



چهارمین دوره مسابقات سراسری ریخته‌گری دانشجویان کشور دانشگاه صنعتی اصفهان

گزارش مرحله مقدماتی چهارمین دوره مسابقات سراسری ریخته‌گری دانشجویان کشور

سوال ریخته‌گری	
IUT Casting	نام تیم شرکت کننده
دانشگاه صنعتی اصفهان	نام دانشگاه
میثم لشنی زند	نام سرپرست تیم
۰۹۳۷۵۷۴۶۲۳۷	شماره تلفن همراه
Lashani70@gmail.com	پست الکترونیک

لطفا در این قسمت چیزی ننویسید.	
2010	کد گروه

۱- خلاصه طرح (یک صفحه به علاوه نقشه های مربوطه)

تمام طراحی های صورت گرفته اعم از طراحی مدل و قالب، سیستم راهگاهی و تغذیه گذاری، فوق ذوب مناسب و غیره با تکیه بر دو فاکتور مهم رسیدن به حداکثر خواص متالورژیکی آلیاژ و صرفه اقتصادی صورت گرفته است.

مدل: به صورت دو تکه می باشد که یک قسمت آن در درجه زیری قرار می گیرد و وظیفه ایجاد فضای ریشه ماهیچه را بر عهده دارد و بالایی آن در درجه رویی که فضای مورد نیاز برای قرار گرفتن ماهیچه و ایجاد کل قطعه را فراهم می کند. بدین ترتیب کل قطعه در درجه بالایی قرار می گیرد. همچنین برای دستیابی به حداکثر کیفیت سطح مدل مورد استفاده از جنس آلومینیوم می باشد.

قالب: به صورت دودرجه ای و از جنس ماسه مصنوعی با عدد ریزی ۶۲ بر اساس استاندارد AFS است. برای افزایش استحکام و خودگیری ماسه از چسب سیلیکات سدیم و دمش گاز CO₂ استفاده می شود. علت انتخاب قالبگیری با استفاده از روش فوق عواملی چون استحکام بالای ماسه و تولید آسان ماهیچه، کیفیت سطح بالای قطعه تولیدی، عدم کنده شدن و جابجایی ماسه توسط مذاب و غیره است.

ماهیچه: بهترین و سریعترین روش تولید قطعه مورد نظر استفاده از ماهیچه است. جعبه ماهیچه به صورت دوتکه می باشد که تکه زیری آن وظیفه ایجاد ریشه ماهیچه و رینگ کف و تکه بالایی قسمت های اصلی قطعه را ایجاد می کند.

شبیه سازی: برای اطمینان از طراحی مورد نظر از نرم افزار شبیه ساز پروکست ورژن ۲۰۱۵ استفاده شد. این نرم افزار قادر به انجام تحلیل های سیالاتی و حرارتی می باشد. مشخص شد که استفاده از ۳ کانال فرعی با ابعاد مشخص ضروری است تا بتواند انقباضات محل های تمرکز حرارت پایین قطعه (محل اتصال به رینگ) را جبران کند. همچنین مشخص شد که مذاب به آرامی وارد قالب خواهد شد و تلاطمی در هنگام ورود مذاب وجود نخواهد داشت و سرعت ورود مذاب به قطعه کمتر از مقدار بحرانی برای آلیاژهای آلومینیوم (۰/۵ متر بر ثانیه) می باشد. با استفاده از شبیه سازی گفته های علمی خود را که در ادامه ذکر خواهند شد، تایید کردیم و توانستیم قطعه ای کاملاً سالم و با ماکزیم چگالی ممکن را بسازیم.

سیستم راهگاهی و تغذیه گذاری: بهترین نوع سیستم راهگاهی برای تولید قطعه مورد نظر استفاده از سیستم راهگاهی غیر فشاری می باشد که تا حد ممکن از ایجاد تلاطم و اغتشاش که منجر به تشکیل لایه های اکسیدی سطحی، بای فیلم ها و حباب های گازی که در نتیجه منجر به کاهش خواص مکانیکی می شود، جلوگیری شود. نسبت راهگاهی به صورت As:Ar:Ag 1:4:4 می باشد که سطح تنگه برابر است با As. این نسبت برای جبران انقباضات محل های تمرکز حرارت پایین قطعه که در ادامه به آن خواهیم پرداخت، انتخاب شده است و شبیه سازی های انجام شده نیز تاییدی بر صحت این نسبت انتخاب شده می باشد. یک تغذیه با ابعاد مشخص بر روی استوانه ای بالایی قرار خواهد گرفت و در سر ماهیچه نیز از یک مبرد آهنی برای افزایش راندمان و کاهش حجم تغذیه استفاده خواهد شد. همچنین برای جهت دار کردن انجماد و از بین بردن تمرکز حرارت از یک مبرد رینگی شکل در ناحیه L شکل قطعه استفاده شده است.

نکته: برای بالا بردن سرعت تولید در تولید انبوه باید مدل و سیستم راهگاهی بر روی صفحه مدل نصب گردند.

دمای بارریزی: با توجه به ضخامت کم قطعه و حصول اطمینان از پر شدن قطعه و همچنین عدم جذب گاز دمای بارریزی ۷۱۰ درجه سانتی گراد انتخاب شد.

عملیات کیفی: شامل افزودن فلاکس پوششی قبل و بعد از ذوب شدن شارژ، گاززدایی با گاز آرگون و همچنین عملیات جوانه زایی و اصلاح ساختار یوتکتیک می باشد.

۲- جزئیات طراحی اجزاء مدل و قالب (حداکثر ۳ صفحه به علاوه نقشه ها، تصاویر و نمودارهای موردنیاز)

اصول طراحی اجزاء مدل و قالب بر پارامترهایی همچون اقتصادی بودن، رسیدن به خواص مورد نیاز نظیر حداکثر چگالی، دقت ابعادی و کیفیت سطح، استوار است [۱].

به طور کلی نکات مربوط به طراحی مدل شامل مشخص نمودن سطح جدایش و اعمال اضافات مجاز ریخته‌گری می‌باشد. تعیین سطح جدایش به شکل قطعه، روش تولید، طراحی سیستم راهگاهی و محل ورود مذاب بستگی دارد. اضافات مجاز ریخته‌گری شامل اضافات ریخته‌گری و اضافات قالبگیری است [۲۱].

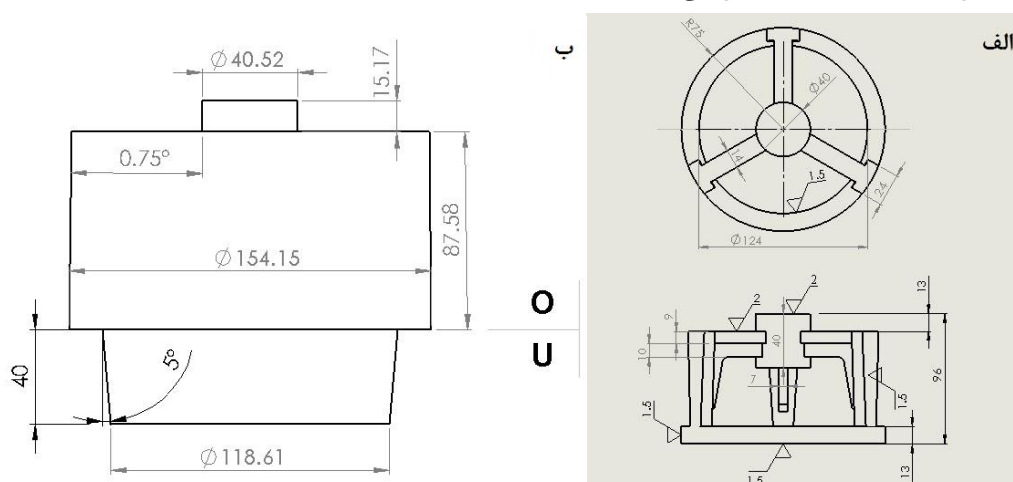
اضافات ریخته‌گری: شامل انقباض مجاز است. در کل می‌توان گفت تمام فلزات در هنگام انجماد انقباض دارند که میزان این کاهش حجم برای هر فلز و آلیاژ متفاوت است و مقدار آن بستگی به درجه حرارت مذاب و نوع قالب به سه قسمت تقسیم می‌شود که عبارتند از: (۱) انقباض فاز مذاب، (۲) انقباض مخلوط مذاب و جامد و (۳) انقباض جامد. انقباض فاز مذاب و انقباض مخلوط جامد و مذاب توسط مذاب اضافی منع تغذیه و انقباض فاز جامد توسط مدل‌سازی صحیح جبران می‌شوند [۳].

مدل اولیه از جنس چوب ساخته می‌شود و با توجه به دوام کم مدل‌های چوبی و کیفیت سطح پایین آن‌ها، این مدل به مدلی فلزی از جنس آلومینیوم تبدیل می‌شود. در محاسبات ابعاد مربوط به مدل اولیه چوبی، علاوه بر انقباض عملی آلیاژ A356 که برابر $\frac{1}{3}$ درصد است، یک انقباض مضاعف هم برای تبدیل مدل چوبی به مدل فلزی لحاظ می‌شود که در مجموع برای محاسبات مدل $\frac{2}{6}$ درصد اضافه انقباض عملی اعمال می‌شود [۴۱]. این درصد انقباض توسط نرم‌افزار سالید ورکس^۱ بر روی تمام قسمت‌های مدل اعمال شد.

نکته: انقباض حالت جامد در تمام جهات یکسان نیست. به دلیل آنکه در بعضی نقاط مقاومت قالب و ماهیچه از انقباض آزاد جلوگیری می‌کند [۵]. به طور مثال در این قطعه بجز قسمت استوانه‌ای شکل بالای مدل، تمام قسمت‌های قطعه با مقاومت ماهیچه وسط مواجه هستند ولی به دلیل مشخص نبودن مقدار این مقاومت، معمولاً انقباض را برای کل قطعه یکسان فرض می‌کنند.

اضافات قالبگیر: اضافات قالبگیری عبارتند از شب، تراش، مجاز و غیره است [۳ و ۲].

شکل ۱- الف نقشه مکانیکی قطعه مورد نظر را نشان می‌دهد. برای بالابردن کیفیت سطح و همچنین حذف عیوب احتمالی در بعضی از قسمت‌های قطعه اضافه تراش اعمال شده است که مقدار آن براساس استاندارد برای سطوح رویی ۲ میلیمتر و برای سطوح جانبی و تحتانی ۱/۵ میلیمتر است [۱]. همچنین شکل ۱-ب نقشه مدل قطعه مورد نظر را نشان می‌دهد که مقدار شیب آن براساس ارتفاع مدل و استاندارد DIN 1511 آلمان تعیین شده و در نقشه مشخص می‌باشد.



شکل ۱. الف) نقشه مکانیکی، و ب) نقشه مدلسازی.

¹ SolidWorks

سیستم راهگاهی: طراحی سیستم راهگاهی صحیح در ریخته‌گری آلومینیوم برای تولید قطعه سالم بسیار اهمیت دارد.

عواملی که در صورت طراحی غیراصولی سیستم راهگاهی با آنها مواجه خواهیم شد، به شرح زیر است [۶و۲]:

۱. تمایل شدید مذاب آلومینیوم به اکسیداسیون

۲. تمایل شدید به تلاطم، جذب گاز و ایجاد لایه‌های اکسیدی

۳. ایجاد تمرکز حرارتی و در نتیجه متمرکز شدن انقباضات و معیوب شدن قطعه

۴. اغتشاش در مذاب و ایجاد مک و تخلخل در قطعه

با توجه به موارد فوق طراحی اصولی سیستم راهگاهی در حذف تلاطم مذاب و ایجاد حرکت آرام و جریان یکنواخت مذاب در

پرکردن قالب الزامی است. هدف از طراحی سیستم راهگاهی را می‌توان در عوامل زیر خلاصه کرد [۶]:

۱. تنظیم سرعت و جهت جریان مذاب به گونه‌ای که پرکردن محفظه قالب را قبل از انجماد تضمین نماید

۲. ایجاد جریان آرام و یکنواخت مذاب بدون هیچگونه تلاطم و جلوگیری از ورود هوا و خوردگی دیواره‌های قالب

۳. ایجاد شیب دمایی یکنواخت و جلوگیری از تمرکز حرارتی در بعضی قسمت‌های قالب

۴. جلوگیری از ورود ناخالصی‌های غیرفلزی و آخال‌ها

با توجه به موارد فوق بهترین نوع سیستم راهگاهی برای تولید قطعه موردنظر استفاده از سیستم راهگاهی غیرفشاری می‌باشد که تا حد

ممکن از ایجاد تلاطم و اغتشاش که منجر به تشکیل لایه‌های اکسیدی سطحی و حباب‌های گازی که در نتیجه منجر به کاهش

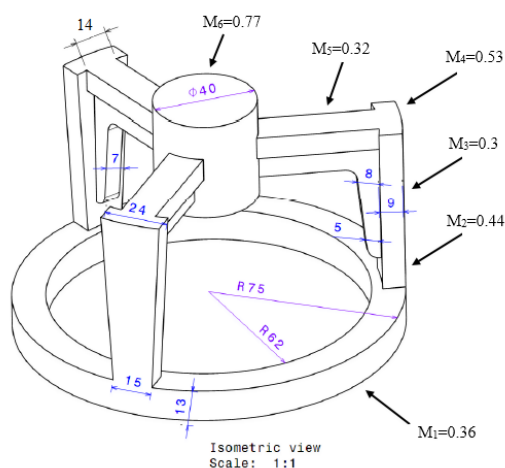
خواص مکانیکی قطعه می‌شود، جلوگیری شود [۶]. نسبت سیستم راهگاهی به صورت $A_S:A_R:A_G$ 1:4:4 می‌باشد که سطح تنگه برابر

است با A_S .

برای انتخاب محل و تعداد کانال‌های فرعی و اصلی لازم به دانستن مدول‌های قسمت‌های مختلف می‌باشد تا بتوانیم با یک سیستم راهگاهی

مناسب علاوه بر جلوگیری از تمرکز حرارتی، انقباضات احتمالی را هم جبران کنیم. شکل ۲ مدول قسمت‌های مختلف قطعه مورد نظر را

با در نظر گرفتن اضافه تراش‌ها و اضافات انقباضی نشان می‌دهد.



شکل ۲. مدول‌های حرارتی قسمت‌های مختلف قطعه.

بررسی جهت انجماد: با توجه به مدول‌های حرارتی قسمت‌های مختلف قطعه می‌توان جهت انجماد را پیش‌بینی کرد. در قطعه مورد نظر

۷ منطقه تمرکز حرارت داریم که مناطق با مدول ۰/۴۴ یعنی M_2 ، ۰/۵۳ یعنی M_4 و منطقه با مدول ۰/۷۷ یعنی M_6 هستند. شرایط قطعه

به گونه‌ای است که نقاط تمرکز حرارت در هنگام انجماد شدیدتر می‌شوند. منطقه M_1 در هنگام انجماد انقباضات خود را وارد منطقه M_2

کرده و آن را تشدید می‌کند. انقباضات M_5 وارد M_4 و M_6 می‌شود و انقباضات M_3 وارد M_4 و M_2 خواهد شد. با توجه به مطالب ذکر شده، حتماً مناطق با مدول‌های حرارتی M_2 ، M_4 و M_6 در شرایط عادی ریخته‌گری معیوب خواهند شد.

نکته: نتایج حاصل از شبیه‌سازی که در ادامه ارائه خواهند شد، صحت مطالب بالا را تایید می‌کنند.

طراحی روش قالبگیری، سیستم راهگاهی، تغذیه‌گذاری و مبردگذاری: برای جلوگیری از عیوب ذکر شده، کل قطعه در درجه بالایی قرار می‌گیرد تا مذاب به آرامی قالب را پر کند و در غیراین صورت با ریزش و تلاطم مذاب مواجه خواهیم شد. همچنین به علت سنگین بودن آخال‌ها در مذاب آلومینیوم، کانال فرعی در بالاترین قسمت از سطح کانال اصلی قرار خواهد گرفت تا آخال‌ها ته نشین شده و مذاب تمیز از بالا وارد قطعه شود [۸و۷].

برای برطرف کردن انقباضات منطقه M_2 از یک سیستم راهگاهی گرد شکل حاوی دو کانال اصلی و سه کانال فرعی استفاده می‌شود که کانال‌های فرعی دقیقاً به محل تمرکز حرارت یعنی M_2 متصل می‌شوند تا بتوانند انقباضات این ناحیه را جبران کنند. این کانال‌ها به صورت کج زده خواهند شد تا از برخورد مستقیم مذاب به جداره جلوگیری کنند. در غیراین صورت نمی‌توانند انقباضات را به طور کامل جبران کنند، چرا که خود تمرکز حرارت را در این نواحی شدیدتر خواهند کرد. عرض و عمق کانال اصلی باید حداقل ۱۵ میلیمتر و کانال فرعی باید ۱۳ میلیمتر باشد تا بتواند انقباضات این ناحیه را جبران کند. پس بدین ترتیب نسبت راهگاهی باید به صورت $AS:AR:AG 1:4:4$ انتخاب شود. ابعاد فوق به کمک شبیه‌سازی بدست آمده‌اند و اگر نسبت راهگاهی کمتر از این مقدار شود، کانال فرعی قادر نیست به‌طور کامل انقباضات این ناحیه را جبران کند.

برای حذف منطقه گرم M_4 از یک مبرد رینگ‌ی شکل آهنی استفاده خواهد شد. این کار باعث می‌شود که اکثر انقباضات این ناحیه به سمت منطقه M_6 هدایت شوند و این منطقه عاری از هرگونه انقباض شود. علت استفاده از مبرد رینگ‌ی شکل بالا بردن سرعت قالبگیری می‌باشد. چون در غیر اینصورت هنگام قرار دادن ماهیچه در جای خود قالبگیر باید بسیار دقت کند که مبردهایی که در درجه بالایی تعبیه شده‌اند، دقیقاً در محل تمرکز حرارت قرار گیرند ولی با استفاده از مبرد رینگ‌ی شکل این مشکل به‌طور کامل برطرف خواهد شد.

تحت این شرایط منطقه M_6 علاوه بر انقباضات خود، انقباضات مناطق دیگر را نیز در خود جای می‌دهد و شرایط بدتر می‌شود. در این قسمت مجبور به تغذیه‌گذاری هستیم. بدین صورت که یک تغذیه روباز با ابعاد مشخص در این ناحیه قرار می‌گیرد. همچنین برای بالا بردن بازدهی تولید و کاهش حجم تغذیه از یک مبرد آهنی که در سر ماهیچه قرار دارد، استفاده می‌شود.

نکته: در طرح فوق به جای استفاده از مبرد مسی که گران قیمت می‌باشد، از مبرد آهنی (فولادی یا چدنی) استفاده می‌کنیم و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مبرد آهنی نیز می‌تواند به آسانی انقباضات را از مراکز تمرکز حرارت به نقطه مورد نظر یعنی درون تغذیه هدایت کند. تحت این شرایط قطعه‌ای با حداکثر چگالی، بالاترین دقت ابعادی و کیفیت سطحی بدست خواهد آمد.

توجه: تمام تصاویر مربوط به سیستم راهگاهی، مبردها و غیره در قسمت بعد آورده شده‌اند.

نکته: در قطعات جداره نازک و کوچک معمولاً بازده تولید پایین می‌باشد. چون حجم سیستم راهگاهی در اینگونه قطعات بالا است و ما برای بالا بردن بازده و کاهش حجم منبع تغذیه از مبردگذاری استفاده می‌کنیم. در غیر اینصورت نیز قطعه تولیدی سالم خواهد بود ولی ابعاد تغذیه باید بیشتر شود.

نکته: یکی از مهمترین عیب‌های سیستم راهگاهی غیر فشاری، پایین بودن بازده ریخته‌گری آن می‌باشد ولی بازده کلی به دلیل کم بودن خرابی قطعات بالا است [۶].

محاسبات سیستم راهگاهی و تغذیه گذاری

ابتدا حجم کل را توسط نرم افزار SolidWorks استخراج می کنیم.

در اینجا به منظور جبران انقباضات و آرام پرشدن قالب از دو کانال اصلی و سه کانال فرعی استفاده می شود.

$$A_c = \frac{V_t}{t \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_e}} \quad \text{سطح مقطع تنگه از رابطه روبه رو بدست می آید [۹]}$$

که در این رابطه:

A_c : سطح مقطع تنگه بر حسب cm^2 ; V_t : حجم کل بر حسب cm^3 ; t : زمان بارریزی بر حسب ثانیه، μ : ضریب ریخته گری، g : شتاب ثقل زمین بر حسب $\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$ و H_e ارتفاع موثر بارریزی بر حسب cm است.

معمولا در قطعات ضخیم ۱۰ و در قطعات نازک ۱۵ درصد حجم قطعه را به عنوان حجم سیستم راهگاهی در نظر می گیرند [۹]. در اینصورت حجم کل برابر است با $V_t = 308.3 \text{ cm}^3$.

زمان بارریزی از رابطه $t = 1.4 \sqrt{W \cdot \sigma}$ بدست می آید که W وزن قطعه بر حسب کیلوگرم و σ ضخامت متوسط بر حسب میلیمتر است که در نتیجه $t = 1.4 \sqrt{0.83 \cdot 18.5} = 3.5 (\text{s})$ بدست می آید [۱۰].

ضریب ریختگی نیز با توجه به نوع آلیاژ ۰/۶ در نظر گرفته می شود. البته این ضریب به عوامل دیگری نیز بستگی دارد. [۹].

ارتفاع موثر بارریزی نیز از رابطه $H_e = H - \left(\frac{0.5 \cdot H_1^2}{H_2} \right)$ بدست می آید که در آن ارتفاع درجه بالایی بر حسب سانتیمتر، H_1 ارتفاع قطعه

در درجه بالایی بر حسب سانتیمتر و H_2 ارتفاع قطعه بر حسب سانتیمتر است [۱۱]. پس داریم $H_e = 15 - \left(\frac{0.5 \cdot 15^2}{15} \right) = 7.5 \text{ cm}$.

$$A_c = \frac{308.3}{3.5 \cdot 0.6 \cdot \sqrt{2 \cdot 980.7 \cdot 7.5}} = 1.2 \text{ cm}^2 \quad \text{اکنون می توان سطح مقطع تنگه را محاسبه نمود که برابر است با}$$

در این قطعه از سیستم راهگاهی غیر فشاری با نسبت راهگاهی $A_S:A_R:A_G$ 1:4:4 استفاده شد که با توجه به سطح مقطع تنگه، مجموع مساحت مقطع کانال های اصلی (A_R) معادل با ۴/۸ سانتیمتر مربع و مجموع مساحت مقطع کانال های فرعی (A_G) معادل با ۴/۸ سانتیمتر مربع می باشد. در این سیستم راهگاهی به دلیل استفاده از دو کانال اصلی و سه کانال فرعی، می بایست برای یافتن مساحت مقطع هر کانال، مقادیر A_R و A_G را به ترتیب بر دو و سه تقسیم نماییم.

قطر لوله راهگاه از طریق رابطه $A = \pi r^2$ حاصل می شود که در آن با جایگذاری مقدار A ، قطر لوله راهگاه معادل با ۱۲ میلیمتر بدست می آید.

ابعاد کانال اصلی نیز از طریق رابطه $A = x \cdot x$ محاسبه می شود که در آن پس از جایگذاری مقدار A ، عرض و عمق کانال اصلی معادل با ۱۵ میلیمتر بدست می آید.

ابعاد کانال فرعی نیز از طریق رابطه $A = x \cdot x$ محاسبه می شود که در آن پس از جایگذاری مقدار A ، عرض و عمق کانال فرعی معادل با ۱۳ میلیمتر بدست می آید.

اصول طراحی اجزای مختلف سیستم راهگاهی از قبیل شیب لوله راهگاه، اندازه حوضچه پای راهگاه، شکل کانال ممتد جهت آخال گیری و غیره همانند شکل ۳ است.

طبق قوانین کمپل^۱، برای محاسبه ابعاد منبع تغذیه می توان از شرایط زمانی و حجمی استفاده کرد [۱۲].

شرط زمانی (شرط انتقال حرارت): با توجه به این شرط می بایست ابعاد منبع تغذیه طوری انتخاب شود که زمان انجماد مذاب در تغذیه به اندازه کافی از زمان انجماد قطعه بیشتر باشد.

^۱ Campbell

طبق رابطه چرنیف^۱، اگر زمان پایان انجماد تغذیه بخواهد بیشتر از قطعه باشد، در این صورت می‌بایست مدول تغذیه بیش از مدول قطعه گردد. اما به منظور حصول اطمینان از اینکه مدول تغذیه تا پایان انجماد بیشتر از مدول قطعه می‌ماند، مدول تغذیه را حداقل ۱/۲ برابر مدول قطعه در نظر می‌گیرند. پس به طور کلی، شرط زمانی بدین صورت خلاصه می‌شود:

$$M_f \geq 1.2M_c$$

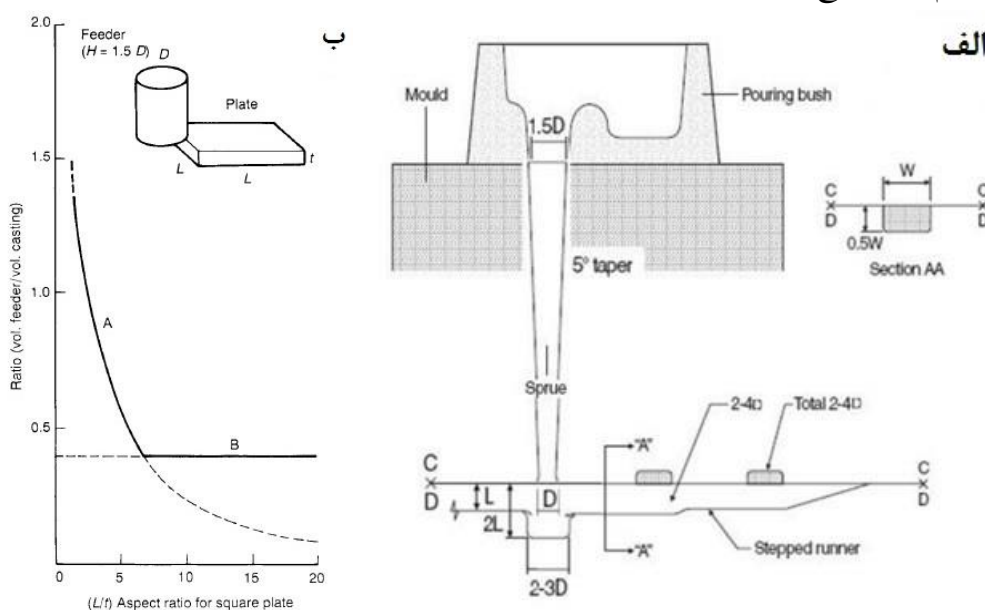
شرط زمانی:

که در این رابطه M_f مدول تغذیه بر حسب سانتیمتر و M_c مدول قطعه بر حسب سانتیمتر است. شرط حجمی: بر اساس این شرط ابعاد منبع تغذیه باید طوری انتخاب شود که تغذیه حجم کافی جهت جبران تمامی انقباضات حجمی قطعه و تغذیه را داشته باشد. بر اساس این تعریف، شرط حجمی بدین صورت خلاصه می‌شود:

$$\varepsilon \cdot V_f = \alpha(V_f + V_c)$$

شرط حجمی:

که در آن ε راندمان تغذیه، V_f حجم تغذیه، α میزان انقباض حجمی مذاب و V_c حجم قطعه می‌باشد. اما در نهایت ابعاد قطعه ریختگی تعیین کننده استفاده از شرایط زمانی یا حجمی برای تعیین ابعاد منبع تغذیه می‌باشد. در این صورت و با توجه به شکل ۳، اگر قطعه ریختگی ضخیم باشد (یعنی نسبت طول به ضخامت آن کوچکتر از ۷ باشد)، از شرط زمانی برای تعیین حجم و ابعاد منبع تغذیه استفاده می‌شود. در صورتیکه قطعه ریختگی نازک باشد (یعنی نسبت طول به ضخامت آن بزرگتر از ۷ باشد)، از شرط حجمی برای تعیین حجم و ابعاد منبع تغذیه استفاده می‌شود.



شکل ۳. الف) اجزای مختلف سیستم راهگای و ب) استفاده از شرایط زمانی و حجمی [۱۲].

با قرار دادن مبرد در سر ماهیچه به علت تماس کامل مبرد و عدم ایجاد فاصله هوایی در هنگام انجماد بین مبرد و فلز مذاب، سطحی که

مبرد بر روی آن قرار دارد، ۳ برابر می‌شود. با استفاده از رابطه چرنیف می‌توان نشان داد که: $\frac{As}{Ao} = \sqrt{\frac{to}{ts}} = 3$ با سه برابر شدن سطح در تماس با مبرد داریم: $M = \frac{V}{A} = \frac{54.8}{99.6} = 0.55$ و با توجه به نوع انجماد آلیاژ که دارای دامنه انجماد بالا است، داریم: $H = D$ ، $M_f = \frac{D}{5}$ و با توجه به رابطه: $M_f = 1.2M_c$ ، در نهایت قطر و ارتفاع تغذیه بدست می‌آید: $H = D = 3.3\text{cm}$. همچنین با استفاده از شکل ۴-الف

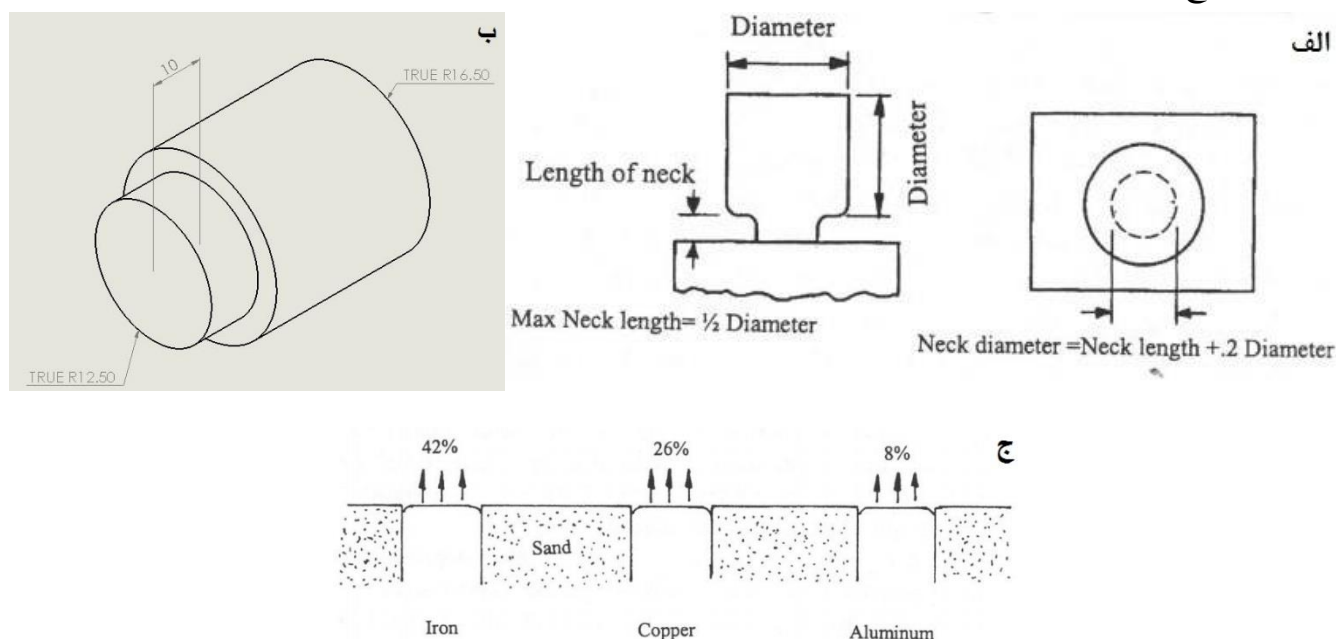
¹ Chernov

ابعاد گردن تغذیه بدست می آید. ابعاد تغذیه در شکل ۴-ب مشخص است. همچنین می توان سطح گردن تغذیه را ۶۰ درصد سطح تغذیه در نظر گرفت [۱۳و۵].

نکته: مدول گردن تغذیه باید بیشتر از قطعه و کمتر از تغذیه باشد تا یک انجماد جهت دار به سمت تغذیه ایجاد شود. در غیر اینصورت تغذیه به درستی عمل نخواهد کرد و همچنین می تواند سبب معیوب شدن قطعه شود [۷].

نکته: آلیاژهای آلومینیوم حدود ۸ درصد از گرمای خود را از طریق تابش از سطح تغذیه از دست می دهند (شکل ۴-ج). با توجه به اینکه مواد گرمازا برای محترق شدن نیاز به یک گرمای اولیه دارند، نمی توان از آن ها در سطح تغذیه استفاده کرد [۴و۳].

نکته: مبرد به هیچ وجه نمی تواند انقباضات را از بین ببرد بلکه فقط آن ها را از نقطه ای به نقطه ای دیگر هدایت می کند [۶].



شکل ۴. الف) ابعاد پیشنهادی برای گردن تغذیه. ب) ابعاد تغذیه مورد استفاده و ج) میزان انتقال حرارت از طریق تابش برای آلیاژهای مختلف [۱۳].

محاسبه بازده کل ریخته گری:

بازده کل ریخته گری از طریق رابطه زیر حاصل می شود که در آن W_c وزن قطعه بدون سیستم راهگاهی، تغذیه و اضافات تراشکاری (وزن قطعه قابل فروش) و W_t وزن قطعه با سیستم راهگاهی و تغذیه می باشد [۹].

$$\%Ra = \frac{W_c}{W_t} \times 100$$

در این صورت با جایگذاری مقادیر W_c و W_t ، بازده کل ریخته گری برابر است با:

$$\%Ra = \frac{530}{950} \times 100 = \%56$$

نکته: همانطور که ذکر شد در قطعات نازک بازده کل پایین می باشد. درست است که بازده تولید با شرایط ذکر شده پایین می باشد ولی این تنها راهی است که می توان این قطعه را بدون هیچگونه مک انقباضی و با حداکثر چگالی تولید کرد. در ادامه و با ارائه تصاویر شبیه سازی این امر مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

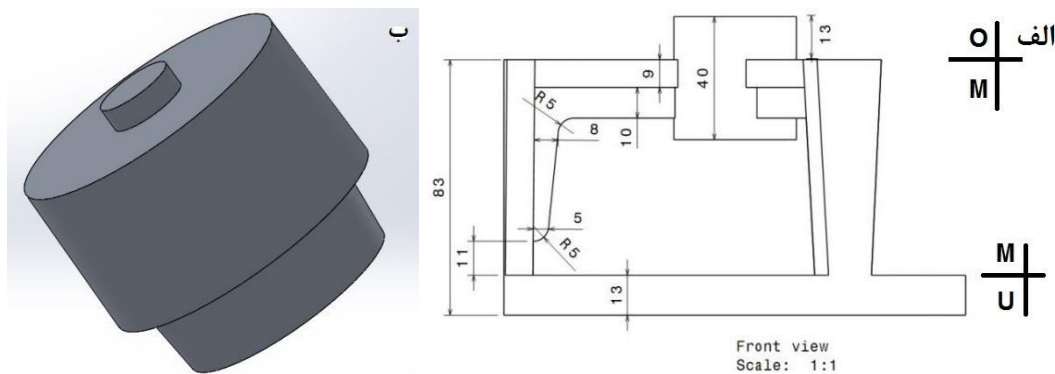
۳- عملیات مدل‌سازی، قالبگیری و ماهیچه سازی (حداکثر ۲ صفحه به علاوه جداول و نمودارهای مورد نیاز)

مدل: پس از اعمال اضافات مجاز بر روی ابعاد قطعه، نوبت به ساخت مدل می‌رسد. در طراحی مدل مواردی همچون شکل قطعه، روش تولید، اهمیت صنعتی، اقتصادی و تیراژ تولید نقش مهمی دارند. در ساخت مدل ابتدا مدل مادر از جنس چوب تهیه می‌شود و با توجه به دوام کم این مدل‌ها و کیفیت سطح ضعیف آن‌ها، مدل نهایی از جنس آلومینیوم ساخته می‌شود [۳].

به طور کلی قطعه مورد نظر از دو روش اصلی قابل تولید است:

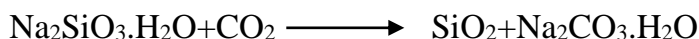
روش اول: در این روش مدل دارای دو سطح جدایش می‌باشد و با استفاده از روش قالبگیری سه‌درج‌ای قابل تولید است (شکل ۵-الف را ببینید). این روش دارای مزایا و معایبی هست که از مزایای آن می‌توان به عدم نیاز به ساخت جعبه ماهیچه و اقتصادی بودن در تیراژ کم تولید اشاره کرد. معایب این روش نیز عبارتند از اقتصادی نبودن در تیراژ تولید بالا، نیاز به مهارت بالای قالبگیری، افزایش ماسه مصرفی، افزایش حجم سیستم راهگاهی به علت افزایش ارتفاع راهگاه بارریز و در نتیجه کاهش بازده تولید، کاهش کیفیت قطعه تولیدی، افزایش فشار متالواستاتیکی در حوضچه پای راهگاه و در نتیجه افزایش تلاطم و امکان جذب گاز و ماسه شویی می‌باشد. در این روش، در صورت استفاده از تغذیه باید از تغذیه کور استفاده کرد که بازده این تغذیه‌ها مخصوصاً در آلیاژهای پایه آلومینیوم بسیار کم هست. در صورت استفاده از تغذیه باز کنترل ذوب ریزی و پرکردن تغذیه تا ارتفاع مورد نظر دشوار است. همچنین در قالبگیری سه‌درج‌ای درجه سوم که بر روی درجه دوم قرار می‌گیرد، پین ندارد و قالبگیر هنگام جفت کردن درجه‌ها باید بسیار دقت کند که خط جدایش‌ها دقیقاً روبه‌روی یکدیگر قرار گیرند.

روش دوم: در این روش از قالبگیری دو درج‌ای استفاده خواهد شد. با استفاده از این روش مشکلات قالبگیری سه‌درج‌ای به طور کامل برطرف خواهد شد. در این روش، فضاهای خالی درون قطعه در مدل پر می‌شوند و توسط ماهیچه‌گذاری در قالب، این فضاها ایجاد خواهند شد. شکل هندسی مدل نیز بسیار ساده است (شکل ۵-ب را ببینید). این روش، روش مورد نظر در این طرح می‌باشد.

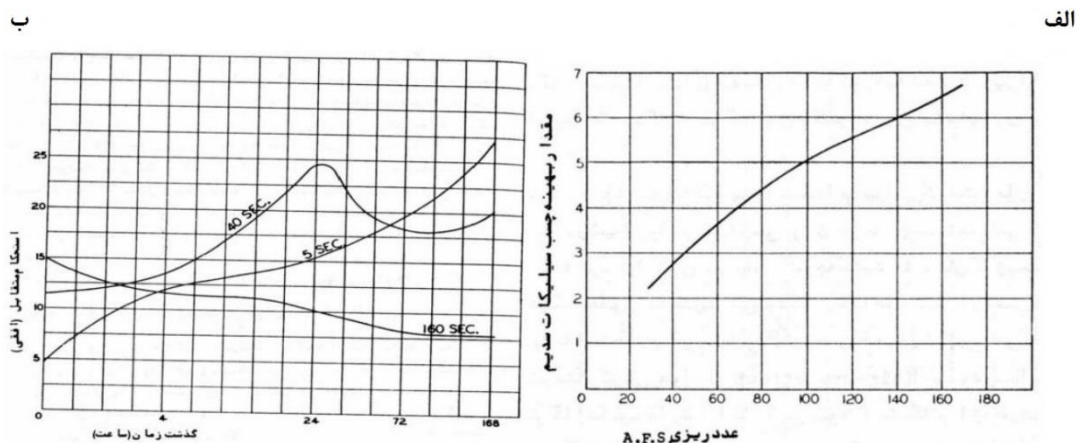


شکل ۵. الف) خط جدایش در قالبگیری سه‌درج‌ای و ب) مدل قطعه مورد نظر.

قالب: به صورت دودرج‌ای و از جنس ماسه مصنوعی با عدد ریزی ۶۲ بر اساس استاندارد AFS است. برای افزایش استحکام و خودگیری ماسه از چسب سیلیکات سدیم و دمش گاز CO₂ استفاده می‌شود. علت انتخاب قالبگیری با استفاده از روش فوق عواملی چون استحکام بالای ماسه و تولید آسان ماهیچه، کیفیت سطح بالای قطعه تولیدی، عدم کنده‌شدن و جابجایی ماسه توسط مذاب و غیره است. مقدار چسب مصرفی طبق نمودار شکل ۶ برابر با ۳/۷ درصد است. پس از افزودن چسب، گاز دی اکسید کربن به داخل قالب دمیده می‌شود تا طبق واکنش زیر سیلیس ژلاتینی حاصل و ذرات ماسه به یکدیگر اتصال یابند [۱۵].

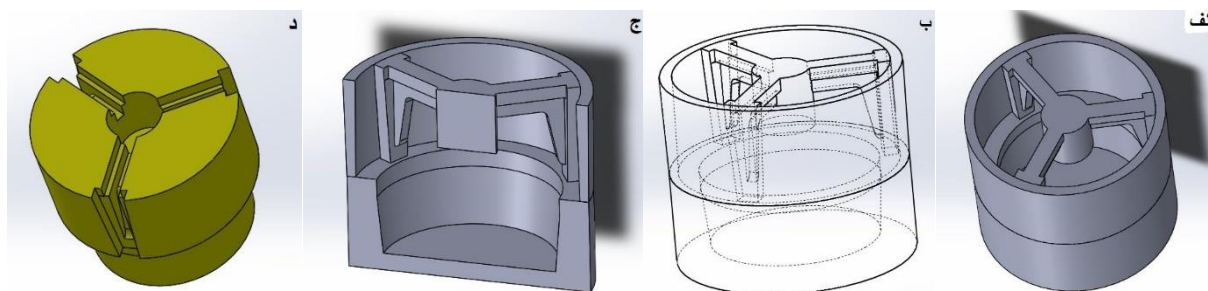


زمان دم‌ش گاز نیز حائز اهمیت است و همانطور که در شکل ۶-الف مشاهده می‌شود، زمان دم‌ش گاز برای مخلوط ماسه که ظرف چند ساعت مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌تواند طولانی باشد تا استحکام در حد قابل قبولی حفظ شود و همچنین قابلیت فروپاشی خوبی داشته باشد [۱۵ و ۳].



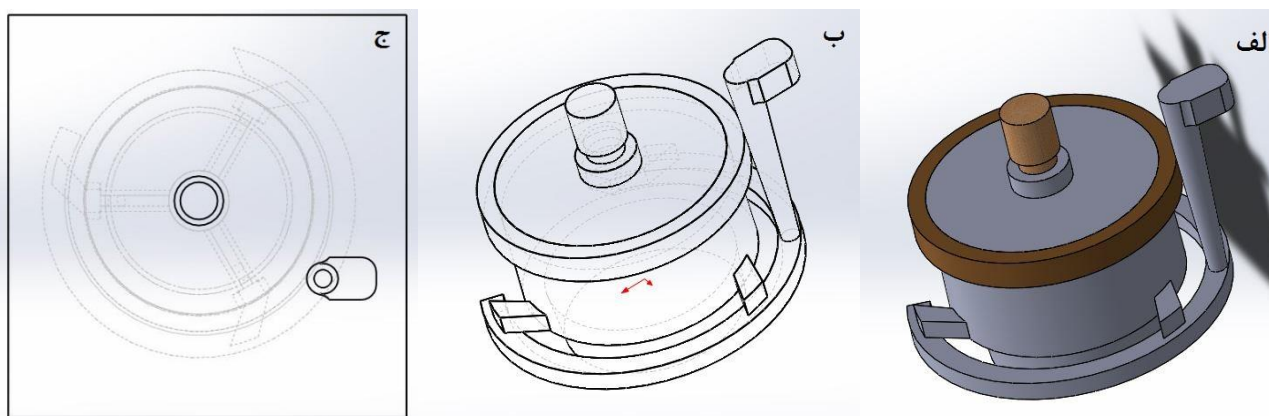
شکل ۶. الف) تاثیر عدد ریزی بر انتخاب مقدار بهینه چسب مصرفی و ب) تاثیر زمان دم‌ش گاز بر استحکام ماسه قالبگیری [۳].

ماه‌یچه: بهترین و سریع‌ترین روش تولید قطعه مورد نظر با توجه به توضیحاتی که در قسمت‌های قبل داده شد، استفاده از ماه‌یچه است. جعبه ماه‌یچه مورد نظر از نظر شکل نسبتاً ساده و دوتکه می‌باشد. شکل ۷ جعبه ماه‌یچه و همچنین روند تولید ماه‌یچه نهایی را نشان می‌دهد. خط جدایش دونیمه جعبه ماه‌یچه در شکل ۷-الف کاملاً مشخص است. همانطور که مشاهده می‌شود، جعبه ماه‌یچه به صورت دوتکه می‌باشد که نیمه زیری آن وظیفه ایجاد ریشه ماه‌یچه و رینگ کف و نیمه بالایی قسمت‌های اصلی قطعه را ایجاد می‌کند. ارتفاع ریشه ماه‌یچه که در درجه زیری قرار می‌گیرد و همچنین شیب آن طبق استاندارد DIN1511 آلمان به ترتیب ۴۰ میلیمتر و ۵ درجه است [۱]. همچنین جای مبردی که قرار است در زیر استوانه قرار گیرد، در ماه‌یچه ایجاد می‌شود و برای اینکار قسمت استوانه‌ای شکل که در شکل ۷-ج مشخص است، عمیق‌تر در نظر گرفته می‌شود.

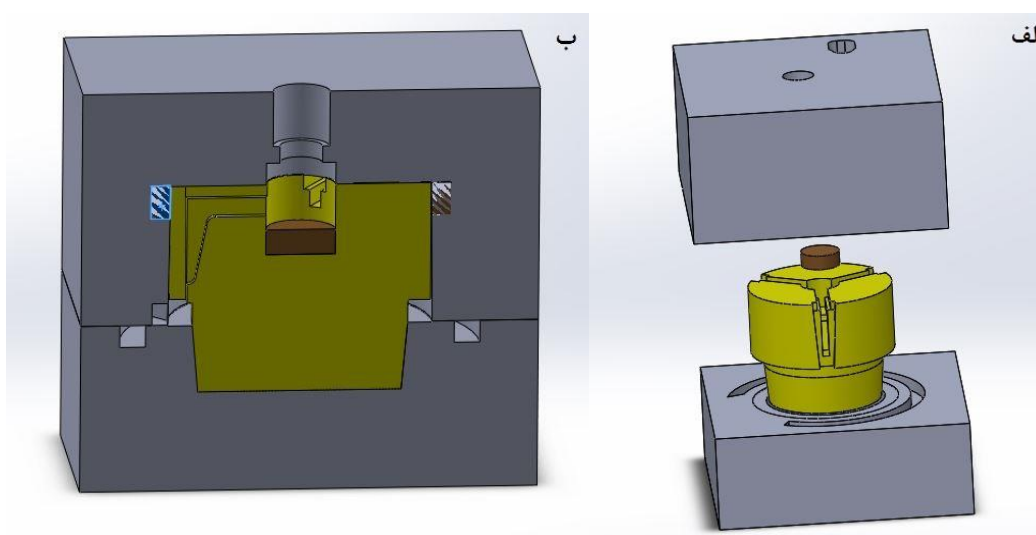


شکل ۷. قسمت‌های مختلف جعبه ماه‌یچه و ساخت ماه‌یچه نهایی.

قالبگیری و مونتاژ: با توجه به اینکه مدل مورد نظر دوتکه می‌باشد، ابتدا تکه زیری مدل در درجه زیری قالبگیری شده و پس از برگرداندن آن نیمه دیگر مدل بر روی آن قرار گرفته و تغذیه، مبرد رینگی و اجزای سیستم راهگاهی در جای خود مستقر شده و درجه بالایی نیز تکمیل می‌شود. در مرحله بعد مدل از قالب خارج شده و ماه‌یچه از پیش آماده‌شده در جای خود مستقر شده، مبرد آهنی در سر ماه‌یچه یعنی زیر تغذیه قرار گرفته، و قالب آماده بارریزی خواهد شد. شکل ۸ مدل و متعلقات آن به همراه محل سیستم راهگاهی، مبرد رینگی و تغذیه را نشان می‌دهد. در نهایت قسمت‌های مختلف یعنی ماه‌یچه، مبرد سر ماه‌یچه، درجه زیری و رویی بر روی یکدیگر قرار گرفته و قالب آماده بارریزی می‌شود. شکل ۹ مونتاژ اجزای مختلف قالب را نشان می‌دهد که در شکل ۹-ب مبرد رینگی شکل هاشور زده شده است.



شکل ۸. الف) مدل به همراه سیستم راهگاهی، میرد آهنی رینگ و تغذیه. ب) مدل و متعلقات آن و نمایش کامل قسمت‌های مختلف. ج) مدل و متعلقات آن در نمای بالا و نمایش محل اتصال کانال‌های فرعی به قسمت‌های تمرکز حرارتی در زیر ستون‌ها.

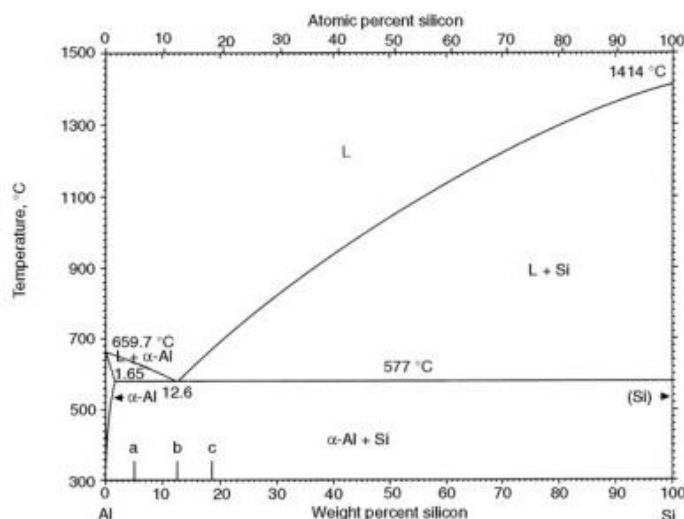


شکل ۹. الف) مونتاژ قسمت‌های مختلف قالب. ب) قالب آماده بارریزی.

نکته: در صورت عدم کج زدن کانال‌ها فرعی به قطعه، نه تنها این کانال‌ها نمی‌توانند انقباضات را جبران کنند بلکه باعث شدیدتر شدن تمرکز حرارتی نیز خواهند شد.

نکته: آلیاژ A356 مقاومت به پارگی گرم بسیار بالایی دارد و احتمال ترک خوردن قطعه به دلیل وجود ماهیچه سیلیسی در مرکز قطعه بسیار پایین است [۵].

۴- شرایط عملیات ذوب و ریخته‌گری (حداکثر ۲ صفحه به علاوه جداول و نمودارهای مورد نیاز)



شکل ۱۰. دیاگرام تعادلی آلومینیوم-سیلیسیم [۱۶].

نکته: بسیاری از اطلاعات مورد نیاز نظیر چگونگی انجماد آلیاژ، حساس بودن آلیاژ به جذب گاز و تلاطم، حساسیت آلیاژ به پارگی گرم، انتخاب کوره مناسب جهت ذوب آلیاژ و غیره را می‌توان از دیاگرام تعادلی آلیاژ استخراج کرد و بدین ترتیب متوجه می‌شویم که در طراحی سیستم راهگامی، تغذیه‌گذاری، شرایط قالبگیری و روش تولید چه پارامترهایی باید رعایت شوند.

خواص متالورژیکی آلیاژ A356: آلیاژهای آلومینیوم حاوی سیلیسیم به علت سیالیت زیاد که ناشی از وجود حجم نسبتاً زیاد سیلیسیم در آلومینیوم است، عموماً از مهمترین آلیاژهای ریختگی آلومینیوم محسوب می‌شوند. با توجه به نمودار تعادلی این آلیاژ، مذاب در منطقه هیپوئوتکتیک منجمد می‌شود و دامنه انجماد این آلیاژ حدود ۶۵ درجه سانتی‌گراد است [۱۷]. پس با این شرایط این آلیاژ جزء آلیاژهای با دامنه انجماد بالا می‌باشد. در آلیاژهای با دامنه انجماد بالا انقباضات پراکنده هستند و لذا جهت‌دار کردن انجماد بسیار حائز اهمیت است. اگر دقت کافی در تهیه مذاب و جهت‌دار کردن انجماد صورت نگیرد، انقباضات به شدت پراکنده می‌شوند [۷].

دمای بارریزی: براساس نمودار تعادلی، نقطه ذوب آلیاژ ۶۱۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همچنین دامنه انجماد حدود ۶۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. پس این آلیاژ جزء آلیاژهای با دامنه انجماد بالا است (اگر دامنه انجماد آلیاژ کمتر از ۶۰ درجه باشد، آلیاژ با دامنه انجماد کوتاه است و اگر دامنه انجماد بیش از ۶۰ درجه باشد، آلیاژ با دامنه انجماد بالا خوانده می‌شود [۱۸]). در انتخاب فوق ذوب مناسب باید به دو فاکتور مهم توجه کرد. یکی رسیدن به سیالیت مناسب و دیگری حداقل جذب گاز مذاب [۱۸]. حال اگر فوق ذوب را زیاد کنیم، سیالیت بالا می‌رود ولی جذب گاز هم به شدت افزایش می‌یابد و اگر فوق ذوب را کم کنیم، جذب گاز کاهش می‌یابد ولی سیالیت نیز افت می‌کند. پس با توجه به ضخامت قطعه و دستیابی به سیالیت مناسب و حداقل جذب گاز، فوق ذوب مناسب را ۹۵ درجه سانتی‌گراد در نظر می‌گیریم که بنابراین دمای بارریزی حدود ۷۱۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

جدول ۱. دمای بارریزی پیشنهادی برای ریخته‌گری آلیاژهای آلومینیوم در قالب ماسه‌ای [۱۸].

۷۳۰ درجه سانتی‌گراد	قطعات نازک زیر ۱۵ میلیمتر
۷۱۰ درجه سانتی‌گراد	قطعات متوسط بین ۱۵ تا ۴۰ میلیمتر
۶۹۰ درجه سانتی‌گراد	قطعات ضخیم بیش از ۴۰ میلیمتر

انتخاب کوره و مواد شارژ: معیار مهم در انتخاب کوره ذوب نقطه ذوب آلیاژ، میل ترکیب شیمیایی و تمایل به اکسیدشدن مذاب می‌باشد. در آلیاژهای آلومینیوم-سیلیسیم به دلیل نقطه ذوب پایین از انواع کوره‌ها می‌توان استفاده کرد. حجم مذاب مورد نیاز و تناژ تولید بر ظرفیت و نوع کوره تاثیر می‌گذارد [۱۹]. در اینجا ما با توجه به دلایل زیر از کوره الکتریکی استفاده می‌کنیم [۱۹]:

۱. کنترل ترکیب شیمیایی بهتر انجام شده و درجه حرارت مذاب و ترکیب شیمیایی آن را قبل از ریختن مذاب به درون قالب بهتر می‌توان کنترل کرد. این مزیت در تولید آلیاژ مذکور اهمیت زیادی دارد.

۲. کوره‌های برقی در رابطه با تمیزی و عدم آلودگی کارگاه ریخته‌گری بهتر از کوره‌های دیگر می‌باشند.

واکنش‌های مذاب: درمذاب آلومینیوم فعل و انفعالات شیمیایی مختلف بین مواد اکسیدی و ترکیبات مختلف و آلومینیوم و مواد آلیاژی آن صورت می‌گیرد که حاصل به صورت مواد جامد غیرفلزی (اکسیدی) و یا حباب‌های گازی در قطعه باقی می‌ماند که این واکنش‌ها به شکل زیر صورت می‌گیرند [۷، ۱۹]:

۱. فعل و انفعالات با اکسیژن و نیتروژن موجود در هوا که مهمترین منشاء وجود ترکیبات غیرفلزی در مذاب آلومینیوم هستند (به عنوان مثال واکنش آلومینیوم با اکسیژن که باعث ایجاد Al_2O_3 می‌شود).

۲. فعل و انفعالات با محصولات سوخت

۳. فعل و انفعالات با بخار آب که باعث ایجاد هیدروژن اتمی به صورت حل شده در مذاب آلومینیوم می‌شود.

۴. فعل و انفعالات با هیدروژن که یا از طریق بخار آب و یا از طریق هیدروژن موجود در هوا وارد مذاب می‌شود. به دلیل آنکه حلالیت هیدروژن در حالت جامد بسیار کم است، به صورت حباب و تخلخل در قطعه ریخته‌شده ظاهر می‌شود و خواص مکانیکی را به شدت کاهش می‌دهد.

توجه: با استفاده از کوره الکتریکی از ایجاد بسیاری از واکنش‌های بالا جلوگیری می‌شود و مذاب با حداکثر کیفیت به دست می‌آید. **عملیات کیفی:** عملیات کیفی در آلیاژهای آلومینیوم به شکل زیر تقسیم می‌شوند [۷، ۸]:

گاززدایی: با توجه به هزینه‌های اقتصادی و همچنین نوع مکانیزم از گاز آرگون استفاده می‌شود. این گاز پس از ورود به مذاب فشار درونی مذاب را بالا برده در حالی که فشار خارجی مذاب پایین است. پس طبق قوانین ترمودینامیک (قانون سیورت)^۱، مذاب برای رسیدن به حالت تعادل با محیط، گازهای محلول را خارج می‌کند. در اینجا از گاز آرگون که توسط یک لانس گرافیتی به داخل مذاب تزریق می‌گردد، استفاده می‌شود. فشار تزریق نیز به مقادیر کمتر از 206KPa یا 30PSI می‌رسد.

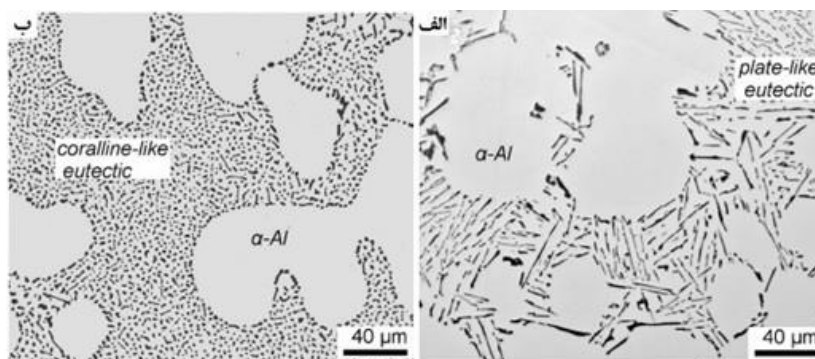
اکسیدزدایی: اکسیژن زدایی به دو روش شیمیایی و مکانیکی صورت می‌گیرد. روش شیمیایی برای ذوب‌هایی که به شدت نسبت به تلاطم حساس هستند (مثل آلیاژهای Al-Mg)، بکار می‌رود. عیب اصلی این روش، پرهزینه بودن آن می‌باشد. روش مکانیکی (استفاده از فلاکس پوششی) در بیشتر آلیاژهای آلومینیوم استفاده می‌شود. بدین صورت که نیمی از فلاکس را قبل از ذوب و نیمی از آن را بعد از ذوب اضافه می‌کنیم. ما در اینجا از روش مکانیکی استفاده می‌کنیم.

نکته: دمش گاز آرگون حلالیت هیدروژن را کاهش می‌دهد. همچنین کوره انتخابی نیز باعث حداقل جذب هیدروژن می‌شود.

اصلاح فاز دوم: با توجه به موقعیت آلیاژ، سیلیسیم به صورت تیغه‌ای شکل ظاهر می‌شود و به شدت برخی خواص مکانیکی نظیر انعطاف‌پذیری را کاهش می‌دهد. برای اصلاح این تیغه‌های شکننده از سدیم یا استرانسیم استفاده می‌کنند. به دلیل آنکه از سدیم خالص نمیتوان استفاده کرد، از ترکیبات آن استفاده می‌کنیم. در اینجا از Nucleant 11M به میزان ۰/۰۳-۰/۱۵ درصد استفاده می‌کنیم [۱۸]. مکانیزم‌های اصلاح‌سازی زیادی مطرح شده‌اند که از حوصله این گزارش خارج است.

¹ Sivert

شکل ۱۱ تاثیر استفاده از استرانسیم را به خوبی نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. آلیاژ A356: الف) اصلاح نشده در حالت ریختگی و ب) اصلاح شده [۱۷].

جوانه‌زایی: آخرین مرحله عملیات کیفی قبل از ریختن مذاب به درون قالب جوانه‌زایی است که برای ریز کردن دانه‌ها و افزایش خواص مکانیکی استفاده می‌شود. در اینجا از Nucleant 11M استفاده می‌کنیم که حاوی ترکیبات بور و تیتانیم می‌باشد که قادر است کار جوانه‌زایی را نیز انجام دهد [۱۸و۷].

فیلتر کردن: در فیلتر کردن هدف جلوگیری از ورود آخال‌های شناور در مذاب می‌باشد که در آلیاژهای آلومینیوم به دلیل نقطه ذوب پایین معمولاً از فیلترهای الیافی استفاده می‌شود. همچنین فیلتر مورد استفاده باید نسبت به فعل و انفعالات مذاب بی‌اثر باشد. معمولاً برای آلیاژهای آلومینیوم از فیلترهای کالبرایت استفاده می‌کنند [۱۴و۷]. که در اینجا به دلیل نوع طراحی و همچنین مسائل اقتصادی از فیلتر استفاده نمی‌کنیم.

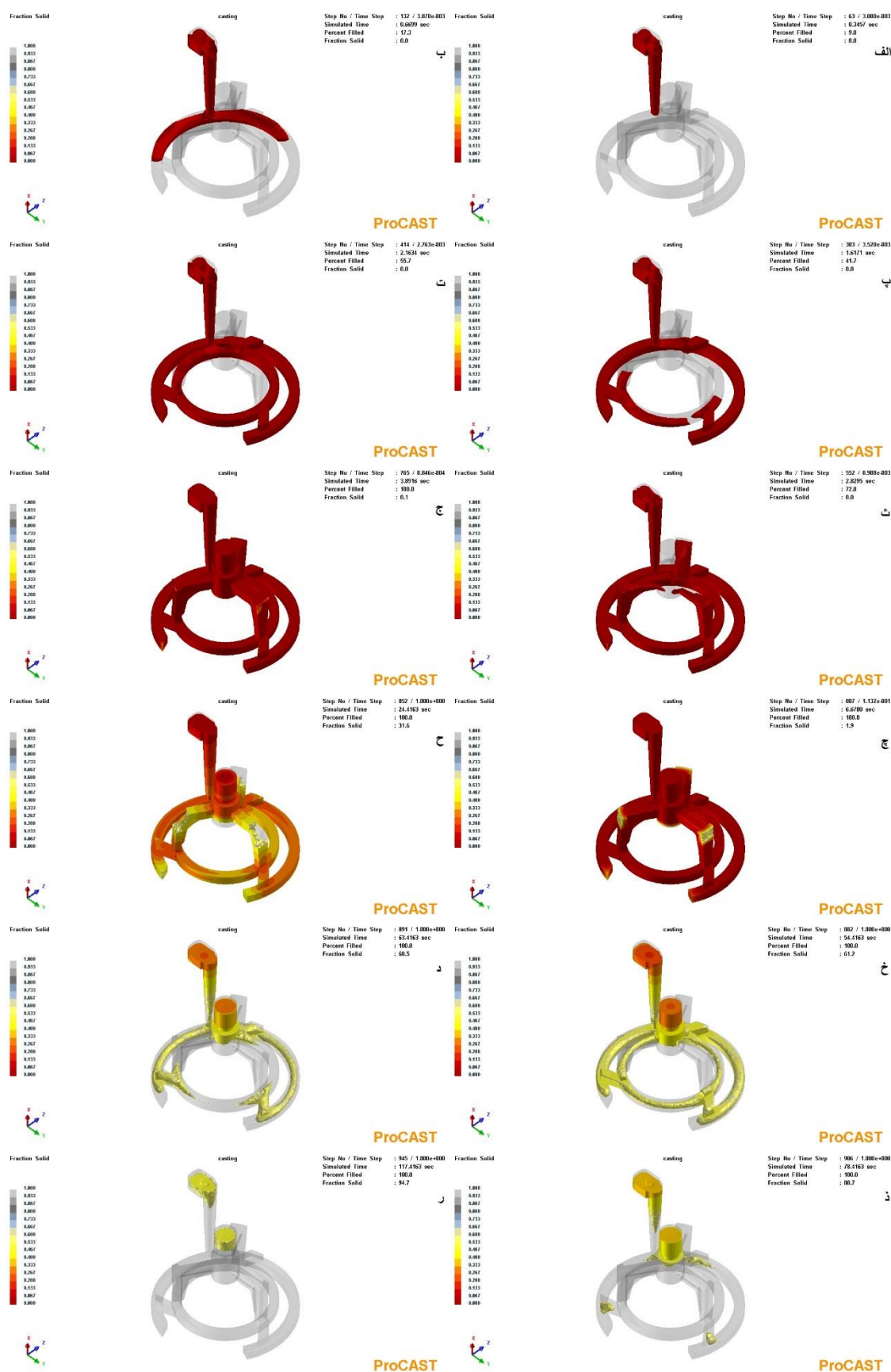
مراحل تهیه آلیاژ:

۱. ذوب شمش آلیاژ تحت فلاکس پوششی (چون شمش این آلیاژ در بازار موجود می‌باشد، معمولاً آلیاژسازی نمی‌کنند. اما اگر به دلایلی همچون مسائل اقتصادی خواستیم آلیاژسازی کنیم، ابتدا آلومینیوم خالص را ذوب می‌کنیم و سپس اکسیژن زدایی می‌کنیم و بعد سیلیسیم را به شکل هاردنر Al-23%Si اضافه می‌کنیم. لازم به ذکر است که به هیچ وجه مجاز نیستیم از سیلیسیم خالص استفاده کنیم. به دلیل آنکه این عنصر نقطه ذوب بالایی دارد و به راحتی حل نمی‌گردد).
۲. پس از ذوب نصف دیگر فلاکس پوششی را اضافه می‌کنیم و توسط گاز آرگون عمل گاززدایی را انجام می‌دهیم.
۳. سرباره‌گیری (چون سرباره‌های آلومینیوم به صورت خاکستر است، باید قبل از ذوب‌ریزی گرفته شوند).
۴. عملیات اصلاح فاز دوم و جوانه‌زایی که در آخرین مرحله صورت می‌گیرد.

شبیه‌سازی

بسیاری از کاربران از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی برای شناسایی مناطق گرم قطعه استفاده می‌کنند و این درحالی است که در اکثر قطعات (به جز قطعات پیچیده) نقاط گرم مشخص هستند و می‌توان این نقاط را با دواير هورز مشخص کرد. همچنین ما به هیچ وجه مجاز نیستیم قبل از طراحی سیستم راهگامی و وصل نمودن آن به قطعه کار شبیه‌سازی را انجام دهیم، چون ممکن است خود ما با طراحی غلط سیستم راهگامی نقاط گرم در قطعه بوجود آوریم (مثلاً برخورد مستقیم مذاب به ماهیچه در قطعات گرد و ایجاد تمرکز حرارت در آن ناحیه). شبیه‌سازی به ما کمک خواهد کرد که آیا طراحی که ما انجام داده‌ایم، صحیح است یا نه. به طور مثال آیا سیستم راهگامی می‌تواند مذاب

را به آرامی وارد قطعه کند و آیا این سیستم می تواند در حدی که ما می خواهیم، انقباضات را جبران کند و همچنین تغذیه ای که طراحی کرده ایم، ابعادش مناسب است و غیره. تصاویر شکل ۱۲ نحوه پر شدن و انجماد قسمت های مختلف قطعه را نشان می دهد.



شکل ۱۲. نحوه پر شدن و انجماد قسمت های مختلف قطعه.

توجه: برای مشاهده‌ی علائم اختصاری شکل‌ها که در سمت چپ تصاویر موجود هستند، لطفاً بر روی آن‌ها زوم کنید. برای کمتر اشغال کردن فضا مجبور به کوچک کردن آن‌ها شدیم.

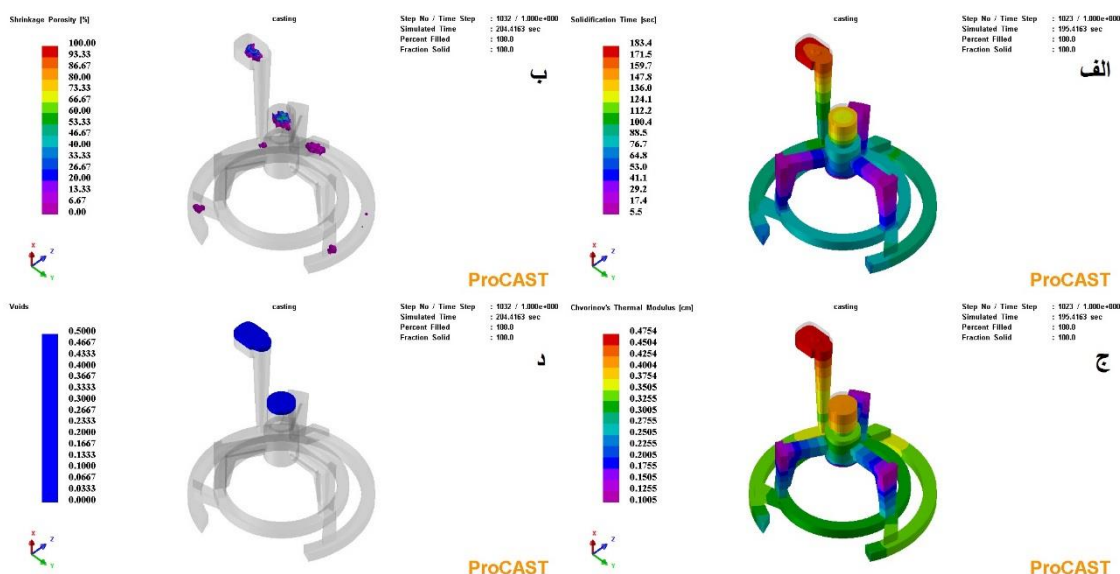
همانطور که در شکل ۱۲ مشخص است، مذاب در تمام لچظات ورود خود به قالب با جداره لوله راهگاه در تماس است و این باعث عدم ورود هوا به داخل مذاب می‌شود. همچنین در تصاویر به وضوح مشخص است که انجماد کاملاً جهت‌دار شده است و تمام انقباضات یا وارده تغذیه و یا وارد سیستم راهگاهی شده‌اند.

شکل ۱۳-الف زمان انجماد قسمت‌های مختلف قطعه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود انجماد کاملاً جهت‌دار شده است و مناطقی که مد نظر است در آخرین مرحله منجمد شده‌اند. شکل ۱۳-ب مهمترین دستور در شبیه‌سازی است که این دستور نشان‌دهنده این است که آیا قطعه سالم تولید شده است یا خیر. همانطور که ملاحظه می‌شود تمام انقباضات ممکن در سیستم راهگاهی و تغذیه متمرکز شده‌اند و کوچکترین انقباضی درون قطعه وجود ندارد و قطعه با حداکثر چگالی ممکن تولید شده است.

نکته: اگر درون قطعه انقباضی مشاهده شود، باید قطعه را اسکن کنیم و مرکز انقباض را مشاهده کنیم و احتمال ایجاد این انقباض را در قطعه بررسی کنیم.

شکل ۱۳-ج دستوری جدید می‌باشد که مختص نرم افزار پروکست^۱ ۲۰۱۵ است. این دستور مدول حرارتی چرنیف را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با مبردگذاری، تغذیه‌گذاری و سیستم راهگاهی مناسب توانسته‌ایم مدول برخی قسمت‌ها را کاهش و افزایش دهیم و شرایط مناسب را برای جهت‌دار کردن انجماد ایجاد کنیم.

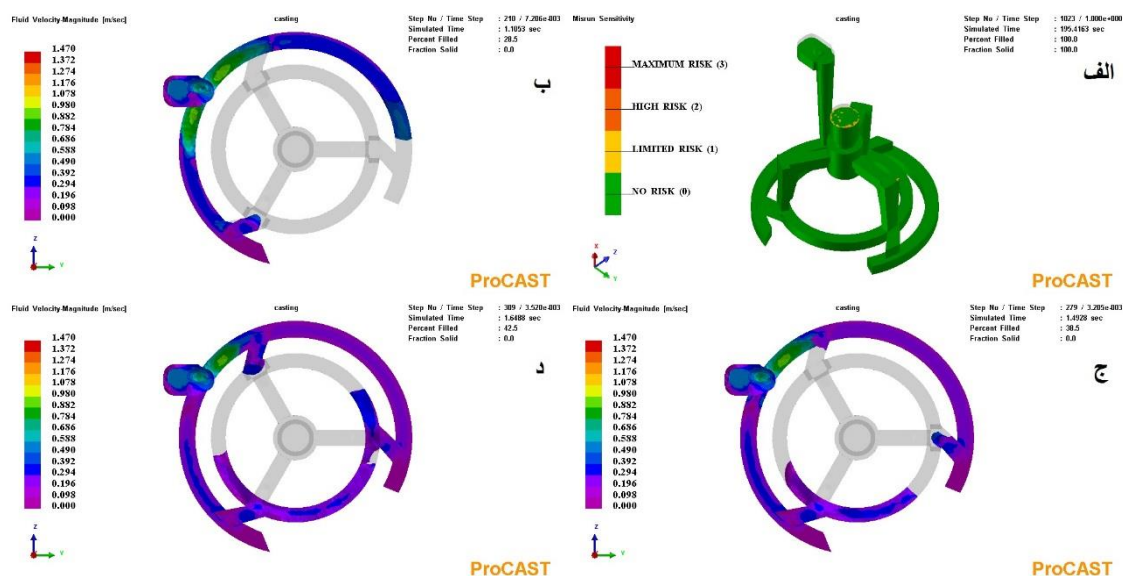
شکل ۱۳-د حفرات را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود تغذیه به‌خوبی عمل کرده و توانسته است انقباضات را جبران کند.



شکل ۱۳. الف) زمان انجماد قسمت‌های مختلف، ب) تخلخل‌های ایجاد شده در قطعه، ج) مدول حرارتی چرنیف در قسمت‌های مختلف و د) کشیدگی‌های ایجاد شده در قطعه.

با توجه به نازک بودن جداره‌های قطعه و همچنین نوع طراحی سیستم راهگاهی، احتمال ایجاد نیامد در قطعه بررسی شد. همانطور که در شکل ۱۴-الف مشاهده می‌شود، این احتمال بسیار کم و تقریباً برابر با صفر است. پس امکان ایجاد نیامد در قطعه مورد نظر وجود ندارد.

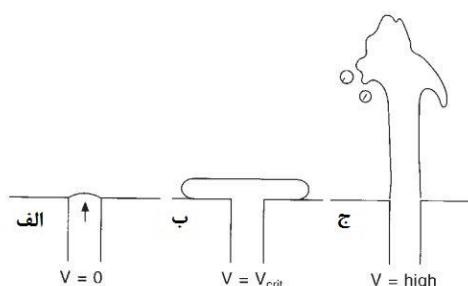
¹ Procast



شکل ۱۴. الف) حساسیت به نیامد مذاب و ب)، ج) و د) سرعت ورود مذاب به درون قطعه در کانال‌های فرعی.

نکته: بر اساس گفته کمپل، ماکزیمم سرعت ورود مذاب به درون قطعه برای آلیاژهای آلومینیوم باید ۰/۵ متر بر ثانیه باشد و به هیچ وجه نباید بیش‌تر از این مقدار شود [۱۲].

شکل‌های ۱۴-ب، ۱۴-ج و ۱۴-د سرعت ورود مذاب به قطعه را نشان می‌دهند. همانطور که ملاحظه می‌شود، در هر سه کانال فرعی این مقدار کمتر از مقدار بحرانی یعنی ۰/۵ متر بر ثانیه است و این یعنی حداقل جذب گاز و ماسه شویی. براساس قوانین کمپل، یک سرعت بحرانی وجود دارد که اگر سرعت ورود مذاب به قطعه کمتر از آن شود، احتمال عیب نیامد افزایش یافته و اگر سرعت مذاب بیشتر از آن شود، احتمال ایجاد عیوبی نظیر ماسه‌شویی، حفرات انقباضی و جذب حباب‌های گازی افزایش می‌یابد (شکل ۱۵ را ببینید) [۱۲].



شکل ۱۵. سرعت‌های ورودی مذاب به قطعه. الف) صفر، ب) سرعت بحرانی (سرعت مناسب) و ج) سرعت زیاد [۱۲].

نکته: در صورت استفاده از مبرد در محل اتصال رینگ به ستون قطعه (انقباضات این ناحیه را توسط کانال فرعی جبران کردیم)، مذاب در ناحیه بین مدول‌های M_2 و M_3 گیر خواهد کرد (مبرد رینگی ناحیه M_3 را سریع سرد خواهد کرد و شبیه‌سازی این گفته را تایید می‌کند) و انقباضات در آن ناحیه ایجاد می‌شود. پس نمی‌توان با مبرد گذاری از افزایش طول سیستم راهگاهی جلوگیری کرد.

توجه: تمام تصاویر، فیلم‌های نحوه پرشدن، انجماد و غیره برای تایید صحت تصاویر، شرایط مرزی اعمالی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی به دفتر مرکزی بر گذاری مسابقات ارسال خواهند شد.

۵- سادگی، انجام پذیری، ابتکار و خلاقیت (حداکثر ۲ صفحه)

در طراحی یک قطعه ریخته گری نکات بسیاری باید مورد توجه قرار گیرند. از مهمترین این نکات خواص خواسته شده و مقدار تولید هستند. این قطعه بدون هیچ گونه مبرد گذاری و فقط با یک تغذیه و یک سیستم راهگاهی ساده از نظر ظاهری سالم تولید خواهد شد و در مواردی که قطعات از لحاظ ظاهری مورد بررسی قرار می گیرند، این سیستم ساده مورد استفاده قرار می گیرد. همچنین اگر تعداد سفارشات تولید کم باشد (مثلا چیزی حدود ۱۰۰ قطعه)، و کیفیت قطعات خیلی مهم نباشد، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست که برای قطعه فوق ماهیچه طراحی شود. اما زمانی که تناژ تولید بالا باشد، دیگر سرعت عمل بسیار مهم می باشد و استفاده از جعبه ماهیچه اجتناب ناپذیر است. برای سادگی در تولید و عمل قالبگیری جعبه ماهیچه برای قسمت وسط قطعه ضروری است. اگر از جعبه ماهیچه استفاده نشود، به دلیل افزایش ارتفاع راهگاه بارریز و همچنین افزایش میزان ماسه در قالبگیری سه درجه ای، در کل بازده تولید افت خواهد کرد.

برای افزایش سرعت سرد کردن و از بین بردن تمرکز حرارتی در ناحیه M_3 ، باید از مبرد استفاده کرد. اگر از سه تکه مبرد به صورت جداگانه استفاده کنید، در هنگام مونتاژ کردن و قرار دادن ماهیچه در جای خود باید بسیار دقت کرد تا مبرد دقیقا در جای خود قرار گیرد. برای جلوگیری از اتلاف زمان و همچنین مشکلات به وجود آمده در صورت جایگذاری ماهیچه و عدم تماس مبرد با ناحیه M_3 ، از یک مبرد رینگگی شکل استفاده می کنیم. در اینصورت عملیات مونتاژ سرعت پیدا می کند و فقط کافیسیت ماهیچه در قالب قرار گیرد چون در هر صورت مبرد با محل تمرکز حرارت مورد نظر یعنی ناحیه M_3 تماس پیدا خواهد کرد.

ابتکار دیگر استفاده از یک مبرد در سر ماهیچه و درست زیر استوانه ای که قرار است تغذیه بر روی آن قرار گیرد، می باشد. جای مبرد در هنگام ماهیچه گیری ایجاد خواهد شد و این سبب افزایش در سرعت تولید خواهد شد. چون جایگذاری مبرد در هنگام قالبگیری نیاز به دقت دارد و ممکن است مبرد تکان خورده و قسمتی از آن از محل مورد نظر خود خارج شود. همچنین استفاده از این مبرد در سر ماهیچه سبب شد تا بتوانیم حجم تغذیه را کاهش و بدین ترتیب بازده تولید را افزایش دهیم.

برای بالابردن بازده تغذیه به هیچ وجه نباید از مواد گرمازا استفاده کرد، چون این مواد دمای احتراق بالایی دارند و نه تنها نمی توانند مبرد را گرم نگه دارند بلکه سبب سریع سرد شدن آن نیز خواهند شد.

در قطعات با جداره نازک در حالت عادی بازده تولید کم است و اگر بخواهیم برای تولید این قطعه برای بالابردن بازده ابعاد سیستم راهگاهی را کاهش دهیم، حتما قطعه در ناحیه M_2 معیوب خواهد شد. استفاده از سه کانال فرعی و همچنین نسبت $As:AR:AG 1:4:4$ برای تولید قطعه ای سالم اجتناب ناپذیر است. باید توجه شود که طراح در انتخاب نسبت راهگاهی کاملا صاحب اختیار است و بستگی به شرایط قطعه، هر نسبتی را می تواند انتخاب کند اما باید اصول کلی یعنی غیر فشاری بودن سیستم را رعایت کند. در اینجا برای تولید قطعه ای سالم مجبور شدیم این نسبت را افزایش دهیم و سالم بودن قطعه را به کاهش بازده ریخته گری ترجیح دادیم. با استفاده از طراحی خاص قطعه مورد نظر امکان استفاده از تغذیه باز فراهم شد.

استفاده از نرم افزارهای طراحی در افزایش سرعت، دقت و همچنین بهتر رساندن مطلب به خواننده از اهمیت بالایی برخوردار است. در اینجا تمام سطح ها و حجم های مورد نیاز برای محاسبه مدول های قسمت های مختلف توسط نرم افزار SolidWorks صورت گرفته است. در قدیم برای تست کردن طراحی اولیه از روش عملی استفاده می کردند. بدین صورت که ذوب ریزی صورت می گرفت و با برش قطعه و مشاهده قسمت های مختلف آن از سالم بودن آن اطمینان حاصل می کردند. این کار نیازمند صرف وقت و هزینه زیادی می باشد. امروزه اکثر کارخانجات به روز دنیا برای افزایش کیفیت قطعات تولیدی و افزایش بازده از نرم افزارهای شبیه سازی استفاده می کنند. بدین صورت که تمام فرضیات ممکن اعم از دمای بارریزی، محل سیستم راهگاهی و تغذیه گذاری، محل قرار گرفتن مبردها و غیره در نرم افزار تست می شوند و سپس در عمل مورد استفاده قرار می گیرند.

در این طرح از نرم افزار پروکست که حاصل بیش از ۳۰ سال ارتباط سازنده آن با صنعت می باشد، استفاده شد. در نهایت با استفاده از آن و دانسته های خود توانستیم به بهینه ترین طرح دست یابیم و قطعه ای با بالاترین چگالی ممکن و بازده را تولید نماییم.

۶- برآورد تقریبی هزینه تولید و توجیه اقتصادی طرح (حداکثر ۱ صفحه)

جدول ۲. مشخصات و ویژگی‌های ماشین‌آلات و تجهیزات خط تولید.

ردیف	شرح	کشور سازنده	تکنولوژی	تعداد	میزان مصرف برق (KW)	قیمت واحد تجهیزات (ریال)	قیمت کل هر تجهیز (میلیون ریال)
۱	کوره الکتریکی	ایران	داخلی	۱	900 (w/h)	۱۰۰۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰۰
۲	دستگاه همزن ماسه	ایران	داخلی	۱	400 (w/h)	۲۰۰۰۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰۰۰
۳	سایر تجهیزات	ایران	داخلی	-	-	۲۰۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۰۰۰۰۰
	جمع			۲	1300(w/h)	۱۴۰۰۰۰۰۰۰	۱۴۰۰۰۰۰۰۰

جدول ۳. مشخصات و هزینه‌های مواد اولیه جهت تولید محصول طرح.

ردیف	نام مواد اولیه	میزان مصرف برای تولید ۱۰ قطعه	قیمت تمام شده (ریال)
۱	شمش آلومینیوم-سیلیسیم	۱۰ کیلوگرم	۱۰۰۰۰۰۰
۲	چسب سیلیکات سدیم	۳ کیلوگرم	۱۰۰۰۰
۳	ماسه سیلیسی	۳۰ کیلوگرم	۷۰۰۰۰
۴	بوته گرافیتی	۱ عدد	۲۰۰۰۰۰۰
۵	مدل و جعبه ماهیچه	۱ عدد	۳۵۰۰۰۰۰
۶	سایر تجهیزات	-	۳۰۰۰۰۰۰
	قیمت		۹۵۸۰۰۰۰

پس با توجه به جداول بالا کل هزینه تولید برای ۱۰ عدد قطعه برابر با ۱۴۹۵۸۰۰۰۰ ریال می‌باشد.

این مقدار برای تولید کم اصلاً مقرون به صرفه نیست ولی برای تولید زیاد مقرون به صرفه خواهد بود.

در صورت تولید زیاد و بازگشت سرمایه، هزینه تولید برای هر قطعه با احتساب هزینه تراشکاری، دستمزد کارگر و غیره حدود ۱۷ هزار تومان و قیمت برای فروش آن ۲۵ هزار تومان است.

نقاط قوت طرح پیشنهادی

- ✓ تیم اجرایی متخصص و کارآمد
- ✓ بهره‌وری از نرم افزار شبیه‌سازی روز دنیا برای بالابردن کیفیت محصولات تولیدی
- ✓ استفاده از روش‌های تولید مناسب و مدرن برای تولید قطعات با حداکثر کیفیت
- ✓ کم هزینه بودن فرآیند تولید محصول
- ✓ قیمت مناسب و کیفیت مطلوب محصول

طرح مورد نظر با توجه به شرایط تولید یعنی استفاده از جعبه ماهیچه، کاهش حجم ماسه و چسب مصرفی، افزایش سرعت تولید، بالا بودن کیفیت محصولات و به حداقل رساندن قطعات برگشتی در تولید بالا توجیه اقتصادی بسیار خوبی خواهد داشت.

۷- توجیه زیست محیطی طرح و فرایند تولید (حداکثر ۱ صفحه)

با توجه به سروصدای بالا، ایجاد آلودگی‌های صوتی، ناقص بودن احتراق سوخت و ایجاد دود، کوره‌های زمینی کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

دود ناشی از سوخت کوره‌های زمینی سبب آلوده کردن فضای کارگاهی و مذاب می‌شود. این موضوع باعث افزایش تلفات ذوب نیز خواهد شد.

با توجه به موارد فوق برای تهیه مذابی عاری از هرگونه ناخالصی، گازهای حل شده و همچنین به حداقل رساندن تلفات مذاب از کوره الکتریکی استفاده می‌کنیم.

با رعایت تمام نکات مربوط به تهیه ذوب نمی‌توان گفت که مذاب تهیه شده کاملاً تمیز می‌باشد. معمولاً قبل از عملیات ذوب ریزی مذاب را گاززدایی می‌کنند. این کار می‌تواند توسط قرص‌های حاوی گاز کلر و یا گاز آرگون صورت گیرد. گاز کلر گازی بسیار سمی می‌باشد و هنگام گاززدایی مذاب آلومینیوم توسط قرص دگازور، گاز آلومینیوم کلراید ($AlCl_3$) تولید خواهد شد [۷۲]. این گاز محیط کارگاه را به شدت آلوده کرده و باعث ضرر رساندن به افرادی که در آن محیط مشغول کار هستند، می‌شود.

پس با توجه به موارد ذکر شده در این طرح ما از گاز خنثی و بی‌ضرر آرگون برای گاززدایی استفاده خواهیم کرد.

- [۱] سلیمی، م.، رسم مدل و قالب، ویرایش دوم، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۹۳.
- [۲] عابدی، ا.، مهدوی، و.، ریخته‌گری آلیاژهای آهنی، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ۱۳۸۸.
- [۳] عابدی، ا.، کرمی، م.، اصول تکنولوژی ریخته‌گری، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ۱۳۸۹.
- [4] Standard Specification for Aluminum-Alloy Investment Castings, Designation: B 618-02, ASTM International, 2001.
- [5] Campbell J., “*castings*”, Second edition, McGraw-Hill, Birmingham, 2003.
- [۶] امامی، م.، ثقفیان، ح.، اصول متالورژی ریخته‌گری، ویرایش دوم، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۹۳.
- [۷] حجازی، ج.، ریخته‌گری فلزات غیرآهنی، چاپ هفتم، انتشارات آزاده، ۱۳۸۸.
- [۸] طهماسبی، ا.، آلومینیوم، چاپ دوم، انتشارات آزاده، ۱۳۸۵.
- [۹] نظم‌دار شهری، س.، محاسبات فنی تخصصی، ویرایش دوم، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۹۳.
- [10] Rao P.N., “*Manufacturing Technology*”, Second edition, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, Malaysia, 1998.
- [11] Stefanescu M.D., “*Science and Engineering of Casting Solidification*”, Second edition, The Ohio state university, USA, 2009.
- [12] Campbell J., “*The 10 rules of castings*”, Elsevier, 2004.
- [13] Chastain D.S., “*Metal Casting: A Sand Casting Manual for the Small Foundry*”, University of Central Florida, USA, 2004.
- [14] ASM Metals Handbook, Vol. 15, “*Casting*”, ASM International, 2002.
- [۱۵] امامی، م.، ثقفیان، ح.، اصول تکنولوژی ریخته‌گری، ویرایش دوم، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۹۱.
- [16] ASM Metals Handbook, Vol. 3, “*Alloy phase diagrams*”, ASM International, 2002.
- [17] Zolotarevsky S., Belov A., Glazoff V., “*Casting Aluminum Alloys*”, Elsevier, Moscow, 2007.
- [18] Brown R., “*Foseco Non-ferrous Foundryman’s Handbook*”, Eleventh edition, Elsevier, 1999.
- [19] Beeley P., “*Foundry Technology*”, Second edition, Elsevier, 2001.