

آنالیز دقت ابعادی الگوهای مومی تولید شده پره‌های توربین گازی به

روش ابزارسازی سریع

جمال زمانی^۱، محمدهادی همتی^۲ و رضا مرسلویی^۳

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۹۲/۳/۰۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۶/۲۰)

چکیده

هدف اولیه این تحقیق، تعیین دقت ابعادی الگوهای مومی یک نوع پره توربین گازی است که شامل نواحی مشترک در همه پره‌های توربین می‌باشد که توسط روش‌های ابزارسازی نرم، قالب‌های سیلیکونی و قالب‌های اپوکسی تولید شده‌اند. از این تحقیق نتیجه می‌شود که قالب اپوکسی الگوی دقیق‌تری را نسبت به قالب سیلیکونی تولید می‌کند، همچنین محدوده تغییرات ابعادی در جهات مختلف الگوهای مومی به دست آمد. در الگوهای خروجی از قالب سیلیکونی درصد انقباض به صورت میانگین در امتداد طولی و عرضی ریشه به ترتیب ۰/۶ درصد و ۳/۵ درصد و در جهت عمود بر پلت فرم در راستای ایرفویل تقریباً ۰/۶ درصد می‌باشد، در حالی که در الگوهای خروجی از قالب اپوکسی درصد انقباض به صورت میانگین در امتداد طولی و عرضی ریشه به ترتیب ۱/۱ درصد و ۰/۶ درصد و در جهت عمود بر پلت فرم در راستای ایرفویل تقریباً ۰/۶ درصد می‌باشد. این مطالعات به کسانی که از هر دو روش ابزارسازی سریع و ریخته‌گری دقیق در تولید پره‌های توربین گازی استفاده می‌کنند، کمک می‌کند تا تغییرات مورد نیاز در نقشه‌کشی CAD اولیه را برای تولید قالب نهایی با حداقل بی‌دقتی در ابعاد تخمین بزنند.

واژه‌های کلیدی: پره توربین گازی، ابزارسازی سریع، ریخته‌گری دقیق، کنترل انقباض

Statistical Analysis on Dimensional Accuracy of Wax Patterns of Gas Turbine Blades Produced by Rapid Tooling

J. Zamani, M.H. Hemati and R. Morsalui

Mechanical Engineering Department

K.N.Tossi University of Technology

(Received:29/May/2013; Accepted:11/September/2013)

ABSTRACT

In this paper, dynamic analysis of doubly curved composite shells under low velocity impact is studied analytically. The governing equations based on the first-order deformation theory (FSDT) are derived for simply supported boundary conditions. The contact force history is predicted using two models of complete and improved spring-mass. Considering the displacement components as the doubly Fourier series, equations of motion shell and impactor are solved analytically. By writing code in Matlab software, using Galerkin method, the dynamic response of shell is obtained. In this investigation, the effect of geometrical parameters, such as curvature changes, aspect ratio (curvature length ratio), fiber orientation, mass and velocity of impactor, with constant impact energy, on the impact response of shell is determined by two models.

Keywords: Gas Turbine Blades, Rapid Tooling, Investment Casting, Shrinkage

۱- استاد (نویسنده پاسخگو): zamani@kntu.ac.ir

۲- دانشیار: hemati@mut.ac.ir

۳- کارشناسی ارشد: morsalooe@gmail.com

۱- مقدمه

شامل انتخاب‌های متنوع ابزارسازی شد که به ابزارسازی سریع^۱ موسوم است. بنابراین فرایند ابزارسازی سریع با توانا کردن فرایند نمونه‌سازی سریع در تولید انبوه در محدوده وسیعی از مواد، مکمل این روش شد. ابزارسازی سریع یک روش ساخت ابزار است که توسعه ذاتی نمونه‌سازی سریع می‌باشد. [۱-۳]

روش‌های مختلف نمونه‌سازی سریع و ابزارسازی سریع وجود دارد که قادر به تولید هر دو نوع مدلی و قطعات کاربردی می‌باشند. استریولیتوگرافی (SLA) یکی از روش‌های فرایند نمونه‌سازی سریع است که بر اساس فوتو پلیمریزاسیون رزین مونومر مایع کار می‌کند. سطح لایه رزین به‌صورت انتخابی طبق مسیری که در مدل لایه‌لایه شده تعریف شده است، توسط پرتو لیزر حرارت داده می‌شود. پس از ساخته شدن این لایه، سکوی متحرک به سمت پایین داخل رزین رفته و لایه نازک جدیدی از مونومر روی مدل را دربر می‌گیرد و این مرحله دوباره از اول تکرار می‌شود. [۱]

همچنین ابزارسازی نرم یکی از روش‌های فرایند ابزارسازی سریع است. ابزارسازی نرم با استفاده از قالب‌گیری از یک الگوی اصلی صورت می‌گیرد و به دو طریق قالب‌گیری سیلیکونی^۲ و قالب‌گیری اپوکسی تقسیم‌بندی می‌شود.

در این بررسی ترکیبی از روش استریولیتوگرافی و شیوه‌های ابزارسازی سریع برای تولید نمونه‌های مومی جهت استفاده در قالب‌گیری پوسته‌ای در ریخته‌گری دقیق به‌کار گرفته شده است. همچنین مقایسه‌ای بین قالب‌های سیلیکونی و قالب‌های اپوکسی صورت گرفته است.

۲- پیشینه تحقیق

ریخته‌گری دقیق به عنوان یک فرایند قطعه‌سازی با دقت، گروه‌بندی می‌شود. این روش به دلیل توانایی‌هایش در تولید یک قطعه ریخته‌گری پیچیده و دقیق خود را به خوبی به نمونه‌سازی و تولید سریع، واگذار می‌نماید. همان‌گونه که صنایع رشد می‌کنند، تقاضا برای نمونه‌های فلزی عملکردی افزایش می‌یابد، سایر روش‌های نمونه‌سازی و تولید سریع نظیر استریولیتوگرافی، می‌توانند تنها برای تعیین شکل و انطباق نمونه‌ها به‌کار روند و عملکرد نمونه‌ها تنها با استفاده از یک نمونه فلزی قابل دستیابی است که با ریخته‌گری دقیق قابل تولید است.

مواردی که دقت ابعادی را تحت تأثیر قرار می‌دهند عبارتند از: سیستم مومی (الگوی مومی، پرس موم، پارامترهای تزریق)،

پره‌های متحرک و ثابت توربین گازی از جمله قطعات حساس موتورهای هواپیما و نیروگاه‌ها می‌باشند. از آنجایی که شکل و ابعاد این قطعات تأثیر بسزایی روی راندمان موتورها دارد، محدوده تغییرات ابعادی (تلرانس) کوچکی برای آنها باید در نظر گرفته شود. همچنین قابلیت ماشین‌کاری مواد سوپر آلیاژ که برای ساخت پره‌های متحرک و ثابت به‌کار می‌روند بسیار پایین است، به همین دلیل این قطعات همواره توسط فرایند قالب پوسته‌ای ریخته‌گری دقیق، با شکل تقریباً نهایی تولید می‌گردند.

روش ریخته‌گری دقیق در چندین مرحله صورت می‌گیرد. برای شروع نیاز به یک قالب معمولاً فلزی با حفره داخلی است که براساس هندسه قطعات طراحی شده باشد. یک ماده مخصوص با پایه مومی به داخل قالب تزریق می‌شود تا الگو به‌دست آید، این الگوهای مومی به نوبت در معرض دوغاب سرامیکی و گچ سرامیکی زبر و درشت قرار می‌گیرند تا پس از خشک شدن، پوسته‌ای با ضخامت مناسب ایجاد کنند. در مرحله بعد در سیستم اتوکلاو بخار، موم موجود در قالب به‌طور کامل تخلیه شده و قالب در کوره پخته می‌شود. سپس مذاب سوپر آلیاژ درون قالب پوسته‌ای ریخته شده و فرایند ریخته‌گری از طریق روش مرسوم یا انجماد هدایتی کامل شده و قالب شکسته می‌شود. در آخر راهگاه‌ها و مسیر تغذیه از آلیاژ جامد شده بریده می‌شود تا قطعات با شکل تقریباً نهایی به‌دست آید.

فرایند ساخت قالب فلزی در روش سنتی معمولاً بین ۴ تا ۵ هفته طول می‌کشد و هزینه نسبتاً بالایی دارد. در این تحقیق به‌منظور کاهش زمان و هزینه تولید، از فناوری جدید نمونه‌سازی سریع استفاده شده است.

این روش مبین پتانسیلی است که میتواند به‌طور کامل انقلابی در جریان تولید ایجاد کند. به‌طور کلی این فناوری در برگیرنده گروهی از روش‌های ساخت است که در آن شکل فیزیکی یک قطعه با به هم پیوستن لایه به لایه مواد ایجاد می‌شود [۱].

فناوری نمونه‌سازی سریع نه تنها مدلهایی برای اهداف تجسمی تولید می‌کند بلکه توانایی تولید قطعات عملیاتی و کاربردی را نیز دارد. روش‌های رایج نمونه‌سازی سریع قادر به تولید در محدوده وسیع همه مواد در دسترس تجاری نیستند و همچنین برای تولید انبوه مناسب نمی‌باشند. این دلیل موجب هدایت به سمت مطابقت با روش‌های ترکیبی چند مرحله‌ای

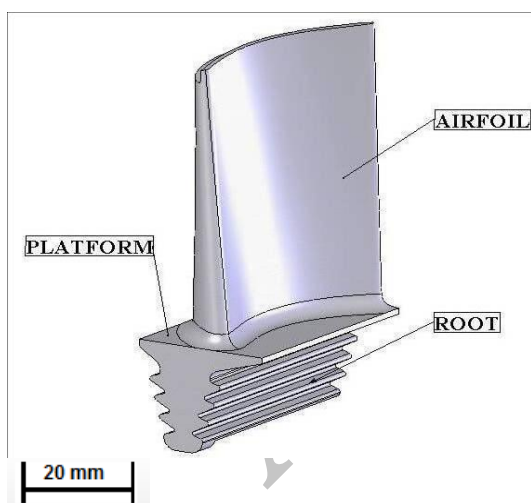
1- Rapid Tooling
2- Silicone Rubber Moulds

و دمای پلیمر مذاب، برای دو نوع پلیمر (یکی پلی اتیلن و دیگری پلی استیرن) مقایسه کردند [۹].

تحقیقات قبلی اساساً روی شکل‌های ساده با هندسه خاص صورت پذیرفته‌اند. نتایج به‌دست آمده می‌توانند برای اندازه‌های معین در برخی کاربردها مورد استفاده قرار گیرند ولی با توجه به تأثیر قابل توجه هندسه قطعه بر اندازه‌های نهایی، نتیجه‌گیری از اطلاعات مربوط به این شکل‌ها برای شکل‌هایی با هندسه متفاوت باید بسیار آگاهانه صورت گیرد به ویژه اگر برای قطعه‌ای با هندسه پیچیده و دقت بالا مثل پره‌های توربین باشد.

۳- روش کار

همان‌طور که قبلاً ذکر شد هدف اصلی این تحقیق، حداقل نمودن بی دقتی‌های ابعادی در تولید الگوی مومی پره توربین با استفاده از هر دو ابزار نرم، قالب سیلیکونی و قالب اپوکسی است همچنین تعیین دقت ابعادی الگوهای مومی پره توربین و مقایسه این دو ابزار است، به همین منظور پره ردیف اول توربین گازی EM85 برای شروع کار انتخاب شد. شکل ۱ یک پره توربین نوعی و قسمت‌های مختلف آن را نشان می‌دهد.



شکل (۱): یک نمونه پره توربین و معرفی نواحی مختلف.

به‌منظور ارزیابی تغییرات ابعادی در ساخت الگوهای مومی این پره با استفاده از روش ابزارسازی سریع برخی ابعاد که اندازه‌های متفاوت داشته و در نواحی مختلف‌اند (پارامترهای A تا K) در نظر گرفته شد. شکل ۲ این ابعاد را به همراه سیستم مختصات فرضی نشان می‌دهد.

ابتدا با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری مختصات (CMM)، نمونه اصلی پره توربین اندازه‌گیری شد و توسط نرم‌افزار سالید

سیستم قالب‌گیری (نوع، مواد، روش موم‌زدایی^۱، مواد پشتی قالب) و سیستم راهگاه^۲ ریخته‌گری (آلیاژ، دمای ذوب، جای‌گیری راهگاه‌ها و لوله‌های تغذیه^۳، موقعیت دهی ریخته‌گری روی راهگاه، روش پر کردن قالب). [۴ و ۵] بنابراین به‌منظور بهبود دقت نهایی ریخته‌گری، بهبود دقت هر مرحله لازم است. شروع منطقی برای آغاز بهبود دقت، سیستم مومی است، زیرا که عیوب متعددی نظیر تشکیل الگوی مومی، آماده‌سازی موم، خصوصیات تزریق، دما و پرکردن قالب، اندازه راهگاه، دمای موم و طراحی قالب بر روی الگوی مومی مؤثر هستند. [۵]

هوراکک و لوبس^۴ [۶]، تأثیر پارامترهای تزریق بر پایداری ابعادی الگوی مومی صلیبی شکل تولید شده توسط فرایند قالب‌گیری تزریقی را بررسی نموده‌اند. آنها متوجه شدند که رابطه‌ای داخلی میان پارامترهای مختلف تزریق و وابستگی آنها به سایر پارامترها وجود دارد.

هوک و یالاگادا^۵ [۷]، دقت الگوهای مومی H شکل تولید شده توسط قالب سخت و قالب نرم را تعیین کرده‌اند و همچنین پارامترهای تزریق برای استفاده در فشار پایین تزریق قالب را بهینه نموده‌اند.

های هوا^۶ و همکارانش یک فرایند نمونه‌سازی سریع برای ساخت شکل پیچیده مبتنی بر آلومینا با هسته سرامیک از ترکیب فرایند استریولیتوگرافی با ریخته‌گری ژله‌ای را مطالعه کردند. SL برای ساخت یک قالب رزین فداشونده جدایی ناپذیر استفاده شد، و ریخته‌گری ژله‌ای برای شکل دادن یک هسته سرامیک مرطوب با بدنه سبز از طریق پلیمریزاسیون دوغاب سرامیک آبی استفاده شده است. فرایند خشک شدن یخ برای رفتار با بدنه سبز مرطوب احاطه شده توسط قالب رزین اتخاذ شد، انقباض خشک شدن کاهش یافت، و تولید شکاف می‌تواند جلوگیری شود. انقباض پخت هسته سرامیک با اضافه کردن قدرت اکسید منیزیم و توسعه یک فرایند پخت جدید کنترل شد. پس از اینکه رزین قالب سوزانده شد، شکل پیچیده مبتنی بر آلومینا با هسته سرامیک است به دست آمد. [۸]

زمانی و گودرزی انقباض قطعات پلاستیکی تزریق شده در قالب‌هایی از جنس آلیاژهای با دمای پایین و رزین اپوکسی را تحت تأثیر پارامترهای تزریق شامل فشار تزریق، زمان نگهداری

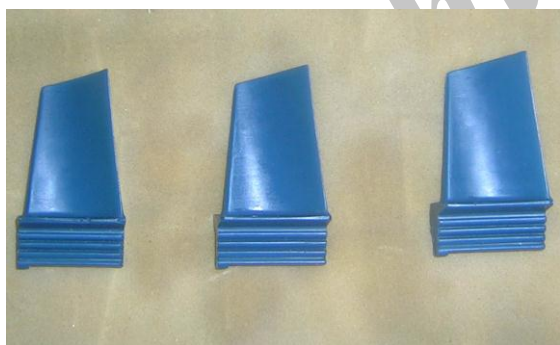
- 1- Dewax
- 2- Sprue
- 3- Risers
- 4- Horaček & Lubos
- 5- Hock & Yalagadda
- 6- HaihuaWu

اپوکسی با رزین ابزارسازی EP 250A ساخت شرکت MCP آلمان که ترکیبی از پودر آلومینیوم و اپوکسی است، ساخته شد. قالب گیری هر دو ابزار به صورت نیم و نیم و با رعایت شیب های منفی پره توربین صورت گرفت. شکل های ۳ و ۴ به ترتیب یک نیمه قالب سیلیکونی و نیمه قالب اپوکسی را به همراه نمونه Quick Cast نشان می دهند.



شکل (۴): نیمه قالب اپوکسی به همراه مدل Quick Cast.

پارامترهای دستگاه مومریزی^۲ طبق مقادیر بهینه تجربی نشان داده شده در جدول ۱ تنظیم شده و عملیات مومریزی در قالب سیلیکونی انجام گردید، سپس پارامترهای دستگاه تزریق موم طبق مقادیر بهینه که در جدول ۲ آمده است تنظیم شده [۷] و عملیات تزریق موم در ابزار سخت یا قالب اپوکسی صورت گرفت. شکل ۵ چند نمونه موم تولید شده را نشان می دهد.

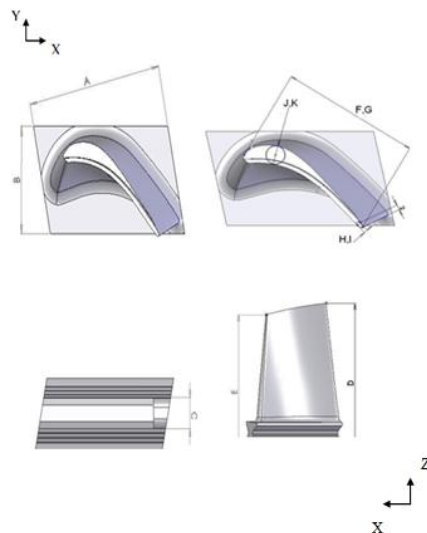


شکل (۵): چند نمونه الگوی مومی تولید شده.

جدول (۱): پارامترهای تعیین شده مومریزی توسط دستگاه vacuum casting

۰/۵-barG	فشار خلأ
۵۰±۲ °C	دمای قالب
۹۰±۲ °C	دمای موم

ورک^۱ مدلسازی گردیده و خروجی به صورت فرمت STL با سه گوش هایی با چگالی بالا جهت کاهش خطاهای تبدیل، تهیه شد.



شکل (۲): معرفی نواحی مختلف اندازه گیری شده و جهات مختصات.

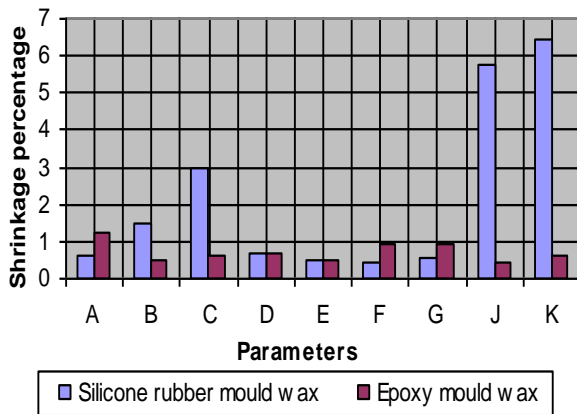
در مرحله بعد توسط فرایند SLA، نمونه Quick Cast پره توسط دستگاه 3D System- SLA 5000 با رزین Watershed 11120 تولید گردید.



شکل (۳): نیمه قالب سیلیکونی به همراه مدل Quick Cast.

سپس رزین های اضافی از روی مدل پاک شد، تکیه گاه های مدل از آن جدا گردیده و در محفظه اشعه ماوراء بنفش جهت پخت قرار گرفت. فواصل مذکور توسط ابزار اندازه گیری دقیق از قبیل کولیس با دقت ۰/۰۱ میلی متر و ضخامت سنج با دقت ۰/۰۱ میلی متر روی نمونه Quick Cast اندازه گیری گردید. سپس از نمونه Quick Cast ابتدا قالب سیلیکونی با ترکیب لاستیک سیلیکونی VTV 750 و کاتالیست CAT 800 ساخت شرکت MCP آلمان، ساخته شد و پس از آن قالب

پارامترهای گروه دوم مربوط به قسمت ریشه پره می‌باشند، به دلیل انطباقی بودن سطوح این نواحی با محل نصب پره، نهایتاً نیاز به ماشین‌کاری بعدی با دقت بالا دارند لذا در تولید الگوهای مومی پره‌ها، قسمت ریشه را اغلب کاملاً توپر و نسبتاً بزرگتر از اندازه نهایی طراحی می‌کنند به همین جهت اهمیت کمتری نسبت به پارامترهای گروه اول دارد ولی با تعیین انقباض این گروه از پارامترها می‌توان میزان انقباض ابعادی پره در جهت‌های موازی با پارامترهای گروه اول را مقایسه کرد. میزان انقباض در نواحی مختلف به صورت نمودار ستونی در شکل ۶ نمایش داده شده است و همچنین نتایج اندازه‌گیری نمونه‌ها به صورت نمودار خطی مجزا برای هر ناحیه در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل (۶): نمودار ستونی میزان انقباض در نواحی مختلف.

پس از بررسی‌های انجام شده روی نتایج اندازه‌گیری جدول ۳ و شکل ۶ با مقایسه آنها این نتیجه به دست می‌آید که انقباضات در قالب سیلیکونی با انقباضات در قالب اپوکسی تفاوت دارد، به عنوان مثال انقباض در برخی پارامترها همچون پارامتر K در قالب سیلیکونی، تقریباً به طور میانگین ۶/۴۶ درصد بوده در صورتی که همین پارامتر در قالب اپوکسی انقباض میانگینی معادل با ۰/۶ درصد دارد که این نشان‌دهنده انقباض بیش از ۱۰ برابری موم در قالب سیلیکونی نسبت به قالب اپوکسی در ناحیه مشخص شده با پارامتر K است. این انحراف ممکن است، در نتیجه تفاوت در هدایت حرارتی مواد دو قالب ایجاد شده است. هدایت حرارتی قالب اپوکسی بسیار بالاتر از قالب سیلیکونی است، بنابراین در زمان نگهداری یکسان در قالب، مقدار حرارت منتقل شده از الگوهای مومی قالب سیلیکونی بسیار بالاتر است. بنابراین الگوهای مومی با دمای بالاتر (الگوی مومی ساخته شده توسط قالب سیلیکونی) بیشتر منقبض می‌شود.

جدول (۲): پارامترهای تعیین شده تزریق موم توسط دستگاه wax injecting [۷].

فشار تزریق	۴۰±۳ kPa
دمای قالب	۵۰±۲ °C
دمای موم	۷۰±۲ °C
زمان نگهداری	۱۵min

باید به این نکته توجه شود که پارامترهای F, G به ترتیب طول کورد^۱ در بالاترین و پایین‌ترین مقطع ایرفویل^۲ و پارامترهای K, J به ترتیب بیشترین ضخامت ایرفویل^۳ در بالاترین و پایین‌ترین مقطع ایرفویل می‌باشند.

از آنجایی که در اندازه‌گیری همواره برخی خطاها اجتناب‌ناپذیر بوده و تأثیر این خطاها روی میزان درصد انقباض ابعاد کوچک عدد قابل توجهی است، لذا برای حصول نتایج دقیق‌تر از میزان درصد انقباض نواحی مختلف و جهت مختلف، ابعاد کوچکتر از ۵ میلی‌متر نادیده گرفته شد. در مرحله بعد پس از موم‌ریزی تعدادی پره در قالب سیلیکونی و تزریق موم چند پره در قالب اپوکسی، نمونه‌ها در نقاط دقیقاً مشابه با همان نقاط روی نمونه Quick Cast، با همان ابزار، در همان شرایط و توسط همان اپراتور اندازه‌گیری شدند.

نتایج این اندازه‌گیری‌ها در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. جدول ۵ میانگین نتایج اندازه‌گیری در نواحی مختلف را به همراه میزان درصد انقباض نسبت به مدل Quick Cast را برای هر نمونه نشان می‌دهد.

۴- نتایج و بحث

برای بررسی نتایج اندازه‌گیری ابتدا نواحی مختلف پره براساس اهمیت‌شان به دو گروه تقسیم‌بندی شدند، دسته اول پارامترهای مربوط به قسمت ایرفویل پره است که تأثیر بسزایی روی جریان سیال حول آن دارند، و شامل پارامترهای D, E, F, G, H, I, J, K می‌باشد [۱۰]، گروه دوم پارامترهای مربوط به قسمت ریشه پره است که شامل پارامترهای A, B, C می‌باشد. گروه اول از آن جهت که مربوط به قسمت‌هایی از پره است که پس از ذوب‌ریزی عملیات خاص ماشین‌کاری روی آن صورت نمی‌گیرد و تنها در صورت نیاز در برخی موارد جهت رفع برخی عیوب سطحی روی آن پرداخت کاری می‌شود لذا باید در طی فرایند ریخته‌گری دقیق به اندازه نهایی بسیار نزدیک باشد، حائز اهمیت بیشتری است، ولی با توجه به اینکه

1- Chord
2- Airfoil
3- Airfoil Maximum Thickness

جدول (۳): نتایج اندازه‌گیری نواحی مختلف روی نمونه‌های خارج شده از قالب سیلیکونی (بر حسب میلی‌متر).

شماره موم‌های قالب سیلیکونی										
پارامترها	Quick Cast	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
پارامتر A	۴۲/۲۷	۴۱/۹۵	۴۱/۹۲	۴۲/۱۲	۴۲/۰۲	۴۲/۰۸	۴۱/۹۴	۴۲/۱۴	۴۱/۸۵	۴۱/۹۸
پارامتر B	۲۵/۰۵	۲۴/۶۲	۲۴/۶۵	۲۴/۶۶	۲۴/۹۵	۲۴/۷۱	۲۴/۶۶	۲۴/۷۶	۲۴/۷۵	۲۴/۷
پارامتر C	۸/۰۵	۷/۸۸	۷/۸	۷/۷۵	۷/۷۸	۷/۷۹	۷/۷۸	۷/۸۷	۷/۸۵	۷/۷۹
پارامتر D	۸۴/۱	۸۳/۵۲	۸۳/۴۹	۸۳/۵	۸۳/۵۷	۸۳/۶	۸۳/۴۷	۸۳/۵۲	۸۳/۴	۸۳/۴۶
پارامتر E	۷۹/۰۵	۷۸/۷	۷۸/۶۵	۷۸/۸	۷۸/۶۹	۷۸/۶۸	۷۸/۶۷	۷۸/۷۵	۷۸/۴۳	۷۸/۷
پارامتر F	۴۲/۶۸	۴۲/۳۷	۴۲/۴۴	۴۲/۵۳	۴۲/۶۱	۴۲/۴۳	۴۲/۴	۴۲/۴۵	۴۲/۶	۴۲/۵۱
پارامتر G	۳۶/۶	۳۶/۴	۳۶/۴۵	۳۶/۳۸	۳۶/۵۶	۳۶/۵۲	۳۶/۲۳	۳۶/۵	۳۶	۳۶/۴۲
پارامتر H	۱/۲۵	۱/۱	۱/۱	۱	۱/۰۵	۱/۱	۱	۱	۱	۱/۱
پارامتر I	۱/۹	۱/۶۸	۱/۶۵	۱/۶	۱/۷	۱/۷	۱/۶۵	۱/۶۵	۱/۶۵	۱/۷
پارامتر J	۵/۴	۵/۱۵	۵/۱۵	۵	۵	۵/۰۵	۵/۱	۵/۱۵	۵/۱	۵/۱
پارامتر K	۱۰/۴	۹/۷	۹/۷۶	۹/۷	۹/۶۵	۹/۶۵	۹/۷۵	۹/۸	۹/۸	۹/۷۵

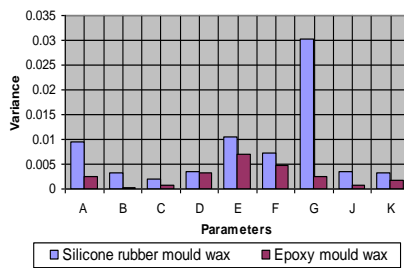
جدول (۴): نتایج اندازه‌گیری نواحی مختلف روی نمونه‌های خارج شده از قالب اپوکسی (بر حسب میلی‌متر).

شماره موم‌های قالب اپوکسی						
پارامترها	Quick Cast	۱	۲	۳	۴	۵
پارامتر A	۴۲/۲۷	۴۱/۶۶	۴۱/۷۸	۴۱/۷۶	۴۱/۷۸	۴۱/۷۲
پارامتر B	۲۵/۰۵	۲۴/۹۲	۲۴/۹۴	۲۴/۹۲	۲۴/۹	۲۴/۹۴
پارامتر C	۸/۰۵	۸/۰۳	۸/۰۳	۷/۹۷	۷/۹۸	۷/۹۸
پارامتر D	۸۴/۱	۸۳/۵۲	۸۳/۵	۸۳/۵۷	۸۳/۴	۸۳/۶۲
پارامتر E	۷۹/۰۵	۷۸/۶۵	۷۸/۶۶	۷۸/۴۵	۷۸/۷	۷۸/۸
پارامتر F	۴۲/۶۸	۴۲/۲۸	۴۲/۳۳	۴۲/۳۸	۴۲/۲	۴۲/۲۵
پارامتر G	۳۶/۶	۳۶/۲۵	۳۶/۲۵	۳۶/۲۴	۳۶/۲۵	۳۶/۲۵
پارامتر H	۱/۲۵	۱/۲	۱/۲	۱/۲۵	۱/۲	۱/۲۵
پارامتر I	۱/۹	۱/۸	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۱/۹
پارامتر J	۵/۴	۵/۳۸	۵/۴	۵/۴	۵/۳۵	۵/۳۵
پارامتر K	۱۰/۴	۱۰/۳۴	۱۰/۴	۱۰/۲۵	۱۰/۳	۱۰/۴

جدول (۵): میانگین نتایج اندازه‌گیری (بر حسب میلی‌متر) و درصد انقباض.

پارامترها	QuickCast	میانگین موم‌های قالب سیلیکونی	میانگین موم‌های قالب اپوکسی	انقباض موم‌های قالب سیلیکونی	انقباض موم‌های قالب اپوکسی
پارامتر A	۴۲/۲۷	۴۲	۴۱/۷۴	۰/۶۴	۱/۲۵
پارامتر B	۲۵/۰۵	۲۴/۶۸	۲۴/۹۲	۱/۴۹	۰/۵
پارامتر C	۸/۰۵	۷/۸۱	۸	۲/۹۸	۰/۶۵
پارامتر D	۸۴/۱	۸۳/۵	۸۳/۵۲	۰/۷۱	۰/۶۹
پارامتر E	۷۹/۰۵	۷۸/۶۷	۷۸/۶۵	۰/۴۸	۰/۵
پارامتر F	۴۲/۶۸	۴۲/۴۸	۴۲/۲۹	۰/۴۶	۰/۹۲
پارامتر G	۳۶/۶	۳۶/۳۹	۳۶/۲۵	۰/۵۸	۰/۹۶
پارامتر H	۱/۲۵	۱/۰۵	۱/۲۲	۱۶	۲/۴
پارامتر I	۱/۹	۱/۶۶	۱/۸۸	۱۲/۴	۱/۰۵
پارامتر J	۵/۴	۵/۰۹	۵/۳۸	۵/۷۶	۰/۴۵
پارامتر K	۱۰/۴	۹/۷۳	۱۰/۳۴	۶/۴۵	۰/۶

دارند. به‌عنوان مثال اختلاف بین بیشینه و کمینه عدد اندازه-گیری شده در ناحیه مشخص شده با پارامتر J در موم‌های خروجی از قالب اپوکسی برابر ۰/۰۵ میلی‌متر است در صورتی که همین اختلاف در موم‌های خارج شده از قالب سیلیکونی ۰/۱۵ میلی‌متر می‌باشد که تقریباً ۳ برابر قالب اپوکسی است و همچنین میزان انحراف (واریانس) از مقدار میانگین در همین ناحیه در موم‌های خروجی از قالب اپوکسی ۰/۰۰۰۶۳ است، در صورتی که در موم‌های خروجی از قالب سیلیکونی ۰/۰۰۳۶ می‌باشد که تقریباً ۵ برابر قالب اپوکسی است.



شکل (۸): نمودار ستونی میزان واریانس در نواحی مختلف.

جدول (۶): واریانس از مقدار میانگین و محدوده تغییرات ابعاد قطعات مختلف.

پارامترها	واریانس موم‌های قالب سیلیکونی	واریانس موم‌های قالب اپوکسی	محدوده تغییر موم‌های قالب سیلیکونی	محدوده تغییر موم‌های قالب اپوکسی
پارامتر A	۰/۰۰۹۵۲۵	۰/۰۰۰۲۸	۰/۲۹	۰/۱۲
پارامتر B	۰/۰۰۳۲۴۴	۰/۰۰۰۲۸	۰/۱۷	۰/۰۴
پارامتر C	۰/۰۰۲۰۵	۰/۰۰۰۸۷	۰/۱۳	۰/۰۶
پارامتر D	۰/۰۰۳۵۲۵	۰/۰۰۳۲۲	۰/۲	۰/۱۶
پارامتر E	۰/۰۱۰۴۲۸	۰/۰۰۷۰۷	۰/۳۷	۰/۲۲
پارامتر F	۰/۰۰۷۲۶۹	۰/۰۰۴۸۷	۰/۲۴	۰/۱۸
پارامتر G	۰/۰۳۰۳۵۳	۰/۰۰۲۵	۰/۵۶	۰/۱
پارامتر H	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۰۷۵	۰/۱	۰/۰۵
پارامتر I	۰/۰۰۱۱۲۸	۰/۰۰۰۲	۰/۱	۰/۱
پارامتر J	۰/۰۰۳۶۱۱	۰/۰۰۰۶۳	۰/۱۵	۰/۰۵
پارامتر K	۰/۰۰۳۲۶۱	۰/۰۰۱۷۲	۰/۱۵	۰/۱

لذا برای تولید قطعاتی با محدوده تolerانس بسته همچون پره توربین بهتر است از قالب اپوکسی بجای قالب سیلیکونی استفاده نمود. این مطالعات به ریخته‌گری دقیق کمک می‌کند تا تغییر مجاز مورد نیاز در مدلسازی نرم افزاری و نقشه‌کشی CAD اولیه را برای تولید قالب نهایی با حداقل بی‌دقتی در ابعاد تخمین بزنند.

علاوه بر آن انقباض‌ها در جهات مختلف مختصاتی مشخص شده در شکل ۶ نیز متفاوت می‌باشند. به‌عنوان مثال در قالب سیلیکونی انقباض میانگین موم در ناحیه مشخص شده با پارامتر A که در جهت محور X مختصات است ۰/۶ درصد است که در صورتی که این انقباض در ناحیه مشخص شده با پارامتر B که در جهت محور Y مختصات است برابر ۱/۵ درصد می‌باشد.

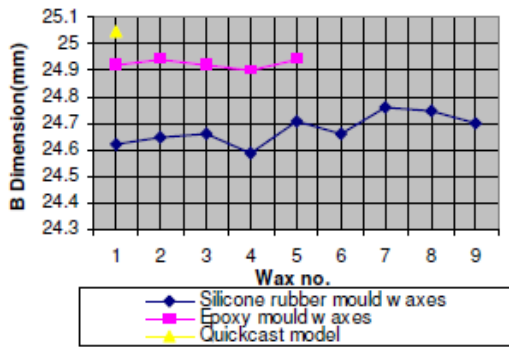
این تفاوت ممکن است، به جهت پر شدن قالب سیلیکونی بستگی داشته باشد، از آنجایی که قالب در جهت محور Y مختصاتی موم‌ریزی شده و پر می‌شود این احتمال وجود دارد که به دلیل وجود نیروی گرانشی در این جهت و بالا بودن دمای موم، میزان انقباض در جهت محور Y مختصاتی بیش از جهت‌های دیگر مختصاتی باشد.

این تفاوت در نواحی مشخص شده با پارامترهای J, K که نشان‌دهنده بیشترین ضخامت ایرفویل پره توربین می‌باشند و سطح زیادی برای انتقال حرارت دارند، پر رنگتر است و همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد از آنجایی که اصولاً در ریخته‌گری دقیق پره‌ها، روی سطح ایرفویل عملیات خاص ماشین‌کاری با براده برداری زیاد، صورت نمی‌گیرد و ابعاد به‌دست آمده از ریخته‌گری دقیق تقریباً ابعاد نهایی این قسمت است لذا بایستی کنترل دقیقی روی انقباض این نواحی صورت گرفته و در طراحی مدنظر قرار گیرد.

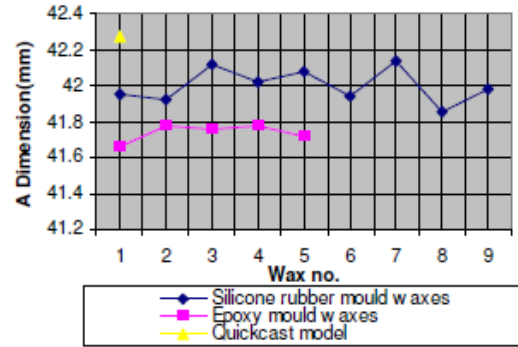
میزان انقباض موم‌های تولید شده توسط هر دو قالب سیلیکونی و اپوکسی در طول کورد در مقطع بالای ایرفویل (پارامتر G) و در مقطع پایین ایرفویل (پارامتر F) و همچنین در بیشترین ضخامت ایرفویل در مقطع بالای ایرفویل (پارامتر J) و در مقطع پایین ایرفویل (پارامتر K)، در جدول ۵ نشان داده شده است.

بعد از اندازه‌گیری میزان انقباض نواحی مختلف الگوهای مومی خارج شده از هر دو قالب (اپوکسی و سیلیکونی) نوبت به مقایسه محدوده تolerانس و تکرارپذیری آنها می‌رسد، بدین‌منظور با توجه به اندازه‌گیری‌های صورت گرفته روی الگوهای مومی، میزان بیشینه و کمینه عدد اندازه‌گیری شده در هر پارامتر مشخص شده و همچنین میزان انحراف (واریانس) آن از مقدار میانگین، در جدول ۶ آمده است.

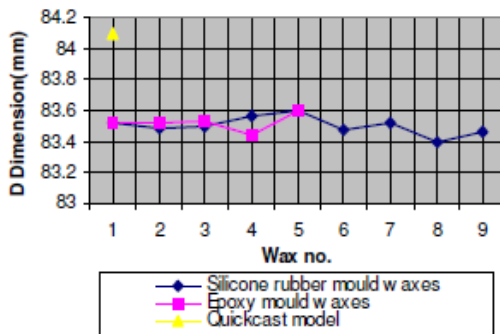
مقایسه میزان انحراف (واریانس) پارامترهای مختلف در شکل ۸ به‌صورت نمودار ستونی نشان داده شده است. از نتایج جدول ۶ و شکل‌های ۷ و ۸ آشکار است که الگوهای مومی ساخته‌شده توسط قالب اپوکسی ثبات بیشتر و تolerانس کوچکتری نسبت به الگوهای تولید شده توسط قالب سیلیکونی



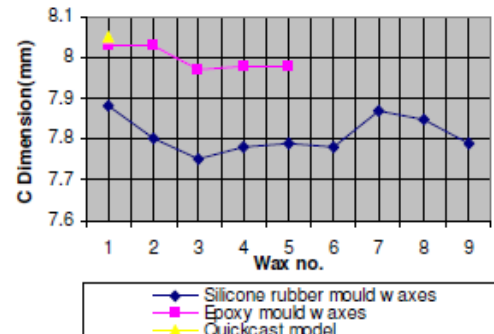
ب) - ناحیه B



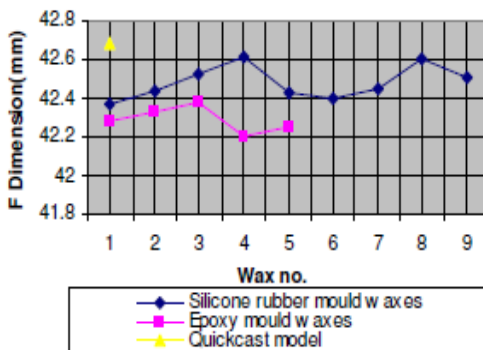
الف) - ناحیه A



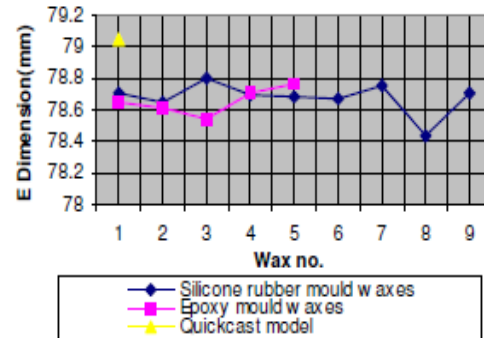
ت) - ناحیه D



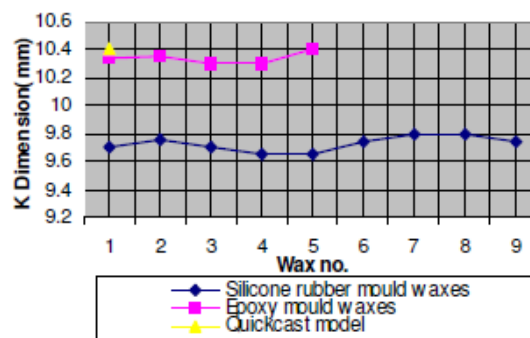
پ) - ناحیه C



ج) - ناحیه F



ث) - ناحیه E



د) - ناحیه K

شکل (۷): نتایج اندازه‌گیری نمونه‌ها به صورت نمودار خطی مجزا برای هر ناحیه.

پراکندگی داده در تکرار هر قالب باشد. همچنین از شکل ۹، می‌توان نتیجه گرفت که داده‌ها توزیع عادی دارند.

۵- نتیجه گیری

بر اساس تحقیق حاضر می‌توان این‌گونه بیان نمود که تولید الگوهای مومی پره‌های توربین گازی با استفاده از هر دو قالب سیلیکونی یا اپوکسی مزایا و معایب خاص خود را دارد.

به دلیل خاصیت انعطاف پذیری قالب‌های سیلیکونی، الگوهای مومی که شیب منفی کوچکی دارند را می‌توان به راحتی با منقطع ساختن قالب از آن خارج نمود در صورتی که این عمل در قالب‌های اپوکسی امکان پذیر نمی‌باشد و تنها راه برای رفع شیب‌های منفی ساخت قالب پیچیده با اجزاء کشویی است، در نتیجه قالب‌های سیلیکونی، توانایی تولید الگوهای مومی با اشکال پیچیده را دارند. اما از دیدگاه دقت و ثبات ابعادی، عملکرد قالب‌های اپوکسی بسیار بهتر است زیرا الگوهای مومی با دقت تر و با محدوده ترانسسی کوچکتری تولید می‌کنند. بنابراین اگر نیاز به تولید الگوهای دقیق باشد استفاده از قالب‌های اپوکسی بهتر است.

همچنین میزان تغییرات ابعادی در راستاهای مختلف الگوهای مومی پره توربین و میزان انقباض پارامترهای ابعادی موثر در راندمان ایرفویل همچون ضخامت بیشینه و طول کورد مقطع به دست آمد.

این بررسی‌ها می‌تواند در تعیین تغییرات ابعادی لازم در طراحی اولیه برای تولید قالب نهایی با کمترین بی‌دقتی ابعادی در فرایند ریخته‌گری دقیق کمک کند.

۶- تشکر و قدردانی

بدینوسیله بر خود لازم دانسته از همکاری کارشناسان محترم شرکت سابکو، خصوصاً آقایان مهندس ثریا و مهندس غلامی در کمک‌های بی‌دریغ در ارائه پیشنهادات مفید و ساخت قالب سپاس‌گزاری نماید.

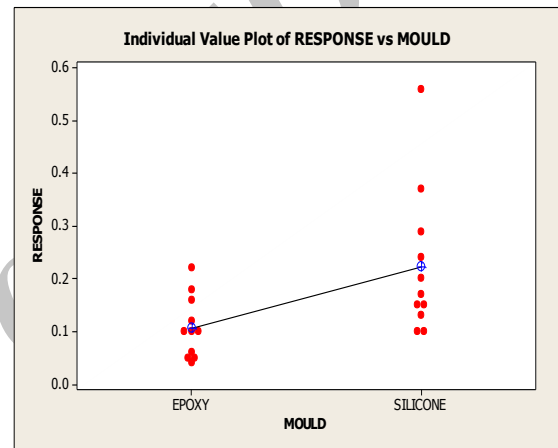
۷- مراجع

1. Rosochowski, A. and Matuszak, A. "Rapid Tooling: the State of the Art", J. Mater. Proc. Tech. Vol. 106, No. 1-3, pp. 191-198, 2000.
2. Ma, S., Gibson, I., Balaji, G., and Hu, Q.J. "Development of Epoxy Matrix Composites for Rapid Tooling Applications", J. Mater. Proc. Tech. Vols. 192-193, No. 1, pp. 75-82, 2007.
3. Kruth, P.J., "Material Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques", Ann. Vol. 40 No. 2, pp. 603-614, 1991.
4. Piwonk, T.S. and Wiest, J.M., "Factors Affecting Investment Casting Pattern Die Dimensions", INCAST, Vol. 353, No. 60, pp. 8-13, 1997.

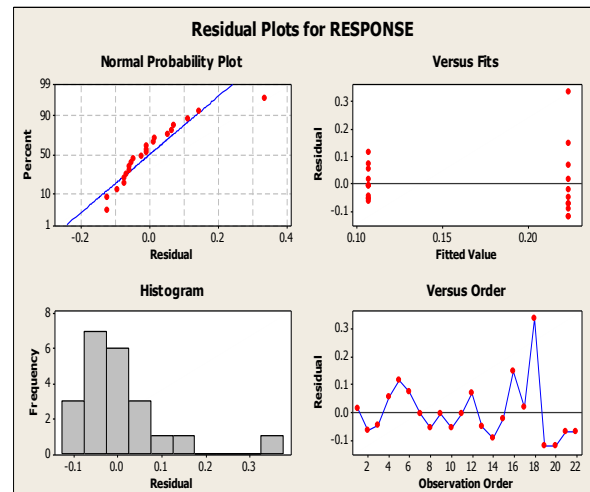
در ادامه محدوده تغییر پارامترهای مختلف موم‌های قالب‌های سیلیکونی و اپوکسی تحت تحلیل واریانس (ANOVA) قرار گرفت. نتایج محاسبات از نرم‌افزار Minitab به صورت به صورت جدول ۷ و شکل‌های ۹ و ۱۰ می‌باشد:

جدول (۷): ANOVA برای محدوده تغییر پارامترهای مختلف موم‌های قالب‌ها.

Source	DF	SS	MS	F	P
Type of mould	۱	۰/۰۷۴۵	۰/۰۷۴۵	۶/۵۵	۰/۰۱۹
Error	۲۰	۰/۲۲۷۳	۰/۰۱۱۴	-	-
Total	۲۱	۰/۳۰۱۷	-	-	-



شکل (۹): دیاگرام محدوده تغییر پارامترها در مقابل نوع قالب‌ها.



شکل (۱۰): دیاگرام منحنی مانده‌ها برای محدوده تغییر پارامترها.

طبق جدول ۷، نتیجه گرفته می‌شود که نوع قالب با ۹۵ درصد قطعیت ($\alpha=0/05$) می‌تواند روی محدوده تغییرات موم‌ها تأثیر بگذارد ولی نمی‌توان فرض کرد که پراکندگی آن شبیه

5. Wolff, T.M., "Thermal Expansion of Investment Casting Pattern Wax", INCAST, Vol. 874, No. 68, pp. 22-25, 1999.
6. Hora'cek, M. and Lubos, S., Proceedings of the Ninth World Conference on Investment Casting, San Francisco, CA, USA, pp. 1:1-1:20, 1996.
7. Yarlagadda, P.K.D.V. and Hock, T.S. "Statistical Analysis on Accuracy of Wax Patterns Used in Investment Casting Process", J. Mater. Process. Technol., Vol. 138, No. 1-3, pp. 75-81, 2003.
8. Haihuawu, Dichen Li , Yiping Tang, Bo Sun, Dongyang X. "Rapid Fabrication of Alumina-Based Ceramic Cores for Gas Turbine Blades by Stereolithography and Gelcasting", J. Materials Proc. Tech., Vol. 209, No. 18-19, pp. 5886-5891, 2009.
9. Zamani-Ashani, J. and Goudarzi, R. "The Shrinkage Comparison of Plastic Injection Molding inserts, Made of Low Melting Point Metal Casting Alloy and Epoxy Resin Material" , J. Aerospace Mechanics, Vol. 9, No. 3, pp. 1-8, 2013 (In Persian).
10. Bammert, K. and Sandstede, H. "Influences of Manufacturing Tolerances and Surface Roughness of Blades on the Performance of Turbines", J. Eng. for Power, Vol. 98, No. 1, pp. 29-36, 1976.

Archive of SID