

رسالة محمد



بررسی تاثیر میدان مغناطیسی بر ریزساختار شمش آلومینیوم ۲۰۲۴ ریخته‌گری  
شده به روش DC

## فهرست

۱. مقدمه..... ۱
۲. ریخته‌گری DC..... ۱
  - ۱.۲. الگوی انجماد در ریخته‌گری DC..... ۴
  - ۲.۲. جریان مذاب، جدایش عنصری و توزیع اندازه دانه در ریخته‌گری DC..... ۸
۳. مفاهیم میدان مغناطیسی..... ۱۲
۴. بررسی ریخته‌گری DC آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ تحت میدان مغناطیسی..... ۱۸
  - ۱.۴. تاثیر بزرگی میدان مغناطیسی..... ۲۰
  - ۲.۴. بهبود خواص مکانیکی آلیاژ ۲۰۲۴ ریختگی به روش DC تحت میدان الکترومغناطیسی..... ۲۶
۵. نتایج..... ۲۸
- مراجع..... ۲۹

## ۱. مقدمه:

ریخته‌گری DC<sup>۱</sup> یکی از فرایندهای متداولی است که برای تولید شمش‌های آلیاژهای آلومینیوم بکار گرفته می‌شود. اما این فرایند با مشکلاتی از جمله جدایش عناصر آلیاژی، ناهمگنی ساختاری و کیفیت سطحی نامطلوب همراه است. به منظور کنترل این عیوب؛ یک میدان مغناطیسی به فرایند طول افزوده می‌شود. این میدان با فرکانس مناسب، تاثیر بسزایی در اصلاح ساختاری شمش دارد. نتایج تحقیقات حاکی از بهبود ریزساختار، توزیع عناصر آلیاژی و کیفیت سطحی است. هم چنین نتایج نشان می‌دهد که میدان مغناطیسی با فرکانس پایین تاثیر مطلوب‌تری دارد.

در این تحقیق، ابتدا مقدمه‌ای از ریخته‌گری DC ارائه شده و در ادامه مفاهیم اولیه میدان مغناطیسی بیان شده و در نهایت ریخته‌گری DC شمش آلومینیوم ۲۰۲۴ تحت میدان مغناطیسی بررسی شده است.

## ۲. ریخته‌گری DC:

ریخته‌گری DC آلومینیوم در سال ۱۹۳۶-۱۹۳۸ تقریباً به طور همزمان در آلمان و آمریکا ابداع شد. محصولات این فرایند عبارتند از تختال<sup>۲</sup> و شمش<sup>۳</sup>، که در فرایندهای آماده سازی بعدی مثل اکستروژن و نورد مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱].

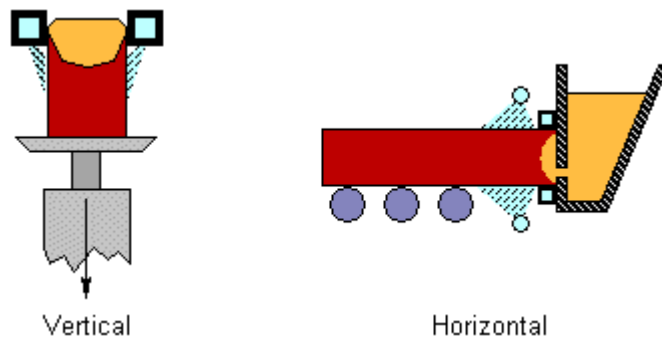
در این فرایند، مذاب فلز داخل یک قالب آبگرد ریخته می‌شود. در نتیجه تماس مذاب با قالب یک پوسته جامد نزدیک دیواره قالب ایجاد می‌گردد. قسمت منجمد شده با یک سرعت ثابت  $V_{Cast}$  به عقب (پایین) کشیده می‌شود؛ به طوریکه سطح مذاب در قالب در ارتفاع خاصی باقی بماند و ایزوترم‌های دمایی تغییر نکند. پوسته جامد در اثر انتقال حرارت از طریق قالب (سرد شدن اولیه) ایجاد می‌شود. با وجود اینکه قسمت خارجی شمش جامد است، قسمت داخلی شمش هنوز حالت نیمه جامد دارد و همانطور که شمش از قالب خارج می‌شود شمش توسط سیستم پاشش آب (سرد شدن ثانویه) تا دماهای پایین تر کوئنچ می‌گردد و لذا انجماد قسمت های داخلی کامل می‌گردد. (در این مرحله حدود ۸۰-۹۵ درصد حرارت شمش گرفته می‌شود). [۱].

<sup>1</sup> Direct Chill

<sup>2</sup> Slab

<sup>3</sup> Ingot

به طور کلی فرایند DC به دو دسته افقی (HDC)<sup>۱</sup> و عمودی (VDC)<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی می‌شود. به طور شماتیکی این دو فرایند در شکل ۱ آورده شده است. ریخته‌گری HDC در مقایسه با ریخته‌گری VDC مزایایی همچون هزینه تجهیزات کم، راندمان بیشتر، انعطاف‌پذیری بیشتر فرایند، زمان‌های ریخته‌گری طولانی‌تر و... دارد ولی مهم‌ترین عامل مضر در این فرایند (HDC) نیروی جاذبه است؛ چراکه به دلیل اختلاف نیروی جاذبه در سطح بالایی و پایینی شمش، یک ناهمگنی ساختاری در شمش بوجود می‌آید. البته این ضعف با استفاده از تکنیک‌های ویژه مثل استفاده از میدان مغناطیسی قابل پوشش است. با این وجود، در سال‌های اخیر فرایند HDC توجه بیشتری را به خود معطوف کرده است [۲].



شکل ۱. انواع فرایند ریخته‌گری DC [۳].

هم‌چنین خود فرایند ریخته‌گری VDC، به دو صورت طراحی شده است؛ یکی طراحی سنتی<sup>۳</sup> (که جریان سیال ورودی با یک شناور کنترل می‌شود) و دیگری طراحی Hot Top. در شکل ۲ تصویری از این دو طراحی آورده شده است.

در فرایند ریخته‌گری Hot Top، از یک دیرگداز استفاده شده است که در درون قالب تعبیه می‌شود. حضور این دیرگداز مزایای زیر را در بر دارد [۴]:

✘ دیگر نیازی به کنترل جریان مذاب نمی‌باشد. (برعکس طراحی سنتی که به یک شناور جهت

کنترل جریان مذاب نیاز است.)

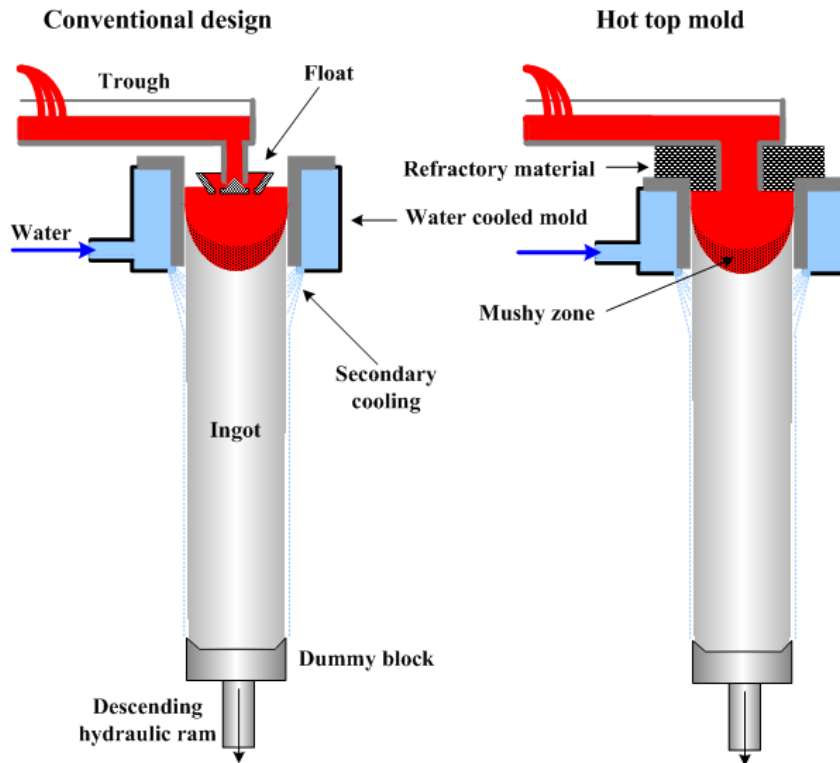
✘ اتلاف حرارتی کمتر خواهد شد.

<sup>۱</sup> Horizontal Direct Chill

<sup>۲</sup> Vertical Direct Chill

<sup>۳</sup> Conventional Design

✘ از اکسیداسیون مذاب جلوگیری می‌شود.



شکل ۲. انواع مدل‌های روش ریخته‌گری VDC [۴].

در ریخته‌گری DC کیفیت سطح و ریزساختار اهمیت ویژه‌ای دارد. لذا از روانکاری (روغنکاری) قالب و دمش هوا یا مخلوط هوا/گاز به منظور جداسازی پوسته جامد از قالب استفاده می‌شود تا سرد شدن اولیه کنترل شود و چسبندگی قالب به پوسته جامد حداقل گردد. چرا که واکنش و درگیری بین قالب و پوسته جامد (نیمه جامد) می‌تواند منجر به زبری سطحی همراه با عیوب مختلفی گردد [۱].

منطقه سطحی شمش‌های ریختگی به روش DC با ریز ساختار مخلوط (ریز/درشت) شناخته می‌شود. علاوه بر این جدایش ماکروسکوپی در این شمش‌ها وجود دارد. این پارامترها روی کیفیت سطحی و زیرسطحی محصول تولیدی اثر می‌گذارد که حتی می‌تواند منجر به ایجاد مشکلاتی در فرایندهای بعدی مثل ترک خوردن لبه‌ای و ورقه‌ای شدن در فرایندهای نورد و اکستروژن گردد [۱].

برای کنترل تاثیرات نامطلوب در ریخته‌گری DC، چندین تکنولوژی طراحی شده است؛ مثل ریخته‌گری Hot Top، استفاده از روان کار در قالب، استفاده از قالب تحت دمش هوا، ریخته‌گری<sup>۱</sup> EMC (ریخته‌گری تحت میدان مغناطیسی) و ... [۱].

حتی در ریخته‌گری EMC یک جلوتر رفته و ریخته‌گری بدون قالب مطرح می‌شود. در این حالت مذاب مقید و محدود به میدان مغناطیسی می‌شود و همزمان با پاشش آب خنک شده و انجماد صورت می‌گیرد. یکی از مزیت‌های این روش تولید محصولی با کیفیت سطح خوب (سطح خیلی صاف) است چرا که تماس پوسته نیمه جامد به کلی حذف شده و دیگر تاثیرات نامطلوب قالب از بین می‌رود. علاوه بر این جریان‌های گردابی القا شده در مذاب، الگوی و مسیرهای حرکتی مذاب را تغییر می‌دهد که تاثیری مستقیمی روی ساختار و جدایش دارد [۱].

به طور کلی می‌توان متغیرهای اصلی این فرایند را به صورت زیر مشخص کرد:

← سرعت ریخته‌گری یا همان سرعت که جامد از درون قالب بیرون کشیده می‌شود.

← سرعت پاشش آب یا همان سرعت و شدت سرد شدن ثانویه

← دمای مذاب یا میزان فوق‌گداز

سرعت بهینه ریخته‌گری بسته به ترکیب شیمیایی آلیاژ و ابعاد ریخته‌گری در محدوده ۲-۳ Cm/Min تغییر می‌کند و دبی مناسب پاشش آب  $4000-2000 \text{ mm}^3/\text{s}$  است و دمای مناسب مذاب برای آلیاژهای آلومینیوم  $725-690^\circ\text{C}$  می‌باشد [۱].

## ۱.۲. الگوی انجماد در ریخته‌گری DC:

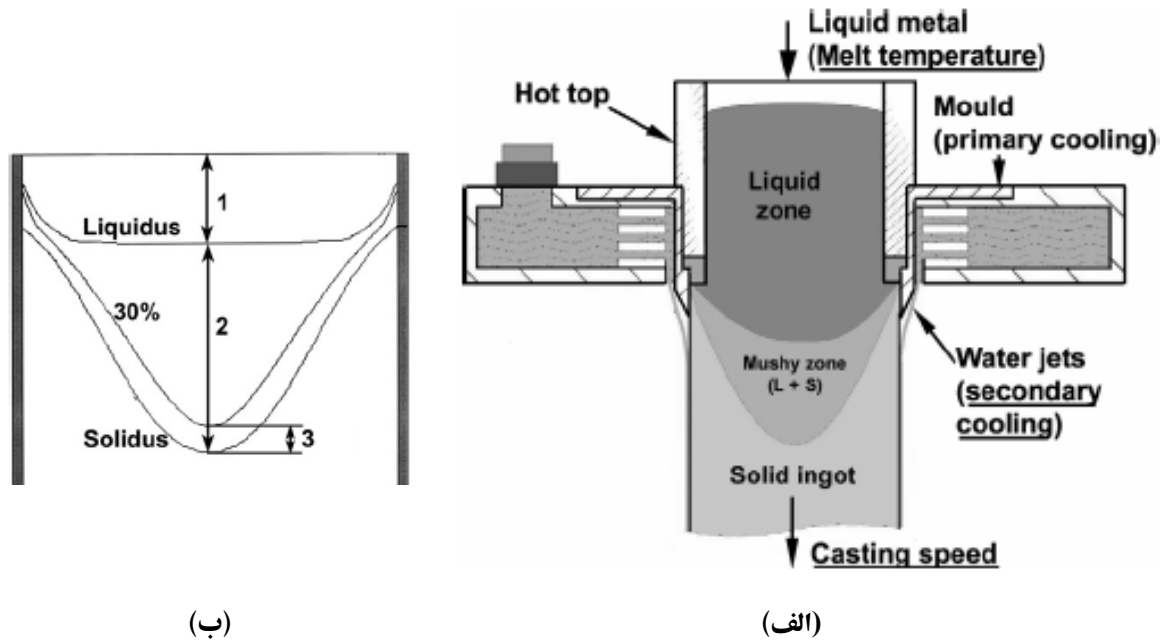
در ریخته‌گری DC انجماد شمش رابطه مستقیمی با پارامترهای ریخته‌گری دارد. این ارتباط و هم‌چنین نحوه تاثیرش در ریزساختار شمش را می‌توان در شکل و مشخصه‌های چاه انجمادی<sup>۲</sup> جستجو کرد. این چاه انجمادی شامل حوضچه مذاب (منطقه ۱ از شکل ۳.ب) و منطقه گذار/انتقالی (منطقه ۲ از شکل ۳.ب) است به طوری که منطقه گذار بین ایزوترم‌های لیکوئیدوس و سالیدوس محدود شده است و به بخش‌های دوغابی<sup>۳</sup> و

<sup>۱</sup> Electromagnetic Casting

<sup>۲</sup> Sump

<sup>۳</sup> Slurry

خمیری (منطقه ۳ از شکل ۳.ب) تقسیم می‌شود. در شکل ۳ شماتیک کلی فرایند DC آورده شده است که در آن مناطق مختلف چاه انجمادی به خوبی قابل مشاهده است [۱].



شکل ۳. الف) شماتیک کلی فرایند DC و مناطق مختلف انجمادی شمش ب) چاه انجمادی [۱].

فصل مشترک بین منطقه خمیری و دوغابی با ایزوترم کوهیرنسی نمایش داده می‌شود. شرایط کوهیرنسی بدین گونه تعریف می‌شود: زمان یا دمائی که دانه‌ها/دندریتهای منجمد شده به یکدیگر فشار/نیرو وارد می‌کنند و تشکیل ساختار کوهیرنت می‌دهند. معمولاً این ایزوترم‌ها به عنوان کسر جامد نشان داده می‌شوند که برای آلیاژهای متداول آلومینیوم بین ۰/۲ تا ۰/۳ است. منطقه بین ایزوترم کوهیرنسی و ایزوترم لیکوئیدوس به عنوان منطقه دوغابی و منطقه بین ایزوترم کوهیرنسی و ایزوترم سالدوس به عنوان منطقه خمیری تعریف می‌گردد. در شکل ۴ مناطق مختلف چاه انجمادی متناسب با تعریف‌های ارائه شده، دیده می‌شود [۱].

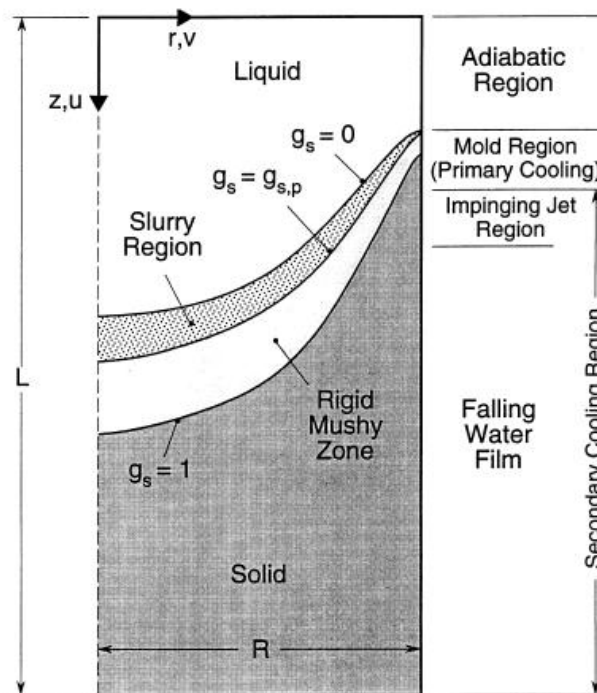
عمق چاه انجمادی (فاصله بین قسمت بالایی قالب، Hot Top، و ایزوترم سالدوس در امتداد مرکز شمش) یکی از مشخصه‌های پروفیل انجماد در فرایند DC است که به سرعت ریخته‌گری، نوع آلیاژ و ابعاد ریختگی بستگی دارد. در رابطه زیر ارتباط عمق انجمادی با پارامترهای ریخته‌گری آورده شده است.

$$L = [A.R^2.V_{cast}]/[4\lambda_s(T_m-T_{surface})] \quad (1)$$

در این رابطه  $\lambda_s$  هدایت حرارتی جامد و  $A$  یک ثابت وابسته به نوع آلیاژ (گرمای نهان ذوب، چگالی و



گرمای مخصوص جامد) و  $T_{\text{surface}}$  دمای سطح شمش یا دمای آب است. ارتباط عمق چاه انجمادی با سرعت ریخته‌گری و جنس آلیاژ به خوبی با رابطه فوق قابل تشریح است [۱].

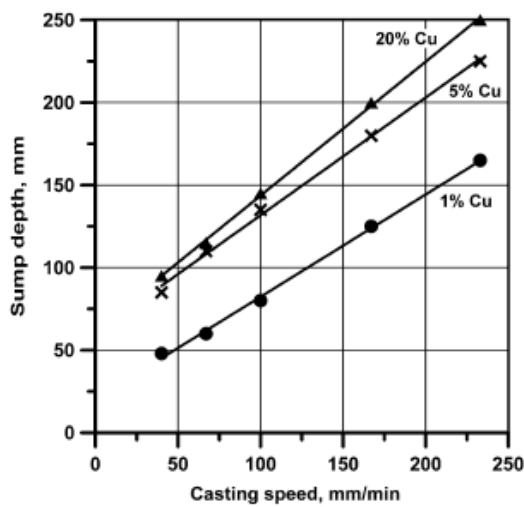


شکل ۴. بخش‌های مختلف چاه انجمادی [۵].

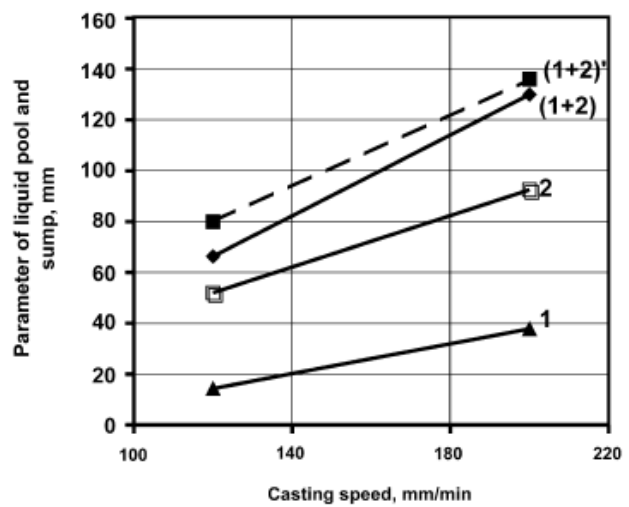
البته باید توجه داشت که سرعت پاشش آب و دمای مذاب، در مقایسه با سرعت ریخته‌گری تاثیر خیلی کمی روی ابعاد چاه انجمادی دارد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که تغییر در سرعت یا دبی پاشش آب تقریباً تاثیری روی مشخصات چاه انجمادی ندارد (مخصوصاً در سرعت‌های بالای ریخته‌گری). با این وجود، در سرعت ریخته‌گری پایین و فوق‌گداز کم و دبی زیاد پاشش آب؛ کاهش اندکی در عمق چاه انجمادی گزارش شده است که به علت افزایش انتقال/خروج حرارت می‌باشد. همین‌طور، افزایش دمای مذاب (فوق‌گداز) می‌تواند عمق چاه انجمادی را افزایش دهد چرا که باعث افزایش محتوی حرارتی (گرمای کل سیستم) شده و لذا به انتقال حرارت بیشتر نیاز است و نهایتاً باعث افزایش گرادیان دمایی در حوضچه مذاب می‌گردد. بهر حال تاثیر این دو پارامتر در مقابل سرعت ریخته‌گری قابل نظر است [۱].

در شکل ۵ نحوه تاثیر سرعت ریخته‌گری بر روی مشخصه چاه انجمادی به خوبی بیان شده است. به طور کلی افزایش سرعت ریخته‌گری سبب عمیق شدن شدید چاه انجمادی می‌شود چرا که به طور همزمان هم عمق

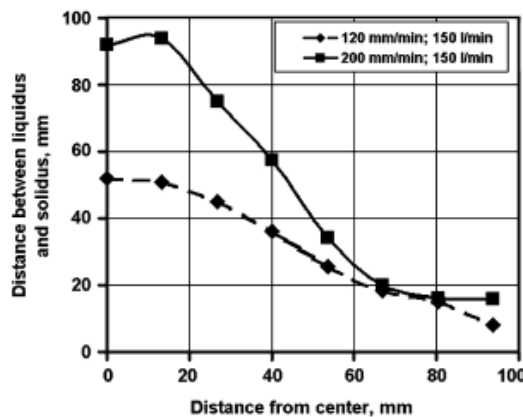
چاه انجمادی و هم فاصله بین ایزوترم‌های سالیدوس/لیکوئیدوس و ایزوترم‌های دیگر تغییر می‌کند (شکل ۵.الف). بیشترین تاثیر سرعت ریخته‌گری در مرکز شمش دیده می‌شود که فاصله بین ایزوترم لیکوئیدوس و سالیدوس (ضخامت منطقه انتقالی) به بیشترین مقدار می‌رسد (شکل ۵.ج). البته تا حدودی این شکل بیانگر تاثیر نوع آلیاژ بر روی مشخصه چاه انجمادی نیز هست. داده‌ها نشان می‌دهد که در یک سرعت ثابت ریخته‌گری، افزایش عنصر آلیاژی Cu در آلیاژ Al-Cu باعث افزایش عمق چاه انجمادی می‌شود البته این اختلاف در سرعت‌های بالای ریخته‌گری بیشتر می‌گردد (شکل ۵.ب) [۱].



(ب)



(الف)

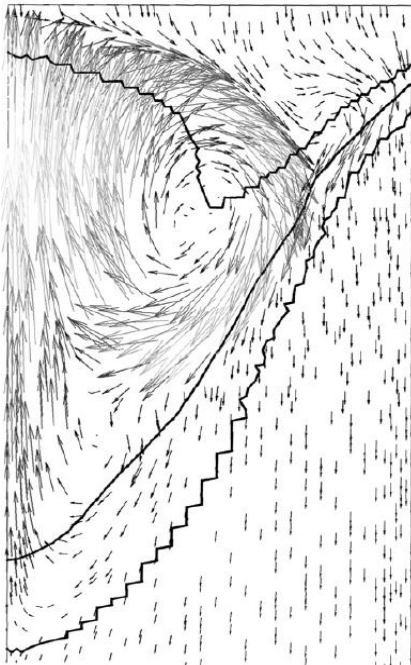


(ج)

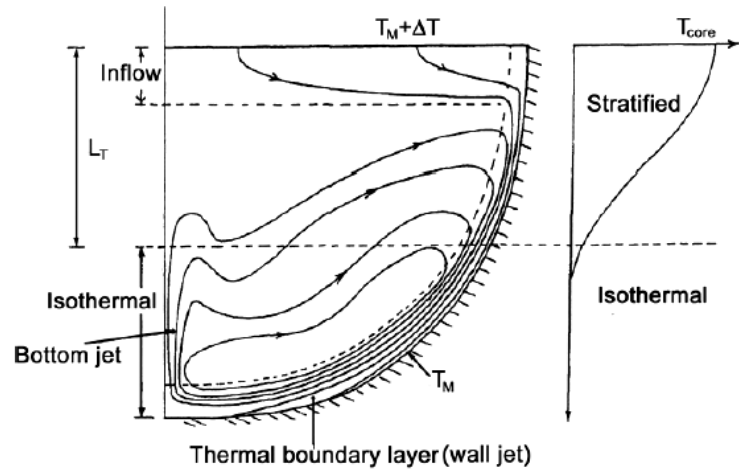
شکل ۵. تغییر ابعاد چاه انجمادی با سرعت ریخته‌گری. الف) عمق بخش‌های چاه انجمادی در سرعت‌های ریخته‌گری مختلف برای شمش‌ی به قطر ۲۰۰ mm از آلیاژ ۲۰۲۴؛ عمق تجربی چاه انجمادی (1+2)، عمق محاسبه شده چاه (1+2)، عمق حوضچه مذاب (1) و عمق منطقه گذار/انتقالی (ب) داده‌های تجربی برای شمش‌ی به قطر ۱۹۵ mm از سه آلیاژ مختلف Al-Cu (ج) تغییرات ضخامت لایه گذار/انتقالی (فاصله بین لیکوئیدوس و سالیدوس) در امتداد شعاع شمش برای دو سرعت متفاوت ریخته‌گری [۱].

## ۲.۲. جریان مذاب، جدایش عنصری و توزیع اندازه دانه در ریخته‌گری DC:

با توجه به وجود گرادیان دمایی در منطقه مذاب و تفاوت چگالی دندریت‌های منجمد شده و مذاب، یک جریان همرفتی در مذاب وجود دارد. از طرفی شرایط و نحوه پر شدن قالب نیز در جریان مذاب تاثیرگذار است (مثل اعمال میدان مغناطیسی خارجی). لذا با وجود جریان همرفتی و نیروی حاصل از پر شدن قالب، یک جریان (الگو) حرکتی برای مذاب در نظر گرفت. این الگوی جریانی است که ایزوترم‌های دمایی و در نهایت مشخصه‌های چاه انجمادی را تعیین می‌کند. شکل ۶ الگویی از جریان مذاب را نشان می‌دهد. شکل نشان می‌دهد که میدان حرکتی مذاب به دو قسمت نسبتاً ساکن، تفکیک می‌گردد؛ قسمت مرکزی Stratified که به جریان‌های تشکیل شده در نزدیکی دیواره قالب، ناشی از شدت سردشوندگی اولیه تغییرات دمایی (تغییر دما از دمای مذاب مرکزی به دمای دیواره)، محدود می‌شود. این جریان‌های دیواره‌ای اجازه می‌دهند تا مذاب داغ قسمت‌های بالایی چاه انجمادی در جبهه انجماد (نسبتاً سرد) سرد شوند. این جریان‌ها در پایین چاه انجمادی با هم برخورد کرده و لذا جریان مذاب دوباره به سمت بالای چاه انجمادی باز می‌گردد. بخش دیگر جریان مذاب را قسمت Isothermal تشکیل می‌دهد که در پایین چاه انجمادی واقع شده است و بیانگر محدوده ایزوترم‌های دمایی است [۱].



(ب)



(الف)

شکل ۶. الگوی حرکتی مذاب در شمش ریخته‌گری به روش DC (الف) شماتیک تحلیلی (ب) شماتیکی از شبیه‌سازی عددی،

که در آن بردارهای سرعت به‌مراه خطوط کسر جامد ۰، ۰/۳ و ۱ رسم شده است [۱].

با توجه به کنش‌های بین نیروهای درون مذاب، یک الگوی ایده‌آل مذاب زمانی بدست خواهد آمد که مذاب از منطقه مرکزی شمش به سمت اطراف (سطح شمش) کند و عمق چاه انجمادی را کاهش دهد. با پیشروی انجماد (جبهه انجماد)، عنصر حل شده به سمت مذاب پس زده می‌شود؛ لذا جلوی جبهه انجماد مذاب غنی از عنصر حل شده حضور می‌یابد. از طرفی با ته نشین شدن دندریته‌های منجمد شده در ته چاه انجمادی، مذاب غنی از عنصر حل شده به سمت بالا (به سمت مذاب ورودی) به حرکت در می‌آید و نهایتاً مذاب غنی شده با رویارویی با جریان مذاب ورودی به سمت پایین حرکت می‌کند. لذا ساختار جامد دندریته به همراه مذاب غنی شده شناور می‌شوند و یک شیب غلظتی در منطقه دوغابی بوجود می‌آید. بنابراین توزیع عنصر حل شونده براساس انتقال حرارت و انتقال جرم در مذاب و لایه خمیری تعیین می‌شود. در اصل می‌توان نحوه توزیع عنصر حل شده را به مشخصه‌های چاه انجمادی نسبت داد [۶].

همانطور گفته شد در اثر تماس مذاب با قالب، یک پوسته جامد ایجاد شده و در اثر انقباض این پوسته از قالب جدا شده و یک فاصله هوائی بین قالب/شمش ایجاد می‌شود که کاهش زیاد انتقال حرارت را به دنبال دارد (به نحوی که پوسته منجمد شده توسط مذاب دوباره حرارت می‌بیند و ممکن است حتی باعث پارگی موضعی پوسته گردد و کیفیت سطحی را به شدت کاهش دهد). از طرفی با توجه به ارتفاع متالواستاتیکی منطقه دوغابی، مذاب بین دندریته به داخل پوسته جامد نفوذ می‌کند و غلظت بیشتر عنصر حل شونده را در سطح شمش سبب می‌شود [۶].

تغییرات درصد عناصر آلیاژی در آلیاژهای متداول آلومینیوم در ریخته‌گری DC الگویی مشابه با شکل ۷ دارد ( $K < 1$  - جدول ۱). در این الگو جدایش منفی (رقیق شدن عنصر آلیاژی) در مرکز شمش در مجاورت جدایش مثبت تقریباً وسط شعاع شمش (غنی شدن از عنصر آلیاژی) به همراه رقت عنصر حل شونده در لایه زیرین سطح شمش و جدایش مثبت شدید سطح شمش وجود دارد [۱].

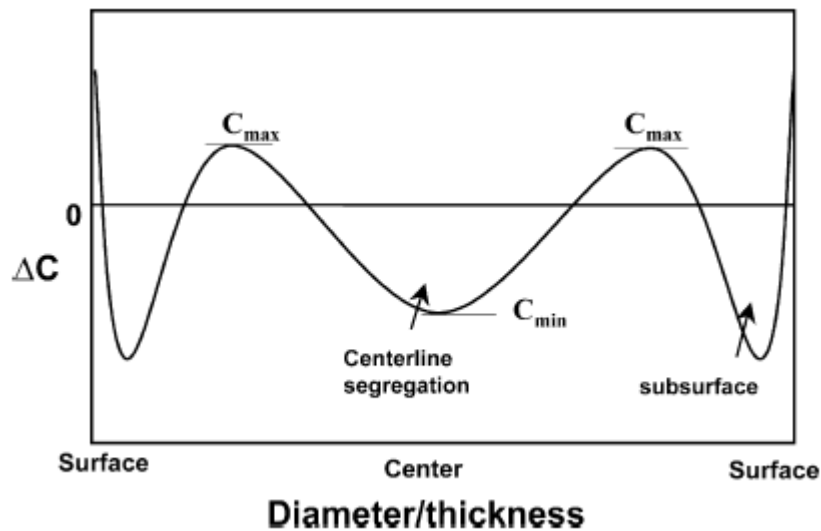
جدول ۱. ضریب/توزیع تقسیم برای عناصر مختلف آلیاژی در آلومینیوم [۱].

عنصر	Fe	Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	Cr
K	۰/۳۰	۰/۱۳	۰/۱۷	۰/۴۳	۰/۴۵	۰/۹۰	۹/۰	۲/۰

حرکت مذاب و عناصر آلیاژی در اثر انقباض ناشی از انجماد را می‌توان به دو مولفه تجزیه کرد. مولفه افقی

و عمودی؛ که مولفه افقی آن (از مرکز به سطح شمش) سبب ایجاد منطقه جدایش منفی در مرکز و جدایش مثبت در سطح شمش می گردد. این الگوی جدایش از فاکتورهای زیر منتج می شود [۱]:

- \* جریان مذاب ناشی از انقباض
- \* جریان همرفتی ناشی از گرادیان دمایی یا غلظتی
- \* حرکت دانه های هم محور (شناور)
- \* تغییر فرم شبکه جامد (قسمت جامد)؛ مهمترین مکانیزم برای جدایش سطحی و زیر سطحی



شکل ۷. الگوی جدایش عنصری برای  $K < 1$ ؛  $\Delta C$  برابر است با  $(C_i - C_{ave})/C_{ave}$  [۱].

به طور کلی می توان نقش این فاکتورها را به صورت زیر تشریح کرد [۱]:

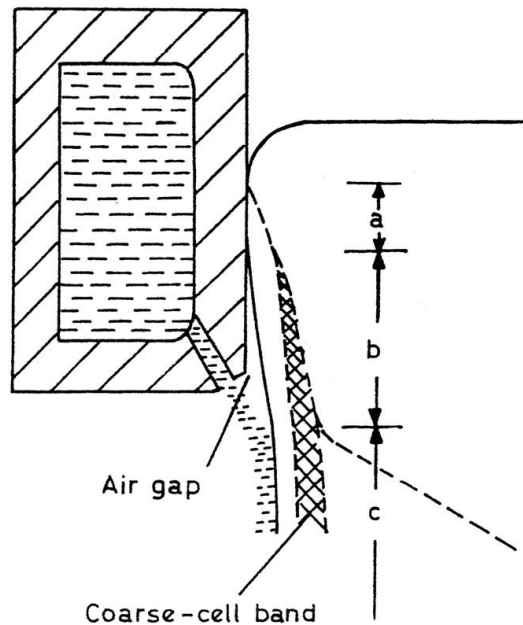
- \* جریان همرفتی حرارتی، جدایش مثبت مرکز شمش را کنترل می کند.
- \* سهم جریان همرفتی غلظتی بستگی به چگالی عنصر حل شونده دارد اما در بسیاری از موارد این جریان هم جهت با جریان همرفتی حرارتی است.
- \* جریان ناشی از انقباض سبب جدایش منفی مرکزی و جدایش مثبت سطحی می گردد.
- \* دانه ها (دندریت ها)ی شناور در جدایش منفی مرکز شمش نیز موثر است.

\* تاثیر جریان ناشی از تغییر فرم بستگی به نوع تغییر فرم دارد؛ در اکثر موارد این تغییر فرم جدایش مثبت را کنترل می‌کند.

البته همه عواملی که بتوانند به طور موثر ریزساختار را اصلاح کنند و منطقه هم محور را گسترش دهند؛ به عنوان مثال دندریت‌ها دوباره ذوب شده، از جبهه انجماد جدا شده یا خرد شده و بوسیله جریان داخل مذاب از پوسته جامد به سمت منطقه مرکزی شمش منتقل گردد، می‌تواند جوانه‌زنی ناهمگن را افزایش داده و برای حذف/کاهش جدایش عناصر آلیاژی مفید باشد [۶].

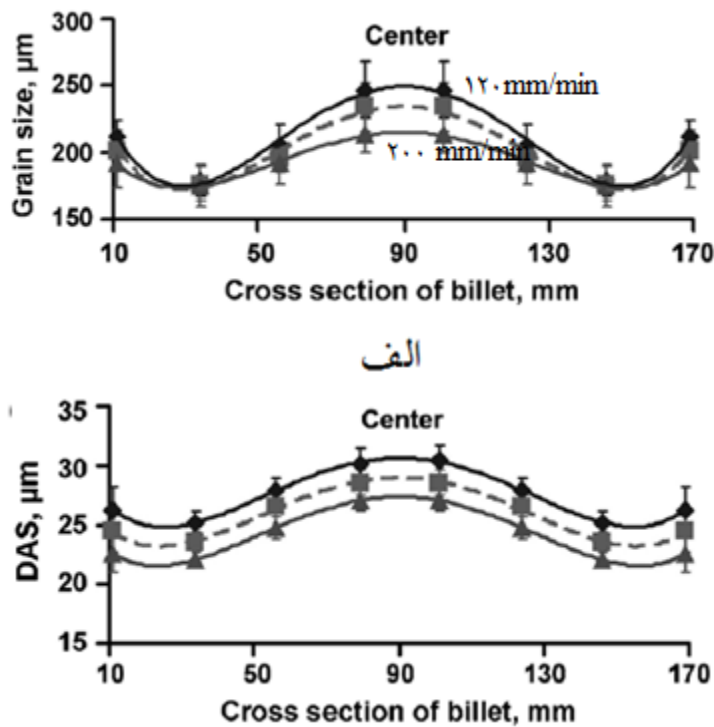
در مورد توزیع اندازه دانه در شمش ریختگی به روش DC می‌توان به صورت زیر بحث کرد:

در سطح شمش به دلیل پایین بودن میزان انتقال حرارت از مذاب به سمت قالب (کم بودن شدت سرد شدن اولیه) دانه بندی درشتی را شاهد خواهیم بود. در لایه‌های زیرین پوسته جامد اولیه، دانه‌های کوچکتر و با مورفولوژی متفاوتی تشکیل خواهد شد چرا که لایه‌های زیرین با شدت بیشتری سرد خواهد شد (سرد شدن ثانویه با پاشش آب)، در ادامه در مرکز شمش به دلیل وجود تحت انجماد ترکیبی یا به دلیل جوانه‌زنی غیرهمگن؛ دانه‌های درشت‌تری ایجاد خواهد شد (شکل ۸).



شکل ۸. تاثیر سرعت‌های سرد شدن متفاوت در اندازه دانه در بخش‌های مختلف شمش؛ (a) سرد شدن اولیه در تماس با قالب (b) حضور فاصله هوایی و درشت شدن دانه‌ها (c) سرد شدن ثانویه با آب و ریز شدن مجدد دانه در لایه‌های مرکزی شمش [۱].

لذا از سطح به مرکز شمش، توزیع دانه بندی نوسان خواهد داشت؛ البته این توزیع به سرعت ریخته گری نیز بستگی دارد. به عنوان مثال می توان به شکل ۹ که مربوط به آلیاژی از Al-Cu است، اشاره کرد؛ این شکل هم بیانگر تغییرات اندازه دانه و DAS (فاصله بین بازوهای دندریتی) در امتداد شعاع شمش و هم بیانگر نحوه تاثیر سرعت ریخته گری بر این پارامتر ریزساختاری است [۱].



شکل ۹. الف) نوسان اندازه دانه در امتداد شعاع شمش و تاثیر سرعت ریخته گری ب) نوسان DAS و تاثیر سرعت ریخته گری (سرعت ریخته گری از بالا به پایین: ۱۲۰ mm/min، ۱۶۰ mm/min، ۲۰۰ mm/min) [۱].

### ۳. مفاهیم میدان مغناطیسی:

تلاش های اولیه برای بکارگیری میدان مغناطیسی در فرایندهای انجمادی به دهه اول ۱۹۳۰ برمی گردد و امروزه استفاده از میدان مغناطیسی به یک روش استاندارد صنعتی در فرایندهای انجماد سیال های هادی مغناطیس همچون فلزات مذاب و نیمه هادی ها تبدیل شده است. کاربردهای این میدان می تواند به صورت زیر دسته بندی گردد [۷]:

- © حذف قالب؛ فراهم کردن شرایط انجماد در هوا
- © ایجاد یک جریان همرفتی در مذاب در حال انجماد

© مقابله و حذف تلاطم و جریان‌های همرفتی مضر در مذاب

همه این تاثیرات می‌تواند هم در صنایع فلزات و هم در نیمه هادی‌ها بکار گرفته شود و در اصلاح و بهبود کنترل فرایند و کیفیت محصول موثر باشد [۷].

لذا برای درک بهتر تاثیر مغناطیسی لازم است تا شناخت کافی از میدان مغناطیسی و نحوه اثر گذاری آن روی مذاب در حال انجماد داشته باشیم.

برای شناخت بهتر میدان مغناطیسی و تاثیر آن، باید تانسور تنش ماکسول را بررسی کرد. که برای یک محیط همگن ماکروسکوپی به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$T_{\alpha\beta} = \varepsilon E_{\alpha} E_{\beta} + \mu H_{\alpha} H_{\beta} - 0.5 \delta_{\alpha\beta} \left[ E^2 \left( \varepsilon - \rho \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right)_T \right) + H^2 \left( \mu - \rho \left( \frac{\partial \mu}{\partial \rho} \right)_T \right) \right] \quad (2)$$

که در آن  $\varepsilon$  ضریب نفوذپذیری الکتریکی،  $E_{\alpha}$  میدان الکتریکی جزء  $\alpha$ ،  $\mu$  ضریب نفوذپذیری مغناطیسی،  $H_{\alpha}$  میدان مغناطیسی جزء  $\alpha$ ،  $\rho$  چگالی سیال و  $T$  دما است. دلتای کرونکر  $\delta_{\beta\alpha}$ ، اگر  $\alpha = \beta$  :  $\delta_{\beta\alpha} = 1$  و اگر  $\alpha \neq \beta$  :  $\delta_{\beta\alpha} = 0$  در حالیکه  $\alpha$  و  $\beta$  می‌توانند ۱، ۲، ۳ و... باشند.

در رابطه ۲، ترم‌های اول و سوم سمت راست معادله بیانگر تاثیرات الکترواستاتیکی هستند که در طی انجماد سیالات هادی استفاده می‌شود. در حالیکه بقیه ترم‌ها بیانگر تاثیرات مغناطیسی می‌باشند و از تغییرا خواص مغناطیسی منتج می‌شوند و اخیراً این ترم در رشد تک کریستال‌ها بکار گرفته می‌شود. تاثیر بزرگ و مهم میدان الکترومغناطیسی اعمالی روی انجماد نیمه هادی‌ها و فلزات از دو ترم اولی ناشی می‌شود [۷].

اثر میدان الکترومغناطیسی به صورت یک نیروی القایی در مذاب/سیال یا همان نیروی لورنتز مطرح است. این نیرو به صورت رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$F = \nabla \cdot T \quad (3)$$

رابطه (۱) را می‌توان به فرم زیر در نظر گرفت:

$$F = J \times B = \nabla \times H \times B = \sigma(E + u \times B) \times B \quad (4)$$

که  $J$  و  $B$  به ترتیب چگالی جریان الکتریکی و میدان مغناطیسی القایی را نشان می‌دهد و  $\sigma$  ضریب هدایت الکتریکی است [۷].

به طور کلی می‌توان دو نوع میدان مغناطیسی برای فرایند انجماد فلزات مذاب و نیمه هادی‌ها بکار برد. یکی



میدان مغناطیسی متناوب برای تولید جریان‌های گردابی<sup>۱</sup> و نیروی لورنتز؛ در این حالت ترم  $\mathbf{u} \times \mathbf{B}$  در مقایسه با میدان مغناطیسی  $\mathbf{E}$  کوچک بوده و لذا نیروی لورنتز به صورت رابطه زیر بدست می‌آید:

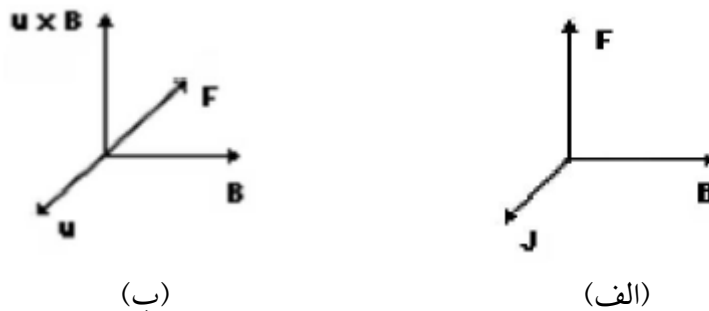
$$\mathbf{F} = \sigma \mathbf{E} \times \mathbf{B} \quad (۵)$$

این نیرو به عنوان ایجاد حرکت و تلاطم قوی در نزدیکی جبهه انجماد بکار می‌رود؛ به منظور شکستن و خرد کردن دندریت‌های جدید (مثلا در ریخته‌گری فلزات) یا به عنوان همگن‌کننده غلظت عنصر آلیاژی و حذف دیگر ناپایداری حرکتی سیال (مثلا رشد تک کریستال نیمه هادی‌ها). هم چنین می‌تواند تاثیرگذار روی شکل مذاب یا نگهدارنده مذاب در مقابل نیروی جاذبه باشد [۷].

حالت دوم، کاربرد میدان مغناطیسی ثابت، به منظور کاهش حرکت سیال یا ناپایداری موضعی حرکتی در حوضچه مذاب در حال انجماد است. در این مورد نیروی لورنتز به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{F} = \sigma \mathbf{u} \times \mathbf{B} \times \mathbf{B} \quad (۶)$$

به طور خلاصه می‌توان این توضیحات را در شکل ۱۰ مشاهده کرد [۷].



شکل ۱۰. نیروی لورنتز القایی بوسیله دو نوع میدان مغناطیسی (الف) بکارگیری میدان مغناطیسی a.c.

(ب) بکارگیری میدان مغناطیسی d.c. [۷].

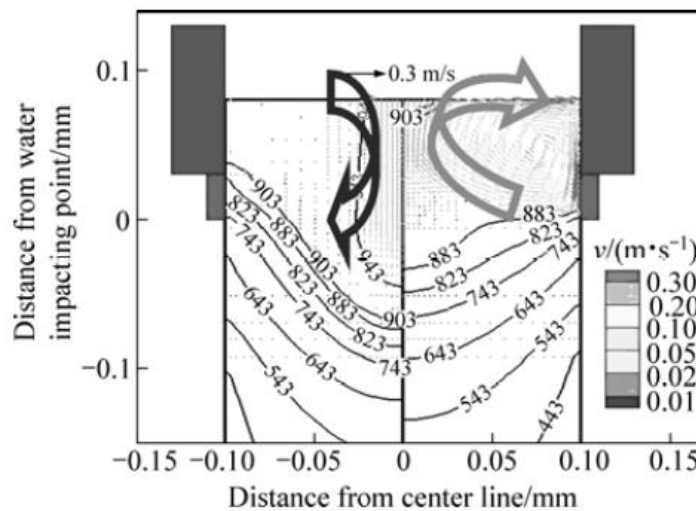
بنابراین با بکارگیری یک جریان متناوب a.c. در یک سیم پیچ اطراف مذاب، یک جریان گردابی (J) و میدان مغناطیسی در مذاب القا شده و در اثر کنش بین این نیروها، نیروی لورنتز در مذاب ایجاد می‌شود که نقش اساسی در حرکت مذاب خواهد داشت. که این حرکت باعث به حرکت درآمدن دندریت‌های تازه منجمده شده می‌گردد و یا سبب شکسته شدن دندریت‌های پیشین و جابجایی آنها شده و در نهایت به جلوی جبهه

<sup>1</sup> Eddy Current

انجماد منتقل کرده و سبب جوانه‌زنی بیشتر می‌گردد و اصلاح سازی دانه را دنبال دارد. هم چنین با حضور جنبش/تلاطم<sup>۱</sup> القایی در مذاب جدایش عناصر آلیاژی به شدت کاهش می‌یابد. علاوه بر این اعمال میدان مغناطیسی باعث کاهش حفره و تخلخل شده و ترک‌های داخلی را به حداقل می‌رساند [۸ و ۷].

نیروی لورنتز القا شده در مذاب به دو مولفه تقسیم می‌شود: مولفه پتانسیلی<sup>۲</sup>، که با گرادیان فشار مذاب به تعادل خواهد رسید و باعث تحدب در سطح شمش (برای ریخته‌گری در حالت استفاده از شناور کنترل کننده) و بهبود کیفیت سطحی می‌گردد (در نتیجه کاهش فشار تماس و سطح تماس بین مذاب و قالب کیفیت سطح بهبود می‌یابد). مولفه دیگر نیروی/مولفه دورانی (حلقوی)<sup>۳</sup> است که باعث بهم خوردن مذاب و نتیجتاً اصلاح میکروساختار و همگن شدن توزیع عناصر آلیاژی را در پی دارد [۹].

نیروی لورنتز یک جریان در مذاب درون مذاب ایجاد می‌کند. جهت این جریان سیال تغییر خواهد کرد و سرعت این جریان در مقایسه با ریخته‌گری DC افزایش خواهد یافت (شکل ۱۱). که توزیع عناصر آلیاژی را یکنواخت می‌کند و انتقال حرارت بین مذاب و دیواره قالب را افزایش می‌یابد. از طرفی ایزوترم‌های دمائی نیز تغییر می‌کند به عبارتی دمای مذاب نسبت به ریخته‌گری معمولی DC کمتر می‌گردد (شکل ۱۲) [۹].

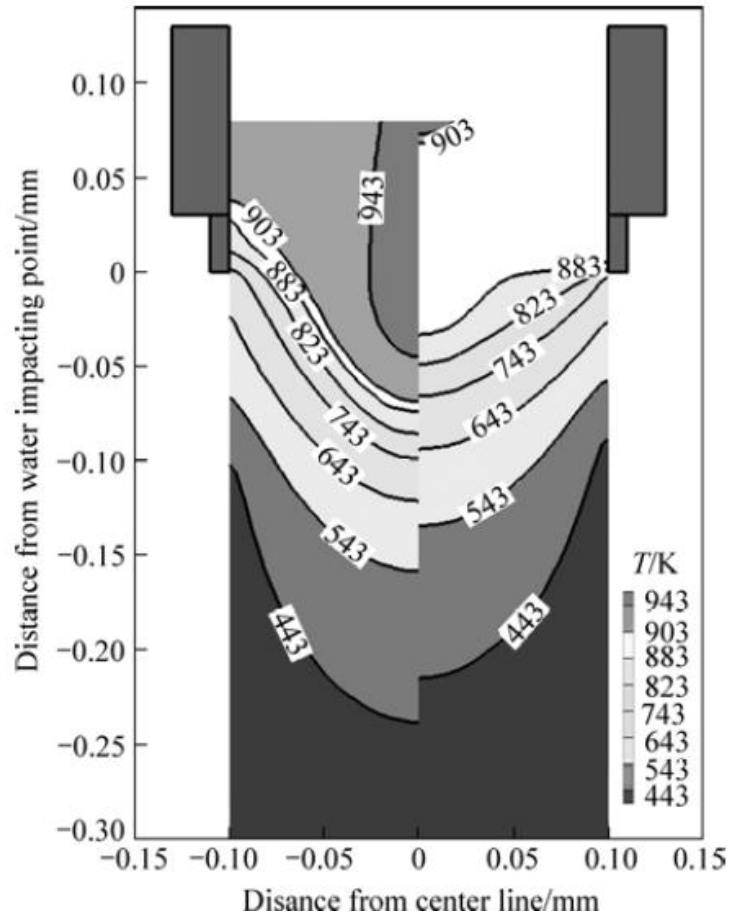


شکل ۱۱. میدان‌های حرکت/سیالیت مذاب در ریخته‌گری معمولی DC (سمت چپ) و ریخته‌گری DC تحت میدان مغناطیسی (سمت راست) [۹].

<sup>1</sup> Stirring

<sup>2</sup> Potential

<sup>3</sup> Rotational or Vortical



شکل ۱۲. ایزوترم‌های دمایی در ریخته‌گری معمول DC (سمت چپ) و ریخته‌گری DC تحت میدان مغناطیسی (سمت راست) [۹].

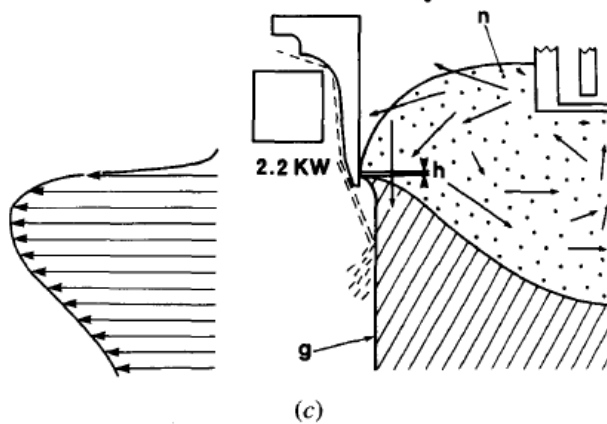
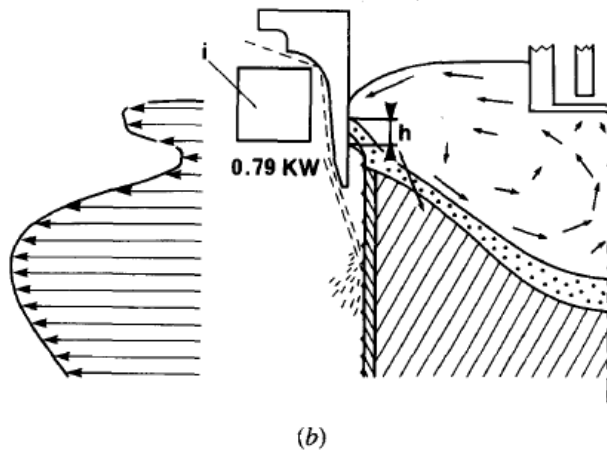
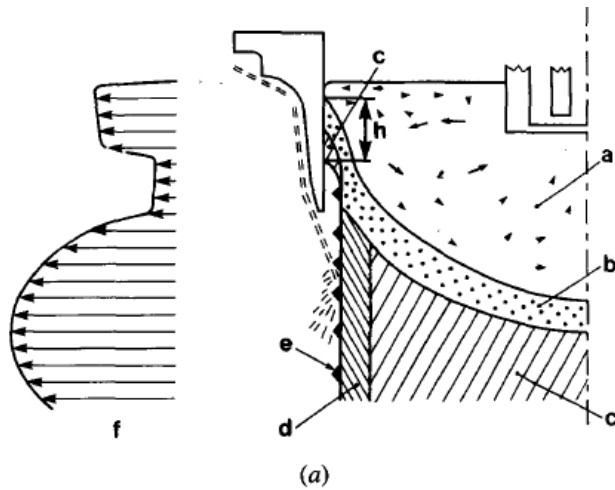
از تصاویر می‌توان نتیجه گرفت که در ریخته‌گری DC تحت میدان مغناطیسی؛ گرادیان دمایی و عمق چاه انجمادی کاهش می‌یابد. و لذا کاهش ریسک ترک خوردگی را نیز در پی دارد [۹].

شکل ۱۳ حضور میدان مغناطیسی و مولفه‌های نیروی القایی را در مذاب نشان می‌دهد. شکل ۱۴ بیانگر تاثیر میدان مغناطیسی در مذاب و نحوه حرکت مذاب می‌باشد. هم‌چنین در این تصویر چگونگی تغییر چاه انجمادی و تماس مذاب با قالب و هم‌چنین پروفیل انتقال حرارت قابل مشاهده است [۸].

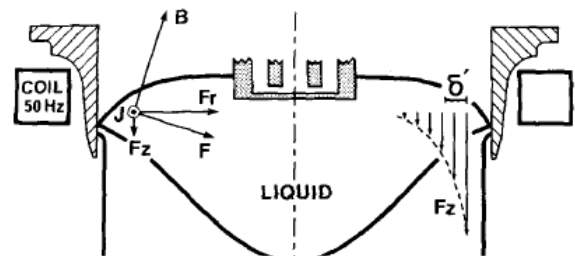
همانطور که مشاهده می‌شود با حضور میدان، کیفیت سطحی هم بهبود یافته است، چرا که با حضور میدان مناسب لایه جدایش و تراوش و به عبارتی تماس بین قالب و مذاب تا حد امکان کاهش یافته است [۸].

در شکل ۱۴a، شکل چاه انجمادی و میزان تماس مذاب با قالب قابل ملاحظه است که تغییرات آنها در حضور

میدان مغناطیسی (با شدت های مختلف) در قسمت های b و c دیده می شود. البته باید توجه داشت که این تغییرات ناشی از نیروهای القا شده در مذاب (همان  $F_r$  و  $F_z$ ) بوده که روی جریان مذاب تاثیر گذار است [۸].



شکل ۱۴. نحوه تاثیر میدان مغناطیسی [۸].



شکل ۱۳. نیروی لورنتز و مولفه های آن [۸].

در شکل ۱۴ نقاط مشخص شده به شرح زیر است:

- (a) فلز مذاب
- (b) منطقه خمیری
- (c) فلز منجمد شده
- (d) منطقه جدایش
- (e) تراوشات سطحی
- (f) پروفیل تخمینی سیلان حرارت
- (g) سطح صاف
- (h) ارتفاع فلز منجمد شده در تماس با قالب
- (i) القاکننده
- (n) جوانه‌های معلق در مذاب

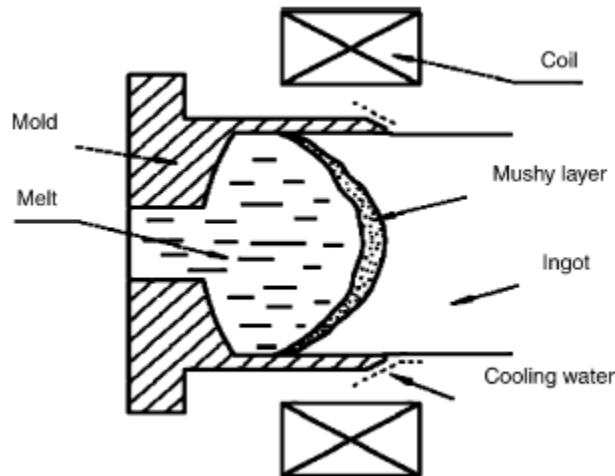
#### ۴. بررسی ریخته‌گری DC آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ تحت میدان مغناطیسی:

با توجه به اینکه در سال‌های اخیر ریخته‌گری DC در حالت افقی (HDC) توجه بیشتری به خود معطوف کرده است؛ در ادامه به بررسی تاثیر میدان مغناطیسی روی ریزساختار شمش آلومینیوم ۲۰۲۴ ریخته‌گری به روش HDC می‌پردازیم.

قبلاً بیان شد که مهمترین عامل مزاحم در ریخته‌گری HDC نیروی جاذبه است که یک ناهمگنی میکرو ساختاری را در شمش بوجود می‌آورد. به عبارتی مهمترین مشکل این فرایند ناهمگنی ساختاری به دلیل تاثیر نیروی جاذبه و سرد شدن نامتوازن است. بنابراین یافتن روشی برای فراهم کردن یکنواختی میکروساختاری، یک دغدغه اساسی در روش HDC است. در سال‌های اخیر استفاده از میدان مغناطیسی در حین ریخته‌گری توجه زیادی را به خود جلب کرده است. با استفاده از این تکنیک علاوه بر اصلاح میکروساختار، می‌توان به کیفیت سطحی بالایی در شمش دست یافت [۱۰ و ۲].

در این فرایند یک القا کننده اطراف قالب تعبیه می‌شود که با اعمال جریان متناوب (a.c)، یک میدان مغناطیسی در مذاب القا می‌شود و نتیجتاً براساس بحث‌های قبلی، باعث کاهش فشار بین مذاب و قالب شده و شدت سرد شدن اولیه را کاهش می‌دهد (شکل ۱۵). از طرفی نیروی مغناطیسی القا شده در مذاب باعث پهن تر

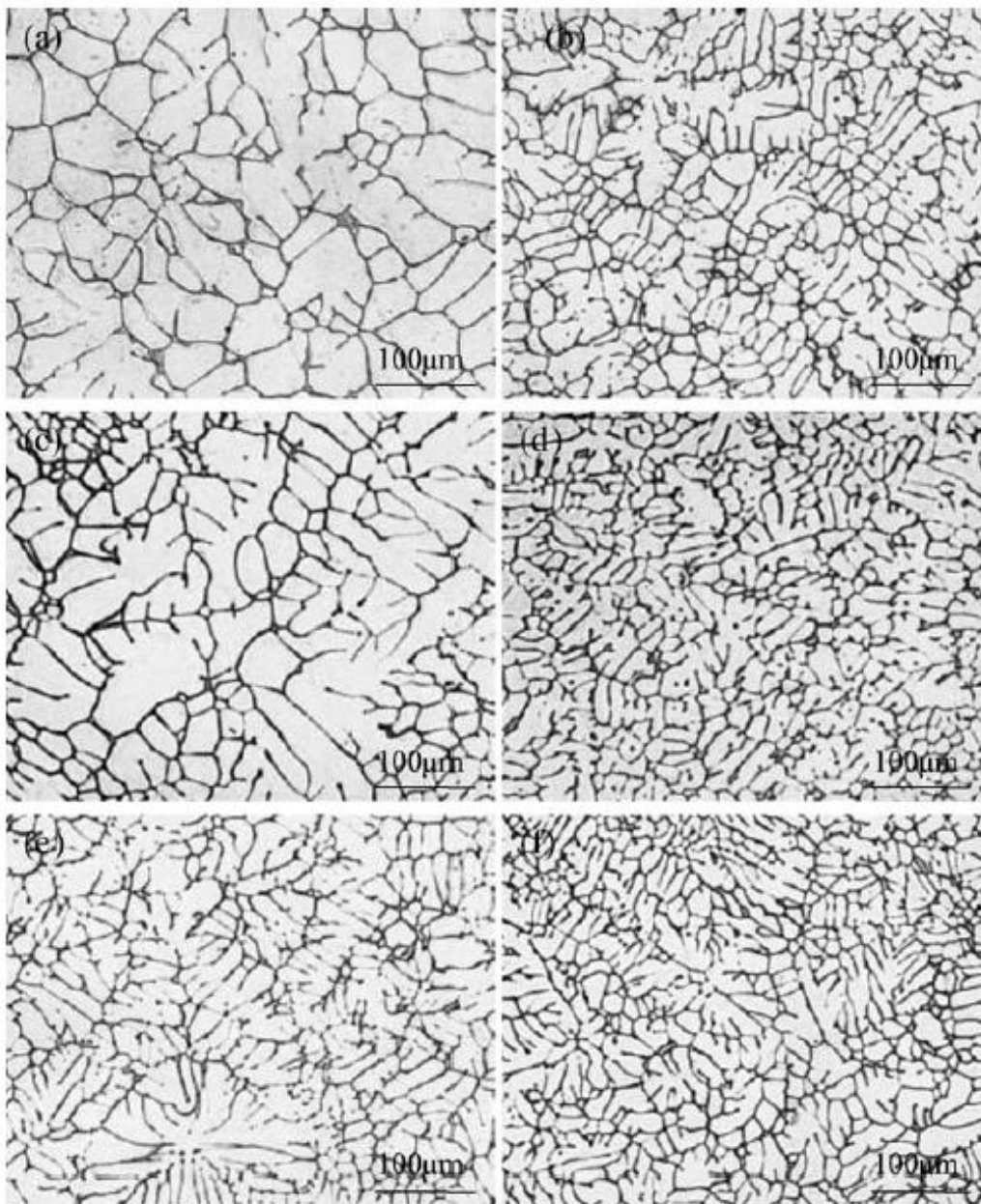
شدن منطقه خمیری (کاهش ارتفاع و عمق چاه انجمادی)، کنترل جوانه‌زنی ناهمگن، کاهش گرادیان دمائی و ضعیف شدن اثر نیروی جاذبه می‌شود. همه این تاثیرات، اصلاح قابل ملاحظه ریزساختار و توزیع مجدد عناصر حل شده را در پی دارد [۱۰۲].



شکل ۱۵. شماتیکی از فرایند ریخته‌گری HDC تحت میدان الکترومغناطیس [۱۰۲].

به طور کلی در ریخته‌گری HDC، دانه‌ها ناهمگن بوده و اندازه دانه از سطح پایینی به سطح بالایی بزرگ و درشت می‌شوند به طوری که اندازه متوسط دانه در حدود  $100 \mu\text{m}$  است ولی در حضور میدان مغناطیسی اختلاف اندازه دانه بین سطح پایینی و بالایی کاهش یافته و اندازه متوسط دانه در حدود  $40 \mu\text{m}$  می‌شود (شکل ۱۶) [۱۰].

شکل ۱۷، توزیع عنصر Cu را در طول قطر شمش نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در غیاب میدان مغناطیسی، سطوح شمش از Cu غنی بوده و اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین سطح پایینی و بالایی وجود دارد. البته باید توجه داشت جدایش معکوس و جدایش ناشی از جاذبه به طور همزمان وجود دارد. با حضور میدان الکترومغناطیسی  $10000 \text{ At}$  و  $30 \text{ Hz}$  (بیانگر تعداد دور سیم پیچ ضربدر میزان آمپر عبوری از سیم پیچ است) توزیع Cu یکنواخت‌تر شده و جدایش ماکرو به شدت کاهش می‌یابد. همچنین توزیع عنصر حل‌شونده در داخل دانه‌های کریستالی، با حضور میدان مغناطیسی، اصلاح می‌شود به نحوی که درصد Cu در داخل دانه‌ها به بیشتر از  $2/8$  درصد می‌رسد، در حالی که مقدار آن در غیاب میدان حدود  $2/2$  درصد است [۱۰].

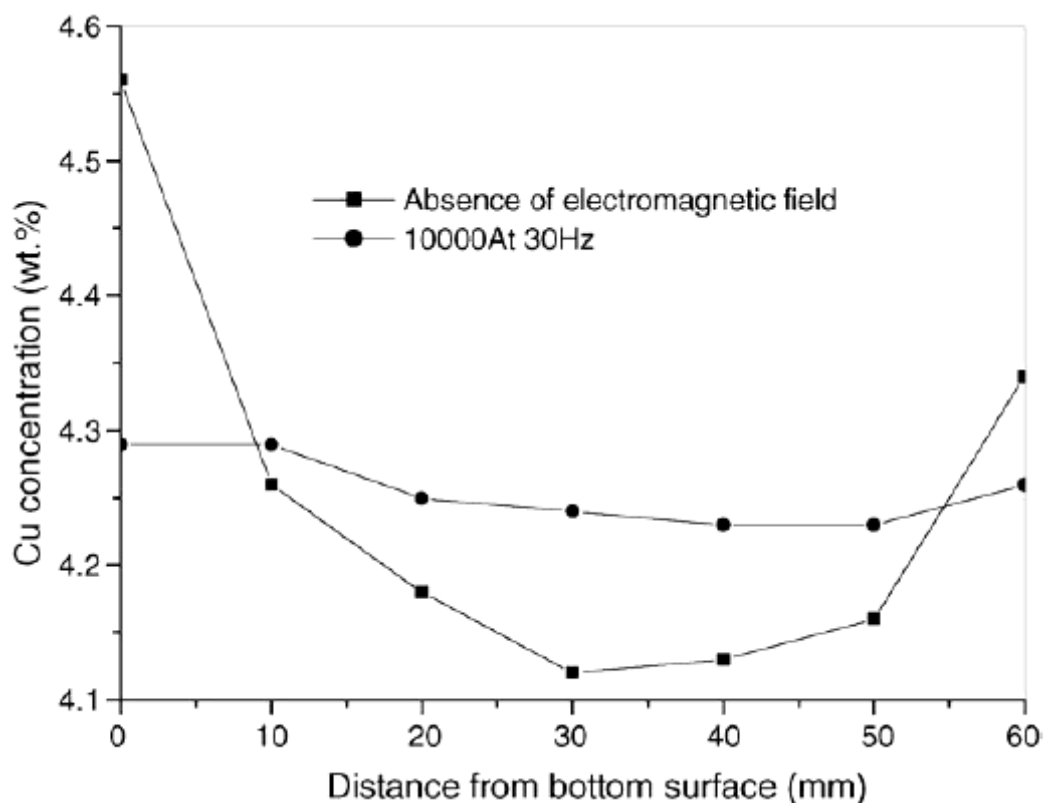


شکل ۱۶. تصاویر میکروسکوپ نوری از شمش ریختگی به روش HDC؛ a، c و e: در غیاب میدان الکترومغناطیسی و b، d و f: با اعمال میدان  $10000\text{At}$ ،  $30\text{Hz}$  (در دو قسمت تصاویر از بالا به سمت پایین شمش تهیه شده است) [۱۰].

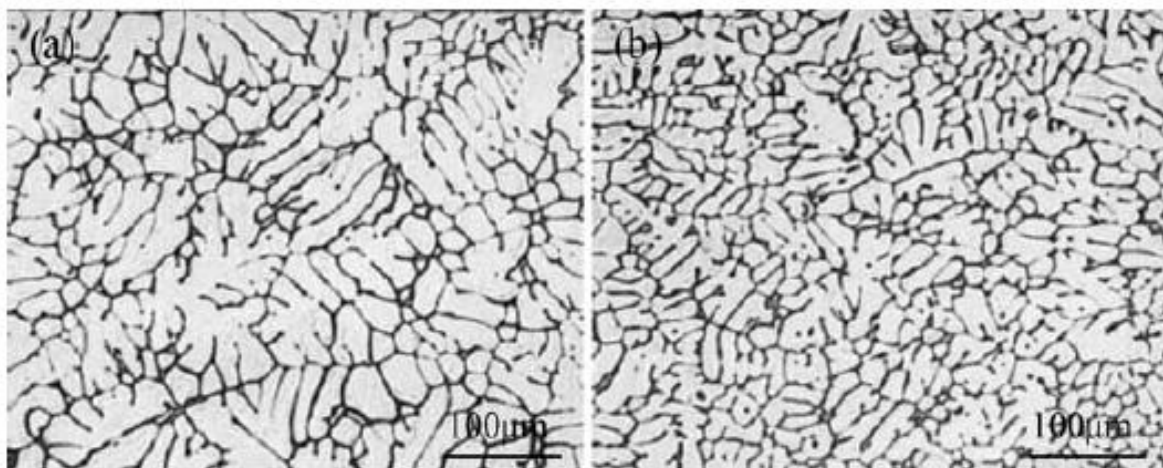
#### ۱.۴. تاثیر بزرگی میدان مغناطیسی [۱۰]:

(الف) شدت میدان:

تاثیر شدت میدان روی ریزساختار در شکل ۱۸ قابل مشاهده است. با افزایش شدت میدان مغناطیسی از  $5000$  به  $10000\text{At}$ ، دانه های دندریتی ریزتر و یکنواخت تر می شوند.



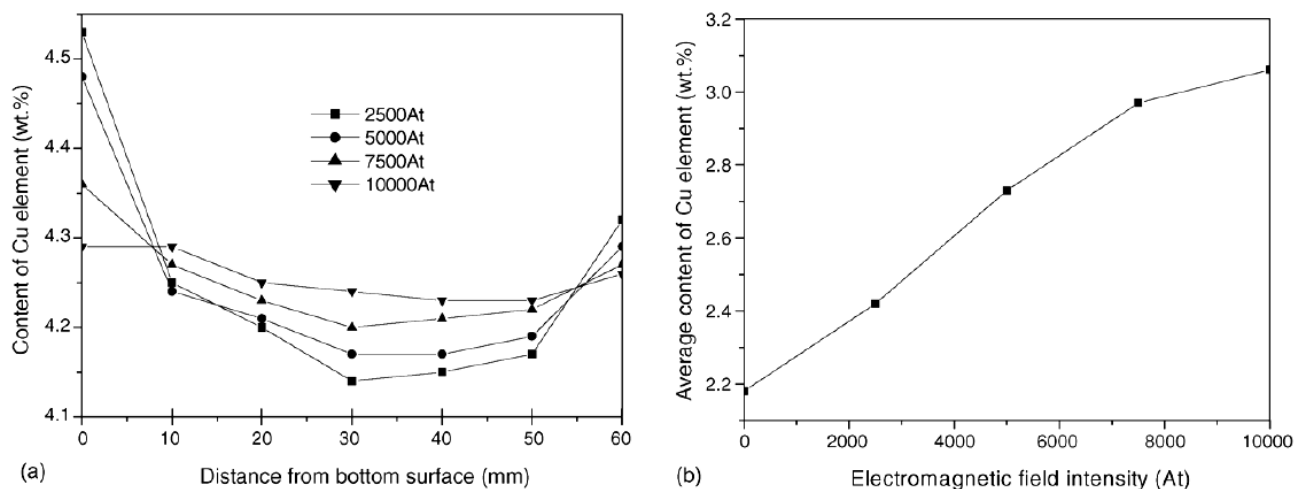
شکل ۱۷. بهبود توزیع عنصر Cu در حضور میدان مغناطیسی [۱۰].



شکل ۱۸. تصاویر میکروسکوپ نوری: (a) ۳۰ Hz، ۱۰۰۰۰ At (b) ۳۰ Hz، ۵۰۰۰ At [۱۰].

شکل ۱۹ تاثیر شدت میدان را روی توزیع Cu در طول قطر و داخل دانه نشان می دهد. در این حالت فرکانس میدان ۳۰ هرتز ثابت نگه داشته شده و شدت میدان از ۲۵۰۰ تا ۱۰۰۰۰ At تغییر کرده است. همانطور که در شکل دیده می شود ناهمگنی توزیع Cu به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته است. این مشاهدات حاکی از تاثیر قوی شدت میدان مغناطیسی روی کنترل توزیع عنصر حل شونده در شمش و در داخل دانه ها می باشد.

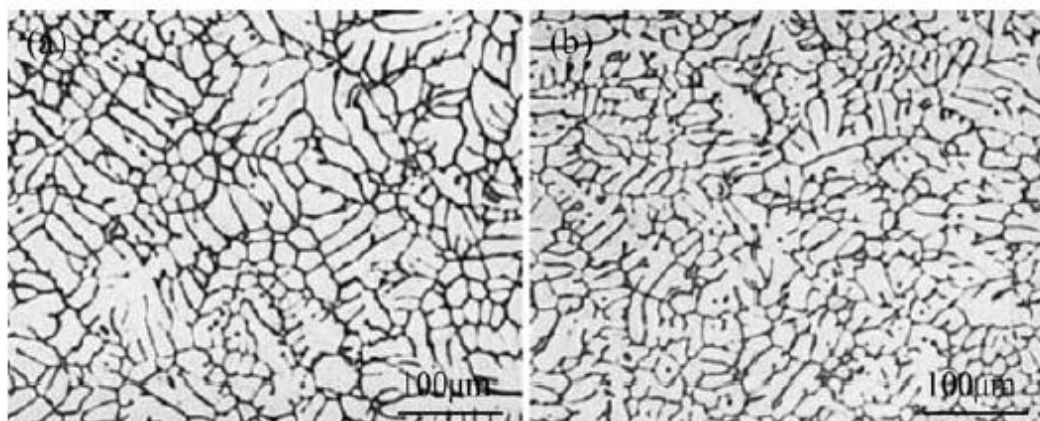




شکل ۱۹. (a) پروفیل غلظت مس در امتداد قطر برای شدت‌های مختلف میدان (b) پروفیل غلظت مس داخل دانه‌های کریستالی برای شدت‌های مختلف میدان [۱۰].

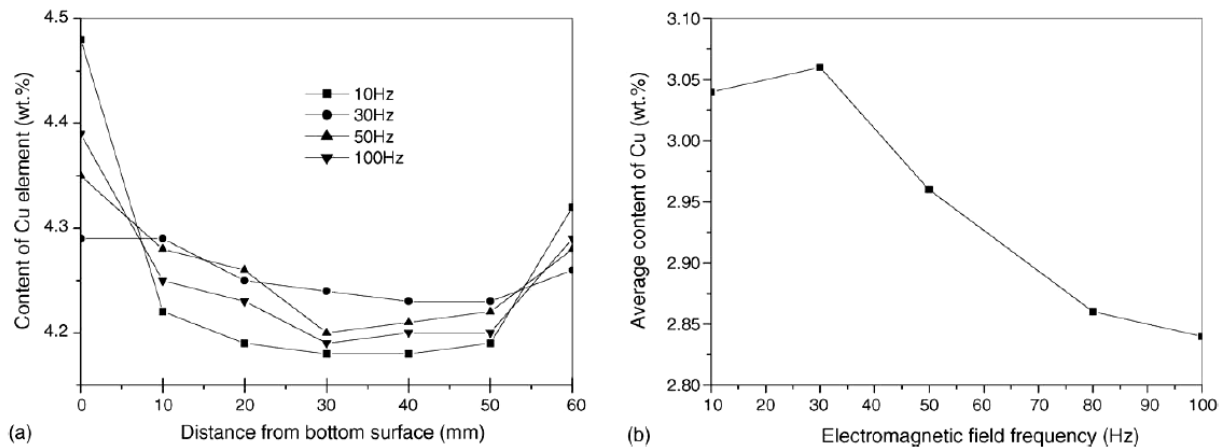
(ب) فرکانس میدان:

شکل ۲۰ تاثیر فرکانس را بر روی ریزساختار به خوبی نشان می‌دهد. با کاهش فرکانس از ۱۰۰ به ۳۰ هرتز، ساختار ریزتر و یکنواخت‌تر شده است.



شکل ۲۰. تصاویر میکروسکوپ نوری: (a) ۱۰۰ Hz، ۱۰۰۰۰ At (b) ۳۰ Hz، ۱۰۰۰۰ At [۱۰].

در شکل ۲۱ تاثیر فرکانس بر روی توزیع Cu دیده می‌شود. جدایش معکوس و جدایش جاذبه به طور قابل ملاحظه‌ای با کاهش فرکانس کاهش می‌یابد. البته با کاهش فرکانس، غلظت مس داخل دانه‌ها تا فرکانس ۳۰ هرتز افزایش و بعد از آن شروع به کاهش می‌کند که حاکی از این است که فرکانس‌های کمتر تاثیر بیشتری روی کنترل عنصر حل شونده در داخل دانه‌ها دارد.



شکل ۲۱. (a) پروفیل غلظت مس در امتداد قطر تحت میدان با فرکانس‌های مختلف (b) پروفیل غلظت مس داخل دانه‌های کریستالی تحت میدان با فرکانس‌های مختلف [۱۰].

در فرایند HDC، جدایش از تاثیر سه عامل اصلی: جریان ناشی از انقباض، جریان ناشی از جاذبه و تراوایی سطحی (ناشی از فشار استاتیکی) نتیجه می‌شود [۱۰].

در حضور میدان مغناطیسی فشار تماس بین مذاب و قالب کاهش می‌یابد که کاهش قابل ملاحظه شدت سرد شدن اولیه را به دنبال دارد بنابراین تراوایی سطحی به شدت کاهش می‌یابد. از طرفی میدان مغناطیسی با ایجاد نیروی لورنتز در مذاب، سبب به حرکت در آوردن مذاب از مناطق مرکزی به مناطق اطراف می‌گردد و باعث ضعیف شدن جریان ناشی از انقباض و نیروی جاذبه می‌گردد. لذا میدان مغناطیسی با کنترل انتقال حرارت و جرم بین قسمت‌های بالایی و پایینی شمش، ناهمگنی‌های ساختاری را کاهش می‌دهد [۱۰].

به عنوان پارامتر اساسی، فرکانس میدان روی توزیع چگالی میدان مغناطیسی در محیط‌های هادی تاثیر گذار است. لذا در فرآیندهای ریخته‌گری الکترومغناطیسی، باید شرایط بهینه‌ای را برای انجماد فرآهم کرد، که این شرایط متاثر از بهینه شدن میدان مغناطیسی است. طول مشخصه میدان مغناطیسی یکی از پارامترهای اصلی و عمده در بهینه شدن میدان مغناطیسی است [۱۰].

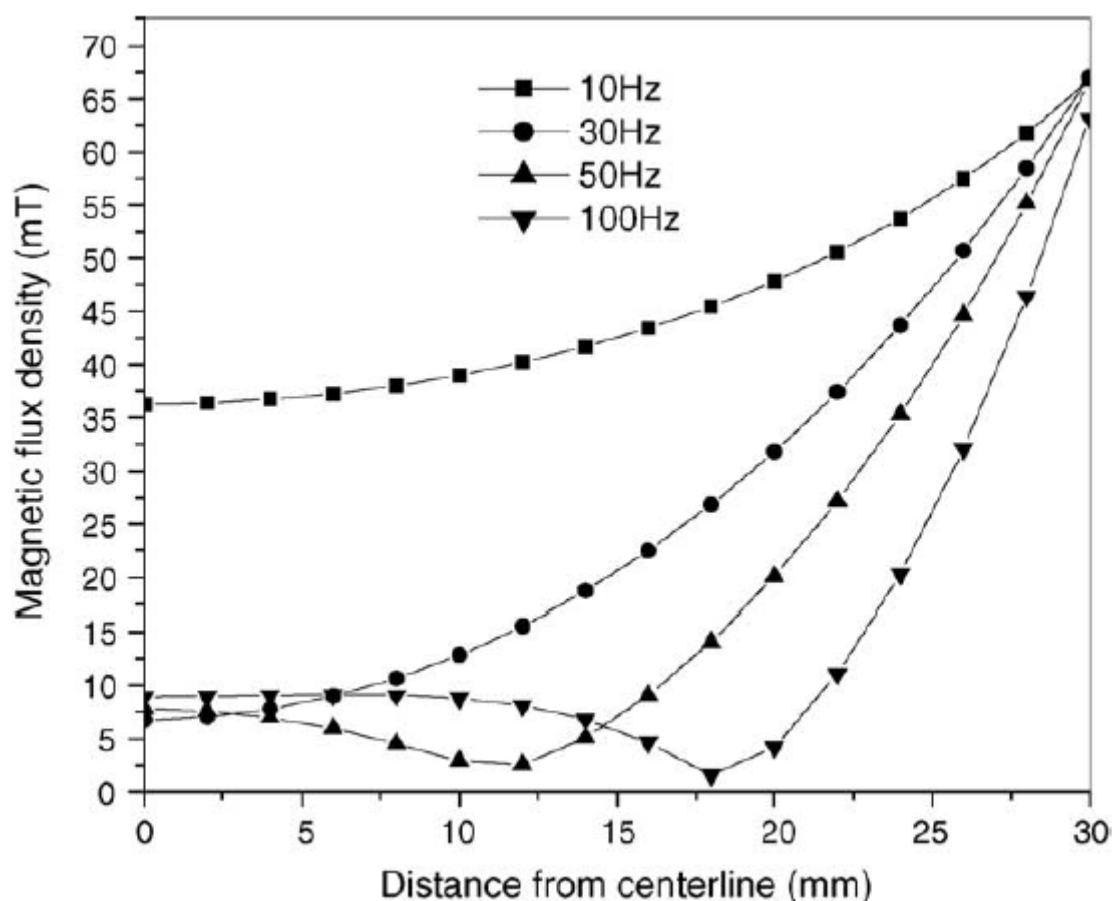
$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\sigma \mu \pi f}}$$

σ: ضریب هدایت الکتریکی مذاب

μ: ضریب نفوذپذیری مذاب

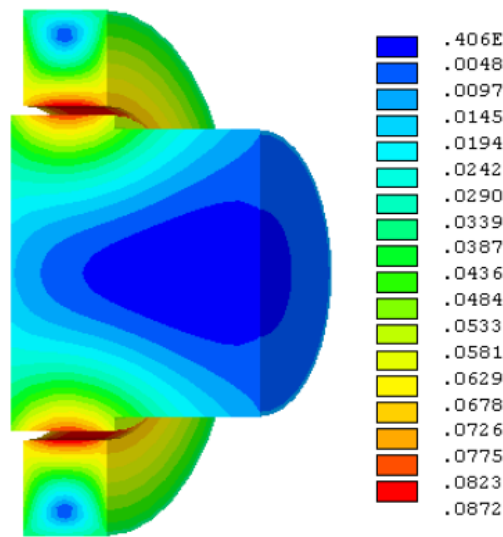
در شکل ۲۲ می‌توان توزیع چگالی شار مغناطیسی را برای فرکانس‌های مختلف مشاهده کرد. هم‌چنین شکل ۲۳ توزیع چگالی شار مغناطیسی را در مذاب نشان می‌دهد. برای فرکانس‌های نسبتاً بالا (۵۰ هرتز یا

بیشتر)، بزرگی میدان و نیروهای حاصل از آن در نزدیکی سطح واقع شده و عمق تاثیر گذاری میدان مغناطیسی خیلی کوچک می باشد. لذا نیروی وارد شده به مذاب در محدوده خاصی بوده و تاثیر آن روی حرکت مذاب کاهش می یابد. با کاهش فرکانس، جریان القایی در مذاب و نتیجتاً چگالی نیروی لورنتز در مذاب افزایش می یابد لذا جز دورانی نیروی لورنتز غالب شده و جریان همرفتی القا شده افزایش می یابد. با کاهش بیشتر فرکانس (کمتر از ۱۰ هرتز) اگرچه چگالی میدان مغناطیسی افزایش می یابد و توزیع چگالی میدان و زاویه فاز در داخل مذاب نسبتاً یکنواخت می شود، ولی در مقابل جز دورانی نیروی لورنتز ضعیف می شود [۱۰].



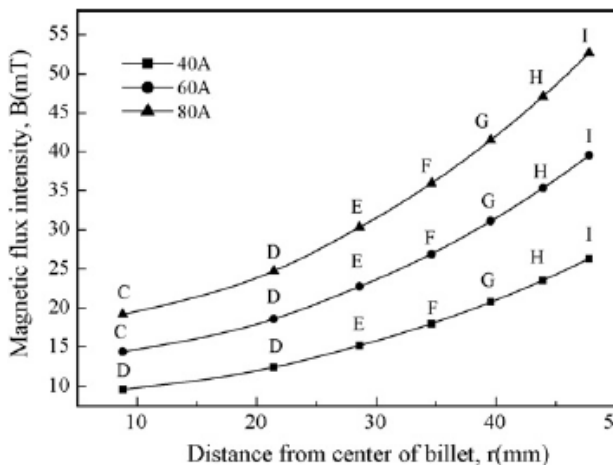
شکل ۲۲. توزیع چگالی شار مغناطیسی با فرکانس های مختلف جریان کویل/سیم پیچ [۱۰].

بنابراین با اعمال فرکانس مناسبی از میدان مغناطیسی می توان به الگوی ایده آلی از جریان مذاب و پروفیل های دمایی رسید و بهترین تاثیر را روی اصلاح ریزساختار ایجاد کرد [۱۰].

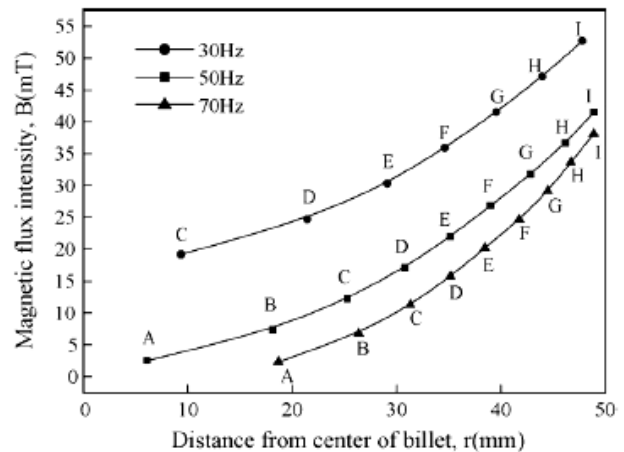


شکل ۲۳. توزیع چگالی شار مغناطیسی در مذاب (واحدها بر حسب تسلا T است) [۱۱].

در شکل ۲۴، تاثیرات تغییرات فرکانس و شدت جریان کویل بر روی چگالی میدان مغناطیسی القایی به خوبی قابل مشاهده است. هم چنین تاثیر قابل ملاحظه حضور میدان مغناطیسی بر روی ایزوترم های دمایی و مشخصه چاه انجماد در شکل ۲۵ آورده شده است. (این تصویر مربوط به شبیه سازی ریخته گری DC آلیاژ Mg بوده و صرفاً برای نشان دادن تاثیر حضور میدان مغناطیسی در فرآیند ریخته گری DC آورده شده است). [۱۲]



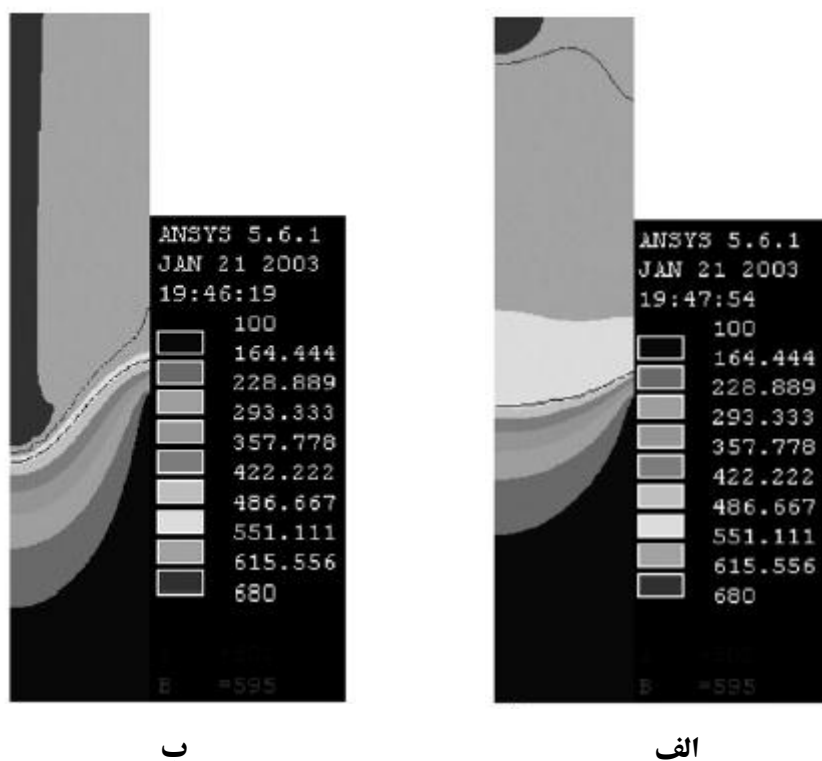
ب



الف

شکل ۲۴. توزیع چگالی شار مغناطیسی در امتداد قطر شمش با اعمال: الف) جریان کویل فرکانس متغیر ب) جریان کویل شدت

متغیر [۱۲].



ب

الف

شکل ۲۵. پروفیل چاه انجمادی و ایزوترم‌های دمایی: الف) در حضور میدان الکترومغناطیس ( $f=30\text{Hz}$ ,  $I=40\text{A}$ ) ب) در غیاب میدان الکترومغناطیس [۱۲].

#### ۲.۴. بهبود خواص مکانیکی آلیاژ ۲۰۲۴ ریختگی به روش DC تحت میدان الکترومغناطیسی:

نتایج حاکی از این است که شمش تولیدی از ریخته‌گری EDC<sup>۱</sup>، خواص مکانیکی بهتری را، نسبتاً در حالت ریختگی بلکه در حالت پیر شده، از خود نشان می‌دهد. از جمله بهبود خواص مکانیکی را می‌توان عمر خستگی عالی، سختی و مقاومت سایشی خوب نام برد (جداول ۲ تا ۴). عمر خستگی شمش تولیدی به روش EDC (در حالت ریختگی) تقریباً سه برابر می‌شود چرا که این شمش نسبت به حالت ریختگی معمول DC دارای سطح صاف، عاری از حفره و تخلخل بوده و جدایش زیر سطحی کمتری دارد. مقاومت سایشی خوب این شمش به علت سلول‌ها یا دانه‌های دندریتی خیلی ریز، یکنواخت و فشرده است که در مقابل سطح سایشی تحمل و پایداری زیادی دارند. از طرفی با توجه به ساختار ریز دانه، شمش سختی بیشتری از خود نشان می‌دهد [۱۳].

<sup>1</sup> Electromagnetic Direct Casting

جدول ۲. مقایسه عمر خستگی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ در دو حالت ریخته‌گری [۱۳].

با ریخته‌گری DC	با ریخته‌گری EDC	آلیاژ ۲۰۲۴ ریختگی
۳۷۴۸۴	۹۴۶۷۴	تعداد سیکل خستگی

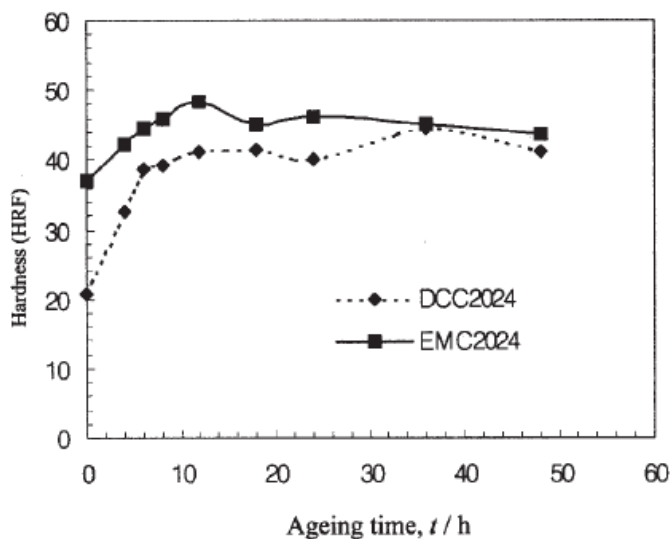
جدول ۳. مقایسه مقاومت سایش (میزان کاهش وزن در اثر سایش) آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ در دو حالت ریخته‌گری [۱۳].

با ریخته‌گری DC	با ریخته‌گری EDC	آلیاژ ۲۰۲۴ ریختگی
۳/۰	۱/۶	کاهش وزن (mg)

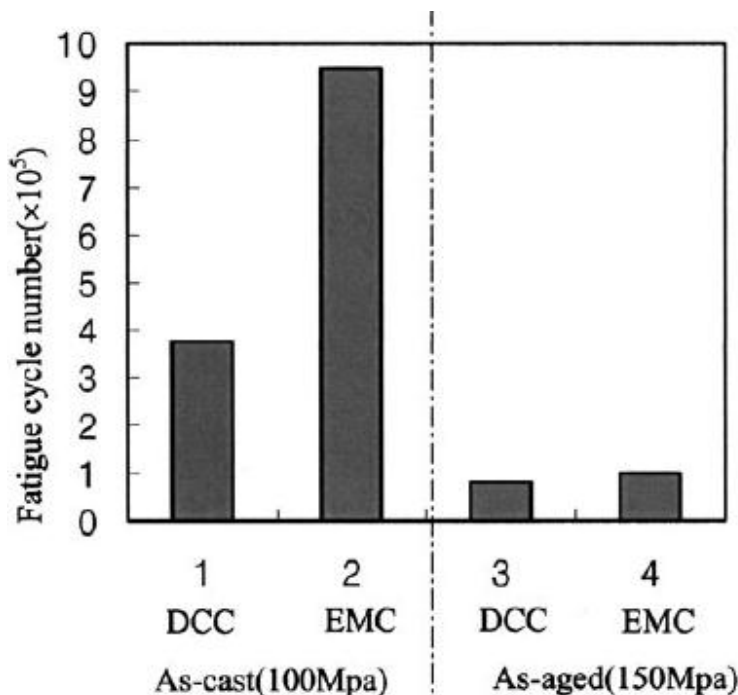
جدول ۴. مقایسه سختی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ در دو حالت ریخته‌گری [۱۳].

با ریخته‌گری DC	با ریخته‌گری EDC	آلیاژ ۲۰۲۴ ریختگی
۱۶/۰۲	۳۱/۷۲	سختی (Rockwell)

علاوه بر اینکه شمش ریختگی به روش EDC خواص بهتری را در حالت ریختگی نسبت به DC نشان می‌دهد؛ خواص آن در حالت پیر شده نیز بهتر است و سینتیک رسوب سریعتری را نسبت به DC نشان می‌دهد. شکل‌های ۲۶ و ۲۷ بیانگر این مطلب است [۱۴].



شکل ۲۶. مقایسه سختی آلیاژ ۲۰۲۴ ریختگی به روش DC و EDC [۱۴].



شکل ۲۷. مقایسه عمر خستگی آلیاژ ۲۰۲۴ ریختگی به دو روش DC و EDC در دو حالت ریختگی و پیر شده [۱۴].

## ۵. نتایج:

- \* تاثیر مضر سرد شدن نامتعادل و اختلاف جاذبه، با اعمال میدان مغناطیسی فرکانس پایین به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۱۰].
- \* شدت میدان مغناطیسی، نقش قابل ملاحظه‌ای در اصلاح دانه و توزیع مجدد عنصر آلیاژی دارد. با افزایش شدت جریان کویل، تاثیر نیروهای اعمالی و القایی به مذاب بیشتر شده و لذا دانه‌ها ریزتر شده و جدایش ماکرو و توزیع عنصر حل شونده داخل دانه‌ها بهبود می‌یابد [۱۰].
- \* فرکانس میدان الکترومغناطیسی تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی اصلاح ساختار و جدایش عنصری دارد. نتایج نشان داد که فرکانس ۳۰Hz بهترین تاثیر را روی اصلاح سازی ساختار داشته است [۱۰].
- \* قطعات ریختگی به روش EDC خواص مکانیکی بهتری از خود نشان می‌دهد. از جمله عمر خستگی عالی، سختی و مقاومت به سایش خوب [۱۳ و ۱۴].
- \* علاوه بر این، خواص قطعات ریختگی به روش EDC در حالت پیر شده نیز نسبت به قطعات ریختگی به روش DC مطلوب‌تر و بهتر است [۱۳ و ۱۴].

## مراجع:

- [1] R. Nadella, D.G. Eskin, Q. Du, L. Katgerman, “Macroseggregation in Direct-Chill Casting of Aluminium Alloys”, *Progress in Materials Science* 53, 421–480,(2008).
- [2] Zhihao Zhao, Jianzhong CUI, Jie Dong, Beijiang Zhang, “Effect of low-frequency Magnetic Field on Microstructures of Horizontal Direct Chill Casting 7075 Aluminum Alloy”, *Journal of Materials Processing Technology* 182, 185–190,(2007).
- [3] <http://www.matter.org.uk>.
- [4] <http://www.substech.com>.
- [5] Christopher J. Vreeman, Frank P. Incropera, “The Effect of Free-Floating Dendrites and Convection on Macroseggregation in Direct Chill Cast Aluminum Alloys Part II”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43, 687-704, (2000).
- [6] Beijiang Zhang, Jianzhong CUI, Guimin Lu, “Effect of Low-Frequency Magnetic Field on Macroseggregation of Continuous Casting Aluminum Alloys”, *Materials Letters* 57, 1707– 1711, (2003).
- [7] B.Q. Li, “Solidification Processing of Materials in Magnetic Fields”, *Journal of JOM*, Vol. 50, No. 2, February 1998.
- [8] Charles Vives, “Electromagnetic Refining of Aluminum Alloys by the CREM Process Part I”, *Metallurgical Transactions B*, Vol. 20A, 623-629, October 1989.
- [9] CUI Jian-zhong, Zhang Zhi-qiang, LE Qi-chi, “DC Casting of Light Alloys under Magnetic Fields”, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*20, 2046-2050, 2010.
- [10] Zhihao Zhao, Jianzhong Cui, Jie Dong, Zhefeng Wang, Beijiang Zhang, “Effect of Low-Frequency Magnetic Field on Microstructures of Horizontal Direct Chill Casting 2024 Aluminum Alloy”, *Journal of Alloys and Compounds* 396 164–168, (2005).
- [11] Zhihao Zhao, Jianzhong CUI, Jie Dong and Beijiang Zhang, “Effect of Low-Frequency Magnetic Field on Microstructures of Horizontal Direct Chill Casting Aluminum Alloys”, *J. Mater. Sci. Technol.*,Vol. 21, No. 1, (2005).
- [12] Qi-chi Le, Shi-jie Guo, Zhi-hao Zhao, Jian-zhong Cui, Xin-jian Zhang, “Numerical Simulation of Electromagnetic DC Casting of Magnesium Alloys”, *Journal of Materials Processing Technology* 183, 194–201, (2007).
- [13] Cao Zhiqiang, Jia Fei, Zhang Xingguo, Hao Hai, Jin Junze, “Microstructures and Mechanical Characteristics of Electromagnetic Casting and Direct-Chill Casting 2024 Aluminum Alloys”, *Materials Science and Engineering A*327, 133–137,(2002).
- [14] Sug Wonkim and Haihao, “Microstructure and Fatigue Characteristics of Direct Chill Cast and Electromagnetic Cast 2024 Al Alloy Ingots”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 34A, 1537-1543, July 2003.