

# طراحی و ساخت قالب پره متحرک توربین گازی با استفاده از فن آوری نمونه سازی سریع (RP) و ابزار سازی سریع (RT)

جمال زمانی<sup>۱</sup>، مهدی فروتن<sup>۲</sup>

## چکیده

معرفی فن آوری نمونه سازی سریع (RP) و ابزار سازی سریع (RT) در دو دهه گذشته باعث تغییرات شگرفی در دنیای ساخت و تولید شده است، یکی از روش های ساخت که این فن آوری می تواند در آن نقش ویژه ای ایفا نماید، فرایند ریخته گری دقیق می باشد.

در این تحقیق، بمنظور تولید پره توربین های گازی به روش ریخته گری دقیق از فناوری نمونه سازی سریع و ابزار سازی سریع استفاده گردیده است ابتدا مدل سه بعدی پره به روش مهندس معکوس ایجاد و سپس به کمک یک روش از فن آوری نمونه سازی، تحت عنوان استریولیتوگرافی (Stereolithography) و دو روش از فن آوری ابزار سازی سریع به نامهای ابزار سازی اپوکسی (Epoxy Molding) و ابزار سازی سیلیکونی (RTV)، پره های تولید گردید و در نهایت پره های تولید شده، از منظر صافی سطح، زمان تولید، و دقت با یکدیگر مقایسه شده اند.

## کلمات کلیدی

نمونه سازی سریع - ابزار سازی سریع - پره توربین

## *Examination of RP and RT Technologies in Production of Turbine Blades IC Wax Patterns*

J. Zamani.; M. Forotan

### ABSTRACT

The introduction of Rapid Prototyping and Rapid Tooling (RP&RT) Technologies in past two decades has caused great changes in manufacturing and production procedures. Investment casting as a process for production of complex metal parts from various alloys is one of the areas that application of RP and RT should be concerned. Gas turbine blade as an investment cast part with geometrical and dimensional complexity and close manufacturing tolerances has been investigated in this research,. As a result 3D-CAD model that has been evolved from reverse engineering of a blade, was used in Stereolithography for manufacturing of the master models. Then, Epoxy and RTV rapid mould tooling used for wax production mould making. At last the results of application of these methods and application of metal die for wax model production has been assessed and compared based on parameters such as time, cost, surface roughness, and dimensional accuracy.

### KEYWORDS

Rapid Prototyping, Stereo lithography, Rapid Tooling, Epoxy Molding, Vacuum Temperature Vulcanizing, Gas Turbine Blade.

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی E-mail : zamani@kntu.ac.ir

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد، گروه ساخت و تولید



## ۱-۱- پیش‌زمینه

ریخته‌گری دقیق یک روش اقتصادی برای تولید انبوه قطعات فلزی با شکلهای پیچیده و از آلیاژهای گوناگون می‌باشد. از سوی دیگر زمان و هزینه مورد نیاز برای ساخت قالب‌های فلزی جهت تولید مدل مومی مورد استفاده در فرایند ریخته‌گری دقیق، می‌تواند باعث افزایش چشمگیر هزینه‌ها شده و مزایای استفاده از این روش را بویژه در مواردی که تولید تعداد کمی قطعه مورد نظر باشد، کاهش دهد. فن‌آوری نمونه‌سازی سریع (RP) و ابزارسازی سریع (RT) که فقط دو دهه از معرفی آن می‌گذرد، بسیار نوپا می‌باشد. این فن‌آوری می‌تواند به طور موثری زمان و هزینه طراحی و تولید محصولات را کاهش دهد. یک کاربرد مورد انتظار از این روشها، تولید مستقیم یا غیرمستقیم مدل‌های مومی مورد نیاز صنایع ریخته‌گری دقیق می‌باشد، که در سالهای اخیر، بسیار مورد بحث و بررسی قرار گرفته است [۱] و [۲].

از سوی دیگر، پره‌های ثابت و متحرک مورد استفاده در توربین‌های گازی قطعاتی راهبردی و پراستفاده در صنایع مهم همچون نیرو، نفت و گاز، پتروشیمی و صنایع دفاعی می‌باشند که معمولاً با بهره‌گیری از روش مهندسی معکوس در کشور ساخته می‌شوند.

با توجه به شرایط کاری بسیار سخت این پرها که ناشی از فعالیتشان در محیطی با دمای بالا حاوی ترکیبات خورنده و ساینده و همچنین اعمال تنشهای گوناگون مکانیکی و حرارتی بر آنها می‌باشد، باید از موادی ساخته شوند که قابلیت‌های مکانیکی و متالورژیکی لازم برای کار در چنین شرایطی را داشته باشند. این مواد اغلب سوپرآلیاژهایی هستند که دارای قابلیت ماشینکاری ضعیفی بوده و انجام عملیات سنتی ماشینکاری همچون فرزکاری در مورد آنها بسیار سخت و غیراقتصادی می‌باشد. همچنین با توجه به تکرانس‌های بسته اعمال شده بر پره‌های توربین نیاز به فرایند تولیدی است که با استفاده از آن بتوان شکل نهایی قسمت‌های حساس قطعه را تا وضعیتی بسیار نزدیک به شکل نهایی تولید کرد به گونه‌ای که حداقل عملیات برای نهایی‌سازی آن لازم باشد. امروزه اغلب پره‌های متحرک و ثابت توربین‌های گازی از طریق فرایند ریخته‌گری دقیق تولید می‌گردند [۳]، [۴]. برای تولید مدل مومی مورد نیاز در فرایند ریخته‌گری دقیق برای قطعات خاص، از قالب‌های فلزی که به روش ماشینکاری ساخته می‌شوند، استفاده شده است. زمان و هزینه‌های مورد نیاز برای ساخت چنین

قالب‌هایی می‌تواند باعث افزایش زمان و هزینه کل فرایند شده و مزایای آن را تا میزان زیادی کاهش دهد. هوراکک (Horaček) و لوبس (Lubos) [۵]، تاثیر پارامترهای تزریق بر پایداری ابعادی الگوی مومی شکل تولید شده توسط فرایند قالب‌گیری تزریقی را بررسی نموده‌اند. آنها متوجه شدند که یک رابطه داخلی میان پارامترهای مختلف تزریق و وابستگی آنها به سایر پارامترها وجود دارد.

هوک (Hock) و یالاگادا (Yalagadda) [۶]، دقت الگوهای مومی H شکل تولید شده توسط قالب سخت (Polyurethane mould) و قالب نرم (RTV mould) را تعیین کرده‌اند و همچنین پارامترهای تزریق برای استفاده در فشار پائین تزریق قالب را بهینه نموده‌اند.

## ۲-۱- فرایندهای نمونه‌سازی سریع و ابزارسازی سریع مورد استفاده

کاربرد فناوری نمونه‌سازی سریع (RP) برای تولید مدل‌های مورد استفاده در ریخته‌گری دقیق را می‌توان از دو طریق مورد بررسی قرار داد:

الف- روش مستقیم

ب- روش غیرمستقیم

استفاده مستقیم از نمونه‌سازی سریع می‌تواند منجر به ایجاد مدل‌هایی از جنس پلاستیک، موم یا کاغذ شود که از آنها می‌توان به طور مستقیم در فرایند قالب‌گیری سرامیکی ریخته‌گری دقیق بهره جست. اساس چنین فرایندی بر نوب‌شدن یا سوختن مواد سازنده این مدل‌ها و خروج آنها از قالب پوسته‌ای سرامیکی بدون صدمه زدن به آن استوار است [۷]. از سوی دیگر با استفاده از فن‌آوری نمونه‌سازی سریع می‌توان به طور غیرمستقیم نیز به تولید مدل‌های مومی پرداخت.

در این طرح، ساخت مستقیم قالب برای تولید مدل مومی با استفاده از دستگاه نمونه‌ساز سریع و داده‌های هندسی قطعه ساخته خواهد شد. همچنین استفاده از فن‌آوری نمونه‌سازی سریع استریولیتوگرافی (Stereolithography) برای ساخت مدل اصلی (Master Model) پره متحرک ردیف اول توربین گازی Ruston Ta 1750 با توان ۱/۳ مگاوات مورد استفاده در صنعت گاز در دستور کار قرار گرفت و سپس استفاده از این مدل اصلی برای ساخت قالب تولید مدل مومی پره یاد شده به دو روش ابزارسازی سریع به نامهای روش ابزارسازی اپوکسی (Epoxy Molding) و روش ابزارسازی RTV استفاده گردید. گفتنی است که روش یاد شده با مشارکت دانشگاه و شرکت گاز برای اولین بار در کشور صورت می‌پذیرد.

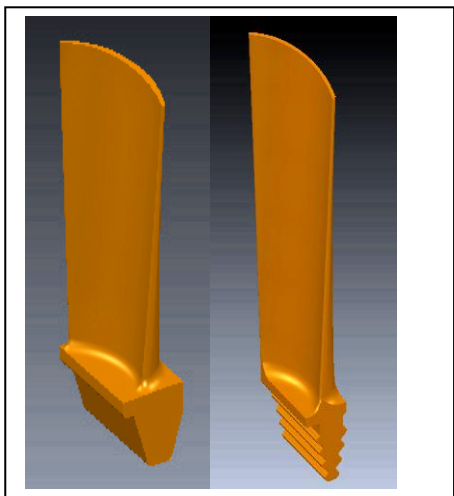
## ۲- روش اندازه گیری و مدل سازی

استناد منابع ارائه شده توسط شرکت گان ، انتخاب شده است (شکل ۳)، [۸] .

برای ساخت مدل فیزیکی قطعه بوسیله دستگاه نمونه سازی سریع ابتدا مدل سه بعدی با استفاده از نرم افزار (Power shape) که دربردارنده همه اطلاعات لازم از قطعه می باشد به فرمت مناسبی ذخیره می گردد، البته این مرحله بعد از اندازه گیری قطعه مورد نظر بوسیله دستگاه اندازه گیری (CMM) می باشد (شکل ۱ و ۲) .



شکل (۱): عملیات داده برداری پره نمونه بوسیله دستگاه CMM

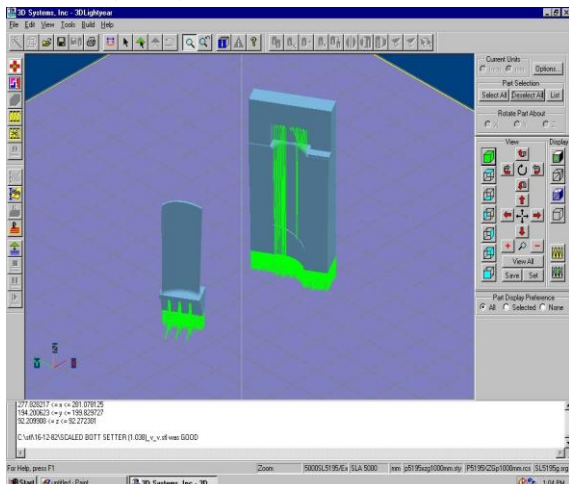


شکل (۳): مدل خالص پره نمونه (چپ) مدل پره نمونه پس از باربرداری اضافه مورد نیاز (راست)

## ۳- عملیات نمونه سازی سریع (RP) و ابزار سازی سریع (RT)

### ۳-۱- نمونه سازی سریع و کنترل ابعادی

مدلهای کامپیوتری تهیه شده از قطعه به فرمت STL ذخیره شده اند، STL یک فرمت بین سازمانی صنایع نمونه سازی سریع است که در آن، سطوح مدل قطعه بوسیله مثلثهای کوچکی تقریب زده می شوند. از آنجا که مدل از رزین مایع ساخته می شود برای نگهداری و جلوگیری از حرکت آن در محوطه پاتیل ساخت، نیاز به ایجاد نگهدارنده ها است (شکل ۴).



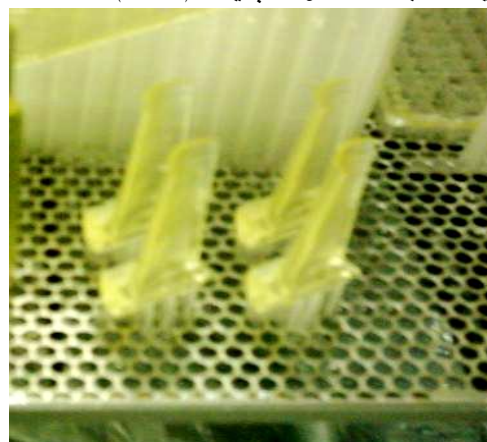
شکل (۴): موقعیت دهی مجازی قطعه در محفظه ساخت دستگاه و ایجاد نگهدارنده ها تکیه گاهی برای آن ساخت مدلها در دستگاه نمونه ساز سریع SLA5000 و از



شکل (۲): مختصات تعیین شده برای مدل سازی

مدل ایجاد شده در این مرحله ، مدل خالص (Pure Model) نام دارد. سپس ملاحظات و پارامترهای ساخت بر مدل خالص وارد می شود، به گونه ای که ابتدا اضافه اندازه ماشین کاری در نواحی مورد نیاز منظور و سپس بزرگنمایی های مورد نیاز به طور جداگانه و به اندازه های  $3/5$  و  $3/8$  درصد اندازه اولیه بر مدل به ترتیب برای استفاده از آن در روش های قالب گیری اپوکسی و قالب گیری سیلیکونی (RTV) اعمال می گردد. علت اعمال این بزرگنمایی ها، جبران انقباض موم تزریقی در قالب، انقباض آلیاژ ریختگی و همچنین انقباض احتمالی مواد سازنده قالب در حین انجماد می باشد. مقادیر بزرگنمایی یاد شده به

رزین فتوپلیمر Cibatool 5195 صورت پذیرفت. ضخامت لایه‌های سازنده قطعه ۱۰۰ میکرون در نظر گرفته شدند. پس از ساخت، عملیات تکمیلی شستشوی رزین اضافی، از بین بردن نگهدارنده‌ها، پخت نهایی در کوره UV و بهبود کیفیت سطحی بوسیله سندبلاست صورت پذیرفت (شکل ۵).



شکل (۵): مدل پره ساخته شده بوسیله دستگاه SLA بر روی سکوی ساخت

در مرحله بعد و پیش از استفاده از مدل ساخته شده بوسیله نمونه‌سازی سریع در فرایند ابزارسازی سریع، بدلیل تاثیر مستقیم صحت ابعادی مدل ساخته شده بر دقت نهایی قالب، بازرسی ابعادی قطعه بوسیله دستگاه اندازه‌گیری مختصاتی مجهز به نرم‌افزار مخصوص مقایسه صورت پذیرفت. نتایج بدست آمده در بازه تoleransi  $\pm 0.05$  میلی‌متر بررسی و در نهایت متوسط مقدار انحراف از اندازه اصلی نزدیک  $+0.035$  میلی‌متر بدست آمد (شکل ۶).



شکل (۶): عملیات اندازه‌گیری قطعه ساخته شده بوسیله استریولیتوگرافی و مقایسه آن با مدل پره

### ۲-۳- ابزارسازی سریع

#### الف- قالبگیری اپوکسی

در ابتدا مدل بدست آمده از نمونه‌سازی سریع در امتداد

خطوط جداسازی محصول و در درون یک کلاف آلومینیمی، جانمایی و تنظیم گردید. طراحی و ساخت کلاف، به منظور تسهیل در عملیات قالبگیری و اطمینان از صحت کارکرد قالب صورت پذیرفت. مواد اپوکسی مورد استفاده از نوع EP310 و ساخت شرکت MCP HEK آلمان می‌باشند. پس از آماده‌سازی مواد اپوکسی با انجام عملیاتی چون اختلاط و گاززدایی و محاسبه مقدار مواد مورد نیاز، این مواد بر روی قطعه جانمایی شده در طول خط جداسازی محصول در درون کلاف فلزی ریخته شده و آنرا پر کرد. پس از انجام عملیات تکمیلی گاززدایی، مجموعه در محیط آزاد به مدت زمان کافی جهت تشکیل نیمه بالایی قالب قرار داده شد. پس از این مرحله نیمه پایینی قالب هم بر روی نیمه اول و با روشی مشابه آن چه ذکر گردید آماده شد و در مرحله آخر عملیات پخت نهایی و پولیشینگ برای حذف مواد اضافی به اجرا درآمد (شکل ۷).

#### ب- قالبگیری سیلیکونی (RTV)

در این روش مدل اصلی بدست آمده از نمونه‌سازی سریع در امتداد خطوط جداسازی محصول تنظیم شده و کل مجموعه در درون یک چارچوب ساخته شده از تکه‌های مناسب چوبی محصور شد. میله راهگامی نیز به مجموعه اضافه گردید و سپس مواد سیلیکونی VTV750 ساخت شرکت MCP HEK آلمان پس از آماده‌سازی که مراحل همچون توزین و گاززدایی را شامل می‌گردید به درون محفظه چوبی ریخته شد. نیمه بالایی قالب بدین ترتیب ساخته شده و گاززدایی گردید. سپس نیمه پایینی قالب به طریقی شبیه آنچه در آماده‌سازی نیمه اول صورت پذیرفت بر روی آن ساخته شد (شکل ۸).

### ۴- تولید مدل مومی پره

#### ۴-۱- تولید نمونه مومی بوسیله قالب اپوکسی

در این مرحله، قالب اپوکسی بر روی یک دستگاه تزریق موم با نازل عمودی بسته شده و تعیین شرایط مناسب تزریق با انجام آزمایش صورت پذیرفت. سپس تعدادی نمونه با استفاده از موم مذاب با دمای نزدیک ۶۵ درجه سانتیگراد و در فشار تزریق ۴۰ (bar) تولید شدند (شکل ۹).

#### ۴-۲- تولید نمونه بوسیله قالب RTV

در این عملیات ابتدا قالب به مدت ۲ ساعت در کوره با دمای ۷۰ درجه سانتیگراد پیشگرم شده و بعد از اضافه شدن مواد مذاب مومی، کل قالب در شرایط خلاء قرار داده شد تا حباب‌های هوا تخلیه گردد. شکل ۱۰، حالت نهایی قالب و قطعه آماده شده را نشان می‌دهد.





۳

۲

۱



۶

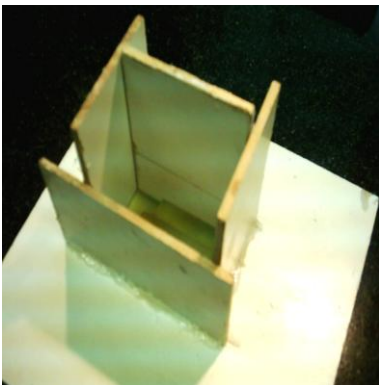


۵

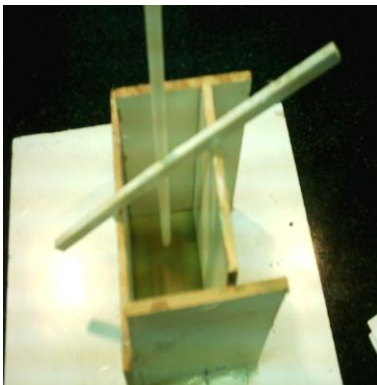


۴

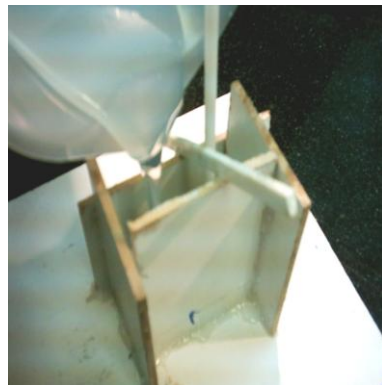
شکل (۷): مراحل گوناگون ساخت قالب اپوکسی (از راست به چپ و از بالا به پایین)



۳



۲



۱



۶



۵



۴

شکل (۸): مراحل گوناگون ساخت قالب RTV (از راست به چپ و از بالا به پایین)

گونه قالب به خوبی تامین شده است. چنین موضوعی در مورد قالبهای فلزی بدلیل نصب و سرهم نمودن اجزاء بوسیله پیچ و پین با صرف زمان و هزینه بیشتری امکان پذیر است. ویژگی های کیفی قالب تولیدشده به روش ابزارسازی اپوکسی در جدول ۱ ارائه شده است.

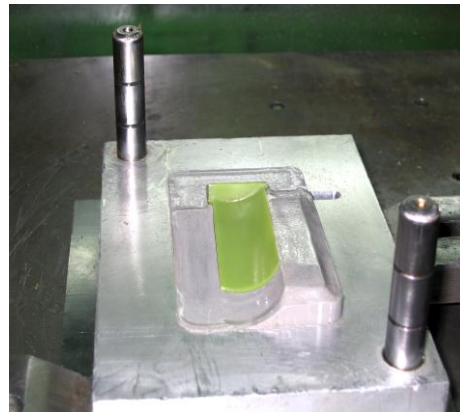
در هنگام تولید مدل مومی نیز با وجود تفاوت در ضریب انتقال حرارت مواد اپوکسی با مواد رایج در ساخت قالبهای فلزی همچون فولادهای ابزار و آلیاژهای آلومینیم، انتقال حرارت مواد تزریقی به اطراف بسیار خوب صورت گرفته و سیکل زمانی تزریق تفاوت بارزی با آنچه در مورد قالبهای فلزی بکار می رود نداشت. مواد تزریق شده به طور کامل تمامی گوشه ها و زوایای قالب را پر کرده و مدلی با سطح پرداخت خوب با خطوط جدا شونده یکنواخت در مناطق حساس بدست آمدند. صافی سطح میانگین، در روش قالب اپوکسی پیش از انجام براقیت بر روی، با صافی سطح مدل مومی تولیدی از قالب در جدول (۲) ارائه شده است. عملیات اشاره شده بوسیله دستگاه زبری سنجی Taylor Hobson صورت پذیرفت. اعداد ارائه شده در این جدول بیانگر قابلیت براقیت پذیری بسیار خوب قالب اپوکسی هستند.

عملیات کنترل ابعادی مدل مومی تولیدشده بوسیله یک دستگاه ATOS 3D Scan III و به صورت غیرتماسی انجام شد. نتایج بدست آمده حاکی از اختلاف میانگین  $\pm 0.04$  میلیمتری در مقایسه با مدل کامپیوتری قطعه بود. ضمن اینکه اکثر نقاط اندازه گیری شده در بازه  $\pm 0.15$  میلیمتری تolerانس تعیین شده قرار داشتند. ویژگیهای مدل مومی تولیدشده بوسیله قالب اپوکسی در جدول (۳) ارائه شده است.

زمان و هزینه تولید مدل مومی در صورت بکارگیری این روش در مقایسه با روش ساخت قالب فلزی در نمودار (۱) آورده شده است. میزان صرفه جویی در زمان و هزینه با بکارگیری روش قالب سازی اپوکسی به ترتیب حدود ۴ و ۵ برابر می باشد. این مقایسه با لحاظ نمودن پارامترهای گوناگون مرتبط در محاسبه زمان و هزینه انجام عملیات طراحی، صورت پذیرفت. ساخت قالب، مواردی همچون طراحی قالب، تهیه مواد اولیه، انجام خدمات ساخت قالب اعم از تجهیزاتی و نیروی انسانی و عملیات جانبی و تکمیلی را در بر می گیرد. هزینه و زمان ساخت قالب فلزی به روش شبیه سازی فرایند ساخت و پرسش از مراکز خدمات رسانی در این زمینه صورت پذیرفت [۹].



شکل (۹): تولید مدل مومی بوسیله قالب اپوکسی



شکل (۱۰): تولید مدل مومی بوسیله قالب RTV

## ۵- نتایج و بحث

### ۵-۱- روش ابزارسازی اپوکسی

قالب تولید شده به روش ابزارسازی اپوکسی تمامی جزئیات مدل اصلی مورد استفاده در ساخت آن را به خوبی نمایان کرد. نواحی باریک یا دارای گوشه های تیز قطعه به خوبی در قالب منعکس شدند. این موضوع مزیت مهمی در مقایسه با روش ساخت قالب فلزی می باشد. زیرا ماشینکاری چنین نواحی در ساخت قالبهای فلزی مشکل بوده و نیازمند بکارگیری ترفندهای خاص است. به عنوان مثال بدلیل وجود شعاع ابزار، در ماشینکاری گوشه ها نواحی، فیلت دار ایجاد می شود. در این حالت برای ایجاد نواحی تیز بایستی از عملیات تکمیلی مانند ماشینکاری EDM بهره گرفت و یا با چندتکه کردن قالب به ماشینکاری آن پرداخت. چنین مساله ای می تواند منجر به اعمال زمان و هزینه اضافی و در بسیاری موارد کاهش دقت ساخت شود. در ضمن ماشینکاری نواحی با شعاع فیلت کوچک نیاز به تهیه ابزاری با شعاع حداکثر همان اندازه دارد که چنین موضوعی نیز افزایش زمان و هزینه ها را به جهت نیاز به تهیه ابزار مناسب در پی دارد. همراستایی (Alignment) اجزای قالب نیز به دلیل ماهیت ریختنی مواد اپوکسی در این

جدول (۱): ویژه گی های کیفی قالب تولید شده به روش ابزار سازی اپوکسی

قابلیت ماشینکاری نواحی مورد نیاز	قابلیت پرداخت سطوح قالب	کیفیت اولیه سطوح قالب	قابلیت انعکاس نواحی گوناگون مدل اصلی	ویژگی مورد بحث
بسیار خوب	بسیار خوب	متوسط	خوب	

جدول ۲ - مقادیر اندازه گیری شده صافی سطح

صافی سطح مدل مومی تزریق شده	صافی سطح قالب اپوکسی پیش از پرداخت	ویژگی مورد بحث
۱/۸۸	۵/۳۱	مقدار برحسب $R_a$

جدول ۳ - ویژگیهای مدل مومی تولید شده به روش ابزار سازی اپوکسی

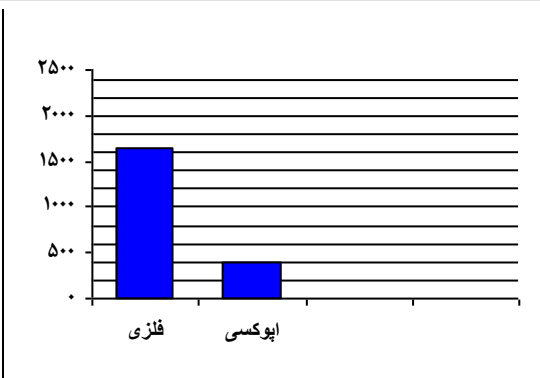
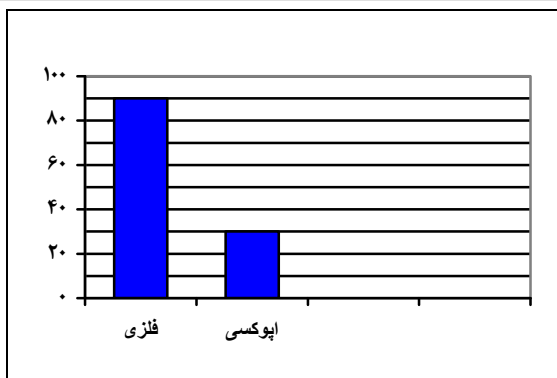
کیفیت درز جداسازی و آببندی	تشکیل کلیه اجزاء قطعه	سطح پرداخت مدل مومی تولید شده	دقت ابعادی مدل مومی تولید شده	ویژگی مورد بحث
خوب	کامل	بسیار خوب	خوب	

۲-۵- روش ابزار سازی RTV

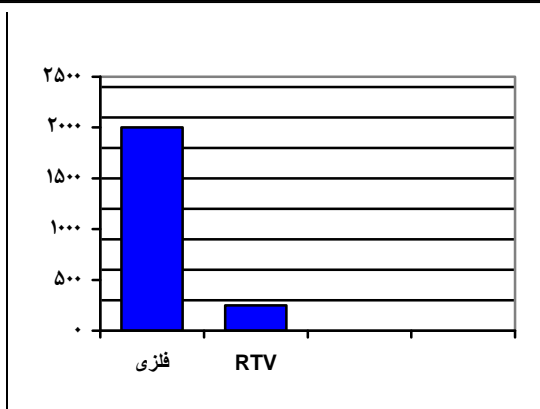
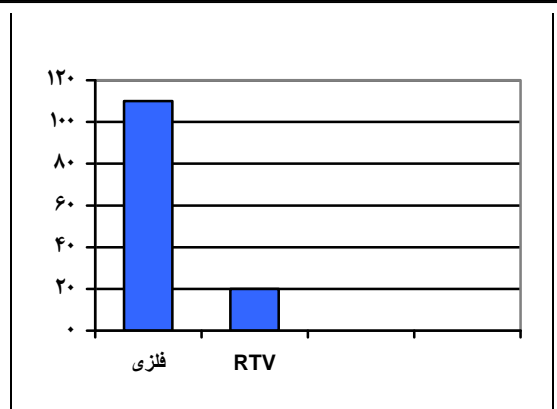
قالب تولید شده به روش ابزار سازی RTV نیز تمامی جزئیات مدل اصلی مورد استفاده در ساخت آن را به خوبی منعکس کرد. همراستایی (Alignment) دو نیمه قالب نیز بدلیل ماهیت ریختنی مواد و شکل خاص سطوح جداسازی دو نیمه قالب که به صورت کنگره ای و با یک ابزار دستی بریده می شوند، به خوبی تأمین شد. این دو ویژگی به دلایلی که در بخش پیش نیز ذکر شد مزایای مهمی را برای این روش در مقایسه با روش ساخت قالبهای فلزی، بدنبال دارند. وجود اثر پله ای (Stair Stepping) در سطوح حفره های قالب پس از ساخته شدن آن، نکته منفی مشاهده شده در این بخش است. این اثر ناشی از وجود چنین سطوحی بر روی مدل اصلی استفاده شده در ساخت قالب است.

اما در هنگام تولید مدل مومی، زمان زیاد مورد نیاز برای انتقال حرارت مواد قالب گیری شده به اطراف به دلیل ویژگیهای انتقال حرارتی مواد سازنده قالب را می توان نکته منفی دیگری برای این نوع قالب برشمرد. مواد ریخته شده به درون قالب نیز تا میزان زیادی نواحی قالب را پر نموده و تنها قسمت های بسیار کوچکی از نواحی باریک قطعه پرنگشت. زمان و هزینه تولید مدل مومی در صورت بکارگیری این روش در مقایسه با روش ساخت قالب فلزی در نمودار (۲) آورده شده است. میزان صرفه جویی در زمان و هزینه با بکارگیری روش قالب سازی RTV به ترتیب ۸۲ و ۸۵ درصد می باشد پارامترهای این مقایسه نیز همانند مواردی هستند که در قسمت قبل ذکر گردید





نمودار (۱): چپ (زمان - بر حسب ساعت)، راست (هزینه - بر حسب هزار تومان) مورد نیاز برای طراحی و ساخت قالب و تولید نمونه مومی پره به روش اپوکسی در مقایسه با روش ماشینکاری



نمودار (۲): چپ (زمان - بر حسب ساعت)، راست (هزینه - بر حسب هزار تومان) مورد نیاز برای طراحی و ساخت قالب و تولید نمونه مومی پره به روش RTV در مقایسه با روش ماشینکاری

دقیق پره به صورت تولیدی و در مقیاس بالا استفاده از قالبهای اپوکسی مناسب می‌باشد. زیرا هر دو روش تحت شرایط یاد شده می‌توانند جایگزین روش پرهزینه، وقت‌گیر و پیچیده، ماشینکاری و سرهم نمودن قالب شوند. البته در صورتی که مقیاس تولید مورد نظر بسیار بالا باشد استفاده از قالب فلزی هم بخاطر جبران هزینه‌ها دلیل تعداد تولید بالا مقرون به صرفه خواهد بود. بررسی هر دو قالب از نقطه نظر خواص مکانیکی در دست تحقیق بوده که امید است نتایج در آینده منتشر گردد.

## ۷- تشکر و قدردانی

ابتدا از شرکت محترم گاز به لحاظ پشتیبانی های انجام گرفته و خصوصاً آقایان، دکتر پاک‌سرشت، دکتر بهمنی، مهندس بنیاد، مهندس رضائی و پرسنل محترم ایستگاه فشار شرکت گاز در امیدیه و میانکوه در احوال تشکر و قدردانی بعمل می‌آورد. از شرکت محترم سابکو و آقایان مهندس ثریا و مهندس غلامی سپاسگزاری می‌نماید. در ضمن از ویراستار محترم مجله جناب آقای شکوری تشکر می‌گردد.

## ۶- نتیجه‌گیری

یکی از اهداف این تحقیق، امکان سنجی کاربرد فناوری های نمونه‌سازی سریع و ابزارسازی سریع در انجام بخشهایی از فرایند مهندسی معکوس، قطعه‌ای همچون پره متحرک توربین گازی با ویژگیها و خصوصیات منحصر بفرد می‌باشد. از دیگر اهداف تحقیق، معرفی فناوری RP و RT به مجامع علمی و صنعتی کشور می‌باشد.

نتایج بدست آمده از کاربرد این فناوری‌ها که در نهایت منجر به تولید مدل مومی پره بوسیله ابزارهای اپوکسی و RTV شد، نشان داد که این امر نه تنها امکان‌پذیر است بلکه استفاده از این روشها در مقایسه با روشهای معمول، مزایای مناسبی نیز در بر دارد.

با توجه به موارد یاد شده و در نظر گرفتن اهداف تولید محصول می‌توان نتیجه گرفت که برای تولید تعداد انگشت شماری قطعه یا ساخت تعداد اندکی نمونه جهت تدوین فناوری و مراحل بعدی ساخت همچون تدوین فناوری ریخته‌گری، قالبهای RTV کاربرد مناسبی دارند. اما جهت انجام ریخته‌گری



- [۵] M. Horaček, S. Lubos, "Parameter analysis of investment casting, using RP & RT", Proceedings of the Ninth World Conference on Investment Casting, San Francisco, CA, USA, 1996, pp. 1:1-1:20.
- [۶] P.K.D.V. Yarlagadda, T.S. Hock, Statistical "Analysis on accuracy of wax patterns used in investment casting process", J. Mater. Process. Technol. 138, 75-81, 2003
- [۷] Lee, C. W. Chua, C. K. Cheah; "Rapid Investment Casting, Direct and Indirect Approaches", The Inter. J. of Advanced Manufacturing Technology, 23, 242-256, 2004
- [۸] مدارک ارائه شده توسط شرکت گاز
- [۹] مدارک ارسالی از گروه ساتف سازمان هوافضا
- [۱] A. Rosochowski, A. Matuszak; "Rapid tooling: the state of the art", Title in Italic (and the title components, if any), J. Mater. Process. Technol, No: 106, 191-198, 2000
- [۲] Ma, I. Gibson, G. Balaji, Q. J. Hu; "Development of Epoxy Matrix Composites for Rapid Tooling Applications", J. of Mater. Process Technol, No:75-82, 192-193, 2007
- [۳] D.T Pham and S.S Dimov; "The technologies and application of rapid prototyping and rapid tooling – 1<sup>st</sup> ed", Springer-Verlag, 2001, ISBN: 1-85233-360-X
- [۴] J. A. Mc Donald, C.J. Ryall; "Rapid Prototyping Case Book", Professional Engineering Publishing, 2002, ISBN: 1-86058-076-9

