

طراحی، شبیه‌سازی و ساخت یک گرم‌کن الکتریکی القایی تا دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد

مصطفی گلرخ جوبنی^۱، آرش دهستانی کلاگر^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، مجتمع برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۱۳۹۸/۷/۲۱، پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۹)

چکیده

در این مقاله، طراحی، شبیه‌سازی و ساخت یک نمونه گرم‌کن القایی با توانایی گرم کردن فلزات تا دمای $300^{\circ}C$ انجام گرفته است. با استفاده از مدار مربوطه و طراحی صورت گرفته برای ظرفیت خازن و ابعاد سلف، گرم‌کن مربوطه ساخته شده و نتایج حاصل از ساخت، با نتایج شبیه‌سازی همخوانی مطلوبی داشته است. در این مقاله، به روش اجزای محدود و با کمک نرم‌افزار COMSOL Multiphysics، شبیه‌سازی گرم‌کن القایی انجام شده است. روش اجزای محدود جهت تحلیل‌های مغناطیسی و حرارتی، روش مرسوم بوده و توانمندی خود را در حوزه‌های فیزیکی مختلف به اثبات رسانیده است، از این‌رو، برای محاسبه و تحلیل میدان مغناطیسی و حرارت حاصل از گرمایش القایی از نرم‌افزار امان محدود استفاده شده است. در شبیه‌سازی فوق، مدار الکتریکی مورد استفاده و تمامی المان‌ها نیز در نظر گرفته شده‌اند؛ با توجه به مدار الکتریکی و تئوری کنترلی حاکم بر مدار ارائه شده، نمونه آزمایشگاهی متناسب با ابعاد شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار امان محدود، پیاده‌سازی شده است و شکل موج‌های قسمت‌های مختلف مدار مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند. از این گرم‌کن‌ها می‌توان در صنایع کوچک مختلف و در سطح آزمایشگاهی بهره برد. همچنین، به‌عنوان پیش‌گرم‌کن یا گرم‌کن تا دمای مذکور، برای کاربردهای مختلف در صنایع متالورژی، مواد و فرآوری فلزات، تست و آزمایش آنها در ابعاد کوچک، قابل استفاده می‌باشند. قابل ذکر است که مدار ارائه شده در این مقاله بسیار مقرون به‌صرفه بوده و اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی با نتایج نمونه حاصل از ساخت در مقیاس آزمایشگاهی، نشان‌دهنده صحت تحلیل‌ها می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: گرم‌کن القایی، جریان گردابی، تشدید، تحلیل اجزای محدود، تحلیل حرارتی

۱. مقدمه

از تحقیقات گذشته، مسائلی از قبیل اعوجاجات همساز منتجه، بسامد کاری، ایجاد نویز بر روی شبکه و کنترل کیفیت توان در این کوره‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در سال‌های اخیر با افزایش توان کامپیوترها و ارتقای نرم‌افزارهای شبیه‌سازی، توان بررسی و شبیه‌سازی به روش اجزای محدود (FEM) کوره‌های القایی مهیا شده است. با استفاده از روش اجزای محدود ویا روش حجم محدود (FVM) می‌توان تحلیل دقیقی از کوره‌های القایی حاصل نمود [۳-۶]. در [۶]، جهت رسیدن به بسامد مطلوب، از تحلیل در نرم‌افزار امان محدود انسیس- ماکسول استفاده شده است. کوره‌های القایی موجود در صنعت فولادسازی، طی ۲۵ سال گذشته توسعه فراوانی یافته‌اند. همچنین، کوره‌های القایی از منظر ایجاد صدا و نویز در [۷] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. کوره‌های القایی در انواع سفاز و تک‌فاز مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. این کوره‌ها، جهت اتصال به شبکه نیازمند فیلتر هستند تا به سامانه‌های الکتریکی اطراف آسیبی وارد نیابند. در نتیجه،

در سال‌های اخیر در صنایع مختلف از انواع کوره‌های الکتریکی استفاده می‌شود که عبارتند از: کوره‌های قوس الکتریکی، کوره‌های مقاومتی و کوره‌های القایی. در میان کوره‌های گفته شده کوره‌های القایی به دلیل نداشتن اتصال فیزیکی نسبت به کوره‌های قوس الکتریکی محصول نهایی با کیفیت‌تری تولید می‌کنند [۱-۲]. این امر موجب گسترش تحقیق و مطالعه بر روی این نوع از کوره‌ها شده است. همچنین، این کوره‌ها در شرایط خلاء و حتی در ابعاد کوچک توان ذوب معلق را دارند که ایده‌آل‌ترین حالت ذوب فلزات می‌باشد. زیرا، هیچ‌گونه آلودگی و ناخالصی‌ای در فلز ذوب شده ایجاد نمی‌کنند؛ و این مسئله در صنایع مختلف از قبیل متالورژی، قالب‌گیری، ذوب کاری و موارد مشابه، یک مزیت بسیار مهم به شمار می‌رود [۱-۲]. همچنین از کوره‌های القایی برای پیش گرم کردن و فرآوری فلزات نیز استفاده می‌شود. در بسیاری

² Finite Element Method³ Finite Volume Method

(کویل^۲) و یوغ^۳ می‌باشد. در صنعت، پاتیل کوره‌های القایی از جنس‌های مختلفی ساخته می‌شود. با توجه به این‌که بوت‌ها باید تحمل تنش حرارتی بالای ناشی از فلز مذاب را داشته باشند و در عین حال کمترین واکنش را با فلز در حال ذوب داشته باشند. معمولاً جنس بوت‌ها را از مواد با دوام، ارزان قیمت و در دسترس مانند سرامیک‌ها و آلومینا با فرمول Al_2O_3 که دمای ذوب آن بالای $2072^\circ C$ بوده است، و نیز دارای استحکام بالا در برابر اصطکاک می‌باشد، و همچنین به‌عنوان عایق الکتریکی نیز به‌کار گرفته می‌شود، انتخاب می‌کنند. همچنین کویل مربوطه معمولاً از جنس مس می‌باشد تا تلفات مقاومتی مسیر عبور جریان کمتر شود.

تلفات در یک کوره القایی به دو دسته تقسیم می‌گردد که عبارتند از:

(۱) تلفات جریان‌های گردابی

(۲) تلفات هیستریزیس^۴

۲-۱. تلفات جریان گردابی

جریان‌های گردابی حلقه‌هایی از جریان الکتریکی است که داخل هادی ایجاد می‌شود. با فرض وجود یک میدان مغناطیسی متغیر با زمان، در صورت اعمال این میدان به یک هادی، طبق قانون القای فارادی، یک جریان متغیر با زمان در داخل هادی ایجاد می‌شود. در شکل (۱) جریان عبوری از کویل و مسیر عبور میدان مغناطیسی که موجب ایجاد جریان القایی می‌گردد، نشان داده شده است. طبق قوانین الکترومغناطیس، جریان گردابی تلفات مقاومتی در فلزات ایجاد می‌کند. تلفات مقاومتی نیز سبب تولید گرما می‌گردد. این تلفات گرمایی، گرمای ژولی^۵ نام داشته و بازده دستگاه‌هایی را که دارای میدان مغناطیسی متغیر با زمان هستند (مانند سیم‌پیچ آهنی ترانسفورماتور و موتورهای الکتریکی) را کاهش می‌دهد. در شکل (۱) میدان‌های مغناطیسی نیز نشان داده شده است. این میدان‌ها با توجه به عمق نفوذ که وابسته به جنس ماده می‌باشد، می‌توانند در مواد نفوذ کرده و موجب ایجاد جریان‌های گردابی شوند [۲].

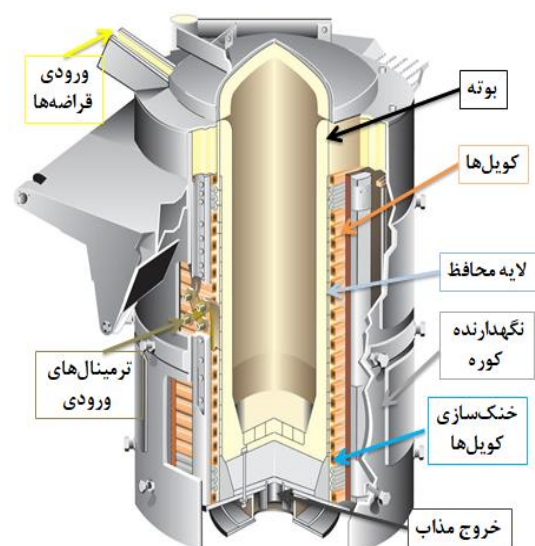
رابطه تلفات حاصل از جریان‌های گردابی به‌صورت زیر می‌باشد:

شاخص‌های کیفیت برق در سطح مطلوبی حفظ می‌گردد [۸]. کوره‌های القایی کانالی یکی از روش‌های مرسوم در صنعت برای نگهداری فلزات در دمای مطلوب می‌باشد که در آن‌ها بسامد کاری، اهمیت بسیار بالایی دارد [۸]. در [۹] مدل‌سازی فرآیند القاء و روش‌های شبیه‌سازی کوره‌های القایی، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در [۱۰] به تاثیر گام سیم‌پیچ بر روی گرمایش القایی و اثر آن بر روی تلفات پرداخته شده است. در مقالات ارائه شده در حوزه کوره‌های القایی، معمولاً از یک بوت‌ها استفاده شده است. اما در مقاله حاضر، به دلیل کم حجم بودن سامانه تحت مطالعه، از آن صرفه نظر شده است.

در این مقاله، در بخش (۲)، به‌طور مختصر به بررسی عملکرد کوره القایی پرداخته می‌شود. سپس، در بخش (۳)، روش محاسبه پارامترهای گرم‌کن القایی و همچنین، نحوه کنترل مدار تغذیه آن مورد بحث قرار گرفته و در بخش (۴) نیز نتایج شبیه‌سازی به روش المان محدود ارائه می‌گردد. در ادامه، در بخش (۵)، نتایج ساخت گرمکن القایی مورد نظر، آورده شده و مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت، بخش (۶) مقاله نیز به نتیجه‌گیری اختصاص داده شده است.

۲. بررسی عملکرد کوره القایی

کوره القایی در واقع یک ترانسفورماتور با ثانویه اتصال کوتاه می‌باشد. در شکل (۱) نمای برش خورده از یک کوره القایی از روبه‌رو مشاهده می‌شود.



شکل (۱): شمای کلی یک کوره القایی.

اجزای کوره القایی شامل: بدنه کوره (پاتیل)، سیم‌پیچ کوره

² Coil

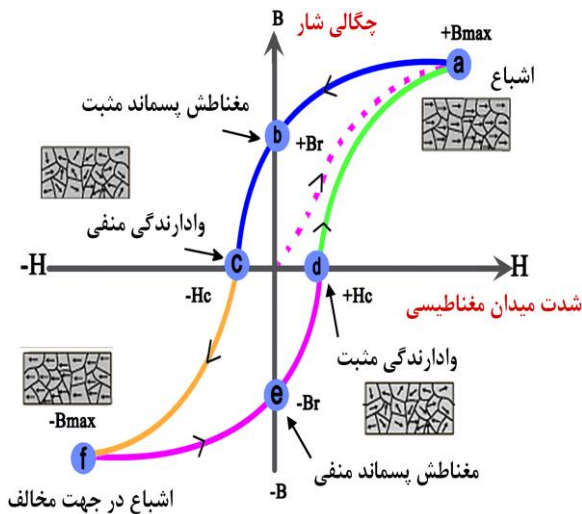
³ Yoke

⁴ Hysteresis

⁵ Joule Heating

¹ Furnace

در شکل (۳) منحنی هیستریزیس ماده نشان داده شده است. این منحنی برای مواد مختلف متفاوت می‌باشد. منحنی هیستریزیس جزء خواص ذاتی هر ماده‌ای می‌باشد، همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است برای اولین بار که یک ماده تحت میدان قرار می‌گیرد، مشخصه مغناطیسی بر روی مسیر خط چین در منحنی حرکت می‌کند. با افزایش شدت میدان مغناطیسی، حوزه‌های مغناطیسی ماده شروع به جابجایی می‌کنند تا این‌که حوزه‌های مغناطیسی یکسو شوند.



شکل (۳): منحنی هیستریزیس.

در نقطه a چگالی شار به حالت اشباع می‌رسد، سپس با کاهش میدان مسیر برگشت متفاوت بوده و به صورت (f,c,b,a) می‌باشد. با کاهش شدت میدان مغناطیسی و نهایتاً منفی شدن آن، مجدداً چگالی شار در جهت منفی، تا نقطه f، به اشباع می‌رود. از طرفی، با افزایش شدت میدان مغناطیسی، مسیر عبوری از (a,d,e,f) می‌گذرد. در حین این فرآیند، با جابجایی حوزه‌های مغناطیسی تلفات رخ می‌دهد. رابطه تلفات هیستریزیس به صورت زیر است:

$$P_h = K_h \times B_{max}^n \times f \quad (3)$$

در این رابطه، مقدار n بستگی به ماده دارد و از ۱/۵ تا ۲/۵ تغییر می‌کند [۲].

از روابط (۲) و (۳) درمی‌یابیم که تلفات فوکو با افزایش بسامد نقش پر رنگ‌تری را ایفا می‌کند و موجب افزایش حرارت بالاتری می‌گردد. در میدان‌هایی که تغییرات سریعی دارند، میدان مغناطیسی به طور کامل به داخل ماده وارد نمی‌شود. این پدیده اثر سطحی^۱ یا اثر پوستی نام داشته و عمق نفوذ ماده نیز با استفاده از رابطه (۴) حاصل می‌گردد.

$$P_e = \frac{\pi^2 B_p^2 d^2 f^2}{6K\rho D} \quad (1)$$

که در این رابطه، پارامتر P نمایش‌دهنده توان تلف شده نسبت به واحد جرم (W/Kg)، B_p حداکثر میدان مغناطیسی بر حسب (T)، d ضخامت صفحه فلزی (m)، f بسامد بر حسب (Hz)، K عدد ثابت می‌باشد که وابسته به ضخامت است، ρ مقاومت الکتریکی هادی (Ωm) و D چگالی ماده بر حسب (Kg/m^3) است.

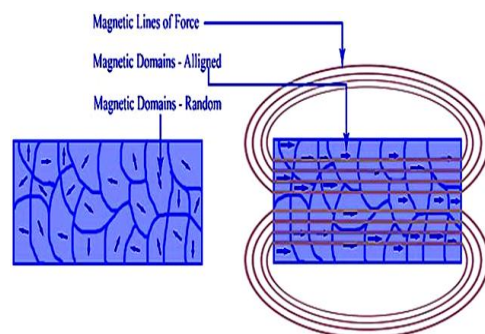
البته رابطه (۱) را به صورت ساده‌تر، به صورت رابطه (۲) می‌توان نمایش داد:

$$P_e = K_e \times B_{max}^2 \times f^2 \quad (2)$$

که در این رابطه، B_{max} حداکثر چگالی شار می‌باشد [۲].

۲-۲. تلفات هیستریزیس

تلفات هیستریزیس تلفاتی است که در اثر جابجایی حوزه‌های مغناطیسی در ماده به وجود می‌آید. به این ترتیب که جریان در لحظه‌ای که مثبت است، حوزه مغناطیسی در یک جهت معین در ماده به وجود می‌آید و با تعویض جهت جریان، جهت حوزه مغناطیسی نیز عوض می‌شود. در نتیجه‌ی عوض شدن جهت حوزه، مقداری از حوزه‌ها در همان جهت قبلی باقی می‌مانند. این مقدار باقی مانده را پسماند مغناطیسی می‌گویند. حذف پسماند مغناطیسی و عوض شدن جهت آن و ادامه این عمل باعث تلفات هیستریزیس می‌شود. به زبان ساده، وقتی جریان تغییر جهت می‌دهد دوقطبی‌های هسته نیز تغییر جهت می‌دهند، در این تغییر جهت دوقطبی‌ها، بین آنها اصطکاک به وجود آمده و باعث گرم شدن ماده می‌شود. این عمل موجب تلفات هیستریزیس می‌گردد. در شکل (۲) حوزه‌های مغناطیسی اشاره شده، دیده می‌شوند که در ابتدا به صورت نامنظم بوده و در حضور یک میدان خارجی، در جهت آن میدان هم‌راستا می‌گردند و با تغییر میدان نیز مجدداً جابجا می‌شوند.



شکل (۲): حوزه‌های مغناطیسی در حضور میدان.

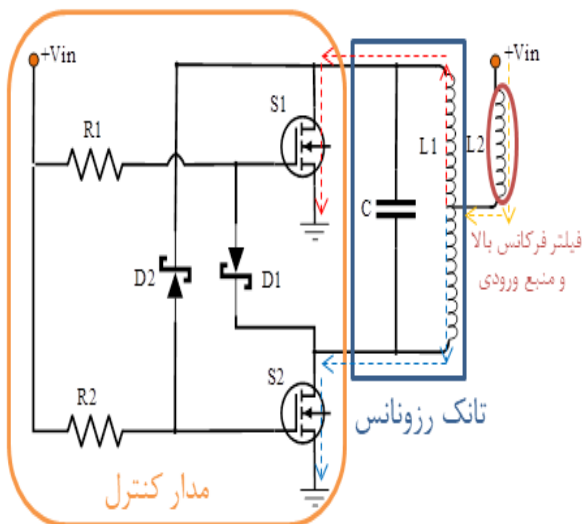
^۱ Skin Effect

سپس، خازن با پلاریته معکوس شارژ می‌شود. فرآیند شارژ خازن در شکل (۴) از شماره ۵ تا ۷ نشان داده شده است؛ در ادامه خازن انرژی خود را در جهت جریان مخالف به سلف می‌فرستد تا در شکل (۴) شماره ۱۰ خازن خالی شده و انتقال انرژی مجدداً از سلف به خازن ادامه یابد. در شکل (۴) شماره ۱۲، یک دوره کاری کامل انجام می‌گیرد. به این صورت چرخه فوق موجب القاء به درون قراضه‌ها می‌گردد و باعث افزایش دما و ذوب آنها می‌گردد.

۳. محاسبه پارامترهای گرم‌کن القایی

۳-۱. بررسی مدار گرم‌کن القایی

مدار کلی مورد استفاده در یک گرم‌کن القایی، به صورت خلاصه در شکل (۵) نشان داده شده است. این ساختار، از دو کلید، دو دیود، دو مقاومت، دو سلف و یک خازن تشکیل شده است. مطابق شکل (۵) مدار از ۳ بخش تشکیل شده است.



شکل (۵): مدار گرم‌کن القایی.

بخش اول قسمت کنترل می‌باشد و عمکرد به این صورت است: با توجه به شکل (۲۶) شکل موج ولتاژ درین^۱ روی کلید S_۱ (ولتاژ سر بالایی خازن C) نشان داده شده است. در هنگام تشدید و با فرض حضور در نیم سیکل مثبت ولتاژ شکل (۲۶)، دیود شاتکی^۲ D_۲ به دلیل بالاتر بودن ولتاژ کاتد نسبت به آند خاموش می‌گردد و ولتاژ ورودی از طریق مقاومت R_۲ متصل به گیت^۳ کلید S_۲ موجب روشن شدن این سوئیچ می‌شود. سپس، دیود شاتکی D_۱ نیز به دلیل روشن شدن سوئیچ S_۲ از سر کاتد به زمین مدار

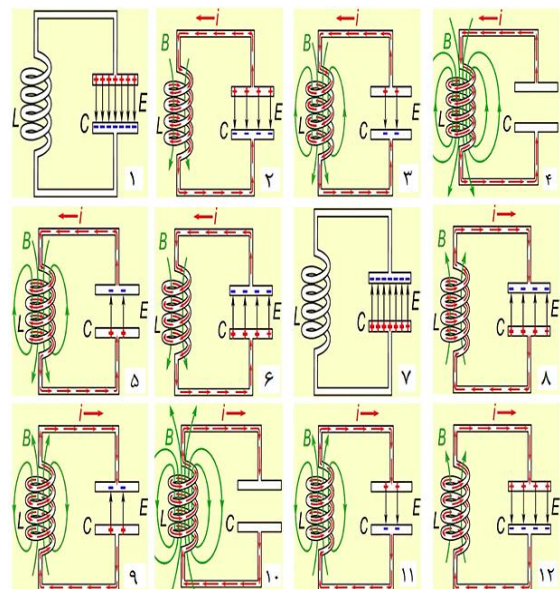
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (4)$$

در این رابطه، پارامتر δ نمایش‌دهنده عمق نفوذ ماده برحسب f (m)، بسامد برحسب (Hz)، μ ضریب نفوذپذیری مغناطیسی یا تراوایی ماده برحسب (H/m) و σ هدایت الکتریکی ماده برحسب (Ωm) می‌باشد. عمق نفوذ ماده باید در نظر گرفته شود تا اطمینان حاصل گردد که میدان وارد ماده شده و موجب گرمایش آن می‌گردد [۱ و ۱۰].

در کوره‌های القایی تلفات مقاومتی (اهمی) نیز وجود دارد که ناشی از عبور جریان القایی از درون ماده فلزی است. اما به دلیل ناچیز بودن، از آن صرف‌نظر می‌شود [۱].

۳-۲. بررسی پدیده تشدید و القاء

پدیده تشدید در شکل (۴) نشان داده شده است. در ابتدا فرض می‌شود که خازن به صورت کامل شارژ می‌باشد، در شکل (۴) از شماره ۱ تا ۴ جریان الکتریکی از خازن به سمت سلف می‌رود و طی این فرآیند انرژی ذخیره شده در خازن به سلف انتقال پیدا کرده، سلف نیز با ایجاد یک میدان مغناطیسی در اطراف خود مانند شکل (۲)، موجب عبور میدان مغناطیسی از درون قراضه‌های فلزی قرار گرفته در داخل کویل و در نتیجه باعث القاء جریان‌های گردابی در قراضه‌ها می‌گردد؛ و فلز درون کویل به واسطه تلفات هیستریزیس و فوکو شروع به گرم شدن می‌کند، سپس این سیکل ادامه یافته و انرژی انتقال یافته از کویل به خازن باز می‌گردد.

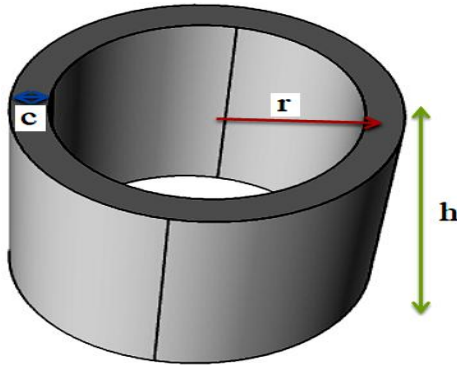


شکل (۴): پدیده تشدید بین سلف و خازن.

¹ Drain
² Shottky Diod
³ Gate

$$L = \frac{\mu_0 \times r^2 \times N^2 \times \pi}{h} \times \frac{1}{1 + \frac{0.9 \times r}{h} + \frac{0.32 \times c}{r} \times \frac{0.84 \times c}{h}} \quad (9)$$

مقادیر r ، h و c در رابطه (۹) به ترتیب شعاع متوسط هندسی، ارتفاع کویل و طول سیم‌پیچ می‌باشند. در شکل (۶) نمایی از یک سلف با فرض استوانه در نظر گرفتن آن آمده است و پارامترهای r ، h و c نشان داده شده‌اند [۱۱].



شکل (۶): نمایی از سلف با فرض استوانه‌ای بودن.

مقادیر ابعاد کویل مورد استفاده در جدول (۱) آورده شده‌اند که همگی به میلی‌متر هستند.

جدول (۱): مقادیر ابعاد کویل.

مقدار به (mm)	نام پارامتر
۱/۴۵	r
۲	c
۳۰	h

۴. نتایج شبیه‌سازی

۴-۱. معادلات به کار رفته در شبیه‌سازی

برای بررسی میدان و دمای مدار گرم‌کن القایی از نرم‌افزار اجزای محدود COMSOL_Multiphysics، نسخه ۵،۴ استفاده شده است. ماژول‌های مورد استفاده در این شبیه‌سازی Magnetic Fields و Heat Transfer می‌باشند. همچنین، شرایط بسامدی وابسته به زمان نیز برای حل معادلات در نظر گرفته شده است [۱۲]. همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده، مش‌بندی بسیار ریزی برای دست‌یابی به نتایج دقیق و قابل اطمینان مورد استفاده قرار گرفته است.

متصل می‌گردد. این امر موجب روشن شدن دیود D_1 شده و گیت سوئیچ S_1 به واسطه دیود D_1 که به زمین متصل شده، دارای ولتاژ صفر می‌شود و سوئیچ S_1 خاموش می‌شود. این فرآیند برای نیم سیکل منفی به صورت معکوس اتفاق می‌افتد. قسمت دوم شامل تانک تشدید می‌باشد و عمل تشدید و القاء به درون قراضه را انجام می‌دهد. بخش سوم شامل سلف ورودی L_2 بوده که نقش فیلتر در برابر انتقال نویزها به طرف منبع ورودی و هم‌چنین پیوسته نگاه داشتن جریان را دارد.

۳-۲. محاسبات خازن

رابطه امپدانس خازن برابر است با:

$$X_C = 1/j\omega C = 1/j2\pi fC \quad (5)$$

مقدار خازن مورد استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C = I/2\pi fV \quad (6)$$

مقدار خازن از رابطه (۶) محاسبه می‌شود که پس از محاسبه مقدار آن $1,98 \mu F$ می‌باشد [۱۱، ۱۱].

۳-۳. محاسبات سلف

رابطه امپدانس سلف برابر است با:

$$X_L = j\omega L = j2\pi fL \quad (7)$$

مقدار سلف و خازن در حالت تشدید یکدیگر را جبران نموده که موجب عبور حداکثر جریان می‌شود. در این حالت تشدید، بسامد برابر است با:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (8)$$

بسامد مورد نظر ۱۴۰ kHz می‌باشد، از این رو مقدار سلف برابر با $0,6527 \mu H$ می‌شود [۱، ۲].

۴-۳. طراحی ابعاد سلف

برای طراحی ابعاد سلف، روابط متعددی موجود است که عبارتند از:

$$1 - \text{ولس بی}^1, 2 - \text{توربورگ}^2 \text{ و } 3 - \text{ویلر}^3.$$

رابطه ولس بی به صورت زیر می‌باشد:

¹ Vels bey

² Thorborg

³ Wheeler

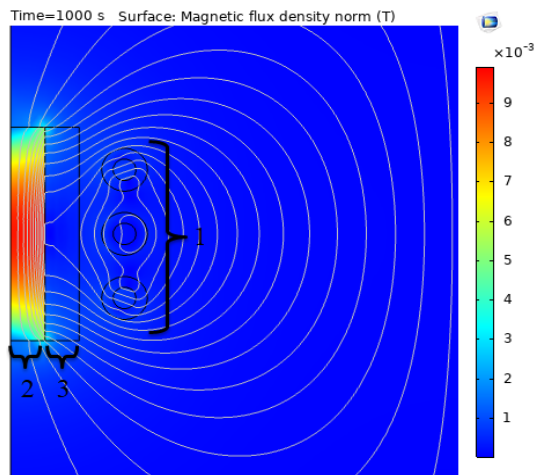
۱۲، ۶]. جهت مدل‌سازی سامانه خنک کننده، نیز از رابطه (۱۶) برای حرارت جریان آب ورودی کویل‌ها استفاده شده است.

$$Q = M_t * h_t * C_p * \left(\frac{T_{in} - T}{2 * \pi * r * AC} \right) \quad (16)$$

در رابطه (۱۶) میزان دبی ورودی (M_t)، دمای محاسبه شده از مائول حرارتی (h_t)، ظرفیت گرمایی ویژه (C_p) و تغییرات دما (T) می‌باشد. دمای اولیه محیط با مقدار $25^\circ C$ است، (r) مقدار شعاع کویل و (AC) سطح مقطع درونی می‌باشد. با توجه به رابطه (۱۶) مقدار انتقال حرارت محاسبه می‌شود [۱، ۶، ۱۲]. هم‌چنین دبی مورد استفاده برای کویل‌ها 0.3 (m/s) می‌باشد و جریان ورودی 25 A با بسامد 140 kHz می‌باشد.

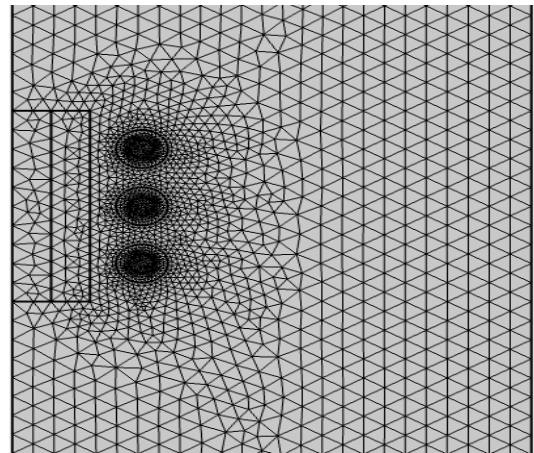
۲-۴. تحلیل نتایج شبیه‌سازی

در شکل (۸) توزیع میدان مغناطیسی مشاهده می‌شود. قسمت ۱ کویل‌های گرم‌کن بوده و از جنس مس می‌باشند.



شکل (۸): توزیع میدان مغناطیسی (حالت ۱).

مطابق شکل (۸)، سه حالت برای فلز مورد استفاده در نظر گرفته شده است که عبارتند از: حالت (۱) - قسمت ۲ و ۳ ماده ذوب شونده می‌باشند که به ترتیب از جنس آهن و مس هستند. حالت (۲) - جنس مواد قسمت‌های ۲ و ۳ عوض شده و به ترتیب مس و آهن می‌باشند؛ و حالت (۳) - کل قسمت ۲ و ۳ از جنس آهن هستند. در حالت (۱) به دلیل عمق نفوذ ذکر شده در رابطه (۴)، خطوط میدان مسیر خود را از آهن می‌بندند زیرا مقاومت مغناطیسی این مسیر کمتر است. در شکل (۹) بردارهای چگالی میدان مغناطیسی نشان داده شده است که تجمع آنها در ناحیه آهنی بسیار بیشتر می‌باشد.



شکل (۷): نحو مش‌بندی گرم‌کن القایی.

از طرفی جهت کاستن از زمان شبیه‌سازی، از ساختار دو بعدی متقارن استفاده شده است. معادلات استفاده شده در نرم‌افزار عبارتند از:

$$\nabla \times H = j \quad (10)$$

$$B = \nabla \times A \quad (11)$$

$$J = \sigma E + j\omega D + \sigma V \times B + j_e \quad (12)$$

$$E = -j\omega A \quad (13)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-K \nabla T) = Q + Q_{ted} \quad (14)$$

معادلات (۱۰-۱۳) مجموعه معادلات ماکسول بوده و رابطه (۱۴) نیز معادله انتقال حرارت می‌باشد [۱، ۶، ۱۲].

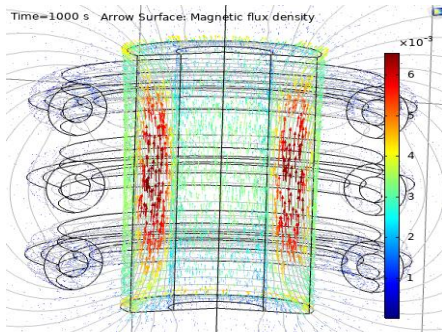
جهت برقراری ارتباط بین دو مائول به کار رفته از کویلاژهای قسمت چند فیزیکی^۱ درون نرم‌افزار COMSOL_Multiphysics نام‌های Heating Electromagnetic و Temperature Coupling استفاده شده است. رابطه حاکم بر Electromagnetic Heating به صورت زیر می‌باشد:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (-K \nabla T) + Q_e \quad (15)$$

$$Q_e = \frac{1}{2} \text{Re}(J \cdot E^*) + \frac{1}{2} \text{Re}(i\omega B \cdot H^*)$$

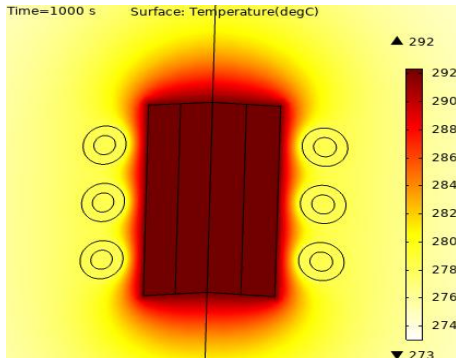
بین دو مائول اصلی نرم‌افزار با رابطه (۱۵) ارتباط برقرار شده و مقدار حرارت القایی محاسبه می‌گردد. بخش Temperature Coupling رابطه (۱۴) را برقرار می‌سازد. به این صورت معادلات حرارتی و مغناطیسی درون نرم‌افزار با یکدیگر ادغام می‌شوند [۱،

¹ Multiphysics



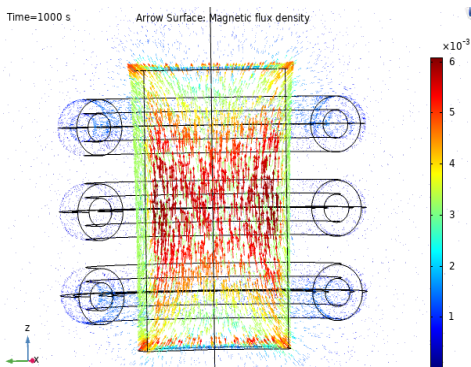
شکل (۱۲): بردارهای میدان مغناطیسی در حالت (۲).

در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود دما نسبت به حالت (۱) نشان داده شده در شکل (۱۰) بالاتر رفته است، زیرا میزان چگالی جریان در نزدیک کویل‌ها بیشتر می‌باشد، در نتیجه چگالی میدان در فلز افزایش یافته و موجب افزایش دما می‌گردد.

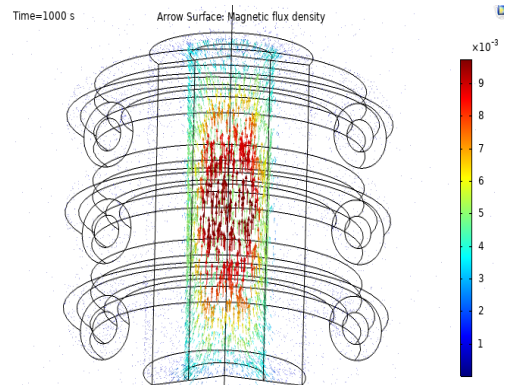


شکل (۱۳): توزیع دما در حالت (۲).

در واقع خطوط میدان مغناطیسی بیشتری وارد آهن که هدایت مغناطیسی بالاتری دارد شده و این امر موجب افزایش تلفات هیستریزیس و فوکوی می‌شود؛ هم‌چنین منحنی هیستریزیس آهن پهن‌تر از مس می‌باشد و دما بالاتر می‌رود. در شکل (۱۴) بردارهای میدان‌های مغناطیسی برای حالت (۳) در درون کل آهن نفوذ کرده است و حداکثر تلفات برای این حالت رخ می‌دهد.

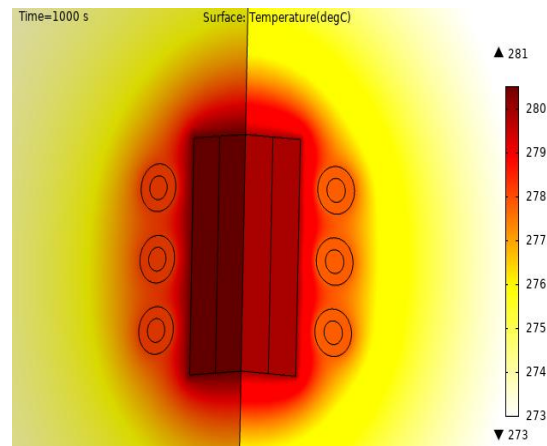


شکل (۱۴): بردارهای میدان مغناطیسی در حالت (۳).

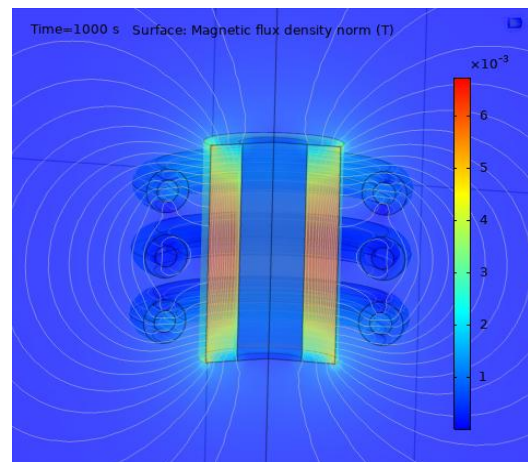


شکل (۹): بردارهای میدان مغناطیسی در حالت (۱).

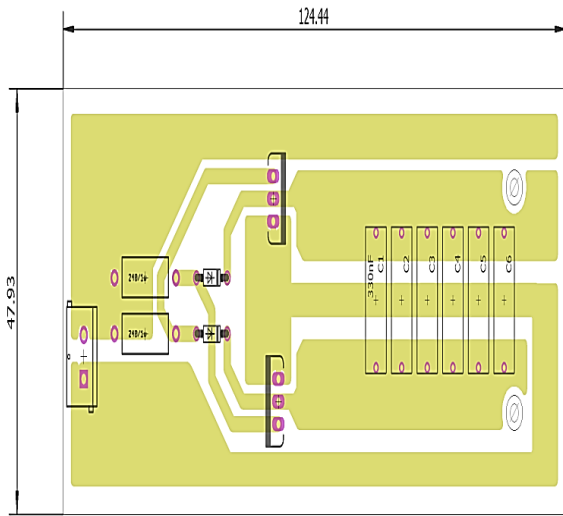
در شکل (۱۰) توزیع دمای اطراف گرم‌کن نشان داده شده که تا دمای ۲۸۱ C° رسیده است. برای حالت (۲) توزیع میدان مغناطیسی در شکل (۱۱) و شکل (۱۲) نشان داده شده است، همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، عبور خطوط میدان از ناحیه آهنی بیشتر می‌باشد.



شکل (۱۰): توزیع دما در حالت (۱).

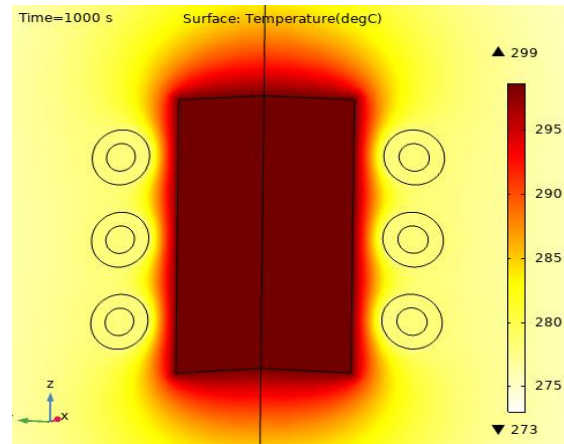


شکل (۱۱): توزیع میدان مغناطیسی (حالت ۲).



شکل (۱۷): مدار برد در نرم افزار EAGLE.

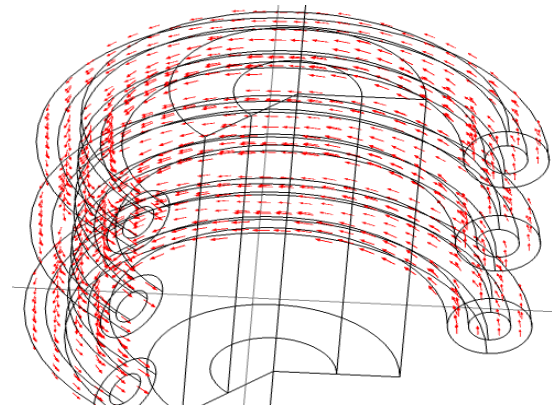
در شکل (۱۵) دمای فلز تا $299^{\circ}C$ بالا رفته است؛ که با توجه به بیشتر شدن حجم آهن، نتیجه کاملاً منطقی است. همچنین مسیر حرکت جریان عبوری از کویل‌ها در شکل (۱۶) نمایش داده شده است؛ طبق قانون دست راست خطوط میدان باید از پایین به بالا باشند که در شکل (۹)، شکل (۱۲) و شکل (۱۴) درستی این قانون نیز استنباط می‌شود. در شبیه‌سازی از جریان ۲۵ A با ولتاژ ۲۰ V به عنوان ورودی استفاده شده است.



شکل (۱۵): توزیع دما در حالت (۳).



شکل (۱۸): سمت راست خازن‌های تشدید و سمت چپ کویل و فریت.



شکل (۱۶): مسیر حرکت جریان الکتریکی درون کویل‌ها.

جدول (۲): المان‌های مورد استفاده در مدار.

نام المان	تعداد	واحد
خازن (MKT)	۶	۳۳۰ nF
فریت	۱	زرد-سفید به شماره (T95-26B)
کلید	۲	IRF3205
دیود شاتکی	۲	1N5819
پمپ آب	۱	۲۰۰ لیتر در ساعت

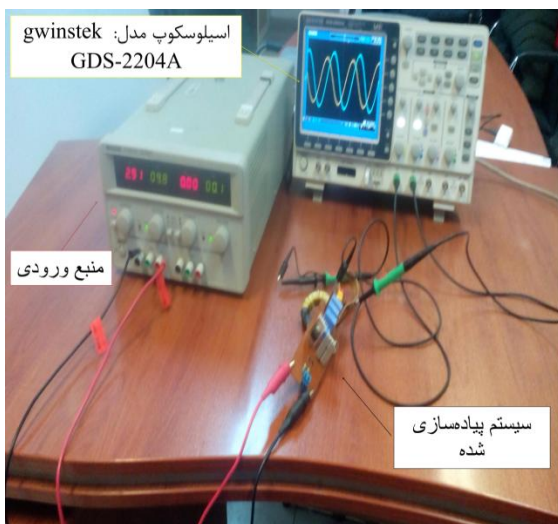
۵. نتایج ساخت

مدل پیاده‌سازی شده مشابه ابعاد شبیه‌سازی می‌باشد. در شکل (۱۷) نمایی از مدار برد چاپی در نرم‌افزار EAGLE نشان داده شده است.

مقدار تمامی المان‌های مورد استفاده در مدار پیاده‌سازی شده، در جدول (۲) آورده شده‌اند. همچنین، در شکل (۱۸)، کویل، خازن و سلف پیچیده شده به دور هسته‌ی فریت برای کاهش ضربات جریان بسامد بالا به منبع DC ورودی، نشان داده شده است.

حصول می‌باشند. درحالی‌که، مدل مداری سامانه صرفاً جهت حصول پارامترهای الکتریکی اعم از ولتاژ، جریان، بسامد و نحوه کنترل و کلیدزنی مدار تغذیه، مناسب می‌باشد. همچنین، به‌جای دماسنج‌های الکتریکی از یک دماسنج لیزری برای محاسبه دما استفاده شده است؛ تا میدان ناشی از کویل بر دماسنج اثری نداشته باشد و دمای محاسبه شده دقیق باشد.

سامانه پیاده‌سازی شده در محیط آزمایشگاهی در شکل (۲۱) نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری جریان کویل از آمپر متر نمی‌توان استفاده کرد. زیرا، در صورت استفاده از آمپر متر به صورت سری در مسیر بین سلف و خازن، به دلیل ناپایده‌آلی در پروب‌های آمپر متر، هنگام تشدید مقداری امپدانس پارازیتی شامل (سلف، مقاومت و خازن) وارد مدار می‌گردد. لذا برای اجتناب از این امپدانس پارازیتی یک حسگر جریان طراحی گردیده است که در شکل (۲۲) نشان داده شده است.

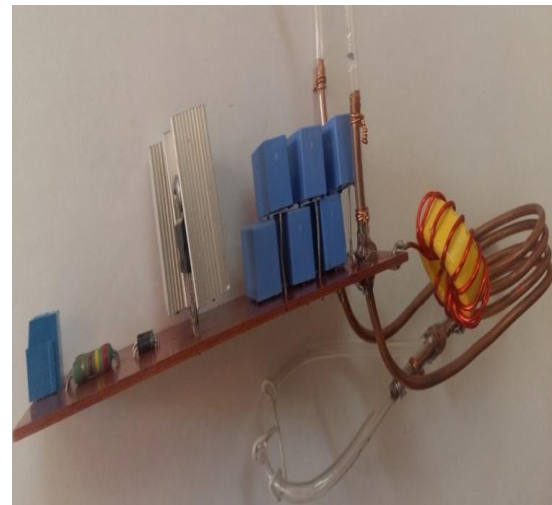


شکل (۲۱): سامانه پیاده‌سازی شده.



شکل (۲۲): گرم‌کن القایی به همراه حسگر جریان.

برای این حسگر، از هسته فریت با قطر ۴ cm استفاده شده



شکل (۱۹): گرم‌کن ساخته شده.

شکل (۱۹) نمایی دیگر از سامانه پیاده شده است که در آن از دو گرماگیر^۱ و پمپ آب با توان انتقال ۲۰۰ لیتر آب در ساعت جهت خنک‌سازی و فن برای کاهش تنش دمایی کلیدها استفاده شده است. در شکل (۲۰) دمای فلز درون کویل به ۲۹۷ °C رسیده است که به نتایج شبیه‌سازی آورده شده در شکل (۱۵) بسیار نزدیک می‌باشد و تنها ۲ °C یا به عبارتی ۰/۰۰۶۶ درصد خطا دارد، که بسیار ناچیز است.

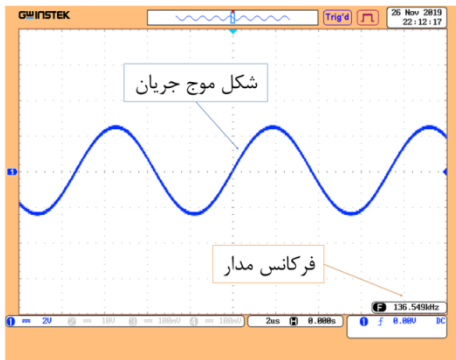


شکل (۲۰): دمای فلز درون گرم‌کن.

علت این اختلاف چند درجه‌ای، بین نتایج شبیه‌سازی و ساخت، ناشی از ناپایده‌آلی قطعات می‌باشد. شبیه‌سازی المان محدود به دلیل محاسبات دقیق قبل از ساخت نمونه و اطمینان از نتایج ساخت مورد نیاز می‌باشد. به علاوه نحوه توزیع میدان مغناطیسی و چگالی شار و همچنین چگونگی توزیع حرارت در قراضه‌های درون کویل، صرفاً از طریق تحلیل اجزای محدود قابل

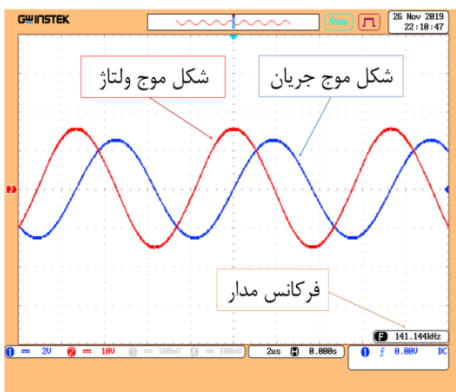
^۱ Heat Sink

تشدید به واسطه ورود بار به درون کوپل می‌باشد.



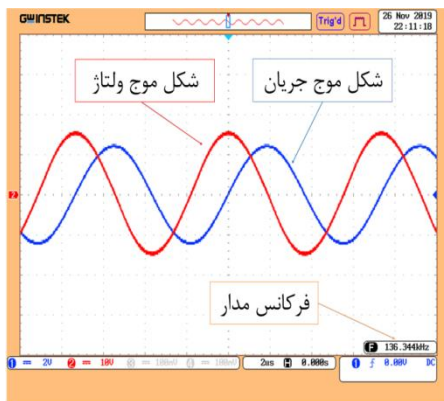
شکل (۲۴): جریان کوپل در شرایط بار.

میزان این تغییر بسامد تنها ۰/۰۲۸ درصد نسبت به حالت بدون بار می‌باشد. در شکل (۲۵) ولتاژ و جریان دو سر کوپل آورده شده است، با توجه به بار سلفی پس فاز بودن ولتاژ از جریان در شکل (۲۵) قابل مشاهده می‌باشد.



شکل (۲۵): جریان ولتاژ دو سر کوپل در شرایط بدون بار.

هم‌چنین میزان ولتاژ ۱۵ V می‌باشد و بسامد کاری در حالت بدون بار ۱۴۱ kHz می‌باشد. در شکل (۲۶) ولتاژ و جریان کوپل نشان داده شده است. همانند نتایج شکل (۲۴)، در شکل (۲۶) تنها بسامد کاهش یافته است.



شکل (۲۶): جریان ولتاژ دو سر کوپل در شرایط بار.

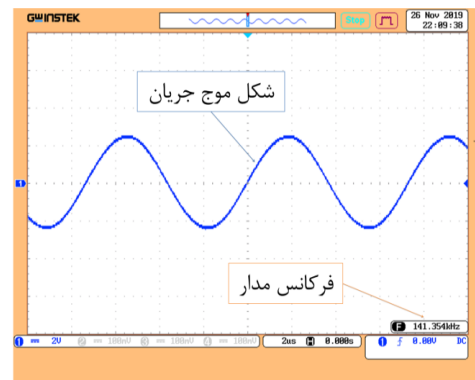
است که با توجه به جنس هسته، توان اندازه‌گیری مولفه‌ها با بسامدهای بالا را دارد. همچنین، هسته به اندازه کافی بزرگ انتخاب شده است، که وارد ناحیه اشباع نشود و دقت حسگر نیز در حد قابل قبولی می‌باشد. در شکل (۲۲) مقاومت و المان‌های دیگر مداری قابل مشاهده می‌باشند.

هم‌چنین در جدول (۳) مقدار المان‌های مورد استفاده برای حسگر جریان آورده شده است.

جدول (۳): مقدار المان‌های حسگر جریان

نام المان	مقادیر مورد استفاده
هسته فریت	قطر ۴ سانتی‌متر
سیم	۱۰۰ دور ۱ میلی‌متر
مقاومت	۱۰ اهمی

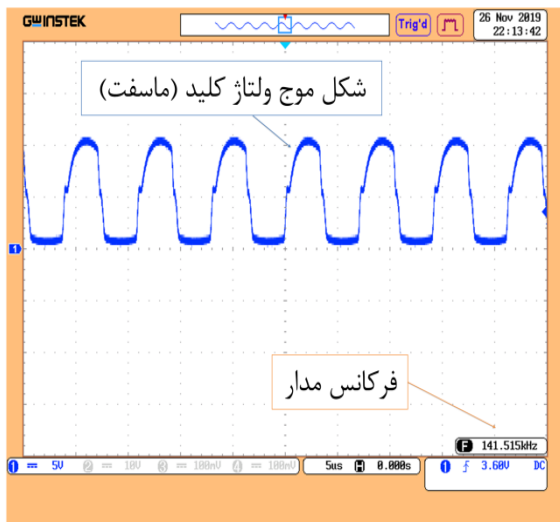
حسگر جریان مانند یک ترانسفورماتور می‌باشد. با توجه تعداد دور، با عبور جریان از داخل حسگر جریان به دلیل این که سیم اولیه (کوپل) عبوری یک دور می‌باشد و میزان سیم‌پیچی دور هسته فریت ۱۰۰ دور می‌باشد، میزان جریان با نسبت ۱ به ۱۰۰ انتقال می‌یابد. سپس، در صورت عبور جریان از مقاومت ۱۰ اهمی هر ۱ ولت نشان‌دهنده ۱۰ آمپر می‌باشد. در شکل (۲۳) جریان کوپل‌ها بدون قرارگیری بار در میان کوپل مانند شکل (۲۱) نشان داده شده است.



شکل (۲۳): جریان کوپل در شرایط بدون بار.

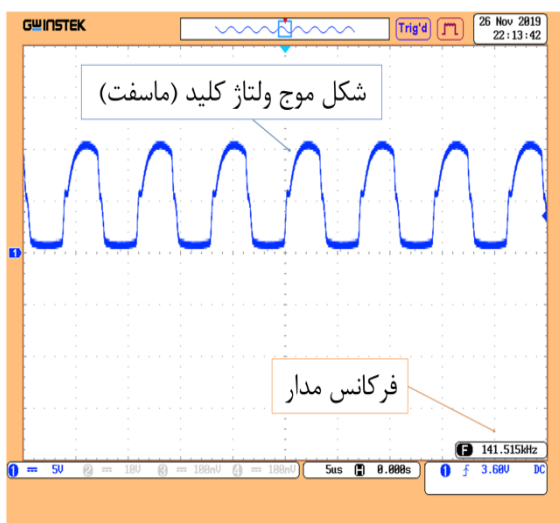
در این حالت جریان ۲۵ A با بسامد ۱۴۱ kHz از کوپل عبور می‌کند، اختلاف بسامد بدست آمده با بسامد تشدید تنها ۰/۰۰۹۶ درصد می‌باشد. از طرفی، این مقدار اختلاف قابل صرفه‌نظر کردن می‌باشد. مانند شکل (۲۰) از یک تیغه به عنوان بار استفاده شده است. ماهیت این نوع بار سلفی می‌باشد. در نتیجه، جریان خروجی هنگام ورود بار به درون کوپل به صورت پس‌فاز می‌باشد. در شکل (۲۴) جریان در حالت وجود بار مشاهده می‌شود. میزان بسامد جریان به ۱۳۶ kHz کاهش می‌یابد، و علت آن ناشی از تغییر اندوکتانس معادل و در نتیجه تغییر بسامد

جریان به‌صورتی که موجب ضربه در مدار شود می‌گردد. ولتاژ ماسفت S_1 در شکل (۲۹) و شکل (۳۰) به‌ترتیب برای حالت بدون بار و با بار آورده شده است. در شکل (۲۹) هنگام وصل شدن کلید ولتاژ دو سر آن صفر شده؛ و در زمان خاموشی کلید ولتاژ حدود ۱۰ V بر روی کلید قرار می‌گیرد. کلیدها با بسامد ۱۴۰ kHz کلیدزنی می‌کنند.



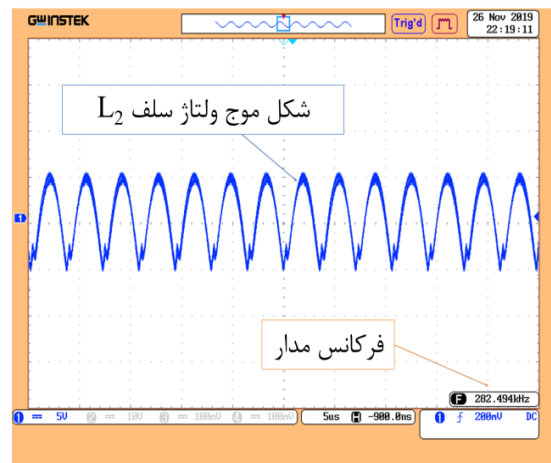
شکل (۲۹): ولتاژ دوسر ماسفت (S_1) در شرایط بدون بار.

کلید ماسفت دوم با همان بسامد و ولتاژ، منتها برعکس کلید اول عمل می‌کند (زمان خاموش و روشن شدن دو کلید عکس یکدیگر می‌باشد). همچنین، در زمان وارد شدن بار به داخل کوئل، مقدار ولتاژ دو سر کلیدها به دلیل اضافه شدن مقدار کمی امپدانس و افت ولتاژ روی آن، کاهش یافته و از استرس ولتاژی کلیدها نیز به مقدار تقریباً ۴ V کاسته می‌شود.

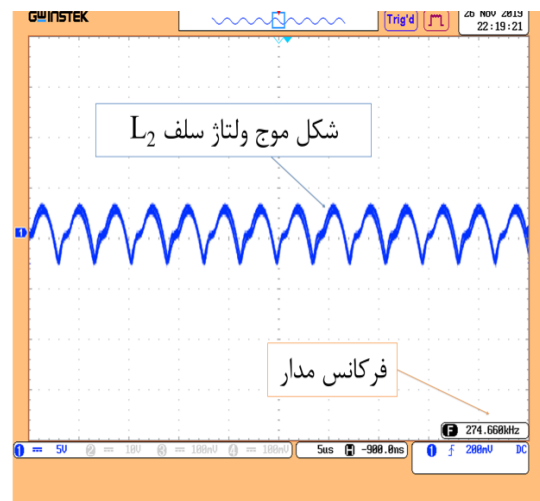


شکل (۳۰): ولتاژ دوسر ماسفت (S_1) در شرایط بدون بار.

ولتاژ دو سر سلف L_2 در حالت بدون بار و با بار به‌ترتیب در شکل (۲۷) و شکل (۲۸) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بسامد کاری سلف L_2 دو برابر بسامد تشدید می‌باشد، زیرا جریان با توجه به مدار شکل (۵) پس از عبور از سلف L_2 وارد دو مسیر می‌شود و در هر مسیر دارای بسامد ۱۴۱ kHz می‌باشد. این دو جریان نسبت به هم دارای شیف فاز می‌باشند. در نتیجه طبق قانون KCL^۱ مجموع دو جریان از سلف L_2 می‌گذرد، از این‌رو، بسامد کاری برای سلف L_2 دو برابر خواهد شد.



شکل (۲۷): ولتاژ دو سر سلف ورودی (L_2) در شرایط بدون بار.



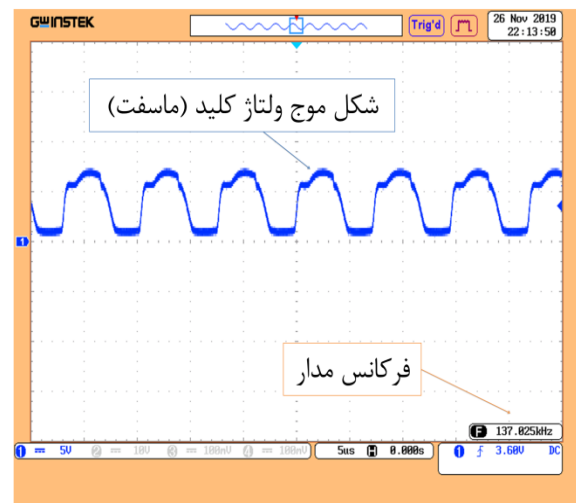
شکل (۲۸): ولتاژ دو سر سلف ورودی (L_2) در شرایط با بار.

با توجه به رابطه (۷) برای سلف L_2 برای بسامدهای بالا به منزله یک امپدانس بالا عمل می‌کند و مانع از ورود نویزها به منبع ورودی می‌گردد. همچنین با توجه به کلیدزنی بسامد بالا نیاز به یک اسنابر^۲ برای کلیدها می‌باشد، تا از ضربات ناگهانی به مدار جلوگیری به عمل آید. وجود این سلف مانع از قطع و وصل

^۱ Kirchhoff's Circuit Laws

^۲ Snaber

- [3] J. Choi, S. Kim, S. Kim, K. Sim, M. Park, and I. Yu, "Simulation and experimental demonstration of a large-scale HTS AC induction furnace for practical design," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 26, no. 4, pp.4-1, 2016.
- [4] V. Frizen, A. Koptyakov, V. Lusgin, and D. Tomashevskiy, "Choice of compensating device for induction furnace with dual-frequency power supply," in 18 20 17th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), 2017, pp. 5-1: IEEE.
- [5] V. E. Frizen, V. I. Luzgin, A. S. Koptyakov, K. E. Bolotin, N. V. Tarchutkin, and S. E. Mironov, "Induction crucible furnace with dual frequency power supply," in 15 20 17th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), 2017, pp. 426-423: IEEE
- [6] N. T. T. Hang and U. Lüdtke, "Numerical simulation of channel induction furnace to investigate frequency-dependent efficiency," in 2016 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET), 2016, pp.95-90: IEEE.
- [7] D. van Riesen and K. Hameyer, "Coupled electromagnetic, structural-dynamic, and acoustic simulation of an induction furnace," IEEE transactions on magnetics, vol. 42, no. 4, pp. 1022-1019, 2006.
- [8] G. A. Patil, Y. Bhosale, and V. Bolaj, "Passive filter design to mitigate harmonics in three phase induction furnace," in 2017 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), 2017, pp. 6-1: IEEE.
- [9] N. Bara, "Review paper on numerical analysis of induction furnace," International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology-IJLTET, vol. 3, pp. 557-549, 2013.
- [10] A. J. Shokri, M. H. Tavakoli, A. A. Sabouri Dodaran, M. S. Akhouni khezrabad, "Numerical Study of Influence of Coil Step on the Induction Heating Process in Three-Dimensional", Journal of Applied Electromagnetics, Vol. 4, No. 1, 2016,(in Persian).
- [11] K. Thorborg, Power Electronics in Theory and Practice.2005.
- [12] COMSOL_Multiphysics.(2018). induction_heating. Available: <https://www.comsol.com/>



شکل (۳۱): ولتاژ دو سر ماسفت (S_1) در شرایط بار.

۶. نتیجه گیری

کوره‌ها و گرم‌کن‌های القایی در صنایع مختلف کاربردهای فراوانی دارند، لذا بررسی دقیق رفتار آنها بسیار مهم می‌باشد. در این مقاله، ضمن بررسی فرآیندهای اصلی ذوب القایی، با استفاده از روابط موجود در الکترومغناطیس، المان‌های مدار محاسبه و طراحی شده‌اند. سپس، با استفاده از نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود COMSOL Multiphysics، شبیه‌سازی گرم‌کن القایی جهت صحت‌سنجی مقدار سلف محاسبه شده توسط روابط، پایداری دمایی و توزیع میدان‌های مغناطیسی در حالت‌های مختلف صورت گرفته است. پس از حصول نتایج مطلوب و امکان‌سنجی ساخت، گرم‌کن القایی مورد نظر، منطبق بر پارامترهای الکتریکی محاسبه شده و نتایج حاصل از تحلیل حرارتی المان محدود، طراحی و پیاده‌سازی شده است. در ادامه، جریان و ولتاژ قسمت‌های مختلف مدار تغذیه و کنترل، و همچنین، دمای قراضه‌های درون کوئل در نقطه کار پایدار، ارائه شده و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در انتها، نتایج حاصل از ساخت حاکی از انطباق بسیار مطلوب آن با نتایج تحلیلی بوده است و نشان‌دهنده عملیاتی بودن سامانه ارائه شده می‌باشد.

۷. مراجع

- [1] J. C. C. Galeano, G. H. Alvarez, and E. J. B. Nocua, "Design Validation and Construction of an Induction Furnace Coil," IEEE Latin America Transactions, vol. 14, no. 2, pp. 720-713, 2016.
- [2] S. LUPI, FUNDAMENTALS OF ELECTROHEAT: Electrical Technologies for Process Heating. SPRINGER, 2018.

**Design, Simulation, and Implementation of an Electric Induction
Heater up to 300 °C**

M. Golrokh joubeni, A. Dehestani Kolagar *

Malek-Ashtar University of Technology

(Received: 13/10/2019, Accepted: 30/12/2019)

Abstract

In this paper, design, simulation, and implementation of an induction heater with the ability of heating metals up to 300°C is carried out. The respective heater is made utilizing the relevant circuit, proper capacitor selection, and inductor design, and the experimental results are in good agreement with simulation results. In this paper, the induction heater simulation is carried out using the finite element method with COMSOL Multiphysics software. The finite element method for magnetic and thermal analysis is a conventional method and its capability has been proven in various physical fields. Therefore, finite element software has been applied to calculate and analyze the magnetic field and heat induced by induction heating. In this simulation, the relevant electric circuit is considered and all the elements are taken into account. According to the proposed electrical circuit and the related control method, a laboratory prototype proportional to the simulated dimensions is implemented in finite element software and the waveforms of the circuit parameters are analyzed. These induction heaters can be utilized in a variety of small and labware industries. In addition, they can be used as a preheater or heater for various applications (e.g., metallurgy industry, materials and metals processing, and testing in small dimensions). It should be noted that the circuit presented in this article is very cost effective and comparison of a laboratory-scale sample with simulation results demonstrates the validation and accuracy of the analysis.

Keywords: Induction Heater, Eddy Current, Resonance, Finite Element Analysis, Thermal Analysis

* Corresponding author E-mail: a_dehestani@mut.ac.ir