بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک تبدیل انرژی

مدل‌سازی عددی انتقال حرارت و میدان مغناطیسی در کوره ذوب القایی

نگارنده: سارا قربان زاده

استاد راهنما

دکتر محمد محسن شاه مردان

دکتر محسن نظری

استاد مشاور

دکتر امیر حسن نیا، دکتر مصطفی نظری

بهمن ۱۳۹۶

شماره: ۳/۴۹۲/۱۷
تاریخ: ۱۳۹۶/۱۲/۱۴

باسمه‌تعالی

دانشگاه صنعتی شاهرود

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 سارا قربان زاده با شماره دانشجویی۹۴۱۳۹۷۴. رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان مدل سازی عددی انتقال حرارت ومیدان مغناطیسی در کوره ذوب القایی که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: عالی) ☑	**مردود** ☐
نوع تحقیق: نظری ☐	**عملی** ☐

عضو هیأت داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبهٔ علمی	امضاء
۱ـ استادراهنمای اول	محمد محسن شاه مردان	دانشیار	[امضا]
۲- استادراهنمای دوم	محسن نظری	دانشیار	[امضا]
۳- استاد مشاور	امیر حسن نیا	استادیار	[امضا]
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	علی عباس نژاد	استادیار	[امضا]
۵- استاد ممتحن اول	محمود نوروزی	دانشیار	[امضا]
۶ـ استاد ممتحن دوم	پوریا اکبرزاده	دانشیار	[امضا]

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به آنان که به من آموختند و تقدیم به خانواده‌ام که با شکیبایی و مهربانی درکنارم بودند...

تعهد نامه

اینجانب سارا قربان زاده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته تبدیل انرژی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **مدل‌سازی عددی انتقال حرارت و میدان مغناطیسی در کوره ذوب القایی** تحت راهنمائی دکتر محمد محسن شاه مردان و دکتر محسن نظری 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 بافتهای 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

کوره القایی یکی از ابزارهای گرمایش بدون تماس مواد می‌باشد. کوره‌های القایی به سبب کارایی گرمایی خوب، سرعت تولید زیاد، محیط کار تمیز و آلـوده نکـردن قطعـه کـار در صـنایع فلزی برای ذوب و گرم کـردن (به‌منظور شکل‌دهی فلزها) به‌طور گـسترده بـه کـار مـی‌رونـد. اطلاعات مربوط به سیستمهای حرارت القایی اغلب در محیط‌های تولیدی به دست می‌آید. اما این رویه‌های آزمون‌وخطا بسیار طولانی و پرهزینه هستند. بنابراین روش‌های عددی برای حل مسائل حرارت القایی، پیشنهاد مناسبی می‌باشد. در این تحقیق، ابتدا اساس گرمایش القایی و مزایای گرمایش القایی نسبت به سایر روش‌های گرمادهی بیان‌شده و سپس به بررسی عددی انتقال حرارت و میدان مغناطیسی در یک کوره ذوب القایی خلأ پرداخته‌شده است.

با استفاده از یک هندسه صنعتی، مدل کوره القایی شبیه‌سازی شده است. در این تحقیق به بررسی و مقایسه گرمادهی القایی در یک ماده فرو مغناطیسی و یک ماده غیر مغناطیسی پرداخته‌شده است. روند تغییرات دما در ماده گرم شونده از زمان شروع به کار کوره تا زمان رسیدن به دمای ذوب بررسی قرارگرفته است. تغییرات چگالی جریان و دمای کوره القایی نیز بررسی و مقایسه شده است.

مجموع منبع حرارتی در کوره القایی شامل تلفات مغناطیسی (تلفات هیسترزیس) و تلفات مقاومتی (فوکو) می‌باشد. تلفات کل برای دو حالت ماده مختلف بررسی‌شده است. ملاحظه می‌شود در مواد فرومغناطیسی حرارت ایجادشده مطلوب، بیشتر از مواد غیر مغناطیسی می‌باشد، که استفاده بیشتر از کوره‌ها القایی برای مواد فرومغناطیسی را توجیه می‌کند.

سعی در این است با بررسی پارامتری مسئله، مدل مناسبی برای طراحی کوره ذوب القایی در مقیاس کوچک ایجادشده و تأثیر شکل هندسی بوته و سیم‌پیچ بر مدت زمان رسیدن به نقطه

ذوب مطالعه شود. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد حلقه در کوره القایی و ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها، ماده در زمان کوتاه‌تری به دمای ذوب رسیده است. همین‌طور در این پایان‌نامه با در نظر گرفتن چگالی جریان ثابت و جریان القاشده ثابت به بررسی اثرات تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ در کوره پرداخته می‌شود. محل قرارگیری سیم‌پیچ در اطراف بوته نیز بررسی‌شده و نتایج مربوط برای دو نوع مختلف از مواد مطالعه شده است. مشاهده شد طبق بررسی‌های انجام‌شده، کمترین فاصله بین دورهای سیم‌پیچ، برای کاهش زمان رسیدن به ذوب ماده مناسب است.

کلمات کلیدی:

کوره، حرارت القایی، الکترومغناطیس، حل عددی

فهرست مطالب

۱- فصل اول: مقدمه و کلیات ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- تاریخچه مختصری از گرمایش القایی ۲

۱-۳- طبقه بندی کوره‌های القایی از نظر فرکانس ۳

۱-۳-۱- کوره‌های القایی فرکانس شبکه ۴

۱-۳-۲- کوره‌های القایی با فرکانس متوسط ۴

۱-۳-۳- کوره‌های القایی با فرکانس زیاد (فرکانس رادیوئی) ۴

۱-۴- کاربرد گرمایش القایی در صنعت ۴

۱-۵- اساس گرمایش القایی ۶

۱-۶- توزیع جریان گردابی در یک میله توپر ۱۰

۱-۷- مزایای گرمایش القایی نسبت به سایر روش‌های گرمادهی ۱۵

۱-۸- کوره‌های القائی بدون هسته ۱۶

۱-۹- سیستم خنک کنندگی ۱۹

۱-۱۰- سیم پیچ کوره‌های القایی ۲۰

۱-۱۱- انتخاب مشخصات اصلی کوره‌های القایی ذوب ۲۰

الف) هزینه ۲۱

ب) تعداد دور سیم پیچ: ۲۱

ج) ایجاد نیروی مکانیکی و مساله تلاطم مذاب ۲۲

۱-۱۲- انتخاب توان مورد نیاز ۲۲

۱-۱۳- مروری بر کارهای گذشته ۲۴

۱-۱۴- ضرورت مساله ۲۶

۲-فصل دوم: معادلات حاکم و روش حل عددی ۲۹

۲-۱- فیزیک مساله.. ۳۰

۲-۲- متغییرهای بی بعد پر اهمیت در طراحی کوره القایی ۳۳

۲-۳- معادلات ریاضی روش اجزای محدود.. ۳۴

۲-۴- پارامترهای ورودی مساله.. ۳۷

۲-۵- شرایط مرزی و اولیه ۳۸

۲-۶- تولید شبکه عددی ۳۹

۲-۷- فلوچارت حل روش عددی ۴۲

۳-فصل سوم : نتایج و بحث.. ۴۳

۳-۱- گرمایش و ذوب ماده غیرمغناطیسی.. ۴۴

۳-۱-۱- نمایش کانتور دما و چگالی جریان مغناطیسی کوره القایی.......................... ۴۵

۳-۱-۲- بررسی تلفات در کوره القایی ۴۹

۳-۲- مطالعه پارامتری.. ۵۲

۳-۲-۱- بررسی تغییر تعداد حلقه ۵۲

۳-۲-۲- بررسی تغییر فرکانس.. ۵۸

۳-۲-۳- تاثیر تغییر نسبت $\frac{D_3}{D_4}$ بوته در طراحی با در نظر گرفتن حجم ثابت بوته ۶۱

۳-۲-۴ تاثیر تغییر فاصله دورهای کویل بر زمان رسیدن به دمای ذوب.................... ۶۵

۳-۲-۵- تغییر محل قرارگیری کویل‌ها در اطراف بوته.. ۶۹

۳-۲-۶- بررسی تاثیر تغییر$\frac{D_1}{D_3}$.. ۷۳

۳-۲-۷- بررسی تاثیر تغییر دبی آب سیستم خنک‌کاری کوره ۷۸

۴-فصل چهارم: جمع بندی.. ۸۳

۴-۱- ارائه نتایج ۸۴

مراجع ۸۷

فهرست اشکال

شکل ۱-۱: تأثیر ورود یک میله بر روی میدان مغناطیسی القایی (فلوی مغناطیسی) در داخل یک سیم‌پیچ که حامل جریان الکتریکی است (الف) میله غیر مغناطیسی (مس) (ب) میله مغناطیسی (آهن)[۷] ۸

شکل ۱-۲: تغییرات جریان و شدت میدان مغناطیسی القایی نسبت به زمان برای یک سیم‌پیچ سلونوئیدی که توسط یک منبع AC تغذیه می‌شود. جریان گردابی که در یک استوانه هادی، در یک سیم‌پیچ القایی قرارگرفته القاء می‌شود نیز نشان داده‌شده است [۷]. ۱۰

شکل ۱-۳: تغییر کیفی، به‌عنوان تابع موقعیت شعاعی، از مقدار و تغییر فاز جریان‌های گردابی القاشده در میله توپر توسط یک سیم‌پیچ سلوئیدی حامل جریان متناوب [۹]. ۱۱

شکل ۱-۴: نمودار عمق پوستی مواد مختلف برحسب فرکانس[۷] ۱۲

شکل ۱-۵: کاهش چگالی جریان برحسب عمق پوستی[۱۰] ۱۲

شکل ۱-۶: تفاوت زمان گرمادهی در یک کوره القایی و یک کوره با سوخت فسیلی [۷] ۱۶

شکل ۱-۷: برش مقطعی از کوره القایی ۱۷

شکل ۱-۸:نمایش حرکت ماده مذاب دربرشی از کوره القایی بدون هسته ۱۸

شکل ۱-۹: نیروهای واردشده در قطعه کار در حالتی که در مرکز قرار نگرفته است ۲۲

شکل ۱-۱۰: رابطه بین ظرفیت کوره و زمان ذوب وتوان موردنیاز برای ذوب فولاد و استیل در کوره القایی بدون هسته[۷] ۲۳

شکل ۲-۱: هندسه کوره القایی ۳۱

شکل ۲-۲: نمونه شبکه‌بندی انتخاب‌شده ۴۰

شکل ۲-۳: بررسی میانگین دما در فرکانس‌های مختلف نسبت به تعداد شبکه، در جریان ۱۳۰۰ آمپر و پارامترهای ثابت $\frac{D_1}{D_3} = 1.62376$ $\frac{L}{D_4} = 0$, $\frac{D_2}{D_4} = 0.91044$ ۴۱

شکل ۲-۴: بررسی میانگین دما در جریان‌های مختلف نسبت به تعداد شبکه در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز پارامترهای ثابت $\frac{D_1}{D_3} = 1.62376$ $\frac{L}{D_4} = 0$, $\frac{D_2}{D_4} = 0.91044$ ۴۱

شکل ۲-۵: فلوچارت حل کوره القایی ۴۲

شکل ۳-۱: نمایش تغییرات دما در خط ox در زمان‌های مختلف فرکانس ۲۰کیلوهرتز، جریان ۱۳۰۰ آمپر وپارامترهای ثابت ۴۵

شکل ۳-۳: نمایش تغییرات دما (کلوین) کوره القایی در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و جریان۱۳۰۰آمپر در نقطه ذوب۴۸

شکل ۳-۴: نمایش چگالی جریان مغناطیسی(تسلا) کوره القایی در فرکانس ۲۰کیلوهرتز و جریان ۱۳۰۰آمپر در زمان ذوب ۴۹

شکل ۳-۵: تلفات مقاومتی در خط گذرنده BC در زمان ۱۳۰۰ ثانیه فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و جریان ۱۳۰۰ آمپر۵۰

شکل ۳-۶: تلفات الکترومغناطیسی در خط گذرنده BC در زمان ۱۳۰۰ثانیه فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و جریان ۱۳۰۰ آمپر $\frac{D_1}{D_3} = 1.62376$ و $\frac{L}{D_4} = 0$ و $\frac{D_2}{D_4} = 0.91044$ ۵۰

شکل ۳-۷: نمایش مجموع منبع حرارت در خط BC، (الف) آلومینیوم، (ب) استیل ۵۱

شکل ۳-۸: نمایش تغییرات زمان رسیدن به دمای ۷۰۰ کلوین نسبت به تغییر تعداد حلقه در فرکانس‌های مختلف و جریان ۱۳۰۰آمپر و$\frac{D_1}{D_3} = 1.62376$ و $\frac{L}{D_4} = 0$ و $\frac{D_2}{D_4} = 0.91044$ ۵۳

شکل ۳-۹: اشکال هندسی پیشنهادی برای کوره با N×Iثابت و چگالی جریان ثابت $\frac{D_1}{D_3} = 1.62376$ و $\frac{L}{D_4} = 0$ که در آن تعداد حلقه‌ها را از ۲حلقه تا ۷ حلقه تغییر داده‌شده است ۵۴

شکل ۳-۱۰: نمایش تغییرات دمای میانگین خط ox درگذر زمان برای تعداد حلقه‌های مختلف در فرکانس ۲۰کیلوهرتز و N×I ثابت و چگالی جریان ثابت و$\frac{D_1}{D_3} = 1.62376$ و $\frac{L}{D_4} = 0$ ۵۵

شکل ۳-۱۱: نمایش تغییرات دمای میانگین خط ox درگذر زمان در تعداد حلقه‌های مختلف (N) و در دو فرکانس ۱۰ و۳۰ کیلوهرتز نشان داده‌شده است و جریان ۱۳۰۰ آمپر و N×I ثابت و چگالی جریان ثابت $\frac{D_1}{D_3} = 1.62376$ و$\frac{L}{D_4} = 0$ ۵۵

شکل ۳-۱۲: نمایش تغییرات دما در تعداد حلقه‌های مختلف (N) و در فرکانسهای۱۰ و۲۰ کیلوهرتز نشان داده‌شده است و جریان ۱۳۰۰ آمپر و N×I ثابت و چگالی جریان ثابت $\frac{D_1}{D_3} = 1.62376$ و $\frac{L}{D_4} = 0$ ۵۶

شکل ۳-۱۳: نمایش چگالی جریان مغناطیسی (تسلا) کوره در زمان۱۴۰۰ ثانیه برای تعداد حلقه‌های مختلف در فرکانس ۲۰کیلوهرتز و N×I ثابت و چگالی جریان j ثابت و$\frac{D_1}{D_3} = 1.62376$ و $\frac{L}{D_4} = 0$ ۵۷

شکل ۳-۱۴: نمایش تغییرات دما (کلوین) در کوره القایی در زمان ۱۴۰۰ ثانیه برای تعداد حلقه‌های مختلف در فرکانس ۲۰کیلوهرتز و.. ۵۸

شکل ۳-۱۵: بررسی تأثیر تغییر فرکانس بر دما در گذر زمان در جریان ۱۳۰۰آمپر و تعداد۶ حلقه سیم پیچ و.۵۹

شکل ۳-۱۶: تأثیر فرکانس بر دما در جریان ۱۳۰۰ آمپر و شکل مدل اصلی$\frac{D_1}{D_3}=1.62376$ و $\frac{L}{D_4}=0$ و $\frac{D_2}{D_4}=0.9104$،.. ۶۱

شکل ۳-۱۷:نمایش تغییرات دما نسبت به زمان در $\frac{D_3}{D_4}$ مختلف و جریان ۱۳۰۰ آمپر و فرکانس ۲۰ کیلوهرتز در حجم ثابت و$\frac{D_1}{D_3}=1.62376$ و $\frac{L}{D_4}=0$ و $\frac{D_2}{D_4}=0.91044$، (الف) آلومینیوم، (ب) استیل.. ۶۲

شکل ۳-۱۸: نمایش تغییرات دما نسبت به زمان در $\frac{D_3}{D_4}$ مختلف و جریان ۱۳۰۰ آمپر و فرکانس ۱۰و۳۰ کیلوهرتز در حجم ثابت و $\frac{D_1}{D_3}=1.62376$ و $\frac{L}{D_4}=0$ و $\frac{D_2}{D_4}=0.91044$، (الف) آلومینیوم، (ب) استیل........................... ۶۳

شکل ۳-۱۹: تغییرات دما نسبت به $\frac{D_3}{D_4}$مختلف در زمان ثابت در سه فرکانس مختلف ۱۰ ،۲۰، ۳۰ کیلوهرتز و جریان ثابت ۱۳۰۰ آمپر و حجم ثابت بوته نسبت‌های $\frac{D_1}{D_3}=1.62376$ و $\frac{L}{D_4}=0$ و $\frac{D_2}{D_4}=0.91044$, (الف) آلومینیوم در زمان ۷۰۰ ثانیه، (ب) استیل در زمان ۷۰ ثانیه.. ۶۴

شکل ۳-۲۰: چگالی میدان مغناطیسی (تسلا) نسبت به $\frac{D_3}{D_4}$ مختلف در زمان ثابت در سه فرکانس مختلف۲۰ کیلوهرتز و جریان ثابت ۱۳۰۰ آمپر و حجم ثابت بوته نسبت‌های $\frac{D_1}{D_3}=1.62376$ و $\frac{L}{D_4}=0$و$\frac{D_2}{D_4}=0.91044$,........ ۶۵

شکل ۳-۲۱: تأثیر تغییرات نسبت $\frac{D_2}{D_4}$ بردمت درگذر زمان، جریان ۱۳۰۰آمپر فرکانس ۲۰کیلوهرتز و پارامترهای ثابت $\frac{L}{D_4}=0$ ،$\frac{D_1}{D_3}=1.62376$ ۶۶

شکل ۳-۲۲: تاثیرتغییرات نسبت $\frac{D_2}{D_4}$بردما در گذر زمان، جریان ۱۳۰۰آمپر فرکانس۱۰ و۳۰ کیلو هرتز و پارامتر-های ثابت$LD4=0$ ،$\frac{D_1}{D_3}=1.62376$.. ۶۷

شکل ۳-۲۳: تأثیر تغییرات نسبت $\frac{D_2}{D_4}$ بر زمان رسیدن به دمای ذوب آلومینیوم در جریان ۱۳۰۰آمپر و فرکانس ۲۰کیلوهرتز، $\frac{L}{D_4}=0$ ،$\frac{D_1}{D_3}=1.62376$.. ۶۸

شکل ۳-۲۴: تأثیر تغییرات نسبت $\frac{D_2}{D_4}$ بردما آلومینیوم در فرکانس‌های مختلف در زمان ثابت ۷۰۰ ثانیه و جریان ۱۳۰۰آمپر،$\frac{L}{D_4}=0$،$\frac{D_1}{D_3}=1.62376$.. ۶۹

شکل ۳-۲۵: تأثیر تغییرات نسبت $\frac{L}{D_4}$ بر دما در گذر زمان، جریان ۱۳۰۰آمپر فرکانس۲۰ کیلوهرتز،،=$\frac{D_1}{D_3}$

1.62376 ..... ۷۰

شکل ۳-۲۶: تأثیر تغییرات نسبت $\frac{L}{D_4}$ بر دما درگذر زمان، جریان ۱۳۰۰آمپر فرکانس۱۰ و۳۰ کیلوهرتز $\frac{D_1}{D_3} = 1.6237$، ۷۱

شکل ۳-۲۷: نمودار تغییرات زمان رسیدن به دمای ذوب آلومینیوم نسبت به $\frac{L}{D_4}$ مختلف در۳ نسبت مختلف $\frac{D_2}{D_4}$ در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و جریان ۱۳۰۰ آمپر و ۶ حلقه کویل $\frac{D_1}{D_3} = 1.62376$ ۷۲

شکل ۳-۲۹: نمودار تغییرات دما درگذر زمان نسبت به $\frac{D_1}{D_3}$ مختلف در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و جریان ۱۳۰۰ آمپر و ۶ حلقه کویل، $\frac{D_2}{D_4} = 0.91044$، $\frac{L}{D_4} = 0$ ۷۵

شکل ۳-۳۰: نمودار تغییرات دما درگذر زمان نسبت به $\frac{D_1}{D_3}$ مختلف در فرکانس ۳۰و۱۰ کیلوهرتز و جریان ۱۳۰۰ آمپر و ۶ حلقه کویل، $\frac{D_2}{D_4} = 0.91044$، $\frac{L}{D_4} = 0$ ۷۶

شکل ۳-۳۱: نمودار تغییرات دما نسبت به $\frac{D_1}{D_3}$ مختلف در فرکانس مختلف و جریان ۱۳۰۰ آمپر و ۶ حلقه کویل $D2D4 = 0.9104$، $\frac{L}{D_4} = 0$ الف) آلومینیوم در زمان ۷۰۰ ثانیه،(ب) استیل در زمان ۱۰۰ثانیه ۷۷

شکل ۳-۳۲: کانتور تغییرات دما (کلوین)به ازای $\frac{D_1}{D_3}$ مختلف در زمان ۱۳۰۰ ثانیه برای آلومینیوم و جریان عبوری از کویلها ۷۸

شکل ۳-۳۳: تغییرات دما استیل درگذر زمان به ازای دبی‌های متفاوت جریان عبوری سیم‌پیچ ۱۳۰۰ آمپر فرکانس۲۰ کیلوهرتز ۷۹

شکل ۳-۳۴: تغییرات دما به ازای دبی‌های متفاوت جریان عبوری سیم‌پیچ ۱۳۰۰ آمپر و فرکانس ۲۰ ..... ۸۰

شکل ۳-۳۵: نمایش تغییرات دما با افزایش دبی در جریان‌های مختلف و فرکانس ثابت ۲۰ کیلوهرتز و پارامترهای ثابت ۸۱

فهرست جداول

جدول ۱-۱: عمق پوستی مواد مختلف برحسب فرکانس [۱۱] ۱۳

جدول ۱-۲: تعیین فرکانس کار برحسب قطر قطعه ذوب شدنی [۱۱] ۱۴

جدول ۲-۱: جدول خواص ماده در دمای مرجع ۳۴

جدول ۲-۲: خواص الکترومغناطیسی و حرارتی ۳۸

جدول ۳-۱: تغییر تعداد حلقه و میزان جریان و سطح مقطع کویل با درنظرگرفتن $N \times I = 7800$ و $\mathbf{j}$ ثابت، $\frac{D_1}{D_3} = 1.62376$ و $\frac{L}{D_4} = 0$ ۵۳

فهرست علائم

A	بردار پتانسیل مغناطیسی (Wb/m)	k	ضریب هدایت حرارتی(W/m.K)
B	بردار چگالی شار مغناطیسی(T)	C_P	ظرفیت گرمایی ویژه(J/kg.k)
D	بردار جابجایی الکتریکی (C/m^2)	Q_{ml}	تلفات مغناطیسی(W)
E	بردار میدان الکتریکی(V/m)	Q_{rh}	تلفات مقاومتی(W)
v	پتانسیل الکتریکی(V)	Q_e	تلفات الکترومغناطیسی(W)
H	شدت میدان مغناطیسی(A/m)	Leq	اندوکتانس معادل سیم‌پیچ(H)
J	بردار چگالی جریان مغناطیسی(A/m^2)	Req	مقاومت معادل سیم‌پیچ(Ω)
t	زمان(s)	Q	ضریب کیفیت
Q	منبع گرما(W)	i	جریان القاشده در ماده گرم شونده(A)
T	دما(K)	N	تعداد حلقه
q	انتقال حرارت هدایتی(W)	f	فرکانس(Hz)
I	جریان عبوری از سیم‌پیچ(A)	α	ضریب دمای مقاومتی(1/k)

علائم یونانی

μ_0 نفوذپذیری خلأ

μ_r نفوذپذیری نسبی ماده

ϱ چگالی (kg/m^3)

ρ مقاومت ویژه الکتریکی $(\Omega.m)$

ρ_f چگالی بار الکتریکی (C/m^3)

σ هدایت الکتریکی (S/m)

δ عمق نفوذ مغناطیسی (m)

ω فرکانس زاویه‌ای (rad/s)

ε_0 گذردهی الکتریکی در خلأ

ε_r گذردهی الکتریکی نسبی در خلأ

فصل اول: مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه

حرارت القایی بدون هیچ‌گونه تماسی قادر است به‌وسیله‌ی سیم‌پیچ رسانا جریان الکتریکی را به حرارت تبدیل نماید. جریان متناوب در سیم‌پیچ، که تولید میدان مغناطیسی گذرا می‌کند، اساس کار کوره‌های القایی را تشکیل می‌دهد. در این کوره‌ها از حرارت ایجادشده توسط تلفات فوکو و هیسترزیس برای ذوب فلزات استفاده می‌شود.

گرمایش القایی یکی از روش‌هایی است که به‌طور گسترده در عملیات حرارتی فولاد مورد استفاده قرار می‌گیرد که با گرمایشی سریع‌تر و دقیق‌تر به‌صورت موضعی با صرف انرژی کمتر، مطلوب موردنظر را حاصل می‌کند و موردپسند دوستداران محیط‌زیست نیز هست [۱و۲]. در گرمایش القایی عدم نیاز به منبع خارجی گرم‌کننده، تلفات گرمایی کمتر شده و تمیزی شرایط کار تأمین می‌گردد در این روش نیازی به تماس فیزیکی بار و کویل نبوده و علاوه بر این چگالی توان بالا در مدت زمان گرمایش کم به آسانی قابل دسترس می‌باشد [۳]. از دیگر مزایای این روش می‌توان به هزینه کمتر نیروی کار، نگهداشت آسان از تجهیزات، تضمین کیفیت، قابلیت اتوماسیون و قابلیت اطمینان بالا اشاره کرد [۴]. القای الکترومغناطیسی یک روش حرارت دادن مواد رسانای الکتریکی مانند فلزات است. تعداد کالاهای صنعتی و مصرفی که در مرحله تولید تحت حرارت القاء قرار می‌گیرند بسیار زیاد است و به سرعت در حال گسترش می‌باشند. گرمایش القایی یکی از فن‌آوری‌های جدید در لوازم‌خانگی است [۵ و۶].

۱-۲- تاریخچه مختصری از گرمایش القایی

تاریخ کشف پدیده القای مغناطیسی به سال ۱۸۳۱ میلادی برمی‌گردد. در نوامبر آن سال مایکل فاردای دو سیم‌پیچ را بر روی یک حلقه آهنی پیچید و نشان داد که هنگامی‌که یک جریان متناوب را به یکی از دو سیم‌پیچ وصل کنیم یک ولتاژ در دیگری القا می‌شود. این کشف، منجر به تولید ترانسفورماتور و تجهیزات وابسته به آن گردید و تا مدت‌ها تمامی سعی و تلاش متخصصان بر گسترش و توسعه این نوع تجهیزات متمرکزشده بود.

در سال‌های پایان قرن نوزدهم بود که کاربردهای عملی گرمایش القایی شناخته شد و اولین کاربرد شناخته‌شده، ذوب فلزات بود در آغاز از کوره‌هایی با بوته فلزی استفاده می‌شد. ولی این روش به علت معایب زیاد به سرعت منسوخ شد و پس از آن سه تن از متخصصین به نام‌های فرانتی[۱]،کولبی[۲] وکلین[۳] روش ذوب را توسعه دادند و درواقع اولین کوره ذوب واقعی را ساختند که جریان، مستقیماً در مذاب القا می‌شد و با فرکانس برق شهر کار می‌کرد.

به دنبال استفاده از گرمایش القایی به‌منظور ذوب فلزات، سایر کاربردهای گرمایش القایی شدیداً موردتقاضا واقع شد. این تقاضاها شامل سخت‌کاری فولاد و عملیات حرارتی قطعات حساس بود. از سال ۱۹۲۷ میلادی شرکت فولاد میدوال[۴] برای اولین بار از این تکنیک برای سخت‌کاری فولاد استفاده کرد. در سال ۱۹۳۰ میلادی نیز شرکت میل‌لنگ سازی اوهایو[5] به‌منظور استحکام بیشتر میل‌لنگ‌های خود از گرمایش القائی به‌منظور عملیات حرارتی بر روی میل‌لنگ استفاده کرد.

بسیاری از پیشرفت‌های اخیر در این صنعت ناشی از پیشرفت مبدل‌های فرکانسی نیمه‌هادی که در سال ۱۹۶۷میلادی ساخته شد می‌باشد. در دهه‌های اخیر راندمان این نوع مبدل‌ها افزایش چشمگیری داشته است و به حدود ۹۵ درصد رسیده است [۷].

۱-۳- طبقه‌بندی کوره‌های القایی از نظر فرکانس

کوره‌های القایی انواع مختلفی دارند که برای کاربردهای مختلفی ساخته شده‌اند. در اکثر منابع و مراجع این کوره‌ها بر اساس فرکانسی که توسط آن تغذیه می‌شوند طبقه‌بندی شده‌اند بدین ترتیب که معمولاً به سه گروه زیر دسته‌بندی می‌شوند.

---

[1]- T[1] Ferranti

[2]- CoIby

[3]- KjIIin

[4]- MidvaIe CoreIess SteeI Co

[5]- Ohio Crankshaft Co

۱-۳-۱- کوره‌های القایی فرکانس شبکه

این کوره‌ها که با فرکانس ۵۰ هرتز در اروپا و ۶۰ هرتز در آمریکا کار می‌کنند، معمولاً برای ذوب مواد یا گرم نگاه‌داشتن مواد در مقادیر زیاد بکار می‌روند. این نوع کوره‌ها چون نیاز به هیچ‌گونه تغییر فرکانس ندارند. دارای ساختمانی ساده می‌باشند و تنها مسئله مهم در این نوع کوره‌ها، مسئله تصحیح ضریب قدرت و یکسان کردن بار بر روی سه فاز[۱] هست.

۱-۳-۲- کوره‌های القایی با فرکانس متوسط

این نوع کوره‌ها معمولاً با فرکانس ۵۰۰ هرتز تا ۵۰ کیلوهرتز کار می‌کنند. البته سازندهای مختلف، حدود مختلفی برای تعیین فرکانس متوسط دارند. در این نوع کوره‌ها معمولاً از یک موتور القایی که به یک ژنراتور متصل است برای تولید فرکانس موردنیاز استفاده می‌کنند. البته اخیراً از مبدل‌های فرکانسی نیمه‌هادی برای این منظور استفاده می‌کنند.

۱-۳-۳- کوره‌های القایی با فرکانس زیاد (فرکانس رادیوئی)

این نوع کوره‌ها در فرکانس ۵۰ کیلوهرتز تا ۱۰ مگاهرتز و بیشتر کار می‌کنند و معمولاً برای سخت‌کاری و عملیات حرارتی استفاده می‌شود زیرا همان‌گونه که بعداً خواهیم دید عمق نفوذ با فرکانس کار نسبت معکوس دارد (عمق نفوذ این کوره‌ها ۰/۱ تا ۲ میلی‌متر است). در این نوع کوره‌ها نیز فرکانس توسط موتور- ژنراتورها و یا مبدل‌های نیمه‌هادی (تریستوری) تأمین می‌شود.

۱-۴- کاربرد گرمایش القایی در صنعت

امروزه ذوب القایی به صورت گسترده‌ای در تولید و ریخته‌گری فولادها و همچنین ذوب آلومینیوم، مس، روی و سایر فلزات استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر، استفاده از کوره القایی عملیات حرارتی رواج بیشتری داشته است و در بسیاری از موارد به علت آلودگی بسیار کم، سرعت زیاد، گرمایش

---

[1]- Load matching

موضعی، کنترل عمق نفوذ گرما و راه‌اندازی سریع (روشن و خاموش شدن کوره) بیشتر موردتوجه واقع‌شده است. کاربرد گرمایش القایی در صنعت شامل:

۱- ذوب فلزات مختلف، مانند فولاد، چدن، مس، آلومینیم، برنج[1] و ... در صنایع ریخته‌گری.

۲- پیش گرم کردن شمش در صنایع آهنگری (فورج)، جهت گرم کردن و شکل دادن قطعات مختلف به‌وسیله پرس، نورد و ...[2]

۳- سخت‌کاری در صنایع ماشین‌سازی، جهت سخت‌کاری سطحی قطعات، مانند چرخ‌دنده میل‌لنگ، میل پولس و...[3]

۴- کوره‌های آزمایشگاهی، جهت آلیاژسازی و اندازه‌گیری تنش، خمش و کشش در درجه حرارت معین قطعات و...[4]

۵- جوشکاری موضعی و جوشکاری قطعات خاص [5]

۶- سخت‌کاری موضعی [6]

1- melting of metals

2- preheating for forging

3- Surface heating

4- Lab induction heater

5- brazing and soldering

6- Case hardening

حرارت و گرما همواره ناشی از تلفات است و در این نوع از گرمایش نیز از تلفات هیسترزیس و فوکو استفاده می‌کنیم، تلفاتی که در اکثر تجهیزات الکتریکی مانند ترانسفورماتور و ماشین‌های الکتریکی مضر است و سعی بر این است که مقدار این تلفات به حداقل ممکن برسد.

به‌طورکلی یک سیستم گرمایش القایی شامل یک منبع تغذیه با جریان متناوب، یک سیم‌پیچ و یک قطعه که باید تحت حرارت قرار بگیرد است. اتفاق اصلی و اساسی مابین قطعه کار و سیم‌پیچ رخ می‌دهد. در این مورد نقش منبع تغذیه در مورد فرکانس و میزان جریان سیم‌پیچ اهمیت دارد. این دو فاکتور مهم و اساسی است که تأثیرات الکتریکی و حرارتی بر قطع کار می‌گذارند.

۱-۵- اساس گرمایش القایی

همان‌طوری که گفته شد گرمایش القایی بر پایه دو مکانیسم اتلاف انرژی استوار است. این دو مکانیسم یکی، تلفات جریان فوکو یا تلفات فوکو و دیگری تلفات هیسترزیس است. در مواد غیر مغناطیسی مانند آلومینیوم، مس و چدن تنها مکانیسم اول، یعنی تلفات انرژی به علت قانون ژول تأثیرگذار است ولی در مواد فرو مغناطیسی مانند فولاد و چدن (در دمای پایین‌تر از نقطه کوری)، تلفات هیسترزیس نیز نقش دارد. یک توضیح ساده ولی مفید برای تلفات هیسترزیس این است که این تلفات در اثر اصطکاک بین مولکول‌ها، یا به‌عبارت‌دیگر بین دوقطبی‌های مغناطیسی[1] به وجود می‌آید [۸].

هنگامی‌که یک ماده فرو مغناطیسی ابتدا در یک‌جهت و سپس در جهت دیگر مغناطیسی می‌شود، این دوقطبی را می‌توان همانند یک آهن‌ربا فرض کرد که با هر بار تغییر جهت میدان مغناطیسی که درنتیجه تغییر جهت جریان متناوب ایجاد می‌شود، می‌چرخند. مقدار افزایش این تلفات با نرخ افزایش تغییر جهت میدان و یا در واقع همان فرکانس جریان الکتریکی متناسب است.

---

[1]- Magnetic dipoI

تلفات جریان گردابی و تولید تلفات ژول توسط همان روابط معمول مدارهای جریان متناوب و یا مدارهای جریان مستقیم توصیف می‌شود. همانند دیگر جریان الکتریکی، جریان گردابی نیز به یک مسیر کاملاً بسته نیاز دارد. هنگامی‌که این جریان جاری می‌شود یک افت ولتاژ که توسط قانون اهم ($V=RI$) تعیین می‌گردد، ایجاد می‌شود که R مقاومت مسیر جریان است. هنگامی‌که یک افت ولتاژ اتفاق می‌افتد انرژی الکتریکی به انرژی حرارتی یا گرما تبدیل می‌شود. این تبدیل را می‌توان با تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی در سیستم‌های مکانیکی، هنگامی‌که مثلاً یک جسم از ارتفاع معین به علت نیروی جاذبه به زمین سقوط می‌کند مقایسه کرد. در سیستم‌های الکتریکی، حرارتی که توسط افت ولتاژ به وجود می‌آید. توسط رابطه $VI=RI^2$ تعیین می‌شود. دقت کنید که رابطه بیان‌کننده میزان توان تلف‌شده است و واحد آن انرژی بر واحد زمان است.

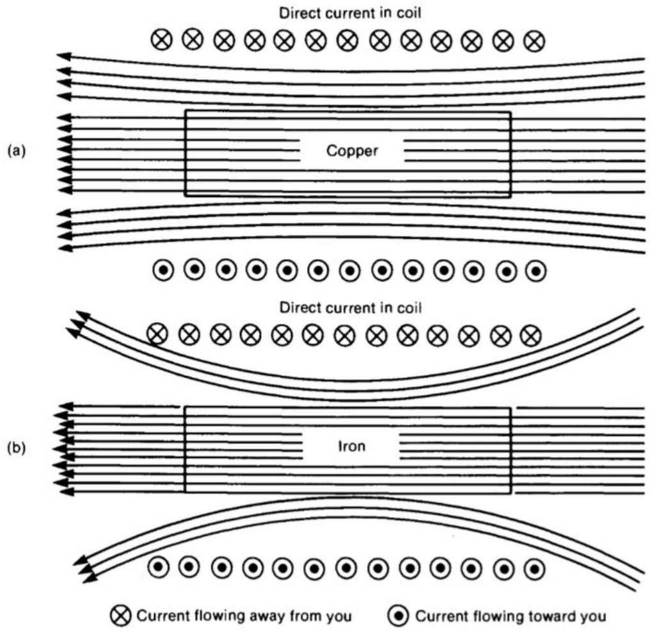
سؤالی که در این لحظه به ذهن می‌رسد این است که جریان گردابی به چه صورتی در قطعه کار القاء می‌شود فهم این موضوع برای طراحی سیم‌پیچ‌های القاء کننده و کنترل مقدار حرارت و الگوهای حرارتی[1] ضروری است. اصل این پدیده مربوط به این است که هر میدان مغناطیسی توسط یک جریان الکتریکی ایجاد می‌شود این جریان AC و یا DC باشد. در مورد یک هادی حامل جریان DC، جهت میدان مغناطیسی (یا به عبارت بهتر میدان القای مغناطیسی) عمود برجهت جریان است و شدت آن هرچه که از هادی دورتر می‌شویم کمتر می‌شود. همچنین شدت میدان مغناطیسی متناسب با جریان است. اگر یک جریان DC را به یک سیم‌پیچ سلئوئیدی وصل کنیم شدت میدان در داخل سیم‌پیچ زیادتر و بیرون از سیم‌پیچ کمتر می‌شود.

شدت میدان مغناطیسی در بین حلقه‌های کنار هم خیلی کم است. و علت آن این است که القای مغناطیسی در حلقه‌های کنار هم، دارای علامت مختلف است بنابراین همدیگر را خنثی می‌کنند. حال تصور کنید هنگامی‌که یک میله توپر را وارد یک سیم‌پیچ که حامل جریان DC است، می‌کنیم چه

1- Heating patterns

اتفاقی برای میدان مغناطیسی می‌افتد.

همان‌طور که در شکل ۱-۱ نشان داده‌شده، اگر میله، فرو مغناطیسی نباشد میدان هیچ تغییری نمی‌کند. از طرف دیگر اگر یک میله آهنی را درون سیم‌پیچ قرار دهیم تعداد خطوط القای مغناطیسی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. به همین علت گفته می‌شود گذردهی آهن بزرگ‌تر از گذردهی مواد غیر مغناطیسی است. در عمل برای محاسبات الکتریکی لازم است که گذردهی نسبی مشخص باشد. گذردهی مواد غیر مغناطیسی مساوی با گذردهی هوا است. و گذردهی نسبی آن‌ها برابر یک است. در مقابل، مواد مغناطیسی دارای گذردهی بزرگ‌تر از یک می‌باشند.



شکل ۱-۱: تأثیر ورود یک میله بر روی میدان مغناطیسی القایی (فلوی مغناطیسی) در داخل یک سیم‌پیچ که حامل جریان الکتریکی است (الف) میله غیر مغناطیسی (مس) (ب) میله مغناطیسی (آهن)[۷]

هنگامی‌که یک میله توپر هادی را درون یک سیم‌پیچ، که حامل جریان DC است قرار می‌دهیم هیچ جریان گردابی در آن القاء نمی‌شود. اگر به‌جای جریان DC از جریان AC استفاده کنیم هم جریان گردابی القاء می‌شود وهم گرما ایجاد خواهد شد.

برای کمک به فهم بهتر این موضوع فرض کنید که یک سیم‌پیچ به دور یک استوانه توخالی(از

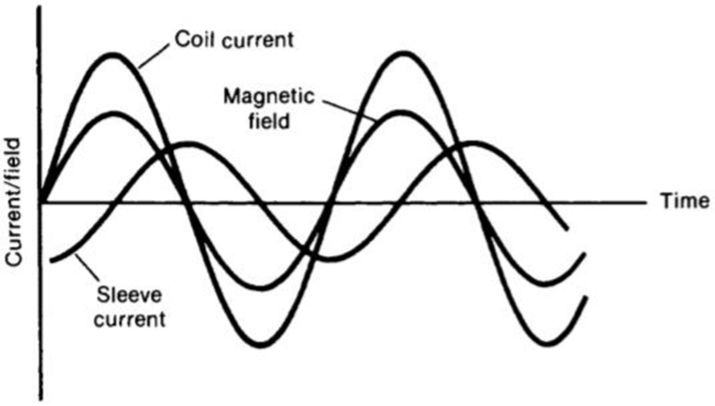
جنس همان ماده هادی که در قسمت قبل بحث شد)پیچیده شده است.

هنگامی‌که سیم‌پیچ به جریان متناوب متصل است یک میدان مغناطیسی دورتادور سیم‌پیچ را احاطه می‌کند ولی جهت و مقدار این میدان با هر بار تغییر جهت و مقدار جریان متناوب تغییر می‌کند. این باعث می‌شود که تعداد خطوط میدان یا به‌عبارت‌دیگر شار مغناطیسی که این استوانه را قطع می‌کند تغییر کند که فارادی در اواسط سال ۱۸۰۰ میلادی در آزمایش‌ها خود فهمید که این تغییر شار باعث القای یک ولتاژ می‌شود. در این مورد اخیر، ولتاژ یا نیروی الکترومغناطیسی که در استوانه القاء می‌شود توسط رابطه زیر به دست می‌آید [۷]:

$$E_{sleeve} = -N(\Delta\phi / \Delta t)$$ رابطه (۱-۱)

در این رابطه N تعداد دور سیم‌پیچ و $\varnothing\Delta/_{\Delta t}$ نرخ تغییر شار برحسب وبر بر ثانیه(wb/s) است.

رابطه فوق به قانون القای فارادی معروف است. این مشخص است که شدت میدان مغناطیسی که با تغییرات جریان الکتریکی مشخص می‌شود بستگی به مقدار جریان دارد. بنابراین دریک سیم‌پیچ، حداقل و حداکثر شدت میدان مغناطیسی درهمان لحظه‌ای که جریان حداقل و حداکثر است اتفاق می‌افتد مقدار برابر با صفر است. با توجه به شکل ۱-۲ مشخص است که هنگامی بیشترین مقدار خود را دارد که منحنی جریان از صفر بگذرد. وقتی جریان از صفر می‌گذرد ولتاژ القاء شده در استوانه، بیشترین مقدار خود را دارد.



شکل ۱-۲: تغییرات جریان و شدت میدان مغناطیسی القایی نسبت به زمان برای یک سیم‌پیچ سلونوئیدی که توسط یک منبع AC تغذیه می‌شود. جریان گردابی که در یک استوانه هادی، در یک سیم‌پیچ القایی قرارگرفته القاء می‌شود نیز نشان داده‌شده است [۷].

۱-۶- توزیع جریان گردابی دریک میله توپر

در مورد استوانه توخالی فرض بر این است که مقدار جریان گردابی یکنواخت است و فقط بستگی به جریان سیم‌پیچی و شکل هندسی استوانه دارد. درواقع هنگامی‌که میله توپر درون یک سیم‌پیچ قرار می‌گیرد اوضاع کمی پیچیده‌تر می‌شود.

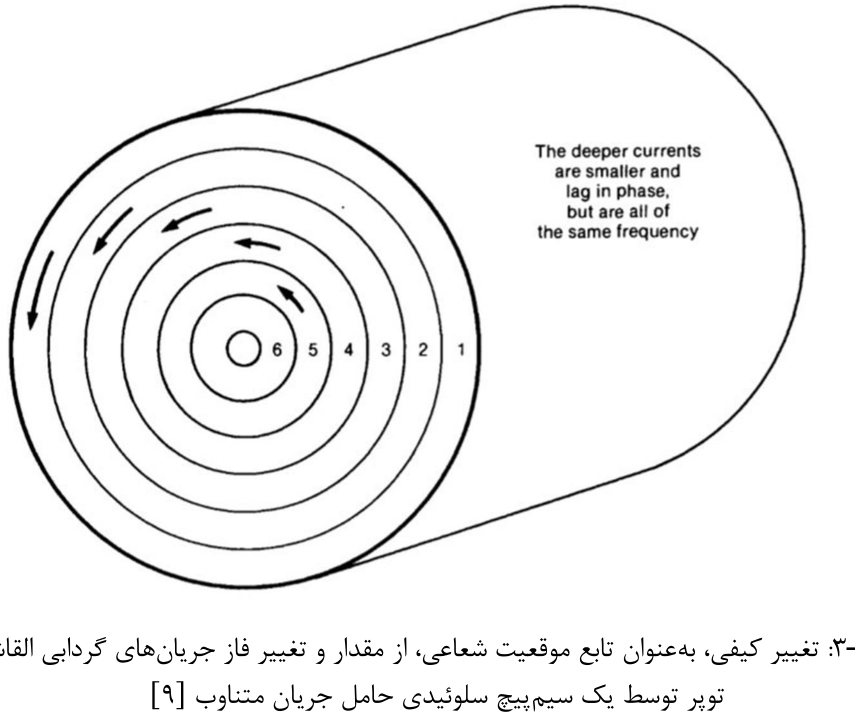
فرض کنید میله توپر از تعدادی استوانه متحدالمرکز تشکیل‌شده است (شکل۱-۳) میدان مغناطیسی القایی در سطوح بالائی میله قوی‌تر است. مقدار زیادتری شار از استوانه‌های بالاتر می‌گذرد و این شار است که جریان گردابی را تولید می‌کند. یک سؤال که اینک به ذهن می‌رسد این است که آیا شدت میدان مغناطیسی در استوانه‌های درونی نسبت به شدت میدان در استوانه‌های خارجی بزرگ‌تر است یا کوچک‌تر. این بستگی دارد به این‌که آیا جریان القایی در استوانه بیرونی مخالف میدان است یا نه. اگر این جریان میدان را تقویت کند یک ولتاژ بزرگ‌تر در استوانه القاء می‌شود که باعث یک جریان بزرگ‌تر می‌شود که مجدداً این جریان یک میدان بزرگ‌تر را باعث می‌شود و این میدان منجر به یک ولتاژ بزرگ‌تر خواهد شد و این روند همین‌طور ادامه پیدا می‌کند. چنین وضعیتی قطعاً اتفاق نخواهد افتاد، به همین علت جریانی که در دومین استوانه از سطح میله القاء می‌شود کوچک‌تر

از جریان القاء شده در استوانه بیرونی است و به همین ترتیب جریان القاء شده در استوانه سوم کوچک‌تر از جریان القاء شده در استوانه دوم است و به همین ترتیب ادامه پیدا می‌کند. درواقع جریان القایی از سطح میله تا عمق میله شروع به کم شدن می‌کند و این صرف‌نظر از جنس میله است که خواه مغناطیسی باشد خواه غیر مغناطیسی. این پدیده موسوم به اثر پوستی است و در مدل‌سازی عددی فصل‌های آینده به کمک روش المان محدود به‌درستی مدل شده است [۷].

مقدار جریان به‌صورت نمائی از سطح میله تا عمق میله کمی می‌شود. می‌توان عمق پوستی را که به فرکانس سیم‌پیچی و ضریب گذردهی نسبی و مقاومت قطعه کار بستگی دارد به‌صورت زیر محاسبه کرد :

رابطه (۱-۲)

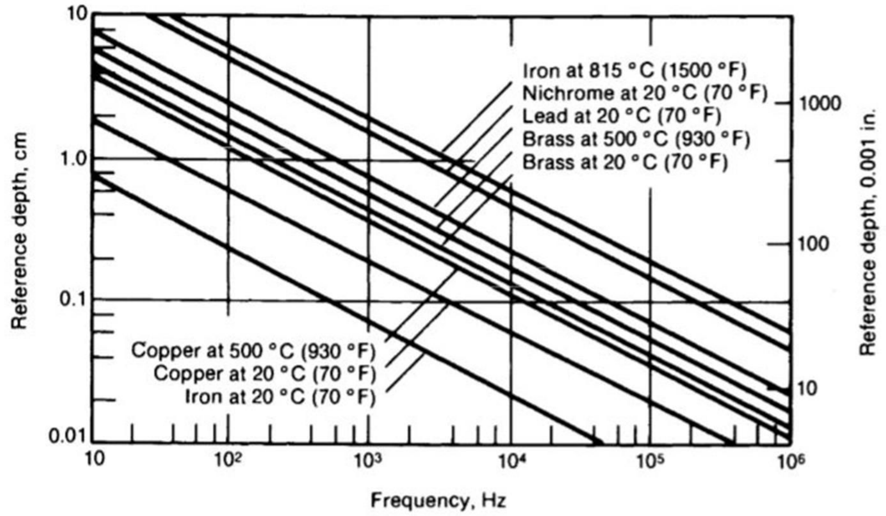
$$d = 5000\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}$$



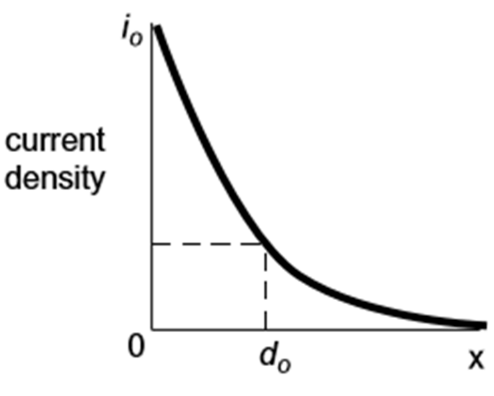
شکل ۱-۳: تغییر کیفی، به‌عنوان تابع موقعیت شعاعی، از مقدار و تغییر فاز جریان‌های گردابی القاشده در میله توپر توسط یک سیم‌پیچ سلوئیدی حامل جریان متناوب [۹]

در این رابطه d عمق نفوذ مغناطیسی، ρ مقاومت مخصوص قطعه کار است. μ قابلیت گذردهی مغناطیسی نسبی قطعه کار است و f فرکانس (Hz) میدان متغیر سیم‌پیچ است.

دوواقع عمق نفوذ مغناطیسی فاصله‌ای است از سطح ماده که شدت میدان القایی و مقدار جریان القایی به ۳۷ درصد مقدار آن در سطح ماده می‌رسد [۷]. شکل ۱-۴ عمق نفوذ مغناطیسی را برحسب فرکانس برای فلزات معمول نشان می‌دهد. عمق نفوذ مغناطیسی در یک فرکانس ثابت با تغییر دما تغییر می‌کند. زیرا مقاومت هادی با تغییر دما تغییر خواهد کرد.



شکل ۱-۴: نمودار عمق پوستی مواد مختلف برحسب فرکانس[۷]



شکل ۱-۵: کاهش چگالی جریان برحسب عمق پوستی[۱۰]

همان‌گونه که از شکل ۱-۵ نتیجه می‌شود می‌توان تغییرات چگالی جریان را نسبت به عمق، با یک رابطه نمائی به‌صورت زیر بیان کرد [۱۰]:

رابطه (۱-۳)

$$j_X = j_0\, e^{-Xd_0}$$

j_X چگالی جریان در فاصله X (فاصله از سطح)، j_0 تراکم جریان در عمق پوسته (X = 0)، d_0 ثابت معین با فرکانس (عمق نفوذ کنونی یا عمق پوسته)

به‌طورکلی ۸۷ درصد انرژی القاشده در عمق پوستی توزیع می‌شود و مدتی طول می‌کشد تا حرارت به مرکز قطعه نیز برسد. به‌منظور به دست آوردن یک راندمان الکتریکی خوب، قطر قطعه کار می‌بایستی چهار برابر عمق نفوذ باشد. همان‌گونه که ذکر شد عمق نفوذ متأثر از فرکانس جریان تغذیه و جنس ماده موردنظراست [۱۱].

آلیاژهای فولاد در حرارت زیر نقطه کوری، مغناطیسی و در دماهای بالای نقطه کوری غیر مغناطیسی‌اند. دمای نقطه کوری به‌طورمعمول در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۱-۱) عمق پوستی را برحسب فرکانس منبع تغذیه برای چند ماده نشان می‌دهد:

جدول ۱-۱: عمق پوستی مواد مختلف برحسب فرکانس [۱۱]

فرکانس (هرتز)	آلومینیوم	مس	فولاد کربن دار: بالاتر از نقطه کوری	فولاد کربن دار: پایین‌تر از نقطه کوری
	اینچ(mm)	اینچ(mm)	اینچ(mm)	اینچ(mm)
60	0.61(15)	0.55(14)	2.56(67)	0.65(17)
200	0.324(18)	0.304(8)	1.5(47)	0.35(9)

500	0.212(5)	0.192(5)	0.92(23)	0.22(6)
1000	0.149(4)	0.136(3)	0.65(17)	0.16(4)
3000	0.086(2)	0.078(2)	0.34(9)	0.09(2)
10000	0.047(1)	0.043(1)	0.20(5)	0.05(1)

جدول (۱-۲) که توسط شرکت "American Induction Heating Corp" ارائه‌شده است را نیز می‌توان برای مشخص کردن فرکانس برای ذوب قطعات با قطرهای مختلف مورداستفاده قرار داد:

جدول ۱-۲: تعیین فرکانس کار برحسب قطر قطعه ذوب شدنی [۱۱]

فرکانس پیشنهادی	قطر قطعه ذوب شدنی
۱۰kHz	۹mm تا ۳۸mm
۶kHz	۱۴ mm تا ۵۱mm
۳kHz	۱۹mm تا ۶۴mm
۱kHz	۴۴mm تا ۱۰۲mm
۵۰۰kHz	۷۶mm تا ۱۱۴mm
۲۰۰kHz	۹۵mm تا ۱۵۲mm
۶۰kHz	۱۲۷mm و بیشتر

۱-۷- مزایای گرمایش القائی نسبت به سایر روش‌های گرمادهی

کوره القایی در مقایسه با کوره‌های سوخت فسیلی دارای مزایای فراوانی ازجمله دقت بیشتر، تمیزی و تلفات گرمایی کمتر و ... است. همچنین در کوره‌هایی که در آن‌ها از روش‌های دیگر، غیر القاء استفاده می‌شود، اندازه کوره القایی بسیار بزرگ بوده و زمان راه‌اندازی و خاموش کردن آن‌ها طولانی است. کوره القایی ازنظر افزایش و تقلیل مصرف انرژی نسبت به سایر کوره‌ها دارای مزایای فراوانی می باشد. این کوره‌ها در ظرفیت‌های مختلف قادر به ذوب از چند کیلوگرم تا چندین تن است. در کوره القایی هیچ‌گونه فعل و انفعالی شیمیایی که باعث افزایش ناخالصی و تغییرات ترکیبی مذاب گردد، انجام نمی‌شود و علاوه بر آن به دلیل عدم استفاده از الکترود نسبت به کوره‌های قوس الکتریک امکان ورود ناخالصی‌های مواد از طریق مکانیکی نیز امکان‌پذیر نیست و ازنظر توزیع حرارت و کنترل ترکیب مطلوب می‌باشد و ازنظر مسائل الکتریکی محدودیتی برای افزایش درجه حرارت ندارند.

۱- اپراتوری بسیار ساده به علت وجود بخش کنترل کامل الکترونیکی،

۲- عدم آلودگی و اکسیداسیون بار به علت عدم وجود گاز و شعله اکسیدکننده،

۳- شروع به کار سریع وعدم نیاز به‌پیش گرم یا ذوب اولیه،

۴- سرعت‌بالای انجام عملیات در مقایسه با سایر کوره‌ها، (در همین رابطه شکل ۱-۶ بیانگر تفاوت زمان گرمادهی تا دمای $^{\circ}$۱۲۳۰ درجه سانتی گراد به یک میله تو‌پر، مابین کوره‌ای با سوخت فسیلی و یک کوره القایی می‌باشد.)

۵- راندمان بسیار بالاتر نسبت به کوره‌های با سوخت فسیلی،

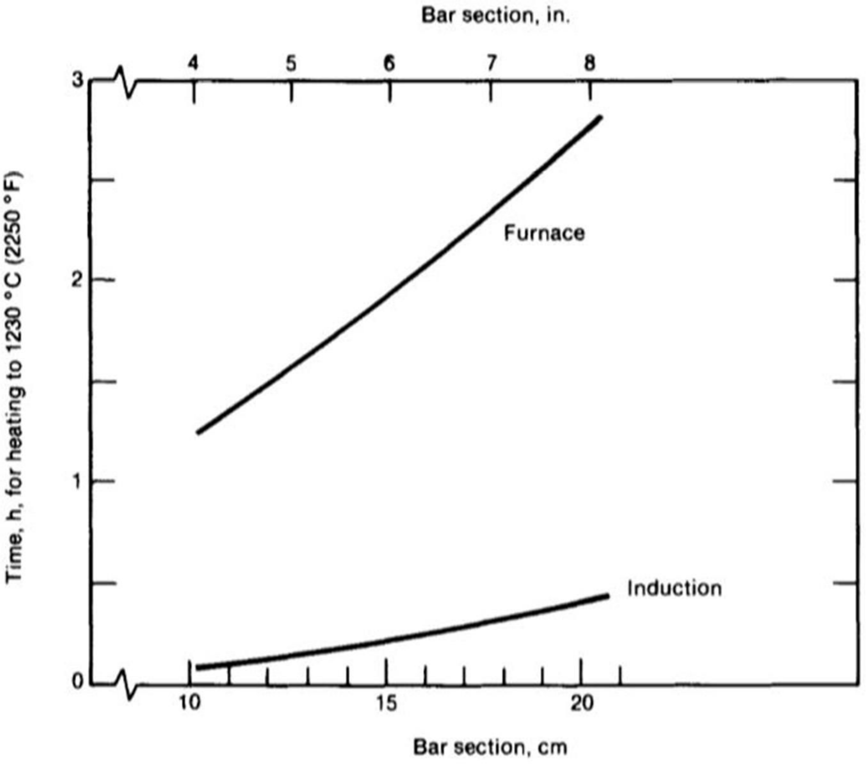
۶- قابلیت تهیه آلیاژهای یکنواخت به علت چرخش داخلی مذاب،

۷- قابلیت تهیه و نگهداری ذوب در ظرفیت‌های مختلف،

۸- امکان کنترل دقیق درجه حرارت،

۹- عدم تأثیر ابرآلودگی محیط‌زیست،

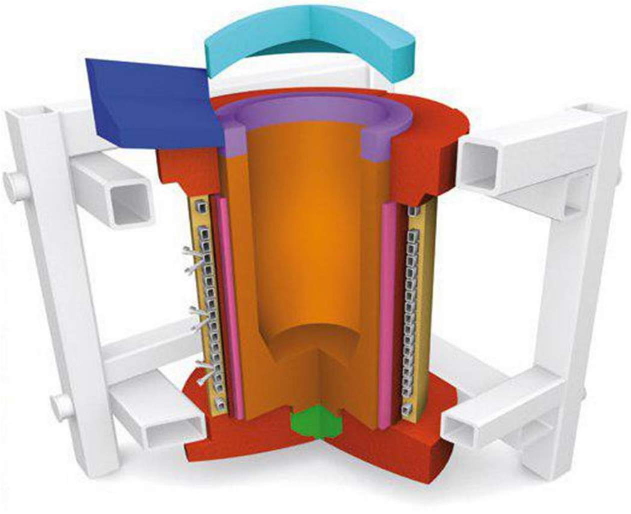
۱۰- امکان کنترل دقیق زمان حرارت دهی.



شکل ۱-۶: تفاوت زمان گرمادهی در یک کوره القایی و یک کوره با سوخت فسیلی [۷]

۱-۸- کوره‌های القایی بدون هسته

چنانچه در شکل ۱-۷ نشان داده‌شده است این نوع کوره‌ها شامل یک بوته دیرگداز است که یک کویل مسی باقابلیت هدایت زیاد به دور آن پیچیده شده است. این کویل با آب خنک می‌شود. حلقه‌های این سیم‌پیچ با فیبر شیشه و پنبه نسوز (آزبست) عایق شده‌اند. این لایه‌های عایق از اتصال کوتاه شدن جلوگیری می‌کند. در بعضی از کوره‌ها، سیم‌پیچ دو یا چند قسمتی است و هریک از قسمت‌ها می توانند به‌طور مجزا یا همگی باهم کار کنند. کوره مخصوصی هم طراحی‌شده است که با دو فرکانس کار می‌کند. فرکانس زیاد برای شروع کار و هنگام که کوره هنوز سرد است و فرکانس شبکه برای ذوب بعدازاینکه مذاب تشکیل شد.



شکل ۱-۷: برش مقطعی از کوره القایی

شکل ۱-۷ یک برش مقطعی از یک کوره القایی با تمام متعلقات آن را نشان می‌دهد. مواد ذوب شدنی یک آستر فشرده نسوز[1] قرار می‌گیرد. یک سیم‌پیچ با لوله‌های مسی توخالی که آب از داخل آن عبور می‌کند دور تا دور این آستر پیچیده شده که هنگامی‌که به منبع تغذیه متصل می‌شود تولید یک میدان مغناطیسی عمودی می‌کند. روی سطح بیرونی سیم‌پیچ، ورقه‌های لایه‌لایه[2] مغناطیسی قرارگرفته که مسیر برگشت شار مغناطیسی را مهیا می‌کند و باعث بهتر شدن ضریب قدرت[3] می‌شود. این ورقه‌ها همچنین باعث می‌شود که مسیر شار با فلزات دیگر دورتادور کوره بسته نشود و باعث گرم شدن آن‌ها و احیاناً ایجاد خطر نشود.

به‌طورکلی کوره‌های بدون هسته برای کار در فرکانس‌های مختلف زیر ساخته می‌شوند:

الف – فرکانس شبکه ۶۰-۵۰ هرتز

ب – فرکانس ۱۸۰ -۱۵۰ هرتز

ج – فرکانس ۵۰۰۰ -۵۰۰ هرتز

---

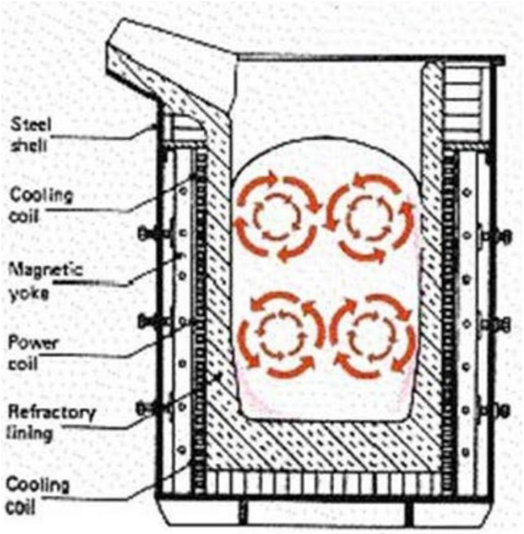
[1]- Refractory lining

[2]- Laminated

[3]- Power factor

د- فرکانس‌های بالاتر برای واحدهای کوچک و کاربردهای خاص

اصلی‌ترین کاربرد کوره‌های القایی در کارخانه‌های ذوب مواد است. این نوع کوره‌ها ما را قادر به ذوب انواع مواد در دماهای دلخواه و با هر نوع ترکیب می‌سازد. همچنین توسط این نوع کوره‌ها می‌توان آلیاژهایی با کمترین درصد آلودگی تهیه کرد.



شکل ۱-۸:نمایش حرکت ماده مذاب دربرشی از کوره القایی بدون هسته

هنگامی‌که مواد به‌صورت مذاب می‌باشند در اثر تلاقی جریان با شار مغناطیسی نیرویی به وجود می‌آید که باعث به هم خوردن[1] مذاب می‌شود. در کوره‌های بدون هسته کل مذاب به هم می‌خورد و این مسئله باعث می‌شود در آخر یک ترکیب کاملاً یکسان داشته باشیم و ترکیب آن را به‌راحتی می‌توان اندازه‌گیری کرد.

کوره‌های القایی بدون هسته قابلیت ذوب انواع آلیاژهای مختلف را دارند. در پایان هر ذوب می‌توان کوره را کاملاً تخلیه کرد و شروع به ذوب یک آلیاژ دیگر نمود.

در کوره‌های القایی بدون هسته با فرکانس شبکه، ذوب کردن قطعات کوچک در ابتدای کار مشکل

1- Stirring

است. در این نوع کوره‌ها به خاطر کم بودن نسبت حجم قطعه به عمق پوستی، راه‌اندازی کوره مشکل و گاهی غیرممکن خواهد بود. برای رفع این مشکل حداقل ۱۵ تا ۲۰ درصد کل ظرفیت کوره باید قبلاً ذوب گردیده باشد. بنابراین در ابتدای هر ذوب برای راه‌اندازی کوره می‌باید یک قطعه بزرگ بلوک مانند که از ذوب قبلی نگاه داشته می‌شود را درون کوره قرارداد و پس‌ازاینکه این بلوک ذوب شد و منابع حاصل شد می‌توان به‌آرامی مواد ذوب شدنی را اضافه کرد. در این نوع کوره‌های ذوب فرکانس شبکه، مواد ذوب شدنی معمولاً قراضه‌های صنعتی است. کوره‌های فرکانس متوسط برای راه‌اندازی احتیاجی به بلوک ندارند. همچنین در این نوع کوره‌ها تلاطم مذاب کمتر است که این مسئله باعث می‌شود این نوع کوره‌ها برای تولید فولادهای با درصد خلوص بالا بکار روند.

هنگامی‌که تفال‌های و ناخالصی مواد مذاب شدنی روی مذاب می‌آیند. در اثر به هم خوردن شدید مذاب، به داخل مذاب نمی‌روند و می‌توان آن‌ها را جمع کرد و این باعث می‌شود ترکیب خالص‌تری به دست آید. فرکانس بالا معمولاً برای کوره‌های القایی کوچک انتخاب می‌شود که برای ذوب مقادیر بسیارکم آزمایشگاهی از مواد گران‌بها مانند طلا، نقره و پلاتین استفاده می‌شود. این نوع کوره‌ها معمولاً به صورتی ساخته می‌شوند که سیم‌پیچ و بوته (پاتیل) از هم جدا می‌باشند و هنگام بارگیری مواد (ریختن مواد به داخل قالب) سرعت کار بالا می‌رود زیرا دیگر همانند کوره‌های قبلی احتیاجی به یک ظرف واسطه برای انتقال مذاب نمی‌باشد و معمولاً به دو صورت پاتیل متحرک و سیم‌پیچ متحرک ساخته می‌شوند (شکل۱-۹) . عیب این نوع کوره‌ها تلفات زیاد، به علت فاصله هوائی که به وجود می‌آید است [۷].

۱-۹- سیستم خنک‌کنندگی

برای محافظت سیم‌پیچ و عایق در برابر حرارت، باید آن‌ها را با استفاده از حجم قابل توجهی آب خنک کرد. این مقدار آب را می‌توان از منبع لوله‌کشی شهر یا آب محلی، که تأمین نمود. در بسیاری از موارد، آب را تصفیه می‌کنند تا از رسوب در لوله‌ها و گرفتگی آن‌ها جلوگیری گردد. وجود رسوب و

گرفتگی باعث می‌شود که سرعت حرکت آب در لوله‌ها کم شود و عمل انتقال حرارتی به‌خوبی صورت نگیرد و سیم‌پیچ آسیب ببیند.

۱-۱۰- سیم‌پیچ کوره‌های القایی

سیم‌پیچ کوره از لوله مسی با هدایت الکتریکی بالا ساخته می‌شوند که توسط جریان آب داخل آن‌ها خنک می‌شوند. تلفات درسیم پیچ فوق‌العاده بالا است و در حدود ۳۰ درصد از توان ورودی به سیم‌پیچ به گرما تبدیل می‌شود و توسط آب‌خنک می‌شود . در بعضی از کوره‌ها خنک‌سازی اضافی در بالا و پائین کوره انجام می‌شود بدین‌صورت که علاوه بر آب عبوری از داخل سیم‌پیچ لوله‌های آب اضافی کنار آن طراحی می‌شود.

کیفیت طراحی و عملکرد یک سیستم الکترومغناطیسی با پارامتری به نام ضریب کیفیت(Q) به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۱۲]:

رابطه (۱-۴)

$$Q = \frac{\omega Leq}{\operatorname{Re} q}$$

که در آن:

ω فرکانس زاویه‌ای جریان سیم‌پیچ

Leq اندوکتانس معادل سیم‌پیچ

Req مقاومت معادل سیم‌پیچ

است. درواقع در یک سیستم الکترومغناطیسی خاص مانند کوره القایی، بالا بودن مقدار این ضریب نشان‌دهنده کیفیت بهتر عملکرد کوره القایی است.

۱-۱۱- انتخاب مشخصات اصلی کوره‌های القایی ذوب

در این قسمت به بحث در مورد نحوه انتخاب مشخصات اصلی کوره‌های القایی ذوب می‌پردازیم. در

بین مشخصات کوره‌های القایی انتخاب فرکانس مهم‌ترین گزینه برای انتخاب نوع کوره القایی است زیرا خود فرکانس عامل تعیین‌کننده‌ای در انتخاب سایر پارامترهای کوره است. در ضمن انتخاب خود فرکانس به عوامل متعددی مربوط است که باید با دقت موردتوجه قرار گیرد. انتخاب مناسب و بهینه فرکانس می‌تواند از بروز مشکلات بعدی جلوگیری کند.

مواردی که در ابتدای طراحی بایستی موردنظر و توجه قرار گیرند شامل هندسه سیم‌پیچی، نوع ماده نسوز و جنس و شکل ظاهری هدایت‌کننده شار می‌باشند. هندسه سیم‌پیچی بر اساس ظرفیت کوره و فرکانس انتخابی تعیین می‌شود و قطر دهانه کوره نیز بر همین اساس طراحی می‌شود.

در ذوب القایی انتخاب فرکانس مناسب مهم‌ترین نکته در امر طراحی کوره برای یک منظور خاص است. در نگاه اول شاید به نظر برسد که استفاده از فرکانس شبکه با توجه به همیشه در دسترس بودن آن بسیار مقرون‌به‌صرفه خواهد بود. بااین‌وجود بررسی دقیق‌تر نشان می‌دهد که در برخی موارد این انتخاب نمی‌تواند انتخاب بهینه باشد.

به‌طورکلی پارامترهایی که در انتخاب فرکانس کوره‌ها مؤثر می‌باشند عبارت‌اند از :

الف) هزینه

قیمت تجهیزات متناسب با افزایش فرکانس زیاد می‌شود که البته اخیراً با پیدایش مبدل‌های فرکانسی با راندمان بالا تفاوت قیمت بین تجهیزات فرکانس شبکه و فرکانس متوسط چندان چشمگیر نیست .

ب) تعداد دور سیم‌پیچ:

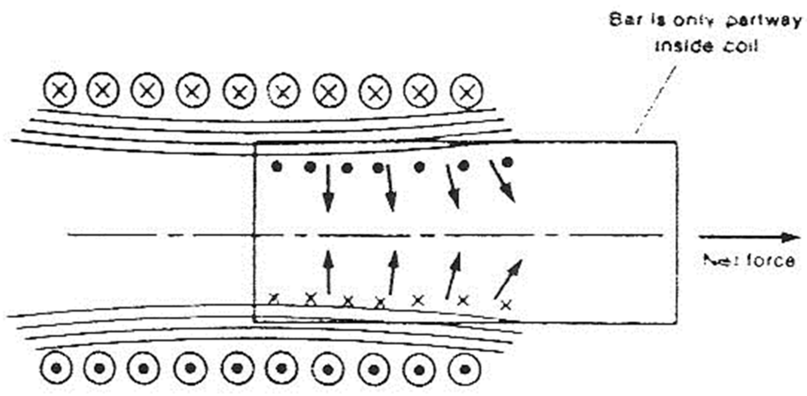
با توجه به رابطه (۱-۵)

$$E = 4.44 f.\phi.N$$

ملاحظه می‌شود که تعداد دور سیم‌پیچ با فرکانس رابطه معکوس دارد و این بدان معناست که در فرکانس پائین از تعداد دور بیشتری باید استفاده شود.

ج) ایجاد نیروی مکانیکی و مسئله تلاطم مذاب

یکی از پارامترهای دیگر برای دقت در انتخاب فرکانس، نیروی مکانیکی در قطعه کار است. اگر یک ماده غیر مغناطیسی استوانه‌ای را درون یک سیم‌پیچ قرار دهیم، مشاهده می‌شود که اگر این ماده در مرکز سیم‌پیچ قرار گیرد نیروهای وارد بر بار به‌صورت داخلی می‌باشند و به‌صورت عمود بر سطح جانبی، ولی نیروهای وارد بر لبه‌ها به‌صورت کاملاً عمود بر سطح نمی‌باشند اما متقارن هستند بنابراین نیروی خالصی دربار نخواهیم داشت. حال اگر مانند شکل ۱-۹بار در مرکز قرار نگیرد نیروها کاملاً به سمت بیرون می‌باشند و درنتیجه این نیرو قطعه را بیرون پرتاب می‌کند.



شکل ۱-۹: نیروهای واردشده در قطعه کار در حالتی که در مرکز قرار نگرفته است

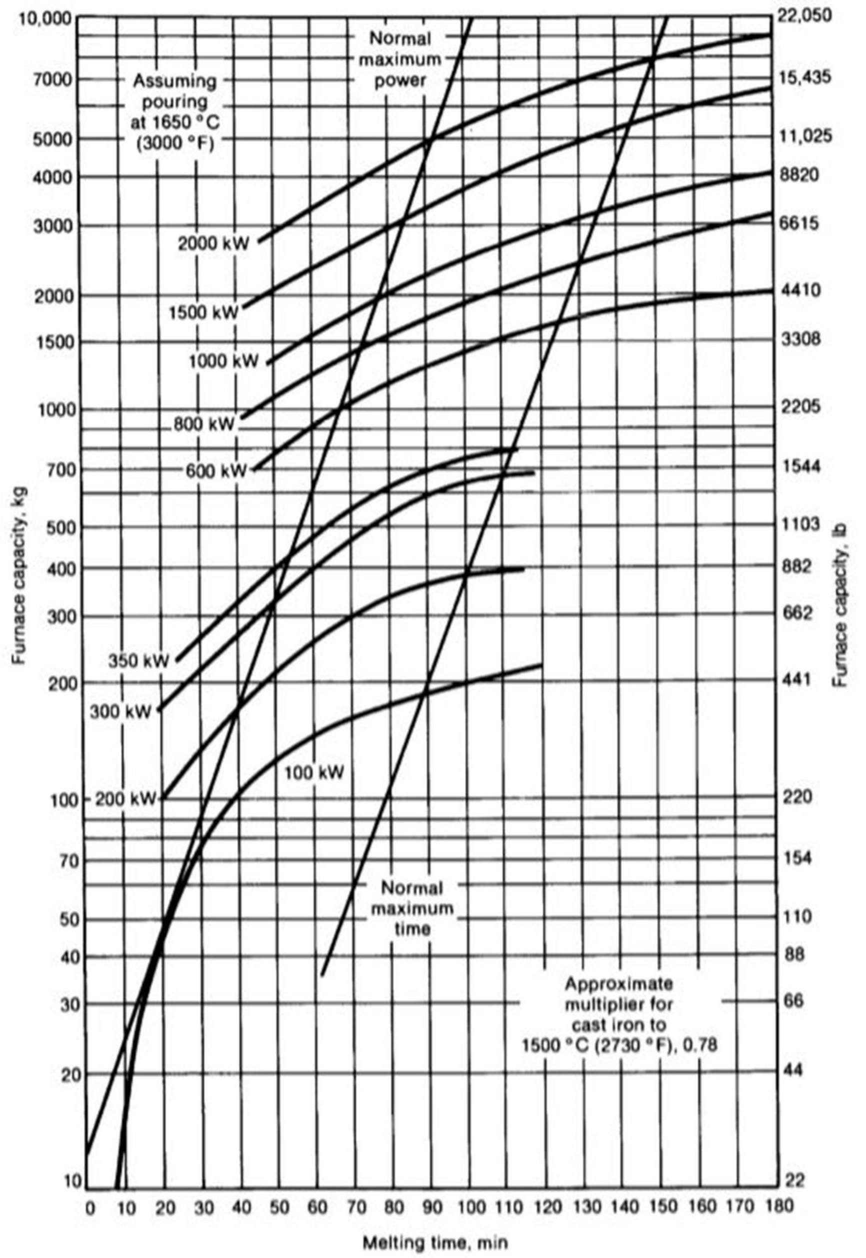
نیروی خالص در یک‌بار مغناطیسی عکس آنچه دربارهای غیر مغناطیسی است می‌باشد، در اینجا نیروی جاذبه اضافی بین بار و سیم‌پیچ وجود دارد. هنگامی‌که این نیرو بزرگ‌تر از نیروی دافعه شود بار به داخل سیم‌پیچ جذب می‌شود.

۱-۱۲- انتخاب توان موردنیاز

عاملی که در تعیین توان موردنیاز کوره القایی ذوب مهم‌ترین نقش را دارد نرخ تولید کوره است. برای تعیین توان کوره می‌توان از شکل (۱-۱۰) استفاده کرد. این شکل رابطه بین ظرفیت کوره‌های مختلف، زمان ذوب وتوان موردنیاز برای کوره را به‌منظور ذوب فولاد و یا چدن را نشان می‌دهد و همان‌طور که مشاهده می‌شود برای اکثر قسمت‌ها دو برابر کردن خروجی مستلزم دو برابر کردن توان

کوره است .

به‌طور طبیعی ظرفیت کوره وابسته به نوع و میزان تولید است ولی عامل فرکانس نیز بر روی ظرفیت کوره تأثیر می‌گذارد بدین ترتیب که در فرکانس‌های پایین که عمل به هم خوردن شدید است همان‌طور که گفته شد نسبت توان کوره به ظرفیت کوره باید پایین باشد.



شکل ۱-۱۰: رابطه بین ظرفیت کوره و زمان ذوب وتوان موردنیاز برای ذوب فولاد و استیل در کوره القایی بدون هسته[۷]

۱-۱۳- مروری بر کارهای گذشته

گرمایش القایی یک فرایند پیچیده شامل الکترومغناطیس، پدیده‌های حرارتی و متالوژی است. در این فرایند یک جریان الکتریکی متناوب میدان الکترومغناطیسی را القا می‌کند که منجر به جریان-های گردابی در قطعه‌کار می‌شود. جریان‌های گردابی القا شده انرژی را به شکل گرما آزاد می‌کنند که سپس در قطعه‌کار توزیع می‌گردد. شبیه‌سازی عددی اولیه توزیع گرما برای برنامه‌ریزی سیستم گرمایش القایی بسیار مطلوب است. انتخاب شکل و موقعیت مناسب برای کویل القایی و تنظیم خواص جریان الکتریکی، برای دستیابی به مشخصات درجه حرارت مورد نیاز در قطعه کار لازم و ضروری است. در طول فرایند گرمایش القایی دمای ماده گرم شونده به میزان زیادی تغییر می‌کند که معرفی ویژگی‌های غیرخطی وابسته به دما را مخصوصاً برای مواد فرو مغناطیسی ضروری می‌کند [۱۳]. درنتیجه، توزیع الکترومغناطیسی و دما در اکثر موارد غیرممکن است به‌صورت تحلیلی به دست آورد. بنابراین روش‌های عددی مانند روش المان محدود به‌طور گسترده برای حل مسائل گرمایش القایی مورداستفاده قرارگرفته است [۱۴-۱۶]. بررسی تجربی مدل‌های گرمایش القایی معمولاً با اندازه‌گیری دما قطعه‌کار درگذر زمان به‌وسیله ترموکوپل‌ها [۱۷-۱۹] یا دوربین‌های ترموگرافی [۲۰-۲۱] انجام می‌شود.

مزایای اصلی اندازه‌گیری دما با ترموکوپل‌ها عبارت‌اند از: دقت بالا اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای، امکان اندازه‌گیری دمای داخلی با حسگرهای داخل قطعه‌کار و کم‌هزینه. اگرچه چندین مشکل در ارتباط با استفاده از ترموکوپل برای اندازه‌گیری دما در قطعات با حجم بالا وجود دارد. تعداد زیاد ترموکوپل قرارگرفته بر روی قطعه‌کار یا درون آن می‌تواند بر فرایند گرمایش القایی تأثیر بگذارد. علاوه بر این، پیاده‌سازی اندازه‌گیری دما سطح با ترموکوپل می‌تواند در یک خط تولید سخت باشد. یکی دیگر از محدودیت‌های مهم، پاسخ زمان گیرنده ترموکوپل است. زیرا گرمایش القایی یک فرایند نسبتاً سریع است. برای جلوگیری از این محدودیت‌ها، روش اندازه‌گیری غیرتماسی بر اساس ترموگرافی توسط [۲۲-۲۳] مورداستفاده قرارگرفته است. این داده‌ها همچنین می‌توانند برای تشخیص نقص‌های مواد

قطعه‌کار استفاده شوند یا برای مشاهده توزیع دما و تغییرات پویا در فرایند استفاده شوند، ازآنجاکه دوربین‌های ترموگرافی قادر به ردیابی تغییرات دما بسیار سریع در دامنه میکروثانیه می‌باشند. ماتیج و همکاران گرمایش القایی را در قطعه کار استیل به‌صورت عددی و تجربی بررسی کرده‌اند. مقایسه خواص وابسته به دما و مستقل از دما به‌منظور تعیین اهمیت و ارتباط خواص وابسته به دما در مدل عددی صورت گرفته است. الگوریتم پردازش اطلاعات ترموگرافی در فرایند تجربی توسعه داده‌شده، موردتحقیق و بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی موردبحث و ارزیابی قراردادند [۲۴].

ماتوس اوسیلکا و همکاران [۲۵] به شبیه‌سازی مسئله انتقال حرارت القایی پرداختند و از دو فیزیک انتقال حرارت و الکترومغناطیس استفاده کرده‌اند. الکترومغناطیس و انتقال حرارت به خاطر خواص فیزیکی ماده گرم شده مرتبط بوده و خواص ماده می‌تواند توابع غیرخطی از شدت میدان مغناطیسی و دما باشد. در مدل ماتوس اوسیلکا و همکاران خواص ماده گرم شونده مورد ملاحظه قرارگرفته که شامل ضریب نفوذپذیری، مقاومت الکتریکی، ضریب هدایت حرارتی، ضریب گرمایی است. همچنین مدل شبیه‌سازی‌شده با در نظر گرفتن خواص غیرخطی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی‌شده با خطای نسبی قابل قبولی تائید شده است. مؤلفین به این نتیجه رسیدند که میزان حرارت تولیدشده در قطعه‌کار به جریان الکتریسیته عبوری از کویل وابسته بوده و عمق حرارت نیز به فرکانس آن وابسته است [۲۶-۲۷].

در راستای مدل‌سازی کوره‌های القایی سمیاتین و همکارانش [۷] و همچنین رودنو و همکاران [۲۸]میدان مغناطیسی تولیدشده توسط سیم‌پیچ را عامل ایجاد جریان در کوره دانسته و پدیده انتقال حرارت در حضور میدان الکترومغناطیس در کوره القایی را کاملاً مرتبط با ماهیت و خواص فیزیکی ماده یافتند.

انتخاب شکل و موقعیت سیم‌پیچ القایی و تنظیم خواص جریان الکتریکی برای رسیدن به یک

درجه حرارت مشخص از اهمیت اصلی طراحی کوره القایی است. هنگامی‌که با مواد فرو مغناطیس کار شود، در طول فرآیند گرمایش القایی، تغییر درجه حرارت وابسته به خواص مواد خواهد بود. برای استخراج عددی نتایج از روش‌هایی مانند روش المان محدود استفاده‌شده است [۲۹-۳۱].

شبیه‌سازی عددی ابزاری مفید برای طراحی و بررسی سیستم‌های حرارت القایی است. سیستم اصلی حرارت القایی شامل منبع جریان متناوب AC و سیم‌پیچ القایی است. کوپل کردن قطعه کار و کویل، شکل قطعه کار و کویل القاگر، انتقال حرارت در ماده موردنظر و سایر مواردی می‌باشند [۳۲].

۱-۱۴- ضرورت مسئله

امروزه کوره‌های القایی یکی از اساسی‌ترین نیازهای صنعت است و درواقع می‌توان گفت بسیاری از صنایع به‌نوعی به این نوع کوره‌ها وابستگی دارند.گرمایش القایی به خاطر دقت و کارایی و گرمایش بدون تماس، ارزشمند شده است. بنابراین برای طراحی مناسب کوره القایی نیاز به بررسی پارامتری شکل هندسی آن داریم. هدف از انجام این پروژه این است که اثرات تعداد گام، ارتفاع بوته، قطر کویل، نرخ جریان سیال خنک‌کننده و اثرات شدت جریان و فرکانس بررسی شود. مناسب‌ترین محل برای قرارگیری سیم‌پیچ‌ها در اطراف بوته تعیین شود. بهینه‌ترین شکل کوره برای یک جرم مشخص از ماده مذاب به دست آورده شود. زمان رسیدن به دمای موردنظر ذوب برای استیل و آلومینیوم در مدل بهینه به دست آورده شود.

اهداف و نوآوری

۱) مدل‌سازی عددی و مطالعه پارامتری گرمایش القایی با کوپله شدن دقیق میدان مغناطیسی و معادلات انتقال حرارت و لحاظ نمودن خواص مغناطیسی و عمق نفوذ مغناطیسی مواد

۲) ارائه مقادیری مناسب جهت طراحی کوره ذوب القایی در خلأ

۳) بررسی اثرات تعداد گام، ارتفاع و قطر بوته، نرخ جریان سیال خنک‌کننده و اثرات شدت

جریان و فرکانس

۴) مناسب‌ترین محل برای قرارگیری سیم‌پیچ‌ها در اطراف بوته تعیین شود.

۵) زمان رسیدن به دمای موردنظر ذوب برای استیل و آلومینیوم در مدل بهینه به دست آورده شود.

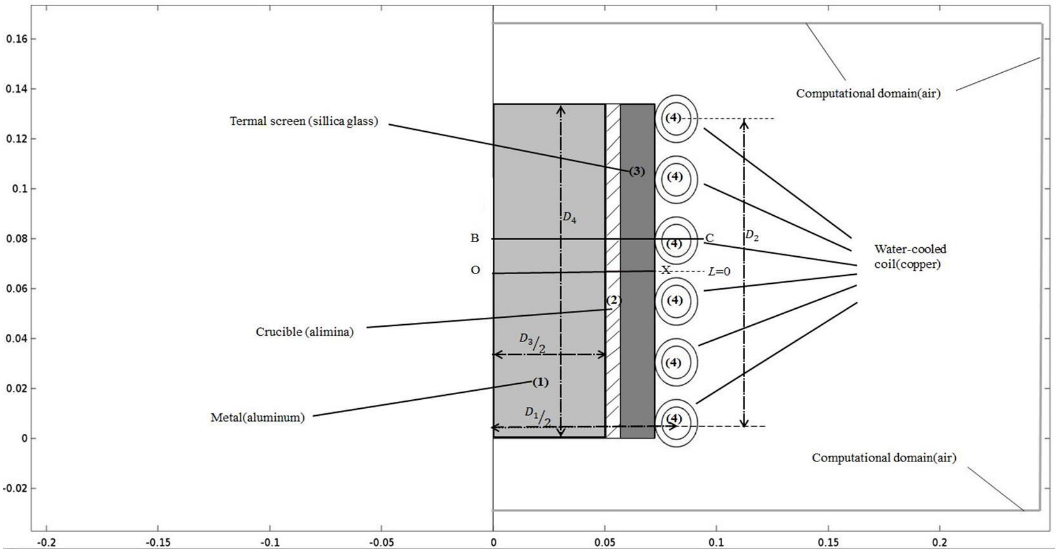
فصل دوم: معادلات حاکم و روش حل عددی

۲-۱- فیزیک مسئله

اجزای کلاسیک یک کوره القایی همان‌طور که در شکل ۲-۱ آمده است متشکل از بوته (۲) که شامل شارژ (فلز) است (۱)، یک سپر حرارتی که انتقال حرارت را کنترل می‌کند (۳) و یک سیم‌پیچ (۴) که در آن انرژی الکتریکی اعمال می‌شود. در این کوره‌ها از حرارت ایجادشده توسط تلفات فوکو و هیسترزیس برای ذوب فلزات یا هرگونه عملیات حرارتی استفاده می‌شود.

یکی از چالش‌ها در گرمایش القایی این است که جریان بالا در کویل القاگر نیازمند به خنک‌کننده فعال است. برای حل این مشکل می‌توان از سیم‌پیچ رسانای توخالی و گردش آب سرد داخلی آن بهره برد.

ابعاد و پارامترهای استفاده‌شده در الگو موردتحقیق در شکل ۲-۱ نام‌گذاری شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید با در نظر گرفتن تعدادی حلقه کویل و قراردادن مرکز سیم‌پیچ بر روی مرکز بوته، انحراف مراکز نداریم. خط OX گذرنده از مرکز بوته و ماده گرم‌شونده است. خط BC به صورتی در نظر گرفته‌شده که از مرکز یک سیم‌پیچ عبور کند و همین‌طور از عایق سیلکاگلس و بوته آلومینا و ماده گرم شونده بگذرد.D_1 قطر اصلی کویل،D_2 ارتفاع کویل،D_3قطر بوته،D_4 ارتفاع بوته است. حال با بررسی تغییر نسب پارامترها، به تأثیر شکل هندسی بر مدت زمان رسیدن به ذوب خواهیم پرداخت.



شکل۲-۱: هندسه کوره القایی

۲-۲- طراحی کوره ذوب القایی برای ذوب ۳ کیلوگرم آلومینیوم در زمان ۲۰ دقیقه

هدف طراحی یک کوره القایی برای ذوب۳ کیلوگرم در زمان ۲۰دقیقه است. برای محاسبه توان ورودی کوره القایی، ابتدا باید میزان حرارت موردنیاز برای ذوب ۳ کیلوگرم آلومینیوم محاسبه شود. گرمای ویژه آلومینیوم برابر $C_p = 1100J/kg.K$ است. اگر دمای اولیه T_0=293K و دمای آستانه ذوب آلومینیوم $T_c = 933.47K$ در نظر گرفته شود. کل انرژی حرارتی لازم برای ذوب ۳کیلوگرم آلومینیوم به‌صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$Q=m\,C_p\Delta T=3\times1100\times(933.47-293)=2113551\text{ J} \quad (۲-۱)$$

اگر زمان ذوب ۲۰ دقیقه فرض شود، توان حرارتی متوسط برای ذوب به‌صورت زیر است:

$$P_{out} = \frac{Q}{t} = \frac{2113551}{20 \times 60} = 1761.2925W = 1.7612925\text{kW} \quad (۲-۲)$$

با فرض آنکه راندمان کلی کوره ۶۰٪ باشد، توان ورودی کوره به‌صورت زیر است:

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} = 2.935\text{kW}$$ (۲-۳)

با توجه به توان ورودی محاسبه‌شده درایو موجود در بازار که با این توان متناسب است خریداری می‌شود. حال با مشخص شدن توان موردنیاز مقاومت و جریان القاشده (i)در آلومینیوم مجهول ما می-باشد:

$$P=Ri^2$$ (۲-۴)

فرکانس با توجه به منبع تغذیه انتخاب‌شده،مشخص می‌شود که در اینجا f=20kHz است. با داشتن مقدار فرکانس، مقدار عمق نفوذ در ماده گرم شونده قابل‌محاسبه است. طبق رابطه زیر عمق نفوذ به دست میاید:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} = \frac{1}{\sqrt{\pi \times 20000 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 3.5 \times 10^{7}}} = 0.6015mm$$ (۲-۵)

ابعاد مناسب برای بوته که شامل ۳ کیلوگرم آلومینیوم است با فرض نسبت$\frac{D_4}{D_3} = 1.3$ برای کوره-های موجود در صنعت محاسبه‌شده است:

$$\frac{D_4}{D_3} = 1.3$$ (۲-۶)

$$\varrho_{Al} = 2698.9 \text{ kg/m}^3$$

$$V = \frac{m}{\varrho_{Al}} = 0.00111m^3$$ (۲-۷)

$$V = \pi \left(\frac{D_3}{2}\right)^2 . D_4 = 0.00111$$

$$D_3 = 101mm, D_4 = 134mm$$

مقاومت معادل آلومینیوم از رابطه زیر قابل‌محاسبه است:

$$R = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{\pi D_3}{D_4 \delta} = \frac{\pi D_3}{\sigma D_4 \delta} = \frac{\pi \times 0.101}{3.5 \times 10^7 \times 0.134 \times 0.6015 \times 10^{-3}} = \frac{0.3173}{0.2821 \times 10^4} = 1.12477 \times 10^{-4} \Omega \quad (۸-۲)$$

$$i = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{2.2016 \times 10^3}{1.12477 \times 10^{-4}}} = 5108.23A \quad (۹-۲)$$

لوله مسی با استحکام کافی در بازار موجود است و قطر خارجی آن ۱۹ میلی‌متر است. با احتساب فاصله۵ میلی‌متر بین حلقه‌های کویل، فاصله مراکز کویل‌ها از هم برابر با ۲۵ میلی‌متر می‌شود. بنابراین در ارتفاع ۱۳۴ میلی‌متر تعداد حلقه برابر است با:

$$N = \frac{134}{24} = 5.58 \quad (۱۰-۲)$$

که اگر به سمت بالاگرد کنیم ۶ دور مناسب است. با این محاسبات ارتفاع کویل کمی از بوته بیشتر شده و برابر با ۱۴۱ میلی‌متر است. با محاسبه تعداد حلقه، مقدار جریان عبوری از کویل قابل‌محاسبه است:

$$I = \frac{5108.23}{6} \times \sqrt{2} = 1204A \quad (۱۱-۲)$$

۲-۳- متغیرهای بی‌بعد پراهمیت در طراحی کوره القایی

برای مطالعه پارامتری مسئله و با توجه به اهمیت ابعاد هندسی از پارامترهای بی‌بعد زیر استفاده خواهد شد.

$$\frac{D_1}{D_3}, \frac{D_2}{D_4}, \frac{L}{D_4}$$

حجم ماده گرم شونده نیز با Vنشان داده‌شده و برابر است با:

$$V = \frac{\pi {D_3}^2}{4} \times D_4$$

پارامتر دیگر جهت مطالعه، جنس ماده است که با S نمایش می‌دهیم. در این پروژه یک ماده غیر مغناطیسی مثل آلومینیوم و یک ماده فرو مغناطیسی همچون استیل را بررسی نموده‌ایم.

جدول ۲-۱: جدول خواص ماده در دمای مرجع

ماده	ضریب دمایی مقاومت ویژه (α)در دمای ۲۹۳مرجع کلوین	مقاومت ویژه الکتریکی مرجع (ρ)در دمای مرجع۲۹۳ کلوین
آلومینیوم	$0.0042(\frac{1}{K})$	$2.65 \times 10^{-8}(\Omega.m)$
استیل	$0.005(\frac{1}{K})$	$9.71 \times 10^{-8}(\Omega.m)$
مس	$0.0039(\frac{1}{K})$	$1.72 \times 10^{-8}(\Omega.m)$

۲-۴- معادلات ریاضی روش اجزای محدود

از روش اجزای محدود برای محاسبه میدان مغناطیسی و توزیع حرارت استفاده‌شده است. در این روش کل فضای مسئله شامل سیم‌پیچ، عایق‌ها، بوته، هوا و قطعه کار به المان‌های کوچک تقسیم می‌شوند و معادلات ماکسول در هر سلول حل خواهد شد. سپس حرارت ناشی از تغییرات میدان مغناطیسی تعیین می‌شود. معادلات ماکسول برای محاسبه میدان مغناطیسی شامل چهار معادله اساسی به‌صورت زیر است [۳۳]:

$$\nabla.\vec{D} = \rho_f \quad (۲-۱۲)$$

$$\nabla.\vec{B} = 0 \quad (۲-۱۳)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$ (۲-۱۴)

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$ (۲-۱۵)

که در آن $\vec{D}$ بردار جابجایی الکتریکی برحسب کولمب بر مترمربع، ρ_fچگالی بار الکتریکی برحسب کولمب بر مترمکعب، $\vec{B}$ بردار چگالی شار مغناطیسی برحسب تسلا، $\vec{E}$ بردار میدان الکتریکی برحسب ولت بر متر، $\vec{H}$ بردار شدت میدان مغناطیسی برحسب آمپر بر متر و $\vec{J}$ بردار چگالی جریان الکتریکی برحسب آمپر بر مترمربع است. بدیهی است با توجه به ماهیت مسئله کوره القایی از بردار پلاریزاسیون الکتریکی ($\vec{P}$) و بردار مغناطیس کنندگی ($\vec{M}$) صرف‌نظر شده است.

با تعریف میزان جریان کویل در مدل‌سازی مسئله، بردار چگالی جریان $\vec{J}$ با توجه به سطح مقطع هر المان قابل‌محاسبه است.

$$i = \int \vec{J}.\overrightarrow{dA}$$ (۲-۱۶)

که در آن i میزان جریان کویل و $\overrightarrow{dA}$ بردار المان سطح برای هر مش است. با مشخص شدن بردار چگالی جریان، $\vec{H}$ بردار شدت میدان مغناطیسی با استفاده از رابطه (۲-۱۵) محاسبه می‌شود.$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} =$ (0 مطابق رابطه (۲-۱۲) ماکسول بردار جابجایی الکتریکی فقط به چگالی بار مغناطیسی وابسته است.)

همچنین با داشتن رابطه زیر در میدان مغناطیسی، $\vec{B}$ بردار چگالی شار مغناطیسی قابل‌محاسبه خواهد بود [۳۴].

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$ (۲-۱۷)

μ_0 نفوذپذیری خلأ، μ_r نفوذپذیری نسبی است. حال با دانستن $\vec{B}$ از طریق رابطه (۲-۱۴) ماکسول مقدار $\vec{E}$ بردار میدان الکتریکی محاسبه می‌شود. سپس مقدار جابجایی الکتریکی $\vec{D}$ از طریق رابطه زیر و دانستن ε_0 ضریب گذردهی الکتریکی خلأ، ε_r گذردهی الکتریکی نسبی، قابل‌محاسبه است [۳۵].

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \tag{۱۸-۲}$$

حرارت تولیدشده توسط القا از طریق هدایت حرارتی انتقال پیدا می‌کند. بنابراین شار انتقال حرارت هدایتی در المان‌های سیستم با در نظر گرفتن مکانیزم هدایت و معادله (۲-۱۹) خواهد بود:

$$q = -k\,\nabla T \tag{۱۹-۲}$$

kضریب هدایت حرارتی، T دما، q انتقال حرارت هدایتی است. سپس برای حل معادله انرژی در گره‌ها با در نظر گرفتن کوپل هم‌زمان انتقال حرارت و الکترومغناطیس باید ترم اتلاف الکترومغناطیسی Q_e، را به‌صورت منبع گرما در بخش انتقال حرارت مدل شود.

$$\varrho C_P \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla.\mathrm{q} = \mathrm{Q}_e \tag{۲۰-۲}$$

Q_e اتلاف حرارتی شامل تلفات مقاومتی Q_{rh} و تلفات مغناطیسی Q_{ml} است. که هرکدام جداگانه در معادلات (۲-۱۱) و (۲-۱۲) تعریف‌شده است.

$$\mathrm{Q}_e = \mathrm{Q}_{\mathrm{rh}} + \mathrm{Q}_{\mathrm{ml}} \tag{۲۱-۲}$$

منبع حرارت Q_{rh} توسط جریان‌های گردابی و Q_{ml} توسط تلفات هیسترزیس ایجاد می‌شود:

$$Q_{\mathrm{rh}} = \frac{1}{2} Re(J.E^*) \tag{۲۲-۲}$$

$$Q_{\mathrm{ml}} = \frac{1}{2} Re(\, i\omega . H^{*}) \quad (۲۳-۲)$$

در معادلات قبل،ϱ چگالی، C_P ظرفیت گرمایی، T دما و Q_eمنبع حرارت است. J بردار چگالی جریان الکتریکی، E^* مزدوج بردار پتانسیل الکتریکی،H^* مزدوج شدت میدان مغناطیسی وω فرکانس زاویه‌ای است.

۲-۵- پارامترهای ورودی مسئله

برای پیدا کردن تلفات حرارتی، توزیع دما در ماده گرم شونده و چگالی شار مغناطیسی نیاز به مدل‌سازی عددی داریم. مدل عددی با کوپل الکترومغناطیس و پدیده انتقال حرارت و با استفاده از روش عددی المان محدود موردبررسی قرارگرفته است. به دلیل تقارن، از هندسه دوبعدی متقارن محوری استفاده‌شده است. پارامترهای ورودی در جدول۲-۱ ارائه‌شده است. مطابق با چگالی آلومینیوم در جدول و بنا بر شکل هندسی ۲-۱ مقدار جرم برای حالتی که آلومینیوم در داخل بوته است، برابر با ۳ کیلوگرم است. در این مدل‌سازی عددی خواص اصلی وابسته به دما، که بر گرمایش القایی بیشترین تأثیر را دارند در نظر گرفته‌شده است. این خواص شامل k ضریب هدایت حرارتی،C_p ظرفیت گرمایی، σ ضریب رسانایی الکتریکی است. مقدار ضریب هدایت حرارتی k آلومینیوم از دمای ۲۹۳ کلوین تا ۹۳۳.۴۷کلوین متغیر با دما در نظر گرفته‌شده است. همچنین میزان k برای استیل از دمای ۲۹۳ تا ۱۸۱۱ کلوین نیز تغییر می‌کند.

ضریب رسانایی الکتریکی مس و آلومینیوم و استیل(σ) تابعی از دما در نظر گرفته‌شده است و توسط عبارت زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma = \frac{1}{\rho_0 (1 + \alpha (T - T_0))} \quad (۲۴-۲)$$

ρ_0 مقاومت ویژه الکتریکی در دمای مرجعT_0 ، دمای مرجع T_0 = 293K است. α ضریب دمایی مقاومت ویژه، Tدما واقعی در دامنه است.

جدول ۲-۱: خواص الکترومغناطیسی و حرارتی

دامنه	آلومینیوم	مس
رسانایی الکتریکی (σ) [S/m]	$\frac{1}{\rho\big(\alpha+(T-T_0)\big)}$	$\frac{1}{\rho\big(\alpha+(T-T_0)\big)}$
نفوذپذیری مغناطیسی(μ) [H/m]	1.000021	0.99999
چگالی(ϱ) $[\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}]$	2698.9	8700

۲-۶- شرایط مرزی و اولیه

به‌منظور اعمال شرایط مرزی می‌توان فرض کرد که ناحیه عایق مغناطیسی کاملاً دور از کوره القایی وجود دارد. هوا در اطراف قطعه کار و کویل را در یک جعبه با شرایط عایق مغناطیسی در مرزهای آن محصورشده است، که باعث می‌شود که مؤلفه نرمال میدان مغناطیسی صفر باشد.

مهم است اطمینان حاصل شود که این ناحیه عایق به‌قدر کافی دور از کوره است که بر حل عددی تأثیر نگذارد. بنابراین ما حدوداً ۱۰ برابر مقیاس کوره، ناحیه محاسباتی را در نظر گرفتیم [۱۶].

دمای اولیه برای کل دامنه حل، برابر با دمای مرجع $T_0 = 293\mathrm{K}$ در نظر گرفته‌شده است. جریان ورودی برای کویل برابر با ۱۳۰۰ آمپر تعریف‌شده است. خنک کاری توسط آب در گردش درون سیم‌پیچ‌ها با دبی(حداقل) ۱ کیلوگرم بر دقیقه انجام‌گرفته است. میزان حرارت گرفته‌شده از سیم‌پیچ ثابت و برابراست با:

$$Q_C = \frac{\frac{dM}{dt} C_P (T_{in} - T)}{2\pi r A} \tag{۲-۲۵}$$

$\frac{dM}{dt}$دبی آب، Tدمای سیم‌پیچ،T_{in} دمای آب ورودی که برابر با ۲۹۳ کلوین می‌باشد.

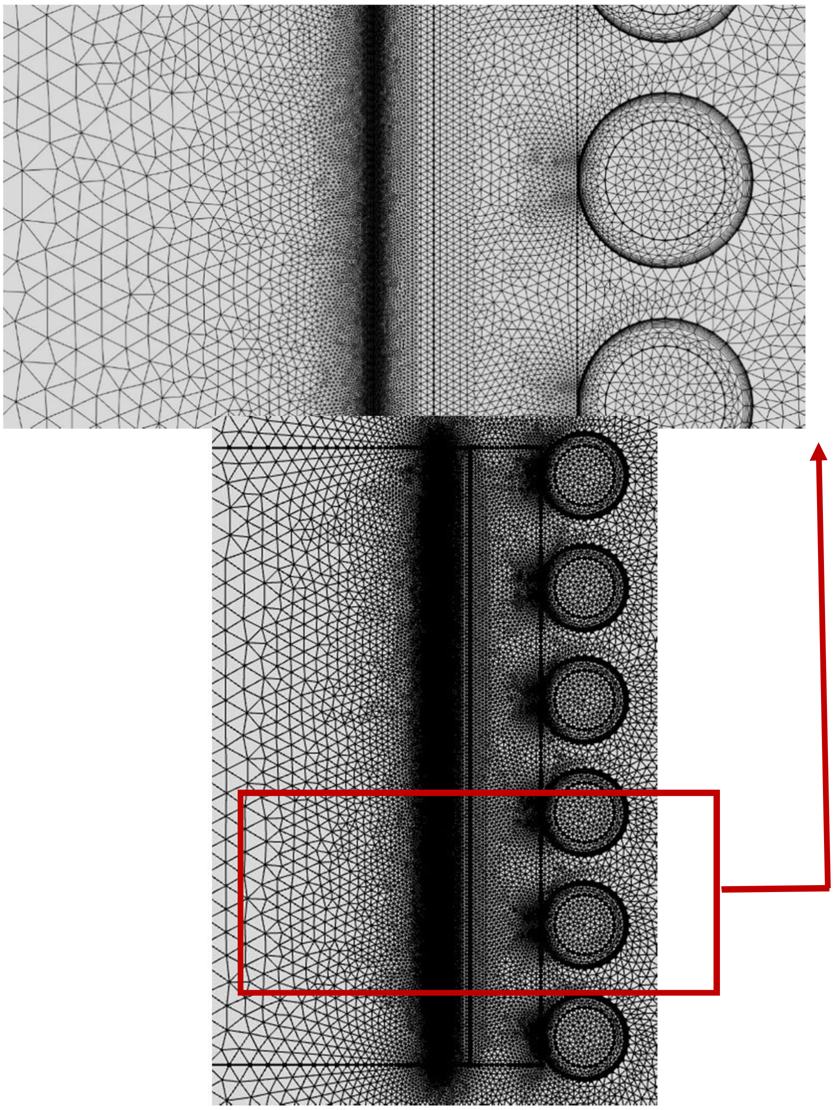
۲-۷- تولید شبکه عددی

برای انجام هر محاسبه‌ای میزان عمق نفوذ که پارامتر مهم و تأثیرگذاری است باید تعیین شود. زیرا اکثر جریان‌های الکتریکی از طریق عمق نفوذ جریان می‌یابند. این پارامتر وابسته به نفوذپذیری خلأμ_0، نفوذپذیری نسبی ماده μ_r، ضریب هدایت الکتریکی σ و فرکانسfاست [۲۸].

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad (۲-۲۶)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (۲-۲۷)$$

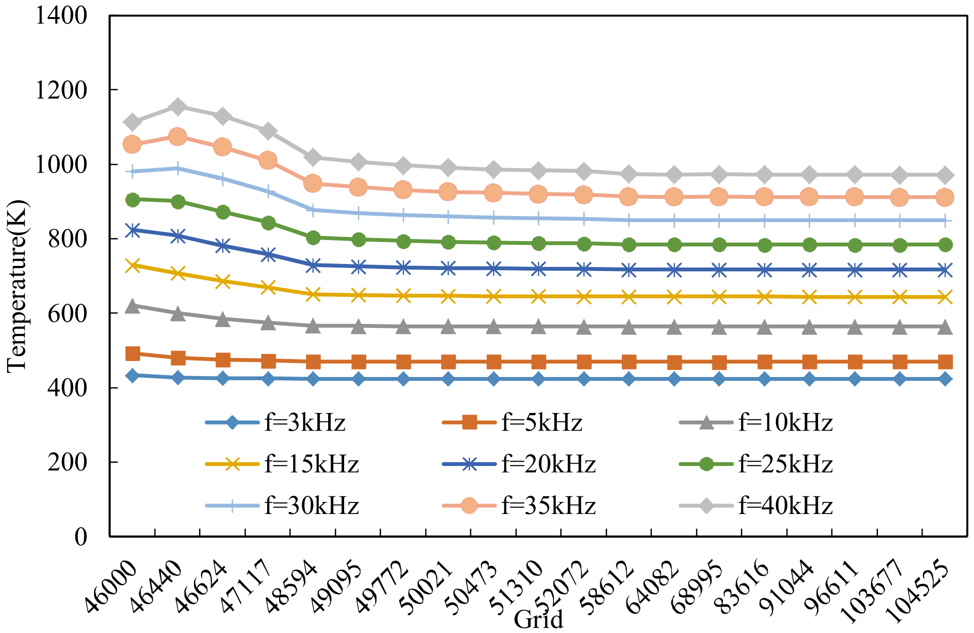
هرچه فرکانس بالاتر، عمق نفوذ نازکتر است. درنتیجه با تنظیم فرکانس میزان عمق نفوذ مغناطیسی را می‌توان کنترل کرد. بنابراین ازنظر عددی تعداد شبکه برای هر هادی باید به‌قدر کافی ریز باشد تا دقت و صحت تضمین شود. در اینجا مقدار عمق نفوذ برای آلومینیوم برابر با ۰.۶۰ میلی‌متر شده است. در محل عمق نفوذ یعنی محل تماس قطعه کار با بوته نیز از نسبت تراکم شبکه بالاتری استفاده می‌شود. پس در اطراف ماده و داخل کویل‌ها تعداد شبکه بیشتری داریم که این افزایش شبکه به خاطر حساسیت عمق نفوذ و نیاز کنترل حرارت در داخل سیم‌پیچ می‌باشد [۳۶].



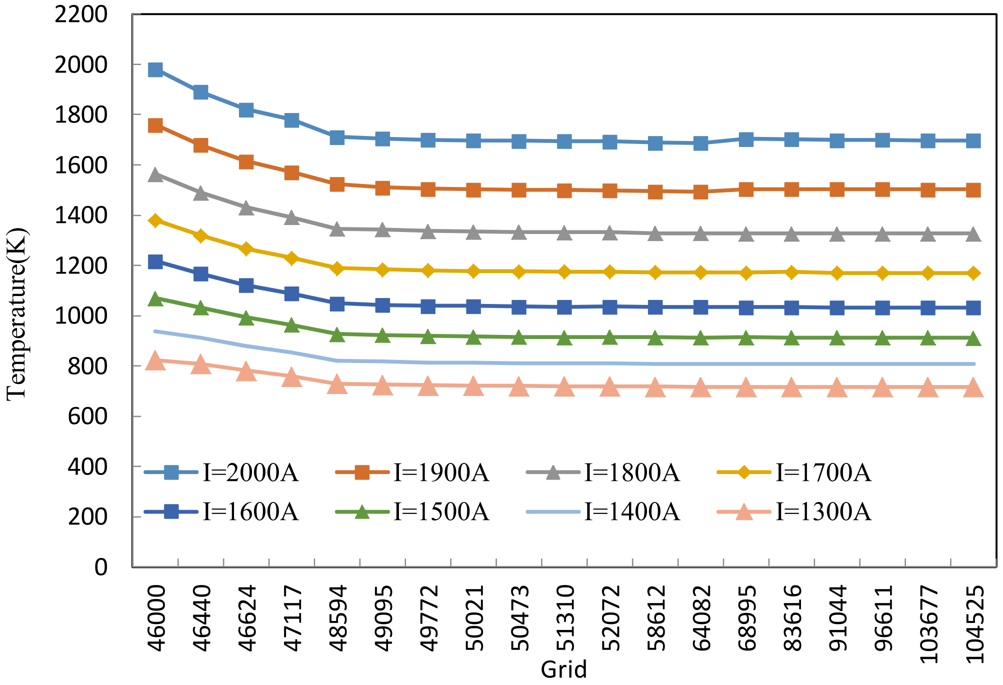
شکل۲-۲: نمونه شبکه‌بندی انتخاب‌شده

برای پیدا کردن تعداد شبکه مناسب لازم است نسبت به یک پارامتر حساس تعداد شبکه کنترل شود. در نمودار ۲-۳ دمای میانگین خط ox در زمان ۹۰۰ ثانیه برای فرکانس معین اندازه‌گیری شد مثلاً در فرکانس ۴۰کیلوهرتز با افزایش تعداد شبکه دمای میانگین را محاسبه کردیم همان‌طور که مشاهده می‌شود از ۴۹۰۹۵ شبکه به بعد تغییری در نتایج مشاهده نمی‌شود و این روند را برای فرکانس‌های دیگر نیز بررسی کردیم همان‌طور که در شکل ۲-۳ مشاهده‌شده است تعداد شبکه موردنیاز در فرکانس‌های پایین‌تر نیز مناسب است. برای اطمینان از تعداد شبکه انتخاب‌شده، این بررسی را در فرکانس ثابت ۲۰ کیلوهرتز با جریان‌های متفاوت تکرار کردیم. مطابق بررسی قبلی در

شکل ۲-۴ نیز مشاهده می‌شود در هر جریانی با افزایش تعداد شبکه بعد از ۴۹۰۹۵ جواب میانگین دما خط ox ثابت‌شده است.



شکل۲-۳: بررسی میانگین دما در فرکانس‌های مختلف نسبت به تعداد شبکه، در جریان ۱۳۰۰ آمپر و پارامترهای ثابت$\frac{D_1}{D_3} = 1.62376$ $\frac{D_2}{D_4} = 0.91044, \frac{L}{D_4} = 0$

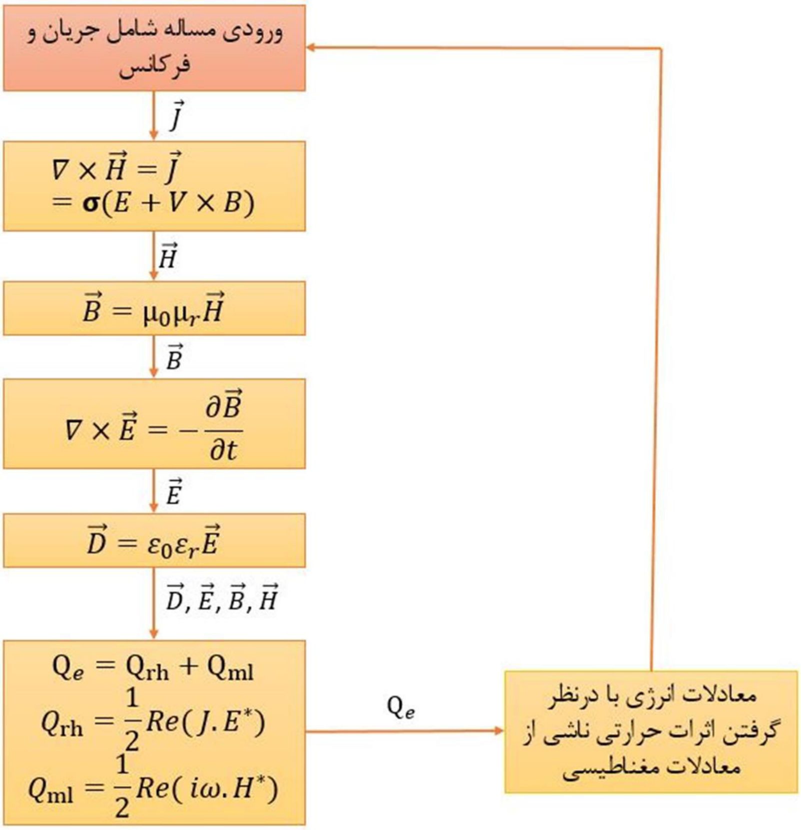


شکل ۲۰-۴: بررسی میانگین دما در جریان‌های مختلف نسبت به تعداد شبکه در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز پارامتر-

های ثابت $\frac{D_1}{D_3} = 1.62376$ $\frac{L}{D_4} = 0$ $,\frac{D_2}{D_4} = 0.91044$

۲-۸- فلوچارت حل روش عددی

برای حل مسائل کوره القایی می‌توان فلوچارت زیر را مطابق با توضیحات این فصل ارائه نمود. همان‌طور در شکل ۲-۵ نشان داده‌شده است، ابتدا با مشخص کردن جریان و فرکانس ورودی به کویل‌ها و حل معادلات ماکسول، مقادیر $\vec{D}, \vec{E}, \vec{B}, \vec{H}$ به‌دست‌آمده است. سپس منبع حرارت الکترومغناطیسی محاسبه می‌شود و در معادله انرژی قرار می‌گیرد. با حل معادله انرژی دما در زمان مشخص تعیین می‌شود،سپس برای گام زمانی بعدی از ابتدا نمودار، تمام مراحل تکرار می‌شود.درگذر زمان دما تغییر کرده و خواص مواد وابسته به دما همچونσو k نیز متغیر خواهد بود.



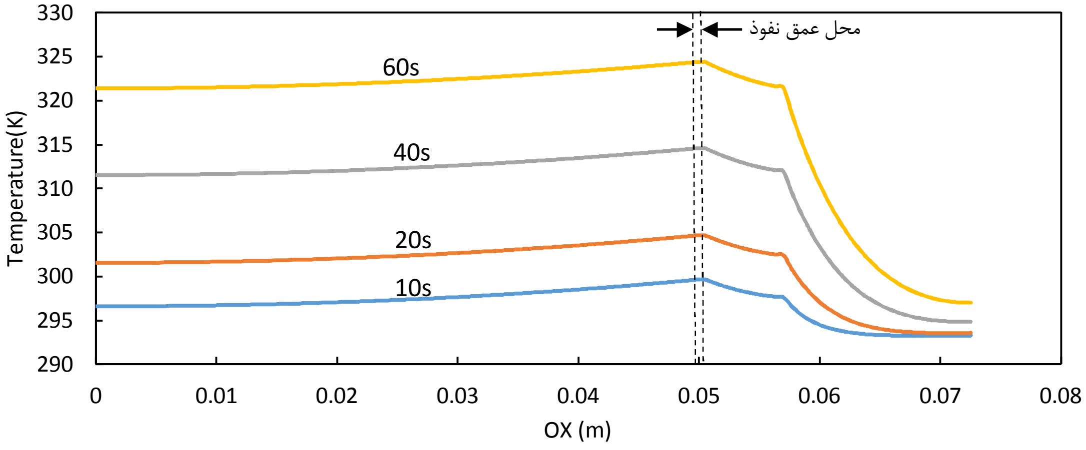
شکل ۲-۵: فلوچارت حل کوره القایی

فصل سوم : نتایج و بحث

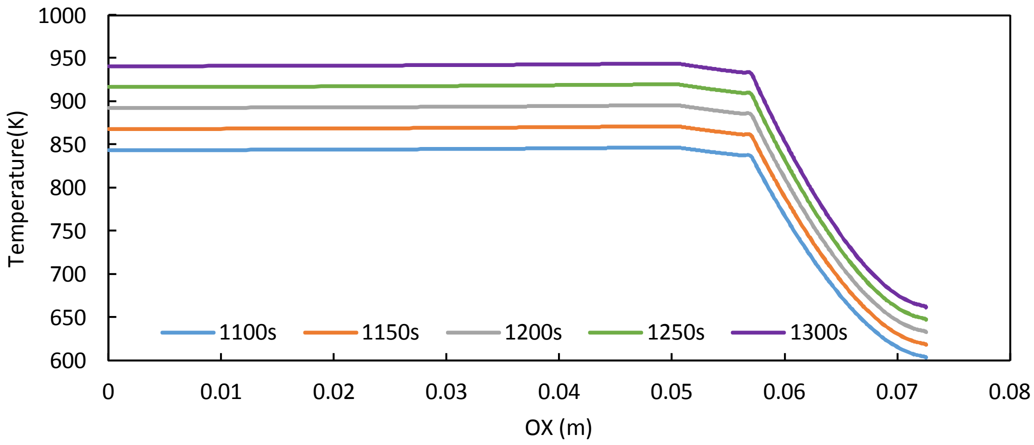
۳-۱- گرمایش و ذوب ماده غیر مغناطیسی

امروزه آلومینیوم یکی از فلزاتی است به‌طور گسترده در سراسر جهان استفاده می‌شود. آلومینیوم ماده‌ای غیر مغناطیسی است پس ذوب آن در کوره القایی با تلفات فوکو انجام می‌پذیرد و تلفات هیسترزیس در آن صفر می‌باشد.

همان‌طور که می‌دانیم دمای ذوب آلومینیوم ۹۳۳.۴۷ کلوین است. با در نظر گرفتن هندسه پیشنهادشده در شکل۲-۱ و جریان ۱۳۰۰آمپر و فرکانس ۲۰ کیلوهرتز، زمان رسیدن به دمای ذوب۱۳۰۰ثانیه به‌دست‌آمده است. تغییرات دمای میانگین در خط ox در زمان‌های مختلف در شکل ۳-۱ نمایش داده‌شده است. در زمان‌های اولیه در عمق نفوذ آلومینیوم مقاومت حرارتی بیشتری ایجادشده و همین مقاومت بالا سبب تلفات گرمایی و افزایش دمای آلومینیوم می‌شود. سپس باگذشت زمان این گرما به مرکز آلومینیوم از طریق هدایت منتقل می‌شود و در زمان ۱۳۰۰ ثانیه کل ماده گرم شونده به دمای ذوب رسیده است. نمایش تغییرات دمای میانگین خط گذرنده ox در زمان‌های نهایی در شکل ۳-۱(ب) نشان‌دهنده این است که دما در داخل بوته ثابت‌شده است. همانطورکه انتظار می‌رود دما در قسمت عایق حرارتی افت قابل ملاحظه‌ای یافته است. بنابراین عایق سیلکا گلس به‌خوبی مانع هدر رفت دما از داخل بوته به بیرون شده است.



(الف)



(ب)

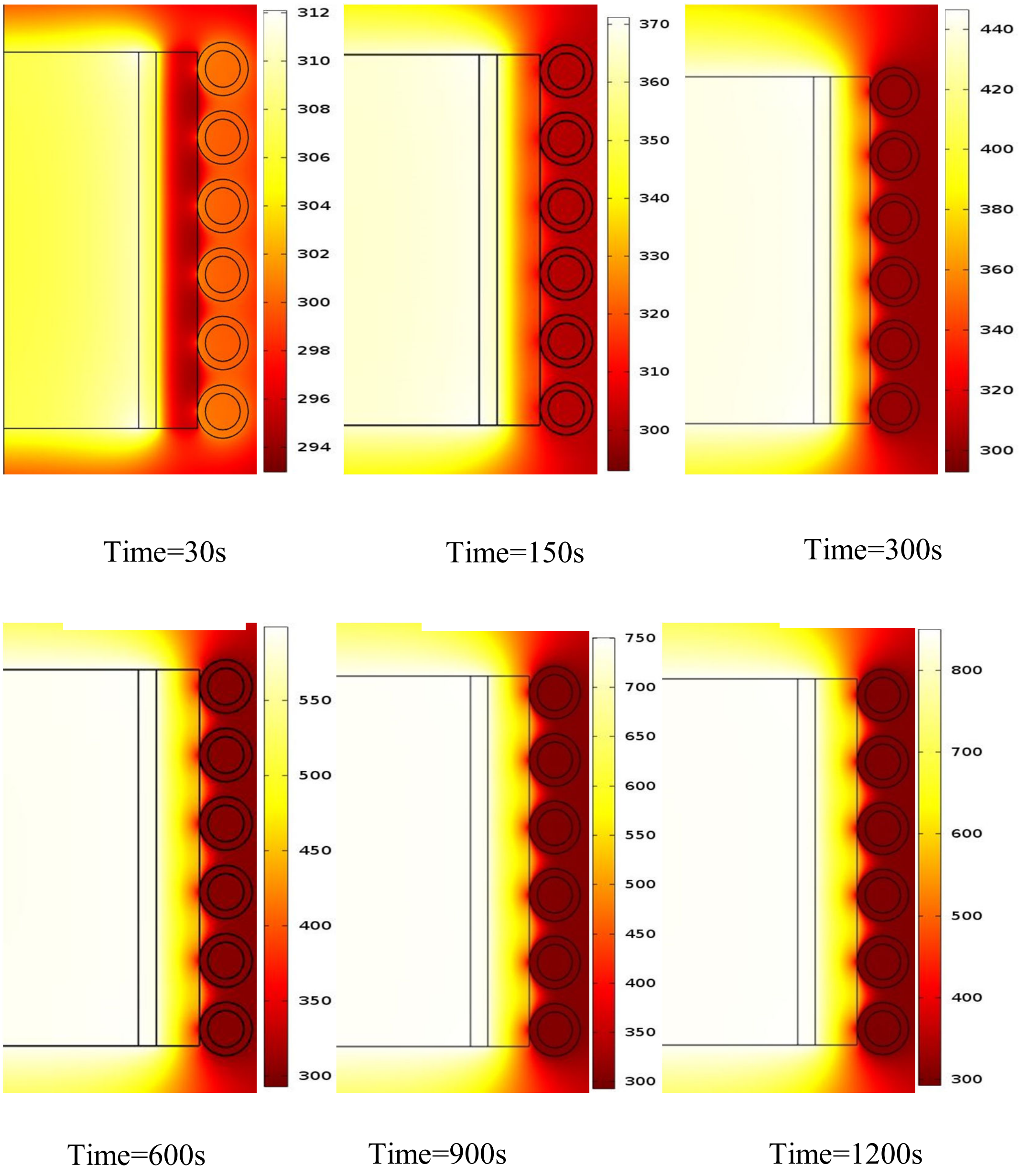
شکل ۳-۱: نمایش تغییرات دما در خط ox در زمان‌های مختلف فرکانس ۲۰کیلوهرتز، جریان ۱۳۰۰ آمپر و پارامترهای ثابت

$$\frac{D_2}{D_4} = 0.91044, \frac{L}{D_4} = 0, \frac{D_1}{D_3} = 1.62376$$

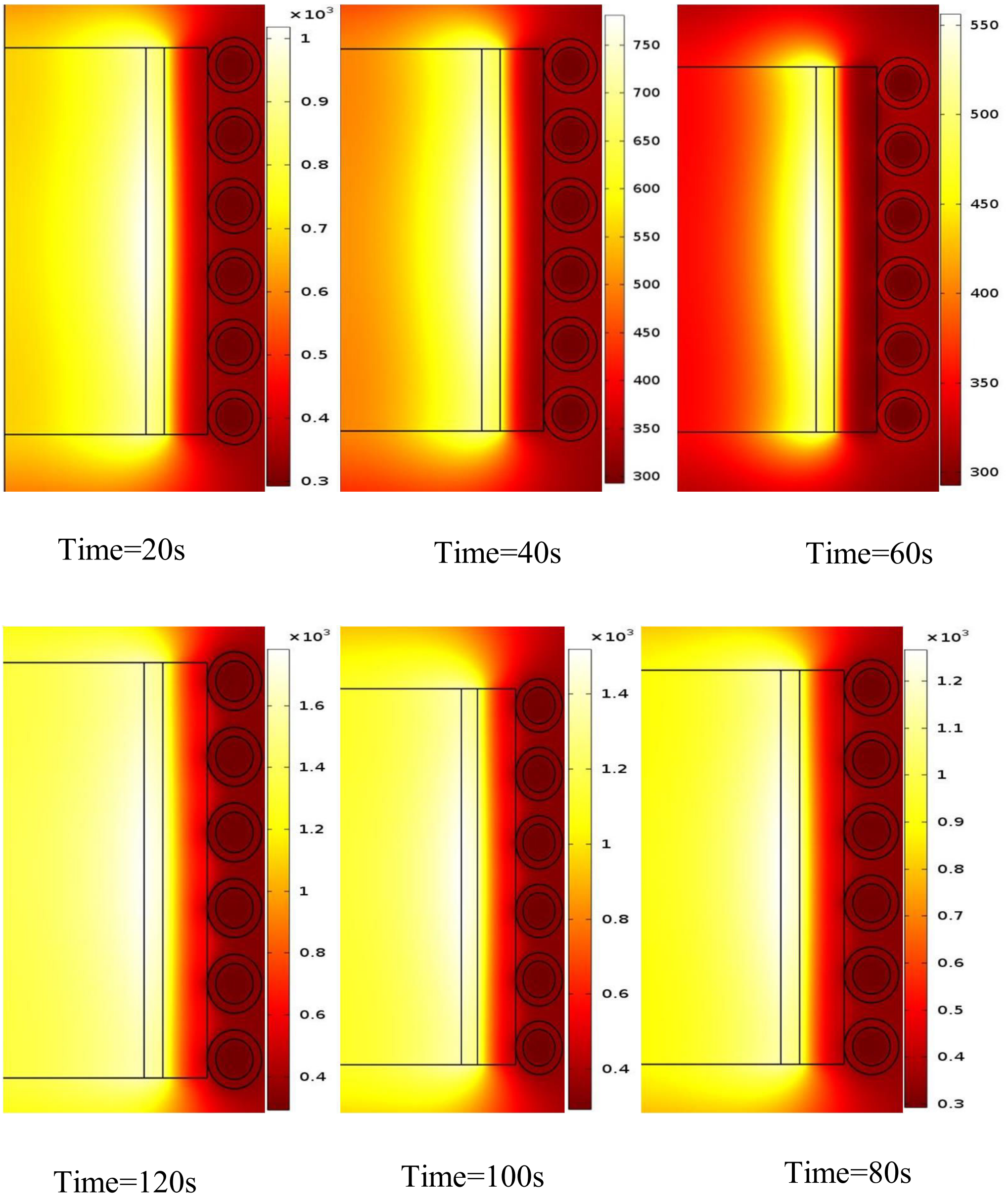
الف- زمان‌های اولیه ذوب آلومینیوم ب-زمان‌های نزدیک به زمان ذوب آلومینیوم

۳-۱-۱- نمایش کانتور دما و چگالی جریان مغناطیسی کوره القایی

کانتور تغییرات دما برای کوره القایی در زمان‌های مختلف در دو حالت که ماده گرم شونده آلومینیوم یا استیل باشد در شکل ۳-۲ نمایش داده‌شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ابتدا دما در عمق نفوذ ماده گرم شونده زیاد شده، سپس باگذشت زمان دما در کل ماده گرم شونده افزایش خواهد یافت.


312
310
308
306
304
302
300
298
296
294
Time=30s
370
360
350
340
330
320
310
300
Time=150s
440
420
400
380
360
340
320
300
Time=300s
550
500
450
400
350
300
Time=600s
750
700
650
600
550
500
450
400
350
300
Time=900s
800
700
600
500
400
300
Time=1200s

(الف)



(ب)

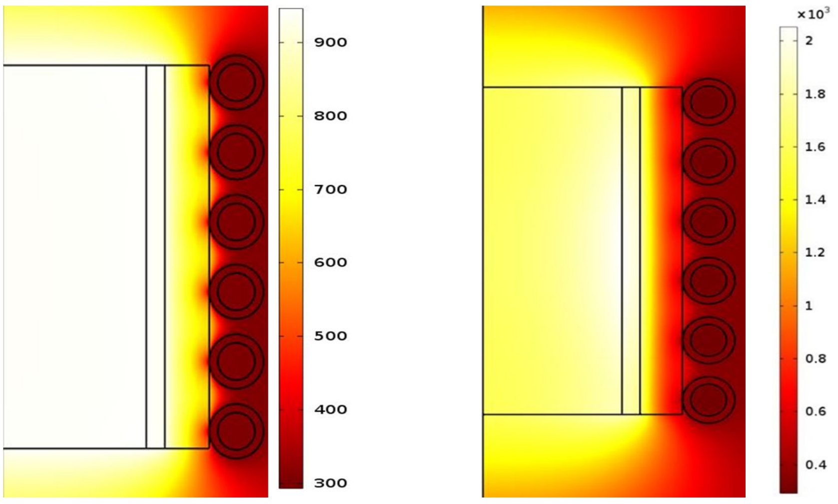
شکل۳-۲: کانتور تغییرات دما (کلوین) در زمان‌های مختلف برای کوره القایی در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و جریان ۱۳۰۰ آمپر

(الف) آلومینیوم،(ب) استیل

شکل ۳-۳ نمایش تغییرات دما در کوره در زمان ذوب است. همان‌طور که انتظار می‌رود با خنک کاری انجام‌شده در کویل‌ها مانع افزایش دما نامطلوب در سیم‌پیچ مسی شدیم. افزایش دمای مطلوب

در داخل ماده مذاب اتفاق افتاده است.

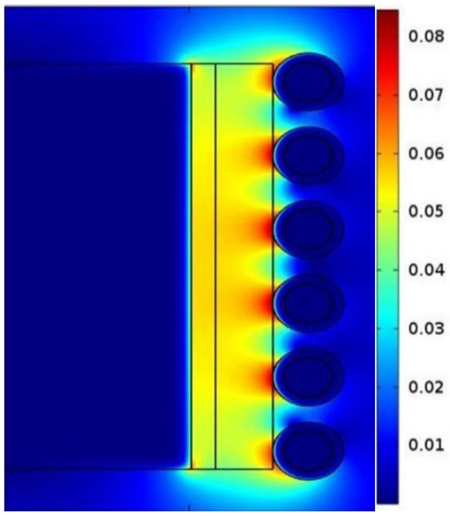
استیل ماده‌ای فرو مغناطیسی می‌باشد به دلیل خواص مغناطیسی و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی بالا در زمان کوتاه‌تری نسبت به آلومینیوم در کوره القایی ذوب می‌شود. همان‌طور که می‌دانیم دمای ذوب استیل ۱۸۱۱ کلوین است. با مدل کوره انتخاب‌شده ۲-۱ در مدت زمان ۱۵۰ ثانیه به دمای ذوب استیل می‌رسد. کانتور دما در شکل۳-۳ (ب) آمده است. از آنجا که ضریب نفوذپذیری استیل بسیار بالاست، دما در مدت زمان کمتری نسبت به آلومینیوم افزایش‌یافته است.



(ب) (الف)

شکل ۳-۲: نمایش تغییرات دما (کلوین) کوره القایی در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و جریان۱۳۰۰آمپر در نقطه ذوب $\frac{D_2}{D_4} = 0.91044, \frac{L}{D_4} = 0\ \frac{D_1}{D_3} = 1.62376$ (الف) آلومینیوم در زمان ۱۳۰۰ثانیه، (ب) استیل در زمان ۱۵۰ ثانیه

در شکل ۳-۴ کانتور چگالی جریان مغناطیسی در زمان ۱۳۰۰ ثانیه با جریان عبوری از کویل۱۳۰۰ آمپر و فرکانس ۲۰ کیلوهرتز برای کوره انتخاب‌شده، نشان داده‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشینه چگالی جریان در دامنه کویل‌ها به میزان ۰.۰۸ تسلا رسیده است. توزیع چگالی جریان در داخل کویل یکنواخت نیست و در قسمت داخلی کویل شدت بالاتری دارد. بنا بر اصل گرمایش القایی، جریان مغناطیسی از عمق نفوذ آلومینیوم می‌گذرد و چگالی جریان مغناطیسی در عمق نفوذ آلومینیوم به مقدار ۰.۰۴ تسلا رسیده است.



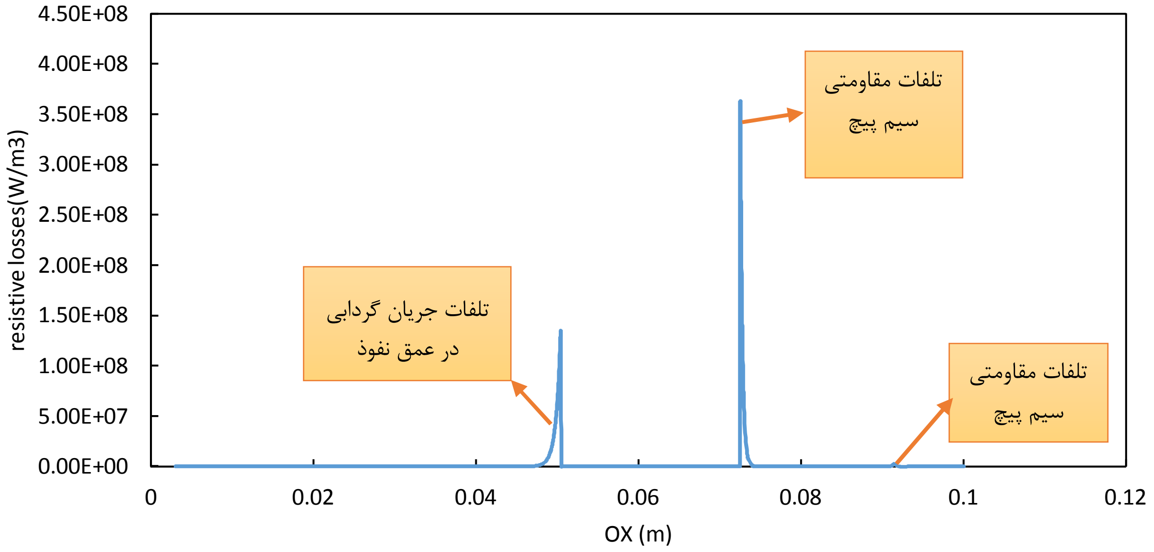
شکل ۳-۳: نمایش چگالی جریان مغناطیسی(تسلا) کوره القایی در فرکانس ۲۰کیلوهرتز و جریان ۱۳۰۰آمپر در زمان ذوب

$$\frac{D_1}{D_3} = 1.62376\ ,\ \frac{D_2}{D_4} = 0.91044, \frac{L}{D_4} = 0$$

۳-۱-۲- بررسی تلفات در کوره القایی

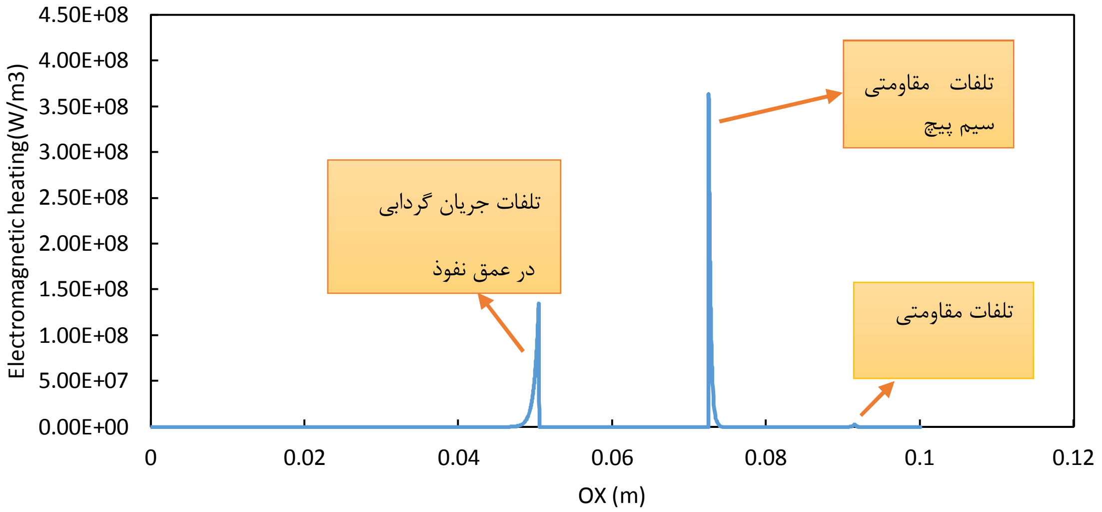
مجموع منبع حرارتی در کوره‌های القایی شامل حرارت مغناطیسی و حرارت مقاومتی است. حرارت مغناطیسی که همان تلفات هیسترزیس است در مواد گرم شونده فرو مغناطیسی مشاهده می‌شود. تلفات مقاومتی شامل تلفات گردابی (فوکو) در داخل ماده گرم شونده و تلفات مقاومتی در سیم‌پیچ کوره القایی است. تلفات هیسترزیس و جریان گردابی در سیستم کوره القایی مطلوب و گرمایش و ذوب از طریق این تلفات تحقق‌پذیر است. ولی تلفات مقاومتی موجود در سیم‌پیچ باید کنترل شود تا از رسیدن سیم‌پیچ به دمای ذوب ممانعت گردد. بنابراین در سیستم کوره القایی از خنک کاری استفاده می‌شود تا گرما ایجادشده در سیم‌پیچ‌ها را به آب در گردش درون آن‌ها انتقال دهیم. در این تحقیق دبی آب ۱ کیلوگرم بر دقیقه استفاده‌شده است. همان‌طور که در شکل۳-۵ نشان داده‌شده است تلفات مقاومتی در واحد حجم، در حجم کوچکی که عمق نفوذ ماده گرم شونده است، به دلیل جریان گردابی ایجادشده است. در قسمت داخلی کویل مقدار تلفات مقاومتی در واحد حجم بیشتر از قسمت خارجی کویل بوده است. چون آلومینیوم ماده‌ای غیر مغناطیسی است تلفات مغناطیسی ندارد

و کل تلفات الکترومغناطیس برابر با تلفات مقاومتی به‌دست‌آمده است.(مطابق شکل ۳-۶)



شکل ۳-۴: تلفات مقاومتی در خط گذرنده BC در زمان ۱۳۰۰ ثانیه فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و جریان ۱۳۰۰ آمپر

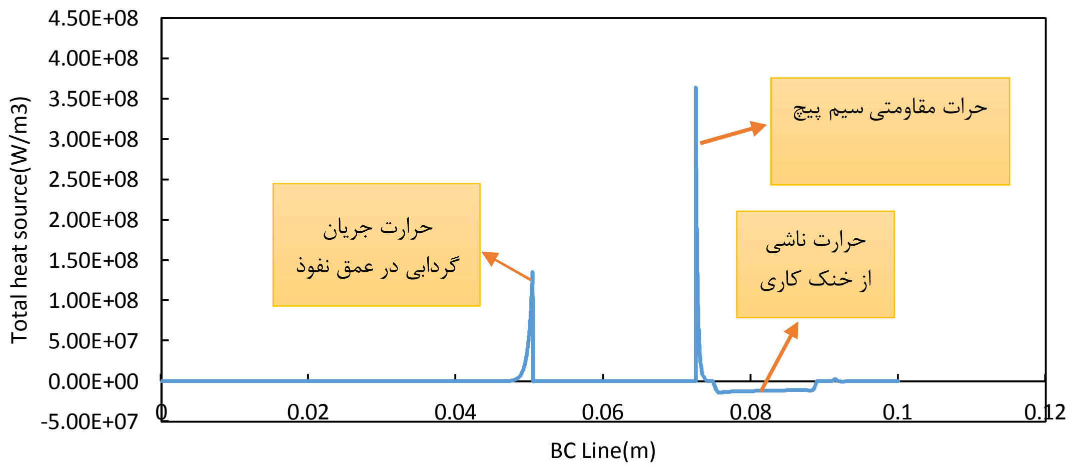
$\frac{D_2}{D_4} = 0.9104$ و $\frac{L}{D_4} = 0$ و $\frac{D_1}{D_3} = 1.6237$



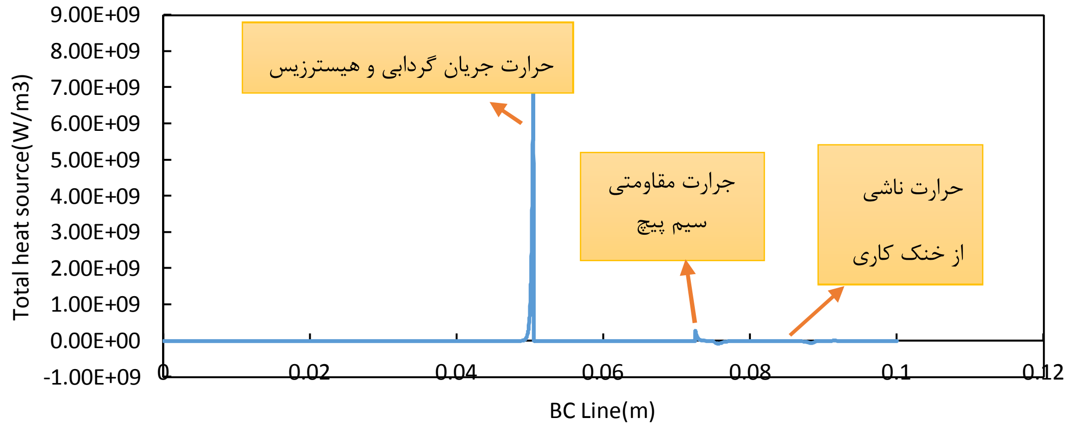
شکل ۳-۵: تلفات الکترومغناطیسی در خط گذرنده BC در زمان ۱۳۰۰ثانیه فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و جریان ۱۳۰۰ آمپر $\frac{D_2}{D_4} = 0.9104$ و $\frac{L}{D_4} = 0$ و $\frac{D_1}{D_3} = 1.6237$

مجموع منبع حرارتی شامل تلفات هیسترزیس، تلفات مقاومتی و خنک کاری مفروض در داخل سیم‌پیچ می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۳-۷ نشان داده‌شده، گرما گرفته‌شده توسط خنک کاری

منفی است تا تلفات مقاومتی تولیدی داخل سیم‌پیچ را خنثی کند و مانع از ذوب سیم‌پیچ مسی شود. مجموع منبع حرارتی در حالتی که ماده گرم شونده استیل می‌باشد در قسمت (ب) شکل۳-۷ هم بررسی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشینه تلفات بر واحد حجم در داخل عمق نفوذ آلومینیوم کمتر از بیشینه تلفات داخل سیم‌پیچ آن می‌باشد. درحالی‌که بیشینه تلفات بر واحد حجم داخل عمق نفوذ استیل سه برابر بیشینه تلفات داخل سیم‌پیچ آن می‌باشد. بنابراین استفاده از کوره-های القایی برای مواد فرو مغناطیسی بهتر بوده و در مدت زمان بسیار کوتاهی ماده ذوب می‌شود.



(الف)



(ب)

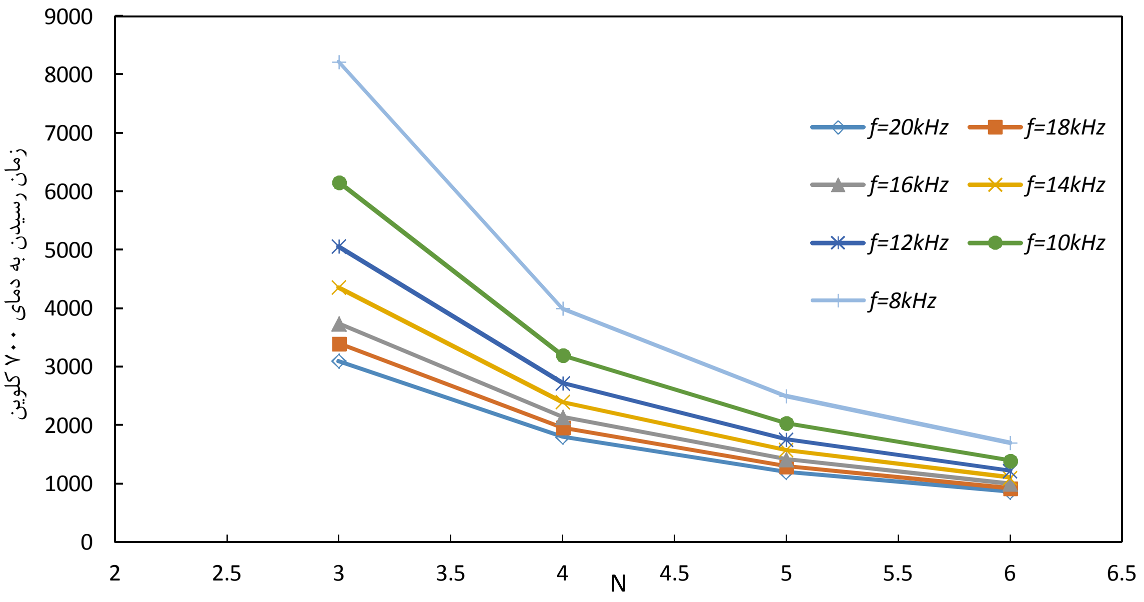
شکل ۳-۶: نمایش مجموع منبع حرارت در خط BC، (الف) آلومینیوم، (ب) استیل

۳-۲- مطالعه پارامتری

۳-۲-۱- بررسی تغییر تعداد حلقه

با افزایش تعداد حلقه‌ها و ثابت نگه‌داشتن پارامترهای دیگر همچون جریان عبوری، فرکانس و شکل کویل همان‌طور که انتظار می‌رود زمان رسیدن به ذوب کوتاه‌تر شده است که در نمودار ۳-۸ نیز مشاهده می‌شود. در فصل اصول گرمایش القایی توضیح داده شد که عبور جریان متناوب در سیم‌پیچ باعث ایجاد میدان مغناطیسی در داخل ماده گرم شونده می‌شود که این میدان مغناطیسی متناوب خود جریان الکتریکی در ماده گرم شونده القا می‌کند. میزان جریان القاشده در ماده گرم شونده، برابر با حاصل‌ضرب تعداد حلقه سیم‌پیچ در جریان عبوری از سیم‌پیچ می‌باشد($i = N \times I$) . حال اگر بخواهیم با ثابت نگه‌داشتن جریان القاشده در آلومینیوم و چگالی جریان به بررسی تغییر تعداد حلقه بپردازیم. تغییر تعداد حلقه هنگامی‌که جریان القاشده در آلومینیوم و چگالی جریان سیم‌پیچ ثابت می‌ماند، نباید اثری در تغییرات دما درگذر زمان در ماده گرم شونده داشته باشد. چگالی جریان (j) تابعی از میزان سطح مقطع و جریان عبوری از کویل است($j = \frac{I}{A}$) . پس اگر بخواهیم تعداد حلقه را با ثابت نگه‌داشتن چگالی جریان (j) و میزان جریان القاشده در آلومینیوم ($N\times I$) تغییر دهیم ناچار به تغییر سطح مقطع عبور جریان در کویل‌ها و جریان عبوری از سطح مقطع کویل می‌باشیم.

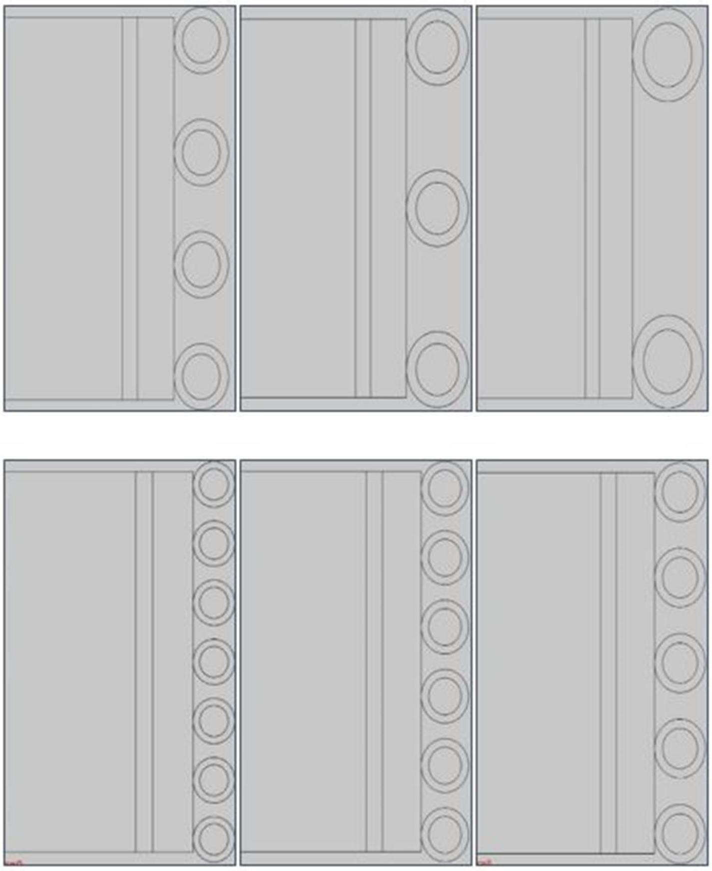
بنابراین مطابق جدول ۳-۱ سطح مقطع عبور جریان در کویل‌ها با تغییر تعداد حلقه تغییر خواهد کرد تا چگالی جریان در همه حالات ثابت بماند و همین‌طور برای ثابت ماندن حاصل‌ضرب $N\times I$ جریان گذرنده از کویل‌ها نیز مطابق جدول تغییر داده می‌شود.



شکل ۳-۷: نمایش تغییرات زمان رسیدن به دمای ۷۰۰ کلوین نسبت به تغییر تعداد حلقه در فرکانس‌های مختلف و جریان ۱۳۰۰آمپر و$\frac{D_1}{D_3} = 1.6237$ و $\frac{L}{D_4} = 0$ و $\frac{D_2}{D_4} = 0.9104$

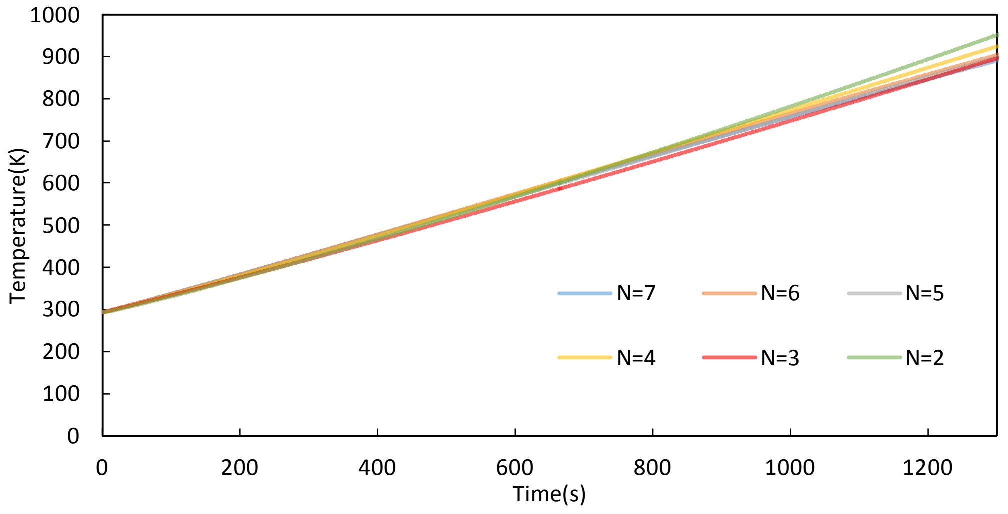
جدول ۳-۱: تغییر تعداد حلقه و میزان جریان و سطح مقطع کویل با در نظر گرفتن $N \times I = 7800$ و j ثابت، $\frac{D_1}{D_3}$ =1.6237 و$\frac{L}{D_4}$ =0

تعداد حلقهN	2	3	4	5	6	7
جریان I، (A)	3900	2600	1950	1560	1300	1114.28
سطح مقطع عبور جریانA، (mm^2)	450	300	225	180	150	128.57



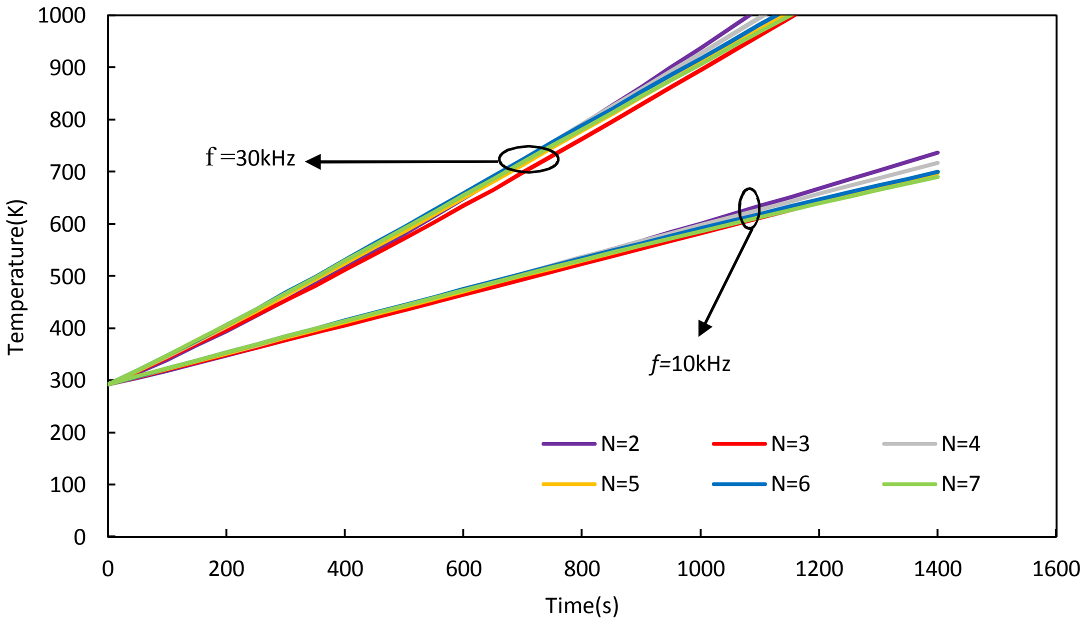
شکل ۳-۸: اشکال هندسی پیشنهادی برای کوره با $N\times I$ ثابت و چگالی جریان ثابت$\frac{D_1}{D_3}=1.6237$ و $\frac{L}{D_4}=0$ که در آن تعداد حلقه‌ها را از ۲حلقه تا ۷ حلقه تغییر داده‌شده است

همان‌طور که در شکل ۳-۱۰ مشاهده می‌شود نمودار تغییرات دما میانگین خط گذرنده ox درگذر زمان در چگالی شار ثابت و $N\times I$ ثابت در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز برای تعداد حلقه‌های مختلف طراحی‌شده است. که این ۶ نمودار تقریباً بر هم منطبق می‌باشند. درنتیجه با ثابت نگاه‌داشتن چگالی جریان و جریان القاشده در قطعه کار، می‌توان با چندین هندسه متفاوت کوره دلخواه را رسم کرد. فقط باید به میزان جریان الکتریکی ورودی توجه شود که تا چه میزان محدودیت داریم. هرچند استفاده از تعداد حلقه بیشتر بهتر می‌باشد و نیاز به استفاده از جریان بالا ندارد.

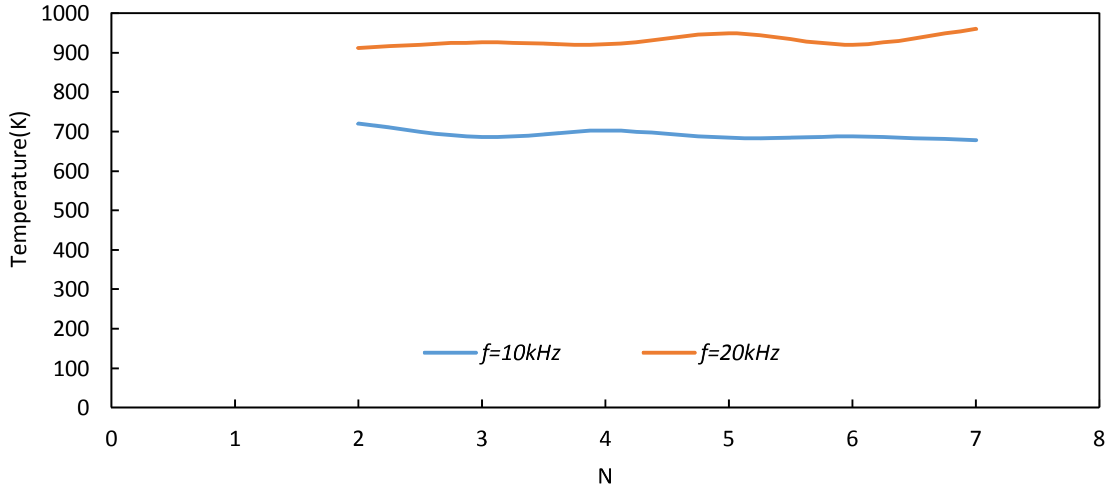


شکل ۳-۹: نمایش تغییرات دمای میانگین خط ox درگذر زمان برای تعداد حلقه‌های مختلف در فرکانس ۲۰کیلوهرتز و $N\times I$ ثابت و چگالی جریان ثابت و$\frac{D_1}{D_3} = 1.6237$ و $\frac{L}{D_4} = 0$

این بررسی را برای فرکانس‌های ۱۰و۳۰ کیلوهرتز هم انجام دادیم. تغییرات دما درگذر زمان نسبت به تغییر تعداد حلقه در شکل ۳-۱۱ نمایش داده‌شده است.

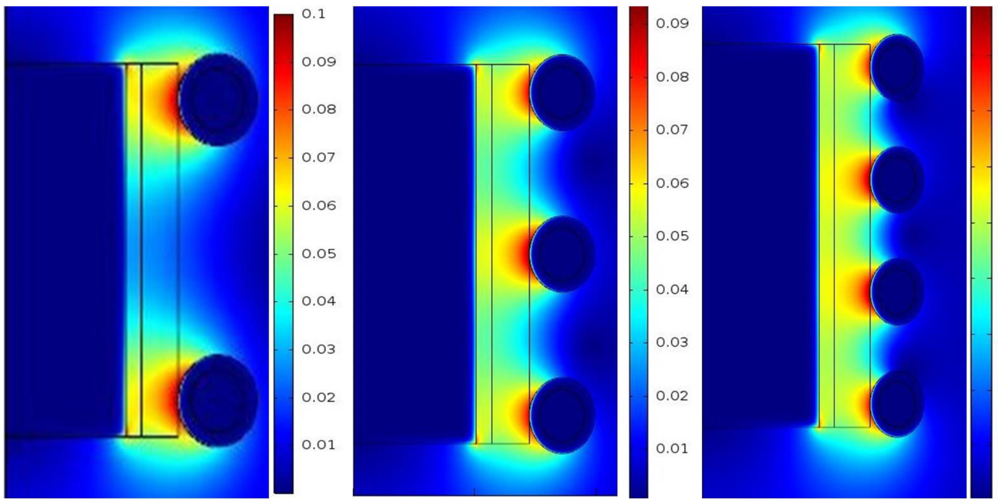


شکل ۳-۱۰: نمایش تغییرات دمای میانگین خط ox درگذر زمان در تعداد حلقه‌های مختلف (N) و در دو فرکانس ۱۰ و۳۰ کیلوهرتز نشان داده‌شده است و جریان ۱۳۰۰ آمپر و $N\times I$ ثابت و چگالی جریان ثابت $\frac{D_1}{D_3} = 1.6237$ و $\frac{L}{D_4} = 0$

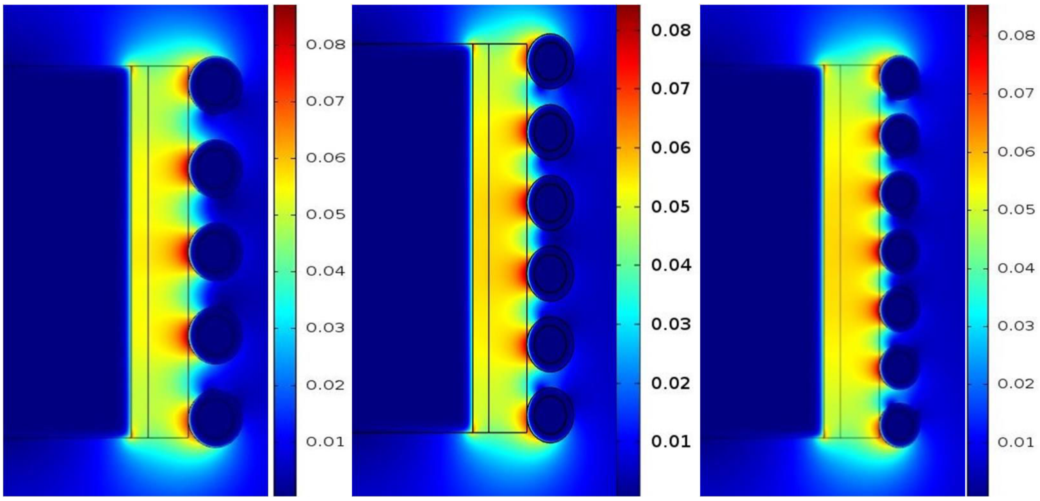


شکل ۳-۱۱: نمایش تغییرات دما در تعداد حلقه‌های مختلف (N) و در فرکانس‌های ۱۰ و ۲۰ کیلوهرتز نشان داده‌شده است و جریان ۱۳۰۰ آمپر و $N\times I$ ثابت و چگالی جریان ثابت $\frac{D_1}{D_3}=1.6237$ و $\frac{L}{D_4}=0$

شکل ۳-۱۳ نمایش توزیع نرم چگالی جریان مغناطیسی(B) در اشکال پیشنهادی می‌باشد. همان‌طور که در نظر داشتیم چون چگالی شار(j) ثابت در نظر گرفته‌شده است مقدار چگالی جریان در شکل ۳-۱۳ تقریباً بیشینه و کمینه یکسانی دارد. مشاهده می‌شود که بیشینه چگالی جریان در دامنه کویل‌هاست. توزیع چگالی جریان در داخل کویل یکنواخت نیست و جریان بیشتر میل دارد در قسمت داخلی کویل حرکت کند. بیشینه چگالی جریان در حالت ۲ حلقه به بیشترین مقدار ۰.۱ تسلا می رسد و ماکسیمم چگالی جریان در ۴، ۵ و۶ حلقه کمترین مقدار ۰.۰۸تسلا را دریافت کرده است.



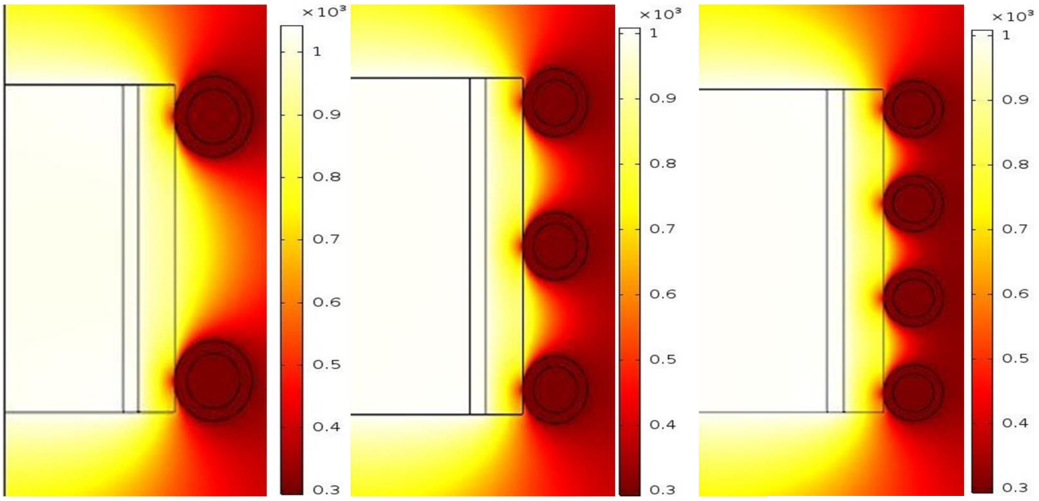
N=2 N=3 N=4



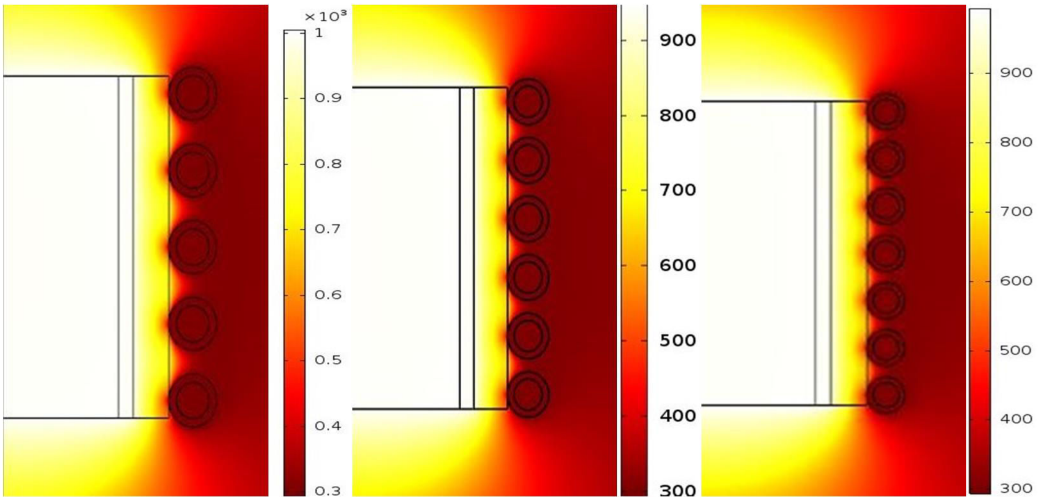
N=5 N=6 N=7

شکل ۳-۱۲: نمایش چگالی جریان مغناطیسی (تسلا) کوره در زمان ۱۴۰۰ ثانیه برای تعداد حلقه‌های مختلف در فرکانس ۲۰کیلوهرتز و $N\times I$ ثابت و چگالی جریان j ثابت و $\frac{D_1}{D_3}=1.6237$ و $\frac{L}{D_4}=0$

شکل ۳-۱۴ نمایش توزیع دما در اشکال مختلف پیشنهادی برای کوره القایی در زمان ۱۴۰۰ ثانیه است. همان‌طور که انتظار می‌رود با خنک کاری انجام‌شده در کویل‌ها مانع افزایش دما نامطلوب در سیم‌پیچ مسی شدیم. اتلاف حرارت در حالت ۲حلقه بیشتر است. درصورتی‌که در تعداد حلقه‌های بالا تمرکز حرارت بر بوته معطوف است. هرچقدر تعداد بیشتری حلقه انتخاب کنیم با جریان الکتریکی کمتر و منبع تغذیه مقرون‌به‌صرفه‌تر به دمای مدنظر خود خواهیم رسید.



N=2 N=3 N=4



N=5 N=6 N=7

شکل ۳-۱۳: نمایش تغییرات دما (کلوین) در کوره القایی در زمان ۱۴۰۰ ثانیه برای تعداد حلقه‌های مختلف در فرکانس ۲۰کیلوهرتز و

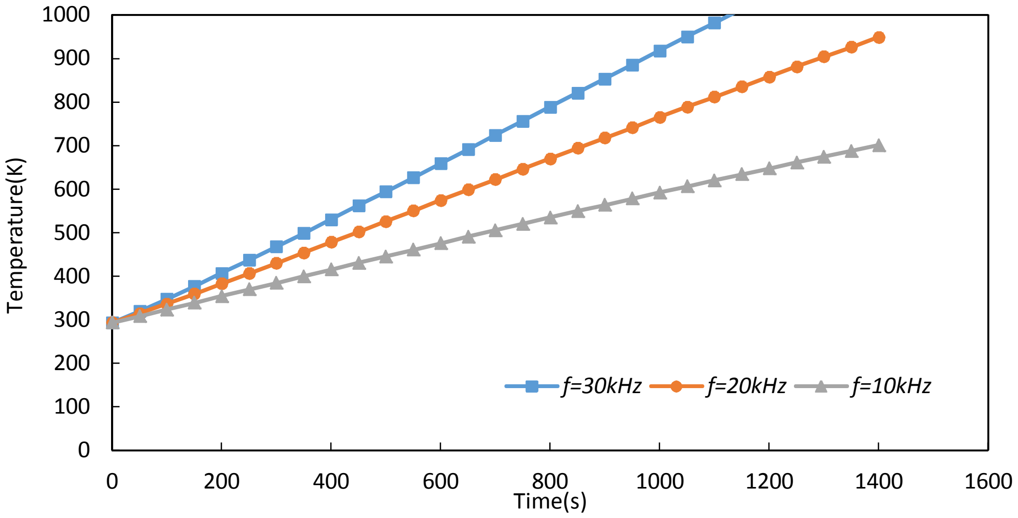
$N \times I$ ثابت و چگالی جریان j ثابت و $\frac{D_1}{D_3} = 1.6237$ و $\frac{L}{D_4}=0$

۳-۲-۲- بررسی تغییر فرکانس

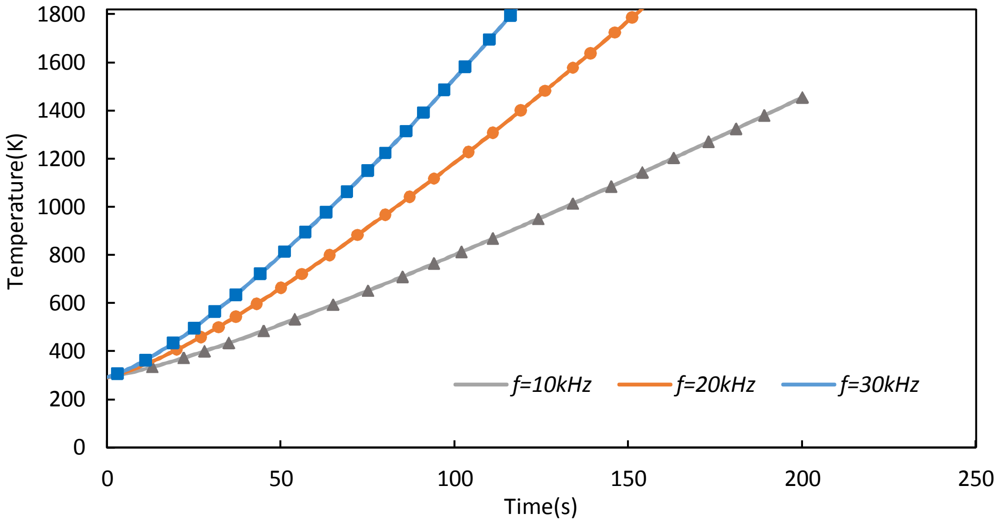
با توجه به هندسه در نظر گرفته‌شده برای ذوب آلومینیوم، نمودار تغییرات دما میانگین در بازه زمانی ۰تا ۱۴۰۰ثانیه برای فرکانس مختلف در شکل۳-۱۵(الف) نشان داده‌شده است. همان‌طور که از نمودار می‌توان نتیجه گرفت افزایش فرکانس سبب افزایش دما می‌شود و زمان رسیدن به دمای ذوب را کوتاه می‌کند. این نمودار برای آلومینیوم خطی است درصورتی‌که مطابق ۳-۱۵ (ب) در استیل تغییرات دما نسبت به زمان در فرکانس‌های مختلف تغییرات خطی ندارد. به دلیل اینکه افزایش فرکانس باعث کاهش عمق نفوذ در ماده می‌شود برای افزایش فرکانس در طراحی محدودیت داریم. پس باید تا حدی فرکانس را افزایش داد که عمق نفوذ مغناطیسی در ماده مناسب باشد.

همچنین عمق نفوذ نباید زیاد باشد چون باعث تداخل این جریان با جریان القایی طرف دیگر سیم‌پیچ می‌شود. فرکانس‌های استانداردشده زیادی برای کوره‌های تجارتی وجود دارند. هر یک از فرکانس‌ها متناسب با یک کوره‌ی خاص و در اندازه و توان معین در نظر رفته شده است. مهم‌ترین عواملی که در امر انتخاب فرکانس مؤثرند عبارت‌اند از عمق نفوذ، توان ورودی، نوع محصول و ظرفیت

کوره. هرچه گنجایش بوته کمتر باشد فرکانس بالاتر احتیاج است.



(الف)

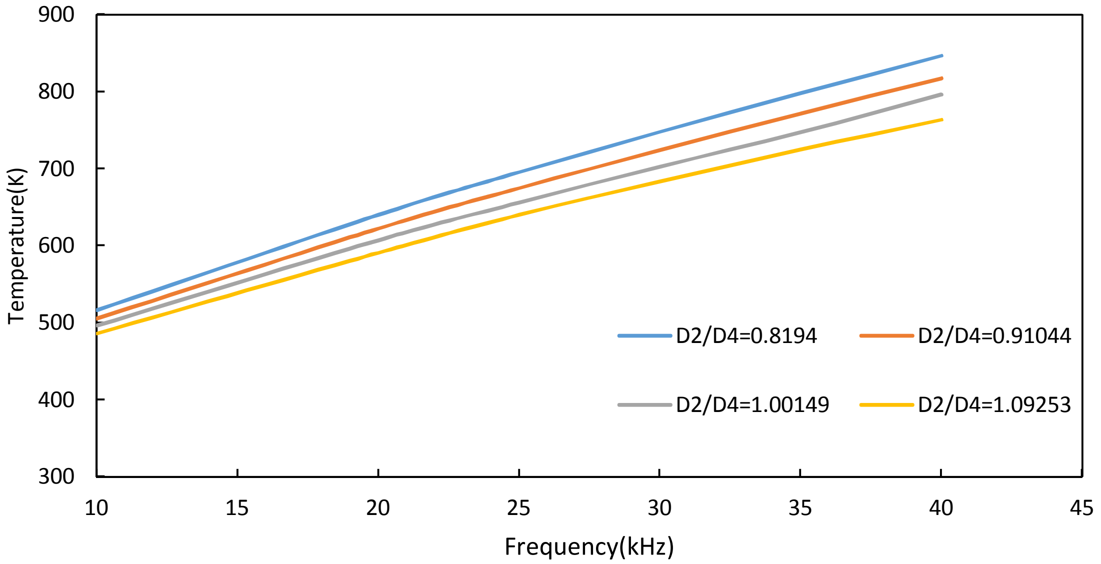


شکل ۳-۱۴: بررسی تأثیر تغییر فرکانس بر دما در گذر زمان در جریان ۱۳۰۰آمپر و تعداد۶ حلقه سیم پیچ و
$\frac{D_1}{D_3} = 1.6237$ و $\frac{L}{D_4} = 0$ و $\frac{D_2}{D_4} = 0.9104$، (الف) آلومینیوم، (ب) استیل

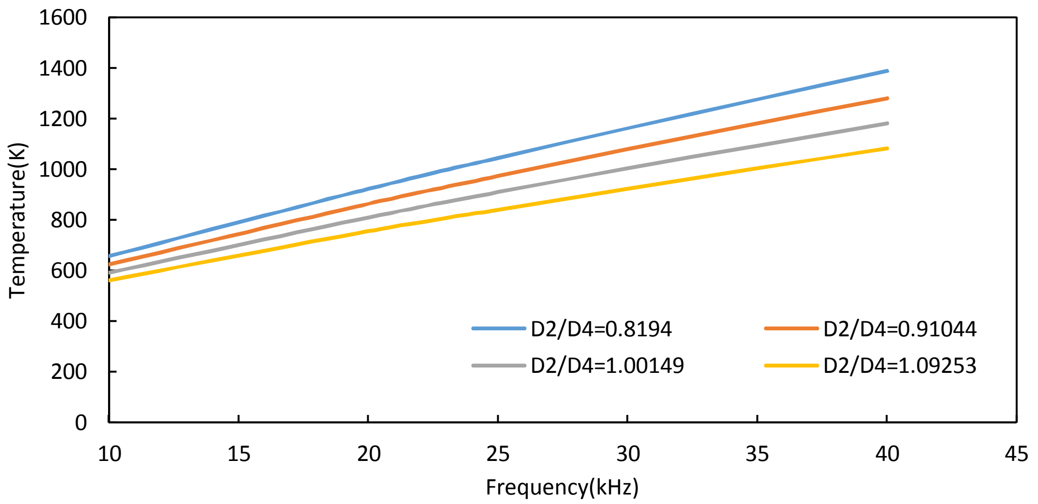
(ب)

همچنین تغییرات فرکانس از بازه ۱۰ کیلوهرتز تا ۴۰ کیلوهرتز و با گام ۵ کیلوهرتز موردمطالعه

قرارگرفته است. تأثیر فرکانس برای آلومینیوم در زمان ثابت ۷۰۰ ثانیه و $\frac{D_2}{D_4}$ مختلف بروی دمای میانگین خط ox در شکل ۳-۱۶ (الف) نمایش دادهشده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمودار تغییرات دما نسبت به فرکانس با شیب تقریباً ثابت افزایش‌یافته است. با افزایش فرکانس، دما از۵۰۰کلوین به ازای فرکانس ۱۰ به ۸۱۷ به ازای فرکانس ۴۰ رسیده است. که نشان می‌دهد افزایش ۴برابری فرکانس موجب افزایش ۱.۵ برابری دما میانگین خط ox در همان زمان ۷۰۰ ثانیه می‌شود. تأثیر فرکانس بر دما میانگین خط ox به ازای ماده گرم شونده استیل هم در قسمت (ب) شکل ۳-۱۶ نمایش دادهشده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شیب این نمودار در مقایسه با نمودار آلومینیوم بیشتر شده است. افزایش فرکانس در استیل باعث افزایش بیشتر دمای میانگین نسبت به حالتی که ماده گرم شونده آلومینیوم است خواهد بود. به‌عبارت‌دیگر تأثیر فرکانس در مواد فرو مغناطیس بیشتر از مواد غیر مغناطیسی است.



(الف)



(ب)

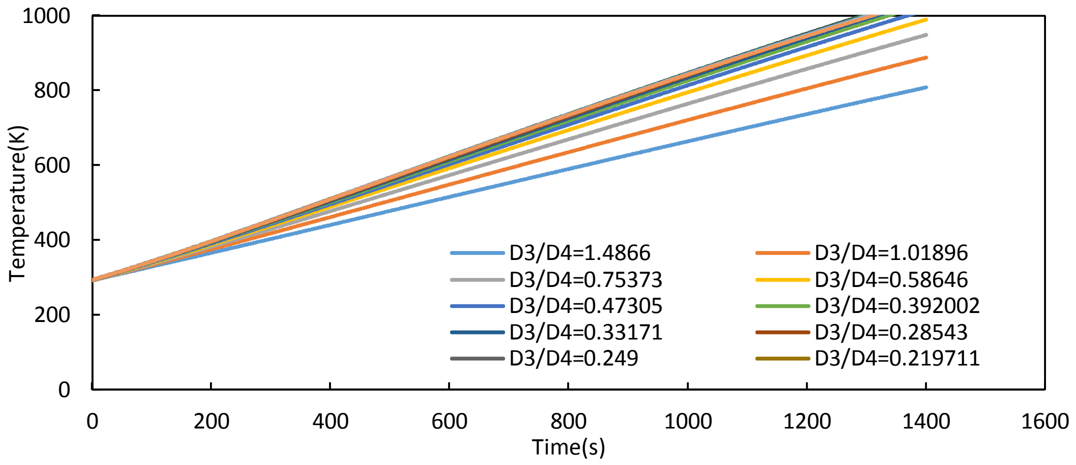
شکل ۳-۱۵: تأثیر فرکانس بر دما در جریان ۱۳۰۰ آمپر و شکل مدل اصلی $\frac{D_1}{D_3}=1.6237$ و $\frac{L}{D_4}=0$ و $\frac{D_2}{D_4}=0.9104$، الف-آلومینیوم در زمان ۷۰۰ ثانیه ب-استیل در زمان ۷۰ ثانیه

۳-۲-۳- تأثیر تغییر نسبت $\frac{D_3}{D_4}$ بوته در طراحی با در نظر گرفتن حجم ثابت بوته

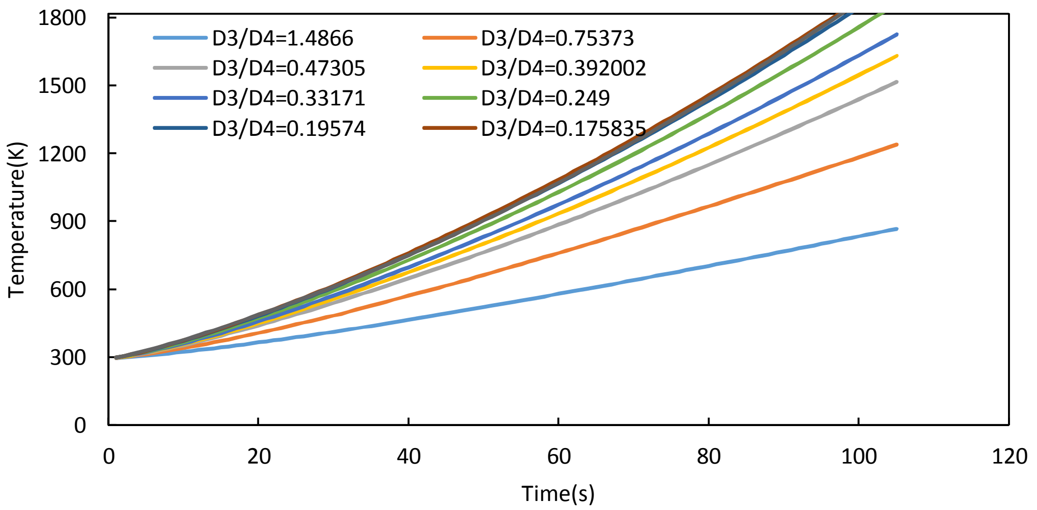
برای بررسی تأثیر شکل بوته در کوره القایی ذوب، نسبت قطر بر ارتفاع بوته را تغییر می‌دهیم تا در حجمی ثابت برای ماده به شکل بهبودیافته برسیم. همان‌طور که از نمودار ۳-۱۷ پیداست با افزایش ارتفاع(D_4) و کاهش قطر بوته(D_3) دما درزمانی کوتاه‌تر به دما ذوب می‌رسد. همان‌طور که در شکل ۳-۱۹(الف) برای آلومینیوم نشان داده‌شده افزایش دما در اثر کاهش نسبت $\frac{D_3}{D_4}$ تا $\frac{D_3}{D_4}=0.4$ ادامه یافته است ولی تقریباً در اعداد کمتر از این نسبت دیگر افزایش ارتفاع و کاهش قطر در جواب تأثیری ندارد و جواب‌ها مشابه می‌باشند. ولی برای استیل همان‌طور که در شکل۳-۱۷ (ب) مشخص است از نسبت $\frac{D_3}{D_4}=0.2$ کمتر جواب‌ها برهم منطبق خواهد شد.

جریان القایی سیم‌پیچ درون کوره نفوذ می‌کند، همان‌طور که اشاره شد عمق نفوذ نباید زیاد باشد چون باعث تداخل این جریان با جریان القایی طرف دیگر سیم‌پیچ می‌شود . چون در جریان القایی مخالف یکدیگرند و همدیگر را حذف می‌کنند که موجب کاهش حرارت تولیدی می‌شود. قطر بوته باید حداقل چهار برابر عمق نفوذ باشد [۳]. عمق نفوذ استیل به دلیل ضریب نفوذپذیری بالایی که دارد

طبق فرمول ذکرشده در فصل ۳ بسیار کوچک‌تر از آلومینیوم است. پس می‌توان نتیجه گرفت که جواب به‌دست‌آمده مطابق انتظار است و نسبت قطر بوته به ارتفاع در استیل باید کمتر از آلومینیوم باشد.

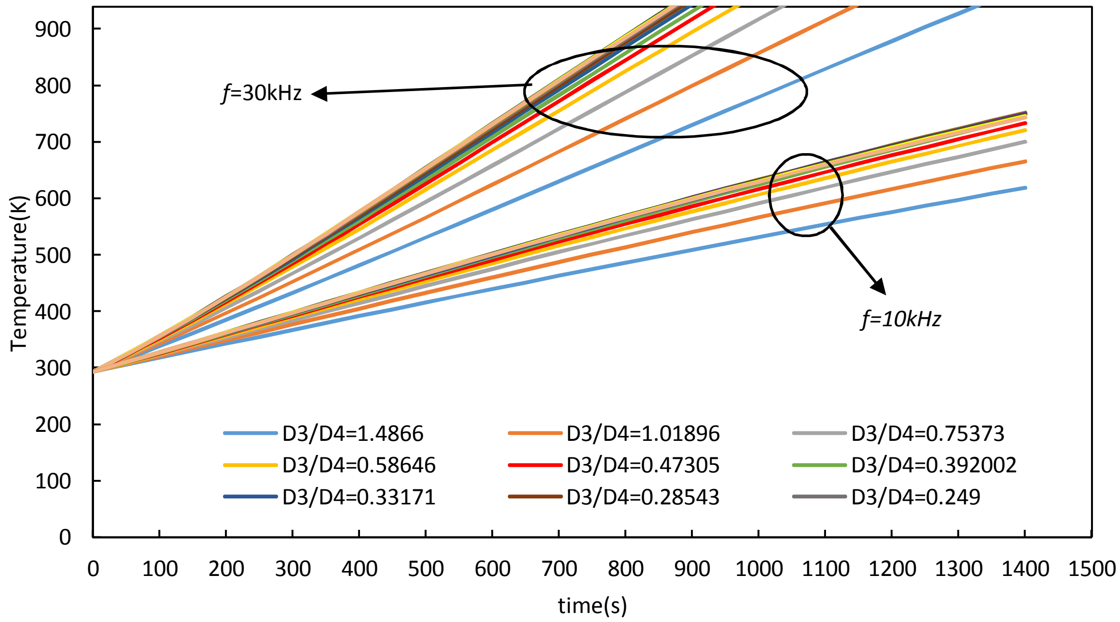


(الف)

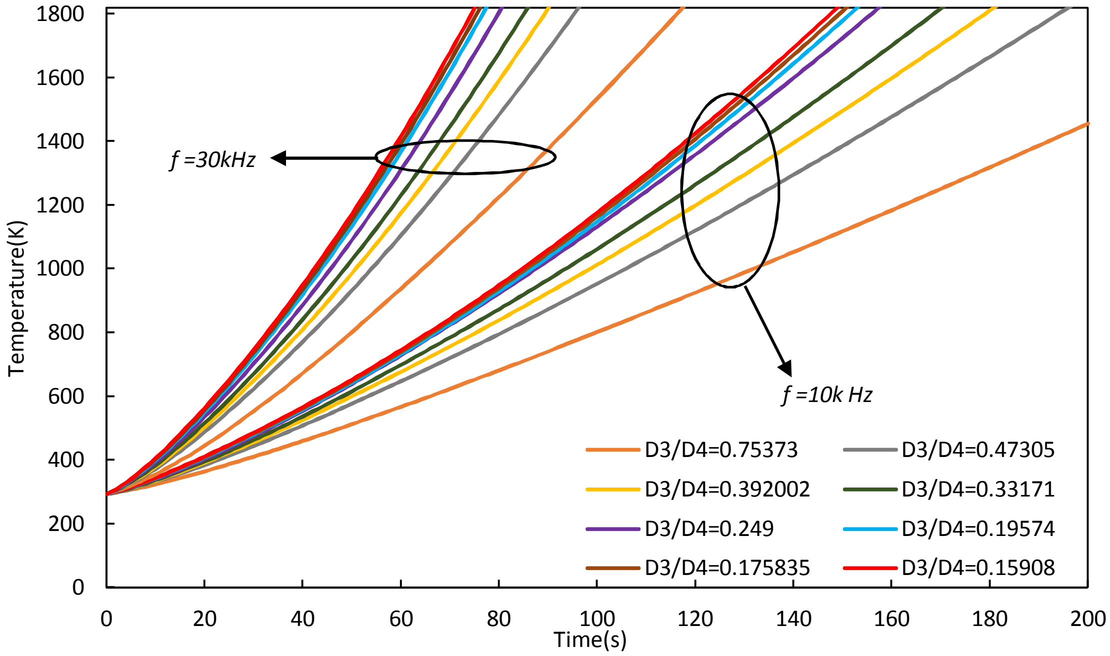


(ب)

شکل ۳-۱۶:نمایش تغییرات دما نسبت به زمان در $\frac{D_3}{D_4}$ مختلف و جریان ۱۳۰۰ آمپر و فرکانس ۲۰ کیلوهرتز در حجم ثابت و$\frac{D_1}{D_3} = 1.6237$ و $\frac{L}{D_4} = 0$ و $\frac{D_2}{D_4} = 0.9104$ ، (الف) آلومینیوم، (ب) استیل



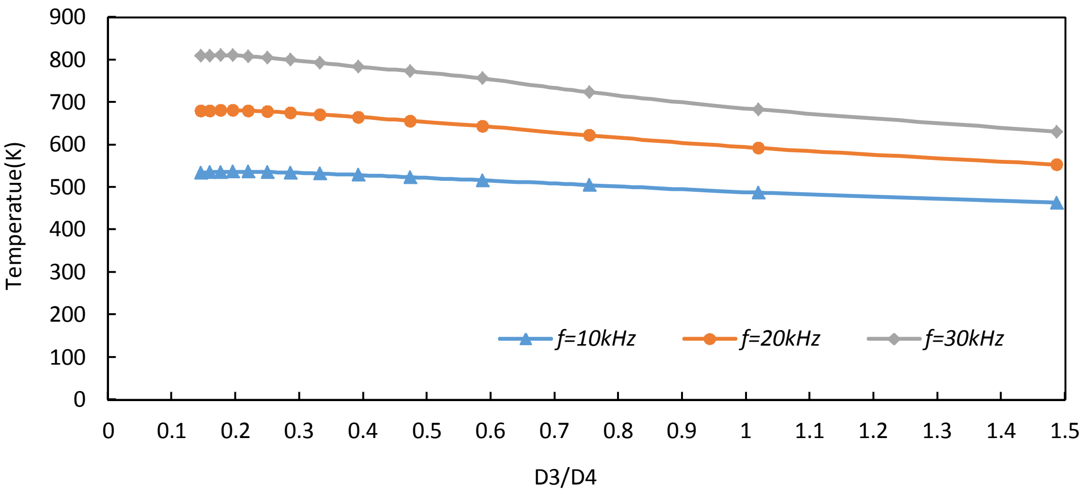
(الف)



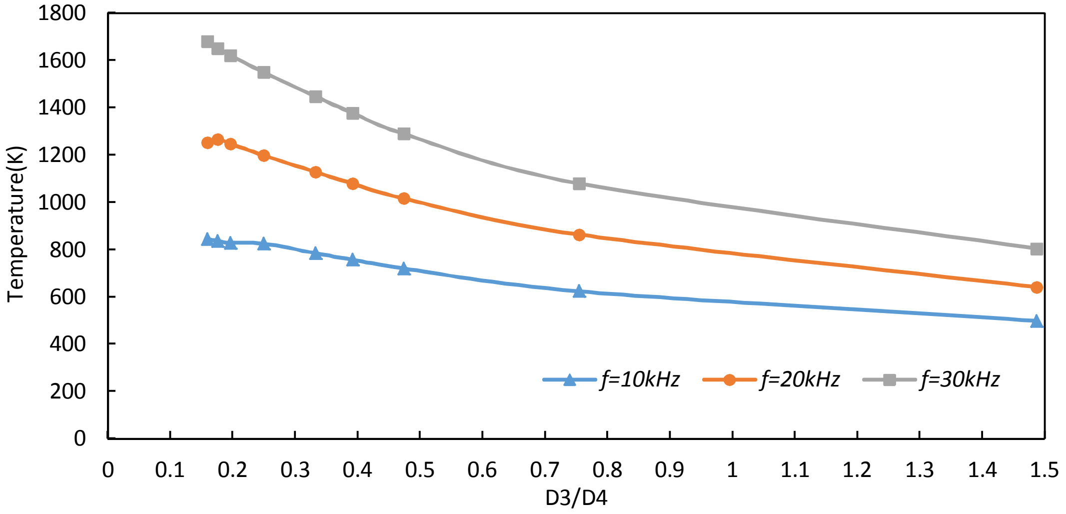
(ب)

شکل ۳-۱۷: نمایش تغییرات دما نسبت به زمان در $\frac{D_3}{D_4}$ مختلف و جریان ۱۳۰۰ آمپر و فرکانس ۱۰و۳۰ کیلوهرتز در حجم ثابت و$\frac{D_1}{D_3} = 1.6237$ و $\frac{L}{D_4} = 0$ و $\frac{D_2}{D_4} = 0.9104$، (الف) آلومینیوم، (ب) استیل

حال این بررسی را برای دو فرکانس ۱۰و۳۰ کیلوهرتز نیز انجام می‌دهیم. در شکل ۳-۱۹ تغییرات دما در زمان ثابت ۷۰۰ ثانیه نسبت به $\frac{D_3}{D_4}$ مختلف نمایش دادیم. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با کاهش نسبت قطر به ارتفاع از ۰.۴ به بعد تغییر محسوسی در دما ما حاصل نشده و این روند تا نسب $\frac{D_3}{D_4} = 0.14$ ادامه یافته است.

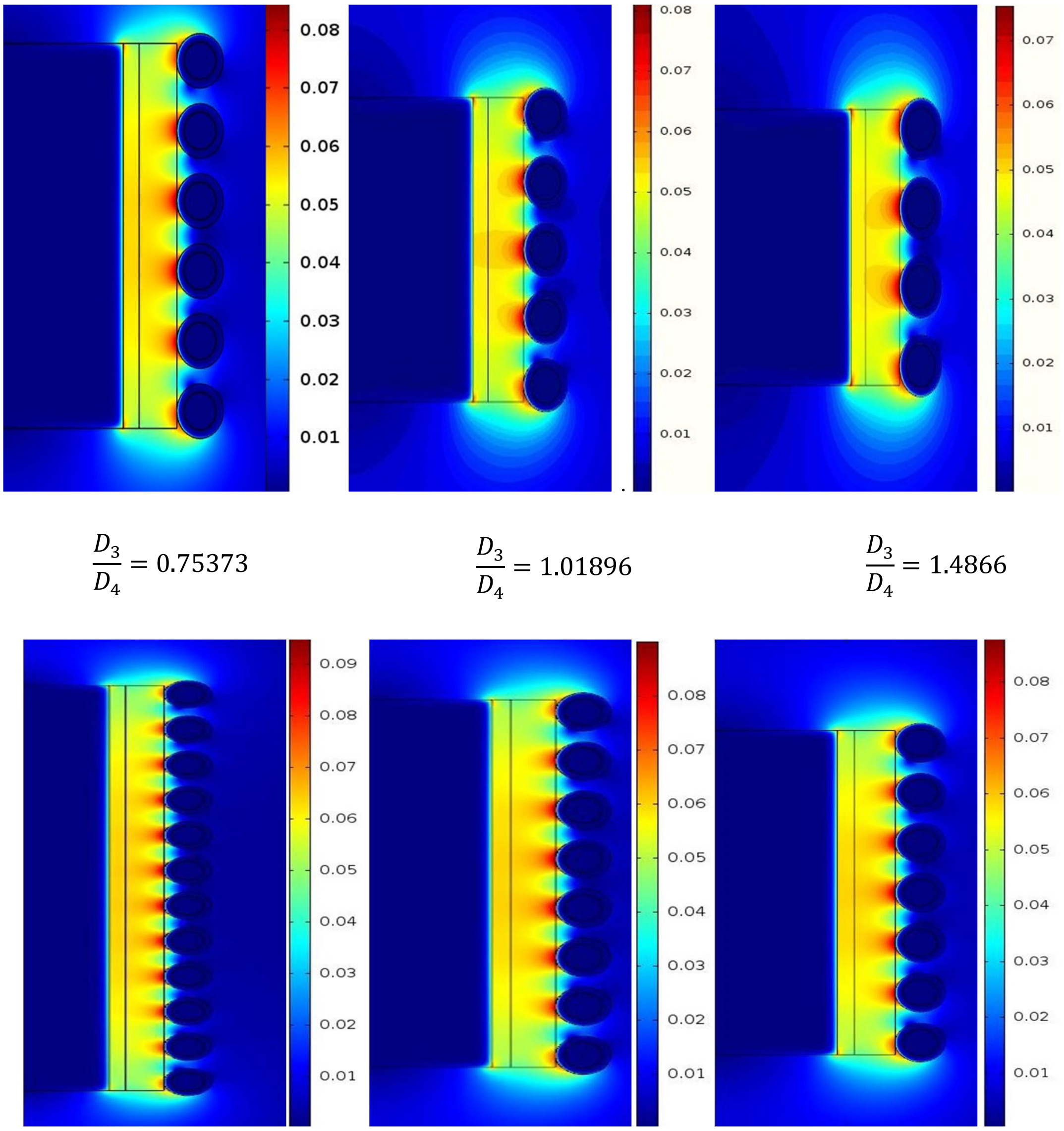


(الف)



(ب)

شکل ۳-۱۸: تغییرات دما نسبت به $\frac{D_3}{D_4}$مختلف در زمان ثابت در سه فرکانس مختلف ۱۰ ،۲۰، ۳۰ کیلوهرتز و جریان ثابت ۱۳۰۰ آمپر و حجم ثابت بوته نسبت‌های $\frac{D_1}{D_3} = 1.6237$ و $\frac{L}{D_4} = 0$ و $\frac{D_2}{D_4} = 0.9104$ (الف) آلومینیوم در زمان ۷۰۰ ثانیه، (ب) استیل در زمان ۷۰ ثانیه



$\frac{D_3}{D_4} = 0.75373$ $\frac{D_3}{D_4} = 1.01896$ $\frac{D_3}{D_4} = 1.4866$

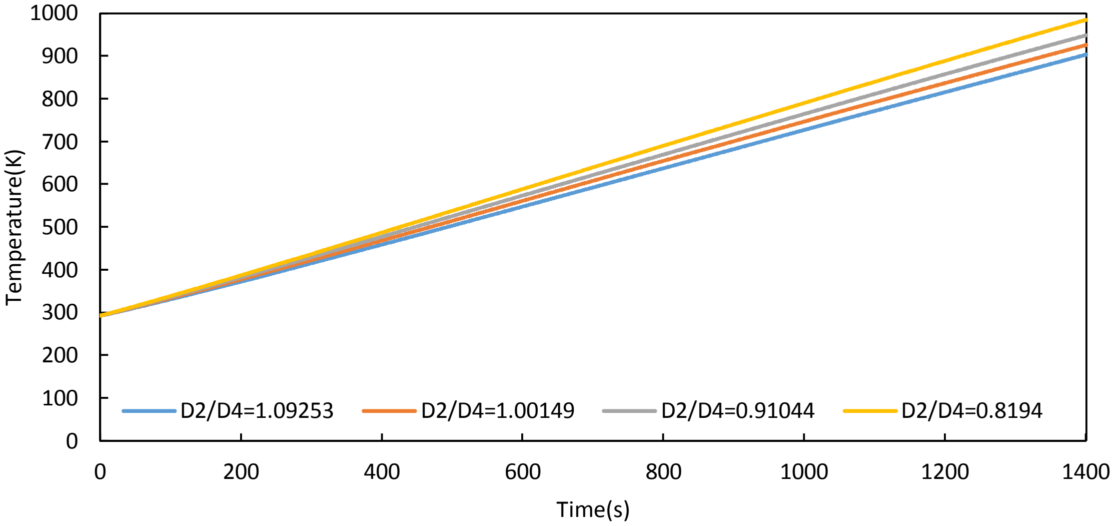
$\frac{D_3}{D_4} = 0.2804$ $\frac{D_3}{D_4} = 0.47305$ $\frac{D_3}{D_4} = 0.58646$

شکل ۳-۱۹: چگالی میدان مغناطیسی (تسلا) نسبت به $\frac{D_3}{D_4}$ مختلف در زمان ثابت در سه فرکانس مختلف ۲۰ کیلوهرتز و جریان ثابت ۱۳۰۰ آمپر و حجم ثابت بوته نسبت‌های $\frac{D_1}{D_3} = 1.6237$ و $\frac{L}{D_4} = 0$ و $\frac{D_2}{D_4} = 0.9104$

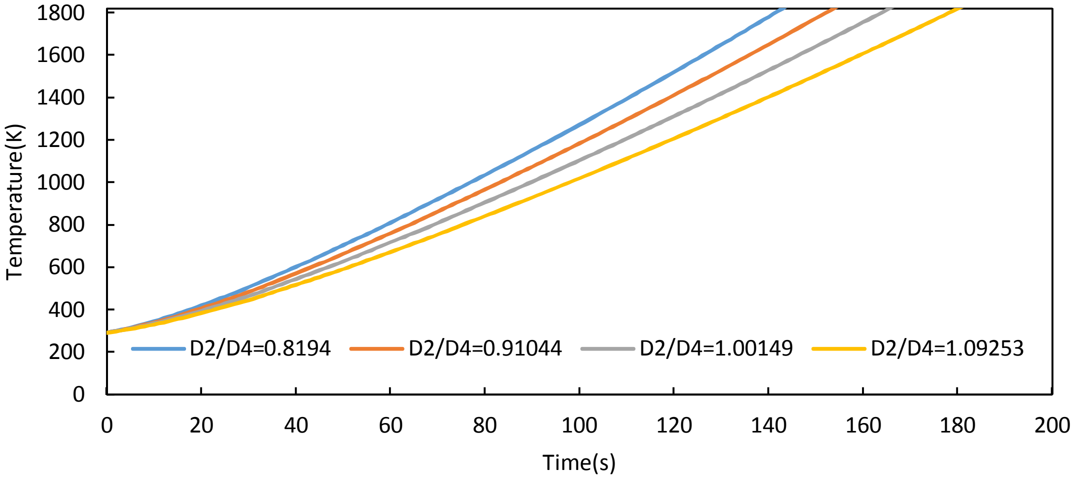
۳-۲-۴- تأثیر تغییر فاصله دورهای کویل بر زمان رسیدن به دمای ذوب

با تغییر فاصله مراکز کویل‌ها، طول سیم‌پیچ تغییر می‌کند. با بررسی تأثیر تغییر نسبت طول سیم‌پیچ(D_2) به ارتفاع بوته(D_4) زمان رسیدن به دمای ذوب باکم شدن فاصله کوتاه‌تر می‌شود. با کمتر شدن فاصله، مقدار چگالی جریان بین سیم‌پیچ‌ها افزایش‌یافته و در مدت زمان کمتری ماده مذاب می‌شود. همان‌طور در شکل ۳-۲۱ نشان داده‌شده است، هرچقدر فاصله کویل‌ها کمتر باشد، دما

در بازه زمانی ثابت بیشتر افزایش‌یافته است.

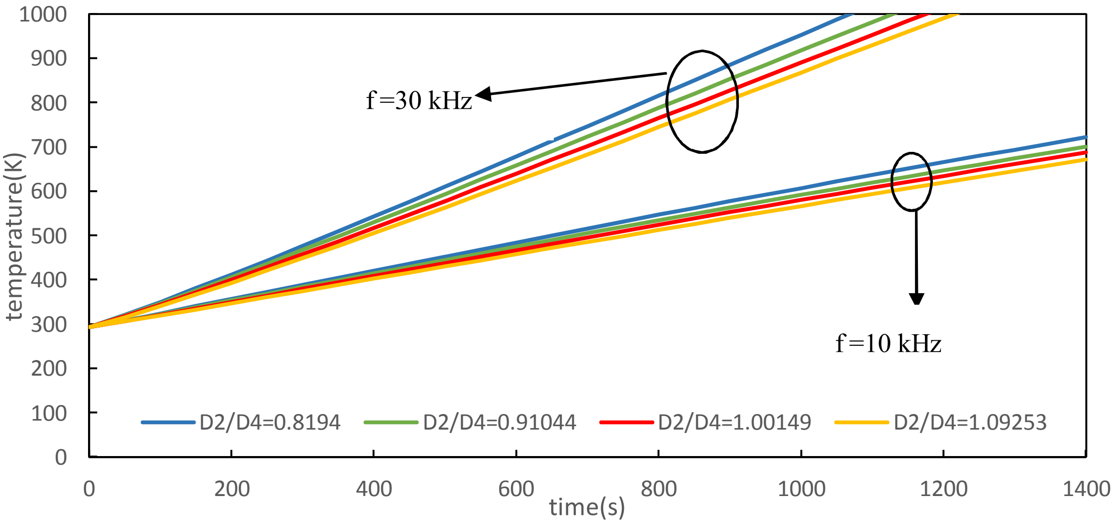


(الف)

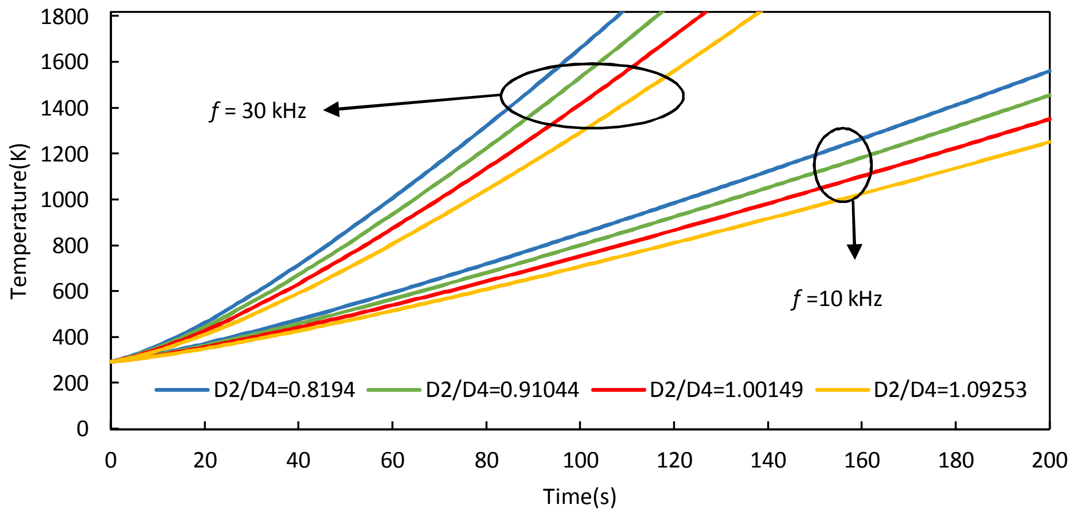


(ب)

شکل ۳-۲۰: تأثیر تغییرات نسبت $\frac{D_2}{D_4}$ برحسب درگذر زمان، جریان ۱۳۰۰آمپر فرکانس ۲۰کیلوهرتز و پارامترهای ثابت $\frac{D_1}{D_3} = 1.6237$، $\frac{L}{D_4} = 0$
(الف) آلومینیوم، (ب) استیل

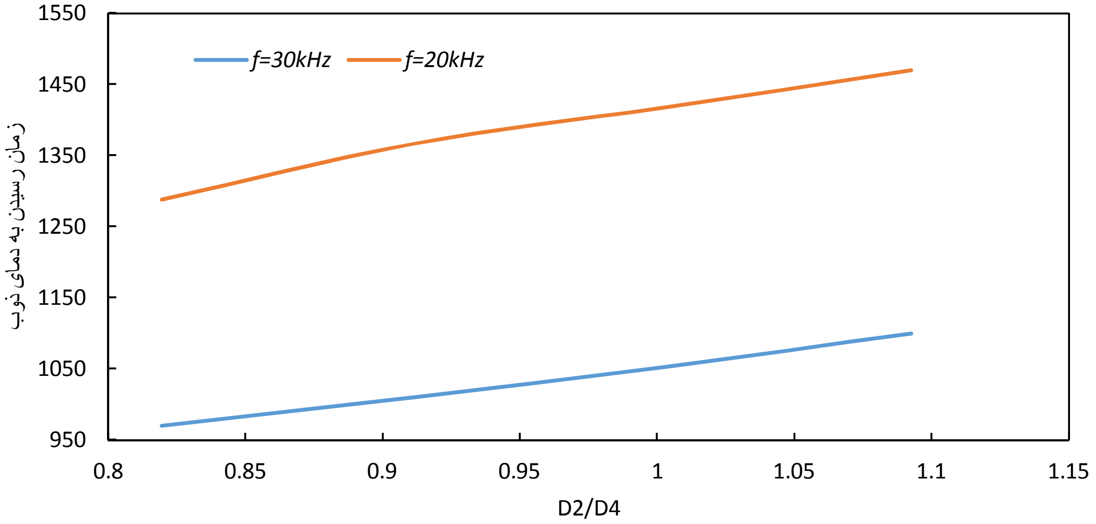


(الف)



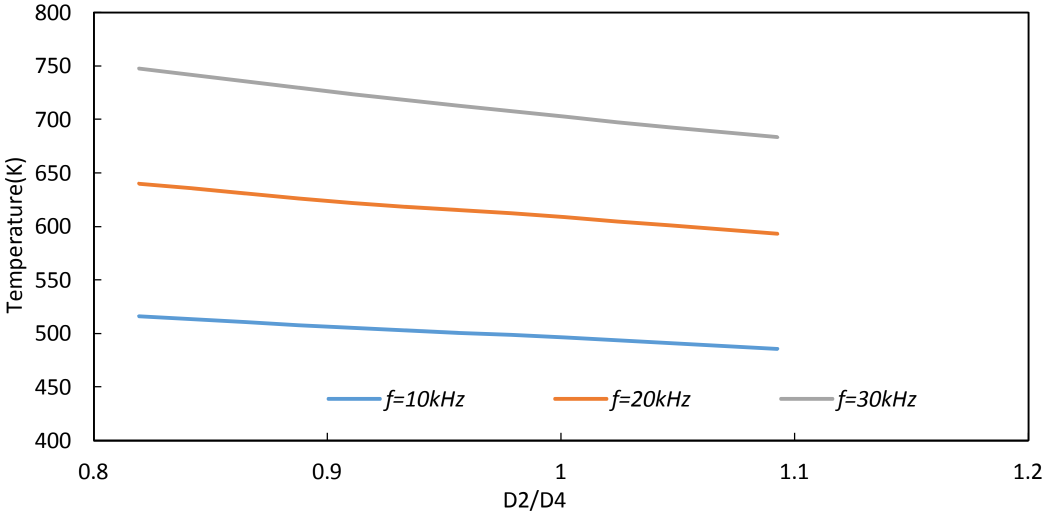
(ب)

شکل ۳-۲۱: تاثیرتغییرات نسبت $\frac{D_2}{D_4}$ بردما در گذر زمان، جریان ۱۳۰۰آمپر فرکانس ۱۰ و ۳۰ کیلو هرتز، $\frac{L}{D_4} = 0$ ، $\frac{D_1}{D_3} = 1.6237$ ،
(الف)آلومینیوم، (ب) استیل



شکل ۳-۲۲: تأثیر تغییرات نسبت $\frac{D_2}{D_4}$ بر زمان رسیدن به دمای ذوب آلومینیوم در جریان ۱۳۰۰آمپر و فرکانس ۲۰کیلوهرتز، $\frac{D_1}{D_3} = 1.6237$، $\frac{L}{D_4} = 0$

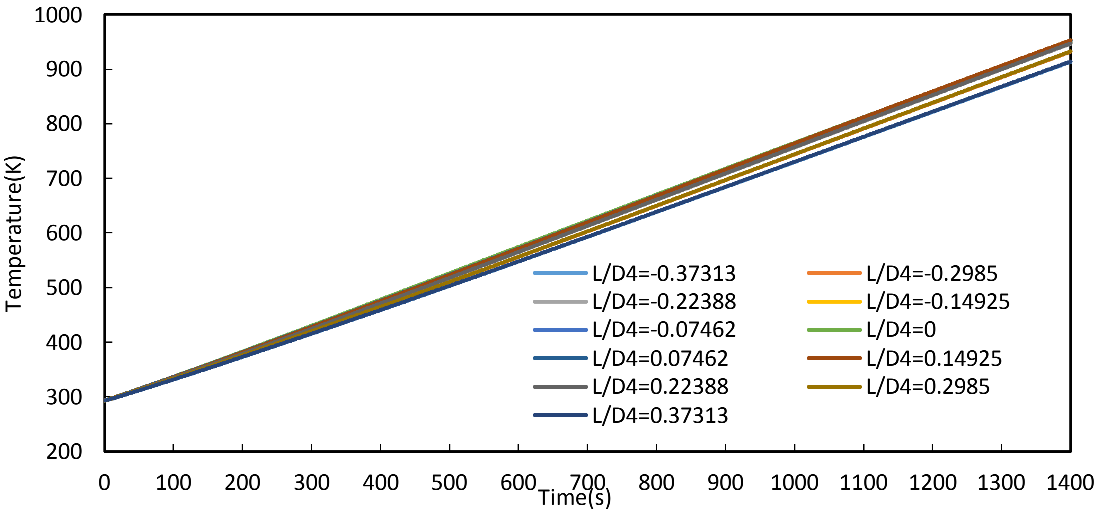
همان‌طور که در شکل ۳-۲۴ در سه فرکانس متفاوت تغییر نسبت ارتفاع سیم‌پیچ را نسبت به ارتفاع بوته بررسی کردیم نتیجه گرفته شد با کاهش ۱۰ درصدی فاصله بین سیم‌پیچ‌ها میانگین دما افزایش‌یافته است و با افزایش ۱۰ و ۲۰ درصدی فاصله کویل‌ها دمای میانگین کاهش می‌یابد. هر چقدر که فاصله کویل‌ها کمتر باشد، چگالی جریان در بین سیم‌پیچ‌ها بیشتر خواهد شد و منجر به افزایش جریان القاشده در قطعه کار می‌شود. بنابراین با در نظر گرفتن امکان نزدیک‌تر سیم‌پیچ‌ها به هم که عملاً نیز امکان‌پذیر است، کمترین میزان فاصله ممکن را انتخاب می‌کنیم.



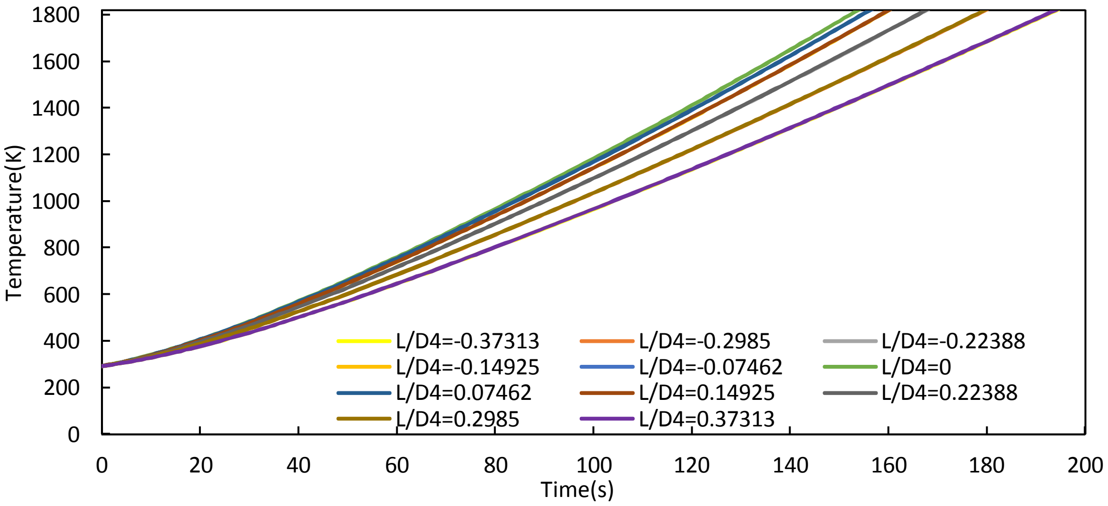
شکل ۳-۲۳: تأثیر تغییرات نسبت $\frac{D_2}{D_4}$ بر دما آلومینیوم در فرکانس‌های مختلف در زمان ثابت ۷۰۰ ثانیه و جریان ۱۳۰۰آمپر، $\frac{L}{D_4}=0$، $\frac{D_1}{D_3}=1.6237$

۳-۲-۵- تغییر محل قرارگیری کویل‌ها در اطراف بوته

بررسی محل قرارگیری سیم‌پیچ در اطراف بوته یکی از پارامترهای تأثیرگذار در طراحی کوره است. محل قرارگیری سیم‌پیچ در طراحی اولیه مطابق با شکل۲-۱ در وسط بوته در یک فاصله برابر از انتها و ابتدای بوته قرارداده‌شده است($\frac{L}{D_4}=0$). برای بررسی فوق، سیم‌پیچ‌ها نسبت به طراحی اولیه به نسبت حداکثر $\frac{L}{D_4}=0.373$ و حداقل $\frac{L}{D_4}=0.149$ به سمت بالا و به همین ترتیب در جهت پایین جابجا نمودیم. با انجام محاسبات و به دست آوردن میانگین دمایی در هر یک از حالات ذکرشده به نمودارهای۳-۲۵ و۳-۲۶ خواهیم رسید.

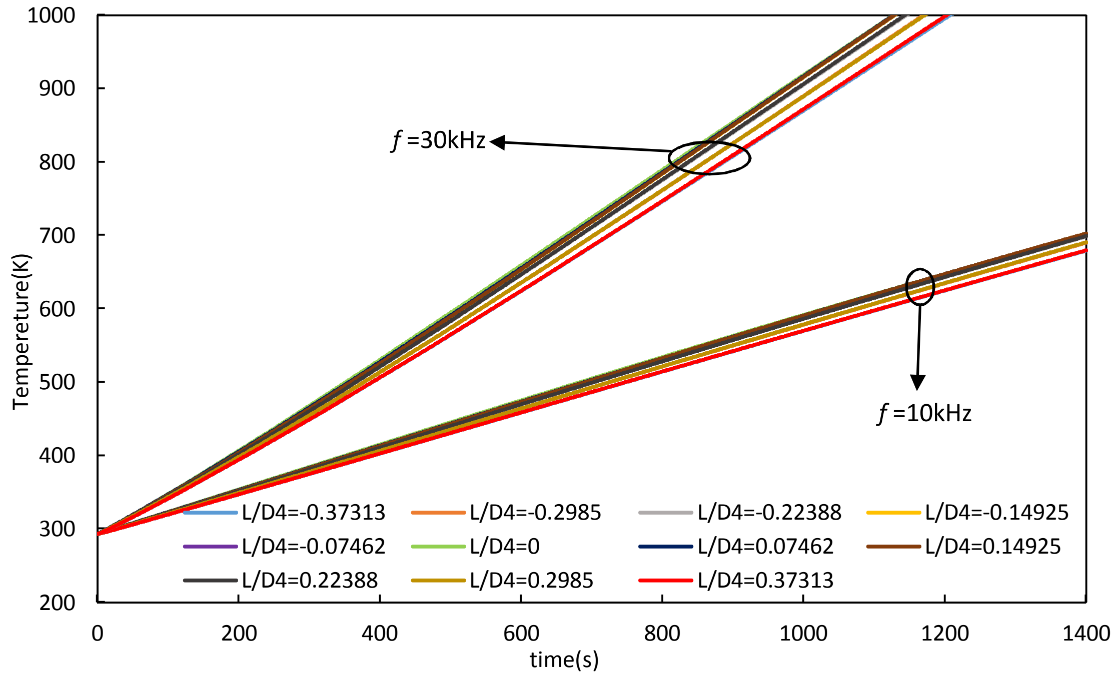


(الف)

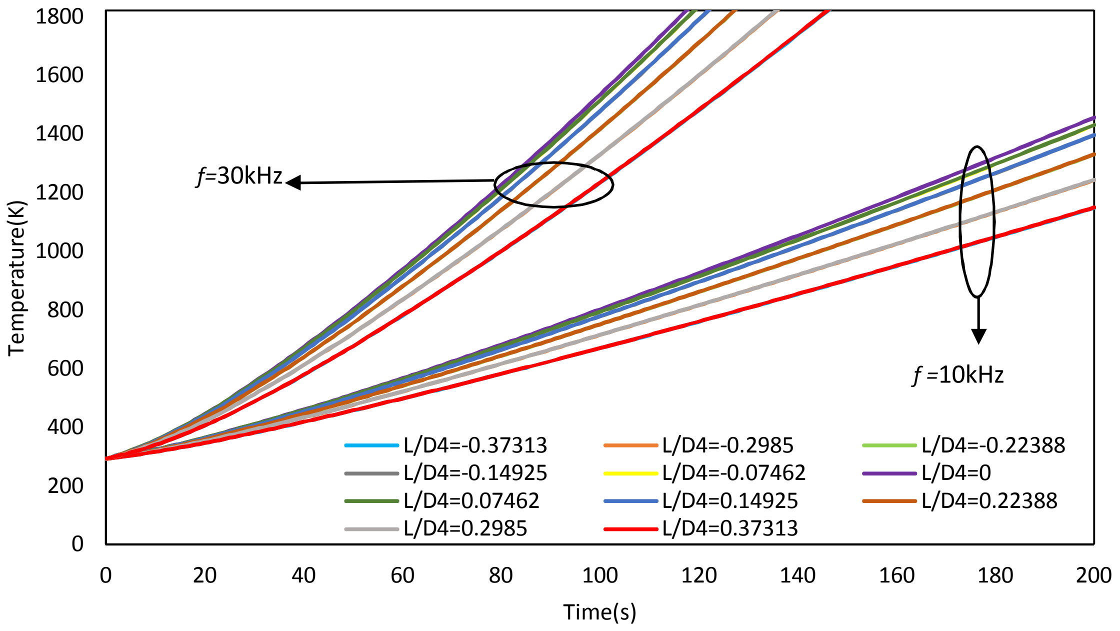


(ب)

شکل ۳-۲۴: تأثیر تغییرات نسبت $\frac{l}{D_4}$بر دما درگذر زمان، جریان ۱۳۰۰آمپر فرکانس ۲۰ کیلوهرتز، $\frac{D_1}{D_3} = 1.6237$،
$\frac{D_2}{D_4} = 0.91044$ (الف) آلومینیوم، (ب) استیل



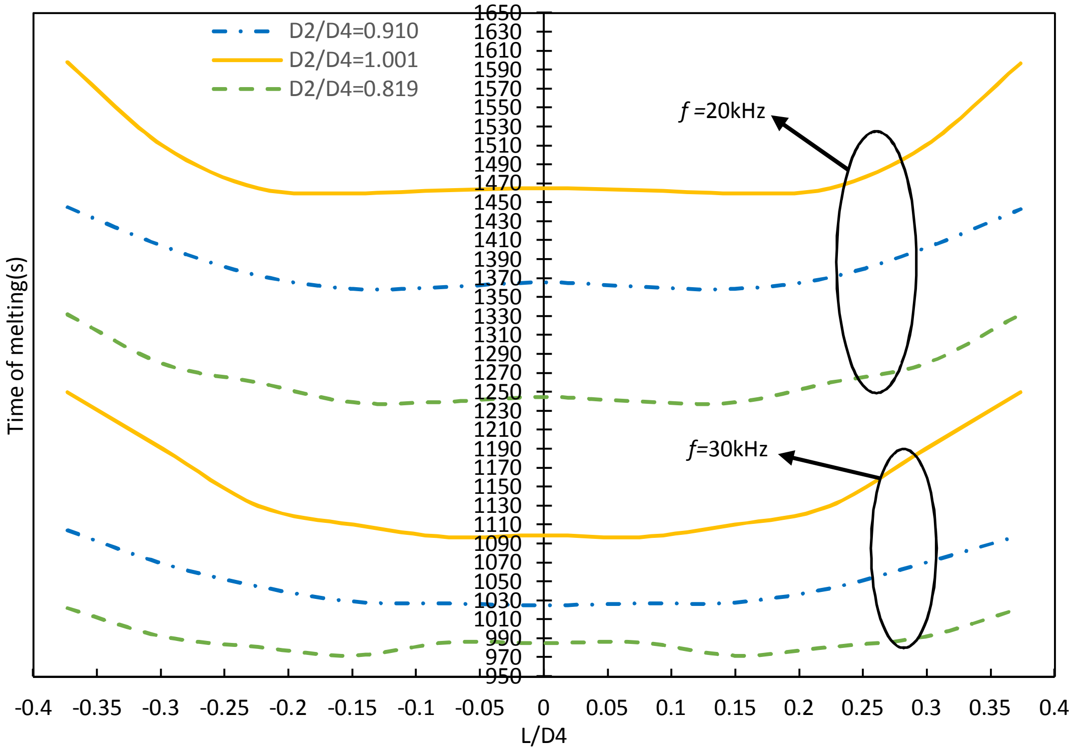
(الف)



(ب)

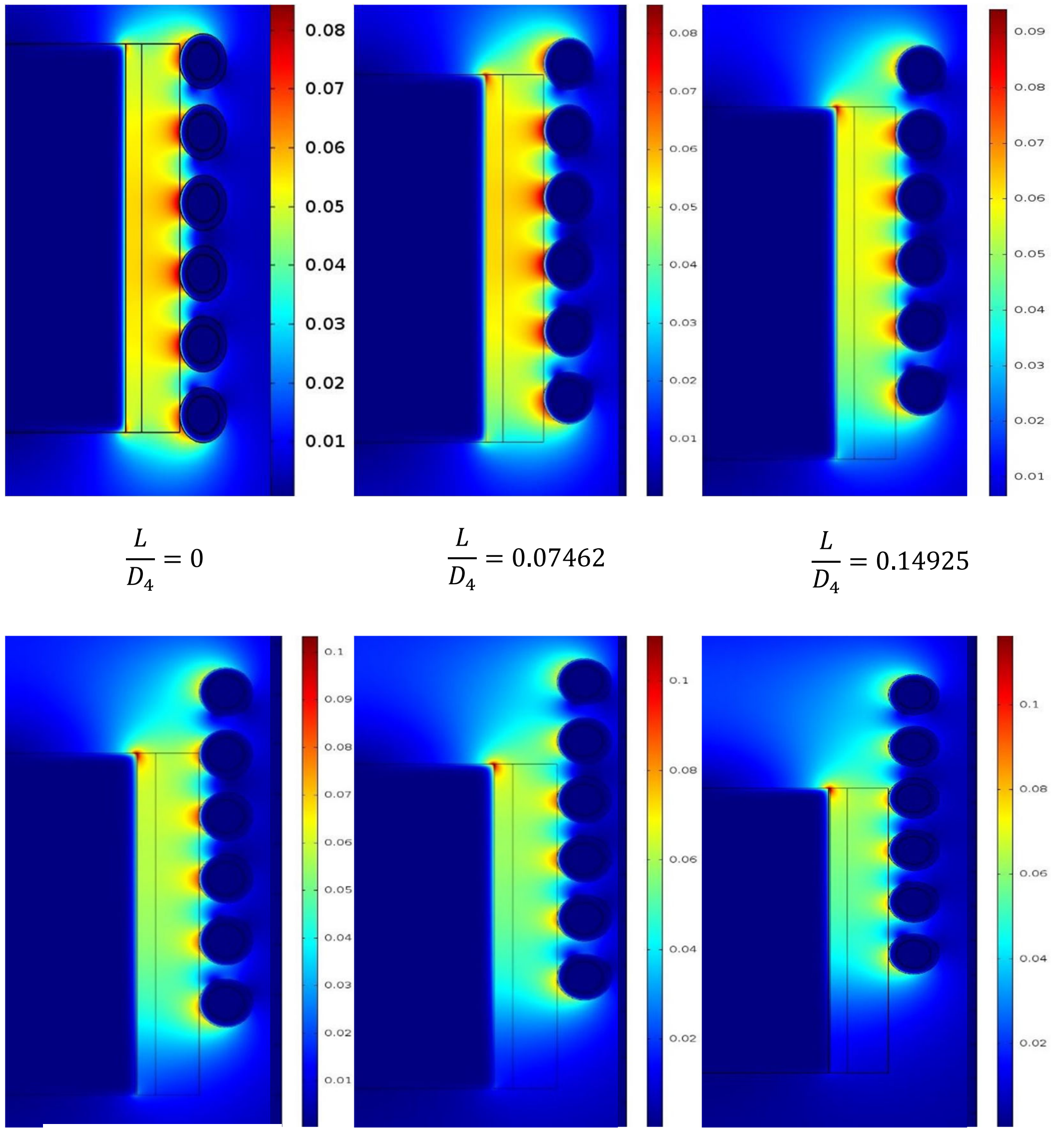
شکل ۳-۲۵: تأثیر تغییرات نسبت $\frac{l}{D_4}$ بر دما درگذر زمان، جریان ۱۳۰۰آمپر فرکانس ۱۰ و۳۰ کیلوهرتز، $\frac{D_1}{D_3} = 1.6237$، $\frac{D_2}{D_4} = 0.91044$ (الف) آلومینیوم، (ب) استیل

مطابق شکل۳-۲۷ به این نتیجه می‌رسیم که مکان $\frac{L}{D_4}=0$ برای ذوب ماده مذاب مناسب است. از صفرتا نسبت ۰.۱۴۹ زمان رسیدن به دمای ذوب کمتر شده است ولی در نسبت‌های بالاتر از ۰.۱۴۹ زمان رسیدن به ذوب افزایش زیادی یافته است و دیرتر به مطلوب موردنظر مسئله می‌رسیم. پس مقدار L در فاصله۰ تا ۰.۰۲ بهینه جواب کوره را محقق می‌کند.



شکل ۳-۲۶: نمودار تغییرات زمان رسیدن به دمای ذوب آلومینیوم نسبت به $\frac{L}{D_4}$ مختلف در۳ نسبت مختلف $\frac{D_2}{D_4}$ در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و جریان ۱۳۰۰ آمپر و ۶ حلقه کویل $\frac{D_1}{D_3}=1.6237$

نرم چگالی جریان در ۶ حالت $\frac{L}{D_4}$ مختلف در شکل ۳-۲۸ بررسی شده است. همان‌طور که از نمودار می‌توان نتیجه گرفت از مقدار صفرتا ۰/۱۴ این نسبت چگالی جریان ۰/۰۸ تسلا در عمق نفوذ ماده متمرکز است ولی برای مقادیر بالاتر $\frac{L}{D_4}$ چگالی جریان مغناطیسی به ۰/۱ تسلا رسیده است ولی تمرکز آن در عمق نفوذ کاهش‌یافته است و در اصل سیم‌پیچ‌هایی که اطراف ماده را در برنگرفته‌اند تأثیری در ذوب ندارند.



$\frac{L}{D_4} = 0$ $\frac{L}{D_4} = 0.07462$ $\frac{L}{D_4} = 0.14925$

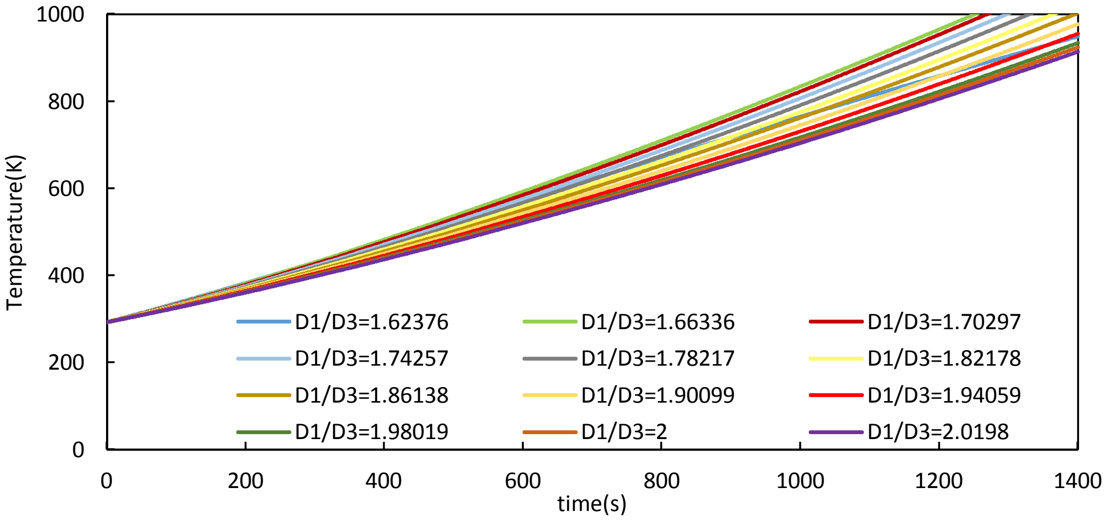
$\frac{L}{D_4} = 0.22388$ $\frac{L}{D_4} = 0.2985$ $\frac{L}{D_4} = 0.37313$

شکل۳-۲۸: نمایش چگالی میدان مغناطیسی (تسلا) در $\frac{L}{D_4}$ مختلف برای آلومینیوم در زمان ۱۴۰۰ ثانیه جریان سیم‌پیچ‌ها ۱۳۰۰ آمپر و فرکانس ۲۰ کیلوهرتز، $\frac{D_2}{D_4} = 0.9104$, $\frac{D_1}{D_3} = 1.62376$

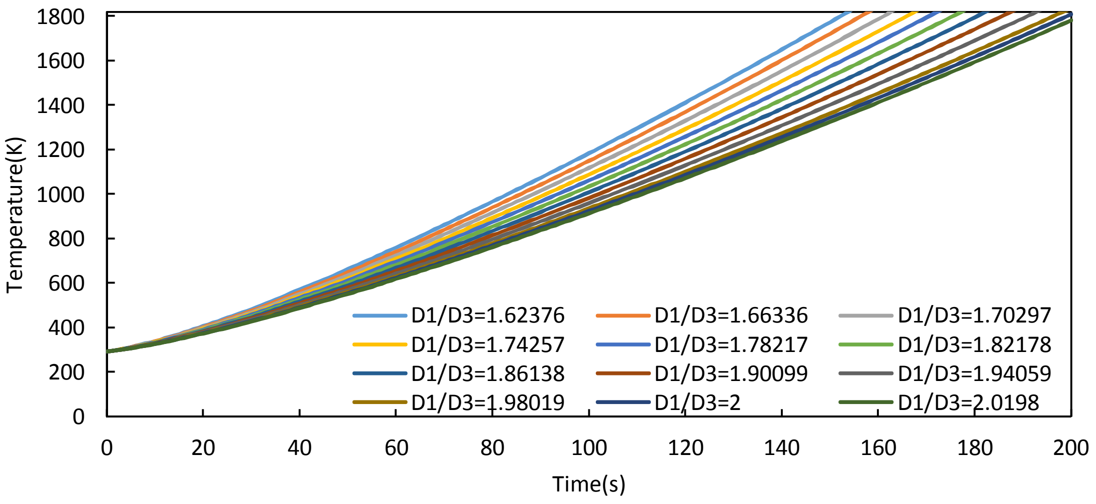
۳-۲-۶- بررسی تأثیر تغییر $\frac{D_1}{D_3}$

برای پیدا کردن بهترین محل برای قرارگیری کویل در اطراف بوته، بین کویل و عایق اطراف بوته فاصله مجازی ایجادشده و اثرات مطالعه شده است. همان‌طور که در شکل ۲-۱ نشان داده شده است در طرح اولیه بین کویل و عایق هیچ فاصله وجود نداشت. با افزایش فاصله، به بررسی تأثیر نسبت $\frac{D_1}{D_3}$

که همان قطر اصلی کویل بر قطر بوته است پرداخته‌شده است. در نمودار ۳-۲۹ تغییرات دما نسبت به زمان در$\frac{D_1}{D_3}$ مختلف آمده است. همان طورکه در شکل۴-۳۱ (الف) مشاهده می‌شود، بیشینه میانگین دمای آلومینیوم را در نسبت $\frac{D_1}{D_3}=1.66$ داریم. از نسبت بیشتر $\frac{D_1}{D_3}=1.7$ دما افت محسوسی پیدا می‌کند و سیر نزولی دارد. بهترین حالت قرارگیری، همان فاصله $\frac{D_1}{D_3}=1.643$ تا $\frac{D_1}{D_3}=1.683$ برای آلومینیوم است. که در این بازه در $\frac{D_1}{D_3}=1.66$ فاصله بیشینه میانگین دما را برای آلومینیوم در شکل ۳-۳۱ (الف) شاهد هستیم. این بررسی برای استیل در قسمت (ب) شکل ۳-۲۹ و ۳-۳۰ در فرکانس‌های مختلف انجام‌شده است. نتیجه حاصله از نمودارهای استیل حاکی است که افزایش فاصله دما درگذر زمان را کاهش داده است. همچنین مطابق شکل ۳-۳۱ (ب) و تکرار این بررسی در ۳ فرکانس برای استیل، بهترین محل قرارگیری نسبت $\frac{D_1}{D_3}=1.623$ شده است که فاصله بین کویل و عایق صفر است. با افزایش فاصله، دما در زمان ثابت و شرایط ثابت کاهش‌یافته است.

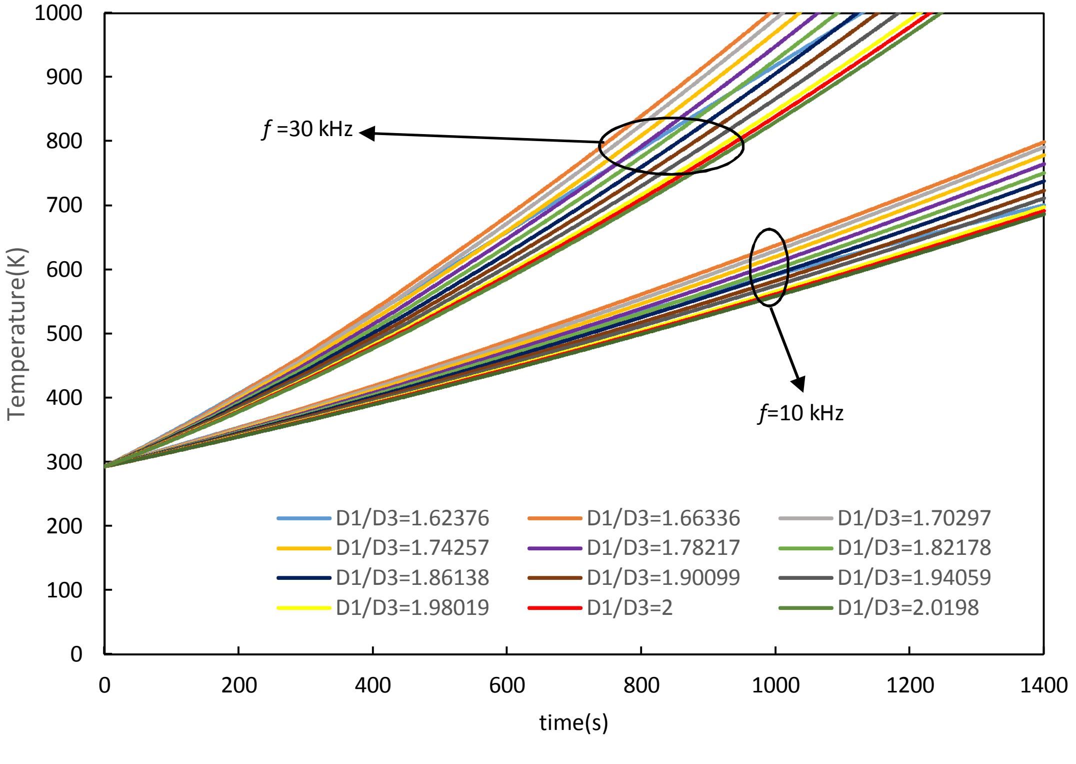


(الف)

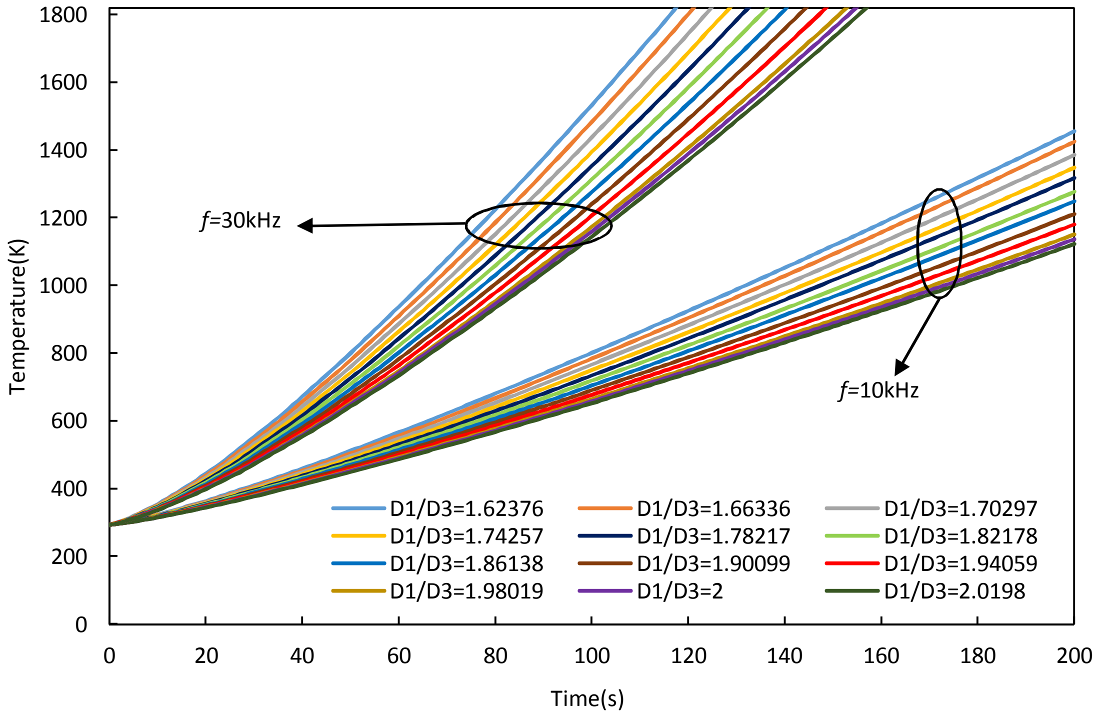


(ب)

شکل ۳-۲۷: نمودار تغییرات دما درگذر زمان نسبت به $\frac{D_1}{D_3}$ مختلف در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و جریان ۱۳۰۰ آمپر و ۶ حلقه کویل، $\frac{D_2}{D_4} = 0.9104$، $\frac{L}{D_4} = 0$

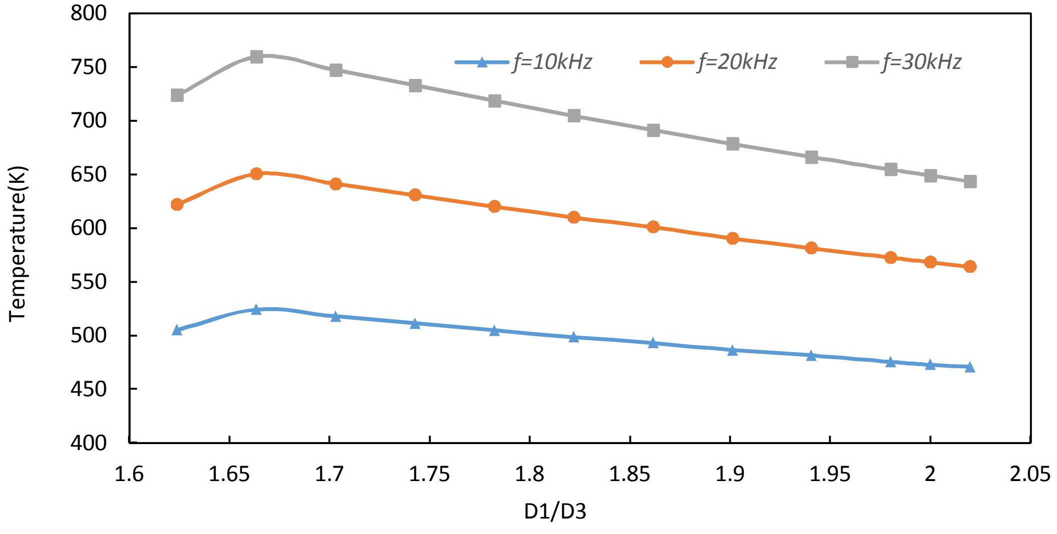


(الف)

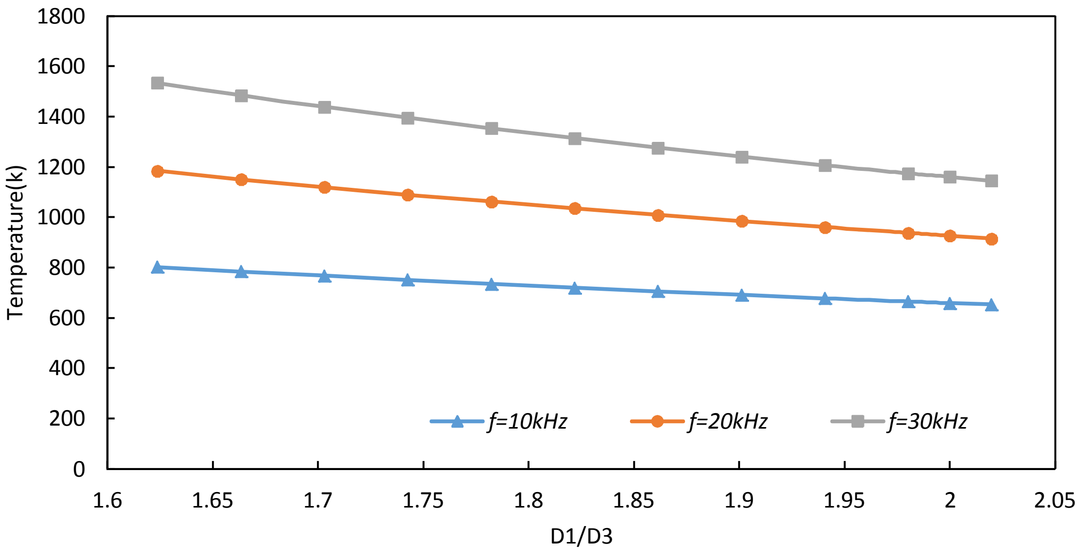


(ب)

شکل ۳-۲۸: نمودار تغییرات دما درگذر زمان نسبت به $\frac{D_1}{D_3}$ مختلف در فرکانس ۳۰ و ۱۰ کیلوهرتز و جریان ۱۳۰۰ آمپر و ۶ حلقه کویل، $\frac{D_2}{D_4} = 0.9104$، $\frac{L}{D_4} = 0$



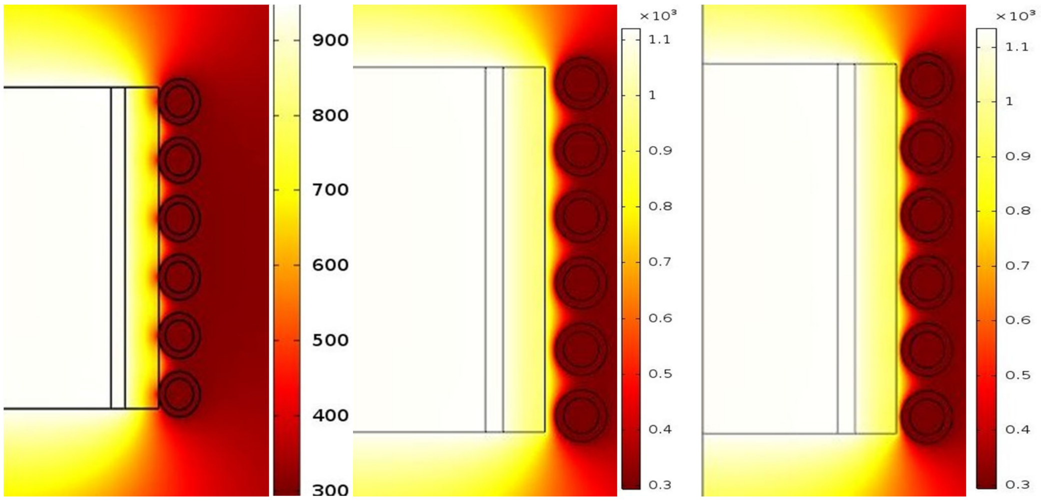
(الف)



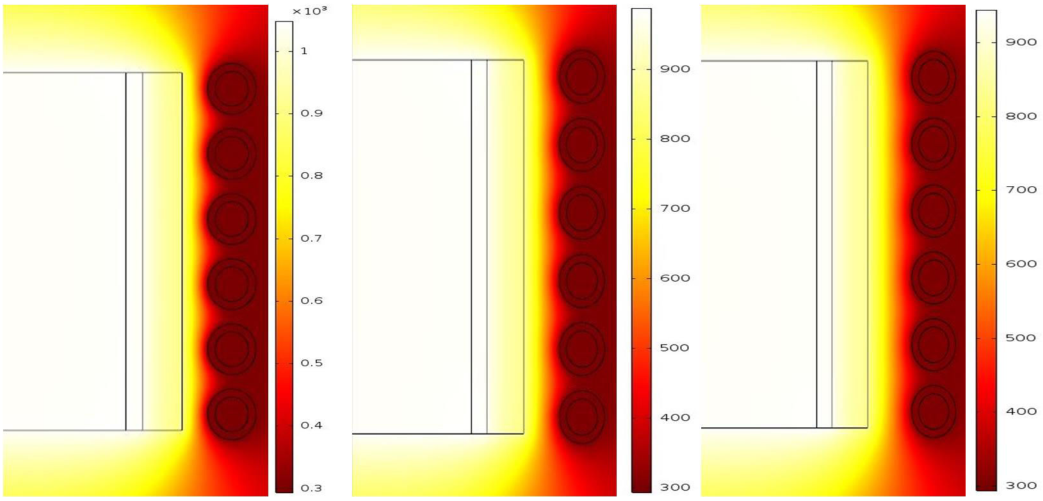
(ب)

شکل ۳-۲۹: نمودار تغییرات دما نسبت به $\frac{D_1}{D_3}$ مختلف در فرکانس مختلف و جریان ۱۳۰۰ آمپر و ۶ حلقه کویل
$\frac{D_2}{D_4} = 0.9104$ ، $\frac{L}{D_4} = 0$ الف) آلومینیوم در زمان ۷۰۰ ثانیه،(ب) استیل در زمان ۱۰۰ثانیه

شکل ۳-۳۲ تغییرات دما در کوره القایی در $\frac{D_1}{D_3}$ مختلف نمایش می‌دهد. با افزایش فاصله بین کویل و عایق بیش از ۰.۰۲ و نسبت $\frac{D_1}{D_3}$ بالاتر از ۰.۶۶ مطابق کانتور دما حرارت تولیدشده در عایق و بوته نیز افزایش‌یافته و هوا اطراف آن‌ها نیز تحت این افزایش دما قرارگرفته است بنابراین تمرکز کافی از روی ماده گرم شونده برداشته‌شده و صرف محیط اطراف می‌گردد بنابراین افزایش بیش از ۰.۰۲ فاصله به‌صرفه نخواهد بود.



$\frac{D_1}{D_3} = 1.62376$ $\frac{D_1}{D_3} = 1.66336$ $\frac{D_1}{D_3} = 1.70297$

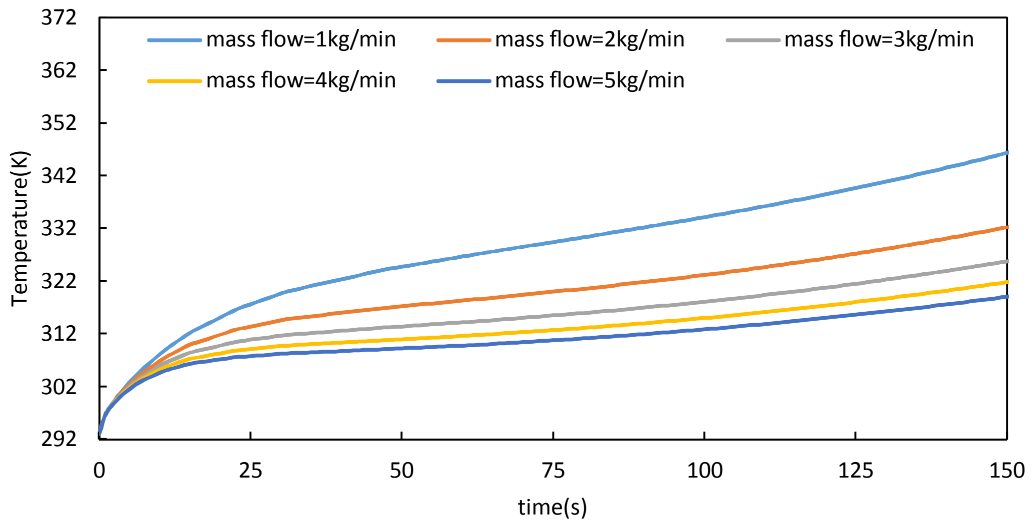


$\frac{D_1}{D_3} = 2$ $\frac{D_1}{D_3} = 1.92079$ $\frac{D_1}{D_3} = 1.82178$

شکل ۳-۳۰: کانتور تغییرات دما (کلوین)به ازای $\frac{D_1}{D_3}$ مختلف در زمان ۱۳۰۰ ثانیه برای آلومینیوم و جریان عبوری از کویل‌ها
۱۳۰۰ آمپر با فرکانس ۲۰کیلوهرتز و پارامترهای ثابت$\frac{D_2}{D_4} = 0.91044, \frac{L}{D_4} = 0$

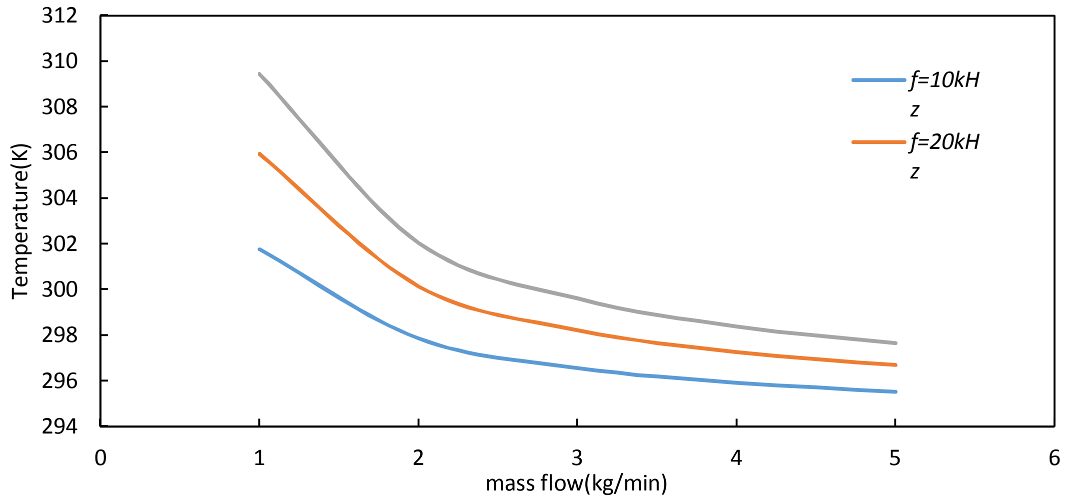
۳-۲-۷- بررسی تأثیر تغییر دبی آب سیستم خنک کاری کوره

بررسی تأثیر خنک کاری بر دمای میانگین خط گذرنده از جداره داخلی کویل، از دبی ۱kg/min تا۵ kg/min در شکل۳-۳۳ نمایش داده‌شده است. مشاهده می‌شود باگذشت زمان در دبی ثابت، از ۲۰۰ ثانیه به بعد برای آلومینیوم و از۲۵ ثانیه به بعد برای استیل، تغییرات دما جداره کویل توسط خنک کاری کنترل‌شده و تغییرات ناچیزی خواهد داشت. همان‌طور که در شکل ۳-۳۴ پیداست نتایج میانگین دما کویل با افزایش دبی در فرکانس‌های مختلف، کاهش پیدا می‌کند. نتیجه گرفته می‌شود که با افزایش دبی بیش‌ازحد لزوم که برای کاهش دمای سیم‌پیچ لازم است، باعث خنک شدن بیش‌ازحد سیم‌پیچ شده است. از مقایسه شکل ۳-۳۴ با ۳-۳۵ دمای کویل مسی با دو برابر شدن فرکانس برای آلومینیوم ۴ درجه تغییرات و برای استیل ۲۰ درجه تغییر دما مشاهده می‌شود. درصورتی‌که با دو برابر شدن جریان ۳۰ درجه تغییر دما برای آلومینیوم و۱۰۰ درجه برای استیل در جداره کویل مسی مشاهده می‌شود. بنابراین در طراحی کوره القایی با تغییر در جریان ورودی مستلزم تغییر در سیستم خنک کاری هستیم.

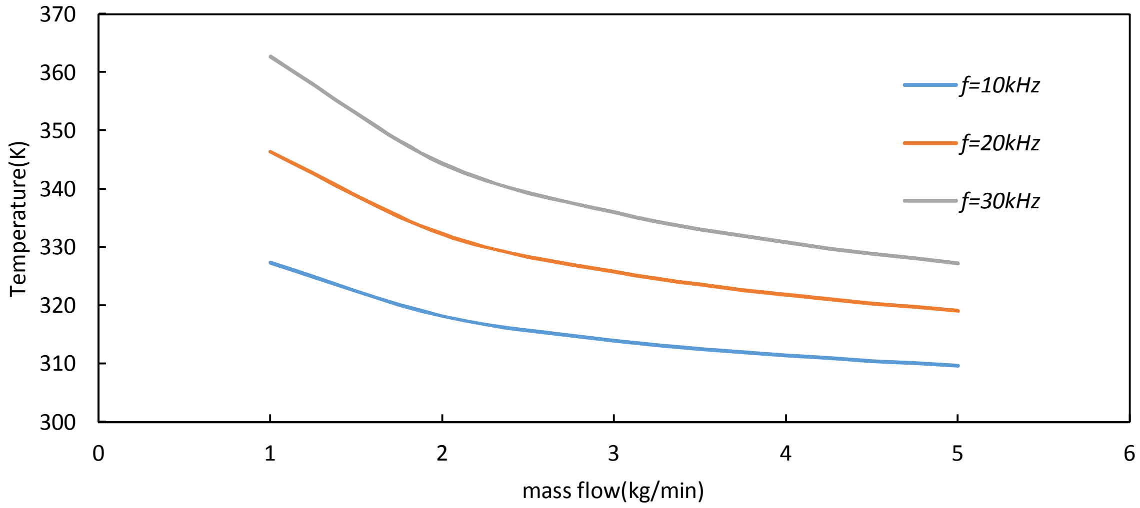


شکل ۳-۳۱: تغییرات دما استیل درگذر زمان به ازای دبی‌های متفاوت جریان عبوری سیم‌پیچ ۱۳۰۰ آمپر فرکانس۲۰ کیلوهرتز

$$\frac{D_2}{D_4} = 0.91044, \frac{L}{D_4} = 0 \frac{D_1}{D_3} = 1.62376$$

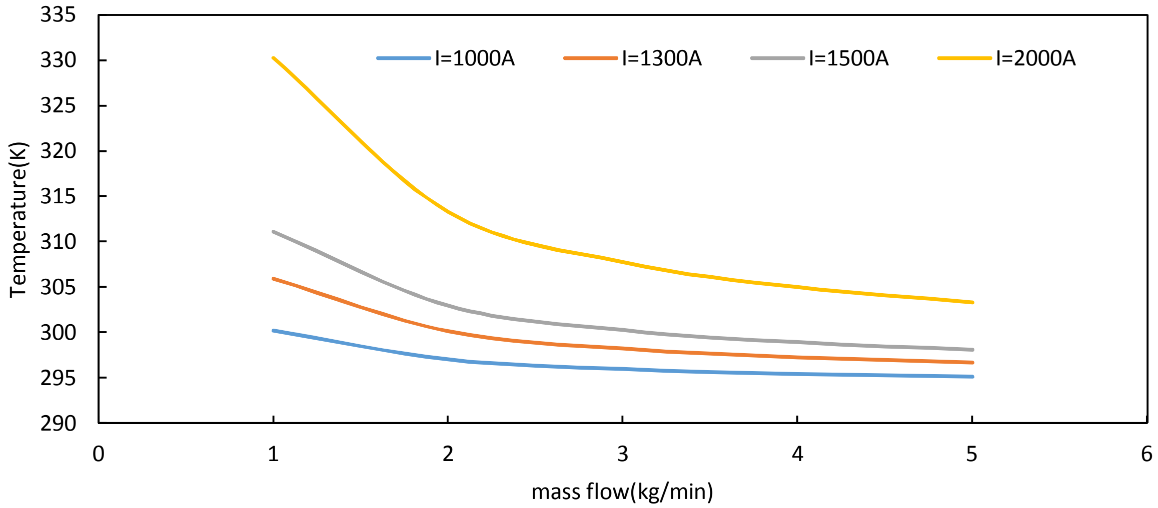


(الف)

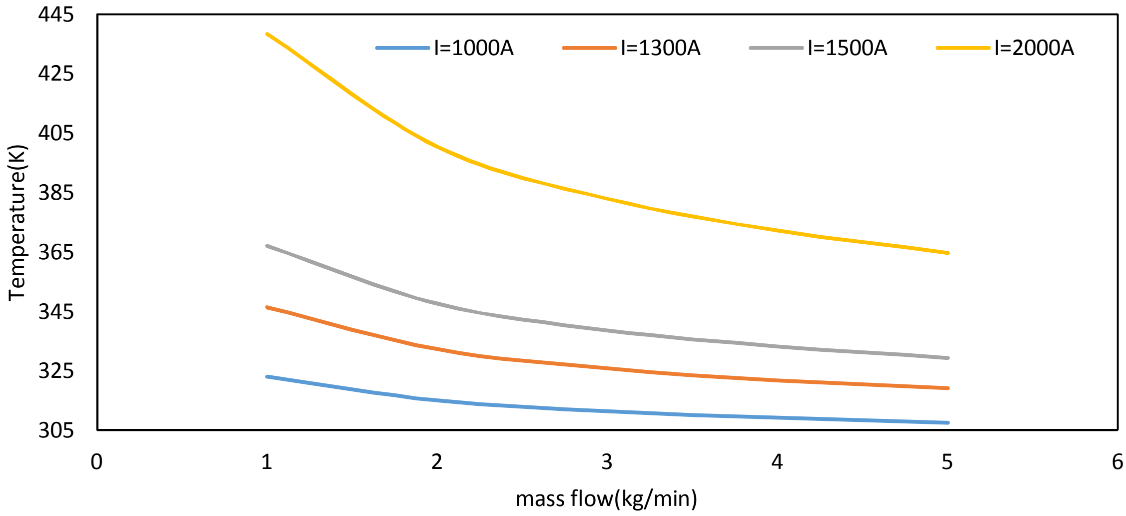


(ب)

شکل ۳-۳۲: تغییرات دما به ازای دبی‌های متفاوت جریان عبوری سیم‌پیچ ۱۳۰۰ آمپر و فرکانس ۲۰
$\frac{D_2}{D_4} = 0.91044, \frac{L}{D_4} = 0\ \frac{D_1}{D_3} = 1.62376$،
الف)آلومینیوم در زمان ۱۳۰۰ثانیه، ب)استیل در زمان ۱۵۰ ثانیه



(الف)



(ب)

شکل ۳-۳۳: نمایش تغییرات دما با افزایش دبی در جریان‌های مختلف و فرکانس ثابت ۲۰ کیلوهرتز و پارامترهای ثابت $\frac{D_1}{D_3} = 1.62376$ $\frac{L}{D_4} = 0$, $\frac{D_2}{D_4} = 0.91044$ الف) آلومینیوم در زمان ۱۳۰۰ ثانیه، ب) استیل در زمان ۱۵۰ثانیه

فصل چهارم: جمع‌بندی

۴-۱- ارائه نتایج

در این تحقیق به بررسی عددی انتقال حرارت و میدان مغناطیسی در یک کوره ذوب القایی خلأ پرداخته‌شده است. برای حل معادلات کوپله حرارت و مغناطیس از روش المان محدود استفاده‌شده است. توزیع دما و شار مغناطیسی و انتقال حرارت ناپایا آلومینیوم برای مدل هندسی در نظر گرفته‌شده، تا رسیدن به دمای ذوب مورد بررسی قرارگرفته شده است. با بررسی تغییرات دما در زمان‌های اولیه مشاهده شد که در عمق نفوذ مقاومت حرارتی بیشتری ایجادشده است. که همین مقاومت بالا سبب تلفات حرارتی گردابی در ماده گرم شونده می‌شود. این حرارت باگذشت زمان از طریق انتقال حرارت هدایتی به مرکز ماده گرم شونده منتقل‌شده است. همچنین مشاهده شد چگالی جریان مغناطیسی در قسمت داخلی کویل‌ها به بیشینه مقدار خود ۰.۰۰۸ تسلا برای آلومینیوم رسیده است. درصورتی‌که برای استیل بیشینه چگالی جریان مغناطیسی در داخل عمق نفوذ ماده به مقدار ۴.۵ تسلا رسیده است.

مجموع منبع حرارتی در کوره‌های القایی شامل حرارت مغناطیسی و حرارت مقاومتی است. در این تحقیق تلفات در کوره القایی در دو حالت مختلف که ماده گرم شونده فرو مغناطیسی یا غیر مغناطیسی است، موردبررسی قرارگرفته است. حرارت مغناطیسی فقط در مواد گرم شونده فرو مغناطیسی مشاهده می‌شود. تلفات مقاومتی شامل تلفات گردابی(فوکو) در داخل ماده گرم شونده و تلفات مقاومتی در سیم‌پیچ کوره القایی است. تلفات هیسترزیس و جریان گردابی در سیستم کوره القایی مطلوب و گرمایش و ذوب از طریق این تلفات تحقق‌پذیر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشینه تلفات بر واحد حجم در داخل عمق نفوذ آلومینیوم کمتر از تلفات بر واحد حجم داخل سیم‌پیچ آن است. درحالی‌که بیشینه تلفات بر واحد حجم در داخل عمق نفوذ استیل سه برابر بیشتر از بیشینه تلفات بر واحد حجم در داخل سیم‌پیچ آن است. بنابراین استفاده از کوره‌های القایی برای مواد فرو مغناطیسی بهتر بوده و در مدت زمان بسیار کوتاهی ماده ذوب می‌شود.

در این تحقیق به بررسی پارامترهای هندسی کوره القایی و تأثیر آن بر زمان رسیدن به دمای ذوب پرداخته‌شده است. با افزایش تعداد حلقه در کوره القایی و ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها، ماده در زمان کوتاه‌تری به دمای ذوب رسیده است. همین‌طور با در نظر گرفتن چگالی جریان ثابت و جریان القاشده ثابت به بررسی تعداد حلقه پرداخته شد. توزیع دما و شار مغناطیسی مطالعه شده و انتقال حرارت ناپایا آلومینیوم تا رسیدن به دمای ذوب موردبررسی قرارگرفته است. مشاهده شد که در تعداد حلقه‌های بالا تمرکز حرارت بر بوته معطوف است. هرچقدر تعداد حلقه بیشتری انتخاب کنیم با جریان الکتریکی کمتر به دمای مدنظر خود خواهیم رسید.

سپس به بررسی تأثیر فرکانس بر دمای میانگین پرداخته‌شده است. با افزایش فرکانس دمای ماده در زمانی ثابت افزایش میابد ولی به علت تأثیر فرکانس بر عمق نفوذ در طراحی برای انتخاب فرکانس محدودیت داریم. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس کوره القایی از 5kHz تا 20kHz زمان رسیدن به دمای ذوب کاهش‌یافته به‌گونه‌ای که در دمای ۵۰۰درجه سانتی گراد، زمان مورد نظر ۵۵ درصد کاهش را نشان می‌دهد.

با بررسی نسبت قطر بر ارتفاع بوته در حجمی ثابت برای ماده به تأثیر شکل بوته پرداخته‌شده است. نتیجه شد با کاهش نسبت قطر به ارتفاع از نسبت $\frac{D_3}{D_4} = 0.4$ کمتر برای آلومینیوم تغییر محسوسی در میانگین دما حاصل نشده است این روند تا نسب $\frac{D_3}{D_4} = 0.14$ ادامه یافته است. برای استیل به دلیل عمق نفوذ نازک‌تر، از نسبت $\frac{D_3}{D_4} = 0.2$ کمتر جواب‌ها برهم منطبق خواهد شد. با بررسی تأثیر تغییر نسبت طول سیم‌پیچ (D_2) به ارتفاع بوته (D_4) به این نتیجه رسیدیم که زمان رسیدن به دمای ذوب با کم شدن فاصله سیم‌پیچ‌ها کوتاه‌تر می‌شود. بنابراین با در نظر گرفتن امکان نزدیک‌تر شدن سیم‌پیچ‌ها به هم، برای سیم‌پیچ کمترین فاصله ممکن را انتخاب می‌کنیم.

برای بررسی تأثیر محل قرارگیری سیم‌پیچ در اطراف بوته، L میزان انحراف مراکز سیم‌پیچ و بوته تغییر داده‌شده است. درنتیجه مکان $\frac{L}{D_4} = 0$ برای ذوب ماده مذاب مناسب است. از صفرتا نسبت

۰.۱۴۹ زمان رسیدن به دمای ذوب کمتر شده است ولی در نسبت‌های بیشتر از $\frac{L}{D_4} = 0.149$ زمان رسیدن به ذوب افزایش زیادی یافته است و دیرتر به نقطه ذوب خواهیم رسید. برای پیدا کردن بهترین محل برای قرارگیری کویل در اطراف بوته، بین کویل و عایق اطراف بوته فاصله مجازی ایجادشده و اثرات مطالعه شده است. با ایجاد فاصله، به بررسی تأثیر نسبت $\frac{D_1}{D_3}$ که همان قطر اصلی کویل بر قطر بوته است پرداخته‌شده است. در نسبت $\frac{D_1}{D_3} = 1.66$ بیشینه میانگین دما برای آلومینیوم به‌دست‌آمده است. نتیجه حاصله از نمودارهای استیل حاکی است که افزایش فاصله دما درگذر زمان را کاهش داده است.برای استیل بهترین فاصله بین کویل و عایق صفر شده است و با افزایش فاصله، دما در زمان ثابت کاهش‌یافته است.

در پایان به بررسی تأثیر دبی سیستم خنک کاری بر دمای میانگین جداره داخلی کویل پرداخته‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دبی دمای جداره داخلی کویل کاهش‌یافته است. این بررسی در فرکانس‌ها و جریان‌ها متفاوت انجام‌شده است. نتیجه گرفتیم تغییر جریان بر دمای کویل تأثیر زیادی نسبت به تغییر فرکانس داشته است. برای طراحی کوره القایی نیاز است دبی آب ورودی متناسب با جریان و فرکانس سیم‌پیچ باید انتخاب شود تا مانع از افزایش بی‌رویه دمای سیم‌پیچ باشد.

جهت ادامه مسیر تحقیقات این پایان‌نامه می‌تواند در زمینه‌های بیان‌شده زیر فعالیت نمود:

۱. تحقیقات بر روی تأثیر قرار دادن قطعه کار غیر یکپارچه بر دما و چگالی جریان مغناطیسی
۲. بررسی حرکت ماده گرم شونده بعد از رسیدن به دمای ذوب و بررسی جریان ماده مذاب داخل بوته
۳. بررسی ذوب مواد متخلخل در کوره القایی

مراجع

[1] T. A. Jankowski, D. P. Johnson, J. D. Jurney, J. E. Freer, L. M. Dougherty, and S. A. Stout, "Experimental Observation and Numerical Prediction of Induction Heating in a Graphite Test Article," in *The Proceeding of the COMSOL conference*, 2009.

[2] M. Fabbri, M. Forzan, S. Lupi, A. Morandi, and P. L. Ribani, "Experimental and numerical analysis of DC induction heating of aluminum billets," *IEEE Transactions on Magnetics,* vol. 45, pp. 192-200, 2009.

[3] Metal Hand Book, "casting" *ASM International*,Ninth Edition,1998,Vol.15,PP.356-392

[4] Good Practice Guide, "Efficient Melting in coreless Induction Furnaces", *The Environmental and Energy Helpline*, London, England, No.50,2000

[5] A. Choudhury and M. Blum, "Economical production of titanium-aluminide automotive valves using cold wall induction melting and centrifugal casting in a permanent mold," *Vacuum,* vol. 47, pp. 829-831, 1996.

[6] A. Bhat, S. Agarwal, D. Sujish, B. Muralidharan, B. Reddy, G. Padmakumar*, et al.*, "Thermal Analysis of Induction Furnace," in *Proceedings of the 2012 COSMOL conference in Banglore*, 2012.

[7] S.Zinn and S.L. Semiatin, "Elements of induction heating: design, control, and applications": *ASM International*, 1988.

[8] Semiation S.L and D.E Indution Heat Treatment of steeI .ASM.1986.

[9] from C. A. Tudbury, Basics of Induction Heating, Vol ١, John F. Rider, Inc., New York, 1960.

[10] A. N. AN, "Induction heating system topology review," *Fairchild Semiconductor,* 2000.

[11] American Induction Heatig corp Webstie:www.americanindution.com

[12] E. R. Laithwaite, "The goodness of a machine," in *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1965, pp. 538-541.

[13] B. Drobenko, O. Hachkevych, and T. Kournyts'kyi, "A mathematical simulation of high temperature induction heating of electroconductive solids," *International journal of heat and mass transfer,* vol. 50, pp. 616-624, 2007.

[14] F. Bay, V. Labbé, Y. Favennec, and J.-L. Chenot, "A numerical model for induction heating processes coupling electromagnetism and thermomechanics," *International journal for numerical methods in engineering,* vol. 58, pp. 839-867, 2003.

[15] O. Bodart, A.-V. Boureau, and R. Touzani, "Numerical investigation of optimal control of induction heating processes," *Applied Mathematical Modelling,* vol. 25, pp. 697-712, 2001.

[16] C. Marchand and A. Foggia, "2D finite element program for magnetic induction heating," *IEEE Transactions on Magnetics,* vol. 19, pp. 2647-2649, 1983.

[17] J. Codrington, P. Nguyen, S. Ho, and A. Kotousov, "Induction heating apparatus for high temperature testing of thermo-mechanical properties," *Applied Thermal Engineering,* vol. 29, pp. 2783-2789, 2009.

[18] H. Kurose, D. Miyagi, N. Takahashi, N. Uchida, and K. Kawanaka, "3-D eddy current analysis of induction heating apparatus considering heat emission, heat conduction, and temperature dependence of magnetic characteristics," *IEEE Transactions on magnetics,* vol. 45, pp. 1847-1850, 2009.

[19] K. Sadeghipour, J. Dopkin, and K. Li, "A computer aided finite element/experimental analysis of induction heating process of steel," *Computers in industry,* vol. 28, pp. 195-205, 1996.

[20] M. Fabbri, M. Forzan, S. Lupi, A. Morandi, and P. L. Ribani, "Experimental and numerical analysis of DC induction heating of aluminum billets," *IEEE Transactions on Magnetics,* vol. 45, pp. 192-200, 2009.

[21] M.-S. Huang and Y.-L. Huang, "Effect of multi-layered induction coils on efficiency and uniformity of surface heating," *International Journal of Heat and*

Mass Transfer, vol. 53, pp. 2414-2423, 2010.

[22] Y. Huang and J.-W. Wu, "Infrared thermal image segmentations employing the multilayer level set method for non-destructive evaluation of layered structures," *NDT & E International,* vol. 43, pp. 34-44, 2010.

[23] M. Omar, M. Hassan, K. Saito, and R. Alloo, "IR self-referencing thermography for detection of in-depth defects," *Infrared physics & technology,* vol. 46, pp. 283-289, 2005.

[24] M. Kranjc, A. Zupanic, D. Miklavcic, and T. Jarm, "Numerical analysis and thermographic investigation of induction heating," *International Journal of Heat and Mass Transfer,* vol. 53, pp. 3585-3591, 2010.

[25] OCILKA, Matúš, and Dobroslav KOVÁČ. "Simulation model of induction heating in Comsol multiphysics." *Acta Electrotechnica et Informatica* 15.1, 2015

[26] Leinhard IV, J H and Leinhard V, J.H. A Heat Transfer Textbook, Massacushetts, 2006.

[27] L. A. Barragan, D. Navarro, J. Acero, I. Urriza, and J. M. Burdío, "FPGA implementation of a switching frequency modulation circuit for EMI reduction in resonant inverters for induction heating appliances," *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* vol. 55, pp. 11-20, 2008.

[28] V. I. Rudnev, R. L. Cook, D. L. Loveless, and M. R. Black, " Induction Heat Treatment: Basic Principles, Computation, Coil Construction, and Design Considerations," *Steel Heat Treatment: Equipment and Process Design,* p. 277, 2006.

[29] B. Drobenko, O. Hachkevych, and T. Kournyts'kyi, "A mathematical simulation of high temperature induction heating of electroconductive solids," *International journal of heat and mass transfer,* vol. 50, pp. 616-624, 2007.

[30] I. Quintana, Z. Azpilgain, D. Pardo, and I. Hurtado, "Numerical modeling of cold crucible induction melting," in *Proceedings of The COMSOL Conference, Boston, USA*, 2011.

[31] C. Marchand and A. Foggia, "2D finite element program for magnetic induction heating," *IEEE Transactions on Magnetics,* vol. 19, pp. 2647-2649, 1983.

[32] D. Istardi and A. Triwinarko, "Induction heating process design using comsol multiphysics software," *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control),* vol. 9, pp. 327-334, 2013.

[33] J. A. Stratton, "Electromagnetic theory," *John Wiley & Sons*, 2007.

[34] D. Labridis and P. Dokopoulos, "Calculation of eddy current losses in nonlinear ferromagnetic materials," *IEEE Transactions on Magnetics,* vol. 25, pp. 2665-2669, 1989.

[35] P. Guerrier, K. K. Nielsen, S. Menotti, and J. H. Hattel, "An axisymmetrical non-linear finite element model for induction heating in injection molding tools," *Finite Elements in Analysis and Design,* vol. 110, pp. 1-10, 2016.

[36] Vincent Bruyere, Tips and Tricks for Modeling Induction Furnaces, www.comsol.com, March 2015.

Abstract

One of the most popular non-contact heating devices is an induction furnace. They are widely in use in most metal industries to heat and melt metals due to their excellent thermal efficiency, high production speed, and clean working medium.

The available data on induction heating systems are normally obtained from manufacturing environments directly. These experimental methods or trial and error approaches are very time-consuming and non cost-effective. Therefore, numerical methods are highly recommended for induction heating problems. In this study, the basis of induction heating and its advantages over other heating methods have been discussed and then the heat transfer and magnetic fields in a vacuum induction melting furnace (VIM) have been numerically investigated.

The induction furnace model employed in this study, has been simulated based on a real industrial model. Induction heating was applied to a ferromagnetic and a non-magnetic material. The temperature behavior in the heated material from furnace startup until the melting temperature of the material has been investigated. Flow density variations and furnace temperature changes are also studied.

The total heat sources of an induction furnace include magnetic loss (hysteresis loss) and resistance loss (Foucault). The total loss for both materials have been found. Results indicate that the desired heat generated in ferromagnetic material is greater than that of a non-magnetic material. This fact solely justifies the use of inductions furnaces for ferromagnetic materials.

It was attempted to achieve a reasonable model for designing the furnace in small scale by using a parametric approach. The effect of crucible and coil geometry on the time the material reaches its melting point has been examined. Increasing the number of turns in the coil while keeping other parameters constant, will lead to a shorter time for the material to meet its melting point.

In this thesis, the effects of the number of coil turns on the furnace have been also explored considering the flow density and inducted flow to be constant. In addition, the effect of the location of the coil around the crucible has been also studied and the results for two different types of materials have been reported. It is claimed that the least gap

possible between the turns may lead to the shortest time possible for a material to reach to its melting point.

Keywords: furnance, Induction heating, electromagnetics, numerical solution

Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanic Engineering

M.S. Thesis

Numerical modeling of heat transfer and magnetic fields in vacuum induction furnace

By

Sara Ghorbanzadeh

Supervised by

Dr. Mohsen Nazari

Dr. Mohammad Mohsen Shahmardan

Adviser by

Dr.amir hasannia, Dr Mostafa nazari

Feburary 2017