بسم الله الرحمن الرحیم

کلیه امتیازهای این پایانامه به دانشگاه بوعلی سینا تعلق دارد. در صورت استفاده از تمام یا بخشی از مطالب این پایانامه در مجلات، کنفرانس ها و یا سخنرانی ها، باید نام دانشگاه بوعلی سینا یا استاد راهنمای پایانامه و نام دانشجو با ذکر مأخذ و ضمن کسب مجوز کتبی از دفتر تحصیلات تکمیلی دانشگاه ثبت شود. در غیر این صورت مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت. درج آدرس های ذیل در کلیه مقالات خارجی و داخلی مستخرج از تمام یا بخشی از مطالب این پایانامه در مجلات، کنفرانس ها و یا سخنرانی ها الزامی می باشد.

…….Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

.....،گروه.....،دانشکده.....، دانشگاه بوعلی سینا همدان.

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

پایان نامه:

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک (گرایش حالت جامد)

عنوان:

مطالعه‌ی عددی اثر خودالقایی پیچه در فرآیند گرمای القایی

استاد راهنما:

دکتر محمّد حسین توکّلی

استاد مشاور:

دکتر فریدون سموات

پژوهشگر:

حامد حیدری

مهر ماه ۱۳۹۰

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک (حالت جامد)

حامد حیدری

تحت عنوان:

مطالعه‌ی عددی اثر خودالقایی پیچه در فرآیند گرمای القایی

به ارزش ۶ واحد در روز چهار شنبه مورخ ۴/ ۷/ ۹۰ ساعت ۱۶ در محل آمفی تئاتر۱ و با حضور اعضای هیأت داوران زیر برگزار گردید و با نمره ۱۹/۷۵ درجه عالی ارزیابی شد.**ترکیب اعضای هیأت داوران:**

ردیف	سمت در هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی - گروه/ دانشکده/ دانشگاه	محل امضاء
۱.	استاد راهنما	دکتر محمّد حسین توکّلی	استادیار فیزیک/ علوم پایه/ بوعلی سینا	
۲.	استاد مشاور	دکتر فریدون سموات	استادیار فیزیک/ علوم پایه / بوعلی سینا	
۳.	داور	دکتر صفدر حبیبی	استادیار فیزیک/ علوم پایه / بوعلی سینا	
۴.	داور	دکتر منوچهر بابائی‌پور	دانشیار فیزیک/ علوم پایه / بوعلی سینا	

تشکر و قدر دانی

من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق

اکنون که با یاری خداوند توانستم مرحله‌ای دیگر از زندگی را پشت سر بگذارم لازم می‌دانم کـه از تمام کسانی که به من لطف و عنایت داشتند قدردانی کنم.

از خانواده‌ام بخصوص **پدر و مادرم** که همواره و در هر شرایطی کنار من بوده‌اند تشکر می‌کنم.

از استاد راهنمای گرانقدر **آقای دکتر محمّد حسین توکّلی** که برای من جدا از استاد علمی استاد اخلاق هم بوده‌اند سپاسگزارم. از استاد مشاور گرامی **آقای دکتر فریدون سموات** به خاطر تمام زحماتشان قدردانی می‌کنم.

از دوستان بسیار خوبم (آقایان: **حمید محمودزاده، پیمان غلامی، پژمان شمشیری، وریا زراعـی، حامد طهمورسی، کیومرث سلطانیان، صالح شریفی، فایق حسین پناهی و حسین کرباسچی** خـانم‌هـا: **محترم هنرمندنیا و خاطره محرمخانی**)که حقیقتاً خانواده‌ی دوم من بوده‌اند بخاطر تمام خوبی‌ها و کمک-های بسیار مفیدشان تشکر می‌کنم.

برای تمامی ایـن عزیـزان از خداونـد متعـال سـلامتی و پیـروزی در تمـام مراحـل زندگیشـان را خواستارم.

دانشگاه بوعلی سینا

مشخصات پایان نامه تحصیلی

عنوان: مطالعه‌ی عددی اثر خودالقایی پیچه در فرآیند گرمای القایی

نام نویسنده: حامد حیدری

نام استاد راهنما: دکتر محمد حسین توکّلی

نام استاد مشاور: دکتر فریدون سموات

دانشکده : علوم پایه	**گروه آموزشی: فیزیک**	
رشته تحصیلی: فیزیک	**گرایش تحصیلی: حالت جامد**	**مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد**
تاریخ تصویب: ۱۳۸۹/۹/۱۵	**تاریخ دفاع: ۱۳۹۰/۷/۴**	**تعداد صفحات: ۱۱۹**

چکیده:

امروزه روش‌های زیادی برای گرما دادن به فلزات وجود دارد که هرکدام معایب و مزایای خاص مربوط به خودشان را دارند. یکی از این روش‌ها گرمای القایی است. این روش دارای مزایایی همچون بازدهی بالا، تمیز بودن، سرعت زیاد و قابلیت انجام در خلاء می‌باشد. گرمای القایی با استفاده از القای میدان‌های الکترومغناطیسی فلز را گرم می‌کند. این روش ترکیب پیچیده‌ای از میدان‌های الکترومغناطیسی، انتقال حرارت و پدیده‌های متالورژیکی می‌باشد. در این پایان‌نامه پدیده‌ی الکترومغناطیسی آن با کمک روش عناصر متناهی (بسته‌ی نرم‌افزاری FlexPDE) مورد مطالعه قرار گرفته است. فصل اول به مقدمه‌ای گرمای القایی پرداخته است. در فصل دوم به بررسی پدیده‌های القا و خودالقایی پرداخته شده است. فصل سوم به فرمول‌بندی ریاضی حاکم بر سیستم می‌پردازد که شامل سه قسمت است: در قسمت اول به فرمول‌بندی ریاضی اثر خودالقایی پیچه پرداخته شده است که یکبار اثر خودالقایی پیچه حذف شده و در حالت دیگر این اثر در نظر گرفته شده است. قسمت دوم برخی از فرمول‌های مورد استفاده جهت محاسبه ضریب خودالقایی پیچه می‌پردازد و در نهایت فرمول‌بندی ریاضی مورد استفاده در توزیع جریان و ولتاژ در حلقه‌های پیچه بررسی شده است. فصل چهارم به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی و بحث در مورد آن‌ها پرداخته است بطوریکه نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که حذف اثر خودالقایی پیچه تأثیر زیادی بر روی توزیع و مقادیر میدان‌های الکترومغناطیسی، چگالی جریان‌های القایی در قطعه‌کار و میزان گرمای تولیدی در قطعه‌کار و پیچه دارد. همچنین در ادامه نتایج به دست آمده برای مقادیر ضریب خودالقایی پیچه نشان داد که کاهش ارتفاع قطعه‌کار باعث افزایش مقادیر این ضریب می‌شود: در نهایت مقادیر بدست آمده برای توزیع جریان و ولتاژ در حلقه‌های پیچه در حضور قطعه‌کار با ارتفاع‌های مختلف و شعاع‌های مختلف نشان داد که توزیع آن‌ها در حلقه‌های پیچه یکنواخت نمی‌باشد.

واژه‌های کلیدی: گرمای القایی، مطالعه‌ی عددی، اثر خودالقایی پیچه، توزیع جریان و ولتاژ

فصل اول: گرمای القایی ۱

۱-۱ تاریخچه ۳

۱-۲ معرفی ۴

۱-۲-۱ پدیده‌ی الکترومغناطیسی در گرمای القایی ۵

۱-۳ القاگر ۸

۱-۴ مزایای گرمای القایی ۹

۱-۵ کاربردها ۱۱

فصل دوم: القا و خودالقایی ۱۷

۲-۱ مقدمه ۱۸

۲-۲ فرمول بندی ریاضی ۱۸

۲-۲-۱ القای الکترومغناطیسی ۱۹

۲-۳ EMF حرکتی ۲۲

۲-۳-۱ میله‌ی رسانای در حال حرکت ازمیان یک میدان مغناطیسی ۲۲

۲-۴ کاربرد قانون فارادی در مدارها: ضرایب القاء ۲۵

۲-۴-۱ القای متقابل ۲۶

۲-۴-۲ بدست آوردن ضرایب القا از دیدگاه انرژی ۲۸

۲-۴-۳ خودالقاها- القاها به‌صورت متوالی و موازی ۳۰

فصل سوم: فرمول‌بندی ریاضی ۳۴

۳-۱ معادلات حاکم بر سیستم ۳۵

۳-۱-۱ مدل الف (نادیده گرفتن اثر خودالقایی پیچه) ۳۷

۳-۱-۲ مدل ب (در نظر گرفتن اثر خودالقایی پیچه) ۳۸

۳-۱-۳ چگالی جریان القایی ۳۹

۳-۲ مقدمه‌ای بر روش عناصر متناهی ۴۰
۳-۲-۱ تاریخچه ۴۲
۳-۲-۲ مفهوم پایه‌ای روش المان‌های محدود ۴۳
۳-۲-۲-۱ تخمین زدن محیط یک دایره ۴۳
۳-۲-۲-۲ تعیین تقربی مرکز جرم یک ماده ۴۵
۳-۲-۲-۳ راه حل معادله‌ی دیفرانسیلی ۴۸
۳-۲-۳ استفاده از نرم‌افزار FlexPDE ۵۴
۳-۳ بدست آوردن ضریب خودالقایی ۵۴
۳-۳-۱ ضریب خودالقایی برای یک حلقه‌ی دایرهای با سطح مقطع دایره‌ای ۵۵
۳-۳-۱-۱ فرمالیزم کیر شهوف ۵۵
۳-۳-۱-۲ فرمالیزم ماکسول ۵۶
۳-۳-۱-۳ فرمالیزم رالی و نیوِن ۵۷
۳-۳-۱-۴ ضریب خودالقایی یک لوله-ی خمیده درون یک دایره ۵۷
۳-۳-۲ مقایسه‌ی دقت فرمول‌ها ۵۸
۳-۳-۳ ضریب خودالقایی یک پیچه یا سیملوله‌ی تک لایه ۵۹
۳-۳-۳-۱ فرمالیزم رالی و نیوِن ۵۹
۳-۳-۳-۲ فرمالیزم کوفین ۶۰
۳-۳-۳-۳ فرمالیزم لورنتز ۶۰
۳-۳-۳-۴ فرمالیزم عمومی ۶۳
۳-۴ فرمول‌بندی حاکم بر سیستم در قالب توابع مختلط ۶۳
۳-۴-۱ مدل (الف) ۶۴
۳-۴-۲ مدل (ب) ۶۴

۳-۵ محاسبه توزیع جریان و ولتاژ در حلقه‌های پیچه ۶۵

فصل چهارم نتایج و بحث ۶۷

۴-۱ محاسبا ت برای چند نوع پیکر بندی ۶۸

۴-۱-۱ پیچه‌ی تک حلقه بدون حضور قطعه‌کار ۶۸

۴-۱-۲ نتایج و بحث ۶۸

۴-۱-۳ پیچه‌ی با شش حلقه بدون حضور قطعه‌کار ۷۰

۴-۱-۴ نتایج و بحث ۷۰

۴-۱-۵ پیچه‌ی تک حلقه با حضور قطعه‌کار ۷۲

۴-۱-۶ نتایج وبحث ۷۳

۴-۱-۷ پیچه‌ی شش حلقه با حضور قطعه‌کار ۸۴

۴-۱-۸ نتایج وبحث ۸۴

۴-۲ محاسبه‌ی ضریب خودالقایی برای پیچه ۹۵

۴-۲-۱ پیچه بدون حضورقطعه‌کار ۹۵

۴-۲-۲ پیچه با حضور قطعه‌کارهای با ارتفاع‌های گوناگون ۹۶

۴-۲-۳ نتایج و بحث ۹۶

۴-۳ محاسبه توزیع جریان و ولتاژ در حلقه‌های پیچه ۱۰۹

۴-۳-۱مقادیر توزیع جریان و ولتاژ در حلقه‌های پیچه در حضور قطعه‌کارهای با ارتفاع های گوناگون ۱۰۹

۴-۳-۲ نتایج و بحث ۱۱۰

۴-۳-۳مقادیر توزیع جریان و ولتاژ در حلقه‌های پیچه در حضور قطعه‌کارهای با شعاع‌های گوناگون ۱۱۴

۴-۳-۴ نتایج و بحث ۱۱۴

۴-۴ نتیجه‌گیری ۱۱۷

۵ منابع ۱۱۸

شکل ۱-۱: یک سیستم گرمای القایی مرسوم و المان های تشکیل دهنده ی آن. ۵
شکل ۱-۲: مقایسه‌ی توزیع جریان در سطح مقطع یک رسانا در فرکانس‌های مختلف. ۷
شکل ۱-۳: نمونه‌هایی از پیچه‌های القایی برای اشکال مختلف قطعه‌کار. ۸
شکل ۱-۴: نمونه‌هایی از پیچه‌های القایی مورد استفاده در سختکاری القایی. ۹
شکل ۱-۵: انواع سطح مقطع برای القاگر. ۹
شکل ۱-۶: مقایسه‌ی زمان گرمادهی برای کوره‌های القایی و کوره‌های گازی بر حسب تابعی از زمان [۸]. ۱۱
شکل ۱-۷: نمایی از یک کوره‌ی القایی. ۱۲
شکل ۱-۸: لحیم‌کاری القایی. ۱۴
شکل ۱-۹: سیستم رشد بلور چکرالسکی. ۱۵
شکل ۱-۱۰: مقایسه‌ی بین زمان مورد نیاز برای به جوش آوردن یک لیتر آب توسط روش‌های مختلف. ۱۶
شکل ۱-۱۱: عدم آسیب رسانی به پوست در زمان تماس با اجاق القایی. ۱۶
شکل ۲-۱: ولتاژ تولید شده توسط میلهای که در یک میدان مغناطیسی حرکت میکند. ۲۴
شکل ۲-۲: نمودار طرحوار دو حلقه برای بدست آوردن القای متقابل(فرمول نیومن) بین هردوحلقه. ۲۷
شکل ۲-۳: خودالقای ″ خارجی″ یک حلقه اغلب با محاسبه‌ی شاری که از ناحیه‌ای خارجی نسبت به سیم می‌گذرد (ناحیه هاشور خورده) معین می‌شود تا از واگرایی‌های احتمالی در خود سیم اجتناب شود. ۳۰
شکل ۲-۴: نمودار طرحوار مداری شامل دو القای متصل به‌هم (الف) بطور متوالی (ب) بطور موازی. ۳۱
شکل ۲-۵: دو حلقه جریان که بطور متوالی به متصل‌اند (الف) شارها یگدیگر را تقویت می‌کنند (ب) شارها یگدیگر را تضعیف می‌کنند. ۳۱
شکل ۳-۱: تقریب محیط یک دایره به کمک المان‌های خطی، (a) دایرهای به شعاع R؛ (b) شبکه‌های یکنواخت و غیریکنواخت برای نمایش محیط یک دایره؛ (c) یک المان نوعی. ۴۳
شکل ۳-۲: تعیین تقریبی مرکز جرم یا مرکز هندسی یک ناحیه نامنظم با تقسیم کردن آن به مجموعه‌ای از زیرناحیه‌های چهار گوشی یا ذوزنقه‌ای. ۴۷

شکل ۳-۳: تقریب سطح منحنی شده (یا یک تابع غیر یکنواخت) بر سرتاسر یک ناحیه سه‌گوشی بوسیله‌ی یک سطح مسطح. ۴۸
شکل ۳-۴: (a) استوانه هم‌محور ساخته شده از دو ماده مختلف. (b) نمایش المان محدود یک خط شعاعی از استوانه. ۴۸
شکل ۳-۵: (a) تقریب خطی یک تابع T(r). (b) تقریب درجه دومی یک تابع T(r). ۵۰
شکل ۳-۶: نمایی از محیط نرم‌افزار FlexPDE. ۵۴
شکل ۳-۷: نمایی از رسانای دایره‌ای شکل به شعاع a. ۵۵
شکل ۳-۸: نمایی ازسیملوله‌ی تک لایه به شعاع a. ۵۹
شکل ۳-۹: نمایی ازسیملوله‌ی تک لایه. ۶۰
شکل ۴-۱: توزیع مؤلفه‌های همفاز و ناهمفاز تابع جریان مغناطیسی در مدل (الف). ۶۹
شکل ۴-۲: توزیع مؤلفه‌های همفاز و ناهمفاز تابع جریان مغناطیسی در مدل(ب)..... ۶۹
شکل ۴-۳: توزیع گرمای ایجاد شده در پیچه در مدل‌های(الف) و (ب). ۷۰
شکل ۴-۴: توزیع مؤلفه‌های همفاز و ناهمفاز تابع جریان مغناطیسی در پیچه در مدل(الف).. ۷۱
شکل ۴-۵: توزیع مؤلفه‌های همفاز و ناهمفاز تابع جریان مغناطیسی در پیچه در مدل(ب). ... ۷۱
شکل ۴-۶: توزیع گرمای تولید شده در پیچه در مدل‌های (الف) و (ب). ۷۲
شکل ۴-۷: توزیع مؤلفه‌های همفاز و ناهمفاز تابع جریان مغناطیسی در مدل (الف). ۷۳
شکل ۴-۸: منحنی رفتار مؤلفه‌های همفاز و ناهمفازتابع جریان مغناطیسی در راستای شعاعی در قطعه‌کار در مدل (الف). ۷۴
شکل ۴-۹: منحنی رفتار مؤلفه‌های همفاز و ناهمفازتابع جریان مغناطیسی در راستای ارتفاع در قطعه‌کار در مدل (الف). ۷۴
شکل ۴-۱۰: توزیع مؤلفه‌های همفاز و ناهمفاز جریان القایی در قطعه‌کار در مدل (الف). ۷۵
شکل ۴-۱۱: منحنی رفتار مؤلفه‌های همفاز و ناهمفاز جریان القایی در راستای شعاعی در قطعه-کار در مدل (الف). ۷۶
شکل ۴-۱۲: منحنی رفتار مؤلفه‌های همفاز و ناهمفاز جریان القایی در راستای ارتفاع در قطعه-کار در مدل (الف). ۷۶
شکل ۴-۱۳: توزیع گرمای ایجاد شده در قطعه‌کار در مدل (الف). ۷۷
شکل ۴-۱۴: منحنی گرمای ایجاد شده در راستای ارتفاع در قطعه‌کار در مدل (الف)..... ۷۷

شکل ۴-۱۵: توزیع گرمای ایجاد شده در پیچه تک حلقه در مدل (الف). ۷۸
شکل ۴-۱۶: توزیع مؤلفه‌های همفاز و ناهمفاز تابع جریان مغناطیسی در مدل (ب). ۷۹
شکل ۴-۱۷: منحنی رفتار مؤلفه‌های همفاز و ناهمفازتابع جریان مغناطیسی در راستای شعاعی در قطعه‌کار در مدل (ب). ۷۹
شکل ۴-۱۸: منحنی رفتار مؤلفه‌های همفاز و ناهمفازتابع جریان مغناطیسی در راستای ارتفاع در قطعه‌کار در مدل (ب). ۸۰
شکل ۴-۱۹: توزیع مؤلفه‌های همفاز و ناهمفاز جریان القایی در قطعه‌کار در مدل (ب)..... ۸۱
شکل ۴-۲۰: منحنی رفتار مؤلفه‌های همفاز و ناهمفاز جریان القایی در راستای شعاعی در قطعه-کار در مدل (ب). ۸۱
شکل ۴-۲۱: منحنی رفتار مؤلفه‌های همفاز و ناهمفاز جریان القایی در راستای ارتفاع در قطعه‌کار در مدل (ب)..... ۸۲
شکل ۴-۲۲: توزیع گرمای ایجاد شده در قطعه‌کار در مدل (ب). ۸۲
شکل ۴-۲۳: منحنی رفتار گرمای تولیدی در راستای ارتفاع در قطعه‌کار در مدل (ب). ۸۳
شکل ۴-۲۴: توزیع گرمای تولیدی در حلقه پیچه در مدل (ب). ۸۳
شکل ۴-۲۵: توزیع مؤلفه‌های همفاز و ناهمفاز تابع جریان مغناطیسی در مدل (الف). ۸۵
شکل ۴-۲۶: منحنی رفتار مؤلفه‌های همفاز و ناهمفازتابع جریان مغناطیسی در راستای شعاعی در قطعه-کار در مدل (الف)..... ۸۵
شکل ۴-۲۷: منحنی رفتار مؤلفه‌های همفاز و ناهمفازتابع جریان مغناطیسی در راستای ارتفاع در قطعه‌کار در مدل (الف)..... ۸۶
شکل ۴-۲۸: توزیع مؤلفه‌های همفاز و ناهمفاز جریان القایی در قطعه‌کار در مدل (الف). ۸۷
شکل ۴-۲۹: منحنی رفتار مؤلفه‌های همفاز و ناهمفاز جریان القایی در راستای شعاعی در قطعه-کار در مدل (الف)..... ۸۷
شکل ۴-۳۰: منحنی رفتار مؤلفه‌های همفاز و ناهمفاز جریان القایی در راستای ارتفاع در قطعه‌کار در مدل (الف). ۸۸
شکل ۴-۳۱: توزیع گرمای ایجاد شده در قطعه‌کار در مدل (الف). ۸۹
شکل ۴-۳۲: منحنی رفتار گرمای ایجاد شده در راستای ارتفاع در قطعه‌کار در مدل (الف). ۸۹
شکل ۴-۳۳: توزیع گرمای ایجاد شده درپیچه در مدل (الف)..... ۸۹

شکل ۴-۳۴: توزیع مؤلفه‌های همفاز و ناهمفاز تابع جریان مغناطیسی در مدل (ب). ۹۰
شکل ۴-۳۵: منحنی رفتار مؤلفه‌های همفاز و ناهمفاز تابع جریان مغناطیسی در راستای شعاعی در قطعه‌کار در مدل (ب). ۹۱
شکل ۴-۳۶: منحنی رفتار مؤلفه‌های همفاز و ناهمفاز تابع جریان مغناطیسی در راستای ارتفاع در قطعه‌کار در مدل (ب). ۹۱
شکل ۴-۳۷: توزیع مؤلفه‌های همفاز و ناهمفاز جریان القایی در قطعه‌کار در مدل (ب). ۹۲
شکل ۴-۳۸: منحنی رفتار مؤلفه‌های همفاز و ناهمفاز جریان القایی در راستای شعاعی در قطعهکار در مدل (ب). ۹۳
شکل ۴-۳۹: منحنی رفتار مؤلفه‌های همفاز و ناهمفاز جریان القایی در راستای ارتفاع در قطعه-کار در مدل (ب). ۹۳
شکل ۴-۴۰: توزیع گرمای ایجاد شده در قطعه‌کار در مدل (ب). ۹۴
شکل ۴-۴۱: منحنی رفتار گرمای ایجاد شده در راستای ارتفاع در قطعه‌کار در مدل (ب). ۹۴
شکل ۴-۴۲: توزیع گرمای ایجاد شده در پیچه در مدل (ب). ۹۵
شکل ۴-۴۳: توزیع مؤلفه‌های حقیقی و موهومی پتانسیل برداری مغناطیسی در مدل (الف). .. ۹۶
شکل ۴-۴۴: توزیع مؤلفه‌های حقیقی و موهومی پتانسیل برداری مغناطیسی در حضور قطعه-کارهای با ارتفاع‌های گوناگون در مدل (الف). ۹۸
شکل ۴-۴۵: منحنی رفتار مؤلفه‌ی حقیقی پتانسیل برداری مغناطیسی در راستای شعاعی حضور قطعه‌کارهای با ارتفاع‌های گوناگون در مدل (الف). ۱۰۰
شکل ۴-۴۶: منحنی رفتار مؤلفه‌ی موهومی پتانسیل برداری مغناطیسی در راستای شعاعی در حضور قطعه‌کارهای با ارتفاع‌های گوناگون در مدل (الف). ۱۰۰
شکل ۴-۴۷: منحنی رفتار مؤلفه‌های حقیقی و موهومی پتانسیل برداری مغناطیسی در راستای ارتفاع در حضور قطعه‌کارهای با ارتفاع‌های گوناگون در مدل (الف). ۱۰۲
شکل ۴-۴۸: توزیع مؤلفه‌های حقیقی و موهومی پتانسیل برداری مغناطیسی بدون حضور قطعه-کار در مدل (ب). ۱۰۳
شکل ۴-۴۹: توزیع مؤلفه‌های حقیقی و موهومی پتانسیل برداری مغناطیسی در حضور قطعه-کارهای با ارتفاع‌های گوناگون در مدل (ب). ۱۰۵
شکل ۴-۵۰: منحنی رفتار مؤلفه‌ی حقیقی پتانسیل برداری مغناطیسی در راستای شعاعی در

حضور قطعه‌کارهای با ارتفاع‌های گوناگون در مدل (ب). ۱۰۶
شکل ۴-۵۱: منحنی رفتار مؤلفه‌ی موهومی پتانسیل برداری مغناطیسی در راستای شعاعی در حضور قطعه‌کارهای با ارتفاع‌های گوناگون در مدل (ب) ۱۰۷
شکل ۴-۵۲: منحنی رفتار مؤلفه‌های حقیقی و موهومی پتانسیل برداری مغناطیسی در راستای ارتفاع در حضور قطعه‌کارهای با ارتفاع‌های گوناگون در مدل (ب)..... ۱۰۸
شکل ۴-۵۳: پیکر بندی مورد استفاده در بخش ۴-۳..... ۱۰۹
شکل ۴-۵۴: منحنی توزیع جریان در حلقه‌های پیچه در حضور قطعه‌کارهای با ارتفاع‌های گوناگون..... ۱۱۳
شکل ۴-۵۵: منحنی توزیع ولتاژ در حلقه‌های پیچه در حضور قطعه‌کارهای با ارتفاع‌های گوناگون. ۱۱۳
شکل ۴-۵۶: منحنی توزیع جریان در حلقه‌های پیچه در حضور قطعه‌کارهای باشعاع‌های گوناگون..... ۱۱۶
شکل ۴-۵۷: منحنی توزیع ولتاژ در حلقه‌های پیچه در حضور قطعه‌کارهای با شعاع‌های گوناگون. ۱۱۷

جدول ۳-۱: مقادیر ضریب خودالقایی برای یک تک حلقه دایره‌ای با نسبت‌های مختلف ρ/a. ۵۸
جدول ۳-۲: مقادیر Q برای یک سیملوله‌ی تک لایه [۱۳]. ۶۲
جدول ۴-۱: پارامترهای مورد استفاده در محاسبات در بخش ۴-۱-۱. ۶۸
جدول ۴-۲: مشخصات مربوط به قطعه‌کار. ۷۲
جدول ۴-۳: مقادیر ضریب خودالقایی برای پیچه در حضور قطعه‌کارهای با ارتفاع‌های گوناگون در مدل (الف). ۹۹
جدول ۴-۴: مقادیر ضریب خودالقایی برای پیچه در حضور قطعه‌کارهای با ارتفاع‌های گوناگون در مدل (ب). ۱۰۶
جدول ۴-۵: مقادیر توزیع جریان و ولتاژ در حلقه‌های پیچه بدون حضور قطعه‌کار. ۱۱۰
جدول ۴-۶: مقادیر توزیع جریان و ولتاژ در حلقه‌های پیچه با حضور قطعه‌کار به ارتفاع ۱۸۶ میلیمتر. ۱۱۰
جدول ۴-۷: مقادیر توزیع جریان و ولتاژ در حلقه‌های پیچه با حضور قطعه‌کار به ارتفاع ۹۳ میلیمتر. ۱۱۱
جدول ۴-۸: مقادیر توزیع جریان و ولتاژ در حلقه‌های پیچه با حضور قطعه‌کار به ارتفاع ۶۲ میلیمتر. ۱۱۱
جدول ۴-۹: مقادیر توزیع جریان و ولتاژ در حلقه‌های پیچه با حضور قطعه‌کار به ارتفاع ۴۶/۵ میلیمتر. ۱۱۲
جدول ۴-۱۰: مقادیر توزیع جریان و ولتاژ در حلقه‌های پیچه با حضور قطعه‌کار به ارتفاع ۳۷/۲ میلیمتر. ۱۱۲
جدول ۴-۱۱:مقادیر توزیع جریان و ولتاژ در حلقه‌های پیچه با حضور قطعه‌کار به شعاع ۵۵ میلیمتر. ۱۱۴
جدول ۴-۱۲: مقادیر توزیع جریان و ولتاژ در حلقه‌های پیچه با حضور قطعه‌کار به شعاع ۵۷ میلیمتر. ۱۱۵
جدول ۴-۱۳: مقادیر توزیع جریان و ولتاژ در حلقه‌های پیچه با حضور قطعه‌کار به شعاع ۵۹ میلیمتر. ۱۱۵
جدول ۴-۱۴: مقادیر توزیع جریان و ولتاژ در حلقه‌های پیچه با حضور قطعه‌کار به شعاع ۶۱ میلیمتر. ۱۱۵

جدول ۴-۱۵: مقادیر توزیع جریان و ولتاژ در حلقه‌های پیچه با حضور قطعه‌کار به شعاع ۶۳ میلیمتر. ۱۱۶

۱ فصل اول:

گرمای القایی

روش‌های زیادی برای گرم کردن قطعات فلزی وجود دارد که شامل گرم کننده های القایی، کوره های سوخت گازی، کوره‌های بستر مایع، حمام‌های نمکی، گرم کننده‌های مادون قرمز، کوره‌های الکتریکی و سوختی و غیره هستند. هرکدام از این روش‌ها دارای مزایای خاص خود هستند و هیچ روش جهان شمولی نیست که برای تمام مواد و تمام کاربردها به‌کار رود.

در سه دهه‌ی اخیر گرمادهی به وسیله‌ی القای میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی بسیار پرکاربرد شده است. یک دلیل مهم، توانایی ایجاد شدت گرمای بالا در زمان کوتاه و در مکان مورد نظر از قطعه‌کار در این روش است که منجر به زمان گرمادهی کوتاه (قابلیت تولید بالا) و کیفیتی قابل تکرار می‌شود. همچنین این روش دارای بازدهی انرژی بالایی بوده و بر خلاف دیگر روش‌ها که دارای انواع آلودگی‌های محیطی (مثلاً دود ناشی از سوخت یا آلودگی‌های سطحی یا تابشی) هستند، دوست دار محیط است.

در فرآیند گرمای القایی معمولاً از دو مدل ریاضی برای محاسبه گرمای القایی استفاده می کنند. یکی نادیده گرفتن جریان گردابی در القاگر (اثر خود القایی) و دیگری در نظر گرفتن این اثر.

۱-۱ تاریخچه

در سال ۱۸۳۱ میلادی مایکل فارادی[1] با ارائه‌ی این مطلب که اگر از سیم پیچ اولیه جریان متغیری عبور کند، در سیم پیچ ثانویه مجاورش نیز جریان القا می‌شود، تئوری گرمای القایی را بنا نهاد. علت اصلی این پدیده‌ی القا، تغییرات شار در مدار بسته ثانویه است که از جریان متناوب اولیه ناشی می-شود. نزدیک به یکصد سال این اصل در موتورها، ژنراتورها، ترانسفورماتورها، وسایل ارتباط رادیویی و غیره به‌کار گرفته می‌شد و هر اثر گرمایی در مدارهای مغناطیسی به عنوان یک اثر نامطلوب شناخته می‌شد. مهندسین برای مقابله با این اثرات حرارتی در مدارهای مغناطیسی و الکتریکی به شیوه‌ی ورقه ورقه کردن هسته‌ی مغناطیسی موتورها و ترانسفورماتورها روی آوردند تا جریان گردابی را که عامل تلفات حرارتی بود به حداقل برسانند.

به دنبال آزمایشات فارادی، قوانین متعددی پیشنهاد شد. قوانین لنز و[2] نیومن[3] نشان دادند که جریان القا شده با شار اصلی مخالفت کرده و بطور مستقیم با فرکانس متناسب است. از سال ۱۸۶۳ فوکو[4] در مقاله‌ای تحت عنوان "القای جریان در هسته[5]" که توسط هویساید[6] منتشر گردید، درباره‌ی جریان گردابی ارائه داد و در رابطه با انتقال انرژی از یک پیچه به یک هسته‌ی توپر بحث نمود. علاوه بر افراد فوق تامسون[7] نیز در ارائه ی نظریه گرمایش از طریق القا سهم بسزایی داشت. در اواخر قرن نوزدهم استفاده از تلفات گردابی و پسماند[8] به عنوان منبع گرمایش القایی از طرف مهندسین مطرح شد. بعدها در سال ۱۹۲۷ کمپانی کوره‌های الکتریکی، نخستین کوره ی الکتریکی[9] با فرکاس میانی را در شفلید انگلستان و به منظور آهنگری و گرمادهی موضعی فلزات جهت اتصال به یکدیگر، نصب کرد. بعد از این، تعداد و اندازه‌ی این کوره‌ها روبه افزایش گذاشته است.

لازم به ذکر است که مزیت های دیگر کوره های القایی همچون دقت زیاد برای گرم کردن تا عمق مورد نظر و حرارت دادن نواحی سطحی در طی پیشرفت‌های بعدی (در سال های جنگ جهانی دوم)

---

[1] Faraday
[2] Lenz
[3] Neuman
[4] Focault
[5] The induction of current in cores
[6] Heviside
[7] Thomson
[8] Hysteresis
[9] Electrical Furance Co