

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی

تاثیر سیکل وظیفه و فرکانس کلیدزنی بر روی گرمای تولیدی در یک قطعه کار
در سیستم القایی، طراحی، شبیه‌سازی و پیاده‌سازی

نگارنده: مصطفی علی‌زاده گرگی

استاد راهنما
دکتر علی دستفان

استاد مشاور
امیر حسن‌نیا خیبری

بهمن ۱۳۹۵

تقدیریم به:

پشمه های جوشان محبت

بلوه های مهر و عطوفت الهی

لبفندهای پر مهر زندگی

پدر و مادر عزیزم

که در تمام مراحل زندگی، به من راه و رسم درست زیستن را آموختند.

تقدیر و تشکر:

در اینجا بر خود لازم می‌دانم از تلاش‌ها و زحمات بی‌دریغ و راهنمایی‌های ارزنده استادان
گران‌قدر و دلسوزم، جناب آقای دکتر علی دستفان و جناب آقای دکتر امیر حسن‌نیا خیبری،
صمیمانه تقدیر و تشکر نمایم.

تعهد نامه

اینجانب **مصطفی علی زاده گرچی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق/قدرت دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه **تأثیر سیکل وظیفه و فرکانس کلیدزنی بر روی گرما ی تولیدی در یک قطعه کار در سیستم القایی، طراحی، شبیه سازی، و پیاده سازی** تحت راهنمایی دکتر علی دستفان 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 مورداستفاده 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 شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University Trcnology » 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 آن ها) 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 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 فارسی

امروزه از تکنولوژی گرمایش القایی در بسیاری از صنایع، لوازم خانگی و کاربردهای طبی به دلیل داشتن مزایایی از قبیل بازده بالا گرمایش سریع، ایمنی، پاکی و کنترل دقیق استفاده می‌شود. این سیستم معمولاً از اینورتر، سلف و یک قطعه فلز تشکیل شده است. با عبور جریان متناوب از سیم‌پیچ، شار مغناطیسی متناوب در سه قسمت شامل قطعه کار، فاصله هوایی و در مس شارش می‌یابد، این میدان مغناطیسی متناوب موجب ایجاد جریان گردابی در کف تابه می‌شود و این جریان طبق قانون ژول در تابه ایجاد حرارت می‌کند. در این تحقیق ابتدا به یک الگوریتم طراحی اشاره شده و در این الگوریتم عواملی مانند قطر هر رشته هادی، دمای رشته های هادی، تعداد دور، جنس تابه و فاصله سیم‌پیچ تا تابه بررسی شده است. در طول پایان‌نامه، از ابزار المان محدود (FEM) برای شبیه سازی استفاده شده، یک مدار برای مدلسازی عملکرد سیم‌پیچ در متلب معرفی شده است. تاثیر فرکانس کلید زنی و سیکل وظیفه بر عمق نفوذ و تولید حرارت در قطعه کار مورد بررسی قرار گرفته است.

کلید-واژه: گرمایش القایی، سیم‌پیچ، جریان گردابی، المان محدود (FEM)، عمق نفوذ

فهرست

- ر..... فهرست شکل‌ها
- ج..... فهرست جدول‌ها.
- ۱..... فصل اول: پیشگفتار.....
- ۲..... ۱-۱ تاریخچه
- ۴..... ۲-۱ انگیزه‌های تحقیق.....
- ۴..... ۳-۱ اهداف تحقیق.....
- ۵..... ۴-۱ مروری بر فصلهای پایان‌نامه
- ۷..... فصل دوم: پیش درآمد موضوع و مروری بر کارهای گذشته.....
- ۸..... ۱-۲ معادلات و قوانین.....
- ۸..... ۱-۱-۲ معادلات ماکسول.....
- ۹..... ۲-۱-۲ اثر پوستی در هادی استوانه‌ای.....
- ۱۰..... ۳-۱-۲ عمق نفوذ.....
- ۱۴..... ۴-۱-۲ اثر مجاورت.....
- ۱۵..... ۵-۱-۲ اثر حلقه.....
- ۱۵..... ۶-۱-۲ جریان گردابی.....

- ۲۰.....انتقال حرارت ۷-۱-۲
- ۲۱.....الکترونیک قدرت ۲-۲
- ۲۱.....سوئیچ ۱-۲-۲
- ۲۲.....اینورتر ۲-۲-۲
- ۲۶..... پارامترهای سیم پیچ اجاق القایی ۳-۲
- ۲۶..... مدار معادل سیم پیچ ۱-۳-۲
- ۲۷..... مؤلفه‌های امپدانس معادل سیستم دستگاه‌های گرمایش القایی ۲-۳-۲
- ۳۹..... یکنواختی شار مغناطیسی ۳-۳-۲
- ۴۱..... جنس فلز تابه ۴-۲
- ۴۴..... خلاصه ۵-۲
- ۴۵..... فصل سوم: طراحی سیم پیچ اجاق القایی
- ۴۶..... طراحی سیم پیچ اجاق القایی ۱-۳
- ۴۶..... محاسبه مقاومت سیم پیچ ۱-۱-۳
- ۴۸..... بررسی پارامترهای طراحی ۲-۱-۳
- ۵۵..... عوامل مؤثر بر پارامترهای سیم پیچ ۲-۳
- ۵۶..... تأثیر تعداد دور بر پارامترهای سیم پیچ ۱-۲-۳
- ۵۹..... تأثیر فاصله سیم پیچ با قطعه کاربر پارامترهای سیم پیچ ۲-۲-۳
- ۶۱..... تأثیر جنس فلز گرم شونده بر پارامترهای سیم پیچ ۳-۲-۳

۶۲	..... خلاصه ۳-۳
۶۳	..... فصل چهارم: نتیجه شبیه‌سازی و ساخت
۶۴	..... ۱-۴ سیم‌پیچ
۶۵	..... ۲-۴ مدار معادل سیستم
۶۶	..... ۳-۴ تأثیر فرکانس بر عملکرد سیم‌پیچ
۶۹	..... ۱-۳-۴ تأثیر فرکانس بر اندوکتانس
۷۰	..... ۲-۳-۴ تأثیر فرکانس بر مقاومت
۷۱	..... ۳-۳-۴ تأثیر فرکانس بر مقاومت ناشی از اثر مجاورت سیم‌پیچ
۷۱	..... ۴-۳-۴ تأثیر فرکانس بر راندمان
۷۲	..... ۵-۳-۴ تأثیر فرکانس با خازن ثابت بر دما
۷۸	..... ۶-۳-۴ تأثیر فرکانس با خازن تشدید مدار بر دما
۷۹	..... ۴-۴ تأثیر سیکل وظیفه بر عملکرد سیستم
۸۱	..... ۵-۴ خلاصه
۸۳	..... فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۸۴	..... ۱-۵ نتیجه‌گیری
۸۵	..... ۲-۵ پیشنهادات
۸۷	..... مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: اثر پوستی در هادی استوانه‌ای بی‌نهایت ۱۰
- شکل ۲-۲: یک میدان الکتریکی موازی با سطح بلوک هادی نیمه بی‌نهایت ۱۳
- شکل ۳-۲: اثر مجاورت ۱۴
- شکل ۴-۲: اثر حلقه ۱۵
- شکل ۵-۲: الف) مدل سه‌بعدی (ب) ارتباط بین جریان گردابی و هندسه سیم‌پیچ ۱۶
- شکل ۶-۲: قدرت توان سوئیچ‌ها در تجهیزات گرمایش القایی ۲۲
- شکل ۷-۲: تفاوت بین مدار سری و موازی ۲۳
- شکل ۸-۲: نمونه‌ای از انواع اینورترها بر اساس تعداد سویچ (الف) تک سوئیچ (ب) دو سوئیچ (نیم پل) (ج) چهار سوئیچ (تمام پل) ۲۵
- شکل ۹-۲: مدار معادل الف) سری (ب) موازی ۲۶
- شکل ۱۰-۲: مدل توسعه‌یافته سلف ۲۶
- شکل ۱۱-۲: مدل مداری تابه و سلف در سیستم و اجزاء امیدانس] ۲۸
- شکل ۱۲-۲: الف) شماتیک سیم‌های مختلف با توجه راندمان - هزینه (ب) راندمان دستگاه‌های حرارتی ۳۳
- شکل ۱۳-۲: تغییرات مشخصات مواد به تغییرات دما ۳۵
- شکل ۱۴-۲: الف) القاگر PCB در اندازه ۲۲۰ mm ۳۸
- شکل ۱۵-۲: مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده فلزات آهن و مس و آلومینیوم الف) اندوکتانس (ب) مقاومت ۴۲
- شکل ۱۶-۲: سیم‌پیچ برای ظرف‌های مختلف ۴۳
- شکل ۱۷-۲: مقاومت ورودی سیم‌پیچ وابسته به فرکانس ۴۳

- شکل ۳-۱: عمق نفوذ ۴۹
- شکل ۳-۲: مقاومت سطح ۴۹
- شکل ۳-۳: شکل مدل سیستم در نرم افزار سیم پیچ (نارنجی) و شیشه (سفید) و تابه (سبز) ۵۰
- شکل ۳-۴: مدل مش بندی شده سیستم ۵۱
- شکل ۳-۵: نمودار متوسط مربع میدان مغناطیسی ۵۲
- شکل ۳-۶: نمودار مقاومت نسبت به افزایش رشته ۵۲
- شکل ۳-۷: تأثیر حرارت بر مقاومت سیم پیچ ۵۴
- شکل ۳-۸: نمودار نسبت مقاومت به افزایش تعداد رشته در فرکانس بین ۲۰-۴۵ KHz (الف) رشته هادی ۰.۳ میلی متر ب) رشته هادی ۰.۴ میلی متر ۵۵
- شکل ۳-۹: ساختار سیم پیچ و تابه ۵۶
- شکل ۳-۱۰: تغییرات مقاومت تابه ۵۷
- شکل ۳-۱۱: مقاومت سیم پیچ ۵۸
- شکل ۳-۱۲: تأثیر تعداد دور بر اندوکتانس سیم پیچ ۵۹
- شکل ۳-۱۳: مقاومت انتقال یافته به سیمت سیم پیچ ۵۹
- شکل ۳-۱۴: مقاومت سیم پیچ ۵۹
- شکل ۳-۱۵: تأثیر فاصله سیم پیچ و تابه بر راندمان ۶۰
- شکل ۳-۱۶: تأثیر فاصله سیم پیچ بر اندوکتانس ۶۰
- شکل ۳-۱۷: ضریب کیفیت ۶۱
- شکل ۴-۱: مدار معادل شبکه که شامل شش المان (مدل کننده سیم پیچ سیستم گرمایش القایی) ۶۵
- شکل ۴-۲: مقایسه اندوکتانس شبکه با عناصر پسیو و شبیه سازی المان محدود متغیر با

- فرکانس ۶۶
- شکل ۳-۴: مقایسه مقاومت شبکه با عناصر پسیو و شبیه سازی المان محدود متغیر با فرکانس..... ۶۶
- شکل ۴-۴: چگالی جریان در کف تابه در جهت محور Z با فرکانس ۴۰ KHz ۶۷
- شکل ۵-۴: چگالی جریان در کف تابه در جهت قطر (خط فرضی) تابه ۶۷
- شکل ۶-۴: چگالی توان در کف تابه در جهت محور Z ۶۸
- شکل ۷-۴: توزیع میدان مغناطیسی الف (۵۰ Hz ب) ۵۰ KHz ۶۹
- شکل ۸-۴: تأثیر فرکانس بر اندوکتانس ۷۰
- شکل ۹-۴: تأثیر فرکانس بر مقاومت ۷۰
- شکل ۱۰-۴: مقاومت وابسته به سیم پیچ ۷۱
- شکل ۱۱-۴: نمودار راندمان در اثر تغییر فرکانس ۷۱
- شکل ۱۲-۴: مدار معادل اینورتر و بار در فرکانس متغیر با خازن ثابت ۷۲
- شکل ۱۳-۴: نمودار توان فرکانس با خازن ثابت ۷۲
- شکل ۱۴-۴: توزیع چگالی جریان در تابه ۷۳
- شکل ۱۵-۴: توزیع دما و شار حرارتی در تابه ۷۳
- شکل ۱۶-۴: نمودار شدت میدان ۷۴
- شکل ۱۷-۴: نمودار چگالی توان حرارتی ۷۴
- شکل ۱۸-۴: نمودار توزیع دما در راستای قطر ۷۵
- شکل ۱۹-۴: اختلاف دما در سطح پایین و سطح بالایی دیسک ۷۵
- شکل ۲۰-۴: نمودار دمای متوسط دیسک ۷۶
- شکل ۲۱-۴: تغییر دما روی خط فرضی با توجه به زمان ۷۶
- شکل ۲۲-۴: تأثیر فرکانس بر دما در طی زمان ۱۸۰۰ ثانیه ۷۷

- شکل ۴-۲۳: نمودار توان - فرکانس ۷۸
- شکل ۴-۲۴: تأثیر فرکانس بر دما در طی زمان ۱۸۰۰ ثانیه ۷۹
- شکل ۴-۲۵: مدار معادل اینورتر و بار ۸۰
- شکل ۴-۲۶: مقایسه توان محاسبه شده توسط متلب و شبیه‌سازی با FEM ۸۱
- شکل ۴-۲۷: منحنی حرارتی بر اساس تغییر سیکل وظیفه و زمان ۸۱

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲: مزایا و معایب اینورتر موازی و سری ۲۴
- جدول ۱-۳: مشخصات مواد ۴۹
- جدول ۱-۴: مشخصات فیزیکی فلزات ۶۴
- جدول ۲-۴: پارامترهای شبکه ۶۶
- جدول ۳-۴: یکنواختی دما ۷۸
- جدول ۴-۴: سیکل وظیفه و مقدار جریان در سیم‌پیچ ۸۰

فصل اول

مقدمه

گرمای الکتریکی بسیار شبیه به دیگر اشکال گرما می‌باشد. خورشید، شعله، بخاری همه این موارد ذکر شده به نوعی منبع حرارتی می‌باشند. در مقایسه، یک گرمکن الکتریکی یک منبع انرژی ثابت با دمای متغییر است. یعنی تا زمانی که انرژی بتواند از گرم کن انتقال یابد دمای جسم گرم شونده افزایش می‌یابد.

گرمایش القایی (IH^1) دارای کاربردهای بی‌شماری در صنایع فلز می‌باشد که به دلیل کنترل انرژی القایی در این صنعت به شکل گسترده استفاده می‌شود. چراکه انرژی زیادی را در حالت کنترل شده به قطعه کار انتقال می‌دهد، به همین دلیل درجایی که به انرژی بالا نیاز است مانند: ذوب فلز، برای چکش کاری فلز، برای فرم دادن فلز و جایی که به حرارت دقیق نیاز است مانند سخت شدن سطح، آهسته سرد شدن و برای پخت و پز مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر این به عنوان جوش القایی استفاده می‌شود [۱]. در این پایان نامه سعی داریم سیستم گرمایش القایی را مورد بررسی قرار دهیم.

۱-۱ تاریخچه

فناوری گرمایش القایی در اواخر سده نوزدهم در صنایع مورد استفاده قرار گرفت. اساس سیستم گرمایش القایی توسط فارادی وقتی که او جریان القایی توسط مغناطیس را کشف کرد پایه‌ریزی شد. و ماکسول بعدها تئوری الکترومغناطیس را گسترش داد و جیمز ژول حرارت تولید شده توسط جریان در هادی را تشریح کرد، و این گونه پایه و اساس گرمایش القایی شکل گرفت.

پدیده گرمایش القایی اولین بار در کاربردهای صنعتی در سال ۱۸۸۷ توسط فرانسیس^۲ معرفی شد، او استفاده از گرمایش القایی برای ذوب فلزات را پیشنهاد داد، که اولین اختراع در سیستم گرمایش القایی بود. بعدها در سال ۱۸۹۱ اصول کوره القایی را برای اولین بار به طور کامل تشریح شد.

^۱ Induction Heating

^۲ Sebastian Z. de Ferranti

اولین پیشرفت عمده وقتی اتفاق افتاد که نورثروپ^۱ ساخت اولین کوره القایی فرکانس بالا را در سال ۱۹۱۶ اجرا کرد، تقریباً هم‌زمان با آن، تکنولوژی گرمایش القایی فرکانس بالا با استفاده از مولدهای جرقه زن توسعه و بعدها مولدهای گرمایش القایی گسترش یافت. این آغاز سیستم گرمایش القایی فرکانس بالا به صورت مدرن بود. بعداً، در صنایع اتومبیل‌سازی و صنایع هوایی بشدت مورد استفاده قرار گرفت، و در فرایندهای صنعتی مهم بیشتر از پیش از سیستم گرمایش القایی مورد استفاده قرار گرفت. [۱].

با توسعه مبدل‌های حالت جامد انقلابی در تکنولوژی گرمایش القایی به وجود آمد، که به آن فن‌آوری، نیمه‌رسانای قدرت گفته می‌شود. ابتدا از تریستور برای این منظور بکار گرفته شد بعدها با معرفی BJT^۲ و MOSFET^۳، توانایی طراحی مبدل‌های فرکانس بالا برای ساخت تکنولوژی گرمایش القایی در بسیاری از کاربردها فراهم گردید. با پیشرفت‌های بیشتر در تکنولوژی نیمه‌هادی و معرفی IGBT^۴، موجب گسترش کاربرد فن‌آوری گرمایش القایی فراتر از محیط‌های صنعتی شد. تا آنجاکه اواخر دهه ۸۰ میلادی، گرمایش القایی در لوازم خانگی به کار گرفته شد، و امروزه اجاق القایی صفحه‌ای به خوبی در بسیاری از کشورها مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این در قرن بیست و یکم، علاقه خاصی به استفاده گرمایش القایی برای کاربردهای پزشکی به دلیل مزایای آن مانند شرایط حرارت دهی دقیق و محلی برای درمان استفاده شده است. در حال حاضر، فن‌آوری گرمایش القایی به سرعت در جهت افزایش قابلیت اعتماد و راندمان در حال تکامل است. [۱].

Edwin F. Northrup^۱

Bipolar junction transistor^۲

Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor^۳

Insulated gate bipolar transistor^۴

۲-۱ انگیزه‌های تحقیق

در روش‌های سنتی پخت‌وپز، قرار دادن یک تابه بر روی آتش ناشی از مواد قابل احتراق مانند چوب، زغال‌سنگ و گاز می‌باشد. این روش پخت‌وپز معمولی برای هزاران سال انجام می‌شد، و هنوز امروزه تعدادی از خانواده‌ها از این روش برای پخت‌وپز استفاده می‌کنند. از معایب این روش می‌توان به انتقال حرارت در حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد از انرژی کل به تابه اشاره کرد، که این نشان می‌دهد که بخش بزرگی از گرما به هدر می‌رود و در محیط منتشر می‌شود.

با توجه به این که راندمان ناشی از احتراق سوخت کم است، به همین خاطر امروزه از روش گرمایش القایی برای کاربرد خانگی استفاده می‌کنند. گرمایش القایی یک روش با فرکانس بالا است که در قطعه موردنظر تلفات جریان گردابی ایجاد نموده، و این تلفات در تابه تولید حرارت می‌کند.

در حال حاضر به لطف مزایای متعدد از جمله بهره‌وری بالای گرمایش القایی، کنترل پاکیزگی از اجاق القایی در رستوران‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. از طرفی راندمان اجاق القایی معمولاً بین ۸۰ تا ۹۰ درصد حتی بالاتر می‌باشد که به‌طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به استفاده از شعله کارآمدتر است.

۳-۱ اهداف تحقیق

در این تحقیق مطرح کردن الگوریتم طراحی با در نظر گرفتن عوامل تأثیرگذار سیستم گرمایش القایی از جمله تعداد دور، ارتفاع قطعه کار از سیم‌پیچ، جنس تابه مورد استفاده در پخت‌وپز، کوپل حرارتی و الکترومغناطیسی مورد مطالعه قرار گرفته است. علاوه بر آن تأثیر فرکانس کلید زنی و سیکل وظیفه بر روی حرارت تولیدی بررسی گردید. همچنین عملکرد سیم‌پیچ با استفاده از عناصر پسیو در یک شبکه مدلسازی خواهد شد. در طول مطالعه از نرم‌افزار المان محدود (FEM^۱) برای

^۱ Finite Element Method

بررسی جریان گردابی و اثر حرارتی استفاده شده است.

۴-۱ مروری بر فصل‌های پایان‌نامه

در فصل دوم به سوابق موضوع و تعاریف موردنیاز پرداخته می‌شود. در این فصل، گزارشی از مطالعات انجام‌شده و مدلی از سیم‌پیچ گرمایش القایی مطرح‌شده و معادلات ریاضی مرتبط با سیستم گرمایش القایی نیز بیان می‌شود. در فصل سوم تأثیر عوامل مؤثر بر طراحی سیم‌پیچ در سیستم گرمایش القایی موردبحث قرار گرفته و تأثیر این پارامترها بر مدار معادل این سیستم موردبررسی قرار می‌گیرد. در نهایت این فصل را با طراحی سیم‌پیچ برای گرمایش القایی به پایان می‌رسانیم. در فصل چهارم مدلی برای اینورتر معرفی شده و تأثیر فرکانس کلید زنی و سیکل وظیفه موردبررسی قرار گرفته و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد. در فصل پنجم، نتایج به‌طور خلاصه بیان و پیشنهادها برای تحقیقات آتی ارائه خواهد شد.

فصل دوم

پیش درآمد موضوع و مروری بر

کارهای گذشته

تکنولوژی گرمایش القایی در بسیاری از صنایع و لوازم خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرد، این دستگاه‌ها معمولاً از یک اینورتر و سلف و قطعه فلز تشکیل می‌شوند. عملکرد سیستم گرمایش القایی به این صورت است که، با عبور جریان متناوب از سیم‌پیچ میدان مغناطیسی متناوب ایجاد می‌شود، این میدان مغناطیسی متناوب موجب ایجاد جریان گردابی در تابه می‌شود و در مواد فرو مغناطیس هسیتریس هم موجب تولید حرارت می‌شود. بنابراین تلفات جریان گردابی تشریح مسئله گرمایش القایی بر اساس چند قوانین فیزیکی بوده، که در این فصل تعدادی از این قوانین مطرح شده و تولید جریان متناوب و روابط محاسبه مقاومت سیم‌پیچ بررسی می‌گردد.

۱-۲ معادلات و قوانین

فرآیند گرمایش القایی با استفاده از قوانین فیزیک تشریح می‌شود، معادلات ماکسول که برای تعیین توزیع چگالی جریان و چگالی توان در درون جسم گرم بکار رفته و در حالی که قانون فوریه حرارت را در جسم گرم پیش‌بینی می‌کند. قوانین دیگری که در این فرآیند بکار می‌رود می‌توان به قانون اهم، قانون ژول لنز، پدیده اثر پوستی، اثر مجاورت و اثر حلقه اشاره کرد [۲].

۱-۱-۲ معادلات ماکسول

معادلات ماکسول مجموعه‌ای از معادلات است، که پدیده الکترومغناطیسی را به‌طور کامل توصیف می‌کند به‌ویژه توزیع فضایی بردارهای $\vec{E}, \vec{H}, \vec{D}, \vec{B}$ و همچنین وابستگی به زمان در معادلات ماکسول نظر گرفته می‌شود. این معادلات به صورت فرمول‌های (۱-۲) تا (۴-۲) تعریف می‌شود [۲].

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1-2)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2-2)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (3-2)$$

$$\operatorname{div} \bar{D} = \rho$$

(۴-۲)

در روابط (۱-۲) الی (۴-۲) پارامترها به صورت زیر تعریف می‌شود.

\bar{H} : شدت میدان مغناطیسی

\bar{B} : چگالی شار مغناطیسی

\bar{E} : شدت میدان الکتریکی

\bar{D} : چگالی شار الکتریکی

\bar{J} : چگالی جریان

t : زمان

ρ : چگالی بار الکتریکی

۲-۱-۲ اثر پوستی در هادی استوانه‌ای

اثر پوستی، منجر به توزیع غیریکنواخت چگالی جریان الکتریکی در سطح مقطع یک هادی یا شار مغناطیسی در یک سطح مقطع از هسته مغناطیسی می‌شود. چگالی جریان در هادی و یا شار مغناطیسی در هسته از سطح مقطع به سمت داخل جسم کاهش می‌یابد. اگر در هادی جریان DC شارش یابد چگالی جریان در سطح مقطع هادی یکنواخت و از رابطه (۵-۲) به دست می‌آید [۲].

$$J = \frac{I}{s} \quad (۵-۲)$$

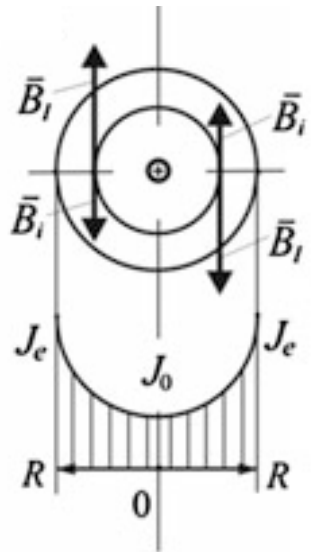
در در رابطه (۵-۲) پارامترها به صورت زیر تعریف می‌شود.

I : جریان الکتریکی

s : سطح مقطع هادی

ω : فرکانس زاویه‌ای

حال اگر در هادی جریان AC جاری شود یک حالت متفاوتی رخ می‌دهد که دیگر چگالی جریان در سطح مقطع هادی ثابت نیست و جریان در نزدیکی سطح افزایش می‌یابد و در سطح مقطع هادی چگالی جریان به صورت نامتعالی جاری می‌شود. این پدیده از لحاظ کیفی در شکل ۱-۲ نشان داده شده است [۲].



شکل ۱-۲: اثر پوستی در هادی استوانه‌ای بی‌نهایت [۲]

۳-۱-۲ عمق نفوذ

عمق نفوذ در رسانا (بار): نفوذ میدان در مواد با شکل‌های دلخواه (خواه فرو مغناطیس یا غیر مغناطیس) یک مسئله پیچیده است. برای حل این مسئله فرض می‌کنیم که مواد فرو مغناطیس، خطی، همسانگرد^۱ هستند. بر این اساس یک معادله دیفرانسیل خطی مرتبه دوم با استفاده از معادله ماکسول بنا می‌کنیم. سپس نفوذ میدان‌ها را در هادی‌ها به صورت یک جواب از این معادله بدست می‌آید [۳].

معادله برای H، با استفاده از معادله $\text{rot } \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$ و اعمال چرخش به دو طرف معادله

^۱ Isotropic

زیر بدست می آید.

$$\text{rot rot } H = \text{rot } J \quad (۶-۲)$$

با توجه به سمت چپ معادله (۶-۲) برابر معادله (۷-۲) می شود.

$$\text{rot rot } H = \text{grad div } H - \nabla^2 H \quad (۷-۲)$$

با فرض اینکه نفوذپذیری در تمام محیط ثابت است.

$$\text{div } B = 0$$

$$\mu \text{div } H = 0 \quad (۸-۲)$$

$$\text{div } H = 0$$

که رابطه (۷-۲) را به صورت (۹-۲) می توانیم بنویسیم.

$$\text{rot rot } H = -\nabla^2 H \quad (۹-۲)$$

سمت راست معادله (۹-۲) را به صورت معادله (۱۰-۲) می توان نوشت:

$$\text{rot } J = \text{rot } \sigma E = \sigma \text{rot } E = -\sigma \frac{\partial B}{\partial t} = -\sigma \mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (۱۰-۲)$$

μ : نفوذپذیری مغناطیسی

σ : رسانایی ویژه

و با جایگذاری معادلات (۹-۲) و (۱۰-۲) در معادله (۷-۲)، معادله (۱۱-۲) بدست می آید.

$$\nabla^2 H = \sigma \mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (۱۱-۲)$$

معادله برای B ، به صورت:

$$\nabla^2 B = \sigma\mu \frac{\partial B}{\partial t} \quad (12-2)$$

معادله برای E، به صورت:

$$\nabla^2 E = \sigma\mu \frac{\partial E}{\partial t} \quad (13-2)$$

معادله برای J، به صورت:

$$\nabla^2 J = \sigma\mu \frac{\partial J}{\partial t} \quad (14-2)$$

شکل کلی معادلات (11-2) و (12-2) و (13-2) و (14-2) به صورت معادله (15-2) است.

$$\nabla^2 V = \sigma\mu \frac{\partial V}{\partial t} \quad (15-2)$$

با حل معادله (15-2) جواب بردارهای H، B، E، J هم مشخص می شود [3]، و V یکی از بردارهای فوق بوده، برای ساده سازی فرض می کنیم همه میدانها در طبیعت به صورت سینوسی هستند. با استفاده از چگالی جریان J به عنوان متغیر به صورت مختلط نشان داده می شود.

$$J = J_0 e^{j\omega t} \quad (16-2)$$

که در پس با جایگذاری رابطه (16-2) در معادله (15-2) معادله (17-2) بدست می آید.

$$\nabla^2 J - \sigma\mu\omega J = 0 \quad (17-2)$$

متغیر δ را به صورت معادله (18-2) بیان می کنیم.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma\mu\omega}} \quad (18-2)$$

δ : عمق نفوذ

معادله (۱۷-۲) را به صورت معادله (۱۹-۲) می توان نوشت:

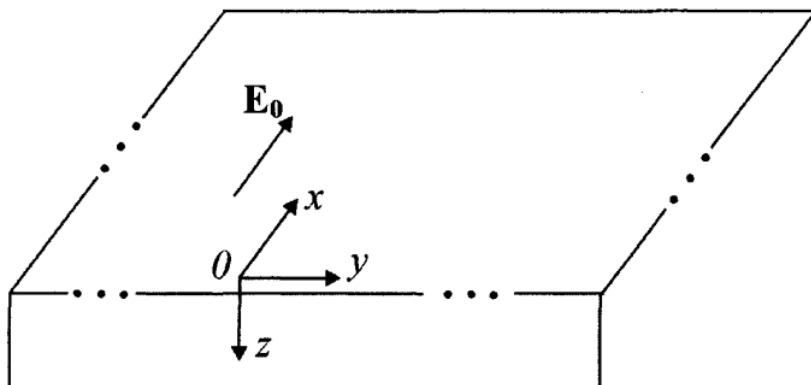
$$\nabla^2 J - \frac{2j}{\delta} J = 0 \quad (19-2)$$

حل این مسئله مشکل است، لازم است که مسئله بیشتر ساده شود. پس یک هادی نیمه بی نهایت مانند شکل ۲-۲ را در نظر می گیریم. و یک میدان الکتریکی منطبق بر جهت صفحه OX در سراسر بلوک در نظر می گیریم. با این فرض J فقط دارای یک مؤلفه در جهت x است، که به صورت معادله (۲۰-۲) می توان نوشت.

$$\frac{\partial^2 J_x(z)}{\partial z^2} - \frac{2j}{\delta} J_x(z) = 0 \quad (20-2)$$

حال جواب معادله (۲۰-۲) را به صورت معادله (۲۱-۲) می توان نوشت.

$$J_x(z, t) = J_0 e^{-z/\delta} \cos(\omega t - z/\delta) \quad (21-2)$$



شکل ۲-۲: یک میدان الکتریکی موازی با سطح بلوک هادی نیمه بی نهایت [۳]

که در معادله (۲۱-۲) به $J_0 e^{-z/\delta}$ اندازه چگالی جریان و به $-z/\delta$ فاز چگالی جریان گفته می‌شود هرچه z افزایش می‌یابد و فاز تغییر می‌کند دامنه به صورت نمایی کاهش می‌یابد که آن را با علامت δ نشان داده و عمق نفوذ می‌نامند [۳].

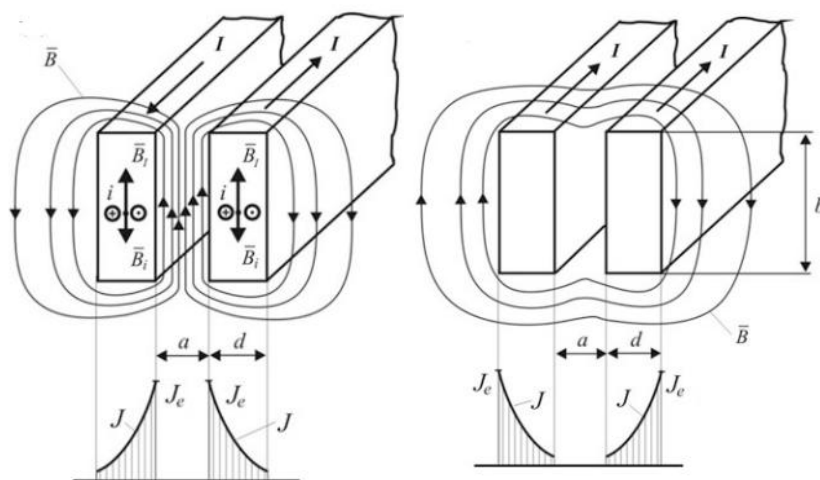
عمق نفوذ در هادی استوانه‌ای: با توجه به شکل ۱-۲ اثر پوستی چگالی جریان از سطح به سمت مرکز هادی به صورت نمایی کاهش می‌یابد [۲].

$$J = J_e e^{-\frac{y}{\delta}} \quad (22-2)$$

رابطه (۲۲-۲) نشان‌دهنده چگالی جریان در فاصله y از سطح هادی است [۲].

۲-۱-۴ اثر مجاورت

اثر مجاورتی، اثری است که موجب توزیع چگالی جریان در مناطق خاصی از هادی می‌شود. اگر یک هادی جریان AC عبور کند جریان در سطح مقطع هادی به صورت غیریکنواخت توزیع می‌شود، و اگر جریان متناوب در دو هادی جاری شود توزیع چگالی جریان تحت تأثیر فاصله بین دو هادی و جهت جریان دو هادی قرار می‌گیرد. در این حالت توزیع جریان در هادی تحت تأثیر تغییر میدان مغناطیسی تولیدشده ناشی از جریان هادی‌های دیگر می‌باشد. در شکل ۳-۲ این موضوع نشان

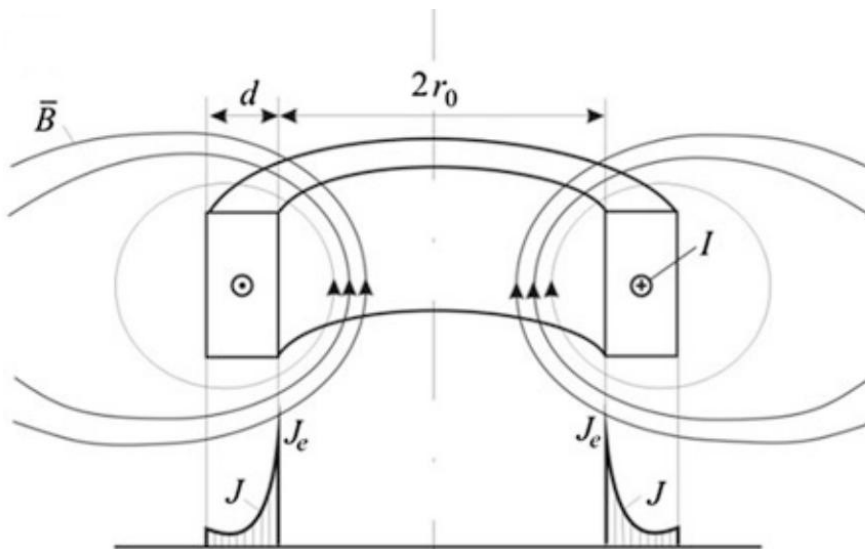


شکل ۳-۲: اثر مجاورت [۲]

داده شده است [۲]. اگر جریان دو هادی در خلاف جهت هم جاری شود، چگالی جریان در دیواره‌های داخلی سیم پیچ ماکزیمم است. اگر جریان دو هادی هم جهت باشد، چگالی جریان در دیواره‌های خارجی سیم ماکزیمم است [۲].

۲-۱-۵ اثر حلقه

اثر حلقه، وقتی جریان AC یا DC در هادی حلقوی جاری شود، بالاترین جریان در سطح داخلی حلقه متمرکز می‌شود، در شکل ۲-۴ نشان داده شده است. این پدیده را اثر حلقه سیم پیچ می‌گویند، که علت آن توزیع نامتقارن میدان مغناطیسی است [۲].



شکل ۲-۴: اثر حلقه [۲]

۲-۱-۶ جریان گردابی

در این قسمت با استفاده از یک سیم پیچ تک دوری به تشریح مسئله جریان گردابی می‌پردازیم. مدل که بررسی شده بسیار ساده‌تر از کاربردهای عملی است اما برای آنالیز مقدماتی سیستم گرمایش القایی ضروری است که مطرح گردد. مدل ریاضی متناسب با سیستم اجاق القایی نیز بررسی می‌شود.

۱-۶-۱-۲ مدل جریان گردابی با یک سیم پیچ

شکل (۵-۲ الف) مدل سه بعدی گرمایش القایی را نشان می دهد. بر اساس این مدل مشخصات توزیع جریان گردابی مشخص می شود. فرض کنید که یک صفحه فلزی به صورت موازی با دایره C_1 با شعاع r_1 ، و مشابه با C_1 یک دایره C_2 با شعاع r_2 وجود دارد (شکل ۵-۲ ب). دایره ها هم مرکز بوده و فرض می شود که مرکز C_2 ، a_r باشد که در (شکل ۵-۲ ب) نشان داده شده است [۴].

که در آن C_1 به یک منبع جریان متناوب متصل و فاصله بین فلز و سیم پیچ بسیار نزدیک است. با توجه به قانون فارادی پتانسیل الکتریکی در حلقه دایره ای از رابطه (۲۳-۲) بدست می آید.

$$e = - \frac{d\varphi}{dt} \quad (23-2)$$

e : پتانسیل الکتریکی

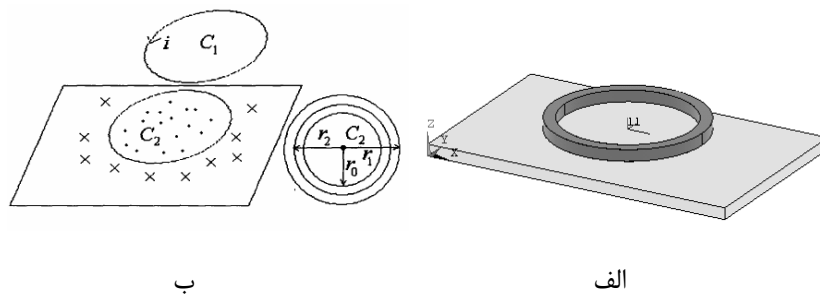
φ : شار مغناطیسی القاشده توسط سیم پیچ

φ_M : اندازه شار

وقتی که جریان تحریک متغیر با زمان باشد، چگالی میدان مغناطیسی نیز تغییر می کند. در

این صورت:

$$\varphi = \varphi_M \sin(\omega t) \quad (24-2)$$



شکل ۵-۲: الف) مدل سه بعدی ب) ارتباط بین جریان گردابی و هندسه سیم پیچ [۴]

مقاومت حلقه دایره‌ای از رابطه (۲۵-۲) بدست می‌آید [۴].

$$R = \rho \frac{l}{s} = \rho \frac{2\pi a_r}{d_r \delta} \quad (25-2)$$

φ_M : اندازه شار

l : طول سیم‌پیچ

a_r : شعاع دایره

d_r : قطر هادی

R : مقاومت

توزیع چگالی جریان در دو موقعیت (خارج از حلقه C_2 و داخل حلقه C_2) مطرح می‌شود.

الف: وضع جریان در خارج از حلقه C_2

جریان گردابی از رابطه (۲۶-۲) محاسبه می‌شود [۴].

$$i = \frac{e}{R} = -\frac{\omega d_r \delta}{2\pi \rho} \times \frac{\varphi_M}{\alpha_r} \cos \omega t \quad (26-2)$$

برای فلزات با عمق نفوذ، مقاومت ویژه الکتریکی و فرکانس عملکرد مشخص، ضریب

$K_1 = -\frac{\omega d_r \delta}{2\pi \rho}$ ثابت می‌باشد. با افزایش شعاع دایره α_r ، φ_M با شیبی کاهش می‌یابد، بنابراین در

خارج از شعاع سیم‌پیچ چگالی جریان گردابی با افزایش شعاع کاهش می‌یابد.

ب: وضع جریان در داخل حلقه C_2

شار مغناطیسی φ در سطح مقطع می‌توان از رابطه زیر بدست آورد.

$$\varphi = \int_S B ds_n \quad (27-2)$$

چون در چگالی شار B شار فلز پیوسته است، پس از انتگرال فرمول اصلی در اینجا B_a از رابطه زیر بدست می آید.

$$\int_S B ds_n = B_a S \quad (28-2)$$

S_n : جزء سطح

که در اینجا n طبق قانون دست راست در امتداد خطوط دایره ای صفحه می باشد، و بدیهی است که شار مغناطیسی موازی با n می باشد. S مساحتی است که توسط حلقه مدار احاطه شده است. شار مغناطیسی که از سطح عبور می کند از رابطه زیر می آید.

$$\varphi = B_a \pi r_2^2 \quad (29-2)$$

$$e = - \frac{d}{dt} B_{aM} \pi r_2^2 \sin \omega t \quad (30-2)$$

B_{aM} : اندازه چگالی شار مغناطیسی

r_2 : شعاع خارجی حلقه

جریان گردابی در داخل حلقه از رابطه (2-31) بدست می آید.

$$i = \frac{e}{R} = - \frac{\omega d_r \delta}{2\rho} \times \frac{\varphi_M}{\alpha_r} \cos \omega t \quad (31-2)$$

برای نوار فلزی با عمق نفوذ، مقاومت و فرکانس مشخص، ضریب $K_2 = - \frac{\omega d_r \delta}{2\pi\rho}$ ثابت است و

با افزایش شعاع α_r ، $B_{aM} \alpha_r$ افزایش می یابد [4].

۲-۶-۱-۲ مدل ریاضی جریان گردابی

مدل‌سازی ریاضی یک روش مهم برای مطالعه اصول، عملکرد و مشخصه ذاتی یک سیستم گرمایش القایی است. مدل‌سازی ریاضی می‌تواند از یک معادله ساده به یک تجزیه تحلیل عددی بسیار متفاوت باشد. برای توجیه پدیده الکترومغناطیسی در حالت متغیر با زمان از معادله ماکسول، و از معادلات (۲-۳۲)، (۲-۳۳) و (۲-۳۴) برای مواد همسانگرد، خطی و همگن استفاده می‌شود.

$$B = \mu H \quad (۲-۳۲)$$

$$D = \varepsilon E \quad (۲-۳۳)$$

$$J = \sigma E \quad (۲-۳۴)$$

ε : ضریب گذردهی الکتریکی

با استفاده از معادلات ماکسول و معادلات (۲-۳۲)، (۲-۳۳) و (۲-۳۴) معادله جریان گردابی را به صورت معادله (۲-۳۵) می‌توان نوشت.

$$\frac{1}{\mu} (\nabla \times \nabla \times A) = J_s - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (۲-۳۵)$$

A : پتانسیل برداری

J_s : چگالی جریان تحریک

با مشخص شدن پتانسیل برداری در معادله جریان گردابی و با توجه به قانون ژول توان حرارتی تعیین می‌گردد [۵].

$$J_e = \sigma E = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} = -j\omega\sigma A \quad (۲-۳۶)$$

J_e : چگالی جریان گردابی

از طرفی کل تلفات ایجاد شده توسط جریان گردابی توسط رابطه (۳۷-۲) بدست می آید. حال در می یابیم که افزایش مقاومت به مفهوم توان حرارتی تولید شده بیشتر است. پس اگر چگالی جریان گردابی J_e باشد می توان توان حرارتی را به صورت رابطه (۳۸-۲) نوشت. محاسبه تلفات متوسط با انتگرال گیری بدست می آید، که در معادله (۳۹-۲) نشان داده شده است. حاصل معادلات (۳۸-۲) و (۳۹-۲) باید با هم برابر باشد. که اگر انتگرال گیری تنها بر روی سطح یک جزء محدود انجام شود، می توان گرمایش محلی این جزء را بدست آورد [۳].

$$P = \frac{RI^2}{2} \quad (۳۷-۲)$$

$$P = \frac{J_e^2}{\sigma} \quad (۳۸-۲)$$

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_s \frac{J_e^2}{\sigma} dsd(\omega t) \quad (۳۹-۲)$$

P : توان الکتریکی

۱-۲-۷ انتقال حرارت

انتقال دما به علت شیب حرارتی یا اختلاف دما را انتقال حرارت می نامند. اختلاف دما نیرو محرکه ای است که باعث جریان حرارت می شود. به این ترتیب انتقال حرارت به سه روش هدایت، جابجایی و تابش صورت می گیرد.

۱-۲-۱ هدایت

هدایت، فرایند تدریجی است که بر اساس آن دمای درون جسم یا بین اجسام مختلفی که با برخورد فیزیکی دارند، انتقال پیدا می کند.

۲-۷-۱-۲ جابجایی

همرفت وقتی اتفاق می‌افتد که یک سیال با یک جسم جامد گرم تماس یافته است. در این حالت جنبش ثابتی وجود خواهد داشت که ذرات گرم شده با ذرات سرد شده جایگزین خواهد شد.

۲-۷-۱-۳ تابش

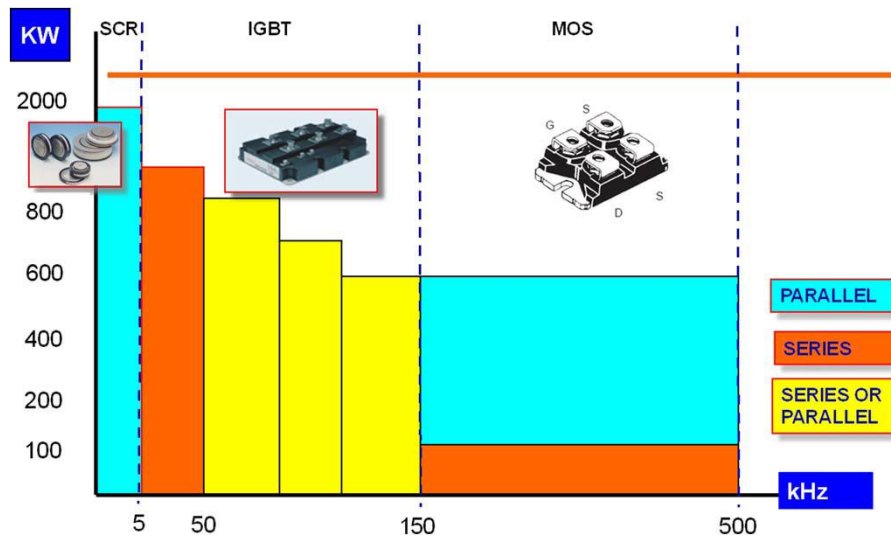
در هدایت و جابجایی برای انتقال انرژی نیاز به ماده است. از این رو به انتقال انرژی در یک محیط خلأ کامل تابش الکترومغناطیسی می‌گویند. در این نوع انتقال انرژی نیازی به ماده نیست. در این حالت جسم در دما T به جسم دیگر در دمای T_a ، انرژی می‌تابد.

۲-۲ الکترونیک قدرت

با پیشرفت فن‌آوری‌های کلید توسعه تکنولوژی گرمایش القایی امکان‌پذیر شده است. در حالی که توانایی تکنولوژی عادی سیستم گرمایش القایی شامل اینورتر، الگوریتم‌های مدولاسیون و کنترل می‌شود که مورد بحث قرار می‌گیرد. سیستم اینورتر استاتیکی شامل کلیدهای نیمه‌هادی قدرت می‌شود که به‌طور گسترده در سیستم گرمایش القایی بکار رفتند.

۲-۲-۱ سوئیچ

سیستم اینورتر استاتیکی شامل کلیدهای نیمه‌هادی قدرت می‌شود که به‌طور گسترده در سیستم گرمایش القایی بکار رفتند [۶]. بسته به نوع کاربرد نهایی، حرارت مواد، فرکانس مبدل قدرت به‌طور قابل توجهی متفاوت است، که از چند هرتز برای دستگاه‌های توان بالا به‌نوعی برای ذوب فلز، تا فرکانس چند صد کیلوهرتز، برای گرم کردن سطح لازم است. به‌عنوان یک نتیجه، نیمه‌هادی مورد استفاده در مبدل‌های گرمایش صنعتی تریستور هستند، که در فرکانس‌های تا ۳ کیلوهرتز، توانی در حد چند مگاوات عمل می‌کنند، در حالی که IGBT تا، در فرکانس‌های تا ۱۵۰ کیلوهرتز و با توانی تا ۳ مگاوات به‌طور معمول استفاده می‌شود. ماسفت برای فرکانس‌های بالاتر، تا چند صد کیلوهرتز و



شکل ۲-۶: قدرت توان سوئیچها در تجهیزات گرمایش القایی [۱]

قدرت خروجی کمتر از ۵۰۰ کیلووات استفاده می‌شود. شکل ۲-۶ خلاصه منطق استفاده از نیمه‌هادی، بسته به فرکانس کلید زنی، سطح قدرت، و نوع تانک تشدید، سری، و یا موازی، را نشان می‌دهد [۱].

۲-۲-۲ اینورتر

اینورتر، عامل مهم در تغذیه فرکانس جریان سیم‌پیچ است [۶]. فرکانس عملکرد معمولاً بیش از ۲۰ KHz است تا نویز صدا به وجود نیاید و تا ۱ MHz، بسته نوع کاربرد متغیر است. در حال حاضر، امروزه در بسیاری از دستگاه‌های گرمایش القایی برای تولید چگالی توان بالا از اینورتر تشدید سری یا اینورتر تشدید موازی استفاده می‌شود. تعداد زیادی از این اینورترها در سیستم گرمایش القایی توسعه یافته‌اند که معمولاً از دو نوع اینورتر در این سیستم بیشتر استفاده شده است.

الف) اینورتر موازی منبع جریانی

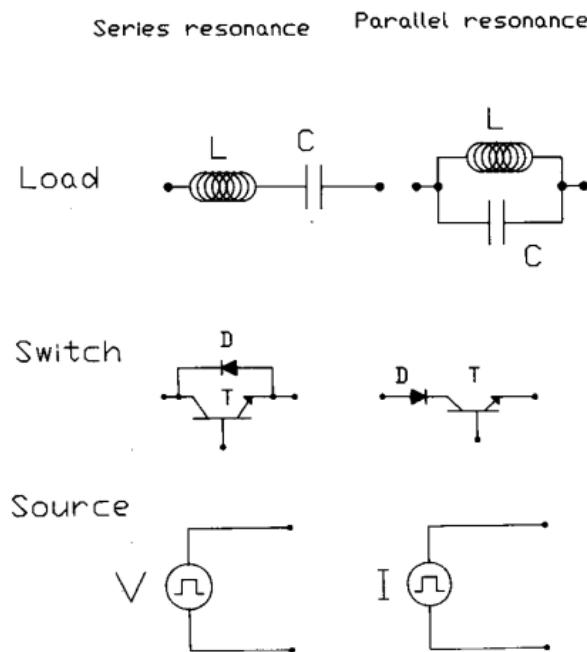
ب) اینورتر سری منبع ولتاژی

اینورتر موازی منبع جریانی: این اینورترها از لحاظ تئوری از یک منبع جریان به‌عنوان منبع انرژی استفاده می‌کنند اما از آنجایی که در عمل منبع جریان وجود ندارد می‌بایست با سری کردن منبع

ولتاژ و یک سلف این منبع جریانی را تولید می‌کنند در این ساختار از دیود سری استفاده می‌شود این سویچ‌ها توانایی نگهداری ولتاژ را در هر دو جهت رادارند اما جریان آن‌ها یک‌طرفه است یعنی فقط جریان آن‌ها مثبت باشد می‌توان آن‌ها را سوئیچ نمود. از این اینورتر می‌توان برای کاربردهای توان بالا استفاده نمود. قدرت توسط یک منبع جریان تولید می‌شود و از یک سلف که به‌صورت سری، با سیم‌پیچ موازی قرار می‌گیرد [۶].

اینورتر سری منبع ولتاژی: در این نوع اینورترها انرژی موردنیاز توسط منبع ولتاژ تأمین می‌گردد. در ساختار این اینورتر از دیود موازی استفاده می‌شود. این سویچ‌ها توانایی عبور جریان را در هر دو جهت رادارند اما ولتاژ آن‌ها یک‌طرفه است یعنی فقط ولتاژ آن‌ها مثبت باشد می‌توان آن‌ها را سوئیچ نمود [۶].

در شکل ۷-۲ تفاوت بین مدار سری و موازی نشان داده شده است و در جدول (۱-۲) به‌طور خلاصه مزایا و معایب اینورتر سری و موازی نشان داده می‌شود [۷].



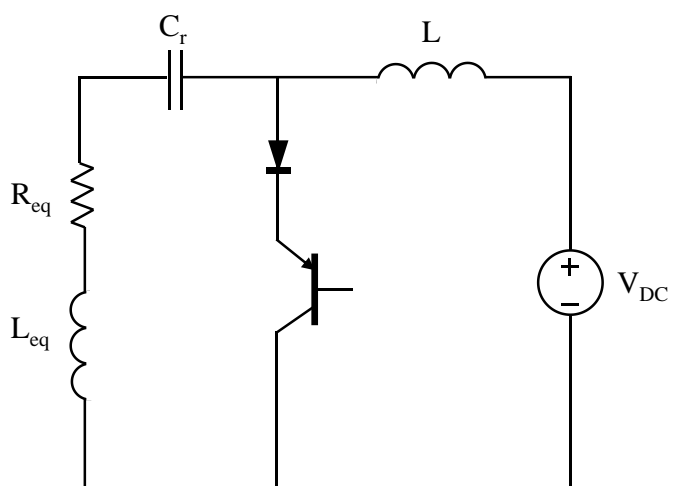
شکل ۷-۲: تفاوت بین مدار سری و موازی [۷]

جدول ۲-۱: مزایا و معایب اینورتر موازی و سری

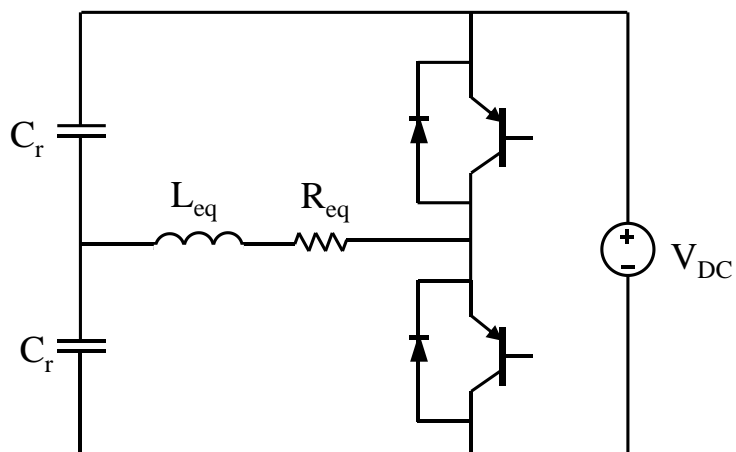
اینورتر موازی	اینورتر سری
(+) امکان عملکرد در بی‌باری	(+) ساختار ساده‌تر، در نتیجه، بسیار ارزان‌تر
(+) قابلیت اتصال کوتاه در سیم‌پیچ کار	(+) کنترل ساده
(+) خازن با ولتاژ بالا لازم نیست	(+) منبع قدرت یک یکسو شده بدون کنترل
(+) ترانزیستور در زمان عبور جریان روشن است	(-) عمل در بی‌باری با یک کنترل پیچیده
(-) منطق کنترل پیچیده‌تر	(-) بدون توانایی اتصال کوتاه
(-) منبع قدرت توسط یک یکسو کننده کنترل شده و یا چاپر	(-) کنترل توان توسط شیفتر فرکانسی می‌تواند مشکلات در برخی از کاربردها رخ دهد
(-) نیاز به یک چوک صاف	
(-) اندازه بزرگتر	

یکی از روش‌های دسته‌بندی اینورترها، ثبت تعداد سوئیچ دستگاه‌ها است که در حالت عادی ساختارهای اینورتر، در سیستم گرمایش القایی از اینورتر تشدید پل کامل [۸]، نیم پل [۹]، [۱۰] و تک سوئیچ [۱۱] استفاده می‌شود که در شکل ۲-۸ نشان داده شده‌اند.

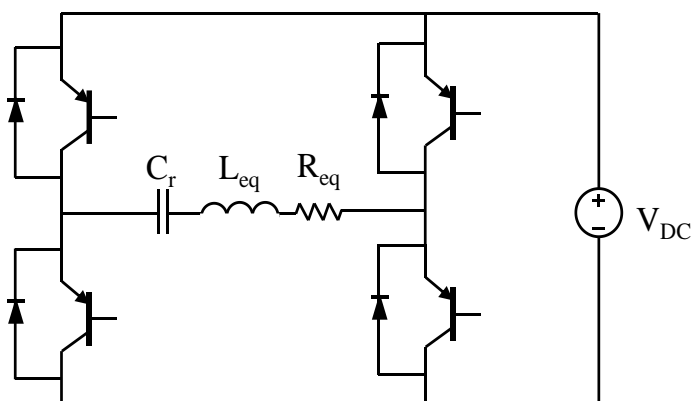
از ساختار پل کامل برای قدرت بالای ۱KW، و این استاندارد منتخب برای دستگاه‌های صنعتی است، که در اینجا از اینورتر تک سوئیچ برای تولید حرارت با سیستم گرمایش القایی کوچک و لوازم خانگی در محدوده توان ۲KW استفاده می‌شود.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۸-۲: نمونه‌ای از انواع اینورترها بر اساس تعداد سویچ (الف) تک سویچ (ب) دو سویچ (نیم پل) (ج) چهار سویچ (تمام پل)

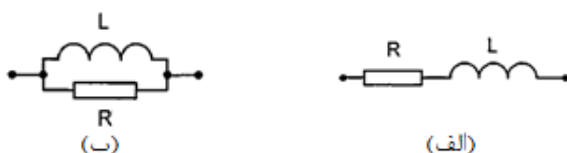
۳-۲ پارامترهای سیم‌پیچ اجاق القایی

طراحی اجزای مغناطیسی در سیستم گرمایش القایی سیستم القاگر و بار بسیار مهم است. تلاش‌های قابل توجهی برای مدل‌سازی انجام شده است، تحلیل طراحی یا تحلیل اجزای محدود FEM برای استخراج پارامترهای مدار معادل الکتریکی و راندمان مهم است.

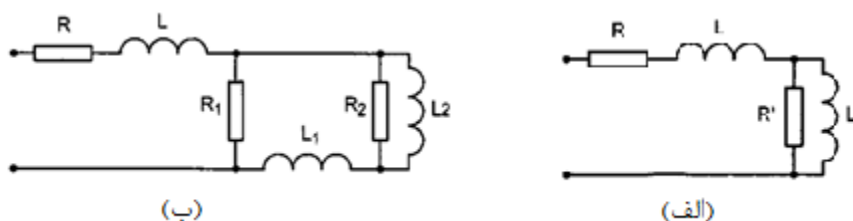
۳-۲-۱ مدار معادل سیم‌پیچ

در طراحی مبدل‌ها از عملکرد سیم‌پیچ و بار بهره گرفته می‌شود، پس ضروری است که مدل‌سازی بار القاگر به صورت صحیح مطرح شود. با استفاده از مشخصات تابه (هندسی و مواد) باید مقاومت سطح در فرکانس‌های متغیر تعیین گردد. در این صورت مدل الکتریکی را ارائه می‌دهیم که معرف سلف باشد. پس می‌توانیم القاگر را به صورت اتصال سری و یا موازی مدار L-R نشان دهیم [۱۲] و [۱۳] و [۱۴].

شکل ۲-۹، R نشان‌دهنده مجموع توان کل (تلفات سیم‌پیچ و توان بار) در سلف است و L اثر القا در سیم‌پیچ کوپل شده با بار القاگر می‌باشد. اما این مدار معادل برای مدل‌سازی یک فرکانس به



شکل ۲-۹: مدار معادل الف (سری ب) موازی [۱۳]



شکل ۲-۱۰: مدل توسعه‌یافته سلف [۱۳]

کار می‌رود از این دو مدل برای مدل‌سازی مؤلفه اصلی می‌توان استفاده کرد [۱۳].

بنابراین مدار معادل مناسب در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است. بار القاگر را می‌توان به صورت دستگاه القایی، و تابه را به عنوان هسته مغناطیسی مدل کرد. در این صورت R و L مقاومت سری و اندوکتانس نشستی سیم‌پیچ است و R' و L' پارامترهای موازی مطابق با شار و تلفات در تابه است. باین حال این مدل نمی‌تواند تلفات جریان گردابی را که وابسته به فرکانس است را مدل نماید. مدار معادل نهایی در شکل ۲-۱۰ ب) نشان داده شده است که در آن به جای L' از L_1 و R_2 و L_2 استفاده می‌شود و در نتیجه جریان گردابی با فرکانس‌های متغییر توسط این شبکه مدل‌سازی می‌شود [۱۳].

۲-۳-۲ مؤلفه‌های امپدانس معادل سیستم دستگاه‌های گرمایش القایی

در مرجع [۱۵] امپدانس معادل سیستم القایی یک بار صفحه‌ای دایره‌ای شکل بررسی شده است. معمولاً سیستم توسط مدار سری مقاومت و اندوکتانس مدل می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲-۱۱ مشاهده می‌شود مدار معادل از مقادیر R_{eq} و L_{eq} بدست می‌آید. پس امپدانس را می‌توان به صورت حاصل جمع مقاومت و اندوکتانس نوشت.

$$Z = R_{eq} + j\omega L_{eq} = j\omega\mu_0\pi \int_0^{\infty} [1 - \Phi(k)e^{-2kd}] T(k) dk \quad (۴۰-۲)$$

R_{eq} : مقاومت معادل

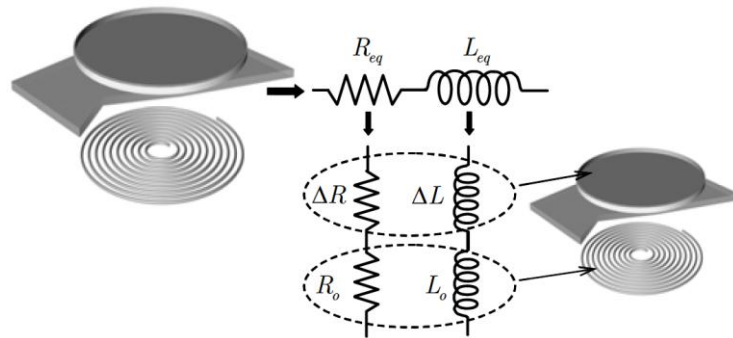
L_{eq} : اندوکتانس معادل

k : متغییر انتگرال گیری

$\Phi(k)$: پارامتر مختلط وابسته به بار

$T(k)$: تابع شکل

d : فاصله سیم پیچ تا تابه



شکل ۲-۱۲: مدل مداری تابه و سلف در سیستم و اجزاء امپدانس [۱۴]

$\Phi(k)$ شامل قسمت حقیقی و موهومی می‌شود، $\Phi = \Phi_r + j\Phi_i$ امپدانس را می‌توان به صورت

حاصل جمع مقاومت و اندوکتانس نوشت.

۱-۲-۳-۲ مقاومت سیستم

با توجه به رابطه (۲-۴۱) مقاومت کل سیستم را به صورت R_{eq} نشان داده می‌شود. R_{eq} به مجموع توان تلفاتی در سیم‌پیچ (تلفات هدایتی و تلفات القایی) و توان جذب‌شده در ظرف وابسته است. R_0 نماد توان تلف‌شده در سیم‌پیچ و مقاومت ΔR نماد توان جذب شده برای گرم کردن بار از طریق پدیده القا می‌باشد [۱۶].

$$R_{eq} = R_0 + \Delta R \quad (۲-۴۱)$$

R_0 : مقاومت سیم‌پیچ

ΔR : مقاومت معادل تابه انتقال یافته به سمت سیم‌پیچ

تلفات در سیم گرد شامل دو جزء تلفات هدایتی و تلفات القایی می‌شود. تلفات هدایتی، تلفات

به دلیل اثر ژول که با عبور جریان در سیم، تلفات هدایتی P_{cond} گفته می‌شود. این تلفات و تلفات اثر

پوستی جزء تلفات DC در نظر گرفته می‌شود. مقاومت معادل این تلفات از فرمول [۱۶]:

$$R_{cond_ul} = \frac{\xi}{2\pi r_0 \sigma_{cu}} \phi_{cond}(\xi r_0) \quad (42-2)$$

$$\phi_{cond}(\xi r_0) = \frac{ber(\xi r_0)bei'(\xi r_0) - ber'(\xi r_0)bei(\xi r_0)}{ber'^2(\xi r_0) + bei'^2(\xi r_0)} \quad (43-2)$$

$$\xi = \frac{\sqrt{2}}{\delta} = \frac{1}{\sqrt{\omega\sigma\mu}} \quad (44-2)$$

R_{cond_ul} : مقاومت بر واحد طول

ξ : عضو وابسته به فرکانس

ber, bei', ber', bei : توابع کلویین

r_0 : شعاع هادی

تلفات القایی، تلفاتی که به دلیل جریان گردابی القاشده در هادی سیم پیچ به خاطر شار مغناطیسی تولیدشده توسط خود سیم پیچ می باشد را تلفات القایی P_{ind} می گویند، به آن در اصطلاح اثر مجاورتی گفته می شود. در واقع این اثر مجاورتی و اثر پوستی موجب توزیع غیریکنواخت در سیم پیچ شده و در نتیجه موجب افزایش تلفات سیم پیچ می شود و از رابطه (45-2) بدست می آید [16].

$$R_{ind} = \frac{8\pi^2 \xi r_0}{\sqrt{2}\sigma} \phi_{ind} \sum_{i=1}^n a_i (H_{0,i}^T)^2 \quad (45-2)$$

R_{ind} : مقاومت القایی

ber, bei', ber', bei : توابع کلویین

a_i : شعاع در دور i ام حلقه

$H_{0,i}^T$: شدت میدان مغناطیسی خارجی به ازای جریان 1 آمپر

n : تعداد دور

مقدار مقاومت تابه از رابطه (۴۶-۲) استفاده می‌شود [۱۶].

$$\Delta R = \omega \pi \mu_0 \int_0^{\infty} \phi_i(k) e^{-2kd} T(k) dk \quad (46-2)$$

$$\phi(k) = \frac{\sqrt{k^2 + j\omega\sigma_l \mu_0 \mu_{rl}} - k\mu_{rl}}{\sqrt{k^2 + j\omega\sigma_l \mu_0 \mu_{rl}} + k\mu_{rl}} \quad (47-2)$$

$$T(k) = \left[\sum_{i=1}^n a_i J_1(ka_i) \right]^2 \quad (48-2)$$

σ_l : رسانایی بار

μ_{rl} : ضریب نفوذپذیری بار

J_1 : بسل نوع اول

۲-۲-۳-۲ محاسبه اندوکتانس

اندوکتانس معادل را می‌تواند به‌طور مجزا نوشت، که اندوکتانس سیم‌پیچ L_0 و اندوکتانس

سه‌م بار ΔL می‌باشد. بنابراین، برای اندوکتانس می‌توان به‌صورت معادله زیر نوشته می‌شود [۱۶].

$$L_{eq} = \Delta L + L_0 \quad (49-2)$$

L_0 : اندوکتانس سیم‌پیچ

ΔL : اندوکتانس سه‌م بار

L_{eq} که نشان‌دهنده ارتباط بین شار مغناطیسی کل و جریان تحریک است و ΔL ناشی از

جریان القاشده در بار می‌باشد. بنابراین، به دلیل عمق نفوذ در پدیده القا ΔL به‌طور معمول موجب

کاهش اندوکتانس خودی می‌شود. به‌صورت معادلات زیر نوشته می‌شود [۱۶].

$$\begin{aligned}
L_{eq} &= L_0 + \Delta L \\
&= \pi\mu_0 \int_0^\infty T(k)dk \\
&\quad - \pi\mu_0 \int_0^\infty \Phi_r(k)e^{-2kd}T(k)dk
\end{aligned}
\tag{۵۰-۲}$$

$$L_0 = \pi\mu_0 \int_0^\infty T(k)dk \tag{۵۱-۲}$$

$$\Delta L = -\pi\mu_0 \int_0^\infty \Phi_r(k)e^{-2kd}T(k)dk \tag{۵۲-۲}$$

با توجه به معادله (۵۲-۲)، L_0 وابسته به مقدار فرکانس جریان نیست. پس می‌توان آن را از طریق پارامترهای هندسی سیم‌پیچ بدست آورد. در مرجع [۱۷] روش‌های محاسبه اندوکتانس سیم‌پیچ مسطح مارپیچ به روش‌های Schieber و Wheeler مطرح شده است.

برای سیم‌پیچ دایره‌ای با شعاع خارجی R_0 با تعداد دور n محاسبه به روش Schieber به صورت معادله (۵۳-۲) می‌باشد.

$$L_0 = 1.748 \times 10^{-5} \mu_0 \pi R_0 n^2 \tag{۵۳-۲}$$

این معادلات برای زمانی مناسب است که سیم‌پیچ به صورت یکپارچه باشد. فرمول روش Wheeler در رابطه (۵۴-۲) آورده شده است.

$$L_0 = 31.33 \mu_0 n^2 \frac{a^2}{8a + 11c} \tag{۵۴-۲}$$

a : شعاع حلقه

c : پهنای سیم‌پیچ

در این روش خطا وقتی رخ می‌دهد که تعداد دورها خیلی کم یا فاصله بین دورها زیاد باشد [۱۷].

۳-۲-۳-۲ راندمان

راندمان در سیستم گرمایش القایی از نسبت توان حرارتی جذب‌شده توسط قطعه به کل توان محاسبه می‌شود [۱۶].

$$\eta = \frac{P_I}{P_t} = \frac{P_I}{P_w + P_I} \quad (۵۵-۲)$$

η : راندمان

P_I : توان القا شده در تابه

P_t : توان کل

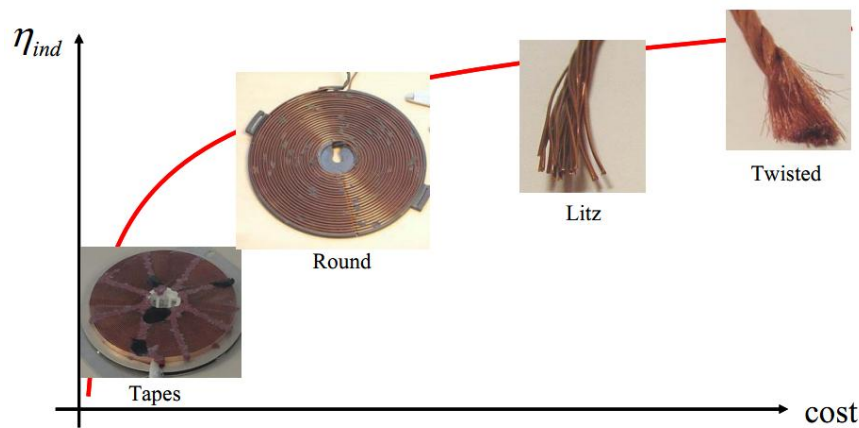
P_w : توان تلفاتی در سیم‌پیچ

P_w توان تلف‌شده در سیم‌پیچ است که موجب گرم شدن نامطلوب سیم‌پیچ می‌شود. برای بهبود راندمان دو راهکار وجود دارد، یک افزایش P_I و از طرفی دیگر از طریق انتخاب تعداد مناسبی از رشته هادی P_w را کاهش داد. در این مدل مقدار دو عنصر الکتریکی که با پارامترهای دیگر بار القایی سیم‌پیچ در سیستم (تعداد دور، فرکانس، مشخصه الکترومغناطیسی فلز، و هندسه) وابسته است مهم می‌باشد [۱۶].

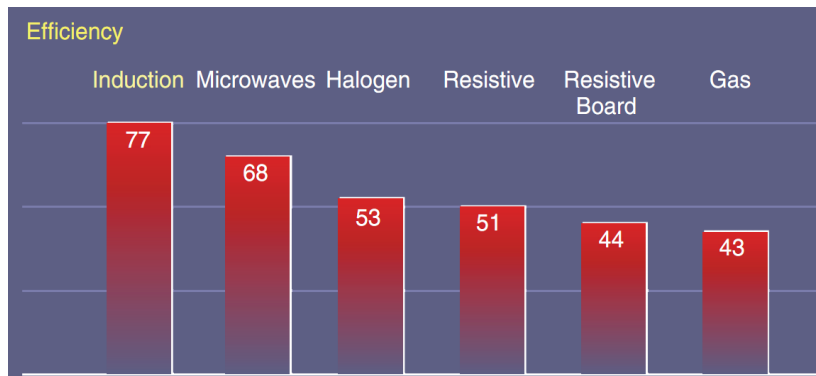
در طراحی سلف می‌توان با توجه به تعداد رشته‌ها تلفات سلف را بهینه کرد. بنابراین، انواع مختلف از سیم مسی را می‌توان برای دستگاه‌های گرمایش القایی شامل فویل و نوار فلزی، سیم گرد و

سیم چند رشته‌ای بهره برد. سیم رشته‌ای^۱ که شامل ده‌ها رشته هادی می‌شود و سیم به هم پیچیده^۲، که از گروه‌های زیادی رشته هادی درست می‌شود شماتیک این هادی‌ها با توجه به هزینه در شکل ۲-۱۲ (الف) نشان داده شده است.

امروزه، از سیم رشته‌ای به دلیل اینکه نسبت خوبی از کارایی و هزینه را دارا هستند به‌طور



(الف)



(ب)

شکل ۲-۱۳: الف) شماتیک سیم‌های مختلف با توجه راندمان - هزینه [۱۶] ب) راندمان دستگاه‌های

حرارتی [۱۸]

^۱ Litz

^۲ Twisted

گسترده برای این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۰] و [۱۶]. از روش‌های اجزا محدود برای طراحی سلف سیستم گرمایش القایی می‌توان استفاده کرد و برای سیم‌های با تعداد هادی زیاد می‌توان از روش‌های ترکیبی می‌توان بهره برد. به محاسبات میدان مغناطیسی از طریق FEM برای محاسبه تلفات مجاورتی در سیم‌پیچ مورد نیاز است [۱۶]. با توجه به معادله (۲-۵۵) و با فرض سینوسی بودن جریان سیم‌پیچ I_φ می‌توان اثبات کرد که راندمان از معادله (۲-۵۶) محاسبه می‌شود [۱۶] و [۱۹].

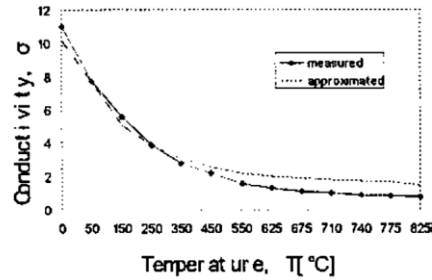
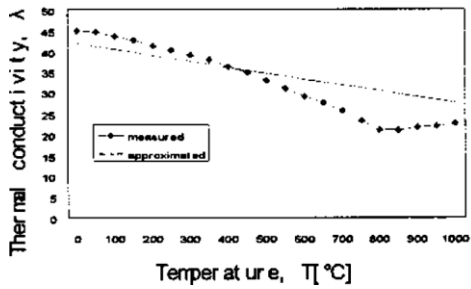
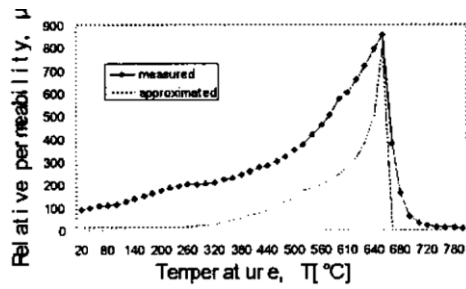
$$\eta = \frac{\frac{1}{2} \Delta R I_\varphi^2}{\frac{1}{2} R_{eq} I_\varphi^2} = \frac{\Delta R}{R_0 + \Delta R} \quad (۲-۵۶)$$

I_φ : جریان سیم پیچ

شکل ۲-۱۲ (ب) راندمان تجهیزات حرارتی با تکنولوژی‌های مختلف را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که سیستم گرمایش القایی به دلیل تولید حرارت در داخل تابه، گرما را به راحتی از طریق هوا به محیط پیرامون از دست نمی‌دهد بنابراین این استفاده از مبدل‌های قدرت با راندمان بالا در تکنولوژی گرمایش القایی این تکنولوژی را به کارآمدترین تکنولوژی شناخته شده تبدیل کرده است و اجاق گازی به دلیل از دست دادن حرارت به محیط پایین‌ترین راندمان را دارد [۱۸].

۲-۳-۴ تأثیر حرارت بر پارامترها

وابستگی حرارتی مشخصات مواد همچون نفوذپذیری مغناطیسی، هدایت الکتریکی، هدایت حرارتی برای تحلیل جریان گردابی اتخاذ می‌شود. اطلاعاتی هدایت ویژه الکتریکی و هدایت ویژه حرارتی و نفوذپذیری مغناطیسی در شکل ۲-۱۳ به ترتیب نشان داده شده، و مقادیر اندازه‌گیری و محاسبه شده است. نفوذپذیری مغناطیسی می‌تواند به صورت فرمول (۲-۵۷) بیان گردد، همچنین مقادیر هدایت الکتریکی و حرارتی تابعی از دما است که در روابط (۲-۵۸) و (۲-۵۹) بیان گردید [۲۰].



شکل ۲-۱۵: تغییرات مشخصات مواد به تغییرات دما [۲۰]

$$\mu_s = \frac{I_s/I_\theta}{C(1 - T/T_\theta)^{2/3}}, \frac{I_s}{I_\theta} = \tanh \frac{(I_s/I_0)}{(T/T_\theta)} \quad (57-2)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho_0[1 + \alpha_1(T - T_0)]} \quad (58-2)$$

$$\lambda = \lambda_0[1 + \alpha_2(T - T_0)] \quad (59-2)$$

I_s : اشباع مغناطیسی در دمای T

I_0 : اشباع مغناطیسی در دمای 0

T_θ : نقطه کوری

C : ضریب ثابت

ρ_0 : مقاومت ویژه الکتریکی

λ_0 : ضریب هدایت ویژه

α_1 : ضریب متوسط مقاومت ویژه الکتریکی

α_2 : ضریب متوسط هدایت ویژه حرارتی

T_0 : دمای مبنا

در دماهای بالاتر از نقطه کوری، بین مقادیر محاسبه شده و مقادیر اندازه گیری شده تطابقی وجود ندارند. با توجه به وابستگی مشخصات مواد به دما در مرجع [۲۱] روابط تحلیلی بیان شده را به صورت زیر می توان اصلاح نمود. مجموع از همه مقاومت معادل از توان تلفاتی در سیم پیچ بدست می آید که آن را با R_0 نشان می دهند.

$$R_0(\omega, T) = R_{cond}(\omega, T) + R_{ind\ int}(\omega, T) + R_{ind\ ext}(\omega, T) \quad (۶۰-۲)$$

$$\xi = \sqrt{\omega \mu_0 \mu_r(T) \sigma(T)} = \sqrt{2} / \delta(T) \quad (۶۱-۲)$$

$$R_{cond}(\omega, T) = - \sum_{i=1}^n a_i \frac{1}{n_s r_0 \sigma(T)} \xi \phi_{cond}(\xi r_0) \quad (۶۲-۲)$$

$$R_{ind\ int}(\omega, T) = \sum_{i=1}^n 2\pi^2 a_i n_s \frac{\xi r_0 \phi_{ind}(\xi r_0)}{\sigma(T)} (H_{S,i}^2(\omega T)) \quad (۶۳-۲)$$

$$R_{ind\ ext}(\omega, T) = \sum_{i=1}^n 2\pi^2 a_i n_s \frac{\xi r_0 \phi_{ind}(\xi r_0)}{\sigma(T)} (H_{S,i}^2(\omega T)) \quad (۶۴-۲)$$

$R_0(\omega, T)$: مقاومت کل (تلفات سیم‌پیچ) وابسته به فرکانس و دما

$R_{cond}(\omega, T)$: مقاومت هدایتی وابسته به فرکانس و دما

$R_{ind in}(\omega, T)$: مقاومت القایی داخلی وابسته به فرکانس و دما

$R_{ind ext}(\omega, T)$: مقاومت القایی خارجی وابسته به دما و فرکانس

n_s : تعداد رشته هادی

چون سیم‌پیچ به آهستگی گرم می‌شود، پس تلفات آن نیز به همین صورت افزایش می‌یابد اما این تغییرات ناچیز است پس راندمان را به صورت فرمول (۶۵-۲) می‌توان نوشت [۲۱].

$$\eta(\omega, T) = \frac{\Delta R}{R_0 + \Delta R} \quad (۶۵-۲)$$

۵-۲-۳-۲ طراحی و پیاده‌سازی سیم‌پیچ بر روی PCB^۱

در مرجع [۱۰] طراحی و پیاده‌سازی سلف بر روی PCB بررسی شده است. ساختار این نوع از

سیم‌پیچی مانند سیم‌پیچ معمولی با سیم رشته‌ای مسطح می‌باشد که برای گرمایش القایی

استفاده شده است. نمونه اولیه از این سلف در شکل ۱۴-۲ نشان داده شده است.

این روش به ما اجازه می‌دهد، تا یک سلف یکپارچه با ویژگی‌های مشابه سیم‌پیچ‌های معمولی

داشته باشیم. که در اجرا به چند نکته باید توجه داشت، نکته اول، باید محدوده فرکانس و توان

موردنیاز در نظر گرفت، یک برد مدار چاپی مسطح ساختار سیم رشته‌ای برای کاهش تلفات ac

^۱ Printed Circuit Board



شکل ۲-۱۶: القاگر PCB در اندازه ۲۲۰mm [۱۰]

مناسب است. نکته دوم، توان انتقالی به ظرف در فرکانس کار موجب کاهش اندازه سلف برای دستگاه

اجاق القایی می‌شود تعداد دورها شامل چند دور در هر یک لایه می‌شود. محاسبه مقاومت سیم‌پیچ

R_0 ، از مجموع چند مقاومتی که در این مقاومت سهم دارند بدست می‌آید [۱۰].

$$R_0 = R_{cond} + R_{prox} = R_{cond} + R_{prox z} + R_{prox r} \quad (۶۶-۲)$$

R_{cond} : مقاومت هدایتی

R_{prox} : مقاومت القایی در جهت محور x

$R_{prox z}$: مقاومت القایی در جهت محور z

$R_{prox r}$: مقاومت القایی در جهت محور r

که R_{cond} و R_{prox} به ترتیب مقاومت هدایتی و مقاومت مجاورتی است که مقاومت مجاورتی

از مجموع دو مقاومت $R_{prox z}$ و $R_{prox r}$ بدست می‌آید، این مقاومت‌ها به دلیل وجود میدان‌ها

مغناطیسی $H_{0,z}$ ، $H_{0,r}$ در هادی می‌باشد. این سلف شبیه به سلف‌هایی هستند از هادی‌هایی با مقطع

دایره‌ای درست شده‌اند با این تفاوت که این سلف‌ها از هادی‌هایی با مقطع مستطیلی با n_s رشته و n دور ساخته شده‌اند، و از روابط زیر این مقاومت‌ها محاسبه می‌شوند [۱۰].

$$R_{cond} = \frac{n\pi(r_{ext} + r_{int})}{n_s} \frac{1}{w_s h_s \sigma} \Phi_{cond rec} \left(\frac{w_s h_s}{\delta^2}, \frac{w_s}{h_s} \right) \quad (۶۷-۲)$$

$$R_{prox z} = nn_s \frac{4\pi}{\sigma} \Phi_{prox rec} \left(\frac{w_s h_s}{\delta^2}, \frac{w_s}{h_s} \right) (2\pi r H_{0,z}^2)_{swinding} \quad (۶۸-۲)$$

$$R_{prox z} = nn_s \frac{4\pi}{\sigma} \Phi_{prox rec} \left(\frac{w_s h_s}{\delta^2}, \frac{w_s}{h_s} \right) (2\pi r H_{0,r}^2)_{swinding} \quad (۶۹-۲)$$

r_{ext} : شعاع خارجی سیم‌پیچ

r_{int} : شعاع داخلی سیم‌پیچ

w_s : پهنا سیم مستطیلی

h_s : ضخامت مس

تابع $\Phi_{prox rec}$ وابسته به فرکانس و هندسه در اثر مجاورتی می‌باشد. $(2\pi r H_{0,r}^2)_{swinding}$ و

$(2\pi r H_{0,z}^2)_{swinding}$ مقادیر متوسط $2\pi r H_{0,z}^2$ و $2\pi r H_{0,r}^2$ می‌باشد. و مقادیر $H_{0,r}^2$ و $H_{0,z}^2$ مقادیر

شدت میدان مغناطیسی توسط جریان ۱ آمپر می‌باشد [۱۰].

۲-۳-۳ یکنواختی شار مغناطیسی

مفهوم طراحی سیم‌پیچ با توجه به شدت میدان مغناطیسی در کاربردهای مختلف با در نظر

گرفتن تعداد دور و جنس هادی می‌تواند متفاوت باشد. تناسب بین شدت میدان الکترومغناطیسی،

نیروی الکترومغناطیسی و یا توزیع حرارت می‌تواند در طراحی سیم‌پیچ تأثیرگذار باشد [۲۲]. چندین

روش برای تغییر شار مغناطیسی و توزیع دمای یکنواخت استفاده می‌شود، مانند تنظیم تعداد دور در یک سیم‌پیچ، تنظیم مسیر سیم‌پیچ و تنظیم فاصله بین سیم‌پیچ و قطعه کار، تغییر مقطع سیم‌پیچ [۲۳] و استفاده از میله‌های مغناطیسی (فریت) [۲۴] در آن و غیره. طراحی سیم‌پیچ می‌تواند به گونه‌ای باشد که یک میدان یکنواخت مغناطیسی و در نتیجه توزیع دمای یکنواخت در قطعه کار ایجاد شود [۲۴]. به منظور شناسایی اثرات شار مغناطیسی، به عنوان ضریب میزان یکنواختی (UF) در هر قطعه کار ابتدا مقدار میانگین دما و سپس انحراف معیار آن را بدست می‌آوریم. در یکنواخت سازی باید مقدار UF را بدست آورد. نتیجه آن برای دستگاه‌های مختلف قابل محاسبه است. اما مقدار UF هر چه کمتر باشد بهتر است، یعنی توزیع دما یکنواخت‌تر است [۲۵].

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N T_j \quad (70-2)$$

$$S_N = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (T_j - \bar{T})^2} \quad (71-2)$$

$$UF = \frac{S_N}{\bar{T}} \quad (72-2)$$

\bar{T} میانگین دما

T_j : دما در نقطه j ام

N : تعداد نقاط

S_N : انحراف معیار

UF : ضریب یکنواختی

در مرجع [۲۳] از یک سیم‌پیچ با سطح مقطع غیریکنواخت به‌صورتی که حلقه‌های سیم‌پیچ در فاصله‌های یکسانی از یکدیگر قرار دارند استفاده شده است که در جهت محور Z عرض مقطع هادی زیاد می‌شود. توزیع حرارت توسط سیم‌پیچ با سطح مقطع غیر یکنواخت در این مرجع بررسی شده است. در مرجع [۲۴] از سیم‌پیچ برای گرم کردن لوله دستگاه قالب‌گیری استفاده شده است، شار مغناطیسی در طول سیم‌پیچ کار به سمت مرکز بیشتر از دو طرف سیم‌پیچ است در نتیجه میزان حرارت در این ناحیه به‌طور کلی بیشتر از دو طرف انتهایی سیم‌پیچ است. اما از طرفی در دستگاه‌های قالب‌گیری توزیع حرارت به‌طور یکنواخت در سطح لوله مدنظر است. هدف اصلی این مرجع این است که ثابت کند، سیستم پیشنهادی می‌تواند یک شار مغناطیسی یکنواخت با نرخ حرارتی بالا و توزیع دما یکنواخت در سطح داخلی لوله دستگاه قالب‌گیری تزریقی ایجاد کرد. نتایج نشان می‌دهد که سیم‌پیچ کار همراه با میله فریت ۸ mm و شار مغناطیسی موجب یکنواختی توزیع حرارت می‌شود [۲۴].

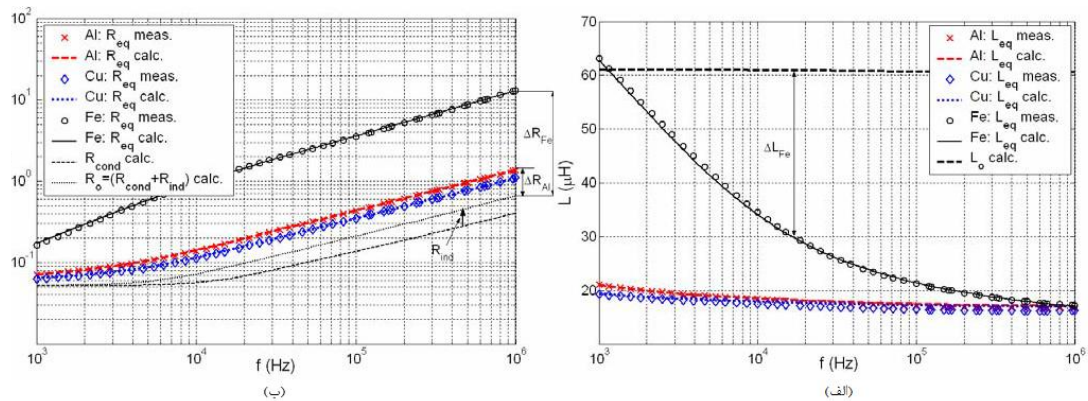
۲-۴ جنس فلز تابه

با ثابت فرض کردن هندسه و فرکانس، در طراحی سیم‌پیچ باید جنس مواد انتخاب گردد تا راندمان گرمایش با توجه به امپدانس و سطح توان تعیین گردد. فقط مقاومت ویژه تعیین‌کننده در انتخاب مواد نیست، چون پدیده اثر پوستی در فرکانس‌های تعیین‌شده بسیار مهم است. این پدیده عمق نفوذ جریان را مشخص می‌کند. مقاومت سطح R_S را برای تابه با توجه به عمق نفوذ به‌صورت زیر می‌توان تقریب زد [۲۶].

$$R_S = \frac{\rho}{\delta} \quad (۲-۷۳)$$

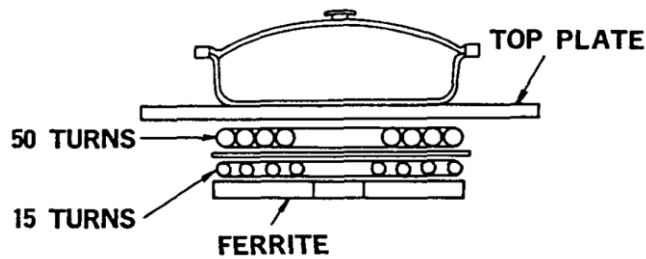
R_S : مقاومت سطح

گرم کردن ظرف‌های مسی و آلومینیومی در محدوده فرکانس مطرح‌شده به دلیل عمق نفوذ و مقاومت سطح دشوار است [۲۶]. از طرفی، اثر فرکانس جریان تحریک را در شکل ۲-۱۵ می‌توان مشاهده کرد. افزایش فرکانس، موجب افزایش مقدار ΔR برای بارهای مختلف می‌شود.



شکل ۲-۱۷: مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده فلزات آهن و مس و آلومینیوم (الف) اندوکتانس (ب) مقاومت [۱۴]

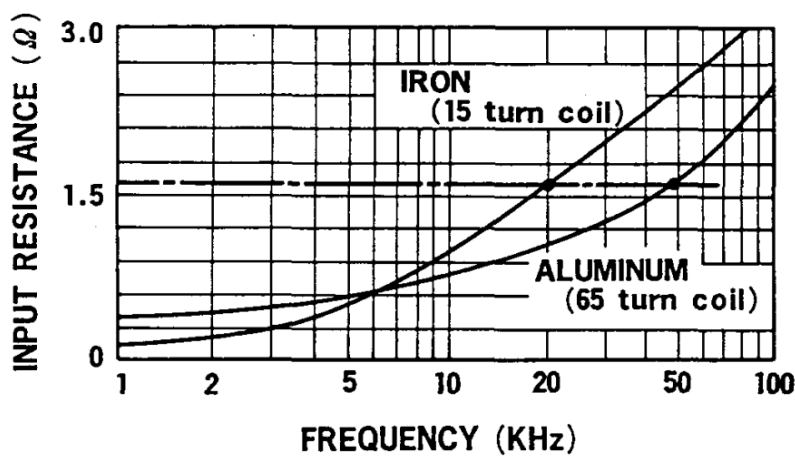
شکل ۲-۱۶ نشان می‌دهد که افزایش فرکانس برای گرم کردن مواد غیر مغناطیسی خیلی مناسب نیست [۱۴]. بنابراین در مرجع [۲۷] برای مرتفع کردن این مشکل پیشنهادهایی مطرح‌شده است. در این اینورتر از دولایه سیم‌پیچ و دو خازن برای مدار تشدید استفاده‌شده و فرکانس‌هایی به‌صورت خودکار با توجه به نوع ظرف تعیین می‌شود. با توجه به عمق نفوذ تابه با جنس مختلف، سیم‌پیچی که برای تابه‌های آلومینیومی استفاده می‌شود نسبت به سیم‌پیچی که برای تابه‌های آهنی استفاده می‌شود متفاوت است. از طرفی محدوده سیم‌پیچ‌ها ثابت است از سیم‌پیچ دولایه استفاده‌شده، مانند شکل ۲-۱۶، که ۵۰ دور در لایه بالایی و ۱۵ دور در لایه پایینی قرار داده شده است. برای گرم کردن ظرف آلومینیومی از هر دو سیم‌پیچ استفاده می‌شود که به‌صورت سری به هم متصل‌اند یعنی از ۶۵ دور استفاده می‌شود. و برای ظرف آهنی فقط از سیم‌پیچ ۱۵ دوری استفاده می‌شود. چون برای گرم کردن ظرف آلومینیومی و ظرف مسی نیاز به شدت میدان قوی‌تری نسبت به ظرف آهنی است.



شکل ۱۸-۲: سیم‌پیچ برای ظرف‌های مختلف

در مرجع [۲۷] از سیم‌پیچ و فرکانس اینورتر که با توجه به جنس فلز تابه به صورت خودکار تعیین می‌شود. برای گرم کردن تابه آلومینیومی و مسی از سیم‌پیچی با ۶۵ دور در فرکانس ۵۰ KHz استفاده می‌شود و برای تابه آهنی از ظرف‌های ۱۵ دور با فرکانس ۲۰ KHz استفاده می‌شود.

شکل ۱۸-۲ نشان می‌دهد، وقتی که از سیم‌پیچ ۶۵ دوری و در فرکانس ۵۰ KHz برای ظرف آلومینیومی استفاده می‌شود در این حالت مقاومت معادل آن برابر وقتی است که از سیم‌پیچ ۱۵ دوری و در فرکانس ۲۰ KHz برای آهن استفاده می‌شود [۲۷] که موجب بهبود فرآیند پخت در ظرف‌های آلومینیومی و مسی می‌شود.



شکل ۱۹-۲: مقاومت ورودی سیم‌پیچ وابسته به فرکانس [۲۷]

۲-۵ خلاصه

با توجه به گسترش سیستم گرمایش القایی، ابتدا قوانین موردنیاز برای شناخت سیستم گرمایش القایی مطرح شد و به اختصار به منابع متناوب و کارایی‌شان نیز بررسی گردید. مدل مدار معادل نیز مورد نقد و بررسی قرار گرفت و روابط موردنیاز برای طراحی سیم‌پیچ و تأثیر دما بر این روابط مطرح گردید. تأثیر جنس تابه با توجه به مشخصات فیزیکی بیان شد.

فصل سوم

طراحی سیم پیچ اجاق القایی

یکی از اجزاء مهم در سیستم گرمایش القایی، جزء الکترومغناطیسی آن است. بنابراین در این قسمت روشی برای طراحی سیم‌پیچ بیان می‌گردد. پارامترهای مختلف که در عملکرد سیم‌پیچ تأثیرگذار است بررسی می‌شود. یک سیم‌پیچ برای تحلیل و کار آزمایشگاهی پیشنهاد می‌شود. هدف این فصل طراحی سیم‌پیچ برای اجاق القایی است.

۳-۱ طراحی سیم‌پیچ اجاق القایی

قسمت الکترومغناطیسی (سیم‌پیچ) به دلایلی مانند انتقال انرژی به تابه توسط میدان مغناطیسی و توزیع انرژی یکنواخت در ته ظرف دارای اهمیت است. این قسمت بعنوان بخشی از تانک تشدید اینورتر محسوب می‌شود، بنابراین عملکرد آن باید بررسی گردد. با توجه به پیچیدگی تحلیل سیستم گرمایش القایی، برای طراحی سیم‌پیچ از روش ترکیبی استفاده می‌شود. در این روش ابتدا مقدار مقاومت سیم‌پیچ محاسبه شده و تعداد رشته هادی بهینه تعیین می‌گردد، سپس با استفاده از FEM پارامترهای دیگر بدست می‌آید [۲۸] و [۲۹].

۳-۱-۱ محاسبه مقاومت سیم‌پیچ

مجموع تلفات سیم‌پیچ P_0 (سیم رشته‌ای) دارای دو قسمت اصلی است. اول، تلفات به دلیل تلفات ژولی که توسط جریان رخ می‌دهد و P_{cond} نامیده می‌شود. تلفات دیگر به دلیل جریان گردابی در سیم‌پیچ که توسط شار مغناطیسی ایجاد می‌شود و P_{ind} نامیده می‌شود. به‌طور کلی، همواره اثر پوستی در P_{cond} و اثر مجاورتی در P_{ind} (داخلی و خارجی) وجود دارد. در هر رشته، اثر مجاورتی داخلی به دلیل عبور جریان در هر رشته از سیم‌پیچ به وجود می‌آید، در صورتی که اثر مجاورتی خارجی از میدان تولیدشده توسط دوره‌های دیگر القاگر ایجاد می‌گردد [۲۸].

$$P_0 = P_{cond} + P_{ind} = R_0 I_\phi^2 = (R_{cond} + R_{ind}) I_\phi^2 \quad (1-3)$$

۳-۱-۱-۱ محاسبه مقاومت هدایتی

مقاومت هدایتی وابسته به اثر پوستی که این هم در سیم استوانه‌ای وابسته به فرکانس منبع تغذیه می‌باشد. اگر رشته‌های سیم رشته‌ای به اندازه کافی کوچک باشد از اثر فرکانس می‌توان صرف نظر کرد، و بنابراین، مقاومت هدایتی همان مقاومت dc می‌باشد. اگر شعاع r_i دور n م سیم پیچ باشد آنگاه مقاومت کل هدایتی به صورت معادله (۲-۳) می‌شود [۲۸].

$$R_{cond} = \frac{1}{n_s} \frac{8\rho}{d_s^2} \sum_{i=1}^n r_i \quad (2-3)$$

d_s : قطر رشته هادی

۳-۱-۱-۲ محاسبه مقاومت القایی

از طرفی دیگر برای محاسبه مقاومت القاگر، شرایطی را باید در نظر گرفت که در ذیل به آن اشاره شده است [۲۸].

۱) میدان مغناطیسی خارجی به صورت یکنواخت بر هر رشته از آن سطح مقطع در نظر گرفته شده است.

۲) میدان مغناطیسی عمود بر محور رشته‌ها باید محاسبه گردد.

۳) قطر رشته حداکثر ۱.۵ برابر عمق پوسته δ است.

۴) اثر مجاورتی داخلی ناچیز است. در سیم رشته‌ای، جریان در n رشته توزیع شده است.

بنابراین جریان القایی تولیدشده در هر رشته را می‌توان صرف نظر کرد.

با در نظر گرفتن موارد بالا مقاومت مجاورتی از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۸].

$$R_{ind} = n_s \frac{\pi^2 d_s^4 \omega^2}{32\rho} \sum_{i=1}^n [r_i (B_{rms}^2)_i] \quad (3-3)$$

متوسط مربع میدان از رابطه (۳-۴) بدست می‌آید.

$$B_{rms}^2 = \frac{B_{rms_upper}^2 + B_{rms_lower}^2}{2} \quad (4-3)$$

B_{rms_upper} : چگالی شار در بالای سیم‌پیچ

B_{rms_lower} : چگالی شار در پایین سیم‌پیچ

میدان با استفاده از FEM بدست می‌آید [۲۸].

۳-۱-۲ بررسی پارامترهای طراحی

از خصوصیات سیم‌پیچ می‌توان به ولتاژ سیم‌پیچ، توان نامی، فرکانس عملکرد، محدوده Q و محدوده L_{eq} اشاره کرد. مشخصه امپدانس را که تابعی از فرکانس است باید محاسبه گردد، بنابراین برای انجام محاسبات از نرم‌افزار اجزای محدود استفاده می‌شود [۶].

۳-۱-۲-۱ عمق نفوذ

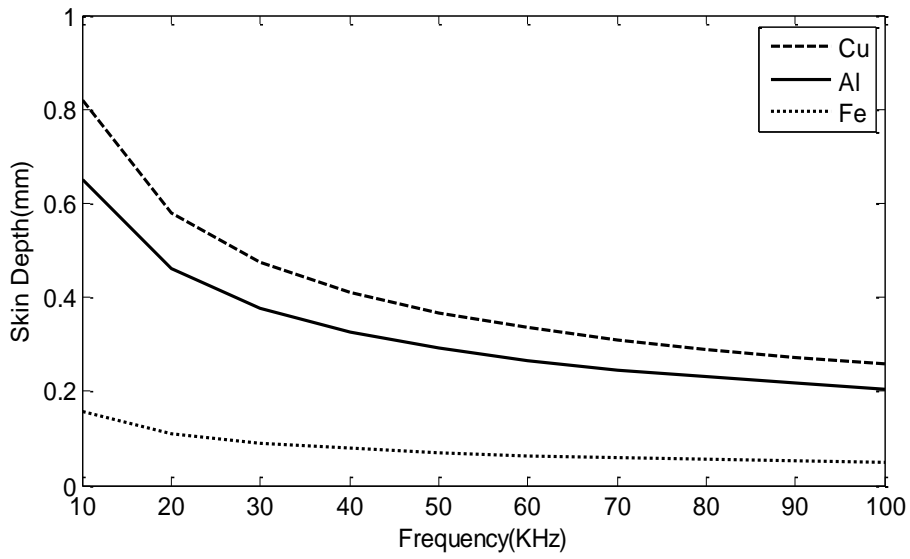
تعیین عمق نفوذ مواد در طراحی سیستم گرمایش القایی بسیار مهم است. به دلیل اینکه مواد دارای مشخصات فیزیکی متفاوتی هستند پس بررسی خود را با انتخاب فلزات، آهن و آلومینیوم و مس محدود می‌کنیم که مشخصات آن‌ها در جدول (۳-۱) آورده شده است.

عمق نفوذ و مقاومت سطح طبق روابط بیان شده در فصل ۲ برای مواد مطرح شده بین فرکانس

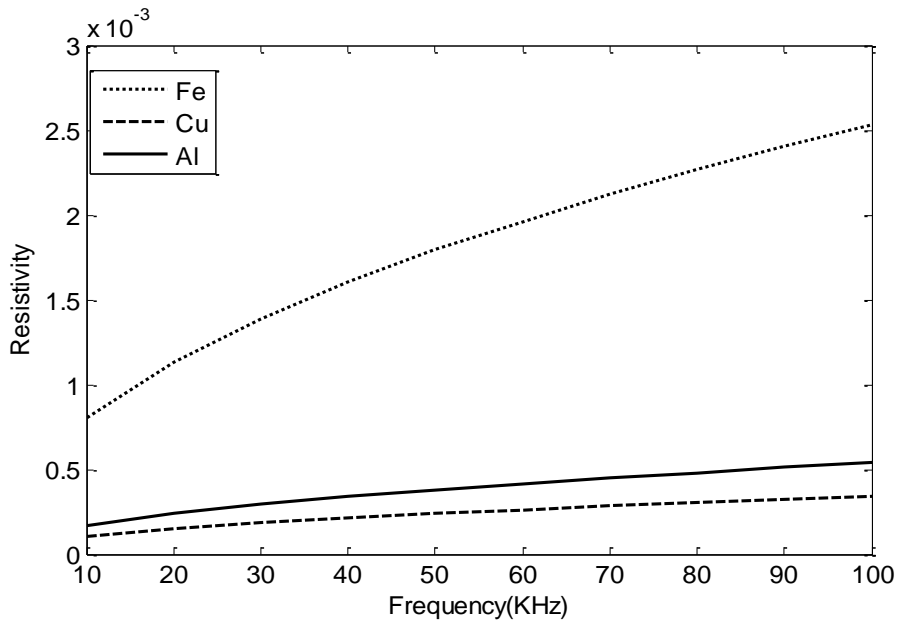
۱۰-۱۰۰ KHz در جدول (۳-۲) محاسبه شده است.

جدول ۱-۳: مشخصات مواد

رسانایی ویژه $\sigma(S)$	ضریب تراوایی مغناطیسی μ_r	کمیت فلز
8×10^6	۱۳۰	آهن
4×10^7	۱	آلومینیوم
5.8×10^7	۱	مس



شکل ۱-۳: عمق نفوذ



شکل ۲-۳: مقاومت سطح

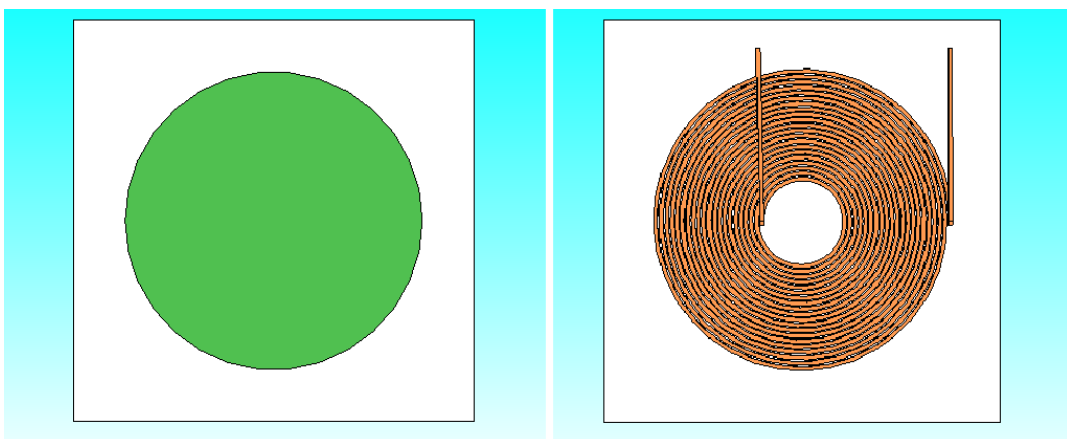
با توجه به روابطی که در فصل ۲ مطرح شد، دیده می‌شود که در تمامی فرکانس‌ها، آهن دارای کمترین عمق نفوذ و بیشترین مقاومت سطح است و مس دارای بیشترین عمق نفوذ و کمترین مقاومت سطح است.

برای استفاده از این معادلات در طراحی سیم‌پیچ باید عمق پوسته را برای مواد محاسبه کرد. عمق نفوذ برای فلزات مختلف در شکل ۱-۳ آورده شده است.

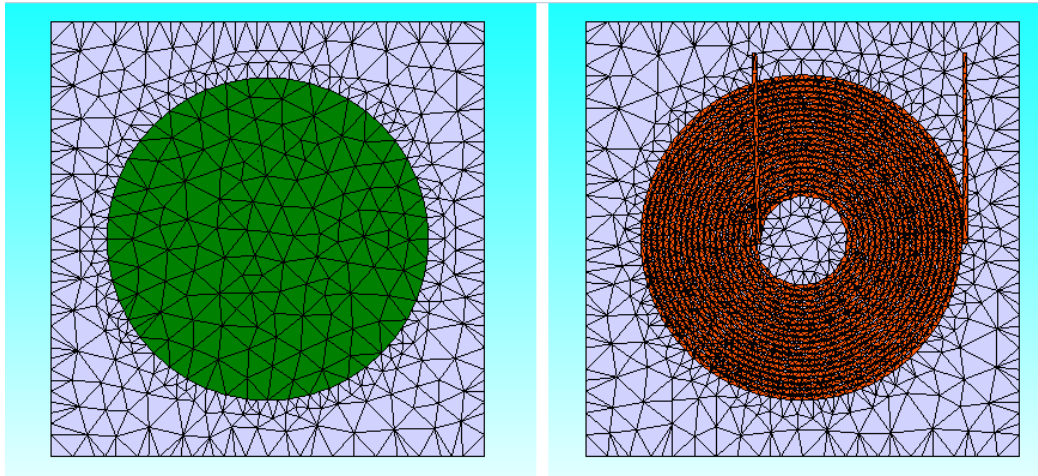
با توجه به اینکه عمق نفوذ در فرکانس 100 KHz برای مس 0.209 میلی‌متر است باید قطر رشته کمتر از 0.31 میلی‌متر باشد که ما در اینجا از قطر 0.3 میلی‌متر استفاده می‌کنیم. تعداد دور سیم‌پیچ رابین $17-23$ دور در نظر می‌گیریم. برای استفاده از روش ترکیبی ابتدا باید تأثیر تعداد رشته بر مقاومت سیم‌پیچ بررسی شود و مقاومت سیم‌پیچ در فرکانس‌های مختلف محاسبه شود.

۳-۱-۲-۲ المان محدود

روش حل مسئله گرمایش القایی به روش تحلیلی بسیار دشوار است معمولاً با استفاده از روش‌های عددی توسط نرم‌افزارهای المان محدود مسئله گرمایش القایی حل می‌شود. در این پایان‌نامه از نرم‌افزار JMag-Designer 10.5 استفاده شده است. در شکل ۳-۳ مدل سیم‌پیچ و شیشه و قطعه کار نشان داده شده است.



شکل ۳-۳: شکل مدل سیستم در نرم‌افزار سیم‌پیچ (نارنجی) و شیشه (سفید) و تابه (سبز)



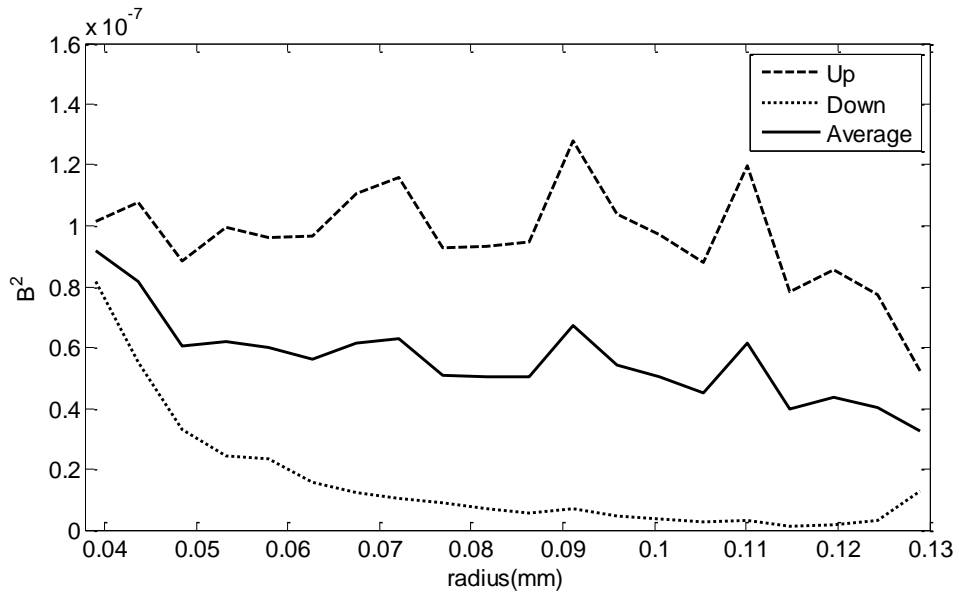
شکل ۳-۴: مدل مش بندی شده سیستم

انتخاب مش باید به صورتی باشد تا با انتخاب کمترین تعداد مش به جواب دقیق برسیم. در این مطالعه در نرم افزار اثر پوستی فقط در تابه بررسی شد، برای بررسی تأثیر فرکانس تعداد مش در قسمت اثر پوستی با افزایش فرکانس، باید افزایش یابد. در شکل ۳-۵ یک مدل از مش بندی سیستم نشان داده شده است.

۳-۲-۱-۳ محاسبه میانگین مربع میدان سیم پیچ

با توجه به روابطی که برای محاسبه مقاومت گفته شد و از طرفی سطح مقطع هر رشته برای این سیستم ۰.۳ میلی متر محاسبه گردید. و برای سیم پیچ ۲۰ دوری برای شعله اجاقی با قطر خارجی ۲۶ سانتی متری که قطر داخلی شعله اجاق ۶۸ mm تأثیر تعداد رشته بر مقاومت در فرکانس KHz ۴۰ را بررسی کنیم.

برای محاسبه مقاومت، نیاز به مقدار متوسط مربع میدان مغناطیسی (میدان مغناطیسی که بر هر دور از سیم پیچ عمود باشد) داریم که با استفاده از نرم افزار اجزا محدود بدست می آید. با توجه به رابطه (۳-۴) مربع میدان برای بار آهنی محاسبه شده که در شکل ۳-۶ نشان داده شده است.

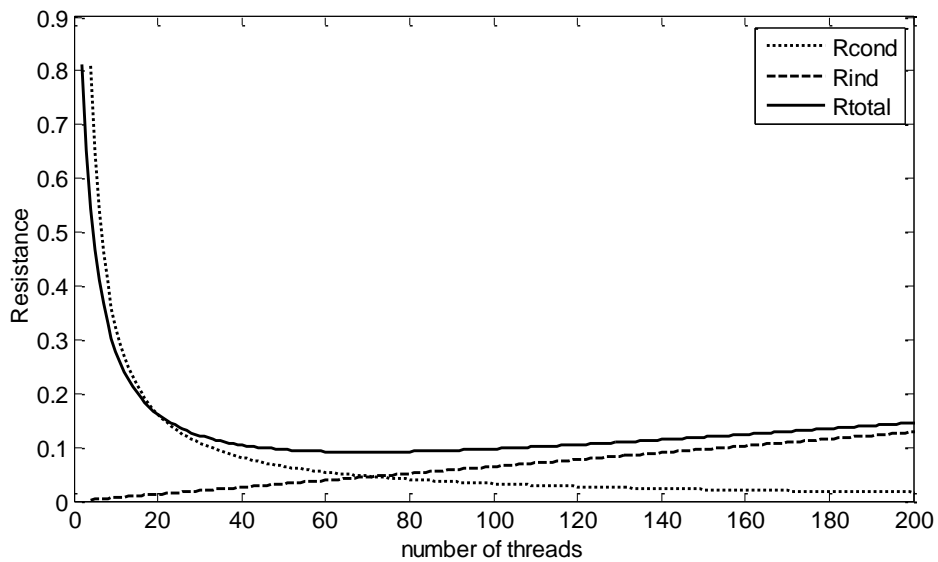


شکل ۳-۶: نمودار متوسط مربع میدان مغناطیسی سیم پیچ

۴-۲-۱-۳ تأثیر تعداد رشته هادی

با توجه به اینکه مقاومت سیم پیچ از روابط (۳-۳) و (۳-۳) محاسبه می شود، مقدار مقاومت

نسبت به افزایش رشته در شکل ۳-۷ نشان داده شده است.



شکل ۳-۷: نمودار مقاومت نسبت به افزایش رشته

شکل ۷-۳ نشان می‌دهد که در این سیستم افزایش تعداد هادی همواره موجب کاهش مقاومت نمی‌شود. چون مقاومت کل سیم‌پیچ از دو قسمت مقاومت هدایتی و مقاومت القایی (اثر مجاورتی) تشکیل شده است. مشاهده می‌شود که مقاومت با افزایش تعداد هادی افزایش می‌یابد.

۵-۲-۱-۳ محاسبه تعداد رشته هادی بهینه

از معادله (۵-۳) برای بهینه کردن تعداد رشته هادی در ازای کمترین تلف شده استفاده می‌گردد [۲۸].

$$\frac{dR_0(n_s)}{dn_s} = 0 \Rightarrow n_{s\min} = \frac{16\rho}{\pi\omega d_s^3} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n r_i}{\sum_{i=1}^n (r_i (B_{rms}^2)_i)}} \quad (۵-۳)$$

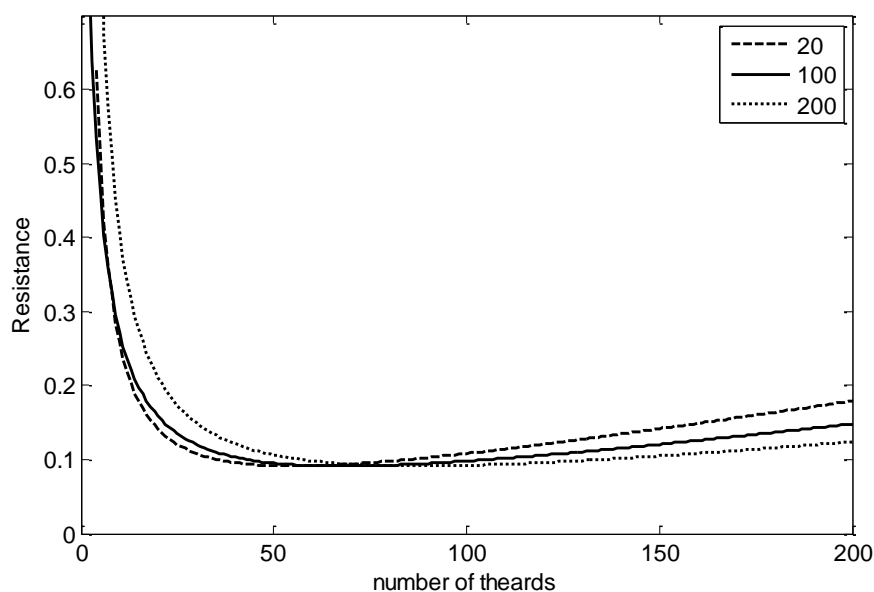
و مقاومت مینیمم از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$R_0(n_{s\min}) = \frac{ld_s\omega}{2} \cdot \sqrt{(B_{rms}^2)} \quad (۶-۳)$$

این معادله نشان می‌دهد که مینیمم مقاومت سیم‌پیچ وابسته به مقاومت ویژه مواد نیست. اما تعداد رشته هر سیم وابسته به مقاومت ویژه است از این رو معمولاً از سیم مسی استفاده می‌شود [۲۸].

۶-۲-۱-۳ تأثیر دما بر مقاومت سیم‌پیچ

از طرفی دمای جوش آب ۱۰۰ درجه است پس حداقل دمای تابه ۱۰۰ فرض کنیم. این دما از طریق شیشه به سیم‌پیچ منتقل می‌شود در این دما مقاومت ویژه مس حدود ۲۷ درصد بیشتر از وقتی است که دما مس ۲۰ درجه است. دمای تابه در حین پخت به ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد و در این دما مقاومت ویژه مس ۶۰ درصد افزایش می‌یابد و تأثیر این دما بر مقاومت با توجه به تعداد رشته هادی در شکل ۸-۳ نشان داده شده است.

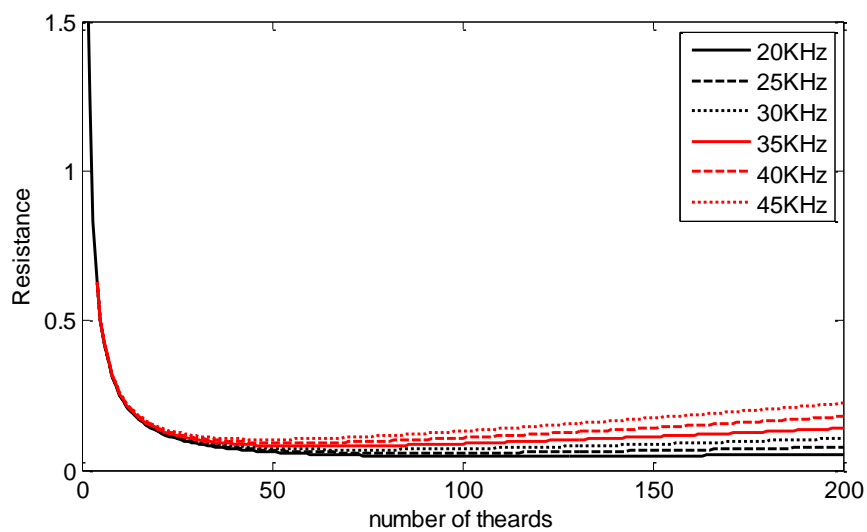


شکل ۳-۸: مقاومت سیم‌پیچ در دماهای ۲۰، ۱۰۰، ۲۰۰ درجه سانتیگراد

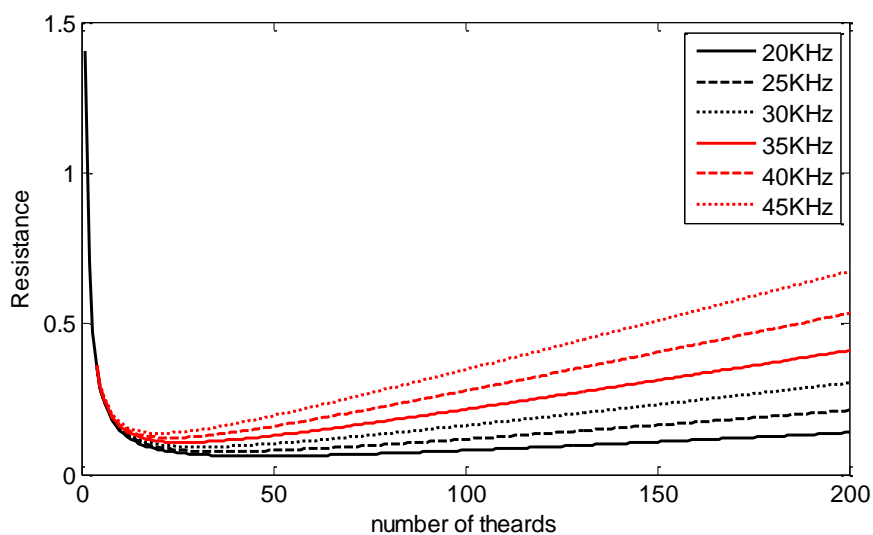
با توجه به روابط بیان‌شده و شکل ۳-۸ دیده می‌شود که افزایش دما موجب افزایش مقاومت ویژه $\rho = \rho_0(1 + 0.00339(T_a - T))$ می‌گردد به نحوی که اگر تعداد رشته هادی از مقدار بهینه کمتر باشد مقاومت سیم‌پیچ افزایش می‌یابد اما اگر تعداد رشته هادی بیشتر از رشته هادی بهینه باشد با افزایش دما مقاومت سیم‌پیچ کاهش می‌یابد. اگر شرایط کار سیم‌پیچ در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شود در این حالت انتخاب تعداد رشته هادی بهینه، ۸۹ رشته است. اگر دمای سیم‌پیچ ۱۰۰ درجه باشد تعداد رشته هادی بهینه، ۶۸ رشته است و در دمای ۲۰ تعداد رشته هادی بهینه، ۵۳ رشته است.

۳-۱-۲-۷ تأثیر فرکانس و قطر هر رشته بر مقاومت سیم‌پیچ

با توجه به روابط (۳-۲) و (۳-۳) مشاهده‌شده که مقاومت سیم‌پیچ علاوه بر تعداد هادی به فرکانس کار و به قطر هر رشته وابسته است که در شکل زیر نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۳-۹: نمودار نسبت مقاومت به افزایش تعداد رشته در فرکانس بین ۲۰-۴۵ KHz (الف) رشته هادی ۰.۳ میلی‌متر (ب) رشته هادی ۰.۴ میلی‌متر

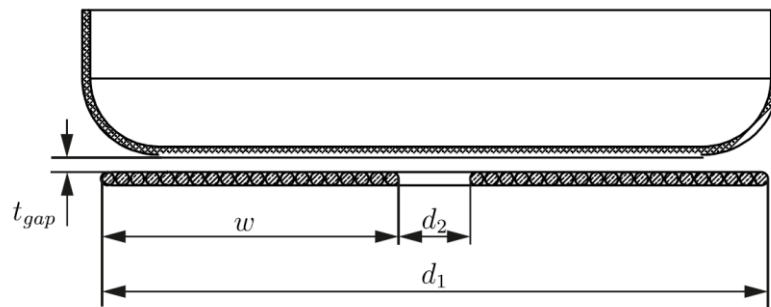
شکل ۳-۹ نشان می‌دهد که با تلفات در سیم‌پیچ با قطر رشته کوچک‌تر کمتر است و با

افزایش فرکانس این تلفات بیشتر می‌شود.

۲-۳ عوامل مؤثر بر پارامترهای سیم‌پیچ

با توجه به سیستم گرمایش القایی، این که تعداد دور سیم‌پیچ چند دور است و تابه در چه

فاصله‌ای از سیم‌پیچ قرار گرفته است و حتی جنس فلز گرم شونده بر عملکرد سیم‌پیچ تأثیرگذار است. در این قسمت به بررسی عملکرد سیستم گرمایش القایی با توجه به شرایط مطرح شده می‌پردازیم. شکل ۳-۱۰ ساختار تابه و سیم‌پیچ را در یک اجاق القایی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۰: ساختار سیم‌پیچ و تابه

۳-۲-۱ تأثیر تعداد دور بر پارامترهای سیم‌پیچ

عملکرد سیم‌پیچ و قطعه کار در سیستم گرمایش القایی همانند عملکرد ترانسفورماتور با نسبت تبدیل 1:N می‌باشد. سیم‌پیچ همانند اولیه ترانسفورماتور و قطعه کار همانند ثانویه ترانسفورماتور می‌باشد که اتصال کوتاه شده است. تعداد دور سیم‌پیچ می‌تواند از ۱ تا N دور متغیر است. با توجه به شکل (۲-۹) در این بررسی فاصله سیم‌پیچ تا تابه ۵ mm، شعاع داخلی سیم‌پیچ (d_1) ۲۶۰ mm و شعاع خارجی سیم‌پیچ (d_2) ۶۸ mm در نظر می‌گیریم. حال تأثیر تعداد دور را بر روی پارامترهای مدار معادل را بررسی کنیم. در این بررسی فرکانس را هم ثابت، معادل ۴۰ کیلوهرتز در نظر می‌گیریم. تعداد دور سیم‌پیچ را بین ۱۷-۲۳ دور در نظر می‌گیریم. نتایج آن در شکل‌های زیر آورده شده است.

تأثیر تعداد دور بر مقاومت هادی: حال فرض کنید که مقاومت تابه را می‌خواهید محاسبه کنید از معادله (۳-۷) طول متوسط ظرف بدست آمده و در نهایت مقاومت ظرف از رابطه (۳-۸) (R_{wp})

محاسبه می شود.

$$MCP = \pi \frac{d_1 + d_2}{2} \quad [m] \quad (7-3)$$

$$R_{wp} = \rho \frac{MCP}{w\delta} \quad [\Omega] \quad (8-3)$$

$$w = \frac{d_1 - d_2}{2} \quad (9-3)$$

MCP : مسیر جریان اصلی در تابه

R_{wp} : مقاومت قطعه کار

w : پهنای یک طرف سیم پیچ

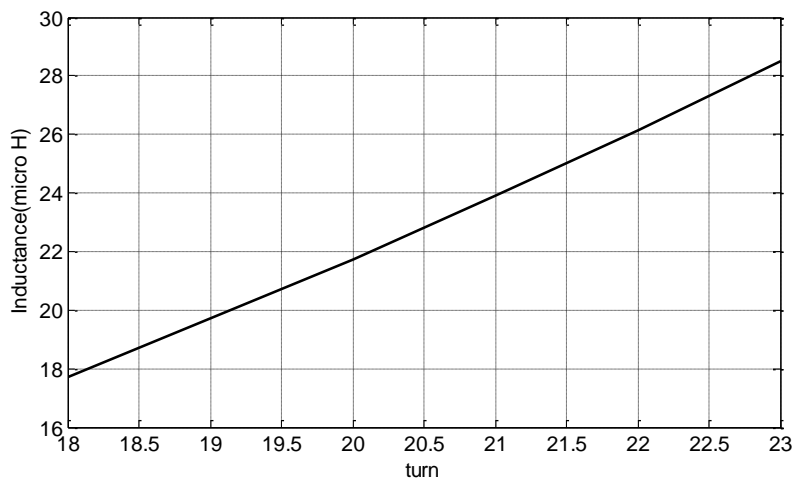
d_2 : قطر خارجی سیم پیچ

d_1 : قطر داخلی سیم پیچ

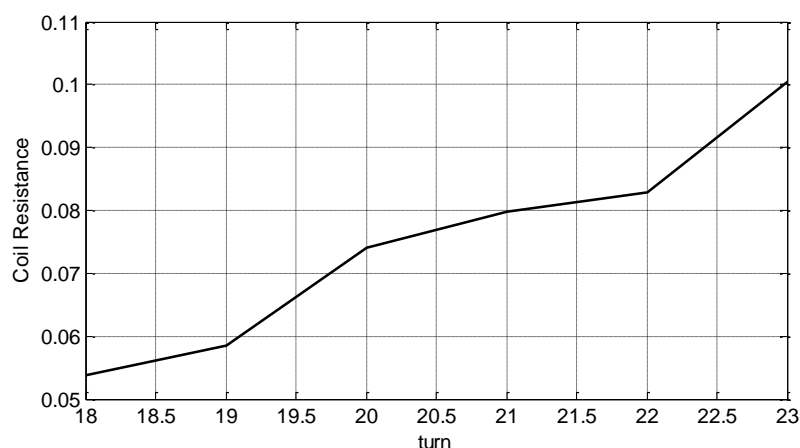
که برای انتقال این مقدار از مقاومت به سمت اولیه از رابطه (۱۰-۳) استفاده می شود.

$$\Delta R = n^2 q R_{wp} \quad (10-3)$$

q : کوپل بین تابه و سیم پیچ



شکل ۱۱-۳: تغییرات مقاومت تابه

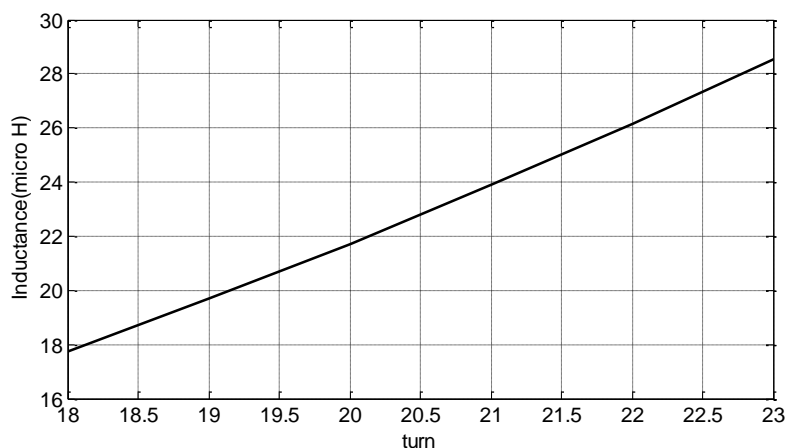


شکل ۳-۱۲: مقاومت سیم پیچ

با توجه به روابطی که گفته شد، مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد دور مقاومت تابعه نیز افزایش می‌یابد. مقاومت سیم پیچ شامل دو مقاومت (هدایت و القایی) می‌شود که با افزایش تعداد دور هر دو مقاومت افزایش می‌یابد.

تأثیر تعداد دور بر اندوکتانس: با توجه به رابطه اندوکتانس در مرجع [۳۱] $L_{eq} = \frac{\pi\mu_0 n^2 D_{in}^2}{4H_{in}}$

مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد دور اندوکتانس سیم پیچ نیز افزایش می‌یابد و برای سیم پیچ طراحی شده در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده است.

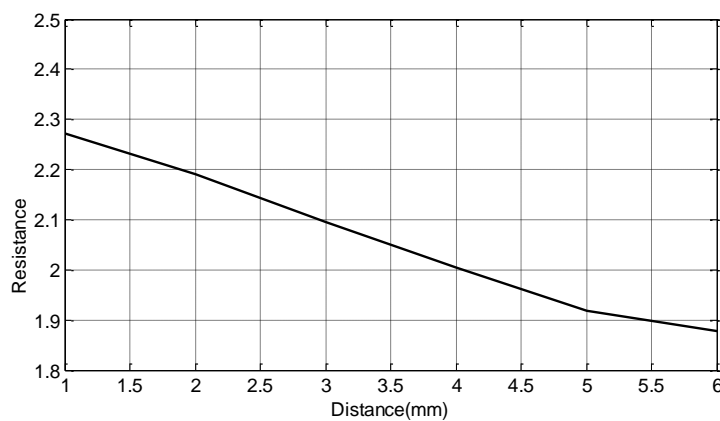


شکل ۳-۱۳: تأثیر تعداد دور بر اندوکتانس سیم پیچ

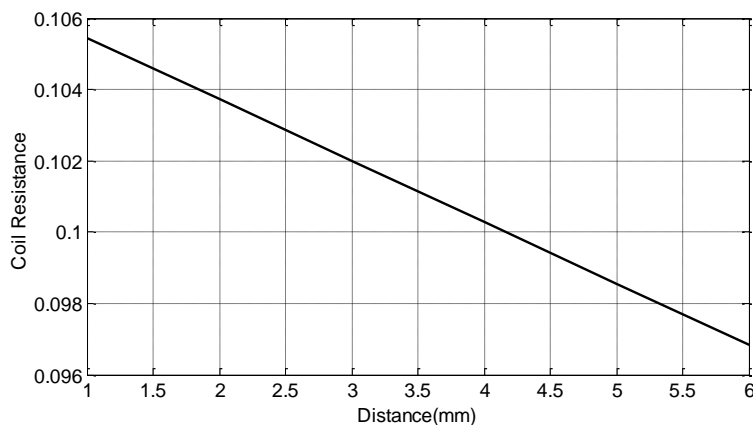
۲-۲-۳ تأثیر فاصله سیم پیچ با قطعه کاربر پارامترهای سیم پیچ

یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد سیم پیچ، فاصله سیم پیچ تا قطعه کار است که به بررسی آن می پردازیم. در این حالت فرکانس را ۴۰ KHz تعداد دور را ثابت ۲۰ دور در نظر گرفته شده است.

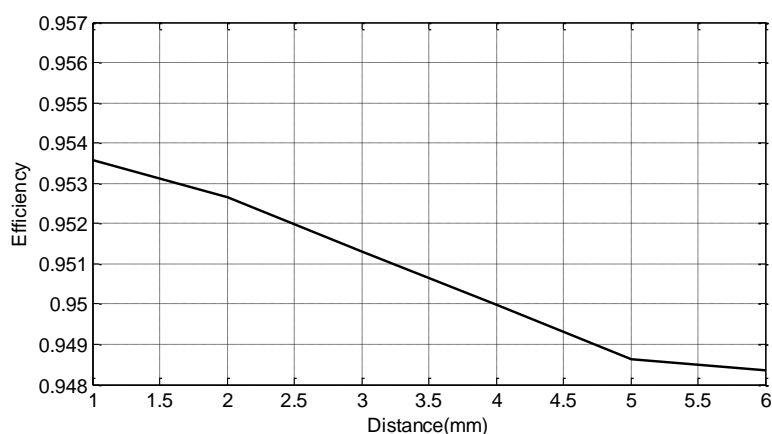
تأثیر فاصله سیم پیچ از قطعه کار بر مقاومت: با توجه به شکل ۳-۱۴ مشاهده می شود که با افزایش فاصله سیم پیچ با قطعه کار مقاومت انتقال یافته به سمت سیم پیچ کاهش می یابد که علت آن کاهش شار پیوندی می باشد و شکل ۳-۱۵ نشان می دهد که با افزایش فاصله سیم پیچ با تابه مقاومت القایی به دلیل اثر مجاورت کاهش می یابد که علت آن کاهش میدان در نقاط عمود بر هر دور می باشد.



شکل ۳-۱۴: مقاومت انتقال یافته به سیمت سیم پیچ



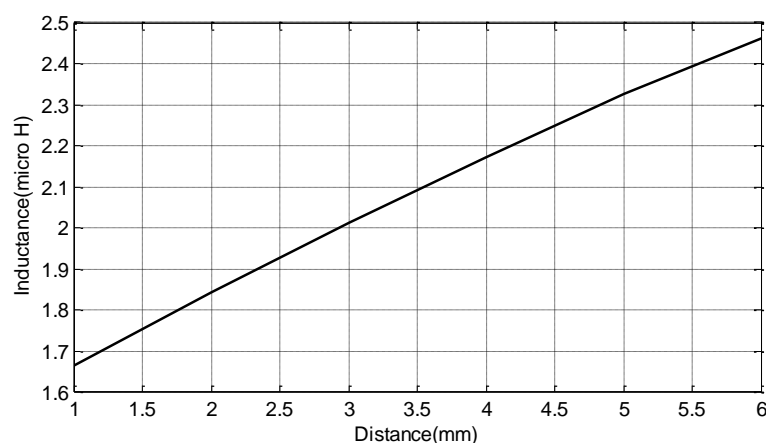
شکل ۳-۱۵: مقاومت سیم پیچ



شکل ۳-۱۶: تأثیر فاصله سیم پیچ و تابه بر راندمان

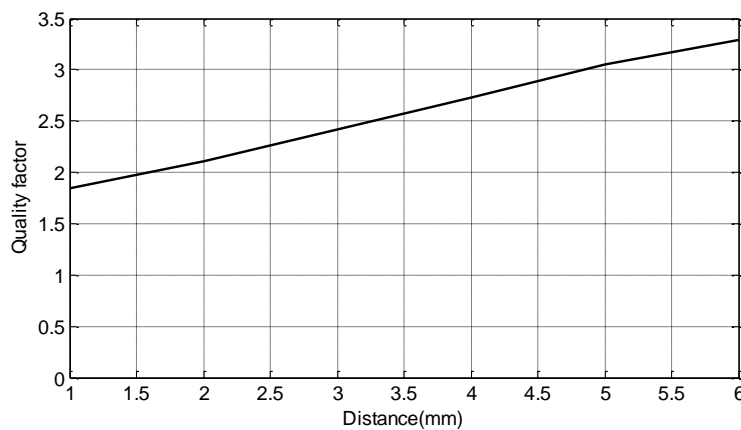
تأثیر فاصله سیم پیچ از قطعه کار بر راندمان: با توجه به شکل ۳-۱۶ مشاهده می شود. اگرچه با افزایش فاصله راندمان کاهش می یابد اما فاصله بین قطعه کار و سیم پیچ تأثیر چندانی بر راندمان ندارد. علت این امر این است که هر دو توان حرارتی و تلفات سیم پیچ با افزایش فاصله کاهش می یابد.

تأثیر فاصله سیم پیچ از قطعه کار بر اندوکتانس: اگر برای مدل سیم پیچ مدل استاندارد ترانسفورماتور در نظر بگیریم به صورتی که سیم پیچ، اولیه ترانسفورماتور و تابه مانند ثانویه ترانس با یک دور سیم پیچی که اتصال کوتاه شده است، افزایش فاصله موجب افزایش اندوکتانس نشی می شود که برای عملکرد سیستم مقدار اندوکتانس سیم پیچ مهم است. چون هم در انتخاب خازن و هم در عملکرد اینورتر بسیار اهمیت دارد.



شکل ۳-۱۷: تأثیر فاصله سیم پیچ بر اندوکتانس

تأثیر فاصله سیم پیچ از قطعه کار بر ضریب کیفیت: با توجه مقدار مقاومت و ضریب کیفیت می توان نتیجه گرفت که افزایش فاصله بین سیم پیچ و تابه موجب کاهش مقاومت و افزایش ضریب کیفیت (شکل ۳-۱۸) می شود. به این معنی که برای تولید توان حرارتی یکسان در ضریب کیفیت بالاتر نیاز به جریان بیشتری است.



شکل ۳-۱۸: ضریب کیفیت

۳-۲-۳ تأثیر جنس فلز گرم شونده بر پارامترهای سیم پیچ

در این قسمت اثر جنس ماده بر روی عملکرد سیستم گرمایش القایی مورد بررسی قرار می گیرد. در شبیه سازی از سیم پیچ ۲۰ دوری با فرکانس ۴۰ KHz و در فاصله ۵ mm انجام شده است.

جدول ۳-۲: مشخصات مواد

جنس فلز کمیت	آلومینیوم	مس	آهن
ΔR	۰.۰۷۹۴	۰.۰۷۴۹	۱.۸۲
مقاومت سیم پیچ (اهم)	۰.۱۰۵۶۵۱	۰.۱۰۶۵۵۱	۰.۰۹۵۲۹۶
اندوکتانس سیم پیچ	۱۴.۱ μH	۱۴.۱ μH	۲۳.۳ μH
راندمان (درصد)	۴۲.۷	۴۱.۳	۹۵
ضریب کیفیت (Q)	۱۹.۱	۱۹.۵	۳۰.۵

تأثیر جنس فلز مقاومت: از جدول ۲-۳ می‌توان دید که مقاومت انتقال‌یافته به سمت سیم‌پیچ، مقاومت سیم‌پیچ اندوکانس، راندمان و حتی ضریب کیفیت به ویژگی‌های جنس ظرف وابسته است. بنا بر این با توجه به جنس ظرف و ضریب کیفیت به این نتیجه می‌رسیم که هرچه ضریب کیفیت بار کمتر باشد آن بار زودتر گرم می‌شود.

۳-۳ خلاصه

در این فصل ابتدا روشی برای طراحی سیم‌پیچ اجاق القایی مطرح گردید و تأثیر قطر هادی نیز در نظر گرفته و بهینه‌سازی تعداد هادی بر اساس دما انجام شد و عملکرد سیم‌پیچ در شرایط مختلف بررسی شد در نهایت سیم‌پیچ با توجه به بررسی‌ها انجام‌شده ساخته شده است.

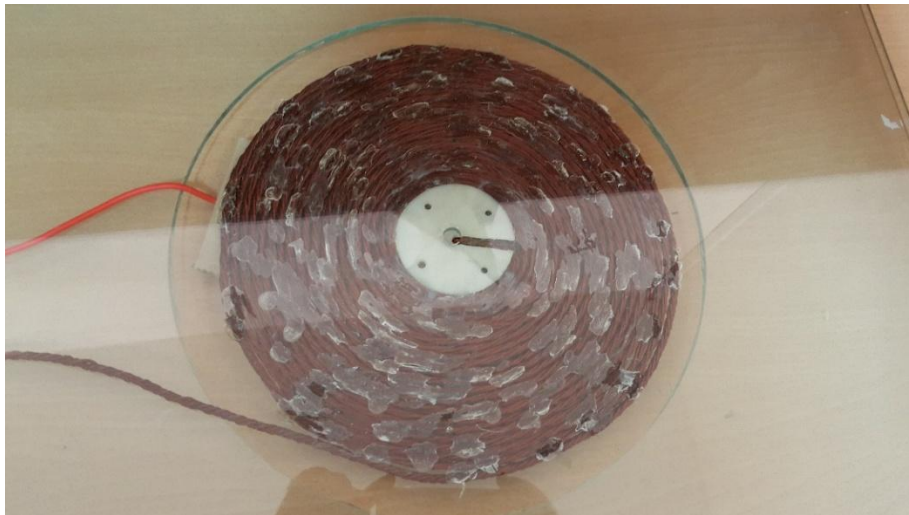
فصل چهارم

نتیجه شبیه‌سازی و ساخت

در این فصل از سیم پیچ طراحی شده، برای بررسی و عملکرد این آن در فرکانس‌های گوناگون و نیز شبیه‌سازی استفاده خواهد شد. نتایج آن مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت و همچنین تأثیر سیکل وظیفه بر حرارت تولیدی در ظرف بیان خواهد شد.

۱-۴ سیم پیچ

سیم پیچ طراحی شده در فصل ۳ با ۲۰ دور و ۷۰ رشته هادی با قطر 0.3 mm با قطر داخلی شعله 68 mm و قطر خارجی شعله 260 mm به صورتی که فاصله سیم پیچ تا تابه 6 mm ساخته و در شکل ۱-۴ نشان داده شده است.



شکل (۱-۴): سیم پیچ طراحی شده

در این پایان‌نامه از موادی با مشخصاتی که در جدول زیر آورده شده، استفاده شده است.

جدول ۱-۴: مشخصات فیزیکی فلزات

جنس فلز کمیت	آلومینیوم	مس	آهن
تراوایی μ_r	۱	۱	۴۰۰-۱۷۵z
هدایت ویژه (S)	۳۸.۵	۶۰	۲
ضریب دما	۰.۰۰۴	۰.۰۰۴	۰

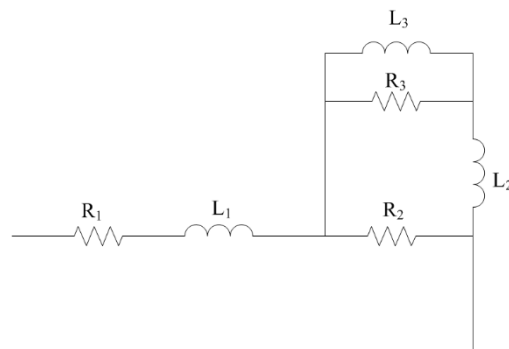
۲-۴ مدار معادل سیستم

مدار معادل شبکه در شکل ۱-۴ نشان داده شده است. $Z_{network}(\omega)$ در فرکانس ω را به صورت رابطه (۱-۴) نوشته می‌شود، که برای تکرار بهینه سازی غیر خطی بکار می‌رود. در واقع امپدانس (مقاومت و اندوکتانس) با تغییر فرکانس تغییر می‌کند که این تغییر را با شبکه‌ای از عناصر پسیو می‌توان مدل کرد.

$$Z_{network}(\omega) = (R_1 + j\omega L_1) + (R_2 \parallel ((R_3 \parallel j\omega L_3) + j\omega L_2)) \quad (۱-۴)$$

مقدار بهینه توسط مینیمم سازی مجموع مربعات خطا بین امپدانس شبکه و امپدانس شبیه‌سازی شده توسط FEM در فرکانس های ۸۰ KHz - ۳۰ KHz بدست می‌آید.

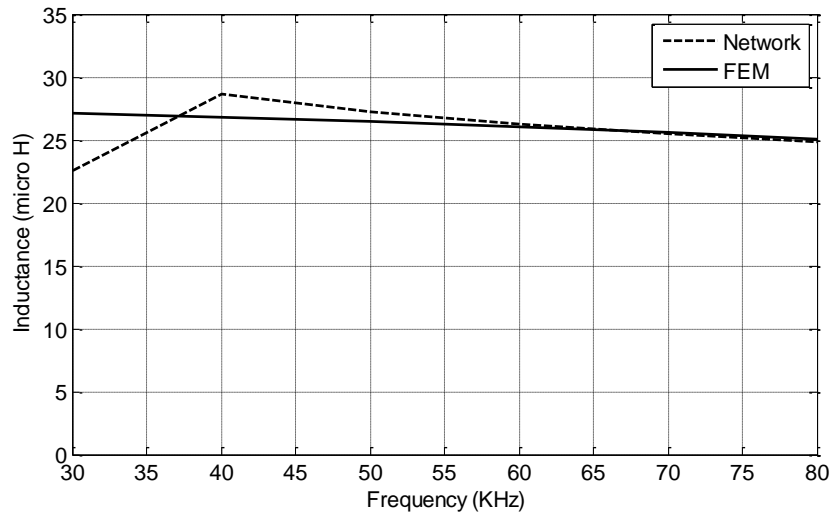
مقادیر المان‌های شکل ۱-۴ با استفاده از الگوریتم بهینه سازی پرندگان محاسبه شده است و در جدول ۲-۴ این مقادیر آورده شده است، از این شبکه در SIMULINK برای بررسی و مدل سازی تاثیر فرکانس کلیدزنی و سیکل وظیفه استفاده شده است. از شکل ۲-۴ و شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود که مطابقت خوبی بین مقادیر امپدانس معادل شبکه و شبیه‌سازی المان محدود در فرکانس های مختلف وجود دارد.



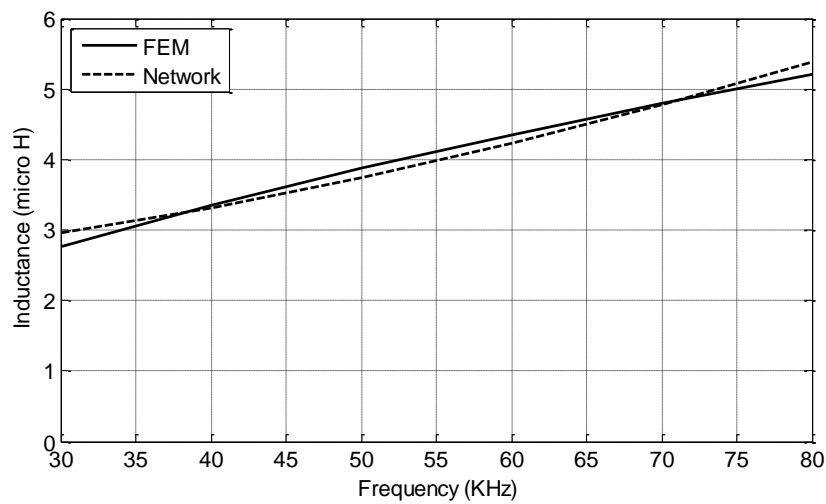
شکل ۱-۴: مدار معادل شبکه که شامل شش المان (مدل کننده سیم پیچ سیستم گرمایش القایی)

جدول ۲-۴: پارامترهای شبکه

ردیف	مقاومت	اندوکتانس
۱	۲.۵۴۶۹Ω	$۵۴.۸۶۸۱ \mu H$
۲	۸۹.۵۴۰۹Ω	$۱۰.۷ \mu H$
۳	۴۷.۴۸۹۳Ω	$.۱۰.۷۶۸ \mu H$



شکل ۲-۴: مقایسه اندوکتانس شبکه با عناصر پسیو و شبیه سازی المان محدود متغیر با فرکانس



شکل ۳-۴: مقایسه مقاومت شبکه با عناصر پسیو و شبیه سازی المان محدود متغیر با فرکانس

۳-۴ تأثیر فرکانس بر عملکرد سیم پیچ

نحوه عملکرد به این صورت است، یک سیم پیچ و یک خازن که مدار تشدید را تشکیل می دهد

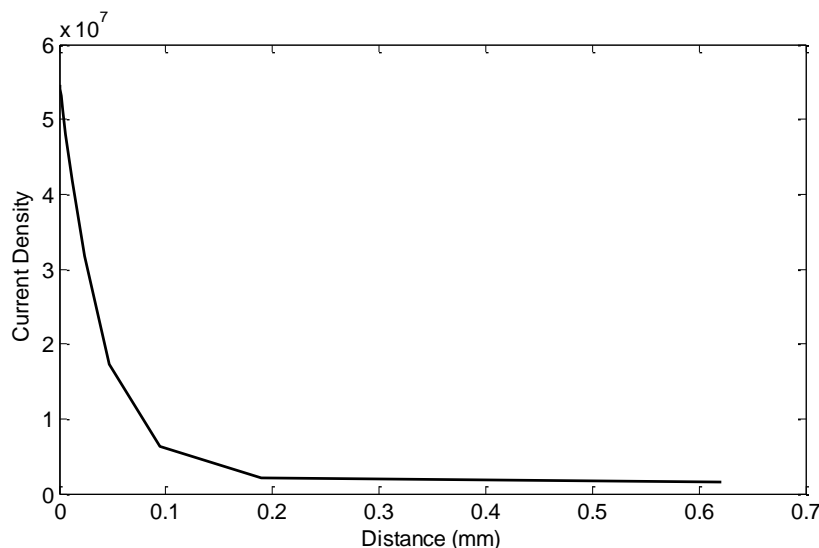
که به یک منبع با موج ولتاژ مربعی متقارن متصل شده است. بنابر این توان با تغییر فرکانس کلیدزنی

تنظیم می‌شود. از این رو بررسی تأثیر فرکانس ضروری است. وقتی ولتاژ منبع به سرعت تغییر کند (تغییر فرکانس)، نفوذ جریان در هادی یکنواخت نخواهد بود، عمق نفوذ با توجه به رابطه

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 \mu_r f}}$$

می‌شود و با تغییر فرکانس عمق نفوذ تغییر خواهد کرد.

عمق نفوذ، ضخامت سطحی است که چگالی جریان در آن قسمت ۶۳٪ از کل جریان و توان حرارتی تولیدی در این لایه ۸۷٪ از کل توان حرارتی می‌باشد، به ترتیب در شکل ۴-۴ و شکل ۴-۶ برای فرکانس ۴۰ KHz نشان داده شده است. و شکل ۴-۵ چگالی جریان را در کف تابه در جهت قطر تابه در فرکانس‌های مختلف را نشان می‌دهد.



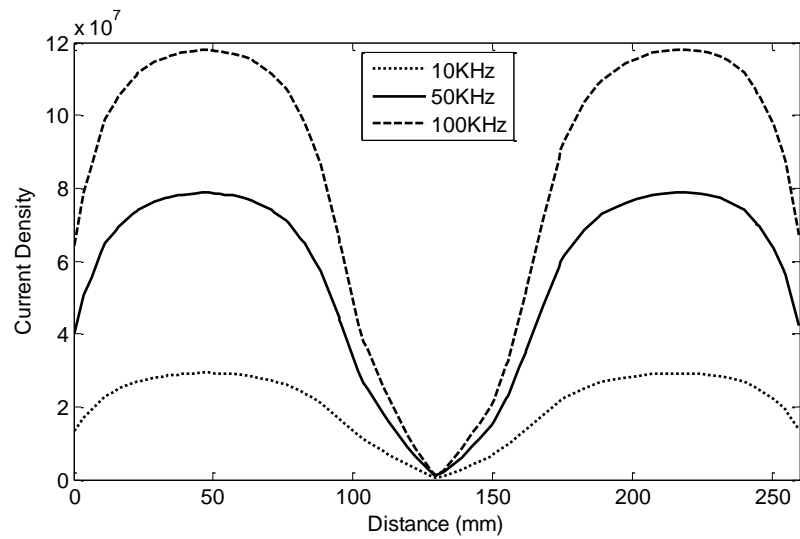
شکل ۴-۴: چگالی جریان در کف تابه در جهت محور z با فرکانس ۴۰ KHz

در شکل ۳-۱ عمق نفوذ در چند فلز نشان داده شده، بیانگر این نکته است که برای مواد غیرمغناطیسی مانند آلومینیوم ضریب نفوذپذیری نسبی برابر یک می‌باشد، و برای مواد فرو مغناطیسی مانند آهن و بعضی از فولادها ضریب نفوذپذیری نسبی بالاتری دارند و هرچه ضریب نفوذپذیری نسبی بیشتر باشد عمق نفوذ آن کاهش می‌یابد. بنابراین مواد فرومغناطیس دارای عمق نفوذ کمتری می‌باشند. پرمابلیته مغناطیسی مواد فرومغناطیسی وابستگی زیادی به ساختار ماده و حرارت دارد.

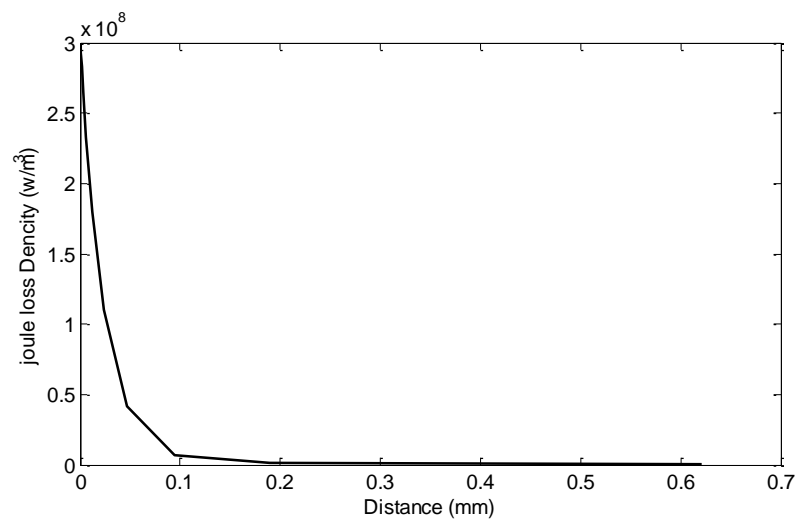
به نحوی که در دماهای بالاتر از دمای کوری μ_r ناگهان کاهش می‌یابد و برابر یک می‌شود که سریعاً

عمق نفوذ را افزایش می‌یابد. از طرفی باتوجه به معادله (۲-۱۸) عمق نفوذ وابسته به فرکانس

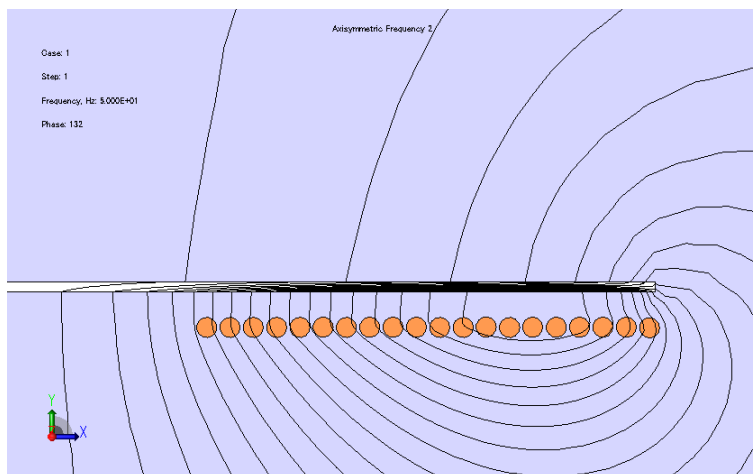
نیز می‌باشد که در شکل ۴-۷ این مسئله به صورت گرافیکی نشان داده شده است.



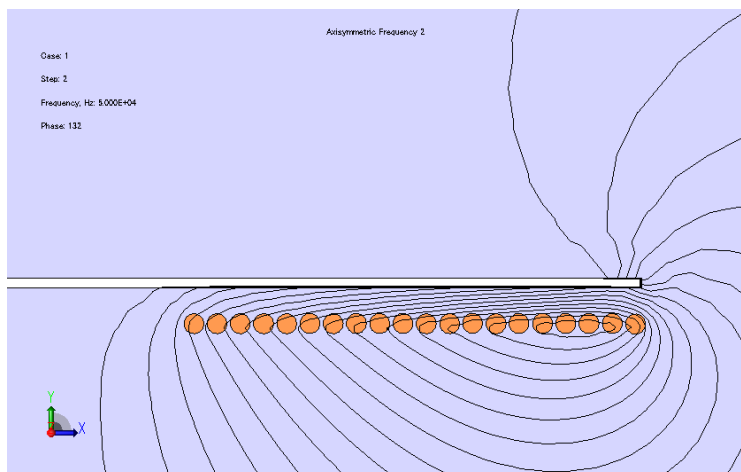
شکل ۴-۵: چگالی جریان در کف تابه در جهت قطر (خط فرضی) تابه



شکل ۴-۶: چگالی توان در کف تابه در جهت محور z



(الف)

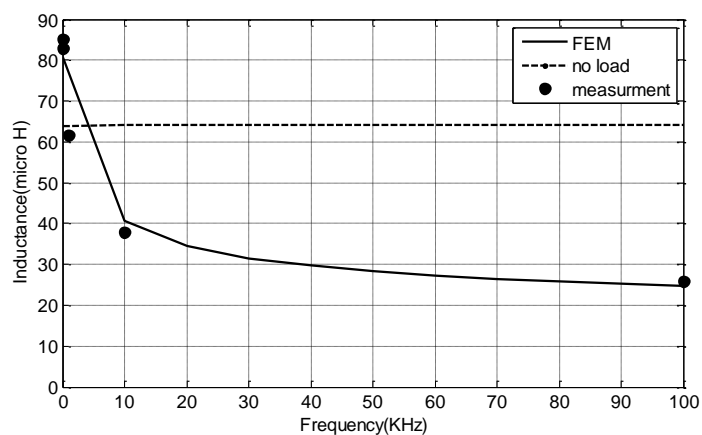


(ب)

شکل ۷-۴: توزیع میدان مغناطیسی الف (۵۰ Hz) ب (۵۰ KHz)

۱-۳-۴ تأثیر فرکانس بر اندوکتانس

با افزایش فرکانس اندوکتانس کاهش می‌یابد با توجه به شکل ۷-۴، چون شار مغناطیسی به علت نفوذپذیری میدان پایین‌تر (رلوکتانس زیاد می‌شود) کاهش می‌یابد. در شکل ۸-۴ تأثیر فرکانس بر اندوکتانس نشان داده شده است.

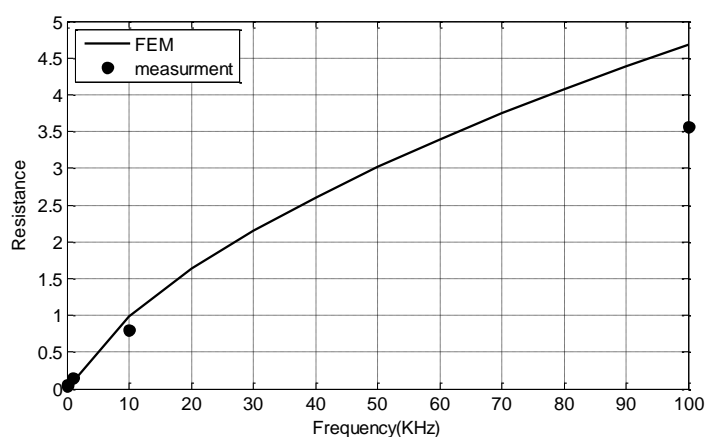


شکل ۸-۴: تأثیر فرکانس بر اندوکتانس

۲-۳-۴ تأثیر فرکانس بر مقاومت

همان‌طور که در قسمت قبل گفته شد با افزایش فرکانس عمق نفوذ نیز طبق معادله (۲-۱۸) نیز کاهش می‌یابد، با توجه به معادله (۳-۸) مقاومت با کاهش عمق نفوذ افزایش می‌یابد. که در شکل ۹-۴ نشان داده شده است.

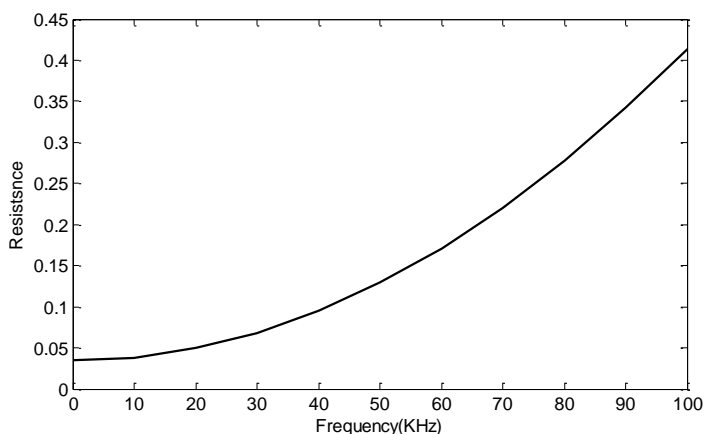
از طرفی کل تلفات ایجاد شده توسط جریان گردابی توسط قانون ژول محاسبه می‌شود. افزایش مقاومت به مفهوم توان حرارتی ایجاد شده بیشتر است.



شکل ۹-۴: تأثیر فرکانس بر مقاومت

۳-۳-۴ تأثیر فرکانس بر مقاومت ناشی از اثر مجاورت سیم پیچ

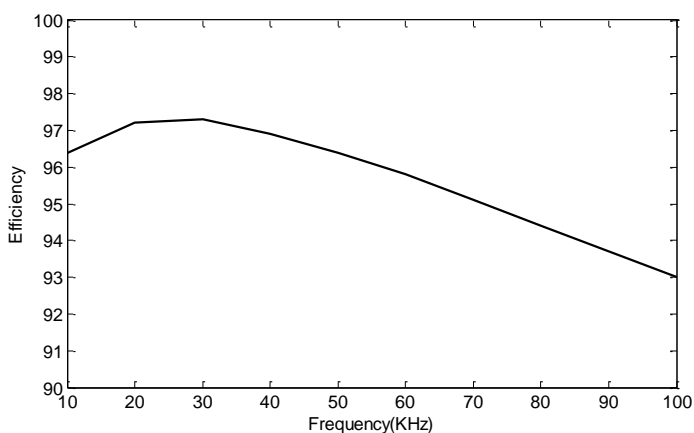
با افزایش فرکانس مقاومت ناشی از اثر مجاورت طبق معادله (۳-۴) افزایش می یابد که در شکل ۴-۱۰ مقاومت سیم پیچ در فرکانس ۰-۱۰۰ KHz نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۰: مقاومت وابسته به سیم پیچ

۴-۳-۴ تأثیر فرکانس بر راندمان

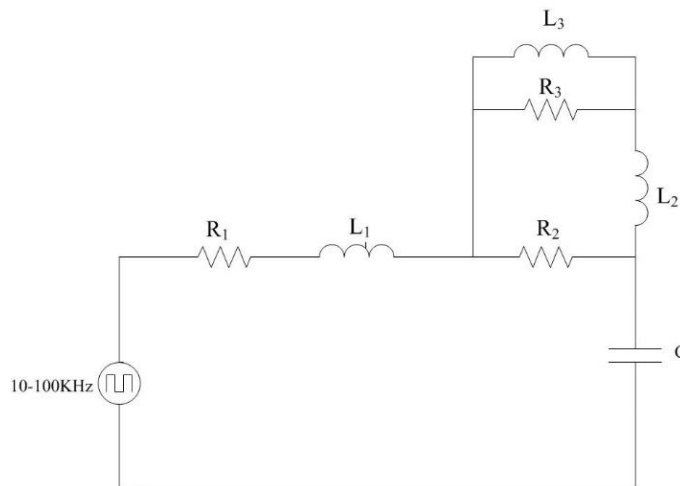
با افزایش فرکانس مشاهده می شود که مقاومت دیسک افزایش می یابد اما باید به مقاومت سیم پیچ توجه کنیم که با افزایش فرکانس، تلفات نیز افزایش می یابد. پس راندمان این سیستم و از معادله (۲-۵۶) محاسبه گردد. که در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است.



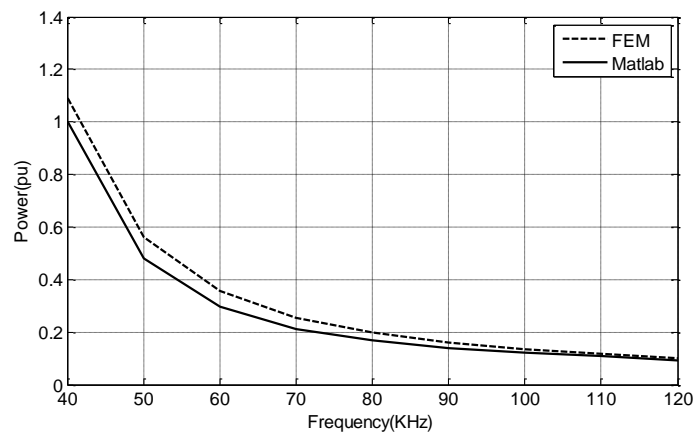
شکل ۴-۱۱: نمودار راندمان در اثر تغییر فرکانس

۵-۳-۴ تاثیر فرکانس با خازن ثابت

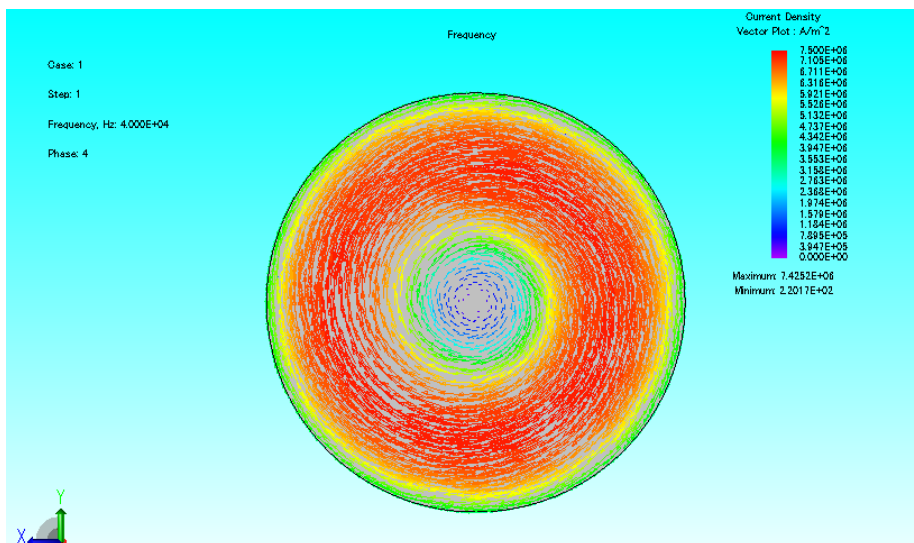
برای بررسی تأثیر فرکانس به این صورت عمل می‌کنیم که ابتدا سیم‌پیچی با ۲۰ دور در نظر گرفته که فاصله بین سیم‌پیچ و تابه ۶ mm می‌باشد حال فرکانس از ۱۲۰ KHz-۴۰ KHz تغییر می‌کند. البته در این شرایط فرض شده که جریان ۱۰ آمپر در سیم‌پیچ شارش یافته و در این حالت از یک خازن سری $1\mu F$ در مدار استفاده شده است. مدار معادل اینورتر و بار در شکل ۱۲-۴ نشان داده شده است. با افزایش فرکانس راکتانس سلفی افزایش یافته که منجر به کاهش جریان و در نهایت موجب کاهش توان خواهد شد که در شکل ۱۳-۴ نشان داده شده است.



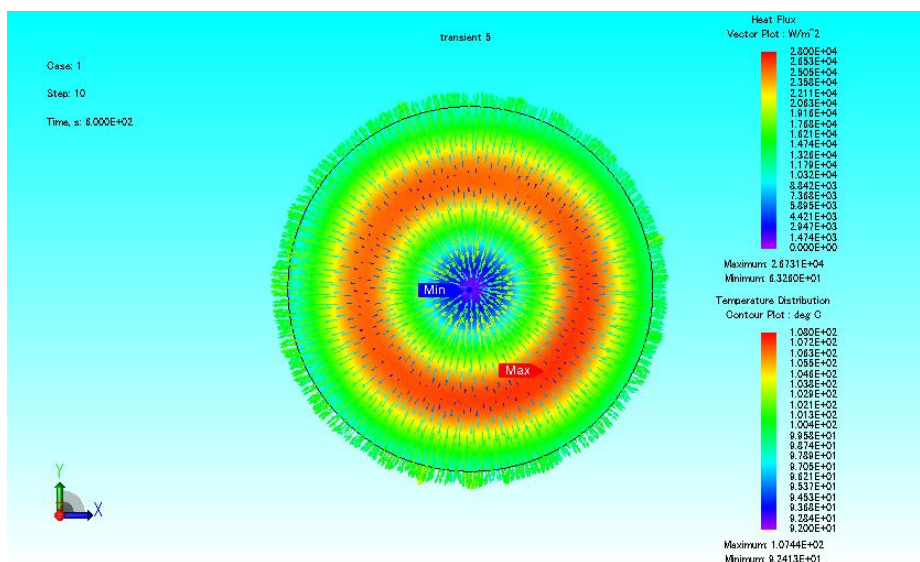
شکل ۱۲-۴: مدار معادل اینورتر و بار در فرکانس متغیر با خازن ثابت



شکل ۱۳-۴: نمودار توان فرکانس با خازن ثابت



شکل ۴-۱۴: توزیع چگالی جریان در تابه



شکل ۴-۱۵: توزیع دما و شار حرارتی در تابه

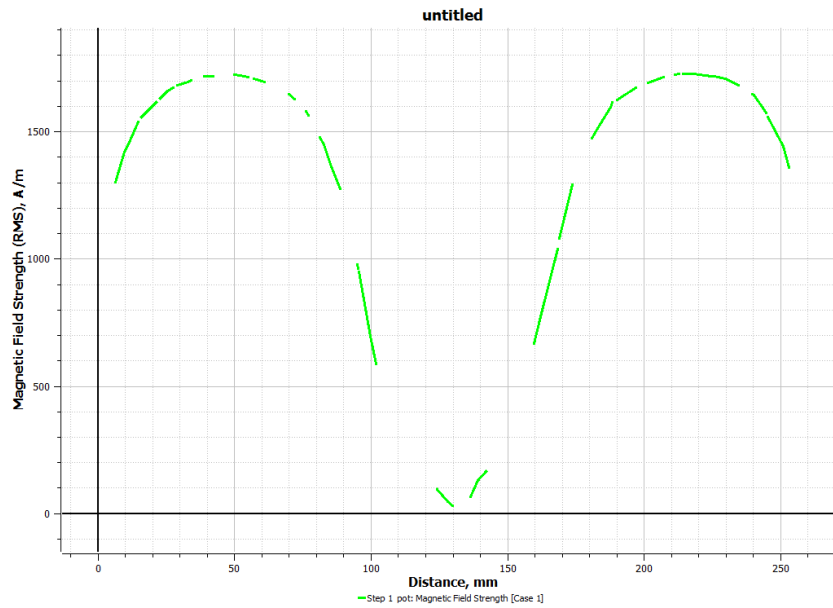
حال اگر چگالی جریان گردابی J_e اگر انتگرال گیری تنها بر روی سطح S_i از یک جزء محدود

انجام شود، توان حرارتی و گرمایش محلی این جزء را طبق قانون ژول $p = \frac{J_e^2}{\sigma}$ بدست می آید. توزیع

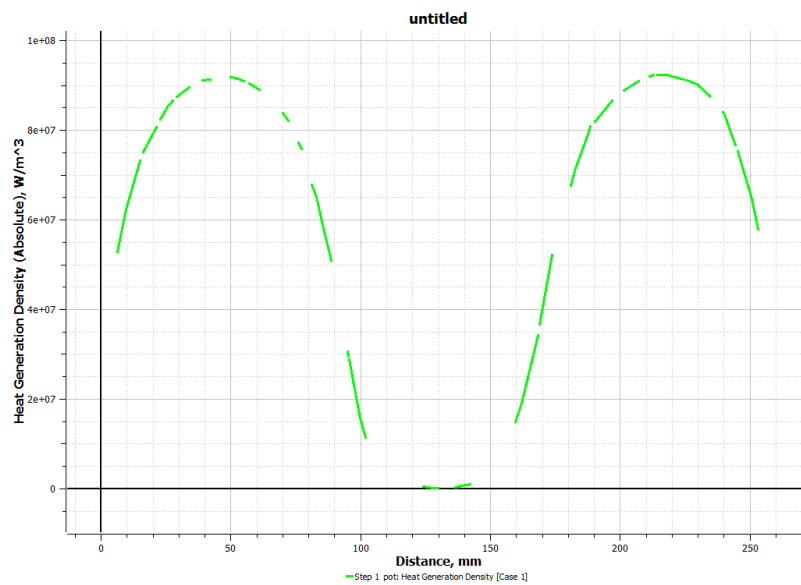
چگالی جریان گردابی در ته تابه در شکل ۴-۱۴، و در شکل ۴-۱۵ توزیع حرارت و شار حرارتی در تابه

نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود شار حرارتی بر خطوط هم دما عمود می باشد. با توجه

به نمودار چگالی جریان نمودار شدت میدان به صورت شکل ۴-۱۶ می باشد.

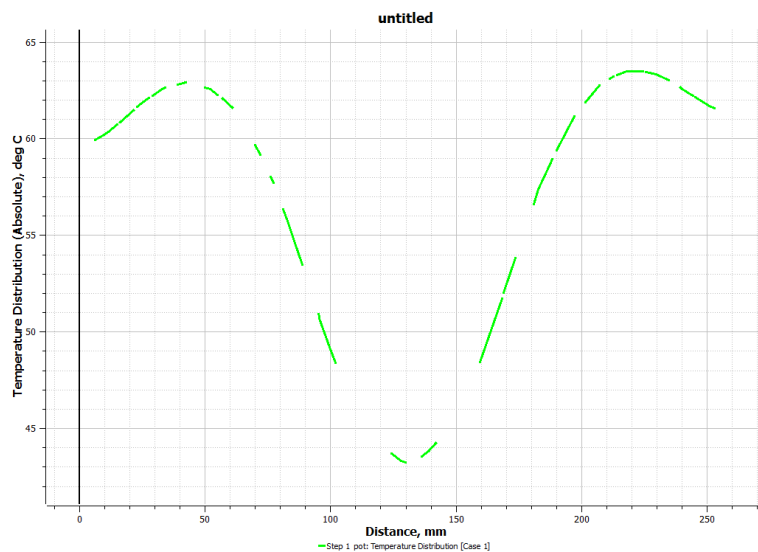


شکل ۴-۱۶: نمودار شدت میدان

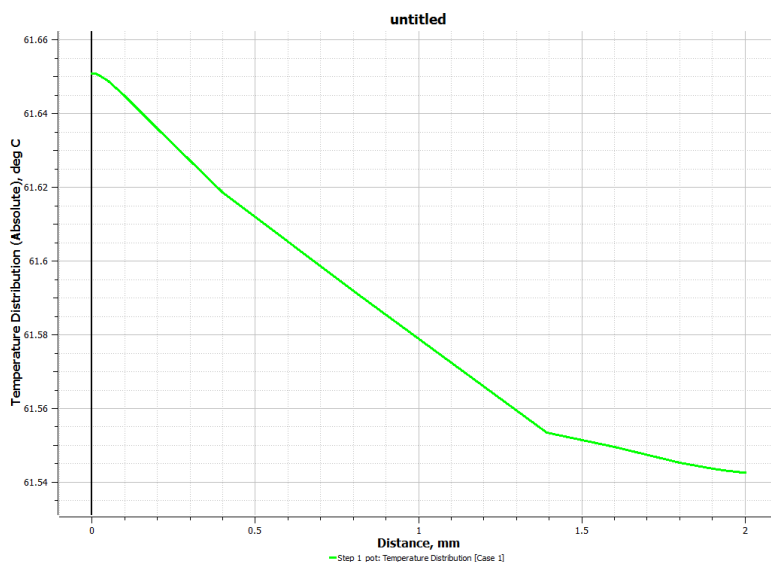


شکل ۴-۱۷: نمودار چگالی توان حرارتی

و با توجه به قانون ژول و نمودار چگالی جریان، چگالی توان حرارتی تولیدشده به صورت شکل ۴-۱۷ خواهد بود. توزیع دما در زمان ۱۰۰ ثانیه به صورت شکل ۴-۱۸ بوده همان طور که ملاحظه می شود یک انتقال حرارت به صورت جابجایی از لبه های و سطح بالایی دیسک داریم که مقدار آن 10 W/m^2 می باشد.



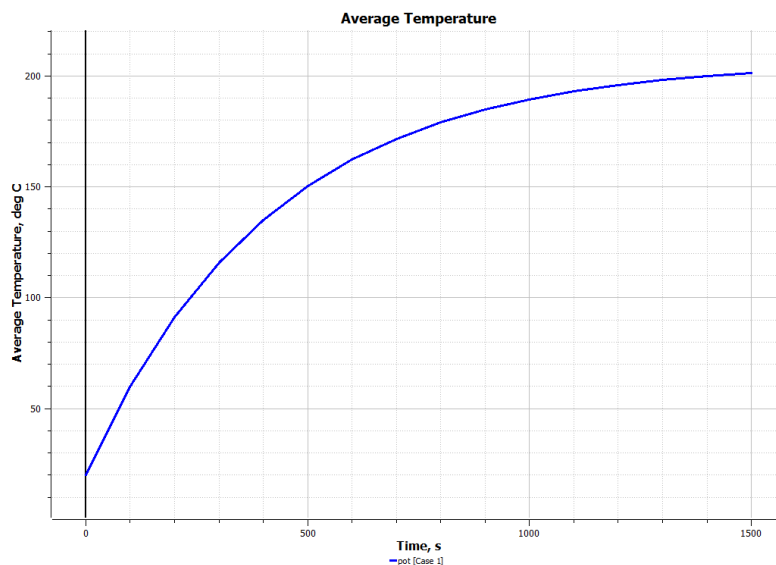
شکل ۴-۱۸: نمودار توزیع دما در راستای قطر



شکل ۴-۱۹: اختلاف دما در سطح پایین و سطح بالایی دیسک

شکل ۴-۱۹ نشان دهنده اختلاف دما در سطح پایین و سطح بالایی دیسک می باشد که علت این اختلاف دما رسانش (هدایت) حرارت می باشد البته باید در نظر گرفت که حرارت در لایه ای در پایینی دیسک تولید می شود و دمای سطح بالایی دیسک به دلیل تماس با هوای مجاور خنک تر است. در شکل ۴-۱۹ عدد ۰ مربوط به ته دیسک بوده و عدد ۲ mm اشاره به سطح بالایی دیسک دارد.

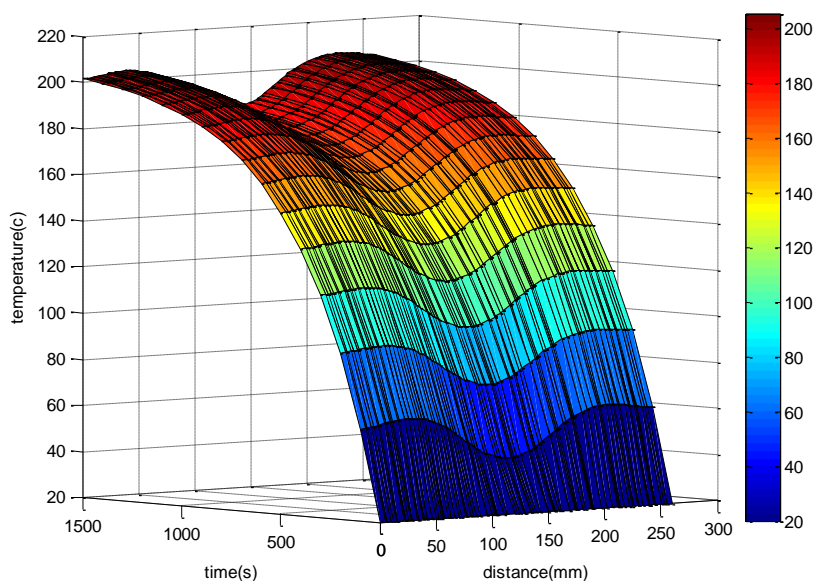
اگر توان حرارتی تولیدی برابر با کل اتلاف حرارت (جابجایی و هدایت و تشعشع) می شود آن زمان حالت ماندگار (پایدار) می باشد. شکل ۴-۲۰ دمای متوسط دیسک را نشان می دهد که به حالت



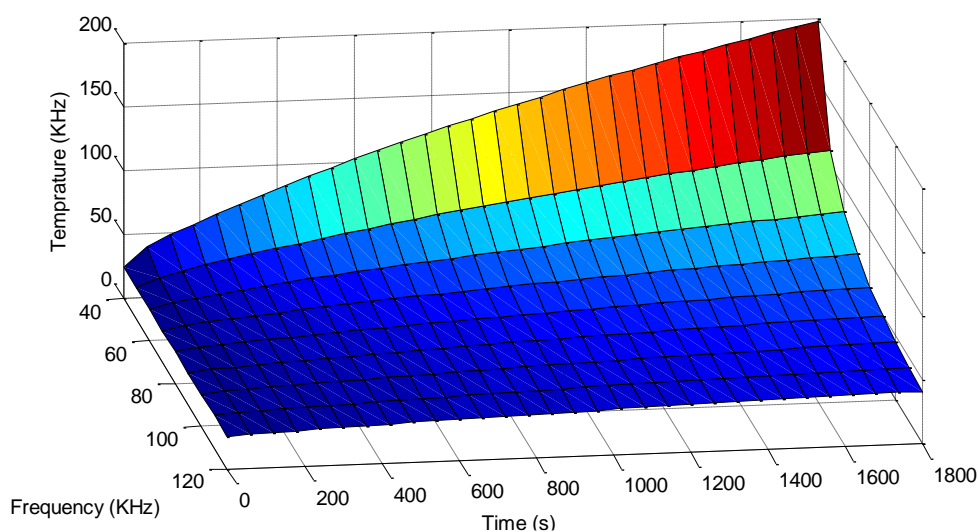
شکل ۴-۲۰: نمودار دمای متوسط دیسک

پایدار نزدیک می‌شود.

حال همان خط فرضی روی قطر دیسک را در نظر می‌گیریم. همان‌طور که ملاحظه می‌شود افزایش دما با توجه به زمان بر روی این خط فرضی در شکل ۴-۲۱ نشان داده شده است. دیده می‌شود که تغییرات دما بر روی خط فرضی رژیم خود را در طول زمان حفظ می‌کند.



شکل ۴-۲۱: تغییر دما روی خط فرضی با توجه به زمان



شکل ۴-۲۲: تأثیر فرکانس بر دما در طی زمان ۱۸۰۰ ثانیه

شکل ۴-۲۲ تأثیر فرکانس بر دما در زمان ۱۸۰۰ ثانیه نشان داده شده است. با توجه به اینکه در اثر افزایش فرکانس عمق نفوذ کاهش و در نتیجه مقاومت نیز افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه خازن در مدار ثابت است و در نتیجه توان حرارتی تولیدشده نیز کاهش یافته پس در طی زمان یکسان روند گرم شدن دیسک با افزایش فرکانس کندتر از فرکانس تشدید می‌باشد.

۹۷ نقطه از دمای خط فرضی را که مشخص شده، برای محاسبه برآیند توزیع حرارتی که همانند توزیع توان تلفاتی می‌باشد استفاده می‌کنند. برای ارزیابی دقت یکنواختی سیستم ساخته شده، از ضریب یکنواختی (UF) استفاده می‌شود، از رابطه‌ای که در فصل ۲ بیان شد دمای میانگین، انحراف میانگین، ضریب یکنواختی محاسبه می‌شود.

در اینجا T دما در سطح تابه می‌باشد، که برای M تعداد نقطه محاسبه شده است، دمای متوسط در تابه با استفاده از رابطه (۲-۷۰) محاسبه شده است. انحراف معیار دما از رابطه (۲-۷۱) بدست می‌آید، که پراکندگی دما را تشریح می‌کند. متوسط دمای گوناگون در دستگاه‌های اجاق القایی متفاوت ظاهر می‌شود، دمای متوسط برای هر سیستم توسط رابطه (۲-۷۰) و UF می‌توان از رابطه

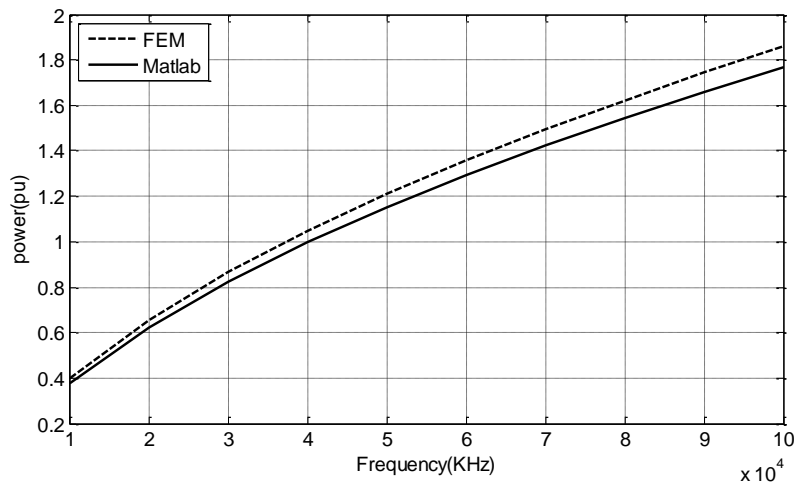
جدول ۳-۴: یکنواختی دما

$\bar{T} = 198.0247$	$S_N = 7.2828$	$UF = 0.0368$
----------------------	----------------	---------------

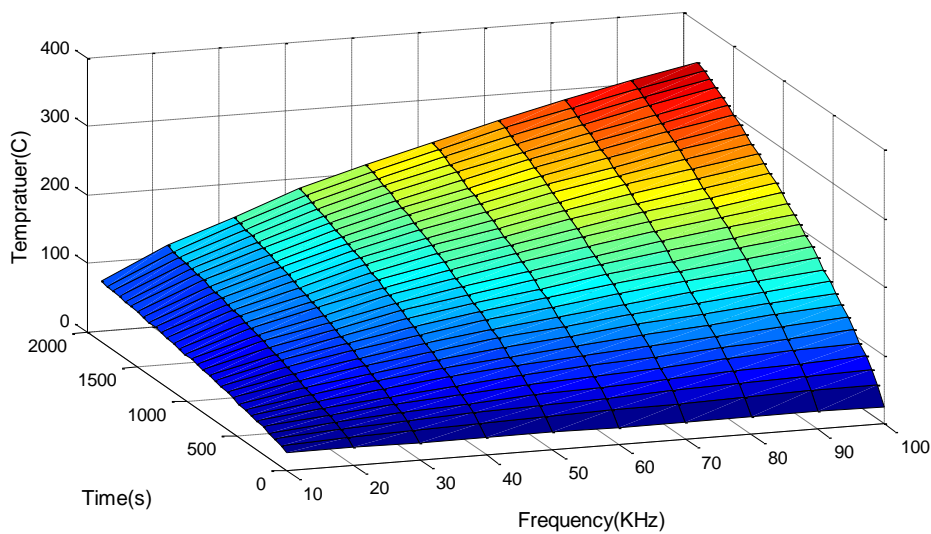
(۷۲-۲) بدست آورد، که نشان دهنده ضریب یکنواختی می باشد. یکنواخت سازی می توان از رابطه (۷۲-۲) بدست آورد. مقدار آن برای دستگاه های مختلف قابل محاسبه است. UF توزیع دما در کل تابه القایی برای هر سیستم وقتی که پیک دما ۲۰۰ درجه است محاسبه شده است.

۶-۳-۴ تاثیر فرکانس با خازن تشدید

اگر فرکانس متغیر باشد بگونه ای که همه فرکانس ها، فرکانس تشدید باشد در این حالت اگر جریان را ثابت فرض کنیم مشاهده می شود که با افزایش فرکانس توان حرارتی به دلیل افزایش مقاومت افزایش می یابد (شکل ۴-۲۳)، و این خود دلیل بر سریع تر گرم شدن تابه می باشد که در شکل ۴-۲۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۳: نمودار توان - فرکانس

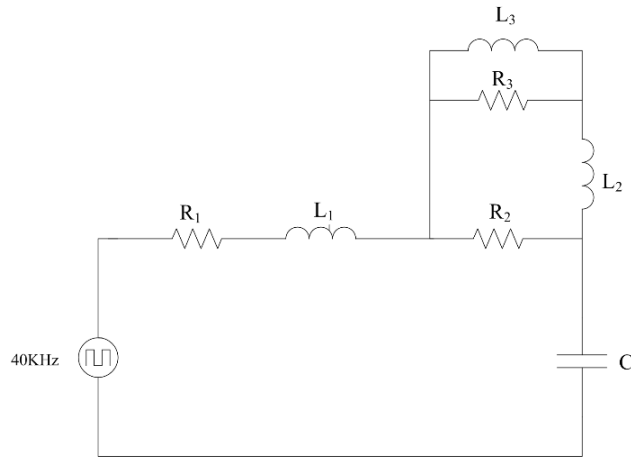


شکل ۴-۲۴: تأثیر فرکانس بر دما در طی زمان ۱۸۰۰ ثانیه

۴-۴ تأثیر سیکل وظیفه بر عملکرد سیستم

در این بررسی از سیم پیچ و خازن توسط ولتاژ پالسی با پهنای ولتاژ متغیر استفاده شده است. بنابر این توان با استفاده از مد کنترل مدولاسون پهنای پالس (PWM) تنظیم می شود (سیکل وظیفه (D). پس توان خروجی توسط دو عامل فرکانس و سیکل وظیفه تنظیم می شود.

برای مدل سازی در FEM ابتدا مدار معادل آن در متلب شبیه سازی نموده و با قرار دادن مقادیر امپدانس معادل و ولتاژ را تغییر داده تا جریان ۱۰ آمپر در مدار جاری شود و سپس مقادیر سیکل وظیفه را تغییر داده و مؤلفه اصلی جریان عبوری را ثبت نموده و در شبیه سازی FEM از این مقادیر استفاده می کنیم.



شکل ۴-۲۵: مدار معادل اینورتر و بار

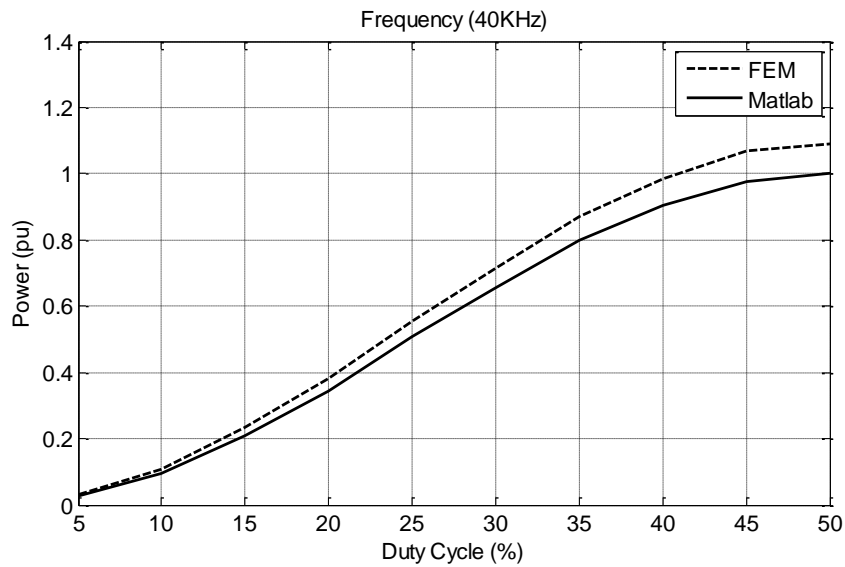
جدول ۴-۴: سیکل وظیفه و مقدار جریان در سیم پیچ

سیکل وظیفه	جریان
٪۵	۱.۶۸
٪۱۰	۳.۱۵۳
٪۱۵	۴.۶۴۷
٪۲۰	۵.۹۰۹
٪۲۵	۷.۱۲۴
٪۳۰	۸.۰۸۴
٪۳۵	۸.۹۲۷۷
٪۴۰	۹.۵۰۵
٪۴۵	۹.۸۹۳
٪۵۰	۱۰

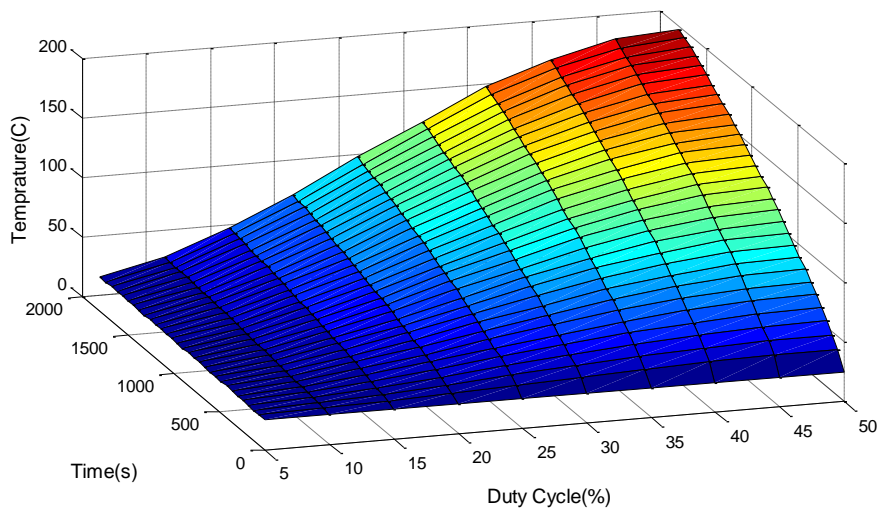
مشاهده می‌شود که با کاهش سیکل وظیفه جریان مؤلفه اصلی کاهش می‌یابد که با توجه به

آن مقادیر جریان در جدول ۴-۴ بدست آمده است. با توجه به مطالب گفته شده در فصل ۲ می‌توان گفت که سیکل وظیفه تأثیری در پارامترهای مدار معادل ندارد و در فرکانس ثابت راندمان تغییری نخواهد کرد. (جریان کاملاً سینوسی در نظر گرفته شده است).

از طرفی توان حرارتی تولیدشده با مجذور جریان نیز مرتبط است پس با کاهش سیکل وظیفه جریان مؤلفه اصلی کاهش می‌یابد، از طرفی کاهش جریان موجب کاهش توان می‌شود که منحنی آن در شکل ۴-۲۶ نشان داده شده است و در نهایت توان حرارتی کاهش می‌یابد، در نتیجه روند گرم شدن



شکل ۴-۲۶: مقایسه توان محاسبه شده توسط متلب و شبیه‌سازی با FEM



شکل ۴-۲۷: منحنی حرارتی بر اساس تغییر سیکل وظیفه و زمان

تابه کندتر می‌شود که در شکل ۴-۲۷ نشان داده شده است.

۴-۵ خلاصه

در این فصل با استفاده از سیم‌پیچ طراحی شده، اثر فرکانس را بر عملکرد سیم‌پیچ مورد بررسی قرار دادیم. تأثیر فرکانس و سیکل وظیفه در تولید حرارت فرایند گرمایش القایی پرداختیم. همچنین ضریب یکنواختی و توزیع حرارت برای تابه محاسبه شده است.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ نتیجه‌گیری

کارهای انجام‌شده و نتایج به‌دست‌آمده در این پایان‌نامه را می‌توان به‌طور خلاصه به‌صورت زیر

مطرح نمود:

- معرفی روش ترکیبی برای طراحی سیم‌پیچ اجاق القایی: براین اساس مقاومت سیم‌پیچ با استفاده از روابط مطرح شده در فصل ۳ محاسبه شده و سپس با استفاده از نرم افزار المان محدود سایر پارامترهای مورد نیاز بدست می‌آید. در این بررسی اثر تعداد رشته هادی و حتی دمای رشته‌ها بر مقاومت سیم‌پیچ بررسی شده است. که مشاهده شده، مینیمم تعداد رشته‌ها به مقاومت ویژه وابسته است. اما مقاومت مینیمم به مقاومت ویژه رشته هادی وابسته نیست.
- بررسی تأثیر تعداد دور بر مشخصات سیم‌پیچ: با توجه به این که سیم‌پیچ گرمایش القایی را مانند یک ترانسفورماتور با n دور می‌توان در نظر گرفت، افزایش تعداد دور موجب افزایش مقاومت انتقال یافته تابه به سمت سیم‌پیچ می‌شود و این افزایش مقاومت به ازای جریان یکسان به مفهوم افزایش حرارت در تابه است.
- بررسی تأثیر فاصله بین سیم‌پیچ و تابه: با افزایش فاصله سیم‌پیچ تا تابه مشاهده می‌شود که مقدار اندوکتانس افزایش می‌یابد و مقدار مقاومت انتقال یافته به سمت سیم‌پیچ کاهش می‌یابد. پس می‌توان گفت که هر چه فاصله سیم‌پیچ تا قطعه کار کمتر باشد بهتر است.
- بررسی جنس ماده در فرایند سیستم گرمایش القایی: در این بررسی مشاهده شد که جسم گرم شونده با مقاومت ویژه بالاتر و تراوایی مغناطیسی بالا دارای ضریب کیفیت پایین‌تری هستند و هرچه ضریب کیفیت پایین‌تر باشد جسم سریع‌تر گرم می‌شود.
- تأثیر فرکانس بر پارامترهای سیم‌پیچ و نحوه تولید حرارت در سیستم گرمایش القایی:

باتوجه به عمق نفوذ و مقاومت سطح که به مقاومت ویژه، تراوایی مغناطیسی و فرکانس کار وابسته است و هرچه این مقادیر بیشتر باشد عمق نفوذ کمتر و مقاومت سطح بیشتر می‌شود. اما برای انتخاب فرکانس باید مدار اینورتر بررسی شود، در فرکانس تشدید بیشترین توان در تابه تولید می‌شود.

- تأثیر سیکل وظیفه بر تولید حرارت در تابه: جریان به طور مستقیم وابسته به سیکل وظیفه است هرچه درصد سیکل وظیفه کمتر باشد شارش جریان در سیم‌پیچ کمتر می‌باشد که به مفهوم کاهش جریان گردابی در تابه است و حرارت کمتری در تابه ایجاد می‌شود. پس با کنترل سیکل وظیفه می‌توان حرارت را کنترل کرد.

۲-۵ پیشنهادات

در این زیر بخش، به دنبال مسائلی که در این پایان‌نامه مورد مطالعه قرار گرفت. چند پیشنهاد برای ادامه مطالعه و تحقیق ارائه شد.

- با توجه به اهمیت پارامترهای مربوط به طراحی سیم‌پیچ در طراحی از نرم‌افزار Design expert برای بهینه‌سازی سیستم گرمایش القایی شود.
- استفاده از چند سیم‌پیچ فنی با اشکال گوناگون مانند دایره‌ای، مثلثی و چهارضلعی و
- ضمن استفاده از چند سیم‌پیچ تأثیر اختلاف فاز در سیم‌پیچ‌ها بر روی حرارت تولیدی در تابه بررسی شود.

- [۱] O. Lucia, P. Maussion, E. J. Dede, and J. M. Burdio, "Induction heating technology and its applications: Past developments, current technology, and future challenges," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, pp. 2509-2520, 2014.
- [۲] S. Lupi, M. Forzan, and A. Aliferov, "Induction and direct resistance heating," *Theory and Numerical*, 2015.
- [۳] جوائوپدرو ای باستوس و نلسون سادوسکی، "مدل سازی الکترومغناطیسی با استفاده از روش‌های اجزاء محدود،" مترجم احمد دارابی و حامد طحانیان، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ۱۳۹۳.
- [۴] W. Youhua, W. Junhua, L. Jianguai, and L. Haohua, "Analysis of induction heating eddy current distribution based on 3D FEM ",in *Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering*, pp. 238-241, 2008.
- [۵] C. Dodd and W. Deeds, "Analytical Solutions to Eddy-Current Probe-Coil Problems," *Journal of applied physics*, vol. 39, pp. 2829-2838, 1968.
- [۶] F. P. Dawson and P. Jain, "A comparison of load commutated inverter systems for induction heating and melting applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 6, pp. 430-441, 1991.
- [۷] E. J. Dede, J. V. Gonzalez, J. A. Linares, J. Jordan, D. Ramirez, and P. Rueda, "25-kW/50-kHz generator for induction heating," *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 38, pp. 203-209, 1991.
- [۸] E. Dede, V. Esteve, J. Gonzalez, J. Garcia, E. Maset, and D. Ramirez, "A 12 kW/250 kHz series resonant converter for induction heating," *3rd AFRICON Conference*, pp. 91-94, 1992.
- [۹] H. W. Koertzen, J. D. Van Wyk, and J. A. Ferreira, "Design of the half-bridge, series resonant converter for induction cooking," in *Power Electronics Specialists Conference, (PESC'95 Record.), 26th Annual IEEE*, pp. 729-735, 1995.
- [۱۰] I. Lope, J. Acero, J. M. Burdío, C. Carretero, and R. Alonso, "Design and implementation of PCB inductors with litz-wire structure for conventional-size large-signal domestic induction heating applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, pp. 2434-2442, 2015.
- [۱۱] H. Koertzen, J. Ferreria, and J. Van Wyk, "A comparative study of single switch induction heating converters using novel component effectivity concepts," in *Power Electronics Specialists Conference, (PESC'92 Record)., 23rd Annual IEEE*, pp. 298-305, 1992.
- [۱۲] R. Rodriguez, J. Dishman, F. Dickens, and E. Whelan, "Modeling of two-dimensional spiral inductors," *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, vol. 3, pp. 535-541, 1980.
- [۱۳] F. Forest, E. Laboure ,F. Costa, and J. Y. Gaspard, "Principle of a multi-

- load/single converter system for low power induction heating," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 15, pp. 223-230, 2000.
- [14] J. Acero, J. Burdío, L. Barragán, and R. Alonso, "A model of the equivalent impedance of the coupled winding-load system for a domestic induction heating application," in *International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 491-496, 2007.
- [15] J. Acero, R. Alonso, J. Burdio, L. Barragan, and D. Puyal, "Analytical equivalent impedance for a planar circular induction heating system," *IEEE transactions on magnetics*, vol. 42, pp. 84-86, 2006.
- [16] J. Acero, J. Burdio, L. Barragan, D. Navarro, R. Alonso, J. Garcia, *et al.*, "The domestic induction heating appliance: An overview of recent research," *Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2008.
- [17] M. Thompson, "Inductance Calculation Techniques—Part II: Approximations and Handbook Methods," *Power Control intell. Motion*, vol. 25, pp. 40-45, Dec, 1999.
- [18] O. Lucia, J. Acero, C. Carretero, and J. M. Burdio, "Induction heating appliances: Toward more flexible cooking surfaces," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 7, pp. 35-47, 2013.
- [19] J. Acero, J. Burdio, L. Barragan, D. Navarro, R. Alonso, J. Ramon, *et al.*, "Domestic induction appliances," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 2, pp. 39-47, 2010.
- [20] H. Arita, T. Todaka, and M. Enokizono, "Thermal magnetic characteristic for high frequency induction heating analysis," *Journal of applied physics*, vol. 91, pp. 8317-8318, 2002.
- [21] C. Carretero, J. Acero, R. Alonso, J. Burdio, and F. Monterde, "Temperature influence on equivalent impedance and efficiency of inductor systems for domestic induction heating appliances," in *APEC 07-Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2007.
- [22] M. Ahmed, S. Panthi, N. Ramakrishnan, A. Jha, A. Yegneswaran, R. Dasgupta, *et al.*, "Alternative flat coil design for electromagnetic forming using FEM," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 21, pp. 618-625, 2011.
- [23] Z. Wang, J. Li, X. Liu, X. Yu, and J. Yuan, "Study on the coil design of the reusable linear magnetic flux compressor," *IEEE transactions on magnetics*, vol. 39, pp. 442-445, 2003.
- [24] H.-T. Bui and S.-J. Hwang, "Design of an induction heating coil coupled with magnetic flux concentrators for barrel heating of an injection molding machine," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2014.
- [25] L. Meng, K. Cheng, and S. Ho, "Multicoils design for induction cookers with applying switched exciting method," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, pp. 4503-4506, 2012.
- [26] W. Moreland, "The induction range: Its performance and its development problems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 1, pp. 81-85, 1973.
- [27] T. Tanaka, "A new induction cooking range for heating any kind of metal vessels,"

- IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 35, pp. 635-641, 1989.
- [٢٨] J. Acero, P. J. Hernandez, J. M. Burdío, R. Alonso, and L. Barragdan, "Simple resistance calculation in litz-wire planar windings for induction cooking appliances," *IEEE Transactions on magnetics*, vol. 41, pp. 1280-1288, 2005.
- [٢٩] P. Hernandez ,F. Monterde, J. Burdio, J. Garcia, and S. Llorente, "Power losses distribution in the litz-wire winding of an inductor for an induction cooking appliance," in *Industrial Electronics, 28th Annual Conference*), pp. 1134-1137, 2002.
- [٣٠] M.Lichan, PhD.thesis, "Field analysis and high frequency conversion for multi-coils induction heating appliances," Department of electrical engineering.The hong kong polytechnic university, 2012.
- [٣١] M. B. Iqbal, N. Masud, and M. Aqil, "Design of induction coil of a coreless induction furnace to melt aluminum," in *Multi-Topic Conference (INMIC), IEEE 17th International*, pp. 523-528, 2014.

Abstract

Induction heating technology is currently used in many industries, home appliances and medical applications due to advantages such as high efficiency, fast heating, safety, cleanliness and accurate control is used. These systems usually consist of inverter, inductor and a piece of metal. By passing alternating current through the coil, an alternating magnetic flux in the three parts of the workpiece, air gap and copper will flow, the alternating magnetic field induces eddy currents in the bottom of the pan, and the pan heat up, according to Jule's law. In this study at the beginning a designing algorithm has referred. In this algorithm factors such as the diameter of each strand conductors, temperature of each stranded conductor, the number of rounds, pan's material and the distance between pan and winding have been investigated. During the supervision, finite element (FEM) tool was used to simulate and a circuit for modeling of coil performance in Matlab is introduced. The impact of the switching frequency and duty cycle on heat penetration in the work piece is examined.

Keyword:

Induction heating, coil, eddy current, finite element method (FEM), skin depth.



Faculty of Electrical Engineering and Robotic

M.Sc. Thesis in Power Electronic and Machine Engineering

**The effect of duty cycle and frequency of
switching on the produced heat in a work-piece in the
induction system design, simulation and
implementation**

By: Mostafa Alizade Gorji

Supervisors:

Dr. Ali Dastfan

Advisor:

Dr. Amir Hassannia kheibari

February 2017