

## شبیه‌سازی ریخته‌گری تبرید مستقیم در حضور میدان مغناطیسی با فرکانس پایین برای تولید بیلتهای آلومینیمی با قطر بالا

حسین مومنی<sup>۱\*</sup>

### چکیده

تولید بیلتهای آلومینیمی با قطر بالا و با حداقل عیوب ساختاری، یکی از خواسته‌های پژوهشگران و صنعتگران صنایع مرتبط است. در این پژوهش مدلی برای شبیه‌سازی روش ریخته‌گری تبرید مستقیم در حضور میدان الکترومغناطیسی با فرکانس پایین با حل توأمان میدان‌های فیزیکی گوناگون توسعه یافته است. این مدل با نتایج تجربی اندازه‌گیری دما و میدان مغناطیسی در محدوده بیلتهای تولیدی مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفته است. نتایج حل میدان‌های حرارتی، جریان سیال، پدیده انجماد و نیز میدان الکترومغناطیسی نشان داد که قرار دادن کویل در پشت قالب سبب رانده شدن مذاب از جلوی قالب به سمت مناطق مرکزی حوضچه مذاب می‌گردد. همچنین بررسی پارامتری این فرایند مشخص کرد که کاهش فرکانس و افزایش شدت الکترومغناطیسی کویل به ترتیب موجب یکنواخت‌تر شدن توزیع نیروی الکترومغناطیسی و شدیدتر شدن آن می‌شود و به‌گونه کلی استفاده از مقادیر مناسب پارامترهای الکترومغناطیسی در این فرایند می‌تواند افزایش کیفیت سطحی و بهبود ویژگی‌های ساختاری در مناطق نزدیک به سطح در بیلتهای با قطر بالا را در پی داشته باشد. **واژه‌های کلیدی:** ریخته‌گری تبرید مستقیم، الکترومغناطیس، بیلتهای با قطر بالا، شبیه‌سازی انجماد.

<sup>۱</sup> - دانش‌آموخته دکتری مهندسی مواد دانشگاه علم و صنعت ایران

\* - نویسنده مسوول مقاله : h\_momeni@iust.ac.ir

## پیشگفتار

ریخته‌گری تبرید مستقیم آلیاژهای آلومینیم مثالی مناسب برای یک تکنولوژی است که به‌موقع برای برآورده ساختن نیازهای صنعت به وجود آمده است. به‌گونه کلی در ریخته‌گری تبرید مستقیم کیفیت سطحی و ریزساختار بسیار مورد توجه است. برای مقابله با عیوب ناخواسته فرایندی از روش‌های گوناگونی مثل ارتفاع کم ریخته‌گری، استفاده از بالاپوش، روانکاری قالب و میدان‌های الکترومغناطیسی به کار گرفته می‌شود [۱-۵].

به کارگیری میدان الکترومغناطیسی در ریخته‌گری نیمه‌پیوسته یکی از ایده‌های جالب توجه بوده که تا حد زیادی عیوب گوناگون را برطرف نموده است. دو باتکین و انسوشکین [۶] به این نتیجه رسیدند که در حضور همرفت اجباری (هم زدن مکانیکی یا الکترومغناطیسی) انتقال از جدایش منفی (معکوس) به جدایش مثبت (نرمال) در ریخته‌گری تبرید مستقیم امکان‌پذیر است. از بین روش‌های گوناگونی که برای استفاده از میدان‌های الکترومغناطیسی در ریخته‌گری تبرید مستقیم پیشنهاد شده است، ریخته‌گری الکترومغناطیسی<sup>۱</sup> یا ریخته‌گری بدون قالب اختراع تأثیرگذار و انقلابی به حساب می‌آید. وجود قالب در این فرایند مشکلاتی را در پی داشت که از آن جمله می‌توان به انجماد زودرس با احتمال آویزان شدن بیلت یا شمش، انجماد محذب یا مقعر مایع و تشکیل سطح نواری شده با جوش‌های سرد، تشکیل فاصله هوایی و متناظر با آن تغییر شرایط انجماد، نیاز به روانساز و ... اشاره کرد. در این روش برهم کنش بین جریان‌های ادی با میدان مغناطیسی خارجی، نیروهای الکترودینامیکی ایجاد می‌کند که منجر به فشردن مذاب می‌شود. آب خنک‌کننده بر سطح این مذاب قالب بندی شده اعمال می‌شود و قسمت جامد شده از زیر، مشابه ریخته‌گری تبرید مستقیم معمولی، بیرون کشیده می‌شود [۷]. از طرف دیگر گرچه حذف قالب در این روش کیفیت سطحی بسیار عالی برای شمش ریخته‌گری شده ایجاد می‌کند لیکن همه جنبه‌های متالورژیکی را اصلاح نمی‌نماید [۸]. هم-چنین معایبی از جمله هزینه بر بودن تولید میدان

مغناطیسی، دشواری کنترل سطح مذاب و بی حرکت نگاه داشتن آن و احتمال آنکه بیلتهای تولیدی استوانه‌های نشود را می‌توان برای مشکلات این روش ریخته‌گری برشمرد.

روش دیگر کاربرد الکترومغناطیسی در ریخته‌گری نیمه پیوسته فرآیند ریخته‌گری-بهسازی-الکترومغناطیسی (CREM)<sup>۲</sup> نامیده می‌شود که توسط ویوز و فرنچمن [۳]، [۴] در انتهای دهه ۱۹۸۰ توسعه یافت. در روش CREM کویل در حول قالب شمش قرار می‌گیرد به طوری که تقریباً هم شکل قالب است. جریان متناوب، القاگر یک میدان مغناطیسی متغیر درون مذاب ایجاد می‌کند که منجر به جریان القایی می‌شود. بنابراین مذاب در معرض نیروی جرمی الکترومغناطیسی ناشی از جریان‌های ادی و میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد. در این فرآیند شدت میدان مغناطیسی از دیواره به سمت مرکز شمش افت پیدا می‌کند. به صورت خلاصه می‌توان گفت که با روش CREM شدت به هم زدن و سطح تماس را به‌طور دلخواه می‌توان کنترل کرد بدون آنکه همزن تماس مستقیم با مذاب داشته باشد و مشکلات آلودگی مذاب را ایجاد نماید. علاوه بر این باید خاطر نشان کرد که اثر پشتیبانی قالب، اگر چه در حضور نیروهای نگهدارنده الکترومغناطیسی کم می‌شود ولی هم‌چنان وجود دارد [۳].

روش ریخته‌گری الکترومغناطیسی با فرکانس پایین (LFEC)<sup>۳</sup> بر اساس تکنولوژی CREM توسط کوی [۱]، [۹] توسعه داده شد. تفاوت LFEC با CREM در استفاده از جریان با فرکانس پایین است که به کارگیری میدان الکترومغناطیسی را تسهیل می‌کند. بررسی‌ها نشان داده است که در فرآیند LFEC می‌توان جریان و دما را با استفاده از تنظیم میدان مغناطیسی کنترل نمود [۵]. تحقیقات انجام شده بر روی این روش مشخص نموده است که استفاده از این روش نسبت به روش ریخته‌گری DC معمولی می‌تواند موجب تولید محصولاتی با تمایل به ترک کمتر، کیفیت سطحی بهتر و تمایل به پارگی گرم کمتر شود.

در این تحقیق فرایند ریخته‌گری تبرید مستقیم در

<sup>۲</sup>-Casting, Refining, Electromagnetic

<sup>۳</sup>-Low Frequency Electromagnetic Casting

<sup>۱</sup>- Electromagnetic Casting (EMC)

شد [۱۱].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) - \nabla P + S_m \quad (8)$$

در این روابط  $\mu_{eff}$  و  $S_m$  به ترتیب ویسکوزیته موثر و ترم منبع مومنتم هستند.

در این پژوهش از مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد که یک مدل نیمه تجربی است، جهت مدل کردن انتقال انرژی سینتیکی آشفتگی ( $k$ ) و نرخ از بین رفتن آن ( $\varepsilon$ ) استفاده شد. مقادیر  $k$  و  $\varepsilon$  از طریق حل معادلات زیر به دست می-آیند.

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k - \rho \varepsilon + S_k \quad (9)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (10)$$

$C_1$  و  $C_2$  ثابت هستند.  $\sigma_k$  و  $\sigma_\varepsilon$  و به ترتیب اعداد پرنتل آشفته برای  $k$  و  $\varepsilon$  هستند.

$S_k$  و  $S_\varepsilon$  نیز ترم‌های منبع نامیده می‌شوند. تمامی ثابت‌های مورد نیاز در این مدل در جدول ۱ آمده است.

معادله انتقال حرارت به صورت کلی به فرم زیر است

$$\frac{\partial (\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U H) = \nabla \cdot [k \nabla T] + S_{th} \quad (11)$$

که در این رابطه  $k$  و  $S_{th}$  به ترتیب ضریب هدایت حرارت و ترم منبع حرارتی هستند و  $H$  انتالپی سیستم است.

انتالپی مواد به صورت مجموع انتالپی محسوس ( $h$ ) و گرمای نهان ( $\Delta H$ ) محاسبه می‌شود.

$$H = h + \Delta H \quad (12)$$

در محاسبات مقدار گرمای نهان نیز بر اساس کسر مایع و گرمای نهان ماده  $L$  به صورت زیر حساب می‌گردد.

$$\Delta H = f_l L \quad (13)$$

حضور میدان الکترومغناطیسی با فرکانس پایین موسوم به LFEC برای تولید بیلتهای آلومینیومی با قطر بالا مورد بررسی قرار گرفته است. اگرچه تولید بیلتهایی تا قطر ۲۰۰ mm با استفاده از این روش به خوبی صورت گرفته است ولی در مورد بیلتهای با قطر بالاتر اطلاعاتی در دسترس نیست. به همین منظور شبیه‌سازی فرایند انجماد در این روش با توجه به جریان سیال و توزیع حرارت و تأثیرات میدان مغناطیسی بر فرایند صورت گرفته و اثرات مختلف پارامترهای الکترومغناطیسی سنجیده شده است.

## مواد و روشها

به منظور به دست آوردن نیروهای ناشی از حضور میدان مغناطیسی بر سیال، چگالی شار میدان مغناطیسی  $B$  و شدت میدان الکتریکی  $E$  با حل کردن معادلات میدان ماکسول به دست آمد که این معادلات عبارتند از [۱۰]:

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times B = \frac{\varepsilon}{\mu} \frac{\partial E}{\partial t} + J \quad (2)$$

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho_e}{\varepsilon} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4)$$

در این روابط  $B$  چگالی شار مغناطیسی،  $E$  میدان الکتریکی،  $\mu$  گذردهی مغناطیسی،  $\varepsilon$  ثابت الکتریکی و  $\rho_e$  چگالی بار الکتریکی،  $J$  چگالی جریان الکتریکی و  $t$  زمان است.

برای حل معادلات مذکور لازم است تا جریان هدایتی  $J$  با استفاده از قانون اهم به دست آید ( $\sigma$  هدایت الکتریکی ماده است و  $U$  میدان سرعت سیال).

$$J = \sigma(E + U \times B) \quad (5)$$

برهم‌کنش بین میدان مغناطیسی و سایر میدان‌های فیزیکی را می‌توان به صورت چگالی نیروی حجمی الکترومغناطیسی بیان کرد که به صورت زیر است.

$$f_{em} = J \times B \quad (6)$$

طبق شرایط و فیزیک مسئله، در این پژوهش از معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس به شرح زیر استفاده

با توجه به رسانایی الکتریکی بالای مذاب آلیاژ آلومینیم از جریان الکتریکی ناشی از جابجایی مذاب صرف نظر شده است

میدان مغناطیسی اعمال شده به اندازه کافی قوی است که تغییرات میدان سیال تأثیر بسیار ناچیزی بر آن دارد. عدد رینولدز مغناطیسی عدد بسیار کوچکی به دست می‌آید. با این حساب در قانون اهم از ترم  $\sigma(U \times B)$  می‌توان صرف نظر نمود [۱۰].

در فرایند LFEC گرمای ژول ناشی از میدان مغناطیسی در مقایسه با انترپی آلومینیم مذاب قابل چشم‌پوشی است.

تغییرات غلظت عناصر آلیاژی در این مدل لحاظ نشده است.

مذاب آلیاژ آلومینیم به صورت سیال تراکم ناپذیر و نیوتنی در نظر گرفته شد.

به دلیل تقارن موجود در هندسه و شرایط مرزی، مسئله به صورت تقارن محوری حل شد.

در این پژوهش به منظور مدل کردن پدیده جریان سیال توأم با انجماد در حضور میدان مغناطیسی از دو نرم افزار استفاده شد. از آنجا که فرض شد تأثیر سایر میدان‌ها بر میدان مغناطیسی ناچیز است ابتدا با استفاده از نرم افزار COMSOL میدان مغناطیسی و میانگین زمانی نیروی الکترومغناطیسی وارد بر سیال محاسبه شد. سپس از نرم افزار FLUENT برای شبیه‌سازی میدان‌های سرعت و دما و هم‌چنین پدیده انجماد با توجه به نیروی الکترومغناطیسی به دست آمده استفاده شد. شکل و مشخصات هندسی برای شبیه‌سازی ریخته‌گری DC بیلت آلومینیم با شعاع تقریباً SI ۳۰ در شکل ۱ و جدول‌های ۲ و ۳ برای هر دو نرم‌افزار مورد استفاده آمده است. در نرم افزار COMSOL از روش پتانسیل برداری مغناطیسی برای محاسبه میدان مغناطیسی استفاده گشت. در نرم افزار FLUENT برای ایجاد رابطه بین سرعت و فشار الگوریتم SIMPLEC و برای گسسته‌سازی معادلات نگرش upwind درجه اول به کار گرفته شد. در این مطالعه از آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ استفاده شد که خواص فیزیکی در نظر گرفته شده برای آن در جدول ۴ آمده است.

$$f = \begin{cases} 1 & T > T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_s < T < T_l \\ 0 & T > T_l \end{cases} \quad (14)$$

در روش مورد استفاده، برای کاهش مومنتم و انرژی سینتیکی آشفستگی در منطقه خمیری و به صفر رسانیدن آن در منطقه جامد از ترم منبع زیر در معادلات مومنتم و آشفستگی استفاده شده که به نام ترم دارسی مشهور است [۱۲].

$$S_D = \frac{(1 - f_l)^2}{(f_l^3 + \epsilon)} A_{mush} (X - X_{cast}) \quad (15)$$

یک عدد کوچک برای جلوگیری از صفر شدن مخرج و  $A_{mush}$  یک عدد بزرگ،  $X$  متغیر وابسته  $k, v, u$  و هم‌چنین مقدار این متغیر در فاز جامد است.  $\epsilon$  و وجود این ترم منبع سبب می‌شود که ماده پس از جامد شدن با سرعت ریخته‌گری در میدان محاسباتی حرکت کند.

برای مدل‌سازی نیروی ارشمیدسی ناشی از تغییرات چگالی در اثر دما که موجب حرکت سیال می‌شود، از تقریب بوزینسک استفاده گشت و ترم منبع زیر به معادله جریان اضافه شد [۱۲].

$$F_{th} = \rho g \beta (T - T_{ref}) \quad (16)$$

که در آن  $\beta$  ضریب انبساط حجمی و  $T_{ref}$  دمای مرجع است که اشاره به دمایی دارد که در آن سرعت مایع صفر می‌شود.

با توجه به موارد گفته شده ترم منبع معادله‌های جریان سیال به صورت زیر می‌گردد.

$$S_m = F_{em} - S_D + F_{th} \quad (17)$$

در این پژوهش ریخته‌گری تبرید مستقیم در حضور میدان مغناطیسی فرکانس پایین مدل شده که این امر مستلزم آن است که برهم‌کنش بین فیزیک‌های گوناگون دخیل در این فرایند به دقت شناخته و حل گردند. با توجه به پیچیدگی معادلات و هم‌چنین مشکلات ناشی از حل توأم آنها فرض‌های زیر به‌منظور ساده‌سازی مسئله و رسیدن به جواب با امکانات موجود در نظر گرفته شده است.

به صورت دیوار ثابت لحاظ شد. در مورد شرایط حرارتی نیز از انتقال حرارت به وسیله جریان همرفت با ضریب انتقال حرارت متغیر استفاده شد.

$$k_{th} \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_0) \quad (18)$$

در این رابطه  $T_0$  دمای محیط است که برابر با  $K$  ۳۲۳ در نظر گرفته شد.

ضریب انتقال حرارت براساس مقدار کسر جامد تشکیل شده طبق رابطه زیر به دست آمد.

$$h = h_{constant}(1 - f_s) + h_{air}f_s \quad (19)$$

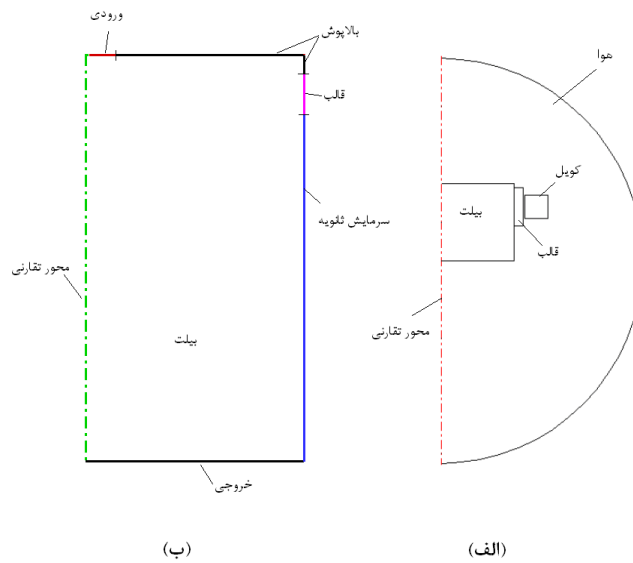
در این رابطه  $h_{constant}$  ضریب هدایت حرارت در زمانی است که تماس کامل بین قالب و مذاب برقرار باشد. لیکن به دلیل وقوع انجماد و انقباض ناشی از آن، فاصله هوایی بین قالب و پوسته جامد پدید می‌آید که در این حالت  $h_{air}$  دخیل می‌گردد.  $f_s$  در حقیقت کسر جامد تشکیل شده است. در این پژوهش  $h_{constant}$  و  $h_{air}$  به ترتیب  $2500 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  و  $100 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  لحاظ شد [۱۴].

در مرز سرد شدن ثانویه شرایط سرعت و آشفتگی به صورت دیوار متحرک با سرعت ثابت ریخته‌گری در نظر گرفته شد. برای ایجاد شرایط دمایی مناسب این مرز به دو قسمت تقسیم شد؛ یکی سرد شدن در اثر برخورد مستقیم جت آب و دیگری در اثر جریان آب بر سطح بیلت. برای قسمت اول ضریب انتقال حرارت  $22000 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  و برای قسمت دوم  $10000 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  لحاظ شد. دمای محیط برای سیال خنک کننده نیز  $293 \text{ K}$  در نظر گرفته شد.

از آنجا که هدف از حل معادلات ماکسول به دست آوردن نیروی حجمی الکترومغناطیس بر آلیاژ آلومینیم در حال ذوب بوده است برای حل این معادلات در نرم افزار COMSOL شبکه‌بندی در این منطقه ریزتر از سایر مناطق در نظر گرفته شده است. در شبکه‌بندی این منطقه حداقل ابعاد المان  $7/0 \times 10^{-4} \text{ m}$  و حداکثر  $10^{-3} \text{ m}$  است.  $4/0 \times 10^{-4}$  شبکه‌بندی میدان محاسباتی برای حل معادلات سرعت و انرژی در نرم افزار FLUENT به گونه‌ای صورت گرفته که در مناطق نزدیک به ورودی و قالب ریزتر و در مناطق جامد پایینی درشت‌تر ایجاد شده است. در این شبکه‌بندی حداقل و حداکثر مقدار حجم کنترل به ترتیب  $1/67 \times 10^{-5} \text{ m}^3$  و  $10^{-4} \text{ m}^3$  است.  $1/31 \times 10^{-4}$

به منظور اعمال شرایط مرزی در نرم افزار COMSOL، سطح بیرونی نیم دایره عایق مغناطیسی لحاظ شده و محدوده کوپل به صورت تک‌دور با جریان و فرکانس گوناگون در نظر گرفته شده است.

در نرم افزار FLUENT ورود سیال با دمای ثابت  $973 \text{ K}$  و با سرعت بالانس شده با سرعت ریخته‌گری قرار داده شد. با توجه به آشفتگی بودن جریان مقدار  $k$  و  $\epsilon$  به ترتیب از روابط  $k = 0.01 \times u_{inlet}^2$  و  $\epsilon = k^{1.5} / R_{noz}$  که  $R_{noz}$  شعاع هیدرولیک ورودی است، محاسبه گردید [۱۳]. خروج سیال از پایین میدان محاسباتی با سرعت ثابت  $0/00083 \text{ m/s}$  که همان سرعت ریخته‌گری است، در نظر گرفته شد. از آنجا که مرز خروجی در این آلیاژ جامد خواهد بود بنابراین مقادیر  $k$  و  $\epsilon$  صفر لحاظ شدند. سطح آزاد و بالاپوش به صورت دیوار ثابت و عایق حرارتی در نظر گرفته شدند. در مرز قالب شرایط سرعت و آشفتگی



شکل ۱. مدل‌های به کار رفته در نرم افزارهای (الف) COMSOL و (ب) FLUENT.

جدول ۱- ثابت‌های مدل k-ε

$C_1$	$C_2$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$	$C_\mu$
۱/۴۴	۱/۹۲	۱/۰	۱/۳	۰/۰۹

جدول ۲- مشخصات مدل به کار رفته در نرم افزار COMSOL.

بیلت آلومینیم	قلب	کویل	هوا
۰/۴ m × R	۰/۲ m × ۰/۰۵ m	۱/۲ m × ۰/۱۲ m	نیم دایره به شعاع ۱ m

جدول ۳- مشخصات مدل به کار رفته در نرم افزار FLUENT.

ورودی	بالا پوش	سرمایش قالب	سرمایش ثانویه
۰/۰۵ m	۰/۰۳۵ m	۰/۰۷ m	۰/۶۰ m

جدول ۴- خواص فیزیکی آلیاژ آلومینیم مورد استفاده

$\mu_l (Pa.s)$	$K (\frac{W}{m.K})$	$H_T - H_{298K} (J/kg)$	$C_P (\frac{J}{K.kg})$	$\rho (\frac{kg}{m^3})$	$T (K)$
	۱۷۵	.	۸۵۰	۲۷۸۵	۲۹۸
	۱۸۵	۶۶۰۰۰	۹۰۰	۲۷۷۰	۳۷۳
	۱۹۳	۱۵۹۰۰۰	۹۵۰	۲۷۵۰	۴۸۳
	۱۹۳	۲۵۵۰۰۰	۹۷۰	۲۷۳۰	۵۷۳
	۱۹۰	۳۵۳۰۰۰	۱۰۰۰	۲۷۰۷	۶۷۳
	۱۸۸	۴۷۵۰۰۰	۱۰۸۰	۲۶۸۳	۷۷۳
	۱۸۸	۵۶۶۰۰۰	۱۱۰۰	۲۶۷۴	۸۱۱
	-	۶۷۳۰۰۰	-	-	۹۰۵
۰/۰۰۱۳	۸۵/۵	۹۷۰۰۰۰	۱۱۴۰	۲۵۰۰	۹۰۵
۰/۰۰۱۲	۸۵	۱۰۴۸۰۰۰	۱۱۴۰	۲۴۸۰	۹۷۳
۰/۰۰۱۱	۸۴	۱۱۶۲۰۰۰	۱۱۴۰	۲۴۵۲	۱۰۷۳

## نتایج و بحث

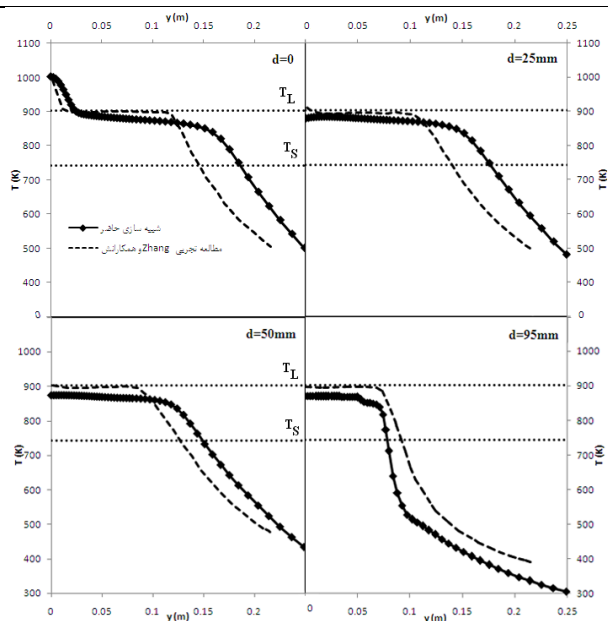
## اعتبار سنجی و ارزیابی مدل

در ابتدا جهت ارزیابی و اعتبارسنجی مدل توسعه یافته، شبیه‌سازی در مورد یک آزمایش تجربی [۸] که تولید بیلت آلومینیم سری 7xxx با استفاده از روش LFEC بود، صورت گرفت. در این آزمایش قطر بیلت ریخته‌گری شده ۲۰۰ mm بوده است. در شکل ۲ تغییرات دما در طول بیلت پس از رسیدن به حالت پایدار به ازای فواصل گوناگون از مرکز بیلت در فرایند LFEC نشان داده شده است. در این شکل تطابق مناسبی بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی از نظر روند کاهش دما در طول بیلت در نقاط گوناگون دیده می‌شود. برای فهم بهتر مناطق انجمادی خطوط مایع و جامد آلیاژ مورد بررسی نیز ترسیم شده است. با دقت در این شکل می‌توان دریافت که در حضور میدان مغناطیسی، در منطقه مذاب توزیع دمای یکنواخت‌تری وجود دارد و در محدوده مقابل قالب، اغلب نقاط در دمای مایع ( $T_L$ ) هستند.

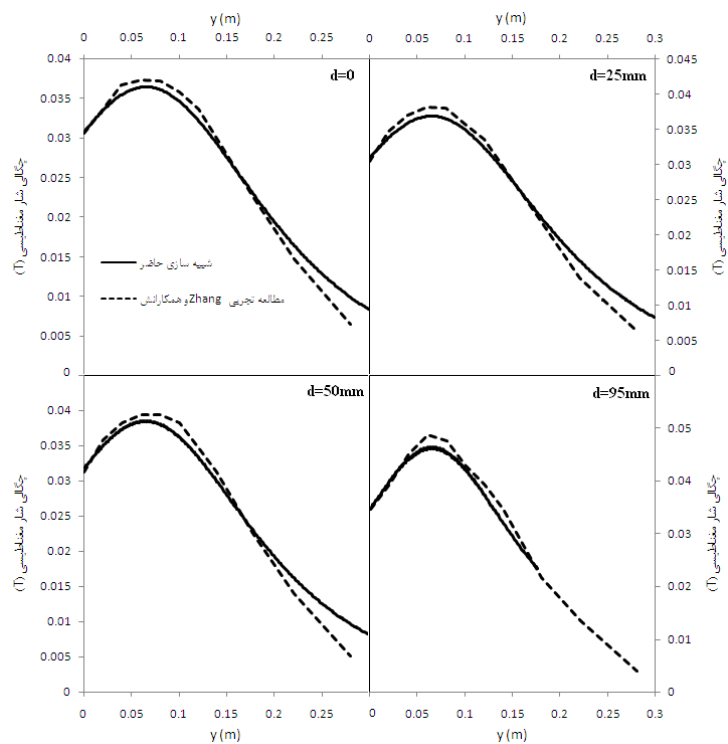
در شکل ۳ مقایسه تغییرات چگالی شار مغناطیسی در طول بیلت به ازای فواصل گوناگون از مرکز آن بین نتایج شبیه‌سازی حاضر و مطالعه تجربی [۸] آمده است. لازم به ذکر است که در هر دو مطالعه (شبیه‌سازی و تجربی) به جای بیلت آلومینیمی، هوا قرار داده شده است. چراکه اندازه‌گیری میدان مغناطیسی در نقاط گوناگون بیلت آلومینیمی دشوار است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود تطابق قابل قبولی بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی حاکم است. در محدوده نزدیک به کویل حداکثر چگالی شار میدان مغناطیسی به دست می‌آید. مقایسه بین نتایج ارائه شده در شکل‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهد که مدل ارائه شده توانایی مناسبی جهت شبیه‌سازی در فرایند LFEC برای مطالعه میدان‌های جریان مذاب و توزیع دما دارد.

به منظور فهم بهتر، در ادامه، نتایج به دست آمده برای فرایند ریخته‌گری DC معمولی و LFEC با جزئیات بیش‌تری تشریح می‌گردند.

شکل ۴-الف توزیع دما و هم‌چنین کسر مذاب در ریخته‌گری بیلت آلومینیمی به روش تبرید مستقیم معمولی و LFEC را در حالت پایدار نشان می‌دهد. در هر دو فرایند سطح بیلت قبل از خروج از قالب منجمد می‌گردد. مقایسه بین نتایج دو فرایند مشخص می‌کند که در فرایند LFEC توزیع دمای یکنواخت‌تری در حوضچه مذاب وجود دارد چنانچه تقریباً کل حوضچه مذاب از نظر دمایی در محدوده خمیری است. عمق حوضچه مذاب در هر دو فرایند تقریباً یکسان است. با توجه به اینکه در فرایند LFEC، قسمت عمده حوضچه مذاب، کسر مایعی بین ۰/۷-۰/۹ دارد، می‌توان انتظار داشت که ذرات جامد معلق در این قسمت، در مناطق مرکزی بیلت در نقش جوانه‌زا عمل کرده و ساختار همگن‌تری برای بیلت منجمد شده ایجاد کنند. در شکل ۴-ب بردارهای سرعت در فرایند ریخته‌گری تبرید مستقیم معمولی و LFEC همراه با نمایش توزیع دما آمده است. در ریخته‌گری تبرید مستقیم معمولی، مذاب پس از ورود به دلیل نیروی ارشمیدسی ناشی از تفاوت دما به سمت سطح آزاد برگردانده می‌شود و در نتیجه در منطقه بین بالاپوش و سطح آزاد، گردابه‌ای تشکیل می‌گردد. هم‌چنین در مناطق پایینی حوضچه و نزدیک به محل ورود مذاب، گردابه‌های کوچکتری تشکیل شده است. پس از انجماد، با توجه ترم داری لحاظ شده، سرعت به مقدار ثابت سرعت ریخته‌گری می‌رسد. در حضور میدان مغناطیسی، نیروی الکترومغناطیسی مذاب را به سمت داخل بیلت می‌راند. از طرفی مذاب وارد شده از ورودی، به دلیل نیروی ارشمیدسی به سمت سطح آزاد آمده است. وجود این دو نیرو سبب شده که دو گردابه در قسمت مذاب ایجاد گردد که تقریباً در فاصله نصف شعاع از یکدیگر جدا شده‌اند. با وجود گردابه نزدیک به سطح قالب می‌توان انتظار داشت که در این قسمت جدایش کمتری از عناصر آلیاژی رخ دهد. به عبارت دیگر، می‌تواند از وقوع جدایش معکوس جلوگیری کند. گردابه کوچکی نیز در قسمت پایینی حوضچه مذاب تشکیل شده است.

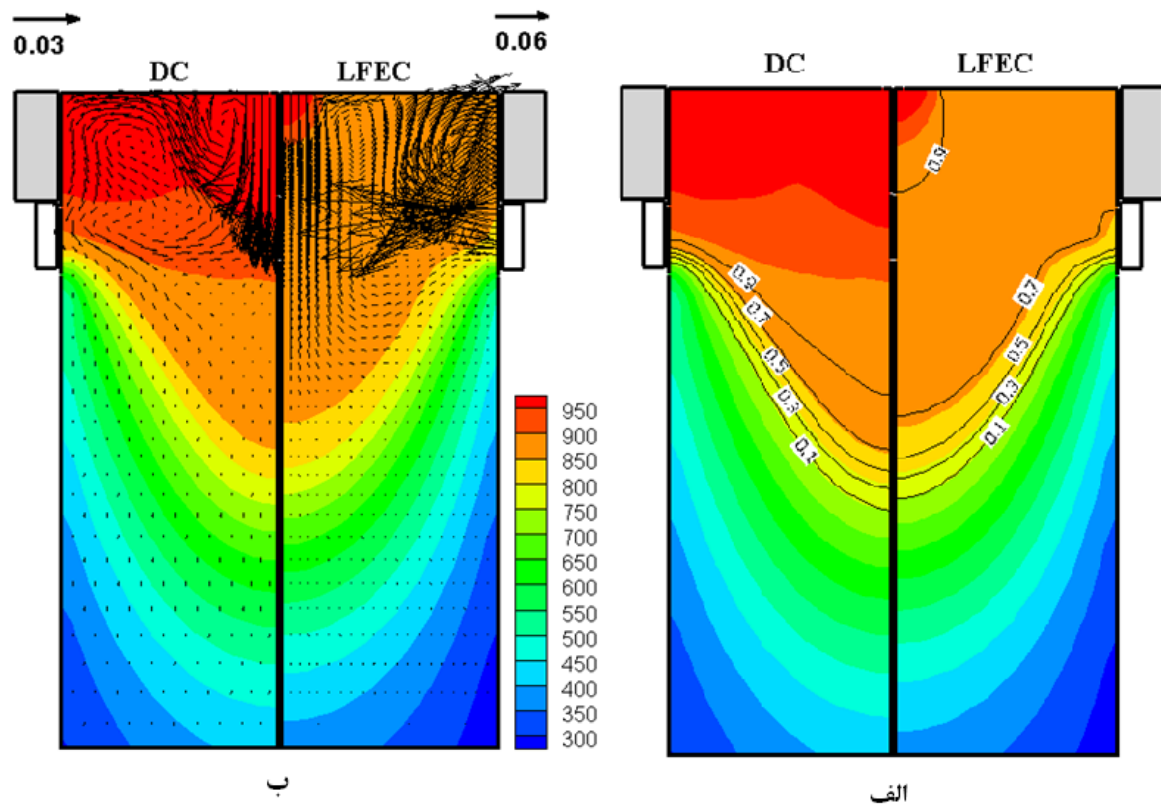


شکل ۲. مقایسه تغییرات دما در طول بیلت به ازای فواصل مختلف از مرکز آن برای نتایج شبیه سازی حاضر با مطالعه تجربی در فرایند ریخته‌گری تبرید مستقیم در حضور میدان مغناطیسی فرکانس پایین



شکل ۳. مقایسه تغییرات چگالی شار مغناطیسی در طول بیلت به ازای فواصل مختلف از مرکز آن برای نتایج شبیه سازی حاضر با مطالعه تجربی.





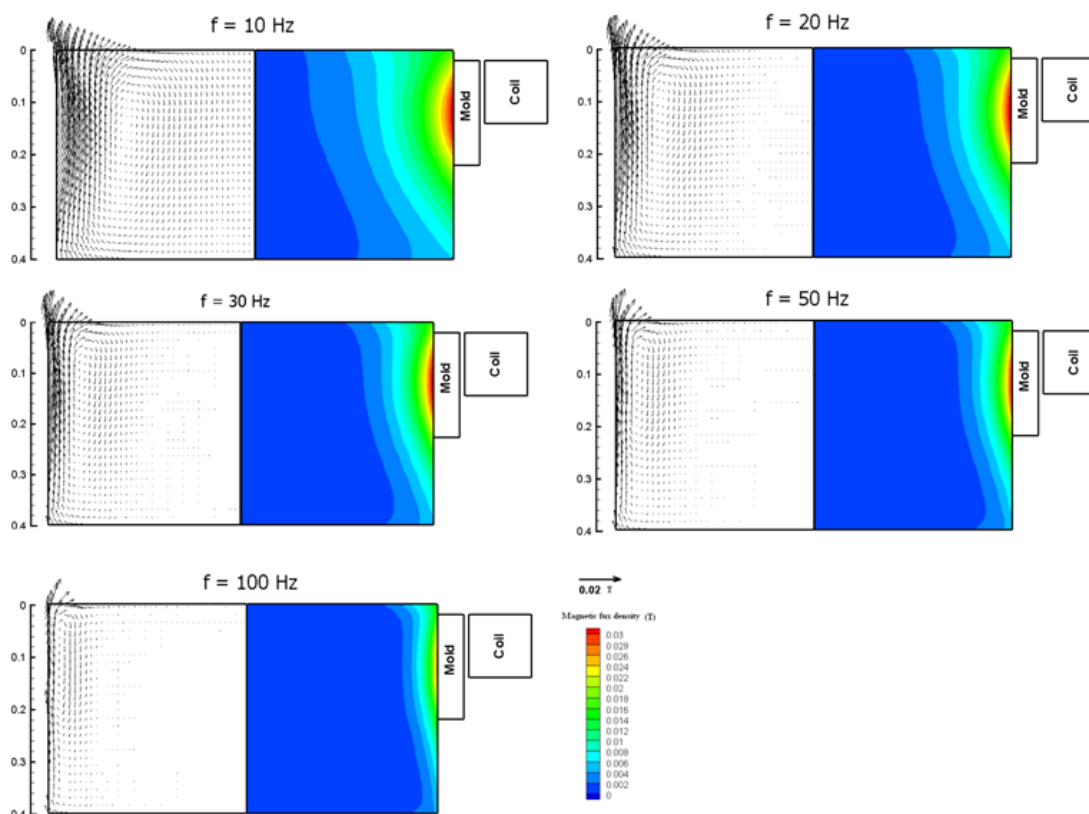
شکل ۴. (الف) توزیع دما و (ب) توزیع میدان جریان سیال در میدان محاسباتی در فرایندهای DC و LFEC.

#### اثر تغییر فرکانس بر چگالی بر مغناطیسی

تغییرات چگالی شار میدان مغناطیسی در فرکانس‌های مختلف در محدوده بیلت در شکل ۵ نمایش داده شده است. در این شکل نیمه‌های سمت راست مقدار این متغیر را به صورت خطوط هم مقدار و نیمه‌های سمت چپ نمایش برداری را بیان می‌کنند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش فرکانس، حداکثر مقدار چگالی شار مغناطیسی کاهش می‌یابد. هم‌چنین افزایش فرکانس موجب می‌شود که توزیع خطوط هم‌مقدار در مناطق نزدیک به سطح بیلت متمرکزتر شود و گرادیان میدان در این مناطق شدیدتر گردد. به عبارت دیگر اثر سطحی افزایش می‌یابد. توجه به نمایش برداری چگالی شار مغناطیسی در بیلت نشان می‌دهد که افزایش فرکانس اثر قابل توجهی بر تغییر جهت میدان مغناطیسی ندارد. هم‌چنین در قسمت‌های مرکزی گردابه‌ای دیده می‌شود که با افزایش فرکانس به سمت سطح بیلت تغییر مکان می‌یابد.

#### نتایج مطالعه پارامتری

برای مطالعه پارامترهای الکترومغناطیسی، دو پارامتر زیر مد نظر قرار داده شد؛  
 (الف) فرکانس  
 (ب) شدت الکترومغناطیسی  
 شدت الکترومغناطیسی در حقیقت نامی است که برای حاصل ضرب جریان در تعداد دور سیم پیچ (NI) انتخاب شده است چرا که افزایش تعداد دور سیم پیچ و جریان هر دو در یک راستا بر میدان مغناطیسی تاثیر گذارند و با واحد آمپر-دور (At) نمایش داده می‌شود.  
 در گروه (الف) شدت الکترومغناطیسی (NI) At در ۱۱۰۰ و فرکانس‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ Hz در نظر گرفته شد. در گروه (ب) فرکانس ۲۰ Hz و شدت الکترومغناطیسی ۸۰۰۰، ۹۰۰۰، ۱۱۰۰۰، ۱۵۰۰۰ و At ۲۵۰۰۰ لحاظ شد.

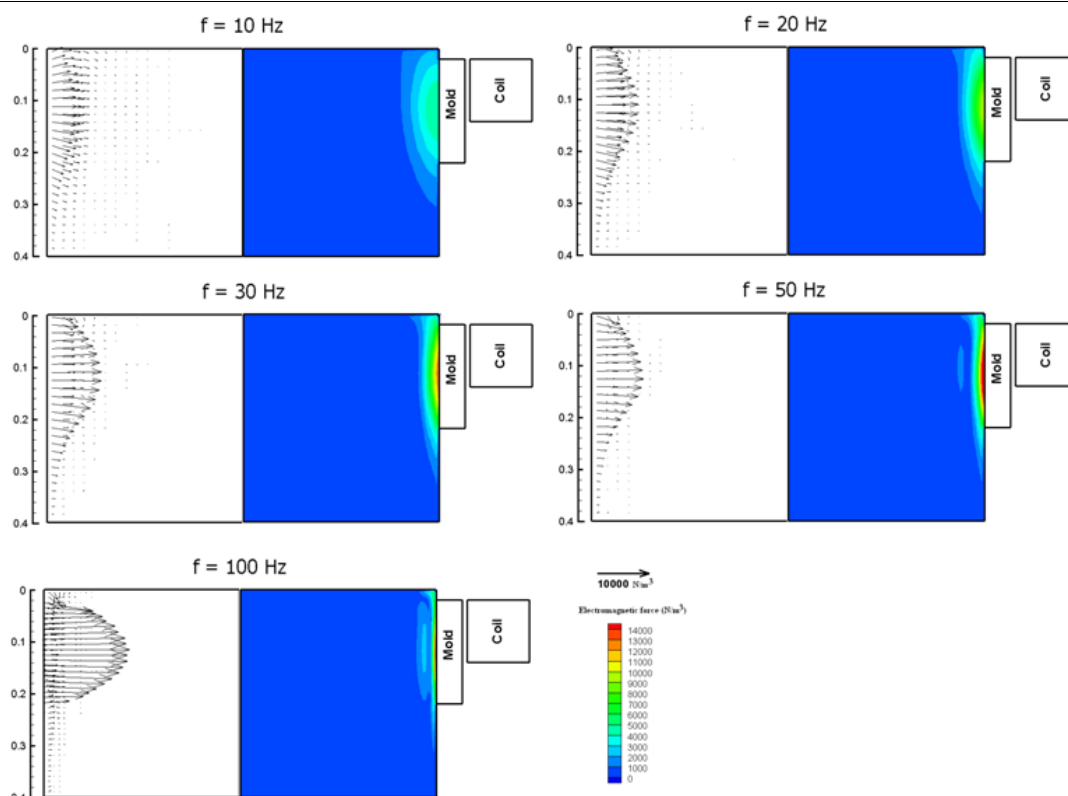


شکل ۵. تأثیر تغییر فرکانس بر چگالی شار مغناطیسی.

فرکانس، اثر قابل توجهی بر جهت نیروی الکترومغناطیسی اعمالی ندارد و در همه حالات این نیرو عمود بر سطح بیلت به سمت مرکز است. با افزایش فرکانس، توزیع نیروی الکترومغناطیسی هم در عرض و هم در طول محدود می‌شود و به سمت قالب یا کویل منتقل می‌شود. با توجه به نحوه توزیع نیروی الکترومغناطیسی در کل بیلت می‌توان انتظار داشت که این نیرو از تشکیل پوسته جامد ضخیم در محل قالب جلوگیری کند. زیرا مذاب سرد از مقابل قالب به سمت مناطق مرکزی بیلت رانده می‌شود. هم‌چنین وجود این نیرو در این منطقه موجب می‌شود که از چسبیدن سطح بیلت به قالب و اختلال در فرایند ریخته‌گری پیشگیری به عمل آید.

### اثر تغییر فرکانس بر نیروی الکترومغناطیسی وارده بر مذاب

شکل ۶ تغییرات نیروی الکترومغناطیسی در بیلت آلومینیمی با تغییر فرکانس را نشان می‌دهد. در نیمه‌های سمت راست این نیرو به صورت خطوط هم‌مقدار و در نیمه‌های سمت چپ این نیرو به صورت برداری نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس، حداکثر نیروی الکترومغناطیسی افزایش می‌یابد و با این حال فقط در مناطق نزدیک به سطح متمرکز می‌گردد. به عبارت دیگر گرادیان شدید نیروی الکترومغناطیسی در منطقه نزدیک به قالب پدید می‌آید. از نمایش برداری نیروی الکترومغناطیسی در این شکل می‌توان دریافت که تغییر در

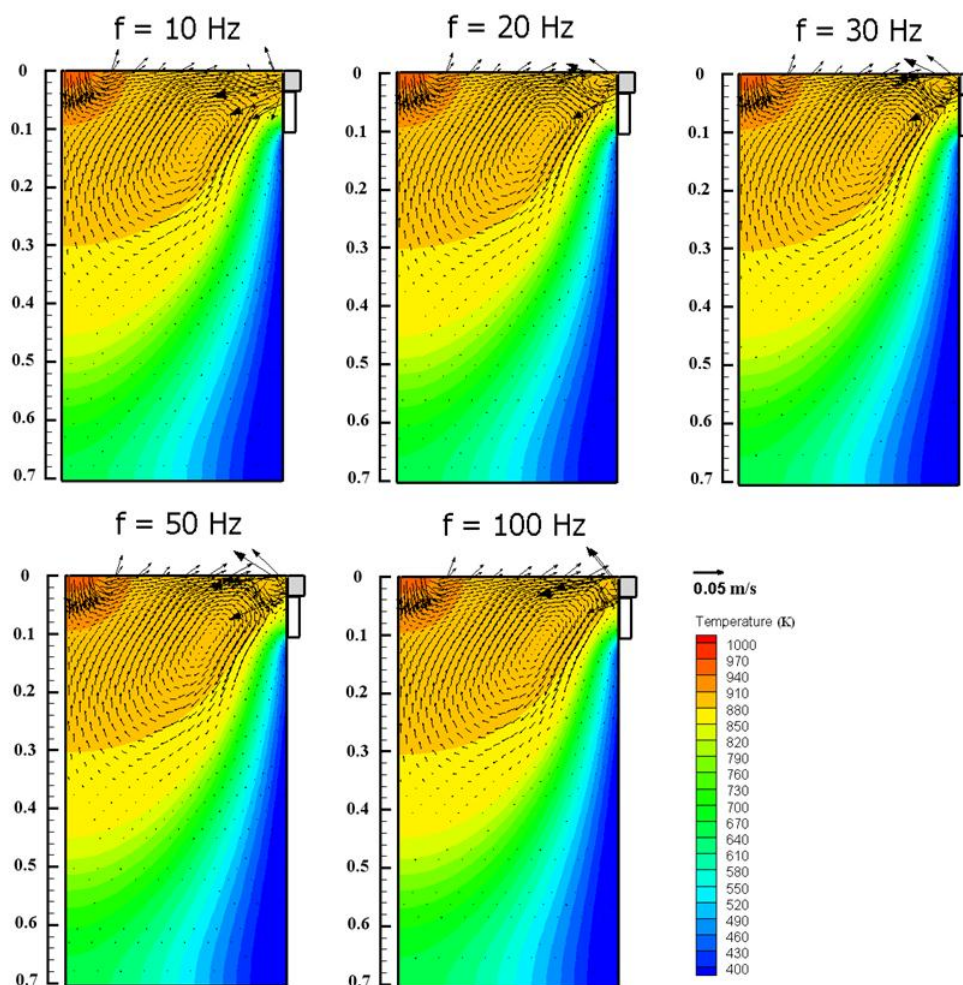


شکل ۶. تأثیر تغییر فرکانس بر نیروی الکترومغناطیسی وارده بر بیلت.

حالت‌ها تقریباً یکسان است. هم‌چنین توزیع دما در بیلت بیانگر این مطلب است که تغییر فرکانس اثری بر تغییر دما در بیلت و عمق و شکل حوضچه مذاب نداشته است. اگرچه در شکل ۶ مشاهده شد افزایش فرکانس منجر به زیاد شدن اثر سطحی یا به عبارتی متمرکز شدن نیروی الکترومغناطیسی در مناطق نزدیک به قالب می‌شود، لیکن این امر تنها تا حدی سرعت را در این منطقه تحت تأثیر قرار داده است و به دلیل قطر زیاد بیلت عملاً نتوانسته تفاوتی در حرکت مذاب درون عمق حوضچه ایجاد نماید. تمرکز نیروی الکترومغناطیسی در منطقه نزدیک قالب منجر به ایجاد گردابه‌ای کوچک در آن منطقه می‌گردد. در فرکانس ۱۰ Hz به دلیل توزیع بازتر نیروی الکترومغناطیسی این گردابه حذف شده است و کل حوضچه به صورت یکنواخت‌تری به هم زده می‌شود.

### اثر تغییر فرکانس بر جریان

توزیع دما به همراه بردارهای سرعت جریان سیال به ازای مقادیر گوناگون فرکانس در شکل ۷ رسم شده است. چنانچه مشاهده می‌شود در همه حالت‌ها مذاب پس از ورود به سمت دیواره حرکت می‌کند و به طور کلی یک گردابه بزرگ در حوضچه مذاب پدید می‌آید. به دلیل ضخامت زیاد بیلت، عمق حوضچه مذاب نیز قابل توجه است. بردارهای سرعت نشان می‌دهد که در محل نزدیک به قالب، مذاب به سمت عمق حوضچه رانده می‌شود. با توجه به توزیع شدت نیروی الکترومغناطیسی در محل نزدیک به قالب، سرعت در این قسمت تقریباً ۲ برابر سرعت مذاب ورودی است. در مجموع شکل ۷ نشان می‌دهد که تغییرات فرکانس در محدوده مذکور اثر قابل توجهی بر توزیع جریان ندارد و نحوه حرکت مذاب در همه



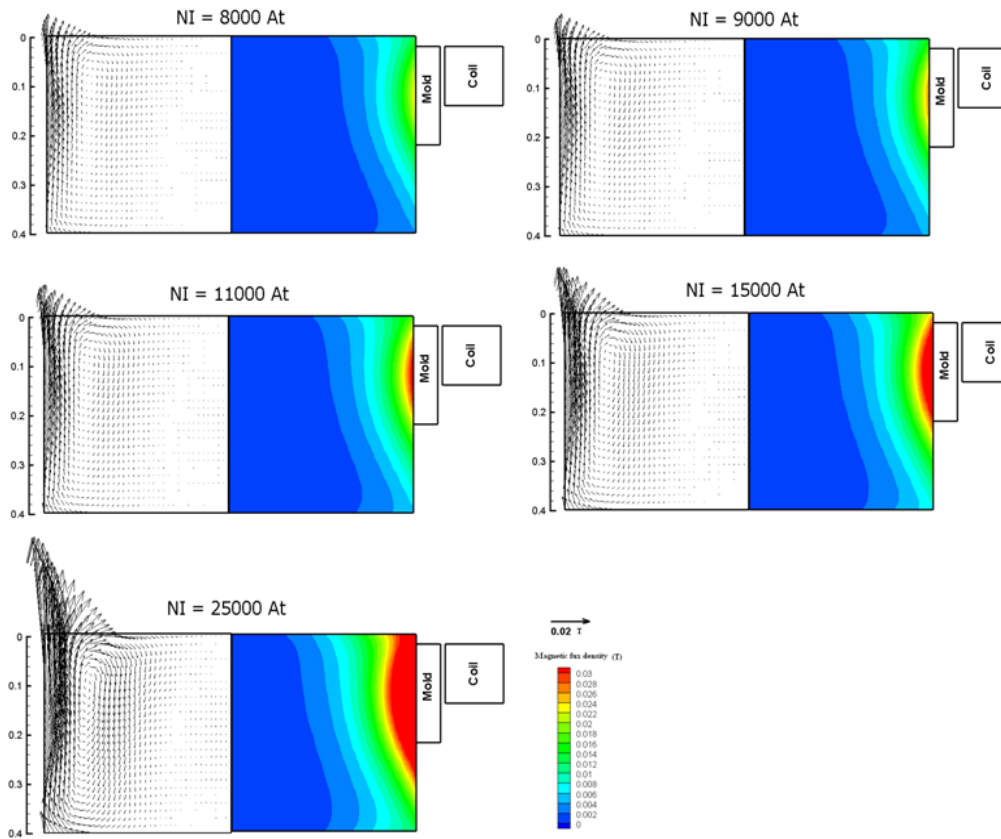
شکل ۷. تأثیر تغییر فرکانس بر جریان سیال و توزیع دما.

### اثر شدت الکترومغناطیسی بر نیروی الکترومغناطیسی

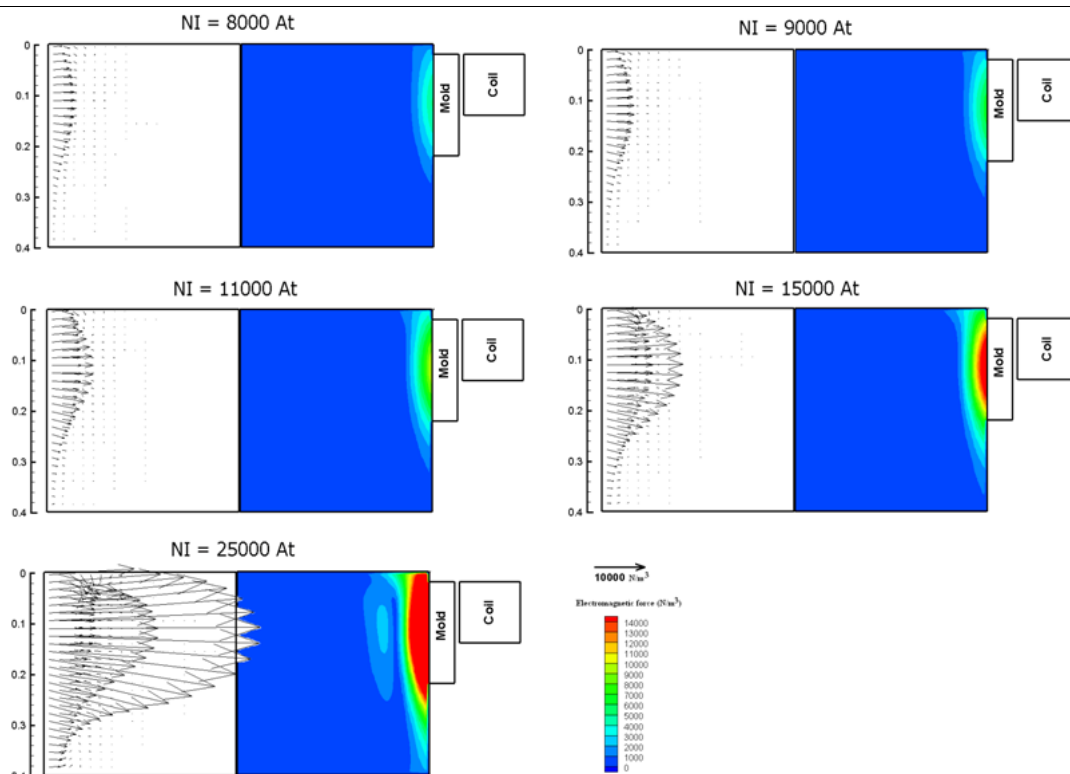
شکل ۹ اثر تغییر شدت الکترومغناطیسی بر توزیع نیروی الکترومغناطیسی در بیلت را نشان می‌دهد. در این شکل می‌توان دید که افزایش شدت الکترومغناطیسی منجر به افزایش نیروی الکترومغناطیسی می‌شود که تقریباً در روندی ثابت صورت می‌گیرد به طوری که به ازای  $NI=25000 \text{ At}$  کل محدوده نزدیک به دیواره تحت نیروی شدید الکترومغناطیسی قرار می‌گیرد. از نمایش برداری این شکل می‌توان دریافت جهت نیروی الکترومغناطیسی اعمال شده در همه حالت‌ها تقریباً ثابت است. محل اعمال بیش‌ترین نیروها نیز با افزایش شدت الکترومغناطیسی تغییر چندانی نمی‌کند.

### اثر تغییر شدت الکترومغناطیسی بر چگالی شار مغناطیسی

در شکل ۸ توزیع چگالی شار مغناطیسی به صورت خطوط هم‌مقدار و برداری به ازای مقادیر گوناگون شدت الکترومغناطیسی (NI) ارائه شده است. چنانچه مشاهده می‌شود با افزایش شدت الکترومغناطیسی، مقدار چگالی شار مغناطیسی در روندی ثابت افزایش می‌یابد. با این حال جهت چگالی شار مغناطیسی در همه حالت‌ها تقریباً ثابت است. پس با توجه به قسمت‌های قبل می‌توان گفت که جهت میدان‌های مغناطیسی وابسته به فرکانس است و مستقل از شدت الکترومغناطیسی عمل می‌کند.



شکل ۸. تأثیر تغییر شدت الکترومغناطیسی بر چگالی شار مغناطیسی.



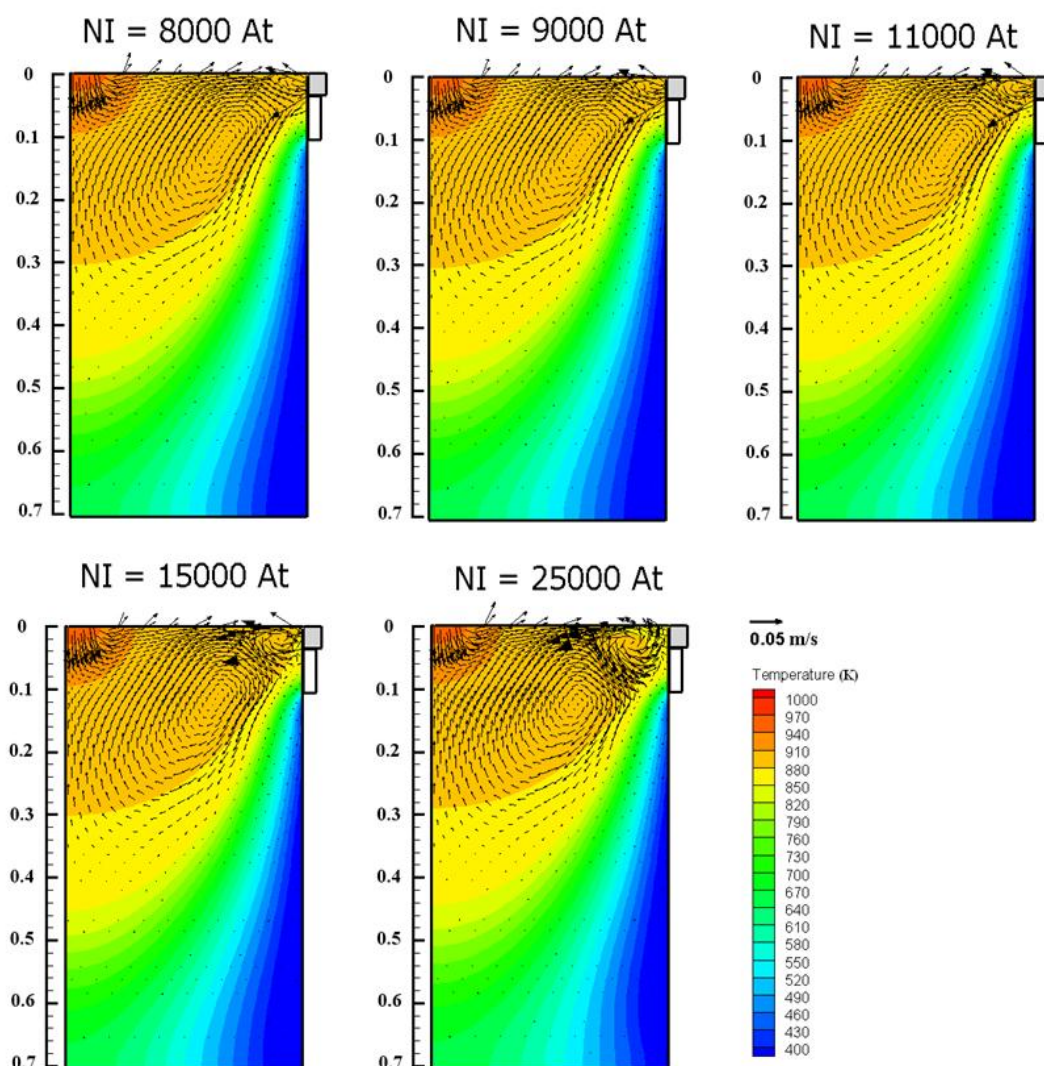
شکل ۹. تأثیر تغییر شدت الکترومغناطیسی بر نیروی الکترومغناطیسی وارده بر بیلت.

یکی از مکانیزم‌های تشکیل ساختار دانه‌ای ریز هم‌محور در حضور میدان مغناطیسی، افزایش نرخ جوانه‌زنی در اثر تکه شدن بازوهای دندریتی به دلیل جریان سیال شدید ناشی از نیروهای الکترومغناطیسی و افزایش تعداد تکه‌های جدا شده و باقیمانده (آنهایی که ذوب مجدد نشده‌اند) در حوضچه مذاب به دلیل مادون انجماد بالا و گردایان دمایی کم است. بنابراین سرعت کم مذاب درون حوضچه احتمال باقی ماندن بازوهای دندریتی تکه شده را کاهش می‌دهد و منجر به درشت‌دانه شدن ساختار می‌گردد. علاوه بر این حضور میدان مغناطیسی در ریخته‌گری تبرید مستقیم موجب نازک شدن پوسته جامد در منطقه قالب می‌گردد که با توجه با آن می‌توان کیفیت سطحی بهتری برای محصول انتظار داشت. از طرف دیگر توزیع حرارتی یکنواخت‌تر می‌تواند باعث کاهش تنش‌های حرارتی درون بیلت در حال انجماد گردد.

## اثر شدت الکترومغناطیسی بر جریان سیال و توزیع دما

در شکل ۱۰ توزیع دما به همراه بردارهای سرعت جریان برای مقادیر مختلف شدت الکترومغناطیسی رسم شده است. علاوه بر گردابه بزرگی که در کل حوضچه مذاب وجود دارد، گردابه کوچکی نیز در نزدیکی بالاپوش به وجود آمده است که با افزایش شدت الکترومغناطیسی، سرعت چرخش و اندازه این گردابه افزایش می‌یابد. به گونه کلی توزیع دما در حالت‌های گوناگون این شکل تقریباً یکسان است. ولی به ازای  $NI=15000, 25000 \text{ At}$  به دلیل شدیدتر شدن گردابه کوچک، به علت عدم دسترسی مذاب گرم به این منطقه، دمای این منطقه نسبت به سایر حالت‌ها کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند منجر به تشکیل پوسته جامد ضخیم‌تر و در نتیجه شکل‌گیری فاصله هوایی بزرگتر بین قالب و سطح بیلت گردد و قدرت سرمایش قالب را بسیار کند کند.





شکل ۱۰. تأثیر تغییر شدت الکترومغناطیسی بر توزیع دما و جریان سیال.

### نتیجه گیری

کاهش فرکانس موجب یکنواخت‌تر شدن توزیع نیروی الکترومغناطیسی در حوضچه مذاب می‌شود. افزایش شدت الکترومغناطیسی (NI) منجر به شدیدتر شدن هم‌زدن مذاب درون حوضچه می‌گردد. وجود نیروی‌های الکترومغناطیسی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر شکل و عمق حوضچه مذاب به ویژه در بیلت‌های با قطر بالا نمی‌گذارد. زیاد بودن قطر بیلت سبب می‌شود که دسترسی نیروی الکترومغناطیسی به مناطق مرکزی حوضچه مذاب کم گردد و در نتیجه نتواند تأثیر قابل توجهی بر توزیع جریان و دما در مرکز بیلت بگذارد.

در این پژوهش فرایند ریخته‌گری تبرید مستقیم در حضور میدان الکترومغناطیسی فرکانس پایین جهت تولید بیلت‌های آلومینیمی با قطر بالا شبیه‌سازی شد و مدل به دست آمده با نتایج تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که: مدل توسعه یافته به خوبی توانست میدان‌های فیزیکی گوناگون را به صورت توأمان محاسبه نماید. وجود نیروی الکترومغناطیسی موجب راندن مذاب از مقابل قالب به سمت عمق بیلت می‌شود که این امر می‌تواند موجب بهبود کیفیت سطحی محصول گردد.

7. D. G. Eskin, *Physical Metallurgy of Direct Chill Casting of Aluminum Alloys*, Taylor & Francis Group, 2008.
8. H. Zhang, H. Nagaumi, Y. Zuo, and J. Cui, "Coupled modeling of electromagnetic field, fluid flow, heat transfer and solidification during low frequency electromagnetic casting of 7XXX aluminum alloys: Part 1: Development of a mathematical model and comparison with experimental results", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 448, pp. 189-203, 2007.
9. J. Dong, Z. Zhao, J. Cui, F. Yu, and C. Ban, "Effect of low-frequency electromagnetic casting on the castability, microstructure, and tensile properties of direct-chill cast Al-Zn-Mg-Cu alloy", *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 35, pp. 2487-2494, 2004.
10. J. A. Shercliff, "A textbook of magnetohydrodynamics", Pergamon Press, Great Britain, 1965
11. R.B. Bird, W.E. Stewart, and E.N. Lightfoot, "Transport Phenomena", 2nd. ed. 2007, New York, Wiley
12. J. NI, C. Beckermann, "a volume-averaged two-phase model for transport phenomena during solidification", *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, vol.22b, pp. 349-361, 1991.
13. S.H. Seyedein, M. Hasan, "A 3-D Numerical Prediction of Turbulent Flow, Heat Transfer and Solidification in a Continuous Slab Caster for Steel", *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol.37(4), pp. 213-228, 1998
14. Q. Du, D.G. Eskin, and L. Katgerman, "Modeling macrosegregation during direct-chill casting of multicomponent aluminum alloys", *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, vol. 38A, pp. 180-188, 2007
- برای تولید بیلتهای با قطر بالا، استفاده از روش LFEC بیش‌تر منجر به بهبود کیفیت سطحی محصول و جلوگیری از وقوع جدایش در مناطق نزدیک به سطح می‌گردد. لیکن در مناطق مرکزی بهسازی ویژه‌ای صورت نمی‌دهد.

### Reference

1. J. Dong, J. Cui, X. Zeng, and W. Ding, "Effect of low-frequency electromagnetic field on microstructures and macrosegregation of [Phi]270 mm DC ingots of an Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloy", *Materials Letters*, vol. 59, pp. 1502-1506, 2005.
2. R. Nadella, D. G. Eskin, Q. Du, and L. Katgerman, "Macrosegregation in direct-chill casting of aluminium alloys", *Progress in Materials Science*, vol. 53, pp. 421-480, 2008.
3. C. Vives, "Electromagnetic refining of aluminum alloys by the CREM process: Part I. Working principle and metallurgical results", *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 20, pp. 623-629, 1989.
4. C. Vives, "Electromagnetic refining of aluminum alloys by the CREM process: Part II. Specific practical problems and their solutions", *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 20, pp. 631-643, 1989.
5. Z. Yubo, C. Jianzhong, Z. Zhihao, Z. Haitao, and Q. Ke, "Effect of low frequency electromagnetic field on casting crack during DC casting superhigh strength aluminum alloy ingots", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 406, pp. 286-292, 2005.
6. V. I. Dobatkin and N. F. Anoshkin, "Comparison of macrosegregation in titanium and aluminium alloy ingots", *Materials Science and Engineering A*, vol. 263, pp. 224-229, 1999.



