

مطالعه عددی تأثیر تعداد حلقه‌های پیچه بر گرمای تولید شده در فرایند گرمای القایی در مدل سه بعدی

عبدالجبار شکری^۱، محمدحسین توکلی^۲، امیرعباس صبوری دودران^۱ و محمدصادق آخوندی خضرآباد^۱

۱. گروه علوم پایه، دانشگاه پیام نور، تهران، تهران

۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، همدان

پست الکترونیکی: ajshokri2017@shargh.tnu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۰۷؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۶/۱۱/۲۱)

چکیده

مدل‌سازی کامپیوتری جهت طراحی القاگرها برای کاربردهای متفاوت در فرایند گرمای القایی اغلب برای صرفه‌جویی در هزینه‌های ناشی از خطا و آزمون ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله تأثیر تعداد حلقه‌های پیچه در فرایند گرمای القایی با حل عددی معادلات ماکسول با استفاده از روش المان محدود و به کمک بسته نرم‌افزاری کامسول مولتی فیزیک، در سه بعد بررسی شده است. بررسی تأثیر تعداد حلقه‌های پیچه در مقدار و الگوی گرمای تولید شده در قطعه کار برای کاربردهای ویژه در صنعت و تکنولوژی خیلی مهم و حیاتی است. زیرا تعداد حلقه‌های پیچه یکی از عوامل‌های مهم در طراحی دستگاه‌های گرمای القایی است. در ابتدا یک پیچه تک‌حلقه‌ای در مدل سه بعدی شبیه‌سازی شده و سپس پیچه‌هایی چند حلقه‌ای با تعداد حلقه‌های ۲، ۳ و ۴ لحاظ شده‌اند. از ولتاژ ۲۰۰ ولت متناوب با بسامد یک کیلوهرتز، به‌عنوان منبع تولید میدان‌های الکترومغناطیسی بهره گرفته شده است. نتایج حاصل از محاسبات عددی نشان می‌دهد تعداد حلقه‌های پیچه تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کمیت‌هایی مانند توزیع و شدت چگالی شار مغناطیسی، چگالی جریان‌های گردابی در قطعه کار و همچنین گرمای حجمی تولید شده در پیچه و قطعه کار دارد.

واژه‌های کلیدی: فرایند گرمای القایی، روش المان محدود، شبیه‌سازی

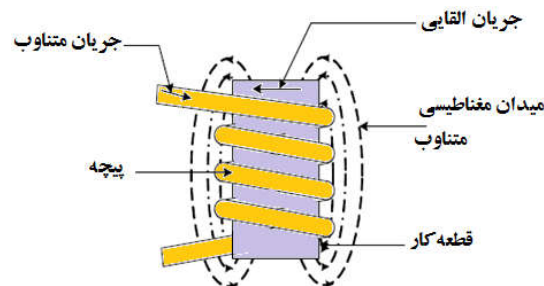
۱. مقدمه

دادن مواد ریزساختار (حتی در خلأ) و همچنین برای قطعات بزرگ‌تر، به دلایل اقتصادی و کاربردی در سراسر جهان موفقیت‌آمیز بوده است [۲]. از آنجا که گرمای تولید شده در قطعه کار به اندازه جریان الکتریکی القایی بستگی دارد که در لایه سطحی شارش می‌یابد، در نتیجه گرما به طور عمده در همان لایه سطحی متمرکز می‌شود. دستگاه گرمای القایی

گرمای القایی یک فرایند گرمایی بدون تماس و یک روش مرسوم و کاربردی در صنعت برای عملیات حرارتی است، زیرا منابع گرمایی به صورت مستقیم در قسمت‌های فلزی و مذاب فلز ایجاد می‌شوند [۱]. امروزه استفاده از عملیات گرمای موضعی با القای الکترومغناطیس برای ترمیم و جوش

در اندازه‌گیری دمای قطعه کار، این است که در شبیه‌سازی دو بعدی فرض می‌شود که پیچه دارای تقارن محوری است [۴]. جانگ و چو اثر اندازه قطعه کار و گاف هوا بین قطعه کار و پیچه را بررسی نمودند و نشان دادند که توافق خوبی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی دوبعدی و نتایج آزمایشگاهی در اندازه‌گیری دما روی قطعه کار وجود دارد [۵]. توکلی و همکاران همچنین با استفاده از روش المان محدود (FEM) اثر بسامدهای مختلف در دستگاه رشد بلور (روش چکرالسکی) را در مدل دوبعدی شبیه‌سازی کردند و نشان دادند که انتخاب بسامد اثر قابل توجهی بر توزیع میدان الکترومغناطیسی، عمق پوست، بازده پیچه، شدت و الگوهای گرمای تولید شده در دستگاه رشد بلور دارد [۶]. کای و همکاران اثر هندسه متمرکز کننده میدان مغناطیسی را روی فرایند گرمای القایی با دو روش شبیه‌سازی و آزمایشگاهی تحلیل و بررسی کردند. با مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی و اندازه‌گیری تجربی در رابطه با توزیع دما روی قطعه کار، نشان دادند که این دو روش توافق خوبی با هم دارند [۷]. خدا مرادی و همکاران با استفاده از روش عناصر متناهی تأثیر هندسه پیچه و بوته را روی فرایند گرمای القایی در دستگاه رشد بلور در دو بعد شبیه‌سازی کردند و نشان دادند که شکل گوشه بوته نقش مهمی در دستگاه رشد بلور بازی می‌کند [۸].

بیشتر مقالات در زمینه فرایند گرمای القایی در مدل دوبعدی به رشته تحریر در آمده و تعداد انگشت شماری از مقالات در مدل سه‌بعدی بررسی شده‌اند، زیرا در مدل دوبعدی فرض می‌شود که پیچه‌ها دارای تقارن محوری و حلقه‌ها متقارن و ۱۰۰٪ دایره کامل هستند و از یک بعد مسئله صرف نظر می‌شود و حل مسئله به مراتب راحت‌تر و نیاز به دستگاه‌های آن چنان قوی ندارد. اما در مدل سه‌بعدی شکل واقعی پیچه مد نظر است و در کل هر حلقه پیچه با یک قسمت مارپیچی شکل به حلقه دیگر متصل می‌شود که در محاسبات باید این مد نظر باشد [۹]. همچنین تعداد شبکه‌بندی‌ها در مدل سه‌بعدی چندین هزار برابر مدل دوبعدی است، بنابراین برای حل عددی مسئله نیاز به دستگاه‌های سخت‌افزاری قوی است. در این مقاله برای بررسی دقیق‌تر از مدل سه‌بعدی استفاده شده است.



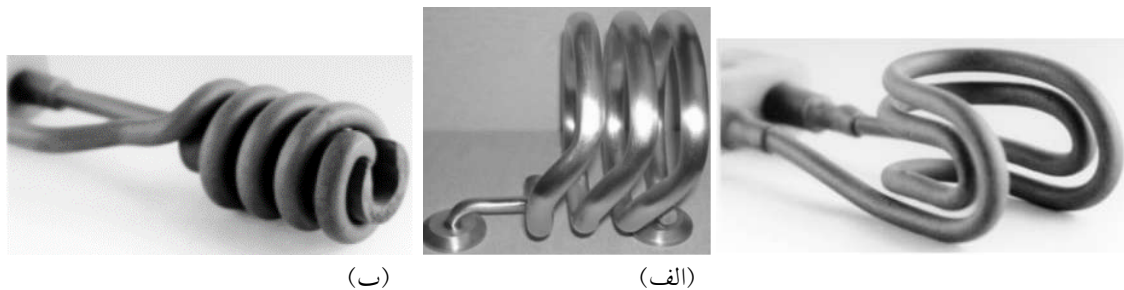
شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمایی از یک دستگاه گرمای القایی.

مزایای زیادی نسبت به گرم کردن مواد به روش سنتی (کوره) دارد از جمله می‌توان به آماده‌سازی سریع، عملیات حرارتی موضعی برای شکل‌دهی فلزات و کنترل عمق گرمای تولید شده در قطعه کار اشاره کرد.

در عمل، طراحی دستگاه‌های گرمای القایی برای کاربردهای متفاوت براساس فرایند آزمون و خطا معمولاً طولانی و پرهزینه هستند. همچنین اندازه‌گیری بسیاری از عوامل‌های آن (مانند بسامد جریان؛ دما، توزیع گرما و...) دشوار است، بنابراین مدل‌سازی و مطالعه عددی با استفاده کامپیوتر روش مناسبی برای طراحی و بررسی دستگاه‌های گرمای القایی می‌باشند. شکل ۱ نمایی از یک دستگاه گرمای القایی را نشان می‌دهد که در آن جریان متناوب (AC) در حال شارش درون پیچه منجر به ایجاد میدان‌های الکترومغناطیسی متغیر با زمان می‌گردند. این میدان‌های متغیر هم جریان‌های القایی (جریان‌های گردابی) در قطعه کار ایجاد می‌کنند، بنابراین این جریان‌ها هم با توجه به اثر ژول عامل تولید گرما در قطعه کار می‌باشند [۳].

تا کنون، مقالات بسیار زیادی در مورد شبیه‌سازی فرایند گرمای القایی نوشته شده که در بیشتر آنها از مدل دوبعدی با تقارن محوری استفاده شده است. در اینجا به برخی از مقالات که در حوزه شبیه‌سازی فرایند گرمای القایی با استفاده از روش المان محدود^۱ ارائه شده اشاره می‌کنیم. چابودس و همکاران پیچهای با شکل هندسی متقارن به روش عناصر متناهی در دوبعد شبیه‌سازی کردند و نشان دادند که نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی توافق خوبی را نشان می‌دهد و یکی از دلایل خطای

۱. Finite Element Method (FEM)



شکل ۲. نمای هندسی دو نوع پیچ (الف) پیچ چندحلقه‌ای بیرونی ساده (راست) و دو حلقه‌ای پروانه‌ای مانند (چپ). (ب) پیچ چند حلقه‌ای درونی [۱۲].

القارگر برای کاربردهای متفاوت شکل‌های بسیار پیچیده‌ای دارد، بنابراین القارگرها مطابق با کاربردشان طراحی می‌شوند و طراحی درست آنها کلید رسیدن به گرمادهی بهینه است. عموماً، سطح مقطع القارگرها دارای شکل ساده دایره‌ای یا مربعی و در مواردی هم مستطیلی است، اما شکل پیچیده قطعه کارها می‌توانند شکل القارگرها را پیچیده‌تر کنند. یک پیش تحلیل با روش المان محدود اغلب برای بهبود نتایج اولیه لازم است، اما در مورد طراحی شکل ساده یک القارگر، اغلب فرایند آزمون و خطا و تجربه کافی است [۱۰]. در فرایند گرمای القایی پیچ‌های که اطراف قطعه کار را احاطه می‌کنند (پیچ‌های بیرونی یا نوع اول) پیچ‌های با بیشترین کار آمد هستند و در بیشتر کاربردها به عنوان گرم کننده قسمت‌های بیرونی قطعه کار استفاده می‌شوند (شکل ۲ (الف)). دسته‌ای دیگر از پیچ‌ها هستند که در داخل قطعه کار قرار می‌گیرند و به پیچ‌های داخلی (نوع دو) معروف هستند و در موارد خاص کاربرد دارند به ویژه وقتی که هدف گرم کردن داخل یک استوانه یا هر چیزی دیگری باشد (شکل ۲ (ب)). انتخاب تعداد حلقه‌ها در هر پیچ به مقدار توان تولیدی لازم، الگوی گرمای تولید شده و فرایند مورد نیاز بستگی دارد [۱۱].

در این مقاله، با استفاده از روش المان محدود، یک دستگاه گرمای القایی در مدل سه‌بعدی برای پیچ‌های تک‌حلقه‌ای، دو حلقه‌ای، سه حلقه‌ای و چهار حلقه‌ای شبیه‌سازی شده است. مقادیر شدت و توزیع چگالی شار مغناطیسی، چگالی جریان‌های گردابی (در قطعه کار)، تولید گرمای حجمی (در پیچ و قطعه کار) و بازده مربوط به هر کدام از پیچ‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ حلقه‌ای محاسبه شده است. همچنین تأثیر تعداد حلقه‌ها بر چگالی جریان القایی و گرمای تولید شده در قطعه کار بررسی شده و نتایج به دست آمده با هم مقایسه شده‌اند.

۲. مدل ریاضی

برای به دست آوردن میدان‌های الکترومغناطیسی معادلات ماکسول باید حل شوند. بدین منظور فرض‌های زیر لحاظ شده‌اند: (۱) دستگاه همسانگرد و خطی است. (۲) همه مواد غیرمغناطیسی و فاقد بار الکتریکی خالص می‌باشند. (۳) چگالی جریان جابجایی نادیده گرفته شده و چگالی جریان رانشی درون پیچ، به طور یکنواخت توزیع شده است. با این فرض‌ها معادلات ماکسول به صورت زیر در می‌آیند [۵ و ۶].

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}, \quad (4)$$

به طوری که \mathbf{E} میدان الکتریکی، \mathbf{B} چگالی شدت میدان مغناطیسی، \mathbf{J} چگالی جریان بار آزاد، μ_0 تراوایی مغناطیسی در خلاء است.

با حل معادلات (۱) الی (۴) و با توجه به رابطه پتانسیل

در این مقاله، با استفاده از روش المان محدود، یک دستگاه گرمای القایی در مدل سه‌بعدی برای پیچ‌های تک‌حلقه‌ای، دو حلقه‌ای، سه حلقه‌ای و چهار حلقه‌ای شبیه‌سازی شده است. مقادیر شدت و توزیع چگالی شار

f بسامد، μ_r نفوذپذیری مغناطیسی نسبی و ρ مقاومت ویژه قطعه کار است. چون توزیع جریان گردابی در داخل رسانا (قطعه کار) یکنواخت نیست بنابراین بیشینه چگالی جریان در لایه‌ای از سطح رسانا متمرکز می‌شود و این چگالی جریان القایی از سطح رسانا به داخل آن مطابق معادله (۱۳) به طور نمایی افت می‌کند [۱].

$$J_r = J_0 \exp(-(r_0 - r)/\delta), \quad (12)$$

که در آن r_0 شعاع قطعه کار، J_r چگالی جریان در فاصله r از مرکز رسانا و J_0 چگالی جریان در سطح رسانا (در r_0) است.

چگالی توان گرمای تولید شده (Q_r) با مربع چگالی جریان القایی متناسب است، یعنی $Q_r = \rho J_r^2$. مطابق با معادله (۱۳) گرمای تولید شده هم از سطح قطعه کار به طرف مرکز آن بطور نمایی افت می‌کند. همچنین حدود ۸۵٪ از کل توان تولید شده در لایه نازکی از سطح قطعه کار (δ) متمرکز است [۳]

$$Q_r = Q_0 \exp(-2(r_0 - r)/\delta). \quad (13)$$

۳. شرایط محاسبات

کیفیت شبکه‌بندی اثر زیادی روی دقت محاسبات دارد بنابراین هر چه اندازه المان‌ها کوچک‌تر باشد دقت جواب‌ها بیشتر می‌شود. برای هر چهار نوع پیچ (تک‌حلقه‌ای، دو حلقه‌ای، سه حلقه‌ای و چهار حلقه‌ای) کیفیت شبکه‌بندی برای پیچ، قطعه کار و فضای اطراف به ترتیب بسیار ریز، فوق‌العاده ریز و معمولی لحاظ شده است. اثر تعداد حلقه‌های پیچ روی عوامل‌های مورد محاسبه با استفاده از روش المان محدود و به کمک بسته نرم‌افزاری کامسول مولتی فیزیک^۳ نسخه پنج و دو دهم برای حل عددی معادلات ریاضی حاکم بر دستگاه استفاده شده است. در این محاسبات ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی برابر با یک ($\mu_r \cong 1$) در نظر گرفته شده و از ولتاژ ۲۰۰ ولت

بردار مغناطیسی \mathbf{A} با شدت میدان مغناطیسی ($\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$)، برای موادی با ویژگی‌های همسانگرد و همچنین با اعمال جریان متناوب برای پتانسیل برداری مغناطیسی داریم [۱۴]

$$\nabla^2 \mathbf{A} + \omega^2 \mu \epsilon \mathbf{A} - i \omega \mu \sigma \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J}_{\text{ext}}, \quad (5)$$

که در آن \mathbf{J}_{ext} چگالی جریان منبع در پیچ، ω بسامد زاویه‌ای، μ نفوذپذیری مغناطیسی، ϵ گذردهی و σ ضریب رسانندگی الکتریکی قسمت‌های رسانا است.

با در نظر گرفتن جریان اعمالی به پیچ به صورت

$$\mathbf{J}_{\text{ext}} = J_0 \cos \omega t$$

$$\mathbf{A}(x, y, z, t) = \mathbf{A}_0(x, y, z) \exp(i \omega t), \quad (6)$$

که در آن $\mathbf{A}_0(x, y, z)$ دامنه مختلط است. با اعمال شرایط مرزی بر دستگاه، برای نقاط دور از دستگاه شرایط زیر اعمال می‌شود

$$\mathbf{A}_0 = 0, \quad (7)$$

با در نظر گرفتن اثر خودالقایی پیچ، جریان کل در حال شارش درون آن به صورت زیر به دست می‌آید

$$\mathbf{J}_{\text{total}}^{\text{coil}} = \mathbf{J}_{\text{eddy}} + \mathbf{J}_{\text{ext}}, \quad (8)$$

به طوری که \mathbf{J}_{eddy} چگالی جریان القا شده در قطعه کار است و از رابطه زیر به دست می‌آید

$$\mathbf{J}_{\text{eddy}} = -\sigma_w \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (9)$$

که در آن σ_w رسانندگی قطعه کار است.

میزان گرمای تولید شده ناشی از جریان القا شده در پیچ و قطعه کار از روابط زیر به دست می‌آید

$$\begin{cases} q_{\text{coil}} = \frac{|-i \omega \sigma A_0 + J_0|^2}{2 \sigma}, \\ q_w = \frac{|-i \omega \sigma A_0|^2}{2 \sigma}, \end{cases} \quad (10)$$

عمق نفوذ δ به عنوان فاصله‌ای از سطح رسانا تعریف می‌شود که در آن چگالی جریان به مقدار e^{-1} بار کوچک‌تر از چگالی جریان در سطح است. عمق نفوذ با در نظر گرفتن فرضیات مذکور و با استفاده از معادلات ماکسول با رابطه زیر داده می‌شود [۱، ۳ و ۶]

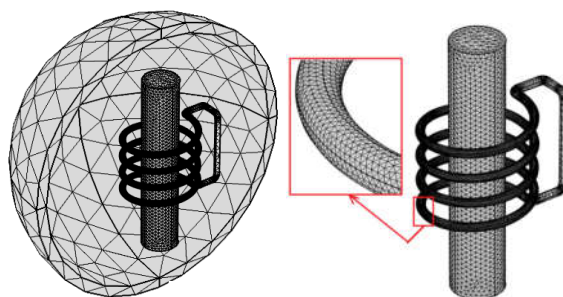
$$\delta = 50.3 \sqrt{\rho / \mu_r f}, \quad (11)$$

۱. Meshing

۲. COMSOL MULTIPHYSICS

جدول ۱. عوامل‌های عملیاتی مورد استفاده در محاسبات.

مقادیر (cm)	توضیحات	
۹٫۲	شعاع داخلی	مشخصات پیچ‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ حلقه‌ای
۱۰٫۸	شعاع خارجی	
۰٫۸	شعاع سطح مقطع	
۵	اندازه گام	
۰٫۳۶	ضخامت دیواره حلقه	قطعه کار
۵۰	طول	
۵	شعاع	



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمایشی از شبکه‌بندی پیچ و قطعه کار و فضای اطراف آن.

جدول ۲. گرمای حجمی تولید شده در پیچ و قطعه کار.

پیچ‌ها	تعداد المان‌ها در پیچ	پیچ (kW)	قطعه کار (kW)	بازده (%)
تک حلقه‌ای	۵۸۵۱۰	۳۵۷	۱۲۲	۲۵/۴۷
دو حلقه‌ای	۷۷۲۳۳	۱۴۵	۸۲	۳۶/۱۲
سه حلقه‌ای	۱۱۵۶۲۵	۸۵	۶۰	۴۱/۳۷
چهار حلقه‌ای	۱۵۳۲۶۲	۵۹	۴۸	۴۴/۸۵

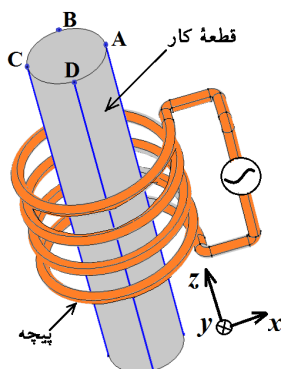
تعداد حلقه‌های پیچ مطابق با جدول ۲ افزایش می‌یابد. در شکل ۴ فقط برای پیچ ۴ حلقه‌ای در مدل سازی خصوصیات هندسه مسئله و چهار راستای متفاوت در روی قطعه کار که با توجه به موقعیت پیچ و قطعه کار تعیین می‌شوند (یعنی راستاهای A، B، C و D) انتخاب و ترسیم شده است.

۴. نتایج و بحث

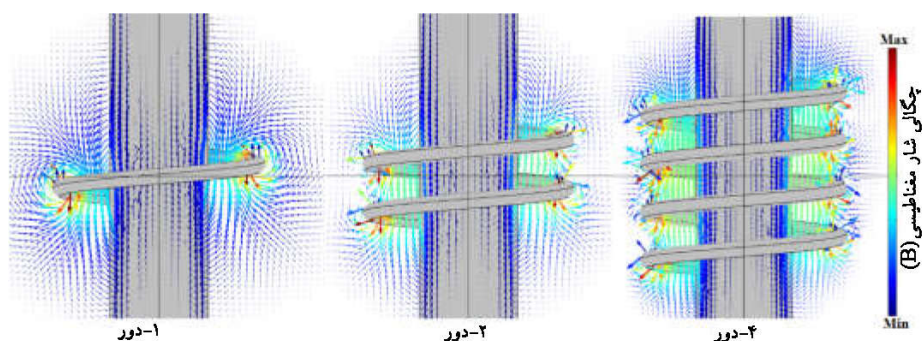
در این بخش نتایج به دست آمده از محاسبات عددی برای به دست آوردن چگالی شار میدان مغناطیسی، چگالی جریان القایی، الگو و مقدار گرمای تولید شده در پیچ و قطعه کار برای پیچ‌های تک حلقه‌ای، دو حلقه‌ای، سه حلقه‌ای و چهار حلقه‌ای با

با بسامد ۱۰۰۰ هرتز برای تولید میدان‌های الکترومغناطیسی استفاده شده است. پیچ از جنس مس با سطح مقطع دایره‌ای، با ضریب رسانندگی $[S/m] \times 10^7 = 5.9$ ، قطعه کار از جنس فولاد^۱ (فولاد زنگ نزن) به شکل استوانه با ضریب رسانندگی $[S/m] \times 10^6 = 4.7$ و سایر عوامل‌های مورد استفاده در محاسبات در جدول ۱ ارائه شده است. در شکل ۳ برای نمونه فقط نمایشی از شبکه‌بندی برای پیچ ۴ حلقه‌ای در مدل سه بعدی نشان داده شده است. تعداد المان‌ها در قطعه کار در هر چهار نوع پیچ یکسان و برابر با ۲۶۹۶۴ عدد المان است، اما تعداد المان‌ها در پیچ‌ها (القاگرها) برای هر چهار حالت متفاوت است و با افزایش

۱. Steel AISI 4340



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمایی از هندسه مسئله در در مدل سه‌بعدی.



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) توزیع شدت میدان مغناطیسی برای پیچه‌های ۱، ۲ و ۴ حلقه‌ای.

روبروی قطعه کار است قوی‌تر است که در واقع همان اثر حلقه و اثر مجاورت را نشان می‌دهند [۳ و ۶]. نفوذ میدان مغناطیسی به داخل اجسام رسانا (قطعه کار)، همان طور که از شکل ملاحظه می‌شود، به دلیل میرا شدن میدان مغناطیسی در رساناها تا عمق کمی از سطح رسانا به داخل آن نفوذ می‌کند. گرادیان چگالی شار مغناطیسی (بین قطعه کار و پیچه) در راستای محور Zها از مرکز پیچه به سمت دو انتها کاهش می‌یابد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که شار میدان مغناطیسی بیشتر در نزدیک رساناها و تقریباً تا عمق کمی از سطح آنها متمرکز شده و در خارج از رساناها و در فاصله نسبتاً دور بسیار تضعیف شده و به صفر میل می‌کند.

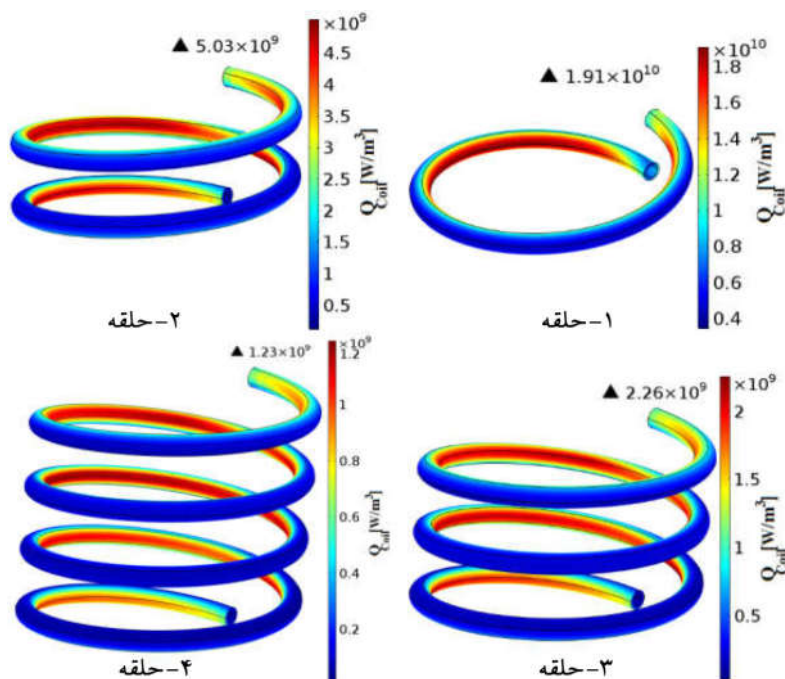
۴.۲. گرمای تولید شده در پیچه‌ها

نمای پیچه‌ها برای چهار حالت متفاوت در شکل ۶ نشان داده شده است، با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که شدت و

استفاده از روش المان محدود در مدل سه‌بعدی فرایند گرمای القایی در چهار بخش تشریح و تفسیر شده است.

۴.۱. چگالی شار میدان مغناطیسی

شکل ۵ شدت و توزیع چگالی شار مغناطیسی برای چهار نوع پیچه مورد نظر (به جز پیچه سه‌حلقه‌ای) در مدل سه‌بعدی ترسیم شده است. با افزایش تعداد حلقه‌ها خطوط شار مغناطیسی داخل حلقه منظم و تقریباً هم‌رستا با محور حلقه می‌شود. در واقع با افزایش تعداد حلقه‌ها شار مغناطیسی کاهش پیدا می‌کند، به دلیل این که ولتاژ اعمالی در هر چهار حالت یکسان است و با افزایش تعداد حلقه‌ها سهم ولتاژ هر کدام از آنها نیز کاهش می‌یابد، در نتیجه شدت میدان مغناطیسی در پیچه تک‌حلقه‌ای بیشتر است. همان طور که از شکل ملاحظه می‌شود شدت و توزیع چگالی شار میدان مغناطیسی در قسمت‌های از داخل سطح پیچه که



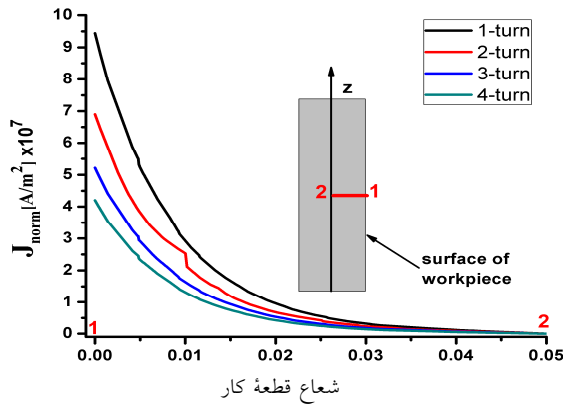
شکل ۶. توزیع و شدت گرما تولید شده در پیچه‌ها با تعداد حلقه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴.

مقدار جریان‌های به دست آمده از نتایج محاسبات برای پیچه‌های تک‌حلقه‌ای، ۲ حلقه‌ای، ۳ حلقه‌ای و ۴ حلقه‌ای به ترتیب برابر با: ۵۶۵۰ آمپر، ۲۴۰۰ آمپر، ۱۷۰۰ آمپر و ۱۴۲۰ آمپر است. که جریان در پیچه تک‌حلقه‌ای به ترتیب تقریباً ۲٫۳، ۳٫۳ و ۴ برابر پیچه‌های با تعداد حلقه‌های ۲، ۳ و ۴ است.

۴.۲.۱. جریان‌های القایی

توزیع و شدت چگالی جریان‌های گردابی در قطعه کار یکی از عوامل مهم در دستگاه گرمای القایی است که در چهار حالت برای پیچه‌های با تعداد حلقه‌های متفاوت بررسی شده است. با ملاحظه تصاویر در شکل ۷، قابل توجه است که جریان‌های گردابی بیشتر در لایه نزدیک سطح قطعه کار متمرکز است و این همان پدیده اثر پوستی [۱ و ۳] را نشان می‌دهد که در فرایند گرمای القایی رخ می‌دهد. به دلیل این که جریان اعمالی پیچه متناوب است بنابراین جهت جریان‌های القایی هم در قطعه کار حالت تناوبی به خود می‌گیرد. مقادیر بیشینه چگالی جریان القایی برای چهار

توزیع گرمای تولید شده در پیچه‌ها برای چهار نوع پیچه با تعداد حلقه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ متفاوت است. بیشینه گرمای تولید شده در پیچه‌های تک‌حلقه‌ای، ۲ حلقه‌ای، ۳ حلقه‌ای و ۴ حلقه‌ای به ترتیب برابر با ۱۹٫۱۰، ۵٫۰۳، ۲٫۲۶ و ۱٫۲۳ در $\left[\frac{W}{m^3}\right] \times 10^9$ است. در هر چهار نوع پیچه شدت و توزیع الگوی گرمای تولید شده بیشتر در قسمت داخلی پیچه‌ها و روبروی قطعه کار توزیع شده است که ناشی از پدیده اثر مجاورت است. با توجه به شکل، ملاحظه می‌شود که تغییرات شدت و توزیع گرمای تولید شده، به ویژه در دو سر پیچه‌ها، به طور یکنواخت در تمام سطح درونی پیچه توزیع نشده است. در پیچه تک‌حلقه‌ای گرما در کل حلقه به جز دوسر آن توزیع تقریباً یکنواختی دارد اما در پیچه‌های چند حلقه‌ای (۲، ۳ و ۴ حلقه‌ای) گرما بیشتر در حلقه‌های میانی متمرکز می‌شود. مقدار نسبی بیشینه توزیع و شدت گرمای تولید شده در پیچه‌ها با تعداد حلقه‌های ۲، ۳ و ۴ به پیچه تک‌حلقه‌ای به ترتیب در حدود ۲۶٪، ۱۱٪ و ۶٪ است. بنابراین با افزایش تعداد حلقه‌های پیچه، مقدار بیشینه شدت و توزیع گرما در آن کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که



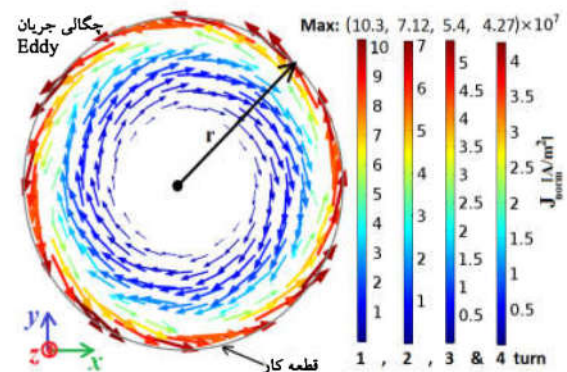
شکل ۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار اندازه جریان گردابی در راستای شعاع قطعه کار.

به طور نمایی مطابق با معادله (۱۳) افت می‌کند [۳ و ۹]. همچنین میرا شدن چگالی جریان در نقاط داخلی قطعه کار، در واقع پدیده میرا شدن امواج الکترومغناطیسی در فلزات را نشان می‌دهد [۱۵].

۳.۴. گرمای تولید شده در قطعه کار

براساس نتایج محاسبات به دست آمده بیشینه گرمای ایجاد شده در قطعه کار برای پیچ‌های با تعداد حلقه‌های متفاوت در شکل ۹ نشان داده شده است. با مشاهده این نتایج ملاحظه می‌شود که بیشینه گرمای ایجاد شده در قطعه کار مربوط به پیچ تک‌حلقه‌ای بوده و با افزایش تعداد حلقه در پیچ‌ها مقدار بیشینه گرمای تولید شده کاهش می‌یابد.

یکی از کاربردهای گسترده دستگاه گرمای القایی، فرایند سخت‌کنندگی القایی^۵ سطح فلزات است، بنابراین الگوی گرمای ایجاد شده و اندازه آن بر روی بدنه قطعه کار بسیار مهم است. همان طور که از تصاویر شکل ۹ مشاهده می‌شود الگوی گرمای ایجاد شده بر روی بدنه قطعه کار (سطح خارجی) مطابق با شکل هندسی پیچ است. لذا در پیچ تک‌حلقه‌ای تمرکز گرما بیشتر است و با افزایش تعداد حلقه‌ها در پیچ، عرض پهنای گرمای تولید شده افزایش یافته و متناظر با آن شدت گرما هم کاهش می‌یابد.

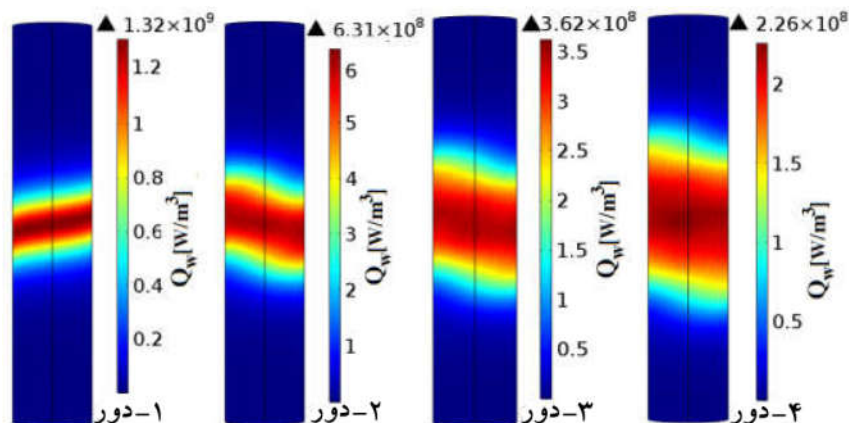


شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) توزیع چگالی جریان گردابی در سطح مقطع قطعه کار.

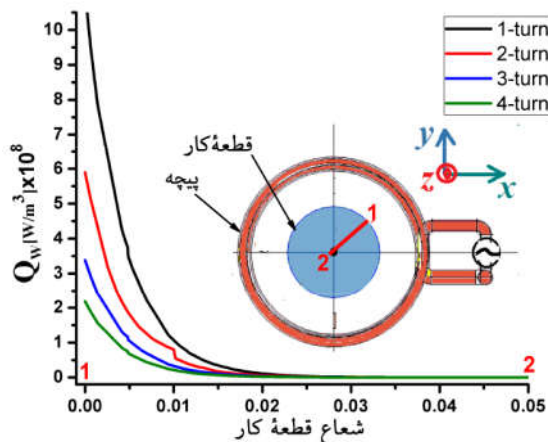
حالت متفاوت به ترتیب از پیچ تک‌حلقه‌ای الی ۴ حلقه‌ای عبارتند از، ۱۰/۳، ۷/۱۲، ۵/۴، ۴/۲۷ در $\left[\frac{A}{m^2}\right] \times 10^7$ است. با مقایسه این چهار حالت نتیجه می‌شود که با افزایش تعداد حلقه‌ها مقدار بیشینه شدت چگالی جریان گردابی کاهش پیدا می‌کند. مقدار نسبی بیشینه چگالی جریان گردابی پیچ‌های ۲، ۳ و ۴ حلقه‌ای نسبت به پیچ تک‌حلقه‌ای به ترتیب در حدود ۶۳٪، ۵۰٪ و ۴۰٪ است، بنابراین تغییرات شدت و توزیع چگالی جریان القایی با تعداد حلقه‌های پیچ رابطه عکس دارد.

یکی از مهم‌ترین عوامل‌های شبیه‌سازی فرایند گرمای القایی نحوه توزیع اندازه چگالی جریان‌های گردابی در راستای شعاعی قطعه کار است. شکل ۸ توزیع جریان‌های گردابی در داخل قطعه کار در راستای شعاع (در راستای نیم‌ساز ربع اول) را نشان می‌دهد. از مقطع‌های شکل ۸ ملاحظه می‌شود که افت چگالی جریان در راستای شعاعی به طور کلی برای هر چهار حالت به صورت نمایی بوده و تفاوت آنها فقط در اندازه است که با افزایش تعداد حلقه‌ها در شرایط ولتاژ و بسامد یکسان اندازه آنها کاهش می‌یابد.

با مشاهده شکل‌های ۷ و ۸ ملاحظه می‌شود که در هر چهار حالت چگالی جریان بیشتر در لایه نازکی از سطح قطعه کار متمرکز شده و از سطح قطعه کار به طرف مرکز آن



شکل ۹. (رنگی در نسخه الکترونیکی) توزیع و شدت گرمای تولید شده در قطعه کار برای پیچه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ حلقه‌ای.

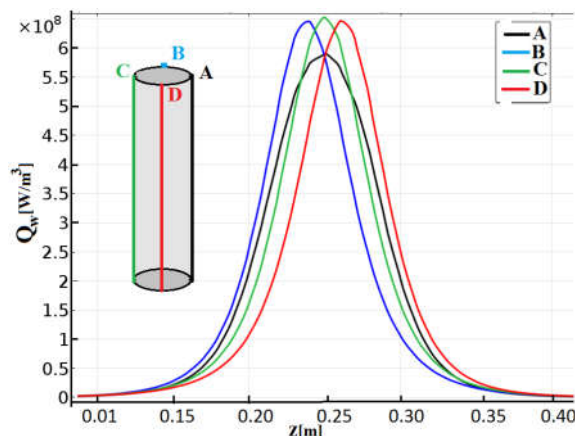


شکل ۱۰. (رنگی در نسخه الکترونیکی) توزیع و شدت گرما تولید شده در راستای شعاع کار در پیچه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ حلقه‌ای.

شده با شیب ملایم‌تری افت می‌کند. همان‌طور که اشاره شد تمرکز گرما تولید شده بیشتر در لایه نازکی از سطح قطعه کار است. همچنین عمق گرمای ایجاد شده در قطعه کار به بسامد اعمالی بستگی دارد (معادله (۱۱)) که هر چه بسامد بیشتر باشد عمق نفوذ کمتر خواهد بود [۳].

توزیع گرمای تولید شده در راستای محور قطعه کار برای مدل‌های دوبعدی و سه بعدی کاملاً متفاوت است. در مدل دوبعدی چون فرض می‌شود دستگاه دارای تقارن محوری است پس گرما در در روی سطح قطعه کار در هر راستا یکسان است، اما در مدل سه بعدی به دلیل عدم تقارن گرمای تولید شده در راستاهای مختلف روی سطح قطعه کار موازی محور آن متفاوت است. در این مقاله چهار راستای متفاوت

در شکل ۱۰ مقطع گرمای تولید شده در قطعه کار برای چهار پیچه با تعداد حلقه‌های متفاوت در راستای شعاع قطعه کار در نیمساز ربع اول ترسیم شده است و در حالت کلی مقطع گرما در راستاهای دیگر به همین منوال است و فقط به دلیل موقعیت پیچه و قطعه کار نسبت به هم دارای اختلاف جزئی می‌باشند. در هر چهار حالت گرمای تولید شده از سطح قطعه کار به طرف داخل آن در راستای شعاع به طور نمایی افت می‌کند. افت گرما در راستای شعاع از افت چگالی جریان القایی شدیدتر است به دلیل اینکه گرما با مربع چگالی جریان القایی متناسب است (معادله (۱۳)). افت گرما برای پیچه تک حلقه‌ای نسبت به سه حالت دیگر خیلی بیشتر است و با افزایش تعداد حلقه‌های پیچه، گرمای تولید



شکل ۱۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار گرمای حجمی قطعه کار برای پیچه تک حلقه‌ای در راستاهای A، B، C و D.

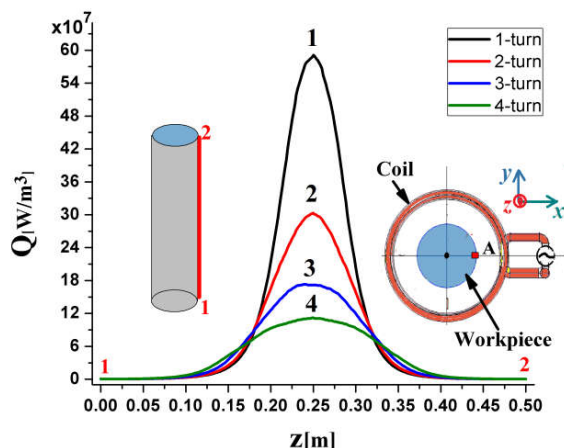
بالاتر از مرکز آن قرار دارد، بنابراین بیشینه گرما در راستای B به طرف پایین و در راستای D به طرف بالای مرکز قطعه کار جابه‌جا می‌شود.

مقطع گرمای روی سطح قطعه کار در راستای A موازی با محور آن برای چهار نوع پیچه با تعداد حلقه‌های متفاوت برای مقایسه گرمای تولید شده در شکل ۱۲ ترسیم شده است. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که برای هر چهار نوع پیچه گرمای تولید شده بیشتر در محدوده پیچه است با دور شدن از محدوده پیچه گرمای حجمی به شدت افت می‌کند و شیب افت گرما در پیچه تک حلقه‌ای خیلی بیشتر است و با افزایش تعداد حلقه‌ها این افت گرما با شیب ملایم‌تری رخ می‌دهد. یکی از برتری‌های دستگاه‌های گرمای القایی نسبت به روش‌های سنتی (کوره) این است که در روش سنتی کنترل گرما در ناحیه مورد نظر غیرممکن است اما در علمیات گرمای القایی می‌توان گرما را در قسمت‌های مورد نظر اجسام فلزی متمرکز کرد بدون این که نیاز به گرم کردن قسمت‌های دیگر یا کل فلز مورد نظر باشد.

در جدول ۲ تعداد المان‌های پیچه، مقادیر گرمای حجمی تولید شده در پیچه و قطعه کار و همچنین بازده برای هر چهار حالت پیچه نشان داده شده است. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که بیشترین گرمای ایجاد شده در قطعه کار مربوط به پیچه تک حلقه‌ای است و به ترتیب در حدود ۱/۵، ۲ و

که عبارتند از راستاهای A، B، C و D که در شکل ۴ ترسیم شده‌اند بررسی شده است.

برای ارزیابی بیشتر عملیات گرمای القایی در راستای محور قطع کار فقط حالت پیچه تک حلقه‌ای را بررسی می‌کنیم. در شکل ۱۱ مقطع گرمای تولید شده در چهار راستای متفاوت (راستاهای A، B، C و D در شکل) در سطح قطعه کار در جهت محور آن برای پیچه تک حلقه‌ای در سه بعد ترسیم شده است. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که گرمای تولید شده برای چهار راستای A، B، C و D در روی سطح قطعه کار متفاوت است. به عبارت دیگر به دلیل شکل نامتقارن پیچه، شدت و توزیع گرمای ایجاد شده در راستاهای مختلف در طول قطعه کار و همچنین در یک مسیر دایره‌ای از سطح مقطع آن در روی سطح قطعه کار متفاوت است. مقطع‌های گرمای تولید شده مربوط به دو راستای A و C دارای تقارن هستند و بیشینه گرمای تولید شده در وسط قطعه کار قرار می‌گیرد با این تفاوت که در راستای نقطه A پهنای گرمای تولید شده بیشتر و مقدار بیشینه آن هم کمتر است. جابه‌جای بیشینه گرمای تولید شده برای مقطع‌های که در دو راستاهای B و D هستند اتفاق می‌افتد. همچنین در این دو راستا (راستای B و D) بیشینه‌های گرمای ایجاد شده در دو جهت مخالف هم جابه‌جا می‌شود به دلیل اینکه حلقه پیچه در نقطه B پایین‌تر از مرکز قطعه کار و در نقطه D



شکل ۱۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودارهای گرمای حجمی قطعه کار در راستای A برای پیچ‌های؛ ۱، ۲، ۳ و ۴ حلقه‌ای.

مدل‌سازی اغلب برای بهبود نتایج اولیه و رسیدن به گرمادهی بهینه بدون صرف هزینه و زمان ضروری به نظر می‌رسد. فرایند گرمای القایی یک فرایند بسیار پیچیده است که تغییر هر کدام از عوامل‌های آن می‌تواند تأثیر بسیار زیادی بر توزیع و شدت میدان‌های الکترومغناطیسی، جریان‌های القایی و گرمای ایجاد شده در پیچه و قطعه کار داشته باشد. نتایج به دست آمده از محاسبات عددی برای چهار حالت متفاوت پیچه‌های، تک حلقه‌ای، ۲ حلقه‌ای، ۳ حلقه‌ای و ۴ حلقه‌ای نشان می‌دهد که:

- مقدار توان تولیدی و الگوی گرمای ایجاد شده به تعداد حلقه‌های پیچه بستگی دارد.
- در پیچه‌های تک حلقه‌ای و چندحلقه‌ای، به طور کلی چگالی جریان بیشتر در لایه نازکی از سطح قطعه کار متمرکز شده و از سطح قطعه کار به طرف مرکز آن به طور نمایی افت می‌کند.
- الگوی گرمای ایجاد شده و مقادیر گرمای حجمی تولید شده در قطعه کار برای حالت تک حلقه‌ای اختلاف زیادی با سه حالت دیگر دارد. همچنین تغییرات گرمای حجمی برای سه حالت دیگر با افزایش حلقه‌های پیچه با شیب ملایمی کاهش می‌یابد.
- بازده پیچه‌ها با افزایش تعداد حلقه‌های پیچه افزایش می‌یابد.

۲/۵ برابر پیچه‌های دو حلقه‌ای، ۳ حلقه‌ای و ۴ حلقه‌ای است. نکته قابل ملاحظه این است که مقدار گرمای تولید شده در پیچه تک حلقه‌ای نسبت به پیچه‌های چند حلقه‌ای تفاوت خیلی زیادی دارد تقریباً در حدود ۲/۵ برابر پیچه دو حلقه‌ای، ۴ برابر پیچه سه حلقه‌ای و ۶ برابر پیچه چهار حلقه‌ای است، در حالی که این روند کاهش گرمای تولید شده در پیچه‌های چند حلقه‌ای با افزایش تعداد حلقه‌ها کندتر رخ می‌دهد.

همان طور که اشاره شد کاهش گرمای تولید شده در قطعه کار از حالت تک حلقه‌ای به حالت چند حلقه‌ای خیلی سریع و در سه حالت دیگر به کندی این تغییرات رخ می‌دهد. دلیل کاهش سریع گرمای تولید شده را می‌توان ناشی از تقسیم ولتاژ اعمالی بین تعداد حلقه‌ها دانست. به عبارت دیگر با افزایش تعداد حلقه‌های پیچه ولتاژ هر پیچه کاهش می‌یابد. بنابراین به نسبت آن تمرکز خطوط میدان مغناطیسی دورن حلقه هم کاهش پیدا خواهد کرد و خود این باعث کاهش شدید میدان‌های الکترومغناطیسی القایی در قطعه کار می‌گردد. همچنین گرمای تولید شده در قطعه کار برای پیچه‌های تک حلقه‌ای، ۲ حلقه‌ای، ۳ حلقه‌ای و ۴ حلقه‌ای به ترتیب در حدود ۲۶٪، ۳۶٪، ۴۱٪ و ۴۵٪ کل گرمای تولید شده در پیچه و قطعه کار است.

۵. نتیجه گیری

برای طراحی القاگرها با استفاده از محاسبات عددی به کمک

نتایج نشان می‌دهد که برای طراحی یک دستگاه گرمای القایی بهینه و الگوی گرمای تولید شده روی قطعه کار تعداد

حلقه‌های پیچه می‌تواند تأثیر بسیار زیادی داشته باشد.

مراجع

1. S Lupi, M Forzan, and A Aliferov, "Induction and Direct Resistance Heating", Springer (2015) 1.
2. M Fisk, "Simulation of Induction Heating in Manufacturing", Thesis, Luleå University of Technology (2008).
3. V Rudnev, D Loveles, R Cook, and M Black. "Handbook of Induction Heating", Marcel Dekker, Inc, New York, NY (2003) 100.
4. C Chaboudez, S Clain, R Glardon, D Mari, J Rappaz, and M Swierkosz, *IEEE Transactions on Magnetics*, **33**, 1 (1997) 739.
5. J Jang and Y Chiu, *Appl. Therm. Eng.* **27** (2007) 1883.
6. M H Tavakoli, H Karbaschi, F Samavat, and E Mohammadi-Manesh, *Journal of Crystal Growth* **312** (2010) 3198.
7. K Gao, X Qin, Z Wang, Sh Zhu, and Z Gan, *J. Mater. Process. Technol.* **23** (2016) 125.
8. H Khodamoradi, M H Tavakoli, and K Mohammadi, *Journal of Crystal Growth* **421** (2015) 66.
9. X Zhou, "Heat Transfer During Spray Water Cooling Using Steady Experiments," MS. Thesis. University of Illinois, Urbana-Champaign (2009).
10. E Haye, "Industrial Solutions for Inductive Heating of Steels", Thesis, Luleå University of Technology (2013).
11. L Zhang, "Numerical Modeling of Induction Assisted Subsurface Heating Technology", Thesis, Worcester Polytechnic Institute (2012).
12. R E Haimbaugh, "Practical Induction Heat Treating," Thesis, Materials Park (2001).
13. M H Tavakoli, *Crystal Growth & Desig* **8**, 2 (2008) 483.
14. X Zhou, B G Thomas, C A Hernandez, A H Castillejos, and F A Acosta, *Journal of Applied Mathematical Modeling*, **37** (2013) 3181.
15. J R Reitz, F J Milford, and R W Christy, "Foundation of Electromagnetic Theory", John Wiley & sons, New York (1992).