

## شبیه‌سازی فرایند ریخته‌گری نیمه‌جامد

### روی سطح شیب‌دار خنک‌شونده

سید صمد حسینی<sup>۱</sup>، سلمان نوروزی<sup>۲</sup> و سیدجمال حسینی پور<sup>۳</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی بابل

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۷/۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۰/۱۸)

#### چکیده

برای تولید شمش با ریزساختار غیر دندریتی روش‌های زیادی وجود دارد. در این میان، روش سطح شیب‌دار خنک‌شونده به علت سرعت و سادگی بالا توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در این روش، با ریختن مذاب روی سطح شیب‌دار و عبور آن از روی سطح به علت وارد آمدن تنش برشی به شکل غیر دندریتی منجمد می‌شود. در مقاله حاضر سعی شده با شبیه‌سازی فرایند سطح شیب‌دار نحوه تأثیر پارامترهای مختلف بارریزی بر ریزساختار آلیاژ آلومینیوم A356 مورد بررسی قرار گیرد. شبیه‌سازی در نرم‌افزار FLOW3D انجام شده و با نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تجربی مقایسه شده است. ویژگی‌های بررسی شده در شبیه‌سازی شامل زمان حضور دوغاب روی سطح، کسر جامد دوغاب خروجی، نرخ برش اعمالی به دوغاب و میزان تلاطم دوغاب می‌باشد. بررسی نتایج شبیه‌سازی و مقایسه آن با نتایج تجربی در حالات مختلف نشان داد که برای داشتن ریزساختار مطلوب یعنی با کرویت بالا و اندازه دانه کوچک‌تر، لازم است زمان حضور دوغاب روی سطح شیب‌دار و میزان خنک‌کاری به اندازه کافی باشد و در عین حال تنش برشی اعمالی به دوغاب بیش از  $60 \text{ s}^{-1}$  و میزان تلاطم دوغاب روی سطح شیب‌دار تا حد امکان بالا باشد.

**واژه‌های کلیدی:** ریخته‌گری نیمه‌جامد، سطح شیب‌دار خنک‌کننده، آلیاژ آلومینیوم A356، شبیه‌سازی با FLOW3D

## Simulation of Semi-Solid Casting Process on Cooling Slope Surface

S. S. Hosseini, S. Nourouzi and S. J. Hosseinipour

Mechanical Engineering Department

Babol University of Technology

(Received: 23 September, 2013; Accepted: 08 January, 2013)

#### ABSTRACT

There are many methods to produce ingot with non-dendritic microstructure. Cooling slope method has attracting more attentions because of its simplicity and high process speed. In this method molten metal is poured on tilted slope that is cooled by water circulation underneath. Due to shear stress exerted to the slurry by flowing on the slope, it is solidified with non-dendritic microstructure. By simulation of semi-solid casting with cooling slope, the effects of different pouring conditions on the microstructure of A356 aluminum alloy are investigated. The simulations are carried out by commercial FLOW3D software. The results of simulation tests are compared to experimental results. In the simulations, the time of slurry presence on the slope, solid fraction of the slurry, strain rate and turbulence were investigated. Comparing the results of simulations with experimental results showed that for having the favorable microstructure, with higher sphericity and lower grain size, the time of slurry flowing on the slope must be enough while the shear stress over  $60 \text{ s}^{-1}$  and turbulence must be as high as possible.

**Keywords:** Semi-Solid Casting, Cooling Slope, Simulation by FLOW3D, A356 Aluminum Alloy

۱- کارشناسی ارشد: s.s-hosseini@nit.ac.ir

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): s-nourouzi@nit.ac.ir

۳- دانشیار: j.hosseini@nit.ac.ir

## ۱- مقدمه

استفاده از روش‌های شکل‌دهی فلزات در حالت نیمه‌جامد به علت مزایای زیاد آن، در حال افزایش است. در صورت وجود شمش با ریزساختار مناسب کروی و استفاده از آن در فرآیند آهنگری در حالت نیمه‌جامد، می‌توان قطعات با پیچیدگی هندسی زیاد را با کیفیت و استحکام بالا و با صرف انرژی شکل‌دهی کمتر تولید کرد [۳-۱]. اغلب آلیاژهای فلزی را می‌توان به روش نیمه‌جامد شکل داد، ولی برای تولید قطعات با کیفیت بالا و وزن پایین، آلیاژهای آلومینیوم مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند. برای تولید شمش با ساختار کروی فاز  $\alpha$  روش‌های زیادی وجود دارد که مهم‌ترین آنها شامل همزن مکانیکی، تلاطم الکترومغناطیسی [۳-۵] و سطح شیب‌دار خنک شونده می‌باشند. در این میان، روش سطح شیب‌دار به علت سرعت، سادگی و کم‌هزینه بودن توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۴-۶].

پژوهش‌های زیادی [۷-۹] در مورد تأثیر پارامترهای مختلف فرآیند از جمله دمای بارریزی، زاویه و طول سطح شیب‌دار بر ریزساختار شمش حاصل انجام شده است. بی‌رول<sup>۱</sup> [۱۰] در یک پژوهش، تأثیر تغییر دمای بارریزی، طول سطح شیب‌دار و گرمایش مجدد را بر ریزساختار بررسی کرد و به این نتیجه رسید که برای داشتن ریزساختار مطلوب، با افزایش دمای بارریزی، طول سطح شیب‌دار باید افزایش یابد. همچنین با نگرداشتن شمش به مدت ۵ دقیقه در دمای  $580^{\circ}\text{C}$  توانست به ریزساختار کروی دست یابد.

تحلیل فرآیند سطح شیب‌دار به علت تعداد زیاد پارامترهای تأثیرگذار و نیز نحوه تأثیر متقابل آنها، اهمیت شبیه‌سازی این فرآیند را نشان می‌دهد. پارامترهای متغیر زیاد و نیز سرعت بالای انجام فرآیند موجب شده شبیه‌سازی این فرآیند مشکل باشد. بنابراین، تاکنون پژوهش‌های معدودی در زمینه شبیه‌سازی فرآیند سطح شیب‌دار انجام شده است. کاند و دوتا<sup>۲</sup> [۱۱] با شبیه‌سازی این فرآیند، تأثیر تغییر سرعت ورودی مذاب، دمای بارریزی، زاویه و طول سطح شیب‌دار را بر توزیع دما، جدایش، سرعت و دمای دوغاب خروجی از سطح شیب‌دار بررسی کردند. در پژوهشی دیگر وانگ<sup>۳</sup> و همکاران [۱۲] تأثیر دما و سرعت

مذاب ورودی، دمای سطح شیب‌دار و دمای قالب را به‌عنوان پارامترهای ورودی و نیز کسر جامد، توزیع ذرات جامد، اندازه ذرات جامد و غلظت محلول به‌عنوان پارامترهای خروجی بررسی کردند. در این پژوهش، عمدتاً به‌طور مستقیم به اندازه و توزیع دانه پرداخته شده است. نتایج نشان داد که در صورت وجود تنش برشی و تلاطم، هم‌خوانی مناسبی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج حاصل از آزمایشات تجربی وجود نداشت.

در پژوهش حاضر، فرآیند سطح شیب‌دار با یک نرم‌افزار تجاری FLOW3D شبیه‌سازی شد. انتخاب پارامترهای فرآیند سطح شیب‌دار از جمله زاویه و طول سطح و دمای بارریزی با توجه به آزمایش‌های تجربی قبلی صورت گرفت [۱۳ و ۱۴]. آن محققین زاویه و طول سطح شیب‌دار و دمای بارریزی را به‌عنوان پارامترهای ورودی و ویژگی‌های ریزساختاری شمش حاصل شامل اندازه و قطر متوسط دانه‌ها و فاکتور شکل را به عنوان پارامترهای خروجی در نظر گرفته بودند. با انجام شبیه‌سازی‌ها، تأثیر پارامترهای ذکرشده بر ریزساختار از طریق ارزیابی زمان حضور دوغاب روی سطح شیب‌دار، کسر جامد، نرخ برش اعمال شده به دوغاب و میزان تلاطم دوغاب مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

## ۲- روش تحقیق

در مطالعه تجربی از سطح شیب‌دار ساخته شده از جنس مس (شکل ۱) استفاده شده که در پشت آن مسیر آب جهت خنک‌کاری با ماشین‌کاری تعبیه شده است (شکل ۲). قالب استفاده شده جهت انجام فرآیند ریخته‌گری از جنس فولاد و به شکل استوانه با قطر خارجی  $80\text{ mm}$ ، ارتفاع  $200\text{ mm}$ ، ضخامت  $6\text{ mm}$  و شیب  $10\%$  انتخاب شده، همچنین در شبیه‌سازی‌ها هندسه و جنس سطح شیب‌دار و قالب مطابق با آزمایش‌ها، تجربی انتخاب شد. در روش تجربی، به کمک نرم‌افزار تحلیل تصاویر، قطر متوسط دانه و فاکتور شکل مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق همانند روش تجربی از آلیاژ آلومینیوم A۳۵۶ با مشخصات فیزیکی برابر مورد استفاده قرار گرفت که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ آمده است. در حالت کلی ریزساختار با دانه کوچک‌تر و با شکل کروی‌تر (فاکتور شکل نزدیک به عدد ۱) مطلوب‌تر است.

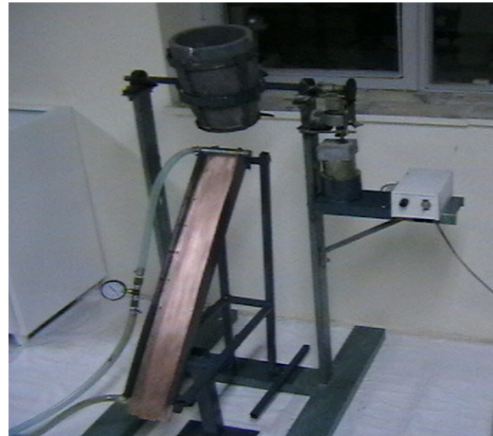
1- Birol  
2- Kund and Dutta  
3- Wang

می‌کند. همچنین در این نرم‌افزار، سطوح آزاد جریان با روش حجم سیال (VOF) مدل‌سازی می‌شوند.

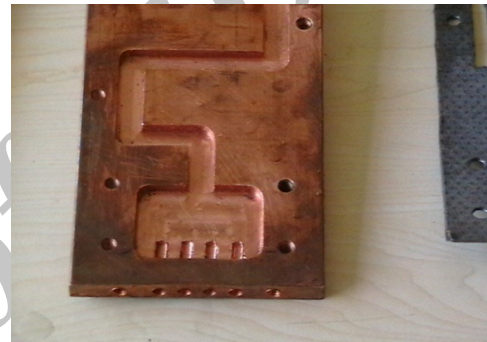
جدول (۲): مشخصه‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی [۱۱ و ۱۵].

مقدار	واحد	متغیر
۱۰۸۲	$J.kg^{-1}.K^{-1}$	ظرفیت گرمایی ویژه $A_{356}$
۶۰	$W.m^{-1}.K^{-1}$	رسانایی گرمایی $A_{356}$ در حالت جامد
۱۶۰	$W.m^{-1}.K^{-1}$	رسانایی گرمایی $A_{356}$ در حالت مذاب
۲۴۹۵	$kg.m^{-3}$	چگالی $A_{356}$ حالت جامد
۲۴۹۵	$kg.m^{-3}$	چگالی $A_{356}$ حالت مذاب
۰/۰۰۱۱۳	$kg.m^{-1}.s^{-1}$	ویسکوزیته مذاب $A_{356}$
۳۹۷۷۰۰	$J.kg^{-1}$	گرمای نهان ذوب $A_{356}$
۳۳۰	$W.m^{-1}.K^{-1}$	رسانایی گرمایی مس
۳۸۰	$J.kg^{-1}.K^{-1}$	ظرفیت گرمایی ویژه مس
۸۹۰۰	$kg.m^{-3}$	چگالی مس
۱/۲	$kg.m^{-3}$	چگالی هوا

در تمامی شبیه‌سازی‌ها یک بلوک مش دربرگیرنده سطح شیب‌دار و قالب ایجاد شده، همچنین برای ورود مذاب یک بلوک مش به ابعاد  $30 \times 30$  mm بر روی بلوک مش اول در نظر گرفته شده است. شرط مرزی سطح بالایی این بلوک، ورود مذاب با دمای معین و با سرعت  $0/1 m/s$  در جهت z تعیین شده است. شرایط مرزی در مرزهای دیگر به صورت پیش‌فرض و به حالت تقارن می‌باشد. شبیه‌سازی‌ها در دو مرحله انجام شده که مرحله اول شامل ریزش مذاب به مدت  $5/5$  ثانیه و در مرحله دوم با قطع جریان مذاب ورودی، شبیه‌سازی برای وارد شدن دوغاب باقی‌مانده روی سطح شیب‌دار به داخل قالب و تکمیل فرایند انجامد به مدت ۶۰ ثانیه دیگر ادامه یافت. برای اعمال اثر خنک‌کاری سطح شیب‌دار باید شبیه‌سازی به صورت دو فازی انجام گیرد (آب به عنوان فاز دوم)، که در این حالت باید از اثر هوا



شکل (۱) سطح شیب‌دار استفاده شده در آزمایش‌ها.



شکل (۲) مسیر خنک‌کاری ماشین‌کاری شده در پشت سطح شیب‌دار.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده (درصد وزنی).

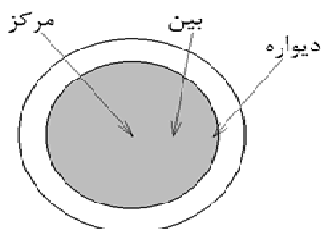
Al	Si	Mg	Fe	Ti	سایر
۹۲/۱۴	۷/۱۰	۰/۳۳	۰/۱۷	۰/۱۰	<۰/۰۸

در بررسی‌های تجربی فرآیند، مشخص شد که تأثیر پارامترها روی ریزساختار در قالب اثر مقدار کسر جامد و مدت زمان حضور دوغاب روی سطح شیب‌دار قابل تفسیر است. بنابراین، در تحقیق حاضر (روش شبیه‌سازی) دو عامل مقدار کسر جامد و زمان رسیدن دوغاب به انتهای سطح شیب‌دار مورد مطالعه قرار گرفت. پارامترهای مربوط به شبیه‌سازی در جدول ۲ آمده است.

نرم‌افزار Flow-3D در زمینه محاسبه سطوح سیال در حال جریان با نرم‌افزارهای دیگر متفاوت است. این نرم‌افزار از روش‌های عددی مخصوصی برای ردیابی سطح مشترک بین فازها و برای اعمال شرایط مرزی دینامیکی مناسب در این سطوح استفاده

### ۳-۱- اثر دمای بارریزی

برای بررسی دمای بارریزی بر ریزساختار، مذاب با دماهای مختلف  $680^{\circ}\text{C}$ ،  $650^{\circ}\text{C}$  و  $625^{\circ}\text{C}$  در طول ثابت  $500\text{mm}$  و زاویه  $50^{\circ}$  بر روی سطح شیبدار در قالب با دمای محیط (بدون پیشگرم) ریخته شده بود. سپس ریزساختار در سه ناحیه دیواره، بین و مرکز مقطع شمش بررسی شد (شکل ۳). نتایج مربوط به قطر متوسط دانه و فاکتور شکل در جدول ۳ آمده است.



شکل (۳): سه ناحیه مورد بررسی در نمونه ریخته‌گری شده در روی سطح شیبدار [۱۲].

همان‌طور که مشاهده می‌شود در ناحیه دیواره در تمام نمونه‌ها قطر متوسط به نسبت کوچک است، اما ذرات جامد حالت کروی ندارند (فاکتور شکل کوچک است). هر چه به مرکز قالب نزدیک‌تر شده فاکتور شکل و قطر متوسط نیز بزرگ‌تر می‌شود. برای توضیح این تغییرات نحوه تغییر برخی پارامترهای مهم از جمله سرعت دوغاب، نرخ برش اعمالی به دوغاب، دما و کسر جامد در قسمت‌های مختلف سطح شیبدار مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که زمان لازم برای رسیدن دوغاب به انتهای سطح در همه شبیه‌سازی‌ها بین  $1/3$  تا  $1/6$  ثانیه است.

جدول (۳): قطر متوسط دانه ( $\mu\text{m}$ ) و فاکتور شکل در دماهای مختلف بارریزی با دمای قالب  $25^{\circ}\text{C}$  [۱۳ و ۱۴].

ناحیه مرکز	ناحیه بین		ناحیه دیواره		دمای بارریزی	
	فاکتور شکل	قطر متوسط	فاکتور شکل	قطر متوسط		
۰/۶۴	۸۱	۰/۵۴	۷۵	۰/۴۵	۷۲	$625^{\circ}\text{C}$
۰/۵۵	۱۰۲	۰/۴۸	۹۵	۰/۳۸	۷۸	$650^{\circ}\text{C}$
۰/۴۸	۱۳۵	۰/۴۲	۱۰۳	۰/۳۳	۸۳	$680^{\circ}\text{C}$

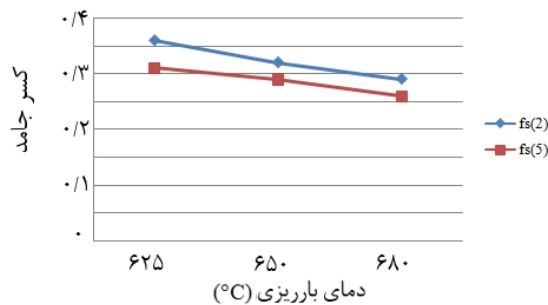
(شامل خنک‌کنندگی و ایجاد مک) صرف نظر کرد. همچنین با تعریف مسیر خنک‌کاری و تعریف آب به‌عنوان فاز دوم، شبیه‌سازی بسیار وقت‌گیر خواهد شد. بنابراین، به‌عنوان یک روش جایگزین برای اعمال اثر خنک‌کنندگی سطح شیبدار، برای سطح مسی یک منبع حرارتی با بار حرارتی منفی در نظر گرفته شد. تعیین مقدار این بار حرارتی با انجام آزمایش و قرار دادن ترموکوپل در چند قسمت سطح شیبدار و اندازه‌گیری دمای آنها در هنگام انجام بارریزی و تطابق دادن آن با دمای سطح شیبدار در شبیه‌سازی به‌دست آمد. در تمام شبیه‌سازی‌ها ارتفاع بارریزی مطابق با آزمایش‌های تجربی و برابر با  $20$  سانتی‌متر در نظر گرفته شد. برای اعتبار سنجی از پژوهش انجام شده توسط کاند و دوتا [۱۱] استفاده شده است. در مقاله حاضر، تأثیر زاویه سطح شیبدار بر کسر جامد و سرعت مذاب خروجی بررسی شده است. سرعت دوغاب و کسر جامد دوغاب هنگام خروج از سطح شیبدار در زاویه  $30^{\circ}$  به ترتیب  $1/0.52\text{ m.s}^{-1}$  و  $0/50$  و در زاویه  $60^{\circ}$  به ترتیب  $1/2.88\text{ m.s}^{-1}$  و  $0/48$  محاسبه شده است. با افزایش زاویه از  $30^{\circ}$  به  $60^{\circ}$  سرعت خروجی دوغاب  $22\%$  افزایش یافت و کسر جامد به اندازه  $4\%$  کاهش داشت.

برای مقایسه، شبیه‌سازی در نرم‌افزار Flow-3D با پارامترهای ذکر شده و در زوایای  $30^{\circ}$  و  $60^{\circ}$  انجام شد. پس از انجام شبیه‌سازی‌ها در زوایای  $30^{\circ}$  و  $60^{\circ}$  و مشاهده نتایج، کسر جامد و سرعت دوغاب هنگام خروج از سطح شیبدار اندازه‌گیری شد. در سطح شیبدار با زاویه  $30^{\circ}$  کسر جامد دوغاب خروجی از سطح  $0/47$  و در سطح شیبدار با زاویه  $60^{\circ}$  برابر است با  $0/44$  که نشان‌دهنده کاهش به میزان  $5\%$  می‌باشد. همچنین با افزایش زاویه سطح شیبدار از  $30^{\circ}$  به  $60^{\circ}$ ، سرعت دوغاب خروجی از  $0/933$  به  $1/16$  می‌رسد که نشان‌دهنده افزایشی به میزان  $24\%$  می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان گفت نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی با نتایج مقاله مرجع تطابق خوبی دارد.

### ۳- نتایج و بحث

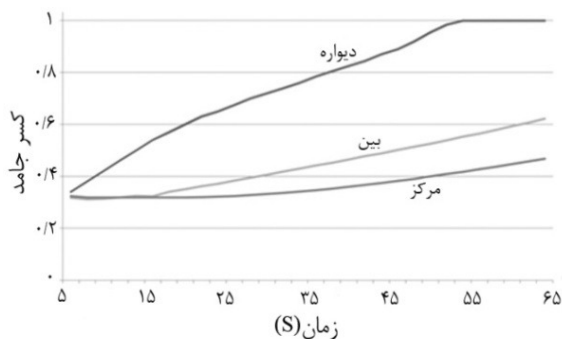
در این بخش نتایج حاصل از تأثیر پارامترهای مهم این فرآیند نظیر دمای بارریزی، زاویه و طول سطح شیبدار روی ریزساختار آلیاژ آلومینیوم A۳۵۶ مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

زمان ۲ ثانیه مقدار کسر جامد دوغاب معادل با ۰/۳۶ محاسبه شده است. این اختلاف به علت بالا رفتن تدریجی دمای سطح شیب‌دار در اثر تماس با دوغاب داغ و کاهش اثر خنک‌کنندگی آن است. مقادیر کسر جامد دوغاب در زمان‌های ۲ و ۵ ثانیه برای دماهای مختلف بارریزی در شکل ۶ آورده شده است. دمای بارریزی بالا موجب می‌شود حجم کمی از دوغاب روی سطح شیب‌دار منجمد شود و بیشتر فرآیند انجماد در داخل قالب رخ دهد. در دمای بارریزی خیلی پایین نیز نرخ انجماد دوغاب روی سطح شیب‌دار آنقدر زیاد است که فرصت کافی برای شکسته شدن ذرات جامد در اثر تنش برشی وجود ندارد.



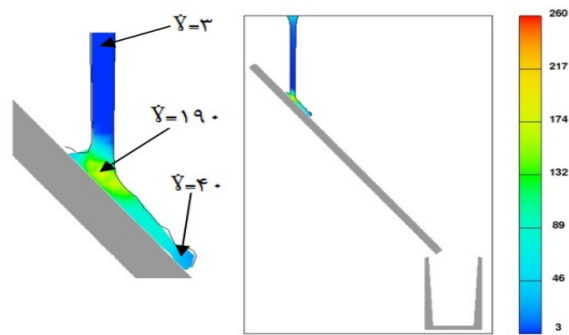
شکل (۶): کسر جامد دوغاب خروجی در زمان‌های ۲ ثانیه ( $f_{s(2)}$ ) و ۵ ثانیه ( $f_{s(5)}$ ) با دماهای مختلف بارریزی.

بررسی‌ها نشان داد که زمان لازم برای انجماد کامل مذاب داخل قالب به قدری زیاد است که حتی در پایان زمان ۶۵ ثانیه برای شبیه‌سازی، مقداری از دوغاب موجود در قالب هنوز به طور کامل منجمد نشده است. شکل ۷ تغییرات مقدار کسر جامد دوغاب را بر حسب زمان در سه ناحیه دیواره، مرکز و ناحیه بین دیواره و مرکز برای دمای بارریزی  $680^{\circ}\text{C}$  نشان می‌دهد.



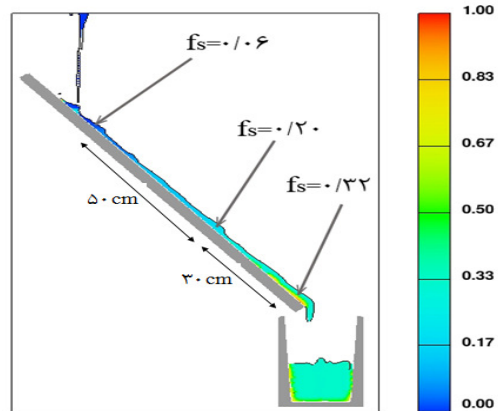
شکل (۷): تغییرات کسر جامد بر حسب زمان در سه ناحیه قالب با دمای بارریزی  $680^{\circ}\text{C}$ .

در شکل ۴ نرخ برش اعمال شده به دوغاب در لحظات ابتدایی برخورد با سطح شیب‌دار در دمای بارریزی  $625^{\circ}\text{C}$  نشان داده شده است. در هنگام برخورد نرخ برشی به میزان حدود  $150-200\text{ s}^{-1}$  به دوغاب اعمال شد ولی نرخ برش اندازه گرفته شده در ادامه طول سطح شیب‌دار بین  $60-100\text{ s}^{-1}$  است. نرخ برش اعمال شده به دوغاب در دماهای بارریزی  $650^{\circ}\text{C}$  و  $680^{\circ}\text{C}$  نشان داد که دمای بارریزی تأثیر چندانی بر نرخ برش ندارد.



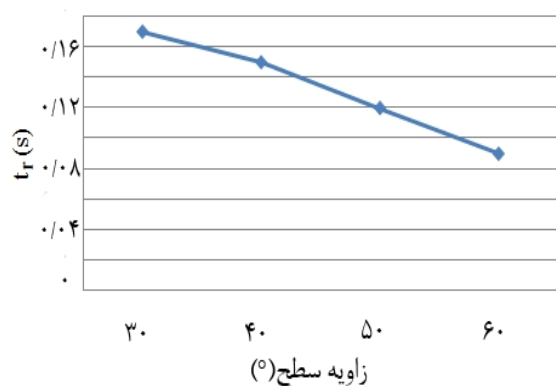
شکل (۴): نرخ برش ( $\text{s}^{-1}$ ) در لحظات اولیه برخورد با سطح شیب‌دار.

شکل ۵ مقدار کسر جامد دوغاب در فواصل مختلف روی سطح شیب‌دار در لحظه ۵ ثانیه برای دمای بارریزی  $625^{\circ}\text{C}$  را نشان می‌دهد.

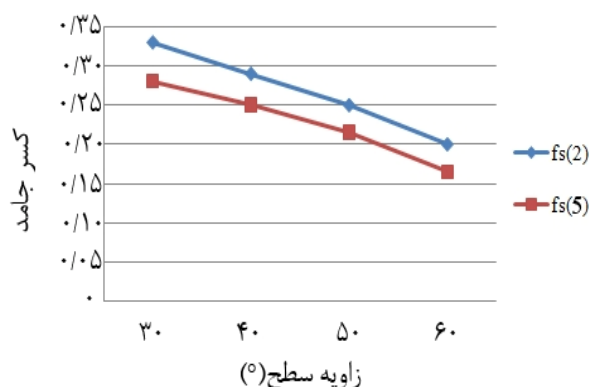


شکل (۵): کسر جامد دوغاب روی سطح شیب‌دار در زمان ۵ ثانیه با دمای بارریزی  $625^{\circ}\text{C}$ .

در این شکل مشاهده می‌شود که مقدار کسر جامد خروجی از انتهای سطح شیب‌دار برابر با ۰/۳۲ می‌باشد، در حالی که برای



شکل (۹): زمان رسیدن دوغاب به انتهای سطح در زاویه‌های مختلف سطح با دمای بارریزی ۶۵۰°C و طول ۴۰۰ mm.



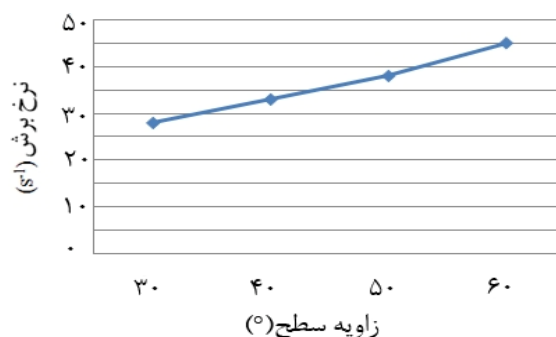
شکل (۱۰): کسر جامد دوغاب خروجی در زمان‌های ۲ و ۵ ثانیه در زاویه‌های مختلف سطح با دمای بارریزی ۶۵۰°C و طول ۴۰۰ mm.

نتایج تجربی نشان می‌دهد ریزساختار به دست آمده با سطح شیب‌دار با زاویه ۴۰° از سه حالت دیگر بهتر می‌باشد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی به نظر می‌رسد دلیل این امر این است که نرخ برش اعمال شده به دوغاب در زاویه ۳۰° کم است و نیز زمان اعمال تنش برشی و کسر جامد دوغاب خروجی از سطح شیب‌دار در زوایای ۵۰° و ۶۰° ناکافی می‌باشد. این نتیجه با نتایج تجربی نیز تطابق خوبی دارد چراکه در زاویه ۴۰° مقدار کسر جامد ۰/۱۶ حاصل شد که در مقایسه با زوایای ۵۰° و ۶۰° که این عامل به ترتیب برابر ۰/۵۲ و ۰/۴۸ بود از شرایط مطلوب‌تری برخوردار بود. برای درک بهتر نحوه تأثیرگذاری زاویه سطح شیب‌دار با طول بارریزی ۶۰۰ mm و در زوایای ۴۰°، ۵۰° و ۶۰° نیز شبیه‌سازی صورت گرفت. نتایج مربوط به زمان رسیدن اولین

همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، انجماد از دیواره‌های قالب شروع می‌شود. سرعت بالای انجماد در ناحیه کنار دیواره قالب موجب تشکیل دانه اولیه فاز  $\alpha$  با اندازه نسبتاً کوچک می‌شود. هر چه به مرکز قالب نزدیک شده، انتقال حرارت کمتر و سرعت انجماد کاهش می‌یابد. این امر موجب افزایش قطر متوسط دانه‌ها می‌شود. در این ناحیه وقتی ذرات منجمد به هم برخورد می‌کنند، در صورتی که دارای زاویه برخورد مناسب باشند به هم می‌چسبند و ذرات بزرگ‌تری را تشکیل می‌دهند که به این پدیده آگلومراسیون<sup>۱</sup> گفته می‌شود [۱۶]. همچنین سرعت انتقال حرارت بر میزان کروی شدن دانه‌ها نیز تأثیر می‌گذارد به طوری که اگر انتقال حرارت بسیار آهسته و یکنواخت باشد و شیب غلظت نداشته باشد، ذرات می‌تواند بدون تنش برشی نیز به صورت کروی منجمد شوند [۲]. این دلایل در مجموع باعث می‌شوند ریزساختار مرکز قطعه دارای قطر متوسط بزرگ‌تر و کرویت بیشتری باشد.

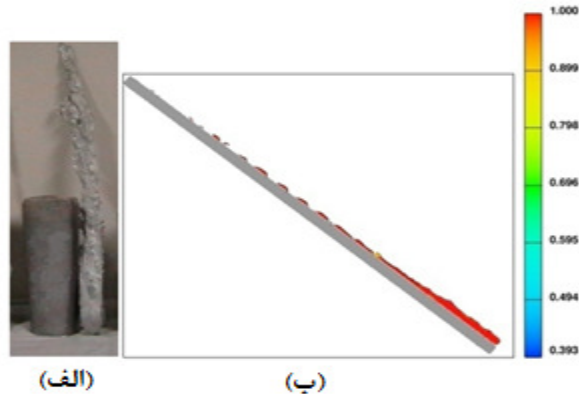
### ۳-۲- اثر زاویه سطح شیب‌دار

با انجام شبیه‌سازی، تأثیر زاویه سطح شیب‌دار بر نرخ برش اعمالی به دوغاب ( $s^{-1}$ )، زمان حضور دوغاب روی سطح شیب‌دار ( $t_r$ ) و کسر جامد در زمان‌های ۲ ثانیه و ۵ ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های ۱۰-۸ نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها حاکی است که با افزایش زاویه سطح شیب‌دار زمان حضور دوغاب روی سطح شیب‌دار کاهش می‌یابد که این به معنای کاهش زمان اعمال تنش برشی و نیز کاهش میزان انجماد دوغاب می‌باشد.



شکل (۸): نرخ برش در زاویه‌های مختلف سطح با دمای بارریزی ۶۵۰°C و طول ۴۰۰ mm.

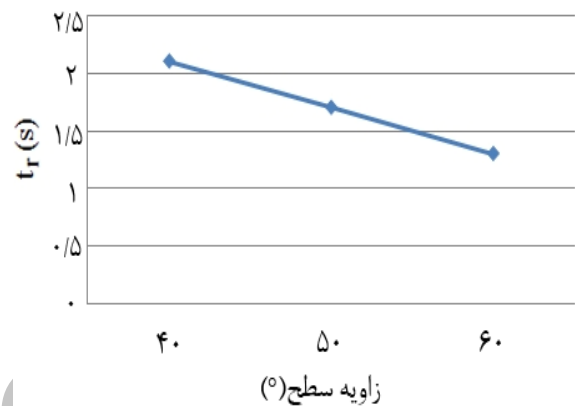
دوغاب خروجی می‌شود. در این حالت در زوایای کم سطح، این امر موجب می‌شود حجم نسبتاً زیادی از دوغاب روی سطح شیب‌دار منجمد شده و به آن بچسبد که عملاً امکان بارریزی ممتد با این شرایط را ناممکن می‌سازد. شکل ۱۳ نشان‌دهنده دوغاب منجمد شده و باقی‌مانده روی سطح شیب‌دار (در شبیه‌سازی و آزمایش عملی) است.



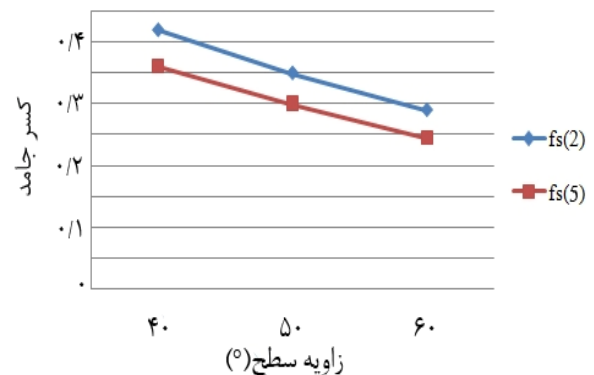
شکل (۱۳): دوغاب منجمد شده روی سطح شیب‌دار، (الف) تجربی و (ب) شبیه‌سازی بادمای بارریزی  $650^{\circ}\text{C}$  طول  $600\text{ mm}$  و زاویه  $60^{\circ}$ .

ترکیب مناسب زمان اعمال تنش برشی، میزان خنک‌کنندگی سطح و میزان نرخ برش اعمال شده به دوغاب در زاویه  $60^{\circ}$  اتفاق می‌افتد. این حالت در مقایسه با حالت بارریزی در طول  $400\text{ mm}$  و زاویه  $40^{\circ}$  که در آن بهترین نتیجه به دست می‌آید دارای  $t_r$  تقریباً مشابهی هستند، اما نرخ برش در زاویه  $60^{\circ}$  بیشتر از زاویه  $40^{\circ}$  است که موجب می‌شود ریزساختار بهتری به دست آید. نتایج تجربی که در زوایای  $40^{\circ}$ ،  $50^{\circ}$  و  $60^{\circ}$  طول  $600$  صورت گرفت حاکی از عدد اندازه دانه به ترتیب  $124$ ،  $95$  و  $80$  بود که به روشنی نتایج شبیه‌سازی را تأیید می‌کند، یعنی در زاویه  $60^{\circ}$  ریزساختار مطلوب‌تری حاصل می‌شود. تقریباً در همه آزمایش‌ها مشاهده می‌شود که ریز شدن دانه‌ها با بهبود شکل آنها همراه است. برای ریز شدن دانه‌ها لازم است تعداد جوانه‌های زیادی روی سطح شیب‌دار ایجاد شود و این جوانه‌ها با ورود به جریان دوغاب باعث شکل‌گیری ذرات جامد شوند. برای بهبود شکل ذرات نیز لازم است تلاطم جریان دوغاب زیاد باشد. تلاطم موجب کاهش گرادیان دما و ترکیب شیمیایی در داخل دوغاب می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود گرادیان دما یکی از عوامل شکل‌گیری

دوغاب به انتهای سطح شیب‌دار ( $t_r$ ) و کسر جامد دوغاب خروجی در زمان‌های  $2$  ثانیه ( $fs(2)$ ) و  $5$  ثانیه ( $fs(5)$ ) برای طول سطح  $600\text{ mm}$  نیز در شکل‌های  $11$  و  $12$  آمده است. با توجه به این که در زاویه  $40^{\circ}$  زمان رسیدن اولین دوغاب به انتهای سطح شیب‌دار بیشتر از  $2$  ثانیه است عددی که در قسمت  $fs(2)$  در جدول آمده بیانگر کسر جامد اولین دوغاب رسیده به انتهای سطح شیب‌دار است.



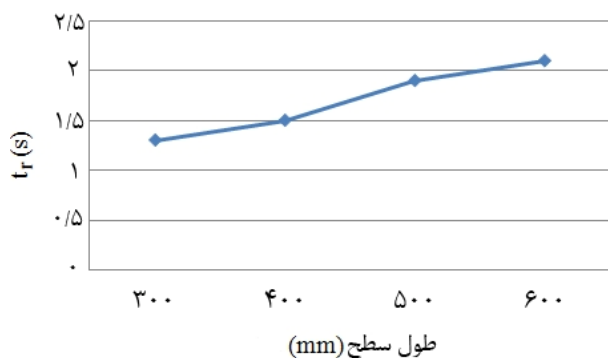
شکل (۱۱): زمان رسیدن دوغاب به انتهای سطح در زاویه‌های مختلف سطح با دمای بارریزی  $650^{\circ}\text{C}$  و طول  $600\text{ mm}$ .



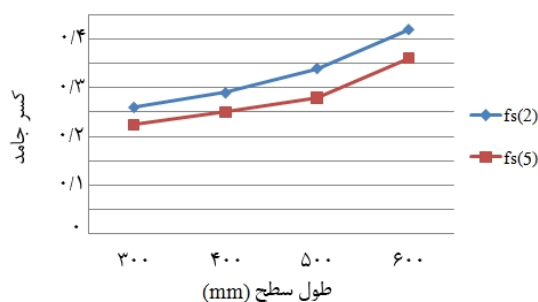
شکل (۱۲): کسر جامد دوغاب خروجی در زمان‌های  $2$  و  $5$  ثانیه در زاویه‌های مختلف سطح با دمای بارریزی  $650^{\circ}\text{C}$  و طول  $600\text{ mm}$ .

در طول بارریزی  $600\text{ mm}$  نیز با افزایش زاویه سطح شیب‌دار، نرخ برش افزایش می‌یابد. افزایش طول سطح شیب‌دار باعث افزایش اثر خنک‌کنندگی سطح و در نتیجه افزایش کسر جامد

دانه به ترتیب برابر با  $0/6$  و  $84\mu\text{m}$  حاصل شد. در طول  $300\text{mm}$  زمان کم اعمال تنش برشی و میزان کم کسر جامد ورودی به قالب باعث شکل گیری دانه‌ها با اندازه به نسبت بزرگ و با کرویت کم شده است (نتایج تجربی، فاکتور شکل و اندازه دانه به ترتیب برابر با  $0/54$  و  $118\mu\text{m}$  به دست آمد). در این حالت تعداد زیادی از ذرات منجمد شده روی سطح شیب دار وقتی به داخل قالب می‌رسند به علت بالا بودن نسبی دما در اثر پدیده آگلومراسیون به هم می‌چسبند و دانه‌های بزرگ‌تری را به وجود می‌آورند. همچنین در این حالت، بیشتر دوغاب در داخل قالب به شکل شاخه‌ای (دندریتی) منجمد شده که موجب کاهش فاکتور شکل می‌شود. در طول‌های بالاتر از  $400\text{mm}$  به علت پایین بودن نسبی تلاطم و نرخ برش در زاویه  $40^\circ$  پدیده آگلومراسیون روی سطح شیب دار اتفاق می‌افتد و اندازه دانه بزرگ می‌شود. اما در زاویه  $50^\circ$  به دلیل اینکه نرخ برش و میزان تلاطم بیشتر است، طول بارریزی بحرانی که به ازای آن بهترین ریزساختار به دست می‌آید بلندتر است.



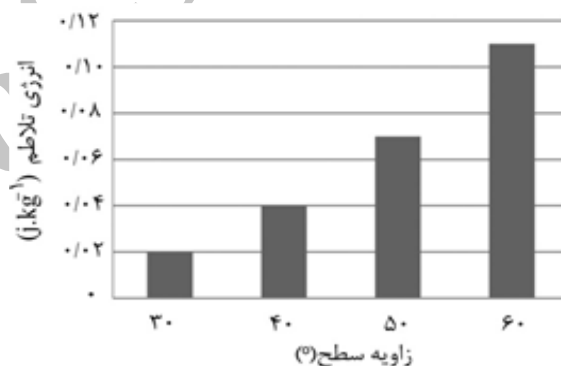
شکل (۱۵): تأثیر طول سطح بر زمان رسیدن دوغاب به انتهای سطح با دمای بارریزی  $650^\circ\text{C}$  و زاویه سطح شیب دار  $40^\circ$ .



شکل (۱۶): تأثیر طول سطح بر کسر جامد دوغاب خروجی در زمان‌های ۲ و ۵ ثانیه با دمای بارریزی  $650^\circ\text{C}$  و زاویه سطح شیب دار  $40^\circ$ .

ساختارشاخه‌ای است، همچنین در تلاطم پایین امکان چسبیدن ذرات جامد و تشکیل ذرات بزرگ‌تر وجود دارد (پدیده آگلومراسیون). برای تعیین میزان تلاطم، پارامتر انرژی تلاطم به ازای زاویه‌های مختلف بر حسب  $\text{J.kg}^{-1}$  محاسبه شده است. متوسط انرژی تلاطم در زوایای مختلف سطح شیب دار در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

با افزایش زاویه، نرخ برش و میزان تلاطم افزایش می‌یابد که هم موجب جدا شدن راحت تر جوانه‌های جامد تشکیل شده روی سطح شیب دار و وارد شدن آنها به داخل جریان دوغاب می‌شود و هم از وقوع پدیده آگلومراسیون جلوگیری می‌کند. در نتیجه اندازه ذرات جامد کاهش می‌یابد. کاهش گرادیان دمایی و ترکیب شیمیایی در اثر تلاطم و افزایش نرخ برش در اثر افزایش زاویه نیز موجب کرویت بیشتر ذرات و افزایش فاکتور شکل خواهد شد.



شکل (۱۴): تأثیر زاویه سطح شیب دار بر مقدار انرژی تلاطم.

### ۳-۳- اثر طول سطح شیب دار

نتایج شبیه‌سازی تأثیر طول بارریزی بر ریزساختار، با دمای بارریزی  $650^\circ\text{C}$ ، زاویه سطح شیب دار  $40^\circ$  و دمای قالب  $200^\circ\text{C}$  در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده است.

با توجه به برابر بودن زاویه سطح شیب دار نرخ برش اعمالی به دوغاب برابر است. بنابراین، طبق روال گذشته تأثیر تغییر طول سطح بر دو پارامتر مهم کسر جامد و زمان حضور دوغاب روی سطح شیب دار بررسی شده است. همان‌طور که ذکر شد، با افزایش طول بارریزی زمان حضور دوغاب روی سطح شیب دار افزایش می‌یابد که موجب افزایش زمان اعمال تنش برشی و میزان خنک‌کنندگی می‌شود. با زاویه سطح شیب دار  $40^\circ$  بهترین ریزساختار با طول بارریزی  $400\text{mm}$  به دست آمده بود (در این حالت به‌طور تجربی بالاترین فاکتور شکل و کوچک‌ترین اندازه



طول سطح شیب‌دار به ترتیب  $40^\circ$  و  $60.0\text{mm}$  بالاترین مقدار فاکتور شکل  $0.68$  و کوچک‌ترین عدد اندازه دانه معادل  $82$  حاصل شده است.

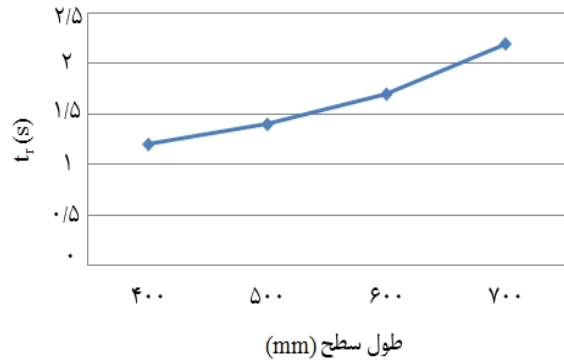
#### ۴- نتیجه‌گیری

- ۱- یکی از متغیرهای مؤثر بر ریزساختار، زمان حضور دوغاب روی سطح شیب‌دار ( $t_f$ ) است که تعیین‌کننده زمان اعمال تنش برشی و اثر خنک‌کاری سطح شیب‌دار است.
- ۲- مدت زمان رسیدن دوغاب به انتهای سطح شیب‌دار باید دارای مقدار بهینه خود باشد. مقدار بالای پارامتر  $t_f$  منجر به وقوع پدیده آگلومراسیون می‌شود. در حالی که در مقادیر پایین این پارامتر ذرات جامد به خوبی کروی نمی‌شوند.
- ۳- با افزایش زاویه سطح شیب‌دار تا  $60$  درجه نرخ برش و میزان تلاطم همزمان افزایش می‌یابد، در نتیجه باعث افزایش مقدار کسر جامد می‌شود که از نظر تجربی موجب بهبود دو عامل فاکتور شکل و عدد اندازه دانه را به دنبال دارد.
- ۴- ترکیب پارامترهای دمای بارریزی، زاویه و طول سطح شیب‌دار باید به گونه‌ای باشد که زمان اعمال تنش برشی به اندازه کافی باشد و در این زمان در حالی که کسر جامد دوغاب خروجی حدود  $30$  تا  $35$  درصد می‌باشد از میزان نرخ برش و تلاطم تا حد امکان بالا برخوردار باشد.

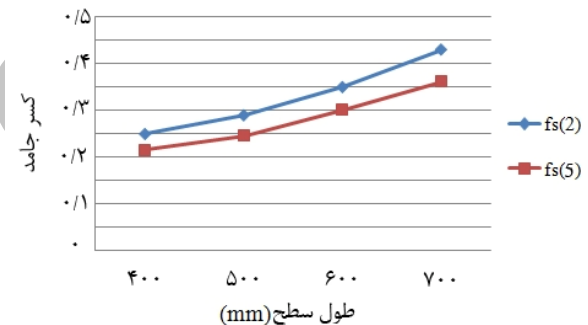
#### ۵- مراجع

1. Hirt, G. and Kopp, R. "Thixoforming", WILEY-VCH, Weinheim, Chapter 10, pp.369-409, 2009.
2. Fan, Z. "Semisolid Metal Processing", Int Mater Rev, Vol. 47, No.1, pp. 49-85, 2002.
3. Hellawell, A. "Mechanical Deformation of Dendrites by Fluid Flow Metal", A27A, Vol.22, No. 1, pp. 229-232, 1991.
4. Kamarei, A., Nourouzi, S., Bakhshi, M. and Gorji, A. H., "An investigation on the effect of mechanical stirring parameters on mechanical properties of A360 aluminum alloy in semi-solid forming", Journal of Tehran Uni. Engineering Faculty Vol. 43, No.1, pp751-759, 2009 (in Persian).
5. Nourouzi, S., Kolahdoz, A., and Botkan, M., "Behaviour of a 356 Aluminum Alloy in Semi-Solid State Produced by Mechanical Stirring", Advanced Material Research, Vol. 402, No.1, pp. 331-336, 2012.
6. Ghavamodini, S.M., Nourouzi, S., Baseri, H. Kolahdoz, A., Kaboli, S., and Botkan, M. "A Study of the Effects of Semi-Solid Casting Parameters on

نتایج مربوط به تأثیر طول بارریزی بر زمان رسیدن مذاب به انتهای مسیر و مقدار کسر جامد خروجی در سطح شیب‌دار با زاویه  $50^\circ$  در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ آمده است.



شکل (۱۷): تأثیر طول سطح بر زمان رسیدن دوغاب به انتهای سطح در دمای بارریزی  $650^\circ\text{C}$  و زاویه سطح شیب‌دار  $50^\circ$ .



شکل (۱۸): تأثیر طول سطح بر کسر جامد دوغاب خروجی در زمان‌های ۲ و ۵ ثانیه در دمای بارریزی  $650^\circ\text{C}$  و زاویه سطح شیب‌دار  $50^\circ$ .

با بررسی تأثیر پارامترهای مختلف می‌توان به این نتیجه رسید که برای داشتن یک شمش با ریزساختاری که دارای دانه‌های فاز اولیه  $\alpha$  با بیشترین کرویت و کمترین اندازه باشند لازم است بارریزی در شرایط معینی انجام شود. در این شرایط باید زمان اعمال تنش برشی به اندازه کافی باشد و در این زمان در حالی که انجماد با نرخ مناسبی صورت می‌پذیرد میزان نرخ برش و تلاطم دوغاب نیز باید به اندازه کافی باشد. بنابراین، اگر بتوان در زمان مناسب تنش برشی را تا حد امکان بالا برد در حالی که نرخ خنک‌کنندگی کاهش نداشته باشد، می‌توان به ریزساختار مطلوب‌تری دست یافت. نتایج به دست آمده در این بخش مطابقت خوبی با نتایج تجربی داشته، به طوری که با زاویه و

12. Wang, T., Pustal, B., Abondano, M., Grimmig, T., Buhrig-Polaczek, A., Wu, M., and Ludwig, A. "Simulation of Cooling Channel Rheo-Casting Process of A356 Aluminum Alloy Using Three-Phase Volume Averaging Model", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 15, No.1, pp.389-394, 2005.
13. Nourouzi, S., Ghavamodini, S.M., Baseri, H., Kolahdooz, A., and Botkan, M. "Microstructure Evolution of A356 Aluminum Alloy Produced by Cooling Slope Method", Advanced Material Research, Vol. 402, No.1, pp. 272-276, 2012.
14. Hosseini, S.S., Nourouzi, S., Hosseinipour, S.J., Kolahdooz, A. "Effect of Slope Plate Variable and Pouring Temperature on Semi-Solid Microstructure of A356 Aluminum Alloy", Steel Research Int., Vol.10, No.2, pp779-781, 2012.
15. Pollock, D.D. "Physical Properties of Materials for Engineers", CRC Press, Williamsville, New York, USA, 1993.
16. Doherty, R. D. Lee, H.I. and Feast E.A., "Microstructure of Stir-Cast Metals", Materials Sci. and Eng. Vol. 65, No.1, pp.181-189, 1984.
7. Nourouzi, S. and kykha, M.M. "Investigation on effect of die temperature and reheating treatment on Microstructure of A360 Aluminum Alloy Semi-Solid Forming", J. of Eng. Materials, Vol. 2, , pp. 347-34, 2010 (In Persian).
8. Kykha, M.M. and Nourouzi, S. "The Influence of Angle and Length of Slope Plate on Properties of Cast Aluminum Alloys in Semi-Solid Forming State", the 2th National Conf. on Manufacturing Eng. Isfahan, Iran, October 2008 (In Persian).
9. Nourouzi, S., Bakhshi, M., Kolahdooz, A., and Hosseinipour, S.J., "Effect of Temperature on the Microstructure of Semi-Solid Casting in Cooling Slope Method", Aero. Mech. J., vol. 9, No. 3, pp55-63, 2013 (in Persian).
10. Birol, Y. "A357 Tixofforming Feedstock Produced by Cooling Slope", Casting J. Materials Proc. Tech. Vol.186, No.2, pp. 94-101, 2007.
11. Kund, N.K. and Dutta, P. "Numerical Simulation of Solidification of Liquid Aluminum Alloy Flowing on Cooling Slope", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 20, No.1, pp. 898-905, 2009.

Archive