



## چهارمین دوره مسابقات سراسری ریخته‌گری دانشجویان کشور دانشگاه صنعتی اصفهان

I

گزارش مرحله مقدماتی چهارمین دوره مسابقات سراسری ریخته‌گری دانشجویان کشور

سوال ریخته‌گری	
نام تیم شرکت کننده	دانشگاه صنعتی فولاد
نام دانشگاه	موسسه آموزش عالی صنعتی فولاد
نام سرپرست تیم	مریم موسوی
شماره تلفن همراه	۰۹۳۸۷۶۷۵۰۲۵
پست الکترونیک	Blue.eyes_gh70@yahoo.com

لطفا در این قسمت چیزی ننویسید.	
کد گروه	2013

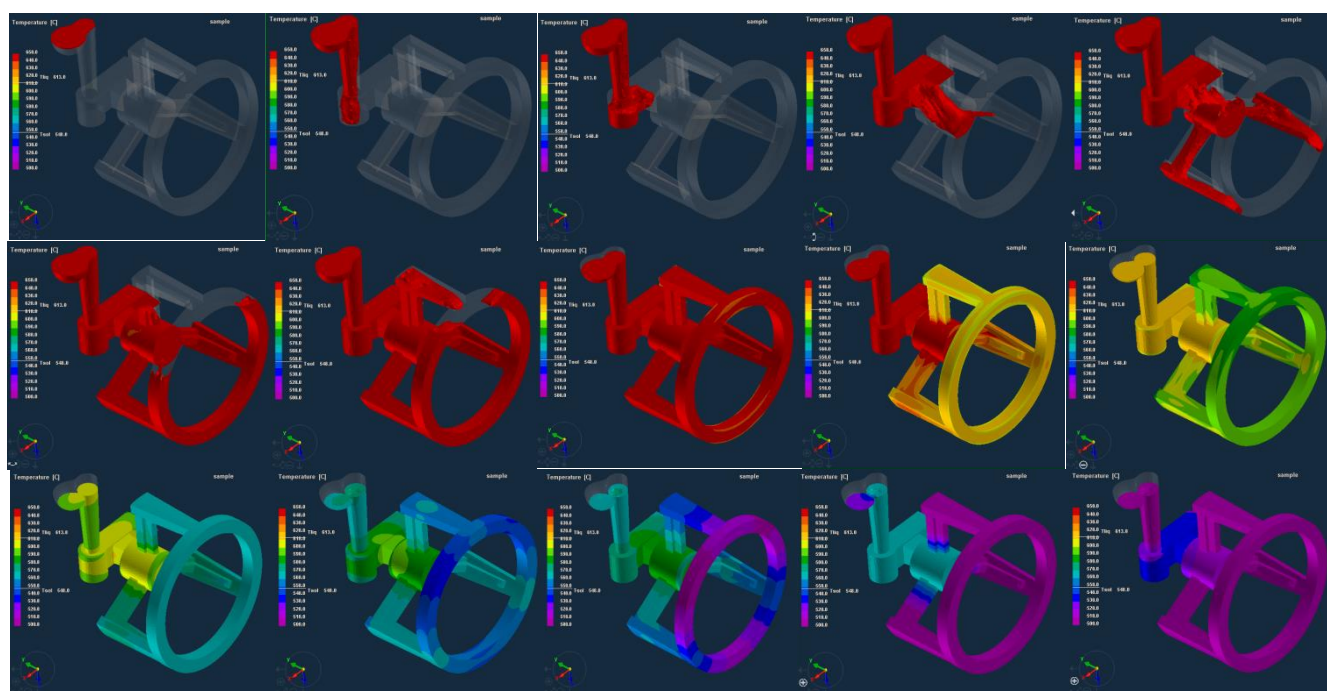
## ۱- خلاصه طرح

آلیاژ آلومینیم A۳۵۶ دارای نقطه ذوب ۶۱۰ درجه سانتی‌گراد، هدایت حرارتی ۰/۲۶ کالری بر سانتی‌متر، وزن مخصوص ۲/۶۹ و دانسیته ۲۷۱۳ کیلوگرم بر مترمکعب، یکی از آلیاژهای پرکاربرد ریخته‌گری از گروه آلیاژی ۳xx است و قابلیت عملیات حرارتی را دارد. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم A۳۵۶ در جدول ۱-۱ نشان داده شده است [۱]. از خصوصیات این آلیاژ می‌توان به مقاومت پایین نسبت به ترک گرم، استحکام بالا، سیالیت بالا و مقاومت به خوردگی متوسط اشاره کرد. در این طرح قالب به صورت افقی و مدل سه تکه به اضافه ماهیچه دو قسمتی دور راهگاه طراحی شده است. برای مسیر راهگاه از دو قسمت ماهیچه که توسط ماسه سیلیسی با چسب سیلیکات سدیم ایجاد شده‌اند بهره گرفته شده است. نحوه ساخت مدل به گونه‌ای است که نقشه مدل را به دستگاه CNC داده و توسط ماشین‌کاری کلیه اجزاء مدل آماده می‌شود. مدل از جنس Al-Si است که خود دارای مزیت‌های از جمله؛ مقاومت به خوردگی بسیار بالا در برابر مواد قالب‌گیری و ماسه، ریخته‌گری و ماشین‌کاری آسان، انقباض و انبساط بسیار پایین و ایجاد دقت ابعادی بالا هستند.

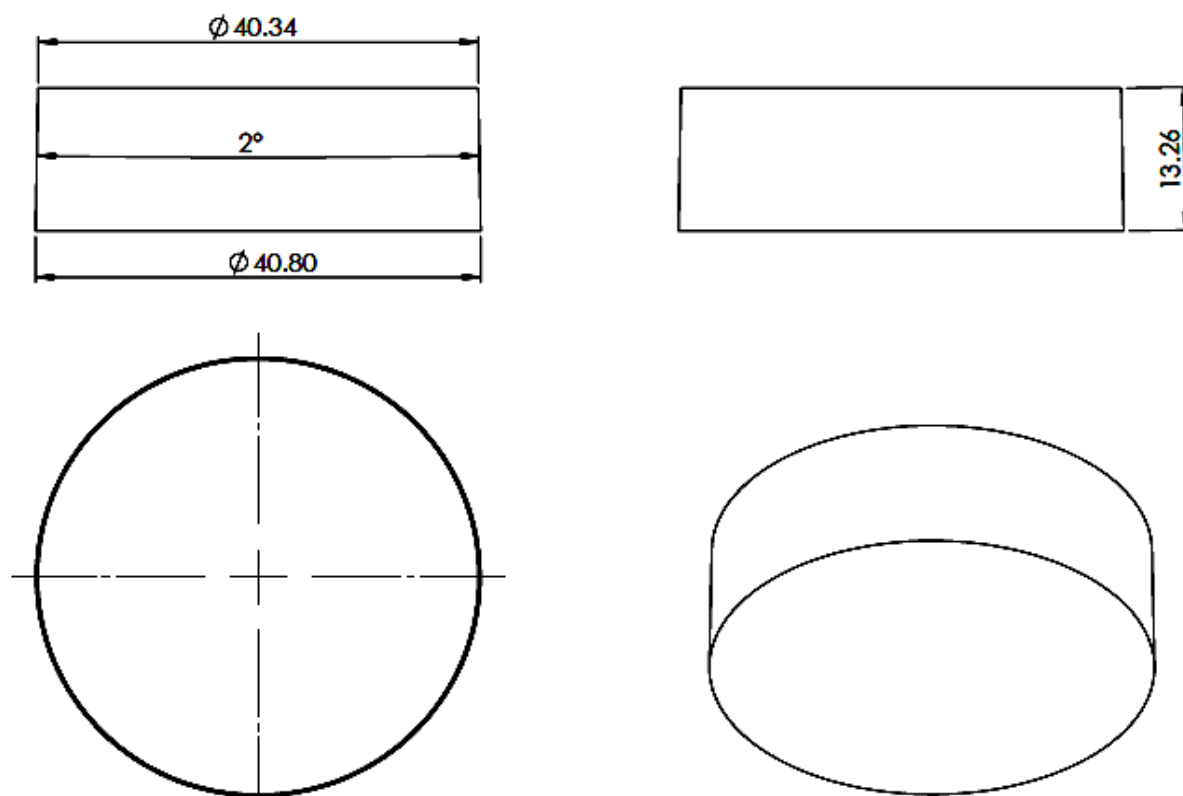
جدول ۱-۱- محدوده ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم A۳۵۶ برحسب درصد وزنی [۲].

عنصر	منگنز	مس	آهن	تیتانیوم	روی	منیزیم	سیلیسیم	آلومینیم
مقدار	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۳۵	۰/۴-۰/۲۵	۷/۵-۶/۵	باقی‌مانده

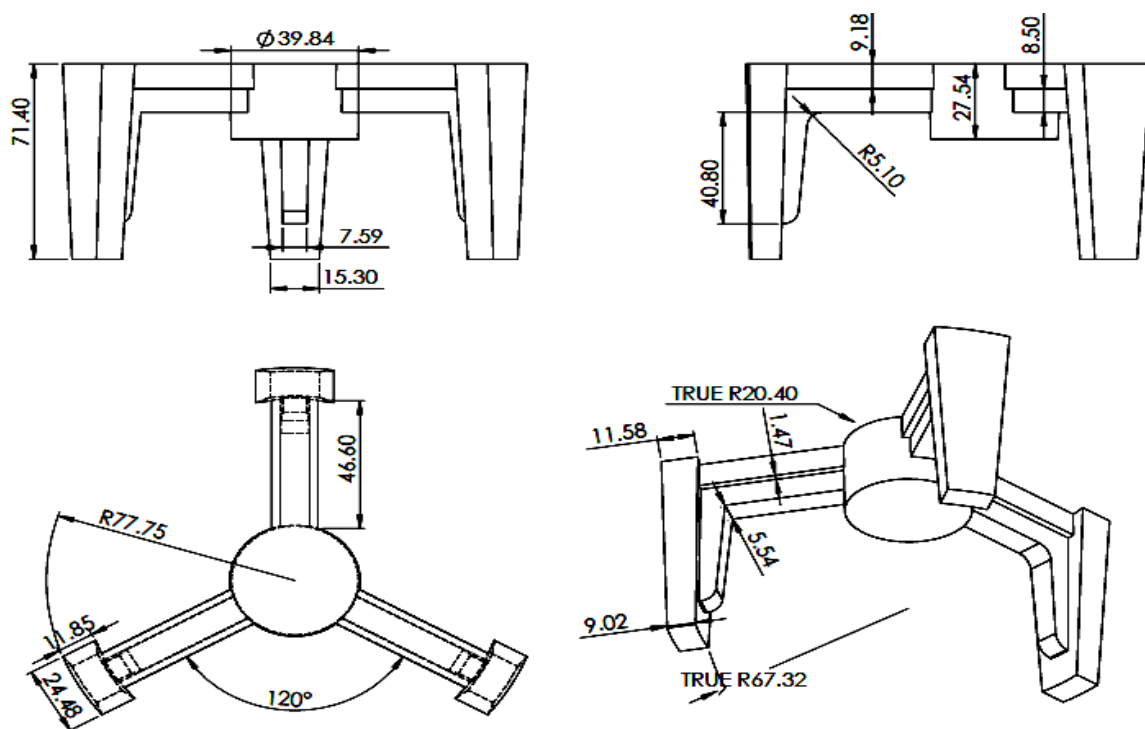
برای ذوب کردن آلیاژ آلومینیم A۳۵۶ از یک کوره زمینی بوته متحرک، با سوخت گازوئیل یا گاز متان، و با محیط اکسیدان مورد نیاز است. برای انجام گاززدایی و عملیات کیفی روی مذاب آلومینیم A۳۵۶، بهترین روش استفاده از گاز بی‌اثر آرگون جهت افزایش فشار داخلی و کاهش فشار خارجی است (در غیر این صورت می‌توان از قرص دگازور استفاده کرد). جهت انجام عملیات اکسیژن‌زدایی می‌توان از فلاکس های پوششی و یا پودر کاورال استفاده کرد که به ترتیب اکسیژن‌زدایی مکانیکی و شیمیایی نام دارند. پس از ذوب آلیاژ مورد نظر جهت بهبود خواص مکانیکی و همچنین همگن‌شدن ساختار از جوانه‌زای تیتانیوم و یا قرص جوانه‌زای M۱۱ (Na<sub>۲</sub>AlF<sub>۶</sub>) استفاده می‌شود. باید همواره دقت داشته باشیم که جوانه‌زایی باید در مراحل پایانی انجام شود تا از میرایی آن جلوگیری به عمل آید. در پایان اصلاح فاز دوم توسط افزودن فلوئور سدیم (NaF) یا کلرید سدیم (NaCl) باید انجام پذیرد. قبل از ریختن مذاب به درون قالب باید دما کنترل شود. دمای ذوب برای آلیاژ آلومینیم A۳۵۶ حدود ۶۱۰ درجه سانتی‌گراد است. دمای فوق ذوب برای این آلیاژ بین ۵۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود و با توجه به ضخامت کم مدل دمای ریختن آلیاژ باید به ۶۶۰ الی ۶۸۰ درجه سانتی‌گراد برسد. در پایان جهت بهبود خواص مکانیکی، یکنواختی در اندازه ذرات فاز دوم و جلوگیری از ورود آخال به درون قالب از یک فیلتر الیفای یا فومی ۳۰ppi در امتداد سیستم راهگاهی استفاده می‌شود. زمان ریخته‌گری برای این قطعه ۳ ثانیه و سرعت بارریزی ۰/۲۲ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شده است. در طی فرایند ریختن مذاب به درون قالب، همواره باید لوله راهگاه و حوضچه بارریز پر باشند. در طراحی سیستم راهگاهی باید همواره دقت شود تا مذاب با تلاطم کمی وارد قالب شده و همچنین آخال و یا سرباره وارد قالب نشود. سیستم راهگاهی در این آلیاژ از نوع غیرفشاری - فشاری با نسبت ۱:۳:۲ انتخاب شد به دلیل اینکه همین سیستم به عنوان تغذیه هم عمل کرده و کشیدگی استوانه راجبران می‌کند. برای جهت‌دارشدن انجماد و ریخته‌گری قطعه بدون کشیدگی و حفره انقباضی از یک مبرد فولادی (ضخامت ۲-۳ سانتی‌متری) تمیز و عاری از زنگ‌زدگی و آلودگی در پشت استوانه ۴۰ میلی‌متری استفاده شد. شبیه‌سازی توسط نرم افزار پروکست ۲۰۱۳ برای این آلیاژ انجام شده و نتایج آن از شروع ریخته‌گری تا پایان آن در شکل ۱-۱ آورده شده است. در شکل‌های ۲-۱ تا ۵-۱ نقشه مکانیکی مدل‌سازی همراه با اعمال ۲ درصد انقباض و شیب نشان داده شده است. با توجه به تصاویر مدل به سه قسمت (مدل سه تکه) تقسیم شده است.



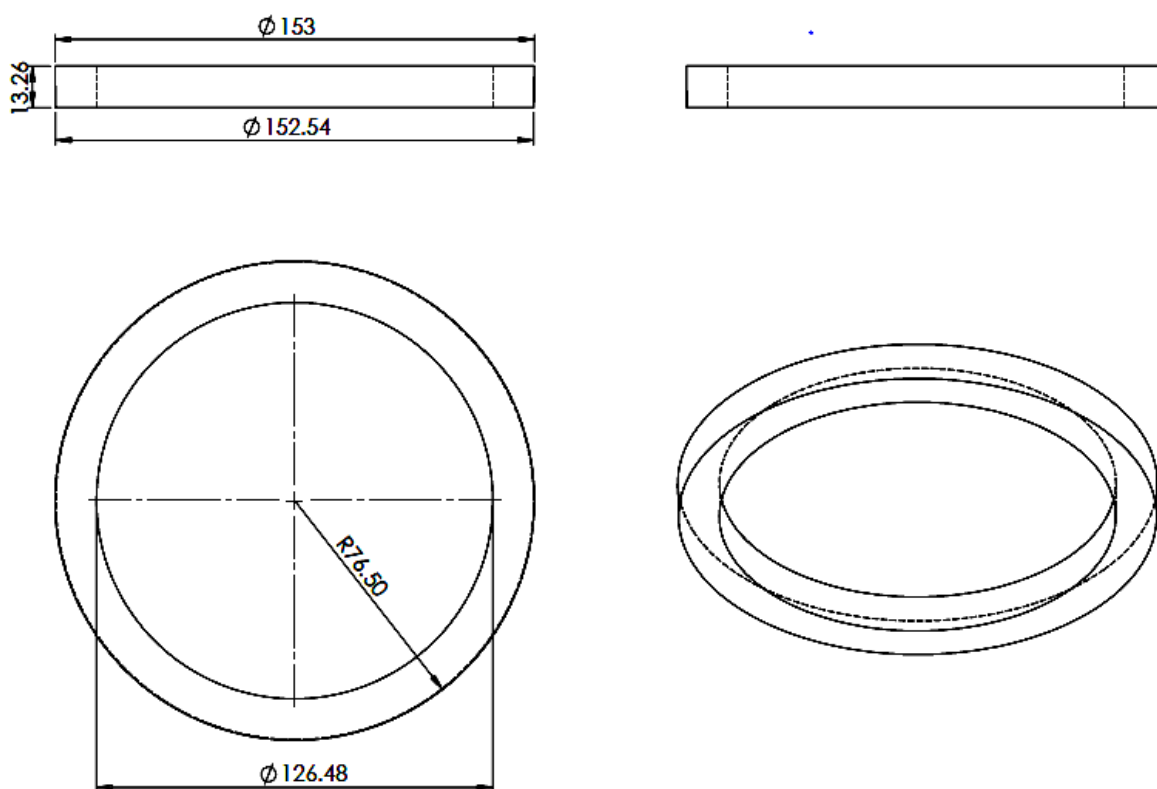
شکل ۱-۱- مراحل شبیه‌سازی ریخته‌گری قطعه مورد نظر توسط نرم افزار 9 Visual Environment و 2013 procast.



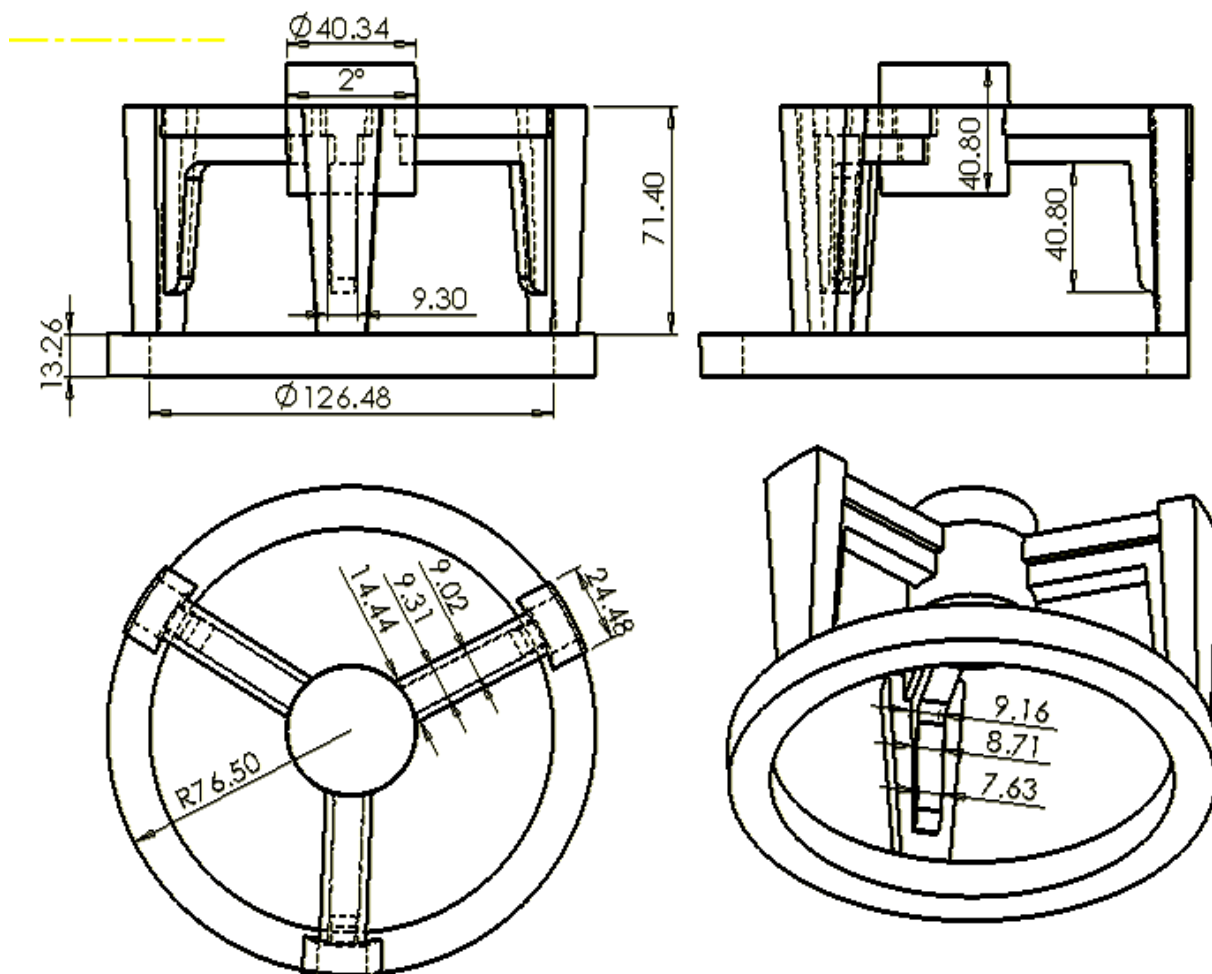
شکل ۲-۱ - نقشه مکانیکی مدلسازی قسمت شماره ۳ مدل (نیم استوانه ی بالایی) همراه با شیب و اعمال ۲ درصد انقباض



شکل ۱-۳- نقشه مکانیکی مدلسازی قسمت شماره ۲ مدل (تیغه ها و نیم استوانه پایینی) همراه با شیب و اعمال ۲ درصد انقباض



شکل ۱-۴- نقشه مکانیکی مدلسازی قسمت شماره ۱ مدل (طوقه) همراه با شیب و اعمال ۲ درصد انقباض



شکل ۱-۵- نقشه مکانیکی مدل‌سازی مونتاژ شده ی مدل‌ها اعمال شیب و ۲ درصد انقباض

## ۲- جزئیات طراحی اجزاء مدل و قالب

باتوجه به پارامترهای زیر باید سیستم راهگامی و تغذیه را محاسبه و طراحی کرد [۳].

۱. نوع انجماد (خمیری، پسته‌ای و میانی بودن انجماد که با سیالیت رابطه دارند).

۲. انتخاب سطح جدایش (بسته به قرار گرفتن مدل در درجه بالایی و یا پایینی رابطه سطح تنگه تغییر می‌کند که در این مدل نیمی از قطعه بالاتر از کانال فرعی و نیمی از قطعه پایین کانال فرعی قرار دارد).

۳. اندازه، شکل و ضخامت مدل (روی تعداد و شکل کانال‌های اصلی و فرعی تاثیر بسزایی دارد).

۴. وزن مخصوص و سایر عوامل دیگر.

برای محاسبه سیستم راهگامی باید ابتدا مقادیر سطح و حجم قطعه را محاسبه کنیم. نرم‌افزار کتیا این مقادیر را به‌صورت دقیق به ما خواهد داد که در زیر آورده شده است. جواب نهایی محاسبات انجام شده جهت ابعاد سیستم راهگامی در جدول ۱-۲ آمده است.

- سطح کل قطعه برحسب سانتی متر مربع با سیستم راهگامی و اعمال شیب و اضافه تراش: ۶۷۸ سانتی متر مربع
- حجم کل قطعه برحسب سانتی متر مکعب با سیستم راهگامی اعمال شیب و اضافه تراش: ۲۳۷ سانتی متر مکعب
- وزن کل قطعه برحسب سانتی متر مربع با سیستم راهگامی اعمال شیب و اضافه تراش: ۷۳۷ گرم
- سطح کل قطعه برحسب سانتی متر مربع بدون سیستم راهگامی و بدون اعمال شیب و اضافه تراش: ۵۱۴ سانتی متر مربع
- حجم کل قطعه برحسب سانتی متر مکعب بدون سیستم راهگامی و بدون اعمال شیب و اضافه تراش: ۱۹۱ سانتی متر مکعب
- وزن کل قطعه برحسب سانتی متر مربع بدون سیستم راهگامی و بدون اعمال شیب و اضافه تراش: ۵۱۷ گرم

جدول ۱-۲- ابعاد و اندازه محاسبه شده برای اجزاء مختلف سیستم راهگامی [۳ و ۸].

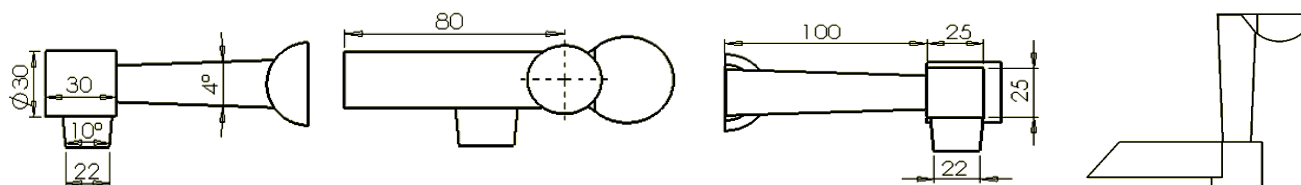
ردیف	عنوان	توضیحات	مقدار
۱	$\mu$	ضریب ریخته‌گری	۰/۲
۲	$V_d$	حجم قطعه در درجه زیری (پایین تر از کانال فرعی)	۱۰۷ سانتی متر مکعب
۳	$V_c$	حجم قطعه در درجه بالایی (بالتر از کانال فرعی)	۸۵ سانتی متر مکعب
۴	$H$	ارتفاع سیستم راهگامی (لوله راهگاه)	۱۲ سانتی متر
۵	$L$	ارتفاع درجه رویی	۱۰ سانتی متر
۶	$A_c$	$A_c = \frac{1}{\mu t \sqrt{2g}} \left[ \frac{V_d}{\sqrt{H}} + 1.5L \frac{V_c}{\sqrt{H^3 - (H-L)^3}} \right]$ سطح تنگه	۲/۶ سانتی متر مربع
۷	$A_g$	سطح کانال فرعی ( $A_g = 5.2X^2$ )	$X = 2/2$  ابعاد کانال فرعی (سانتی متر)
۸	$A_r$	سطح کانال اصلی ( $A_g = 6.2X^2$ )	$X = 2/5$  ابعاد کانال اصلی (سانتی متر)



لوله راهگاهی با قطر ۱,۷ سانتی‌متر	سطح لوله راهگاه	$A_s$	۹
۷۰/۱ درصد	راندمان ریخته‌گری $100 * (517 / 737) (R_c = )$	$R_c$	۱۰

## ۲-۱- طراحی سیستم راهگاهی و تغذیه‌گذاری

طراحی سیستم راهگاهی و تغذیه‌گذاری یک امر مهم و لازم در ریخته‌گری قطعات محسوب می‌شود. طبق اصول طراحی سیستم راهگاهی اجزای اصلی یک سیستم راهگاهی استاندارد شامل؛ حوضچه بارریز، لوله راهگاه، حوضچه پای راهگاه، کانال اصلی و کانال فرعی است. عواملی چون شکل، نوع، تعداد، اندازه و مکان سیستم راهگاهی نیز در تولید یک قطعه عاری از عیب تاثیر گذارند. پیش‌تر در مورد شکل، اندازه و نوع سیستم راهگاهی بحث و بررسی شد. در این قسمت به بررسی تعداد و مکان سیستم راهگاهی و تغذیه می‌پردازیم. در ابتدا باید گفت که، مکان سیستم راهگاهی به اندازه قابل توجهی به سطح جدایش مدل بستگی دارد که در بخش بعدی در مورد انتخاب سطح جدایش توضیح داده خواهد شد. در ابتدا به طراحی حوضچه بارریز پرداخته می‌شود. حوضچه بارریز در آلومینیم و آلیاژهای آن از نوع گلابی شکل است که در بخش قالب‌گیری در مورد آن توضیح داده شده است [۵]. در این طرح نحوه قالب‌گیری به صورت افقی است بنابراین مشکل سقوط مذاب نخواهیم داشت. تنها مشکل ممکن در حالت افقی کشیدگی در قسمت استوانه و ترک گرم احتمالی در تیغه بالایی است (محل اتصال بازوها به استوانه) که برای حل این مشکل از راهگاه فرعی به نحوی هوشمندانه به عنوان تغذیه هم استفاده شده به این صورت که راهگاه اصلی و فرعی کمی بزرگ‌تر (نسبت سیستم راهگاهی ۱:۳:۲) در نظر گرفته شده تا علاوه بر جبران انقباض استوانه آخرین قسمتی باشد که سرد می‌شود. پس برای این طرح باید ذوب از استوانه به قالب وارد شده تا بدون هیچ تلاطمی قالب را پر کند و راهگاه فرعی و اصلی نقش تغذیه را برای جبران کشیدگی استوانه ایفا نماید. از طرفی کانال فرعی باید به قسمتی از قطعه متصل شود، که قابلیت برش کاری و تراش کاری داشته باشند. به عبارتی دیگر جداسازی سیستم راهگاهی از قطعه آسان باشد [۶]. محل سیستم راهگاهی به محیط کاری قطعه نیز ارتباط دارد؛ زیرا سیستم راهگاهی نباید در محلی طراحی شود که در آن ناحیه در محیط کاری تنش و یا سایش وجود داشته باشد. در شکل ۱-۶ طراحی سیستم راهگاهی برای این طرح آورده شده است. پس بسته به نوع تکنولوژی و طراحی موجود، تعداد هر یک از پارامترهای بالا متغیر است. در شکل مشاهده می‌شود که راهگاه جلوی استوانه به قطعه متصل شده است. این نقطه به این دلیل انتخاب شد تا ذوب گرم وارد قالب شده و تیغه نازک پایینی را پر کرده و از طرفی انجماد قطعه کاملاً جهت‌دار باشد و نیز جداسازی نهایی سیستم راهگاهی از قطعه آسان‌تر بوده و نیاز به تراش کاری چندانی نداشته باشد. در طراحی، سیستم راهگاهی غیرفشاری فشاری در نظر گرفته شده است تا در ابتدا تلاطم مذاب در کانال اصلی گرفته شود و سپس قطعه به طور کامل (نازک بودن قسمت‌هایی از قطعه) پر شود. در آلیاژهای آلومینیم، حوضچه بارریز را به شکل گلابی و لوله اصلی راهگاه را به شکل استوانه و با شیب ۱/۵ الی ۲ درجه‌ای مثبت در نظر گرفته می‌شود. حوضچه پای راهگاه جهت کاهش تلاطم مذاب در حال سقوط در پایین لوله راهگاه تعبیه می‌شود. عمق حوضچه پای راهگاه ۲ برابر عمق کانال اصلی و قطر آن ۱/۵ برابر قطر لوله راهگاه است. کف حوضچه پای راهگاه کاملاً تخت طراحی می‌شود تا از هرگونه تلاطم، ناشی از سقوط مذاب جلوگیری کند. با توجه به شکل ۱-۶ در انتهای کانال اصلی یک چاهک (یا دوزنقه) جهت محبوس کردن شلاکه‌ها و آخال تعبیه می‌شود تا جداسازی نهایی سیستم راهگاهی از قطعه آسان‌تر بوده و نیاز به تراش کاری چندانی نداشته باشد. از طرفی با ورود مذاب به درون قالب ذوب با سرعت وارد کانال اصلی شده و سپس به انتهای کانال اصلی برخورد کرده و آرام می‌شود و به کانال فرعی رفته و در نهایت قالب پر می‌شود. به دلیل ضخامت پایین قطعه و همین‌طور کم بودن منافذ خروج گاز در ماسه سیلیسی باید محلی برای خروج گاز در بالای قالب در نظر گرفته شود تا گازهای ایجاد شده در حین ریخته‌گری خارج شود (سیخ هوا). محفظه خروج گاز نباید مستقیماً به قطعه متصل باشند چون زیر آن در قطعه مک‌گازی ایجاد می‌شود.



شکل ۶-۱- نقشه مکانیکی از ابعاد مربوط به اجزاء مختلف سیستم راهگاہی در نماهای مختلف

۲-۲- طراحی و ساخت مدل و قالب

۲-۲-۱- عملیات مدل‌سازی

جهت ساخت مدل برای این قطعه روش‌های مختلفی وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها در زیر آورده شده است:

۱. ساخت مدل چوبی یا یونالیتی و سپس قالب‌گیری و ریخته‌گری آن توسط آلومینیم و تهیه مدل آلومینیمی. (مدل آلومینیمی توسط مدل چوبی ساخته شده و باید از محاسبه مجموع انقباضات طی مراحل ساخت در مدل چوبی استفاده شود تا هنگام تهیه مدل آلومینیمی درصدی از انقباض اعمال شده و پس از ریخته‌گری قطعه، درصد باقیمانده انقباض حاصل شود).

ساخت مدل آلومینیمی توسط دستگاه CNC. این روش برای ساخت مدل‌های چوبی نیز کاربرد دارد. (مدل‌سازی به این روش، گران قیمت بوده ولی در عوض ابعاد مدل در این روش بسیار دقیق هستند و از همه مهم‌تر زمان بسیار کمی صرف مدل‌سازی به روش CNC می‌شود). برای ساخت مدل چوبی باید به ترتیب زیر عمل کنیم:

۲. خراطی دوازده قطعه چوب (که هر چهار تکه مربوط به یکی از تیغه هاست) طبق نقشه که در آن اضافه برش، انقباض، شیب و سایر موارد در نظر گرفته شده سپس سمباده کاری تا رسیدن به ابعاد نهایی و چسباندن قطعات در نهایت تولید سه تیغه ی کامل.

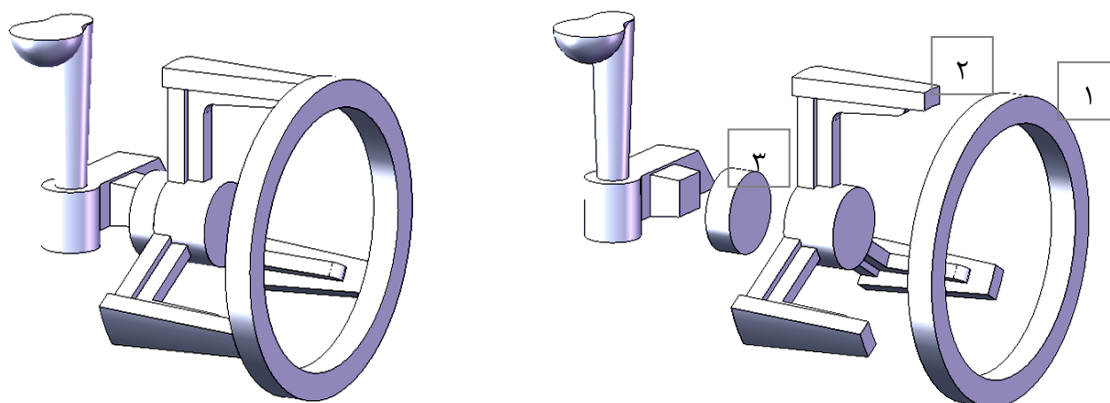
۳. خراطی طوقه و استوانه و رساندن آنها به ابعاد نهایی.

۴. ایجاد قسمت بالایی استوانه با توجه به سطح جدایش در نظر گرفته شده (در این طرح برای آسان شدن قالب‌گیری استوانه در دو درجه و به صورت دو تکه تعبیه شده است)

۵. چسباندن سه تیغه به قسمت پایینی استوانه با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به یکدیگر (تصویر نمادینی از قسمت‌های مختلف مدل در شکل ۱-۳ نشان داده شده است).

باتوجه به این که، محاسبات مربوط به سیستم راهگاہی و طراحی سیستم راهگاہی انجام شد، نوبت به طراحی مدل و قالب می‌رسد. جهت انجام مدل‌سازی روی این قطعه ابتدا باید ۱/۲ درصد انقباض به قطعه اضافه شود [۷]. همچنین برای سهولت خروج مدل از قالب ۱/۵ درجه شیب مثبت به مدل داده می‌شود. در شکل ۱-۷ تصویری نمادین از مدل نشان داده شده است (پس از اعمال شیب، درصد انقباض و اضافه تراش مجاز). باتوجه به شکل دیده می‌شود که مدل به سه تکه تقسیم شده است. تکه شماره ۱ در قالب زیری، تکه ۲ در قالب میانی و تکه شماره ۳ همراه با راه گاه فرعی چوبی یا یونالیتی و راهگاه اصلی و ملحقات درخشت بالایی قرار می‌گیرند.



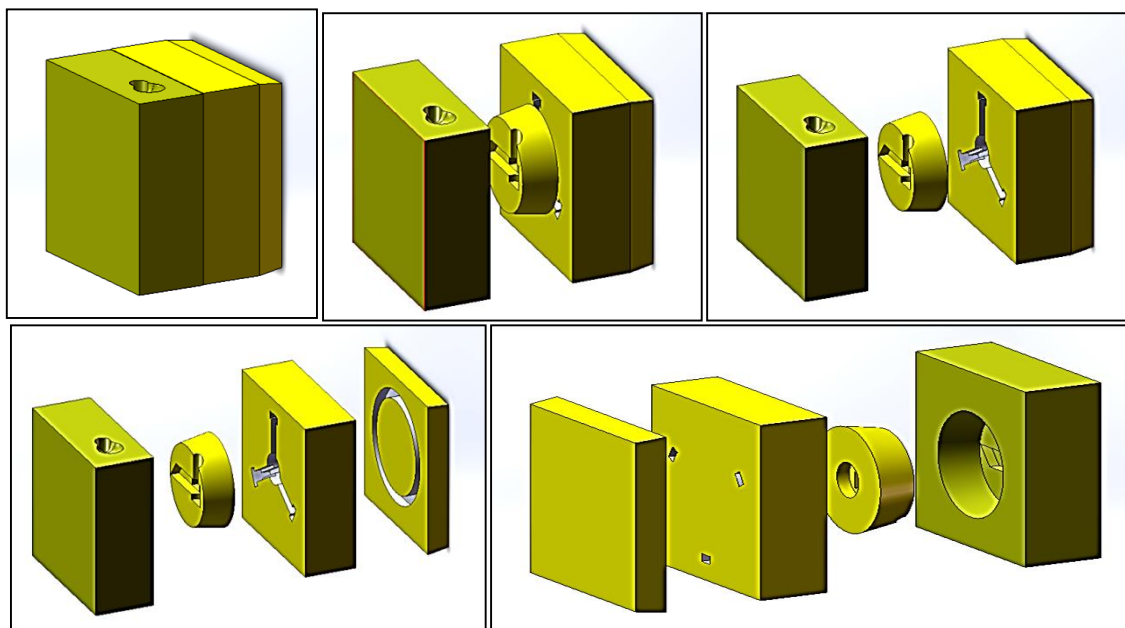


شکل ۱-۷- تصویر سه بعدی از قطعه به همراه سیستم راهگاهی ریخته‌گری شده به صورت افقی.

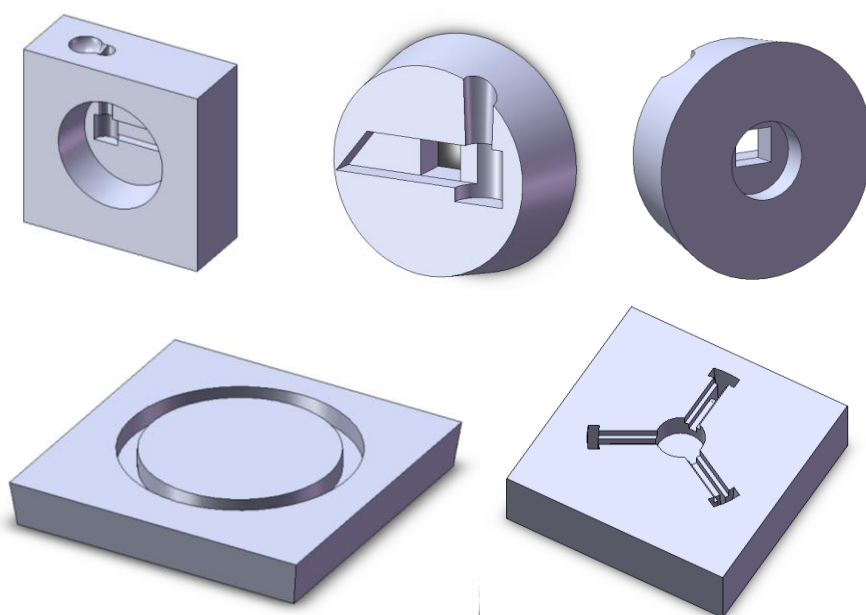
### ۳- عملیات مدل‌سازی، قالب‌گیری و ماهیچه سازی

مراحل قالب‌گیری به این صورت است که:

- با توجه به شکل ۱-۷ ابتدا تکه ۱ را درون درجه گذاشته و روی آن پودر می‌زنیم. سپس روی آن ماسه ریخته و آن را می‌کوبیم.
- پس از پایان کار درجه را برگردانده و روی آن را تمیز می‌کنیم. سطح را پودر زده و تکه‌ی ۲ را روی تکه ۱ جفت کرده فرایند قالب‌گیری را تکرار می‌کنیم (باید توجه کرد که در این مرحله باید یک مبرد ۲ تا ۳ سانتی‌متری در زیر استوانه ۴ سانتی متری متصل و ثابت شود تا از ایجاد حفره انقباضی احتمالی در قسمت استوانه ۴ سانتی‌متری جلوگیری و انجماد به سمت سیستم راهگاهی جهت‌دار شود).
- در مرحله بعدی تکه ۳ روی تکه ۲ جفت شده، پودر تالک می‌زنیم و دور مدل مقداری ماسه سیلیسی ریخته و با دقت با دست می‌فشاریم سپس تکه کوچک‌تر راهگاه را روی نیم استوانه بالایی سوار کرده سپس تکه چوب مربوط به راهگاه فرعی را روی آن فیکس کرده در نهایت اطراف این سه قسمت را با ماسه فیکس کرده و حوضچه پای راهگاه و راهگاه اصلی را اضافه می‌کنیم. (لازم به ذکر است که نصف لوله راهگاه و کانال اصلی به همراه کل کانال فرعی در خشت پایینی و نصف دیگر لوله راهگاه و کانال اصلی در خشت بالایی قرار می‌گیرد).
- در این مرحله دمیدن گاز  $CO_2$  به ماسه سیلیسی که حدود ۳/۵ درصد چسب سیلیکات سدیم دارد باعث خودگیری ماسه می‌شود. سپس خشت اول را پودر تالک می‌زنیم و سپس نیمه دوم خشت را قالب‌گیری کرده و فرایند را با دمیدن  $CO_2$  تکرار می‌کنیم. (ماسه اطراف راهگاه و قسمت سوم از جنس سیلیسی است که با ۳/۵ درصد چسب سیلیکات سدیم در مخلوط‌کن به‌طور کامل و یکنواخت مخلوط شده است طی این مراحل باید بین راهنما تعبیه شود تا در هنگام مونتاژ قالب به مشکل برنخوریم).
- پس از خشکیدن خشت دو قسمت خشت را جدا کرده تمام قسمت‌های مربوط به راهگاه و نیم استوانه بالایی را خارج می‌کنیم سپس مدل را لقی کرده و در ابتدا قسمت دوم و در نهایت طوقه را با دقت خارج می‌کنیم.
- سپس تمام قسمت‌های قالب را روی هم مونتاژ می‌کنیم، خشت را با گیره سفت می‌کنیم و در نهایت کل درجه هارا به پهلو چرخانده تا راهگاه اصلی به سمت بالا قرار گیرد و آماده ذوب‌ریزی شود. در شکل ۱-۸ اجزای قالب قبل و بعد از مونتاژ نمایش داده شده است.
- در قالب‌گیری قطر لوله راهگاهی و شکل آن بسیار حائز اهمیت است. در صورتی که شکل و قطر لوله راهگاهی مناسب نباشد، اکسیداسیون و جذب گاز در آلیاژ افزایش می‌یابد. جهت جلوگیری از اکسیداسیون و جذب گاز لوله راهگاه به شکل استوانه‌ای در نظر گرفته شده و به آن شبیه برابر ۱/۵ الی ۲ درجه اعمال می‌شود. حوضچه بار ریز برای آلومینیم و آلیاژهای آن باید از نوع گلابی شکل باشد. از خصوصیات این نوع حوضچه بارریز می‌توان به؛ آرام کردن مذاب حین ریخته‌گری و جلوگیری از سقوط ناگهانی مذاب به درون قالب اشاره کرد.



شکل ۸-۱- اجزای قالب به صورت مونتاژ و ديمونتاژ شده.

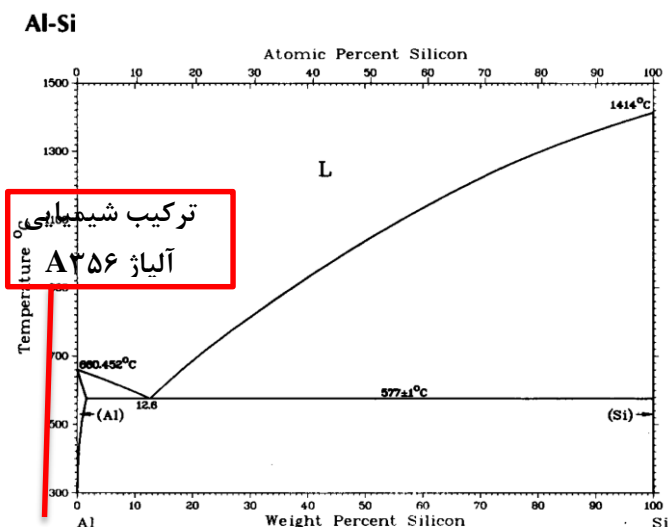


شکل ۹-۱- شماتیکی از اجزای قالب به صورت مجزا.

#### ۴- شرایط عملیات ذوب و ریخته‌گری

##### ۴-۱- عملیات ذوب و انجماد آلیاژ A۳۵۶

آلیاژ آلومینیم A۳۵۶ یکی از پرکاربردترین آلیاژها از گروه آلیاژی ۳XX است. عنصر غالب در این آلیاژ سیلیسیم بوده و محدوده ترکیب شیمیایی آن روی نمودار دوتایی آلومینیم - سیلیسیم مشخص شده است (شکل ۱-۱۰). در دیاگرام فازی آلومینیم- سیلیسیم یک تحول یوتکتیک در ترکیب شیمیایی حاوی ۱۲/۷ درصد سیلیسیم دیده می‌شود. با کاهش میزان سیلیسیم از ۱۲/۷ درصد، دامنه انجماد افزایش یافته و جبهه انجماد به صورت دندردیتی رشد می‌کند پس می‌توان نتیجه گرفت که انجماد آلیاژ A۳۵۶ به صورت دندردیتی بوده و تنها در قسمت‌هایی محدود ساختار یوتکتیکی مشاهده می‌شود است. پس می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش میزان سیلیسیم تا ۱۲/۷ درصد خواص مکانیکی افزایش یافته و در ادامه به دلیل ایجاد فاز دوم بلوکه‌ای شکل و درشت به عنوان فاز دوم، خواص مکانیکی کاهش می‌یابد. شکل ۱-۱۱ نمودارهای خواص مکانیکی را برحسب درصد وزنی سیلیسیم در آلیاژ آلومینیم- سیلیسیم آورده شده است [۳]. با توجه به نمودار دوتایی آلومینیم- سیلیسیم با افزایش دمای آلیاژ از دمای محیط، تا دمای ۵۷۷ درجه سانتی‌گراد، حلالیت سیلیسیم در آلومینیم از ۰/۰۵ به ۱/۶۷ درصد وزنی افزایش می‌یابد. با افزایش گرم کردن، اولین جوانه‌های مذاب در دمای ۵۶۰ درجه سانتی‌گراد ایجاد شده و در دمای ۶۱۵ درجه سانتی‌گراد ساختار کاملاً به مذاب تبدیل می‌شود. پس از تهیه مذاب و ریختن آن درون قالب، فرایند انجماد در قالب شروع می‌شود. با توجه به شکل ۱-۱۰ با کاهش دما و عبور از خط لیکوئیدوس، اولین جوانه‌های جامد  $\alpha$  در فاز مذاب ایجاد شده و با کاهش بیش‌تر دما ساختار کاملاً به جامد تبدیل شده و تحول یوتکتیک ایجاد می‌شود. در تحول یوتکتیک یک جامد به دو جامد دیگر تبدیل می‌شود ( $\alpha \rightarrow \beta + \gamma$ ). در این آلیاژ با انجام تحول یوتکتیک، محلول جامد سیلیسیم در آلومینیم به دو فاز جامد آلومینیم (زمینه) و سیلیسیم (ذرات سوزنی شکل) تبدیل می‌شود.

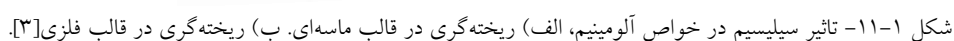


شکل ۱-۱- محدوده ترکیب شیمیایی آلیاژ A۳۵۶ روی نمودار دوتایی آلومینیم-سیلیسیم [۱۳].

با انجام تحول یوتکتیک، باتوجه به قوانین هیوم روتاری، سیلیسیم از انحلال خارج شده و تشکیل یک‌سری ذرات ریز سوزنی با توزیع یکنواخت را می‌دهد [۹]. باتوجه به قوانین ترمودینامیکی و خواص فیزیکی دو عنصر آلومینیم و سیلیسیم باید گفت که نفوذ سیلیسیم در آلومینیم در دامنه کوتاه رخ می‌دهد [۱۰ و ۱۱]. لذا سیلیسیم‌ها از انحلال خارج شده و در فواصل کوتاهی به هم رسیده و تشکیل تیغه‌های ریز، پراکنده و سوزنی شکل را می‌دهند که به ساختار یوتکتیک سوزنی معروف است [۱۲]. برای تعیین نوع انجماد برای آلیاژ A۳۵۶ (خمیری، پوسته‌ای و انجماد میانی) باید به فاصله دمایی بین خط سالیدوس و لیکوئیدوس توجه کرد که در زیر به‌اختصار آمده است.

۱. اگر تفاوت دمایی بین خط سالیدوس و لیکوئیدوس کمتر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد باشد، انجماد پوسته‌ای است.
۲. اگر تفاوت دمایی بین خط سالیدوس و لیکوئیدوس بیشتر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد و کمتر از ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد باشد انجماد میانی است (خمیری - پوسته‌ای).

۳. اگر تفاوت دمایی بین خط سالیدوس و لیکوئیدوس بیش‌تر از ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد باشد انجماد آلیاژ مورد نظر کاملاً خمیری است. در آلیاژ A۳۵۶ علاوه‌ی پارامترهای بالا عوامل دیگری نیز در تعیین نوع انجماد تاثیرگذار هستند. یکی از عوامل حضور عناصر آلیاژی در زمینه آلومینیمی است که باعث ایجاد جوانه‌های جامد در نقاط مختلف شده و به پراکنده شدن انجماد در آلیاژ منتهی می‌شود. به این صورت که، وجود عناصر مختلف در آلیاژ آلومینیم باعث ایجاد ترکیباتی بسیار سخت و با نقطه ذوب بسیار بالاتر از نقطه ذوب آلیاژ پایه می‌شود. این ترکیبات در آلیاژ به‌صورت معلق هستند و در نتیجه هسته‌های اولیه روی این ترکیبات جوانه‌زده و باعث پراکنده شدن جبهه انجماد می‌شوند. با استناد به این پارامترها و همین‌طور سایر پارامترهای دیگر می‌توان گفت که آلیاژ آلومینیم A۳۵۶ دارای انجماد میانی و متمایل به خمیری است. پس باتوجه به نوع انجماد در این آلیاژ محیط کوره به صورت اکسیدی انتخاب می‌شود.

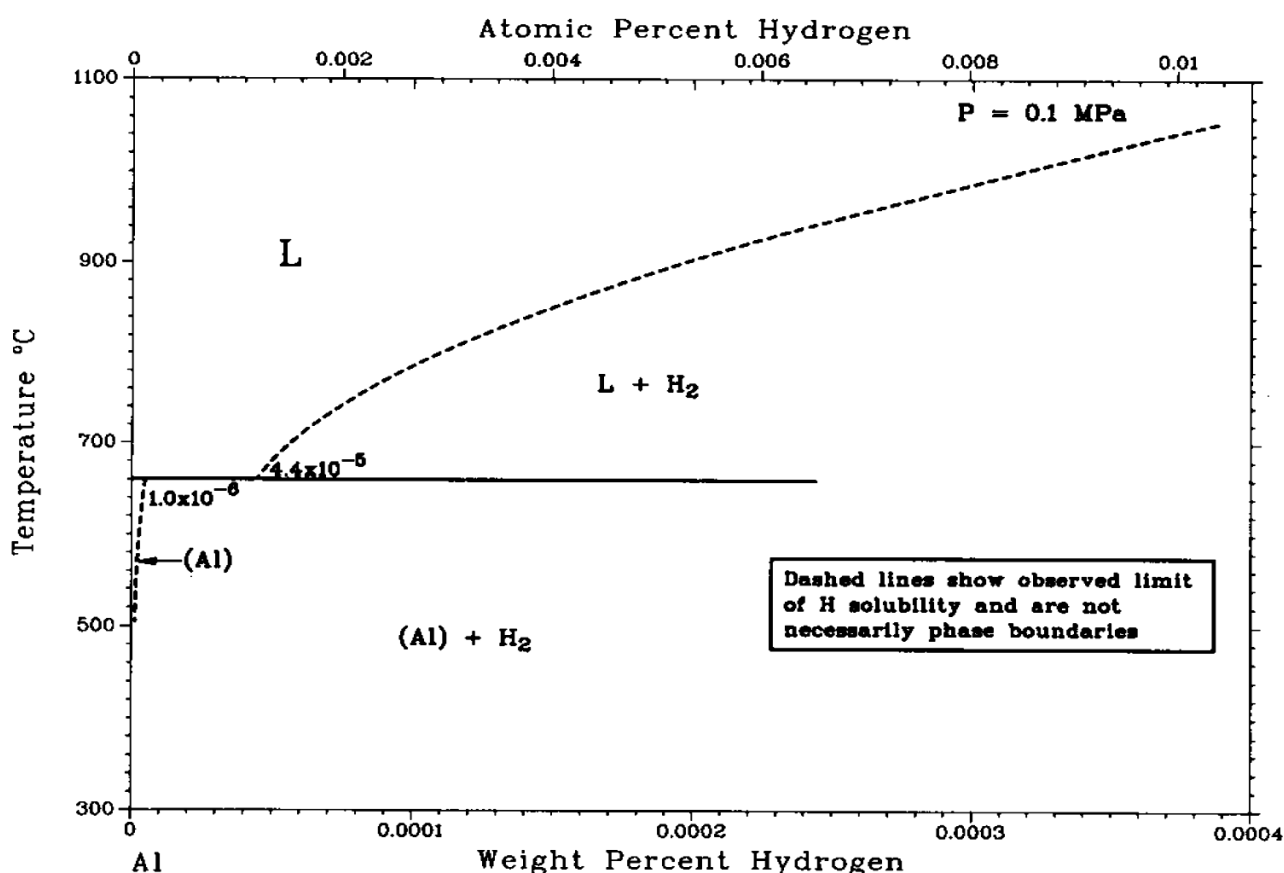


**نکته:** اگر کوره مورد استفاده برای ذوب آلومینیم از نوع القایی یا مقاومتی باشد باید جنس نسوز دیواره خنثی یا آلومینا در نظر گرفته شود.

**عملیات گاز زدایی (آخال زدایی):** برای انجام این عملیات دو روش وجود دارد. روش اول، شامل گاززدایی مکانیکی (استفاده از گاز بی اثر) و روش دوم گاز زدایی به صورت شیمیایی (استفاده از ترکیباتی که با ایجاد واکنش باعث خروج گاز از مذاب می شوند) است. البته روش سومی هم تحت عنوان ذوب در خلا وجود دارد (به دلیل گران قیمت بودن تجهیزات مقرون به صرفه نیست). مفیدترین و مناسب ترین نوع عملیات گاز زدایی روی آلیاژ آلومینیم  $Al_{306}$ ، گاز زدایی به روش مکانیکی است. در این روش گازی بی اثر نسبت به آلومینیم (گاز آرگون) با فشار ۳ اتمسفر به مدت ۳ الی ۴ دقیقه به داخل مذاب دمیده می شود. با انجام این کار فشار داخلی مذاب افزایش یافته و به کاهش فشار خارجی منتج می شود. در نهایت گاز موجود در مذاب خارج شده و میزان آن از  $0/34$  سانتی متر مکعب در  $100$  گرم به  $0/034$  سانتی متر مکعب می رسد. در شکل ۱-۱۲ نمودار فازی دوتایی آلومینیم- هیدروژن آورده شده است. با توجه به شکل با افزایش دمای آلومینیم از دمای محیط تا دمای  $900^{\circ}C$

۶۶۰ (در حالت جامد) حلالیت ناچیزی دارد اما با تبدیل آلیاژ آلومینیم از حالت جامد به حالت مایع حلالیت هیدروژن در آلومینیم به مقدار زیادی افزایش می‌یابد و گاززدایی یک امر مهم و الزامی در ریخته‌گری آلیاژهای آلومینیم محسوب می‌شود [۱۳]. در صورت عدم وجود تجهیزات جهت گاززدایی مکانیکی از گاززدایی به روش شیمیایی استفاده می‌شود. در گاززدایی به روش شیمیایی از قرص دگازور استفاده می‌شود (برای هر ۱۰۰ کیلوگرم ذوب آلومینیم یک قرص ۲۵۰ گرمی استفاده می‌شود و قابلیت استفاده قرص دگازور در آلیاژهای حاوی منیزیم وجود ندارد). در کل روش گاززدایی مکانیکی نسبت به شیمیایی تاثیر بهتری دارد. در عملیات هیدروژن زدایی و گاززدایی از ترکیبات کلردار و بخصوص  $C_2Cl_6$  استفاده بسیاری دارد که هنگام تبخیر و خروج آن از مذاب بسیاری از مواد غیرفلزی به سرباره می‌آید.

## Al-H



شکل ۱-۱۲- نمودار فازی دوتایی آلومینیم- هیدروژن برحسب درصد وزنی [۱۳].

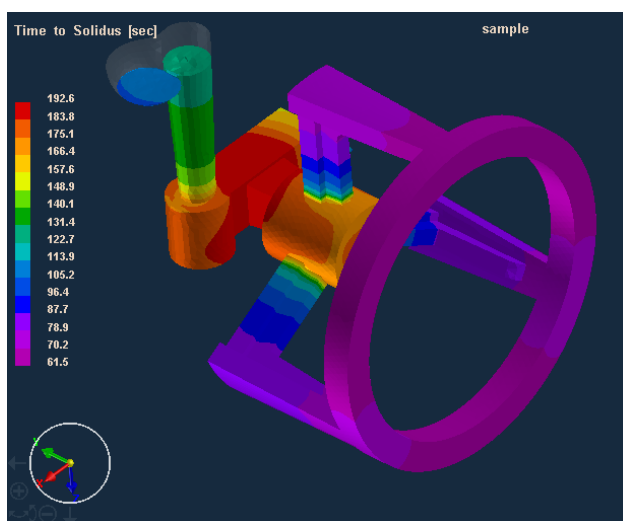
### ۵- سادگی، انجام پذیری، ابتکار و خلاقیت

در این بخش عواملی چون سادگی، انجام‌پذیری، ابتکار و خلاقیت به صورت موردی آورده شده است:

۱. در این طرح، طراحی سیستم راهگامی و مدل و قالب به گونه‌ای بوده است که قالب به راحتی و بدون نیاز به تغذیه‌گذاری پر شده (راندمان بالای ریخته‌گری) و منجمد می‌شود. در این قطعه از یک لوله راهگاه و یک کانال اصلی و فرعی بهره گرفته شد و کانال فرعی به صورتی روی استوانه تعبیه شده تا هم نقش تغذیه و هم راهگاه داشته و راندمان ریخته‌گری بیشترین مقدار باشد و پس از انجماد جدا کردن آن آسان باشد [۴]. پس در این طرح قالب‌گیری افقی به قالب‌گیری عمودی ترجیح داده شد.

۲. طبق شبیه‌سازی‌های انجام شده در حالت عمودی علاوه بر راندمان پایین و افزایش حجم سیستم راهگامی گریز از کشش در قسمت استوانه بدون تعبیه تغذیه تقریباً ناممکن است. در این طرح تدابیری اندیشیده شده تا از همان سیستم راهگامی برای جبران این

کشش استفاده کرده تلاطم را کم‌تر کنیم و باز هم با همه این شرایط راندمان از حالت عمودی بالاتر باشد. باتوجه به شکل ۱-۱۳ آخرین مکانی که منجمد می‌شود کانال فرعی و کانال اصلی است. پس عمل مذاب‌رسانی به قسمت استوانه ۴ سانتی متری توسط سیستم راهگاهی جبران می‌شود. از طرفی برای افزایش مدول حجمی در کانال اصلی و کانال فرعی از پوشش دایکت استفاده می‌شود تا بتوان زمان انجماد را در کانال فرعی و کانال اصلی افزایش داد. پوشش‌دهی توسط دایکت باید دو یا سه لایه روی هم انجام شود. از طرفی پوشش دایکت باعث کاهش عیب ماسه‌شویی و ماسه‌سوزی در سیستم راهگاهی می‌شود که به تولید قطعه‌ای عاری از عیب کمک می‌کند.



شکل ۱-۱۳- زمان انجماد برای قسمت‌های مختلف قطعه مورد نظر .

۳. در ریخته‌گری افقی ابتدا استوانه و تیغه‌ی پایینی به‌طور ملایم و بدون تلاطم پر شده در نهایت ذوب گرم وارد طوقه و تیغه بالایی می‌شود و در محل اتصال طوقه و تیغه بالایی بهم وصل می‌شود و شروع به سرد شدن و انجماد می‌کند و استوانه و راهگاه آخرین قسمتی است که منجمد می‌شود به‌همین دلیل هم قابلیت جبران کشیدگی و انقباض حین انجماد را دارد. تمامی مراحل مذکور طبق تصاویر شبیه‌سازی قابل رویت می‌باشد. در اصل ذوب سرد به‌سمت بالا حرکت کرده و ذوب گرم در پایین قالب وجود دارد. با توجه به تصاویر جبهه‌ی انجماد از دورترین نقطه به سیستم راهگاهی شروع شده و به داخل سیستم راهگاهی کشیده می‌شود. با این وجود کمبود مذاب ناشی از انقباض قطعه از درون سیستم راهگاهی جبران می‌شود و دیگر نیازی به تغذیه نیست.

۴. طراحی سیستم راهگاهی به گونه‌ای بوده است که کانال فرعی به‌صورت دوزنقه به قطعه برخورد کرده است. مزیت این طراحی این است که، مذاب با سرعت زیاد به درون سیستم راهگاهی وارد شده و در نهایت وارد کانال اصلی شده و به انتهای کانال اصلی برخورد کرده و از سرعت آن کاسته شده و سپس وارد کانالی می‌شود که در راستای حرکت مذاب است (در این حالت از تلاطم مذاب کاسته می‌شود). در ضمن در مرحله نهایی نیاز به برداخت کاری آنچنانی نداریم و این محل اتصال در قطعه محل تمرکز تنش نیست.

۵. در قسمت عملی سعی شده که در کم‌ترین زمان ممکن و با معمولی‌ترین امکانات موجود قالب‌گیری را به نحو احسن به پایان برسانیم. در واقع مدل ساده‌ای با امکانات کاملاً معمولی تهیه شده و در دو نیم درجه و یک خشت با حجم کم انجام شده و وزن کل



مجموعه اندک و حمل آن آسان و سریع است به علاوه که ماسه مصرفی اندک بوده و در کل تهیه مجموعه از لحاظ اقتصادی کاملاً مقرون به صرفه و مبتکرانه است.

#### ۶- برآورد تقریبی هزینه تولید و توجیه اقتصادی طرح

در یک طرح مطلوب باید تمامی جوانب امر در نظر گرفته شده باشد. در طرح مذکور سعی شده تا تمام موارد رعایت شده باشد. مواردی که در یک عملیات ریخته‌گری در مقیاس کارگاهی و گاهاً در کارگاه‌های بزرگ و تیراژ بالا در نظر گرفته شوند شامل موارد زیر می‌باشند:

۱. مواد و مصالح و امکانات به‌کار گرفته‌شده در تهیه مدل

۲. مواد مصرفی در تهیه و آماده‌سازی قالب و ذوب

۳. کوره مصرفی و سوخت مورد نیاز آن برای تهیه ذوب مطلوب

۴. زمان و نیروی انسانی مورد نیاز برای تمامی مراحل بالا

۵. رعایت راندمان مناسب در تمام مراحل بالا خصوصاً ذوب‌ریزی

۶. جلوگیری یا به حداقل رساندن پرداخت کاری و ماشین‌کاری

- بسته به تیراژ تولید میتوان کم هزینه ترین روش تهیه مدل را انتخاب کرد. در تیراژهای بالا صرفه با روش تهیه با دستگاه سی ان سی میباشد (به علت استهلاک مدل) اما در موارد کم اهمیت تر (از نظر دقت ابعادی و ظرافت) از چوب و یا یونالیت استفاده کرد. لازم به ذکر است که چون این آلیاژ در مصارف نظامی یا خودروسازی استفاده میشود بهتر است مدل از همان روش سی ان سی و با دقت بالا تهیه شود.
- در مرحله تهیه قالب مواد و امکانات مصرفی شامل دو نیم درجه ساده، یک عدد گیره و دو مدل ماسه از نوع سیلیسی و ماسه معمولی ریخته‌گری استفاده شده و لازم به ذکر است که مقدار کم ماسه مصرفی خود به نوعی کمک به سبک شدن کل سیستم کرده و زمان حمل را کم تر و این عمل را آسانتر میکند.
- ماسه مصرفی در دو درجه اصلی از نوع ماسه تر بوده و نسبت به ماسه سیلیسی که تنها در قسمت خشت استفاده می شود مقرون به صرفه تر است قابلیت بازیابی دارد و نیز زمانی برای خشک کردن و مصرف گاز  $CO_2$  لازم ندارد.
- کوره مصرفی در این طرح از نوع کوره زمینی با بوته متحرک بوده که استفاده از آن با شرایط موجود اجتناب ناپذیر بوده اما در تیراژ های بالا و موارد حساس بهتر است از کوره های القایی یا مقاومتی و نگهدارنده های برقی استفاده شود تا هم در زمان ذوب شدن صرفه جویی شود هم آلودگی سوختی نداشته باشد و هم ذوب تمیزتر و آنالیز دقیق تری داشته باشیم. در غیراین صورت باید متحمل هزینه های همچون تصفیه ذوب و آلودگی هایی نظیر گازهای خروجی ناشی از سوخت باشیم.
- تمامی مراحل قالب گیری، حمل، ذوب ریزی در طرح مذکور می تواند توسط یک نفر انجام شده و به نیروی انسانی زیادی نیاز ندارد و قالب گیری و مونتاژ و دمونتاژ کردن آن سریع و آسان می باشد.
- حین شبیه سازی بیشترین تلاش در این جهت بوده که علاوه بر حل مشکل کشیدگی و حفرات انقباضی کوتاه ترین و کم حجم ترین سیستم راهگاهی و نتیجتاً ذوب مصرفی کم تر و راندمان بالاتر داشته باشیم. به علاوه به طوری هوشمندانه از سیستم راهگاهی به عنوان تغذیه نیز بهره گرفته شده است.
- محل اتصال راهگاه فرعی به قطعه در روی استوانه تعبیه شده تا جداسازی آن آسان باشد و نیاز به پرداخت کاری های اضافی نباشد.

## ۷- توجه زیست محیطی طرح و فرایند تولید

یک طرح معقول طرحی است علاوه بر رعایت همه جوانب از لحاظ اقتصادی موجه بوده و به صرفه باشد. توجه به موارد زیر در جهت همین هدف میباشد:

- در تهیه مدل سعی شده حتی الامکان از مصالح ساده، طبیعی و بدون ضرر برای محیط زیست استفاده شود نظیر چوب خام.
- به طور منطقی آلودگی در کوره های القایی یا مقاومتی بسیار کم تر است و در نهایت ما ذوب تمیزتری تحویل گرفته و آلودگی سوختی نخواهیم داشت اما در مقیاس کارگاهی و برای یک قطعه مجبور به استفاده از کوره زمینی بوته متحرک هستیم که با سوخت گاز شهری است و آلودگی های خاص خود را داراست. پس باید در کارگاه های بزرگ از سیستم تصفیه هوا در بالای کوره استفاده شود.

- از بین ماسه‌های موجود کم‌ضررترین ماسه از لحاظ مسائل زیست محیطی ماسه تر می‌باشد که علاوه بر قابلیت بازیابی گازهای ناشی از سوختن چسب را ندارد و نیازی هم به استفاده از گاز  $Co_2$  برای خشکاندن ندارد لذا قسمت عمده قالب توسط ماسه تر تهیه شده و استفاده از ماسه سیلیسی را به حداکثر رسانده‌ایم.
- رعایت راندمان بالا در طرح فوق خود از مواردی است که به‌طور عمده بسیاری از مسائل مضر زیست محیطی را کم می‌کند.
- از دیگر تدابیر اندیشیده شده برای کاهش موارد آسیب‌زننده به محیط زیست استفاده از نرم افزارهای شبیه‌سازی نظیر پروکست می‌باشد که باعث اجتناب از آزمون و خطا و تولید آلاینده‌های زیست محیطی شده است.
- استفاده از بوته چدنی به‌جای بوته گرافیتی به‌دلیل آسان‌تر بودن بازیابی چدن
- کنترل دمای ذوب به‌منظور جلوگیری از ایجاد آلودگی حرارتی و ماسه‌سوزی و تولید آلاینده‌ها
- استفاده از سوخت گاز متان به‌جای مازوت و نفت (بهتر استفاده از کوره مقاومتری در صورت وجود)

#### ۸- منابع مراجعه

1. D.M. Stefan, **Casting**, ASM handbook, the ASM international handbook committee ASM international, Volume 15, 9<sup>th</sup> edition, 719-730, 2010.
2. J.R. Davis, **Nonferrous Alloys and special-purpose materials**, ASM handbook, the ASM international handbook committee, ASM international, 9<sup>th</sup> edition, 90-115, 1991.
۳. جلال حجازی، ریخته‌گری فلزات غیر آهنی، انتشارات آزاده با همکاری انجمن علمی ریخته‌گری ایران، تهران، ۱۳۸۸.
۴. جلال حجازی، اصول ریخته‌گری متالورژی - تکنولوژی، چاپ هفتم، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ۱۳۸۶.

۵. حسن ثقفیان و منصور امامی، اصول متالورژی ریخته‌گری، ویرایش دوم، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۸۵.
۶. پرویز دوامی، مبانی سیستم راهگامی و تغذیه‌گذاری، چاپ اول، انتشارات جامعه ریخته‌گران ایران، ۱۳۶۱.
۷. مراد سلیمی، رسم مدل و قالب، ویرایش دوم، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۸۴.
۸. سیاوش نظم‌دار شهری، محاسبات فنی تخصصی متالورژی، ویرایش دوم، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۸۴.
۹. دیوید آ-پورتر و کنث ای-ایسترلینگ، دگرگونی فازها در فلزات و آلیاژها، ترجمه ابوالقاسم دهقان، عباسعلی نظربلند و بابک هاشمی، انتشارات دانشگاه شیراز، شیراز، ۱۳۸۵.
10. H. Mehrer, **Diffusion in Solid**, Springer Series in solid-state science, (2007).
11. B. Rundman, **Metal Casting**, materials science and engineering michigan tech. university, (2001).
12. W. Kurz and D.J. Fisher. **Fundamental of solidification**, (1984).
13. H. Baker, **Alloy phase diagrams**, ASM handbook, the ASM international handbook committee, ASM international, 9th edition, 90-115, 1991.

پیوست- تصویری از فعالیت انجام شده توسط گروه، شامل مدلسازی، قالب‌گیری و ریخته‌گری قطعه سالم





## چهارمین دوره مسابقات سراسری ریخته‌گری دانشجویان کشور

دانشگاه صنعتی اصفهان - اسفندماه ۱۳۹۴