

## پژوهش‌نامه ریخته‌گری

### مقاله مروری:

### مروری بر فرایند ریخته‌گری دقیق در صنایع هنری و زیورآلات

نازنین همایون‌جم<sup>۱</sup>، فاطمه اصغری<sup>۱</sup>، احمد سعادت<sup>۲</sup>، مهدی ملکان<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

\* نویسنده مکاتبه کننده: E-mail: mmalekan@ut.ac.ir

#### چکیده:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۹

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۰۵

فرآیند ریخته‌گری دقیق، روشی قابل اطمینان برای تولید اشکال پیچیده و ظریف، با کیفیت سطحی مناسب و دقت ابعادی بالا است. بزرگ‌ترین مزیت ریخته‌گری دقیق امکان تولید انواع گسترده‌ای از محصولات صنایع مختلف است و اجسام غیرقابل ماشین کاری را می‌توان به همان شکل از پیش تعیین شده ریخته‌گری کرد، به طوری که قطعه نهایی عموماً نیازی به جوشکاری و مونتاژ کردن ندارد و در نتیجه باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌شود. این روش در دوران باستان به منظور تولید اسلحه، جواهرات و مجسمه‌های هنری استفاده می‌شد. پس از گذشت قرن‌ها، این تکنولوژی پیشرفت کرده و در ریخته‌گری انواع آثار هنری، قطعات صنعتی و تولید پره‌های توربین به کار می‌رود. مقاله حاضر، مروری بر به کارگیری فرآیند ریخته‌گری دقیق در تولید قطعات هنری است. در این مقاله تاریخچه ریخته‌گری دقیق، خصوصیات موم مدل، چسب، مواد افزودنی و پرکننده‌ها، روند ساخت پوسته‌های سرامیکی برای آلیاژهای غیرآهنی، مقایسه موم‌زدایی با دو روش ماکروبو و اتوکلاو، ذوب‌ریزی و عملیات نهایی، روش پرینت سه بعدی برای ساخت مدل و نهایتاً شبیه‌سازی‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی عیوب و بهینه‌سازی مدل به طور مجزا مرور خواهد شد.

#### واژه‌های کلیدی:

ریخته‌گری دقیق،  
نقصهای ریختگی،  
زیورآلات،  
نمونه سازی سریع،  
شبیه سازی.

#### ارجاع به این مقاله:

نازنین همایون‌جم، فاطمه اصغری، احمد سعادت، مهدی ملکان، مروری بر فرایند ریخته‌گری دقیق در صنایع هنری و زیورآلات، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، تابستان ۱۴۰۰، جلد ۵، شماره ۲، صفحات ۱۳۹-۱۵۹.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/fjz.2022.328830.1151

#### ۱- مقدمه

این فرآیند در تولید محصولات متنوع، کاربردی بودن آن در صنایع مختلف، نیازمندی به تجهیزات کم و ایمن بودن برای محیط‌زیست از دیگر دلایل پیشرفت و محبوبیت آن است [۳]. فرآیند ریخته‌گری دقیق به علت ویژگی‌های منحصر به فردی که دارد، بخش عمده‌ای از ریخته‌گری فلزات را به خود اختصاص می‌دهد. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به کیفیت بالای سطوح نهایی، ایجاد خطوط و شیار و سطوح برجسته و مقاطع نازک اشاره کرد. همچنین امکان استفاده از طیف گسترده‌ای از آلیاژهای غیر آهنی به ویژه آلومینیوم، کاربرد آن را از چرخ‌های توربوشارژر تا سرچوب‌های گلف و ایمپلنت‌های مفصل ران و صنایع دفاعی و هوافضا ممکن می‌سازد [۵و۴].

ریخته‌گری دقیق<sup>۱</sup> فرآیندی است که قرن‌ها توسط بشر مورد استفاده قرار گرفته و توانایی بسیار بالایی در تولید قطعاتی با دقت ابعادی بالا، کیفیت سطحی مناسب و تناژ بالا دارد [۱و۲]. این روش به‌خصوص برای تولید مستقیم قطعات نهایی، بدون نیاز به ماشین کاری، بسیار کاربردی است. بنابراین، به کمک این روش تولید قطعاتی که به دلیل پیچیدگی هندسی و یا جنس آلیاژ آنها، امکان ماشین کاری ندارند امکان‌پذیر است. ریخته‌گری دقیق، روشی بسیار قدیمی و تاریخی برای تولید ابزار و قطعات هنری بوده که به مرور زمان، به یکی از روش‌های کاربردی، نوین و پیشرفته در زمینه تولید قطعات تبدیل شده است. توانایی بالای

<sup>۱</sup> Investment casting (IC)

در ادامه نیز، مراحل مختلف فرایند تولید قطعات به روش ریخته‌گری دقیق به طور سنتی و مدرن بررسی شده و به پیشرفت‌های صورت گرفته در هر یک از مراحل مدل‌سازی، قالب‌گیری، موم زدایی، پخت قالب و ریخته‌گری پرداخته خواهد شد. در نهایت نیز به بررسی نحوه کاربرد تکنولوژی جدید پرینت سه بعدی و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری در بهبود و بهینه‌سازی قطعات و کاهش هزینه‌های تولید، در فرایند ریخته‌گری دقیق خواهد پرداخت.

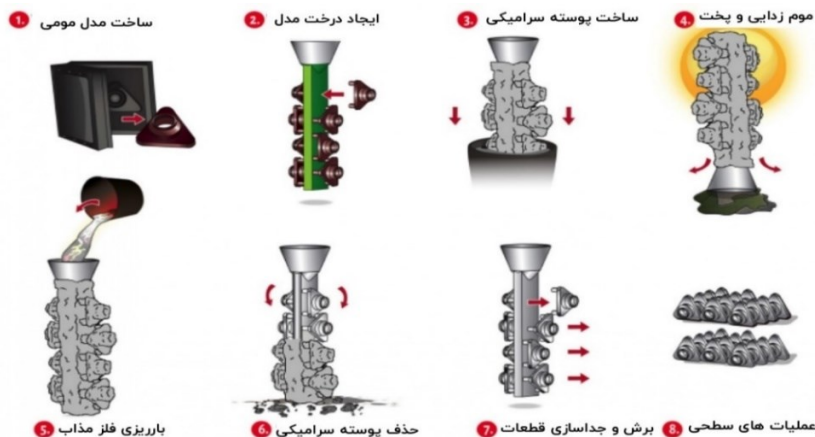
## ۲- پیشینه تاریخی ریخته‌گری دقیق

تاریخچه این فرآیند به ۵۰۰۰ سال پیش از میلاد، به اولین تمدن‌های شرق نزدیک بازمی‌گردد که به منظور ساخت ابزار آلات توسط انسان‌های اولیه مورد استفاده قرار گرفته است [۹و۸]. انسان‌های اولیه با کشف توانایی ذوب فلزات و قابلیت شکل‌دهی آن‌ها در قالب، یکی از گام‌های اصلی به سوی کشف فرآیند ریخته‌گری دقیق برداشتند. حدود ۴۰۰۰ سال قبل از میلاد، در چندین منطقه مختلف، پس از انجام آزمایش طولانی روی مواد معدنی رنگی مانند مالاشیت<sup>۲</sup> و آزوریت<sup>۳</sup>، بشر شروع به ذوب مس کرد [۹]. این فرآیند در اصل یکی از قدیمی‌ترین روش‌های تولید قطعات ظریف اما با هندسه مستحکم به ویژه قطعات هنری و تزئینی از فلزاتی گرانبها مانند طلا و برنز در تمدن‌های کهن هم چون مصر بوده‌است که در طی قرن‌ها با پیشرفت‌های حاصل شده در فرایند ریخته‌گری و همچنین تکنیک‌های ساخت، به مدرن‌ترین روش ریخته‌گری تبدیل شده است [۱۰].

از جمله محدودیت‌های این روش می‌توان به انبساط مدل‌های مومی در طی فرآیند، محدودیت در ابعاد قطعات، امکان ایجاد ترک در پوسته سرامیکی و چرخه طولانی تولید اشاره کرد. با اینکه ابزار گران‌قیمتی در این فرآیند مورد استفاده نیست اما به دلیل عملیات دستی و نیروی انسانی مورد نیاز در طی ساخت مدل و دوغاب سرامیکی، افزایش هزینه‌ها را به دنبال داشته و از دسته فرآیندهای اقتصادی خارج می‌شود [۶].

برای ساخت قطعه مورد نظر در آغاز مدلی عموماً از جنس موم که شکل و جزئیات دقیق قطعه نهایی را دارد ساخته می‌شود که یا از طریق تزریق موم مذاب به درون قالب فلزی و یا شکل دادن مستقیم آن توسط نیروی کار یا دستگاه‌های نمونه‌سازی سریع<sup>۱</sup> صورت می‌گیرد. سپس مدل‌های ساخته شده بر روی یک راهگاه مومی سوار شده و یک خوشه یا درخت تشکیل می‌شود. در مرحله بعد پوسته سرامیکی بر روی آن اعمال شده و با قرارگیری در کوره و حرارت دهی، موم داخل آن ذوب می‌شود. همچنین با ادامه فرایند حرارتی دهی و پخت، استحکام پوسته سرامیکی نیز افزایش می‌یابد. در مرحله بعد در حفره ایجاد شده، فلز مذاب ریخته می‌شود و پس از انجماد، سیستم راهگاهی و تغذیه جدا شده و با شکستن پوسته یا تکان دادن، قطعه ریخته شده خارج می‌گردد [۷]. برای داشتن درک بهتری از این روش، شماتیک کلی مراحل ریخته‌گری دقیق در شکل (۱) آورده شده است.

مقاله حاضر با هدف مطالعه پیشینه تاریخی و پیشرفت‌های اخیر، در زمینه جواهرات و قطعات هنری تولید شده به روش ریخته‌گری دقیق گردآوری شده است. در همین راستا ابتدا جوانب تاریخی ریخته‌گری دقیق در تولید لوازم زینتی و هنری در اعصار و مناطق مختلف مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



شکل ۱- شماتیک مراحل مختلف فرایند ریخته‌گری دقیق شامل: ۱- خروج مدل مومی از قالب، ۲- اتصال مدل‌ها به راهگاه و ایجاد خوشه، ۳- غوطه‌وری در دوغاب و ایجاد پوسته سرامیکی، ۴- موم‌زدایی و پخت، ۵- بارریزی فلز مذاب، ۶- حذف پوسته سرامیکی، ۷- برش و جداسازی قطعات از راهگاه و ۸- عملیات سطحی، پرداخت کاری و بسته‌بندی [۷].

<sup>۳</sup> Azurite

<sup>۱</sup> Rapid prototype

<sup>۲</sup> Malachite

اولین ریخته‌گری‌ها توسط مس خالص صورت گرفت اما به مرور از مس‌های آرسنیکی و بعدها از برنز و قلع و حتی طلا هم استفاده کردند [۹]. بررسی کوتین، بیان می‌کند که فرآیند ریخته‌گری دقیق نقش مهمی در تغییر و پیشرفت فرهنگ مردم از طریق تمدن‌های باستان داشته است [۱۱].

اگرچه به هیچ وجه اولین نمونه ریخته‌گری دقیق پیدا نشد، اما برخی از قدیمی‌ترین نمونه‌های ریخته‌گری دقیق ساخته شده از مس شامل مجسمه‌های کوچکی از حیوانات، به صورت خوابیده است که روی استوانه‌ای حکاکی شده از سنگ آهک<sup>۳</sup> یا منیزیت<sup>۴</sup> قرار گرفته‌اند. شکل (۳)، نمونه‌ای از مجسمه ریخته‌گری مربوط به دوره اوروک در بین‌النهرین که حدوداً مربوط به ۳۵۰۰ سال قبل از میلاد است را نشان می‌دهد [۹]. در همین دوره در ایلام (واقع در جنوب غربی ایران)، تعدادی از سنجاق‌های بزرگ لباس با بزهای کوهی تعظیم کرده و یا سایر حیوانات کشف شد که هم اکنون در موزه لوور هستند. تمامی این نمونه‌ها، مهارت در تکنیک ریخته‌گری و نمایش جزئیات کامل را نشان می‌دهند. همچنین، در سال ۱۹۶۱ قطعات پیچیده‌تر ریخته شده از مس آرسنیکی که در یک غار خارج از دسترس در Nahal Mislunar مشرف به ساحل غربی دریای لوط در فلسطین مخفی شده بود، یافت شدند که تصویر یکی از این قطعات در شکل (۴) قابل مشاهده است. مجسمه‌ای مسی از یک ارابه با چهار الاغ وحشی در شکل (۵) قابل مشاهده است که متعلق به یک پادشاه سومری بوده و ۲۸۵۰ سال قبل از میلاد در نزدیکی محرابی بلند در یک معبد در Tell Agrab در شمال شرقی بغداد مدرن کشف شده است و اکنون در موزه عراق در این منطقه قرار دارد. اگرچه این مجسمه ۷ سانتی‌متری به شدت آسیب دیده و دچار خوردگی شده است، اما نمایانگر مهارت در مدل‌سازی و ریخته‌گری است. با گذر از تمدن‌ها و دوره‌های مختلف تاریخی تا رسیدن به عصر معاصر که جنگ جهانی دوم از نقاط عطف آن است، شاهد

البته هیچ اطلاعات دقیقی در مورد تاریخ، موقعیت جغرافیایی یا مراحل متالورژیکی ریخته‌گری دقیق در دسترس نیست، با این حال در کاوش‌های باستان‌شناسی در تمدن‌های ایران، سوریه، فلسطین و حتی تایلند شواهدی از حضور آن به دست آمده است [۹ و ۱۰]. به جز آسیای میانه و تمدن‌های ذکر شده، جواهرات، بت‌ها و گنجینه‌های ساخته شده با این روش در مقبره اینکا<sup>۱</sup> در آمریکای مرکزی و جنوبی و یا تمدن اتروسکان<sup>۲</sup> در اروپا یافت شده است. همچنین ساخت بت با این روش، مانند مجسمه گانشا در شکل (۲)، به ویژه در چین و هندوستان و در تمدن‌های Indus valley و Harappan رواج داشته است [۱۱].

در ابتدا انسان‌های نخستین مس را در قالب‌های باز و ساده‌ی ساخته شده از سنگ و یا خاک رس به منظور تولید ابزارهای ساده ریخته‌گری می‌کردند [۹].

سفالگران نیز در این زمان‌ها در خاور نزدیک و مکان‌های دیگر، مهارت زیادی در ساختن مجسمه‌هایی کوچک از انسان‌ها و حیوانات به عنوان نمادی از قربانیان نذر شده برای جلب خشنودی خدایان در ادیان متعدد اولیه داشتند. به علاوه پیکره‌های کوچک انسانی اغلب به عنوان نمادهای مذهبی و یا به عنوان وسیله‌ای برای از بین بردن یا اجتناب از نفرین دشمنان، از موم زنبور عسل ساخته می‌شدند [۹]. برای مثال برای نفرین و نابودی دشمنان، مجسمه آنان از موم زنبور عسل ساخته شده و در آتش افکنده می‌شد. با مشاهده این پدیده در تاریخ نامشخصی در اواسط هزاره چهارم قبل از میلاد - احتمالاً به طور مستقل در بیش از یک منطقه - یک سفالگر یا یک فلزکار (احتمالاً هر دو با هم) با ایده‌ی بسیار جذابی که در ذهن پروراند، یک مدل را با استفاده از موم زنبور عسل ساخته، سپس روی آن را با پوششی از خاک رس پوشانده و آن را حرارت داده تا موم آن خارج شده و همچنین سخت شود. با حرارت دهی، این پوشش سخت شده و موم داخل آن ذوب می‌شود در نتیجه قالب ریخته‌گری تولید شده، امکان ساخت نمونه‌ای با جزئیات تراشیده شده روی مدل مومی را خواهد داشت. این نوآوری به شدت مورد استقبال قرار گرفت و مزیت‌های زیادی نسبت به سایر تکنیک‌های قبلی داشت، مثلاً این فرآیند در مقایسه با حکاکی و تراشکاری روی سنگ‌ها، قابلیت بهتری در نمایش جزئیاتی مثل دست و پای انسان‌ها، شاخ، دم و اشکال حیوانات در نمونه‌های تولیدی داشت و از استحکام بیشتری نیز برخوردار بود. موم زنبورهای وحشی در آن زمان از جمله موم‌های مورد استفاده بود که امروزه نیز کاربردهای دیگری هم پیدا کرده‌اند [۹].



شکل ۲- ساخت یک مجسمه گانشا (شناخته شده‌ترین خدای فرقه‌های هندورا در دوران باستان) که به روش‌های کهن ریخته‌گری دقیق تولید شده است [۱۲].

<sup>۳</sup> Limestone

<sup>۴</sup> Magnesite

<sup>۱</sup> Inca

<sup>۲</sup> Etruscans

صاف و دقیق را بدون نیاز به ماشین کاری فراهم می‌آورد و در نهایت موجب افزایش تقاضا برای این فرآیند شده است [۷].

### ۳- مراحل مختلف فرآیند ریخته‌گری دقیق

#### ۳-۱- طراحی و ساخت مدل

ساخت مدل مومی می‌تواند از طریق تزریق در قالب فلزی، قالب سیلیکونی یا به صورت دستی و از پیکرتراشی بلوک مومی انجام شود. در این فرآیند، مدل دقیقا دارای هندسه‌ی نهایی قطعه مورد نظر است که برای جبران انقباض حجمی موم، باید اضافه ابعاد مورد نیاز محاسبه و بر روی قالب فلزی اولیه اعمال شود. همچنین باید انقباض فلز مذاب که حین انجماد در قالب سرامیکی رخ می‌دهد را در نظر بگیریم تا قطعه نهایی، ابعاد دقیقی داشته باشد. از رایج ترین مواد مدل می‌توان به موم، پلاستیک، پلی استایرن یا جیوه منجمد اشاره کرد که در بین آن‌ها موم بیشترین کاربرد را دارد. تحقیقات گسترده‌ای روی موم‌های مختلف انجام شده که نشان می‌دهد، موم مدل باید دارای مشخصات زیر باشد [۱۳]:

- (۱) باید کمترین انبساط حرارتی ممکن را داشته باشد تا بتواند در نهایت هندسه‌ای با بالاترین دقت ابعادی ایجاد کند.
- (۲) نقطه ذوب آن نباید خیلی بالاتر از دمای محیط باشد تا از ایجاد حفره‌های سطحی و اعوجاج مقاطع ضخیم جلوگیری شود.
- (۳) موم مدل باید استحکام و سختی کافی در دمای اتاق را داشته باشد تا بتوان بدون آسیب دیدن مدل با آن کار کرد و حین کار دچار شکستگی نشود.
- (۴) باید سطحی صاف با ترشوندگی بالا داشته باشد تا قطعه ریخته‌گری نهایی سطوح صافی داشته باشد.
- (۵) باید سیالیت بالایی داشته باشد، تا هنگام ذوب شدن، نازکترین قسمت‌های قالب را نیز پر کند.
- (۶) پس از ساخته شدن مدل، باید به راحتی از قالب خارج شود.
- (۷) باید محتوی خاکستر بسیار کمی باشد تا در داخل پوسته سرامیک هیچ خاکستری باقی نماند.
- (۸) باید زیست سازگار باشد، یعنی هنگام احتراق منجر به تشکیل مواد خطرناک محیطی یا سرطان‌زا نشود.
- (۹) هزینه‌های تمام شده، در دسترس بودن، امکان بازیافت آسان و سمی نبودن نیز از دیگر فاکتورهای مهم در هنگام انتخاب موم مدل هستند.



شکل ۳- مجسمه یک قوچ خوابیده ریخته شده با آلیاژ مس، روی استوانه ای حکاکی شده با نقش گاو مربوط به دوره اوروک در بین‌النهرین، ۳۵۰۰ سال پیش از میلاد<sup>۱</sup> [۹].



شکل ۴- مجسمه مس آرسنیکی متعلق به ۳۲۰۰ سال پیش از میلاد که در سواحل دریای لوط کشف شده است<sup>۲</sup> [۹].



شکل ۵- مجسمه مسی ارابه پادشاه سومری که ۲۸۵۰ سال پیش از میلاد در بغداد ساخته شده است<sup>۳</sup> [۹].

تغییر در نیازهای جوامع بشر و پیشرفت صنایع بوده‌ایم که در نتیجه نیاز به تولید قطعات پیچیده تر با هندسه دقیق مانند پره توربین و موتور هواپیما، موجب جایگزینی روش‌های سنتی ریخته‌گری دقیق با تکنولوژی نوین شده که امکان ایجاد سطوح

<sup>۱</sup> Photograph by Hirmer Verlag, Munich

<sup>۲</sup> Photograph by courtesy of the Ashmolean Museum, University of Oxford

<sup>۳</sup> Photograph by courtesy of the Israel Museum, Jerusalem



Exp. no.	Material	SR ( $\mu\text{m}$ )	CTE ( $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ )	Viscosity (cp)			Wetting angle	Penetration ( $\text{mm} \times 10^2$ )	Tensile strength ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )
				55 °C	60 °C	65 °C			
1	B140	0.24	348.65	90,110	45,835	17,066	100	2	10
2	B97	1.35	867.7	532	70	24	98	5.9	11.66
3	B97 + gum arabic	0.41	186.35	800	118	28	99	2.8	12.66
4	B97 + pectin	0.65	288.47	1381	206	31	94	3.8	12.66
5	B97 + agar	1.06	224.64	1914	211	55	102	3.3	13.16
6	B97 + polyvinylpyrrolidone-40	1.28	160.01	1896	301	85	104	2.2	13.83
7	B97 + alginic acid	0.77	81.92	1500	200	65	104	5.1	14.33
8	B97 + cellulose	0.57	101.97	1586	243	79	96	2.6	13.66
9	B97 + carboxymethyl cellulose	1.27	186.31	1694	339	102	75	3.8	13.66
10	B97 + silicone	0.31	373.81	1021	123	33	102	5.3	11.66
11	B97 + tannic acid	0.52	203.17	1697	184	45	102	0.4	14.00
12	B97 + saponine	0.7	545.05	1107	159	50	102	0.8	13.66
13	B97 + activated charcoal	0.57	161.28	1281	167	52	105	0.7	12.66
14	B97 + palmitic acid	1.02	1061.4	138	30	8	102	4.2	14.66
15	B97 + sodium dodecyl sulfate	0.92	462.93	2396	250	76	102	8.4	7.33
16	B97 + sorbitan oleostearate	0.55	441.73	1360	124	32	102	10.3	16.33
17	B97 + glycerine	0.56	128.41	1343	166	42	102	0.7	7.83
18	B97 + soybeans	0.63	60.80	790	129	40	94	4.5	14.16

جدول ۱- تاثیر افزودنی‌های مختلف بر خواص موم B97 (فاقد و حاوی افزودنی‌های مختلف) و مقایسه آن با موم B140

گرانروی، زاویه ترشوندگی، نفوذ و استحکام کششی نمونه‌های مومی با و بدون افزودنی اندازه گیری شدند که نتایج آن در جدول (۱) آورده شده است [۱۸].

تمام مواد شیمیایی مورد استفاده، به جز پلی وینیل-پلی پیرولیدون، زبری سطح B97 را کاهش می‌دهد که موثرترین عامل کاهش زبری سطح سیلیکون است. اما زبری سطح موم هنوز از B140 بیشتر است. همچنین انبساط حرارتی توسط مواد شیمیایی استفاده شده، به جز اسید پالمیتیک کاهش یافته است با این حال تمام موم‌ها حاوی مخلوط با ساپونین، سدیم دودسیل سولفات، و سوربیتان اولئوسترات دارای انبساط‌های حرارتی بیشتر از B140 بودند. تمام آردهای سویا استفاده شده نیز منجر به بهبود چشمگیر زبری سطح، استحکام کششی، نفوذ و انبساط حرارتی B97 شدند. گرانروی تمام نمونه‌های مومی کمتر از B140 بود و به راحتی می‌توانست در قالب ریخته شود. تحقیقات انجام شده توسط محققان ثابت کرد که یک موم کم هزینه می‌تواند به عنوان یک موم مدلسازی خوب با اضافه کردن یک ماده افزودنی مناسب به مقدار مناسب، عمل کند. با این حال، اثرات مواد افزودنی مشابه بر روی مخلوط‌های ساخته شده با مخلوط موم‌های مختلف هنوز بررسی نشده است [۱۸].

سینگ و همکاران (۲۰۰۶) [۱۹]، ترکیبات مختلف موم را با مخلوط کردن چهار نوع موم (موم پارافین، موم زنبور، موم کارناوبا<sup>۳</sup> و موم مونتان<sup>۴</sup>) در دماهای ذوب مختلف تهیه کردند. با استفاده از موم‌های ذکر شده، هفت ترکیب مومی در نسبت‌های مختلف تهیه شد. این تحقیق با هدف تعیین دقت هندسی و زبری سطح مدل‌های تولید شده از این ترکیبات انجام شد و متغیرهای فرایند دمای تزریق موم، زمان نگهداری، دمای قالب و مدت زمان تزریق بودند. پارامترهای دیگر، از جمله ترکیب موم، دمای موم داخل دستگاه تزریق، ونت‌های قالب، فشار تزریق،

موم مورد استفاده در ریخته‌گری دقیق، شامل موم‌های مختلف از انواع حیوانی، گیاهی، نفتی، معدنی و مصنوعی است. تحقیقات نشان می‌دهد که مدل‌هایی که فقط حاوی موم باشند، فاقد دو ویژگی هستند [۱۴]: (الف) صلبیت و استحکام کافی (مخصوصاً در مواقعی که باید مدل‌های ظریف و بسیار شکننده ای ساخته شود) و (ب) کنترل ابعادی.

خواص موم‌های مدل را می‌توان از طریق افزودن برخی مواد افزودنی اصلاح کرد [۱۵]. تحقیقات نشان می‌دهد که می‌توان دانه‌های سویا را که ماده‌ای قابل اشتعال و حاوی خاکستر کم است، تراکم مناسبی دارد و به وفور با هزینه کم در دسترس هستند به عنوان ماده پرکننده به موم اضافه کرد تا انقباض مدل‌های مومی را کاهش دهد. با این حال، محققان فقط سه نوع دانه سویا را در کار خود استفاده کرده‌اند. اثرات و عملکرد انواع دیگر دانه‌های سویا هنوز بررسی نشده است [۱۷ و ۱۸]. مواد افزودنی تا حد زیادی مشکلات مطرح شده برای موم‌ها را برطرف می‌کند. آکار و تاشچی‌اوغلو (۲۰۰۳) [۱۶]، تحقیقات گسترده‌ای در مورد عملکرد موم‌های مختلف انجام داده اند و استفاده از دو موم B97 و B140 را برای مدل سازی پیشنهاد کردند. در این میان B140 یک موم مدل با خصوصیات بهتر اما گران تر است در حالی که B97 یک موم کم‌هزینه با خواص درجه دو است که می‌توان آن را با استفاده از روش‌های خاصی، به موم با کیفیت بالاتر تبدیل کرد، که قابل مقایسه با موم مدلسازی با کیفیت بالا (B140) باشد. برای این منظور، افزودنی‌های مختلفی مانند دانه‌های سویا، کلئیدها (مثل صمغ عربی، پلی وینیل-پلی پیرولیدون با اتصالات عرضی و غیره)، ذغال فعال، اسید پالمیتیک و برخی از عوامل فعال سطح (مثل سدیم دودسیل سولفات، سوربیتان اولئوسترات و گلیسرین) به طور جداگانه به موم B97 اضافه شدند. زبری سطح، ضریب انبساط حرارتی (CTE)،

<sup>۳</sup> carnauba<sup>۴</sup> montan<sup>۱</sup> Akar and Tascioglu (2003)<sup>۲</sup> Singh et al.(2006)

وجود دارد که در نهایت منجر به بهبود کیفیت مدل می‌شود. علاوه بر این، نرخ انجماد بالاتر و متعاقباً زمان نگهداری کوتاه‌تر، انقباض مدل‌های مومی را افزایش می‌دهد.

به طور کلی، موم‌های ریخته‌گری دقیق مخلوطی متشکل از موم طبیعی یا مصنوعی، رزین طبیعی یا مصنوعی، فیلرهای آلی جامد و حتی آب هستند که رزین‌ها برای افزایش استحکام مخلوط و فیلرها (مواد پودری ریز و نرم) برای بهبود خصوصیات انقباضی مدل اضافه می‌شوند. عملکرد کلی سیستم‌های مومی بر اساس پارامترهای مهندسی مانند استحکام، انقباض حین انجماد و انبساط حجمی ارزیابی می‌شود. بنابراین مواد افزودنی باید به درستی انتخاب شوند تا خواص موم را بهبود بخشند. بیشتر مواد افزودنی که به موم‌های ریخته‌گری دقیق اضافه می‌شوند، هزینه بر هستند. بنابراین، تحقیقات آینده باید بر یافتن مواد افزودنی ارزان‌تر و در عین حال دارای خصوصیات مورد نیاز تمرکز کنند.

### ۳-۲- قالب‌گیری

فرایند ریخته‌گری دقیق با ساخت جداره نازکی از پوسته سرامیکی، که فلز مذاب در آن ریخته خواهد شد، آغاز می‌شود. با توجه به ماهیت آلیاژ ریختگی، قبل از ریختن مذاب باید اطمینان بالایی از پوسته وجود داشته باشد زیرا ممکن است پوسته در حین ریخته‌گری آسیب دیده و هزینه‌های زیان‌بار آن غیر قابل جبران باشد. پوسته سرامیکی باید ویژگی‌های مورد نیاز برای ریخته‌گری موفق اجزا و قطعات را داشته باشد [۲۱]. این الزامات عبارتند از: استحکام تر کافی (مقاومت در برابر خروج موم بدون خرابی)، استحکام پخت کافی (برای مقاومت در برابر وزن فلز مذاب ریخته شده)، مقاومت بالا در برابر شوک حرارتی (برای جلوگیری از ترک خوردگی در هنگام ریختن فلز)، پایداری شیمیایی بالا (برای جلوگیری از واکنش قالب و مذاب)، نفوذ پذیری کافی قالب (برای خروج هوای محبوس در دیواره‌های قالب در هنگام ریختن فلز مذاب)، هدایت حرارتی کافی (برای انتقال حرارت کافی از طریق دیواره قالب) و خزش محدود (برای جلوگیری از تغییرات ابعادی در داخل دیواره قالب و در نهایت قطعه ریخته‌گری).

به طور کلی، دوغاب سرامیکی مخلوطی شامل پودرهای سرامیکی (پودر نسوز)، سیلیس کلئیدی پایه به عنوان چسب مایع و سایر مواد برای تهیه دوغاب آبی است. پودر سرامیکی شامل ماسه سیلیسی، آلومینو سیلیکات‌ها، آلومینا و سیلیکات زیرکونیم یا زیرکون است. انتخاب این مواد به در دسترس بودن، هزینه و عملکرد آن‌ها در ریخته‌گری بستگی دارد.

انجماد پس از تزریق، در طول تحقیق ثابت بودند. انتخاب بهترین ترکیب موم با استفاده از نتایج انقباض خطی و حجمی مدل‌های موم تعیین شد. مخلوط مومی که با استفاده از موم پارافین، موم زنبور عسل و موم مونتان در نسبت ۲۰:۳۰:۵۰ تولید شده بود در مقایسه با سایر ترکیبات که انقباضی در محدوده ۱/۰۵ تا ۲/۹۹٪ دارند، انقباض بسیار کمتری (حدود ۰/۸۹٪) داشته و به عنوان بهترین موم انتخاب شده است. با استفاده از این ترکیب و با تغییر دمای تزریق، زمان نگهداری، دمای قالب و زمان تزریق، حدود ۳۰ مدل مومی تولید شد و مشخص شد که مدل مومی تولید شده با دمای تزریق ۶۸ °C، زمان نگهداری ۹ دقیقه، دمای قالب ۴۶ °C و زمان تزریق ۱۰ ثانیه، دارای کمترین انقباض (۱/۰۵ میلی متر) و زبری سطح ۱/۴۲ میکرون متر است.

شن و همکاران (۲۰۰۲)<sup>۱</sup> [۲۰] تحقیقاتی را در مورد تأثیر پارامترهای مختلف مانند مواد قالب، مواد موم و پارامترهای فرآیند تزریق انجام دادند. کیفیت قطعه نهایی بیشتر به پارامترهای فرآیند تزریق مانند زمان انجماد، دمای ذوب، فشار تزریق، سرعت تزریق، زمان تزریق، زمان پر شدن و دمای قالب بستگی دارد و این تحقیقات چندین پارامتر را در فرآیند ریخته‌گری پیشنهاد می‌کند که می‌تواند کیفیت قطعه را کنترل کند اما اغلب کنترل همزمان تمام پارامترها برای یک ریخته‌گر دشوار است.

با توجه به مشکلاتی که در کنترل همه این متغیرها در سطوح و مراحل مختلف وجود دارد، سینگ و همکاران. (۲۰۰۶)<sup>۲</sup> [۱۹]، توصیه کردند که در این میان، متغیرهای دمای تزریق موم، زمان نگهداری، دمای قالب و زمان تزریق به شدت بر کیفیت قطعه ریخته‌گری تأثیر می‌گذارند. آن‌ها دریافتند که با افزایش دمای تزریق، درصد انحراف از ابعاد افزایش می‌یابد. چرا که دمای تزریق بالا منجر به افزایش گرادیان دمایی، تبخیر محتوای فرار، از دست رفتن مقداری از مواد ترکیب موم و در نتیجه انقباض بیشتر مخلوط موم می‌شود. افزایش زمان نگهداری و زمان تزریق باعث کاهش انقباض موم می‌شود. هم چنین با افزایش دمای قالب و کاهش دمای تزریق درصد انحراف ابعاد کاهش می‌یابد. به طور کلی، افزایش دمای قالب باعث تأخیر در زمان انجماد راهگاه می‌شود، بنابراین می‌توان مواد بیشتری را برای کاهش میزان انقباض اضافه کرد. افزایش دمای تزریق و دمای قالب نیز باعث کاهش زبری سطح مدل می‌شود. اگر زمان تزریق کوتاه باشد، برخی حفرات ریز هوا در سطح مدل مومی تشکیل می‌شود در حالی که اگر زمان تزریق طولانی باشد، هیچ حفره‌ای دیده نمی‌شود؛ زیرا زمان بیشتری برای حذف هوای محصور شده حین سیلان مذاب

<sup>۲</sup> Singh et al. (2006)

<sup>۱</sup> Shen et al. (2002)

ترک خوردگی و آسیب پوسته سرامیکی بیشتر در لبه‌های قطعه، مانند لبه‌های دنباله دار و گوشه‌های تیز که عموماً هم در اشکال هنری به وفور یافت می‌شود، رخ می‌دهد و در نتیجه کاهش ضخامت پوسته و تنش زیاد متمرکز شده در این نواحی است که منجر به انهدام پوسته سرامیکی می‌شود. مشاهده شده است که افزودنی‌های فیبری باعث افزایش استحکام پوسته سرامیکی می‌شوند. با این حال در پژوهشی مشخص شد که این دوغاب‌های حاوی فیبر همواره نمی‌توانند سوراخ‌های کوچک، شکاف‌ها، شیارها و سایر جزئیات ریز را با کیفیت مورد نظر ایجاد کنند که این مشکل، از وجود فیبرهای پراکنده در دوغاب که باعث کاهش تماس دقیق دوغاب با مدل خواهد شد، ناشی می‌شود. برای غلبه بر این مشکل، ویرس و دولس<sup>۲</sup> [۲۶]، دو نوع مختلف از فیبر را در نسبت‌های مختلف با یک جزء اتصال دهنده (چسب) معمولی تولید کردند. ماده چسب از سیلیس کلئیدی و یک پلیمر آلی تشکیل شده بود. بخش عمده اجزای فیبر با نسبت دقیق و مناسبی از یک گروه متشکل از سیلیس، سیلیکات آلومینیم، آلومینا و زیرکون انتخاب شده است. مقدار اندکی نیز از ذرات صفحه‌مانندی هم چون کائولن و سایر رس‌ها یا ذرات سوزنی مانند مولایت، کیانیت، هالوایزیت و آزیست به ترکیب اضافه شده بود. این دوغاب ریخته‌گری دقیق باعث کاهش زمان تخلیه و تولید پوسته‌ای با ضخامت یکنواخت و پوشش عالی در محل سوراخ‌ها، گوشه‌ها و جزئیات ریز ریخته‌گری، در مقایسه با دوغاب حاوی فیبر تجاری می‌شود. با وجود تمام مزایایی که این روش دارد ولی به احتمال زیاد پوزحمت و گران‌تر از به کارگیری فیبرهای تجاری خواهد بود.

آلیاژهای آلومینیم دارای چگالی کم و همچنین دمای پایین مذاب ریزی هستند و بنابراین نیازی به ایجاد لایه‌های بیش از حد روی پوسته قبل از فرآیند ریخته‌گری نیست. علاوه بر این، افزایش تعداد لایه‌های پوسته سرامیکی، موجب افزایش هزینه و همچنین زمان کل فرآیند می‌شود. اخیراً، جیانگ و همکاران (۲۰۱۰)<sup>۳</sup> [۲۷]، پوسته نازکی مرکب از سه لایه با پوشش اولیه متشکل از پودر زیرکون و چسب سیلیکا تولید کردند. لایه دوم از آلومینا سیلیکات به عنوان پودر نسوز و سیلیس جامد به عنوان چسب تشکیل شده است. لایه سوم نیز از آلومینا سیلیکات و چسب سیلیکات سدیم تشکیل شده است. پس از موم‌زدایی و به منظور افزایش استحکام قالب، پوسته سرامیکی در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱ ساعت حرارت داده شد.

آلومینو سیلیکات‌ها شامل رس حرارت داده شده، شکسته یا خرد شده هستند. سیلیکات زیرکونیم یا زیرکون به دلیل بی اثر بودن و پایداری بسیار خوب در دمای بالا، به عنوان فیبر اولین لایه پوشش استفاده می‌شود.

### ۱-۲-۳- پوسته سرامیکی برای آلیاژهای غیر آهنی

پوسته نقش مهمی در فرآیند ریخته‌گری دقیق دارد و باید علاوه بر استحکام بالا، کیفیت سطح خوبی نیز داشته باشد. پوسته‌های سرامیکی تولید شده توسط چسب‌های کلئیدی دارای استحکام پیش از پخت بسیار کمی هستند به طوری که در هنگام جابجایی و تخلیه موم مستعد ترک خوردگی هستند. با این حال، هیچ راه حلی برای این مشکل توصیه نشده است [۲۲]. افزودن پلیمرهای آلی محلول به یک چسب سیلیس کلئیدی می‌تواند باعث افزایش استحکام پیش از پخت پوسته سرامیکی شود، درحالی که ممکن است استحکام پخت پوسته را کاهش دهد [۲۳]. البته باید در نظر داشت پلیمرهای آلی محلول گران قیمت هستند و استفاده از آن‌ها هزینه فرآیند را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. جونز و مارکیز (۱۹۹۵)<sup>۱</sup> [۲۴]، فرآیند افزودن الیاف آلی به دوغاب‌های سرامیکی را ابداع کردند، بنابراین نیازی به مواد افزودنی گران قیمت پلیمری وجود نخواهد داشت. همچنین به کمک این روش نفوذپذیری پوسته سرامیکی نیز تقویت می‌شود. در پژوهشی مشابه الیاف پلیمری به دوغاب سرامیک اضافه شدند [۲۱]. این الیاف در حین حرارت دهی پوسته سرامیکی می‌سوزند و تبخیر می‌شوند و مقداری منافذ در داخل پوسته سرامیکی باقی می‌گذارند تا امکان عبور گازهای گرم وجود داشته باشد. این روش از روش پیشنهادی جونز و مارکیز (۱۹۹۵) [۲۴]، کارآمدتر بود. بعدها مقایسه‌ای از سیستم دوغاب سرامیکی اصلاح شده با پلیمر و سیستم دوغاب سرامیکی اصلاح شده با الیاف انجام گرفت [۲۵]. نتایج نشان داد که استفاده از الیاف در دوغاب پوسته سرامیکی باعث افزایش ۱۵٪ ضخامت پوسته در پوسته‌هایی با ساختاری شامل یک لایه اصلی به همراه ۴ لایه دیگر، بدون افزودن لایه‌های اضافی می‌شود. حتی اگر هر دو پلیمر و الیاف آلی در طی فرآیند پخت سوخته باشند، پوسته اصلاح شده با الیاف ظرفیت تحمل بار و نفوذپذیری بالاتری در مقایسه با پوسته سرامیکی اصلاح شده با پلیمر دارد. با این وجود، جایگزین کردن الیاف طبیعی و ارزان قیمت مانند الیاف نارگیل، الیاف فوفل و غیره به جای این نوع الیاف مصنوعی و پرهزینه به شدت به نفع تولید کنندگان خواهد بود.

<sup>۳</sup> Jiang et al. (2010)

<sup>۱</sup> Jones and Marquis (1995)

<sup>۲</sup> Viers and Doles (2009)

برای افزایش نفوذپذیری پوسته‌سرامیکی و خروج راحت تر هوا و گازهای گرم از داخل قالب بهتر است پوسته‌سرامیکی تولید شده، دارای مقداری تخلخل باشد تا عیوب ناشی از حبس هوای فشرده در قالب و احتمال ترک خوردن قالب در اثر فشار گازهای داخلی تولید شده به حداقل برسد. عموماً برای این منظور از الیاف طبیعی یا مصنوعی استفاده می‌شود. الیاف به گونه ای انتخاب می‌شوند که نقطه ذوب یا اشتعال الیاف کمتر از دمای پخت پوسته باشد به طوری که هنگام حرارت‌دهی الیاف ذوب شده یا بسوزند. الیاف مصنوعی گران تر بوده و سبب افزایش هزینه تولید پوسته‌سرامیکی می‌شود. بنابراین باید تحقیقات بیشتری روی ترکیبات الیاف طبیعی و ارزان‌تر، مانند الیاف نارگیل، الیاف فوفل، الیاف کنف، علف کاراجا، سیسال (نوعی گیاه) و غیره انجام شود. استفاده از ذرات سرامیکی با اشکال زاویه‌دار از جمله مولوشیت، مولایت، آلومینا و غیره نیز می‌تواند باعث بهبود نفوذپذیری پوسته‌سرامیکی شود.

تولید پوسته‌سرامیکی زمان‌بر است و بسته به اندازه اجزا، حدود ۲۴ تا ۷۲ ساعت طول خواهد کشید. تعداد لایه‌های پوشش‌های اعمال شده روی مدل مومی باید بهینه بوده و باعث کاهش زمان خشک شدن، هزینه مواد و کاهش زمان ساخت، بدون افت کیفیت شود. برای بهینه‌سازی ضخامت پوسته، می‌توان از نرم افزار شبیه‌سازی ریخته‌گری مانند Procast، Quickcast، Solidcast، Flow-3D، Starcast و غیره استفاده کرد. توزیع تنش در پوسته‌سرامیکی نیز می‌تواند قبل از آزمایش و با استفاده از نرم افزارهای شبیه‌سازی تعیین شود.

یکی از مهم‌ترین دلایل مردودی قطعات ریخته‌گری، واکنش شیمیایی بین فلز مذاب و قالب است. واکنش بین فلز و دیواره قالب سرامیکی منجر به ایجاد یک سطح ناهموار از محصولات واکنش روی اجزای قطعه ریخته‌گری می‌شود. بنابراین باید برای ساخت قالب پوسته‌ای در ریخته‌گری آلیاژهای مختلف، مواد نسوز مناسبی انتخاب شود تا از واکنش بین فلز مذاب و قالب جلوگیری شود یا حداقل امکان این واکنش‌ها کاهش یابد. همچنین، چسب انتخاب شده نباید در برابر پوسته‌سرامیکی واکنش نشان دهد و باید مقاومت کافی را به قالب ببخشد تا در برابر فشارهایی که ممکن است در هنگام آماده‌سازی پوسته ایجاد شود، مقاومت کند. واکنش‌های شیمیایی رخ داده بین چسب و پوسته‌سرامیکی نیاز به تجزیه و تحلیل دارند. عموماً سیلیس ذوب شده به عنوان ماده نسوز تشکیل دهنده قالب برای همه آلیاژهای معمول ریخته‌گری بسیار مناسب است. برای آلیاژهایی با نقطه ذوب بالا بهتر است در لایه‌های اولیه ترکیبی از سیلیس و زیرکون یا فقط زیرکون استفاده شود.

ضخامت پوسته نازک فقط ۳-۴ میلی متر بود، که بسیار کمتر از ضخامت‌های مرسوم (۶-۸ میلی متر) مورد استفاده در ریخته‌گری دقیق سنتی است. پوسته نازک در نهایت به دلیل به کارگیری لایه‌های کمتر و چسب سیلیکات سدیم دارای سطح بهتر، تخلیه آسان، زمان آماده‌سازی کوتاه و هزینه کمتری است. اگرچه این تحقیق موفقیتی در کاهش ضخامت پوسته‌سرامیکی محسوب می‌شود، اما نویسندگان حداکثر اندازه یا وزن قطعه‌ای را که می‌توان با چنین پوسته‌های نازک سرامیکی ریخته‌گری کرد، ذکر نکرده‌اند. ظاهراً ممکن است این روش فقط برای ریخته‌گری اجزا و قطعات کوچک مناسب باشد.

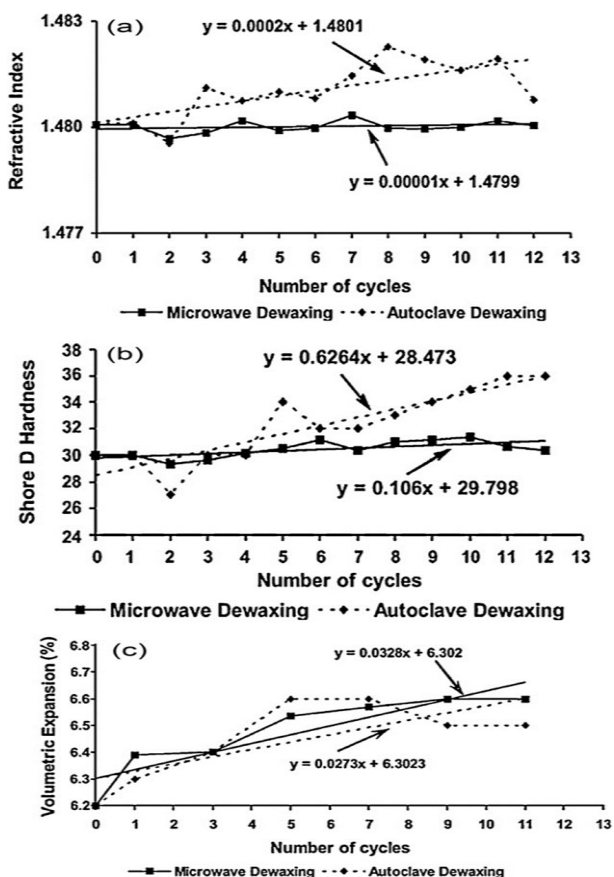
### ۳-۲-۲- تکنولوژی چسب

قالب‌های سرامیکی به طور معمول متشکل از یک بخش عمده مواد نسوز بسیار مقاوم هستند که با چسب به هم متصل شده‌اند. نقش چسب ایجاد یک پیوند مقاوم بین ذرات مواد نسوز و استحکام دهی کافی قالب، برای تحمل تنش‌های ایجاد شده در مراحل آماده‌سازی است. علاوه بر این، پس از حرارت‌دهی، قالب باید به اندازه کافی مستحکم باشد تا بتواند شوک حرارتی، سایش و فشار فلز مذاب را هنگام ریخته‌گری تحمل کند.

براساس پژوهش‌های انجام شده، دو نوع چسب در ساخت قالب پوسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. نوع اول اتیل سیلیکات است، که یک چسب برپایه سیستم حلال بوده و معمولاً اتانول یا ترکیبی از اتانول و ایزوپروپان را به کار می‌گیرند و نوع دوم، سیلیس کلئیدی است، که شامل ذرات سیلیکای پراکنده شده در محلول آبی است. اتیل سیلیکات شامل مواد نسوزی است که می‌تواند به طور شیمیایی و یا به سرعت در هوا مقاوم شود. اما در مقایسه با سیلیس کلئیدی استحکام پیوند کم و پایداری محدودتری در دوغاب مواد نسوز دارد. الکل در این چسب، یک ترکیب آلی فرار (VOC) است و میزان آن باید مرتب، کنترل شود. از آنجا که سیلیس کلئیدی دارای هیچ گونه مشکل فرار نیست به عنوان جایگزین برای اتیل سیلیکات در این صنعت استفاده می‌شود. مشکل اساسی سیلیس کلئیدی سرعت پایین سخت شدن در هواست. بنابر این اکثر تولیدکنندگان برای سرعت بخشیدن به پروسه تولید از اتیل سیلیکات استفاده می‌کنند. بعلاوه، تولید قالب‌های سرامیکی بزرگ با استفاده از سیلیس کلئیدی، معمولاً منجر به نرخ بالای قطعات مردود و ضایعات در ریخته‌گری می‌شود [۲۸]. مطالعه واکنش‌های شیمیایی مربوط به چسب استفاده شده ضروری است زیرا ممکن است منجر به مردود شدن پوسته‌های سرامیکی و ریخته‌گری معیوب شود [۲۹ و ۳۰].



تأثیر محیطی، گرمایش انتخابی و حجمی مواد و کیفیت بهتر محصول اشاره کرد. روش اتوکلاو در مقایسه با میکروویو در تخلیه موم هزینه بیشتری دارد اما صرفه جویی در وقت و انرژی و کیفیت بالاتر محصول را به دنبال دارد. ارزیابی تطبیقی خصوصیات شیمیایی و ساختاری و قابلیت بازیافت موم پس از چرخه‌های متوالی موم‌زدایی از طریق روش اتوکلاو و میکروویو توسط برام (۲۰۰۹) [۳۳] انجام شده است. شکل (۶-الف) تغییر در ضریب شکست موم بر حسب تعداد چرخه شبیه سازی شده، با هر دو روش موم‌زدایی، یعنی اتوکلاو و میکروویو را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۶-ب) مشاهده می‌شود که سختی موم در طول روش میکروویو کمتر تغییر می‌کند. شکل (۶-ج) تغییر درصد افزایش ضریب انبساط حجمی موم را با تعداد چرخه شبیه سازی شده برای هر دو روش موم‌زدایی نشان می‌دهد. علاوه بر این، در موم‌زدایی به روش میکروویو، تغییرات ساختاری کمتری نسبت به اتوکلاو مشاهده می‌شود زیرا در روش اتوکلاو موم در حضور بخار آب در دمای بالا و تحت فشار داخل دستگاه اتوکلاو ذوب می‌شود و سپس برای حذف آب، آن را هم زده و در دمای ۱۳۰-۱۲۰ درجه سانتیگراد گرم می‌کنند.



نمودار ۶- الف) مقایسه تغییر در ضریب شکست موم، ب) مقایسه سختی موم و ج) مقایسه تغییر در افزایش ضریب انبساط حجمی حرارتی [۳۳].

زیر کون به دلیل اینکه در مقابل اکثر فلزات مذاب معمول ماهیت خنثی از خود نشان می‌دهد و می‌تواند به خوبی مذاب داخل قالب را سرد کند، معمولاً به تنهایی و یا به صورت ترکیبی با دیگر سرامیک‌ها در لایه اول قالب پوسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. پودر آلومینا نیز از نظر شیمیایی بسیار پایدار و غیرفعال است و می‌تواند برای مصارفی که آلیاژهای دما بالا در آن حضور دارند استفاده شود.

### ۳-۳- فرآیند موم‌زدایی

پس از اتمام مراحل ساخت قالب پوسته ای باید مدل مومی به طور کامل ذوب شده و از داخل قالب خارج شود و پس از طی مراحل تصفیه و بازیافت، دوباره برای ساخت مدل‌های مومی جدید مورد استفاده قرار گیرد. با گرم کردن پوسته سرامیکی، موم ذوب شده و از پوسته‌ی سرامیکی خارج می‌شود. قالب باید سریع گرم شود. اگر قالب به آرامی گرم شود، ممکن است اختلاف ضریب انبساط موم و پوسته سرامیکی، باعث شکستن پوسته شود.

فرآیند موم‌زدایی به طور متداول به کمک اتوکلاو یا کوره فلش فایر انجام می‌شود. در اکثر صنایع ریخته‌گری دقیق، موم‌زدایی معمولاً در اتوکلاوهای صنعتی انجام می‌شود. برای همین منظور قالب‌های سرامیکی حاوی مدل‌های مومی درون اتوکلاو قرار گرفته و در حضور رطوبت و گرما (دما و فشار بالا) موم‌زدایی می‌شوند. تحقیقات نشان می‌دهد که موم بازیابی شده از اتوکلاو، غالباً با بخار اتوکلاو چگال شده و باعث ایجاد ناخالصی می‌شود، در نتیجه بازیابی و تصفیه موم را برای استفاده مجدد دشوار و پرهزینه می‌کند [۳]. علاوه بر این، گرم کردن قالب سرامیکی در اتوکلاو همیشه باعث حذف کامل موم همه مناطق نمی‌شود.

تحقیقات دیگری در زمینه موم‌زدایی پوسته‌ها با استفاده از کوره فلش فایر انجام شده است [۳۲]. این کوره شامل یک محفظه قابل گرم شدن و احتراق، یک محفظه اطفاء و انژکتور گاز برای تزریق گاز بی‌اثر یا دی‌اکسید کربن به محفظه اطفاء حریق به منظور خاموش کردن و خنک کردن موم‌های شعله‌ور در محفظه خاموش کننده است. اگرچه این روش می‌تواند از بروز همه مشکلات موجود در اتوکلاو جلوگیری کند، اما هزینه عملیاتی بالا در این فرایند مانع گسترش چشمگیر آن شده است.

موم مورد استفاده در فرآیند ریخته‌گری دقیق ماده‌ای با خواص دی الکتریک است که می‌تواند با جذب اشعه میکروویو گرم شود. امروزه، استفاده از حرارت میکروویو در فرآیندهای صنعتی به طور مداوم در حال رشد است و از مزایای آن می‌توان به کمترین

قالب پوسته‌ای پس از حرارت‌دهی، مستحکم‌تر شده و قطعه ریخته شده به سختی از آن خارج می‌شود. بتلو (۲۰۰۳) [۳۵]، نمک قلیایی حاکی یا قلیایی را به حداقل یکی از لایه‌های قالب پوسته‌ای اضافه کرد که حذف پوسته‌های سرامیکی به ویژه پس از حرارت‌دهی، تسهیل کند. این روش می‌تواند برای آلیاژهای آهنی و غیر آهنی اعمال شود. در ادامه، بتلو و همکاران (۲۰۰۶) [۳۶]، برای تسهیل حذف پوسته‌های سرامیکی اطراف قطعه ریخته‌گری، پوسته قبلی که حاوی اکسید فلز قلیایی یا یک اکسید فلز قلیایی حاکی است را مرطوب کرده و نتایج بهتری گرفتند. هیدراتاسیون می‌تواند با روش‌های مختلف مانند اسپری آب، غوطه‌ور شدن پوسته در آب یا فرآیندهای مشابه انجام شود. با این حال، اگر نمک قلیایی بیش از حد افزوده شود، ممکن است منجر به شکستگی پوسته‌های سرامیکی پس از حرارت‌دهی شود.

پس از عملیات ناک اوت در ریخته‌گری دقیق، قطعه ریخته‌گری تحت عملیات ثانویه مانند عملیات حرارتی، ماشین‌کاری، عملیات نهایی، بازرسی و تست‌های غیرمخرب قرار می‌گیرد و سپس آماده‌سازی تحویل محصول نهایی به مشتری است. اگرچه فرآیندهای عملیات حرارتی می‌تواند خصوصیات مکانیکی قطعه را بهبود بخشد، اما باید فقط در مواردی استفاده شود که ریخته‌گری قادر به تأمین نیازهای لازم در کاربرد خود نباشد.

#### ۴- عیوب و اقدامات احتیاطی

##### ۴-۱- دسته بندی عیوب

عیوب قطعات ریخته‌گری دقیق مخصوصاً قطعات هنری و تزئینی به دو دسته کلی نقص سیستماتیک و نقص ریخته‌گری تقسیم می‌شوند. نقص سیستماتیک نواقصی هستند که در نتیجه عملیات عادی ریخته‌گری حاصل شده و به طور کلی به صورت سوراخ، روزنه یا ناهموازی در سطح برنز ظاهر می‌شوند. در حالی که با برداشتن پین‌های ماهیچه، سوراخ‌های کوچکی بر روی مجسمه‌های برنز باقی می‌ماند. روزنه‌های بزرگتر اغلب در هنگام ریخته‌گری ایجاد می‌شوند و جزو عیوب ریخته‌گری هستند. این عیوب گاهی اوقات به صورت سوراخ‌های بزرگ و دارای هندسه کاملاً مشخص قابل مشاهده‌اند. دسته سوم از عیوب پس از برش راهگاه‌ها ایجاد می‌شوند که معمولاً شامل مناطق ناصاف ناشی از برش راهگاه هستند. در شکل (۷-الف)، تصویری از مجسمه‌ای برنزی قرن ۱۱ مشاهده می‌کنید. با بررسی دقیق‌تر آن (شکل ۷-ب)، حفره‌ها و طرح‌های ضربدری در زیر مجسمه مشاهده می‌شود که برای خروج جریان گازهای به دام افتاده ایجاد شده‌اند و مصداق نقص سیستماتیک هستند.

این روش ممکن است به طور انتخابی باعث حذف، یا تغییرات فیزیکی-شیمیایی برخی از اجزا شود. این روش، جدا از مزایای مذکور باعث افزایش سیکل‌های بازیافت موم می‌شود. اگرچه هزینه اولیه یک میکروویو در مقایسه با اتوکلاو زیاد است، اما می‌توان این سرمایه اضافی را در طولانی مدت با کاهش هزینه تهیه موم جبران کرد.

فرآیند موم زدایی باید به گونه‌ای انجام شود که موم بازیافت شده عاری از آلودگی باشد و تغییرات ساختاری برای استفاده مجدد از آن خیلی کم باشد. موم در فرآیند موم زدایی میکروویو، هنگامی خواص خود را حفظ می‌کند که انرژی میکروویو، آن قدر بالا نباشد که منجر به تجزیه شدن موم‌ها شود.

##### ۳-۴- ذوب ریزی و عملیات نهایی

پس از موم زدایی، از روش‌های مختلفی از جمله ثقلی، تحت فشار، تحت خلا و گریز از مرکز برای ریختن فلز مذاب درون قالب‌های پوسته‌ای استفاده می‌شود. با سرد شدن کافی فلز مذاب، قطعه ریخته‌گری می‌تواند از پوسته خارج شود. با این حال، مهم است که ریزساختار قطعه ریخته‌گری نهایی قابل قبول باشد، زیرا در طی فرآیندهای ذوب ریزی و انجماد، ریزساختار تحت تأثیر قرار خواهد گرفت [۳۴].

از بین بردن کامل پوسته اطراف قطعه، که اغلب "ناک اوت" نامیده می‌شود، شامل فرآیندهای طولانی و پرهزینه است و با استفاده از ماسه زنی، لرزش مکانیکی یا حمام‌های نمک مذاب انجام می‌شود. پوسته‌های سرامیکی باید از مقاومت بالایی برای جلوگیری از آسیب دیدن در طی مراحل ساخت پوسته برخوردار باشند و باید دارای استحکام پخت قابل توجهی باشند تا از تغییر شکل در درجه حرارت بالا و حین مذاب ریزی جلوگیری شود. هنگامی که قطعه ریخته‌گری منجمد و خنک شد، استحکام پخت کمی برای تسهیل ناک اوت یا حذف پوسته سرامیکی اطراف قطعه ریخته‌گری مورد نظر لازم است.

بیشتر پوسته‌های ریخته‌گری دقیق دارای مقادیر قابل توجهی سیلیس هستند و هنگامی که در دمای بالاتر از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند، سیلیس آمورف متبلور می‌شود و کریستوبالیت بتا را تشکیل می‌دهد. تغییر فاز کریستوبالیت باعث کاهش استحکام پخت سیلیکا می‌شود. با این وجود پوسته‌های سرامیکی بر پایه سیلیس می‌توانند برای ریخته‌گری آلومینیم و منیزیم مورد استفاده قرار گیرند چرا که دمای ذوب و ریختن آن‌ها برای تشکیل کریستوبالیت کافی نیست.

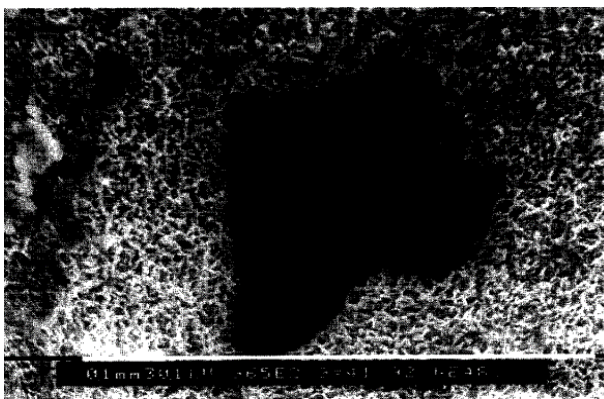
#### ۲-۴- عیوب رایج صنعت جواهرسازی

رایج‌ترین عیوب در صنعت جواهرات و ریخته‌گری طلای زرد عبارتند از: حفرات انقباضی، تخلخل، مک‌ها و حفرات گازی، آخال‌های غیر فلزی مثل آخال سرباره.

#### ۴-۲-۱- حفرات انقباضی و تخلخل

حفرات انقباضی عموماً در ضخیم‌ترین مناطق قطعه، به طور مثال آخرین ناحیه انجماد، و هم‌چنین در مجاورت راهگاه مشاهده می‌شوند. مجموعه‌ای از حفره‌ها منجر به ایجاد تخلخل در قطعه خواهد شد که می‌تواند ماکرو یا میکرو باشد. حالت میکرو عموماً در اثر عدم جریان آزاد مذاب در بخش‌های مختلف و در حال انجماد قطعات با ابعاد کوچک اتفاق می‌افتد و منجر به آسیب‌های جدی نخواهد شد اما وجود تخلخل‌های ماکرو در قطعه می‌تواند منجر به عدم دستیابی به کیفیت مطلوب و در نتیجه مردود شدن قطعه شود. ریز ساختار دندریتی یک حفره انقباضی در شکل (۸) نشان می‌دهد که این حفرات و تخلخل‌ها عموماً به شکل نامنظم هستند.

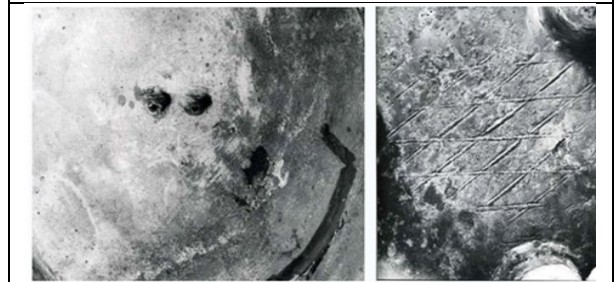
همانطور که قبلاً هم گفته شد، ساختار دندریتی عموماً در حفرات و به دلیل انقباض حجمی مشاهده می‌شود. کاهش و یا حذف حفره‌ها و تخلخل‌های ایجاد شده حین انجماد برای حفظ کیفیت قطعات ریخته‌گری حیاتی است. به خصوص در تولید جواهرات، میکروحفره‌های نزدیک به سطح ممکن است در مراحل بعدی تولید مانند سنگ‌زنی و پولیش کردن نمایان شوند. در اغلب موارد، این نقص‌ها باعث مردود شدن قطعه یا تعمیرات پرهزینه و دشوار می‌شود. عیوب انقباضی در طلای زرد ۱۸ عیار عموماً از طریق اصلاح اندازه راهگاه، دمای ذوب ریزی، دمای قالب ریخته‌گری و محل اتصال راهگاه و قطعه بهبود می‌یابد. تأمین بدون وقفه فلز مذاب در حین انجماد برای جبران انقباض مذاب و هم‌چنین دمای مناسب ریخته‌گری برای هر قطعه طراحی شده نیز از مواردی است که برای حذف حفرات انقباضی باید رعایت شوند.



شکل ۸- ریزساختار دندریتی یک حفره انقباضی [۴۸].



الف



ب

شکل ۷- الف) نمای کلی از مجسمه نیم تنه میون متعلق به نیمه دوم قرن ۱۱، ب) در سمت راست خطوط ضربدردی و در تصویر سمت چپ حفره‌ها، برای جریان و خروج گازهای به دام افتاده ایجاد شده‌اند [۳۷].

ماهیت نقص‌های ریخته‌گری را می‌توان با تجزیه و تحلیل شکل و موقعیت آن‌ها مشخص کرد. طبق این طبقه‌بندی می‌توان چهار دسته اصلی نقص را ترسیم کرد، که عبارتند از تخلخل، تورق قطعه، ترک و پلیسه [۳۸ و ۴۵]. تخلخل‌ها رایج‌ترین نواقص با ظاهری چاله‌مانند و ریز هستند که در سطح یا در عمق حجم برنز قرار دارند. ایجاد آن‌ها ۲ دلیل اصلی دارد که عبارتند از: انقباض در هنگام انجماد فلز و وجود گاز در مذاب [۴۶ و ۴۷]. نقص انقباض هنگامی رخ می‌دهد که برای جبران انقباض ناشی از انجماد و در نتیجه پر نشدن فضاهای خالی قالب، مذاب کافی نباشد. تخلخل‌های گازی نیز در اثر به دام افتادن حباب‌های ناشی از پس زده شدن گاز محلول در مذاب هنگام انجماد و یا حباب‌های ناشی از جریان مذاب یا سوختن مواد فرار قالب ایجاد می‌شوند.

ترک‌ها در واقع شکست‌های ناشی از تنش‌های حرارتی بعد از انجماد هستند. آن‌ها عموماً به دلیل شکل نامناسب قالب ایجاد می‌شوند. تورق قطعه زمانی اتفاق می‌افتد که مذاب به طور کامل حفره قالب را پر نکند و یک قسمت پرنشده باقی بماند که با انجماد فلز پیش از پر شدن کامل حفره قالب مرتبط است [۳۸]. دسته آخر نواقص که آن‌ها را پلیسه می‌نامند، معمولاً به صورت طرح‌هایی با ضخامت نامنظم روی سطح قطعه و کلا در امتداد خط جدایش قالب، عمود بر یکی از سطوح قطعه، ایجاد می‌شود.

عملیات پسیو کردن قطعات هنری، ارزان هستند و روشی شناخته شده برای محافظت و جلوگیری از کدر شدن نقره تمام عیار در مدت زمان حمل و نگهداری طولانی است. با این حال، مقاومت به سایش آن‌ها پایین است و نمی‌توان طولانی مدت از آن‌ها محافظت کرد. لایه‌های اکسید شفاف نازک را می‌توان بر روی سطوح با تکنیک‌هایی نظیر PVD (رسوب دهی فیزیکی بخار) رسوب داد، اما تکنولوژی و تجهیزات مورد نیاز آن پرهزینه است. یک جایگزین مناسب استفاده از لاک‌های شفاف است. تعداد بسیار زیادی از انواع لاک‌ها در بازار موجود هستند. تمایز اصلی بین لاک‌ها در نوع آن است که می‌تواند بر پایه آب یا حلال دیگری باشند. با اینکه لاک‌های بر پایه آب ضرر کمتری نسبت به لاک‌های بر پایه حلال دارند، اما خواص سطح آن‌ها و مقاومت به سایش آن‌ها ضعیف‌تر است. شفافیت لاک‌های بر پایه حلال، ممکن است به طور قابل توجهی متفاوت باشد. لاک‌های بر پایه حلال معمولاً لاک‌هایی دوجزی هستند و پس از اعمال، باید در دمای ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت حرارت دهی شوند تا مقاومت به سایش آن‌ها افزایش یابد. از فواید استفاده از لاک‌ها می‌توان به کاربرد آسان آن‌ها با غوطه‌وری و یا اسپری کردن اشاره کرد. به تازگی، یک لاک دو جزئی جدید در آزمایشگاهی برای زیورآلات مصنوعی (طلای کم عیار، برنج‌ها، برنرها و همچنین نقره تمام عیار) توسعه داده شده است که حفاظت طولانی مدت مناسبی را در برابر کدر شدن و فرسایش نشان می‌دهد. پوشش‌های لاک شفاف و مقاوم به سایشی در دسترس هستند که نیازهای ذکر شده را برآورده می‌کنند و برای محافظت از رنگ‌های آبی و بنفش و همچنین جواهرات چند رنگ و قطعات متشکل از چندین فلز متفاوت و نیز برای حفاظت در برابر کدر شدن، خوردگی و تغییر رنگ توصیه می‌شود [۴۹].

در مجسمه‌های برنزی، پس از اتمام فرآیند ریخته‌گری، سطح تمیز و خام برنز برای به دست آوردن سطح نهایی مطلوب پرداخت می‌شود. علاوه بر استفاده از رنگ، رنگدانه‌ها، مواد معدنی و فرآیند اکسیداسیون طبیعی، پتینه کردن مصنوعی با استفاده از مواد شیمیایی مختلف برای ایجاد یک رنگ یا طیف انتخابی از رنگ‌های مختلف، رایج‌ترین تکنیک مورد استفاده است. مواد شیمیایی معمولی مورد استفاده عبارتند از نمک‌های کلریدی، نیترات و سولفات. محلول‌های پتینه کاری روی برنز ریخته‌گری، عموماً حاوی ترکیبات پیچیده‌ای از مواد شیمیایی هستند. برای مثال مخلوطی از: ۱- سدیم کلرات، ۲- آب، ۳- نیترات مس و یا: ۱- نیترات مس، ۲- آب، ۳- آمونیاک، ۴- استیک اسید و ۵- آمونیوم کلرید برای ایجاد پتینه سبز روی برنز استفاده می‌

ممکن است به دلیل طراحی‌های خاص و نامناسب راهگاه، این کمبود مذاب جبران نشده و ساختارهای اسفنجی متخلخل با انجماد میکروحفره‌ها در مجاورت راهگاه شکل‌گیرند. دما و زمان خروج قالب از کوره نیز می‌تواند تأثیر زیادی در کنترل انجماد و جلوگیری از تخلخل انقباضی داشته باشد. به طور کلی دمای پایین قالب می‌تواند انقباض بین دندریتی را کاهش دهد، زیرا سرعت انجماد بالا منجر به گرادیان حرارتی بیشتر در ریخته‌گری طلا می‌شود.

#### ۴-۲-۲- تخلخل و مک‌گازی

عیوب گازی عموماً در ریخته‌گری طلای زرد مشاهده می‌شود. همانند حفرات انقباضی، حفرات گازی نیز عموماً بین دندریتی هستند. اگر فشار گاز به مقدار کافی زیاد باشد، روزنه‌های بزرگ مانند حباب ایجاد خواهد شد. برخلاف حفرات انقباضی، حفرات گازی و حباب‌ها اغلب خود را به صورت تقریباً منظم و در اطراف یک سوراخ گرد نشان می‌دهند. سطح این حباب‌ها اغلب صاف و گاهی درخشان دیده می‌شود و هیچ‌گونه ساختار دندریتی در این روزنه‌ها مشاهده نمی‌شود. تخلخل گازی یا سوراخ‌های هوا در ریخته‌گری طلای زرد می‌تواند به دلیل گاز محلول در مذاب یا واکنش بین مذاب و مواد قالب‌گیری باشد. واکنش بین کلسیم سولفات در لایه گچی و کربن باقیمانده از سوختن ناقص نیز می‌تواند منجر به تشکیل سولفیدها در مذاب شود. چنین سولفیدهایی ممکن است در مذاب پخش شده و با اکسیژن محلول در آن واکنش داده و گاز دی‌اکسید گوگرد را تشکیل داده و باعث ایجاد روزنه‌های گازی در سطح قطعه در ریخته‌گری جواهرات طلا شود. تشخیص تخلخل‌ها و حفره‌ها را می‌توان با متالوگرافی یا اندازه‌گیری چگالی و تست کشش انجام داد. تخلخل‌ها و حفره‌های موجود در نمونه‌های آزمایشی ریخته‌گری باعث کاهش ازدیاد طول و استحکام کششی می‌شوند. این عیوب با ذوب مناسب، پخت قالب، ذوب ریزی و طراحی مناسب سیستم راهگاه برطرف می‌شوند [۴۸].

#### ۴-۳- پوشش‌های محافظتی در برابر خوردگی و تغییر رنگ در

##### جواهرات

استفاده از پوشش‌های محافظ برای کاهش خوردگی و افزایش طول عمر و پایداری طولانی‌مدت رنگ قطعات توصیه می‌شود. پوشش‌های محافظ مناسب باید شامل ویژگی‌های زیر باشند:

- ۱- محافظت زیاد در برابر کدر شدن و خوردگی در همه شرایط محیطی،
- ۲- کاربرد آسان،
- ۳- ارزان بودن،
- ۴- شفاف و بدون تغییر رنگ در طول زمان،
- ۵- مقاومت به سایش بالا.

افزارهای CAD مانند Pro-Engineer ، SolidWorks یا Unigraphics است، که عملکردهایی مانند اکستروژن، دوران و عملیات بولی (درست یا غلط منطقی در برنامه نویسی) را که از طرح دو بعدی یا طرح اولیه یا استاندارد (مکعب، استوانه، کره، و غیره) و به دنبال آن اصلاح کننده‌ها (مانند شیب و پرکننده‌ها) شروع می‌شود، ارائه می‌دهند. با این حال، هنگامی که اشکال پیچیده با شکل آزاد (مانند قطعات هنری) به میان می‌آیند، سیستم‌های CAD معمولی ناکافی هستند. یکی از پاسخ‌های موجود برای آن در سیستم‌های مدل سازی مبتنی بر لمس یا touch4 هستند (مانند Phantom ایالات متحده)، که به معنای واقعی کلمه به کاربر اجازه می‌دهد با در دست داشتن یک بازوی رباتی مجسمه سازی کرده و در نتیجه یک مدل پیچیده در فضای مجازی ایجاد کند (شکل ۸). رویکرد دوم، مناسب برای زمانی است که یک مدل فیزیکی از قبل موجود باشد و مدل جامد با استفاده از یکی از سیستم‌های تماسی یا غیر تماسی مهندسی معکوس می‌شود. این سیستم‌ها ابر نقاطی را ارائه می‌دهند که بر روی آن می‌توان سطحی را نصب و سپس به یک مدل جامد تبدیل کرد.

با استفاده از ماژول‌های تخصصی در نرم افزارهای CAD یا نرم افزارهای تخصصی (مانند Delcam DUCT)، مدل قطعه با اعمال شیب، انقباض، ماشین کاری و اضافه مجاز به مدل نهایی تبدیل می‌شود. صفحه جداسازی ممکن است به صورت تعاملی توسط کاربر با تعیین نقاط در امتداد خط جداسازی و یا با کمک نرم افزار تعیین شود. استفاده از اضافه‌های مجاز در بهترین حالت یک کار نیمه خودکار و در غیر این صورت یک کار تعاملی است (به عنوان مثال، کاربر هر وجه را در شیبی که باید به کار رود شناسایی کرده و زاویه شیب مناسب را نیز مشخص می‌کند).



شکل ۸- طراحی مدل مجسمه گانشا مبتنی بر سیستم لمسی [۵۲].

شوند. این دستور العمل‌های پتینه کردن ممکن است در PH‌های اسیدی تا قلیایی باشد.

دو روش متداول کاربردی که توسط کارخانه‌های ریخته‌گری استفاده می‌شود، روش مستقیم و روش مشعل است [۵۰-۵۱]. در روش مستقیم، یک محلول شیمیایی مستقیماً روی سطح فلز اعمال شده و فرصت کافی برای خشک شدن به آن داده می‌شود. مواد شیمیایی اضافی و مواد غیر چسبنده نیز با استفاده از یک پارچه نرم برداشته می‌شود. این روش تا رسیدن به رنگ دلخواه تکرار می‌شود در روش مشعل، محلول‌های پتینه بر روی سطح فلز اعمال شده و پس از آن با مشعل گرم می‌شود. پتینه با گرم شدن متناوب یک منطقه از قطعه با شعله و اعمال محلول ایجاد می‌شود. هنگامی که تنالیت، کیفیت و ضخامت مورد نظر برای پتینه به دست آمد، پتینه کاری کامل می‌شود. سپس جسم خنک شده و پس از گذشت مدت زمان کافی کاملاً خشک می‌شود [۵۱]. روش‌های کم کاربرد دیگری مثل رنگ آمیزی با بخار و غوطه وری نیز وجود دارند که روش دوم نیازمند شستشو در آب برای از بین بردن مواد شیمیایی اضافی است.

#### ۵- فناوری‌های نوین در ریخته‌گری

رویکرد مدرن برای توسعه ریخته‌گری دقیق نتیجه دو عامل عمده است. اولین مورد تقاضای مشتری از نظر سازگاری کیفیت (عمدتاً مطابق با هندسه و مشخصات قطعه)، کاهش زمان تولید (برای بخش مدل و همچنین تولید منظم) و کاهش مداوم هزینه (اساساً توسعه ابزار و هزینه‌های تولید، از آنجا که هزینه مواد معمولاً ثابت هستند) می‌باشد که تنها با رویکردهای مرسوم نمی‌توان آن‌ها را برآورده کرد. دومین عامل اصلی کاهش نیروی انسانی متخصص و باتجربه برای فرآیندهایی است که دارای تعداد زیادی پارامترهای تحت کنترل انسان هستند و بنابراین تغییرات زیادی را در ابزار و پارامترهای فرآیند، برای تولید قطعاتی که در نهایت مورد رضایت باشند، شامل می‌شود. ریخته‌گری به طور کلی، و ریخته‌گری دقیق به طور خاص، جزو فرآیندهایی هستند که نیاز به حداقل یک دهه یادگیری تخصصی از طریق آزمایش و خطا یا ترجیحاً تحت هدایت یک مهندس ارشد دارند. با کاهش شدید تعداد مهندسیین واجد شرایط که مشاغل طولانی مدتی را در زمینه تولید آغاز می‌کنند، در واقع یک مشکل جدی وجود دارد و بنابراین صنایع برای به دست آوردن دانش این حوزه و خودکارسازی به سمت فناوری‌های مدرن می‌روند.

امروزه رویکرد اصلی صنایع ریخته‌گری دقیق تمرکز بر طراحی مدل و بهینه سازی فرآیند، که مهم‌ترین و وقت‌گیرترین مراحل تولید هستند استوار شده است. اولین قدم در رویکرد رایانه‌ای در زمینه ریخته‌گری ایجاد یک مدل سه بعدی با استفاده از نرم



گام بعدی بهترین طراحی در چیدمان تغذیه کننده‌ها و سیستم راهگامی است. طراحی تغذیه نیازمند شناسایی آخرین منطقه منجمد شونده (نقطه داغ) در داخل قطعه ریخته‌گری و قرار دادن یک تغذیه در بالا یا کنار، با شکل و ابعاد مناسب است. اصول و روابط مدول ممکن است در وحله اول برای محاسبات استفاده شود، اما باید با شبیه سازی انجماد قطعه تأیید و بهینه سازی شود.

به طور مشابه، راهگام را می‌توان طوری طراحی کرد که قالب را در زمان مناسب و مورد انتظار پر کنند. برای اینکار، زمان ایده آل پر شدن را که وابسته به نوع فلز، وزن، ضخامت مقطع و دمای ذوب ریزی است و همچنین مساحت تنگه بر اساس سرعت که از حداکثر فشار فلز مایع حاصل می‌شود، محاسبه می‌شود. در انتها طراحی راهگام باید از طریق شبیه سازی پر کردن قالب تأیید شود که می‌تواند نقص‌هایی مانند آخال و سرد جوشی را پیش بینی کند.

برای به دست آوردن بهترین نتایج، باید شبیه سازی پر کردن قالب و انجماد انجام شود، که برای قطعات ریخته‌گری با دیواره نازک مهم است. نرم افزارهای مبتنی بر روش جزء محدود<sup>۱</sup> نسبت به نرم افزارهای مبتنی بر روش تفاضل محدود<sup>۲</sup> مناسب تر هستند، زیرا این نرم افزارها می‌توانند قطعات پیچیده با دیواره نازک را بهتر ارزیابی کنند.

پس از نهایی شدن مدل و روش، نمونه مدل را می‌توان به صورت جداگانه یا همراه راهگام به مرحله نمونه سازی سریع منتقل کرد. در اینجا، یک نسخه مومی از مدل مجازی، لایه به لایه در موم یا سایر مواد مناسب برای ریخته‌گری دقیق ایجاد می‌شود. مدل‌های مومی تولید شده توسط این روش را می‌توان در فرایند ریخته‌گری دقیق سنتی (ایجاد پوسته، موم زدایی و مذاب ریزی) استفاده کرد (شکل ۹) [۵۳].



شکل ۹ - ساخت مدل گانشا با نمونه سازی سریع (الف) و سپس پرداخت مدل (ب) و در نهایت ریخته‌گری آن و ساخت مجسمه (ج) [۵۲].

#### ۵-۱- ساخت افزایشی یا پرینت سه بعدی

ساخت افزایشی همچنین با نام‌های نمونه سازی سریع<sup>۳</sup> و یا پرینت سه بعدی<sup>۴</sup> نیز شناخته می‌شود. ساخت افزایشی شامل سه مرحله طراحی مدل سه‌بعدی یا مدل CAD، ایجاد طرح‌های لایه‌ای و ساخت نمونه مورد نظر است [۵۴]. طرح سه‌بعدی مورد نظر می‌تواند مستقیماً توسط طراح در نرم‌افزارهای طراحی سه‌بعدی طراحی شود و یا این‌که از طریق اسکن نمونه و از ابر نقاط ایجاد شود. بعد از ایجاد فایل CAD، مدل سه بعدی مورد نظر به لایه‌های دوبعدی تقسیم‌بندی شده و مسیرهای حرکت برای ایجاد طرح دوبعدی مورد نظر توسط کامپیوتر طراحی شده و نمونه‌های مورد نظر به صورت افزایشی از پایین به بالا ساخته می‌شوند [۵۵ و ۵۶]. مراحل فرایند ساخت افزایشی به طور خلاصه در زیر آورده شده‌اند:

۱. تهیه یک مدل CAD از طرح نمونه.

۲. تبدیل مدل CAD به زبان STL.

۳. برش لایه‌ای فایل STL به صورت لایه‌های نازک با مقاطع عرضی.

۴. ساخت مدل به صورت لایه‌ای (یک لایه روی لایه دیگر).

۵. تمیز کردن و پرداخت مدل نهایی [۵۷].

ساخت لایه‌ها در فرایند ساخت افزایشی می‌تواند به کمک نازل و اکسترودر و یا با بهره‌گیری از یک منبع انرژی مثل اشعه لیزر، قوس الکتریکی، ستون الکترونی یا اشعه فرابنفش که بر بستر مواد پودری یا وان پلیمری تابانده می‌شوند انجام شود. همچنین گستره بسیار وسیعی از مواد و ترکیبات مثل سرامیک‌ها، فلزات و آلیاژها، پلیمرها، موم‌ها و انواع کامپوزیت‌ها را می‌توان با فرایند ساخت افزایشی تولید کرد [۵۸].

توانایی تولید سریع و تولید ارزان قیمت مدل‌های هنری و صنعتی از ویژگی‌های بارز روش پرینت سه بعدی است. مدل‌های فیزیکی تولید شده بر روی یک پرینتر سه‌بعدی به همه افراد تیم طراحی اجازه می‌دهد تا مفاهیم را مرور کرده و با دریافت بازخوردها منجر به تولید محصول بهتر می‌شود [۵۹]. ساخت افزایشی یا نمونه‌سازی سریع روش‌های بسیار متنوعی را شامل می‌شود که در ادامه برخی از آنها مختصراً ارائه خواهند شد.

۱- فوتوپلیمرایزاسیون VAT: در فوتوپلیمرایزاسیون<sup>۵</sup> یک رزین فتو پلیمر (حساس به نور) در معرض یک نور با طول موج معین قرار می‌گیرد (عموماً موج فرابنفش (UV)، اما برخی از سیستم‌های

<sup>۳</sup> 3D Printing

<sup>۵</sup> Photopolymerization

<sup>۱</sup> FEM

<sup>۲</sup> FDM

<sup>۳</sup> Rapid prototyping



ترین تکنولوژی پرینت سه بعدی در بازار است. در حالی که تکنیک‌های دیگری برای ایجاد اکستروژن وجود دارد، معمولاً از گرما برای ذوب مواد حجیم در یک محفظه کوچک و قابل حمل استفاده می‌شود. این ماده توسط یک سیستم تغذیه تراکتوری<sup>۳</sup> به داخل هل داده می‌شود که فشار لازم برای اکستروژن را ایجاد می‌کند. سپس مواد از یک نازل حرارت دیده خارج شده و روی یک مقطع از پیش تعیین شده اکستروژن می‌شود.

تکنولوژی‌های اکستروژن ماده یک راه سریع و به صرفه برای ساخت نمونه‌های اولیه از جنس پلاستیک است که پرینتر سه بعدی<sup>۴</sup> FDM یکی از پرکاربردترین انواع این تکنولوژی است. پرینتر سه بعدی FDM از رشته (فیلامنت) موادهای ترموپلاستیک برای ساخت قطعه استفاده می‌کند. فیلامنت از یک نازل داغ عبور می‌کند که به آن حالتی خمیری نزدیک به مایع می‌دهد. با حرکت پیوسته نازل، ماده اولیه خمیری در مسیرهای مشخص روی سینی ساخت گذاشته می‌شود. با خنک شدن مواد، جامد شده و قطعه به صورت لایه به لایه ساخته می‌شود. با این حال این روش کمترین دقت ابعادی و بیشترین خطا را در برابر تکنولوژی‌های پرینت سه بعدی دیگر دارد و برای ساخت جزئیات پیچیده چندان مناسب نیست [۶۲].

۴- جت کردن مواد (*Material Jetting*): جت کردن مواد یک فرایند ساخت افزودنی است که شیوه کاری مشابه پرینترهای دوبعدی دارد. در این تکنولوژی یک هد پرینتر، مشابه هد پرینترهای جوهرافشان، قطرات یک مواد حساس به نور را روی پلتفرم پرینتر پخش می‌کند، این قطرات تحت نور UV به صورت لایه به لایه جامد می‌شود و کاربرد گسترده‌ای در صنعت الکترونیک و اپتیک دارد. مواد اولیه این دستگاه‌های پرینتر سه بعدی پلیمرهای ترموستات (اکرلیک‌ها) هستند که در حالت مایع استفاده می‌شوند. قطعات تولید شده با این تکنولوژی جزئیات فوق العاده، دقت بالا و سطح صاف و نرمی دارند. این پرینتر سه بعدی به طراح سه بعدی این امکان را می‌دهد که قطعه را در یک نوبت پرینت با چند رنگ و چند متریکال مختلف پرینت سه بعدی کند که البته هزینه‌های بالاتری را شامل می‌شود [۶۳].

۵- بایندر جت (*Binder Jetting*): پرینتر سه بعدی بایندر جت یک عنصر چسباننده، بایندر، را روی لایه‌های نازک یک مواد پودری توزیع می‌کند. مواد اولیه پودری می‌توانند با پایه سرامیک یا فلز باشند. این روش را می‌توان با ذوب بستر پودر (PBF) مقایسه کرد، که در آن لیزر ذرات پودر را ذوب می‌کند تا سطح مقطعی از قطعه را ایجاد کند. در این روش هد پرینتر سه بعدی

نور مرئی نیز استفاده می‌شوند) و با یک واکنش شیمیایی تبدیل به قطعه جامد می‌شود.

در پلیمریزاسیون VAT از رزین فوتوپلیمر مایع در یک محفظه استفاده می‌شود که وقتی در معرض تشعشع قرار می‌گیرند، با پخت یا سخت شدن رزین به صورت لایه به لایه، مدل از آن ساخته می‌شود.

تکنولوژی SL یا استریولیتوگرافی<sup>۱</sup> یک پروسه ساخت افزودنی از خانواده فوتوپلیمریزاسیون VAT است. تکنولوژی SL اولین تکنولوژی پرینت سه بعدی دنیاست که به عنوان اولین ماشین‌های نمونه سازی سریع به کار گرفته شدند و همیشه بهینه ترین راه حل برای نمونه سازی سریع قطعاتی است که نیاز به دقت بالا و یا سطح باکیفیت و نرم، در عین رعایت جزئیات کوچک دارند. در این تکنولوژی، یک منبع لیزر UV به صورت لایه به لایه رزین را جامد می‌کند. پس از ساخته شدن لایه، پلتفرم ساخت به اندازه یک لایه بالا رفته و پروسه تابش لیزر دوباره تکرار می‌شود و این روند تا شکل‌گیری کامل قطعه تکرار می‌شود [۶۰].

۲- ذوب بستر پودر (*Powder Bed Fusion*): در این فرآیند که اختصاراً PBF نمایش داده می‌شود، با استفاده از یک منبع حرارتی، همجوشی بین ذرات پودر که می‌تواند فلز یا پلیمر باشد ایجاد می‌شود و هر بار یک لایه را شکل می‌دهد. ذوب انتخابی با لیزر<sup>۲</sup> (SLS) اولین دستگامی از این خانواده بود که به صورت تجاری مورد استفاده قرار گرفت. همه فرآیندهای PBF دارای یکسری ویژگی‌های مشترک هستند که شامل ۱- یک یا چند منبع حرارتی برای القای همجوشی بین ذرات پودر<sup>۲</sup>- روشی برای کنترل همجوشی پودر در ناحیه مقرر شده از هر لایه و ۳- مکانیسم‌هایی برای افزودن و صاف کردن لایه‌های پودری است. رایج ترین منابع حرارتی برای PBF لیزر هستند. فرآیندهای PBF که از لیزرها استفاده می‌کنند به عنوان ماشین‌های زینترینگ لیزری شناخته می‌شوند.

پرینترهای سه بعدی SLS در فرآیند ساخت نیازی به استفاده از ساپورت ندارند و پودرهای گداخته نشده‌ی موجود در لایه‌های قطعه که همچنان جزئی از قطعه نشدند، نقش ساپورت را در فرآیند ساخت ایفا می‌کنند. این امر باعث می‌شود که این تکنولوژی بتواند هندسه‌های بسیار پیچیده و فرم‌های آزادی را نسبت به سایر روش‌ها تولید کند [۶۱].

۳- سیستم‌های مبتنی بر اکستروژن (*Extrusion-Based Systems*): فناوری مبتنی بر اکستروژن در حال حاضر محبوب

<sup>۳</sup> Tractor-feed

<sup>۴</sup> Fused deposition modeling

<sup>۱</sup> Stereolithography

<sup>۲</sup> Selective laser sintering

#### ۵-۲- تکنولوژی‌های ساخت جواهرات

ابزارهای هنری و طراحی به کمک رایانه در کل فرایند توسعه، نقش اساسی دارد و از طریق ایده‌های اولیه مفهومی و با بهینه سازی پارامترهای طراحی، به هنرمندان و طراحان کمک می‌کند. اکثر سیستم‌های CAD، روش مدل سازی جامد یا روش مدل سازی سطح را برای نمایش مدل‌های سه بعدی با پارامترهای اقلیدسی اعمال می‌کنند. که در این بین مدل سازی جامد کامل ترین ارائه در مقایسه با سایر روش‌هاست [۶۸]. یک مدل جامد می‌تواند ویژگی‌هایی هم چون شکل کلی و ماده سازنده جسم را به خوبی توصیف کند. در حالی که مدل سازی سطح، روشی مناسب برای مدل سازی منحنی‌ها و سطوح آزاد فراهم می‌کند [۶۹]. پایه منطقی و غیر یکنواخت (NURBS) به یک سیستم مدل سازی اجازه می‌دهد تا از یک نمایش داخلی واحد برای طیف گسترده‌ای از منحنی‌ها و سطوح و همچنین سطوح پیچیده استفاده کند [۷۰]. سیستم‌های مدل سازی قوی بر اساس NURBS برای طراحی هواپیما، اتومبیل، کفش، جواهرات، بطری و غیره به کمک رایانه ایجاد شده اند. طراحی جواهرات توسط رایانه برای اولین بار در پژوهش موجود در مرجع [۷۱] مورد بررسی قرار گرفت و حلقه‌ها با استفاده از نرم افزار CATIA مدل سازی شدند [۷۲]. امروزه چندین نرم افزار عمومی CAD در طراحی جواهرات از قبیل Rhinoceros [۷۳]، SolidWorks [۷۴]، AutoCAD [۷۵] محبوبیت بیشتری پیدا کرده‌اند. نمونه طراحی توسط این نرم افزارها در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود. بسیاری از نرم افزارهای تجاری CAD به طور خاص برای جواهرات ساخته شده‌اند، از قبیل JewelCAD [۷۶]، RhinoJewel [۷۷]، ArtCAM JewelSmith [۷۸]، Matrix3D [۷۹]، SoluTech-3D [۸۰]. بیشتر آن‌ها سیستم‌های پارامتریک و ویژگی محور هستند و به عنوان رابط گرافیکی قابلیت ارائه واقع گرایانه به کاربر را خواهند داشت. این نرم‌افزارها ابزارهای مختلف مدل سازی CAD را برای مدل سازی ساده قطعات جواهرات فراهم می‌کنند. ویژگی خاص این سیستم‌ها وجود کتابخانه‌های ایجاد شده از حلقه‌های استاندارد، سنگ‌های قیمتی برش خورده، جواهرات و مجموعه‌ای از آیت‌های محبوب (شکل ۱۱) و همچنین قابلیت ارسال مستقیم مدل‌ها را به سیستم‌های نمونه‌سازی سریع و ماشین‌های برش و کامپیوترهای کنترل عددی فراهم می‌کنند. ویژگی‌های خاص دیگری که به عنوان مثال در Matrix3D ارائه شده است [۷۹]، ضبط مراحل طراحی و تعریف پارامترها برای ساخت را می‌توان اشاره کرد.

روی پلتفرم ساخت حرکت کرده و قطرات بایندر را توزیع می‌کند. ساخت هرلایه با این پرینترها شبیه به پروسه پرینت دوبعدی جوهر روی کاغذ است. پس از پایان ساخت هرلایه، پلتفرم ساخت پرینتر سه بعدی به سمت پایین حرکت کرده و یک لایه پودر جدید روی آن پخش می‌شود و مراحل برای لایه جدید تکرار می‌شوند تا قطعه به صورت یکپارچه ساخته شود. پس از پرینت، قطعات نیاز به پردازش دارند. پرینتر سه بعدی بایندر جت سرمایی برای مدل‌هایی که ویژگی مهم آنها فرم و زیبایی است بسیار مناسب است، مدل‌های معماری، نمونه‌های بسته بندی و مجسمه‌های تمام رنگی از جمله این کاربردها است. البته قطعاتی که با این تکنولوژی ساخته می‌شوند شکنندگی زیادی دارند [۶۴].

۶- لایه نشانی با توزیع مستقیم انرژی ( Directive Energy Deposition): لایه نشانی با استفاده از توزیع مستقیم انرژی (DED) یک فرآیند پیچیده پرینت سه بعدی است و گرچه می‌توان با استفاده از آن قطعات را از ابتدا ساخت، اما معمولاً برای تعمیر یا افزودن ماده‌ی اضافه به اجزای موجود مورد استفاده قرار می‌گیرد. به طور مشابه با بعضی از روش‌های ذوب لیزری مبتنی بر بستر پودر، این روش نیز از یک منبع انرژی متمرکز مانند پرتو لیزر یا الکترون برای ذوب ماده استفاده می‌کند. با این تفاوت که پرینترهای سه بعدی با تکنولوژی توزیع مستقیم انرژی، قطعات را با ذوب پودر همزمان با توزیع آن و به صورت لایه لایه می‌سازد. این تکنولوژی معمولاً با پودر فلزات یا مفتول فلز کار می‌کند [۶۵].

۷- ساخت صفحات چندلایه (Sheet Lamination Processes): یکی از اولین تکنیک‌های تجاری سازی شده (سال ۱۹۹۱) ساخت افزایشی مواد، ساخت اشیای چند لایه<sup>۱</sup> (LOM) بود. این تکنیک نوعی ساخت لایه افزایشی و به معنی تولید سه بعدی شی چندلایه است. در فرآیند LOM، لایه‌هایی از ورق پلاستیک یا کاغذ به وسیله گرما و فشار، ذوب یا لمینیت می‌شوند و سپس توسط یک لیزر یا یک تیغ متصل به کامپیوتر به اشکال دلخواه در می‌آیند. با این که امروزه LOM محبوب‌ترین روش پرینت سه بعدی نیست، ولی در برخی اهداف خاص یکی از سریع‌ترین و مقرون به صرفه‌ترین روش‌ها برای نمونه سازی سه بعدی می‌باشد. این فرآیند را می‌توان بر اساس مکانیزم بکار گرفته شده برای ایجاد اتصال بین لایه‌ها طبقه بندی کرد: (الف) چسباندن با چسب، (ب) پیوند حرارتی، (ج) بهم فشردگی و (د) جوشکاری اولتراسونیک [۶۶ و ۶۷].

<sup>۱</sup> Laminated Object Manufacturing

شکل ۱۲- نمایی از فضای طراحی و امکانات نرم افزار RhinoJewe [۷۷].



شکل ۱۳- استفاده از تکنولوژی نمونه سازی سریع در ساخت مدل جواهرات [۸۲].  
۵-۲-۱- فن آوری‌های رایانه ای برای نمونه سازی سریع، اتوماتیک و فیزیکی جواهرات

فن آوری‌های پیشرفته‌ای از قبیل نمونه سازی سریع و ماشینهای کنترل عددی رایانه ای<sup>۱</sup> نقش مهمی در ساخت مدل‌های جواهرات دارند. RP به طور گسترده‌ای برای ساخت مدل‌ها و نمونه اولیه قطعات در کاربردهای گوناگون و برای تولید قطعات با کیفیت بالا در تعداد نسبتاً کم و اشکال پیچیده و مجسمه سازی در هنرهای زیبا و هم چنین در ساخت مدل‌های جواهرات (شکل ۱۳) استفاده می‌شود [۸۱ و ۸۲] که در تمام این موارد منجر به کاهش زمان در مرحله مدل سازی می‌شود. این مدل‌ها هم چنین می‌توانند به عنوان مدل‌های مومی تزریق شده در ریخته گری مستقیم که در آن‌ها زمان تولید به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد، استفاده شود.

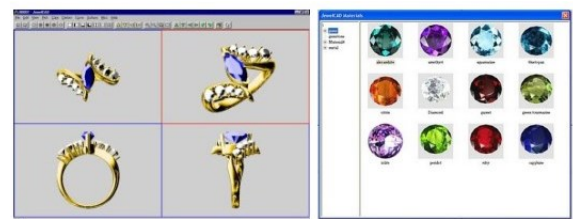
۲-۲-۵- مهندسی رایانه‌ای و شبیه سازی در ریخته‌گری جواهرات  
شبیه سازی رایانه‌ای به طور گسترده‌ای در برنامه‌ها و کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد و در تولید به عنوان راهی برای کاهش زمان و هزینه محصول کاربرد دارد. نرم افزارهای شبیه سازی تجاری موجود برای کاربردهای مختلف در ریخته گری صنعتی توسعه یافته‌اند. با این وجود، هیچ کدام ماژول‌هایی را که به طور خاص برای شبیه‌سازی ریخته‌گری جواهرات استفاده می‌شود، ارائه نمی‌دهد. طراحی به کمک رایانه<sup>۲</sup>، مهندسی به کمک رایانه<sup>۳</sup> و دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۴</sup> که از طریق توسعه نرم افزار به کار می‌روند، ما را قادر می‌سازد تا فرآیند ریخته‌گری را مشابه محیط واقعی و تحت عنوان "آزمایشگاه مجازی" شبیه سازی کنیم [۸۳]. در دهه گذشته، شبیه سازی رایانه ای به طور فزاینده‌ای نقش مهمی در ریخته‌گری دقیق طلا و جواهر ایفا کرده و به تدریج جایگزین آزمایشات آزمون و خطا شده است که تلاش، هزینه و زمان بسیار بیشتری نسبت به شبیه سازی نیازمند است. با توجه به پیچیدگی بالای فرآیند ریخته‌گری طلا و تداخل بین آلیاژ مایع و شرایط فرآیند، شبیه سازی رایانه‌ای به عنوان ابزاری قدرتمند برای کمک به ما در ایجاد بینشی از رفتارهای طبیعی این فرایند مانند جریان فلز و تلاطم در هنگام پر شدن،



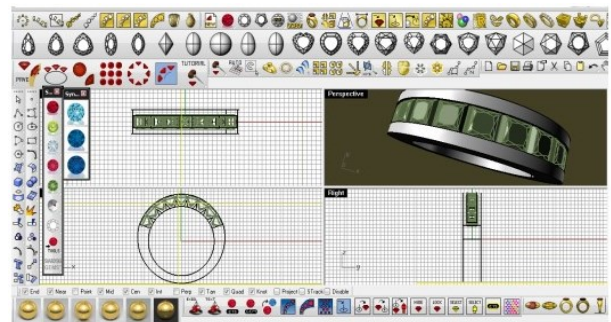
شکل ۱۰- جواهرات طراحی شده توسط نرم افزارهای (a) Rhinoceros و (b) SolidWorks [۷۳ و ۷۴].

در فرآیند طراحی جواهرات، طرح مفهومی مرحله‌ای ابتدایی است که بر شخصیت محصولات تأثیر می‌گذارد و معمولاً دارای ابهام و عدم اطمینان بالایی است. در طول طراحی مفهومی، طراحان معمولاً ایده‌های زیادی داشته و آن‌ها را با مداد و کاغذ به طرح های فوری تبدیل می‌کنند. نرم افزار CAD به ندرت در مرحله طراحی مفهومی استفاده می‌شود، زیرا معمولاً به تعاریف کامل و دقیق هندسه‌های طراحی نیاز دارد که فقط در مراحل پیوسته و دقیق طراحی موجود است.

از مزایای استفاده از CAD در طراحی می‌توان به راحتی در ویرایش و طراحی مجدد، تغییر شکل آسان و پشتیبانی در ادغام مراحل ساخت اشاره کرد (شکل ۱۲). اگرچه چندین سیستم CAD برای طراحی محصولات صنایع مختلف از جمله طراحی مد استفاده می‌شود، اما هنوز هم هنگام استفاده از این سیستم های CAD باید تلاش‌های اساسی انجام شود. این تلاش‌ها منجر به پیشرفت‌های جدیدی در نمونه‌های مدل سازی سه بعدی می‌شود، که تأکید بیشتری بر مرحله خلاقیت در زیبایی شناسی و سبک‌های محصولات لطیف دارند.



شکل ۱۱- نمونه ای از کتابخانه سنگ‌های قیمتی در نرم افزار JewelCAD [۷۶].



<sup>۲</sup> CAE

<sup>۴</sup> CFD

<sup>۱</sup> CNC

<sup>۲</sup> CAD

سلول‌های کوچک تفکیک کرده تا مش یا شبکه حجمی تشکیل شود و سپس از الگوریتم مناسب برای حل معادلات حرکت استفاده گردد. مش‌ها می‌توانند نامنظم یا منظم باشد. برخی از روش‌های تفکیک مورد استفاده عبارتند از:

(۱) روش حجم محدود<sup>۱</sup> (۲) روش جزء محدود<sup>۲</sup> (۳) روش تفاضل محدود<sup>۳</sup>.

(ب) شبیه‌سازی کامپیوتری ریخته‌گری دقیق طلا و جواهر: فرآیند شبیه‌سازی کامپیوتری به دو مرحله کلی طبقه بندی می‌شود: پر کردن قالب و سرد شدن یا انجماد [۸۶].

(۱) پر کردن: در پژوهشی که توسط گرنند-وانارومون<sup>۴</sup> (سال ۲۰۰۹) صورت گرفت [۸۷]، برای مطالعه و تجزیه و تحلیل مرحله پر کردن جواهرات، یک درخت ساده که شامل سه قطعه مختلف است، همانطور که در شکل (۱۴) نشان داده شده است، برای شبیه‌سازی آزمایشی طراحی و استفاده شد. انتخاب اجسام مورد مطالعه بر اساس مشکلات ایجاد شده حین ریخته‌گری بود: گوه پلکانی با تغییر ضخامت قسمت‌های مختلف، حلقه چهار گوشه با گوشه‌های چالش برانگیز و حلقه گرد با کره (یکی از سخت‌ترین اشکال ریخته‌گری). با مطالعه پر کردن این قطعات، انتظار می‌رود رفتار پر کردن بهتر درک شود. در این مقاله از سه نرم‌افزار ProCAST، FLOW-3D و MAGMASoft برای شبیه‌سازی فرآیند پر کردن قالب در ریخته‌گری دقیق استفاده شده است.

(۲) انجماد: در پژوهشی که توسط فیشر-بوهرنر<sup>۵</sup> (سال ۲۰۰۶) انجام شد [۸۶]، نرم‌افزار MAGMASoft برای شبیه‌سازی مراحل سرمایش و انجماد فرآیند ریخته‌گری دقیق به کار گرفته شد (شکل ۱۵). او در این پژوهش ثابت کرد که شبیه‌سازی کامپیوتری فرآیند ریخته‌گری دقیق طلا و جواهر می‌تواند به عنوان ابزاری برای مطالعه وابستگی‌های پیچیده و متقابل پارامترها در هنگام پر شدن و انجماد و همچنین برای طراحی راهگاه اصلی و تغذیه و جلوگیری از نقص‌های احتمالی و در نهایت بهبود کیفیت استفاده شود.

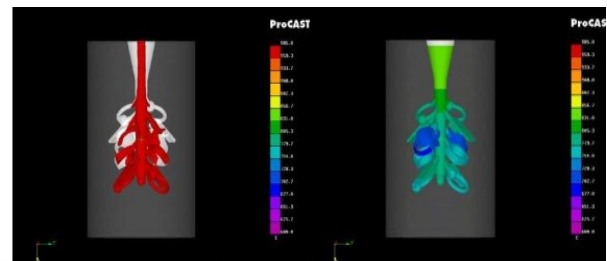
#### ۶- جمع بندی

هنر باستانی ریخته‌گری قطعات هنری یک فرآیند آهسته و دست و پا گیر است که نیازمند توجه به هر قطعه ریختگی از ساخت مدل مومی تا پایان و انجام عملیات پرداخت نهایی می‌باشد. با کمک فرآیند ریخته‌گری دقیق، ریخته‌گری می‌تواند به طور

سرد شدن و انجماد فلز عمل می‌کند که این منجر به درک بهتر مکانیزم‌های ایجاد عیوب می‌شود. توسعه بیشتر در هدف بلند مدت، پیش‌بینی نتایج ریخته‌گری و تلاش برای جلوگیری از ایجاد نواقص ریخته‌گری با روشی مطمئن و در نتیجه کاهش زمان و هزینه تولید است.



شکل ۱۴ - طراحی شماتیک یک درخت استاندارد با نرم‌افزار CAD (شکل سمت چپ) ساخت نمونه مومی آن به همراه سنسورهای دریافت دیتا در طی فرآیند (شکل سمت راست) [۸۸].



شکل ۱۵ - فریم‌های شبیه‌سازی پر کردن (شکل سمت چپ)، انجماد (شکل سمت راست) در نرم‌افزار شبیه‌سازی ProCAST [۸۸].

با این حال بسیاری از جنبه‌ها باید بیشتر مورد مطالعه قرار گیرند، مانند مطالعه خصوصیات فیزیکی آلیاژهای گرانبها و مواد ریخته‌گری دقیق و هم‌چنین بررسی دینامیک فرآیند. در ادامه مفاهیم مرتبط و همچنین مراحل فرآیند بررسی می‌شود [۸۴].

*الف) دینامیک سیالات محاسباتی:* دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) یکی از شاخه‌های مکانیک سیالات است که از روش‌ها و الگوریتم‌های عددی برای حل و تجزیه و تحلیل مسائلی که شامل جریان سیالات است استفاده می‌کند [۸۵]. اساس هر مسئله CFD معادلات ناویر استوکس است که هرگونه جریان سیال تک فاز را تعریف می‌کند. اساسی‌ترین ملاحظاتی که در CFD وجود دارد نحوه برخورد فرد با یک سیال پیوسته به شیوه ای گسسته در رایانه است. یکی از روش‌ها این است که حوزه فضایی را به

<sup>۴</sup> Wannarumon-Grande

<sup>۵</sup> Fischer-Bühner

<sup>۱</sup> FVM

<sup>۲</sup> FEM

<sup>۳</sup> FDM

- [18] Taşcıoğlu S., Akar N., A novel alternative to the additives in investment casting pattern wax compositions, *Materials & design*, 2003, 24(8): p. 693-698.
- [19] Singh B., Kumar P., Mishra B., Experimental investigation of wax blends in investment casting process, *Indian Foundry Journal*, 2006, 52(3): p. 29-36.
- [20] Shen Y. et al., Comparison of the results for semisolid and plastic injection molding process, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2002, 29(1): p. 97-105.
- [21] Jones S., Yuan C., Advances in shell moulding for investment casting, *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 135(2-3): p. 258-265.
- [22] Jones S., Improved sol based ceramic moulds for use in investment casting, 1993, University of Birmingham.
- [23] Jones S., Leyland S., The use of conductivity as a means of assessing the extent of wet back in an investment casting mould, in *Proceedings of 22nd BICTA Conference on Investment Casting*, 1995.
- [24] Jones S., Marquis P., Role of silica binders in investment casting. *British ceramic transactions*, 1995, 94(2): p. 68-73.
- [25] Yuan C., Jones S., Investigation of fibre modified ceramic moulds for investment casting, *Journal of the European Ceramic Society*, 2003, 23(3): p. 399-407.
- [26] Doles R. S., Viers D. S., Filler component for investment casting slurries. 2009, Google Patents.
- [27] Jiang W. et al., A new shell casting process based on expendable pattern with vacuum and low-pressure casting for aluminum and magnesium alloys, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 51(1-4): p. 25-34.
- [28] Jia Q., Cui Y., Yang R., A study of two refractories as mould materials for investment casting TiAl based alloys. *Journal of Materials Science*, 2006, 41(10): p. 3045-3049.
- [29] Znamenski L., Application of a hydrolyzed ethyl silicate in investment casting. RF Patent, 1997, 2088367.
- [30] Ospennikova O., Pikulina L., Antipin L., Application of a hydrolyzed ethyl silicate in investment casting, *Inorganic Materials*, 2010, 46(5): p. 563-564.
- [31] Bleier H., Kukla C., Quality in the production of wax patterns, *Foundry Trade Journal*, 2002, 25(2): p. 20-22.
- [32] Foster G. H., Method and apparatus for removing wax from casting mold, 1994, Google Patents.
- [33] Brum F. J. et al., Microwave dewaxing applied to the investment casting process, *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(7): p. 3166-3171.
- [34] Jovanović M. T. et al., Microstructure and mechanical properties of precision cast TiAl turbocharger wheel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 167(1): p. 14-21.
- [35] Batllo F., Method of improving the removal of investment casting shells, U.S. Patent Application No. 10/337,799, 2003.
- [36] Batllo F., Viers D., Mosher J., Method of improving the removal of investment casting shells, 2006, Google Patents.
- [37] P. Meyers, Holmes L., "Technical Studies of Ancient Chinese Bronzes: Some Observations," *The Great Bronze Age of China, A Symposium*, ed. George Kuwayama (Los Angeles County Museum of Art), 1983.
- [38] Rajkolhe R., Khan J. G., Defects, causes and their remedies in casting process: a review, *Int. J. Res. Adv. Technol.* 2 (3), 2014, 523-531
- [39] Sias F. R., *Lost-Wax Casting. Old, New, and Inexpensive Methods*, Woodsmere Press Pendleton, South Caroline, 2005.
- [40] Theophilus Presbyter, *On Divers Arts*, Dover, New York, 1979.
- [41] Ashbee C. R., *The Treatises of Benvenuto Cellini on Goldsmithing and Sculpture*, Dover, New York, 1967.

دقیق‌تر و در زمان کمتر بدون نیاز به کارهای غیرضروری کارگران انجام شود. دقت ابعادی بهتر، تعداد محصولات مردودی را کاهش می‌دهد. هزینه اولیه این فرآیند نیز به دلیل مراحل مدل‌سازی، نیاز به کارگران ماهر و محیط خنک کننده در مقایسه با ریخته‌گری ماسه‌ای گران‌تر است، بنابراین بهتر است زمانی که محصولات کوچک و با کیفیت مورد نظر است، از ریخته‌گری دقیق استفاده شود.

این امر هم چنین زمینه مناسبی برای تحقیق و توسعه در زمینه ابزارهای کامپیوتری، از سیستم‌های مدل‌سازی برای اشکال پیچیده تا نمونه‌سازی سریع و تبدیل مدل‌های مجازی به مدل‌های مومی و حتی شبیه‌سازی کل فرآیند برای دستیابی نتیجه‌ای هر چه نزدیک‌تر به نتیجه نهایی مورد نظر را فراهم می‌کند که در نهایت هزینه و زمان تولید را به طور موثری کاهش می‌دهد.

#### مراجع

- [1] Beeley P. R., Smart R. F., *Investment casting*, Institute of Materials London, 1995.
- [2] Twarog D., Barron B., Warren R., Helmer J., Klemp T., Ray E., *Handbook on the investment casting process*, American Foundrymen's Society Inc., USA, 1993.
- [3] Barnett S., *Investment Casting--the Multi-Process Technology*, *Foundry Trade J. Int.*, 11, 1988, 33.
- [4] Clegg A. J., *Precision casting processes*, Pergamon, 1991.
- [5] Yodice A., *Freeze process cuts casting costs, advanced materials & processes*, 155, 1999, 35-36.
- [6] Eddy W., Barbero R., Dieters W., Esarey B., L., Frey J., Gros Hall J., Hockin J., Nelligan P., Powell R., *Investment casting, Metals Handbook*, American Society for Metals, 1974, 237-261.
- [7] Kalpakjian S., Schmid S., Kok C., *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, in, Pearson Education India, 2008.
- [8] Taylor P., *An illustrated history of lost wax casting*, in: *Proceedings of the 17th Annual BICTA Conference*, 1983.
- [9] Hunt L. B., *The long history of lost wax casting - Over five thousand years of art and craftsmanship*, 1980, *Gold Bulletin*, 13(2), 63-79.
- [10] Hunt L., *The long history of lost wax casting*, *Gold bulletin*, 13, 1980, 63-79.
- [11] Kotzin E. L., *Metalcasting & molding processes*, American Foundrymen's Society, 1981.
- [12] Ravi B., Datta G. L., February. *Metal Casting--Back to Future*, In 52nd Indian Foundry Congress, 2004.
- [13] Craig R., J. Eick, and F. Peyton, *Properties of natural waxes used in dentistry*, *Journal of Dental Research*, 1965. 44(6): p. 1308-1316.
- [14] Solomon P., *Disposable pattern, composition for investment casting*, 1975, Google Patents.
- [15] Horton R. A., *Investment Casting*. American Society for Metals. Ohio, 1987: p. 253-269.
- [16] Taşcıoğlu S., Akar N., Conversion of an investment casting sprue wax to a pattern wax by chemical agents. *Materials and Manufacturing Processes*, 2000. 18(5): p. 753-768.
- [17] Borcherding A., Luck T., *Application of plant proteins as thermoplastics*, in *Plant Proteins from European Crops*. 1998, Springer. p. 313-318.

- [65] House M. A. et al., Rapid laser forming of titanium near shape articles: LaserCast. In: Proceedings of the solid freeform fabrication symposium, Austin, TX, p 239, 1996.
- [66] Wimpenny D. I., Bryden B., Pashby I. R., Rapid laminated tooling. *J Mater Process Technol* 138:214, 2003.
- [67] Stucker B., Rosen D., Gibson I., *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, Second Edition.
- [68] Olfe D. B., *Computer Graphics for Design: from Algorithms to AutoCAD*, New Jersey: PrenticeHall, 1995.
- [69] Zeid I., *CAD/CAM Theory and Practice*, New York: McGraw Hill, 1991.
- [70] Rogers D. F., *An Introduction to NURBS: with Historical Perspective*, San Francisco: Morgan Kaufmann, 2001.
- [71] Kai C. C., Gay R., "CAD/CAM/CAE for ring design and manufacture," *Computer-Aided Engineering Journal*, vol. February, pp. 13-24, 1991.
- [72] Catia. Virtual Design for Product Excellence Software. <http://www.3ds.com/products/catia> [Online].
- [73] Rhinoceros software. NURBS modeling for Windows. <http://www.rhino3d.com/> [Online].
- [74] SolidWorks. 3D CAD Design Software <http://www.solidworks.com/> [Online].
- [75] AutoCAD. 2D and 3D CAD Design and Documentation Software <http://usa.autodesk.com/autocad/> [Online].
- [76] JewelCAD. CAD/CAM for Jewellery Design Software. <http://www.jcadcam.com/> [Online].
- [77] RhinoJewel. The Software for Creators of Jewels. <http://www.rhinojewel.com/en/> [Online].
- [78] ArtCAM JewelSmith. The Complete Software Solution for Jewelry Design and Manufacture. <http://www.artcamjewelsmith.com/> [Online].
- [79] Matrix3D. Jewelry Design Software. <http://www.gemvision.com/html/products/matrix/matrix.html> [Online].
- [80] SoluTech 3D. The Next Generation CAD Jewelry Program. [http://www.3djd.com/products.aspx?product\\_id=11](http://www.3djd.com/products.aspx?product_id=11) [Online]
- [81] Wannarumon S., E. Bohez L. J., Rapid prototyping and tooling technology in jewelry CAD systems, *Computer-Aided Design & Applications*, vol. 1, pp. 569-575, 2004.
- [82] Wannarumon S., An aesthetics driven approach to jewelry design, *Computer-Aided Design & Applications*, vol. 7, pp. 489-503, 2010.
- [83] Actis Grande M., Porta L., Tiberto D., Computer simulation of the investment casting process: widening of the filling step, in *Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology*, 2007, pp. 1-16.
- [84] Grande M. A., Wannarumon S., Numerical simulation of investment casting of gold jewelry: experiments and validations, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 55, pp. 82-87, 2009.
- [85] Wikipedia web site, "Computational fluid dynamics". Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Computational\\_fluid\\_dynamics](http://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics) Retrieved 27 October 2008
- [86] Fischer-Bühner J., Computer simulation of investment casting, in *Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology*, 2006, pp.193-216
- [87] Wannarumon, S., Grande, M. A., Casting A. G. I., Comparisons of Computer Fluid Dynamic Software Programs applied to Jewelry Investment Casting Process. *Engineering and Technology*, November 2014, 88-95.
- [88] Wannarumon, S., *Reviews of Computer-Aided Technologies for Jewelry Design and Casting*, 2011.
- [42] Feinberg W., Lost-wax casting, in: *Lost-Wax Casting: A Practitioners Manual*, Practical Action Publishing, Rugby, United Kingdom, 1983, pp. 1-74.
- [43] Fidanza G. B., *Le forme del bronzo: ricostruzione della fusione a cera persa con tecnica indiretta in età moderna (da un crocifisso di Gian Lorenzo Bernini ed Ercole Ferrata)*, Fabriano, Ancona, 2005.
- [44] Morigi G., *Fusione a cera persa con tecnica indiretta*, Comune Assessorato alla cultura, Bologna, 1991.
- [45] Giuffredi A., *Formatura e fonderia, guida ai processi di lavorazione*, Alinea Editrice s.r.l, Firenze, 2010
- [46] Rao P. N., *Manufacturing Technology: Foundry, Forming and Welding*, Tata McGraw-Hill, New York, 1999.
- [47] Brown J. R., *Foseco Foundryman's Handbook*, Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford, 2000
- [48] Zhang X. J., Tong K. K., Chan R., Tan M., Gold jewellery casting: Technology design and defects elimination. *Journal of Materials Processing Tech.*, 1995, 48(1-4), 603-609.
- [49] Fischer-Bühner J., Basso A., Poliero M., *Metallurgy and processing of coloured gold intermetallics - Part II: Investment casting and related alloy design*. *Gold Bulletin*, 2010, 43(1), 11-20
- [50] Hughes R., Artificial Patination. In: T. Drayman-Weisser, ed. *Dialogue/89 - The Conservation of Bronze Sculpture in the Outdoor Environment: A Dialogue Among Conservators, Curators, Environmental Scientists, and Corrosion Engineers*. Houston: NACE, 1992, pp. 231-43
- [51] Hughes R., Rowe M., *The Colouring, Bronzing and Patination of Metals*. London: Crafts Council
- [52] Ravi B., Datta G. L., *Metal Casting : Back to Future*. 52nd Indian Foundry Congress, Hyderabad, February 2004, February, 1-11.
- [53] Fischer-Bühner J., Basso A., Poliero M., *Metallurgy and processing of coloured gold intermetallics - Part II: Investment casting and related alloy design*. *Gold Bulletin*, 2010, 43(1), 11-20
- [54] Chua C. K., Leong K. F., *Rapid Prototyping: principles and applications in manufacturing*, John. Wiley & Sons, 1st Edition, Chapter 6, 2000.
- [55] Karapatis N. P., Griethuysen J. P. S., Van and Glardon R., *Direct rapid tooling: a review of current research*, *Prototyping Journal*, Vol. 4, 1998, 77-89.
- [56] Dimitrov D., Schreve W., Beer N., *Advances in three dimensional printing - state of the art and future perspectives*, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 12, 2006, 136-147.
- [57] Terry W., *Future potential of rapid prototyping and manufacturing around the world*, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 1, 1995, 4-10.
- [58] Jurrens Kevin K., *Standards for the rapid prototyping industry*, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 5, 1999, 169-178.
- [59] Dickens P. M., Stangroom R., Greul M., Holmer B., Hon K. K. B., Hovtun R., Neumann R., Noeken S., Wimpenny D., *Conversion of RP models to investment castings*, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 1, 1995, 4-11.
- [60] Jacobs P. F., *Rapid prototyping & manufacturing, fundamentals of stereolithography*. SME, New York, 1992.
- [61] Kruth J. P., Mercelis P., Van Vaerenbergh J., *Binding mechanisms in selective lasersintering and selective laser melting*. *Rapid Prototyp J*, 2005, 11(1):26-36
- [62] Stevens M.J., Covas J. A., *Extruder principles and operation*, 2nd edn. Springer, Dordrecht, 494, 1995.
- [63] Le H. P., *Progress and trends in ink-jet printing technology*. *J Imaging Sci Technol*, 1998, 42(1):49-62
- [64] Sachs E. M., Cima M. J., Williams P., Brancaccio D., Cornie J., *Three-dimensional printing: rapid tooling and prototypes directly from a CAD model*. *J Eng Ind* 114:481-488, 1992.





IRANIAN FOUNDRYMEN'S  
SOCIETY

## Founding Research Journal

*Research Paper:*

### A Review on the Investment Casting Process in the Arts and Jewelry Industries

Nazanin Homayounjam<sup>1</sup>, Fatemeh Asghari<sup>1</sup>, Ahmad Saadati<sup>2</sup>, Mehdi Malekan<sup>3\*</sup>

1. Bachelors Student, Department of Materials and Metallurgy Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

2. M.Sc. Student, Department of Materials and Metallurgy Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

3. Associate Professor, Department of Materials and Metallurgy Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

\* Corresponding Author: E-mail: mmalekan@ut.ac.ir

#### Paper history:

Received: 08 February 2022

Accepted: 25 March 2022

#### Keywords:

Investment Casting,  
Jewelry,  
Rapid Prototyping,  
Casting Defects,  
Simulation.

#### Abstract

The investment casting process is a reliable way to produce complex and delicate shapes, with good surface quality and high dimensional accuracy. The main advantage of investment casting is the ability to produce a wide variety of products from different industries, and non-machinable components can be cast in the same predetermined way, so that the final component generally does not need to be welded and assembled, thus saving time and money. This method was used in ancient times to produce weapons, jewelry and artistic sculptures. Over the centuries, this technology has advanced and is used in the casting of various works of art, industrial parts and the production of turbine blades. The present article is an overview of the application of investment casting process in the production of artistic pieces. In this article, investment casting history, model wax properties, adhesives, additives and fillers, ceramic shell fabrication process for non-ferrous alloys, comparison of microwave and autoclave dewaxing methods, smelting and final operations, 3D printing method for Model construction and finally the simulations used to predict defects and model optimization will be reviewed separately.

#### Please cite this article using:

Nazanin Homayounjam, Fatemeh Asghari, Ahmad Saadati, Mehdi Malekan, A Review on the Investment Casting Process in the Arts and Jewelry Industries, in Persian, Founding Research Journal, 2021, 5(2) 139-159.

DOI: 10.22034/frj.2022.328830.1151

Journal homepage: [www.foundingjournal.ir](http://www.foundingjournal.ir)