



Simultaneous Numerical Modelling of Heat Transfer and Magnetic Fields in a Vacuum Induction Furnace

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Ghorbanzadeh S.¹ MSc,
 Nazari M.*¹ PhD,
 Shahmardan M.M.¹ PhD,
 Hasannia A.¹ PhD,
 Nazari M.¹ PhD

How to cite this article

Ghorbanzadeh S, Nazari M, Shahmardan M.M, Hasannia A, Nazari M. Simultaneous Numerical Modelling of Heat Transfer and Magnetic Fields in a Vacuum Induction Furnace. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(4):959-967.

ABSTRACT

In this paper, heat transfer and magnetic fields in a vacuum induction melting furnace have been studied numerically. To solve the coupled equations of thermal and magnetic induction heating, the finite element method has been used. An induction furnace model is simulated using an industrial geometry. The studies indicate that the effect of the geometry of the crucible and the coil on the melting time has not been thoroughly investigated and requires more in-depth studies. It is attempted to improve the shape of the induction furnace, so that in less time aluminum is melted in a small scale furnace. The effect of the diameter-to-height ratio of the crucible on the duration of melting has been investigated. By decreasing the diameter-to-height ratio, the temperature reaches melting temperature in a shorter time. The results show that for the diameter-to-height ratio of less than 0.4, there will not be a significant change at the average temperature. 10% reduction in the distance between the coils leads to an increase in the average temperature of the working material inside the furnace. With considering the constant density of the coil current and the constant induced current in the heated material, the effects of the number of coil turns on the temperature distribution and magnetic flux are investigated. In this way, the accuracy of the model is also checked by induction heating concepts. The effect of frequency on temperature has been investigated in different coil lengths. The results show that an increase of 4 times in the frequency caused an increase of 1.7 times in the average temperature.

Keywords Induction Heating; Electromagnetics; Numerical Solution; Furnace

¹Mechanical Engineering Faculty, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

*Correspondence

Address: Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
 Phone: +98 (23) 32392204
 Fax: +98 (23) 32392204
 mnazari@shahroodut.ac.ir

Article History

Received: May 10, 2018
 Accepted: November 21, 2018
 ePublished: April 06, 2019

CITATION LINKS

- [1] Experimental and numerical investigation on mass transfer induced by electromagnetic field in cold crucible used for directional solidification [2] Experimental and numerical analysis of DC induction heating of aluminum billets [3] Economical production of titanium-aluminide automotive valves using cold wall induction melting and centrifugal casting in a permanent mold [4] Application of induction heating in food processing and cooking [5] Simulation model of induction heating in Comsol multiphysics [6] A heat transfer textbook [7] FPGA implementation of a switching frequency modulation circuit for EMI reduction in resonant inverters for induction heating appliances [8] Elements of induction heating: Design, control, and applications [9] Induction heat treatment: Basic principles, computation, coil construction, and design considerations [10] A mathematical simulation of high temperature induction heating of electroconductive solids [11] A numerical model for induction heating processes coupling electromagnetism and thermomechanics [12] 2D finite element program for magnetic induction heating [13] 3-D eddy current analysis of induction heating apparatus considering heat emission, heat conduction, and temperature dependence of magnetic characteristics [14] Effect of multi-layered induction coils on efficiency and uniformity of surface heating [15] Numerical and experimental investigation of heat transfer process in electromagnetically driven flow within a vacuum induction furnace [16] Calculation of eddy current losses in nonlinear ferromagnetic materials [17] Numerical analysis and thermographic investigation of induction heating [18] Induction heating handbook

مدل‌سازی عددی هم‌زمان انتقال حرارت و میدان مغناطیسی در کوره ذوب القایی تحت خلا

سارا قربانزاده MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

محسن نظری * PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

محمد محسن شاه‌مردان PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

امیر حسن‌نیا PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

مصطفی نظری PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

در این مقاله به بررسی عددی انتقال حرارت و میدان مغناطیسی در یک کوره ذوب القایی خلا پرداخته شده است. برای حل معادلات گرمایش القایی از کویله شدن انتقال حرارت و میدان مغناطیسی به روش المان محدود استفاده شده و با استفاده از یک هندسه صنعتی، مدل کوره القایی شبیه‌سازی شده است. مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که تاثیر شکل هندسی بوته و سیم‌پیچ، بر مدت‌زمان رسیدن به دمای ذوب به‌طور کامل بررسی نشده و مطالعات عمیق‌تری نیاز است. سعی در این است با بهبود هندسه کوره القایی، در مدت‌زمان کمتری آلومینیوم در کوره ذوب شود. تاثیر نسبت قطر به ارتفاع بوته (در حجم ثابت نمونه) بر مدت‌زمان رسیدن به نقطه ذوب در کوره القایی مورد بررسی قرار گرفته است. با کاهش نسبت قطر به ارتفاع، دما در زمان کوتاه‌تری به نقطه ذوب می‌رسد. نتایج نشان می‌دهد که به‌ازای نسبت قطر به ارتفاع کمتر از ۰/۴ تغییر قابل ملاحظه‌ای در دمای میانگین حاصل نخواهد شد. با کاهش ۱۰ درصدی فاصله بین سیم‌پیچ‌ها، میانگین دمای ماده افزایش یافته است. با ثابت در نظر گرفتن چگالی جریان سیم‌پیچ و جریان القا شده در ماده گرم‌شونده، اثرات تعداد حلقه سیم‌پیچ القایی بر توزیع دما و شار مغناطیسی نیز مورد بررسی قرار گرفته است و به همین روش صحت مدل‌سازی با مباحث گرمایش القایی مقایسه شده است. تاثیر فرکانس بر دما در نسبت‌های مختلف طول سیم‌پیچ مورد تحقیق قرار گرفته و نتایج نشان می‌دهد افزایش ۴ برابری فرکانس موجب افزایش ۱/۷ برابری دمای میانگین در قطعه کاری می‌شود.

کلیدواژه‌ها: حرارت القایی، الکترومغناطیس، حل عددی، کوره

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۳۰

* نویسنده مسئول: mnazari@shahroodut.ac.ir

تجهیزات، تضمین کیفیت، قابلیت اتوماسیون و قابلیت اطمینان بالا اشاره کرد. القای الکترومغناطیسی، یک روش حرارت‌دادن مواد رسانای الکتریکی مانند فلزات است. تعداد کالاهای صنعتی و مصرفی که در مرحله تولید تحت حرارت القا قرار می‌گیرند، بسیار زیاد است و به‌سرعت در حال گسترش هستند. گرمایش القایی یکی از فناوری‌های جدید در لوازم خانگی است [3, 4].

اوسیلیکا و کووچ [5] به شبیه‌سازی مساله حرارت القایی پرداختند و از دو ماژول انتقال حرارت و الکترومغناطیس استفاده کرده‌اند. الکترومغناطیس و انتقال حرارت به خواص فیزیکی ماده گرم‌شده مرتبط است و خواص ماده می‌تواند توابع غیرخطی از شدت میدان مغناطیسی، دما و فاکتورهای دیگر باشد. در مدل اوسیلیکا و کووچ [5] خواص ماده گرم‌شونده مورد ملاحظه قرار گرفته که شامل ضریب نفوذپذیری، مقاومت الکتریکی، ضریب هدایت حرارتی و ضریب گرمایی است. همچنین مدل شبیه‌سازی شده با در نظر گرفتن خواص غیرخطی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی شده با خطای نسبی قابل قبولی تایید شده است. مولفان به این نتیجه رسیدند که میزان حرارت تولیدشده در قطعه کار به جریان الکتریسته عبوری از کویل و عمق حرارت نیز به فرکانس آن وابسته است [6, 7].

در راستای مدل‌سازی کوره‌های القایی، سمیاتین [8] و همچنین رودنو و همکاران [9]، میدان مغناطیسی تولیدشده توسط سیم‌پیچ را عامل ایجاد جریان در کوره دانسته و پدیده انتقال حرارت در حضور میدان الکترومغناطیس در کوره القایی را کاملاً مرتبط با ماهیت و خواص فیزیکی ماده یافتند. انتخاب شکل و موقعیت سیم‌پیچ القایی و تنظیم خواص جریان الکتریکی برای دستیابی به مشخصات درجه حرارت مورد نیاز در قطعه کار لازم و ضروری است. در طول فرآیند گرمایش القایی، دمای ماده گرم‌شونده به میزان زیادی تغییر می‌کند که معرفی ویژگی‌های غیرخطی وابسته به دما را مخصوصاً برای مواد فرومغناطیسی ضروری می‌کند. روش‌های عددی مانند روش المان محدود به‌طور گسترده برای حل مسایل گرمایش القایی مورد استفاده قرار گرفته است [10-12]. بررسی تجربی مدل‌های گرمایش القایی معمولاً با اندازه‌گیری دمای قطعه کار در گذر زمان به‌وسیله ترموکوپل‌ها [13] یا دوربین‌های ترموگرافی [14] انجام می‌شود.

شبیه‌سازی عددی، ابزاری مفید برای طراحی و بررسی سیستم‌های حرارت القایی است. سیستم اصلی حرارت القایی شامل منبع جریان متناوب AC و سیم‌پیچ القایی است. کویل کردن قطعه کار و کویل حاوی جریان، شکل هندسی قطعه کار و کویل القاگر و انتقال حرارت در ماده مورد نظر از جمله موارد بسیار مهم در طراحی سیستم‌های القایی می‌باشند. [15].

در این مقاله به مدل‌سازی عددی کوره القایی پرداخته شده و با استفاده از یک هندسه صنعتی، مدل کوره القایی شبیه‌سازی شده است. سپس به بررسی پارامترهای مختلف هندسی، محل قرارگیری سیم‌پیچ القایی در اطراف بوته و تاثیر این عوامل بر زمان رسیدن به ذوب پرداخته شده است. سعی در این است که با بررسی پارامتری مساله، مدلی بهینه برای طراحی کوره در مقیاس کوچک ایجاد شود.

۲- فیزیک مساله

در این مقاله به مدل‌سازی کوره القایی به روش عددی می‌پردازیم. گرمایش القایی به جریان الکتریکی وابسته است و در ماده‌ای که باید حرارت داده شود، باید به‌صورت داخلی القا شود. اجزای اصلی یک سیستم گرمایش القایی شامل سیم‌پیچ القایی، منبع تغذیه

۱- مقدمه

حرارت القایی بدون هیچ گونه تماسی قادر است به‌وسیله سیم‌پیچ رسانا، جریان الکتریکی را به حرارت تبدیل نماید. جریان متناوب در سیم‌پیچ که تولید میدان مغناطیسی گذرا می‌کند، اساس کار کوره‌های القایی را تشکیل می‌دهد. در این کوره‌ها از حرارت ایجادشده توسط تلفات فوکو و هیستریزیس برای ذوب فلزات استفاده می‌شود.

گرمایش القایی یکی از روش‌هایی است که به‌طور گسترده در عملیات حرارتی فولاد مورد استفاده قرار می‌گیرد که با گرمایشی سریع‌تر و دقیق‌تر به‌صورت موضعی با صرف انرژی کمتر، مطلوب مورد نظر را حاصل می‌کند و مورد پسند دست‌اندازان محیط زیست نیز است [1, 2]. یکی از مزیت‌های گرمایش القایی در خلا، عدم نیاز به وجود منبع خارجی گرم‌کننده است که می‌تواند منجر به تمیزی محیط کوره و اطراف بوته شود. در این روش نیازی به تماس فیزیکی بار و کویل نیست و علاوه بر این، چگالی توان بالا در مدت‌زمان گرمایش کم به‌آسانی قابل دسترس است. از دیگر مزایای این روش می‌توان به هزینه کمتر نیروی کار، نگهداشت آسان از

۲-۲- معادلات ریاضی

در این مقاله از روش اجزای محدود برای محاسبه میدان مغناطیسی و توزیع حرارت استفاده شده است. در این روش، کل فضای مساله شامل سیم پیچ، عایق‌ها، بوته، هوا و قطعه کار به المان‌های کوچک تقسیم می‌شوند و معادلات ماکسول در هر سلول حل خواهد شد. سپس حرارت ناشی از تغییرات میدان مغناطیسی تعیین می‌شود. معادلات ماکسول برای محاسبه میدان مغناطیسی شامل چهار معادله اساسی به صورت زیر است [15]:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (1)$$

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

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

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

که در آن \vec{D} بردار جابه‌جایی الکتریکی بر حسب کولمب بر متر مربع، ρ چگالی بار الکتریکی بر حسب کولمب بر متر مکعب، \vec{B} بردار چگالی شار مغناطیسی بر حسب تسلا، \vec{E} بردار میدان الکتریکی بر حسب ولت بر متر، \vec{H} بردار شدت میدان مغناطیسی بر حسب آمپر بر متر و \vec{j} بردار چگالی جریان الکتریکی بر حسب آمپر بر متر مربع است. با تعریف میزان جریان کویل در مدل‌سازی مساله، بردار چگالی جریان \vec{j} با توجه به سطح مقطع هر المان قابل محاسبه است.

$$i = \int \vec{j} \cdot d\vec{A} \quad (5)$$

که در آن i میزان جریان کویل و $d\vec{A}$ بردار المان سطح برای هر مش است. با مشخص شدن بردار چگالی جریان، \vec{H} بردار شدت میدان مغناطیسی با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود ($\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0$) و مطابق رابطه ۱، بردار جابه‌جایی الکتریکی فقط به چگالی بار مغناطیسی وابسته است. همچنین با داشتن رابطه زیر در میدان مغناطیسی، \vec{B} بردار چگالی شار مغناطیسی قابل حاسبه خواهد بود.

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (6)$$

μ_0 نفوذپذیری خلأ و μ_r نفوذپذیری نسبی است. حال با دانستن \vec{B} از طریق رابطه ۳، ماکسول مقدار \vec{E} بردار میدان الکتریکی محاسبه می‌شود. سپس مقدار جابه‌جایی الکتریکی (\vec{D}) از طریق رابطه زیر و دانستن ضریب گذردهی الکتریکی خلأ (ϵ_0) و گذردهی الکتریکی نسبی (ϵ_r) قابل محاسبه است [16]:

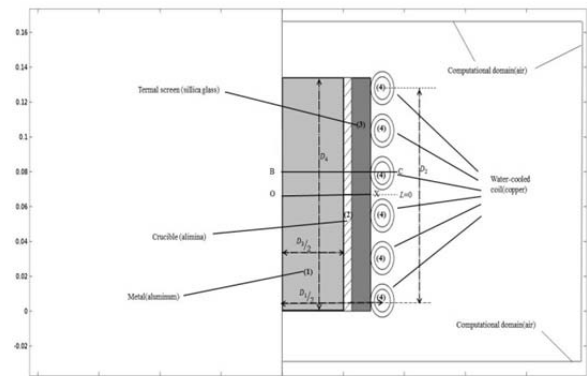
$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (7)$$

حرارت تولیدشده توسط القا از طریق هدایت انتقال پیدا می‌کند و فرایندهای ذوب القایی در محیط خلأ انجام می‌شود. بنابراین شار انتقال حرارت هدایتی در المان‌های سیستم (عایق‌ها و ماده گرم‌شونده داخلی) با در نظر گرفتن مکانیزم هدایت و رابطه ۸ تعریف شده است:

$$q = -k \nabla T \quad (8)$$

k ضریب هدایت حرارتی، T دما و q انتقال حرارت است. سپس برای حل معادله انرژی در گره‌ها با در نظر گرفتن کویل هم‌زمان انتقال حرارت و الکترومغناطیس، باید ترم اتلاف الکترومغناطیسی

جریان متناوب و قطعه کار است. سیم پیچ بسته به الگوی حرارت مورد نیاز می‌تواند شکل‌های مختلفی داشته باشد. جریان الکتریکی AC که با عبور از طریق سیم پیچ موجب ایجاد میدان مغناطیسی متناوب می‌شود، جریان‌های گردابی در داخل قطعه ایجاد می‌کند و زمینه افزایش درجه حرارت را فراهم می‌کند [8]. با استفاده از یک هندسه صنعتی، مدل کوره القایی شبیه‌سازی شده است. اجزای کلاسیک یک کوره القایی همان طور که در شکل ۱ آمده، شامل شارژ (فلز) (۱) که داخل بوته (۲) بوده، سپر حرارتی که انتقال حرارت را کنترل می‌کند (۳) و سیم پیچ (۴) است که در آن انرژی الکتریکی اعمال می‌شود.



شکل ۱ هندسه کوره القایی

یکی از چالش‌ها در گرمایش القایی این است که جریان بالا در کویل القاگر نیازمند به خنک‌کننده فعال است. برای حل این مشکل می‌توان از سیم پیچ رسانای توخالی و گردش آب سرد داخلی آن بهره برد. ابعاد و پارامترهای استفاده‌شده در الگوی مورد تحقیق در شکل ۱ نام‌گذاری شده است. همان طور که مشاهده می‌کنید با در نظر گرفتن تعدادی حلقه کویل و قراردادن مرکز سیم پیچ روی مرکز بوته، انحراف مراکز (L) نداریم. خط OX گذرنده از مرکز بوته و ماده گرم‌شونده است. حال با بررسی تغییر نسبت‌های هندسی (در بوته)، به مطالعه اثرات هندسی بر مدت زمان رسیدن به نقطه ذوب خواهیم پرداخت.

۲-۲-۱- متغیرهای بی‌بعد پراهمیت در طراحی کوره القایی

پارامترهای هندسی شامل N تعداد حلقه، D_1 قطر اصلی کویل، D_2 طول کویل، D_3 قطر بوته و D_4 ارتفاع بوته است. در جدول ۱، مقادیر پارامترهای هندسی برای شبیه‌سازی مدل صنعتی مد نظر مقاله بیان شده است. برای مطالعه پارامتری مساله و با توجه به اهمیت ابعاد هندسی از پارامترهای بی‌بعد زیر استفاده خواهد شد:

$$\frac{D_2}{D_4}, \frac{L}{D_4}, \frac{D_1}{D_3}$$

حجم ماده گرم‌شونده را با V نشان می‌دهیم و برابر است با:

$$V = \frac{\pi D_3^2}{4} \times D_4$$

جدول ۱ پارامترهای هندسی کوره القایی و مقادیر اولیه متناسب با اندازه‌های واقعی

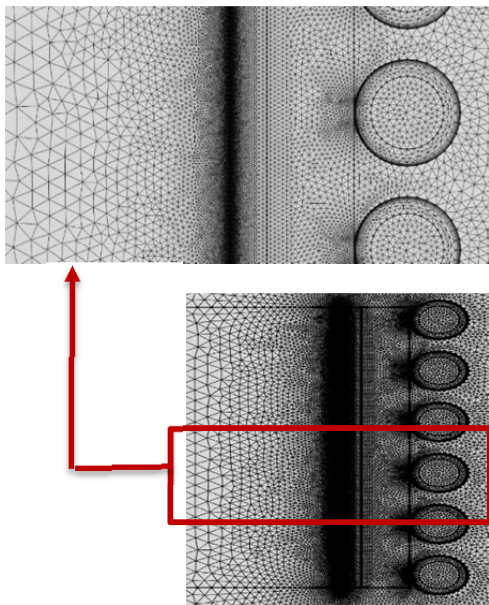
نماد	پارامتر	مقدار (mm)
D_1	قطر اصلی کویل	۱۶۴
D_2	طول کویل	۱۲۲
D_3	قطر بوته	۱۰۱
D_4	ارتفاع بوته	۱۳۴

خلاً (μ_0) ، نفوذپذیری نسبی ماده (μ_r) ، هدایت الکتریکی (σ) و فرکانس (f) است، همان طور که در فرمول ۱۲ داریم [18]:

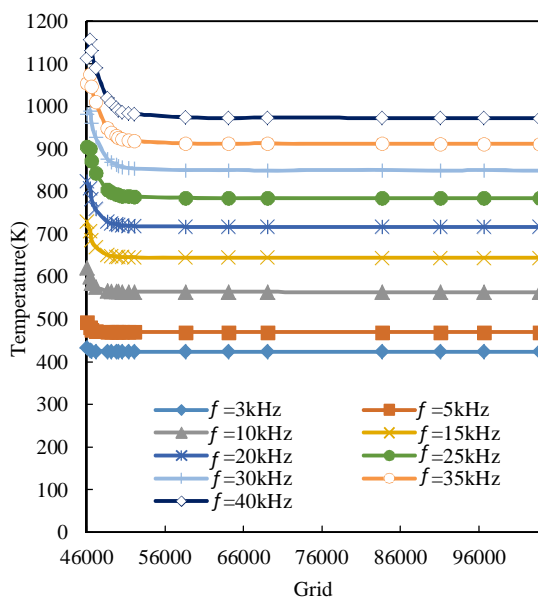
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu k_T}} \quad (12)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (13)$$

هر چه فرکانس بالاتر باشد، عمق نفوذ نازکتر است. در نتیجه با تنظیم فرکانس می‌توان میزان عمق نفوذ مغناطیسی را کنترل کرد. از نظر عددی، تعداد شبکه در هر کوپل باید به قدر کافی ریز باشد تا دقت و صحت نتایج تضمین شود. همین طور در محل عمق نفوذ و محل تماس قطعه کار با بوتله نیز اندازه شبکه محاسباتی باید ریز انتخاب شود (شکل ۲). پس در اطراف ماده گرم‌شونده و داخل کوپل‌ها تعداد شبکه بیشتری مورد نیاز بوده که این افزایش شبکه به دلیل حساسیت عمق نفوذ و نیاز کنترل دما در داخل سیم‌پیچ است [8].



شکل ۲) نمونه شبکه‌بندی انتخاب شده



نمودار ۱) میانگین دما در فرکانس‌های مختلف نسبت به تعداد شبکه، جریان ۱۳۰۰ آمپر و $D_1/D_3 = 1.6237$ ، $L/D_4 = 0$ ، $D_2/D_4 = 0.9104$

(Q_e) به صورت منبع گرما در بخش انتقال حرارت، مدل شود. برای تحلیل انتقال حرارت در ناحیه محاسباتی از رابطه ۹ استفاده شده است:

$$qC_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot q = Q_e \quad (9)$$

اتلاف الکترومغناطیسی شامل تلفات مقاومتی (Q_{rh}) و تلفات مغناطیسی (Q_{ml}) است. در این مقاله چون آلومینیوم ماده‌ای غیرمغناطیسی است، تلفات مغناطیسی در آن صفر می‌شود.

$$Q_e = Q_{rh} + Q_{ml} \quad (10)$$

منبع حرارت Q_{rh} همان جریان‌های گردابی است که داخل آلومینیوم تولید می‌شود و مقدار آن توسط رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$Q_{rh} = \frac{1}{2} Re(J \cdot E^*) \quad (11)$$

q چگالی، C_p ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت و Q منبع حرارت است. E^* مزدوج میدان الکتریکی و H^* مزدوج شدت میدان مغناطیسی است. فرض شده است که ماده به طور کامل بوتله را پر می‌کند. با توجه به خنک‌کاری سیم‌پیچ‌ها در کاربردهای صنعتی، عملاً سطح سیم‌پیچ دمای بالایی ندارد و تشعشعی بین این سطح و مرز بیرونی متصور نیست.

۳-۲- پارامترهای ورودی مساله

برای پیدا کردن تلفات حرارتی، توزیع دما در ماده مذاب و چگالی شار مغناطیسی نیاز به مدل‌سازی عددی داریم. مدل عددی با کوپل الکترومغناطیس، پدیده انتقال حرارت و استفاده از روش المان محدود حل شده است. به دلیل تقارن از هندسه دوبعدی متقارن محوری استفاده شده است. از پارامترهای ورودی ضروری می‌توان به خواص ذکر شده در جدول ۲ اشاره کرد. خواص مطابق با جدول تابع دما در نظر گرفته شده است.

جدول ۲) خواص الکترومغناطیسی و حرارتی

دما	آلومینیوم	مس (سیم‌پیچ)
رسائایی الکتریکی $(\sigma: S/m)$	۱	۱
نفوذپذیر مغناطیسی $(\mu: H/m)$	$\rho(\alpha + (T - T_0))$	$\rho(\alpha + (T - T_0))$
چگالی $(\rho: \frac{kg}{m^3})$	۱۰۰۰۰۲۱	۰/۹۹۹۹۹
ضریب هدایت گرمایی $(k: W/m.K)$	۲۶۹۸/۹	۸۷۰۰
	۲۵۵	۴۰۰

۴-۲- شرایط مرزی و اولیه

به منظور اعمال شرایط مرزی می‌توان فرض کرد که ناحیه عایق مغناطیسی کاملاً دور از کوره القایی وجود دارد و مولفه نرمال میدان مغناطیسی صفر است. مهم است اطمینان حاصل شود که این ناحیه عایق به قدر کافی دور از کوره است که بر راه‌حل تاثیر نگذارد. بنابراین ۱۰ برابر اندازه کوره به عنوان شرایط مرزی دور دست در نظر گرفته شده است [17]. همان گونه که ذکر شد، مساله به صورت متقارن محوری حل شده و در فصل مشترک مواد (مثل ماده گرم‌شونده، بوتله، عایق و غیره) شرط برابری شار حرارتی برقرار شده است.

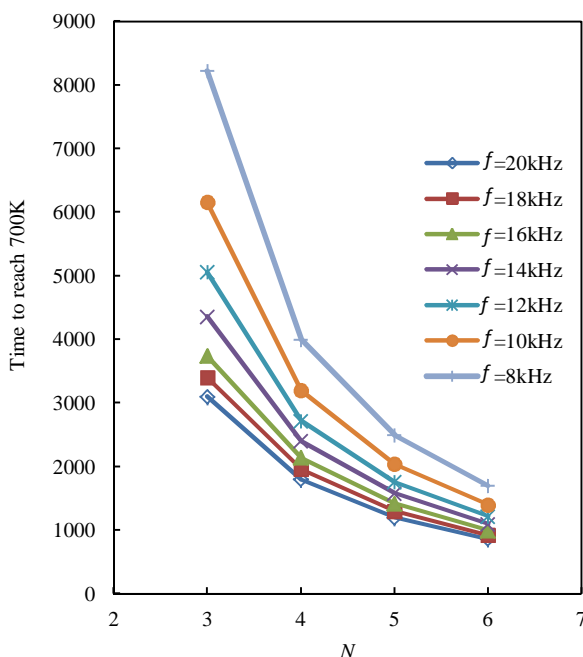
۳- تولید شبکه عددی

برای انجام هر محاسبه‌ای میزان عمق نفوذ باید تعیین شود که پارامتری مهم و تاثیرگذار است، زیرا بیشترین جریان الکتریکی از طریق عمق نفوذ جریان می‌یابند. این پارامتر وابسته به نفوذپذیری

همان طور که در نمودار ۳ مشاهده می‌شود، تغییرات دمای میانگین خط گذرنده OX در گذر زمان در چگالی شار ثابت و $N \times i$ ثابت در فرکانس ۳۰ و ۱۰ کیلوهرتز برای تعداد حلقه‌های مختلف رسم شده است که این ۶ خط نمودار تقریباً بر هم منطبق هستند. این انطباق نمودارها بر یکدیگر، نشان‌دهنده مدل‌سازی درست میدان مغناطیسی در مساله است، چرا که از نتایج الکترومغناطیسی همین مفهوم استنباط می‌شود. در نتیجه با ثابت‌نگاه داشتن چگالی جریان و حاصلضرب $N \times i$ می‌توان با چندین هندسه متفاوت، کوره دلخواه را مدل‌سازی کرد. هر چند استفاده از تعداد حلقه بیشتر بهتر است و نیاز به استفاده از جریان بالا ندارد.

شکل ۳، نمایش توزیع نرم چگالی جریان مغناطیسی (B) در اشکال پیشنهادی مطابق با جدول ۳ است. همان طور که در نظر داشتیم، چون چگالی شار (j) ثابت در نظر گرفته شده، مقدار چگالی جریان در ۶ شکل تقریباً بیشینه و کمینه یکسانی دارد که دلیل بر صحت مدل‌سازی است. مشاهده می‌شود که بیشینه چگالی جریان در دامنه کویل‌هاست. توزیع چگالی جریان در داخل کویل یکنواخت نیست و جریان بیشتر میل دارد تا در قسمت داخلی کویل حرکت کند. بیشینه چگالی جریان در حالت ۲ حلقه به بیشترین مقدار ۰/۱ تسلا می‌رسد و بیشینه چگالی جریان در ۴، ۵، ۶ و ۷ حلقه به کمترین مقدار ۰/۰۸ تسلا رسیده است.

شکل ۴، نمایش توزیع دما در اشکال مختلف پیشنهادی برای کوره القایی در زمان ۱۴۰۰ ثانیه است. همان طور که انتظار می‌رود خنک‌کاری توسط آب در گردش با دبی ۱ kg/min در کویل‌ها، مانع افزایش دما نامطلوب در سیم‌پیچ مسی شده است. افزایش دما، مطلوب و در داخل ماده مذاب است. اتلاف حرارت در حالت ۲ حلقه بیشتر بوده، در صورتی که در تعداد حلقه‌های بالا، تمرکز حرارت بر بوته معطوف است. هر چقدر تعداد بیشتری حلقه انتخاب کنیم با جریان الکتریکی کمتر و منبع تغذیه مقرون به صرفه‌تر به دمای مد نظر خود خواهیم رسید.



نمودار ۲) تغییرات زمان رسیدن به دمای ۷۰۰ درجه نسبت به تغییر تعداد حلقه در فرکانس‌های مختلف، جریان ۱۳۰۰ آمپر و $D_1/D_3=1.6237$ ، $L/D_4=0$ و $D_2/D_4=0.9104$

برای پیدا کردن تعداد شبکه مناسب لازم است نسبت به یک پارامتر حساس، تعداد شبکه کنترل شود. دمای میانگین خط OX در زمان ۹۰۰ ثانیه (زمان انتهای فرآیند) برای فرکانس‌های مختلف اندازه‌گیری شده است. به عنوان نمونه، در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز با افزایش تعداد شبکه، دمای میانگین ماده گرم‌شونده، محاسبه و همان طور که مشاهده می‌شود از ۴۹۰۹۵ شبکه به بعد تغییری در نتایج مشاهده نمی‌شود. این روند برای فرکانس‌های دیگر نیز بررسی شده است. همان طور که در نمودار ۱ مشاهده می‌شود، تعداد شبکه مورد نیاز در فرکانس‌های پایین‌تر نیز مناسب است.

۴- نتایج

در این قسمت به بررسی پارامترهای هندسی موثر بر زمان ذوب ماده می‌پردازیم. در قسمت اول با تغییر تعداد حلقه، در قسمت دوم با بررسی اثرات فرکانس و در انتها با تغییر نسبت ارتفاع بوته به قطر آن در حجم ثابت، زمان رسیدن به دمای ذوب و اثرات دمایی و مغناطیسی بررسی خواهد شد.

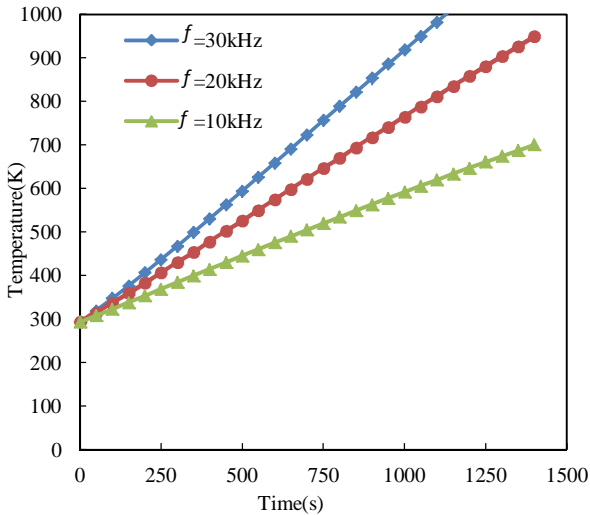
۴-۱- بررسی تاثیر تغییر تعداد حلقه

با افزایش تعداد حلقه‌ها و ثابت‌نگاه داشتن پارامترهایی چون جریان عبوری از کویل، فرکانس و شکل کویل همان طور که انتظار می‌رود، زمان رسیدن به ذوب کوتاه‌تر شده است.

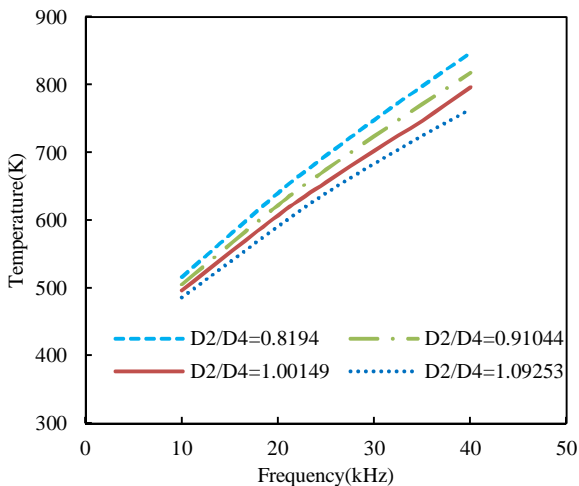
نمودار ۲، نمایش تغییرات زمان رسیدن به دمای ۷۰۰ درجه نسبت به تغییر تعداد حلقه در فرکانس‌های مختلف، جریان ثابت ۱۳۰۰ آمپر و پارامترهای هندسی ثابت $D_1/D_3=1.6237$ ، $D_2/D_4=0.9104$ و $L/D_4=0$ را نشان می‌دهد. طبق اصول گرمایش القایی، عبور جریان متناوب در سیم‌پیچ باعث ایجاد میدان مغناطیسی در داخل ماده گرم‌شونده می‌شود که این میدان مغناطیسی متناوب، جریان الکتریکی را در ماده گرم‌شونده القا می‌کند. میزان جریان القا شده در ماده گرم‌شونده، برابر با حاصلضرب تعداد حلقه سیم‌پیچ (N) در جریان عبوری از سیم‌پیچ (i) است ($I = N \times i$). با ثابت‌نگاه داشتن چگالی جریان و جریان القا شده در قطعه کار می‌بایست با شکل‌های هندسی متفاوت سیم‌پیچ، تغییرات دمایی قطعه کار در گذر زمان ثابت بماند. مطابق با اصول الکترومغناطیسی، پارامترهای اساسی در گرمایش القایی، جریان القا شده در ماده گرم‌شونده و چگالی جریان است. به این دلیل برای درستی آزمایشی نتایج حل عددی صورت‌گرفته، اشکال متفاوت سیم‌پیچ که چگالی جریان و جریان القایی یکسانی در ماده گرم‌شونده ایجاد می‌کند، مورد بررسی قرار گرفته است. تغییر تعداد حلقه هنگامی که جریان القا شده در آلومینیوم و چگالی جریان سیم‌پیچ ثابت می‌ماند، نباید اثری در تغییرات دما در گذر زمان در ماده گرم‌شونده داشته باشد. یکی از راه‌های اصولی کنترل روش عددی، استفاده از همین مفهوم است. می‌دانیم که چگالی جریان تابعی از میزان سطح مقطع کویل و جریان عبوری از کویل است ($j = i/A$). پس اگر بخواهیم تعداد حلقه را با ثابت‌نگاه داشتن چگالی جریان (j) و میزان جریان القا شده در آلومینیوم ($N \times i$) تغییر دهیم، ناچار به تغییر سطح مقطع عبور جریان در کویل‌ها و جریان عبوری از سطح مقطع کویل هستیم.

بنابراین طبق جدول ۳، سطح مقطع عبور جریان در کویل‌ها با تغییر تعداد حلقه تغییر خواهد کرد تا چگالی جریان در همه حالات ثابت بماند و همین طور برای ثابت‌ماندن حاصلضرب $N \times i$ ، جریان گذرنده از کویل‌ها نیز مطابق جدول تغییر داده می‌شود. پارامترهای تنظیم شده شامل $N \times i = 7800$ و j ثابت، $D_1/D_3=1.6237$ و $L/D_4=0$ است.

فرکانس با شیب تقریباً به صورت ثابت افزایش یافته است. با افزایش فرکانس، دما از ۵۰۵ کلوین به ازای فرکانس ۱۰ کیلوهرتز به ۸۵۰ کلوین به ازای فرکانس ۴۰ کیلوهرتز رسیده و حاکی از آن است که افزایش ۴ برابری فرکانس موجب افزایش ۱/۷ برابری دمای میانگین خط OX در زمان ۷۰۰ ثانیه می‌شود.



نمودار ۴) تاثیر تغییر فرکانس بر دما در گذر زمان در جریان ۱۳۰۰ آمپر $D_2/D_4 = 0.9104$ و $L/D_4 = 0$, $D_1/D_3 = 1.6237$



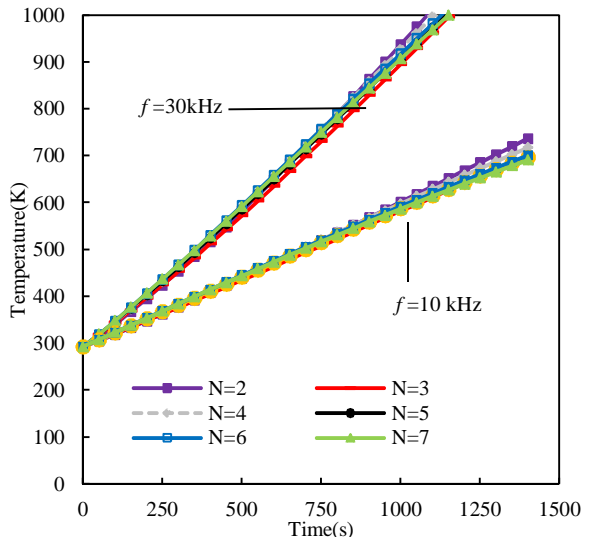
نمودار ۵) تاثیر فرکانس بر دمای میانگین خط OX در زمان ۱۴۰۰ ثانیه و در D_2/D_4 مختلف و جریان ۱۳۰۰ آمپر شکل مدل اصلی $D_1/D_3 = 1.6237$ و $L/D_4 = 0$

۳-۴- تاثیر تغییر نسبت D_3/D_4 بوته در طراحی با در نظر گرفتن حجم ثابت بوته

برای بررسی تاثیر شکل بوته در کوره القایی ذوب، نسبت قطر بر ارتفاع بوته را تغییر می‌دهیم تا در حجمی ثابت برای ماده به شکل بهینه برسیم. همان طور که از نمودار ۶ پیداست، با افزایش ارتفاع (D_4) و کاهش قطر بوته (D_3) ، دما در زمانی کوتاه‌تر به دمای ذوب می‌رسد. همان طور که در نمودار ۶ نشان داده شده، افزایش دما در اثر کاهش نسبت D_3/D_4 تا $D_3/D_4 = 0.4$ ادامه یافته است، ولی تقریباً بعد از این نسبت، افزایش ارتفاع و کاهش قطر تاثیری در پاسخ ندارد. جریان القایی سیم‌پیچ درون کوره نفوذ می‌کند، همان طور که اشاره شد، عمق نفوذ نباید زیاد باشد، چون باعث تداخل این جریان با جریان القایی طرف دیگر سیم‌پیچ می‌شود.

جدول ۳) تغییر تعداد حلقه، میزان جریان و سطح مقطع کویل با در نظر گرفتن $L/D_4 = 0$ و $D_1/D_3 = 1.6237$ و $N \times i = 7800$

تعداد حلقه N	جریان i (A)	سطح مقطع عبور جریان (mm ²)
۲	۳۹۰۰	۰/۰۰۰۴۵
۳	۲۶۰۰	۰/۰۰۰۳
۴	۱۹۵۰	۰/۰۰۰۲۲۵
۵	۱۵۶۰	۰/۰۰۰۱۸
۶	۱۳۰۰	۰/۰۰۰۱۵
۷	۱۱۱۴/۲۸	۰/۰۰۰۱۲۸۵۷



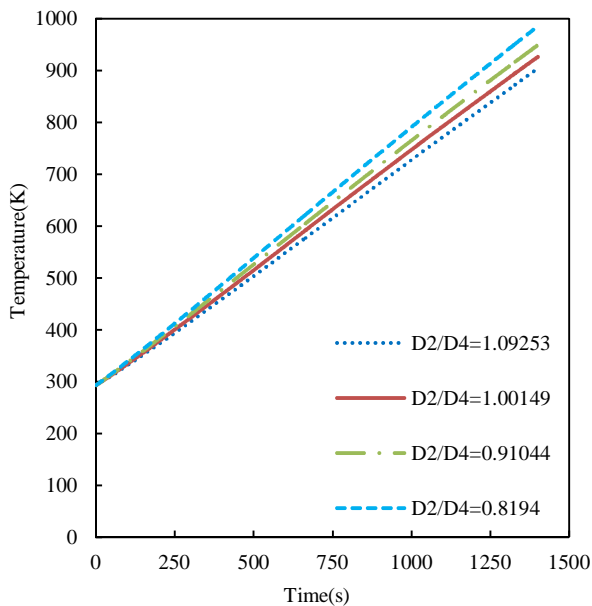
نمودار ۶) تغییرات دمای میانگین خط OX در گذر زمان در تعداد حلقه‌های مختلف (N) و در دو فرکانس ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز و جریان ثابت ۱۳۰۰ آمپر و $N \times i$ ثابت و چگالی جریان ثابت

۴-۲- تاثیر تغییر فرکانس

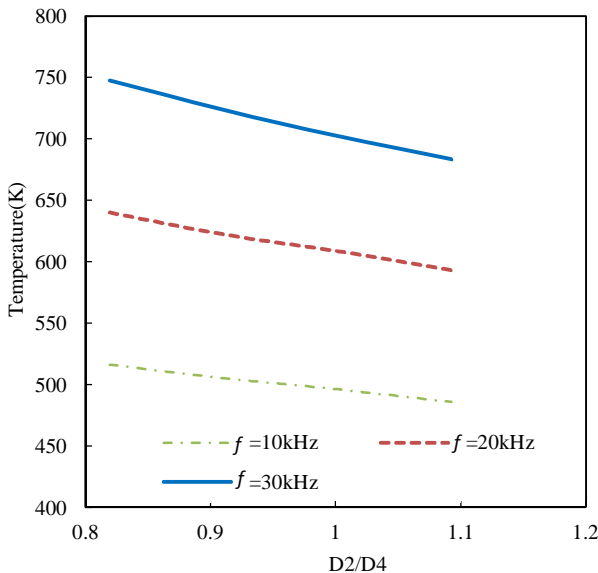
با توجه به هندسه در نظر گرفته شده برای ذوب آلومینیوم، نمودار تغییرات دمای میانگین خط OX در بازه زمانی صفر تا ۱۴۰۰ ثانیه برای فرکانس ۱۰، ۲۰ و ۳۰ کیلوهرتز در نمودار ۴ نشان داده شده است. همان طور که از نمودار می‌توان نتیجه گرفت، افزایش فرکانس نسبت به زمان خطی است. افزایش فرکانس، زمان رسیدن به دمای ذوب را کوتاه می‌دهد. مقایسه دمای حاصل از دو فرکانس ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز در لحظه ۹۰۰ ثانیه نشان می‌دهد با ۳ برابری کردن فرکانس دمای حاصله، ۱/۵ برابر خواهد شد. این نتیجه تطابق مدل‌سازی با اصول گرمایش القایی که حاکی از ارتباط تغییرات دما با توان یک‌دوم فرکانس است را نشان می‌دهد. به دلیل این که افزایش فرکانس باعث کاهش عمق نفوذ در ماده می‌شود، برای افزایش فرکانس در طراحی محدودیت داریم. پس باید تا حدی فرکانس را افزایش داد که عمق نفوذ مناسب باشد و بعد از ذوب آلومینیوم از اطراف، سطوح داخلی هم حرارت یابند و مذاب شوند. همچنین عمق نفوذ نباید زیاد باشد، چون باعث تداخل این جریان با جریان القایی طرف دیگر سیم‌پیچ می‌شود. فرکانس‌های استاندارد شده زیادی برای کوره‌های تجارتي وجود دارند. مهم‌ترین عواملی که در امر انتخاب فرکانس موثرند، عبارت از عمق نفوذ، توان ورودی، نوع محصول و ظرفیت کوره هستند. هر چه گنجایش بوته کمتر باشد، فرکانس بالاتر احتیاج است [8].

تغییرات فرکانس را از بازه ۱۰ تا ۴۰ کیلوهرتز و با گام ۵ هرتز تکرار کردیم. تاثیر فرکانس در زمان ثابت ۷۰۰ ثانیه روی دمای میانگین خط OX در مقادیر مختلف D_2/D_4 در نمودار ۵ نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، تغییرات دما نسبت به

OX در زمان ۷۰۰ ثانیه (زمان کل فرآیند گرمادهی مغناطیسی) افزایش یافته است و با افزایش ۱۰ و ۲۰ درصدی فاصله کویل‌ها، دمای میانگین نمونه کاهش می‌یابد. هر چقدر که فاصله کویل‌ها کمتر باشد، چگالی جریان بین آنها بیشتر خواهد شد که همین افزایش چگالی جریان باعث افزایش جریان القاشده در قطعه کار می‌شود و به تبع آن با تلفات گردابی و انرژی حرارتی تولیدشده بیشتری مواجه خواهیم بود. بنابراین با در نظر گرفتن امکان خمش و نزدیکی کردن سیم‌پیچ‌ها به هم، کمترین میزان ممکن را انتخاب می‌کنیم.



نمودار ۸) تاثیر تغییرات نسبت D_2/D_4 بر دما در گذر زمان، جریان ۱۳۰۰ آمپر فرکانس ۲۰ کیلوهرتز، $L/D_4 = 0$ و $D_1/D_3 = 1.6237$



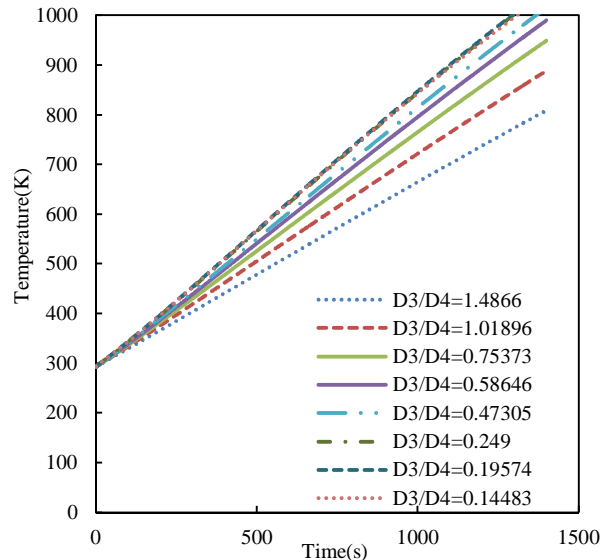
نمودار ۹) تاثیر تغییرات نسبت D_2/D_4 بر دما در فرکانس‌های مختلف در زمان ۷۰۰ ثانیه، جریان ۱۳۰۰ آمپر، $L/D_4 = 0$ و $D_1/D_3 = 1.6237$

۵- نتیجه‌گیری

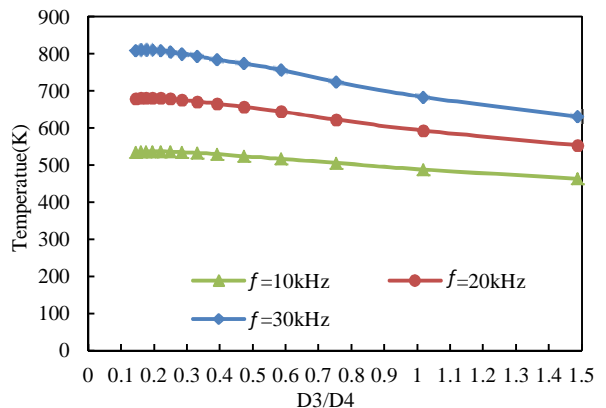
در این مقاله برای اولین بار به صورت جامع به بررسی پارامترهای هندسی کوره القایی تحت خلأ و تاثیر آن بر زمان رسیدن به دمای

طبق استانداردهای مهندسی، قطر بوته باید حداقل برابر عمق نفوذ باشد [8].

حال این بررسی را برای دو فرکانس ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز نیز انجام می‌دهیم. در نمودار ۷، تغییرات دما در زمان ثابت ۷۰۰ ثانیه نسبت به D_3/D_4 نمایش داده شده است. طبق نتایج، با کاهش نسبت قطر به ارتفاع (در مقادیر کمتر از ۰/۴) تغییر محسوسی در نتیجه دما حاصل نشده و این روند تا نسبت $D_3/D_4 = 0.14$ ادامه یافته است.



نمودار ۶) تغییرات دما نسبت به زمان در D_3/D_4 مختلف $i=1300A$ ، $D_2/D_4 = 0.9104$ و $L/D_4 = 0$ ، $D_1/D_3 = 1.6237$ ، $f=20kHz$



نمودار ۷) تغییرات دما نسبت به D_3/D_4 مختلف در زمان ۷۰۰ ثانیه در سه فرکانس مختلف ۱۰، ۲۰ و ۳۰ کیلوهرتز و جریان ثابت ۱۳۰۰ آمپر و حجم ثابت بوته نسبت‌های $D_2/D_4 = 0.9104$ و $L/D_4 = 0$ ، $D_1/D_3 = 1.6237$

۴-۴- تغییر فاصله دوره‌های کویل

با تغییر فاصله مراکز، طول سیم‌پیچ تغییر می‌کند. با بررسی تاثیر تغییر نسبت طول سیم‌پیچ (D_2) به ارتفاع بوته (D_4) به این نتیجه رسیدیم که زمان رسیدن به دمای ذوب با کم شدن فاصله، کوتاه‌تر می‌شود. همان طور که در نمودار ۸ نشان داده شده، هر چقدر فاصله کویل‌ها کمتر باشد، دمای نمونه در یک بازه زمانی ثابت، بیشتر افزایش یافته است.

همان طور که در نمودار ۹ در سه فرکانس متفاوت، تغییر نسبت ارتفاع سیم‌پیچ به ارتفاع بوته بررسی شده، نتیجه گرفته می‌شود که با کاهش ۱۰ درصدی فاصله بین سیم‌پیچ‌ها، میانگین دمای خط

μ_0	نفوذپذیری خلأ
μ_r	نفوذپذیری نسبی ماده
ρ	چگالی بار الکتریکی
q	چگالی
σ	هدایت الکتریکی
ω	بسامد زاویه‌ای

منابع

- 1- Yaohua Y, Chen R, Guo J, Ding H, Su Y. Experimental and numerical investigation on mass transfer induced by electromagnetic field in cold crucible used for directional solidification. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017;114:297-306.
- 2- Fabbri M, Forzan M, Lupi S, Morandi A, Ribani PL. Experimental and numerical analysis of DC induction heating of aluminum billets. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2009;45(1):192-200.
- 3- Choudhury A, Blum M. Economical production of titanium-aluminide automotive valves using cold wall induction melting and centrifugal casting in a permanent mold. *Vacuum*. 1996;47(6-8):829-831.
- 4- El-Mashad HM, Zhongli Pan. Application of induction heating in food processing and cooking. *Food Engineering Reviews*. 2017;9(2):82-90.
- 5- Ocilka M, KOVÁČ D. Simulation model of induction heating in Comsol multiphysics. *Acta Electrotechnica et Informatica*. 2015;15(1):29-33.
- 6- Leinhard IV JH. A heat transfer textbook. 4th Edition. Cambridge: Phlogiston Press; 2013.
- 7- Barragán LA, Navarro D, Acero J, Urriza I, Burdío JM. FPGA implementation of a switching frequency modulation circuit for EMI reduction in resonant inverters for induction heating appliances. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008;55(1):11-20.
- 8- Semiatin SL. Elements of induction heating: Design, control, and applications. 2nd Edition. Zinn S, editor. Metals Park: ASM International; 1988.
- 9- Rudnev VI, Cook RL, Loveless DL, Black MR. Induction heat treatment: Basic principles, computation, coil construction, and design considerations. In: Totten GE, editor. *Steel heat treatment: Equipment and process design*. 2nd Edition. Boca Raton: CRC Press; 2006. p. 277.
- 10- Drobenko B, Hachkevych O, Kournyts'kyi T. A mathematical simulation of high temperature induction heating of electroconductive solids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007;50(3-4):616-624.
- 11- Bay F, Labbé V, Favennec Y, Chenot JL. A numerical model for induction heating processes coupling electromagnetism and thermomechanics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2003;58(6):839-867.
- 12- Marchand Ch, Foggia A. 2D finite element program for magnetic induction heating. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1983;19(6):2647-2649.
- 13- Kurose H, Miyagi D, Takahashi N, Uchida N, Kawanaka K. 3-D eddy current analysis of induction heating apparatus considering heat emission, heat conduction, and temperature dependence of magnetic characteristics. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2009;45(3):1847-1850.
- 14- Huang MS, Huang YL. Effect of multi-layered induction coils on efficiency and uniformity of surface heating. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010;53(11-12):2414-2423.

ذوب پرداخته شده است. با دنرظرگرفتن چگالی جریان ثابت و جریان القا شده ثابت، به بررسی اثرات تعداد حلقه سیم‌پیچ، پرداخته و نتایج حاصل با مفاهیم الکترومغناطیس مقایسه شد. در تعداد حلقه‌های بالا، تمرکز حرارت بر بوته معطوف است و هر چقدر تعداد بیشتری از حلقه (در طراحی سیم‌پیچ) انتخاب شود، با جریان الکتریکی کمتر و منبع تغذیه مقرون به صرفه‌تر به دمای مد نظر خواهیم رسید. سپس به بررسی تاثیر فرکانس بر دمای میانگین پرداخته شده است. با افزایش فرکانس، دمای ماده در زمانی ثابت افزایش می‌یابد، ولی به علت تاثیر فرکانس بر عمق نفوذ مغناطیسی، در طراحی کوره برای انتخاب فرکانس محدودیت داریم. با تغییر نسبت قطر بر ارتفاع بوته در حجم ثابت، به بررسی تاثیر شکل بوته در طراحی پرداخته شده است. نتیجه گرفته شد که با کاهش نسبت قطر به ارتفاع، ماده در زمانی کوتاه‌تر به دمای ذوب می‌رسد. در نسبت‌های کمتر از $D_3/D_4 = 0.4$ دیگر تغییر محسوسی در میانگین دما حاصل نشده که این روند تا نسبت هندسی $D_3/D_4 = 0.14$ مورد بررسی قرار گرفته است. با بررسی تاثیر تغییر نسبت طول سیم‌پیچ (D_2) به ارتفاع بوته (D_4) به این نتیجه رسیدیم که زمان رسیدن به دمای ذوب با کم شدن فاصله کوتاه‌تر می‌شود.

تشکر و قدردانی: از دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود که امکانات را برای انجام این پژوهش فراهم نمودند، تشکر می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است.

تعارض منافع: مولفین مقاله، هیچ گونه تعارض منافعی با فرد یا گروه دیگر ندارند.

سهم نویسندگان: سارا قربانزاده (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی (۲۰٪)؛ محسن نظری (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۲۰٪)؛ محمدمحسن شاه‌مردان (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی (۲۰٪)؛ امیر حسن‌نیا (نویسنده چهارم)، پژوهشگر کمکی (۲۰٪)؛ مصطفی نظری (نویسنده پنجم)، پژوهشگر کمکی (۲۰٪)

منابع مالی: منابع مالی خاصی برای انجام این تحقیق استفاده نشده است.

۶- پی‌نوشت

A	بردار پتانسیل مغناطیسی
B	بردار چگالی شار مغناطیسی
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه
D	بردار جابه‌جایی الکتریکی
E	بردار میدان الکتریکی
f	فرکانس
H	شدت میدان مغناطیسی
i	جریان عبوری از سیم‌پیچ
I	جریان القا شده در ماده گرم‌شونده
J	بردار چگالی جریان مغناطیسی
J_e	چگالی جریان خارجی
k	ضریب هدایت حرارتی
Q	منبع گرما
T	دما

علائم یونانی

δ	عمق نفوذ
ϵ_0	گذردهی الکتریکی خلأ
ϵ_r	گذردهی الکتریکی نسبی

Transactions on Magnetics. 1989;25(3):2665-2669.

17- Kranjc M, Zupanic A, Miklavcic D, Jarm T. Numerical analysis and thermographic investigation of induction heating. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010;53(17-18):3585-3591.

18- Davies J, Simpson P. Induction heating handbook. New York: McGraw-Hill; 1979.

15- Piotr B, Smolka J, Golak S, Przyłucki R, Palacz M, Siwiec G, et al. Numerical and experimental investigation of heat transfer process in electromagnetically driven flow within a vacuum induction furnace. Applied Thermal Engineering. 2017;124:1003-1013.

16- Labridis D, Dokopoulos P. Calculation of eddy current losses in nonlinear ferromagnetic materials. IEEE