

بررسی عددی پارامترهای مهم در فرآیند گرمایش القایی

ادریس رحمتی^۱، محمد هادی خوش تقاضا^{۲*}، احمد بناکار^۳، محمدتقی عبادی^۴

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۴- استادیار گروه علوم باغبانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

فرآیند گرمایش القایی به وسیله فاکتورهای همچون تعداد حلقه های کویل، فرکانس کاری، فاصله کوپلینگ، گام حلقه ها، ضخامت هسته و سایر پارامترها تحت تاثیر قرار می گیرد. بنابراین در این تحقیق اثر تعداد حلقه های کویل، فرکانس کاری، فاصله حلقه ها، فاصله کوپلینگ و ضخامت هسته بر فرآیند گرمایش القایی به صورت عددی بررسی شد. این پارامترها اثر مهمی بر چگالی شار مغناطیسی، تلفات چگالی الکتریکی و میزان حرارت تولید شده در هسته دارند. روش المان محدود برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر مسئله در فضای دو بعدی به کار برده شد. نتایج نشان داد که افزایش تعداد حلقه های کویل منجر به افزایش چگالی شار مغناطیسی و میزان حرارت تولیدی در هسته می گردد. افزایش فرکانس کاری منجر به کاهش عمق نفوذ جریان، افزایش چگالی جریان و میزان حرارت تولیدی در سطح هسته شد. همچنین کاهش ضخامت هسته و فاصله کوپلینگ منجر به افزایش تلفات چگالی الکتریکی و در نتیجه افزایش میزان حرارت تولیدی در هسته شد.

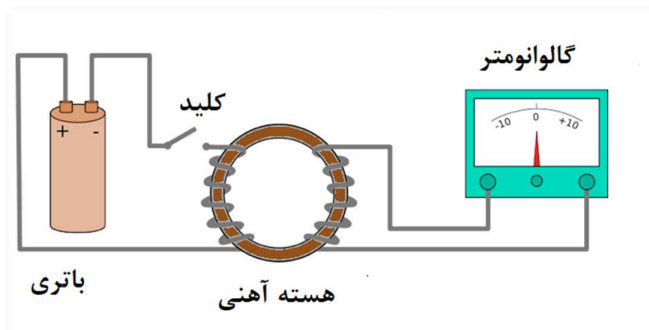
کلمات کلیدی: گرمایش القایی، روش المان محدود، میدان الکترومغناطیس، اثر ژول

*نویسنده مسئول: محمد هادی خوش تقاضا

۱-مقدمه

اساس گرمایش مواد فلزی به وسیله القای الکترومغناطیس در سال ۱۸۳۱ توسط مایکل فارادی فیزیکی دان انگلیسی کشف شد. فارادی در حالی که مشغول انجام آزمایشات با دو کویل که به هسته آهنی مشترکی متصل بودند به این نتیجه رسید که اگر به یکی از کویل ها باتری و کلید متصل گردد که منجر به تشکیل مدار بسته ای گردد یک جریان لحظه ای می توان در کویل ثانویه به وسیله گالوانومتری که به طور سری به آن بسته شده است مشاهده کرد، اگر مدار به حالت بسته باقی بماند جریانی در کویل ثانویه مشاهده نمی گردد، زمانی که کلید قطع و مدار باز می شد جریانی در خلاف جهت جریان اولیه در کویل مشاهده می شد. فارادی از این مشاهده به این نتیجه رسید که تغییر

میدان مغناطیسی منجر به ایجاد جریان الکتریکی می‌گردد (شکل ۱). همچنین نیرو محرکه الکتریکی^۱ القا شده در مدار با نرخ تغییرات شار مغناطیسی در مدار نسبت مستقیم دارد [۱].



شکل (۱): آزمایش اولیه فارادی

بعد از فارادی، فیزیکدان آلمانی هاینریش هرتز، قانون لنز را ارائه داد: جهت جریان القایی در مدار به گونه‌ای است که میدان مغناطیسی حاصل از آن با میدان مغناطیسی اولیه مخالفت می‌کند. بعد از چندین دهه، از این قوانین برای طراحی و توسعه ترانسفورمر به منظور تغییر سطح ولتاژ برای انتقال موثر الکتریسیته و کارکرد ماشین‌های الکتریکی استفاده شد. از معایب ترانسفورمرها ایجاد حرارت در هسته مغناطیسی بود که این مسئله با ورقه ورقه کردن هسته مغناطیسی تا حدودی رفع گردید. در اواخر قرن نوزدهم از این اثر (تلفات حرارتی در هسته) برای گرمایش مواد فلزی بهره گرفتند. اولین کاربرد صنعتی گرمایش القایی به وسیله سبستین^۲ شناسایی شد که گرمایش القایی را برای ذوب فلزات پیشنهاد داد. مدتی بعد ژلین^۳ کوره القایی کاربردی را ارائه داد. انقلاب دوم فناوری گرمایش القایی با توسعه ژنراتورهای حالت جامد^۴ و سامانه‌های فرکانس بالا همچون ترانزیستور پیوندی دوقطبی^۵ و ماسفت‌ها^۶ همراه بود که کاربرد گرمایش القایی را در بسیاری از زمینه‌ها فراهم ساخت [۲].

گرمایش القایی با در نظر گرفتن شمار زیادی از کاربردها در صنایع مختلف به دو دسته گرمایش سطحی و گرمایش حجمی تقسیم می‌شود. در گرمایش سطحی معیارها برای انتخاب پارامترها در ایجاد گرمایش القایی براساس اثر پوستی و زمان فرآیند تعیین می‌گردد. در گرمایش حجمی علاوه بر این پارامترها بازده الکتریکی و حرارتی و کنترل توان باید در نظر گرفته شود [۳]. گرمایش القایی به طور گسترده‌ای در صنایع فلزات، پزشکی، فرآوری شیشه و کوارتز، ساخت نیمه رساناها، سنتز شیمیایی مایعات و گازها به کار گرفته شده است. علاوه بر این در فرآیندهای بسته بندی، ساخت سلول‌های خورشیدی، خشک کردن و استریل کردن مایعات به کار گرفته شده است [۴-۹]. گرمایش القایی یک روش گرمایش الکترومغناطیس، غیر تماسی و گرمایش سطحی است. اصول گرمایش القایی براساس قوانین فیزیکی آمپر، قانون فارادی، قانون اهم، قانون ژول و لنز است (روابط ۱، ۲ و ۳).

¹ Electro-motive force

² - Sebastian

³ -Kjellin

⁴ - Solid-state generators

⁵ - Bipolar junction transistor

⁶ - Moseft

⁶ - Citrange

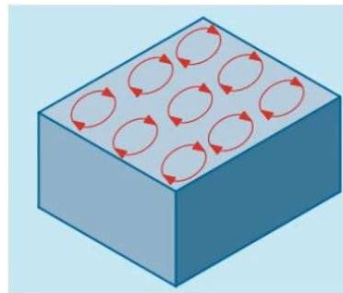
$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

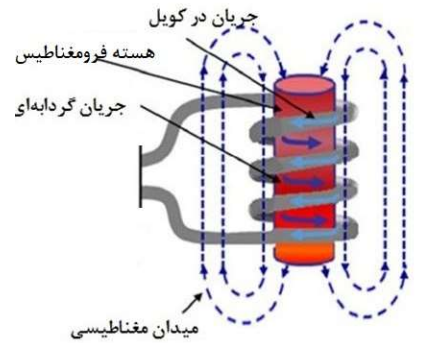
$$P = (R \times I)^2 \quad (3)$$

در این روابط ∇ عملگر کرل، H شدت میدان مغناطیسی (A/m)، J چگالی جریان (A/m^2)، D میدان جابجایی الکتریکی (C/m^2)، E میدان الکتریکی (V/m)، B القای مغناطیسی (T)، P توان (J)، R مقاومت الکتریکی رسانا (Ω) و I جریان الکتریکی (A) می باشد.

بر این اساس یک ولتاژ متناوب به کویل به کار گرفته می شود این پدیده منجر به شار جریان متناوب در کویل القایی می گردد. جریان متناوب، میدان مغناطیسی متغیر با زمان در اطراف کویل ایجاد می کند (قانون آمپر). شدت میدان مغناطیسی ایجاد شده به مقدار جریان، هندسه کویل و فاصله کولپینگ کویل و هسته وابسته است. شار مغناطیسی متغیر با زمان منجر به ایجاد نیرو محرکه الکتریکی می گردد (قانون فارادی). اگر یک ماده رسانا در داخل میدان الکترومغناطیسی قرار بگیرد بر اساس قانون اهم یک جریان القایی در آن ایجاد می گردد (شکل ۲-الف). این جریان ها به جریان های گردابی^۷ معروف هستند که مقدار آنها به القاگر و مقاومت ماده وابسته است. این جریان های القا شده فرکانس یکسان با جریان کویل دارند، با این وجود جهت حرکت آنها در خلاف جهت جریان کویل است. جریان های گردابی به وسیله اثر ژول تبدیل به حرارت می گردند و در نتیجه دمای قطعه کار افزایش و در نهایت انرژی حرارتی بر اساس خواص حرارتی مواد (گرمای ویژه و هدایت حرارتی) در هسته توزیع می گردد (شکل ۲-ب) [۱۰-۱۲]. در فرایند گرمایش القایی هر سه مکانیزم انتقال حرارت رسانشی، همرفتی و تشعشع دخیل هستند. مکانیزم انتقال حرارت بین ذرات داخلی هسته، رسانشی و انتقال حرارت از سطح هسته به هوای اطراف به صورت همرفتی و تشعشعی است.



(ب)

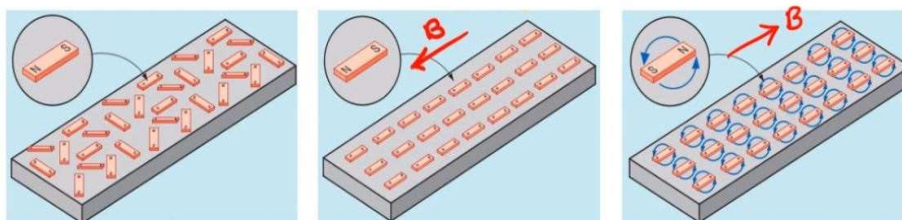


(الف)

شکل (۲): (الف) شماتیک میدان مغناطیسی و (ب) جریان های گردابه‌ای داخل هسته فرومغناطیس

⁷ Eddy current

در مواد فرومغناطیس تلفات پسماند نیز در فرایند گرمایش القایی اثر گذار هستند. در غیاب میدان مغناطیسی دو قطبی‌ها آرایش نامنظمی دارند. میدان مغناطیسی متناوب منجر به تشکیل دوقطبی‌های مغناطیسی در داخل ماده فرومغناطیسی می‌گردد. جهت چرخش این دو قطبی‌ها به طور پیوسته در هر سیکل عوض می‌شود این پدیده منجر به ایجاد مقداری حرارت به وسیله اصطکاک ایجاد شده طی نوسان دوقطبی‌ها می‌گردد. این اثر برای مواد فرومغناطیسی تا دمای کوری^۸ قابل مشاهده است و در دمای‌های بالا از بین می‌رود (شکل ۳) [۱۲]. دمای کوری برای آهن ۷۷۰ درجه سلسیوس است [۱۳].



شکل (۳): شماتیک جهت گیری مولکول‌های ساختار ماده (هسته فرومغناطیس) در حضور میدان مغناطیسی (پسماند)

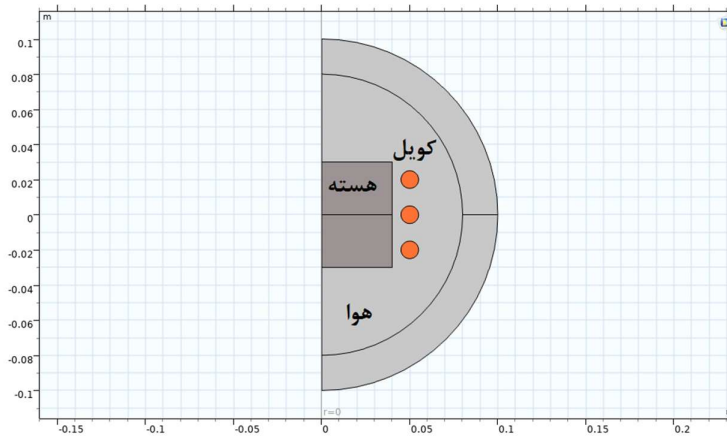
یک سامانه گرمایش القایی مرسوم از کویل، هسته، مبدل فرکانسی، منبع توان و مدار کنترلی تشکیل شده است. انتخاب مناسب منبع توان، سامانه کنترلی و زمان گرمایش در فرآیند گرمایش القایی گرمایش القایی به طور موثری به مقاومت و راکتانس بار وابسته است [۳]. طراحی کویل یکی از مهمترین جنبه‌ها در یک سامانه القایی است و اثر مستقیمی بر بازده سامانه گرمایش دارد. طراحی کویل بر اساس الگوهای گرمایش مورد نیاز، فرکانس و چگالی توان مورد نیاز است [۱۴]. بسته به کاربرد کویل‌های گرمایش القایی در سایزها و شکل‌های مختلفی در دسترس هستند. کویل‌های مستطیلی و استوانه‌ای چند حلقه‌ای معمولاً در کاربردی گرمایش القایی به کار گرفته می‌شوند [۱۵]. علی‌رغم کاربرد گسترده گرمایش القایی در صنایع مختلف، اطلاعات در مورد طراحی کویل القایی و پارامترهای مهم در طراحی کویل القایی محدود است. بنابراین در این تحقیق به صورت عددی اثر پارامترهای مهمی همچون تعداد حلقه‌های کویل، فاصله بین کویل و هسته، فرکانس به کار گرفته شده و ضخامت هسته بر میزان حرارت تولیدی در هسته بررسی خواهد شد.

۲- شبیه سازی فرآیند گرمایش القایی

- هندسه مورد نظر و مواد مورد استفاده

⁸ Curie temperature

هندسه سامانه‌ی گرمایش القایی به منظور انجام تحلیل عددی در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. مدل از هسته آهنی با ابعاد (۴×۶ سانتی متر)، کویل با شعاع ۴/۵ سانتی متر و میدان هوا با شعاع ۱۰ سانتی متر متر تشکیل شده است. خصوصیات مواد مورد استفاده در مدل در جدول (۱) آورده شده است.



شکل (۴): هندسه اجزای مختلف مدل

جدول (۱): خصوصیات مواد مورد استفاده در مدل

هسته تناویم	مس	هوا	مواد
۱	۱	۱	نفوذپذیری نسبی
۱	۱	۱	گذردهی نسبی
$۷/۴۰۷e^{\circ}$	$۵/۹۹۸e^y$	۰	هدایت الکتریکی (s/m)
۷۱۰	۳۸۵	-	ظرفیت حرارتی (J/kgk)
۴۹۴۰	۸۹۶۰	-	چگالی (kg/m^3)
۷/۵	۴۰۰	-	هدایت حرارتی (W/mk)

- فیزیک مسئله و شرایط مرزی

در این تحقیق از دو فیزیک میدان مغناطیسی و انتقال حرارت استفاده شد. تنظیمات اصلی میدان مغناطیسی مربوط به کویل و تنظیمات انتقال حرارت مربوط به هسته می‌باشد. در این مرحله ورودی‌های مدل همچون مقدار جریان، نرخ انتقال حرارت، شرایط مرزی و غیره مشخص خواهد شد. معادلات دیفرانسیل حاکمه بر مدل در ادامه آورده شده است (رابطه ۴-۱۱). با کویل کردن این دو دسته از معادلات دیفرانسیل مدل حل خواهد شد. در این تحقیق جریان ۱۰۰۰ آمپر و فرکانس ۱۰۰۰ هرتز برای ورودی کویل به کار گرفته شد. لازم به ذکر است که جریان عبوری از هر حلقه ۱۰۰۰ آمپر بود.

$$\nabla \times H = J \quad (۴)$$

$$B = \nabla \times A \quad (۵)$$

$$J = \sigma E + j\omega D + \sigma V \times B + J_e \quad (6)$$

$$E = -j\omega A \quad (7)$$

$$\rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{ted} \quad (8)$$

$$q = -k \nabla T \quad (9)$$

$$\rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (K \nabla T) + Q_e \quad (10)$$

$$Q_e = Q_{rh} + Q_{ml} \quad (11)$$

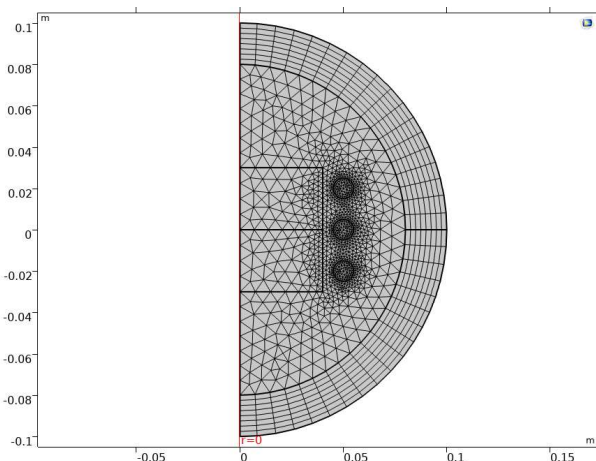
در این معادلات، Q_e گرمای تولید شده به وسیله جریان‌های گردابی (J)، چگالی ماده ρ (kg/m^3)، ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت C_p (J/kg K)، ضریب هدایت حرارتی مواد k (W/m K)، میدان سرعت u (m/s)، میدان دما T (K)، شار حرارتی جابجایی q (W/m^2)، قابلیت انتشار سطح، ε ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)، ضریب انتقال حرارت جابجایی h ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)، ثابت استفان-بولتزمن n ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)، ضریب شکست، J چگالی جریان (A/m^2)، میدان الکتریکی، E (V/m)، بردار پتانسیل مغناطیسی (V/m)، W فرکانس زاویه‌ای (rad/s) و σ هدایت الکتریکی (S/m) است.

- مش بندی و نوع حلگر

مش بندی مدل در محیط نرم افزار کامسول انجام شد (شکل ۵). هدف از این مرحله گسسته‌سازی ناحیه محاسباتی و حل معادلات حاکمه در این ناحیه برای محاسبه پارامترهای مورد نظر می‌باشد. دو مسئله مهم در مش بندی در نظر گرفته شد: ۱- یکی کیفیت مش به کار برده شده و دیگری هم بررسی استقلال نتایج از مش که در ادامه آورده شده است. در این تحقیق از مش مستطیلی برای ناحیه بی نهایت، و مش مثلثی برای سایر قسمت‌ها استفاده شد. در این بررسی سه مش بندی با اندازه‌های مختلف با هم مقایسه شدند و نتایج آن در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲). مقایسه‌ی نتایج اندازه مش بندی‌های مختلف

اندوکتانس کوئل (uH)	کمترین کیفیت مش	میانگین کیفیت مش	تعداد المان کل شکل
۰/۶۶۳۷	۰/۴۳۸۷	۰/۷۹۲۵	۷۱۵
۰/۶۶۳۸	۰/۵۰۲۱	۰/۸۱۹۱	۱۹۳۶
۰/۶۶۳۸	۰/۵۸۱۴	۰/۸۵۸۸	۲۴۵۴



شکل (۵): مش بندی قسمت های مختلف مدل

با توجه به نتایج به دست آمده، ریز کردن مش‌ها از یک محدوده ای به بعد تأثیر قابل توجهی در نتایج عددی ندارد و فقط هزینه و زمان محاسبات را افزایش می‌دهد. بنابراین تعداد مش مناسب برای محاسبات ۱۹۳۶ در نظر گرفته شد. در این تحقیق از حلگر فرکانسی برای حل معادلات میدان مغناطیسی و از حلگر پایا برای حل معادلات میدان انتقال حرارت استفاده شد.

۴- نتایج عددی

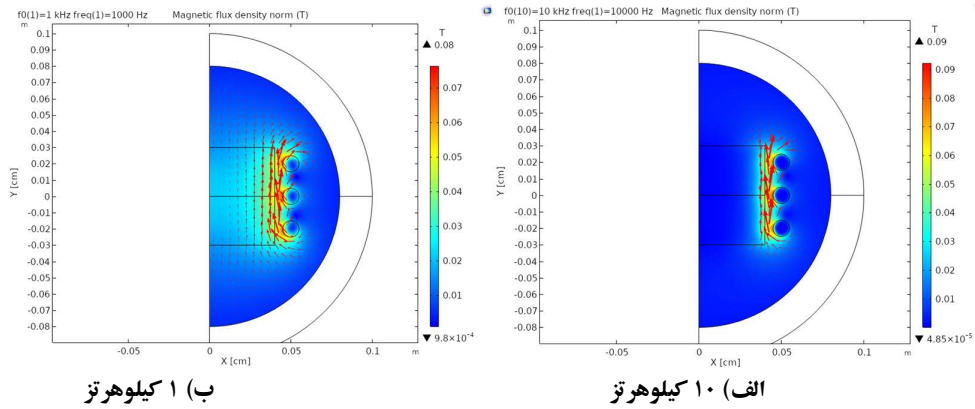
پارامترهای اصلی گرمایش القایی نقش معنی داری در چگالی توان و نرخ حرارت تولیدی دارند. چگالی توان و نرخ حرارت به وسیله ولتاژ کویل، فرکانس گرمایش القایی، عرض سطح گرم شده، فاصله کولپینگ و تعداد حلقه های کویل تحت تأثیر قرار می‌گیرند. در ادامه اثر پارامترهای مختلف بر چگالی شار مغناطیسی و نرخ حرارت تولیدی در هسته بررسی شده است.

- اثر فرکانس بر چگالی شار مغناطیسی و تلفات چگالی الکتریکی

اثر فرکانس‌های مختلف بر چگالی شار مغناطیسی و تلفات چگالی الکتریکی در شکل (۶) نشان داده شده است. با افزایش فرکانس تعداد خطوط میدان مغناطیسی از مرکز به سمت سطح هسته آهنی کاهش یافته است. این پدیده به دلیل اثر پوستی می‌باشد. زمانی که جریان متناوب از داخل هسته عبور می‌کند توزیع جریان یکنواخت نیست و بیشترین مقدار چگالی جریان همیشه بر سطح رسانا قرار می‌گیرد. این اثر یکی از فاکتورهای اصلی است که منجر به تجمع جریان‌های گردابی^۹ در لایه های سطحی هسته می‌گردد [۱۱، ۱۶]. طبق این اثر با افزایش فرکانس عمق نفوذ میدان مغناطیسی کاهش و به تبع آن عمق نفوذ جریان به طور نمایی از سطح به داخل هسته کاهش می‌یابد. به هر حال مقدار چگالی شار مغناطیسی در سطح هسته افزایش و این پدیده منجر به گرمایش سریع سطح هسته می‌گردد [۱۷،

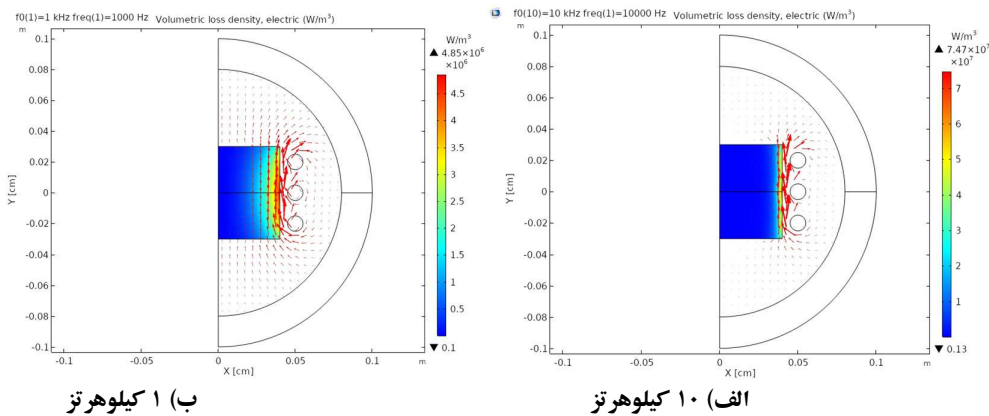
[۱۸]

^۹ Eddy current



شکل (۶): خطوط چگالی شار مغناطیسی در اطراف کویل و هسته با فرکانس های مختلف

تلفات چگالی الکتریکی بیانگر میزان انرژی القا شده در هسته است که در نهایت منجر به حرارت هسته می‌گردد. افزایش فرکانس منجر به افزایش مقدار تلفات و به تبع آن افزایش میزان حرارت تولیدی در هسته شد (شکل ۷).



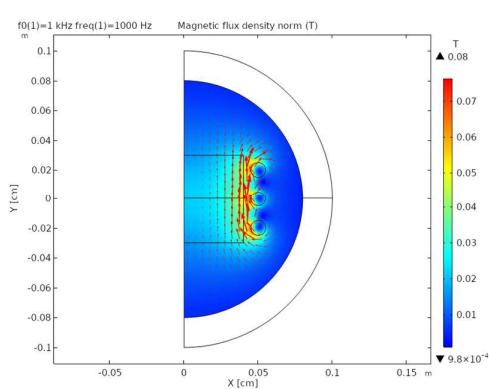
شکل (۷): تلفات چگالی الکتریکی در هسته در فرکانس های مختلف

عمق نفوذ جریان در هسته به نوع ماده (مقاومت الکتریکی و نفوذ پذیری) توان به کار برده شده، و فرکانس کاری دارد. با توجه به افزایش شدت جریان به کار برده شده در نزدیک سطح هسته، حدود ۸۶ درصد توان در لایه‌های سطحی متمرکز می‌شود [۱۹]

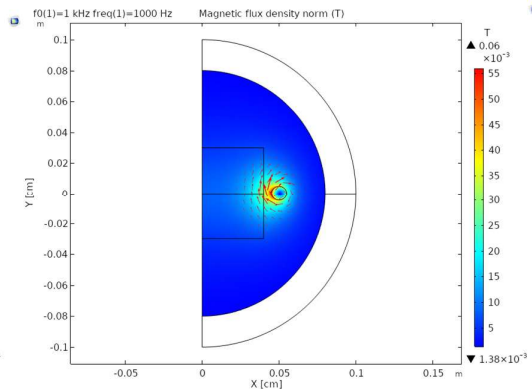
۱- اثر تعداد حلقه‌ها بر چگالی شار مغناطیسی

اثر تعداد حلقه‌های کویل بر چگالی شار مغناطیسی در شکل (۸) نشان داده شده است. افزایش تعداد حلقه‌های کویل منجر به افزایش شار مغناطیسی شده است. این پدیده به این دلیل است که با افزایش تعداد حلقه‌ها جریان نهایی

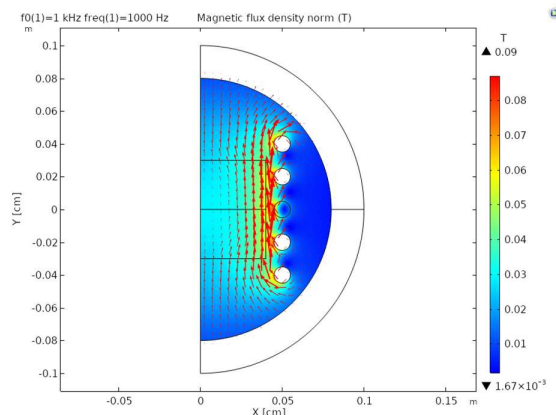
کویل افزایش خواهد یافت در نتیجه شدت میدان مغناطیسی بیشتر خواهد شد. همچنین چگالی شار مغناطیسی در نقاطی از هسته که رو به روی کویل قرار دارد قوی‌تر است این مسئله ناشی از دو پدیده الکترومغناطیسی اثر حلقه^{۱۰} و اثر مجاورتی^{۱۱} می‌باشد. پدیده اثر مجاورتی به طور مستقیم با گرمایش القایی در ارتباط است. بنابراین به عنوان یک نتیجه اثر مجاورتی، جریان کویل و جریان‌های گردابی القا شده در هسته در مناطق رو به روی هم متمرکز می‌گردند [۱۱]. اثر الکترومغناطیسی دیگری که منجر به توزیع جریان در سامانه‌های القایی می‌گردد اثر حلقه است. حضور اثر حلقه می‌تواند اثر مثبت و منفی بر بازده فرآیند و گرمایش داشته باشد. در یک سامانه گرمایش مرسوم زمانی که یک هسته استوانه‌ای جامد در داخل یک کویل القایی استوانه‌ای قرار گرفته است این اثر نقش مثبتی بازی می‌کند. چرا که در ترکیب با اثرات پوستی و مجاورتی منجر به متمرکز کردن جریان کویل بر روی قطر داخلی کویل می‌گردد. به عنوان یک نتیجه منجر به بهبود کویلینگ و افزایش بازده کویل می‌گردد. اثر دیگری که هم باید در تعداد حلقه‌ها در نظر گرفت ارتباط آن با ارتفاع هسته است در صورتی که تعداد حلقه مناسب انتخاب نگردد به بیان دیگر زمانی که ارتفاع هسته از تعداد حلقه‌ها بیشتر باشد گرادیان دمایی در هسته به وجود می‌آید [۲۰]



ب) سه حلقه کویل



الف) یک حلقه کویل

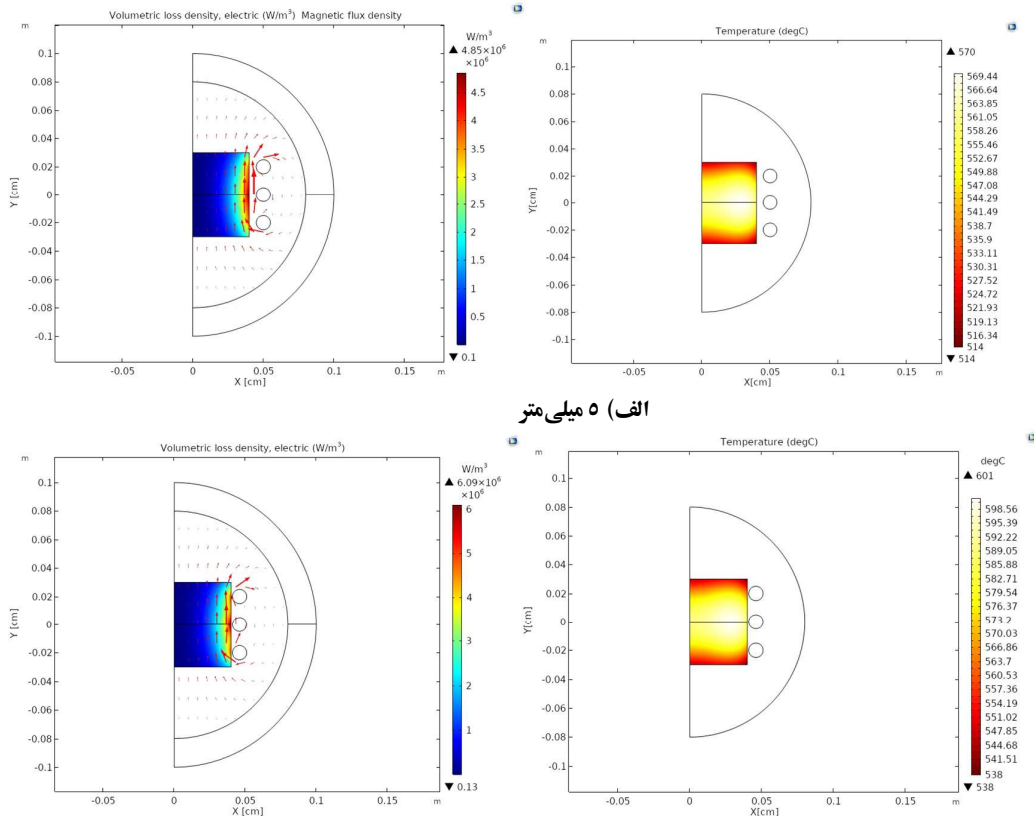


ج) ۵ حلقه کویل

شکل (۸): نمایش چگالی شار مغناطیسی در هسته در تعداد حلقه های مختلف

۱- اثر فاصله کویلینگ بر میزان تلفات و حرارت تولیدی در هسته

اثر فاصله بین کویل و هسته بر میزان حرارت تولید شده در شکل (۹) نشان داده شده است. با کاهش فاصله بین کویل و هسته مقدار حرارت تولیدی افزایش یافته است. کاهش فاصله بین کویل و هسته (فاصله کویلینگ کم) منجر به افزایش اثر مجاورتی می‌گردد بنابراین چگالی جریان های گردابی در هسته افزایش خواهد یافت و به تبع آن میزان حرارت تولیدی و بازده حرارتی افزایش خواهد یافت [۱۶، ۲۱]. در مناطقی که فاصله بین کویل و هسته کم است الگوهای گرمایشی نسبتاً باریک (کم عرض) و عمیق هستند. در مناطقی که فاصله بین کویل و هسته بیشتر می‌گردد الگوهای گرمایشی نسبتاً گسترده تر و کم عمق هستند [۱۱].



ب) بدون فاصله

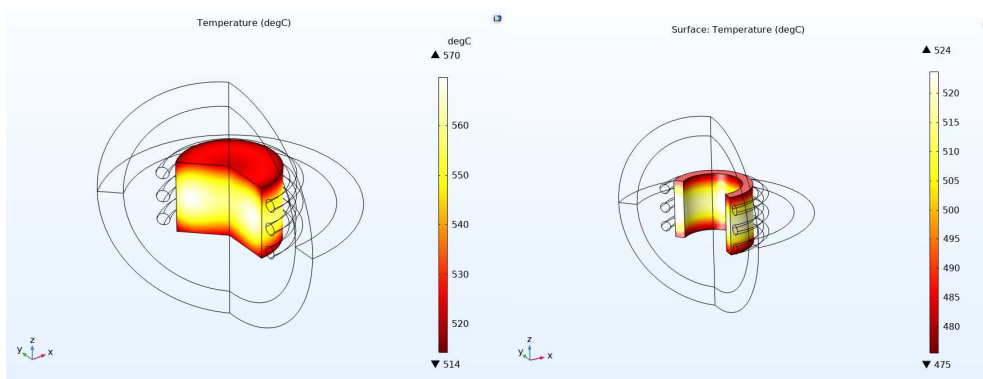
شکل (۹): اثر فاصله کویلینگ (فاصله بین هسته و کویل) بر میزان تلفات الکتریکی و حرارت تولیدی در هسته

بنابراین به منظور افزایش میزان حرارت تولیدی و افزایش بازده کویل باید فاصله بین کویل و هسته مینیمم باشد. بسته به کاربرد مورد نظر این فاصله می‌تواند بین ۱/۶ تا ۳/۲ میلی متر در نظر گرفته شود و در برخی از موارد تا ۱/۲۵

نیز می تواند در نظر گرفته شود. به هر حال هسته در طول گرمایش منبسط می گردد و باید در ملاحظا تفرانس مناسب در نظر گرفته شود [۱۱].

-اثر ضخامت هسته بر میزان حرارت تولیدی

به طور کلی مقدار گرمای تولید شده در هسته به چهار فاکتور: ۱- بزرگی جریان القا شده، ۲- مقاومت ماده به شار جریان، ۳- مدت زمان در معرض میدان هسته، ۴- هندسه و چرخش کویل و هسته [۱۱، ۲۰] بستگی دارد. اثر ضخامت های مختلف هسته بر نرخ گرمایش و دمای هسته در شکل (۱۰) نشان داده شده است. ضخامت هسته نقش مهمی در نرخ گرمایش دارد. در هسته های ضخیم نرخ گرمایش آهسته تر است ولی در هسته نازک نرخ گرمایش سریعتر است چرا که در شرایط شار مغناطیسی یکسان جرم مورد نیاز برای گرمایش هسته نازک کمتر است بنابراین در زمان کمتری و با صرف انرژی کمتر دما هسته افزایش خواهد یافت. همچنین در هسته های نازک گرادیان دمایی کمتر و توزیع دما یکنواختتر است. ضخامت هسته ارتباط مهمی با فرکانس جریان به کار برده شده دارد. به طوری که برای ضخامت کم هسته باید فرکانس ها بالا و برای ضخامت بالا باید فرکانس جریان پایین به کار گرفته شود در غیر این صورت بازده گرمایش القایی به طور معنی داری کاهش می یابد.



ب) ضخامت ۴۰ میلی متر

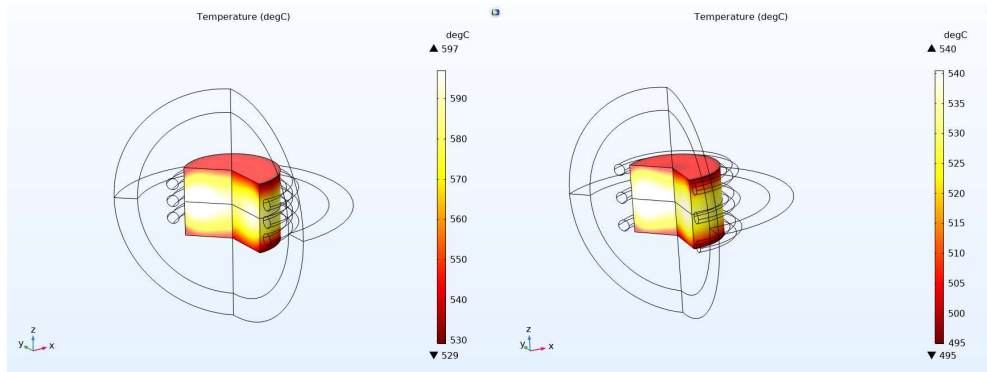
الف) ضخامت ۱۰ میلی متر

شکل (۱۰): اثر ضخامت هسته بر میزان حرارت تولیدی در هسته

-اثر فاصله بین حلقه ها و قطر کویل بر میزان حرارت تولیدی

افزایش فاصله بین حلقه ها از ۵ میلی متر به ۱۵ میلی متر منجر به کاهش حرارت تولیدی در هسته شد (شکل ۱۱). افزایش فاصله منجر به افزایش طول کویل و در نتیجه کاهش شدت میدان مغناطیسی در سطح هسته و ضعیفتر شدن خطوط میدان می گردد. بنابراین چگالی جریان های گردابی در سطح هسته کاهش و به تبع آن میزان حرارت تولیدی کاهش می یابد. اندوکتانس کویل یکی از پارامترهای مهم سامانه گرمایش القایی است که به طور موثری بازده گرمایش سامانه القایی را تحت تاثیر قرار می دهد و به پارامترهای همچون تعداد حلقه های کویل، قطر کویل و طول وابسته است [۱۴، ۲۲]. اندوکتانس ناشی از میدان مغناطیسی می باشد که به وسیله شار جریان متناوب در کویل ایجاد شده است. اندوکتانس همانند فلاپول است که انرژی را ذخیره میکند و با تغییرات مخالفت می کند. شار جریان مخالف ایجاد شده به وسیله اندوکتانس، راکتانس القایی نامیده می شود که با فرکانس رابطه مستقیم دارد. علی رغم اینکه طول

کویل رابطه عکس با اندوکتانس کویل دارد با افزایش طول کویل میزان حرارت تولیدی در هسته کاهش یافته است. بنابراین باید گام حلقه‌ها طوری انتخاب شود که چگالی شار مغناطیسی مطلوب حاصل گردد. اندوکتانس بالا اثر معنی داری بر ولتاژ ایجاد شده بر منبع توان دارد و منجر به کاهش ولتاژ می‌شود. بنابراین توان خروجی به طور معنی دار کاهش و قادر به گرمایش مطلوب هسته نخواهد شد. بنابراین در فرکانس و جریان‌ها بالا مقدار اندوکتانس باید در نظر گرفته شود [۱۱].



ب) ۵ میلی‌متر

الف) ۱۵ میلی‌متر

شکل (۱۱): اثر فاصله بین حلقه‌ها بر میزان حرارت تولیدی در هسته

افزایش قطر کویل و تعداد حلقه‌ها در یک جریان ثابت هم اثر معنی داری بر میزان حرارت تولیدی در هسته دارد. با افزایش قطر کویل و تعداد حلقه‌ها، اندوکتانس کویل افزایش و به تبع آن چگالی شار مغناطیسی کاهش می‌ابد. در این حالت به منظور دستیابی به دمای هسته مورد نظر باید توان بالایی به کار گرفته شود.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش تأثیر پارامترهای مهم سامانه گرمایش القایی همچون تعداد حلقه‌های کویل، فرکانس کاری، ضخامت هسته، گام کویل و فاصله کویلینگ بر میزان حرارت تولیدی در هسته بررسی به صورت عددی بررسی شد. نتایج نشان داد توزیع چگالی جریان در هسته یکنواخت نیست و به وسیله پارامترهای فرآیند و خصوصیات فیزیکی هسته (مقاومت و نفوذپذیری مغناطیسی) تحت تأثیر قرار می‌گیرد. نفوذپذیری مغناطیسی مواد به طور موثری به نوع مواد و ترکیبات، دما و شدت میدان مغناطیسی وابسته است. غیریکنواختی چگالی جریان منجر به غیریکنواختی الگوهای گرمایشی در هسته می‌گردد که این پدیده به نوبه خود منجر به غیریکنواختی پروفایل دمایی در هسته می‌گردد. بنابراین شناسایی پارامترهای اثرگذار بر فرآیند گرمایش القایی و نوع گرمایش (سطحی یا حجمی) باید در محاسبات در نظر گرفته شود. فرمول‌های تحلیلی موجود برای محاسبه پارامترهای فرآیند گرمایش القایی مناسب و کارآمد نیست، بنابراین بکارگیری روش‌های عددی منجر به طراحی بهینه پارامترهای فرآیند و کاهش هزینه‌ها و زمان می‌گردد.

منابع

1. Rudnev, V., et al., *Handbook of induction heating*. 2017: CRC Press, Taylor & Francis Group Boca Raton (FL.
2. Lucia, O., et al., *Induction heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges*. IEEE Transactions on industrial electronics, 2013. 61(5): p. 2509-2520.
3. Ryszard, N. and W. Marcin, *Criteria for selection of volume induction heating parameters*. Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials, 2011: p. 159.
4. El-Mashad, H.M. and Z. Pan, *Application of induction heating in food processing and cooking*. Food Engineering Reviews, 2017. 9(2): p. 82-90.
5. Atyhanov, A. and A. Sagyndikova, *Energy savings at the induction method of grain drying*. Applied Technologies & Innovations, 2013. 9(1): p. 17-20.
6. Tomita, H., et al. *Superheated steam generator by induction heating*. in *2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications*. 2009. IEEE.
7. Kittiamornkul, N., et al. *A small pasteurization system using magnetic induction for coconut juice*. in *2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*. 2017. IEEE.
8. Idakiev, V.V., et al., *Inductive heating of fluidized beds :Spray coating process*. Powder Technology, 2018. 328: p. 26-37.
9. Wu, S., et al., *Development of an innovative induction heating technique for the treatment of liquid food: Principle, experimental validation and application*. Journal of Food Engineering :۲۷۱ . ۲۰۲۰ . p. 109780.
10. Jang, J.-Y. and Y.-W. Chiu, *Numerical and experimental thermal analysis for a metallic hollow cylinder subjected to step-wise electro-magnetic induction heating*. Applied thermal engineering, 2007. 27(11-12): p. 1883-1894.
11. Rudnev, V., D. Loveless, and R.L. Cook, *Handbook of induction heating*. 2017: CRC press.
12. Giustozzi, F., *12 - Novel magnetically induced healing in road pavements*, in *Eco-Efficient Pavement Construction Materials*, F. Pacheco-Torgal, et al., Editors. 2020 ,Woodhead Publishing. p. 315-336.
13. Velasco, S. and F. Román, *Determining the Curie temperature of iron and nickel*. The PhySiCS TeACher, 2007. 45(6): p. 387-389.
14. Zinn, S. and S. Semiatin, *Coil design and fabrication: basic design and modifications* .Heat treating, 1988. 12(3): p. 32-36.
15. Rapoport, E. and Y. Pleshivtseva, *Optimal control of induction heating processes*. 2006: CRC Press.
16. Huang, M.S. and N.S. Tai, *Experimental rapid surface heating by induction for micro-injection molding of light-guided plates*. Journal of applied polymer science, 2009. 113(2): p. 1345-1354.
17. Nian, S.-C., et al., *Key parameters and optimal design of a single-layered induction coil for external rapid mold surface heating*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2014. 57: p. 109-117.
18. Giustozzi, F., *Novel magnetically induced healing in road pavements*, in *Eco-Efficient Pavement Construction Materials*. 2020, Elsevier. p. 315-336.
19. Rudnev, V., et al., *Handbook of Induction Heating*. Marcel Dekker Inc. 2003.
20. Tavakoli, M.H., H. Karbaschi, and F. Samavat, *Influence of workpiece height on the induction heating process*. Mathematical and Computer Modelling, 2011. 54(1-2): p. 50-58.
21. Lucian, S.G., *Optimal design approach of inductors for mass heating processes*. International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEEM), 2014. 3(11): p. 423-427.
22. Qiu, L., et al., *Design and computation of coil inductance for induction cookers*. Russian Electrical Engineering, 2015 :۲)۸۶ . p. 106-110.

Numerical investigation of important parameters in the induction heating process

Edris Rahmati^a, Mohammad Hadi Khoshtaghaza^{*a}, Ahmad Banakar^a, Mohammad-Taghi Ebadi^b

^a Department of Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

^b Department of Horticultural Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract

The induction heating process is influenced by many factors, such as number of coil turns, working frequency, heating distance, pitch of coil turns, thickness of core and etc. Therefore, in this study, the effect of number of coil turns, working frequency, gap between the turns, heating distance and thickness of core on the induction heating process was numerically investigated. These parameters have an important effect on magnetic flux density, electrical density losses and the amount of heat generated in the core. The finite element method was used to solve the partial differential equations in two-dimensional space. The results showed that the increased number of coil turns led to raising the magnetic flux density and the amount of heat generated in the core. Raised working frequency resulted in decrees of current penetration depth as well as increase of current density and amount of heat generated at the core surface. Also, reducing thickness of core and heating distance led to increasing the electrical density losses and thus the amount of heat generated in the core.

Keywords: Induction heating, finite element method, Electromagnetic field, joule effect.

Corresponding author: Mohammad Hadi Khoshtaghaza