

## تحلیل فرو رفتگی بدنه محفظه احتراق موتور پیشران فضایی

سعید ابراهیمی<sup>۱\*</sup>، مهدی مظفری نوشری<sup>۲</sup>، محمد ابوطالبی<sup>۳</sup>، فرهاد سیف<sup>۴</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانشگاه شیراز

۲- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۳- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۴- کارشناس ارشد شیمی پیشران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

\* نویسنده مخاطب، j.seadalian@gmail.com

### چکیده

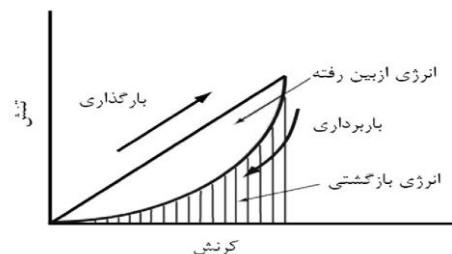
در محفظه احتراق موتور پیشران جامد، پیشران و اکسید کننده در کنار یکدیگر قرار دارد بنابراین جابجایی موتور با دقت و وسواس زیادی انجام می شود تا موتور دچار ضربه نشود. در برخی موارد در اثر ضربه احتمالی وارده به بدنه موتور، ممکن است شکل بدنه در محل ضربه تغییر کند و پیشران در داخل موتور تحت تنش و کشش قرار گیرد. در این موارد تصمیم گیری در خصوص بکارگیری موتور پیشران بسیار سخت است. در این مقاله یک صدمه واقعی ایجاد شده بر روی بدنه موتور مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تنش های وارده به پیشران جامد در محدوده مجاز پیشران بوده و توانایی ایجاد نقص در پیشران را نداشته است.

**واژه های کلیدی:** پیشران جامد- فرورفتگی- استحکام کششی- استحکام فشاری- آباکوس

### ۱- مقدمه

هر گونه آسیب در گرین پیشران ممکن است موجب بروز اشکال در انجام ماموریت موتور شود بنابراین نگهداری و حمل و نقل موتور پیشران جامد باید با تمهیدات ویژه ای باشد.

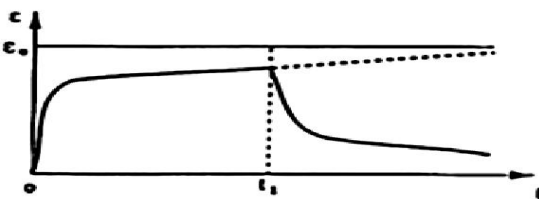
پیشران جامد رفتاری وابسته به زمان و دما از خود نشان می دهد و به عنوان یک ماده ویسکوالاستیک در نظر گرفته می شود [۱]. همانگونه که در نمودار تنش کرنش شماتیک شکل ۱ نشان داده شده، در این مواد بخشی از انرژی که در اثر بارگذاری در ماده ذخیره می گردد، در هنگام باربرداری به علت خاصیت مستهلک کنندگی ویسکوزی تلف می شود و بخش دیگر به صورت تدریجی آزاد می گردد. در نتیجه رفتار مکانیکی ماده تابعی از زمان می گردد [۲].



شکل ۱- استهلاک انرژی در مواد ویسکوالاستیک [۲].

در صورتی که به یک ماده ویسکوالاستیک یک تنش ثابت اعمال شود، مطابق شکل ۲ در ابتدا کرنش با شیب زیادی افزایش می یابد و سپس شیب نمودار به تدریج کاهش یافته و به یک مقدار حدی می رسد که پس از آن در همین مقدار ثابت باقی می ماند. پس از باربرداری، مجدداً کرنش ابتدا با

شیب زیادی کاهش می یابد و در نهایت با افزایش زمان به صفر یا یک مقدار ثابت مشخصی می رسد [۳].



شکل ۲- اعمال تنش ثابت و پاسخ ماده ویسکوالاستیک به آن [۳].

در صورتی که ماده ویسکوالاستیک تحت تنش (یا کشش) قرار بگیرد و به مقدار مشخصی فشرده (یا کشیده) شود و این جابجایی ثابت نگه داشته شود، تنش وارده به پیشران با گذشت زمان به تدریج کاهش خواهد یافت و به یک مقدار حدی خواهد رسید [۴]. در صورتی که ماده ویسکوالاستیک مدت زمان طولانی در این شرایط قرار بگیرد، با برداشتن محدودیت ها، تنها بخشی از جابجایی ایجاد شده بر می گردد و بخش دیگر آن در اثر تغییر در ساختار مولکولی تلف خواهد شد [۵]. لازم به ذکر است عمر یک ماده ویسکوالاستیک وقتی که تحت تنش (یا کشش) دائمی باشد، به طور محسوسی کاهش خواهد یافت [۶].

تعیین خواص و توصیف رفتار پیشران های جامد کار بسیار دشواری است. پاسخ این مواد به شکل پیچیده ای وابسته به شرایط بارگذاری (راستا، اندازه و نرخ بارگذاری)، شرایط محیطی (دما، فشار و رطوبت) و تاریخچه بارگذاری می باشد. مدل هایی که به طور متداول برای توصیف رفتار پیشران در تحلیل سازه ای گرین های پیشران جامد مورد استفاده قرار می گیرند، مدل های ساده سازی شده ای نسبت به رفتار واقعی این ماده هستند که طیفی از مدل های الاستیک خطی تا ویسکوالاستیک غیرخطی را در بر می گیرند. رویکرد معمول در تعیین خواص پیشران های جامد، در نظر گرفتن آن ها به عنوان مواد ویسکوالاستیک خطی است که فرضیات همگن بودن و اصل جمع آثار زمان و دما برای آن ها برقرار است [۷].

### ۲- صورت مساله

موتور پیشران جامد در شرایط انبارداری در اثر ضربه ناشی از شاخک های لیفتراک دچار فرورفتگی شده است. فشار عملکردی موتور ۷۰ bar می باشد. هدف از حل این مساله بررسی و نتیجه گیری در خصوص امکان بهره برداری از این موتور می باشد. این فرورفتگی در قسمتی از بدنه موتور ایجاد شده که دارای ابعاد ذیل می باشد. قطر موتور در قسمتی از بدنه به میزان 4 mm

و صحه گذاری شده و نهایتاً تحلیل تنش مقطعی از موتور که دچار فرورفتگی شده است در شرایط انبارداری بررسی می گردد.

از آنجائیکه سازه مورد تحلیل دارای خواص ویسکوالاستیک می باشد، این امر نحوه مدلسازی و تحلیل را نسبت به حالت الاستیک، پیچیده و متمایز می کند. برای تحلیل ویسکوالاستیک به هندسه سازه، خواص الاستیک، خواص متغیر با زمان و بارگذاری و شرایط مرزی نیاز است. بنابراین روند تحلیل به صورت زیر می باشد:

الف- تعریف مسئله و مدلسازی

ب- تعیین خواص سازه

ج- شرایط مرزی و بارگذاری

د- شبکه بندی

ه- بررسی همگرایی نتایج

در میان روندهای فوق تنها مرحله ای که نسبت به مواد الاستیک دارای پیچیدگی می باشد، مرحله تعیین خواص می باشد. با مشخص کردن دقیق

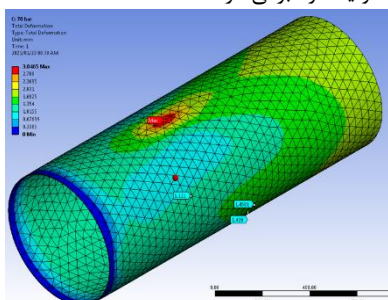
این مرحله می توان از کیفیت تحلیل اطمینان حاصل نمود.

در این گزارش، در مرحله اول برگشت پذیری ناشی از فرورفتگی بدنه موتور بررسی شده و نهایتاً تنش وارد بر پیشرانه در اثر این فرورفتگی بررسی می گردد.

#### ۴- مدلسازی و حل عددی

موتور مورد مساله در شرایط انبارداری دچار فرورفتگی شده است. این فرورفتگی در قسمتی از بدنه موتور ایجاد شده که دارای ابعاد ذیل می باشد. قطر موتور در قسمتی از بدنه به میزان ۴ mm فرورفتگی داشته و میزان این فرورفتگی در طول موتور ۳۰۰ mm گزارش شده است. همچنین این میزان در راستای شعاعی ۱۵۰ mm می باشد. بدین منظور موتور مورد نظر با قطر بیرونی ۶۱۶ mm و ضخامت ۳ mm مدل شده و در قسمتی از بدنه، فرورفتگی ذکر شده در بالا اعمال گردید. فرآیند تحلیل در ۵ مرحله انجام گردید:

**مرحله اول:** مدل سازی و تحلیل بدنه موتور بدون ماده ویسکوالاستیک با فرورفتگی سه بعدی در فشار ۷۰ bar. به منظور بررسی میزان برگشت پذیری پوسته موتور در ثانیه اول کارکرد موتور، لوله موتور با نقص ایجاد شده بر روی آن مدل شده و تحت فشار ۷۰ bar قرار گرفت. کانتور جابجایی بر روی بدنه موتور در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می گردد با اعمال فشار ۷۰ bar، ۳ mm از میزان فرورفتگی ۴ mm بدنه موتور به حالت اولیه خود برمی گردد.



شکل ۳- کانتور جابجایی بر روی بدنه موتور

فرورفتگی داشته و میزان این فرورفتگی در طول موتور 300 mm می باشد. همچنین این میزان در راستای شعاعی 150 mm می باشد.

#### ۳- روش حل مساله

صدمه ایجاد شده در بدنه موتور به گونه ای است که پیشرانه هم تحت فشار و هم تحت کشش قرار دارد. حدود ۱۸ سال بعد از تولید این موتور، بدنه آن دچار نقص شده و یک سال بعد از این حادثه قرار است مورد بهره برداری قرار بگیرد. خواص مکانیکی دوره ای پیشرانه موتور مطابق جدول ۱ می باشد. همانطور که مشاهده می گردد استحکام ماده ویسکوالاستیک به طور میانگین ۰/۹ MPa می باشد.

جدول ۱- خواص مکانیکی دوره ای پیشرانه موتور.

تاریخ	تنش ماکزیمم N/mm <sup>2</sup>	کرنش ماکزیمم %	مدول N/mm <sup>2</sup>	سختی Shore A
سال اول	0.92	55.8	3.28	61.8
سال پنجم	0.88	46.68	3.79	68
سال ششم	0.94	48.29	4	62.5
سال هفتم	1.0	52.24	4.14	64.5

بدیهی است اقدام اول برای بهره برداری از موتور یاد شده، انجام تست اشعه ایکس می باشد تا احتمال وجود ترک در پیشرانه در محل ضربه بررسی شود. با استارت موتور، بخشی از فرورفتگی ایجاد شده بر روی بدنه در پیک اولیه کارکرد موتور برمی گردد. سناریوهایی که ممکن است برای گرین پیشرانه بوجود آمده باشد بدین صورت است:

الف- در صورت مشاهده ترک در تست اشعه ایکس باید از تست موتور اجتناب شود چون بعد از روشن شدن موتور و ایجاد فشار بر روی گرین پیشرانه، ترک به سرعت رشد کرده و به سطح سوزش می رسد و عملکرد موتور دچار شکست می شود [۸].

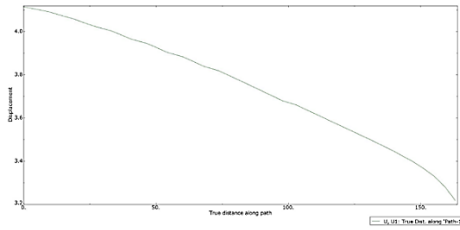
ب- در صورتی که ترک در محل ضربه مشاهده نشود، با توجه به گذشت حدود ۱۹ سال از زمان تولید پیشرانه، ممکن است پیشرانه دچار کهنگی شده باشد و بلافاصله بعد از روشن شدن موتور و برگشتن بخشی از فرورفتگی نتواند همراه بدنه برگردد و دچار ترک شود. در این حالت ترک به سرعت به سمت سطح گرین رشد می کند و موتور دچار شکست می شود [۸].

برای پیدا کردن جواب مساله ابتدا مدلسازی عددی انجام شد تا میزان برگشت بدنه و میزان تنش وارده به پیشرانه تعیین شود. سپس استحکام فشاری و کششی پیشرانه اندازه گیری شد و نتایج آن با نتایج محاسبات بدست آمده مقایسه شد.

سازه های مورد استفاده در موتورهای پیشرانه جامد متنوع بوده و معمولاً هندسه های بدست آمده برای گرین این موتورها براساس نوع استفاده آن طراحی می شوند، به گونه ای که بتواند پیشرانگی مطابق با عملکرد آن برای موتور فراهم کنند.

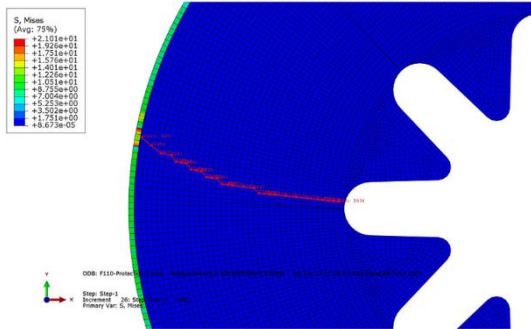
از طرفی بارهای اعمالی بر سازه نیز شامل بارهای ناشی از فشار، حمل و نقل و شرایط انبارداری بوده و شبیه سازی این سازه با استفاده از نرم افزار آباکوس انجام می شود. همچنین علاوه بر ماتریال سازه، پیشرانه بکار رفته در موتور پیشرانه جامد دارای خواص ویسکوالاستیک می باشد. به همین منظور ابتدا روند شبیه سازی ماده ویسکوالاستیک در نرم افزار آباکوس انجام

شکل ۵- کانتور جابجایی بدنه موتور

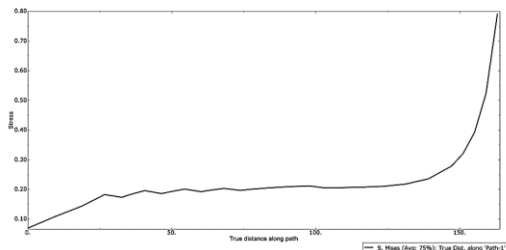


شکل ۶- میزان جابجایی پیشرانه در مسیر انتخاب شده

در شکل ۷ کانتور تنش موتور نشان داده شده است. به منظور بررسی میزان تنش در پیشرانه، مسیری مطابق شکل ۷ انتخاب شده و میزان تنش در مسیر ذکر شده ترسیم گردید. ( شکل ۸).



شکل ۷- مسیر تعریف شده در کانتور تنش

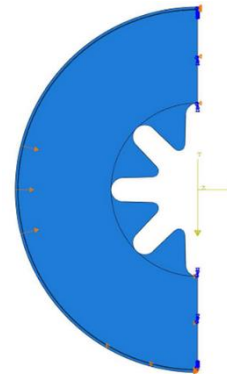


شکل ۸- تنش بر روی مقطع موتور در مسیر تعریف شده

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می گردد، میزان تنش در محل اتصال پیشرانه به لاینر حدود  $0/6 \text{ MPa}$  بوده و در طول مسیر افزایش می یابد. همچنین تنش در انتهای مسیر به  $0/8 \text{ MPa}$  می رسد که با توجه به محدوده مجاز تنشی تعریف شده در موتور ( $0/65 \text{ MPa}$  تا  $0/9 \text{ MPa}$ ) تنش پیشرانه در محدوده مجاز می باشد.

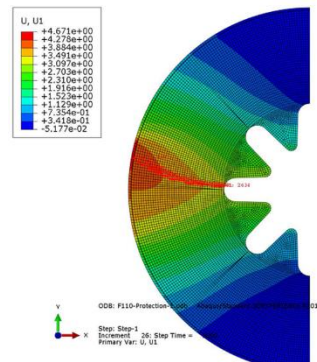
نهایتاً به منظور بررسی میزان جدایش لاینر از پیشرانه و بدنه، نتایج تحلیل در گرین به روش Traction Separation law بررسی و در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می گردد با توجه به بارگذاری فشاری وارد بر پیشرانه، در تمامی مقاطع، میزان چسبندگی لاینر خوب بوده و جدایشی مشاهده نمی گردد.

مرحله دوم: مدل سازی و تحلیل بدنه موتور به همراه ماده ویسکو الاستیک با حداکثر فرورفتگی  $4 \text{ mm}$  در طول عیب در راستای شعاعی. حال به منظور بررسی دقیق تر رفتار موتور در اثر فرورفتگی، مقطعی از موتور به همراه پیشرانه و لاینر مدل شده و رفتار ویسکو الاستیک پیشرانه در آن مقطع بررسی گردید. از آنجائیکه مقطع فرورفتگی مشخص نشده است، به دلخواه مقطعی با فاصله  $1007 \text{ mm}$  از سمت سر موتور انتخاب و در نرم افزار آباکوس مدل شد. در شکل ۴ مقطع ترسیم شده به همراه شرایط اولیه و شرایط مرزی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می گردد با توجه به تقارن در گرین موتور،  $180^\circ$  درجه از مقطع ترسیم شده (به علت انجام سریعتر مراحل حل) و از قید تقارن محوری استفاده شده است. همچنین مجموعه تحت بار انبارداری قرار گرفته است و از سمت چپ دچار فرورفتگی  $4 \text{ mm}$  شده است. گفتنی است قطعی که دچار این فرورفتگی می شود  $150 \text{ mm}$  می باشد (کلیه قطاع  $4 \text{ mm}$  به سمت داخل فرو می رود). بنابراین مساله در سختگیرانه ترین حالت مدل شده تا تنش های اعمالی به پیشرانه تعیین گردد. همچنین زمان حل مساله  $1000$  ثانیه در نظر گرفته شد. زیرا در این مدت، مساله به حالت پایدار رسیده و تغییرات تنش و جابجایی در آن یکنواخت می گردد.

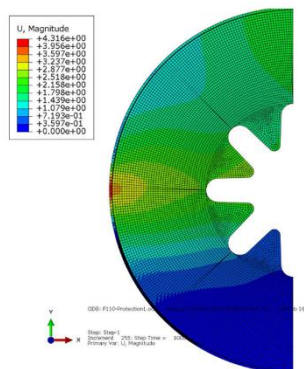


شکل ۴- شرایط مرزی و اولیه در مقطع موتور

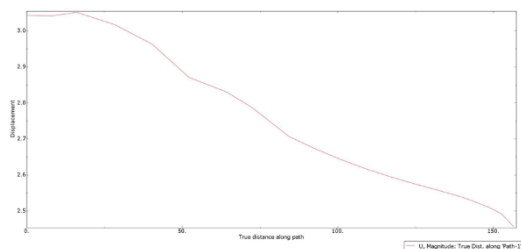
در شکل ۵ کانتور جابجایی موتور نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می گردد با اعمال میزان جابجایی  $4 \text{ mm}$  بر روی بدنه موتور، ماکزیمم جابجایی در مقطع کوچکی از بدنه موتور به  $4/6 \text{ mm}$  می رسد. همچنین به منظور بررسی میزان جابجایی در پیشرانه، مسیری مطابق شکل ۵ انتخاب شده و میزان جابجایی در مسیر ذکر شده ترسیم گردید. ( شکل ۶). همانطور که مشاهده می گردد میزان جابجایی پیشرانه از محل لاینر تا انتهای گرین پیشرانه از  $4 \text{ mm}$  به حدود  $3/2 \text{ mm}$  می رسد.



همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می گردد، میزان تنش در انتهای مسیر به  $0.4 \text{ MPa}$  می رسد که نسبت به حالت قبلی شرایط معقول تری مشاهده می گردد. در شکل ۱۳ و ۱۴ کانتور جابجایی بدنه موتور و میزان جابجایی در مسیر مشخص شده نشان داده شده است. در این شرایط بارگذاری، ماکزیمم جابجایی در محل نشان داده شده  $2.45 \text{ mm}$  می باشد.

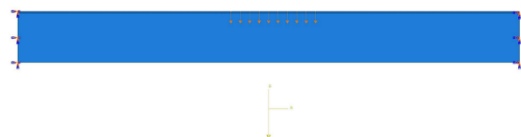


شکل ۱۳- کانتور جابجایی بدنه موتور



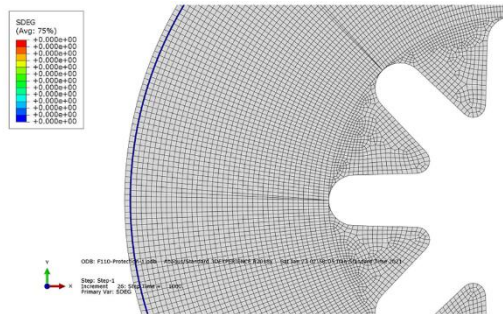
شکل ۱۴- جابجایی بر روی مقطع موتور در مسیر تعریف شده

مرحله چهارم: مدل سازی و تحلیل بدنه موتور به همراه ماده ویسکو الاستیک با مدل سازی واقعی فرورفتگی در راستای طولی. به منظور بررسی رفتار موتور در راستای طولی، (مطابق شکل ۱۵) برشی در راستای محوری موتور در نظر گرفته شده و در آن میزان فرورفتگی به صورت واقعی (مطابق شرایط قسمت قبل)، شبیه سازی گردید.



شکل ۱۵- مدل موتور در مقطعی طولی راستای محوری

در شکل ۱۶ و ۱۷ کانتور تنش و جابجایی در مقطع طولی موتور نشان داده شده است. همچنین به منظور بررسی دقیق تر رفتار تنشی و جابجایی، مسیری مطابق شکل ۱۵ تعریف گردید. همانطور که در شکل ۱۸ مشاهده می گردد، میزان ماکزیمم جابجایی در پایین گرین،  $3 \text{ mm}$  می باشد و با حرکت در راستای محور موتور این عدد کاهش می یابد.

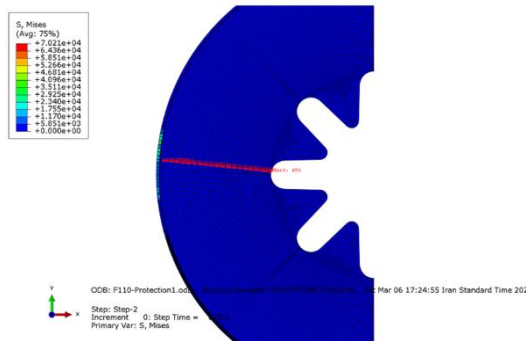


شکل ۹- وضعیت جدایش لاینر

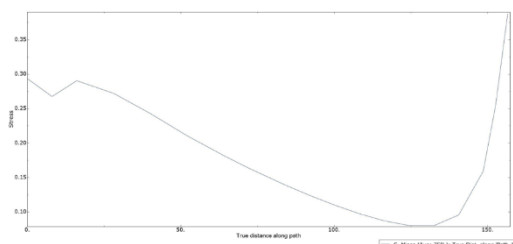
مرحله سوم: مدل سازی و تحلیل بدنه موتور به همراه ماده ویسکو الاستیک با مدل سازی واقعی فرورفتگی در راستای شعاعی. برای بررسی دقیق تر رفتار موتور در اثر فرورفتگی، الگوریتم جدیدی جهت شبیه سازی حالت واقعی تعریف گردید. بدین منظور، در سمت بالا و پایین فرورفتگی، میزان جابجایی صفر و هر چه به سمت مرکز آن نزدیک می شویم، میزان جابجایی افزایش یافته و در مرکز فرورفتگی به  $4 \text{ mm}$  می رسد. در شکل ۱۰ نحوه بارگذاری نشان داده شده است. در شکل ۱۱ کانتور تنش و در شکل ۱۲ میزان تنش در مسیر مشخص شده (در شکل ۱۱) نشان داده شده است.



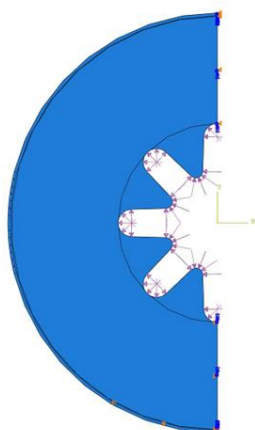
شکل ۱۰- شرایط مرزی مطابق با شرایط واقعی



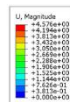
شکل ۱۱- مسیر تعریف شده در کانتور تنش



شکل ۱۲- تنش بر روی مقطع موتور در مسیر تعریف شده



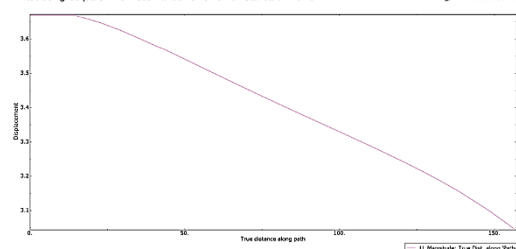
شکل ۱۶- کانتور تنش در مقطع طولی موتور



شکل ۱۷- کانتور جابجایی در مقطع طولی موتور

Printed using Abaqus/CAE on: Sat Mar 06 18:15:18 Iran Standard Time 2021

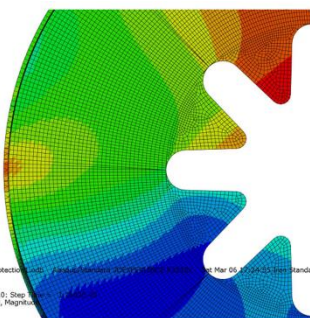
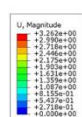
SIMULIA



شکل ۱۸- جابجایی بر روی مقطع موتور در مسیر تعریف شده

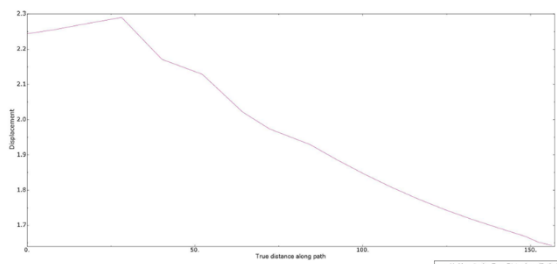
شکل ۱۸- شرایط مرزی در استپ دوم

در شکل ۲۱ و ۲۲ کانتور جابجایی و نمودار جابجایی در مسیر مشخص شده در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می گردد میزان جابجایی قسمت انتهایی گرین  $1/6$  mm می باشد.



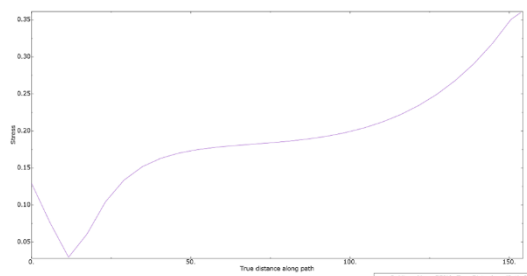
ODB: F110-Protection... Printed on: Sat Mar 06 18:15:18 Iran Standard Time 2021

شکل ۲۱- کانتور جابجایی در استپ دوم



شکل ۲۲- تنش بر روی مقطع موتور در مسیر تعریف شده در شکل ۱۱

نتایج تنش بر روی این مسیر در شکل ۱۹ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می گردد، میزان تنش در انتهای مسیر به  $0.35$  MPa می رسد که شرایطی مشابه با حالت قبلی دارد.



شکل ۱۹- تنش بر روی مقطع موتور در مسیر تعریف شده

#### ۵- اندازه گیری تجربی استحکام کششی و فشاری

در مقالات اشاره شده که مواد ویسکوالاستیک در حالت فشار مقاومت بیشتری نسبت به کشش دارند [۹].

استحکام کششی پیشرانه جامد مطابق استاندارد شماره ۴۵۰۶ [۱۰] تست سختی مطابق استاندارد شماره ۲۲۴۰ [۱۱] و استحکام فشاری آن مطابق روش ارائه شده در مقاله [۱۲] اندازه گیری شد. در تست استحکام کششی ۳ نمونه به شکل دمبل تهیه از دو طرف با سرعت ثابت کشیده شد. در تست استحکام فشاری ۳ نمونه به شکل قرص تهیه و فک های دستگاه با سرعت ثابت طول نمونه را تا ۵۰ درصد طول فشرده کردند. در منابع آمده که میزان جابجایی تا ۵۰ درصد سبب تغییر شکل در مقطع نمونه نشده و نتایج حاصل از تنش و کرنش قابل قبول می باشد [۱۳].

گفتنی است مسیر در نظر گرفته شده در مقطع گرین به صورت افقی بوده و در مقطع طولی به صورت عمودی می باشد. بنابراین در حالت اول، نیروی وزن در راستای عمود بر مسیر بوده و در حالت دوم در راستای مسیر تعریف شده است. بنابراین می توان تاثیر وزن را در جابجایی انتهایی مسیر مشاهده نمود. همچنین در حالت مقطع گرین میزان جابجایی انتهایی پره کمتر از حالت مقطع طولی می باشد. زیرا در این حالت مقطع جمع شده و اجازه حرکت بیشتر را به پیشرانه نمی دهد.

مرحله پنجم: مدل سازی و تحلیل بدنه موتور به همراه ماده ویسکوالاستیک با مدل سازی واقعی فرورفتگی در راستای شعاعی و با اعمال فشار ۷۰ bar در مدت زمان ۰/۱ sec (شرایط عملکردی). هدف از این تحلیل بررسی جابجایی گرین در فشار عملکردی موتور (فشار ۷۰ bar در مدت زمان ۰/۱ ثانیه) تحلیل انجام گردید. شرایط مرزی مطابق شکل ۲۰ تعریف شد.

تنش  $0.2 \text{ MPa}$  می باشد. در این شرایط ماکزیمم تنش در نوک پره گرین (به صورت تمرکز تنش)  $0.8 \text{ MPa}$  می باشد و قابل صرفنظر است. تحلیل تنش در مقطع گرین نشان می دهد که ماکزیمم تنش اعمالی در اثر این جابجایی از  $0.1 \text{ MPa}$  در نزدیکی بدنه شروع شده و در بیشتر ضخامت تنش  $0.25 \text{ MPa}$  می باشد. لازم به ذکر است در انتهای گرین (به صورت تمرکز تنش)  $0.4 \text{ MPa}$  مشاهده می گردد که با توجه محدوده استحکام پیشرانه موتور، تنش بوجود آمده در محدوده مجاز می باشد (ضریب اطمینان  $3/7$ ) و جدایش لاینر نیز مشاهده نمی گردد. همچنین جابجایی در نوک پره  $2/45 \text{ mm}$  می باشد.

تحلیل تنش در مقطع طولی نشان می دهد که ماکزیمم تنش اعمالی در اثر این جابجایی از  $0.1 \text{ MPa}$  در نزدیکی بدنه شروع شده و در بیشتر ضخامت تنش  $0.2 \text{ MPa}$  می باشد. لازم به ذکر است در انتهای گرین (به صورت تمرکز تنش)  $0.35 \text{ MPa}$  مشاهده می گردد که با توجه محدوده استحکام پیشرانه موتور، تنش بوجود آمده در محدوده مجاز می باشد. همچنین جابجایی در نوک پره  $3 \text{ mm}$  می باشد. برای بررسی جابجایی گرین در فشار عملکردی موتور (فشار  $70 \text{ bar}$  مدت زمان  $0.1 \text{ s}$ ) به میزان  $1/6 \text{ mm}$  جابجایی در نوک گرین مشاهده می گردد.

نتایج اندازه گیری تست استحکام فشاری و استحکام کششی نشان داد که مقدار تنش مورد نیاز برای جابجایی یکسان در تست استحکام فشاری بسیار بیشتر از تست استحکام کششی است و بنابراین ورودی های در نظر گرفته شده در مدلسازی ها معتبر است. با توجه به نتایج بدست آمده می توان گفت تنش های وارده به پیشرانه کمتر از تنش قابل تحمل پیشرانه بوده و در نتیجه صدمه وارده به بدنه توانایی ایجاد نقص در پیشرانه را نداشته است.

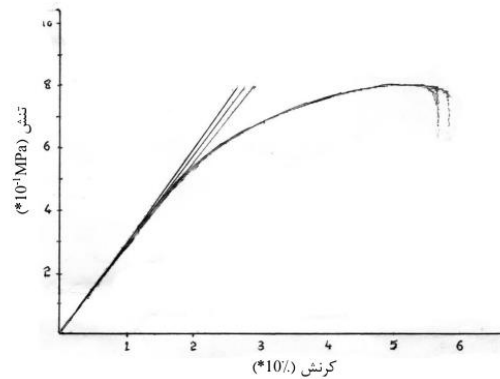
### مراجع

- [1] W. M. Adel, L. Guo-zhu, Developing a Viscoelastic Relaxation Model for AP-HTPB Composite Solid Propellant Based on Experimental Data, 21st AIAA International Space Planes and Hypersonics Technologies Conference, 2017.
- [2] R. S. Lakes, Viscoelastic materials: Cambridge University Press, 2009.
- [3] J. Roesler, H. Harders, M. Baeker, Mechanical Behaviour of Engineering Materials: Metals, Ceramics, Polymers, and Composites, New York: Springer, 2007.
- [4] J. Sorvari, M. Malinen, Determination of the relaxation modulus of a linearly viscoelastic material, Mechanics of Time-Dependent Materials, Vol. 10, No. 2, pp. 125-133, 2006.
- [5] T. L. Smith, Linear Viscoelastic Response to a Deformation at Constant Rate: Derivation of Physical Properties of a Densely Crosslinked Elastomer, Transactions of the society of rheology, Vol. 20, No. 1, pp. 103-117, 1976.
- [6] S. Woei Chyuan, A study of loading history effect for thermoviscoelastic solid propellant grains, Comput. Struct. 77(2000) 735-745.
- [7] J. D. Ferry, Viscoelastic properties of polymers, 3rd. ed., New York: Wiley, 1980
- [8] R. A. Schapery, A Theory of Crack Initiation and Growth in Viscoelastic Media, I., Theoretical Development, International Journal of Fracture, vol. 11, pp. 141-159, 1975. K. P. Murphy, Machine learning a probabilistic

نتایج میانگین تست استحکام کششی در جدول ۲ و نمودار تست استحکام کششی هر یک از نمونه ها در شکل ۲۳ آمده است.

جدول ۲- نتایج تست استحکام کششی.

تنش ماکزیمم (MPa)	کرنش ماکزیمم (%)	مدول (MPa)	سختی (Shore A)
0.80086	51.3	2.8516	56

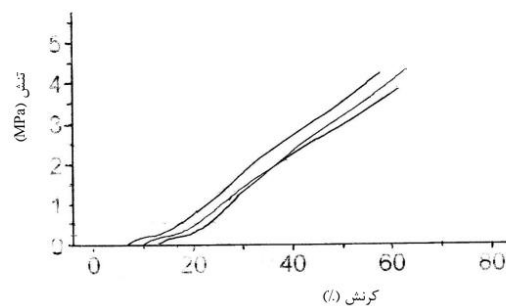


شکل ۲۳- نمودار تست استحکام کششی.

نتایج میانگین تست استحکام فشاری در جدول ۳ و نمودار تست استحکام فشاری هر یک از نمونه ها در شکل ۲۴ آمده است.

جدول ۳- نتایج تست استحکام فشاری.

تنش ماکزیمم (MPa)	کرنش ماکزیمم (%)	مدول (MPa)	سختی (Shore A)
4.151	45.394	10.188	56



شکل ۲۴- نمودار تست استحکام فشاری.

نتایج نشان می دهد که به ازای یک کرنش معین (برای نمونه ۴۰ درصد)، استحکام فشاری پیشرانه ( $4/15 \text{ MPa}$ ) بیشتر از استحکام کششی پیشرانه ( $0.8 \text{ MPa}$ ) می باشد.

### نتیجه گیری

تحلیل بدنه فلزی در فشار اولیه موتور (در حین کارکرد  $70 \text{ bar}$ ) نشان داد که  $3 \text{ mm}$  از  $4 \text{ mm}$  فرورفتگی بدنه به حالت اولیه خود بر می گردد. تحلیل تنش در مقطع گرین نشان داد که ماکزیمم تنش اعمالی در اثر این جابجایی از  $0.1 \text{ MPa}$  در نزدیکی بدنه شروع شده و در بیشتر ضخامت

- perspective. Cambridge, MA: MIT Press, 2012.
- [9] NATO-STANAG NO. 4506-2000.
- [10] ASTM D2240-2015, E1.
- [11] Chen, X. et al., Compressive mechanical properties of HTPB propellant at low temperatures and high strain rates, Results in Physics 2017.
- [12] W. M. Adel, L. Guo-zhu, Developing a Viscoelastic Relaxation Model for AP-HTPB Composite Solid Propellant Based on Experimental Data, 21st AIAA International Space Planes and Hypersonics Technologies Conference, 2017.
- [13] N. Gligorijevic et al., Mechanical characterization of composite solid rocket propellant based on hydroxy-terminated polybutadiene, Hem. ind.70 (5) 581-594, 2016.