

## مطالعه عددی تأثیر گام پیچه بر فرآیند گرمای القایی در سه بعد

عبدالجبار شکری<sup>۱</sup>، محمدحسین توکلی<sup>۲\*</sup>، امیرعباس صبوری دودران<sup>۳</sup>، محمدصادق آخوندی خضرآباد<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه پیام نور تهران شرق، ۲- دانشیار، دانشگاه بوعلی سینا، ۳- دانشیار، ۴- استادیار، دانشگاه پیام نور تهران (دریافت: ۹۶/۰۳/۲۴، پذیرش: ۹۶/۰۷/۰۴)

**چکیده:** در این مقاله با استفاده از روش عناصر متناهی (FEM) اثر گام‌های پیچه در فرآیند گرمای القایی محاسبه شده است. در ابتدا یک پیچه تک حلقه‌ای با تقارن محوری (بدون گام) در نظر گرفته شده و سپس پیچه‌هایی با گام‌های ۳cm، ۵cm و ۷cm لحاظ شده‌اند. از ولتاژ ۲۰۰ ولت متناوب با فرکانس ۱ kHz، که به دو سر پیچه اعمال شده، به عنوان منبع تولید میدان‌های الکترومغناطیسی بهره گرفته شده است. نتایج حاصل از محاسبات نشان می‌دهد که توزیع و شدت میدان‌های الکترومغناطیسی، چگالی جریان‌های گردابی در داخل قطعه کار و همچنین گرمای حجمی تولید شده در پیچه و قطعه کار برای حالت بدون گام (گام صفر) تفاوت زیادی با سه حالت دیگر (یعنی حالت‌های با گام‌های ۳cm، ۵cm و ۷cm) دارد.

### کلیدواژه‌ها: فرایند گرمای القایی، روش عناصر متناهی، شبیه‌سازی

#### ۱- مقدمه

فرایند گرمای القایی یک تکنولوژی بسیار انعطاف‌پذیری است و به‌طور گسترده در تمام صنایع از قبیل ذوب فلزات، رشد بلور، سخت‌شدگی، حتی پخت و پز و غیره کاربرد دارد. همچنین فرایند گرمای القایی برای گرمادهی دقیق‌تر و کنترل شده تنها بخش‌هایی از یک شمش فلزی (قطعه کار) که نیاز به فرم‌دهی دارد و یا مناطق مختلفی از آن که لازم است در دماهای مختلف گرم شوند، می‌تواند بسیار مفید و مقرون به صرفه باشد. با توجه به خصوصیات سیستم القاگر و قطعه کار، مدل‌های اولیه برای درک رفتار عملکرد این فرایندها مبتنی بر روش‌های تحلیلی بود هرچند که این روش‌ها برای تجزیه و تحلیل رفتار کلی عملکرد مفید بودند، اما به اندازه کافی برای تجزیه و تحلیل دقیق نبوده و یا محدود به هندسه‌های ساده سیستم‌های گرمای القایی بودند. با ظهور کامپیوترهای پیشرفته، روش‌های عددی رشد فوق‌العاده‌ای را تجربه کردند و کاربرد آنها در حوزه گرمای القایی وسیع‌تر شد. در حال حاضر، برای دوری از فرایند آزمون و خطا در طراحی سیستم‌های گرمای القایی تعداد زیادی از نرم‌افزارهای تجاری وجود دارند که برای تجزیه و تحلیل شکل‌های پیچیده با دقت بالا استفاده می‌شوند، در نتیجه هزینه‌های طراحی را به حداقل می‌رسانند [۱-۲].

فرایند گرمای القایی یک روشی است که توسط آن مواد رسانا (به‌طور کلی فلزات و همچنین مواد مذاب رسانا) با استفاده از روش غیر تماسی در یک میدان الکترومغناطیسی متناوب گرم می‌شوند. از آنجا که گرمای تولید شده در قطعه کار بستگی به اندازه جریان الکتریکی گردابی دارد که در لایه سطحی شارش می‌یابد، در نتیجه گرما به‌طور عمده در همان لایه سطحی متمرکز می‌شود. بنابراین، می‌توان با اعمال جریان الکتریکی با فرکانس مشخص در پیچه عمق گرمای تولیدشده در قطعه کار را کنترل کرد که در واقع یکی از مزیت‌های سیستم گرمای القایی نسبت به روش‌های سنتی (کوره) است [۳].

یک سیستم گرمای القایی معمولی شامل منبع تغذیه، مبدل فرکانس، القاگر، قطعه کار، سیستم کنترل و سیستم خنک‌کننده است [۲]. در فرایند گرمای القایی شارش یک جریان متناوب در رسانا (پیچه) باعث ایجاد یک میدان مغناطیسی متناوب در فضای اطراف پیچه می‌شود که با قراردادن یک قطعه کار در این میدان (ترجیحاً در داخل پیچه) جریان‌های گردابی در آن به وجود می‌آید و به دلیل اثر ژول ( $I^2R$ ) گرما در قطعه کار پدیدار می‌شود [۳]. جهت جریان گردابی داخل قطعه کار دقیقاً در خلاف جهت جریان اصلی پیچه است همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است.

شبیه‌سازی شده است. ابتدا یک پیچ‌های دارای تقارن محوری (با گام صفر) لحاظ شده و سپس پیچ‌هایی با گام‌های ۳، ۵ و ۷ cm در نظر گرفته شده‌اند. توزیع‌های چگالی شار مغناطیسی، چگالی جریان‌های گردابی درون قطعه کار و گرمای تولیدشده در پیچ و قطعه کار با حل معادلات الکترومغناطیسی حاکم بر سیستم و با استفاده از روش عناصر متناهی (FEM)، محاسبه گردیده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

## ۲- مدل ریاضی

برای به دست آوردن میدان‌های الکترومغناطیسی معادلات ماکسول باید حل شوند. بدین منظور فرض‌های زیر لحاظ شده‌اند: (۱) سیستم 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، بطور یکنواخت توزیع شده است. تحت این فرض‌ها معادلات ماکسول به صورت زیر در می‌آیند [۸-۶].

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

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

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

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (4)$$

به طوری که E میدان الکتریکی، B چگالی شدت میدان مغناطیسی، J چگالی جریان بار آزاد،  $\mu_0$  تراوایی مغناطیسی در خلاء می‌باشد.

با حل معادلات (۱) الی (۴) و با توجه به رابطه پتانسیل برداری مغناطیسی 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 [۵ و ۸]:

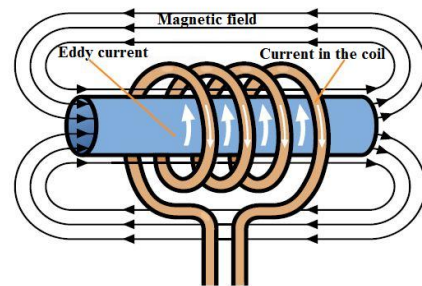
$$\nabla^2 \mathbf{A} + \omega^2 \mu \epsilon \mathbf{A} - i\omega \sigma \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J}_{ext} \quad (5)$$

که در آن،  $\mathbf{J}_{ext}$  چگالی جریان منبع در پیچ،  $\omega$  بسامد زاویه‌ای،  $\mu$  نفوذپذیری مغناطیسی،  $\epsilon$  گذردهی و  $\sigma$  ضریب رسانندگی الکتریکی قسمت‌های رسانا است. با در نظر گرفتن جریان اعمالی به پیچ به صورت  $\mathbf{J}_{ext} = \mathbf{J}_0 \cos \omega t$ , داریم:

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

که در آن،  $\mathbf{A}_0(x, y, z)$  دامنه مختلط می‌باشد. با اعمال

با توجه به این که یکی از کاربردهای مهم گرمای القایی در زمینه فرآیند رشد بلور (از جمله رشد بلور به روش چکرالسکی) می‌باشد، بنابراین، طراحی یک سیستم بهینه تأثیر بسیار زیادی بر کیفیت بلور در حال رشد دارد. از آنجای که پیچ‌های یکی از قسمت‌های مهم سیستم گرمای القایی است پس طراحی بهینه پیچ اثر زیادی بر میزان و توزیع گرمای تولید شده و به تبع آن توزیع دما در قسمت‌های فلزی دارد. در سال‌های اخیر، از روش عناصر متناهی بر پایه مدل‌سازی کامپیوتری در تحلیل جنبه‌های مختلفی از فرایند گرمای القایی استفاده شده که این مدل‌ها قادر هستند فاکتورهای را که در بهینه‌سازی گرمای القایی موثرند پیش‌بینی کنند و از هزینه‌های ناشی از خطا و آزمون بکاهند. در اینجا می‌توان به برخی از کارهای مهم انجام شده در زمینه شبیه‌سازی فرایند گرمای القایی اشاره کرد. توکلی و همکاران [۲] در سال ۲۰۰۹ اثر هندسه پیچ بر سیستم رشد بلور در فرایند گرمای القایی را بررسی کردند و نشان دادند که چگونگی طراحی پیچ اهمیت حیاتی در کیفیت رشد بلور دارد. جانگ و چو [۴] در سال ۲۰۰۷ اثر اندازه قطعه کار و گاف هوا بین قطعه کار و پیچ 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.

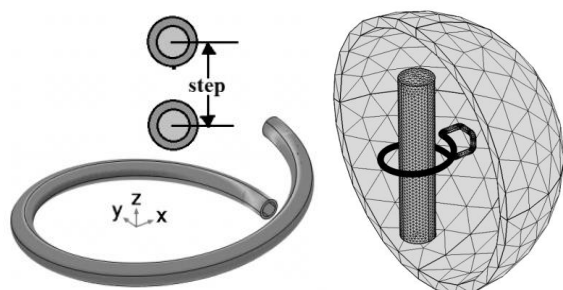


شکل (۱): نمایی از یک سیستم گرمای القایی.

در بیشتر مقالات در حوزه فرایند گرمای القایی از روش عناصر متناهی با استفاده از مدل شبیه‌سازی دوبعدی؛ توزیع دما، جریان گردابی، شدت میدان‌های الکترومغناطیسی و ... بررسی شده و نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و توافق خوبی را نشان داده‌اند [۱ و ۵]. در شبیه‌سازی دوبعدی پیچ‌ها به صورت متقارن و هر حلقه به صورت دایره‌ای کامل فرض می‌شود بنابراین، نمی‌توان اثر گام حلقه‌ها را که یکی از پارامترهای مهم در طراحی پیچ‌ها است در دوبعد شبیه‌سازی کرد، بنابراین، استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی یک امر مهم و اجتناب‌ناپذیر است.

در این مقاله با استفاده از روش عناصر متناهی، اثر گام یک پیچ تک حلقه‌ای برای چهار مقدار متفاوت آن در حالت سه‌بعدی

مولتی فیزیک (COMSOL MULTIPHYSICS 5.2) برای حل عددی معادلات ریاضی حاکم بر سیستم 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 با فرکانس ۱۰۰۰ هرتز برای تولید میدان مغناطیسی استفاده شده است. پیچه از جنس مس با سطح مقطع دایره‌ای، با ضریب رسانندگی  $5.9 \times 10^7$  [s/m] و قطعه کار از جنس فولاد به شکل استوانه با ضریب رسانندگی  $4 \times 10^6$  [s/m] و سایر پارامترهای مورد استفاده در محاسبات در جدول (۱) ارائه شده است. شکل (۲-الف) تصویری از شبکه بندی سیستم مورد نظر را نشان می‌دهد که بطور میانگین هر پیکربندی شامل حدود ۴۲۳۰۰۰ عنصر می‌باشد. همچنین خصوصیات هندسه مسأله در شکل (۲-ب) ترسیم شده است.



شکل (۲): الف) نمایی از شبکه بندی پیچه و قطعه کار و ب) نمایی از هندسه مسئله در مدل سه بعدی.

جدول (۱): پارامترهای مورد استفاده در محاسبات

توضیحات	علائم	مقادیر (cm)
پیچه	شعاع داخلی	۹/۲
	شعاع خارجی	۱۰/۸
	شعاع سطح مقطع	۰/۸
قطعه کار	طول	۵۰
	شعاع	۵
گام‌های پیچه	پیچه اول	Step 0
	پیچه دوم	Step 3
	پیچه سوم	Step 5
	پیچه چهارم	Step 7

## ۴- نتایج و بحث

### ۴-۱- شار میدان مغناطیسی

توزیع و شدت میدان مغناطیسی برای یک پیچه تک حلقه‌ای با چهار گام متفاوت به اندازه‌های صفر، ۳cm، ۵cm و ۷cm در شکل (۳) به ترتیب از بالا به پایین نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشینه توزیع و شدت میدان مغناطیسی بر حسب تسلا ( $T$ ) برای گام‌های صفر، ۳، ۵، ۷ به ترتیب؛ ۲/۲۳، ۲/۷۹، ۲/۱۳ و ۲/۰۱ تسلا می‌باشند که نشان می‌دهد میدان مغناطیسی با افزایش گام سیر نزولی دارد اما تعداد المان‌ها (مش‌ها) اشاره شده

شرایط مرزی بر سیستم، برای نقاط دور از سیستم ( $A_0 = 0$ ) و با در نظر گرفتن اثر خودالقایی پیچه، جریان کل در حال شارش درون آن به صورت زیر به دست می‌آید:

$$J_{total}^{coil} = J_{eddy} + J_{ext} \quad (7)$$

به طوری که چگالی جریان القا شده در قطعه کار می‌باشد و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$J_{eddy} = -\sigma_W \frac{\partial A}{\partial t} \quad (8)$$

که در آن،  $\sigma_W$  رسانندگی قطعه کار می‌باشد. میزان گرمای تولید شده ناشی از جریان اعمالی و جریان القایی در پیچه و قطعه کار از روابط زیر به دست می‌آید:

$$Q_{Coil} = \frac{|-i\omega\sigma A_0 + J_0|^2}{2\sigma} \quad \text{پیچه} \quad (9)$$

$$Q_W = \frac{|-i\omega\sigma A_0|^2}{2\sigma} \quad \text{قطعه کار} \quad (10)$$

عمق نفوذ به عنوان فاصله‌ای از سطح رسانا تعریف می‌شود که در آن چگالی جریان به مقدار  $e^{-1}$  بار کوچکتر از چگالی جریان در سطح می‌باشد. عمق نفوذ با در نظر گرفتن فرضیات مذکور و با استفاده از معادلات ماکسول با رابطه زیر داده می‌شود: [۳، ۹ و ۱۰]:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (11)$$

F فرکانس،  $\mu_r$  نفوذپذیری مغناطیسی نسبی و  $\rho$  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 (۱۲) به طور نمایی افت می‌کند (اثر پوستی). به این دلیل حدود ۸۵٪ توان کل تولید شده در لایه نازکی از سطح قطعه کار متمرکز می‌باشد [۱۰].

$$J_y = J_0 e^{-\frac{y}{\delta}} \quad (12)$$

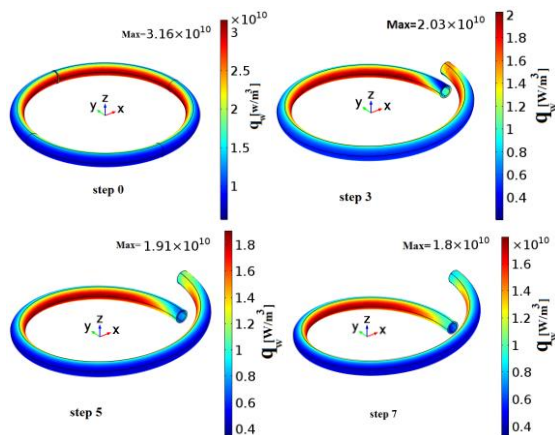
### ۳- شرایط محاسبات

برای بررسی اثر گام‌های پیچه روی پارامترهای مورد محاسبه از روش عناصر متناهی (FEM) به کمک بسته نرم‌افزاری کامسول

۴-۲- گرمای تولید شده در پیچه‌ها

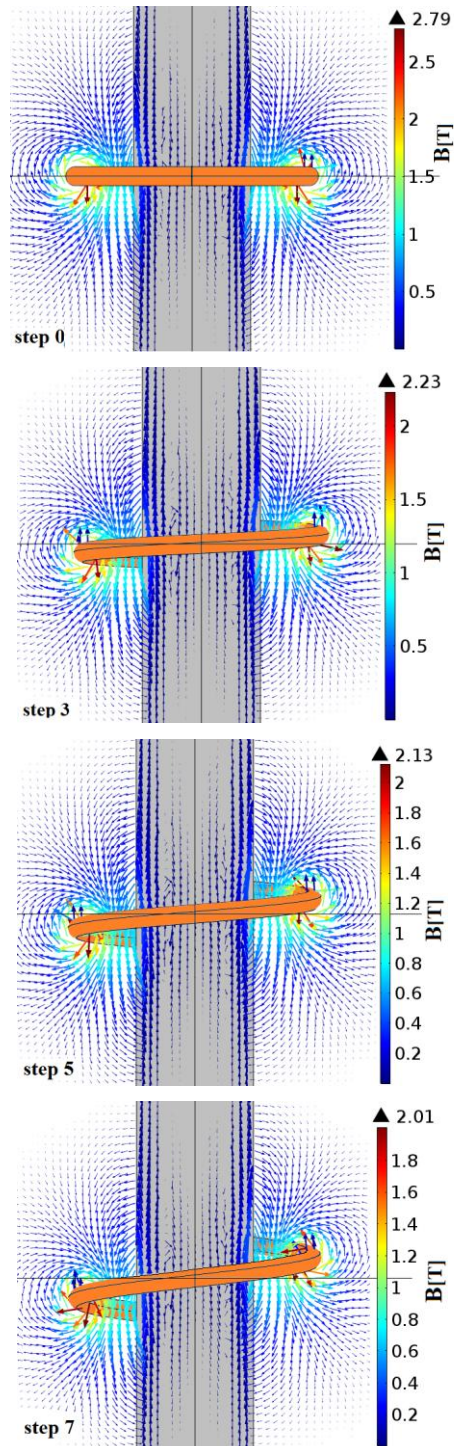
شما تیک حلقه‌ها برای چهار گام متفاوت در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که اشاره شد در هر چهار حالت الگوی شدت و توزیع گرما بیشتر در قسمت داخلی پیچه‌ها روبروی قطعه کار توزیع شده است. با توجه به تصاویر شکل (۴) ملاحظه می‌شود که شدت و توزیع گرمای تولیدشده در پیچه‌ها برای چهار حالت با گام‌های صفر، ۳، ۵ و ۷ cm به ترتیب برابر با  $3.16 \times 10^{10} \frac{W}{m^3}$ ،  $2.03 \times 10^{10} \frac{W}{m^3}$ ،  $1.91 \times 10^{10} \frac{W}{m^3}$  و  $1.80 \times 10^{10} \frac{W}{m^3}$  است. مقدار نسبی بیشینه توزیع و شدت گرمای تولیدشده در پیچه‌ها با گام‌های ۳cm، ۵cm و ۷cm به پیچه با گام صفر به ترتیب در حدود ۶۵٪، ۶۰٪ و ۵۷٪ می‌باشد. بنابراین، اثر دیگری از افزایش گام در پیچه‌ها، کاهش بیشینه شدت و توزیع گرما در آنها می‌باشد. همچنین گرمای حجمی تولیدشده برای پیچه با گام صفر حدود ۵۴۱ کیلو وات است، اما برای سه حالت دیگر این مقدار خیلی کمتر است (جدول (۲)).

همچنین از نتایج محاسبات به‌دست‌آمده و تصاویر ملاحظه می‌شود که توزیع مقادیر بیشینه در پیچه با گام صفر به‌طور یکنواخت در تمام سطح درونی پیچه توزیع شد و تغییرات توزیع گرما در آن خیلی کندتر است. در حالی که در پیچه‌های دیگر توزیع و شدت گرما، به‌ویژه در دو سر پیچه، یکنواخت نیست. نکته قابل تامل این است که شکل پیچه الگوی گرمای ایجاد شده بر روی سطح قطعه کار را تعیین می‌کند که می‌تواند برای کاربردهای که شکل الگوی گرما مهم است مفید باشد. لازم به ذکر است جریان‌های محاسبه شده توسط نرم‌افزار برای گام‌های صفر، ۳، ۵ و ۷ به ترتیب برابر با: ۷۹۲ آمپر، ۵۰۵ آمپر، ۴۹۰ آمپر و ۴۵۶ آمپر می‌باشد.



شکل (۴): توزیع و شدت گرما تولید شده در پیچه‌ها با گام‌های صفر، ۳cm، ۵cm و ۷cm

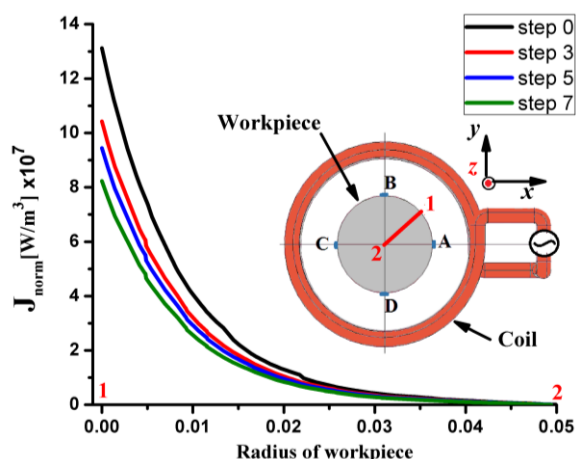
در جدول (۲) به ترتیب افزایش پیدا می‌کند. هم‌چنین ملاحظه می‌شود که توزیع و شدت میدان مغناطیسی بیشتر در قسمت داخلی پیچه که روبروی قطعه کار است متمرکز شده، که در واقع اثر حلقه و اثر مجاورت را به خوبی نشان می‌دهد [۳ و ۱۰].



شکل (۳): توزیع شدت میدان مغناطیسی در سه بعد برای گام‌های صفر، ۳cm، ۵cm و ۷cm

### ۳-۴- جریان گردابی

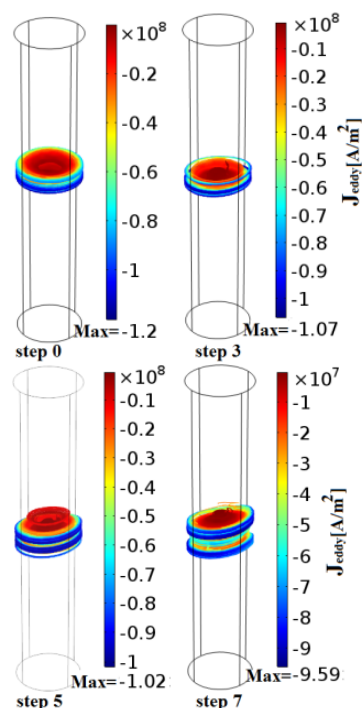
توزیع و شدت چگالی جریان گردابی در قطعه کار یکی از پارامترهای مهم در سیستم گرمای القایی است که در چهار حالت برای یک پیچ تک حلقه‌ای با گام‌های متفاوت بررسی شده است. یکی از فاکتورهای اصلی که باعث می‌شود جریان گردابی در لایه‌ای از سطح قطعه کار متمرکز شود اثر پوستی است [۳] که با ملاحظه تصاویر شکل (۵)، این اثر قابل توجه است زیرا همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود جریان گردابی بیشتر در لایه نزدیک سطح قطعه کار متمرکز است و این همان پدیده اثر پوستی است که در فرآیند گرمای القایی رخ می‌دهد. مقادیر بیشینه چگالی جریان برای چهار گام متفاوت پیچ به ترتیب از حلقه‌ای با گام کوچکتر (گام صفر) به گام بزرگتر عبارتند از:  $1.07 \times 10^8 [\frac{A}{m^2}]$ ،  $1.2 \times 10^8 [\frac{A}{m^2}]$ ،  $1.02 \times 10^8 [\frac{A}{m^2}]$  و  $0.96 \times 10^8 [\frac{A}{m^2}]$ . با مقایسه این چهار حالت نتیجه می‌شود که بیشینه جریان القا شده در حالتی است که گام پیچ صفر باشد. همچنین مقدار نسبی بیشینه چگالی جریان گردابی پیچ به گام‌های صفر، ۳cm، ۵cm و ۷cm نسبت به پیچ به گام صفر به ترتیب در حدود ۹۰٪، ۸۵٪ و ۸۰٪ است، بنابراین، اندازه توزیع و شدت چگالی جریان القایی با گام رابطه عکس دارد.



شکل (۶): نمودار توزیع اندازه جریان گردابی در راستای شعاع قطعه کار برای گام‌های صفر، ۳cm، ۵cm و ۷cm

### ۴-۴- گرمای تولید شده در قطعه کار

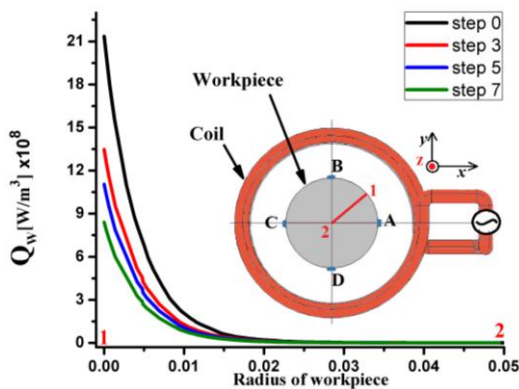
به‌طور وسیعی از سیستم‌های گرمای القایی در شکل دهی فلزات و همچنین گرما دهی قسمتهای از فلز که مورد نظر است استفاده می‌شود. چون فرآیند گرمای القایی در صنعت کاربردهای ویژه‌ای دارد به این دلیل بررسی گرمای تولید شده در قطعه کار یکی از پارامترهای مهم در فرآیند گرمای القایی می‌باشد شدت و توزیع گرمای تولید شده در قطعه کار برای حالت‌های با چهار گام متفاوت را در شکل (۷) ارائه شده است. براساس نتایج محاسبات بیشینه‌ی گرمای ایجاد شده در حالت اول (با گام صفر) برابر است با  $2.16 \times 10^9 [\frac{W}{m^3}]$ ، در حالت دوم (با گام ۳cm) برابر است با  $1.46 \times 10^9 [\frac{W}{m^3}]$ ، در حالت سوم (با گام ۵cm) برابر است با  $1.32 \times 10^9 [\frac{W}{m^3}]$  و در حالت چهارم (با گام ۷cm)  $1.24 \times 10^9 [\frac{W}{m^3}]$  می‌باشد. با مشاهده این نتایج ملاحظه می‌شود که بیشینه گرمای ایجاد شده در قطعه کار مربوط به پیچ به گام صفر



شکل (۵): توزیع و شدت چگالی جریان گردابی در قطعه کار برای گام‌های صفر، ۳cm، ۵cm و ۷cm

با توجه به چگونگی توزیع چگالی جریان گردابی ملاحظه می‌شود که الگوی آن در قطعه کار هندسه پیچ را به خود گرفته (اثر مجاورت) و با افزایش گام پیچ شاهد تغییرات نسبتاً زیادی در نحوه توزیع چگالی جریان می‌باشیم. به‌طوری‌که در پیچ به

اما برای تمام حالت‌ها روند کاهش یکنواخت است. از معادله (۱۱) استنباط می‌شود که عمق گرمای ایجاد شده در قطعه کار به فرکانس اعمالی بستگی دارد که هر چه فرکانس بیشتر باشد عمق نفوذ کمتر خواهد بود و در واقع عمق نفوذ با فرکانس رابطه‌ای عکس دارد [۳ و ۱۰]. مطابق با محاسبات به دست آمده بیشینه گرمای تولید شده در داخل قطعه کار در سه بعد برای هر چهار حالت با گام‌های صفر، ۳ cm، ۵ cm و ۷ cm به ترتیب برابر است با: ۲۱/۳۴، ۱۳/۴۷، ۱۱/۰۵ و ۸/۴۰  $[W/m^3] \times 10^8$ . همچنین گرمای حجمی تولید شده برای گام صفر ۱۹۴ کیلو وات است، در حالی که برای سه پیکربندی دیگر این مقدار همان‌طور که در جدول (۲) ارائه شده کمتر است.



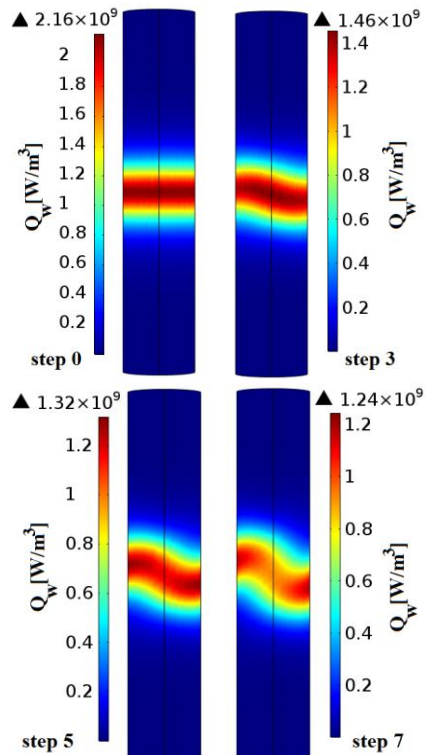
شکل (۸): تغییرات شعاعی گرمای تولید شده در داخل قطعه کار برای گام‌های صفر، ۳ cm، ۵ cm و ۷ cm

در شکل (۹) توزیع گرمای تولید شده در قطعه کار در راستای محور  $z$  ها برای چهار حالت پیچ به گام‌های متفاوت ترسیم شده است. با توجه به محاسبات به دست آمده و مشاهده شکل (۹) ملاحظه می‌شود که گرمای تولید شده بیشتر در محدوده پیچ می‌باشد و این یکی از مزیت‌های گرمای القای است، زیرا می‌توان گرما را در قسمت‌های مورد نظر اجسام فلزی متمرکز کرد بدون این که نیاز به گرم کردن قسمت‌های دیگر باشد. همچنین در هر چهار حالت با دور شدن از محدوده پیچ گرمای حجمی به شدت افت می‌کند.

برای ارزیابی بیشتر عملیات گرمای القای، همان‌طور که در در شکل (۹) ملاحظه می‌شود برای هر پیکربندی (هر گام) پروفایل گرمای تولید شده در چهار راستای متفاوت در سطح قطعه کار در جهت محور آن در سه بعد ترسیم شده است. همان‌طور که از محاسبات نتیجه می‌شود گرمای تولید شده برای چهار راستای متفاوت یعنی راستاهای A، B، C و D برای حالت بدون گام به دلیل تقارن یکسان است، اما برای سه پیکربندی دیگر گرمای

بوده و با افزایش گام پیچ میزان این بیشینه کاهش می‌یابد. بیشترین تغییرات (گرادیان) گرما مربوط به پیچ به گام صفر می‌باشد.

چون یکی از کاربردهای گسترده سیستم گرمای القایی در فرآیند سخت کردن فلزات می‌باشد، بنابراین، الگوی و همچنین عمق گرمای ایجاد شده بر روی بدنه قطعه کار بسیار مهم است. با مشاهده تصاویر شکل (۷) ملاحظه می‌شود که الگوی گرمای ایجاد شده بر روی بدنه قطعه کار (سطح خارجی) شکل هندسی پیچ را به خود گرفته است. در پیچ با گام صفر توزیع بیشینه گرمای تولید شده در دور تا دور قطعه کار یکسان است در حالی که برای سایر گام‌ها دیگر این توزیع بیشینه جابجایی می‌شود.



شکل (۷): توزیع و شدت گرما تولید شده در قطعه کار برای گام‌های صفر، ۳ cm، ۵ cm و ۷ cm

در شکل (۸)، پروفایل‌های توزیع توان تولید شده ناشی از جریان القایی در قطعه کار در راستای شعاعی برای هر چهار حالت ترسیم شده است. این پروفایل‌ها نشان می‌دهند گرمای تولید شده بیشتر در لایه‌ای نازکی از سطح قطعه کار (عمق پوسته) متمرکز می‌شود [۳ و ۱۰]. عموماً الگوی گرما تولید شده در قطعه کار در راستای شعاعی از سطح قطعه کار به طرف داخل آن همان‌طور که از شکل ملاحظه می‌شود برای هر چهار پیکربندی به طور نمایی افت می‌کند (معادله ۱۲)، اگر چه برای حالتی با گام صفر این افت نسبت به حالت‌های دیگر بیشتر است

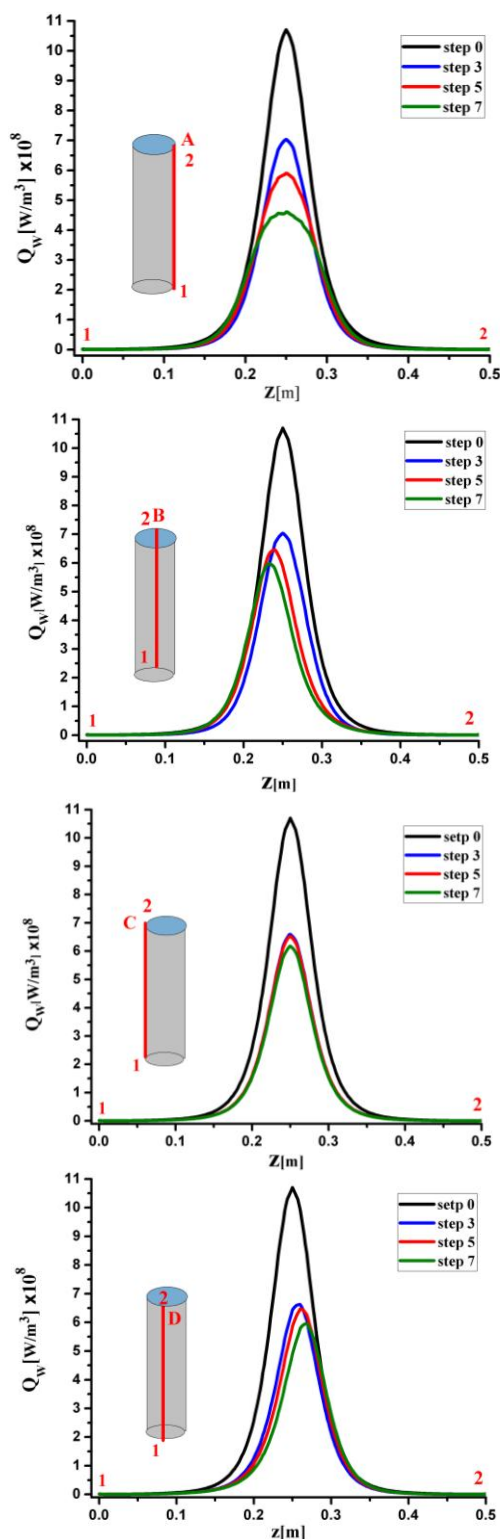
با توجه به شکل (۹) ملاحظه می‌شود که پروفایل‌های گرمای تولید شده مربوط به راستاهای A و C دارا تقارن هستند و بیشینه گرمای تولید شده در وسط قطعه کار قرار می‌گیرد با این تفاوت که در راستای A پهنای گرمای تولید شده با افزایش گام بیشتر شده و مقدار بیشینه آن هم کاهش می‌یابد. همچنین گرمای تولید شده در راستای C برای سه حالت با گام‌های ۳، ۵ و ۷ cm کمترین اختلاف را دارند.

جابجایی بیشینه گرمای تولید شده برای پروفایل‌های که در راستاهای B و D هستند اتفاق می‌افتد. همچنین در این دو راستا (راستاهای B و D) بیشینه‌های گرمای ایجاد شده در دو جهت مخالف هم جابجا می‌شود به طوری که برای راستای B بیشینه مربوط به گام ۳ جابجا نمی‌شود اما برای گام‌های ۵ و ۷ بیشینه به طرف پایین قطعه کار جابجا می‌شود. در راستای D برای هر سه گام، این بیشینه همراه با کاهش، به سمت بالای قطعه کار شیفت پیدا می‌کند.

در جدول (۲) گرمای حجمی تولید شده، تعداد المان‌ها و بازه مربوط به پیچ و قطعه کار برای هر چهار حالت با گام‌های متفاوت ارائه شده است. با توجه به مقادیر به دست آمده بیشترین گرمای ایجاد شده در پیچ و قطعه کار مربوط به پیچ با گام صفر است و با ایجاد گام در پیچ و همچنین افزایش آن مقدار گرمای تولید شده کاهش می‌یابد. نکته قابل ملاحظه این است که کاهش مقدار گرمای تولید شده در پیچ‌های نامتقارن نسبت به پیچ متقارن (پیچ با گام صفر) بسیار سریع اتفاق می‌افتد، در حالی که این روند کاهش گرمای تولید شده در پیچ‌های نامتقارن با افزایش گام بسیار کند رخ می‌دهد. همچنین همین روند کاهش گرمای تولید شده با شدت کمتری برای قطعه کار وجود دارد. دلیل کاهش سریع گرمای تولید شده را می‌توان ناشی از اثر مجاورت دانست. به عبارت دیگر با افزایش گام‌های پیچ تمرکز خطوط میدان مغناطیسی دورن حلقه کاهش می‌یابد و خود این باعث کاهش شدید میدان‌های الکترومغناطیسی القایی در قطعه کار می‌گردد.

با مقایسه گرمای تولید شده در قطعه کار و پیچ (جدول ۲) ملاحظه می‌شود که اختلاف گرمای تولید شده خیلی زیاد است که این می‌تواند ناشی از فاصله زیاد بین قطعه کار و پیچ باشد (با توجه به جدول (۱) شعاع پیچ دوبرابر شعاع قطعه کار است) و به تبع آن اثر مجاورت تضعیف می‌شود و در نتیجه گرمای تولید شده در قطعه کار کاهش چشم‌گیری را نشان خواهد داد. نسبت گرمای تولید شده در قطعه کار به کل گرمای تولید شده در پیچ و قطعه کار (بازده) برای هر چهار حالت اختلاف زیادی باهم ندارند و با افزایش گام به طور جزئی کاهش می‌یابند.

ایجاد شده در این راستاها در روی سطح قطعه کار متفاوت می‌باشد. به عبارت دیگر به دلیل شکل نامتقارن پیچ، شدت و توزیع گرمای ایجاد شده در سطح مقطع قطعه کار در صفحه‌ای با مقدار Z ثابت، x و y متغیر، متفاوت است.



شکل (۹): نمودار گرمای حجمی قطعه کار در راستای محور Z برای گام‌های صفر، ۳cm، ۵cm و ۷cm

## ۶- مراجع

- [1] H. Liu and J. Rao, "Coupled modeling of electromagnetic thermal problem in induction heating process considering material properties," In the Int. Conf. Eng. and Com. Science, ICIECS 2009.
- [2] M. H. Tavakoli, A. Ojaghi, E. Mohammadi-Manesh, and M. Mansour, "Influence of coil geometry on the induction heating process in crystal growth systems," Journal of Crystal Growth, vol. 311, pp. 1594-1599, 2009.
- [3] V. Rudnev, D. Loveles, R. Cook, and M. Black, "Handbook of Induction Heating," CRC Press, New York, 2003.
- [4] J. Jang and Y. Chiu, "Numerical and experimental thermal analysis for a metallic hollow cylinder subjected to step-wise electro-magnetic induction heating," Appl. Therm. Eng., vol. 27, pp. 1883-1894, 2007.
- [5] X. Zhou, B. G. Thomas, C. A. Hernandez, A. H. Castillejos, and F. A. Acosta, "Measuring heat transfer during spray cooling using controlled induction-heating experiments and computational model," Journal of Applied Mathematical Modeling, pp. 3181-3192, 2013.
- [6] M. H. Tavakoli, "Modeling of Induction Heating in Oxide Czochralski Systems Advantages and Problems," Crystal Growth & Desig., vol. 8, pp. 483-488, 2008.
- [7] X. Zhou, "Heat Transfer During Spray Water Cooling Using Steady Experiment," M. S. Thesis, Urbana university, Illinois, 2009.
- [8] M. R. Alizadeh Pahlavani and Y. Shahbazi Ayat, "Computation of Back EMF for Axial Flux BLDC Motors by Using of Maxwell equation," Journal of Applied Electromagnetics, vol. 3, no. 1, 2015. (In Persian)
- [9] M. H. Tavakoli, H. Karbaschi, F. Samavat, and E. Mohammadi-Manesh, "Numerical study of induction heating in melt growth systems Frequency selection," Journal of Crystal Growth, vol. 312, pp. 3198-3203, 2010.
- [10] S. Lupi, M. Forzan, and A. Aliferov, "Induction and Direct Resistance Heating Theory and Numerical Modeling," Springer, 2015.
- [11] J. R. Reitz, F. J. Milford, and R. W. Christy, "Foundation of Electromagnetic Theory," John Wiley & sons, New York, 1992. (In Persian)

جدول (۲): گرمای حجمی تولیدشده در پیچه و قطعه کار.

پیچه‌ها	اندازه گام (CM)	تعداد المان‌ها	پیچه (KW)	قطعه کار (KW)	بازده %
پیچه اول	صفر	۳۲۴۴۹۰	۵۴۱	۱۹۴	۲۶/۴۳
پیچه دوم	۳	۳۶۷۹۴۱	۳۷۲	۱۲۸	۲۵/۶۰
پیچه سوم	۵	۳۷۲۴۹۶	۳۵۷	۱۲۲	۲۵/۴۷
پیچه چهارم	۷	۳۹۳۴۲۵	۳۳۱	۱۱۲	۲۵/۲۸

## ۵- نتیجه گیری

فرآیند گرمای القایی یک فرآیند بسیار پیچیده است که تغییر هر کدام از پارامترهای آن می‌تواند تأثیر بسیار زیادی بر توزیع و شدت میدان‌های الکترومغناطیسی، جریان‌های القایی و گرمای ایجادشده در پیچه و قطعه کار داشته باشد. نتایج شبیه‌سازی برای چهار پیچه تک حلقه‌ای با گام‌های متفاوت نشان می‌دهد که:

- چگالی شار مغناطیسی از لحاظ اندازه و هم از لحاظ توزیع برای حالت متقارن (با گام صفر) تفاوت زیادی با سه حالت دیگر با گام‌های ۳ cm، ۵ cm و ۷ cm دارد.
  - الگوی توزیع جریان گردابی در قطعه کار، به دلیل اثر مجاورت، شکل هندسه پیچه را به خود می‌گیرد. همچنین اندازه چگالی جریان القایی در داخل قطعه کار در راستای شعاعی به طور نمایی افت می‌کند.
  - گرمای حجمی تولیدشده در قطعه کار برای حالت بدون گام اختلاف زیادی با سه حالت دیگر دارد و همچنین تغییرات گرمای حجمی برای این سه حالت با افزایش گام پیچه با شیب ملایمی کاهش می‌یابد.
  - گرما تولیدشده به‌طور عمده در لایه نازکی از سطح قطعه کار متمرکز شده و در راستای شعاع از سطح قطعه کار به طرف داخل آن به‌طور نمایی برای هر چهار پیکربندی افت می‌کند.
  - توزیع گرمای تولیدشده در سطح قطعه کار در راستای طول (محور) آن برای حالت بدون گام یکنواخت است اما در سه حالت دیگر این توزیع گرما یکنواخت نیست.
- نتایج نشان می‌دهد که اندازه گام‌های پیچه در طراحی یک سیستم گرمای القایی بهینه، تأثیر زیادی دارد.



---

**Numerical Study of Influence of Coil Step on the Induction Heating Process in Three-Dimensional**

**A. J. Shokri , M. H. Tavakoli\*, A. A. Sabouri Dodaran, M. S. Akhoundi khezrabad**

**Payame Noor University**

(Received: 14/06/2017, Accepted: 26/09/2017)

**Abstract**

*In this paper, influence of coil steps on the induction heating process has been computed using the Finite Element Method (FEM). At first, a single-turn coil with axisymmetric (no step) has been considered, and then the coils with 3, 5 and 7 cm steps have been employed. Voltage 200 volt with frequent of 1 KHz has been used, which it applied to the coil, as source of electromagnetic fields. The results of the calculations show that distribution and intensity of electromagnetic fields, eddy currents in the workpiece, and generated volume heat in the coil and workpiece for the coil without step have a significant difference with other coils (i.e. the coils with steps of 3, 5, and 7 cm).*

**Keywords:** Induction Heating Process, Finite Element Method, Simulation

---

\* Corresponding author E-mail: mht@basu.ac.ir