مطالعه. ٤۸
فصل سوم: مواد و روشها..... ٤۹
۳-۱ تجهیزات مورد استفاده. ٤۹
۳-۱-۱ دستگاه‌های استفاده شده..... ٤۹
۳-۱-۲ مواد مصرفی. ۵۰
۳-۲ تعیین خواص ترموفیزیکی. ۵۰
۳-۲-۱ جرم حجمی.. ..... ۵۰
۳-۲-۲ اندازه‌گیری pH ۵۱
۳-۲-۳ اندازه گیری هدایت حرارتی. ۵۱
۳-۲-٤ تعیین گرمای ویژه..... ۵۲
۳-۳ مدل سازی..... ۵۲
۳-۳-۱ استانداردهای ملی ایران برای کنسرو خورش قیمه و قورمه سبزی. ۵۳
۳-۳-۲ رسم شکل هندسی قوطی. ۵۳

۳-۳-۳ رسم شکل هندسی اجزای داخل قوطی در خورش قورمه سبزی. ۵۵
۳-۳-٤ رسم شکل هندسی اجزای داخل قوطی در خورش قیمه. ۵۸
۳-٤ شبکه بندی. ۵۹
۳-۵ امتحان شبکه. ٦۲
۳-٦ تعیین مرزها در گمبیت. ٦٦
۳-۷ حل مساله با استفاده از نرم افزار فلوئنت. ٦٦
۳-۷-۱ خواندن و بررسی شبکه. ٦٦
۳-۷-۲ انتخاب شیوه محاسباتی و فرمول بندی حل مساله. ٦۷
۳-۷-۳ انتخاب فرمول بندی حل و تعریف مدل فیزیکی. ٦۷
۳-۷-٤ بیان خواص مواد..... ٦۷
۳-۷-۵ تعیین شرایط مرزی ٦۸
۳-۷-٦ مراحل برای تحلیل مسأله انتقال حرارت..... ٦۹
۳-۷-۷ راه اندازی حل. ۷۰
۳-۷-۸ مشخص کردن پارامترهای کنترل برای بررسی روند همگرایی..... ۷۰
۳-۷-۹ ذخیره فایل و حل مسأله. ۷۱
۳-۸ آماده سازی مواد برای انجام معتبر سازی. ۷٤
۳-۹ انجام فرایند حرارتی به منظور معتبر سازی مدل عددی. ۷۵
۳-۱۰ معتبرسازی مدل و ارزیابی خطا..... ۷۷
۳-۱۱ محاسبه ارزش استریل کنندگی..... ۷۷
فصل چهارم: بحث و نتیجه گیری..... ۷۹
٤-۱ بررسی روند همگرایی در مدل انتقال حرارت در کنسرو قورمه سبزی..... ۷۹
٤-۲ بررسی پروفیل‌های حرارتی در مدل قورمه سبزی در مقاطع زمانی مختلف..... ۸۳
٤-۳ بررسی ناحیه‌کند حرارتی در مدل انتقال حرارت در کنسرو قورمه سبزی..... ۸۷
٤-٤ بررسی اطلاعات دما- زمان با توجه به داده‌های مدل انتقال حرارت..... ۹۱
٤-۵ بررسی اطلاعات دما- زمان در تکرارهای آزمایشگاهی..... ۹۳
٤-٦ تأیید مدل و معتبر سازی..... ۹٤
٤-۷ بررسی روند همگرایی در مدل انتقال حرارت در کنسرو قیمه. ۹٦
٤-۸ بررسی ناحیه کند حرارتی در مدل انتقال حرارت در کنسرو قیمه. ۱۰۲
٤-۹ بررسی اطلاعات دما- زمان در تکرارهای آزمایشگاهی..... ۱۰۷
٤-۱۰ تأیید مدل و معتبر سازی ۱۰۹
٤-۱۱ pH اندازه‌گیری شده ۱۱۰
٤-۱۲ مقایسه این مطالعه با مطالعات سایر پژوهشگران..... ۱۱۰
٤-۱۲-۱ بررسی و مقایسه فرضیات حل مساله..... ۱۱۰
٤-۱۲-۲ بررسی و مقایسه اجرای حل مساله. ۱۱۱

٤-١٢-٣ محل ناحیه کند حرارتی. ۱۱۲
فصل پنجم: نتیجه‌گیری کلی و پیشنهادها. ۱۱۵
٥-١ نتیجه‌گیری ۱۱۵
٥-٢ پیشنهادات. ۱۱۸
مراجع ۱۲۱

فهرست اشکال

عنوان.....**صفحه**
شکل۲-۱ طرح شماتیک اندازه‌گیری گرمای ویژه به روش مخلوط کردن.....۱۶
شکل۲-۲ روش صفحه داغ عایق بندی شده برای اندازه‌گیری گرمای ویژه ۱۶
شکل۲-۳ طبقه بندی روش‌های اندازه‌گیری هدایت حرارتی.....۲۱
شکل۲-٤ پروب اندازه‌گیری هدایت حرارتی.....۲۲
شکل۲-۵ سیستم مورد استفاده برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی به روش پروب.....۲٤
شکل۲-٦ نمودار دما به لگاریتم زمان.....۲۵
شکل ۲-۷ حجم کنترل شده و توزیع دما $T(x,y,z)$ در مختصات کارتزین.....۳۰
شکل۳-۱ سیستم اندازه‌گیری هدایت حرارتی.....۵۲
شکل ۳-۲ مراحل رسم هندسه مربوط به بخش کف قوطی. الف: تعیین نقاط مختلف برای رسم هندسه ب: حذف کمانهای اضافی و تبدیل خطوط به صفحه.....٥٤
شکل ۳-۳ شکل هندسی قوطی از نوع Alupak ۲۳۲ B.....٥٤
شکل ۳-٤ محل قرارگیری قطعات گوشت در داخل قوطی در مدل مربوط به کنسرو قورمه سبزی.....۵۵
شکل ۳-۵ شکل هندسی قوطی و اجزای داخلی آن در مدل مربوط به کنسرو قورمه سبزی.....۵٦
شکل ۳-٦ محل قرارگیری قطعات گوشت و سیب زمینی در داخل قوطی در مدل مربوط به کنسرو قیمه.....۵۸
شکل۳-۷ شکل هندسی قوطی و اجزای داخلی آن در مدل مربوط به کنسرو قیمه.....۵۹
شکل ۳-۸ شبکه بندی سطح قوطی با المان‌های مثلثی به صورت سنگفرش.....٦۰
شکل ۳-۹ شبکه بندی سطح گوشت، لوبیا و دیواره‌های قوطی در مدل مربوط به کنسرو قورمه سبزی.....٦۰
شکل ۳-۱۰ شبکه بندی حجم قطعات گوشت و لوبیا در مدل مربوط به کنسرو قورمه سبزی.....٦۱
شکل ۳-۱۱ شبکه بندی کل حجم قوطی در مدل مربوط به کنسرو قورمه سبزی.....٦۱
شکل ۳-۱۲ شبکه بندی سطح اجزا در مدل مربوط به خورش قیمه.....٦۲
شکل ۳-۱۳ یک مقطع کروی از داخل قوطی مربوط به شبکه بندی مدل کنسرو قورمه سبزی.....٦٤
شکل ۳-۱٤ یک مقطع عرضی از داخل قوطی مربوط به شبکه بندی مدل کنسرو قورمه سبزی.....٦٤
شکل ۳-۱۵ یک مقطع کروی از داخل قوطی مربوط به شبکه بندی مدل کنسرو قیمه.....٦۵
شکل ۳-۱٦ یک مقطع از ارتفاع داخل قوطی مربوط به شبکه بندی مدل کنسرو قیمه.....٦۵
شکل ۳-۱۷ نمودار همگرا شدن باقیمانده‌های انرژی بعد از ۲۰ تکرار.....۷۱
شکل ۳-۱۸ ترموکوپل k و نحوه اتصال قطعات گوشت به آن.....۷٦
شکل ٤-۱ شبکه بندی مدل قورمه سبزی در فلوئنت.....۸۰
شکل ٤-۲ نمودار تغییرات دمای اتوکلاو در طول زمان در فرایند حرارتی.....۸۰
شکل ٤-۳ باقیمانده‌های انرژی در الف) t=۱۱ min، ب) t=٦۱ min ۸۱
شکل ٤-٤ روند تغییرات دما در سطح دیوارهای قطعه گوشت مرکزی برحسب بازه‌های زمانی.....۸۲
شکل ٤-۵ روند تغییرات دما برحسب تکرارهای متوالی در نقطه ای روی محور مختصات قوطی به ارتفاع ۱۲ میلی متر از کف قوطی.....۸۲

شکل ٤-٦ پروفیل دما در لحظه شروع عملیات فرایند حرارتی در الف: سطح x=۰ و دیواره‌های جانبی قوطی، ب: سطوح x=۰ و y=۰، ج: سطح z=۰..... ۸۳
شکل ٤-۷ پروفیل دما در لحظه t=٦۰s در الف: سطح x=۰ و ب: z=۱۳mm نسبت به کف قوطی..... ۸٤
شکل ٤-۸ پروفیل دما در سطح x=۰ در لحظه الف) t=۰s ، ب) t=۱۵۰۰s ، ج) t=۲۳٤۰ ، د) t=۵۱۰۰s..... ۸٤
شکل ٤-۹ پروفیل دما در سطح z=۱۳mm نسبت به کف قوطی در لحظه الف) t=۰s ، ب) t=۱۵۰۰s ، ج) t=۲۳٤۰s ، د) t=۵۱۰۰s..... ۸۵
شکل ٤-۱۰ پروفیل دما در لحظه الف: t=۹٦۰s پس از شروع عملیات فرایند حرارتی نمای اجزای داخل قوطی(گوشت و لوبیا)، ب: لحظه t=۲۳٤۰s نمای اجزای داخل قوطی(گوشت و لوبیا)، ج: لحظه t=۲۳٤۰s نمای اجزای داخل قوطی(گوشت و لوبیا) و دیواره‌های جانبی قوطی، د: لحظه t=۵۱٦۰s نمای اجزای داخل قوطی(گوشت و لوبیا)..... ۸٦
شکل ٤-۱۱ پروفیل دما در پایان دقیقه ۳۹ استرلیزاسیون(t=۲۳٤۰s) در برش‌های الف) y=۱۰mm، ب) y=۰، ج) y=-۱۰mm ۸۷
شکل ٤-۱۲ پروفیل دما در پایان دقیقه ۳۹ استرلیزاسیون(t=۲۳٤۰s) در برش‌های الف) x=-۱۵mm، ب) x=-۱۰mm ، پ) x=-۸mm، ت) x=-۵mm ث) x=۵ mm ، ج) x=۸mm ، د) x=۱۰ mm ، ی) x=۱۵mm..... ۸۸
شکل ٤-۱۳ پروفیل دما در پایان دقیقه ۳۹ استرلیزاسیون(t=۲۳٤۰s) در برش‌های الف) z=۸mm، ب) z=۱۰mm پ) z=۱۳ mm ج) z=۱٦ mm ، د) z=۱۷mm ، ی) z=۱۸mm (دما برحسب درجه کلوین ارایه شده است)..... ۸۹
شکل ٤-۱٤ تصویر هندسی مدل و مشخص کردن موقعیت گوشه‌های قطعه گوشت در مرکز قوطی با توجه به سیستم کارتزین..... ۹۰
شکل ٤-۱۵ تصویر هندسی مدل و مشخص کردن موقعیت ناحیه کند حرارتی در قطعه گوشت در مرکز قوطی با توجه به سیستم کارتزین..... ۹۱
شکل ٤-۱٦ شکل ٤-۱٦ الف)نمودار تغییرات دما نسبت به زمان، ب) نمودار تغییرات F نسبت به زمان. CP: حداقل دما در نقطه واقع در مختصات ۱۳ و ۰ و ۰ = x, y, z و CMWS: میانگین دما برسطوح دیواره قطعه گوشت مرکزی..... ۹۲
شکل ٤-۱۷ منحنی نفوذ دما در شش تکرار آزمایشگاهی (تکرار ۱ تا ٦) در محل ترموکوپل، دمای اتوکلاو و پیش بینی تئوری دما به وسیله مدل (در محل CP به مختصات ۱۳ , ۰ , ۰ = z , y , x و متوسط دما روی سطح دیواره‌های گوشت مرکزی CMWS) ۹۳
شکل ٤-۱۸ نمودار دمای پیش بینی شده بر حسب میانگین دمای تکرارهای آزمایشگاهی از آغاز استرلیزاسیون تا پایان حرارت دهی..... ۹٤
شکل ٤-۱۹ نمودار دمای پیش بینی شده برحسب میانگین دمای تکرارهای آزمایشگاهی در مرحله خشک کردن..... ۹۵
شکل ٤-۲۰ نمودار دمای پیش بینی شده برحسب میانگین دمای تکرارهای آزمایشگاهی در مرحله خنک کردن..... ۹۵
شکل ٤-۲۱ شبکه بندی مدل قیمه در فلوئنت..... ۹٦
شکل ٤-۲۲ باقیمانده‌های انرژی در الف) t=۱۱ min، ب) t=٤۰ min..... ۹۷

شکل ٤-٢٣ روند تغییرات دما در سطح دیواره‌های قطعه گوشت مرکزی برحسب بازه‌های زمانی.....۹۷
شکل ٤-٢٤ روند تغییرات دما برحسب بازه‌های زمانی در نقاطی روی محور مختصات قوطی به ارتفاع الف)۱۱، ب)۱۳/۷۵، ج) ۱۵میلی متر از کف قوطی، د) روند تغییرات دما برحسب تکرارهای متوالی در نقطه ای روی محور مختصات قوطی به ارتفاع ۱۳/۷۵ میلی متر از کف قوطی.....۹۸
شکل ٤-٢٥پروفیل دما در سطح x=۰ و z=۱۳/۷۵ در الف) t=٦۰۰s ، ب) t=۱۲٦۰s ، ج) t=۲٤۰۰s ، د) t=٥۱۰۰s.....۹۹
شکل ٤-٢٦پروفیل دما در سطح y=۰ در الف) t=٦٦۰s ، ب) t=۱۲٦۰s ، ج) t=۲٤٦۰s ، د) t=٥۱٦۰s.....۱۰۰
شکل ٤-٢٧ پروفیل دما در لحظه الف: t=٦۰۰s پس از شروع عملیات فرایند حرارتی نمای اجزای داخل قوطی(گوشت و لپه و سیب زمینی) و کف قوطی، ب۱: لحظه t=۲٤۰۰s نمای اجزای داخل قوطی و کف قوطی، ب۲: نمای اجزای داخل قوطی و دیواره‌های جانبی قوطی، ج: لحظه t=٥۱۰۰s نمای اجزای داخل قوطی و دیواره‌های جانبی قوطی.....۱۰۱
شکل ٤-٢٨ پروفیل دما در پایان دقیقه ٤۰ استرلیزاسیون(t=۲٤۰۰s) در برش‌های الف) y=-۲۰mm ، ب) y=-۱۸mm ، پ) y=-۱٦mm، ت) y=-۱۰mm، ث)y=۰، ج) y=۱۰mm، چ) y=۱٦mm،.....۱۰۳
شکل ٤-٢٩ پروفیل دما در پایان دقیقه ٤۰ استرلیزاسیون(t=۲٤۰۰s) در برش‌های الف) x=-۱٦mm ، ب) x=-۱٤mm، پ) x=-۱۲mm ، ت) x=-۱۰mm ، ث) x=-۷mm ، ج) x=۰ ، چ) x=٥mm ، ح) x=۸mm ، خ) x=۱۱mm، د) x=۱۲mm ، ذ) x=۱٤mm ، ر) x=۱٦mm ۱۰٤
شکل ٤-۳۰ پروفیل دما در پایان دقیقه ٤۰ استرلیزاسیون(t=۲٤۰۰s) در برش‌های الف) z=۸mm ، ب) z=۹mm ، پ) z=۱۱ mm ، ت) z=۱۳ mm ، ث) z=۱٥mm ، ج) z=۱٦mm ، چ) z=۱۸ mm ، ح) z=۱۹mm ۱۰٥
شکل ٤-۳۱ پروفیل دما در پایان دقیقه ٤۰ استرلیزاسیون(t=۲٤۰۰s)، اجزای داخل قوطی (گوشت ، لپه و سیب زمینی) و کف قوطی ۱۰٦
شکل ٤-۳۲ پروفیل دما در پایان دقیقه ٤۰ استرلیزاسیون(t=۲٤۰۰s)، در محل تقاطع سه سطح x=۰، y=۰، z=۱۳.....۱۰٦
شکل ٤-۳۳ تصویر هندسی مدل قیمه و مشخص کردن موقعیت ناحیه کند حرارتی در مرکز قوطی با توجه به سیستم کارتزین.....۱۰۷
شکل ٤-۳٤ الف)نمودار تغییرات دما نسبت به زمان، ب) نمودار تغییرات F نسبت به زمان، z۱۱: حداقل دما در نقطه واقع در مختصات (۱۱ و ۰ و x, y, z = ۰)، z۱۲ حداقل دما در نقطه واقع در مختصات (۱۲ و ۰ و x, y, z = ۰) و CMWS: میانگین دما برسطوح دیواره قطعه گوشت مرکزی.....۱۰۸
شکل ٤-۳٥ نمودار دمای پیش بینی شده بر حسب میانگین دمای تکرارهای آزمایشگاهی از آغاز استرلیزاسیون تا پایان حرارت دهی.....۱۰۹
شکل ٤-۳٦ نمودار دمای پیش بینی شده برحسب میانگین دمای تکرارهای آزمایشگاهی در مرحله خنک کردن.....۱۱۰

چکیده

هدف اصلی استریلیزاسیون غیر فعال کردن اسپور باکتری‌های مضر برای سلامت عمومی و میکروارگانیزم‌های عامل فساد داخل بسته مواد غذایی است، اما بدیهی است ضرورت دارد از حرارت دادن بیش از حد نیاز به دلیل کاهش کیفیت غذا و مصرف انرژی بیش از حد و کاهش ظرفیت واحد تولیدی پرهیز گردد. در این مطالعه یک مدل عددی برای توصیف انتقال حرارت در داخل قوطی‌های جدید کنسرو از نوع مکعب مستطیل شکل طی فرایند حرارتی به عنوان تابعی از عوامل درونی (دمای اولیه و ترکیب داخل قوطی) و عوامل بیرونی (دمای اتوکلاو) با نرم افزار فلوئنت جهت پیش بینی پروفیل‌های دما، شدت فرایند حرارتی (Fvalue) و تعیین ناحیه سرد قوطی برای دو نوع خوراک ایرانی (خورش قورمه سبزی و خورش قیمه) توسعه داده شد و سپس به منظور بررسی مدل عملیات معتبرسازی برای ارزیابی داده‌های مدل از اعداد تولید شده به صورت تجربی انجام شد. رسم شکل هندسی، تعیین شرایط فیزیک مساله (سیستم معادلات اصلی و شرایط مرزی) و شبکه بندی با نرم افزار گمبیت انجام پذیرفت و بعد فرمت تهیه شده برای حل مساله انتقال حرارت با نرم افزار فلوئنت بکارگرفته شد. از بسته‌های نوع ۲۳۲B از محصولات آلوپک در شبیه سازی و معتبرسازی و تایید مدل در این تحقیق استفاده گردید. وزن خالص قوطی ۱۸۰ گرم بود که در مورد قورمه سبزی مطابق استاندارد ملی شامل ۲۷ گرم گوشت پخته و ۲۵/۲ گرم لوبیا قرمز پخته و در کنسرو قیمه مطابق استاندارد ملی شامل ۲۷ گرم گوشت پخته، ۲۱/٦ گرم لپه و ١٤/٤ گرم سیب زمینی آنزیم‌بری شده بود. تعداد کل المان‌های حجمی در مدل قورمه سبزی و قیمه به ترتیب ٤٩٨٥٠٩ و ١٣١١٨٢٦ المان و حجم همه المان‌ها مثبت بود. سطح کلیه لوبیاها، همه قطعات گوشت، سقف و کف و دیواره‌های جانبی قوطی، سطح همه لپه‌ها و قطعات سیب زمینی به عنوان دیواره انتخاب شدند. در شرایط حل مسأله هر یک از دیواره‌ها، دمایی متفاوت از سایر دیواره‌ها داشت و در بخش تعیین شرایط مرزی هر دیواره به صورت جداگانه و با نام خاص به صورت مجزا در نرم افزار در نظر گرفته شد. شرایط فشار پایه، ضمنی، گذرا و معادلات درجه دو ضمنی برای حل مشخص شدند. برای دیواره‌های جانبی، سقف و کف قوطی ویژگی‌های ممنتوم به صورت دیواره ثابت، ویژگی‌های برش به صورت بدون لغزش و ویژگی‌های حرارتی آن برای دمای ثابت در نظر گرفته شد که برای هر مقطع زمانی با توجه به پروفیل دما – زمان اتوکلاو تعریف گردید. گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارتی و دانسیته مواد داخل بسته غذا به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری و در مدل استفاده شد. شرایط حرارتی دیواره‌های گوشت، لوبیا، سیب زمینی و لپه به صورت جفت شده یا کوپل و کل مدت زمان فرایند حرارتی شامل مراحل افزایش دما، دمای ثابت و خنک کردن ۸۵ دقیقه در نظر گرفته شد. ناحیه کند حرارتی در مدل قورمه سبزی با توجه به سیستم کارتزین در ناحیه (۸ > x > ۱۰- و ۱۰ > y > ۱۰- و ۱۷ > z > ۱۰) قرار دارد که مربوط به قطعه گوشت مشخص شده در مرکز مدل است. ناحیه کند حرارتی در مدل قیمه در ناحیه (١٦ > x > ١٤- و ١٦ > y > ١٦- و ١٩ > z > ٨) قرار دارد که مربوط به قطعه گوشت فرض شده در مرکز مدل است. میانگین دما در مدل قورمه در شش تکرار تجربی و در مدل قیمه در دوتکرار تجربی برای هر دقیقه محاسبه و با دمای پیش بینی شده در هر دقیقه توسط مدل در نقطه‌ای روی محور مختصات قوطی به ارتفاع ۱۳ میلی‌متر از کف قوطی مقایسه گردید. با استفاده از آزمون آماری t مشخص شد، تفاوت بین دماهای پیش بینی شده و دماهای حاصل از تکرارهای آزمایشگاهی در سطح احتمال یک درصد معنی دار نبود.

واژه‌های کلیدی: ناحیه کند حرارتی، استریلیزاسیون، بسته‌بندی آلومینیومی نیمه سخت، نرم افزار فلوئنت و گمبیت

فصل اول
مقدمه

۱-۱ مقدمه

پیشرفت روش‌های محاسباتی در علوم مختلف در چند قرن گذشته چشمگیر بوده است. متأسفانه در کشور ما این روش‌ها عمر زیادی ندارد و شاید از دو دهه تجاوز نکند. با توجه به بالا بودن هزینه روش‌های تجربی و ضعف روش‌های تحلیلی در حل مسائل مهندسی، امروزه اغلب محققان روش-های عددی را در پیش گرفته اند. فهم مناسب الگوریتم حل عددی یک مسأله مهم می‌باشد. سه ایده ریاضی در مشخص کردن کارایی یا عدم کارایی هر یک از الگوریتم‌ها می‌تواند به کار رود: همگرایی[۱]، سازگاری[۲] و پایداری[۳]. همگرایی خاصیتی از روش عددی برای به دست آوردن جوابی است که به حل دقیق نزدیک می‌باشد، به طوریکه فاصله شبکه، اندازه حجم کنترل یا المان به صفر میل می‌کند. طرح‌های عددی سازگار، دستگاهی از معادلات جبری را ایجاد می‌کنند که می‌توان نشان داد با معادله حاکم اصلی زمانی که فاصله شبکه به صفر میل می‌کند، معادل است. پایداری در روش عددی با میرایی خطاها همراه

۱-Convergence
۲-Consistency
۳-Stability

می‌باشد. اگر یک روش پایدار نباشد حتی با گرد کردن خطاها در داده‌های اولیه، می‌تواند موجب واگرایی یا نوسانات زیاد گردد[۸].

باوجود پیشرفت روش‌های غیر حرارتی[۱] نگهداری مواد غذایی، استریلیزاسیون حرارتی هنوز متداولترین روش نگهداری بسیاری از مواد غذایی به شمار می‌رود[۳۲] که با توجه به نوع ماده فرایند شونده و عمر ماندگاری به دو روش تولید قوطی کنسرو[۲] و ناپلشت کردن[۳] قابل انجام است[۱۹، ۳۲، ٤۷]. بیش از یک قرن است که فرایند حرارتی، بنیاد مهمی در تولید غذاهای کنسرو شده با عمر ماندگاری بالا به شمار می‌رود[۸۳]. هدف اصلی فرایند حرارتی غیر فعال کردن اسپور باکتری‌های مضر برای سلامت عمومی و میکروارگانیزم‌های عامل فساد داخل بسته مواد غذایی است، ضمن آنکه لازم است از حرارت اضافی به دلیل تخریب کیفیت غذا و مصرف انرژی بیش از حد لازم و کاهش ظرفیت واحد تولیدی پرهیز گردد[۱۸، ۷٤]. با توجه به نگرانی‌های عمده موجود در مورد کلستریدیوم بوتولینوم که سم آن حتی در مقادیر جزئی برای انسان کشنده است، سازمان‌های دولتی قوانین سختگیرانه‌ای برای فرایند حرارتی غذاهای کم اسید وضع کرده‌اند[۱۹]. برای بهبود کیفیت غذا و بهینه کردن شرایط فرایند، تخمین سرعت انتقال حرارت ضروری است و فهم بهتر مکانیزم انتقال حرارت می تواند باعث اجرای بهتر فرایند وجلوگیری از تلف شدن انرژی شود. هدایت، جابجایی طبیعی و اجباری روش‌های مهم انتقال حرارت در فرایند حرارتی غذا به شمار می روند[۱۷]. ناحیه کند حرارتی به منطقه ای از قوطی گفته می شود که طولانی ترین زمان را برای رسیدن به دمای نهایی استریلیزاسیون نیاز دارد و در فرایند حرارتی کمترین میزان گرما را دریافت می کند[٦۳]. به منظور تضمین سلامت عمومی و تامین حداقل کشندگی[٤] لازم، انجام محاسبات فرایند حرارتی ضروری به نظر می رسد. بنابراین درستی روشی که برای این امر استفاده می شود برای پژوهشگران اهمیت بسیاری دارد[۱۳، ٤۱]. یکی از روش‌هایی که برای معتبرسازی استفاده می شود جمع آوری اطلاعات دما- زمان در طول فرایند حرارتی است[٤۷] ولی پروب‌های مورد استفاده اندازه بزرگی دارند که بر جریان سیال خوراکی داخل قوطی و در نتیجه توزیع دما اثر می گذارند. روش-های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)[٥] ابزار قدرتمندی برای پیش بینی دما در داخل قوطی در اختیار می‌گذارند. تعدادی بسته نرم افزاری تجاری برای این منظور وجود دارد که می‌توان به FIDAP، PHOENICS، FLOW ۳-D و FLUENT اشاره کرد[۱٤، ۲۰، ۳۲]. نرم افزار فلوئنت یک برنامه تحلیل‌گر است که برای شبیه سازی و تحلیل محفظه جریان سیال، انتقال حرارت، فرایندهای

۱-Non-thermal
۲-Canning
۳-Aseptic
٤-Lethality
٥-Computational Fluid Dynamics

شیمیایی، اختلاط، احتراق، جریان‌های با سطح آزاد، جریان در محیط‌های متخلخل و غیره استفاده می-شود. این نرم افزار یک برنامه تخصصی است و لازم است اطلاعات کافی نسبت به اصول اولیه مربوط به مسأله در آن وارد شود تا حل مطلوب به دست آید. به کارگیری تحلیل‌گر مناسب، شرایط مرزی قابل قبول، شبکه بندی مناسب محفظه مورد نظر از موارد مهم در یک شبیه سازی عددی است که کاربر باید به آنها توجه داشته باشد، زیرا در شبیه سازی عددی ممکن است حل همگرا شود (باقیمانده‌ها به دقت مورد نظر میل کنند)، ولی جواب‌ها از نظر فیزیکی قابل قبول نباشد. قبل از شروع کار با نرم افزارهای فلوئنت و گمبیت، آشنایی با روش‌های شبکه بندی و اصول اولیه دینامیک سیالات محاسباتی لازم است. تشخیص اعتبار مدلهای فیزیکی و شیمیایی به پیچیدگی برنامه CFD بستگی دارد و دقت نتایج نهایی جز با مقایسه نتایج آزمایشگاهی غیرممکن است.

کار با بسته‌های آلومینیومی نیمه سخت راحت است، حمل ونقل بسته‌های خالی از این نوع نیزآسان است چون به راحتی در یکدیگر فرو می روند و فضای کمی را اشغال می کنند. لذا در این تحقیق از بسته‌های نیمه سخت با پایه آلومینیومی برای کنسرو کردن استفاده شد. در این پژوهش با توجه به ویژگی-های ترموفیزیکی اندازه‌گیری شده و با استفاده از نرم افزار فلوئنت مدلی ریاضی برای توصیف انتقال حرارت در داخل قوطی و پیش‌بینی پروفیل‌های دما، شدت فرایند حرارتی و تعیین نقطه سرد قوطی در کنسرو دو نوع خوراک ایرانی (قورمه سبزی و قیمه) در طی فرایند حرارتی به عنوان تابعی از دمای اتوکلاو توسعه داده شد. داده‌های پیش بینی شده به وسیله مدل با مقادیر آزمایشی مقایسه شدند تا اعتبار مدل بررسی گردد.

فصل دوم
بررسی منابع

۲-۱ مکانیزم‌های انتقال گرما

هرگاه اختلاف دما در یک ماده یا بین دو ماده وجود داشته باشد، انتقال گرما رخ می‌دهد. فرایندهای مختلف انتقال گرما شیوه‌های انتقال گرما نامیده می‌شوند. برای بیان انتقال گرما در ماده ای ساکن (خواه جامد یا سیال) که در آن اختلاف دما وجود دارد وجابجایی در ماده صورت نمی‌گیرد از واژه رسانایی[۱] استفاده می‌شود. در مقابل واژه جابه جایی[۲] هنگامی به کار می‌رود که انتقال گرما بین یک سطح جامد و یک سیال در حال حرکت با دماهای متفاوت رخ دهد یا زمانی که انتقال گرما درون یک سیال با دماهای متفاوت که جابجایی در آن رخ می دهد، صورت گیرد. شیوه سوم انتقال گرما به صورت تابشی[۳] است. تمام سطوحی که در دمای معینی هستند، انرژی را به صورت امواج الکترومغناطیسی صادر می کنند. بنابراین در غیاب یک ماده واسطه، بین دو سطح با دماهای متفاوت انتقال گرمای خالص تابشی رخ می-دهد [۵، ۷۸]. مکانیزم دیگری که در انتقال حرارت وجود دارد مکانیزم تغییر فاز است. مثلاً اگر در فرایند استریلیزاسیون غذا، از بخار در حال کندانس بر روی سطح بسته استفاده شود انتقال حرارت بسیار موثرتر از زمانی خواهد بود که از آب داغ استفاده شود. کندانس بخار به دو صورت لایه[۴] و یا قطره روی سطح شکل می‌گیرد که در حالت قطره‌ای انتقال حرارت بهتر است[۷۸].

۱-Conduction
۲-Convection
۳-Thermal Radiation
٤-Film Condensation