IRANIAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY

Founding Research Journal

Simulating the Effect of Running System Design on the Melt Flow and Feeding of a Hollow Cylinder of A356 Al Alloy

Ali Dehhaghi [1], Mehdi Divandari [2]*

1. M.Sc. Student, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology.
2. Associate Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology.

Received 30 November 2017
Accepted 21 January 2018

Abstract:
Simulation software is not able to design but it can only show various aspects of the suggested design by the running system designer. In this paper, the design of running system with the variation of pouring time (in the range of 5-20 seconds) for a hollow cylinder component weighing approximately 56 kg was carried out based on the choke calculation method USING ProCAST simulation software. The numbers of gates used in the design were 2, 4 and 6 and different types and locations of the gates were considered. The optimal design and pouring time achieved in this work improves the filling and feeding conditions, allowing the control of the linear velocity based on critical gate velocity criteria and a non-turbulent filling pattern of the mold cavity. The maximum average velocity in the gate was decreased from 2 m.s $^{-1}$ to 0.17m. s $^{-1}$ followed by the control of the cooling rate, improved filling conditions, lowering the shrinkage and the likelihood of its formation has decreased by 41%.

Keywords:
Simulation,
Pouring time,
Running system design,
Melt filling,
Shrinkage defect.

Journal homepage: www.foundingjournal.ir

Please cite this article using:

Dehhaghi A., Divandari M., Simulating the Effect of Running System Design on the Melt Flow and Feeding of a Hollow Cylinder of A356 Al Alloy, in Persian, Founding Research Journal, 2018, 1(3)133-148.
DOI: 10.22034/FRJ.2018.108917.1015

*** Corresponding Author:**
Mehdi Divandari, Associate Professor
Address: School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology,
P.O. Box 16846-13114, Narmak, Tehran, Iran. Tel/Fax: +98 21 77240320.
E-mail: divandari@iust.ac.ir

فصل‌نامه علمی پژوهشی

پژوهش‌نامه ریخته‌گری

انجمن علمی ریخته‌گری ایران

شبیه‌سازی اثر طراحی سیستم راهگاهی بر رفتار سیالاتی و تغذیه‌رسانی مذاب در یک استوانه توخالی از آلیاژ Al-A356

علی ده‌حقی[۱]، مهدی دیواندری[۲]*

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران a_dehhaghi@metaleng.iust.ac.ir

۲- دانشیار دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران. divandari@iust.ac.ir (نویسنده مکاتبه کننده)

دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۰۹

پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۰۱

چکیده:

یک نرم‌افزار شبیه‌سازی، قادر به طراحی نیست بلکه فقط می‌تواند جنبه‌های مختلف نتایج طراحی پیشنهاد شده توسط طراح سیستم راهگاهی را نشان دهد. در این مقاله، طراحی سیستم راهگاهی با تغییر زمان‌های بارریزی (در محدوده ۵ تا ۲۰ ثانیه) برای قطعه استوانه‌ای توخالی با وزن تقریبی ۵۶ کیلوگرم و بر اساس روش محاسبه تنگه با استفاده از نرم افزار شبیه‌سازی پروکست انجام شد. تعداد راهبارهای استفاده شده در طراحی ۲، ۴ و ۶ راهباره انتخاب شد و نوع و محل اتصال‌های متفاوتی در نظر گرفته شد. طراحی و زمان بارریزی بهینه به‌دست آمده در این تحقیق، مذاب‌رسانی و شرایط تغذیه پراکنده را بهبود بخشیده و امکان کنترل سرعت خطی مذاب بر اساس معیار رعایت سرعت بحرانی و الگوی پر شدن قالب را امکان‌پذیر می‌کند. بیشینه سرعت میانگین در راهباره از $2\ m.s^{-1}$ به $0/17\ m.s^{-1}$ کاهش‌یافته و در ادامه با تغییر نرخ سرمایش، مذاب رسانی بهبود یافته و کشیدگی‌های انقباضی و احتمال تشکیل آن ۴۱ درصد کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی:

شبیه‌سازی،

زمان بارریزی،

طراحی سیستم راهگاهی،

مذاب رسانی،

عیب کشیدگی انقباضی

۱- مقدمه

در ریخته‌گری فلزات انتقال مذاب، به محفظه قالب به‌طور صحیح و کامل، اولین مرحله کلیدی به شمار می‌رود[۱]. یک سیستم راهگاهی می‌تواند بر سرعت و الگوی پر شدن قالب، عیوب ریخته‌گری و درنتیجه بازده ریخته‌گری تأثیرگذار باشد. درنهایت کیفیت قطعات تولیدشده در گرو این مهم است[۴-۲]. با توجه به پراکندگی خواص و نتایج حاصل از قطعات ریخته‌گری و حساسیت کاهش این پراکندگی نتایج در تولید قطعات باکیفیت، هر قطعه ریختگی به‌طور مستقل نیاز به طراحی یک سیستم راهگاهی با عملکرد صحیح و بهینه از نقطه‌نظر اقتصادی و فنی دارد. تنوع شکل، اندازه، ضخامت و نوع آلیاژهای ریختگی و عدم ارائه استاندارد طراحی سیستم راهگاهی، که دقیقاً منطبق بر کلیه نیازهای ریخته‌گری باشد، پیچیدگی موضوع را نشان می‌دهد. در آلیاژهایی که مستعد به تشکیل فیلم اکسیدی هستند نقش و اهمیت دقت در طراحی سیستم راهگاهی پررنگ‌تر می‌شود. فیلم‌های اکسیدی جوان معمولاً حین ریختن مذاب و پر کردن قالب تشکیل می‌شوند. ازاین‌رو این فرایند حدود چندین ثانیه تا ۱۰ ثانیه به طول می‌انجامد[۵]. یک سیستم راهگاهی بهینه‌شده، ازنظر تلاطم سطحی و رعایت سرعت بحرانی، می‌تواند در کاهش اکسیدهای جوان قابل دفن و تخلخل ناشی از پر شدن قالب، مؤثر باشد[۶].

در سال‌های اخیر نرم‌افزارهای تجاری متعددی، برای حل مسائل شبیه‌سازی فرایندهای گوناگون ریخته‌گری، به‌صورت یک ابزار توانمند، طراحی و معرفی شده‌اند[۷]. این نرم‌افزارها قادرند شبیه‌سازی در زمینه آنالیز حرارتی، انجماد و انقباض متمرکز و پراکنده، جدایش و تحولات

ریزساختاری، حرکت سیال در حین فرایند ریخته‌گری و نیز حوزهای تنش پس از انجماد را پیش‌بینی کنند[۱۰-۸]. استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی در یک مجموعه تولیدی و صنعتی می‌تواند علاوه بر افزایش اعتماد بین سرپرستان و مدیران به تولید بهینه قطعات کمک کند[۱۱]. به این نکته بسیار مهم توجه شود که نرم‌افزارها هوشمند نیستند و به یک کاربر آگاه برای طراحی مناسب نیاز دارد. بدیهی است که نتایج شبیه‌سازی طراح‌ها، می‌تواند توسط طراح بهینه شود. با وجود آنکه نرم‌افزار امکانات خوبی در اختیار قرار می‌دهد، به هر حال، نیاز به داشتن اطلاعات و تجارب کافی برای طراحی صحیح و دست‌یابی به نتایج نزدیک‌تر به نتایج تجربی و کاربردی، ضروری به نظر می‌رسد.

در این تحقیق با در نظر گرفتن یک قطعه به شکل استوانه توخالی مراحل طراحی سیستم راهگاهی بر اساس منابع موجود ریخته‌گری[۱، ۱۴-۱۲] انجام شده است. با اعمال زمان‌های بارریزی در محدوده ۵ تا ۲۰ ثانیه و تعداد راهباره های متفاوت و تغییر مکان اتصال نسبت به یکدیگر و یا گونه‌های متفاوت اتصال راهباره به قطعه پاسخ نرم‌افزار در زمینه نحوه پرشدن[۱] و مذاب‌رسانی[۲] ارائه و مورد تحلیل قرارگرفته است. لازم به یادآوری است که بخش مربوط به روش تحقیق، با توجه به ویژگی‌های این بررسی، نسبت به کارهای تحقیقاتی تجربی نسبتاً طولانی‌تر است و کوتاه کردن این بخش می‌تواند باعث ایجاد ابهام در نحوه بحث شود. به علاوه در این بخش یک روند نما، توسط مؤلفین، طراحی و ارائه‌شده است که می‌تواند مراحل مختلف طراحی را به نمایش گذاشته و احتمالاً به انجام کارهای مشابه از طریق الگوسازی کمک کند و باعث عمق‌بخشی به این نوع بررسی‌ها شود.

۲- روش تحقیق

۲-۱- طرح مسئله

شکل (۱)، هندسه قطعه استوانه توخالی موردنظر جهت شبیه‌سازی نشان می‌دهد. دلایل این انتخاب در قسمت بحث موردتوجه قرار خواهد گرفت. با توجه به هدف این تحقیق که بررسی طراحی سیستم راهگاهی و اثر آن در سلامت قطعه ریخته‌گری است مراحل پنج‌گانه طراحی به شرح ذیل مطابق نظر کمبل [۱]، رائو [۱۳] و نظر محققین ژاپنی [۱۲] تنظیم‌شده است.

الف) تخمین زمان بارریزی برای قطعه ریختگی

ب) محاسبه سطح مقطع تنگه راهگاهی

ج) انتخاب نسبت‌های راهگاهی

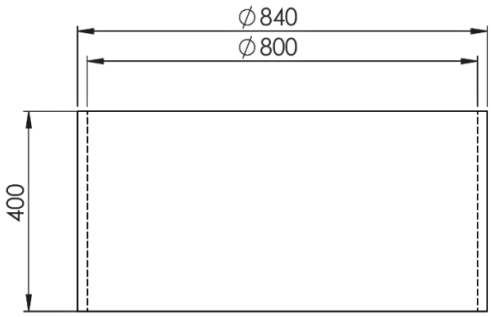
د) انتخاب نوع و محل برخورد سیستم راهگاهی

ه) محاسبه اندازه راهبار و راهباره.

شکل(۲)، نحوه پاسخ‌گیری مسئله شبیه‌سازی و اصلاح طراحی را در قالب یک روند نما به نمایش می‌گذارد. در روند نما دو عامل مهم در سلامت قطعه ریختگی، یعنی پر شدن کامل قطعه و کشیدگی انقباضی، منجر به تغییر مجدد در طراحی از مرحله محاسبه نرخ بارریزی می‌شود.

۲-۲- طراحی سیستم راهگاهی

زمان پر شدن ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه و تعداد راهباره مورد استفاده ۲، ۴ و در حالت اصلاح شده ۶ عدد و نسبت سیستم راهگاهی برای همه طراحی‌ها ۱:۱/۱:۲/۴ در نظر گرفته شد[۱]. زمان‌های پر شدن انتخابی، با استفاده از تخمین، در دامنه بارریزی آهسته تا سریع بر اساس نظر محققین ژاپنی تعیین‌شده است [۱۲]. ضریب تخلیه ۰/۵و ارتفاع مؤثر بارریزی ۱۶۰ میلی‌متر انتخاب شد.



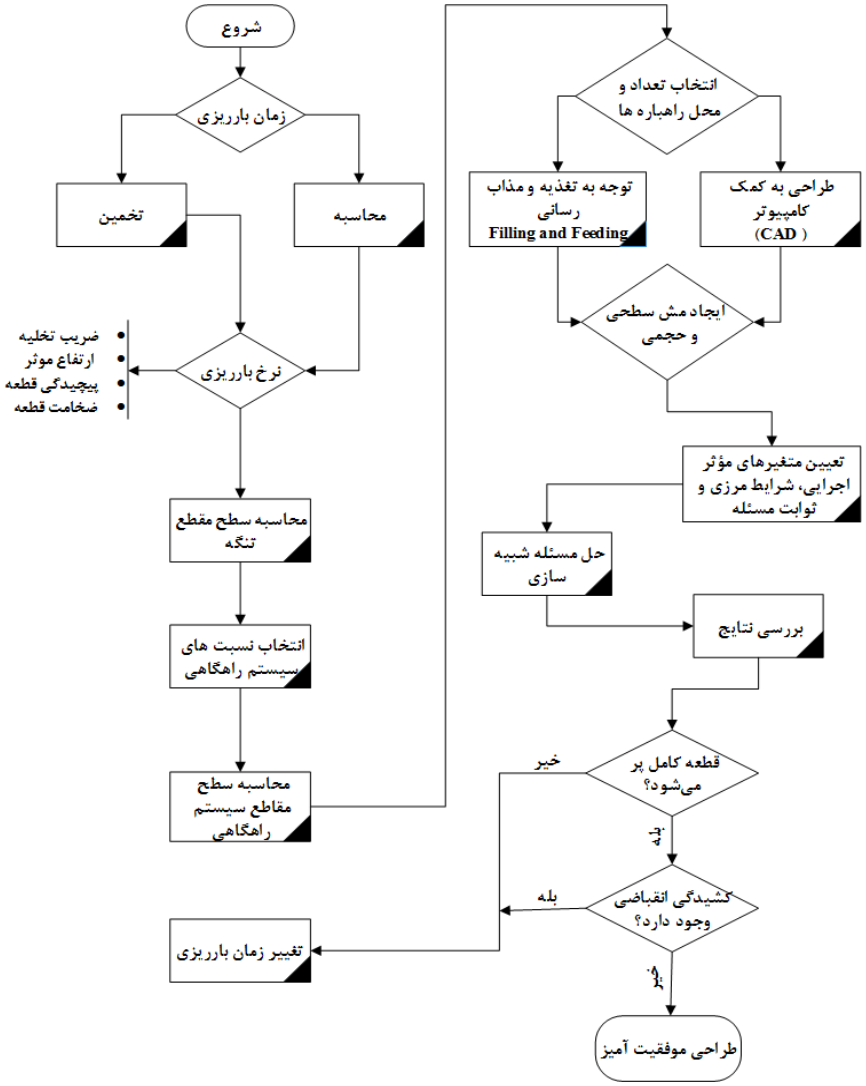
شکل ۱- ابعاد قطعه مورد بررسی بر حسب میلی‌متر.

جدول (۱)، ابعاد محاسبه‌شده سیستم راهگاهی را مطابق با منبع[۱۳] نشان می‌دهد. شکل (۳)، دو نوع سیستم راهگاهی طراحی‌شده بر اساس تعداد راهباره برای قطعه ارائه شده در شکل (۱) را به نمایش می‌گذارد. قسمت‌های هاشور خورده (سیاه رنگ) مجموع سطوح راهباره نشان داده شده در جدول (۱) است. نرخ بارریزی توسط زمان پر شدن یعنی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه و دمای بارریزی ۷۰۰ °C به نرم‌افزار، به‌دست‌آمده است.

---

[۱] Filling

[۲] Feeding



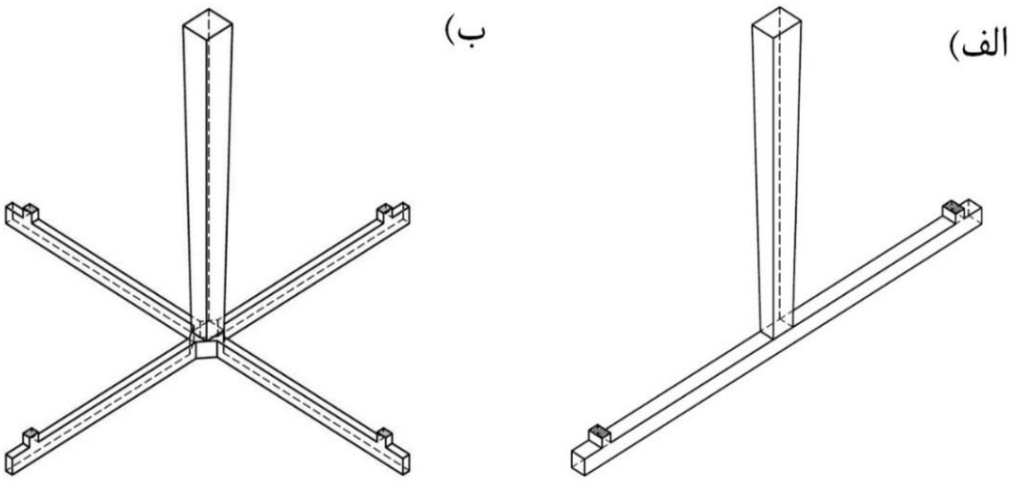
شکل۲- روند نمای کلی از طرح مسئله شبیه‌سازی و نحوه پاسخ‌گیری به کمک نرم‌افزار.

جدول۱- ابعاد مورد استفاده در طراحی استوانه توخالی با سیستم راهگاهی از کف.

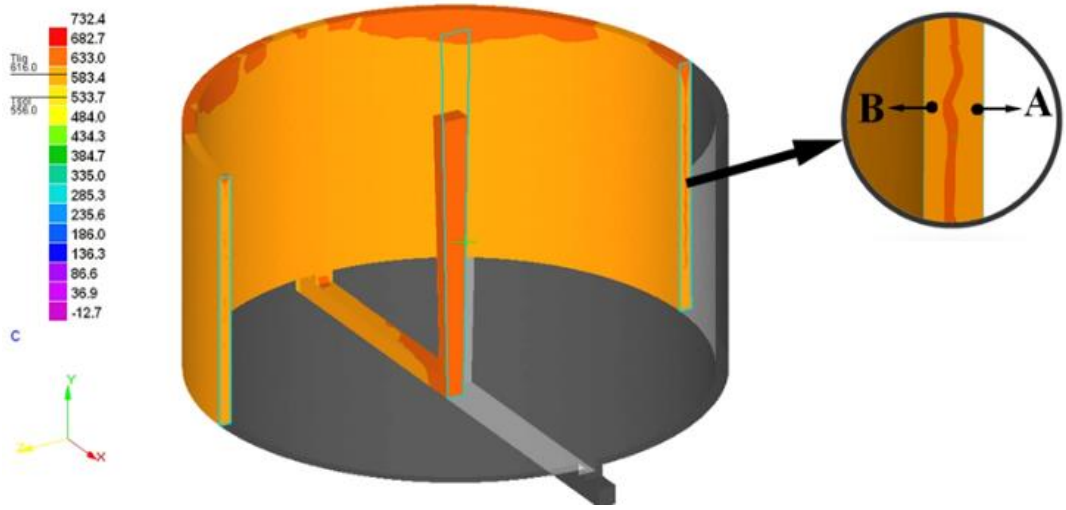
ردیف	مشخصات		نرخ بارریزی* kg/s	سطح مقطع راهگاه (تنگه)** mm^2	مساحت راهبارها mm^2
	تعداد راهبار	زمان پر شدن			
۱	۲	۵	۱۰/۹	۹۶۰	۱۳۴۴
۲	۴	۵	۱۰/۷۱	۹۶۰	۱۳۴۴
۳	۲	۱۰	۵/۲۱	۸۰۰	۱۱۲۰
۴	۴	۱۰	۵/۱۵	۸۰۰	۱۱۲۰
۵	۲	۱۵	۳/۴۴	۴۵۰	۶۳۰
۶	۴	۱۵	۳/۴۱	۴۵۰	۶۳۰
۷	۲	۲۰	۲/۵۵	۳۳۸	۴۷۳/۲
۸	۴	۲۰	۲/۵۴	۳۳۸	۴۷۳/۲

* **(جرم مخصوص (تابع دما)/حدود پرشوندگی (%)) × حجم = نرخ بارریزی**

** $S_a=G/c\cdot\rho\cdot t\cdot\sqrt{2gh}$ و در آن $h=H-P/2$ (از راست به چپ:h: ارتفاع مؤثر بارریزی، g: نیروی گرانش زمین، t: زمان بارریزی،ρ: جرم مخصوص c: ضریب تخلیه، G: جرم قطعه به همراه سیستم راهگاهی،S_a: سطح مقطع تنگه، P: ارتفاع قطعه در دُرجه بالایی قالب، H: ارتفاع لوله راهگاه، h: ارتفاع مؤثر بارریزی)



شکل۳- سیستم‌های راهگاهی کف ریز طراحی‌شده با زمان بارریزی ۵ ، ۱۰ ، ۱۵ و ۲۰ ثانیه برای طراحی الف) ۲ راهباره ، ب) ۴ راهباره.



*جدول وابسته به شکل است.

تعداد کل شبکه‌های حجمی(میلیون)	۰/۵۱۱	۱/۳۳	۳/۰۵	۴/۸۸	۸/۲۱
اندازه شبکه سطحی* (mm)	۱۵	۱۲	۹	۷	۵
اختلاف دمایی دوگره A و B** (°C)	۹/۷	۱۰/۴	۱۱/۷	۱۲/۱	۱۲/۱۳

* شبکه مثلثی و نسبت ابعادی ۱:۱

** اختلاف دمایی این دونقطه برای همه اندازهای شبکه، در پایان بارریزی بررسی‌شده است.

شکل۴- نمایش محل گره‌های انتخابی از مقطع برش خورده قطعه شبیه‌سازی‌شده برای به دست آوردن اندازه شبکه بهینه و جدول اختلاف دمایی استخراج‌شده از گره‌های انتخابی A و B.

۳- شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار ProCAST® به همراه مدول پایه حرارتی/انجماد و مدول انتخابی سیال و حرارتی استفاده شد. جنس قالب ماسه‌تر با دمای اولیه $۲۹۸\,°k$ (۲۵°C) با ابعاد ۷۶۰ mm ×۱۲۴۰×۱۲۴۰ و جنس مذاب از آلیاژ آلومینیم A356 با دمای ذوب و انجماد به ترتیب $k°$ ۸۸۶ و $°k$ ۸۲۱ (۶۱۳°C و ۵۴۸°C) و دمای ذوب‌ریزی $°k$ ۹۷۳ (۷۰۰°C) انتخاب شد. شرایط مرزی صفحه‌ای نیز، سرد شوندگی در محیط هوا با شار حرارتی $۱۰^{w}/_{m^2 \cdot k}$ و به همراه ورودی مذاب با نرخ مشخص‌شده در جدول (۱)، انتخاب‌شده است. برای محاسبه خودکار حبس هوا مدول انتخابی گاز نیز فعال‌شده و در همه شبیه‌سازی‌ها، جاذبه گرانشی و راهگاه بارریزی در جهت محور Y در نظر گرفته‌شده است. مؤلفه‌های دیگر شبیه‌سازی به شرح ذیل است:

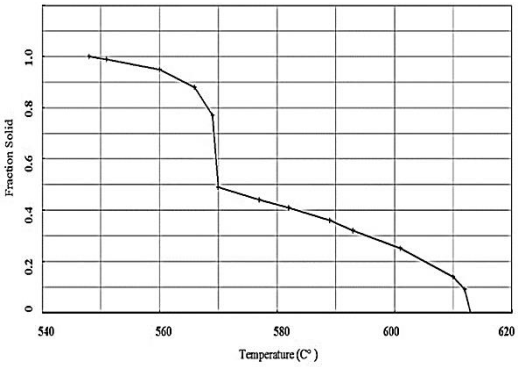
۳-۱- استقلال نتایج از شبکه

اختلاف دمایی دو گره از شبکه‌ها (مش‌ها) با اندازه‌های مختلف برای صحت اندازه و دقت آن بر نتایج امتحان شد. اندازه شبکه‌ها برای قالب، قطعه و سیستم راهگاهی برابر بوده است. نتایج بهینه‌شده اختلاف دمایی ۱۲/۱°C با اندازه شبکه سطحی ۷mm است. این نتایج به‌طور مختصر در شکل (۴) نشان داده شده است.

۳-۲- ضریب انتقال حرارت

به دست آوردن مستقیم ضریب انتقال حرارت بهینه، توسط روش‌های تجربی و یا تئوری کار آسانی نبوده و فصل مشترک مذاب/فاصله هوایی، فاصله هوایی/قالب و تأثیر آن بر ضریب انتقال حرارت در فرایند ریخته‌گری ماسه‌ای بسیار مهم است[۱۵].

در اینجا از اثر فاصله هوایی صرف‌نظر شده و ضریب انتقال حرارت تنها برای فصل مشترک مذاب/قالب در نظرگرفته شده است. اختلاف نرخ سرمایش بین دو حالت–با مقاومت هوایی فصل مشترک و بدون آن- به میزان $\frac{k'}{2h_c}$ در نظر گرفته شد [۱۶] مقدار بهینه ضریب انتقال حرارت برای ریخته‌گری آلیاژ آلومینیم A356 در قالب ماسه‌تر $۱۰۰۰^{w}/_{m^2 k}$ در نظر گرفته شد[۱۵]. دیگر متغیرهای مؤثر در تحلیل نیز به‌صورت پیش‌فرض -نرم‌افزار- در حالت ریخته‌گری ماسه‌ای و تعداد گام‌های زمانی مناسب برای هر تحلیل تعیین‌شده است[۱۷]. شکل (۵)، کسر جامد شده در مقابل دما را نشان می‌دهد که از پایگاه داده نرم‌افزار برای آلیاژ مذکور استخراج شده است. هدف از ارائه این نمودار در این بخش داشتن تصور واقعی از شرایط انجماد مذاب قبل از ریخته‌گری بوده و جزو مقدمات شبیه‌سازی است.



شکل ۵- کسر جامد شده در مقابل دما برای آلیاژ A356 موجود در پایگاه داده نرم‌افزار برای تحلیل مسئله.

۴- نتایج و سگالش

۴-۱- مذاب رسانی

استوانه توخالی مسئله، شکل ساده‌ای دارد اما برای ریخته‌گری قطعه‌ی ساده‌ای به شمار نمی‌رود؛ به علت نحوه توزیع تخلخل، نحوه تمرکز آخال و همچنین شرایط انجمادی و انقباضی خاص اگر به‌صورت عمودی ریخته‌گری شود بهتر است. در ریخته‌گری قطعات دوار- و قطعاتی با طراحی چند راهباره‌ای- شرایط به نحوی است که به‌طور معمول دو مذاب پس از ورود به قطعه از راهباره‌های مختلف، درجایی از قطعه دوباره به یکدیگر برخورد می‌کنند. این موضوع می‌تواند مشکل‌آفرین- از نظر نحوه تداخل فیلم‌های سطحی- باشد [۱۸،۱]. در جدول (۲)، نتایج درصد پرشده قطعه استوانه‌ای برای زمان‌های بارریزی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه آمده است. این درصد پرشدن از نوار وضعیت نرم‌افزار بدست آمده است. مطابق روند نما شکل (۲)، اولین معیار سلامت قطعه، پرشدن کامل و صحیح آن است؛ به طوری که مذاب‌رسانی توسط طراحی صورت گرفته بتواند از لحاظ ظاهری، شکل مدل اولیه را ایجاد کند. شمارنده حفره در طرح‌هایی که کمتر از ۹۵٪ پرشوندگی داشته‌اند، دارای مقدار بوده است (به این معنی که مذاب‌رسانی ناقص بوده و از لحاظ ظاهری شکل مدل ایجاد نشده است). در اینجا، این معیار پرشدن، پرشوندگی بیشتر از ۹۵ درصد انتخاب شده و طرحی که این شرط را

برآورده نکند، مردود به شمار می‌رود و بررسی‌های بعدی در مورد آن انجام نمی‌شود.

طرح‌هایی که با زمان بارریزی کمتر از ۱۰ثانیه پر شدند، در دسته پرشدن مغشوش قرار می‌گیرد که در ادامه بحث خواهد شد. از سویی، طرح‌های طراحی شده با زمان‌های بارریزی بیشتر از ۱۰ ثانیه و ۴ راهباره دچار مذاب‌رسانی ناقص هستند.

وارد شدن مذاب با حداقل تلاطم به عنوان اولین شرط طراحی صحیح یک سیستم راهگاهی است. همچنین لازم است تا طراحی انجام شده از ورود هوا، سرباره، آخال، سایش و خوردگی قالب جلوگیری کند [۱۳]. در یک سیستم راهگاهی با طراحی صحیح، سرعت حرکت مذاب تحت کنترل قرار می‌گیرد [۱].

جدول ۲- نتایج مذاب رسانی برای طراحی با زمان‌های بارریزی ۵ تا ۲۰ثانیه و با ۲ و ۴ راهباره.

زمان بارریزی(sec)	تعداد راهباره	درصد پرشده*	مذاب‌رسانی مورد تأیید است؟
۵	۲	۹۷/۱۹	بله
	۴	۹۶/۱۲	بله
۱۰	۲	۹۷/۲۶	بله
	۴	۹۳/۳۵	خیر
۱۵	۲	۸۶/۲۱	خیر
	۴	۸۰/۱۳	خیر
۲۰	۲	۸۹/۲۴	خیر
	۴	۷۹	خیر

* ۲٪ به‌عنوان میزان درصد انقباض مرحله اول حالت مایع (انقباض مرحله اول مذاب قبل از خط لیکوئیدوس) توسط نرم افزار از ۱۰۰٪ کسر می‌شود. همچنین عیوب نیامد و حبس هوا باعث کاهش ۹۸٪ باقی‌مانده می‌شوند.

۴-۲- تغذیه جامد

تخلخل انقباضی در ریخته‌گری به سه دسته کلی داخلی (حفرات انقباضی)، خارجی (کشیدگی‌های سطحی) و مخلوط هر دو ظاهر می‌شود. به‌طور مختصر، متغیرهای مؤثر در ایجاد نوع آنها شامل [۱۹]:

۱) دمای فوق ذوب،
۲) تمیز بودن مذاب،
۳) دامنه آلیاژ و
۴) نرخ سرمایش

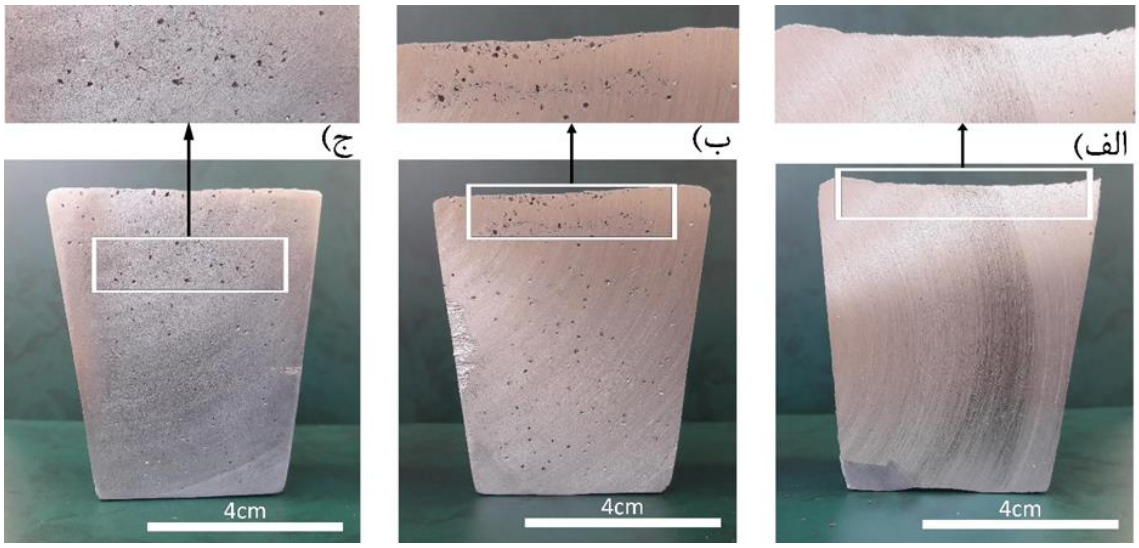
است. توزیع تخلخل برای نمونه‌هایی از آلیاژ آلومینیم A356 که در خلأ $mbar$ ۰ ۸ منجمد شده‌اند، در شکل (۶) آورده شده است. دمای بارریزی برای نمونه‌های الف-ب ۶۷۰± ۵°C و برای نمونه ج، ۶۸۰± ۵°C انتخاب‌شده است. تمامی نمونه‌ها با وزن یکسان و در فنجان نمونه‌گیری از جنس فولاد زنگ‌نزن جداره نازک با دمای اولیه متفاوت، از مذاب نمونه‌برداری شده‌اند. تخلخل‌های پراکنده در تصاویر ب-ج مک‌های گازی ناشی از عدم گاز زدایی مذاب است، که در تصویر الف با گاززدایی کاهش‌یافته‌اند. بایستی توجه داشت که نرم‌افزار قادر است تخلخل انقباضی (شامل متمرکز و پراکنده) را نشان دهد ولی نمایش حفره‌های گازی، که نرم‌افزار قادر به نمایش آن نیست، به متغیرهای متعدد بستگی داشته و به حذف آخال و فیلم‌های جامد ارتباط داده می‌شود[۱].

یکی از معادلات حاکم بر تحلیل تخلخل‌های انقباضی نرم‌افزار، معیار نیاما است؛ که برای دامنه وسیعی از فلزات ریخته‌گری در یک دما یا کسر جامد بحرانی قابل محاسبه است[۱۷]:

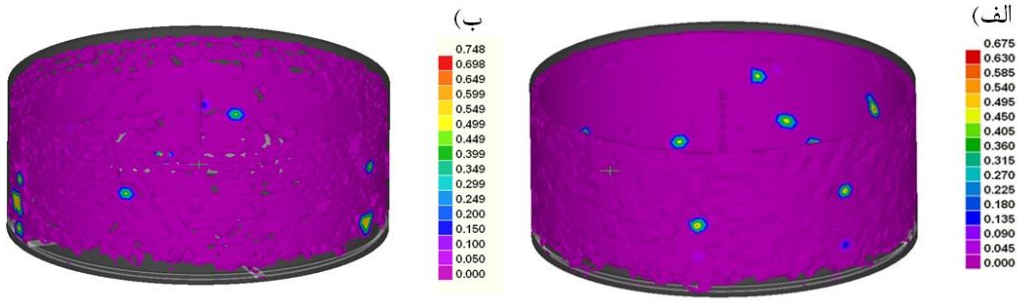
$$N_y = G/\sqrt{T^\circ} \qquad (۱)$$

که در آن G و T° به ترتیب شیب دمایی و نرخ سرمایش است. نمودار شکل ۸-ج میزان کسر جامد شده برحسب زمان برای گرهای مشخص‌شده در شکل ۸-الف را نشان می‌دهد. با استفاده از این نمودارهای استخراجی از نرم‌افزار می‌توان زمان و نرخ انجماد و کسر مایع را در المان دلخواه از قطعه به دست آورد. مناطقی که بیشتر از ۷۰٪ فاز مایع دارند می‌توانند با مناطق دیگر به‌راحتی ارتباط داشته باشند[۲۰]. در زمان بارریزی ۵ ثانیه و تعداد ۲ راهباره نرخ بارریزی حداکثر بوده که این می‌تواند باعث افزایش سرعت انجماد شود طوری که آخرین گره جامد شده در زمان ۷۲ ثانیه به کسر جامد ۱۰۰ درصد می‌رسد.

انجماد سریع در یک قطعه می‌تواند مسیرهای مذاب رسانی را بسته و باعث ایجاد انقباض‌های داخلی شود. با افزایش سرعت سرد شدن، سرعت پیشروی فصل مشترک جامد/مذاب در قطعه ریختگی افزایش می‌یابد و درنتیجه فواصل بین دندریتی کمتر شده و مذاب نمی‌تواند به فضای بین بازوهای دندریتی نفوذ کند[۲۱]. شکل (۷)، احتمال تشکیل کشیدگی و مکان تقریبی آنها را برای طراحی با ۲ راهباره و ۱۰ ثانیه نشان می‌دهد.



شکل۶- الف)کشیدگی سطحی در مذاب گاز زدایی شده، ب) اثر مشترک گاز و انقباض، ج)تخلخل‌های انقباضی داخلی با افزایش ۱۰°C به دمای بارریزی . دمای اولیه فنجان در همه حالت‌ها ۲۵ °C



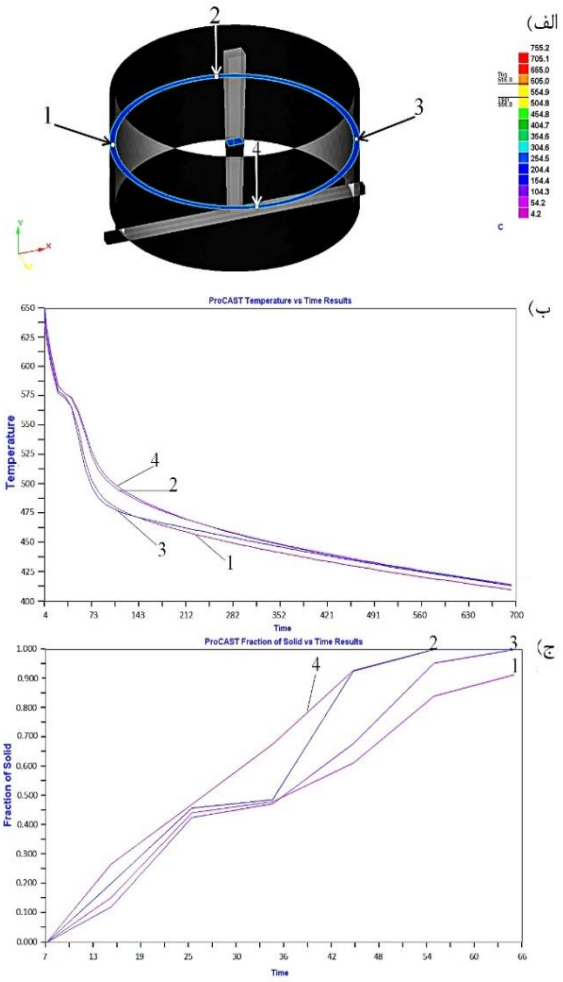
شکل۷- احتمال کشیدگی انقباضی در طراحی اصلاح‌شده از قطعه با زمان بارریزی: الف)۱۰ ثانیه و۲ راهباره و ب)۱۰ ثانیه و۴ راهباره.

۴-۳- نرخ سرمایش و کسر جامد شده

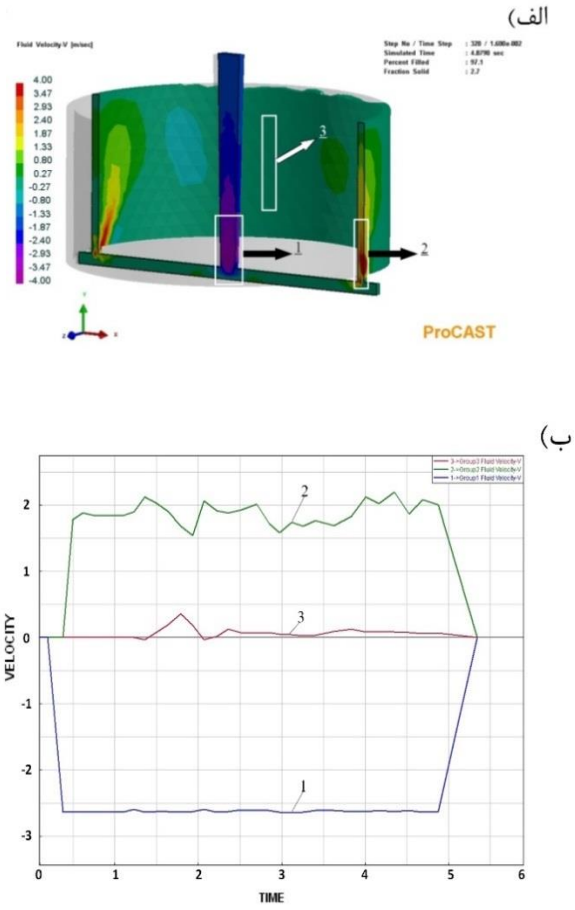
شکل‌های (۸-ب) و (۸-ج)، نمودار تغییرات دمایی برحسب زمان را برای گره‌های مشخص‌شده در شکل (۸-الف) نشان می‌دهند. تشکیل و توزیع ترکیبات بین فلزی وابسته به نرخ سرمایش است[۲۲]. همچنین خواص قطعات ریختگی می‌تواند متأثر از سرعت سرمایش آنها باشد[۲۳]. ضخامت و نوع شکل در قطعات معمول ریخته‌گری متفاوت است که این می‌تواند خواص مکانیکی موضعی (در مذابی که نرخ سرمایش متفاوت را تجربه می‌کند) به وجود آورد؛ به‌خصوص در مواردی که مورفولوژی و نوع ریزساختار، متأثر از نرخ سرمایش و مادون تحت انجماد آن باشد، قطعات ریخته‌گری از این غیریکنواختی در خواص، رنج می‌برند. به هر حال، این مطلب همواره به‌عنوان یک نکته منفی نبوده و در قطعاتی که نیاز به ارائه خواص گوناگون دارند به‌عنوان یک ابزار توانمند بکار گرفته می‌شود. نمودار شکل (۸-ب) نشان می‌دهد که در این نوع اتصال راهباره با زمان بارریزی ۵ ثانیه، اختلاف دمایی در نقاط ۱، ۲، ۳ و ۴ در حدود یک درجه سانتی‌گراد است.

۴-۴- سرعت خطی سیال در راستای محور V (Y)

نظرات مختلفی در رابطه با نسبت‌های سیستم راهگاهی در منابع بیان‌شده که طبق آخرین نظرات نسبت ۱/۴ :۱/۲: ۱ در همه طراحی‌ها لحاظ شده است. شکل (۹)، نمای نیم‌برش خورده سرعت سیال در لحظه‌های پایانی ورود مذاب به قطعه را نشان می‌دهد. از آنجایی‌که سرعت سیال در محور Y نسبت به دیگر محورها عامل اصلی تلاطم سطحی است، این محور برای نشان دادن وضعیت سرعت مذاب انتخاب شده است.



شکل ۸- الف) تصاویر پیمایش شده در قسمت میانی قطعه و محل نقاط انتخاب‌شده در زمان باریزی ۵ ثانیه و ۲ راهباره ب) نمودار دمایی نقاط انتخاب‌شده و ج) نمودار میزان کسر جامد شده-زمان (دما برحسب درجه سانتی‌گراد و زمان برحسب ثانیه).



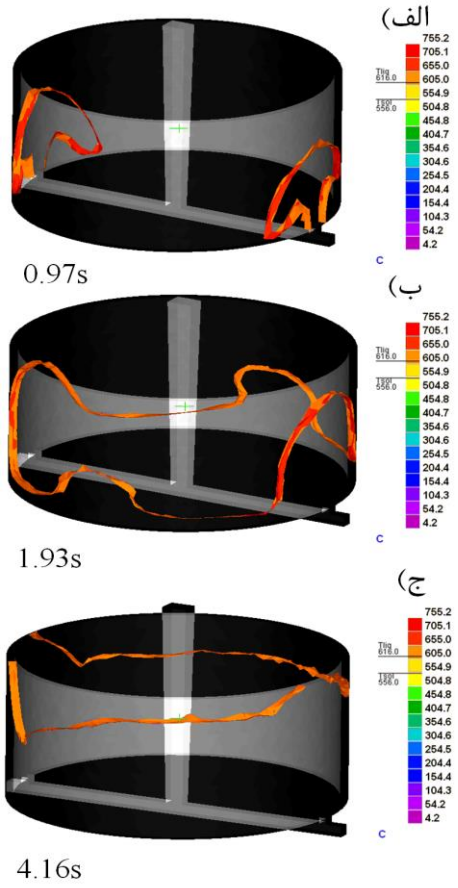
شکل۹- الف) شکل نیم برش خورده از سرعت مذاب در راستای محور Y برای قطعه با زمان باریزی۵ ثانیه، ب) نمودار میانگین گروه المان‌های نشان داده‌شده در شکل-الف (سرعت برحسب متر-زمان برحسب ثانیه).

با مقایسه رنگ‌ها در نمای شکل (۹-الف) می‌توان دید در قطعه مورد طراحی، با زمان باریزی۵ ثانیه، سرعت به حدود$3/5 m.s^{-1}$ هم می‌رسد. نمودارهای شکل (۹-ب)، مربوط به میانگین سرعت در گروه المان‌های انتخاب‌شده مطابق تصاویر نمای حرکت خود هستند. سقوط در اینجا با توجه به انتخاب نیروی گرانش در جهت منفی Y به‌صورت اعداد منفی است که در راهگاه و یا تلاطم مذاب در قسمت‌های دیگر این پدیده به‌وضوح دیده می‌شود. نمودارهای به‌دست‌آمده از حرکت سیال نشان می‌دهد، در اثر سقوط مذاب در راهگاه، سرعت به$2/5 m.s^{-1}$ می‌رسد؛ با ادامه حرکت مذاب در مجموعه سیستم راهگاهی، سرعت میانگین در راهباره به$m.s^{-1}$ ۲ و سرعت موضعی مطابق نقشه رنگی سرعت به $m.s^{-1}$ ۴ هم می‌رسد. در سیستم راهگاهی طراحی‌شده با زمان باریزی۵ ثانیه، سرعت میانگین مذاب کاهش چندانی نداشته و تلاطم باعث دندانه اره‌ای شدن نمودار۲ در شکل (۹-ب) شده است.

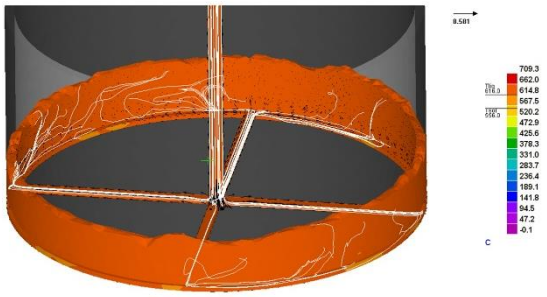
۴-۵- اغتشاش سطحی در مذاب

شکل (۱۰)، سطح آزاد واکنشی مذاب را حین فرایند پر شدن قالب در سه پاره زمانی برای طراحی با زمان باریزی ۵ ثانیه و ۲ راهباره به نمایش می‌گذارد. حرکت قارچی شکل و موجی شکل سطح آزاد واکنشی مذاب در اثر دبی زیاد (۱۰/۹ kg/s) در این طراحی بیان‌گر اغتشاش شدید است. نتیجه چنین طراحی ورود فیلم‌های سطحی مذاب به درون قطعه ریختگی و کاهش اعتمادپذیری قطعه خواهد بود. با افزایش زمان باریزی و اصلاح نحوه اتصال راهباره با قطعه، مذاب می‌تواند به آهستگی و عدم اغتشاش وارد قطعه شود. با طراحی صحیح یک سیستم راهگاهی

فیلم‌های اکسیدی جوان (منظور فیلم‌هایی است که در مرحله ریخته‌گری به وجود می‌آیند نه در مرحله تهیه مذاب) کاهش می‌یابد که این نکته می‌تواند از تفرق در خواص مکانیکی جلوگیری کند[۲۴،۶].



شکل ۱۰- رفتار سطح مذاب حین پر شدن در سه پاره زمانی-بر حسب ثانیه- برای طراحی با زمان بارریزی ۵ ثانیه حین پر شدن قالب.



شکل ۱۱- اغتشاش (پیکان‌های سیاه) و نحوه ورود آخال‌های احتمالی (خطوط سفید) در طراحی قطعه با ۴ راهباره و زمان بارریزی ۱۵ ثانیه.

شکل (۱۱)، میزان اغتشاش را در طراحی با زمان بارریزی ۱۵ ثانیه و ۴ راهباره نشان می‌دهد، که مذاب ناگهان از یک مسیر عمودی به یک مسیر افقی تغییر مسیر می‌دهد. هرچه میزان تراکم بردارها (پیکان‌های سیاه‌رنگ) بیشتر باشد به معنی نیروهای بیشتر مذاب به دیواره‌ها است که می‌تواند خوردگی، سایش و واکنش مذاب و قالب را به دنبال داشته باشد.

حرکت مذاب می‌تواند با پارامتر بردار (که جزء مشخصات تعریف شده نرم‌افزار است) را می‌توان در نواحی مختلف قطعه بهینه کرد[۲۶]. در اینجا تقسیم مذاب از راهگاه به چهار راهباره سبب تراکم بردار در این قسمت شده است؛ این امر می‌تواند سبب ماسه شویی در این ناحیه شود. خطوط سفیدرنگ مسیر احتمالی حرکت یک ذره (آخال) را نشان می‌دهد. با توجه شکل، احتمال ورود آخال برای این طراحی به‌آسانی میسر است و تله‌های انتهای راهبار (شکل (۳) را ببینید) به‌خوبی نمی‌توانند عمل کنند.

۴-۶- طراحی بهینه

منظور از طراحی بهینه، طرحی است که بتواند مذاب را با حداقل اغتشاش وارد قالب و با تغذیه‌رسانی مطلوب عیوب مذکور را بهبود یابد. طرح‌هایی که با زمان بارریزی کمتر از۱۰ثانیه پرشده‌اند در دسته پرشوندگی با اغتشاش قرار می‌گیرند؛ از سویی زمان‌های بارریزی بیشتر از ۱۰ ثانیه و ۴ راهباره دچار مذاب رسانی ناقص هستند. به هر حال پر شدن کامل و صحیح با زمان بارریزی۱۳ ثانیه همراه با تغییر در شکل راهبار و مکان راهباره‌ها (با بیشترین درصد پرشوندگی ۹۸٪) با حداقل اغتشاش (۳/۹۷g/s) به‌عنوان طراحی بهینه به دست آمد. اما همچنان چگونگی طراحی سیستم راهگاهی برای این زمان بارریزی بهینه جای بحث دارد. شکل (۱۲)، طراحی‌های بهینه به‌دست‌آمده از سعی و خطاها را نشان می‌دهد. نمونه مشابه این طرح‌ها در منبع [۱۲] نیز معرفی‌شده است، که البته برای قطعات چدنی است، اما اینکه کدام‌یک بر دیگری برتری دارد نیاز به بحث و تحلیل دارد. در طرح الف با دو حلقه مذاب توسط شش راهبار با شکل خاص، و همچنین شش راهباره، مذاب از راهگاه به قطعه هدایت می‌شود.

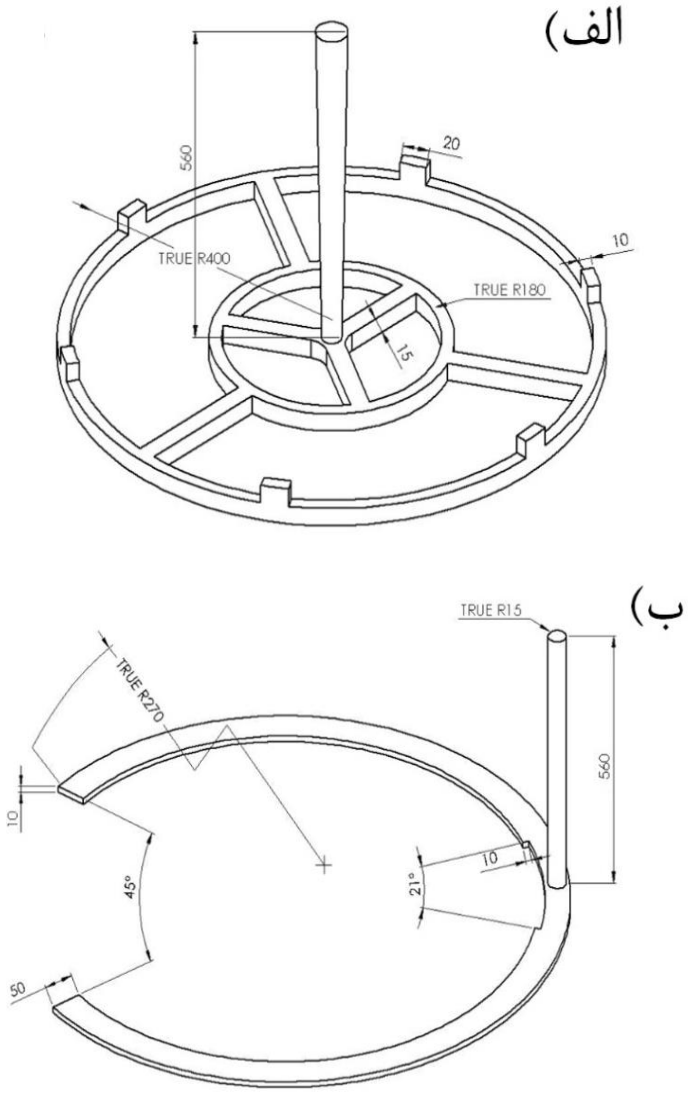
این نوع نحوه اتصالات سبب عدم افت فشار در راهباره‌ها شده و مذاب به‌طور پیوسته و کامل همه طول مسیر سیستم راهگاهی را پر می‌کند. از طرفی، انتخاب یک راهباره نعل اسبی با زمان بارریزی ۱۳ ثانیه و ۲ راهباره، با این تفاوت که راهگاه در جانب و راهباره به‌صورت تیغه‌ای دوار –نعل اسبی- که از دو طرف به‌صورت محیطی با قطعه تماس داشته و چهارپنجم آن را پوشش می‌دهد.

برای جلوگیری از ورود مستقیم مذاب از راهگاه به قطعه در ابتدا راهبار با یک شیار نیز طراحی شد. البته با کاهش ضخامت راهبار قطعاً تنش سطحی تغییر کرده که این می‌تواند رفتار اغتشاشی مذاب برای پر کردن قالب را تحت تأثیر قرار دهد.

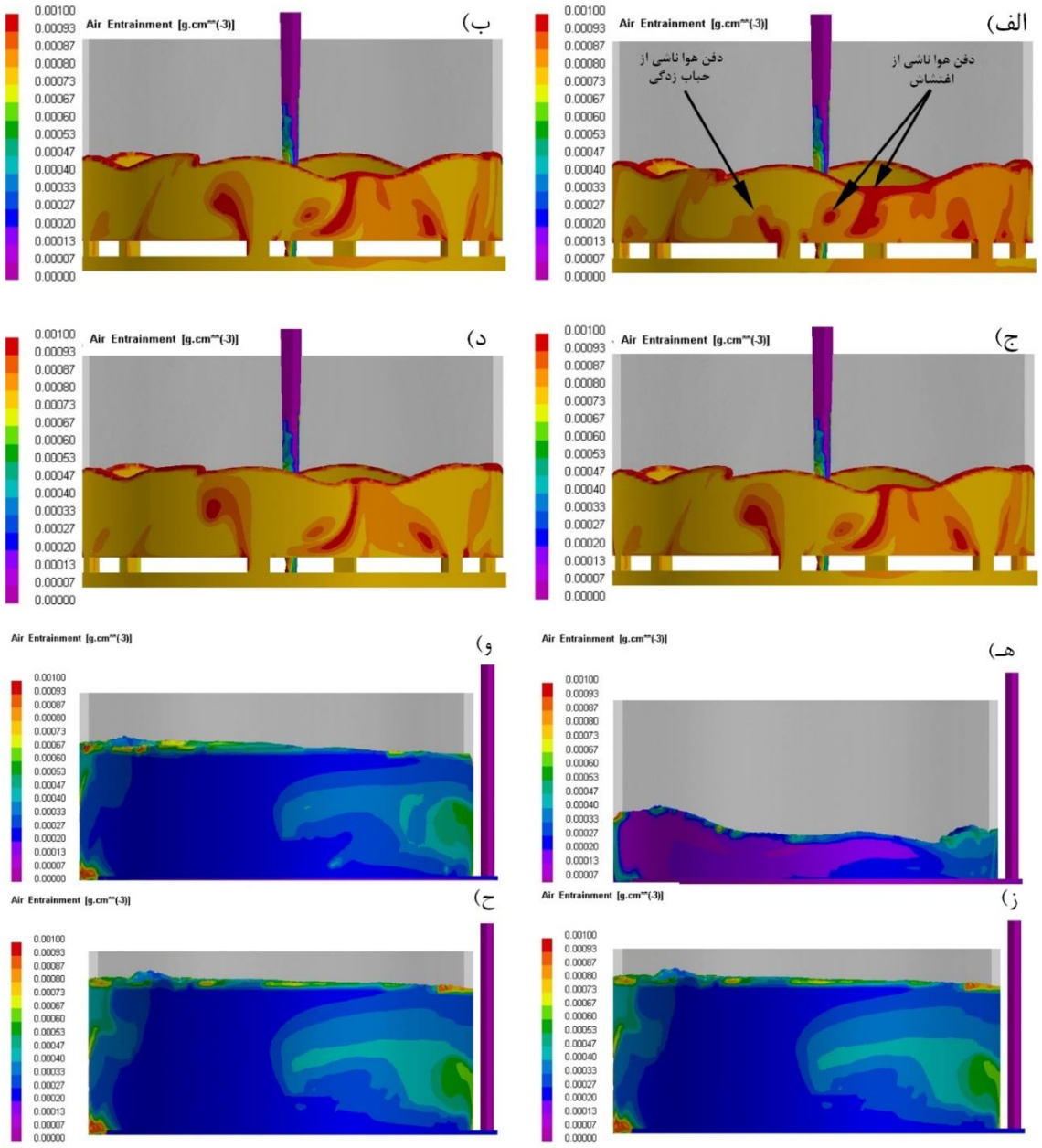
۴-۷- حباب زدگی

شکل (۱۳-الف)، دو منبع عمده تولید هوا برای دفن شدن در طراحی ۶ راهباره‌ای با زمان بارریزی بهینه۱۳ ثانیه را نشان می‌دهد. در هر دو طراحی، ابتدا مذاب از لوله راهگاه به‌صورت پیش‌فرض نرم‌افزار بدون هوای دفن شده، وارد قالب می‌شود. با توجه به طراحی صورت گرفته (شکل۱۲-الف) مذاب پس از رسیدن به راهباره‌ها حدود ۰/۰۰۰۸ گرم بر سانتیمتر مربع هوا در خود دفن می‌کند. این در حالی است که در طراحی با دو راهباره نعل اسبی، دفن هوا به‌طور میانگین ۰/۰۰۰۲۷ گرم بر سانتیمتر مربع است.

انقباض ونا در مسیر راهبار و قطعه باعث تولید گاز و به وجود آمدن عیب حباب زدگی شده است. در راهباره‌ها نیز این عیب به‌صورت جزئی قابل‌مشاهده است. جریان‌های متلاطم ورود یافته از راهباره ها سبب مکش هوا شده‌اند؛ شکل‌های (۱۳ الف) تا (۱۳-د) نحوه گیر افتادن آنها را نشان می‌دهد که با گذشت زمان بخشی از آن به سطح رسیده، و درنهایت ۰/۰۰۱ $^{g}/_{cm^3}$ هوا همچنان تا مراحل پایانی دوام آورده و دفن می‌شود.



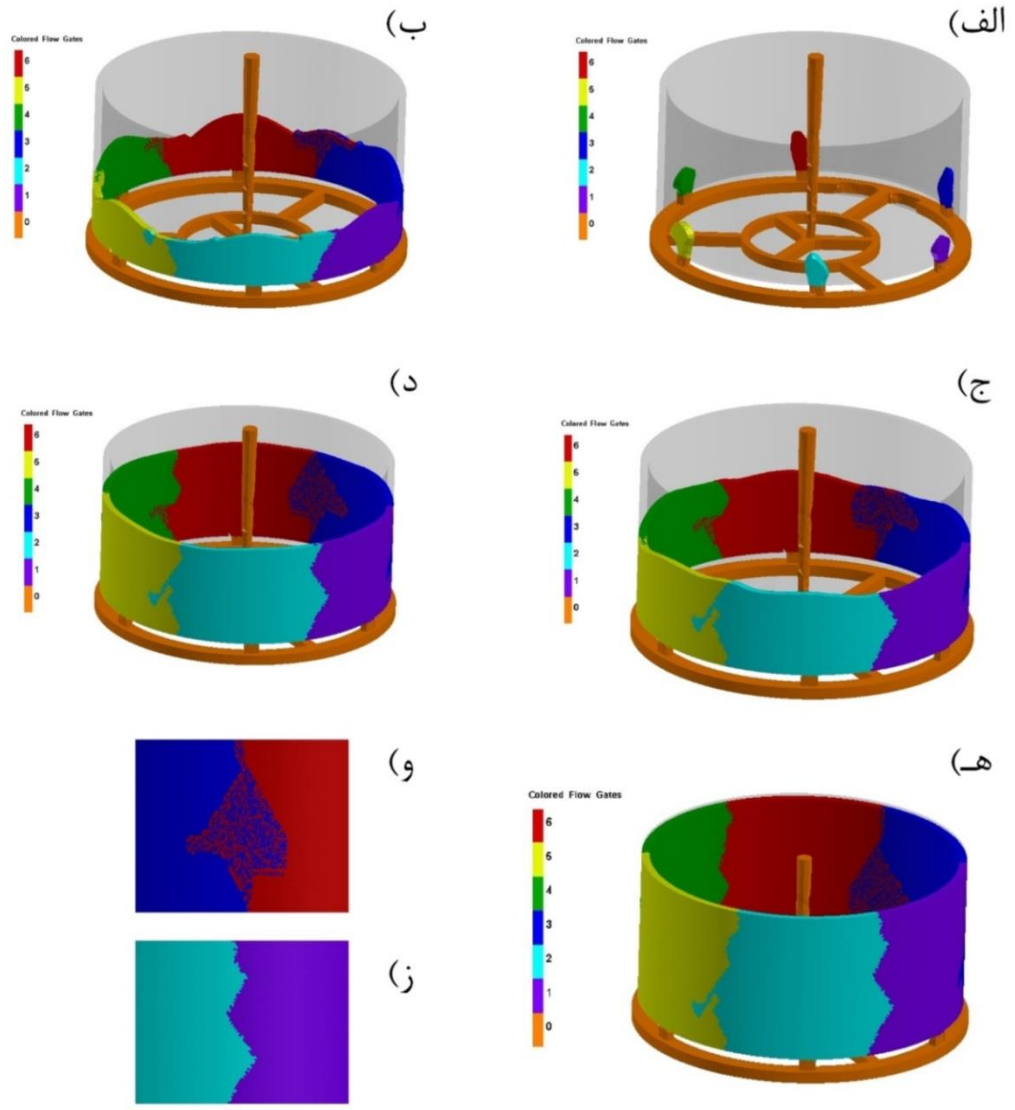
شکل ۱۲- طراحی‌های بهینه برای زمان بارریزی ۱۳ ثانیه: الف) ۶ راهباره و ب)۲راهباره نعل اسبی.



شکل ۱۳- هوای دفن شده بر حسب $^{g}/_{cm^3}$: الف- د) در طراحی با ۶ راهباره و زمان باراریزی۱۳ثانیه: مراحل دفن شدن هوای ناشی از عیب حباب زدگی و اغتشاش‌های سطحی، هـ-ح) در طراحی با راهباره نعل اسبی و زمان باراریزی۱۳ثانیه.

۴-۸- نمایش رنگی جریان‌های مذاب

فیلم‌های جامد سطحی- به خصوص در فلزاتی که سطح مذاب آنها یک فیلم اکسیدی خشک و غیرتر شونده دارد- نقش مهمی در کاهش قابلیت اعتماد قطعه ریختگی دارد. با تعیین رنگ جریان مذاب ورود یافته در هر راهباره، می‌توان به بررسی نحوه چگونگی ایجاد، برخورد و ادغام جبهه مذاب ایجادشده ناشی از هر راهباره پرداخت. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد به دلیل سرعت‌های کم مذاب درروش ریخته‌گری ماسه‌ای معمول مذاب‌های واردشده از هر راهباره به‌خوبی ادغام نمی‌شوند و افزایش تعداد راهباره‌ها به معنی تقسیم جریان به تعداد راهباره و در نتیجه وصله‌های ادغام نشده جریان است. شکل (۱۴)، وصله‌های رنگی جریان مذاب را برای قطعه طراحی شده با ۶ راهباره به نمایش می‌گذارد.



شکل ۱۴- وصله‌های رنگی جریان برای طراحی با ۶ راهباره و زمان بارریزی۱۳ثانیه: الف-هـ) نمایش چگونگی برخورد جبهه‌های مذاب ورود یافته از ۶ راهباره و ادغام آنها تا پایان بارریزی، و) اختلال نسبی در فصل مشترک مذاب‌های وارد شده از راهباره۳و۶، ز) فصل مشترک قابل تمیز در مذاب‌های واردشده از راهباره ۱ و ۲.

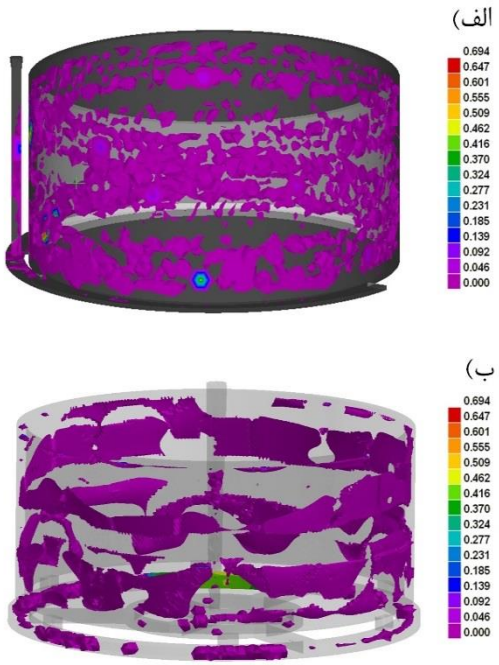
۴-۹- نرخ سرمایش و کسر جامد شده برای طراحی بهینه

در شکل (۱۵)، احتمال کشیدگی انقباضی برای طراحی مطابق شکل (۱۲) آمده است. با بهینه کردن زمان بارریزی احتمال و تعداد انقباض‌ها در مقایسه با شکل (۷) کاهش پیداکرده است. به نظر می‌رسد بخش اعظم این انقباض‌ها با داشتن مسیرهای مذاب رسانی و زمان کافی جبران شده‌اند. این شاید دلیلی بر ذوب‌ریزی آهسته ریخته‌گران سنتی باشد که قصد کاهش انقباض‌های حین انجماد و جبران آنها با انقباض مایع از مذاب رادارند. نمودار شکل (۱۶-ج) کسر جامد شده برحسب زمان را برای همان نقاط مشخص‌شده نشان می‌دهد. آخرین گره جامد شده از نقاط انتخابی در طراحی بهینه زمان ۶۷۰ ثانیه است که نشان می‌دهد احتمالاً فرصت بیشتری برای مذاب‌رسانی در چنین آلیاژی، با دامنه انجمادی متوسط، تأمین می‌شود. همچنین اصلاح راهباره به قطعه توسط راهباره تیغه‌ای و افزایش زمان بارریزی می‌تواند باعث کاهش نرخ سرمایش شود. شاید بتوان گفت زمان طولانی برای پر شدن به همراه یک سیستم راهگاهی کف ریز سبب اختلاط پیاپی مذاب حین فرایند انجماد می‌شود.

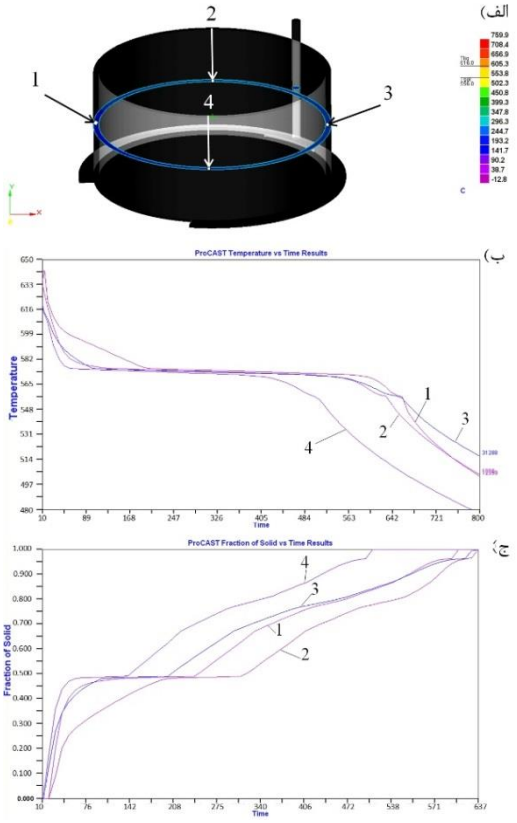
همانند شکل (۹)، نمودار سرعت مذاب در محور Y و نمودار بیشینه سرعت برای قطعه طراحی‌شده با زمان بارریزی ۱۳ ثانیه به‌دست آمده که کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه است. این موضوع بیانگر می‌کند که در این طراحی، قانون کلی سرعت خطی کمتر از نیم متر بر ثانیه رعایت شده است. به‌منظور

بررسی جزئیات نحوه پر شدن غیرتلاطمی در مراحل میانی پر شدن قالب، قسمتی از قطعه در امتداد راهباره برش خورده و با استفاده از نمودار سرعت در شکل (۱۷) به نمایش گذاشته شده است. شکل (۱۷-الف)، نمودار میانگین سرعت خطی راهباره در راستای محور Y را نشان می‌دهد که بیشینه سرعت میانگین در راهباره به $۰/۱۷ m.s^{-1}$ می‌رسد. مطابق نقشه رنگی سرعت در شکل (۱۷-الف)، بیشینه سرعت در برخی نواحی برای قطعه‌ای با زمان بارریزی ۱۳ ثانیه حدود $۰/۵ m.s^{-1}$ است.

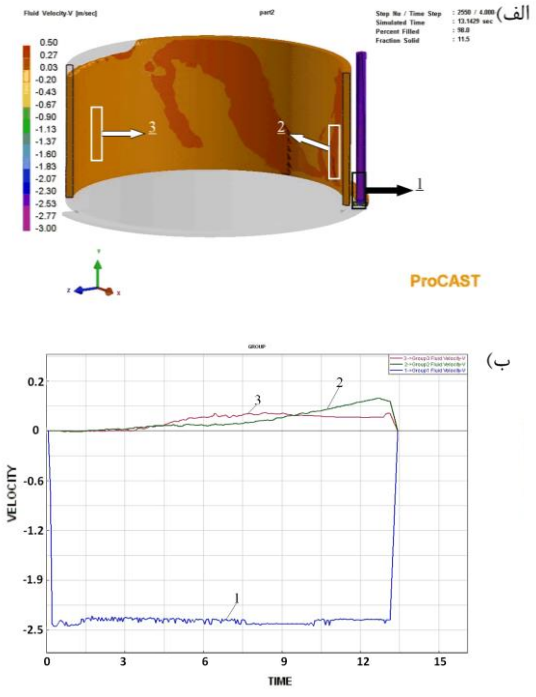
شکل (۱۸)، سطح آزاد واکنشی مذاب را حین فرایند پر شدن قالب در سه پاره زمانی برای طراحی با زمان بارریزی ۱۳ ثانیه و ۲ راهباره نعل اسبی نمایش می‌دهد. حرکت هم‌تراز سطح مذاب معرفی عملکرد صحیح راهباره برای کنترل اغتشاش و حداقل تلاطم حین پر شدن قطعه است. یک الگوی پر شدن صحیح در سیستم راهگاهی را می‌توان در این شکل مشاهده کرد. پر شدن آرام، یکنواخت و کامل بر تغذیه رسانی تقدم دارد که در اینجا این نیاز برآورده شده است. حرکت مذاب در یک تیغه نسبتاً نازک، سبب کنترل مذاب در مسیر راهباره می‌شود. تاخوردگی و دفن سطوح در این الگوی پر شدن، بسیار سخت و حتی غیرممکن است.



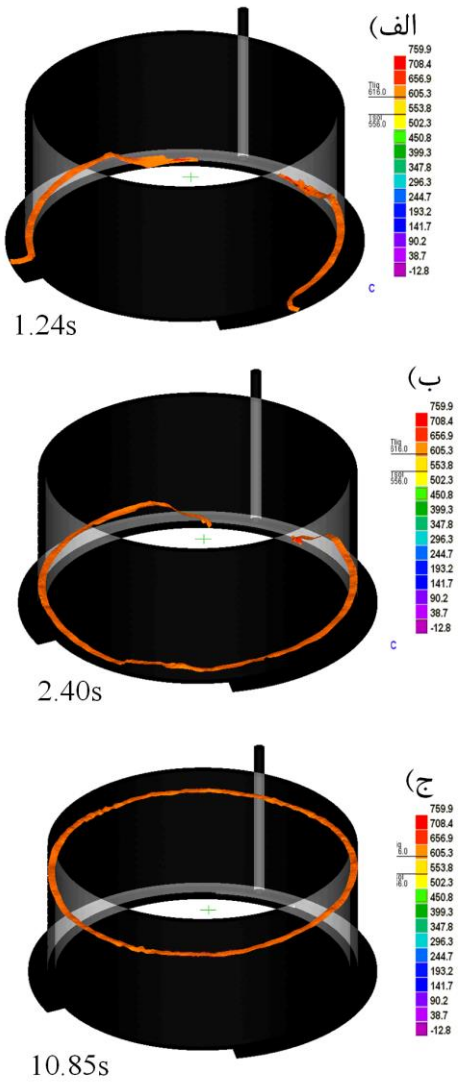
شکل ۱۵- احتمال کشیدگی انقباضی در سیستم راهگاهی طراحی‌شده با زمان بارریزی ۱۳ ثانیه در: الف)۲ راهباره نعل اسبی، ب) ۶ راهباره مدادی.



شکل ۱۶- الف) تصاویر پیمایش شده در قسمت میانی قطعه و محل نقاط انتخاب‌شده در طراحی با زمان بارریزی ۱۳ ثانیه و ۲ راهباره نعل اسبی، ب) نمودارهای دمایی نقاط انتخاب‌شده، ج) نمودارهای میزان کسر جامد شده-زمان (دما برحسب سانتی‌گراد و زمان برحسب ثانیه).



شکل ۱۷- الف) شکل نیم برش خورده از سرعت مذاب در راستای محور Y برای قطعه با زمان بارریزی۱۳ ثانیه، ب) نمودار میانگین گروه مکان‌های نشان داده‌شده در شکل-الف (سرعت برحسب متر برثانیه).



شکل ۱۸- رفتار سطح مذاب حین پر شدن در سه پاره زمانی- بر حسب ثانیه- برای طراحی با زمان بارریزی ۱۳ ثانیه حین پر شدن قالب.

۵- نتیجه‌گیری

۱- زمان بارریزی به‌عنوان اولین و مهم‌ترین گام طراحی سیستم راهگاهی می‌تواند در پر شدن کامل و صحیح و تغذیه‌رسانی نقش مهمی ایفا می‌کند. در این تحقیق زمان بارریزی ۱۳ ثانیه به عنوان زمان بهینه معرفی می‌شود.

۲- برای تخمین یا محاسبه زمان بارریزی با توجه به تنوع آلیاژی، ضخامت، پیچیدگی شکل قطعات، نوع سیستم راهگاهی و نحوه برخورد با قطعه مقدار بهینه‌ای وجود دارد که باید آن را در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مورد توجه قرار داد.

۳- تعداد، نوع تماس و محل تماس راهباره در اغتشاش سطح سیال دخیل است که در نتیجه بر شرایط عمومی سلامت و کیفیت قطعه تأثیر می‌گذارد. برای تعداد راهباره با توجه به طراحی، مقدار بهینه‌ای وجود دارد. همچنین مکان و نحوه اتصال راهباره نقش ویژه‌ای در تغذیه رسانی جامد دارد.

مراجع

[1] Campbell J., Casting practice: the 10 rules of casting, Oxford, Butterworth-Heinemann, 2004.
[2] Masoumi M., Hu H., Hedjazi J., Boutorabi S.M.A., Effect of gating design on mold filling, AFS Transactions, 2005, 2, 1-12.
[3] Flender E. Sturm J., Thirty years of casting process simulation thirty years of casting process simulation, International Journal of Metalcasting, 2010, 10, 7-23.
[4] Vijaya Ramnath B., Elanchezhian C., Chandrasekhar V., Arun Kumar A., Mohamed Asif S., Riyaz Mohamed G., Vinodh Raj D. Suresh Kumar C., Analysis and optimization of gating system for commutator end, Procedia Materials Science, 2014, 6, 1312-1328.
[5] Divandari M., Campbell J., Oxide film characteristics of Al–7Si–Mg alloy in dynamic conditions in casting, Int. J. Cast Met. Res, 2004, 17(3) 182–187.
[6] Sun Z., Hu H., Chen X., Numerical optimization of gating system parameters for a magnesium alloy casting with multiple performance characteristics, materials processing technology, 2008, 199, 256-264.
[7] Jain P.L., Principles of Foundry Technology, Tata McGraw-Hill, New Dlhi, 2003.
[8] Jafari H., Idris M. H., Ourdjini A., Farahany S., In situ melting and solidification assessment of AZ91D granules by computer-aided thermal analysis during investment casting process, Mater. Des, 2013, 50, 181-190.
[9] Dabade U.A., Bhedasgaonkar R.C., Casting defect analysis using design of experiments (DoE) and computer aided casting simulation technique, Proc. CIRP, 2013, 7, 616-621.
[10] Tsai D.C., Hwang W.S., Numerical simulation of solidification morphologies of Cu-0.6Cr casting alloy using modified cellular automaton model, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2010, 20, 1072-1077.
[11] Heisser C., Simulation in modern quality managment systems, AFS, 03, 1-11.
[۱۲] خسروی ر.، اصول طراحی سیستم‌های راهگاهی و تغذیه‌گذاری چدن‌ها، جامعه ریخته‌گران ایران، ۱۳۶۸.
[13] Rao T. V. R., Metal Casting Principles and Practice, K. K. Guta, New Delhi, 2003.
[14] Campbell J., Stop pouring start casting, Metalcasting, 2012, 12, 7-18.
[15] Chi Sun H., Sun Chao L., Analysis of interfacial heat transfer coefficient of green sand mold casting for aluminum and tin-lead alloys by using a lump capacitance method, Heat Transfer, 2007, 129, 595-600.
[16] Geiger G. H , Poirier D. R., Transport phenomena in materials processing, United States of America: TMS. Minerals Metals Materials, Canada, 1994.

[17] ProCAST Users Manual, V2016.1, ESI Group, 2016.
[18] Hsu F.Y., Jolly M. R., Campbell J., Vortex gate design for gravity casting, Cast Metals Research, 2006, 19(1) 38-44.
[19] Campbell J., Complete casting handbook, Sec. Edition Ed., Butterworth-Heinemann, London, 2015.
[20]Yeh C.P., Hwang W. S., Lin C. H., Process design optimization through Numerical experimentation for a Brake Disc Casting, Materials Transactions, 2008, 49(6) 1372-1379.
[۲۱] مدرسی ع.ر.، عیسی آبادی ق.، صفی خانی ع.، داودی س.ع.م.، مصطفی م.، بررسی ارتباط نوع طراحی راهباره بر تشکیل حفرات انقباضی در قطعه ریختگی چدن خاکستری مورد استفاده در صفحه فشار خودرو از طریق شبیه‌سازی با نرم‌افزار ESI ProCAST ، ریخته‌گری، ۱۳۹۴، ۳۴(۱۰۷)، ۷۲-۶۲.
[22] Shabestari S. G., Ghoncheh M. H., Momeni H., Evaluation of formation of intermetallic compounds in Al2024 alloy using thermal analysis technique, Thermochimica Acta, 2014, 589, 174-182.
[23] Lu S.L., Xiao F. R., Zhang S. J., Mao Y. W., Liao B., Simulation study on the centrifugal casting wet-type cylinder liner based on ProCAST, Applied Thermal Engineering, 2014, 73, 512-521.
[24] Kor J., Chen X., Hu H., Multi-objective optimal gating and riser design for metal-casting, in IEEE International Symposium on Intelligent Control, Saint Petersburg, Russia, July-2009.
[25] Nandi T., Optimization of riser size of aluminium alloy (LM6) castings by using conventional method and computer simulation technique, Scientific & Engineering Research, 2011, 2, 2229-5518.
[۲۶] خوشخرام ع.، دیواندری م.، بوترابی س. م. ع.، شبیه‌سازی اثر طراحی سیستم‌های کف‌ریز مختلف بر نحوه حرکت سیال و شرایط انجماد قطعه ریختگی، ریخته‌گری، ۱۳۹۳، ۳۲، ۱۷-۳۲.