



ساخت و تحلیل عددی منیفولد هوا کامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه تحت بارگذاری ارتعاشی

محمد علی مشهدی جعفری سهی¹، امین فرخ آبادی^{2*}

1- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 111-14115، amin-farrokhi@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف از انجام این تحقیق، حذف یکی از محدودیت‌های تولید قطعات صنعتی با بکارگیری کامپوزیت پایه پلیمری گرماسخت بعنوان یک ماده جایگزین در ساخت قطعه‌ای از موتورسیکلت (منیفولد هوا) می‌باشد. لازم به ذکر است نمونه‌های در حال استفاده از مواد پلی آمیدی تقویت شده با الیاف شیشه می‌باشند. منظور از محدودیت مذکور به حد نصاب نرسیدن تیراژ تولید و به طبع آن عدم توانایی مالی در ساخت قالب‌های فولادی جهت تزریق پلاستیک می‌باشد که در کامپوزیت‌های گرماسخت این محدودیت وجود ندارد و می‌توان قطعات به نسبت پیچیده را با قالب سیلیکونی تولید کرد. در همین راستا در این تحقیق به بررسی پلیمرهای گرماسخت پرداخته شد و با در نظرگیری خواص مکانیکی و حرارتی مورد نیاز جهت ساخت این قطعه، رزین وینیل استر بر پایه اپوکسی نووالاک انتخاب گردید و در ادامه برای تقویت ماتریس منتخب، به بررسی تقویت کننده‌های متناسب با خواص قطعه مورد نظر پرداخته که نتیجه آن انتخاب الیاف سوزنی شیشه 3 میلی‌متر به نسبت وزنی 30% است. پس از ساخت نمونه‌های دمبلی شکل این کامپوزیت و استخراج خواص مورد نظر از آن‌ها در آزمایشگاه، مدل سه‌بعدی قطعه در نرم‌افزار آباکوس وارد شده و خواص کامپوزیت برای مدل تعریف گردید. سپس شرایط کارکرد و آزمون‌های منیفولد در آباکوس شبیه‌سازی و نتایج آن بررسی شد. در انتها منیفولد هوا با کامپوزیت منتخب ساخته و به تحلیل تجربی آن پرداخته شد. نتایج آزمون نشان داد که این کامپوزیت تمامی شرایط را ارضا خواهد کرد.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 13 تیر 1399
داوری اولیه: 2 شهریور 1399
پذیرش: 14 آبان 1399

کلیدواژه‌ها:

منیفولد هوا
قطعات موتوری
سازه کامپوزیتی
رزین وینیل استر بر پایه اپوکسی
نووالاک
الیاف سوزنی شیشه

Fabrication and numerical analysis of glass fiber reinforced composite air manifold under vibration loading

Mohammad Ali Mashhadi Jafari Sohi, Amin Farrokhi Abadi*

Department of Aerospace Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 14115-111, Tehran, Iran, amin-farrokhi@modares.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 3 July 2020
First Decision: 23 August 2020
Accepted: 4 October 2020

Keywords:

Air manifold
Engine Parts
Composite Structure
Novolac Epoxy-based Vinyl Ester
Chopped Glass Fiber

Abstract

The purpose of this article is to remove one of the limitations of manufacturing and production of industrial specimens, which is employing a thermoset polymer-based composite as an alternative material in the construction of a motorcycle part (air manifold). It should be noted that the existing parts are produced using polyamide materials reinforced along with glass fibers. The mentioned limitation means that there are not enough order circulations to start production, and therefore there is no financial ability to make steel molds for plastic injection, which is not the case in thermoset composites, and relatively complex parts can be molded with silicone molds. As a result, in this article the types of thermoset polymers were investigated and considering the mechanical and thermal properties required to production this part, Novolac Epoxy-based Vinyl Ester resin was selected and to strengthen the resin, various reinforcing additives suitable for properties of the manifold were investigated, which resulted in the selection of 3mm glass fibers needle in a weight ratio of 30%. By fabricating the test samples of the mentioned composite and extracting the desired properties in the laboratory, the 3D model of the part was employed in Abaqus software and the composite properties were defined for the model. Then the operating conditions and manifold tests in Abaqus simulation and its results were evaluated. Finally, the air manifold was fabricated by the composite material and then analyzed experimentally. The test results showed that the selected composite will pass all the conditions.

1- مقدمه

مقره‌ها در خطوط انتقال نیرو، ساخت لوله‌ها و مخازن نگهدارنده مواد شیمیایی و ساخت شبکه‌های مورد استفاده در صنایع شیمیایی از کامپوزیت‌های پلیمری با الیاف‌های گوناگون استفاده

امروزه کامپوزیت‌ها در بسیاری از صنایع از جمله صنایع مکانیکی، الکترونیکی و شیمیایی کاربرد دارند و در ساخت

Please cite this article using:

M. A. Mashhadi Jafari Sohi, A. Farrokhi Abadi, Fabrication and numerical analysis of glass fiber reinforced composite air manifold under vibration loading, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 12, pp. 64-75, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

می‌شود. در حوزه موتور معمولاً در ساخت قطعات و سنسورهای موتوری به دلیل خواص مورد نیاز از پلی‌آمید استفاده می‌شود که به دلیل گرمانرم بودن این مواد می‌بایست گرانونل مذاب با دستگاه تزریق پلاستیک به قالب‌های مخصوص تزریق شده تا قطعه آماده شود. قالب‌های گفته شده هزینه ساخت بسیار بالایی دارد و ساخت آن برای تیراژهای تولید پایین صرفه اقتصادی نخواهد داشت، برای رفع این مشکل در تیراژ کم می‌بایست روش ساخت را تغییر داد که به طبع با این کار ماده اولیه نیز متغیر خواهد شد. با تغییر در ماده اولیه و انتخاب پلیمرهای گرماسخت بعنوان ماده جایگزین می‌توان طبق تیراژ مورد نیاز هر محصول، قطعه مورد نظر را طراحی و بدون نگرانی از محدودیت تیراژ آن قطعه را وارد مرحله ساخت کرد که این ویژگی مثبت و مورد نظر در پلیمرهای گرماسخت است.

قطعه مورد نظر منی فولد هوا بوده که وظیفه آن در موتور انتقال و ترکیب سوخت و هوا به نسبت مشخص به درون محفظه احتراق می‌باشد. منی فولد ساخته شده از کامپوزیت می‌بایست انواع آزمون‌های موتوری را بدون شکست و تغییر شکل طبق استاندارد بگذراند زیرا دانستن مقدار کاهش استحکام کامپوزیت‌های زمینه پلیمری در شرایط متفاوت اهمیت بسیاری دارد. از این رو، در پژوهش‌های گسترده‌ای مقدار کاهش استحکام کامپوزیت بر حسب زمان غوطه‌وری در مواد با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی بررسی شده است. مشکل اصلی در استفاده از روش‌های مزبور این است که نقش پارامترهایی چون استحکام یا درصد حجمی یا وزنی الیاف و رزین در چنین روش‌هایی تفکیک‌ناپذیر است. از این رو، برای پاسخ‌دهی به این مسائل، تحقیق حاضر جهت ساخت قطعه‌ای از موتور (منی فولد هوا) با استفاده از مواد کامپوزیتی (وینیل استر اپوکسی با الیاف شیشه) از روش‌های عددی و تجربی و مطالعات کیفی متفاوت، استفاده شده است تا از این طریق بتوان محدودیت‌های تولید و هزینه تولید را کاهش داده و از طرفی وابستگی این صنعت را به یک نوع ماده اولیه خاص کم نمود.

2-1- شرایط کارکرد و ویژگی‌های قطعه

موقعیت این قطعه مانند دیگر قطعات موتوری دارای شرایط دمایی و مکانیکی سخت می‌باشد و تفاوت چشم‌گیری در نوع وسیله نقلیه‌ای که قطعه بر روی آن نصب می‌شود نخواهد داشت، این وسیله می‌تواند موتورسیکلت، خودرو، هواپیما و یا بالگرد باشد و اهمیت آن در شرایط کارکردی است که برای آن تعریف می‌شود. منی فولد به دلیل تماس مستقیم با بنزین یکی از سخت‌ترین شرایط محیطی را دارد. برای مثال شرایط کارکرد

می‌شود. در حوزه موتور معمولاً در ساخت قطعات و سنسورهای موتوری به دلیل خواص مورد نیاز از پلی‌آمید استفاده می‌شود که به دلیل گرمانرم بودن این مواد می‌بایست گرانونل مذاب با دستگاه تزریق پلاستیک به قالب‌های مخصوص تزریق شده تا قطعه آماده شود. قالب‌های گفته شده هزینه ساخت بسیار بالایی دارد و ساخت آن برای تیراژهای تولید پایین صرفه اقتصادی نخواهد داشت، برای رفع این مشکل در تیراژ کم می‌بایست روش ساخت را تغییر داد که به طبع با این کار ماده اولیه نیز متغیر خواهد شد. با تغییر در ماده اولیه و انتخاب پلیمرهای گرماسخت بعنوان ماده جایگزین می‌توان طبق تیراژ مورد نیاز هر محصول، قطعه مورد نظر را طراحی و بدون نگرانی از محدودیت تیراژ آن قطعه را وارد مرحله ساخت کرد که این ویژگی مثبت و مورد نظر در پلیمرهای گرماسخت است.

قطعه مورد نظر منی فولد هوا بوده که وظیفه آن در موتور انتقال و ترکیب سوخت و هوا به نسبت مشخص به درون محفظه احتراق می‌باشد. منی فولد ساخته شده از کامپوزیت می‌بایست انواع آزمون‌های موتوری را بدون شکست و تغییر شکل طبق استاندارد بگذراند زیرا دانستن مقدار کاهش استحکام کامپوزیت‌های زمینه پلیمری در شرایط متفاوت اهمیت بسیاری دارد. از این رو، در پژوهش‌های گسترده‌ای مقدار کاهش استحکام کامپوزیت بر حسب زمان غوطه‌وری در مواد با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی بررسی شده است. مشکل اصلی در استفاده از روش‌های مزبور این است که نقش پارامترهایی چون استحکام یا درصد حجمی یا وزنی الیاف و رزین در چنین روش‌هایی تفکیک‌ناپذیر است. از این رو، برای پاسخ‌دهی به این مسائل، تحقیق حاضر جهت ساخت قطعه‌ای از موتور (منی فولد هوا) با استفاده از مواد کامپوزیتی (وینیل استر اپوکسی با الیاف شیشه) از روش‌های عددی و تجربی و مطالعات کیفی متفاوت، استفاده شده است تا از این طریق بتوان محدودیت‌های تولید و هزینه تولید را کاهش داده و از طرفی وابستگی این صنعت را به یک نوع ماده اولیه خاص کم نمود.

2-2- متن مقاله

با گسترش کاربرد کامپوزیت در اکثر صنایع از جمله پزشکی، خودرو، هوافضا و غیره، مقالات مختلفی در راستای بهبود کیفیت بدنه و سازه‌های مکانیکی مانند کاپوت خودرو ارائه شده است [1]، [2]. نتیجه حاصل از بررسی مقالات متعدد بدین صورت بود که علی‌رغم توجه و استفاده از کامپوزیت‌های زمینه فلزی، کامپوزیت‌های زمینه پلیمری بالاخص پلیمرهای گرماسخت در

درصدهای مختلف این ترکیبات زمان پخت مورد نظر انتخاب خواهد شد. ابتدا افزودنی‌هایی که وظیفه پخت رزین را دارند، گفته شده و سپس اطلاعات مندرج در برگه فنی رزین، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. مرسوم‌ترین فعال کننده برای انواع رزین‌های وینیل استر، متیل اتیل کتون پراکسید⁵ می‌باشد. اما برخلاف رزین‌های پلی‌استر که تنها شتاب دهنده کبالت⁶ را در کنار این فعال کننده نیاز دارند، رزین‌های وینیل استر به تسهیل کننده دیگری نیز احتیاج دارند که معمولاً دی متیل آنیلین⁷ می‌باشد. در برخی موارد این تسهیل کننده توسط سازنده رزین به آن اضافه می‌شود و در غیر اینصورت باید طبق مقادیر پیشنهاد شده در هنگام پخت به رزین اضافه شود، جدول 3 اطلاعات کامل پخت رزین منتخب را نشان داده است.

جدول 2 خواص رزین منتخب بعد از پخت

Table 2 Properties of selected cured resin

دستگاه بین‌المللی یکاها ⁸	خاصیت
90~76 مگاپاسکال	9 استحکام کششی
7/3 ~ 5/3 گیگاپاسکال	10 مدول کششی
2 ~ 4%	11 ازدیاد طول
145~124 مگاپاسکال	12 استحکام خمشی
3/6 ~ 4/1 گیگاپاسکال	13 مدول خمشی
8/5 ~ 9/5 درصد	14 انقباض حجم
150~144 درجه سانتی‌گراد	15 درجه حرارت اعوجاج
46~40	16 سختی بارکول

جدول 3 اطلاعات و زمان بندی پخت رزین

Table 3 Information and timing resin curing

دمای پخت	هاردنرها	20~10 دقیقه	40~20 دقیقه	60~40 دقیقه
25°C	متیل اتیل کتون پراکسید	%1/5	%1/5	%1/5
	کبالت	%0/8	%0/45	%0/4
	دی متیل آنیلین	%0/1	%0/08	%0/06

همان طور که در جدول 3 مشخص شده یکی از ویژگی‌های مثبت این رزین دمای پخت آن در محیط اتاق (25 درجه سانتی‌گراد) می‌باشد. با توجه به اینکه پخت رزین در دمای

این قطعه می‌توان به شرایط دمایی بالا اشاره کرد و یا فشار بیش از 2 بار که فشار به نسبت بالایی محسوب می‌شود. قطعه نهایی ساخته شده از این روش باید دارای ویژگی‌هایی باشد تا بتواند آزمون‌های مورد نظر را گذرانده و استانداردهای موتوری که از سخت‌گیرانه‌ترین استانداردها در میان صنایع است را دریافت کند. منبع آزمون‌های تعریف شده در این مقاله، مستخرج از مستندات تست‌های اعتبار سنجی¹ یا همان تست پلن² نمونه اصلی قطعه است که توسط یکی از شرکت‌های معتبر منیفلود سازی بنام مکاپلاست³ تنظیم شده که در بخش آزمون‌ها به آن پرداخته خواهد شد.

2-2- انتخاب ماتریس

برای دستیابی به خواص مورد نظر که شرایط آزمون‌ها را ارضا نماید می‌بایست انتخاب درستی از ماده اولیه انجام داد. در راستای این عمل باید نسبت به مواد موجود شناخت کلی داشته تا بتوان با بررسی و مقایسه خواص مکانیکی، خواص شیمیایی، زمان و روش‌های ساخت و بسیاری دیگر از ویژگی‌های هر یک از مواد انتخابی درست برای ماده اولیه منیفلود داشت. پلیمرهای گرماسخت که به اصطلاح به آنها رزین⁴ نیز گفته می‌شود دارای انواع مختلفی است که با بررسی تمامی آنها، رزین وینیل استر بر پایه اپوکسی نووالاک شرکت سوانکور ساخت کشور تایوان انتخاب شد که خواص اولیه آن در جدول 1 آمده است.

جدول 1 خواص اولیه رزین مایع منتخب

Table 1 Primary properties of liquid resin

ظاهر	مایع شفاف کهربایی
محتوای جامد	%68
ویسکوزیته در دمای اتاق	335 میلی پاسکال ثانیه
وزن مخصوص	1/06
زمان چقرمگی	20 الی 30 دقیقه
زمان نگهداری در دمای اتاق	6 ماه

در ادامه خواص رزین ریخته‌گری شده پس از پخت که توسط سازنده ارائه شده در جدول 2 نمایش داده شده است. پس از مشاهده خواص این ماده به بررسی ترکیبات فعال کننده و سخت کننده رزین پرداخته می‌شود و با استفاده از

¹ Validation folder tests description

² Test plane

³ MECAPLAST

⁴ Resin

⁵ Methyl ethyl ketone peroxide (MEKP)

⁶ Cobalt

⁷ Dimethylaniline (DMA)

⁸ SI

⁹ Tensile Strength

¹⁰ Tensile Modulus

¹¹ Tensile Elongation

¹² Flexural Strength

¹³ Flexural Modulus

¹⁴ Volume Shrinkage

¹⁵ Heat Distortion Temperature (HDT)

¹⁶ Barcol Hardness

2-4- کامپوزیت منتخب

با مطالعه مقالات و فعالیت‌هایی که در این زمینه انجام شده درصدهای ترکیب مختلفی از الیاف و ماتریس مشاهده شد، با بررسی بیشتر در کاربردهای مشابه و همچنین کامپوزیت‌هایی که ترکیبات اجزاء آنها به کامپوزیت این مقاله نزدیک‌تر بود، نسبت وزنی مشخصی انتخاب شد که این نسبت وزنی برابر با 30% الیاف شیشه است. علاوه بر آن قطعات مشابه موتوری که از مواد گرمانرم ساخته شده‌اند نیز مورد بررسی قرار گرفت، نتیجه مورد توجه این است که نسبت الیاف مورد استفاده در اکثر آنها برابر با نسبت استفاده شده در مقالات مطالعه شده در رابطه با مواد گرماسخت بود. این موضوع نشان دهنده آن است که در پلیمرهای گرمانرم و پلیمرهای گرماسخت این نسبت بهینه است، در نتیجه نسبت وزنی منتخب جهت ساخت این کامپوزیت نیز 30% الیاف شیشه انتخاب شد.

برای استخراج برخی از خواص کامپوزیت می‌بایست قالب و نمونه دمبلی استاندارد را مطابق شکل 1 ساخته، سپس کامپوزیت با ترکیب مذکور را درون قالب سیلیکونی ریخته و پس از پخت شکل 2 نمونه دمبلی شکل را تحت آزمون کشش قرار داد.

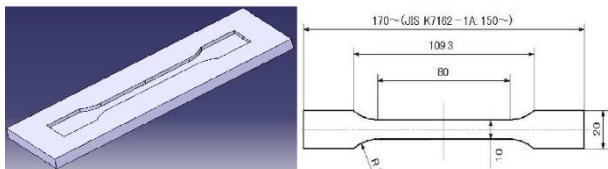


Fig. 1 Dumbbell-shaped mold and drawing

شکل 1 قالب و نقشه نمونه دمبلی شکل



Fig. 2 Dumbbell-shaped composite

شکل 2 کامپوزیت دمبلی شکل

پس از ساخت کامپوزیت دمبلی شکل می‌بایست آن را در دستگاه تست کشش دارای اکستنسیومتر شکل 3 تحت آزمون کشش قرار داده و از نتایج این آزمون خواص مورد نظر کامپوزیت را استخراج کرد. دستگاه کشش مذکور دارای بیشینه ظرفیت بارگذاری 200 کیلونیوتون است و نرخ بارگذاری جهت انجام این آزمون 2 میلی‌متر بر دقیقه تعیین گردید. با استفاده از قانون مخلوطها³ و نتایج به دست آمده از

محیط انجام شده نسبت ترکیب مربوط به آن دما نیز انتخاب شده است.

یکی دیگر از ویژگی‌های مهم این رزین زمان پخت بسیار پایین آن به نسبت دیگر رزین‌ها است. در جدول پخت نسبت‌های مختلف هاردنرها بر اساس زمان پخت مورد نظر آنها از 10 دقیقه الی 1 ساعت آمده که می‌توان به تناسب نیاز، از این درصدها استفاده کرد.

2-3- انتخاب الیاف

با بررسی انواع الیاف و مقایسه ویژگی‌های آنها با یکدیگر، الیاف شیشه نوع ای¹ انتخاب شد. با توجه به روش ساخت کامپوزیت که تزریقی کم فشار می‌باشد، الیاف می‌بایست در رزین بطور یکنواخت مخلوط شده تا کامپوزیت خواص یکسانی در همه جهات داشته باشد، در نتیجه از الیاف خرد شده سوزنی² استفاده استفاده شد تا این نیاز را نیز برطرف کند. با وجود تنوع ابعادی چپد شیشه و در نظر داشتن بهینه‌ترین نسبت سطح به حجم و با در نظر داشتن هزینه هر واحد، الیاف خرد شده 3 میلی‌متر انتخاب شد که ویژگی‌های آن در جدول 4 آمده است.

جدول 4 خواص الیاف سوزنی شیشه 3 میلی‌متر

Table 4 Properties of 3 mm chopped fiber glass

نوع الیاف	ای گلاس سوزنی
دانسیته	2/6~2/5 گرم بر سانتی‌متر مکعب
نقطه نرم شدن	840 درجه سانتی‌گراد
نقطه ذوب	1725 ≥ درجه سانتی‌گراد
قطر رشته	10~13 میکرومتر
سایز	3 میلی‌متر
رنگ	سفید
میزان رطوبت	0/03%
درصد از بین رفتن آتش	0/57%
هدایت حرارتی	1/3 W/(m ² K)
استحکام کششی در دمای اتاق	3450 ~ 3789 مگا پاسکال
ازدیاد طول تا نقطه شکست	4/8%
مدول الاستیسیته	72/4 گیگا پاسکال
نسبت پواسون	0/20
مدول برشی	30 گیگا پاسکال

حال که نوع ماتریس انتخاب شده و یک نوع تقویت کننده نیز متناسب با خواص مکانیکی مورد نظر برگزیده شده است، به ترکیب این دو جزء پرداخته و خواص آن بررسی می‌شود.

¹ E-Glass

² Glass chopped fiber(GCF)

³. rule of mixtures

تحلیلی آباکوس وارد کرده، سپس اطلاعات و خواص مورد نیاز آزمون‌ها در آباکوس برای منی فولد تعریف می‌شود.

3-1- آزمون سطح ارتعاش⁴

آزمون اول، آزمون سطح ارتعاش است که کل قطعه تحت ارتعاش در محورهای عمودی با دامنه بین 25 تا 250 هرتز قرار خواهد گرفت. بارگذاری بصورت سیکنالی، متناسب با دامنه ارتعاش تعیین شده بر روی قطعه اعمال خواهد شد.

با تعریف خواص کامپوزیت بصورت همسانگرد یا همان ایزوتروپیک در نرم‌افزار و با اعمال کمترین، بیشترین و حالت میانی از این دامنه ارتعاش، آزمون را در نرم‌افزار تحت شرایط زیر شبیه‌سازی کرده تا با توجه به هندسه قطعه نرم‌افزار ناحیه شکست را پیش‌بینی کند.

ابتدا خواص کامپوزیت را مطابق جدول 5 تعریف کرده و سپس شرایط دمایی مطابق تست پلن تعیین خواهد شد. شرایط دمایی آزمون، دمای اتاق یا همان 25 درجه سانتی‌گراد است و این دما می‌بایست در طول آزمون‌ها ثابت نگه داشته شود.

نمودار شکل 4 که در تست پلن منی فولد هوا آورده شده است، نشان دهنده تغییرات فرکانس نسبت به جابجایی متناظر با آن است. با استناد به این نمودار، در آزمون سطح ارتعاش برای انجام شبیه‌سازی، فرکانس 50 هرتز و جابجایی متناظر آن یعنی 0/8 میلی‌متر انتخاب شد.

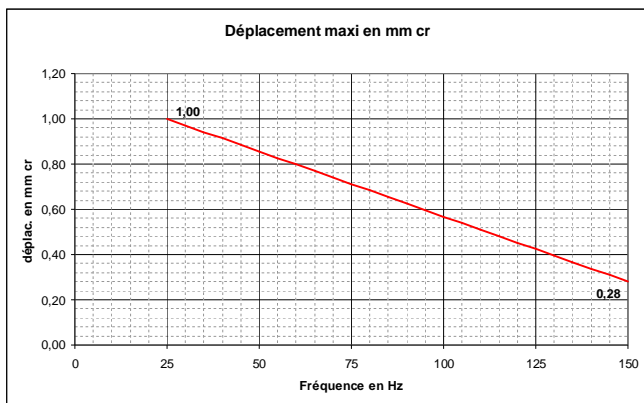


Fig. 4 Chart of frequency changes with respect to displacement

شکل 4 نمودار تغییرات فرکانس نسبت به تغییر مکان

برای انجام شبیه‌سازی فرکانس در نرم‌افزار آباکوس از تکنیک چرخه مستقیم⁵ در گزینه استپ⁶ استفاده می‌شود. لازم به ذکر است جهت افزایش دقت محاسبات تعداد ضرایب فوریه

تست‌های آزمایشگاهی مانند آزمون کشش نمونه دمبلی شکل، خواص مورد نظر کامپوزیت نهایی به شرح جدول 5 استخراج شد.



Fig. 3 Tensile test machine¹

شکل 3 دستگاه آزمون کشش

جدول 5 خواص کامپوزیت منتخب

Table 5 Properties of Selected composite

مدول الاستیسیته	24 گیگا پاسکال
چگالی	1/5 گرم بر سانتی‌متر مکعب
نسبت پواسون	0/21
تنش تسلیم	38 مگا پاسکال
ضریب انبساط	0001/0 m/m°k
کرنش نهایی	0/94

حال با داشتن مدل سه‌بعدی منی فولد و خواص ماده سازنده آن، می‌توان این قطعه را برای انجام آزمون‌های اعتبارسنجی قبل از تولید وارد نرم‌افزار تحلیلی آباکوس به روش المان محدود² کرده تا پس از انجام آزمون‌ها و موفقیت در آن‌ها وارد مرحله تولید شود که در آن مرحله نیز تحت آزمون‌های دیگری قرار گیرد.

3- آزمون‌های عددی

در این قسمت به شبیه‌سازی بخشی از آزمون‌هایی که در تست پلن منی فولد هوا بیان شده، پرداخته خواهد شد به طوری که قطعه طراحی شده در نرم‌افزار طراحی کتیا³ را در نرم‌افزار

⁴ Vibration Level

⁵ Direct Cyclic

⁶ Step

¹ Instron 1027 Frame With The 5000 Series Upgrade

² Finite Element Method (FEM)

³ Catia

تغییری نخواهد کرد. در نتیجه زمان محاسبات و شبیه سازی آزمون افزایش غیرمفید پیدا خواهد کرد، بنابراین اندازه مش 1 بهینه ترین اندازه برای این قطعه است و برای کلیه آزمون های منی فولد این مطلب اجرا خواهد شد.

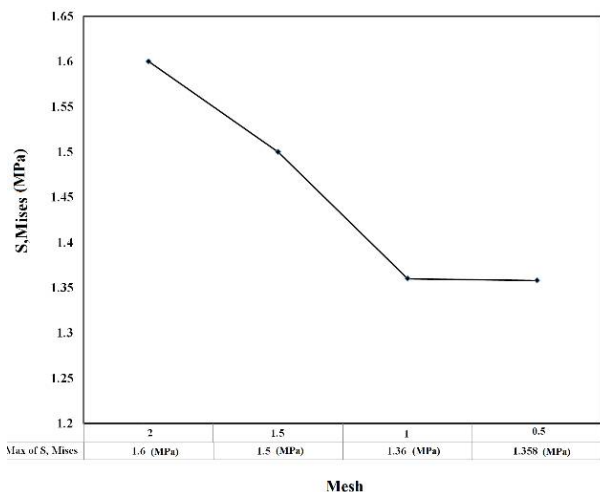


Fig. 7 Mesh Sensitivity chart

شکل 7 منحنی حساسیت مش

بدین ترتیب مطابق شکل 8 نوع مش با توجه به حل ایمپلیت⁴ که برای بارگذاری خستگی⁵ در نظر گرفته می شود، نوع قطعه و با توجه به چهار گره ای بودن و خطی⁶ بودن المان ها المان ها از مش اس فور آر⁷ استفاده شد.

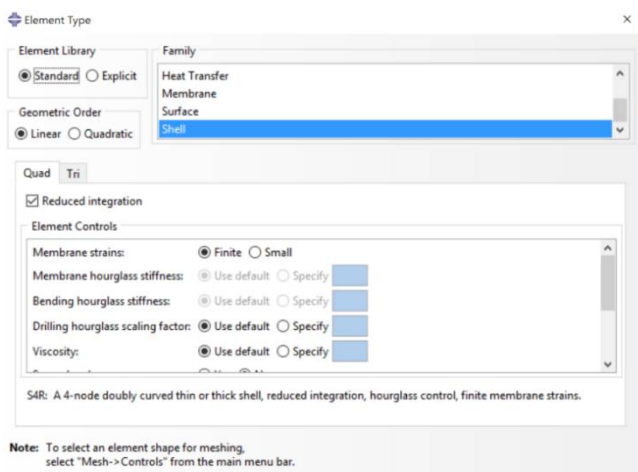


Fig. 8 Select the mesh type

شکل 8 انتخاب نوع مش

مراحل اولیه جهت آماده سازی آزمون سطح ارتعاش بیان شد، حال نتایج این آزمون که شامل فرکانس 50 هرتز و

⁴ Implicit

⁵ Fatigue

⁶ Linear

⁷ S4R

موجود در آباکوس 20 در نظر گرفته می شود. در مرحله بعد با در نظر گرفتن دوره زمانی چرخه¹ برابر 1، تعداد سیکل های بارگذاری مطابق 50 در نظر گرفته می شود. ناحیه تکیه گاه منی فولد مطابق کارکرد در وضعیت حقیقی قطعه تعیین و مطابق تست پلن در تمام جهات مقید شد. جهت بارگذاری در راستای محور Y مطابق شکل 5 می باشد و مقدار جابه جایی 0/8 میلی متر در نظر گرفته شد.

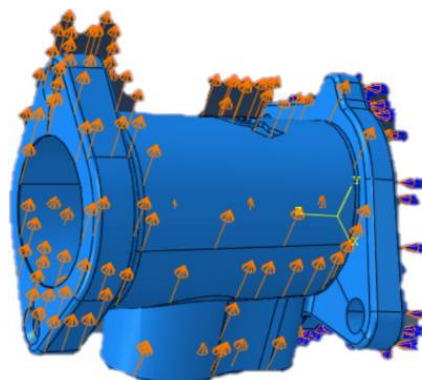


Fig. 5 Defining the direction of loading

شکل 5 اعمال جهت بارگذاری

مطابق شکل 6 در مرحله مش زنی قطعه به دلیل پیچیدگی هندسی آن از مش مربعی² از نوع آزاد³ استفاده شد و اندازه مش ها نیز طوری انتخاب شد که نتایج با کاهش اندازه مش ها تغییری نکند، با این کار زمان محاسبات نیز کاهش پیدا خواهد کرد. همچنین در این مرحله از تکنیک حل مسئله نوع استاندارد خطی بهره گرفته شد.

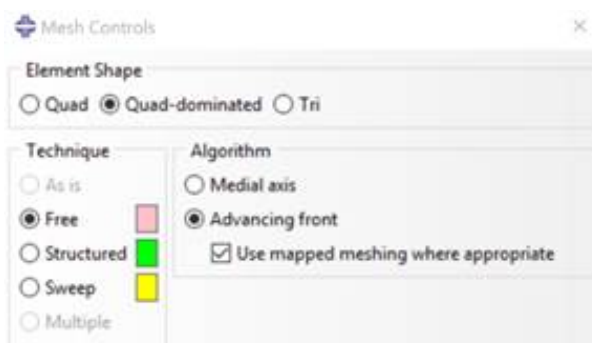


Fig. 6 Defining mesh control

شکل 6 مراحل مش زنی

در خصوص استقلال و حساسیت مش همان طور که در شکل 7 مشخص است، با کاهش اندازه مش کمتر از یک، نتایج

¹ Cycle Time Period

² Quad-Dominate

³ Free

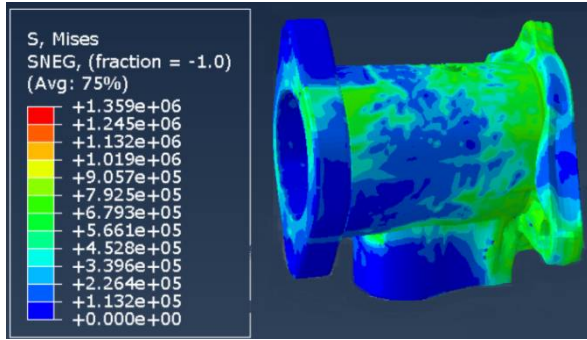


Fig. 11 Von Mises stress vibration level test (25 Hz)
 شکل 11 تنش فون میسرز آزمون سطح ارتعاش (25 هرتز)

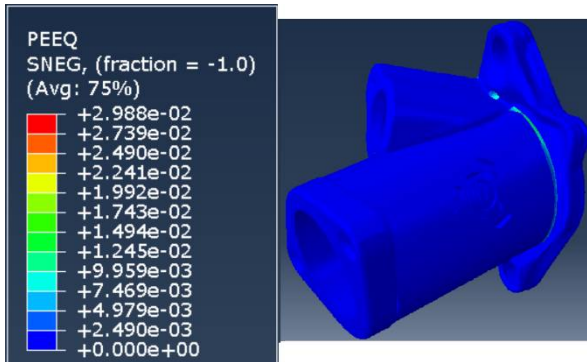


Fig. 12 Effective equivalent strain vibration level test (25 Hz)
 شکل 12 کرنش معادل مؤثر آزمون سطح ارتعاش (25 هرتز)

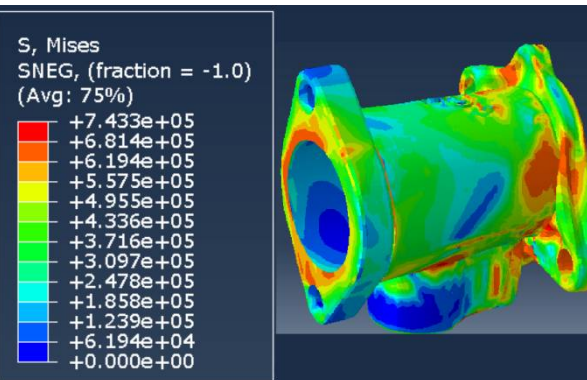


Fig. 13 Von Mises stress vibration level test (150 Hz)
 شکل 13 تنش فون میسرز آزمون سطح ارتعاش (150 هرتز)

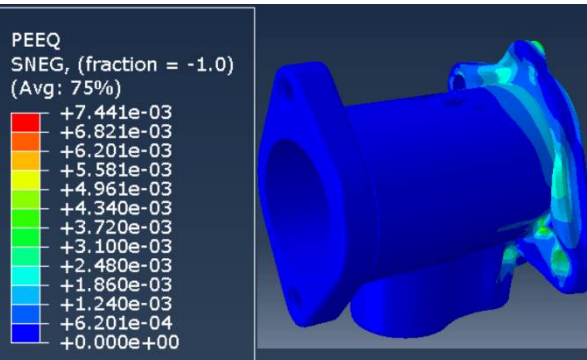


Fig. 14 Effective equivalent strain vibration level test (150 Hz)
 شکل 14 کرنش معادل مؤثر آزمون سطح ارتعاش (150 هرتز)

جابجایی 0/8 میلی متر است، پس از اتمام پردازش نرم افزار به صورت شکل های 9 و 10 می باشد.

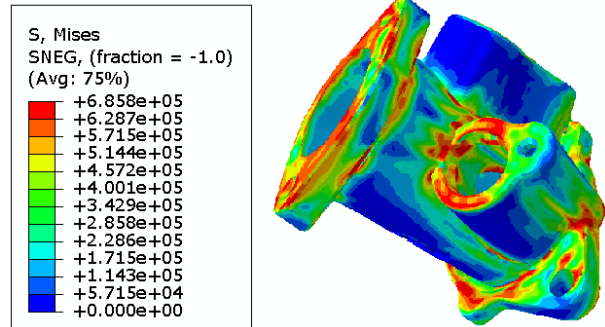


Fig. 9 Von Mises stress vibration level test (50 Hz)
 شکل 9 تنش فون میسرز آزمون سطح ارتعاش (50 هرتز)

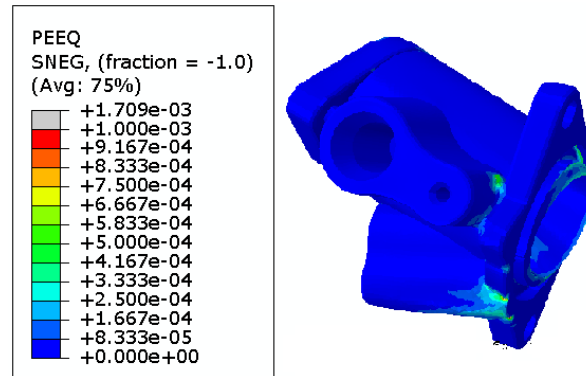


Fig. 10 Effective equivalent strain vibration level test (50 Hz)
 شکل 10 کرنش معادل مؤثر آزمون سطح ارتعاش (50 هرتز)

همان طور که در نتایج مشخص است بیشترین کرنش پلاستیک معادل 0/0017 و بیشترین تنش اعمال شده به قطعه در قسمت فلنچ ها می باشد که برابر 0/6 مگاپاسکال است، که این مقادیر کمتر از تنش تسلیم و کرنش نهایی قطعه می باشد و در نتیجه شکستی در قطعه رخ نخواهد داد.

در ادامه، این آزمون را در کمترین فرکانسی که در تست پلن آمده یعنی 25 هرتز، همراه با بیشترین جابجایی در نرم افزار تعریف کرده و سپس عملیات تحلیل اجرا می شود، نتایج پردازش به صورت شکل های 11 و 12 می باشد.

همان طور که نشان داده شد بیشترین کرنش پلاستیک معادل به وجود آمده 0/029 و بیشترین تنش وارد شده در فرکانس 25 هرتز که بیشترین جابجایی را نیز دارد، برابر با 0/1 مگاپاسکال است که این مقادیر آسیبی به قطعه نخواهد رساند. در ادامه بیشترین فرکانسی را که منی فولد می بایست تحمل کند (150 هرتز) به همراه کمترین جابجایی متناظر با آن را به قطعه اعمال کرده، نتایج در شکل های 13 و 14 به نمایش گذاشته شده است.

که حدوداً 1/2 میلی‌متر است در نظر گرفته شد. "منی فولد بر روی موقعیت اصلی خود با تمامی اتصالات می‌بایست به موتور متصل باشد" منظور شرایط تکیه‌گاه و بارگذاری می‌باشد که مطابق شرایط حقیقی قطعه تعریف شد. برای انجام شبیه سازی فرکانس در آباکوس از تکنیک دایرکت سیکلیک در گزینه استپ استفاده می‌شود. لازم به ذکر است جهت افزایش دقت محاسبات تعداد ضرایب فوریه موجود در آباکوس را 20 در نظر گرفته و با در نظر گرفتن سایکل تایم پیروید برابر 1 تعداد سیکل‌های بارگذاری حدود 15 مرتبه انتخاب گردید. ناحیه تکیه‌گاه قطعه را در تمام جهات مطابق شکل 5 مقید کرده و جهت بارگذاری منطقه اول در راستای محور Y و جابجایی محور 1/2 انتخاب شد. بدین ترتیب همان طور که در انتخاب نوع مش آزمون قبل گفته شد، نوع مش با توجه حل ایمپلیکیت که برای بارگذاری خستگی در نظر گرفته می‌شود، نوع قطعه و با توجه به چهار گره ای بودن و خطی بودن المان‌ها از مش اس فور آر استفاده شد.

مطابق شکل 16 بیشینه تنش وارده بر منطقه اول برابر با 13 مگاپاسکال و مطابق شکل 17 بیشترین کرنش پلاستیک معادل 0/5 است که کمتر از تنش تسلیم و کرنش نهایی قطعه می‌باشد، در نتیجه این آزمون بدون شکست و تغییر شکل پشت سرگذاشته خواهد شد.

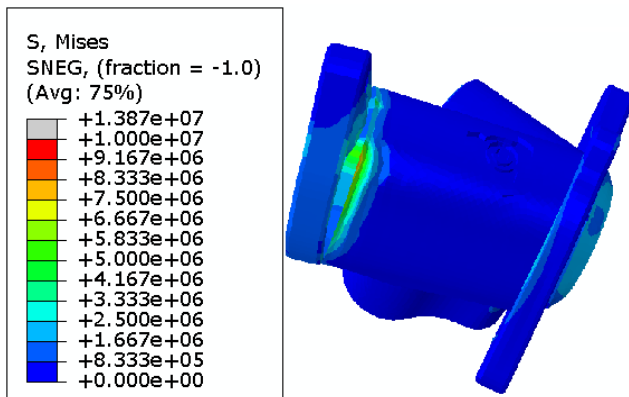


Fig. 16 Von Mises stress in the first zone of the vibration durability test
شکل 16 تنش فون میسز منطقه اول آزمون قابلیت ارتعاش

3-2-2- منطقه دوم

منطقه دوم که قسمت جانبی منی فولد است مطابق شکل 18 می‌باشد، این منطقه تحت فرکانس 30 هرتز و جابجایی متناظر با آن که حدوداً 1 میلی‌متر است، در نظر گرفته شده است. همان طور که در شکل 18 مشاهده می‌شود شرایط تکیه‌گاه و بارگذاری مطابق شرایط حقیقی قطعه تعریف شد.

همان‌طور که نشان داده شد بیشترین تنش و کرنش اعمال شده به قطعه در قسمت فلنج‌ها می‌باشد. بیشترین تنش وارد شده در فرکانس 150 هرتز که کمترین جابجایی را دارد، برابر با 0/7 مگاپاسکال و بیشترین کرنش پلاستیک معادل 0/007 است که این مقادیر آسیبی به قطعه نخواهند رساند. نتیجه بررسی شرایط این آزمون مشخص کرد اگرچه فرکانس‌های بالاتر فشار بیشتری به قطعه تحمیل می‌کند ولی منی فولد با کامپوزیت منتخب می‌تواند تمام شرایط آن را با موفقیت بگذراند.

3-2-2- آزمون قابلیت تحمل ارتعاش¹

آزمون دوم قابلیت تحمل ارتعاش است که به دلیل وجود لرزش‌های ممتد در موتور، این آزمون شبیه سازی شده تا این قطعه قبل از پرداخت هزینه‌های ساخت یکی از شرایط کارکرد حقیقی و دشوار خود را بصورت عددی تجربه کند. در این آزمون منی فولد به چهار تکیه‌گاه منطقه² اول، منطقه دوم، منطقه سوم و منطقه چهارم تقسیم شده و مطابق با شرایط موجود در تست پلن هر منطقه تحت شرایط فرکانس و جابجایی موجود به صورت جداگانه شبیه سازی خواهد شد.

ابتدا خواص مکانیکی و حرارتی ماده را از جدول شکل 5 استخراج کرده سپس هر یک از این چهار منطقه بصورت جداگانه تحت آزمون قرار خواهد گرفت تا با توجه به هندسه منی فولد، نرم‌افزار ناحیه شکست را پیش‌بینی کند.

3-2-2-1- منطقه اول

منطقه اول فلنج بالای منی فولد می‌باشد و مطابق شکل 15 انتخاب گردید.

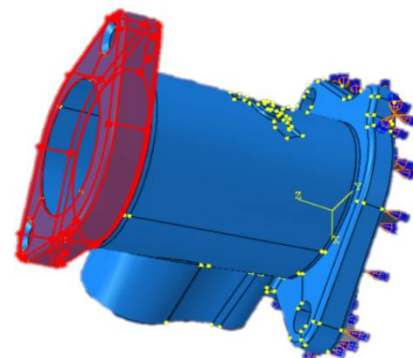


Fig. 15 Selecting the first zone in the vibration durability test
شکل 15 انتخاب منطقه اول در آزمون قابلیت تحمل ارتعاش

این منطقه تحت فرکانس 15 هرتز و جابجایی متناظر با آن

¹ Vibration Durability Test
² Zone

70 هرتز و جابجایی متناظر با آن که حدوداً 0/65 میلی متر است، در نظر گرفته شده است.

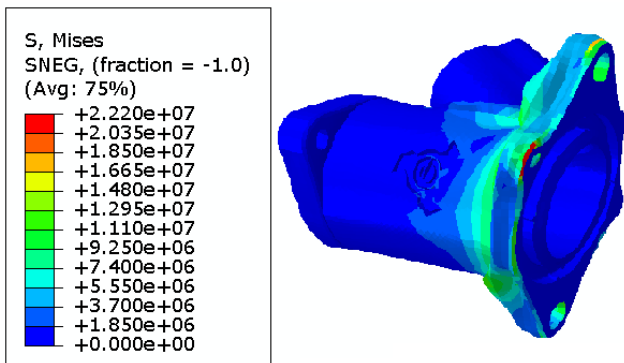


Fig. 19 Von Mises stress in the second zone of the vibration durability test

شکل 19 تنش فون میسز منطقه دوم آزمون قابلیت تحمل ارتعاش

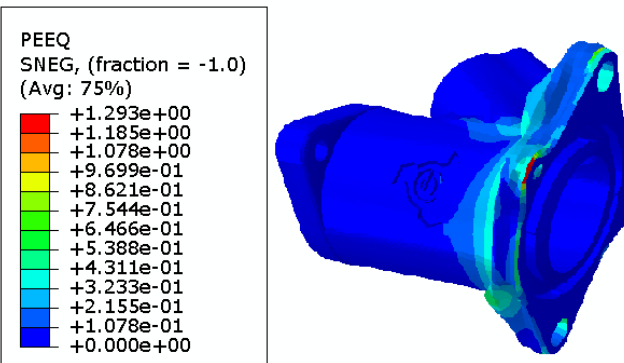


Fig. 20 Effective equivalent strain in the second zone of the vibration durability test

شکل 20 کرنش معادل مؤثر منطقه دوم آزمون قابلیت ارتعاش

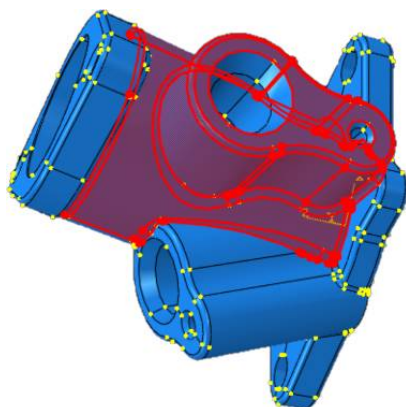


Fig. 21 Selecting the 3th zone in the vibration durability test

شکل 21 انتخاب منطقه سوم در آزمون قابلیت تحمل ارتعاش

برای شبیه سازی فرکانس از تکنیک دایرکت سیکلیک در گزینه استپ از مدول¹ استفاده می شود. تعداد ضرایب فوریه

¹ module

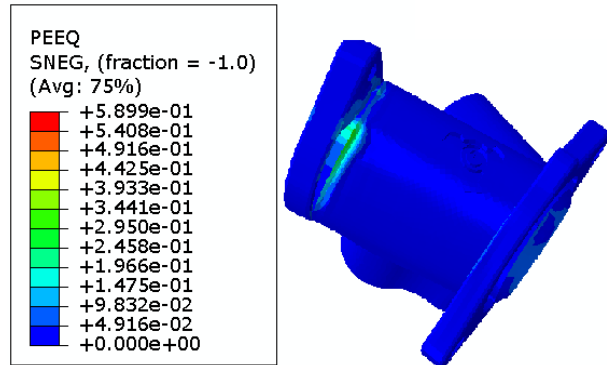


Fig. 17 Effective equivalent strain in the first zone of the vibration durability test

شکل 17 کرنش معادل منطقه اول آزمون قابلیت ارتعاش

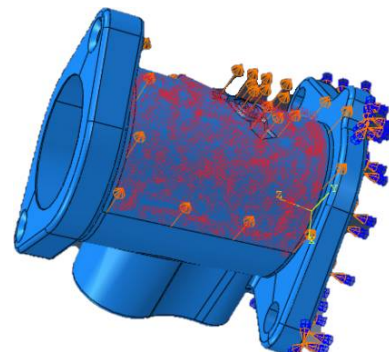


Fig. 18 Loading direction in the second zone for vibration durability test

شکل 18 منطقه دوم و جهت بارگذاری در آزمون قابلیت تحمل ارتعاش

برای انجام شبیه سازی فرکانس در آباکوس از تکنیک دایرکت سیکلیک در گزینه استپ استفاده می شود. لازم به ذکر است تعداد ضرایب فوریه موجود در آباکوس را 20 در نظر گرفته و با در نظر گرفتن سایکل تایم پرپود برابر 1 تعداد سیکل های بارگذاری برابر 30 مرتبه انتخاب شد، نوع مش با توجه حل ایمپلیکیت که برای بارگذاری خستگی در نظر گرفته می شود، با توجه به نوع قطعه، چهار گره ای بودن و خطی بودن المان ها از مش اس فور آر استفاده شد. پس از وارد کردن اطلاعات و معرفی شرایط قطعه و نوع آزمون در نرم افزار، حال می بایست نتایج آزمون را مورد بررسی قرار داد.

همان طور که در شکل 19 مشخص شده بیشینه تنش وارده بر منطقه دوم برابر با 22 مگاپاسکال است که کمتر از تنش تسلیم قطعه می باشد. در مورد کرنش پلاستیک معادل شکل 20 در یکی از نقاط فلنج بیشینه آن 1/29 می باشد که از حد نهایی کرنش کامپوزیت بیشتر است.

3-2-3- منطقه سوم

منطقه سوم که قسمت جانبی نشیمنگاه های منی فولد است، مطابق شکل 21 مشخص شده، این منطقه تحت فرکانس

قسمت پایین منی فولد است که تحت فرکانس 250 هرتز و جابجایی متناظر آن که 0/2 میلی متر است در نظر گرفته شد.

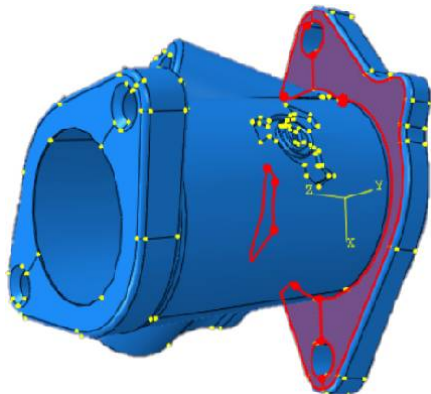


Fig. 24 Selecting the 4th zone in the vibration durability test

شکل 24 انتخاب منطقه چهارم در آزمون قابلیت تحمل ارتعاش

برای شبیه سازی فرکانس از تکنیک دایرکت سیکلیک در گزینه استپ از مدول استفاده شد. تعداد ضرایب فوریه 20، سایکل تایم پیروید 1 و تعداد سیکل های بارگذاری برابر 250 مرتبه انتخاب شد. نوع مش با توجه به حل ایمپلیکیت برای بارگذاری خستگی در نظر گرفته می شود، با توجه به نوع قطعه، چهار گره ای بودن و خطی بودن المان ها از مش اس فور آر استفاده شد. اندازه مش ها نیز طوری انتخاب شد که نتایج با کاهش اندازه مش ها تغییری نکند. پس از وارد کردن اطلاعات حال می بایست نتایج آزمون را مورد بررسی قرار داد.

همان طور که در شکل 25 نشان داده شد، بیشینه تنش وارده بر منطقه چهارم منی فولد برابر با 1/1 مگاپاسکال می باشد که بسیار کمتر از تنش تسلیم کل قطعه است. مطابق شکل 26 بیشینه کرنش پلاستیک معادل قطعه در این آزمون 0/02 و در ناحیه مجاز است که در نتیجه این آزمون با موفقیت گذرانده خواهد شد.

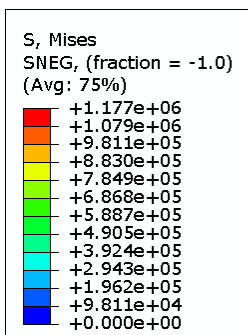


Fig. 25 Von Mises stress in the 4th zone of the vibration durability test

شکل 25 تنش فون میسر منطقه چهارم آزمون قابلیت تحمل ارتعاش

موجود در آباکوس را 20 در نظر گرفته و با در نظر گرفتن سایکل تایم پیروید برابر 1، تعداد سیکل های بارگذاری برابر 70 مرتبه انتخاب شد، نوع مش با توجه به حل ایمپلیکیت برای بارگذاری خستگی در نظر گرفته می شود، با توجه به نوع قطعه، چهار گره ای بودن و خطی بودن المان ها از مش اس فور آر استفاده شد. اندازه مش ها نیز طوری انتخاب شد که نتایج با کاهش اندازه مش ها تغییری نکند. پس از وارد کردن اطلاعات حال می بایست نتایج آزمون را مورد بررسی قرار داد.

همان طور که در شکل 22 نشان داده شد بیشینه تنش وارده بر منطقه سوم برابر با 22 مگاپاسکال می باشد که کمتر از تنش تسلیم کل قطعه است. در رابطه با کرنش پلاستیک معادل شکل 23 در نقاطی از فلنج بیشینه آن 20 می باشد که از حد نهایی کرنش کامپوزیت بیشتر است و دچار تغییر شکل پلاستیک خواهد شد.

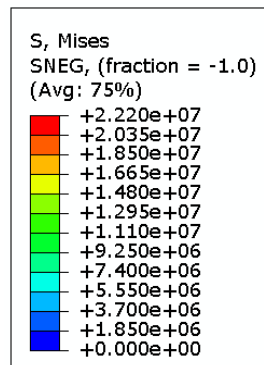


Fig. 22 Von Mises stress in the 3th zone of the vibration durability test

شکل 22 تنش فون میسر منطقه سوم آزمون قابلیت تحمل ارتعاش

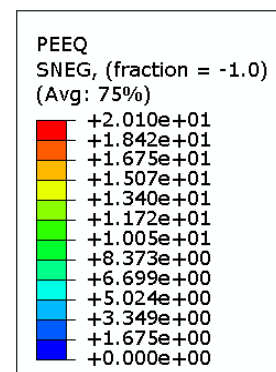


Fig. 23 Effective equivalent strain in the 3th zone of the vibration durability test

شکل 23 کرنش معادل مؤثر منطقه سوم آزمون قابلیت ارتعاش

3-2-4- منطقه چهارم

منطقه چهارم همان طور که در شکل 24 مشخص شده فلنج

آزمون بسیار کمتر از تنش تسلیم می‌باشد و در رابطه با کرنش در دو منطقه در نواحی فلنج تغییر شکل داشته که با تقویت و تبدیل آن نواحی به فلنج فلزی این مشکل رفع خواهد شد. روش ساخت این قطعه بدین صورت است که دو فلنج فلزی را درون قالب سیلیکونی قرار داده سپس کامپوزیت مایع درون قالب تزریق خواهد شد. ناحیه اتصال فلنج به بدنه را جهت اتصال قوی تر می‌بایست خط انداخته تا از حالت صیقل خارج شود و به اصطلاح کامپوزیت بر روی فلز بنشیند.

پس از انجام آزمون‌های عددی حال می‌بایست جهت صحت سنجی مدل ارائه شده قطعه در شرایط حقیقی آزمون در آزمایشگاه قرار گیرد. قطعه نهایی دارای بدنه‌ای کامپوزیتی و فلنجهایی از جنس فلز می‌باشد که آن را بر روی موتور نصب کرده و موتورسیکلت بر روی شاسی تست موتور مطابق شکل 27 قرار داده شد. منیفولد مذکور صد ساعت آزمون عملکرد موتوری را بدون شکست و توقف طی کرد و پس از اتمام آزمون با انجام بازرسی‌های چشمی مرسوم هیچ گونه آسیب، ترک و یا شکستی در قطعه مشاهده نشد به عبارتی نتیجه این آزمون مثبت بوده و قطعه می‌تواند در این شرایط کاری قرار گیرد. لازم به ذکر است این آزمون در آزمایشگاه توسعه قوای محرکه دینا که آزمایشگاه همکار و معتمد اداره استاندارد ایران است، انجام گرفت.



Fig. 27 motorcycle dynamometr

شکل 27 دینامومتر موتورسیکلت

از دیگر آزمون‌های حقیقی و آزمایشگاهی که بر روی این قطعه انجام گرفت، آزمون غوطه‌وری است که پس از 48 ساعت درون بنزین همانند شکل 28 و 48 ساعت درون تینر هیچ آثار خرابی و خوردگی در قطعه دیده نشد.

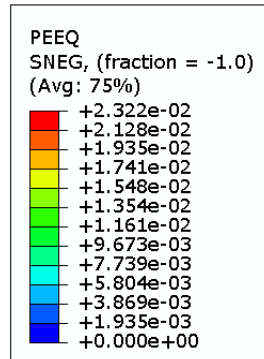


Fig. 26 Effective equivalent strain in the 4th zone of the vibration durability test

شکل 26 کرنش معادل مؤثر منطقه چهارم آزمون قابلیت تحمل ارتعاش

آزمون قابلیت ارتعاش در هر چهار منطقه بررسی شد که از نظر تنش وارد شده در تمامی مناطق نتیجه مثبت بود و شکستی رخ نخواهد داد. کرنش‌های وارده بر منیفولد در منطقه دوم و سوم از بیشینه کرنش قابل تحمل کامپوزیت بیشتر بوده و نتیجه این است که قطعه در آن نواحی (فلنج) تغییر شکل خواهد داشت. به استناد نتایج مذکور جهت تقویت قطعه هر دو فلنج منیفولد را فلزی کرده و بدنه آن کمافی‌السابق از کامپوزیت ساخته شد، با این تغییر منیفولد دیگر در آن دو آزمون تغییر شکلی پیدا نخواهد کرد.

4- جمع‌بندی

بطور کلی نتایج مستخرج از این تحقیق نشان می‌دهد که در آزمون اول (سطح ارتعاش) قطعه تحت ارتعاش در محورهای عمودی با دامنه بین 25 تا 250 هرتز می‌باشد. با تعریف خواص کامپوزیت در نرم‌افزار و با اعمال کمترین، بیشترین و حالت میانی از این دامنه ارتعاش شرایط این آزمون در آباکوس شبیه سازی شد، پس از اعمال شرایط و اتمام آزمون بیشترین تنش و کرنش وارد شده در فرکانس‌های مختلف را استخراج و با بیشینه کرنش و تنش که قطعه می‌تواند تحمل کند مقایسه شد. مقایسه بین آنها نشان داد که این مقدار تنش و کرنش آسیبی به قطعه نخواهد رساند. در نتیجه بررسی شرایط این آزمون مشخص شد که منیفولد با کامپوزیت منتخب می‌تواند تمام شرایط آن آزمون را با موفقیت بگذراند. در آزمون دوم (قابلیت تحمل ارتعاش) منیفولد به چهار منطقه تقسیم شد تا هر منطقه یک فرکانس و جابجایی مستقل را تحمل کند، پس از اعمال شرایط آزمون در هر یک از مناطق و بررسی خروجی تحلیلی آن‌ها در نرم‌افزار، بیشینه کرنش و تنش اعمالی در هر منطقه با کرنش نهایی و تنش تسلیم قطعه مقایسه شد که تنش‌های وارده در حین

مالی و ارائه مشاوره‌های مهندسی به نویسندگان و از شرکت گسترش انرژی نوین جهت اعتماد و تعریف پروژه و در انتها از شرکت توسعه قوای محرکه دینا جهت در اختیار گذاشتن امکانات و آزمایشگاه‌های خود جهت پیشرفت پروژه تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

7- مراجع

- [1] Saverio Affatato, Alessandro Ruggiero, Massimiliano Merola, Advanced biomaterials in hip joint arthroplasty. *A review on polymer and ceramics composites as alternative bearings*, journal homepage, 2015.
- [2] Dong-Hyun Kim, Ku-Hyun Jung, Dug-Joong Kim, Sung-Hyeon Park, Do-Hyoung Kim, Jaeyoung Lim, Byeung-Gun Nam, Hak-Sung Kim, Improving pedestrian safety via the optimization of composite hood structures for automobiles based on the equivalent static load method. *Composite Structure*, journal homepage, 2017.
- [3] Yiru Wang, Wanshuang Liu, ID, Yiping Qiu and Yi Wei, A One Component, Fast-Cure, and Economical Epoxy Resin System Suitable for Liquid Molding of Automotive Composite Parts. *Materials* 2018, 11,685; doi: 10.3390/ma11050685, 2018.
- [4] Meysam Nouri-Niyaraki, Faramarz Ashenai Ghasemi, Ismail Ghasemi, Sajad Daneshpayeh, Experimental analysis of graphene nanoparticles and glass fibers effect on mechanical and thermal properties of polypropylene/EPDM based nanocomposites, *Scientific and Research Journal of Composite Science and Technology*, No. 2, pp. 169-176, 2018. (فارسی)
- [5] Surender Kumar, R.S Bharj, Emerging composite material use in current electric vehicle. *Materials Today*, Proceedings 5, 2018.
- [6] J.S. Sidhu, G.S. Lathkar, S.B. Sharm, Design of Epoxy based Resin Composites for Automotive Applications. *A Case Study on IC Engine Valve Guide*, 2019.
- [7] Emma Bennett Huntley, Epoxy Resin vs Vinyl ester vs Polyester Use and Application Overview. *Composite Resin Developments*, 2014.
- [8] Mohammad Ali Mashadi Jafari Sohi, *The feasibility of using composites as an alternative to polyamide engine Parts*, Master Thesis, Department of Aerospace Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2019. (فارسی)
- [9] Mohammad Ali Mashadi Jafari Sohi, Amin farrokh abadi, Use of composites as a substitute for engine polyamide parts under vibration loading, *The 28th Annual International Conference of the ISME*, Tehran, Iran, May 27-29, 202. (فارسی)



Fig. 27 Immersion in gasoline

شکل 28 غوطه وری در بنزین

5- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پروژه حذف یکی از محدودیت‌های ساخت (همان محدودیت تیراژ پایین در ساخت قالب‌های فلزی) بود و به همین دلیل ماده اولیه، کامپوزیت گرماسخت انتخاب شد که روش ساخت بسیار کم هزینه ای (حدود 1%) در مقایسه با قالب‌های فولادی دارد. مهمترین نتایج این مقاله عبارتند از:

- استفاده از هر قالب سیلیکونی می‌تواند تولید چنین قطعه‌ای را تا تیراژ 100 عدد بدون تعویض قالب پوشش دهد.
- کامپوزیت منتخب مقاومت بسیار مناسبی در محیط‌های شیمیایی دارد بطوری که پس از انجام آزمون غوطه وری در بنزین و تینر حدود 48 ساعت خوردگی در قطعه ایجاد نشد.
- آزمون‌های ارتعاشی بیان شده در این تحقیق، شبیه ساز شرایط بحرانی این قطعه در موتور بوده و با تعریف آن‌ها در نرم‌افزار یکی از بحرانی‌ترین حالات منی فولد یعنی لرزش موتور، مورد بررسی قرار گرفته شد. نتیجه بررسی آزمون‌های عددی تقویت نواحی دو فلنج می‌باشد.
- برای صحت‌سنجی مدل ارائه شده، منی فولد را در آزمایشگاه موتور و در شرایط واقعی تحت آزمون عملکرد به مدت 100 ساعت قرار داده و به بررسی قطعه پرداخته شد. نتیجه آزمون حقیقی مطابق با آزمون عددی بوده، در نتیجه می‌توان ادعا کرد این قطعه 100% مناسب کارکرد در چنین محیط و شرایطی است.
- از دیگر نتایج این پروژه در حوزه طراحی، مقاومت سازه‌ای و جواب‌دهی کامل سیالاتی منی فولد بوده که بدون هیچ کمبود تنفسی در موتور و یا اخلاص جریانی انجام شد.

6- تقدیر و تشکر

از شرکت توسعه سامانه‌های الکترونیک دینا جهت پشتیبانی