

## Technical Note

# Fabrication and Test of Flexible Joint Thrust Vector Controlling System in SRM Using Polyurethane Elastomer

**H. Mahdavy Moghaddam<sup>1\*</sup> and M. M. Javadi<sup>2</sup>**

1, 2. Department of Mechanical and Aerospace Engineering Science and  
Research Branch of the Islamic Azad University

\*Hesarak, Tehran, IRAN

**mahdavy@srbiau.ac.ir**

*Outer space ballistic missiles use thrust vector control system and it is because aerodynamic surfaces are not efficient in thin air. Flexible joint is the most useful type of thrust vector control system through satellite transporters and ballistic missiles based on solid fuel. Most common type of elastomer in these structures is rubbers and especially natural rubber, which require special preparation and cure processes. The goal defined in this article is to introduce a process which is much easier to apply. Based on flexible joint design in Japanese MV booster missile, an elastomer based on polyurethane resin, which is easily applicable and consists of two liquid parts, is used instead of original Polyisoperne. This elastomer has achieved a good rank in both sealing test in eight-bar pressure and hydrostatic test in the pressure of 70 bars. It also has been fire tested and the results were satisfactory.*

**Keywords:** Flexible joint, Solid Fuel Motor, Hydrostatic Test, Thrust Vector Control, Poly Urethane

---

1. Assocat Professor (Corresponding Author)  
2. M. Sc.

یادداشت فنی

# ساخت و آزمایش مفصل انعطاف‌پذیر با الاستومر پلی‌اورتان برای نازل موتور سوخت جامد

حسین مهدوی مقدم<sup>۱\*</sup> و محمد مجتبی جواد<sup>۲</sup>

۱ و ۲ - دانشکده مکانیک و هوافضا، واحد علوم تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی

تهران، حصارک، دانشگاه آزاد اسلامی

mahdavy@srbiau.ac.ir

موشک‌های بالستیک که در خارج جو پرواز می‌کنند، به علت عدم کارایی سطوح آیرودینامیکی خارجی در جو رقیق، از سیستم‌های کنترل بردار پیشران (T.V.C.) استفاده می‌کنند. یکی از اصلی‌ترین روش‌های T.V.C. استفاده از نازل‌های متحرک است. مفصل انعطاف‌پذیر پرکاربردترین نوع سیستم کنترل بردار پیشران در حامل‌های ماهواره و موشک‌های هدایت‌شونده بر پایه سوخت جامد است. متداول‌ترین نوع مواد به‌کاررفته در صفحات انعطاف‌پذیر، انواع لاستیک‌ها، به‌خصوص لاستیک طبیعی است که نیازمند فرآیندهای آماده‌سازی و پخت خاص است. هدف از این پژوهش، معرفی فرآیندی است که تا حد زیادی تولید را ساده می‌کند. با مبنا قراردادن طراحی مفصل انعطاف‌پذیر بوستر جامد موشک MV ژاپن، در این مقاله، یک نوع الاستومر بر پایه رزین پلی‌اورتان که به صورت مایع و دوجزئی بوده و به سهولت قابل استفاده است، به عنوان جایگزین لاستیک پلی‌ایزوپرن بررسی و به‌کارگرفته شده است. آزمایش‌های مختلف شامل آزمایش آب‌بندی با هوا در فشار ۸ بار، آزمایش هیدرواستاتیک در فشار ۷۰ بار و آزمایش گرم بر روی مفصل انعطاف‌پذیر اجرا و نتایج آن مثبت ارزیابی شده است.

واژه‌های کلیدی: مفصل انعطاف‌پذیر، موتور سوخت جامد، آزمایش هیدرواستاتیک، کنترل بردار پیشران، پلی‌اورتان

## اختصارات

## مقدمه

یکی از مهم‌ترین روش‌های کنترل بردار پیشران، نازل متحرک است. در این روش نازل یک مفصل متحرک دارد که امکان تغییر جهت کامل بردار پیشران اصلی را نسبت به مسیر اصلی موشک فراهم می‌کند. زیرا هم امکان ایجاد گشتاورهای بزرگ را که برای حامل‌های ماهواره لازم است فراهم می‌کند و هم نیاز به تدابیر اضافی در جهت کنترل مسائل گرمایش درخصوص سطوح کنترلی در مسیر خروج گاز را مرتفع می‌سازد. تقریباً در تمامی حامل‌های ماهواره مدرن در دنیا، از این روش استفاده شده است [۱].

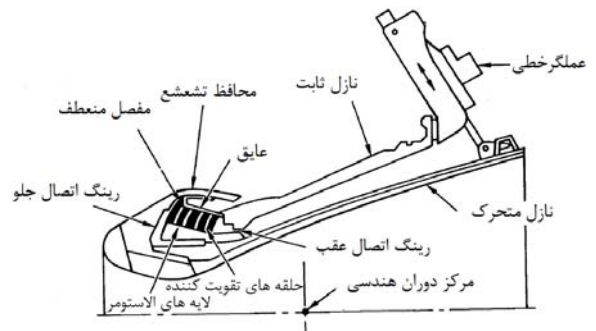
به‌طور کلی نازل‌های متحرک به دو دسته تقسیم می‌شوند: روش مفصل متحرک و روش مفصل انعطاف‌پذیر. روش مفصل

$T_q$	گشتاور چرخشی مفصل
$\theta$	زاویه دوران مفصل
$r_o$	شعاع داخلی
$r_i$	شعاع خارجی
$\beta_1$	زاویه داخلی مفصل
$\beta_2$	زاویه خارجی مفصل
G	مدول برشی مؤثر

۱. استادیار (نویسنده مخاطب)

۲. کارشناس ارشد هوافضا

انعطاف‌پذیر در شکل (۱) نشان داده شده است.



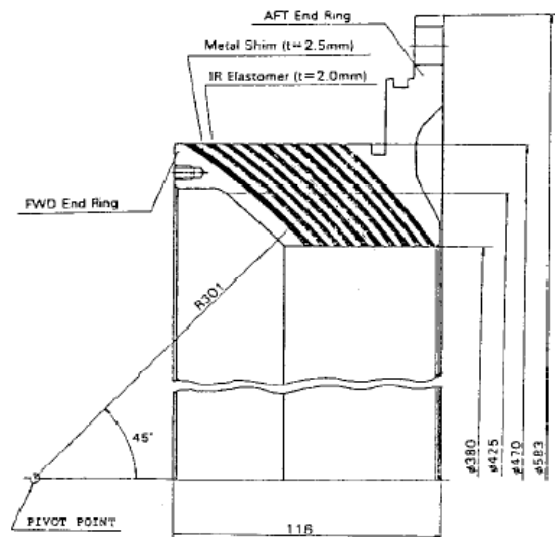
شکل ۱- نازل متحرک با روش مفصل انعطاف‌پذیر [۱]

تولید مفصل انعطاف‌پذیر فرآیند پیچیده ای دارد که در ادامه شرح داده شده است. هدف از این پژوهش معرفی فرآیندی است که تا حد زیادی تولید را ساده می‌کند.

### مفصل انعطاف‌پذیر

مفصل انعطاف‌پذیر اتصال غیرصلب و تحت فشاری است که بین موتور موشک و نازل قرار می‌گیرد. این مفصل ترکیبی از صفحات فولادی و الاستومری است، که به‌طور متناوب و با شکل خاصی به یکدیگر چسبیده‌اند و این امکان را فراهم می‌کند که نازل آزادی حرکت تا ۱۵ درجه را در جهات مختلف دارد [۱].

در شکل (۲) مفصل انعطاف‌پذیر بوستر جامد موشک MV نشان داده شده است.



شکل ۲- مفصل انعطاف‌پذیر بوستر جامد موشک MV [۲]

در واقع نیروی فشاری ناشی از موتور و نیروی عملگر که برای دوران را مشخص می‌کند، باعث ایجاد تنش بر روی لایه‌های فلزی می‌شود،

هندسه لایه‌های فلزی مرکز دوران را مشخص خواهند کرد، از آنجا که لایه‌های الاستومر مقاومت فشاری بالایی دارد اما در برش به‌راحتی جابه‌جا می‌شوند لذا کرنش این لایه‌ها باعث می‌شود که مفصل علاوه بر تحمل نیروی فشاری به‌راحتی دوران کند.

این حلقه‌ها معمولاً مقطعی از کره هستند که همگی دارای یک مرکز دوران واحد هستند. این مسئله باعث توزیع نسبتاً یکنواخت تنش مابین صفحات و حرکت نسبتاً یکسان صفحات می‌شود.

### اجزای مفصل انعطاف‌پذیر

در یک مفصل انعطاف‌پذیر سه عنصر اصلی وجود دارد [۳ و ۴]:

۱. صفحات تقویتی فلزی: جنس این صفحات و استحکام آنها اهمیت بسیار بالایی دارد. زیرا علاوه بر اینکه به استحکام نسبتاً بالایی در این صفحات نیاز است (معمولاً بالاتر از ۱۰۰۰ مگاپاسکال)، باید امکان چسبیدن مناسب الاستومر را نیز فراهم کند.

۲. الاستومر: این صفحات که وظیفه اصلی انعطاف بخشیدن به مفصل را بر عهده دارند باید خواص مکانیکی مناسب داشته باشند که شامل استحکام بالا، مقاومت فشاری و کرنش برشی مناسب است.

۳. چسب بین لایه‌ها: به‌منظور اتصال بین صفحات فلزی و لاستیکی لازم است یک چسب مناسب بین لایه‌ها استفاده شود که از یک طرف چسبندگی بالایی با صفحات فلزی دارد و از طرف دیگر با الاستومر پیوند شیمیایی برقرار کند. در واقع چسبندگی بین لایه‌ها مهم‌ترین مسئله در مفصل انعطاف‌پذیر و عامل اصلی اغلب شکست‌ها در اینگونه مفاصل است.

صفحات فلزی معمولاً باید از جنس فولادهای با استحکام بالا انتخاب شوند، این فولادها، هم قابلیت شکل‌پذیری مناسب و دقیق را دارند و هم خواص مکانیکی مطلوب را تأمین می‌کنند [۱].

صفحات الاستومر در مفاصل انعطاف‌پذیر معمولاً از جنس لاستیک انتخاب می‌شوند. این لاستیک‌ها شامل لاستیک طبیعی، NBR<sup>۳</sup> و SBR<sup>۴</sup> است.

پرکاربردترین لاستیک‌ها در این زمینه، لاستیک طبیعی است. حداقل استحکام این لاستیک ۴ MPa و حداقل ازدیاد طول آن ۳۰۰٪ است [۱].

لاستیک‌ها به‌صورت صفحات پخت نشده آمیزه‌سازی می‌شوند و سپس تحت فشار و دمای بالا در حالی که سطوح فلز و لاستیک خام چسب مخصوص خورده‌اند بر روی یکدیگر فشرده و پخت می‌شوند.

3. Nitrile butadiene rubber  
4. Styrene Butadiene Rubber

## آزمایش‌های رایج مفصل انعطاف‌پذیر

مهم‌ترین آزمایش‌های الزامی در شناخت رفتار الاستومرها انجام آزمایش کشش و به‌دست آوردن خواص مکانیکی الاستومر است. بعد از آماده‌سازی مفصل انعطاف‌پذیر انجام دو آزمایش بر روی آن الزامی است.

**اول،** آزمایش رفتار مفصل تحت فشار هیدرو استاتیک است: در این آزمایش مقدار جابه‌جایی محوری مفصل تحت فشار کارکرد و همچنین مقدار گشتاور فتری مورد نیاز برای دوران مفصل مشخص می‌شود.

**دوم،** آزمایش چسبندگی بین لایه‌هاست: در این آزمایش مفصل بدون فشار داخلی تحت دوران قرار می‌گیرد. هنگامی که فشار بر روی مفصل اعمال نمی‌شود مفصل تحت برش خالص قرار می‌گیرد و این بحرانی‌ترین حالت است. شایان ذکر است، طبق بررسی انجام شده هیچ کدام از آزمایش‌های بالا استاندارد بین‌المللی ندارد و شرکت‌های سازنده از استانداردهای داخلی استفاده می‌کنند. در مرجع [۱] نمونه‌ای از هر کدام از آزمایش‌ها نشان داده شده است.

در مورد آزمایش خستگی می‌توان گفت از آنجا که زمان کارکرد این مفصل در این طرح در حدود ۱۰ ثانیه است، براین اساس آزمایش خستگی لزومی ندارد. با مراجعه به مرجع [۱] مشخص می‌شود که در جمع‌بندی، ناسا در مورد مفصل انعطاف‌پذیر تصریح می‌کند بنابراین لزومی به آزمایش خستگی نیست. تنها در مورد موتورهای با استفاده مجدد، مشابه بوستر جامد شاتل، این آزمایش انجام پذیرفته است که در مورد کاربرد مورد نظر این مقاله صادق نیست.

## بیکربندی مفصل انعطاف‌پذیر

در این مقاله، طراحی مفصل انعطاف‌پذیر بوستر جامد MV مبنای طراحی قرار گرفت. قطر این بوستر ۷۵۰ میلی‌متر بود. موتوری با نسبت ۰/۷۵ برای بررسی جایگزینی لاستیک پلی‌ایزوپرن موتور اصلی با الاستومر پلی‌اورتان در نظر گرفته شد. در این مقاله از آن با نام موتور ۵۰۰ نام برده می‌شود [۶] (طراحی سایر مشخصات موتور موضوع مقاله نیست اما در مرجع [۶] به‌طور کامل آمده است).

در این مقاله، ساخت و آزمایش مفصلی انعطاف‌پذیر با استفاده از صفحات فولادی شکل داده شده و رزین پلی‌اورتان الاستومری به عنوان لایه الاستومری تشریح و نتایج آزمایش‌ها و مزایای این طرح بیان شده است.

این فرآیند علاوه بر اینکه هزینه بالایی را برای ساخت قالب و پرس و سیستم گرم‌کن نیاز دارد، کنترل‌پذیری پایینی نیز دارد و به‌خصوص در قطعات بزرگ با مشکلات زیادی در عدم چسبندگی یا دست نیافتن به خواص مکانیکی لاستیک به همراه دارد [۳].

بزرگ‌ترین مشکل در مورد لاستیک طبیعی این است که در دماهای زیر ۲۸۳ درجه کلون قابل استفاده نیست، زیرا در دماهای پایین سخت می‌شود. در نسل‌های بعدی از لاستیک ایزوپرن با موفقیت استفاده شد. این لاستیک دماهای پایین‌تری را نسبت به لاستیک طبیعی تحمل می‌کند. در بوستر موشک MV نیز از لاستیک ایزوپرن استفاده شده است. جدول (۲) مشخصات این لاستیک را نشان می‌دهد. تا به حال الاستومرهایی ساخته شده‌اند که حداقل تنش برشی آنها ۵۰۰ psi بوده است و آزمایش‌های مختلف را نیز با موفقیت طی کرده‌اند.

برای این که الزامات مربوط به مدول برشی و تنش برشی رعایت شوند، بیشتر مفصل‌ها را از لاستیک طبیعی یا پلی‌سوپرین<sup>۵</sup> می‌سازند. مفاصل هر دو موتورهای پوزایدون<sup>۶</sup> از لاستیک طبیعی با فرمول GTR ۴۴۱۲۵ یا TR ۳۰۰۵ ساخته می‌شوند. قطر موتور ذکر شده ۶/۶۰۴ متر بود و حداکثر مقدار تغییر راستا برابر  $\pm 15^\circ$  و با سرعت ۳۰۰ درجه بر ثانیه عمل می‌کرد و جنس الاستومر آن از GTR ۴۴۱۲۵ بود. ویژگی‌های این‌گونه الاستومرها عبارتند از:

داشتن حداقل تنش برشی ۵۰۰ پوند بر اینچ مربع و بازه تغییرات سکانت مدول برشی از ۲۲ psi تا ۲۶ پوند بر اینچ مربع (در حالتی که تنش برشی به مقدار ۵۰ پوند بر اینچ مربع است).

از الاستومرهای پلی‌سوپرین در موتورهایی با قطر ۳/۹۶۲ متر و ۲/۵۴ متر و موتورهایی با محفظه احتراق دو مرحله‌ای استفاده شده است.

ویژگی‌های الاستومرهای پلی‌سوپرین شبیه الاستومرهایی است که از لاستیک طبیعی ساخته شده‌اند، فقط مدول برشی آن‌ها از لاستیک طبیعی خیلی بزرگ‌تر است و حداقل مقدار آن تقریباً برابر ۲۷ پوند بر اینچ مربع است.

از الاستومر با ساختار نوپرین / پلی‌بوتادین<sup>۷</sup> در ساخت مفصل استفاده شده است و آزمایش‌های رومیزی آن با شرایط زیر انجام شد:

۱. دما بین ۲۳۳ کلون تا ۳۴۷ کلون
۲. فشار موتور معادل ۲۵۵۰ پوند بر اینچ مربع
۳. حداکثر زاویه ی بردار پیشران  $\pm 17/5$
۴. سرعت تغییر زاویه به مقدار ۲۶۰۰ درجه بر ثانیه

5. polyisoprene  
 6. Poseidon  
 7. neoprene/polybutadiene

## ویژگی‌های مورد انتظار

در طرح حاضر سعی شده ترکیب الاستومری مناسب که شرایط تولید سهل‌تر و ارزان‌تر را دارد و در عین حال خواص چسبندگی و مکانیکی مطلوب را فراهم کند، پیشنهاد، آزمایش و ارزیابی شود. این مفصل نباید در فشار ۷۰ بار هیدرواستاتیک دچار واماندگی، نشتی و انحراف خارج از مرکز شود. همچنین باید گشتاور مورد نیاز دوران آن برابر محاسبات آتی باشد. مفصل باید دوران ۷ درجه صفحه خروجی نازل را بدون نشتی تأمین کند. از حفاظ حرارتی سیلیکونی برای محافظت الاستومر پلی‌اورتان می‌تواند استفاده شود. در شکل (۳) شماتیک طرح مجموعه مفصل انعطاف‌پذیر و اتصالات به عدسی سوخت جامد و در شکل (۴) تصویری از مفصل انعطاف‌پذیر تولید شده داخلی نشان داده شده است.

آن پیش از عملیات مونتاژ کاملاً سنبلاست شده است. جدول (۱) مشخصات هندسی دو مفصل را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات هندسی مفصل انعطاف‌پذیر

موتور ۵۰۰	بوستر MV	
۳۵۲mm	۴۷۰mm	قطر
۸۰mm	۱۰۶mm	عرض
۲۰۰mm	۳۰۱mm	شعاع دوران
۲mm	۲/۵mm	ضخامت لایه فلزی
2/5mm	۳mm	ضخامت لایه الاستومری
۷	۷	تعداد لایه فلزی
۸	۸	تعداد لایه الاستومری

جنس الاستومر از یک رزین پلی‌اورتان ترموست با کد ۵۰۷۵ از شرکت هانتزمن<sup>۸</sup> می‌باشد که توسط پرایمر پلی‌اورتان با کد ۸۵۲۱ از شرکت تروسان<sup>۹</sup> به صفحات فلزی متصل گردیده است. در جدول ۲ خواص هر دو الاستومر مقایسه شده است [۲].

جدول ۲- مقایسه خواص دو الاستومر

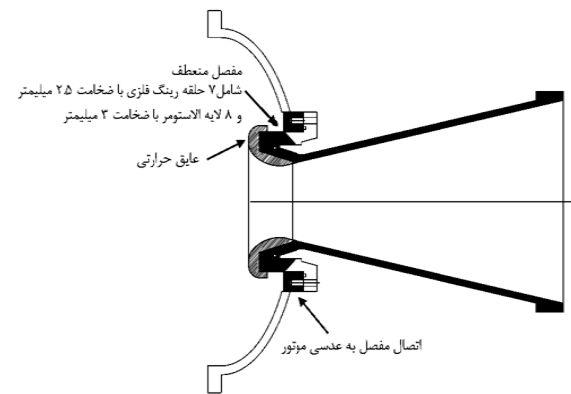
موتور ۵۰۰	بوستر MV	
پلی‌اورتان	پلی‌ایزوپرن	جنس الاستومر
Hs40	۳۰ Hs	سختی
۳/۲ kg/cm <sup>2</sup>	۲/۱ kg/cm <sup>2</sup>	سکانت مدول برشی
٪۳۰۰	٪۳۰۰	حد کرنش نهایی
۱۵۰ kg/cm <sup>2</sup>	۱۳۰ kg/cm <sup>2</sup>	حد استحکام کششی
۲۰ kg/cm <sup>2</sup>	۱۵ kg/cm <sup>2</sup>	مدول یانگ در ٪۳۰۰

در شکل (۵) تصویر قطعه مونتاژ شده نازل با اتصال فوق نشان داده شده است.

## فرآیند تولید

فرآیند تولید قطعه مفصل انعطاف‌پذیر طرح حاضر از پنج مرحله اصلی تشکیل شده است.

۱. تولید صفحات فولادی
۲. آماده‌سازی سطوح فلزی و اجرای پرایمر



شکل ۳- طرح سیستم کنترل بردار پیشران با کمک مفصل انعطاف‌پذیر



شکل ۴- تصویری از مفصل انعطاف‌پذیر تولید شده داخلی

این مفصل از هشت لایه متناوب الاستومر / فلز تشکیل شده که جنس صفحات فلزی فولاد CK75 است که سطح هر دو طرف

که به خواص لاستیک طبیعی نزدیک است. با توجه به اعمال پرایمر، چسبندگی این رزین به فولاد فوق‌العاده است و در آزمایش‌های انجام شده هیچگونه شکستی مشاهده نشد. البته این موضوع منوط به اعمال صحیح پرایمر و آماده‌سازی صحیح رزین و ریخته‌گری رزین در مدت زمان حداکثر ۳۰ دقیقه پس از اجرای پرایمر است، زیرا پرایمر در معرض هوا به سرعت پخته می‌شود و چسبندگی آن کاهش می‌یابد.

به‌منظور دستیابی به حداکثر استحکام و سایر خواص مکانیکی در رزین لازم است که رزین پس از اختلاط با هاردنر تحت خلأ، کاملاً عاری از گاز و هوا شود و یک قطعه کاملاً یکنواخت تشکیل شود. این مرحله اهمیت بالایی دارد زیرا به صورت مستقیم بر خواص قطعه نهایی تأثیرگذار است. مدت زمان اعمال خلأ ۵ دقیقه است.

پس از ریخته‌گری باید رزین در دمای حدود ۴۰ الی ۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت پخته شود تا خواص نهایی خود را به‌دست آورد. پس از این مرحله، قطعه نهایی مورد ماشین‌کاری قرار می‌گیرد و ابعاد آن نهایی می‌شود. در شکل (۴) قطعه مونتاژ شده نهایی، نشان داده شده است.

بعد از اتمام تولید از یک الاستومر سیلیکونی برای حفاظت مفصل در برابر گازهای داخلی استفاده شد.

### بررسی نیروی مورد نیاز عملگر

گشتاور های مؤثر بر مفصل انعطاف‌پذیر شامل موارد زیر است: گشتاور فنر مفصل، گشتاور اصطکاکی، گشتاور اُفت<sup>۱۰</sup> گشتاور اینرسی، گشتاور جاذبه‌ای، گشتاور بوت عایق، گشتاور نیروهای آیرودینامیکی داخلی، گشتاور نیروهای آیرودینامیکی خارجی [۱].

از میان گشتاورهای نام‌برده، اهمیت گشتاور فنر مفصل و گشتاور نیروهای آیرودینامیکی داخلی حایز اهمیت است. بنابراین این دو مقدار باید برای تخمین نیروی عملگر محاسبه شود. برای محاسبه نیروی ناشی از گشتاور فنر مفصل دو روش وجود دارد:

روش محاسباتی: در این روش با مقدار نیرو با توجه به روابط موجود مقدار اولیه به‌دست می‌آید. به عنوان مثال از رابطه زیر مقدار گشتاور محاسبه شده است [۱]:

$$\frac{Tq}{\theta} = \frac{0.156Gr_0^3r_i^3(\beta_2 - \beta_1)}{r_0^3 - r_i^3} \quad (1)$$



شکل ۵- مجموعه نازل با اتصال مفصل انعطاف‌پذیر در داخل عدسی انتهایی موتور

۳. آماده‌سازی رزین
  ۴. مونتاژ صفحات در فیکسچر و ریخته‌گری رزین
  ۵. پخت رزین و عملیات تکمیلی
- در زیر به شرح مختصر مراحل فوق می‌پردازیم:

### تولید صفحات فولادی

در این فرآیند با توجه به اینکه روش تولید قطعه از روش چرخ کاری ورق است و با توجه به اینکه جنس صفحات از فولاد سخت انتخاب شده است. باید ابتدا ورق‌ها سختی‌گیری شود یعنی در کوره کاملاً آنیل شود و سپس عملیات فرم‌دهی و تشکیل قطعه از کره انجام پذیرد و سپس قطعه نهایی با نهایت دقت تحت عملیات حرارتی قرار گیرد. در مرحله عملیات حرارتی نهایی در صورت اعمال سیکل نامناسب قطعه دچار تابیدگی می‌شود که صلاح‌پذیر نیست [۸]. همچنین با توجه به اینکه در فرآیند چرخ کاری ضخامت ورق اولیه کاهش می‌یابد، لازم است ضخامت ورق خام اندکی بیشتر انتخاب شود. این میزان در طرح حاضر به صورت تجربی به‌دست آمده است.

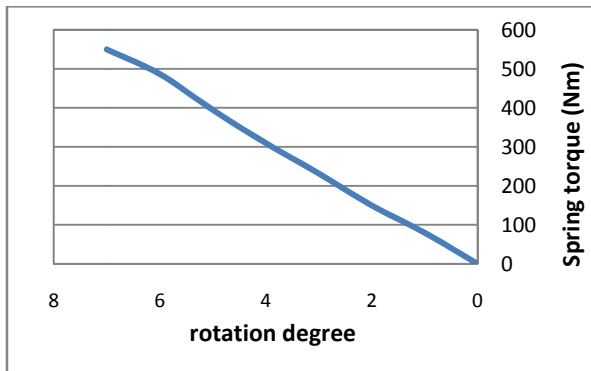
### آماده‌سازی سطوح فلزی و اجرای پرایمر

در این مرحله سطوح فلزی توسط سندبلاست اکسیدزدایی و زبر شده و پس از شستشو با استن، پرایمر پلی‌اورتان با کد ۸۵۲۱ توسط قلم مو بر روی سطح اعمال می‌شود. پرایمر تضمین‌کننده اتصال لایه‌های فولادی و الاستومری است.

### آماده‌سازی رزین

رزین مورد استفاده از نوع پلی‌اورتان با کد ۵۰۷۵ از شرکت هاتزمن است که خواص مکانیکی نهایی آن پس از پخت کامل عبارت است از استحکام کششی ۵ الی ۷ مگاپاسکال و ازدیاد طول ۲۵۰ الی ۳۰۰ درصد

آزمایش هیدرواستاتیک ۷۰ بار: در این آزمایش توسط دستگاه آزمایش هیدرواستاتیک با استفاده از آب داخل محفظه فشار ۷۰ بار اعمال شد و در این شرایط، که شرایط کارکرد موتور است با کمک نیروی جک، جابه‌جایی ۷ درجه‌ای در جهات مختلف به نازل اعمال شد. نیروی مورد نیاز برای دوران مطلوب این قطعه با توجه به مقدار فشار جک هیدرولیک بر حسب زاویه دوران به دست آمد. مقدار این نیرو برای دوران ۷ درجه‌ای حدود ۳۰ کیلوگرم نیرو برآورد شد و پس از جابه‌جایی‌های متعدد هیچگونه نشستی یا صدمه در قطعه مشاهده نشد. در شکل (۷) تغییرات گشتاور فنی مفصل با زاویه دوران نشان داده شده است. این نمودار، با توجه به فشار جک هیدرولیک و بازوی گشتاوری رسم شده است.

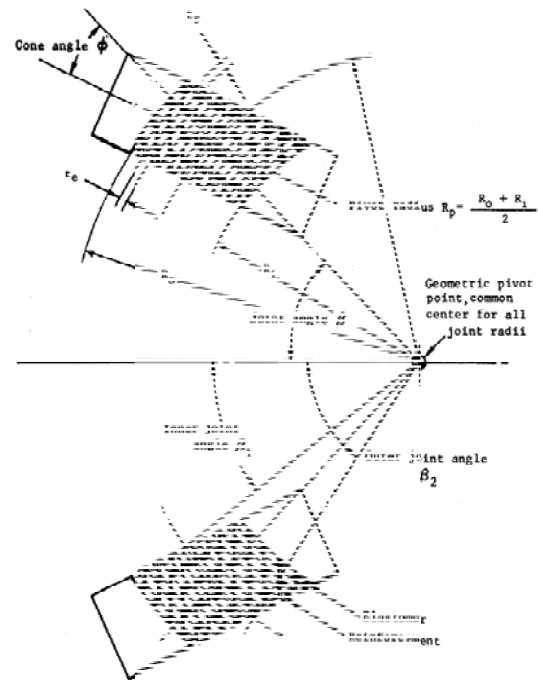


شکل ۷- تغییرات گشتاور فنی مفصل با زاویه دوران

در شکل (۸) آزمایش هیدرواستاتیک که اهمیت بالایی دارد در فشار کاری موتور نشان داده شده است.



شکل ۸- موتور با اتصال انعطاف‌پذیر در آزمایش هیدرواستاتیک ۷۰ بار



شکل ۶- نمایش نمادهای بکاررفته در رابطه (۱)

در آن:  $T_q$  گشتاور چرخشی مفصل،  $\theta$  زاویه دوران مفصل که در اینجا برابر ۷ درجه است.  $T_0, T_1$  به ترتیب شعاع داخلی و خارجی و  $\beta_1$  و  $\beta_2$  زاویه داخلی و خارجی مفصل هستند.  $G$  نیز مدول برشی مؤثر است که از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$G = G_0 + A \sigma^2 \quad (2)$$

$$A = -0.2595 \times 10^6 \quad (3)$$

$$\sigma^2 = \frac{P_c \sin^2 \beta_2}{(\sin^2 \beta_2 - \sin^2 \beta_1) \cos^2 \phi} \quad (4)$$

در رابطه بالا  $P_c$  فشار موتور و  $\phi$  زاویه مخروط است. همچنین کلیه پارامترهای هندسی معادله (۴) در شکل (۶) نشان داده شده است.  $G_0$  سکانت مدول برشی الاستومر است. با توجه به این روابط مقدار این گشتاور برای دوران ۷ درجه برابر ۶۰۰ نیوتن متر است.

رابطه محاسبه گشتاور (۱) حداکثر ۰.۸٪ خطا دارد [۱]. بنابراین با

استفاده از آزمایش هیدرواستاتیک مقدار دقیق این نیرو تعیین می‌شود.

به منظور ارزیابی کارایی مفصل منعطف طراحی شده، ۲ مرحله

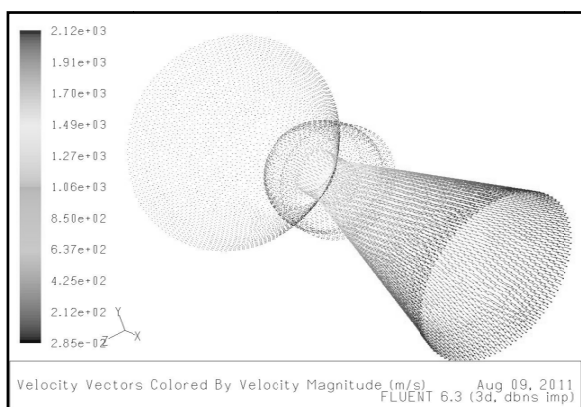
آزمایش روی آن انجام شد که در همه آنها قطعه، کارایی مناسبی را نشان داد. این دو مرحله آزمایش عبارتند از:

آزمایش نشستی: در این آزمایش قطعه و موتور مونتاژ و آب‌بند شده

و توسط کمپرسور هوا ۸ بار فشار در داخل آن اعمال شده و سپس نشستی

بین لایه‌ها و اتصالات کنترل شد. سپس مدت ۲۴ ساعت این فشار

حفظ شد که در این مدت زمان هیچ کاهش فشاری دیده نشد.



شکل ۱۱- بردار سرعت محلی در نازل پس از دوران

با انجام تحلیل بالا مشخص شد مقدار گشتاور حول مرکز دوران برابر ۱۰۰ نیوتن متر است. در مجموع با در نظر گرفتن هر دو گشتاور فنر مفصل و گشتاور آیرودینامیکی مقدار نیروی مورد نیاز محرک برابر ۵۰ کیلوگرم نیرو برآورد شد که با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۲ محرک با ۱۰۰ کیلوگرم نیرو بر روی نازل متصل شد. شکل (۱۲) جک نصب شده روی عدسی سمت نازل را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲- قطعه نهایی عدسی و نازل با مفصل انعطاف‌پذیر و جک

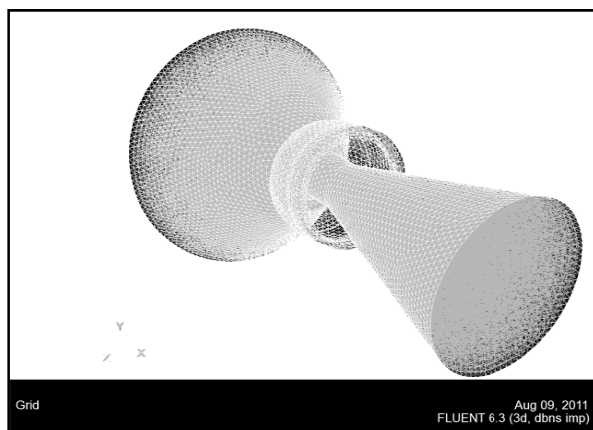
## آزمایش گرم

برای آزمودن سیستم نازل متحرک، این سیستم بر روی یک موتور سوخت جامد با قطر ۵۰ میلی‌متر اجرا و سپس آزمایش شد [۸]. در این آزمایش از یک جک برای حرکت مفصل استفاده شد و نیروی لازم برای حرکت نازل در حدود ۳۴ کیلوگرم نیرو به دست آمد که برای موتور با پیشران ۴۲۳۸ کیلوگرم نیرو عدد بسیار مناسبی

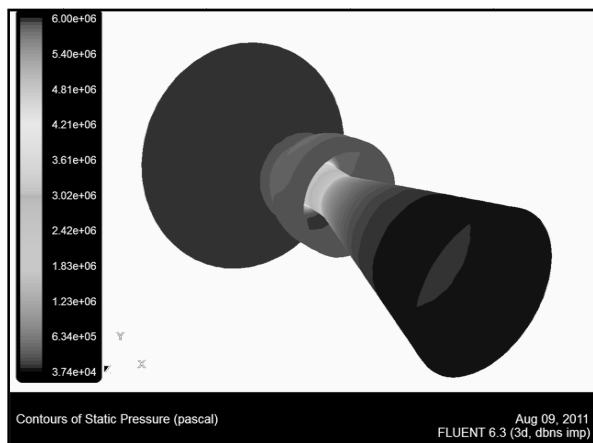
## محاسبه گشتاور آیرودینامیک داخلی

به منظور به دست آوردن شرایط فشار، دما و سرعت در نازل مدل‌سازی در نرم‌افزار فلوئنت انجام شده است. مدل توسط مش‌های هرمینا منظم شبکه‌بندی شده است که در شکل (۹) نمایش داده شده است. پس از تحلیل در نرم‌افزار فلوئنت، مقادیر گشتاور، خطوط هم‌تراز فشار، سرعت و سایر مشخصات سیال در تمام نقاط به دست می‌آید. این مقادیر در شکل (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است.

قرار گرفتن قسمت متحرک نازل در برابر جریان، بر جریان درون نازل تأثیر دارد. به نحوی که لبه‌ای از قسمت متحرک نازل که در برابر جریان قرار می‌گیرد باعث ایجاد افزایش فشار در ناحیه برخورد می‌شود. لبه‌ای از قسمت متحرک نازل که از مسیر مستقیم جریان دور می‌شود، باعث انبساط و کاهش فشار سیال می‌شود. به این ترتیب دو نقطه پرفشار و کم‌فشار دقیقاً روبروی هم تشکیل می‌شود. این اختلاف فشار باعث ایجاد یک جریان چرخشی در داخل نازل می‌شود.



شکل ۹- مدل و مش‌بندی مورد استفاده در تحلیل



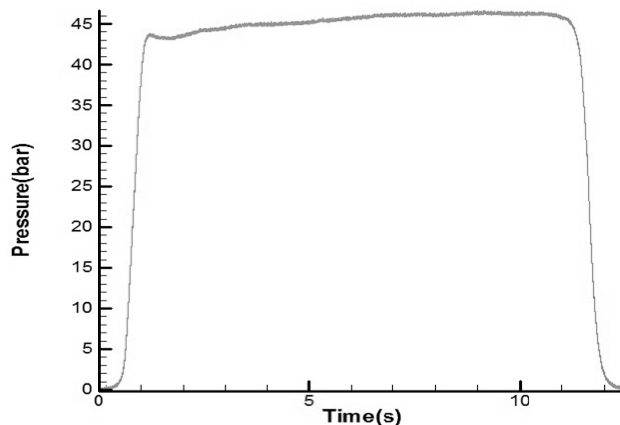
شکل ۱۰- خطوط هم‌تراز فشار در نازل پس از دوران



الاستومر انتخابی از لحاظ خواص مکانیکی در حد لاستیک طبیعی است که یک الاستومر متداول در زمینه مفصل انعطاف پذیر است، و در عین حال با استفاده از یک پرایمر مخصوص چسبندگی مناسبی نیز با فولاد دارد.

همانگونه که در بخش ویژگی‌های مورد انتظار بیان شد، این مفصل باید تولید ساده و خواص مکانیکی کافی داشته باشد. بنابراین کلیه آزمایش‌های متداول بر روی قطعه تولید شده اجرا شد که در کلیه مراحل قطعه مذکور کارایی مورد نظر را از خود نشان داد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت طرح مفصل انعطاف پذیر شرح داده شده کارایی لازم را برای استفاده در یک موتور عملیاتی را داشته و قابلیت تولید در ابعاد بزرگ را نیز دارا می‌باشد.

همچنین به نظر می‌رسد در صورت تأمین خواص مکانیکی مناسب و چسب مناسب، از رزین‌های پلی‌اورتان دیگری بجز مورد ذکر شده در این مقاله بتوان با موفقیت استفاده کرد. فرایند اشاره شده در این طرح و حساسیت‌های آن، تضمین‌کننده کارایی اتصال انعطاف پذیر است.

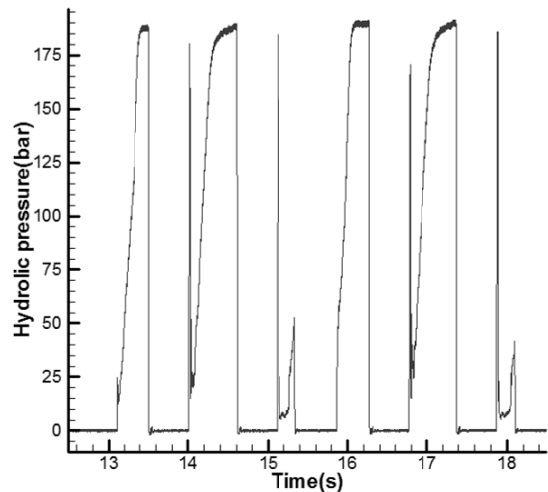


شکل ۱۴- منحنی فشار موتور با مفصل انعطاف پذیر در آزمایش گرم

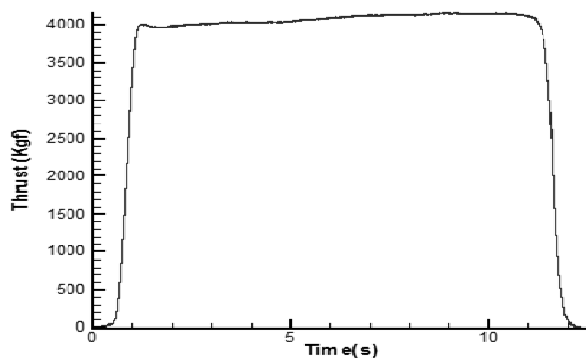
است. مقدار نیروی عملگر از ثبت مقادیر فشار هیدرولیک به دست آمده است. در شکل (۱۳) نمودار این فشار که به طور متناوب تغییر می‌کند آورده شده است.

برای اندازه‌گیری مقدار فشار داخل محفظه احتراق (موتور سوخت جامد)، حسگر فشار بر روی موتور نصب و منحنی تغییرات فشار درون موتور ثبت شده است. نمودار فشار کارکرد موتور در شکل (۱۴) نشان داده شده است. یک سیستم اندازه‌گیری به منظور به دست آوردن نیروهای پیشران اصلی طراحی شد که به وسیله این سیستم، پیشران اصلی ثبت شده است. نمودار این نیرو در شکل (۱۵) نمایش داده شده است.

زمان کلی کارکرد موتور در این آزمایش حدود ۱۲ ثانیه و فشار متوسط موتور در حدود ۵۰ بار است. پیشران متوسط حدود ۴۲۰۰ کیلوگرم نیرو با استفاده از سوخت جامد مرکب است. در شکل (۱۶) تصاویر موتور با مفصل انعطاف پذیر در شرایط آزمایش گرم نشان داده شده است.



شکل ۱۳- تغییرات فشار عملگر هیدرولیک



شکل ۱۵- منحنی نیروی پیشران موتور با مفصل انعطاف پذیر در آزمایش گرم

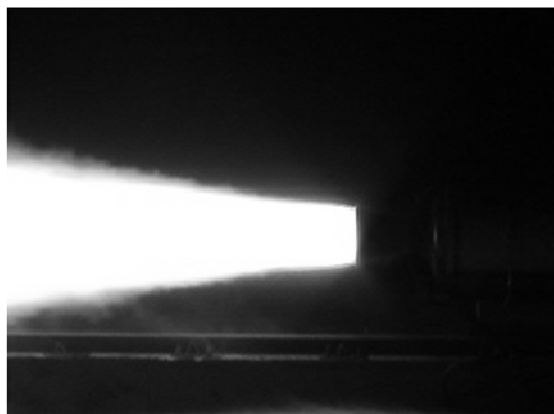
## بحث و بررسی

هدف از اجرای این طرح، ارائه یک الاستومر مناسب برای استفاده در مفصل انعطاف پذیر است که علاوه بر داشتن تمام شرایط فنی لازم، فرایند به کارگیری آن نیز ساده و کم هزینه باشد و نیاز به تجهیزات خاص نداشته باشد.

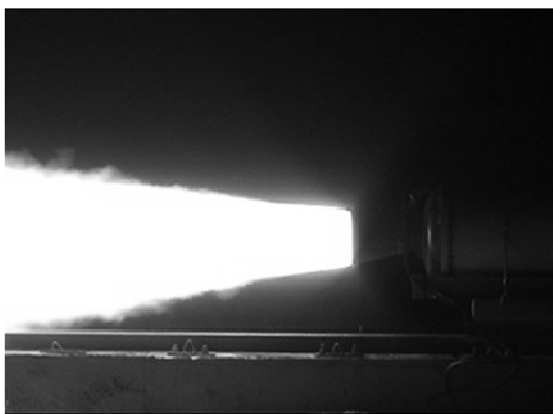
انتخاب طراح در این طرح الاستومری از خانواده پلی‌اورتان است که قابلیت ریخته‌گری دارد و برای پخت نیاز به تجهیزات ویژه‌ای نظیر پرس و حرارت نداشته و در قطعات بزرگ قابل اجرا باشد.



ب- شعله موتور در زاویه صفر درجه نازل



الف- نمای موتور سوخت جامد به همراه نازل متحرک قبل از آزمایش گرم



د- اعمال نیروی جک و تغییر بردار پیشران به کمک مفصل منعطف، ۷ درجه به سمت پایین



ج- اعمال نیروی جک و تغییر بردار پیشران به کمک مفصل منعطف، ۷ درجه به سمت بالا

شکل ۱۶- آزمایش گرم نازل متحرک، با کمک مفصل انعطاف‌پذیر و دوران نازل در جهات مختلف

## مراجع

- [4] Shani, Sh., Putter, Sh. and Peretz A., "Development of a High-Performance Flexible Joint for Thrust Vector Control," *31<sup>st</sup> AIAA Propulsion Conference and Exhibit*, San Diego, 1995.
- [5] Boury, D., Rey, J., Cronier, A., Greco, P. and Choune, G., "Rubber Materials and Solid Propulsion General Overview & Technical Challenges," *41<sup>st</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, USA, 2005. pp. 1-10.
- [6] Javadi, M., "Design, Manufacturing and Test of Solid Rocket Motor and Investigating the Extendible Exit Cone," (M. Sc. Thesis), Azad University, 2012 (In Persian).
- [1] Woodberry, R. F. H. and Zeamer, R. J., *Solid Rocket Thrust Vector Control*, NASA, Report SP- 8114, 1974.
- [2] Akiba, M. Kohno, "Development of Movable Nozzle for Solid Rocket Motor," *Institute of Space and Astronautical Science*, AIAA 83-2285, 1983.
- [3] Woodberry, R. F. H., "Flexible Joints for Thrust Vector Controls," *AIAA 11<sup>th</sup> Propulsion Conference*, Anaheim, California, 75-1221, 1975.