

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک تبدیل انرژی

مدل سازی عددی کوره الکتریکی تحت خلأ

نگارنده: الناز قاضیانی

استاد راهنما

دکتر محمد حسن کیهانی

استاد مشاور

دکتر محسن نظری

بهمن ۱۳۹۶

شماره: ۱۷۷/۲۹۶/۱۳
تاریخ: ۹۶/۱۲/۱۳

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای: الناز قاضیانی
با شماره دانشجویی: ۹۴۱۳۸۴۴ رشته: مهندسی مکانیک گرایش: تبدیل انرژی
تحت عنوان: مدل سازی عددی کوره الکتریکی تحت خلا
که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۱۱ با حضور هیات محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به
شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: بسیار خوب) مردود
نوع تحقیق: نظری عملی

اعضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیات داوران
	استاد	محمد حسن کهنیا	۱- استاد راهنمای اول
—	—	—	۲- استاد راهنمای دوم
	دانشیار	حسن تهرانی	۳- استاد مشاور
	استاد	محمد جواد باقر	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	دانشیار	محمد حسن شاه مردان	۵- استاد امتحن اول
	استاد	علی سرکشان	۶- استاد امتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاه مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تقدیم به پدر و مادر عزیز و مهربانم

که در سختی ها و دشواری های زندگی، همواره یاورمی دلسوز و خداکار و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده-

اند

تقدیم به همسر

به پاس قدردانی از قلبی آکنده از عشق و معرفت که محیطی سرشار از سلامت و امنیت و

آرامش و آسایش برای من فراهم آورده است

سپاسگزاری

شکرشایان نثار ایزدمنان که توفیق را رفیق راهم ساخت تا این پایان نامه را

به اتمام برسانم. از اساتید فاضل و اندیشمندان، جناب آقای دکتر محمد حسن کیهانی و

دکتر محسن نظری که، همواره راهنما و راه‌کشای بنده در اتمام پایان نامه بوده‌اند، کمال

تشکر و قدردانی را دارم و نیز از خانواده ام که با شکیبایی و مهربانی در کنارم بودند...

تعهد نامه

اینجانب الناز قاضیانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته تبدیل انرژی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدل سازی عددی کوره الکتریکی تحت خلأ تحت راهنمایی دکتر محمد حسن کیهانی متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا یافتههای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

این پایان نامه به صورت عددی به مدل سازی انتقال حرارت درون کوره های الکتریکی تحت خلأ می پردازد. در این تحقیق، روش غالب انتقال حرارت درون کوره بدلیل خلأ بودن داخل محفظه، تشعشی است. هدف از این مدل سازی، یکنواخت بودن دما و شار داخل محفظه کوره، بدست آوردن توان ورودی لازم و تعداد سپرهای تشعشی مناسب و ساختار آن در کوره دما بالا و در نهایت خنک کاری این نوع کوره ها است.

کوره الکتریکی تحت خلأ به صورت دوبعدی با مکانیزم انتقال حرارت تشعشی مدل می شود. در این تحقیق کوره های دما پایین تا دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد و کوره های دما بالا از دمای ۷۰۰ تا ۱۷۰۰ درجه سانتی گراد در ابعاد مختلف بررسی می شوند. در هر دو نوع کوره منبع حرارتی المنتها هستند که چهار عدد المنت الکتریکی در چهار وجه هندسه تعبیه می شود و قطعه کاری در مرکز کوره قرار می گیرد. در کوره دما پایین، بین محفظه گرمایی و جداره خارجی کوره، عایق سرامیکی وجود دارد و انتقال حرارت تشعشی فقط داخل محفظه کوره انجام می گیرد و در قسمت عایق حرارتی، قطعه کاری، المنتها و جداره ها انتقال حرارت هدایتی صورت می گیرد. در کوره دما بالا، بین محفظه گرمایی و جداره خارجی، به جای استفاده از عایق، سپرهای تشعشی قرار می گیرند؛ این سپرها همانند مقاومت های حرارتی در مسیر انتقال حرارت تشعشی بین جداره خارجی و المنتها قرار گرفته و سبب کاهش نرخ انتقال حرارت به سمت بیرون می شوند که در فاصله بین سپرها نیز خلأ وجود دارد. در نتیجه علاوه بر محفظه گرمایی، در فاصله بین سپرهای تشعشی نیز انتقال حرارت تشعشی صورت می گیرد. در این نوع کوره ها اطراف جداره خارجی را محفظه ای از جنس استیل پوشانده است که در داخل آن، سیال خنک کننده آب جریان دارد. این خنک کاری برای صرفه جویی در انرژی و هزینه صورت می گیرد تا علاوه بر کم کردن تعداد سپرها، دمای خروجی نیز کم شود. اطلاعات هندسی و حرارتی مورد نظر مدل سازی از نمونه های واقعی ساخته شده در شرکت دانش بنیان علم گستران صنعت آرتا انتخاب شده است.

در هر کدام از کوره ها، استقلال نتایج از شبکه بندی ناحیه حل مطالعه می شود. سپس اثرات توان ورودی المنتها بررسی می شود. ملاک برای بدست آوردن توان لازم، زمانی است که قطعه کاری داخل کوره به دمای مورد نظر طراحی در هر کدام نوع از کوره ها می رسد. سپس در کوره دما بالا، تعداد سپرهای تشعشی مورد نیاز با توجه به ابعاد کوره و جنس سپرها و همچنین دمای جداره خارجی

تعیین می‌شود. در این بررسی ابعاد کل کوره و محفظه گرمایی ثابت است و در فضای بین‌المنتهای و جداره خارجی سپرها با تعداد مناسب توزیع و طراحی می‌شوند.

با توجه به اینکه یکنواختی دما و شار داخل کوره‌ها از اهداف این تحقیق است، در مختصات‌های مختلف داخل کوره، قطعه کاری جایگذاری می‌شود و نمودارهای مربوط به دما و شار حرارتی تشعشعی متوسط محیطی نشان داده می‌شود. نتایج بدست آمده حاکی از یکنواختی بالاتر در کوره‌های با ابعاد کوچک‌تر است.

تأثیر تغییر ضریب نشر و ضریب هدایتی حرارتی قطعه کاری داخل کوره بر توزیع دما و شار حرارتی تشعشعی نیز بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که توزیع دما در کوره به مقدار قابل توجهی به ضریب نشر بستگی دارد و توزیع شار حرارتی به هر دو ضریب نشر و ضریب هدایتی حرارتی بستگی خواهد داشت.

خنک‌کاری کوره دما بالا، مطالعه نهایی در این پایان‌نامه است. این بخش با کم کردن تعداد سپرهای تشعشعی در داخل کوره دما بالا و مطالعه اثرات خنک‌کاری بر دمای جداره خارجی کوره اعمال خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد که خنک‌کاری تأثیر بسزایی در کاهش دمای جداره خارجی از ۱۳۰ الی ۱۴۰ درجه دارد.

واژگان کلیدی: انتقال حرارت تشعشعی، سپر تشعشعی، کوره تحت خلأ

.....	سپاسگزاری	۵
.....	چکیده	ز
.....	فهرست شکل ها	ل
.....	فهرست جداول	ن
.....	فهرست علائم	س
.....	۱- فصل اول: مقدمه و کلیات	۱
.....	۱-۱ مقدمه	۲
.....	۲-۱ کوره های صنعتی	۲
.....	۳-۱ کوره های عملیات حرارتی	۲
.....	۴-۱ کوره های تحت خلأ	۴
.....	۵-۱ سپرهای تشعشی	۵
.....	۲- فصل دوم: مروری بر تحقیقات پیشین	۷
.....	۱-۲ مطالعات انجام شده	۸
.....	۲-۲ هدف از مدل سازی مطالعه حاضر	۱۴
.....	۳-۲ ساختار و فصل بندی پایان نامه	۱۵
.....	۳- فصل سوم: مبانی انتقال حرارت تشعشی، معادلات حاکم، شرایط مرزی و روش حل عددی	۱۷
.....	۱-۳ مکانیزم فیزیکی روش انتقال حرارت تشعشی	۱۸
.....	۲-۳ شدت تشعشع	۱۸
.....	۳-۳ قانون استفان بولتزمن	۱۹
.....	۴-۳ ضریب صدور	۱۹
.....	۵-۳ ضریب شکل یا ضریب دید	۱۹
.....	۶-۳ تبادل تشعشع بین اجسام سیاه	۱۹
.....	۷-۳ تبادل تشعشع بین سطوح پخشی خاکستری در محفظه	۲۰
.....	۸-۳ انتقال حرارت در کوره الکتریکی خلأ	۲۲
.....	۹-۳ انتقال حرارت هدایتی در کوره	۲۳
.....	۱۰-۳ شرط مرزی بین بخشهای جامد	۲۳
.....	۱۱-۳ انتقال حرارت جابجایی در بخش خنک کاری کوره	۲۵
.....	۱-۱۱-۳ فیزیک جریان آرام در بخش خنک کاری	۲۵

۲۵	انتقال حرارت تشعشعی در کوره
۲۶	منبع حرارتی در کوره
۲۶	روش حل عددی
۲۹	فصل چهارم: نتایج مدل سازی کوره دما پایین
۳۰	۱-۴ مقدمه
۳۰	۲-۴ مدلسازی کوره دما پایین
۳۱	۳-۴ مطالعه استقلال نتایج از شبکه بندی ناحیه حل در کوره دما پایین
۳۲	۴-۴ صحت سنجی نتایج
۳۳	۵-۴ بررسی توان ورودی به کوره
۳۴	۶-۴ بررسی یکنواختی دمای داخل کوره
۳۷	۷-۴ بررسی توزیع دما و شار حرارتی در حالت‌های مختلف قطعه کاری درون کوره
۴۰	۱-۷-۴ تغییر هندسه قطعه کاری درون کوره (صفحه مستطیلی)
۴۳	۲-۷-۴ تغییر هندسه قطعه کاری درون کوره (قطعه مربعی)
۴۷	فصل پنجم: نتایج مدل سازی کوره دما بالا
۴۸	۱-۵ مقدمه
۴۸	۲-۵ مدلسازی کوره دما بالا
۵۰	۳-۵ مطالعه استقلال نتایج از شبکه بندی ناحیه حل برای کوره دما بالا
۵۱	۴-۵ بررسی توان در کوره دما بالا
۵۴	۵-۵ بررسی تعداد سپرهای تشعشعی
۶۰	۶-۵ بررسی یکنواختی دما و شار در کوره دما بالا
۶۲	۷-۵ بررسی توزیع دما و شار حرارتی در حالت‌های مختلف قطعه کاری درون کوره دما بالا
۶۴	۱-۷-۵ تغییر هندسه قطعه کاری درون کوره
۶۶	۸-۵ خنک کاری کوره دما بالا
۶۷	۱-۸-۵ مطالعه استقلال نتایج از شبکه بندی ناحیه حل با وجود خنک کاری
۶۹	۲-۸-۵ خنک کاری کوره در ابعاد مختلف
۷۳	فصل ششم: جمع بندی
۷۴	۱-۶ مقدمه
۷۴	۲-۶ ارائه نتایج

۶-۳ پیشنهادات و کارهای آینده ۷۶

فهرست منابع ۷۷

Abstract ۸۱

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۳ شار حرارتی ورودی و خروجی ۲۱
- شکل ۲-۳ هندسه کوره (الف) کوره دما پایین، (ب) کوره دما بالا ۲۳
- شکل ۳-۳ شماتیک مربوط به خصوصیات سطح تماس در مرز بین دو جامد ۲۴
- شکل ۱-۴- شماتیک کوره دما پایین ۳۰
- شکل ۲-۴ (الف) مسئله حل شده کتاب اینکروپرا (ب) شماتیک هندسه مدل سازی ۳۳
- شکل ۳-۴ نمودار بهینه سازی توان برای کوره دما پایین ۳۴
- شکل ۴-۴ شش نقطه مختلف درون کوره دما پایین ۳۵
- شکل ۵-۴ بررسی توزیع دما داخل کوره، نمودار دمای متوسط محیطی گلوله استیلی داخل کوره با توان ۲۰۰۰ وات نسبت به زمان تا ۹۳ دقیقه (الف) کوره ۲۷ لیتری، (ب) کوره ۴۲ لیتری، (ج) کوره ۵۹ لیتری، (د) کوره ۹۷ لیتری ۳۶
- شکل ۶-۴ کانتور دما در شماتیک کوره وقتی گلوله استیلی با قطر ۱ سانتیمتر در مرکز آن قرار دارد ۳۸
- شکل ۷-۴ اثر تغییر ضریب هدایتی حرارتی و ضریب نشر گلوله با قطر ۱ سانتیمتر در مختصات (۱۵۹، ۱۵۹) داخل کوره با توان ۲۰۰۰ وات. (الف) نمودار دمای متوسط محیطی گلوله داخل کوره نسبت به زمان در k و ϵ های مختلف. (ب) نمودار شار حرارتی تشعشعی متوسط محیطی گلوله داخل کوره نسبت به زمان در k و ϵ های مختلف. ۳۹
- شکل ۸-۴ شماتیک صفحه مستطیلی داخل کوره ۵۹ لیتری ۴۱
- (الف) ۴۲
- (ب) ۴۲
- شکل ۹-۴ اثر تغییر ضریب هدایتی حرارتی و ضریب نشر صفحه مستطیلی با ابعاد $۲*۱۰۰$ میلیمتر مربع واقع در مرکز کوره ۵۹ لیتری با توان ۲۰۰۰ وات در زمان ۹۳ دقیقه. (الف) نمودار توزیع دما در راستای ضلع سمت راست صفحه مستطیلی در k, ϵ های مختلف (ب) نمودار توزیع شار حرارتی تشعشعی در راستای ضلع سمت راست صفحه مستطیلی در k, ϵ های مختلف ۴۲
- شکل ۱۰-۴ شماتیک قطعه مربعی مورد بررسی داخل کوره ۵۹ لیتری ۴۳
- (الف) ۴۴
- (ب) ۴۴

شکل ۴-۱۱ اثر تغییر ضریب هدایتی حرارتی و ضریب نشر قطعه مربعی با ابعاد ۵*۵ سانتیمتر مربع واقع در مرکز کوره ۵۹ لیتری با توان ۲۰۰۰ وات در زمان ۹۳ دقیقه. (الف) نمودار توزیع دما در نیمه سمت راست قطعه مربعی در k, ε های مختلف (ب) نمودار توزیع شار حرارتی تشعشعی در نیمه سمت راست قطعه مربعی در k, ε های مختلف..... ۴۴

شکل ۵-۱ شماتیک کوره دما بالا بدون خنک کاری بدنه خارجی..... ۴۹

شکل ۵-۲ بررسی توان لازم با رسم نمودار زمان به توان با وجود ۲ سپر تشعشعی استیلی و ۳ سپر تشعشعی مولیبدنی، (الف) کوره ۱۵*۱۵ سانتی متر مربع (ب) کوره ۲۵*۲۵ سانتی متر مربع (ج) کوره ۳۰*۳۰ سانتی متر مربع..... ۵۳

شکل ۵-۳ بررسی تعداد سپرهای تشعشعی به کمک مقدار دمای جداره خارجی (الف) کوره با ابعاد ۱۵*۱۵ سانتیمتر مربع (ب) کوره با ابعاد ۲۵*۲۵ سانتیمتر مربع (ج) کوره با ابعاد ۳۰*۳۰ سانتیمتر مربع..... ۵۹

شکل ۵-۴ شش نقطه مختلف درون کوره دما بالا..... ۶۱

شکل ۵-۵ بررسی یکنواختی دما و شار حرارتی تشعشعی داخل کوره با ابعاد ۳۰*۳۰ سانتیمتر مربع با وجود ۲ سپر تشعشعی استیلی و ۳ سپر تشعشعی مولیبدنی و توان ۲۶ کیلو وات (الف) نمودار دمای متوسط محیطی نسبت به زمان (ب) نمودار شار حرارتی تشعشعی متوسط محیطی نسبت به زمان..... ۶۱

شکل ۵-۶ اثر تغییر ضریب هدایتی حرارتی و ضریب نشر گلوله با قطر ۱ سانتی متر در مختصات (۱۵۲، ۱۵۲) داخل کوره با ابعاد ۳۰*۳۰ سانتیمتر مربع و توان ۲۶ کیلو وات با وجود ۲ سپر تشعشعی استیلی و ۳ سپر تشعشعی مولیبدنی، (الف) نمودار دمای متوسط محیطی گلوله نسبت به زمان در k و ε های مختلف برای گلوله (ب) نمودار شار حرارتی تشعشعی متوسط محیطی گلوله نسبت به زمان در k و ε های مختلف برای گلوله..... ۶۳

شکل ۵-۷ شماتیک قطعه مربعی مورد بررسی داخل کوره ۵۹ لیتری..... ۶۵

شکل ۵-۸ اثر تغییر ضریب هدایتی حرارتی و ضریب نشر قطعه مربعی با ابعاد ۵*۵ سانتیمتر مربع واقع در مرکز کوره با ابعاد ۳۰*۳۰ سانتیمتر مربع با توان ۲۶ کیلو وات در زمان ۱۰ دقیقه. (الف) نمودار توزیع دما در نیمه سمت راست قطعه مربعی در k, ε های مختلف (ب) نمودار توزیع شار حرارتی تشعشعی در نیمه سمت راست قطعه مربعی در k, ε های مختلف..... ۶۵

شکل ۵-۹ شماتیک کوره دما بالا با وجود خنک کاری..... ۶۷

شکل ۵-۱۰ بررسی تاثیر خنک کاری در کوره دما بالا، (الف) کوره با ابعاد ۱۵*۱۵ سانتی متر مربع و توان ۱۵ کیلووات (ب) کوره با ابعاد ۳۰*۳۰ سانتی متر مربع و توان ۲۶ کیلووات..... ۷۰

شکل ۵-۱۱ بررسی تاثیر خنک کاری در کوره دما بالا با ابعاد ۱۵*۱۵ سانتی متر مربع و توان ۱۵ کیلووات ۷۱

فهرست جداول

- جدول ۴-۱ مشخصات فیزیکی مواد به کار رفته در طراحی کوره ۳۱
- جدول ۴-۲ مطالعه استقلال نتایج از شبکه بندی ناحیه حل در کوره دما پایین برای کوره ۵۹ لیتری ۳۲
- جدول ۴-۳ مختصات های مختلف استفاده شده برای بررسی یکنواختی دما مطابق شکل ۴-۴ ۳۵
- جدول ۵-۱ مشخصات فیزیکی مواد به کار رفته در طراحی کوره ۴۹
- جدول ۵-۲ مطالعه استقلال نتایج از شبکه بندی ناحیه حل در کوره دما بالا بدون خنک کاری ۵۱
- جدول ۵-۳ ابعاد المنتها در ابعاد مختلف کوره دما بالا ۵۲
- جدول ۵-۴ فاصله بین صفحات در کوره دما بالا ۵۵
- جدول ۵-۵ بررسی تعداد سپرهای تشعشی در کوره با ابعاد ۱۵*۱۵ سانتیمتر مربع ۵۶
- جدول ۵-۶ بررسی تعداد سپرهای تشعشی در کوره با ابعاد ۲۵*۲۵ سانتیمتر مربع ۵۷
- جدول ۵-۷ بررسی تعداد سپرهای تشعشی در کوره با ابعاد ۳۰*۳۰ سانتیمتر مربع ۵۸
- جدول ۵-۸ شش مختصات مختلف درون کوره برای بررسی یکنواختی دما و شار مطابق شکل ۴-۵ ۶۰
- جدول ۵-۹ مطالعه استقلال نتایج از شبکه بندی ناحیه حل با وجود خنک کاری ۶۸

فهرست علائم

• علائم انگلیسی

S	تعداد سپر تشعشعی استیلی
M	تعداد سپر تشعشعی مولیبدنی
T	دما
J	رادئوسیتی
t	زمان
u	سرعت
q	شار تشعشعی
G	شار ورودی
I	شدت تشعشع
k	ضریب هدایتی حرارتی
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت
Re	عدد رینولدز
F	فاکتور دید و نیروی حجمی
P	فشار
e_b	قدرت نشر جسم سیاه

• علائم یونانی

σ	انحراف معیار و ثابت استفان بولتزمن
ρ	چگالی و ضریب انعکاس
α	ضریب جذب
ε	ضریب نشر
λ	طول موج
μ	ویسکوزیته دینامیکی

• زیرنویس ها

ext	خارجی
b	جسم سیاه
amb	محیط

۱- فصل اول: مقدمه و کلیات

۱-۱ مقدمه

کوره^۱ ابزاری برای گرمایش است. از کوره‌ها بیشتر برای ساخت ابزار و وسایل سرامیکی استفاده می‌شد. کوره‌ها به دو دسته کلی خانگی و صنعتی تقسیم می‌شوند.

۱-۲ کوره های صنعتی

کوره‌های حرارت‌دهی در فرایندهای صنعتی، محفظه‌های عایق شده‌ای هستند که برای حرارت‌دهی مواد در فرایندهای مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ذوب کردن فلزات آهنی و شیشه‌ها نیازمند پدید آمدن دماهای بسیار بالایی است و علاوه بر دما این فرایندها ممکن است در محیط‌های خورنده انجام شود. در فرایندهای شکل‌دهی از دمای بالا استفاده می‌شود. در این فرایندها از دما برای نرم کردن (خمیری کردن) مواد مختلف استفاده می‌شود. این فرایندها عبارتند از فرجینگ، هدیده کردن، نورد کردن، پرس کردن، خم کردن و اکستروژن کردن. فرایندهای اصلاحی ممکن است در دما-های متوسط انجام شود. در این فرایندها، ساختارهای کریستالی به صورت فیزیکی تغییر می‌کند، مانند: فرایندهای سخت کردن و رهایش تنش در فلزات. مثال‌های از این فرایندها عبارتست از: پیرسازی، آنیل کردن، آستنیت‌ه کردن، کربونیزاسیون، سخت کردن، چکش خوار کردن، مارتنزیت کردن، نیتریده کردن، زینترینگ، اسفرویدیزینگ، رهایش تنش و تمپر کردن. فرایندهای صنعتی که از دماهای پایین بهره می‌برند عبارتند از: خشک کردن، پلیمریزاسیون و سایر تغییرات شیمیایی.

کوره‌های صنعتی که باعث نمی‌شوند مواد فلزی داخل آن‌ها به دمای سرخ شدن برسند، عموماً آن^۲ نامیده می‌شوند. آن‌ها معمولاً دماهای زیر ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد ایجاد می‌کنند. عملیات‌های حرارت‌دهی صنعتی شامل گستره‌ی وسیعی از دماها است که تا حدی به مواد مورد استفاده و تا حدی به هدف فرایند حرارت‌دهی و عملیات‌های بعدی بستگی دارد. در هر فرایند حرارت‌دهی، همیشه دمای ماکزیمم کوره از دمایی که بار کوره نیاز دارد بیشتر است.

۱-۳ کوره های عملیات حرارتی

مهم‌ترین کاربرد کوره‌ها در این پژوهش عملیات حرارتی است. کوره‌های عملیات حرارتی به آن دسته از کوره‌ها اطلاق می‌شود که هدف از بکارگیری آن‌ها بالا بردن دمای فلزات به عنوان عمده‌ترین بار درون کوره تا دمای مشخصی می‌باشد، تا بر آن‌ها عملیات ویژه‌ای صورت پذیرد و از ویژگی این دسته

^۱ Furnace
^۲ Oven

از کوره‌ها این است که تغییر خاص شیمیایی از جمله تغییر فاز فلز و یا همان ذوب شدگی بار درون کوره اتفاق نمی‌افتد [۱].

مرز پایین دمایی در این نوع کوره‌ها بایستی بالاتر از دمای مشخصی باشد و حد بالایی نیز توسط دمای تغییر فاز بار درون کوره و فرم خاص دانه بندی فلزات و همچنین نوع عملیات حرارتی لازم محدود می‌شود [۱].

دمای درون این کوره‌ها معمولاً برای هر ناحیه گرمایی یکنواخت می‌باشد، اما در کوره های یک ناحیه‌ای از نوع کوره های پخت، این دما به زمان وابسته است. در مدل‌های کوره‌های پیوسته ماده شارژ شده به درون کوره در طول کوره حرکت می‌کند و در مناطق مختلف حرارتی، گرم می‌شود.

تفاوت‌های موجود در عملکرد انواع مختلف کوره های عملیات حرارتی به دو پارامتر طراحی زیر وابسته می‌باشد [۱]:

۱. روش تامین حرارت و انرژی در کوره

۲. روش و مکانیزم انتقال بار درون کوره

در رابطه با تامین حرارت مورد نیاز محیط داخل کوره به طور معمول از دو روش متفاوت استفاده می‌شود، که یکی احتراق سوخت‌های فسیلی می‌باشد و دیگری تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی گرمایی است. همچنین در مورد چگونگی انتقال بار درون کوره و خروج بار از کوره پس از رسیدن به دمای مشخص، دو روش متفاوت وجود دارد [۱].

الف- بار گذاری از نوع نوبتی^۱ که این دسته از کوره های عملیات حرارتی را کوره تناوبی می‌گویند. در این دسته از کوره ها، بار در موقعیت مشخصی درون کوره قرار می‌گیرد و تا رسیدن به دمای مناسب در همان موقعیت قرار می‌گیرد و پس از رسیدن بار به دمای مشخص از همان در ورودی کوره و یا درب خروج کوره خارج می‌شود.

ب- کوره‌های عملیات حرارتی پیوسته^۲ که در این دسته از کوره ها، بار به درون کوره شارژ می‌شود و در طول کوره حرکت می‌کند تا وقتی که به دمای مورد نظر برسد.

^۱ In – and – out
^۲ Continus

در تقسیم‌بندی کوره‌های عملیات حرارتی، کوره‌های پخت یا بارگذاری نوبتی را کوره‌های بدون ناحیه و کوره‌های پیوسته را، کوره‌هایی با ناحیه بندی دمایی می‌نامند [۲].

۱-۴ کوره های تحت خلأ

کوره‌های خلأ دارای کاربردهای گسترده‌ای در صنعت و حوزه‌های تحقیقاتی می‌باشند. عملیات حرارتی قطعات در کوره خلأ در صنعت هوافضا (تولید و تعمیر)، تولید توربین‌های زمینی، در صنعت خودرو و تولید ابزار کاربرد داشته و مدت‌ها است که استفاده می‌شود. در آن مواد تحت خلأ و حرارت بالا قرار می‌گیرند و فرآیندهایی مانند بریزینگ، سینترینگ، کربرایز کردن و عملیات حرارتی با سازگاری بالا و آلودگی پایین انجام می‌گیرد. پیش‌بینی صحیح تغییرات و توزیع دما در این کوره‌ها اهمیت بالایی در بدست آوردن کیفیت مناسب محصول و کاهش مصرف انرژی دارد. هر دو مرحله گرمایش و سرمایش را می‌توان در یک محفظه کوره انجام داد.

در بیشتر فرآیندهای عملیات حرارتی، وقتی مواد گرم می‌شوند با گازهای اتمسفری شامل نیتروژن، اکسیژن، آرگون و کربن‌دی‌اکسید واکنش می‌دهند. اغلب این واکنش‌ها نامطلوب است پس قطعه کار بایستی در فضایی حرارت داده شود که عاری از این گازها باشد. در کوره‌های اتمسفری، امکان تغییر ترکیب شیمیایی اتمسفر جهت ایجاد واکنش‌های مطلوب‌تر یا کنترل ترکیب شیمیایی با تغییر درجه حرارت وجود ندارد. تکنولوژی کوره خلأ این اجازه را می‌دهد که بیشتر ترکیبات اجزای نا-مطلوب ایجاد شده در هوای اتمسفری در طول گرم کردن قطعه کار حذف شوند و امکان هر گونه تغییرات سطح، مانند سخت‌شدگی، اکسیداسیون، کربن زدایی یا پوسته پوسته شدن حذف می‌شود. پس از پردازش در محیط خلأ محصولات دارای سطحی روشن و براق بوده و در برخی موارد آماده استفاده هستند. با ایجاد سیستم‌های پمپاژ مناسب خلأی، غلظت اکسیژن و بخار آب می‌تواند تا سطوح خیلی پایین‌تر از اتمسفر شامل گازهای خنثی کاهش یابد.

امروزه از این کوره‌ها برای سخت‌کاری قطعات حساس و با دمای آستنیت بالا مانند قطعات از جنس فولادهای ابزار گرم کار و فولادهای ابزار تندبر استفاده می‌شود. عملیات حرارتی قابل انجام توسط این کوره شامل سخت‌کاری، نرماله و آنیل می‌باشد.

در عملیات حرارتی در خلأ قبل از این که کوره گرم شود، قطعات را داخل آن گذاشته و هوای آن را توسط پمپ خلأ تخلیه می‌کنند. وقتی یک کوره تخلیه می‌شود، واکنش‌های گازی شامل آن‌هایی که با اتمسفر هستند حذف می‌شوند.

۱-۵ سپرهای تشعشی

با توجه به کاربردهای وسیعی که سپرهای تشعشی^۱ در زمینه‌های مختلف دارند، انتقال حرارت تشعشع نیز یکی از مهم‌ترین موده‌های انتقال حرارت به شمار می‌آید. می‌دانیم که در انتقال حرارت به روش هدایت برای کاهش حرارت انتقال یافته، می‌توان از عایق‌های حرارتی استفاده کرد که میزان کاهش انتقال حرارت هدایتی با ضخامت دیوار عایق حرارتی نسبت مستقیم دارد، یعنی هر چقدر ضخامت عایق بیشتر باشد، کاهش انتقال حرارت هدایتی نیز بیشتر رخ می‌دهد [۳].

یکی از راه‌های کاهش انتقال حرارت بین سطوحی که با یکدیگر تبادل تشعشع دارند این است که آن سطوح از مواد با ضریب انعکاس بالا انتخاب شوند. علاوه بر این با قرار دادن سپرهای تشعشی با ضریب صدور پایین (ضریب انعکاس بالا) نیز می‌توان سبب کاهش انتقال حرارت شد [۳].

سپرهای صفحات نازک و موازی با درجه انعکاس بالا هستند که بین صفحات تشعشی قرار داده می‌شوند تا انتقال انرژی بین آنها را کم کنند.

یک عایق با تاثیر بسیار بالا می‌تواند با استفاده از تعدادی صفحات جدا شده به وسیله خلأ به وجود بیاید تا سبب ایجاد یک سری تشعشعات متناوب شده و مانع فرآیند انتقال حرارت هدایت شود. ساختمان سپرهای تشعشی معمولاً به صورت چند لایه از ورقه نازک می‌تواند تشکیل شود که صفحات با فضای خلأ از هم جدا شده‌اند یعنی انتقال حرارت فقط از طریق تشعشع صورت می‌گیرد [۳].

در واقع سپرها، همانند مقاومتی در مسیر انتقال حرارت تشعشی بین سطوح قرار گرفته و سبب کاهش انتقال حرارت می‌شوند، حال اگر این سپرها ضخیم باشند، انتقال حرارت هدایت نیز به عنوان مقاومتی دیگر در مسیر انتقال گرما ظاهر شده و سبب کاهش بیشتر انتقال گرما می‌شود. سپرهای تشعشی کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف از جمله: کاربردهای فضایی، صنعت خودروسازی، زمینه‌های پزشکی و طراحی کوره‌ها دارد [۳].

کاربرد کوره‌های صنعتی مورد نظر در این تحقیق، عملیات حرارتی می‌باشد که قطعه کاری موجود در آن تحت خلأ است و تغییر فاز نمی‌دهد. کوره مورد بحث به دو قسمت کوره دما پایین و دما بالا تقسیم می‌شود، در کوره دما پایین دلیل کم بودن محدوده دمایی از عایق‌های حرارتی استفاده می‌-

^۱ Radiation shields

شود ولی در کوره دما بالا بدلیل محدوده دمایی بالا به جای عایق‌های حرارتی ضخیم از سپرهای
تشعشی با تعداد مناسب که در فاصله‌ی مشخصی از هم قرار دارند، استفاده خواهد شد.

۲- فصل دوم: مروری بر تحقیقات پیشین

۲-۱ مطالعات انجام شده

در طی پنجاه سال گذشته حجم زیادی از مطالعات و تحقیقات انجام شده در زمینه کوره‌های عملیات حرارتی صورت گرفته است. این مطالعات در کوره‌های عملیات حرارتی به دو دسته کلی تقسیم می‌شود [۲].

۱. تامین گرما و حرارت تغذیه کننده کوره

۲. کارکرد کوره در حالتی که مصرف سوخت یا انرژی در حالت کمینه باشد.

در مدل‌سازی و همچنین طراحی ماشین آلات حرارتی با سوخت فسیلی، مهارت طراح و همچنین روش‌هایی که طراح استفاده می‌کند به طور گسترده‌ای در چگونگی مدل‌سازی موثر است. بنابراین چگونگی شبیه‌سازی یک فرآیند حرارتی در کوره به توسعه شبیه‌سازی ریاضی و فیزیکی مدل بستگی دارد. به خصوص در سال‌های اخیر با استفاده از امکانات نرم افزاری و قوی تر شدن امکانات محاسباتی و بکارگیری روش‌های گوناگون شبیه‌سازی، طراحی و مدل‌سازی کوره‌های عملیات حرارتی توسعه چشمگیری داشته است. در گذشته طراحی کوره‌های عملیات حرارتی بیشتر به نظر و تجربه طراحی و روش تحلیل دستگاه حرارتی وابسته بود و در بعضی موارد این تجربیات به عنوان نمودارهایی مرتبط به یکدیگر ثبت می‌شد که از این طریق، مطالعات انجام شده به سایر مهندسين طراح منتقل می‌شد. اما امروزه برای شبیه‌سازی و توسعه روش‌های مدل‌سازی ریاضی و فیزیک کوره‌های عملیات حرارتی از قابلیت‌های جدید محاسبات کامپیوتری استفاده می‌شود [۲].

در تمامی روش‌های مدل‌سازی کوره‌های عملیات حرارتی چنین فرض می‌شود که حرارت و گرمای زیادی به سطح قطعه کاری درون کوره توسط انتقال حرارت تشعشعی^۱ منتقل می‌شود. در اکثر آن‌ها گرمای محیط درون کوره با سوختن سوخت گازی تولید می‌شود و انتقال حرارت جابجایی^۲ و تشعشعی به بار صورت می‌گیرد [۲].

^۱ radiation
^۲ convection

هاتل^۱ و کوهن^۴ [۴] مطالعاتی پیرامون توزیع دمایی گازی غیر یکنواخت در یک کوره انجام دادند. این مطالعات نشان داد که همواره اختلاف دمایی بین لایه‌های مختلف و ناحیه مرکزی یک قطعه کاری وجود دارد که می‌توان این اختلاف دما را با نگه داشتن قطعه کاری در داخل کوره به مدت طولانی به کم‌ترین مقدار رساند. همچنین سرعت گرمایش به سطح مقطع قطعه کاری و تمایل ماده مورد نظر برای گرم شدن بستگی دارد. کوره عملیات حرارتی به عنوان یک بخش مهم از فرآیند کاری روی قطعه کار نیازمند انرژی است و این انرژی به شکل انرژی شیمیایی ناشی از احتراق سوخت می‌باشد. بخشی از این انرژی که در تغذیه مواد داخل کوره مورد مصرف است همان انرژی مفید مصرفی است. در مدل‌سازی کوره‌های عملیات حرارتی برای کاربردهای کنترلی کوره، از مدل‌های ساده‌تر استفاده می‌شود، از آن جمله می‌توانیم به مطالعات فیتز جرال^۲ [۵] اشاره کرد که یک روند محاسباتی را برای انتقال حرارت با وجود احتراق گاز طبیعی در یک کوره توسعه داد، همچنین توزیع درجه حرارت قطعه درون کوره عملیات حرارتی را با استفاده از روش‌های تفاضل محدود برای یک مدل یک بعدی انتقال حرارت هدایت به دست آورد. فیتز جرال و شریدن^۳ [۵] مطالعاتی پیرامون تشعشع گازها و معادلات موازنه انرژی برای یک سیستم گازی انجام دادند و با حل دستگاه معادلات، درجه حرارت را در محفظه کوره به دست آوردند که یافته‌های تجربی را به خوبی تایید کرد.

میستری^۴ و همکاران [۶] روشی برای ساخت مدل محاسباتی کوره الکتریکی ارائه دادند. در این کوره دو المنت در بالا و پایین آن قرار دارد و انتقال حرارت به صورت جابجایی و تشعشعی و ترکیبی از هر دو صورت می‌گیرد. مدل‌سازی محاسباتی کوره‌های الکتریکی که به صورت سه بعدی، ناپایا و با جریان جابجایی طبیعی است که با انتقال حرارت تابشی کوپل می‌شود. یک سری از مقالات توسط آبراهام^۵ و ساپارو^۶ [۷-۱۲] منتشر شده است که انتقال حرارت در محفظه‌های تخلیه شامل تشعشع را

^۱ Hottel
^۲ Fitzgerald
^۳ Shrieden
^۴ Mistry
^۵ Abraham
^۶ Sparrow

وقتی که المنت موجود در کف عمل می‌کند، در نظر می‌گیرند. این مجموعه از مقالات شامل مطالعات تجربی و عددی است که در مورد اهمیت مدل‌سازی نیروهای شناوری به جای استفاده از اختلاف چگالی در مدل، مطالعات حساسیت بار حرارتی و سنجش اندازه‌گیری با توجه به خواص تابشی آن بحث می‌کنند. در این مقالات انتقال گرما در محفظه‌هایی با گرما از کف بدون وجود چرخه گرمایی مورد مطالعه قرار می‌گیرد [۷-۱۳].

چانوال^۱ و همکاران [۱۴] مدل محاسباتی کوره الکتریکی برای پخت نان را با نرم افزار فلونت^۲ ارائه دادند. در این کوره دو المنت در بالا و پایین قرار دادند. انتقال حرارت در این کوره به صورت هدایتی، جابجایی و تشعشعی می‌باشد که حالت تشعشعی غالب است. هدف رسیدن دمای نان به ۱۰۰ درجه سلسیوس بود. کانگ^۳ و همکاران [۱۵] یک روش ترکیبی تجربی و عددی برای انتقال حرارت تابشی، جابجایی و هدایتی در فرآیند عملیات حرارتی قطعه کار ارائه کردند. دو حالت برای کنترل ریز ساختار نهایی، خواص قطعه و کاهش مصرف انرژی و حالت بهینه برای حرارت دهی مطالعه کردند. این حالت‌ها دو الگوی بارگذاری مختلف یکی به صورت مجموعه‌ای از تیغه‌های فولادی و دیگری بارگذاری به شکل مته‌ای بود. نتایج نشان داد که با تغییر الگوی بارگذاری میزان انتقال حرارت و دما تغییر می‌کند. مطالعاتی برای شبیه سازی فرآیند گرمایش ورقه، تیر و قطعه که شامل بخش مستطیلی یا گرد در کوره باز گرمایش برای نورد و صفحات استیلی، انجام شده است [۱۶-۱۹]. که در بیشتر این کارها بر مشکل احتراق در دیگ بخار یا محفظه احتراق متمرکز شده است و تاکید کمتری به انتقال حرارت بین منابع گرمایی و بار شده است [۲۰-۲۵]. گائو^۴ یک روش برای محاسبه زمان حرارت دادن به قطعه با شکل دلخواه ارائه داده است [۲۶]. با این حال، در این مطالعه درجه حرارت کوره ثابت در نظر گرفته شده است.

^۱ Chhanwal
^۲ Fluent
^۳ Jinwu kang
^۴ Gao

موچیدا^۱ و همکاران [۲۷] مدلی را برای محاسبه مسئله انتقال حرارت ترکیبی هدایتی و تشعشعی سه بعدی گذرا در کوره خلأ که توسط مشعلی که سوخت آن گاز شهری است شبیه سازی کردند. هدف از شبیه سازی پیدا کردن ناحیه ای در کوره بود که توزیع دما در آن یکنواخت باشد. مقایسه نتایج با اندازه گیری های تجربی نشان داد که دمای اشیای گرم شده که در منطقه حرارت مؤثر قرار دارند تقریباً یکنواخت بود، در حالی که دمای سطوح مشعل غیر یکنواخت می باشد. هاچم^۲ و همکاران [۲۸] مدل محاسباتی سه بعدی برای شبیه سازی کوره های صنعتی پیچیده با دمای ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد ارائه دادند و انتقال حرارت جابجایی طبیعی و اجباری، هدایتی، تشعشعی و جریان هوا داخل کوره را به صورت عددی با المان محدود بررسی کردند. مولفین مشاهده کردند که الگوی جریان هوا و پروفیل دما در نقاط مختلف کوره با هم تفاوت دارد و این روش با نتایج تجربی توافق خوبی دارد. مهربان و همکاران [۲۹]، طراحی بهینه یک کوره تابشی با سطح متحرک محصول را مورد بررسی قرار دادند. هدف طراحی، ایجاد توان صدور و شار حرارتی مطلوب گذرا روی سطح محصول با اعمال توان حرارتی بهینه گرمکن های روی سطح کوره است. مسئله طراحی از بخش های: ۱- مسئله مستقیم با روش شبه دایمی برای حل معادلات تشعشعی و محاسبه ضرایب دید، ۲- مسئله معکوس، شامل کمینه کردن تابع هدف مناسب با استفاده از روش گرادیان مزدوج و ۳- مسئله حساسیت با حل مسئله مقدار مرزی برای محاسبه ماتریس حساسیت، تشکیل می شود.

سامبر^۳ [۳۰] روش انتقال گسسته^۴ که توسط لاک وود^۵ و شاه^۶ [۳۱] برای محاسبه انتقال حرارت تشعشعی ارائه شده بود را با الگوریتم های مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار داد و اصلاحاتی برای بهبود دقت و عملکرد محاسباتی پیشنهاد داد، ضمناً الگوریتم ارائه شده بر روی کاربردهای مختلفی که تابش حرارتی روش غالب انتقال حرارت است (مانند طراحی کوره های صنعتی) پیاده شده است. در

^۱ Mochida

^۲ Hachem

^۳ Cumber

^۴ Discrete transfer method

^۵ Lock wood

^۶ Shah

این گزارش شار حرارتی تشعشعی داخل کوره با افزایش شعاع کوره استوانه‌ای، به صورت سهموی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. لاری و همکاران [۳۲]، به ارزیابی انتقال حرارت تشعشعی در سیستم-هایی شامل اثر متقابل حالت‌های مختلف انتقال حرارت پرداختند. این ارزیابی در دو بخش، انتقال حرارت مرکب رسانایی و تابش در هندسه‌های پیچیده و انتقال حرارت مرکب تشعشعی و جابجایی طبیعی در محفظه‌های دوبعدی با هندسه منظم و نامنظم انجام می‌گیرد. بر طبق نتایج بخش اول، زمانی که انتقال حرارت تشعشعی غالب است، اختلال در کانتورهای شار حرارتی دیده می‌شود. بر طبق نتایج بخش دوم، حتی در محفظه‌هایی با دمای دیواره پایین و اختلاف دمای کوچک همراه با گازهای جذب کننده ناچیز، صرف نظر کردن از محاسبات تشعشعی در تحلیل، خطای زیادی را ایجاد می‌کند. ذبیحی و همکاران [۳۳]، انتقال حرارت تابشی-هدایتی را در هندسه دوبعدی نامنظم با استفاده از رفتار مرزی جا سازی شده^۱ در سیستم مختصات کارتیزین ارزیابی کردند. نتایج شار حرارتی و دما را برای مسئله تابشی-هدایتی بدست آوردند و با روش نواحی خاموش^۲ که در تجزیه و تحلیل هندسه‌های پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد، مقایسه کردند. نتایج نشان داد که وقتی مرز مورد نظر شیب یا انحنای نداشته باشد، روش نواحی خاموش مناسب است ولی این روش در مرزهای دارای انحنای شیب، رفتار نوسانی غیر فیزیکی دارد، بنابراین روش مرزی جا سازی شده مناسب‌تر است. ابجدپور و همکاران [۳۴]، انتقال حرارت تابشی در محیط‌های مشارکتی و با حضور دیوارهای خاکستری در محفظه دو بعدی با مرزهای خمیده و شکسته را مدل سازی کردند و با استفاده از ترفندهای نواحی خاموش و مرز جداسازی شده به حل پرداختند. ترفند نواحی خاموش به علت اعمال مرزهای شکسته و خمیده به صورت پله‌ای نتایج نوسانی دارد و ترفند مرز جداسازی شده به علت اعمال مرز فیزیکی واقعی، نسبت به ترفند نواحی خاموش تطابق مناسب‌تری با حل دقیق دارد. دیوارهای سرد میانی برای نواحی با ضخامت نوری متوسط بیشترین تاثیر را در کاهش شار حرارتی دارند. ویسکانتا^۳ و همکاران

^۱ Embedded boundary treatment

^۲ Blocked-off

^۳ Viskanta

[۳۵]، انتقال حرارت تشعشعی را در مدل سازی سیستم‌های احتراقی بررسی کردند. خواص تشعشعی محصولات احتراق و گازها، مدل سازی آن‌ها و روش‌های حل معادلات انتقال تابش را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند، و با توجه به پیچیدگی سیستم‌های احتراقی در مدل سازی عددی، مناطق مشکل ساز را شناسایی کردند. مارتیشیو^۱ و همکاران [۳۶]، جابجایی طبیعی و تابش حرارتی در یک محفظه مکعبی که هدایت در دیوارها با ضخامت محدود، صورت می‌گیرد و منبع گرما در کف آن قرار دارد را تجزیه و تحلیل کردند. حل عددی به کمک معادلات سه بعدی و روش تفاضل محدود انجام گرفته است و خطوط جریان و دمای بدست آمده با مدل دو بعدی مقایسه شده است. تاثیر پارامترها بر روی عدد ناسلت متوسط تعیین می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که عدد ناسلت متوسط جابجایی، تابع افزایش عدد رایلی، ضریب هدایت حرارتی و کاهش ضریب نشر است. عبدالعزیز [۳۷]، تاثیر تشعشع بر گرما و جریان سیال بالای یک سطح کششی افقی را به صورت ناپایا بررسی کرد. در این راستا معادلات لایه مرزی وابسته به زمان، برای انرژی گرمایی و مومنتوم را به مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل معمولی کاهش داد. پارامترهای مورد مطالعه، پارامتر ناپایا A ، پارامتر تشعشعی R و عدد پرانتل Pr هستند. نتایج نشان داد که نرخ انتقال حرارت با افزایش Pr ، A ، R افزایش می‌یابد و همچنین تاثیر پارامتر تابشی در نرخ انتقال حرارت در مقادیر بزرگتری از A و Pr قابل مشاهده است. باتالر^۲ [۳۸]، مسئله انتقال حرارت تابشی و جریان سیال تراکم ناپذیر را بر روی یک ورق کششی با تولید گرمای داخلی غیر یکنواخت بررسی کرد، نتایج نشان داد که کاهش دمای مایع با کاهش عدد پرانتل و پارامتر تشعشعی همراه است. پولدر^۳ و همکاران [۳۹]، یک فرمول بندی کلی برای انتقال گرمای تابشی بین اجزای ماکروسکوپی دی الکتریک با خواص جذب و نشر مورد ارزیابی قرار دادند. این فرمول بندی در محیط خلأ بین دو بدنه در دماهای مختلف اعمال می‌شود. کم شدن فاصله بین دو بدنه با افزایش شدید انتقال گرمای تابشی همراه است که با نتایج تجربی در توافق است. مایر^۴ و همکاران [۴۰] روشی

^۱ Martyushev

^۲ bataller

^۳ Polder

^۴ Mayr

جدید برای تشخیص تابش بین بدنه جامد و گاز برای قسمت شعاعی شار حرارتی ارائه می‌دهند که برای بررسی کوره آزمایشگاهی ۱۱۵ کیلو وات و یک کوره صنعتی تجدید پذیر ۱۸ مگا وات، با استفاده از اکسید کننده‌ها با غلظت مختلف اکسیژن، مورد استفاده قرار می‌گیرند. شبیه سازی و آزمایش نشان داد که قابلیت کوره با افزایش اکسیژن در اکسید کننده افزایش می‌یابد و همچنین تابش منتشر شده از دیوارها، بیشترین مشارکت را در گرما داشته، در حالی که سهم تابش گاز جزئی بود. جباری [۴۱] با استفاده از روش‌های تحلیلی و با توجه به مفاهیم انتقال حرارت تشعشعی، میزان انتقال حرارت تشعشعی را وقتی که از سپرهای تشعشعی استفاده شده است، بررسی کرد. این بررسی نشان داد که به کار بردن سپرهای تشعشعی باعث کاهش انتقال حرارت شده است و همچنین به کار بردن یک سپر با ضریب صدور کمتر بهتر از دو یا حتی ۳ سپر با ضریب صدور بیشتر است و حالت بهینه از ترکیب سپرهای تشعشعی با جنس‌های مختلف بدست آمده است.

۲-۲ هدف از مدل سازی مطالعه حاضر

با توجه به تحقیقات پیشین می‌توان به این موضوع پی برد که در اکثر تحقیقات انجام شده در مورد کوره‌ها، عامل گرمایش، محصولات احتراق بوده است. ضمناً تحقیقات اندکی نیز در مورد مدل سازی عددی کوره‌های الکتریکی تحت خلأ با مکانیزم انتقال حرارت تشعشعی، دیده می‌شود. به بیان دیگر اکثر مطالعات انجام شده مربوط به روش‌های مختلف عددی برای تجزیه و تحلیل انتقال حرارت تشعشعی در صفحات، محفظه‌ها، در مرزها و هندسه‌های مختلف به غیر از کوره‌های صنعتی تحت خلأ است.

با توجه به توضیحات داده شده در فصل اول و اهمیت کوره‌های الکتریکی تحت خلأ در صنعت قرار است، مدل سازی دقیق عددی با در نظر گرفتن مکانیزم انتقال حرارت تشعشعی ارائه شود. در این پژوهش کوره‌های صنعتی در دو حالت کوره دما پایین (تا دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) و کوره دما بالا (از دمای ۷۰۰ تا ۱۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) مدل سازی شده است و توزیع دما و شار حرارتی تشعشعی را در داخل کوره بررسی خواهیم کرد. توان مورد نیاز برای انتقال حرارت و همچنین

مناسب‌ترین تعداد سپرهای تشعشعی برای کوره‌های دما بالا ارائه خواهد شد. تاثیر پارامترهای مختلف از جمله ضریب هدایت حرارتی و ضریب نشر قطعه کار داخل کوره بر توزیع دما و شار حرارتی بررسی خواهد گردید، دستیابی به چیدمان مناسب المنت‌های حرارتی، توان کاری مناسب برای المنت‌ها و بدست آوردن تعداد سپرهای تشعشعی برای ابعاد مختلف کوره‌ها از جمله اهداف این پایان‌نامه است.

۲-۳ ساختار و فصل بندی پایان نامه

این پایان نامه در شش فصل ارائه شده است. فصل اول به مقدمه اختصاص داده شده است که گذری بر کلیات کوره‌ها و سپرهای تشعشعی می‌باشد. فصل دوم (فصل حاضر) نیز تاریخچه کارهای انجام شده و اهداف تحقیق را بررسی می‌کند. در فصل سوم، مبانی انتقال حرارت تشعشعی به عنوان روش غالب انتقال حرارت در کوره‌های الکتریکی تحت خلأ، معادلات حاکم بر انتقال حرارت تابشی، شرایط مرزی مربوطه و روش عددی به کار برده شده در طراحی ذکر خواهد شد. سپس در فصل‌های ۴ و ۵ نتایج بدست آمده را در حالت‌های مختلف به ترتیب برای کوره دما پایین و کوره دما بالا، بررسی خواهیم کرد. فصل آخر نیز نتیجه گیری کلی از تحقیق و پیشنهاد کارهای آینده می‌باشد.

۳- فصل سوم : مبانی انتقال حرارت تشعشعی، معادلات حاکم،
شرایط مرزی و روش حل عددی

۳-۱ مکانیزم فیزیکی روش انتقال حرارت تشعشی

یکی از انواع انتقال حرارت، انتقال حرارت تابشی است و تنها نوع انتقال حرارت است که انتشار انرژی در آن نیاز به محیط مادی ندارد، بنابراین به راحتی می تواند در خلأ منتشر شود و با توجه به اینکه داخل کوره در حال بررسی، خلأ می باشد، بنابراین عمده انتقال حرارت در آن تشعشی است [۴۲].

به طور کلی انرژی تابشی را می توان در موارد زیر به عنوان مواد اصلی انتقال حرارت استفاده کرد:

- وقتی که دمای مطلق جسم بالا باشد
- محاسبات کوره ها و بویلرها
- محاسبات گازهای خروجی از انتهای موشک ها.

از بین تمام امواج الکترومغناطیس، ناحیه تابش حرارتی برای مهندسان مکانیک مهم می باشد. محدوده تابش حرارتی ۰.۱ میکرومتر تا ۱۰۰ میکرومتر است و این ناحیه قسمتی از امواج ماوراء بنفش و قسمتی از امواج مادون قرمز است [۴۲].

۳-۲ شدت تشعشع

طبق تعریف، شدت برابر توان صادر شده از جسمی با مساحت المان مشخص بر تغییرات طول موج بر تغییرات مساحت تصویری بر تغییرات زاویه فضایی است؛ که از رابطه زیر بدست می آید:

$$I(\lambda, \theta, \phi) = \frac{dq}{(d\lambda)(dA \cos\theta)(d\omega)} \quad (1-3)$$

پلانک^۱ در سال ۱۹۰۱ ثابت کرد توان صادره از جسم سیاه به خلأ در دمای T و طول موج λ از رابطه زیر بدست می آید:

$$E_{(\lambda,b)}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (2-3)$$

در این رابطه $C_1 = 3.742 \times 10^{-8}$ و $C_2 = 1.439 \times 10^{-2}$ می باشد. و $E_{(\lambda,b)}(\lambda, T)$ توان صدور طیفی نیمکره ای جسم سیاه نامیده می شود؛ و مفهوم فیزیکی آن، انرژی تابشی بر واحد سطح و زمان که از المان مساحتی dA به دمای T به تمامی جهات در داخل یک نیمکره به طول موج λ می تابد، می باشد [۴۲].

^۱Max Karl Ernst Ludwig Planck

۳-۳ قانون استفان بولتزمن^۱

اگر از رابطه (۲-۳) در تمامی طول موجها انتگرال گرفته شود توان گسیل کلی جسم سیاه از رابطه زیر بدست می آید:

$$E_b(T) = \sigma T^4 \quad (3-3)$$

σ ثابت استفان بولتزمن نامیده می شود که برابر w/m^2k^4 5.67×10^{-8} می باشد [۴۲].

۴-۳ ضریب صدور

ضریب صدور (ϵ) انحراف رفتار یک جسم نسبت به جسم سیاه را نشان می دهد. ضریب صدور یک نسبت است و ماکزیمم آن برابر یک است؛ هر چه این ضریب بزرگ تر باشد رفتار جسم به رفتار جسم سیاه نزدیک می شود.

۵-۳ ضریب شکل یا ضریب دید

ضریب شکل نسبت انرژی که از یک سطح رها می شود و به سطح دیگر می رسد را نشان می دهد. این ضریب تنها بستگی به مساحت، فاصله دو سطح و زاویه ای که نسبت به خط عمود می سازند، دارد و به همین دلیل آن را ضریب شکل می نامند [۴۲].

ضریب شکل را با حرف F نشان می دهند و منظور از F_{ij} کسری از تشعشع خروجی از سطح i است که توسط سطح j دریافت می شود. $F_{dA_1 \rightarrow A_2}$ با توجه به شکل ۱-۳ از رابطه زیر بدست می آید:

$$F_{dA_1 \rightarrow A_2} = \int_{A_2} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_2 \quad (4-3)$$

۶-۳ تبادل تشعشع بین اجسام سیاه

به طور کلی تشعشع می تواند توسط انعکاس و صدور از سطحی خارج شود و با رسیدن به سطح دیگر، منعکس و جذب شود. این مسأله برای سطوحی که بتوان آن ها را جسم سیاه در نظر گرفت ساده می شود، چون هیچ انعکاسی وجود ندارد، لذا انرژی تنها با صدور خارج می شود و تمام تشعشع ورودی جذب می گردد.

^۱ Stefan-Boltzmann Law

اگر تبادل تشعشع بین دو سطح سیاه با شکل اختیاری را در نظر بگیریم، آنگاه مقدار انرژی تشعشعی که از جسم ۱ به جسم ۲ می‌رسد برابر است با:

$$F_{1 \rightarrow 2} A_1 E_{b1} = F_{1 \rightarrow 2} A_1 \sigma T_1^4 \quad (5-3)$$

و مقدار انرژی تشعشعی که از جسم ۲ به جسم ۱ می‌رسد برابر است با:

$$F_{2 \rightarrow 1} A_2 E_{b2} = F_{2 \rightarrow 1} A_2 \sigma T_2^4 \quad (6-3)$$

در نتیجه با در نظر گرفتن قانون رابطه متقابل بین ضریب شکل‌ها، انرژی تشعشعی خالص بین دو جسم برابر خواهد بود با:

$$q_{1 \rightarrow 2} = F_{1 \rightarrow 2} A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) = F_{2 \rightarrow 1} A_2 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (7-3)$$

اگر محفظه ای از N سطح سیاه تشکیل شده باشد مقدار گرمای تشعشعی خالص بین سطح i و دیگر سطوح محفظه از رابطه زیر بدست می‌آید [۴۲].

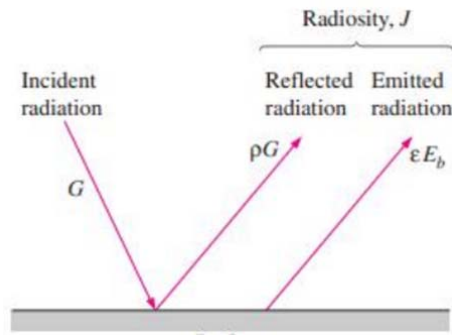
$$q_i = \sum_{j=1}^N A_j F_{i \rightarrow j} \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (8-3)$$

۷-۳ تبادل تشعشع بین سطوح پخشی خاکستری در محفظه

پیچیدگی تحلیل تبادل تشعشع بین سطوح غیر سیاه ناشی از انعکاس سطح است.

تشعشع ممکن است از تمام سطوح چندین بار بازتاب و در هر سطح تا اندازه‌ای جذب شود. فرض می‌کنیم دمای هر سطح ثابت و شار تشعشعی خروجی و ورودی یکنواخت باشد. رفتار سطوح را کدر، خاکستری و پخشی فرض می‌کنیم. مسأله این است که دمای T_i هر سطح معلوم است و می‌خواهیم شار گرمای خالص تشعشعی q_i از آن را بیابیم. در کوره‌های الکتریکی تمام سطوح غیر سیاه هستند و در عمل سطوح خاکستری^۱ فرض می‌شوند و این سطوح از کل محیط اطرافشان انرژی تشعشعی جذب می‌کنند، همچنین صادر کننده تشعشع به محیط خودشان می‌باشند. بنابراین دانستن خصوصیات تشعشعی سطوح در طراحی و مدل سازی حرارتی نقش مهمی دارد. می‌توانیم ضریب جذب و انعکاس سطوح را با فرض سطح خاکستری به صورت $\varepsilon = \alpha = 1 - \rho$ بدست آوریم [۴۲].

^۱ Gray areas



شکل ۱-۳ شار حرارتی ورودی و خروجی

q_i آهنگ خالص تشعشع خروجی از سطح i ، اثر خالص بر هم کنش‌های تشعشعی در این سطح را نشان می‌دهد و آهنگ انتقال انرژی است که باید از روش‌های دیگر به این سطح داده شود تا آن را در دمای ثابت نگه دارد. این جمله برابر است با اختلاف بین شار تشعشع خروجی از این سطح و شار تشعشع ورودی به آن. یعنی [۴۲]:

$$q_i = A_i(J_i - G_i) \quad (۹-۳)$$

از طرفی شار تشعشع خروجی برابر است با:

$$J_i = E_i + \rho_i G_i \quad (۱۰-۳)$$

$$E_i = \varepsilon_i E_{bi}, \alpha_i + \rho_i = 1, \alpha_i = \varepsilon_i \Rightarrow J_i = \varepsilon_i E_{bi} + (1 - \varepsilon_i) G_i \quad (۱۱-۳)$$

از معادله (۱۱-۳) G_i را بدست آورده و در معادله (۹-۳) قرار می‌دهیم. در نتیجه داریم:

$$q_i = \frac{E_{bi} - J_i}{\frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i A_i}} \quad (۱۲-۳)$$

اگر معادله (۱۲-۳) با رابطه $q = \frac{\Delta T}{R}$ مقایسه شود می‌توان نتیجه گرفت پتانسیل محرک در اینجا $E_{bi} - J_i$ و مقاومت تشعشعی سطحی برابر است با:

$$R_i = \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i A_i} \quad (۱۳-۳)$$

انتقال حرارت در محفظه‌های چند سطحی را باید به روش نود^۱ حل کرد. این روش بیان می‌کند، مجموع شدت جریان‌های ورودی به یک نود (گره) باید برابر مجموع شدت جریان‌های خروجی از آن گره باشد، جهت جریان را در مقاومت‌های خارج از حلقه به سمت حلقه و برای مقاومت‌های داخل حلقه اختیاری فرض می‌کنیم [۴۲].

۳-۸ انتقال حرارت در کوره الکتریکی خلأ

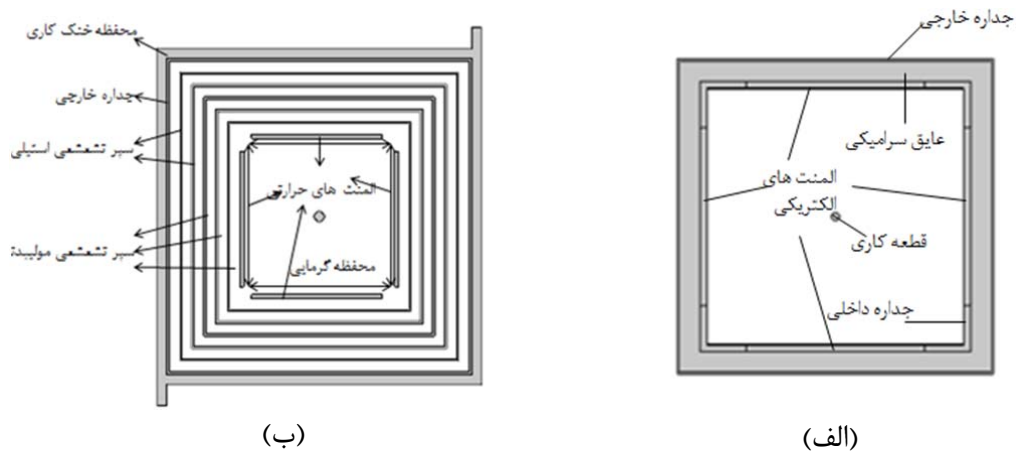
هدف از مدل سازی کامپیوتری یک فرآیند این است که این امکان ایجاد شود تا با بررسی تغییرات گوناگون روی مدل شبیه سازی شده، به نتیجه‌گیری بهتر در طراحی ماشین آلات دست یابیم. از آنجایی که پایه تمام مدل سازی‌های عددی و محاسباتی ایجاد مدل ریاضی مناسب است. می‌بایست در ابتدا پدیده انتقال حرارت در کوره‌های تحت خلأ مدل سازی شود تا بتوان از مدل ایجاد شده در شبیه سازی عددی مساله استفاده کرد.

از آنجایی که کوره‌های الکتریکی تحت خلأ عمدتاً دماهای بالایی دارند، انتقال حرارت تشعشعی مکانیزم غالب انتقال حرارت می‌باشد. همچنین ضرایب صدور سطوح تأثیر قابل توجهی بر روی میزان نرخ انتقال حرارت تشعشعی دارند. بنابراین ارائه یک مدل ریاضی درست نیازمند تحلیل صحیح از تبادل تشعشعی بین سطوح و قطعه کار درون کوره و سپرهای تشعشعی است.

محاسبات انجام شده در این پایان‌نامه به کمک نرم افزار شبیه سازی کامسول^۲ انجام گرفته است، در کوره‌های مدل سازی شده از فیزیک انتقال حرارت با تابش سطح به سطح استفاده می‌کند. قبل از ذکر معادلات و شرایط مرزی حاکم بر کوره‌ها شماتیک کوره دما پایین و دما بالا را در شکل ۳-۲ نشان می‌دهیم.

^۱ Node

^۲ COMSOL Multiphysics ©.۲



شکل ۳-۲ هندسه کوره (الف) کوره دما پایین، (ب) کوره دما بالا

۳-۹ انتقال حرارت هدایتی در کوره

انتقال حرارت در دیواره‌های کوره شامل جداره خارجی، جداره داخلی، المنت‌های حرارتی و قطعه کاری درون کوره و عایق‌ها در کوره دما پایین و سپرهای تشعشعی در کوره دما بالا به صورت انتقال حرارت هدایت است و به شکل معادله (۳-۱۴) خواهند بود.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot q = Q, \quad q = -k \nabla T \quad (3-14)$$

که در آن k ضریب حرارتی هدایتی^۱، C_p ظرفیت گرمایی ویژه^۲ و ρ چگالی^۳ مربوط به هر کدام از بخش‌های جامد است که هدایت در آن‌ها صورت می‌گیرد.

۳-۱۰ شرط مرزی بین بخش‌های جامد

در مدل‌سازی کوره دما پایین مرز بین بخش‌های جامد دارای شرط مرزی تماس حرارتی^۴ می‌باشد. در انتقال حرارت بین سطوحی که در تماس هستند، زبری سطح، شکافی بین مواد در تماس برقرار می‌کند. بنابراین شار حرارتی هدایتی، در مناطقی که با هم تماس ندارند کوچک‌تر است که منجر به افزایش مقاومت حرارتی در سطح تماس می‌شود. تماس حرارتی از رابطه (۳-۱۵) بدست می‌آید.

^۱ Thermal conductivity
^۲ Specific Heat Capacity
^۳ Density
^۴ Thermal contact

$$-n_d \cdot q_d = -d_z h (T_u - T_d)$$

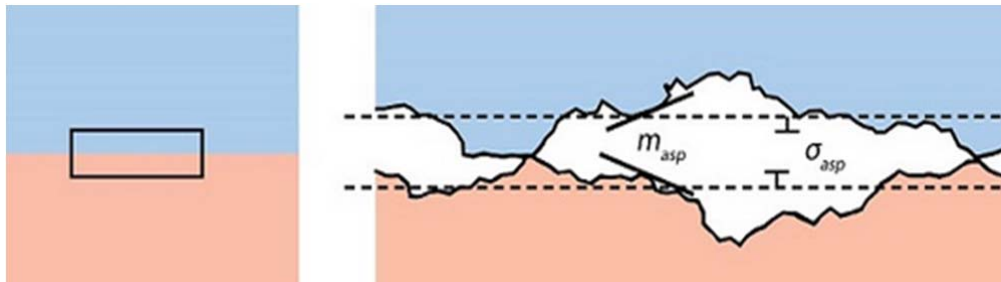
$$-n_u \cdot q_u = -d_z h (T_d - T_u)$$

$$h = h_c$$

$$h_c = 1.25 k_{contact} \frac{m_{asp}}{\sigma_{asp}} \left(\frac{P}{H_c} \right)^{0.95}$$

$$\frac{2}{k_{contact}} = \frac{1}{(k_u n_u) \cdot n_u} + \frac{1}{(k_d n_d) \cdot n_d} \quad (15-3)$$

که در آن h_c هدایت فشاری^۱ خصوصیت سطح تماس است که شامل ارتفاع متوسط زبری سطح^۲ با مقدار ۱ میکرومتر، m_{asp} شیب متوسط زبری سطح^۳ با مقدار ۰/۴، فشار تماسی^۴ با مقدار ۱۰۰ کیلو پاسکال، H_c سختی سطح^۵ با مقدار ۳ گیگا پاسکال و $k_{contact}$ هدایت سطح تماس می‌باشد که در شکل (۳-۳) نشان داده شده است. T_d و T_u به ترتیب دمای سطح بالایی و پایینی، n_d و n_u به ترتیب بردار نرمال سطح بالایی و پایینی و k_d و k_u به ترتیب هدایت سطح بالایی و پایینی است.



شکل ۳-۳ شماتیک مربوط به خصوصیات سطح تماس در مرز بین دو جامد

سطح خارجی کوره که دارای شرط مرزی عایق حرارتی^۶ است از معادله ی (۱۶-۳) پیروی می‌کند. این شرط مرزی به این معنی است که شار حرارتی عبوری از مرز وجود ندارد و گرادیان درجه حرارت در مرز صفر است، یعنی درجه حرارت در یک طرف مرز با درجه حرارت در طرف دیگر برابر است، بنابراین گرما نمی‌تواند منتقل شود.

$$-n \cdot q = 0 \quad (16-3)$$

-
- ^۱ Constriction conductance
 - ^۲ Surface roughness, asperities average height
 - ^۳ Asperities average slope
 - ^۴ Contact pressure
 - ^۵ Microhardness
 - ^۶ Thermal insulation

۳-۱۱ انتقال حرارت جابجایی در بخش خنک کاری کوره

در اطراف جداره خارجی در کوره‌های دما بالا، محفظه‌ای وجود دارد که سیال آب از ورودی آن وارد می‌شود و از قسمت خروجی نیز خارج می‌شود که آب در آن در جریان است و با هدف خنک کاری جداره خارجی کوره تعبیه شده است. در این بخش انتقال حرارت با مکانیزم جابجایی صورت می‌گیرد. در فیزیک انتقال حرارت در بخش سیال از معادله انرژی استفاده شده است که طبق رابطه (۳-۱۷) می‌باشد.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot q = Q \quad , q = -k \nabla T \quad (3-17)$$

در رابطه (۳-۱۷) مقادیر k ، ρ ، C_p از خصوصیات فیزیکی سیال آب بدست می‌آید و به ترتیب، ضریب انتقال حرارت هدایتی، چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه می‌باشد. در ورودی آب دما برابر با دمای اولیه (۲۹۳.۱۵ کلوین) است و خروجی آب نیز از معادله $-n \cdot q = 0$ پیروی می‌کند. \vec{u} نیز بردار سرعت سیال است.

۳-۱۱-۱ فیزیک جریان آرام در بخش خنک کاری

در فیزیک جریان آرام برای تحلیل خصوصیات سیال از معادلات ناویر استوکس به شکل رابطه (۳-۱۸) استفاده می‌کنیم.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [\mu(\nabla u + (\nabla u)^T)] + F \quad , \rho \nabla \cdot (u) = 0 \quad (3-18)$$

در رابطه (۳-۱۸)، μ ویسکوزیته دینامیکی^۱ است که مقدار آن از مشخصات سیال آب بدست می‌آید. F نیروی حجمی با مقدار صفر در نظر گرفته شده است. جداره خارجی و بخش خنک کاری که در تماس با یکدیگر هستند نیاز به شرط مرزی دارند. شرط مرزی دیواره با قابلیت انتقال حرارت بین جامد و سیال در این قسمت تعریف شده است. در بخش ورودی آب، معادله $u = -U \cdot n$ حاکم است که مقدار U در محدوده جریان آرام تغییر می‌کند و در بخش خروجی تحت خنک کاری فشار ثابت p اعمال شده است.

۳-۱۲ انتقال حرارت تشعشعی در کوره

این شکل از انتقال حرارت در محفظه گرمایی در هر دو نوع کوره و در فاصله بین سپرهای تشعشعی در کوره دما بالا صورت می‌گیرد و گرما از المنت‌ها به قطعه کاری درون کوره به این روش منتقل

^۱ Dynamic viscosity

می‌شود. در دیواره‌هایی که با خلاء در تماس هستند، شرط مرزی سطح دیفیوز^۱ وجود دارد که از رابطه (۱۸-۳) پیروی می‌کند.

$$-n \cdot q = \varepsilon(G - e_b(T))$$

$$(1 - \varepsilon)G = J - \varepsilon e_b(T)$$

$$e_b(T) = n^{\ddagger} \sigma T^{\ddagger} \quad (18-3)$$

در رابطه (۱۸-۳)، ε ضریب نشر سطح^۲ است که مقدار آن برای مواد مختلف، متفاوت است و J رادیوسیتی سطح^۳ است. در رابطه اول، عبارت $\varepsilon(G - e_b(T))$ تفاوت بین رادیوسیتی و شار حرارتی ورودی به سطوح است و این عبارت به صورت شار حرارتی به سطح جسم (بصورت شرط مرزی) نسبت به زمان اعمال می‌شود. e_b قدرت نشر جسم سیاه و σ ثابت استفان بولتزمن با مقدار $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ است.

۳-۱۳ منبع حرارتی در کوره

منبع حرارتی^۴ در هر دو نوع کوره، چهار المنت الکتریکی است. مقدار Q (شار حرارتی حجمی) با توجه به نوع کوره و در ابعاد مختلف المنت‌ها متفاوت است. توان کل در تعداد المنت‌ها بطور مساوی تقسیم می‌شود. در داخل المنت‌ها گرما از طریق هدایتی منتقل می‌شود.

۳-۱۴ روش حل عددی

مسائل موجود در بحث مهندسی، در واقع مدل‌های ریاضی از حالات فیزیکی هستند. یعنی معادله‌های دیفرانسیل با شرایط مرزی اولیه و طبیعی داریم. در این جا بحث بوجود آمدن روش عددی مطرح می‌شود. در عمل بسیاری از مسائل مهندسی هستند که برای آن‌ها جواب دقیق به هر دلیلی وجود ندارد. لذا این دسته از مسائل مهندسی، تنها با روش‌های عددی قابل تحلیل هستند [۴۳].

در این پایان‌نامه از نرم افزار شبیه سازی کامسول با ورژن ۵.۲ استفاده شده است. کامسول بسته نرم افزاری شامل حل کننده و تجزیه کننده معادلات دیفرانسیل به روش المان محدود، برای تجزیه و تحلیل سامانه‌های چند فیزیکی به معنای حضور همزمان چند معادله دیفرانسیل است که هر کدام مبین رفتار یکی از متغیرهای اصلی سامانه است [۴۴].

^۱ Diffuse Surface
^۲ Surface emissivity
^۳ Surface radiosity
^۴ General source

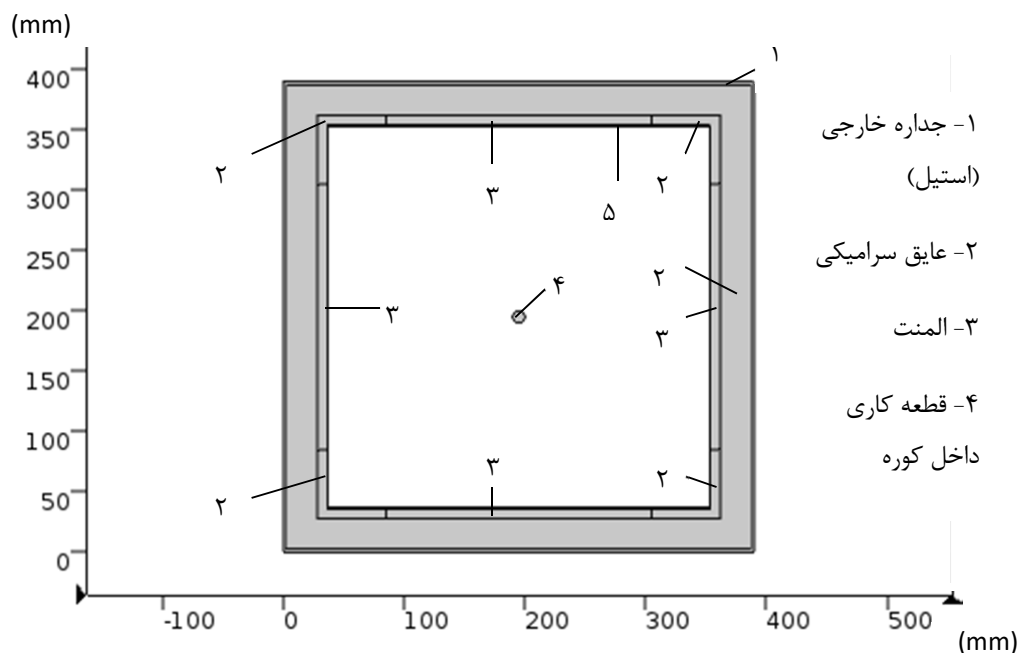
۴- فصل چهارم: نتایج مدل سازی کوره دما پایین

۴-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا با توجه به مباحثی که در فصول قبل بیان شد مکانیزم طراحی کوره‌های دما پایین در خلأ را شرح می‌دهیم، سپس به بررسی مکانیزم انتقال حرارت و در نهایت به تحلیل نتایج و بررسی یکنواختی دمای داخل کوره می‌پردازیم.

۴-۲ مدل‌سازی کوره دما پایین

در این پروژه به مدل‌سازی کوره الکتریکی با مکانیزم انتقال حرارت تشعشی می‌پردازیم که محدوده دمایی در داخل آن تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. این نوع از کوره دارای یک محفظه مکعبی است که در چهار طرف آن المنت‌های الکتریکی از جنس مولیبدن یا سیلیسیم کاربرد وجود دارد که محفظه با پتوهای سرامیکی عایق کاری می‌شود و داخل کوره خلأ می‌باشد که روی عایق‌ها و المنت‌ها را جداره استیلی می‌پوشاند و با انتقال حرارت ناپایا، توزیع دما داخل کوره محاسبه می‌شود و قطعه کاری در داخل کوره قرار دارد. شکل ۵-۱ شماتیک کوره دما پایین را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱- شماتیک کوره دما پایین

در این نوع کوره، ابعاد کل آن ۳۹*۳۹ سانتی‌متر مربع و ابعاد محفظه گرمایی ۳۱۶*۳۱۶ میلی-متر مربع است و جداره خارجی از جنس استیل با ضخامت ۳ میلی‌متر است. عایق‌ها از جنس سرامیک هستند که دارای ضخامت ۲۵ میلی‌متر می‌باشند. المنت‌ها با ابعاد ۸*۲۲۰ میلی‌متر از جنس مولیبدن انتخاب شده‌اند که در فضای خالی موجود بین المنت‌ها عایق‌های سرامیکی با ضخامت

۸ میلی‌متر قرار می‌گیرند و در نهایت تمام این موارد با جداره داخلی استیلی به ضخامت ۱ میلی‌متر پوشانده می‌شوند. قطعه کاری درون کوره در مرکز آن در مختصات (۱۹۵، ۱۹۵) (میلی‌متر) با قطر ۱ سانتی‌متر قرار دارد که می‌تواند استیل، سیلیسیم کاربید یا مس باشد. این مقادیر و جنس‌ها منطبق بر طرح ساخته شده در شرکت دانش بنیان علم گستران صنعت آرتا می‌باشد.

جدول ۴-۱ مشخصات فیزیکی مواد به کار رفته در طراحی کوره

ϵ	$C_p \left(\frac{J}{kg \cdot K} \right)$	$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	$k \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$	مشخصات مواد به کار رفته
۰/۸۵	۴۷۵	۷۸۵۰	۴۴/۵	استیل
۰/۶	۸۸۰	۲۸۰	۱۸	سرامیک
۰/۲	۲۵۰	۱۰۲۸۰	۱۳۸	مولیدن
۰/۹	۷۵۰	۳۲۱۰	۰/۰۰۶	سیلیسیم کاربید
۰/۱۹	۳۸۵	۸۹۶۰	۴۰۰	مس

بدلیل خلأ بودن داخل محفظه از شروط مرزی تشعشی استفاده می‌شود. در این مسئله انتقال حرارت در جداره‌ها و عایق‌ها و همچنین قطعه کار داخل آن به صورت هدایتی و داخل محفظه به صورت تشعشی انجام می‌گیرد. مدل‌سازی این کوره به روش عددی و با استفاده از المان محدود انجام می‌شود.

برای مدل‌سازی کوره دما پایین، ابعاد مختلف ناحیه گرمایش را بررسی می‌کنیم که مدل‌سازی برای کوره‌های ۲۷، ۴۲، ۵۹ و ۹۷ لیتری انجام شده است. در هر یک از ابعاد مقادیر بهینه توان المنت‌ها را بدست آورده و سپس به بررسی توزیع دما در نقاط مختلف داخل کوره می‌پردازیم. در این کوره‌ها، دمای قطعه کاری داخل کوره باید به ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد برسد.

۴-۳ مطالعه استقلال نتایج از شبکه بندی ناحیه حل در کوره دما پایین

در این پژوهش از المان‌های مثلثی برای شبکه بندی ناحیه حل استفاده می‌شود. شبکه به کار رفته در اطراف قطعه کاری داخل کوره، مرز بین المنت‌ها با عایق و در جداره خارجی ریزتر می‌باشد که در نتیجه آن دقت بیشتری در این ناحیه‌ها برای حل بدست می‌آید. لازم به یادآوری است که نتایج ارائه

شده در این پژوهش در اطراف قطعه کاری داخل کوره و جداره خارجی گزارش شده‌اند و با توجه به اینکه نواحی مهم برای طراحی کوره‌های حرارتی هستند، بنابراین با ریز کردن شبکه در این نواحی تلاش شد تا دقت حل عددی افزایش یابد.

در این بررسی، پارامتر لازم، شار حرارتی تشعشعی متوسط اطراف قطعه کاری داخل کوره است وقتی که دمای آن به ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. قطعه کاری داخل کوره گلوله استیلی با قطر ۱ سانتی‌متر است که در مرکز یک کوره ۵۹ لیتری قرار دارد. نتایج را در جدول ۴-۲ ارائه می‌دهیم و تعداد شبکه مناسب را انتخاب می‌کنیم.

جدول ۴-۲ مطالعه استقلال نتایج از شبکه بندی ناحیه حل در کوره دما پایین برای کوره ۵۹ لیتری

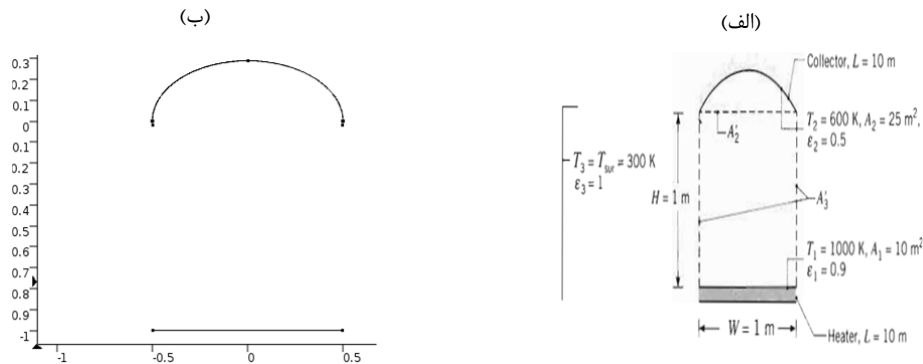
تعداد المان های مثلثی	شار حرارتی تشعشعی متوسط در محیط گلوله ی داخل کوره (وات بر متر مربع)
۴۵۷۸	۵۶۹/۶۶۰۷
۷۱۷۰	۵۶۹/۶۷۲۹
۱۰۴۶۴	۵۶۰/۴۲۶۲
۱۱۰۲۴	۵۶۰/۴۶۸۴
۱۲۵۵۰	۵۶۰/۴۶۹۶
۱۲۲۲۴	۵۶۰/۴۶۹۷
۱۳۰۸۴	۵۶۰/۴۷۳۱
۱۵۰۱۰	۵۶۰/۴۷۳۶

همان طور که در جدول ۴-۲ نشان داده شده، در صورت استفاده از ۱۳۰۸۴ المان مثلثی، نتایج بدست آمده، از تعداد شبکه مستقل خواهد بود.

۴-۴ صحت سنجی نتایج

برای اطمینان از مدل سازی کوره الکتریکی، یکی از مسائل حل شده کتاب اینکروپرا را با روند این پژوهش بررسی می‌کنیم و نتایج بدست آمده از مدل سازی این مسئله را با نتایج کتاب مقایسه می‌

کنیم. این مثال مطابق شکل ۲-۴ که سطح جاذب و المنتی را نشان می دهد که به فاصله ی ۱ متر از هم قرار دارند، سطح جاذب ۱۵ متر مربع و عرض هر دو ۱ متر و طول آن ها ۱۰ متر است. دمای المنت ۱۰۰۰ کلوین و ضریب نشر آن ۰.۹ است در حالی که دمای سطح جاذب ۶۰۰ کلوین و ضریب نشر آن ۰.۵ است که این سیستم در یک اتاق بزرگ با دمای دیوار برابر با ۳۰۰ کلوین قرار دارد. نرخ انتقال حرارت به سطح جاذب را می خواهیم بدست بیاوریم.

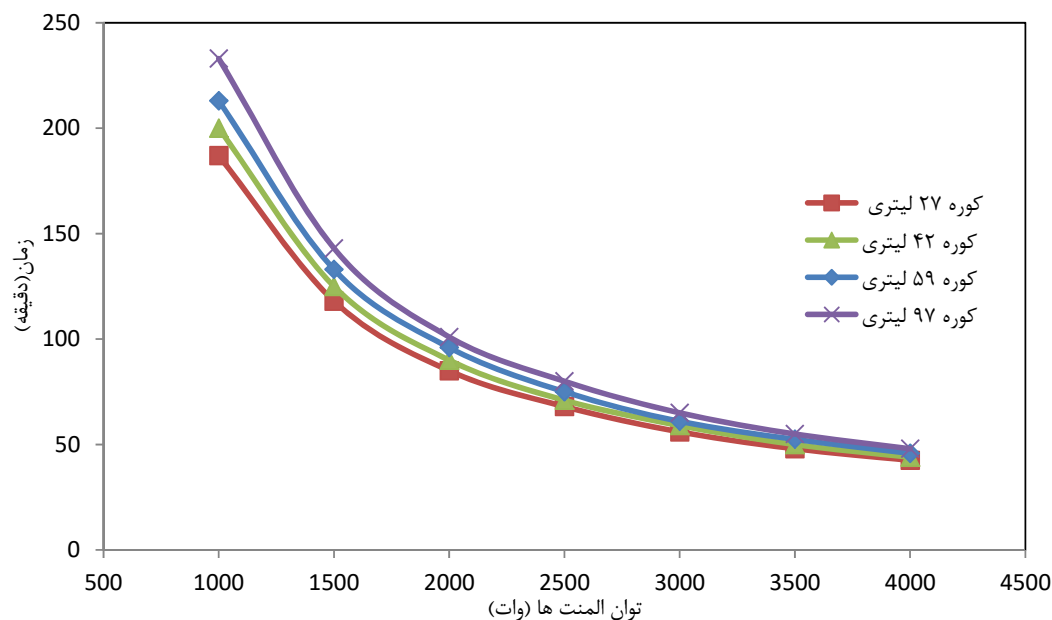


شکل ۲-۴ (الف) مسئله حل شده کتاب اینکروپرا (ب) شماتیک هندسه مدل سازی

کتاب اینکروپرا با حل مسئله به روش ارائه شده در بخش ۳-۷ مقدار انتقال حرارت به سطح جاذب را ۷۷.۱ کیلو وات بدست آورده است که با مدل سازی مقدار شار حرارتی تشعشعی سطح جاذب را ۷۹۴۶ وات بر متر بدست می آوریم که با حاصل ضرب آن در طول که ۱۰ متر بود، ۷۹۴۶۰ وات بدست آمد که این مقدار ۷۹ کیلو وات با مقدار ۷۷ کیلو وات کتاب تقریباً مطابقت دارد. بنابراین صحت مدل سازی انجام شده بدست می آید.

۴-۵ بررسی توان ورودی به کوره

در کوره دما پایین، برای ابعاد مختلف کوره، بررسی را در توان های مختلف المنتها از ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ وات انجام داده و در توان های مختلف، زمانی که قطعه کاری داخل کوره به دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد می رسد را بدست می آوریم. زمان رسیدن به دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد و مقدار توان ورودی از پارامترهای مهم صنعتی برای طراحی آن ها می باشد.



شکل ۳-۴ نمودار بهینه سازی توان برای کوره دما پایین

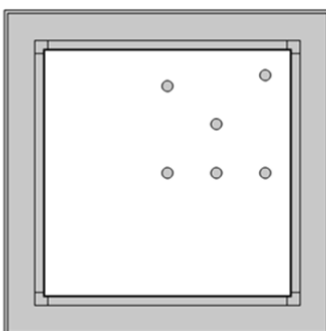
از شکل ۳-۴ می‌توان دریافت که با توان ۲۰۰۰ وات کوره ۲۷ لیتری در زمان ۸۷ دقیقه، کوره ۴۲ لیتری در زمان ۹۳ دقیقه، کوره ۵۹ لیتری در زمان ۹۷ دقیقه و کوره ۹۷ لیتری در زمان ۱۰۰ دقیقه، دمای گلوله استیلی داخل آن به ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. بنابراین در ابعاد بزرگتر کوره در یک توان ثابت مثلاً ۲۰۰۰ وات زمانی که دمای قطعه کار داخل کوره به ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، بیشتر می‌شود.

۴-۶ بررسی یکنواختی دمای داخل کوره

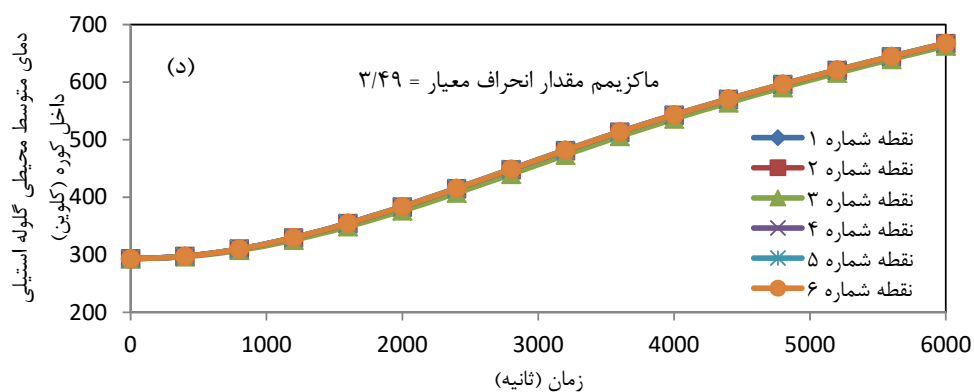
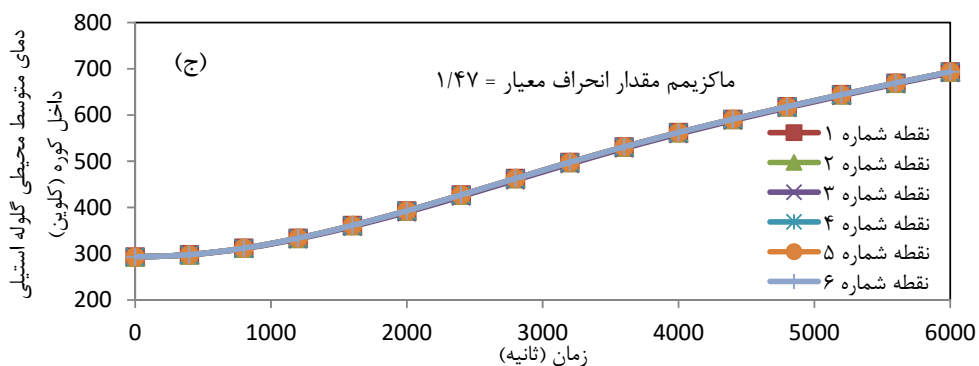
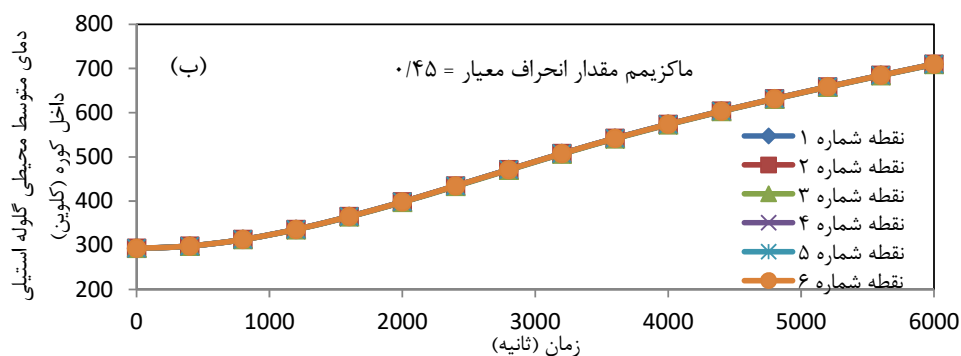
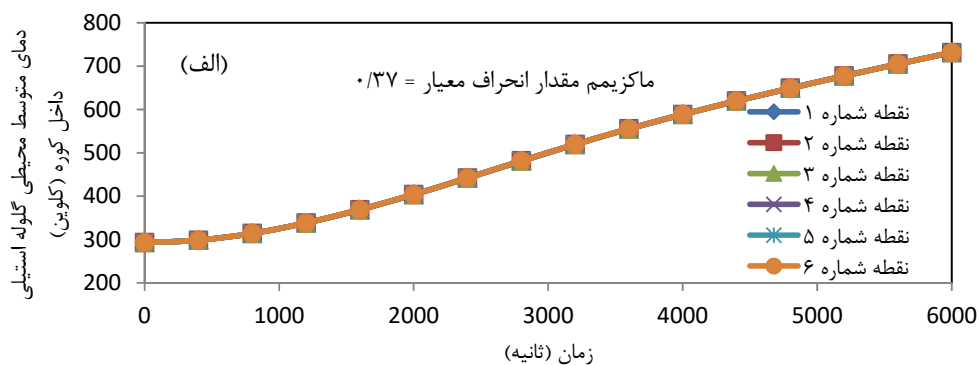
یکی از اهداف مدل‌سازی کوره این است که دما داخل آن به صورت یکنواخت توزیع شود. برای این منظور قطعه کاری درون کوره با توان ۲۰۰۰ وات را در شش مختصات مختلف قرار می‌دهیم و توزیع دمای متوسط محیطی قطعه کار که به صورت گلوله استیلی است را به صورت زمانی در ابعاد مختلف کوره نشان می‌دهیم. شش مختصات مختلف را در جدول ۳-۴ ارائه می‌دهیم.

جدول ۳-۴ مختصات های مختلف استفاده شده برای بررسی یکنواختی دما مطابق شکل ۴-۴

شماره	مختصات گلوله در کوره ۲۷ لیتری	مختصات گلوله در کوره ۴۲ لیتری	مختصات گلوله در کوره ۵۹ لیتری	مختصات گلوله در کوره ۹۷ لیتری
۱	(۱۹۵،۱۹۵)	(۱۹۵،۱۹۵)	(۱۹۵،۱۹۵)	(۱۹۵،۱۹۵)
۲	(۲۴۰،۲۴۰)	(۲۵۰،۲۵۰)	(۲۵۸،۲۵۸)	(۲۷۵،۲۷۵)
۳	(۲۸۵،۲۸۵)	(۲۹۷،۲۹۷)	(۳۲۰،۳۲۰)	(۳۵۰،۳۵۰)
۴	(۲۴۰،۱۹۵)	(۲۵۰،۱۹۵)	(۲۵۸،۱۹۵)	(۲۷۵،۱۹۵)
۵	(۲۸۵،۱۹۵)	(۲۹۷،۱۹۵)	(۳۲۰،۱۹۵)	(۳۵۰،۱۹۵)
۶	(۱۹۵،۲۷۵)	(۱۹۵،۲۸۵)	(۱۹۵،۳۲۰)	(۱۹۵،۳۳۰)



شکل ۴-۴ شش نقطه مختلف درون کوره دما پایین



شکل ۴-۵ بررسی توزیع دما داخل کوره، نمودار دمای متوسط محیطی گلوله استیلی داخل کوره با توان ۲۰۰۰ وات نسبت به زمان تا ۹۳ دقیقه (الف) کوره ۲۷ لیتری، (ب) کوره ۴۲ لیتری، (ج) کوره ۵۹ لیتری، (د) کوره ۹۷ لیتری

از نمودارهای توزیع دمای شکل ۴-۵ می‌توان دریافت که توزیع دما داخل کوره‌ها با ابعاد مختلف مناسب می‌باشد. برای اطمینان بیشتر از انحراف معیار استفاده می‌کنیم. انحراف معیار یکی از شاخص‌های پراکندگی است که نشان می‌دهد به طور میانگین داده‌ها چه مقدار از مقدار متوسط فاصله دارند. مقدار انحراف معیار از رابطه (۴-۱) بدست می‌آید.

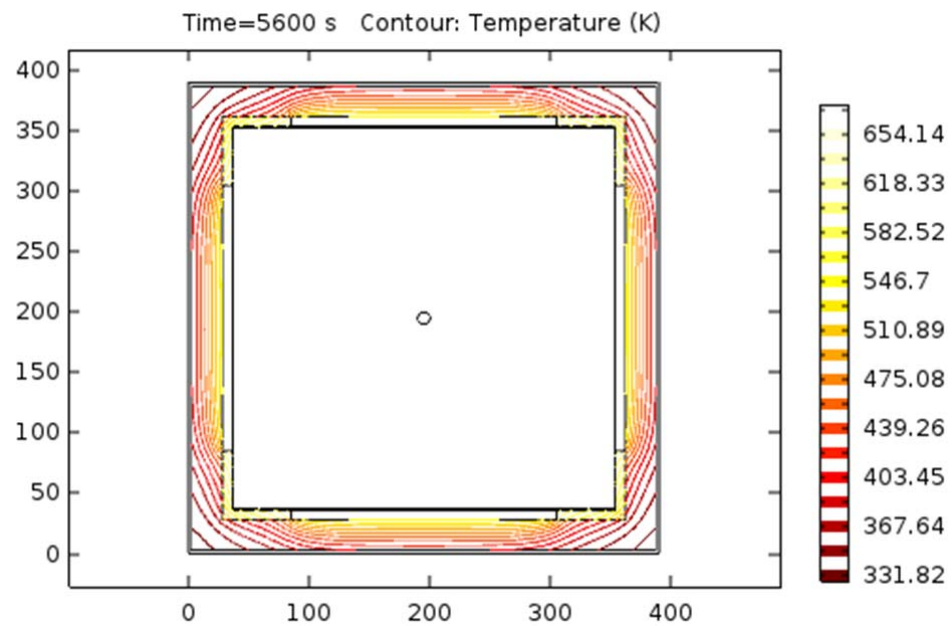
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}, \mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (4-1)$$

در رابطه (۴-۱) μ میانگین و x_i داده‌ها و N فراوانی داده‌ها می‌باشد، طبق این رابطه بیشترین میزان انحراف معیار دمای نقاط مختلف از دمای میانگین محفظه گرمایی کوره در زمان ۹۳ دقیقه برای کوره ۲۷ لیتری ۰/۳۷، برای کوره ۴۲ لیتری ۰/۴۵، برای کوره ۵۹ لیتری ۱/۴۷ و برای کوره ۹۷ لیتری ۳/۴۹ است (در واقع تفاوت دمای هر کدام از نقاط از میانگین دما بیان شده است). از انحراف معیار مشخص است که در کوره با ابعاد کوچکتر توزیع دمای داخل آن‌ها یکنواخت‌تر است و داخل کوره‌های بزرگتر از پراکندگی دمایی بیشتری برخوردار هستند.

۴-۷ بررسی توزیع دما و شار حرارتی در حالت‌های مختلف قطعه کاری درون

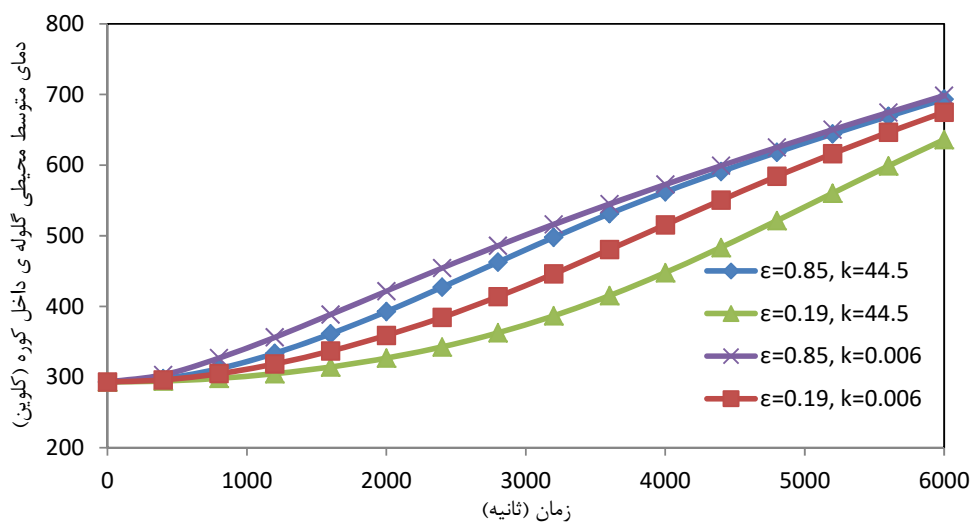
کوره

برای بررسی‌های بیشتر کوره ۵۹ لیتری را وقتی گلوله استیلی یا مسی و همچنین با جنس سیلیسیم کاربید در مرکز آن قرار دارد و توان المنت‌ها ۲۰۰۰ وات و تعداد المان‌های شبکه ۱۳۰۸۴ است، انتخاب می‌کنیم. در شکل‌های زیر توزیع دما و شار حرارتی تشعشعی متوسط محیطی گلوله استیلی وقتی که دمای گلوله به ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، نشان داده شده است.

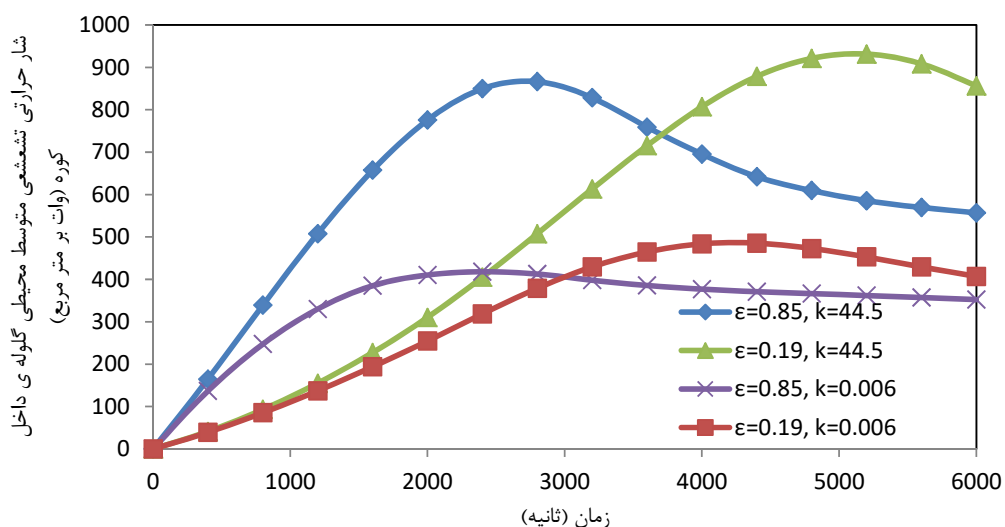


شکل ۴-۶ کانتور دما در شماتیک کوره وقتی گلوله استیلی با قطر ۱ سانتی‌متر در مرکز آن قرار دارد

شکل ۴-۶ نشان می‌دهد که در جداره استیلی خارجی کوره، دما کمترین مقدار خود را دارد سپس در اطراف المنت‌ها با افزایش زمان، دما افزایش یافته و از طریق انتقال حرارت تشعشعی به گلوله داخل آن می‌رسد.



(الف)



(ب)

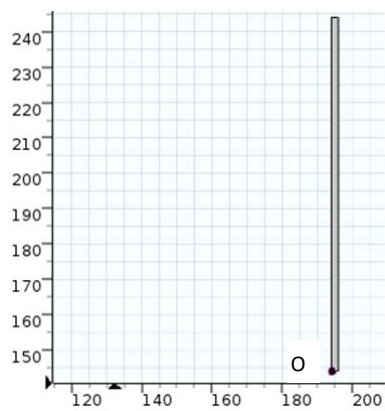
شکل ۴-۷ اثر تغییر ضریب هدایتی حرارتی و ضریب نشر گلوله با قطر ۱ سانتی‌متر در مختصات (۱۵۹، ۱۵۹) داخل کوره با توان ۲۰۰۰ وات. (الف) نمودار دمای متوسط محیطی گلوله‌ی داخل کوره نسبت به زمان در k و ϵ های مختلف. (ب) نمودار شار حرارتی تشعشعی متوسط محیطی گلوله‌ی داخل کوره نسبت به زمان در k و ϵ های مختلف.

طبق شکل ۴-۷ (الف) همانطور که انتظار می‌رفت با گذر زمان دمای اطراف گلوله داخل کوره افزایش یافته است، در این شکل در k ثابت (۴۴/۵ و ۰/۰۰۶ وات بر متر کلوین) و در ϵ های مختلف به ازای ϵ کمتر (۰/۱۹) دمای متوسط محیطی گلوله کمتر شده است، در حالی که در مقدار ϵ ثابت

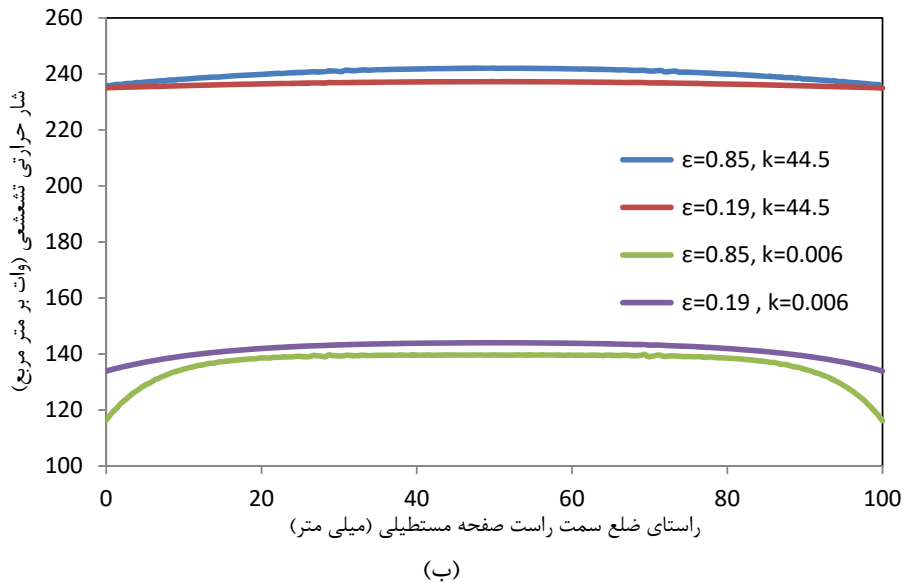
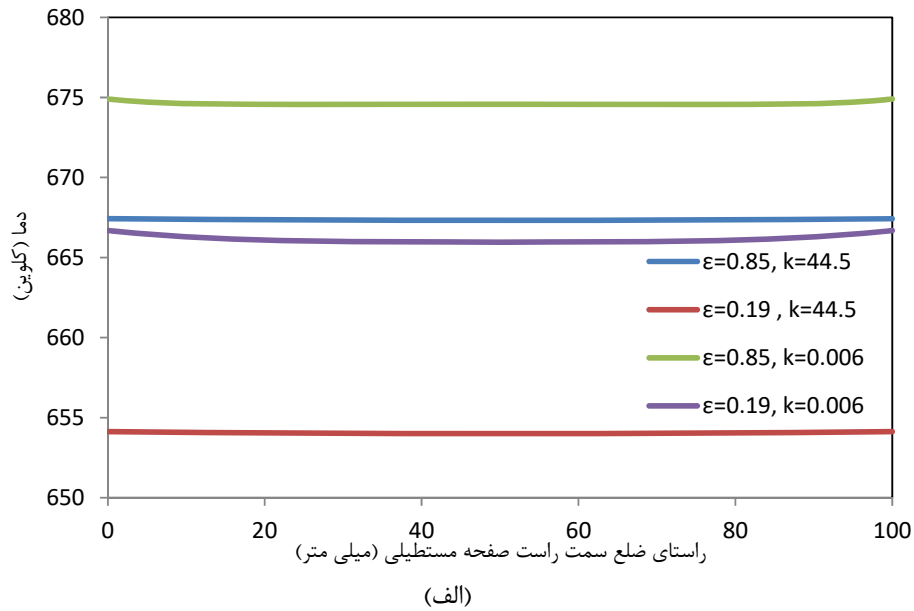
(۰/۸۵) در مقدار k های مختلف نمودارها تقریبا بر هم منطبق هستند و در ε ثابت (۰/۱۹) در مقدار k های مختلف در k بیشتر دمای متوسط محیطی گلوله کمتر شده است. این نتیجه نشان می‌دهد که مقدار دمای متوسط محیطی به نسبت بیشتر، به مقدار ضریب نشر بستگی دارد چون حرارت به صورت تشعشعی به گلوله داخل کوره می‌رسد. با کم شدن مقدار ضریب نشر، انرژی حرارتی منتقل شده نیز کاهش می‌یابد. شکل (ب) نشان می‌دهد که مقدار شار حرارتی تشعشعی به صورت صعودی افزایش می‌یابد سپس با گذر زمان ابتدا کاهش یافته و در نهایت پایا می‌شود، در این شکل در ε ثابت (۰/۸۵ و ۰/۱۹) به ازای مقدار k کمتر (۰/۰۰۶ وات بر متر کلوین) شار حرارتی تشعشعی متوسط محیطی کمتر است، همچنین وقتی مقدار k کم است توزیع شار حرارتی اطراف گلوله متفاوت است و بدون سیر نزولی در ماکزیمم مقدار خود به حالت پایا می‌رسد. در مقدار k ثابت (۰/۰۰۶ و ۴۴/۵ وات بر متر کلوین) به ازای ε های مختلف، مقدار ماکزیمم شار حرارتی تشعشعی متوسط اطراف گلوله استیلی تقریبا برابر است ولی در مقدار ε کمتر (۰/۱۹) شار حرارتی تشعشعی متوسط محیطی در زمان بیشتری به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. این حالت نشان می‌دهد که مقدار شار حرارتی تشعشعی به مقدار k و ε بستگی دارد، با افزایش k انتقال حرارت هدایتی بیشتر می‌شود و گرما به خوبی به مرکز قطعه منتقل می‌شود و محیط قطعه دمای کمتری دارد و شار تشعشعی طبق رابطه شار، با ثابت بودن شار ورودی با کم شدن دما، افزایش می‌یابد و با افزایش ε شار تشعشعی گسیل شده و دما بیشتر است.

۴-۷-۱ تغییر هندسه قطعه کاری درون کوره (صفحه مستطیلی)

برای بررسی بیشتر در زمینه یکنواختی دمای درون کوره، به جای گلوله، صفحه مستطیلی جای - گذاری کرده سپس در حالت‌هایی که ضریب حرارتی هدایتی و ضریب نشر مقادیر مختلفی دارد بررسی می‌کنیم. ابعاد صفحه مستطیلی $2 * 100$ میلی‌متر مربع است که به صورت عمودی در مرکز کوره ۵۹ لیتری با توان ۲۰۰۰ وات که مختصات نقطه O که در شکل ۴-۸ نشان داده شده است (۱۹۴،۱۴۴) میلی‌متر می‌باشد، قرار دارد. جنس این صفحه می‌تواند استیل، مس یا سیلیسیم کاربید باشد. در نمودارهای زیر توزیع دما و شار حرارتی تشعشعی در راستای ضلع سمت راست صفحه مستطیلی با طول ۱۰۰ میلی‌متر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این کوره چون المنت‌ها در چهار طرف نیز قرار دارند، توزیع دما و شار حرارتی تشعشعی در ضلع سمت راست و چپ با هم برابر و به صورت متقارن است، بنابراین فقط یک ضلع مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۴-۸ شماتیک صفحه مستطیلی داخل کوره ۵۹ لیتری



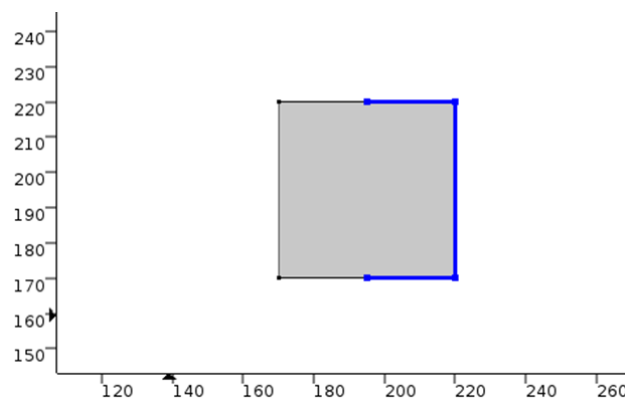
شکل ۴-۹ اثر تغییر ضریب هدایتی حرارتی و ضریب نشر صفحه مستطیلی با ابعاد 2×100 میلی‌متر مربع واقع در مرکز کوره 59 لیتری با توان 2000 وات در زمان 93 دقیقه. (الف) نمودار توزیع دما در راستای ضلع سمت راست صفحه مستطیلی در ϵ, k های مختلف (ب) نمودار توزیع شار حرارتی تشعشعی در راستای ضلع سمت راست صفحه مستطیلی در ϵ, k های مختلف

از شکل ۴-۹ می‌توان دریافت که توزیع دما و شار حرارتی تشعشعی در راستای ضلع سمت راست صفحه مستطیلی تقریباً به صورت یکنواخت است. در شکل (الف) در مقدار k ثابت $(44/5)$ و 0.006 وات بر متر کلوین با تغییر ϵ در مقدار کمتر آن $(0/19)$ مقدار دما در راستای طول صفحه به مقدار

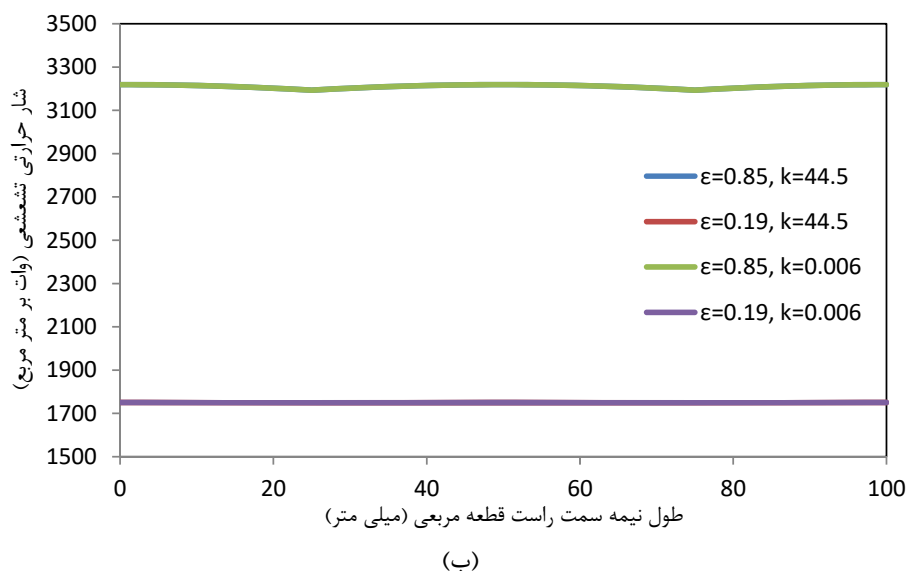
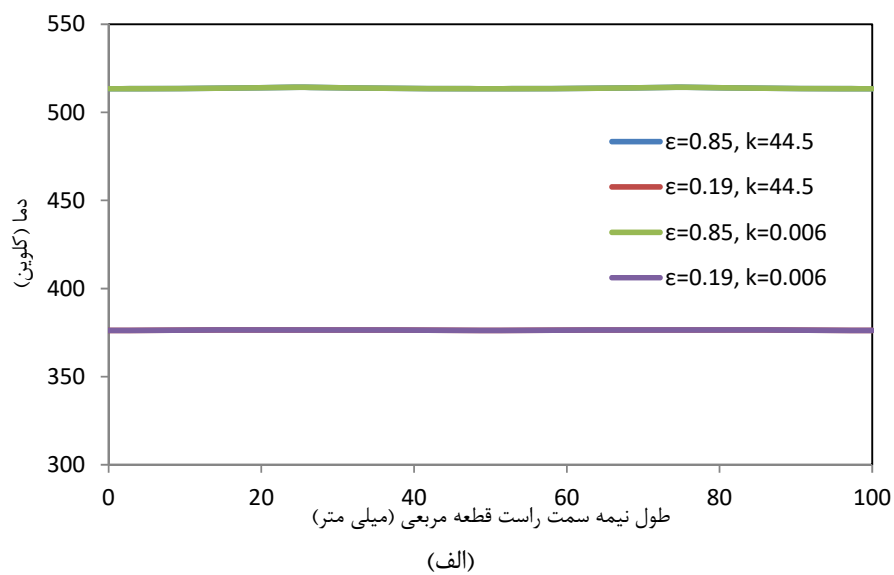
ناچیز از ۸ تا ۱۲ درجه کمتر است و در مقدار ε ثابت (۰/۱۹ و ۰/۸۵) با تغییر k در مقدار کمتر آن (۰/۰۰۶ وات بر متر کلوین)، دما در راستای طول صفحه به مقدار ۸ تا ۱۲ درجه بیشتر است. به عبارت دیگر در ضریب نشر ثابت با افزایش مقدار ضریب هدایتی حرارتی دما کاهش یافته و در مقدار ضریب هدایتی ثابت با افزایش ضریب نشر، دما نیز افزایش یافته است. در شکل (ب) در مقدار k ثابت (۴۴/۵ و ۰/۰۰۶ وات بر متر کلوین) با تغییر ε مقدار شار حرارتی تشعشعی در راستای طول صفحه تغییری نکرده است و در مقدار ε ثابت (۰/۱۹ و ۰/۸۵) با تغییر k در مقدار کمتر آن (۰/۰۰۶ وات بر متر کلوین)، شار حرارتی تشعشعی در راستای طول صفحه به میزان تقریباً ۱۰۰ وات بر متر مربع (در این قسمت ۱۰۰۰ وات) کمتر است. به عبارت دیگر مقدار شار حرارتی تشعشعی بیشتر به مقدار ضریب هدایتی حرارتی بستگی دارد، به طور کلی با افزایش k انتقال حرارت هدایتی بیشتر می‌شود و گرما به خوبی به مرکز قطعه منتقل می‌شود و محیط قطعه دمای کمتری دارد و شار تشعشعی طبق رابطه شار، با ثابت بودن شار ورودی با کم شدن دما، افزایش می‌یابد و با افزایش ε شار تشعشعی گسیل شده و دما بیشتر است.

۴-۷-۲ تغییر هندسه قطعه کاری درون کوره (قطعه مربعی)

برای بررسی بیشتر در زمینه یکنواختی دمای درون کوره، به جای گلوله، قطعه مربعی جای گذاری کرده سپس در حالت‌هایی که ضریب حرارتی هدایتی و ضریب نشر مقادیر مختلفی دارد بررسی می‌کنیم. ابعاد صفحه مربعی ۵*۵ سانتی‌متر مربع است که در مرکز کوره ۵۹ لیتری با توان ۲۰۰۰ وات در مختصات (۱۹۵، ۱۹۵) میلی‌متر قرار دارد. جنس این صفحه می‌تواند استیل، مس یا سیلیسیم کاربرد باشد. در نمودارهای زیر توزیع دما و شار حرارتی تشعشعی نیمه سمت راست صفحه مربعی با طول کل ۱۰۰ میلی‌متر مطابق شکل (۴-۱۰) مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۴-۱۰ شماتیک قطعه مربعی مورد بررسی داخل کوره ۵۹ لیتری



شکل ۴-۱۱ اثر تغییر ضریب هدایتی حرارتی و ضریب نشر قطعه مربعی با ابعاد ۵*۵ سانتی متر مربع واقع در مرکز کوره ۵۹ لیتری با توان ۲۰۰۰ وات در زمان ۹۳ دقیقه. (الف) نمودار توزیع دما در نیمه سمت راست قطعه مربعی در k, ε های مختلف (ب) نمودار توزیع شار حرارتی تشعشعی در نیمه سمت راست قطعه مربعی در k, ε های مختلف

از شکل ۴-۱۱ می توان دریافت که توزیع دما و شار حرارتی تشعشعی در نیمه سمت راست قطعه مربعی به صورت یکنواخت است. در شکل (الف) در مقدار k ثابت (۴۴/۵ و ۰/۰۰۶ وات بر متر کلونین) با تغییر ε در مقدار کمتر آن (۰/۱۹) مقدار دما در راستای مورد نظر تقریباً با مقدار ۱۳۰ درجه اختلاف، کمتر است و در مقدار ε ثابت (۰/۱۹ و ۰/۸۵) با تغییر k نمودارها تغییر نکرده و بر هم منطبق شده اند. به عبارت دیگر در مقدار ضریب هدایتی ثابت با افزایش ضریب نشر، دما نیز افزایش یافته است و توزیع دما تنها به ضریب نشر بستگی داشته است. در شکل (ب) نیز در مقدار k ثابت

(۴۴/۵ و ۰/۰۰۶ وات بر متر کلوین) با تغییر ε در مقدار کمتر آن (۰/۱۹) مقدار شار حرارتی تشعشعی در راستای مورد نظر تقریباً با مقدار ۱۴۵۰ وات بر متر مربع اختلاف، کمتر است و در مقدار ε ثابت (۰/۱۹ و ۰/۸۵) با تغییر k نمودارها تغییر نکرده و بر هم منطبق شده‌اند. به عبارت دیگر مقدار شار حرارتی تشعشعی نیز تنها به مقدار ضریب نشر بستگی داشته است، همانند نتایج قبل با افزایش k انتقال حرارت هدایتی بیشتر می‌شود و گرما به خوبی به مرکز قطعه منتقل می‌شود و محیط قطعه دمای کمتری دارد و شار تشعشعی طبق رابطه شار، با ثابت بودن شار ورودی با کم شدن دما، افزایش می‌یابد و با افزایش ε شار تشعشعی گسیل شده و دما بیشتر است. توزیع دما و شار با تغییر پارامتر-های k و ε نسبت به مکان و ابعاد و فاصله از المنت‌ها متغیر بوده است، اگر فاصله طول و عرض قطعه کاری داخل کوره از المنت‌ها یکسان باشد شار حرارتی و دما متقارن‌تر است.

۵- فصل پنجم: نتایج مدل سازی کوره دما بالا

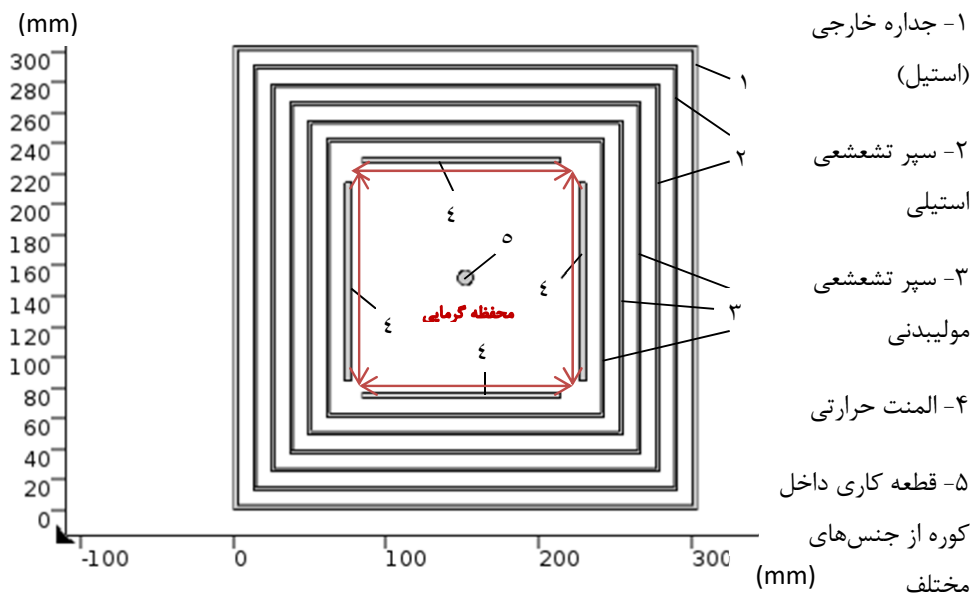
۵-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا با توجه به مباحثی که در فصول قبل بیان شد مکانیزم طراحی کوره‌های دما بالا در خلأ را شرح می‌دهیم، سپس به بررسی مکانیزم انتقال حرارت و بررسی نتایج و یکنواختی دمای داخل کوره می‌پردازیم و در نهایت با مناسب‌ترین ساختار، خنک کاری بدنه کوره را بررسی خواهیم کرد.

۵-۲ مدل‌سازی کوره دما بالا

در بخش دوم این پروژه به مدل‌سازی کوره الکتریکی با مکانیزم انتقال حرارت تشعشعی با وجود سپر-های تشعشعی می‌پردازیم. در کوره دما پایین چون المنت‌ها و جداره خارجی با هم مرز مشترک داشتند انتقال حرارت هدایتی رخ داده بود و از عایق کاری استفاده شده بود، در صورتی که در کوره-های دما بالا چون در فاصله بین صفحات خلأ وجود دارد انتقال حرارت از نوع تشعشعی است بنابراین به جای عایق کاری از سپرهای تشعشعی استفاده می‌شود. این نوع طراحی کوره‌های دما بالا بر اساس سپرهای تشعشعی، تا کنون در ایران انجام نشده ولی نمونه‌های مختلف خارجی وجود دارد ولی بهینه‌سازی و طراحی سپرهای تشعشعی از نوآوری‌های این طراحی خواهد بود. این نوع از کوره دارای یک محفظه مکعبی است که در چهار طرف آن المنت‌های الکتریکی از جنس مولیبدن وجود دارد. در این حالت از طراحی، عایق حرارتی وجود ندارد بلکه به جای آن بین المنت‌ها و جداره خارجی سپرهای تشعشعی قرار می‌گیرد و داخل کوره در حالت خلأ می‌باشد و با انتقال حرارت ناپایا، توزیع دما داخل کوره محاسبه خواهد شد.

هدف از مدل‌سازی این نوع کوره‌های دما بالا که محدوده دمایی آن ۷۰۰ تا ۱۷۰۰ درجه سانتی-گراد است، علاوه بر یکنواختی دمای داخل کوره، گرم شدن بدنه خروجی تا حد دمای معمولی است وقتی که خنک کاری وجود ندارد و در آخرین مرحله، رسیدن به دمای مطلوب در بدنه‌ی خروجی با وجود خنک کاری است با این هدف که به کمترین مقدار سپر تشعشعی لازم برای صرفه جویی در هزینه و انرژی برسیم. شکل ۵-۱ شماتیک کوره دما بالا را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۵ شماتیک کوره دما بالا بدون خنک کاری بدنه خارجی

در شماتیک شکل ۱-۵ ابعاد کل کوره ۳۰*۳۰ سانتی متر مربع است. جداره خارجی از جنس استیل با ضخامت ۳ میلی متر است، سپرهای تشعشی از جنس استیل و مولیبیدن با ضخامت ۲ میلی-متر هستند. المنت‌ها با ابعاد ۴*۱۳۰ میلی متر مربع از جنس مولیبیدن انتخاب شده‌اند که این ابعاد المنت برای ابعاد دیگر کوره‌ها متغیر است. قطعه کاری درون کوره در مرکز آن در مختصات (۱۵۲، ۱۵۲) میلی متر با قطر ۱ سانتی متر قرار دارد که از جنس استیل، سیلیسیم کاربید یا مس می-باشد. تمامی مقادیر و جنس‌ها منطبق بر طرح ساخته شده در شرکت دانش بنیان علم گستران صنعت آرتا است. در فاصله‌ی بین المنت‌ها که فضای خالی است و قطعه کار داخل آن قرار می‌گیرد، محفظه گرمایی می‌باشد که ابعاد آن ۱۵۸*۱۵۸ میلی متر مربع است.

جدول ۱-۵ مشخصات فیزیکی مواد به کار رفته در طراحی کوره

ϵ	$C_p \left(\frac{J}{kg \cdot K} \right)$	$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	$k \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$	مشخصات مواد به کار رفته
۰/۸۵	۴۷۵	۷۸۵۰	۴۴/۵	استیل
۰/۲	۲۵۰	۱۰۲۸۰	۱۳۸	مولیبیدن
۰/۹	۷۵۰	۳۲۱۰	۰/۰۰۶	سیلیسیم کاربید
۰/۱۹	۳۸۵	۸۹۶۰	۴۰۰	مس

بدلیل خلأ بودن داخل محفظه و وجود سپرهای تشعشعی از شروط مرزی تشعشعی استفاده می-شود. در این مسئله انتقال حرارت در جداره‌ها، سپرها و همچنین قطعه کار داخل آن به صورت تشعشعی مدل‌سازی می‌شود. مدل‌سازی این کوره به روش عددی و با استفاده از المان محدود انجام می‌شود.

برای مدل‌سازی کوره دما بالا ابعاد مختلف را بررسی می‌کنیم که ما در اینجا این کار را برای کوره‌های با ابعاد ۱۵*۱۵، ۲۵*۲۵، ۳۰*۳۰ سانتی‌متر مربع انجام می‌دهیم و در هر یک از ابعاد، مقادیر مناسب برای توان المنت‌ها و تعداد سپرهای تشعشعی را بدست خواهیم آورد.

۵-۳ مطالعه استقلال نتایج از شبکه بندی ناحیه حل برای کوره دما بالا

در این پژوهش از المان‌های مثلثی برای شبکه بندی ناحیه حل استفاده می‌شود. شبکه به کار رفته در اطراف قطعه کاری داخل کوره و در جداره خارجی ریزتر می‌باشد که در نتیجه آن دقت بیشتری در این ناحیه‌ها برای حل بدست خواهد آمد.

در این بررسی، پارامتر لازم، شار حرارتی تشعشعی متوسط اطراف قطعه کاری داخل کوره است وقتی که دمای آن به ۱۷۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. قطعه کاری داخل کوره گلوله استیلی با قطر ۱ سانتی‌متر است که در مرکز کوره با ابعاد ۳۰*۳۰ سانتی‌متر مربع قرار دارد. نتایج را در جدول ۵-۲ ارائه می‌دهیم و تعداد شبکه مناسب را انتخاب می‌کنیم.

جدول ۵-۲ مطالعه استقلال نتایج از شبکه بندی ناحیه حل در کوره دما بالا بدون خنک کاری

تعداد المان‌های مثلثی به کار رفته در ناحیه محاسباتی	شار حرارتی تشعشعی متوسط محیطی گلوله ی داخل کوره (وات بر متر مربع)
۲۶۵۹	۲۴۶۲/۹۵
۳۹۰۲	۲۴۵۹/۳
۳۹۸۴	۲۴۶۰/۶۳
۴۰۲۸	۲۴۶۰/۹۱
۴۱۲۰	۲۴۵۹/۳۸
۴۱۴۴	۲۴۵۸/۷۴
۴۱۷۶	۲۴۵۸/۴۵
۴۱۹۲	۲۴۵۸/۲۳

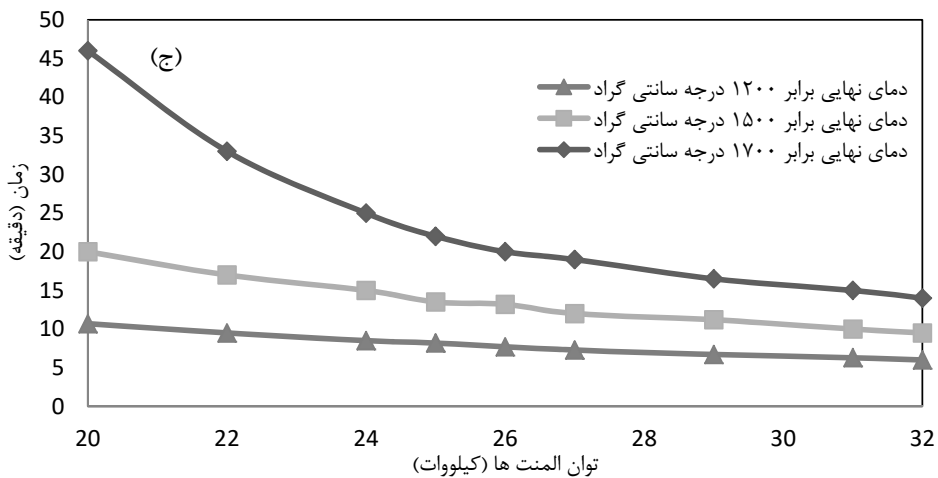
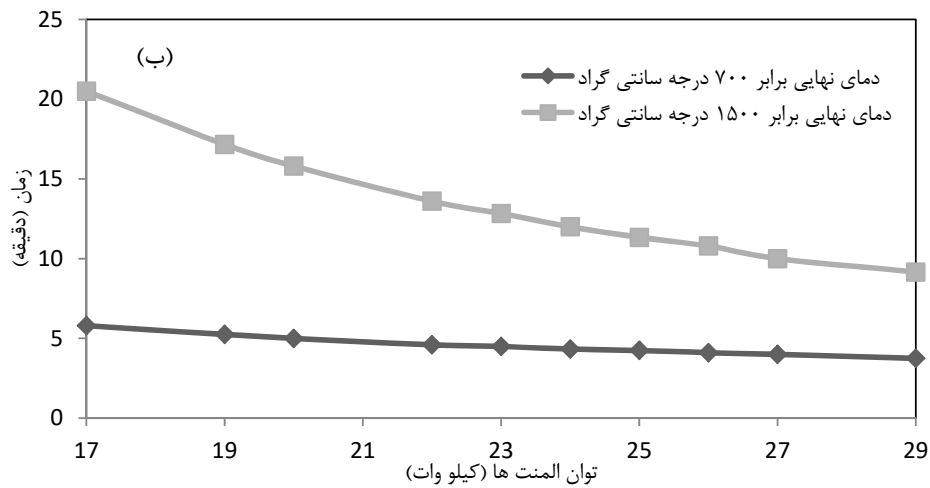
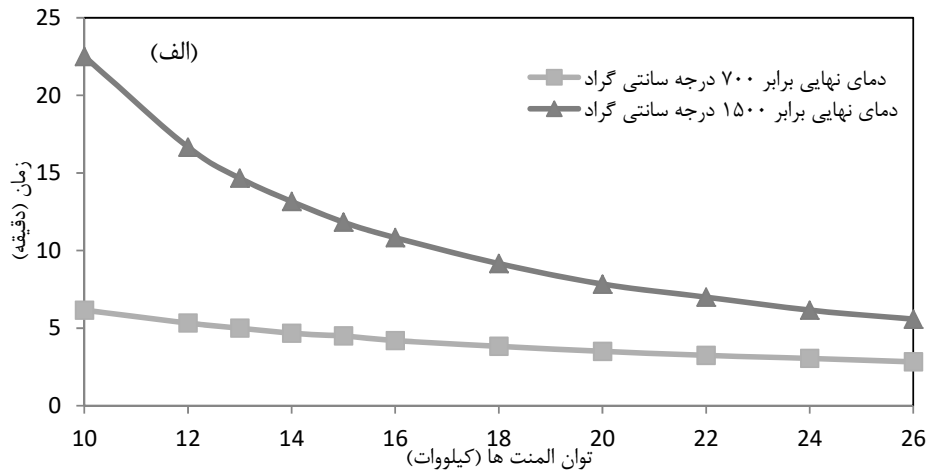
همان طور که در جدول ۵-۲ نشان داده شده، در صورت استفاده از ۴۱۴۴ المان مثلثی، ضمن آنکه کمترین حجم محاسبات رایانه‌ای را خواهیم داشت، نتایج عددی از تعداد شبکه مستقل خواهد شد.

۵-۴ بررسی توان در کوره دما بالا

در کوره دما بالا برای ابعاد مختلف کوره مقدار توان لازم را برای رسیدن به دما از محدوده ۷۰۰ تا ۱۷۰۰ درجه سانتی‌گراد بررسی خواهیم کرد و مناسب ترین توان برای بررسی‌های بعدی انتخاب می‌شود. پارامتر مورد مطالعه در این بررسی دمای متوسط محیطی قطعه کار موجود در مرکز کوره‌ها است که به صورت گلوله استیلی با قطر ۱ سانتی‌متر می باشد. ابعاد المنت‌ها در هر یک از ابعاد کوره را در جدول ۵-۳ ارائه می‌دهیم.

جدول ۳-۵ ابعاد المنتها در ابعاد مختلف کوره دما بالا

ابعاد کوره (میلی متر مربع)	ابعاد المنتها (میلی متر مربع)	ابعاد محفظه گرمایی (میلی متر مربع)
۱۵۰*۱۵۰	۴*۷۱	۸۰*۸۰
۲۵۰*۲۵۰	۴*۱۱۵	۱۳۰*۱۳۰
۳۰۰*۳۰۰	۴*۱۳۰	۱۵۸*۱۵۸



شکل ۵-۲ بررسی توان لازم با رسم نمودار زمان به توان با وجود ۲ سپر تشعشعی استیلی و ۳ سپر تشعشعی مولیبدنی، (الف) کوره ۱۵*۱۵ سانتی متر مربع (ب) کوره ۲۵*۲۵ سانتی متر مربع (ج) کوره ۳۰*۳۰ سانتی متر مربع

طبق شکل ۵-۲ مناسب‌ترین توان مورد نیاز را با توجه به دمای متوسط محیطی گلوله استیلی وقتی کوره با توجه به ملاحظات صنعتی در زمان حدود ۱۰ دقیقه به ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، انتخاب می‌کنیم. در شکل (الف) توان ۱۵ کیلو وات، در شکل (ب) توان ۲۳ کیلو وات و در شکل (ج) توان ۲۶ کیلو وات جهت ادامه مدل‌سازی انتخاب شده است.

۵-۵ بررسی تعداد سپرهای تشعشی

سپرهای تشعشی صفحات نازک، موازی و با ضریب انعکاس زیاد هستند که برای کاهش انتقال حرارت تشعشی بین صفحات قرار می‌گیرند. در واقع، سپرها همانند مقاومتهای حرارتی در مسیر انتقال حرارت تشعشی بین سطوح قرار گرفته و سبب کاهش انتقال حرارت می‌شوند که در این پژوهش برای کاهش دمای بدنه خارجی استفاده می‌شود.

برای بدست آوردن فاصله بین سپرهای تشعشی باید در هر کدام از ابعاد، ابعاد کل کوره و محفظه گرمایی ثابت باشد و در فضای خالی بین المنت‌ها و جداره خارجی تعداد سپرها به صورت یکنواخت توزیع شوند طوری که دمای جداره خارجی در کوره دما بالا افزایش زیادی از خود نشان ندهد. این سپرها از جنس استیل و مولیبدن با ضخامت ۲ میلی‌متر هستند و فاصله بین این صفحات حالت خلأ می‌باشد.

در فاصله ثابت بین جداره خارجی و المنت‌ها، تعداد مختلفی سپر حرارتی می‌تواند قرار گیرد و بسته به تعداد انتخاب شده فاصله بین سپرهای تابشی متغیر خواهد بود. جزییات در جدول ۵-۴ نشان داده شده است. با بررسی دمای جداره خارجی استیلی در تعداد ثابتی از سپر از جنس استیل وقتی که گلوله استیلی مرکز کوره به ۱۷۰۰ یا ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، مناسب‌ترین تعداد برای کل سپرهای حرارتی را در هر یک از ابعاد کوره بدست می‌آوریم. سپر تشعشی مولیبدن را با حرف M و سپر تشعشی استیل را با حرف S در نمودارها نشان می‌دهیم.

جدول ۴-۵ فاصله بین صفحات در کوره دما بالا

فاصله صفحات در کوره (میلی متر) ۳۰*۳۰	فاصله صفحات در کوره (میلی متر) ۲۵*۲۵	فاصله صفحات در کوره (میلی متر) ۱۵*۱۵	تعداد کل صفحات
۱۵/۵	۱۱/۵	۵/۵	۳
۱۲	۸/۸	۴	۴
۱۰	۷	۳	۵
۸	۵/۷۱	۲/۲۸	۶
۶/۷۵	۴/۷۵	۱/۷۵	۷

جدول ۵-۵ بررسی تعداد سپرهای تشعشعی در کوره با ابعاد ۱۵*۱۵ سانتی متر مربع

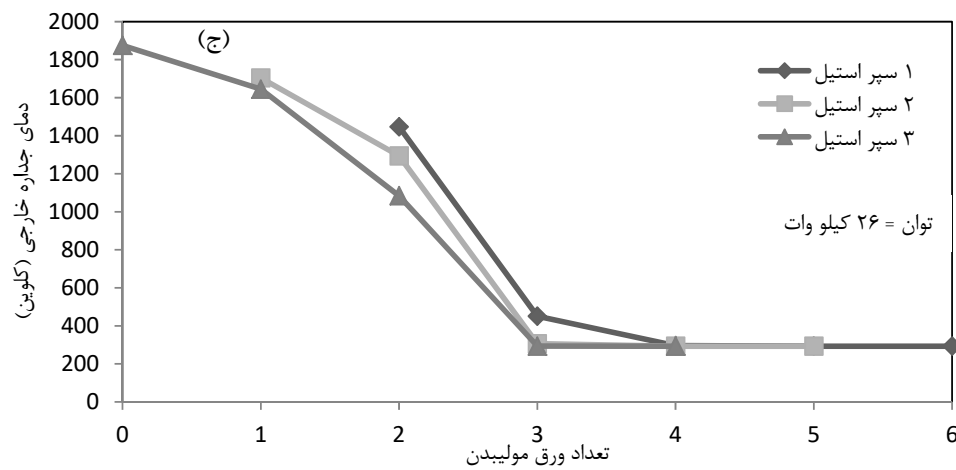
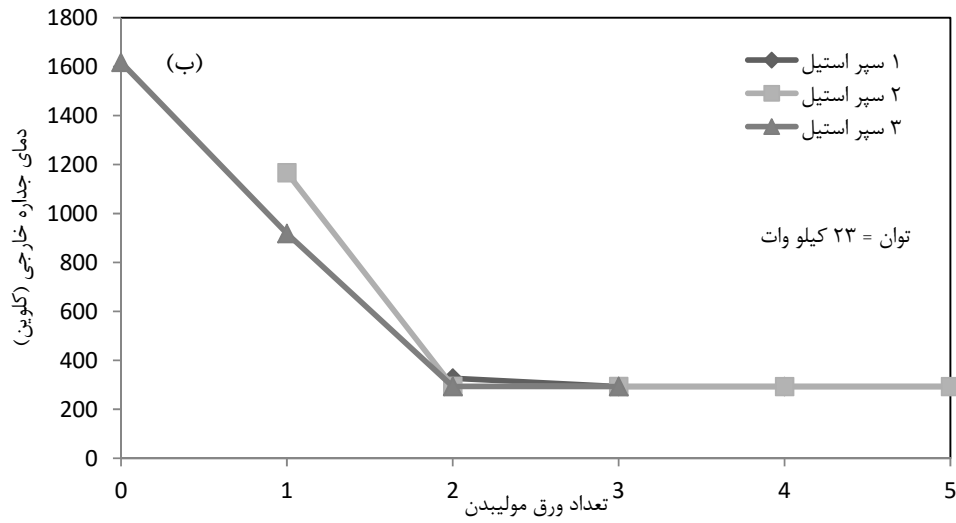
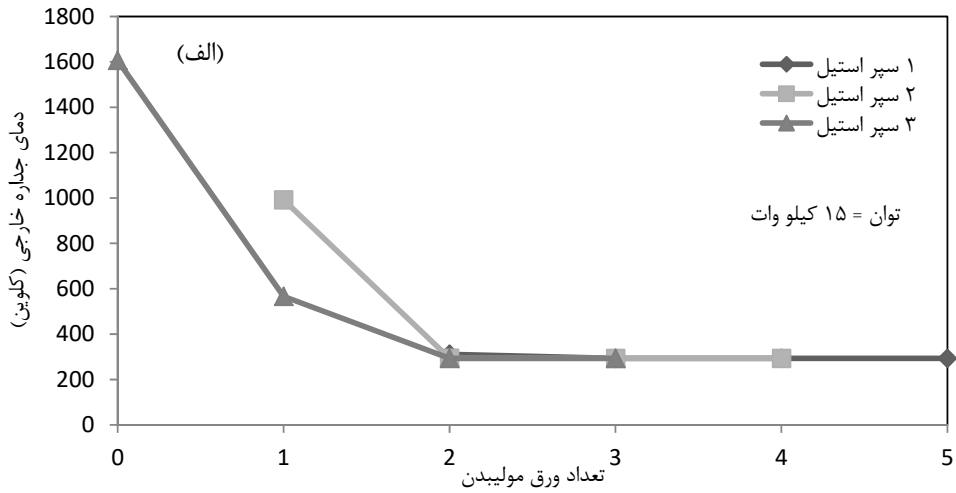
تعداد سپر تشعشعی استیلی	تعداد سپر تشعشعی مولیبدنی	زمان رسیدن گلوله استیلی به ۱۵۰۰ درجه (ثانیه)	دمای جداره خارجی استیل (کلوین)
۱	۲	۷۶۰	۳۱۱/۲۹۵
	۳	۷۳۰	۲۹۳/۲۷۵۳
	۴	۷۱۰	۲۹۳/۱۵۰۶
	۵	۷۰۰	۲۹۳/۱۵
۲	۱	۱۲۶۰	۹۹۱/۷۳۳
	۲	۷۳۰	۲۹۳/۶۱۳۴
	۳	۷۱۰	۲۹۳/۱۵۲۹
	۴	۷۰۰	۲۹۳/۱۵
۳	۰	۱۸۹۰	۱۶۰۶/۲۷
	۱	۱۱۷۰	۵۶۶/۳۶۸۵
	۲	۷۲۰	۲۹۳/۱۶۴۱
	۳	۷۰۰	۲۹۳/۱۵

جدول ۵-۶ بررسی تعداد سپرهای تشعشی در کوره با ابعاد ۲۵*۲۵ سانتی متر مربع

تعداد سپر تشعشی استیلی	تعداد سپر تشعشی مولیبدنی	زمان رسیدن گلوله استیلی به ۱۵۰۰ درجه (ثانیه)	دمای جداره خارجی استیل (کلوین)
۱	۲	۸۳۰	۳۲۷/۰۹
	۳	۷۸۰	۲۹۳/۳۷۸
	۴	۷۶۵	۲۹۳/۱۵۱۵
	۵	۷۵۰	۲۹۳/۱۵۰۰۱
۲	۱	۱۵۰۰	۱۱۶۷
	۲	۸۰۰	۲۹۴/۱
	۳	۷۷۰	۲۹۳/۱۵۷۴
	۴	۷۵۰	۲۹۳/۱۵
	۵	۷۴۰	۲۹۳/۱۵
۳	۰	۲۰۴۰	۱۶۱۷/۶۵
	۱	۱۵۱۰	۹۱۸/۳۲
	۲	۷۸۰	۲۹۳/۱۸۱۴۳
	۳	۷۵۰	۲۹۳/۱۵۰۱

جدول ۷-۵ بررسی تعداد سپرهای تشعشعی در کوره با ابعاد ۳۰*۳۰ سانتی متر مربع

تعداد سپر تشعشعی استیلی	تعداد سپر تشعشعی مولیبدنی	زمان رسیدن گلوله استیلی به ۱۷۰۰ درجه (ثانیه)	دمای جداره خارجی استیل (کلون)
۱	۲	۱۸۵۰	۱۴۴۷
	۳	۱۲۸۰	۴۵۰/۷
	۴	۱۲۰۰	۲۹۵/۶۹
	۵	۱۱۶۰	۲۹۳/۱۷
	۶	۱۱۲۰	۲۹۳/۱۵
	۲	۱	۲۲۰۰
۲		۲۰۰۰	۱۲۹۴
۳		۱۲۴۰	۳۰۶
۴		۱۱۲۰	۲۹۳/۱۸
۵		۱۱۲۰	۲۹۳/۱۵
۳		۰	۲۵۰۰
	۱	۲۵۰۰	۱۶۴۵
	۲	۲۰۵۰	۱۰۸۴
	۳	۱۱۶۰	۲۹۳/۳۶
	۴	۱۱۲۰	۲۹۳/۱۵



شکل ۵-۳ بررسی تعداد سپرهای تشعشعی به کمک مقدار دمای جداره خارجی (الف) کوره با ابعاد ۱۵*۱۵ سانتی متر

مربع (ب) کوره با ابعاد ۲۵*۲۵ سانتی متر مربع (ج) کوره با ابعاد ۳۰*۳۰ سانتی متر مربع

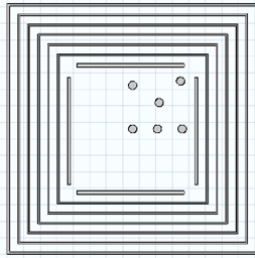
از جدول‌های ۵-۵ تا ۷-۵ و شکل ۳-۵ می‌توان دریافت که به کار بردن یک سپر با ضریب صدور کمتر یعنی مولیبدن می‌تواند بهتر از دو و حتی سه سپر تشعشعی حرارتی با ضریب صدور بیشتر یعنی استیل، سبب کاهش انتقال حرارت از بین سطوح شود و همچنین در به کارگیری سپرهای تشعشعی از جنس استیل و مولیبدن، مناسب‌ترین حالت از ترکیب آن‌ها بدست آمد. طبق شکل ۳-۵ (الف) و (ب)، بهترین تعداد سپر برابر ۴ عدد است که از ترکیب ۲ سپر مولیبدنی و ۲ سپر استیلی بدست می‌آید، برای کوره‌های با ابعاد بزرگ‌تر مشابه آنچه در شکل ۳-۵ (ج) ذکر شده است، تعداد کل ۵ سپر تشعشعی انتخاب شد که شامل ۳ سپر از جنس مولیبدن و ۲ سپر از جنس استیل است.

۵-۶ بررسی یکنواختی دما و شار در کوره دما بالا

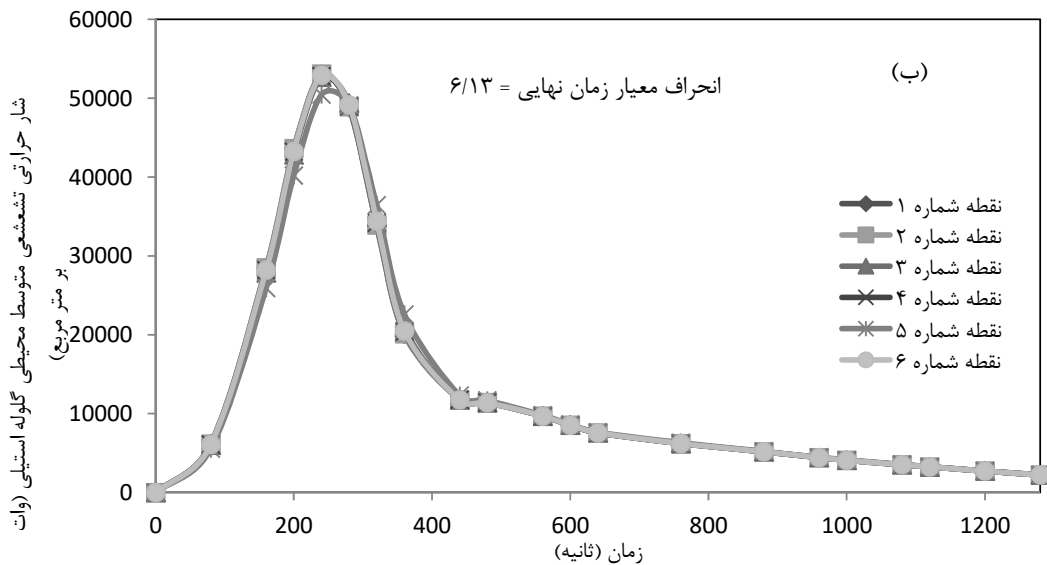
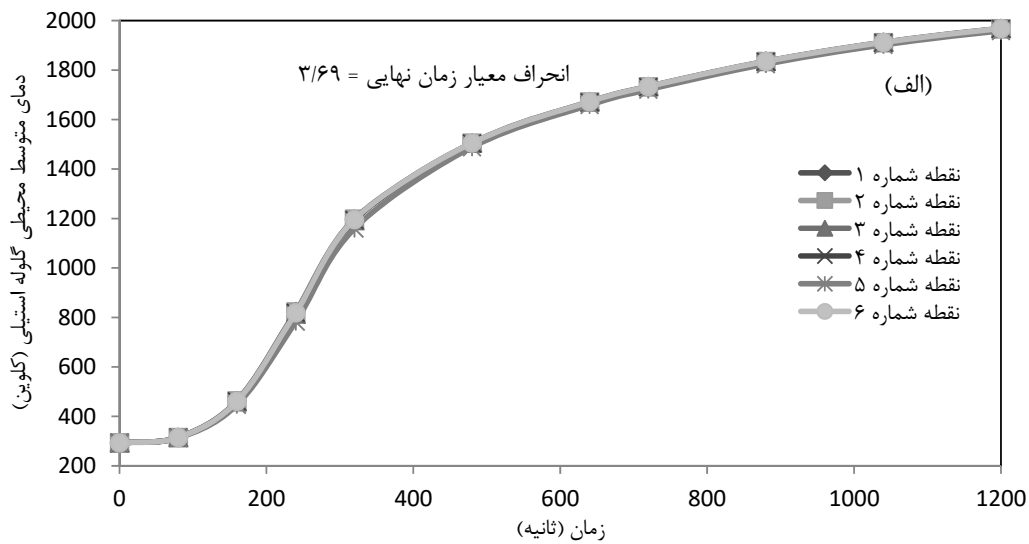
یکی از اهداف مدل‌سازی کوره این است که دما و شار داخل آن به صورت یکنواخت توزیع شود. برای بررسی آن قطعه کاری درون کوره که به صورت گلوله استیلی با قطر ۱ سانتی‌متر است را در شش مختصات مختلف داخل کوره با ابعاد ۳۰*۳۰ سانتی‌متر مربع و توان ۲۶ کیلو وات قرار می‌دهیم و توزیع دما و شار حرارتی تشعشعی متوسط محیطی گلوله نسبت به زمان را در شکل ۴-۵ نشان می‌دهیم.

جدول ۵-۸ شش مختصات مختلف درون کوره برای بررسی یکنواختی دما و شار مطابق شکل ۴-۵

شماره	مختصات گلوله در کوره ۳۰*۳۰ سانتی متر مربع (میلی-متر)
۱	(۱۵۲،۱۵۲)
۲	(۱۸۲،۱۵۲)
۳	(۲۱۲،۱۵۲)
۴	(۱۸۴،۱۸۴)
۵	(۲۱۰،۲۱۰)
۶	(۱۵۲،۲۰۵)



شکل ۴-۵ شش نقطه مختلف درون کوره دما بالا



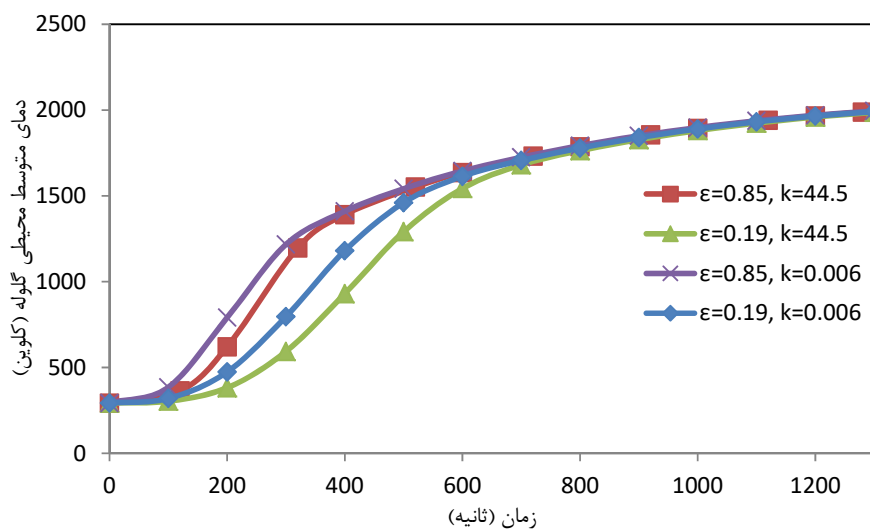
شکل ۵-۵ بررسی یکنواختی دما و شار حرارتی تشعشعی داخل کوره با ابعاد 30×30 سانتی متر مربع با وجود ۲ سپر تشعشعی استیلی و ۳ سپر تشعشعی مولیبدنی و توان ۲۶ کیلو وات (الف) نمودار دمای متوسط محیطی نسبت به زمان (ب) نمودار شار حرارتی تشعشعی متوسط محیطی نسبت به زمان

از شکل ۵-۵ (الف) و (ب) می‌توان دریافت که در نقاط مختلف داخل کوره، توزیع یکنواختی از دما و شار حرارتی وجود دارد. طبق رابطه ۴-۱ که در فصل قبل توضیح داده شد، بیشینه مقدار انحراف معیار دما و شار نقاط مختلف از دما و شار میانگین محفظه گرمایی (تفاوت مقادیر هر کدام از نقاط از مقدار میانگین) برای نمودار (الف) ۳/۶۹ و برای نمودار (ب) ۶/۱۳ است که نشان از توزیع یکنواخت دما و شار حرارتی می‌باشد و با طرح های صنعتی انطباق خوبی دارد.

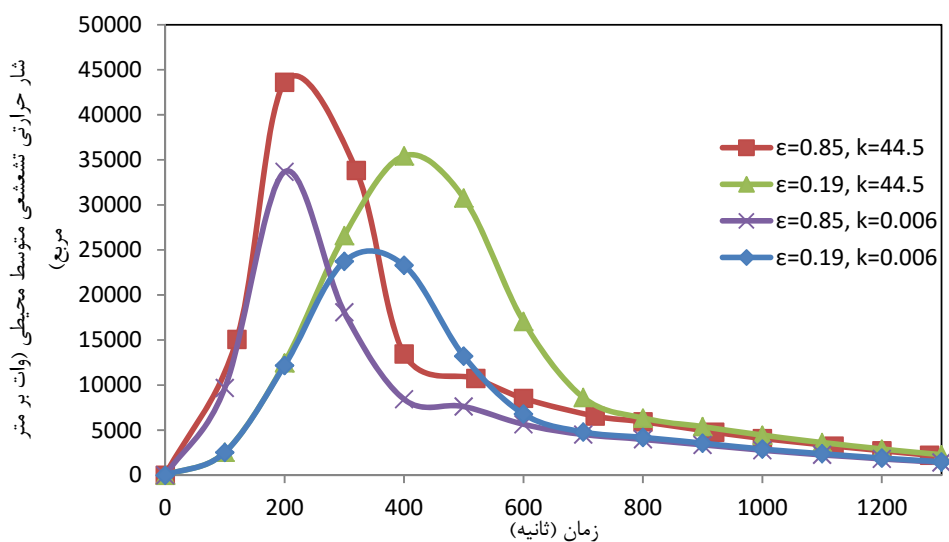
۵-۷ بررسی توزیع دما و شار حرارتی در حالت‌های مختلف قطعه کاری درون

کوره دما بالا

برای بررسی‌های بیشتر، کوره دما بالا با ابعاد ۳۰*۳۰ سانتی‌متر مربع را وقتی گلوله استیل، مسی و یا سیلیسیم کاربید در مرکز آن قرار دارد و توان المنت‌ها ۲۶ کیلو وات و تعداد المان‌های شبکه ۴۱۴۴ است، انتخاب می‌کنیم. در شکل‌های ۵-۶ توزیع دما و شار حرارتی تشعشی متوسط محیطی گلوله، وقتی که دمای آن به ۱۷۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

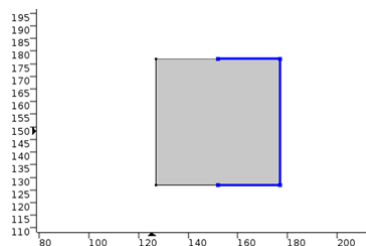
شکل ۵-۶ اثر تغییر ضریب هدایتی حرارتی و ضریب نشر گلوله با قطر ۱ سانتی متر در مختصات (۱۵۲، ۱۵۲) داخل کوره با ابعاد ۳۰*۳۰ سانتی متر مربع و توان ۲۶ کیلو وات با وجود ۲ سپر تشعشعی استیلی و ۳ سپر تشعشعی مولیبدنی، (الف) نمودار دمای متوسط محیطی گلوله نسبت به زمان در k و ϵ های مختلف برای گلوله (ب) نمودار شار حرارتی تشعشعی متوسط محیطی گلوله نسبت به زمان در k و ϵ های مختلف برای گلوله

طبق شکل ۵-۶ (الف) همانطور که انتظار می‌رفت با گذر زمان دمای اطراف گلوله داخل کوره افزایش یافته است، در مقدار ϵ ثابت (۰/۱۹ و ۰/۸۵) با تغییر مقدار k نمودارها به طور ناچیزی در زمان‌های اولیه با هم تفاوت دارند، وقتی مقدار k بیشتر است (۴۴/۵ وات بر متر کلوین) در ابتدا زمان

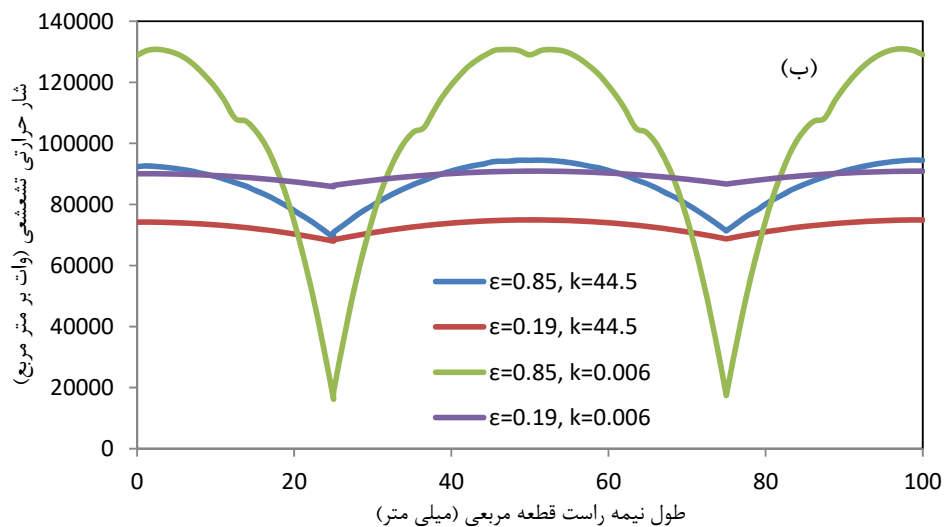
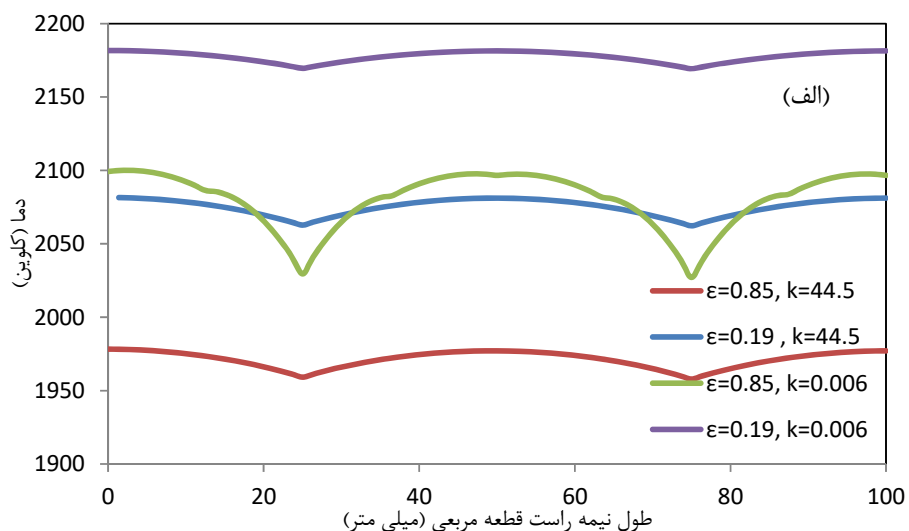
بیشتری طول می‌کشد تا دما افزایش یابد سپس با گذر زمان نمودارها در یک زمان واحد به دمای ثابت مشخصی می‌رسند. در مقدار k ثابت (۴۴/۵ و ۰/۰۰۶ وات بر متر کلوین) با تغییر مقدار ε ، وقتی مقدار آن کمتر است (۰/۱۹) ابتدا زمان بیشتری طول می‌کشد تا دما افزایش یابد سپس با گذر زمان نمودارها در یک زمان واحد به دمای ثابت مشخصی می‌رسند. به عبارت دیگر با افزایش مقدار ضریب هدایت حرارتی و کاهش مقدار ضریب نشر در ابتدا زمان بیشتری لازم است تا دما افزایش یابد. شکل (ب) نشان می‌دهد که مقدار شار حرارتی تشعشعی به صورت صعودی افزایش می‌یابد سپس با گذر زمان ابتدا کاهش یافته و در نهایت پایا می‌شود، در این شکل در ε ثابت (۰/۸۵ و ۰/۱۹) به ازای مقدار k کمتر (۰/۰۰۶ وات بر متر کلوین) شار حرارتی تشعشعی متوسط محیطی کمتر است و در مقدار k ثابت (۴۴/۵ و ۰/۰۰۶ وات بر متر کلوین) به ازای ε های مختلف، در مقدار ε کمتر (۰/۱۹) شار حرارتی تشعشعی متوسط محیطی کمتر است و همچنین در زمان بیشتری به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. این نمودارها نشان می‌دهند که توزیع دما و شار حرارتی تشعشعی به هر دو ضریب هدایتی حرارتی و ضریب نشر بستگی دارد. با افزایش k انتقال حرارت هدایتی بیشتر می‌شود و گرما به خوبی به مرکز قطعه منتقل می‌شود و محیط قطعه دمای کمتری دارد و شار تشعشعی طبق رابطه شار، با ثابت بودن شار ورودی با کم شدن دما، افزایش می‌یابد و با افزایش ε شار تشعشعی گسیل شده و دما بیشتر است.

۵-۷-۱ تغییر هندسه قطعه کاری درون کوره

برای بررسی بیشتر در زمینه یکنواختی دمای درون کوره، به جای گلوله، قطعه مربعی جای گذاری کرده سپس در حالت‌هایی که ضریب حرارتی هدایتی و ضریب نشر مقادیر مختلفی دارد بررسی می‌کنیم. ابعاد قطعه مربعی ۵*۵ سانتی‌متر مربع است که در مرکز کوره با ابعاد ۳۰*۳۰ سانتی‌متر مربع با توان ۲۶۰۰۰ وات در مختصات (۱۵۲، ۱۵۲) میلی‌متر قرار دارد. جنس این صفحه می‌تواند استیل، مس یا سیلیسیم کاربید باشد. در نمودارهای زیر توزیع دما و شار حرارتی تشعشعی نیمه سمت راست صفحه مربعی با طول کل ۱۰۰ میلی‌متر مطابق شکل (۵-۷) مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این کوره چون المنت‌ها در چهار طرف نیز قرار دارند، توزیع دما و شار حرارتی تشعشعی در نیمه سمت راست و چپ با هم برابر و به صورت متقارن است، بنابراین فقط یک نیمه مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۵-۷ شماتیک قطعه مربعی مورد بررسی داخل کوره ۵۹ لیتری



شکل ۵-۸ اثر تغییر ضریب هدایتی حرارتی و ضریب نشر قطعه مربعی با ابعاد ۵*۵ سانتی متر مربع واقع در مرکز کوره با ابعاد ۳۰*۳۰ سانتی متر مربع با توان ۲۶ کیلو وات در زمان ۱۰ دقیقه. (الف) نمودار توزیع دما در نیمه سمت راست قطعه مربعی در ϵ, k های مختلف (ب) نمودار توزیع شار حرارتی تشعشعی در نیمه سمت راست قطعه مربعی در ϵ, k های مختلف

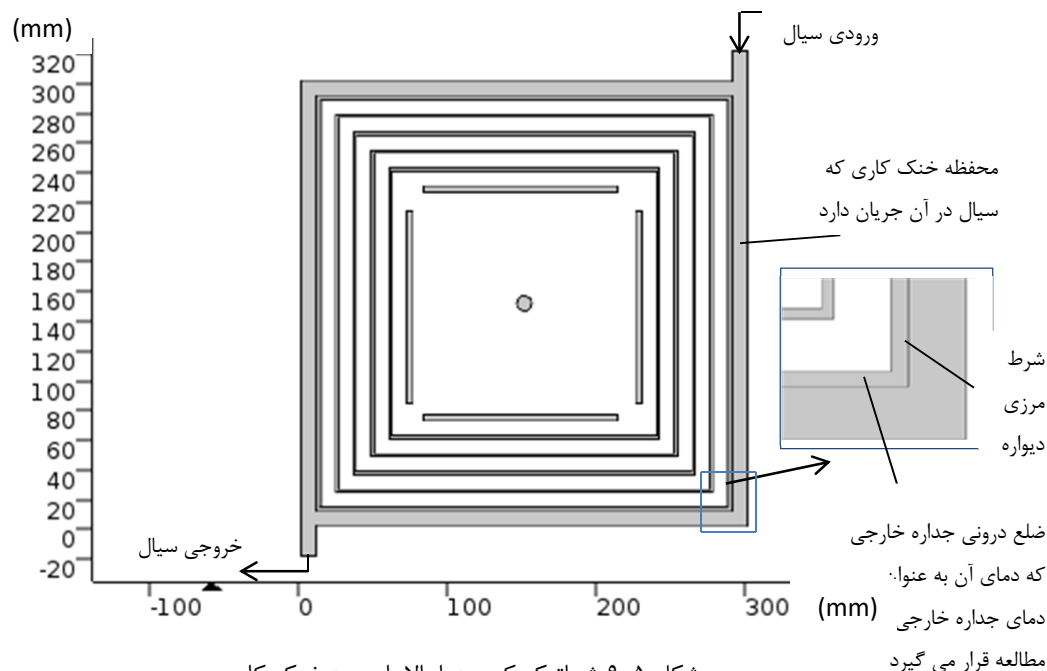
از شکل ۵-۸ می‌توان دریافت که توزیع دما و شار حرارتی تشعشعی در نیمه سمت راست قطعه مربعی به صورت غیر یکنواخت است. در شکل (الف) در مقدار k ثابت (۴۴/۵ و ۰/۰۰۶ وات بر متر کلوین) با تغییر ε در مقدار کمتر آن (۰/۱۹) مقدار دما در راستای مورد نظر تقریباً با مقدار ۱۰۰ درجه اختلاف، بیشتر است و در مقدار ε ثابت (۰/۱۹ و ۰/۸۵) با تغییر k در مقدار کمتر آن (۰/۰۰۶) مقدار دما در راستای مورد نظر تقریباً با مقدار ۱۰۰ درجه اختلاف، بیشتر است. به عبارت دیگر در مقدار ضریب هدایتی ثابت با افزایش ضریب نشر، دما کاهش یافته است و در ضریب نشر ثابت با افزایش ضریب هدایتی حرارتی، دما کاهش یافته است توزیع دما به ضریب نشر و ضریب هدایتی حرارتی بستگی داشته است. در شکل (ب) توزیع شار حرارتی تشعشعی در نمودارها متفاوت بوده است و در مقدار k برابر با ۰/۰۰۶ و ε برابر با ۰/۸۵، توزیع شار حرارتی دارای نوسان بیشتری است و بیشترین یکنواختی مربوط به ε برابر با ۰/۱۹ بوده است. در مقدار k ثابت (۴۴/۵ و ۰/۰۰۶ وات بر متر کلوین) با تغییر ε مقدار شار حرارتی تشعشعی در راستای مورد نظر به طور متوسط برابر بوده است در حالی که بیشینه مقدار شار حرارتی برای ε کمتر (۰/۱۹) در k کم (۰/۰۰۶)، کمتر بوده است و در مقدار ε ثابت (۰/۱۹ و ۰/۸۵) نیز با تغییر k مقدار شار حرارتی تشعشعی در راستای مورد نظر به طور متوسط تقریباً ۲۰۰۰ وات بر متر مربع اختلاف داشته است که این مقدار برای k کم (۰/۰۰۶)، کمتر بوده است. به عبارت دیگر در این جا مقدار شار حرارتی تشعشعی به مقدار ضریب نشر و ضریب هدایتی حرارتی بستگی داشته است. با افزایش k انتقال حرارت هدایتی بیشتر می‌شود و گرما به خوبی به مرکز قطعه منتقل می‌شود و محیط قطعه دمای کمتری دارد و شار تشعشعی طبق رابطه شار، با ثابت بودن شار ورودی با کم شدن دما، افزایش می‌یابد و با افزایش ε شار تشعشعی گسیل شده و دما بیشتر است.

۵-۸ خنک کاری کوره دما بالا

خنک کاری کوره‌ها با هدف صرفه جویی در هزینه و انرژی انجام می‌گیرد و وظیفه‌ی اصلی آن دفع حرارت موجود در جداره خارجی است که دلیل استفاده از آن در این پژوهش استفاده از تعداد سپر-های تشعشعی کمتر در ساختار کوره است. با توجه به هزینه بالای سپرهای تشعشعی با انجام خنک کاری سعی شده است تا هزینه‌ها به حداقل مقدار خود برسد، همچنین آب گرم خروجی از محفظه خنک کاری نسبت به سپر تشعشعی اضافی در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با اضافه کردن خنک کاری جداره خارجی، می‌توان از تعداد سپرهای حرارتی کاست و به همین منظور، ۱ تا ۲ سپر تشعشعی را حذف کرده و دمای جداره خارجی کوره را گزارش خواهیم کرد. دمای

طراحی در جداره خارجی (بهترین نوع عایق حرارتی) وقتی است که دمای جداره خارجی از ۳۵۰ کلوین تجاوز نکند. اثرات خنک کاری بر روی دمای جداره خارجی استیل بررسی خواهد شد. این خنک کاری با سیال آب که دارای جریان آرام است، انجام می‌گیرد که در این قسمت انتقال حرارت بصورت جابجایی است. شکل ۵-۹ شماتیک کوره دما بالا با خنک کاری را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۹ شماتیک کوره دما بالا با وجود خنک کاری

در ورودی آب دما برابر با ۲۹۳.۱۵ کلوین است و سرعت آن در دبی‌های مختلف، متغیر است. در خروجی نیز فشار نسبی صفر می‌باشد. در فصل مشترک ناحیه عبور سیال و دیواره کوره هیچ شرط مرزی اجباری اعمال نشده است.

۵-۸-۱ مطالعه استقلال نتایج از شبکه بندی ناحیه حل با وجود خنک کاری

در این بخش با توجه به اینکه، حل عددی جریان آرام به مدل کوره اضافه شده است، شبکه بندی با المان‌های مثلثی را در دیواره یعنی مرز بین قسمت سیال و جامد ریزتر می‌کنیم و بخشی که خنک کاری انجام می‌گیرد (قسمت سیال) و دیواره‌ها، سپرهای حرارتی، المنت‌ها و قطعه کاری (قسمت جامد) را بصورت جدا بررسی می‌کنیم.

در این بررسی، پارامتر مورد نظر جهت کنترل تعداد شبکه، شار حرارتی تشعشعی متوسط اطراف قطعه کاری داخل کوره و دمای جداره خارجی استیلی است وقتی که دمای گلوله استیلی داخل آن به ۱۷۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. کوره با ابعاد ۳۰*۳۰ سانتی‌متر مربع با دو سپر تشعشعی استیل و سه سپر تشعشعی مولیبدن بررسی شده و نتایج در جدول ۵-۹ ارائه شده است.

جدول ۵-۹ مطالعه استقلال نتایج از شبکه بندی ناحیه حل با وجود خنک کاری

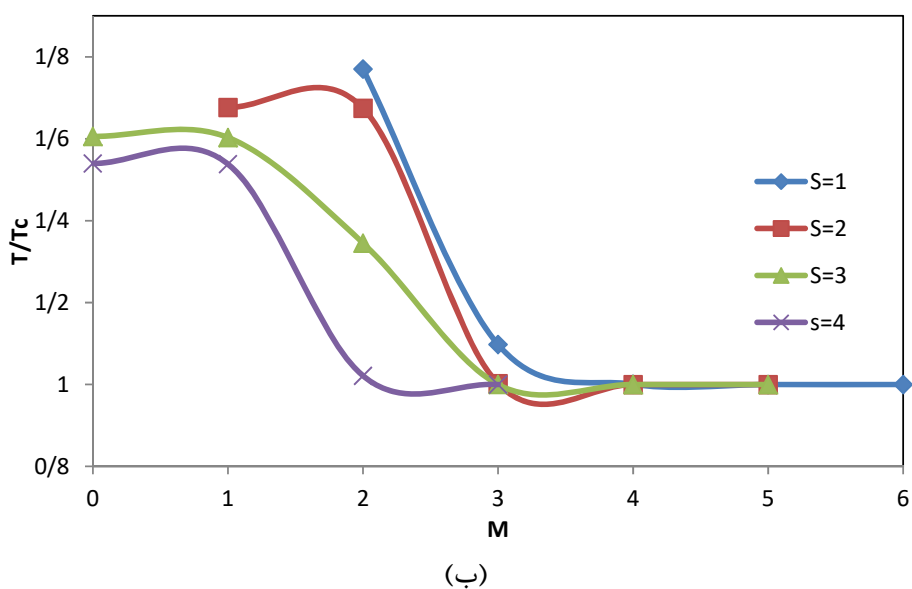
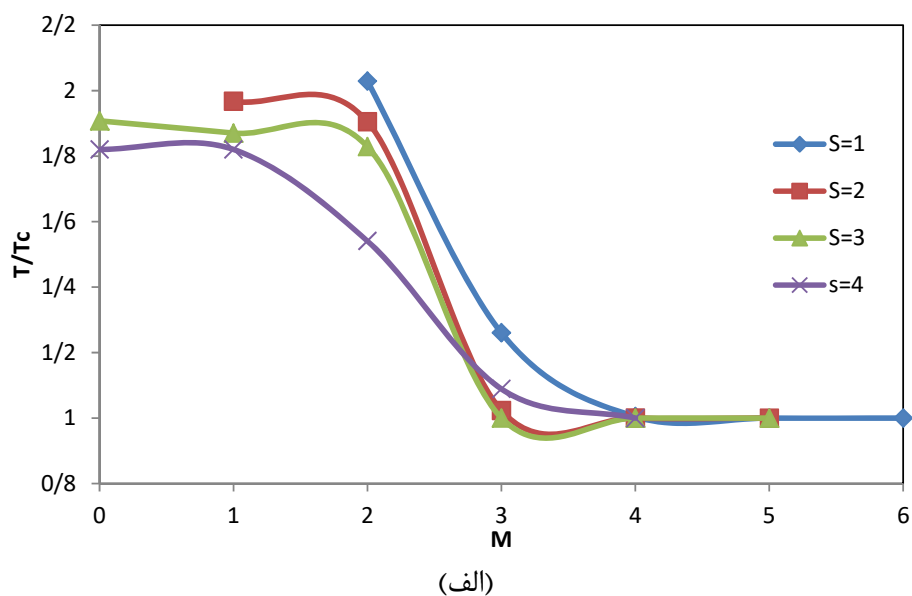
تعداد المان های مثلثی	دمای جداره خارجی استیلی (کلوین)	شار حرارتی تشعشعی متوسط محیطی گلوله استیلی (وات بر متر مربع)	
۲۲۵۶	۲۹۵/۷	۲۴۶۳/۸۸	قسمت سیال
۵۰۹۸	۲۹۶/۳۲	۲۶۵۶/۹۱	
۵۷۴۴	۲۹۵/۶۴	۲۴۹۲/۰۳	
۶۲۲۶	۲۹۵/۷۲	۲۴۸۴/۳۶	
۶۷۷۶	۲۹۵/۷۲	۲۴۸۳/۴۲	
۷۶۶۲	۲۹۵/۶۳	۲۴۷۲/۷۵	
۸۰۸۴	۲۹۵/۸۳	۲۴۵۷/۲۶	
۴۶۳۸	۲۹۶/۳۲	۲۶۵۶/۹۱	قسمت جامد
۶۳۷۴	۲۹۶/۴۵	۲۶۹۲/۹۱	
۷۹۵۴	۲۹۶/۱۵	۲۶۳۶/۷۸	
۹۳۱۸	۲۹۶/۴۲	۲۶۸۱/۴۲	
۱۰۴۳۰	۲۹۶/۳	۲۶۶۰	
۱۱۵۲۶	۲۹۶/۳۸	۲۶۹۲/۲۵	
۱۲۷۷۸	۲۹۶/۴۶	۲۷۳۳/۳	
۱۶۲۴۶	۲۹۶/۱۵	۲۶۷۴	

همان طور که در جدول ۵-۹ نشان داده شده، در صورت استفاده از ۶۰۰۰ المان مثلثی برای بخش سیال و ۹۳۱۸ المان مثلثی برای بخش جامد، نتایج بدست آمده از محاسبات عددی مستقل از شبکه بندی ناحیه حل خواهند بود. ادامه نتایج ارایه خواهد شد.

۵-۸-۲ خنک کاری کوره در ابعاد مختلف

برای بررسی تاثیر خنک کاری در دمای جداره خارجی استیلی دو کوره ۱۵*۱۵ و ۳۰*۳۰ سانتی متر مربع انتخاب شده است و در تعداد مختلف سپرهای تشعشعی خنک کاری انجام گرفته و تاثیر آن بر دمای جداره خارجی در دبی ثابت (۱۰۰ کیلوگرم بر متر مربع ثانیه) در نمودارهای شکل ۵-۱۰ نشان داده شده است. در این نمودارها محور افقی تعداد سپر تشعشعی مولیبدن (M) و محور عمودی $\frac{T}{T_c}$ می باشد، که T دمای جداره خارجی استیل بدون خنک کاری و T_c دمای جداره خارجی استیل با خنک کاری است. در این بررسی فاصله بین جداره خارجی و محفظه گرمایی، جایی که سپرهای تشعشعی توزیع می شوند، ثابت است که این فاصله با L نشان داده می شود. در کوره ۱۵*۱۵ سانتی-متر مربع مقدار L برابر ۳۵ میلی متر و در کوره ۳۰*۳۰ سانتی متر مربع مقدار L برابر ۷۱ میلی متر است.

وقتی که عدد رینولدز کمتر از ۱۵۰۰ باشد، جریان به صورت آرام است. با توجه به ابعاد کوره و همچنین ضخامت بخش خنک کاری عدد رینولدز و به تبع آن سرعت و دبی متغیر است. در کوره ۱۵*۱۵ سانتی متر مربع که ضخامت بخش خنک کاری ۰/۵ سانتی متر است، تا سرعت ۰/۳ و همچنین دبی ۳۰۰ کیلوگرم بر مترمربع ثانیه جریان آرام است و در کوره ۲۵*۲۵ و ۳۰*۳۰ سانتی-متر مربع که ضخامت بخش خنک کاری ۱ سانتی متر است، تا سرعت ۰/۱۵ و دبی ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مربع ثانیه جریان آرام است.

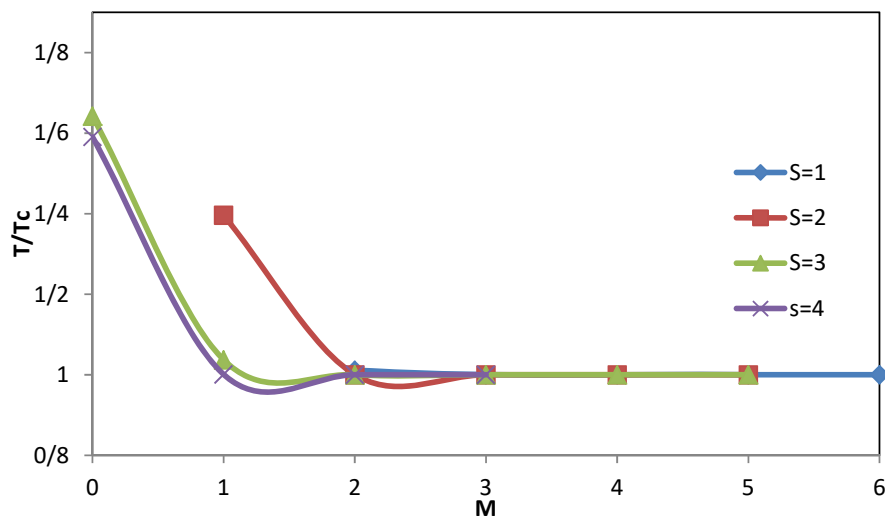


شکل ۵-۱۰ بررسی تاثیر خنک کاری در کوره دما بالا، (الف) کوره با ابعاد ۱۵*۱۵ سانتی متر مربع و توان ۱۵ کیلووات
(ب) کوره با ابعاد ۳۰*۳۰ سانتی متر مربع و توان ۲۶ کیلووات

از نمودارهای شکل ۵-۱۰ می‌توان دریافت که وقتی تعداد سپرهای تشعشعی کمتر است، دمای جداره خارجی در دو حالت بدون خنک کاری و با خنک کاری بیشتر است و همچنین هر چه تعداد سپرهای تشعشعی استیلی که دارای ضریب نشر بیشتری (۰/۸۵) هستند، نسبت به تعداد سپرهای تشعشعی مولیبدنی با ضریب نشر ۰/۲ بیشتر باشد دمای جداره خارجی در دو حالت بیشتر است. بنابراین وجود سپرهای تشعشعی بیشتر و ترکیب سپرهای تشعشعی مولیبدنی و استیل با تعداد استیل

کمتر به صرفه‌تر است. نمودارهای (الف) و (ب) نشان می‌دهد که خنک کاری بر دمای جداره خارجی با توجه به حالت‌های مختلف تاثیر قابل توجهی با نرخ خنک کاری مختلف داشته است.

در ادامه تاثیر خنک کاری را در کوره 15×15 سانتی‌متر مربع وقتی که فاصله بین جداره خارجی و محفظه گرمایی را تغییر می‌دهیم، بررسی می‌کنیم. لازم به ذکر است که تمام پارامترها همانند قبل است فقط در این حالت مقدار L برابر $37/5$ میلی‌متر است و همانند حالت قبل در تعداد مختلف سپر-های تشعشعی خنک کاری انجام گرفته و تاثیر آن بر دمای جداره خارجی در دبی ثابت (100 کیلوگرم بر متر مربع ثانیه) در نمودار شکل ۵-۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۱ بررسی تاثیر خنک کاری در کوره دما بالا با ابعاد 15×15 سانتی متر مربع و توان 15 کیلووات

همانطور که شکل ۵-۱۱ نشان می‌دهد، با تغییر مقدار L نمودار طراحی خنک کاری نیز تغییر کرده است و نمودار ۳ سپر تشعشعی استیلی و ۴ سپر تشعشعی استیلی در تعداد مختلف سپر مولیبدنی با اختلاف ناچیز به یک صورت هستند و در همه حالات نسبت به شکل ۵-۱۰ (الف) نرخ خنک کاری کمتر است یعنی تاثیر خنک کاری نیز بر دمای جداره خارجی با افزایش فاصله بین جداره خارجی و محفظه گرمایی کاهش یافته است.

یکی از اهداف خنک کاری جداره خارجی، حذف ۱ الی ۲ سپر تشعشعی بوده است طوری که دمای جداره خارجی در حد دمای معمولی اتاق باشد. برای تحقق این هدف تعداد سپرهای تشعشعی مناسب که از بخش ۵-۵ انتخاب شده بود را مدنظر قرار داده و با حذف تعداد مناسب از سپرها، بهترین حالت را برای ابعاد مختلف کوره انتخاب می‌کنیم. از بخش ۵-۵ در کوره 15×15 و 25×25

سانتی‌متر مربع ۲ سپر تشعشعی مولیبدنی و ۲ سپر تشعشعی استیلی و در کوره ۳۰*۳۰ سانتی‌متر مربع ۲ سپر تشعشعی استیلی و ۳ سپر تشعشعی مولیبدنی انتخاب شده بود.

در کوره ۱۵*۱۵ سانتی‌متر مربع وقتی ۲ سپر تشعشعی استیلی با ۲ سپر تشعشعی مولیبدنی و ۲ سپر مولیبدنی با ۱ سپر استیلی وجود دارد، دمای جداره خارجی در حالتی که خنک کاری وجود دارد در مقایسه با حالتی که خنک کاری وجود ندارد تفاوت چندانی ندارد. وقتی تنها ۲ سپر مولیبدنی وجود داشته باشد، تاثیر خنک کاری به میزان تقریباً ۹۰ درجه اختلاف بوده است که دمای خروجی نهایی ۳۶۲ کلوین است، بنابراین در کوره ۱۵*۱۵ سانتی‌متر مربع بهترین حالت وجود ۲ سپر تشعشعی مولیبدنی با خنک کاری است. در کوره ۲۵*۲۵ سانتی‌متر مربع وقتی ۲ سپر مولیبدنی وجود دارد، تاثیر خنک کاری به میزان تقریباً ۱۴۰ درجه اختلاف بوده است که دمای خروجی نهایی ۳۸۰ کلوین است، بنابراین در کوره ۲۵*۲۵ سانتی‌متر مربع بهترین حالت وجود ۲ سپر تشعشعی مولیبدنی با خنک کاری است. در کوره ۳۰*۳۰ سانتی‌متر مربع وقتی ۲ سپر استیلی با ۳ سپر مولیبدنی وجود دارد، دمای جداره خارجی در حالتی که خنک کاری وجود دارد در مقایسه با حالتی که خنک کاری وجود ندارد تفاوت چندانی ندارد. ولی وقتی ۱ سپر استیلی با ۳ سپر مولیبدنی وجود دارد، تاثیر خنک کاری به میزان تقریباً ۱۳۵ درجه اختلاف بوده است که دمای خروجی نهایی تقریباً ۳۰۰ درجه کلوین است، بنابراین در کوره ۳۰*۳۰ سانتی‌متر مربع بهترین حالت وجود ۱ سپر تشعشعی استیلی با ۳ سپر تشعشعی مولیبدنی است.

۶- فصل ششم: جمع بندی

۶-۱ مقدمه

این پایان نامه به صورت عددی به مدل سازی انتقال حرارت درون کوره های الکتریکی تحت خلأ پرداخته است. در این تحقیق، روش غالب انتقال حرارت درون کوره بدلیل خلأ بودن داخل محفظه، تشعشی است. هدف از این مدل سازی، یکنواخت بودن دما و شار داخل محفظه کوره، بدست آوردن توان ورودی لازم و تعداد سپرهای تشعشی مناسب و ساختار آن در کوره دما بالا و در نهایت خنک کاری این نوع کوره ها است. پس از بررسی انتقال حرارت کوره، نتایج شبیه سازی در حالت های مختلف ارائه شده است.

۶-۲ ارائه نتایج

کوره الکتریکی تحت خلأ به صورت دوبعدی با مکانیزم انتقال حرارت تشعشی مدل شده است. در این تحقیق کوره های دما پایین تا دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد و کوره های دما بالا از دمای ۷۰۰ تا ۱۷۰۰ درجه سانتی گراد در ابعاد مختلف بررسی شده است. در هر دو نوع کوره منبع حرارتی المنت ها هستند که چهار عدد المنت الکتریکی در چهار وجه هندسه تعبیه شده است. قطعه کاری در مرکز کوره با دو جنس مختلف قرار گرفته است. در کوره دما پایین، بین محفظه گرمایی و جداره خارجی کوره، عایق سرامیکی وجود دارد و انتقال حرارت تشعشی فقط داخل محفظه کوره انجام گرفته است و در قسمت عایق حرارتی، قطعه کاری، المنت ها و جداره ها انتقال حرارت هدایتی صورت می گیرد. در کوره دما بالا، بین محفظه گرمایی و جداره خارجی، به جای استفاده از عایق، سپرهای تشعشی قرار گرفته اند؛ این سپرها همانند مقاومت های حرارتی در مسیر انتقال حرارت تشعشی بین جداره خارجی و المنت ها قرار گرفته و سبب کاهش نرخ انتقال حرارت به سمت بیرون می شوند که در فاصله بین سپرها نیز خلأ وجود دارد. در نتیجه علاوه بر محفظه گرمایی، در فاصله بین سپرهای تشعشی نیز انتقال حرارت تشعشی صورت گرفته است. در این نوع کوره ها اطراف جداره خارجی را محفظه ای از جنس استیل پوشانده است که در داخل آن، سیال خنک کننده آب جریان دارد. این خنک کاری برای صرفه جویی در انرژی و هزینه صورت گرفته است تا علاوه بر کم کردن تعداد سپرها، دمای خروجی نیز کم شود.

ابتدا در هر کدام از کوره ها یکی از ابعاد انتخاب شده است و استقلال نتایج از شبکه بندی ناحیه حل مطالعه شده است. در این تحقیق، مطالعه شبکه بندی با المان های مثلثی انجام گرفته است. در کوره ها، اطراف قطعه کاری داخل آن و جداره خارجی، ناحیه های مهم برای توزیع حرارت هستند و نتایج بدست آمده در این ناحیه ها گزارش شده است. بنابراین با ریز کردن مش در این ناحیه ها تلاش

شده تا دقت نتایج افزایش یابد. در کوره دما پایین و دما بالا با توجه رنج دمایی ذکر شده، جزییات هر یک از آن‌ها به تفسیر در فصول چهارم و پنجم ارائه شده است.

پس از مطالعه استقلال نتایج در هر کدام از کوره‌ها، توان ورودی المنت‌ها بررسی شده است. ملاک برای بدست آوردن توان لازم، زمانی است که قطعه کاری داخل کوره به دمای موردنظر در هر کدام نوع از کوره‌ها می‌رسد. سپس در کوره دما بالا تعداد سپرهای تشعشعی مورد نیاز با توجه به ابعاد کوره، جنس سپرها و دمای جداره خارجی تعیین شده است. در این بررسی ابعاد کل کوره و محفظه گرمایی ثابت است و در فضای بین المنت‌ها و جداره خارجی سپرها با تعداد مناسب توزیع شده اند. مقدار توان و تعداد سپرهای تشعشعی در هر یک از کوره‌ها در فصول قبل آمده است. نتایج نشان داده است که در کوره با ابعاد بزرگتر مقدار توان لازم بیشتر است و همچنین با افزایش دمای کوره توان نیز افزایش یافته است. نتایج بررسی سپرهای تشعشعی نیز حاکی از آن است که به کار بردن یک سپر با ضریب صدور کمتر می‌تواند بهتر از دو و حتی سه سپر تشعشعی حرارتی با ضریب صدور بیشتر باشد، به این دلیل که سبب کاهش انتقال حرارت از بین سطوح می‌شود. مناسب‌ترین حالت، ترکیب سپر-های تشعشعی استیلی و مولیبدنی انتخاب شده است.

با توجه به اینکه یکنواختی دما و شار داخل کوره‌ها از اهداف این تحقیق است، در نقاط مختلف داخل کوره، قطعه کاری جای‌گذاری شده است و نمودارهای مربوط به دما و شار حرارتی تشعشعی متوسط محیطی نشان داده شده است و مقادیر انحراف معیار روی هر کدام از نمودارها ذکر شده است. نتایج نشان داده است که در نقاط مختلف داخل کوره توزیع دما و شار حرارتی تشعشعی بصورت یکنواخت بوده است و مقادیر انحراف معیار حاکی از آن است که یکنواختی داخل کوره‌ها با ابعاد کوچکتر بیشتر است و کوره‌های بزرگتر از پراکندگی دما و شار بیشتری برخوردار هستند.

برای بررسی تاثیر ضریب نشر و ضریب هدایتی حرارتی قطعه کاری داخل هر دو نوع کوره، آن را در مرکز کوره قرار دادیم و با تغییر پارامترهای ذکر شده، نمودارهای توزیع دما و شار حرارتی تشعشعی را داخل کوره بررسی کردیم. همچنین برای بررسی‌های بیشتر هندسه قطعه کاری درون کوره را تغییر دادیم و تغییر پارامترها در آن را مطالعه کردیم. نتایج بدست آمده برای هر کدام، در بخش‌های مختلف فصل چهارم و پنجم ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که توزیع دما و شار حرارتی تشعشعی اطراف قطعه کاری داخل کوره با توجه به هندسه و ابعاد آن به مقدار ضریب نشر و ضریب هدایتی حرارتی قطعه کار بستگی دارد. با افزایش k انتقال حرارت هدایتی بیشتر می‌شود و گرما به خوبی به مرکز قطعه منتقل می‌شود و محیط قطعه دمای کمتری دارد و شار تشعشعی طبق

رابطه شار، با ثابت بودن شار ورودی با کم شدن دما، افزایش می‌یابد و با افزایش ϵ شار تشعشعی گسیل شده و دما بیشتر است.

در پایان فصل پنجم، به خنک کاری کوره دما بالا پرداخته ایم. در این قسمت در ابعاد مختلف کوره، در تعداد سپرهای تشعشعی مختلف تاثیر خنک کاری را بر دمای جداره خارجی استیل بررسی کرده‌ایم. بعد از بدست آوردن تعداد سپر تشعشعی مناسب در حالت بدون خنک کاری، تعداد ۱ یا ۲ سپر تشعشعی را با توجه به دمای جداره خارجی حذف کردیم و به جای آن محفظه خنک کاری را اضافه کردیم. نتایج نشان داد که با انجام خنک کاری دمای جداره خارجی به میزان قابل توجهی از ۱۳۰ الی ۱۴۰ درجه کاهش یافته است.

۳-۶ پیشنهادات و کارهای آینده

در ادامه‌ی مباحث مطرح شده در این پایان نامه، می‌توان به مدل سازی سه بعدی کوره‌های دما بالا و دما پایین پرداخت و همچنین در کوره دما بالا، جریان آشفته سیال داخل محفظه خنک کاری کوره و تاثیر تغییر دبی در این نوع جریان و ارائه یک مدل کنترلی برای دما از پیشنهادات این طرح است.

فهرست منابع

۱. Hemisphere publishing crop, "*furnaces and combustion chambers*" Heat exchanger design Hand book, Section ۳.۱۱, ۱۹۸۳.
۲. کریمی دمنه م، پایان نامه کارشناسی ارشد: "مدل سازی کوره عملیات حرارتی با روش ناحیه ای"، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۸۴.
۳. جباری ف، پایان نامه کارشناسی ارشد: "بررسی اثر وجود سپرهای تشعشعی و کاربرد آن در سیستم های مختلف"، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، ۱۳۹۱.
۴. Hottel. H.C, Sarofim. A.F, "Radiative transfer", ۱ st edition, MC Graw-Hill, ۱۹۶۷.
۵. Rhine J.M., Tucker. R.J, "Modeling of gas-fired furnaces and boilers and other industrial heating processes", ۱ st edition, MC Graw Hill, ۱۹۹۱.
۶. Mistry H, Subbu G, Dey S, Bishnoi P, Castillo J.L, "Modeling of transient natural convection heat transfer in electric ovens", *Journal of Applied Thermal Engineering*, vol. ۲۶, pp. ۲۴۴۸-۲۴۵۶, ۲۰۰۶.
۷. Apraham J.P, Sparrow E.M, "Experimens on discretely heated, vented/unvented enclosures for various radiation surface characteristics of the thermal load, enclosure temperature sensor, and enclosure walls", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. ۴۵, pp. ۲۲۵۵-۲۲۶۳, ۲۰۰۲.
۸. Sparrow E.M, Apraham J.P, "heat tarnsfer coefficients and other performance parameters for variously positioned and supported thermal loads in ovens with/without watter-filled or empty blockages", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. ۴۵, pp. ۳۵۹۷-۳۶۰۷, ۲۰۰۲.
۹. Sparrow E.M, Apraham J.P, "A computational analysis of the radiative and convective processes that take place in preheated and non-preheated ovens", *Heat Transfer Engineering*, vol. ۲۴, pp. ۲۵-۳۷, ۲۰۰۳.
۱۰. Sparrow E.M, Apraham J.P, "A new buoyancy model replacing the standard pseudo-density difference for internal natural convection gases", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. ۴۶, pp. ۳۵۸۳-۳۵۹۱, ۲۰۰۳.
۱۱. Apraham J.P, Sparrow E.M, "A simple model and validating experiments for predicting the heat transfer to a load situated in an electrically heated oven", *Journal of Food Engineering*, vol. ۶۲, pp. ۴۰۹-۴۱۵, ۲۰۰۴.
۱۲. Apraham J.P, Sparrow E.M, "Three-dimensional laminar and turbulent natural convection in a continuously/discretely wall-heated enclosure containing a thermal load", *Numerical Heat Transfer, Part A*, vol. ۴۴, pp. ۱۰۵-۱۲۵, ۲۰۰۳.

13. Verboven P, Scheerlinck N, Baerdemaeker J.D, Nicolai B.M, "Computational fluid dynamics modeling and validation of the isotremal airflow in a forced convection oven", *Journal of Food Engineering*, vol. 43, pp. 41-53, 2000.
14. Chhanwal N, Anishaparvin A, Indrani D, Raghavarao K.S.M.S, Anandharamakrishnan, "Computational fluid dynamics (CFD) modeling of an electrical heating oven for bread-baking process", *Journal of food engineering*, vol. 100, pp. 452-460, 2010.
15. Kang J, Rong Y, "Modeling and simulation of load heating in heat treatment furnaces", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 174, pp. 109-114, 2005.
16. Chapman K.S, Ramadhyani S, "Modeling and parametric studies of heat transfer in a direct-fired batch reheating furnace", *J. Heat Treat*, vol. 8, pp. 137-146, 1990.
17. Chapman K.S, Ramadhyani S, Viskanta R, "Modeling and analysis of heat transfer in a direct-fired continuous reheating furnace", *Heat Transfer Combust. Syst.*, pp. 30-44, 1989.
18. Halliday W, "Computer control model for continuous reheat furnaces", *Metallurgia*, vol. 57, pp. 412-413, 1990.
19. Marlo D.O, "Modeling direct-fired annealing furnaces for transient operations", *Appl. Math. Model.* Vol. 20, pp. 30-40, 1996.
20. Liu M.S, Choi C.K, Leung C.W, "startup analysis of oil-fired furnace – the smoothing Monte Carlo Model approach", *Heat Mass Transfer*, vol. 37, pp. 449-457, 2001.
21. Steward F.R, Cannon P, "The calculation of radiative heat flux in a cylindrical furnace using the Monte Carlo Method", *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 14, pp. 240-262, 1971.
22. Keramida E.P, Liakos H.H, Founti M.A, Boudouvis A.G, Markatos N.C, "The discrete transfer radiation model in a natural gas-fired furnace", *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, vol. 34, pp. 449-462, 2000.
23. Liu F, Becker H.A, Bindar Y.A, "Comparative study of radiative heat transfer modeling in a gas-fired furnaces using the simple grey gas and the weighted-sum-of grey-gases models", *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 41, pp. 3307-3371, 1998.
24. Song G, Bjorge T, Holen J, Magnussen F, "Simulation of fluid flow and gaseous radiation heat transfer in a natural gas-fired furnace", *Int. J. Numer. Meth. Heat Fluid Flow*, vol. 7, pp. 169-180, 1997.
25. Viskanta R, Chapman K.S, Ramadhyani, "Mathematical modeling of heat transfer in high temperature industrial furnaces" in: proceedings of the first international conference on advanced computational methods in heat transfer, Portsmouth, July 17-20, pp. 117, 1990.

۲۶. Gao M, Reid C.N, Jahedi M, Li Y, "Estimating equilibration times and heating/cooling rates in heat treatment of parts with arbitrary geometry", *J. Mater. Eng. Perform*, vol. ۹, pp. ۶۲-۷۱, ۲۰۰۰
۲۷. Mochida A, Kudo K, Mizutani Y, Hattori M, Nakamura Y, "Transient heat transfer analysis in vacuum furnaces heated by radiant tube burners", *Journal of Energy Convers. Mgmt*, Vol. ۳۸, No. ۱۰-۱۳, pp. ۱۱۶۹-۱۱۷۶, ۱۹۹۷.
۲۸. Hachem E, Jannoun G, Veysset J, Henri M, Pierrot R, Piotrault I, Massoni E, Coupez T, "modeling of heat transfer and turbulent flows inside industrial furnaces", *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. ۳۰, pp. ۳۵-۵۳, ۲۰۱۲.

۲۹. مهربان س، حسینی سروری س م، فراهت س، "طراحی معکوس مرزی یک کوره تابشی با سطح متحرک" شانزدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، کرمان،

۱۳۸۷

۳۰. Cumber P.S, "Improvements to the discrete transfer method of calculating radiative heat transfer", *Int.J. Heat Mass Transfer*, Vol. ۳۸, No. ۱۲, pp. ۲۲۵۱-۲۲۵۸, ۱۹۹۵.
۳۱. Lockwood F.C, Shah N.G, "A new radiation solution method for incorporation in general combustion prediction procedures", *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Combustion*, pp. ۱۴۰۵-۱۴۱۳, ۱۹۸۱.

۳۲. لاری خ، ماروباما ش، گنجعلیخان نسب س ع، رساله دکتری تخصصی: "مطالعه ای در زمینه انتقال حرارت تشعشعی ترکیب شده با دیگر حالت های انتقال حرارت در محفظه هایی با اشکال دلخواه"، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۹۰.

۳۳. Zabihi M, Lari Kh, Amiri H, "Coupled radiative-conductive heat transfer problems in complex geometries using embedded boundary method", *J Braz. Soc.Mech. Sci. Eng.*, ۲۰۱۷.

۳۴. ابجدپور آ، آقاجفی س، "استفاده از ترفندهای نواحی خاموش و مرز جاسازی شده جهت حل معادله انتقال تشعشعی در هندسه های دوبعدی پیچیده"، دومین همایش ملی انتقال حرارت و جرم ایران، سمنان، ۱۳۹۳.

۳۵. Viskanta R, Menguc M.P, "Radiation heat transfer in combustion systems", *Prog. Energy Combust. Sic*, Vol. ۱۳, pp. ۹۷-۱۶۰, ۱۹۸۷.
۳۶. Martyushev S.G, Sheremet M.A, "Conjugate natural convection combined with surface thermal radiation in s three-dimensional enclosure with a heat source", *International Journal of heat and Mass Transfer*, Vol. ۷۳, pp. ۳۴۰-۳۵۳, ۲۰۱۴.

۳۷. Mohamed Abd El-Aziz, "Radiation effect on the flow and heat transfer over an unsteady stretching sheet", *International Communications in heat and Mass transfer*, Vol. ۳۶, pp. ۵۲۱-۵۲۴, ۲۰۰۹.
۳۸. Bataller R.C, "Viscoelastic fluid flow and heat transfer over a stretching sheet under the effects of a non-uniform heat source, viscous dissipation and thermal radiation", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. ۵۰, pp. ۳۱۵۲-۳۱۶۲, ۲۰۰۷.
۳۹. Polder D, Van Hove M, "Theory of radiative heat transfer between closely spaced bodies", *Physical Review B*, Vol. ۴, N. ۱۰, pp. ۳۳۰۳-۳۳۱۴, ۱۹۷۱.
۴۰. Mayr B, Prieler R, Demuth M, Hochenauer C, "Comparison between solid body and gas radiation in high temperature furnaces under different oxygen enrichments", *Applied Thermal Engineering*, vol. ۸, pp. ۵۴-۸۴, ۲۰۱۷.

۴۱. جباری ف، سعدالدین س، "بررسی کاهش انتقال حرارت بین موتور و بدنه اتاق

خودرو با استفاده از سپرهای تشعشعی حرارتی همراه با ضریب صدور وابسته به دما"،

مجله مدل سازی در مهندسی، سال ۹، شماره ۲۵، صفحه ۱۱-۱۹، ۱۳۹۰.

۴۲. Incropera, Dewit, Bergman, Lavine, "*Fundamentals of heat and mass transfer*", vol. ۶, pp. ۷۲۴-۸۴۹, ۲۰۰۰.

۴۳. باغبان ح، بلاغی ل، باغبان ه، "مدل سازی مهندسی با *COMSOL* (مهندس یار)"،

جلد اول، ویراست دوم، انتشارات دانشگاهی کیان، تهران، ص، ۱۳۹۵.

۴۴. غیاث م، "روش های عددی و نرم افزارهای محاسباتی در پژوهش های پلیمری"،

بسیارش فصلنامه پژوهشی-آموزشی، سال دوم، شماره ۲، صفحه ۴۸-۵۸، ۱۳۹۱.

Abstract

This thesis describes numerically the modeling of the heat transfer inside the electric vacuum furnaces. In this study, the predominant method of heat transfer inside the furnace is because of the vacuum inside the enclosure. The purpose of this modeling is uniformity of temperature and heat flux inside the furnace chamber, obtaining the necessary input power and the number of appropriate shields and its structure in the high temperature furnace and finally cooling the furnaces.

The electric furnace is modeled in a two-dimensional vacuum with a radiation heat transfer mechanism. In this research, low temperature furnaces are studied up to $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ and high temperature furnaces at temperatures of 1000 to $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ in different dimensions. In both types of furnace, the source of heat is the elements that four electric elements are embedded in four facets of geometry and the workpiece is located in the furnace center. In a low temperature furnace, there is ceramic insulator between the heating chamber and the outer wall of the furnace, and the radiation heat transfer is carried out only inside the furnace chamber, and in the insulation section, workpiece, elements and walls, the conductive heat transfer takes place. In a high-temperature furnace, radiation shields are placed between the heat exchanger (thermal enclosure) and the outer wall, instead of the insulation. These shields, like the thermal resistance are placed on the heat transfer path between the outer wall and the elements, reduce the heat transfer rate to the outside, which is also a gap between the shields. As a result, in addition to the heat exchanger (thermal enclosure), heat radiation is transmitted between radiation shields. In this type of furnace, around the outer wall is covered with a stainless steel chamber in which the water coolant fluid is flows. This cooling takes place to save energy and cost so that in addition to reducing the number of shields, the output temperature will be reduced. The geometric and thermal information for modeling is selected from the actual samples made by the knowledge base company Artha industry.

In each of the furnaces, the independence of the results of the networking of the solution region is studied. Then, the effects of the input power of the elements are checked. The criterion for obtaining the necessary power is when the workpiece inside the furnace reaches the desired design temperature in each type of furnace. Then, in the high-temperature furnace, the number of shields required is determined according to the dimensions of the furnace and material of the shields, as well as the temperature of the outer wall. In this study, the dimensions of the entire furnace and the thermal enclosure are fixed and in the space between the elements and the outer wall of the shields are distributed and designed with a suitable number.

Since the uniformity of temperature and heat flux inside the furnaces is the goal of this study, the workpiece is embedded in the various coordinates in the furnace, and the graphs of the temperature and average environmental radiation thermal heat flux are shown. The results show a higher uniformity in smaller furnaces.

The effect of the diffusion coefficient change and the thermal conductivity coefficient of the workpiece inside the furnace on the temperature distribution and thermal radiation heat flux have also been investigated. The results show that the distribution of temperature in the furnace depends considerably on the emission factor, and the distribution of thermal heat flux depends on both the emission coefficient and the thermal conductivity.

Cooling of high temperature furnace is the final study in this thesis. This part will apply by reducing the number of shields inside the high temperature furnace and studying the cooling effects on the temperature of the external wall of the furnace. The results show that cooling has a significant effect on reducing the temperature of the external wall by 130 to 140 degrees.

Key words: Radiation heat transfer, Radiation shield, vacuum Furnace.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.S. Thesis
Numerical Modeling of electric vacuum furnace

By:

Elnaz Ghaziani

Supervisor:

Dr. Mohammad Hasan Kayhani

Advisor:

Dr. Mohsen Nazari

February ۲۰۱۸