JSST

جلد ۵/ شمارهٔ ۲ / تابستان ۱۳۹۱
ص. ص ۸۳- ۷۵

یادداشت فنی

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

حسین مهدوی‌مقدم [۱*] و محمدمجتبی جوادی [۲]

۱ و ۲ - دانشکدهٔ 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 (thrust vector control (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 پایهٔ 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 پایهٔ 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

گشتاور چرخشی مفصل	T_q
زاویه دوران مفصل	θ
شعاع داخلی	r_o
شعاع خارجی	r_i
زاویهٔ داخلی مفصل	β_1
زاویهٔ خارجی مفصل	β_2
مدول برشی مؤثر	G

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 ماهوارهٔ مدرن در دنیا، از این روش استفاده شده است [۱].

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

---

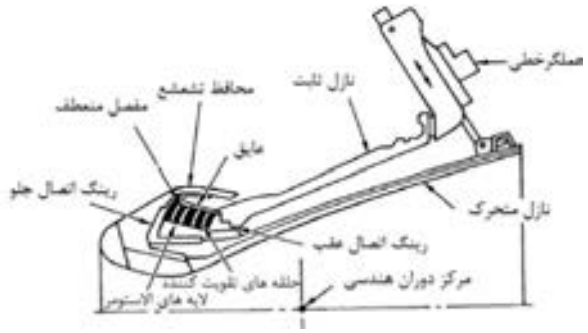
۱. استادیار (نویسندهٔ مخاطب)

۲. کارشناس ارشد هوافضا

دریافت مقاله: ۹۰/۰۱/۱۸ ، تأیید مقاله: ۹۱/۰۵/۲۳

Archive of SID
www.SID.ir

انعطاف‌پذیر در شکل (۱) نشان داده شده است.



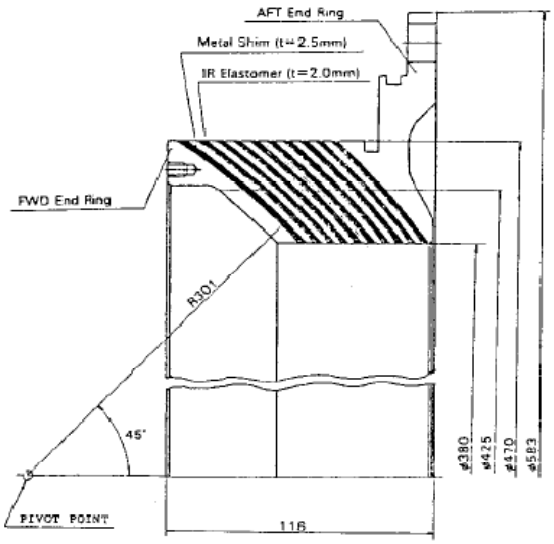
شکل ۱- نازل متحرک با روش مفصل انعطاف‌پذیر [۱]

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 برروی لایه‌های فلزی می‌شود، هندسهٔ 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 [۴ و ۳]:

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 وظیفهٔ 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[3] و SBR[4] است..

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

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

3. Nitrile butadiene rubber
4. Styrene Butadiene Rubber

Archive of SID
www.SID.ir

این فرآیند علاوه بر اینکه هزینهٔ 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 کلوین 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[5] می‌سازند. مفاصل هر دو موتورهای پوزایدون[6] 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 بازهٔ تغییرات سکانت مدول برشی از psi ۲۲ 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 محفظهٔ 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/ پلی بوتادین[7] در ساخت مفصل استفاده شده است و آزمایش‌های رومیزی آن با شرایط زیر انجام شد:

۱. دما بین ۲۳۳ کلوین تا ۳۴۷ کلوین
۲. فشار موتور معادل ۲۵۵۰ پوند بر اینچ مربع
۳. حداکثر زاویه ی بردار پیشران $\pm$۱۷/۵
۴. سرعت تغییر زاویه به مقدار ۲۶۰۰ درجه بر ثانیه

5. polyisoprene
6. Poseidon
7. neoprene/polybutadiene

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 فنری مورد نیاز برای دوران مفصل مشخص می‌شود.

دوم، آزمایش چسبندگی بین لایه‌هاست: در این آزمایش مفصل بدون فشار داخلی تحت دوران قرار می‌گیرد. هنگامی‌که 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 شرکت های 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 مفاصل انعطاف‌پذیر تصریح می‌کند بنابراین لزومی به آزمایش خستگی نیست. تنها در مورد موتورهای با استفادهٔ مجدد، مشابه بوستر جامد شاتل، این آزمایش انجام پذیرفته است که در مورد کاربرد مورد نظر این مقاله صادق نیست.

پیکربندی مفصل انعطاف‌پذیر

در این مقاله، طراحی مفصل انعطاف‌پذیر بوستر جامد MV مبنای طراحی قرارگرفت. قطر این بوستر ۷۵۰ میلی‌متر بود. موتوری با نسبت ۰/۷۵ برای بررسی جایگزینی لاستیک پلی‌ایزوپرن موتور اصلی با الاستومر پلی‌اورتان درنظرگرفته 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 لایهٔ الاستومری تشریح و نتایج آزمایش‌ها و مزایای این طرح بیان شده است.

Archive of SID

www.SID.ir

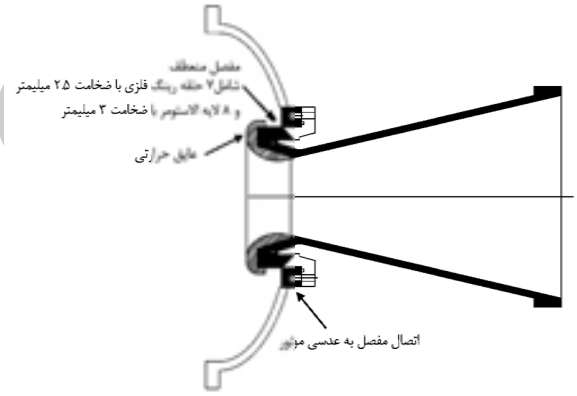
ویژگی‌های مورد انتظار

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 صفحهٔ 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 موتور سوخت جامد و در شکل (۴) تصویری از مفصل انعطاف‌پذیر تولید شدهٔ داخلی نشان داده شده است.



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

شکل ۴- تصویری از مفصل انعطاف‌پذیر تولیدشدهٔ داخلی

این مفصل از هشت لایه متناوب الاستومر/ فلز تشکیل شده که جنس صفحات فلزی فولاد CK75 است که سطح هر دو طرف آن پیش از عملیات مونتاژ کاملاً سندبلاست شده است. جدول (۱) مشخصات هندسی دو مفصل را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات هندسی مفصل انعطاف‌پذیر

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

جنس الاستومر از یک رزین پلی‌اورتان ترموست با کد ۵۰۷۵ از شرکت هانتزمن[8] می‌باشد که توسط پرایمر پلی‌اورتان با کد ۸۵۲۱ از شرکت تروسان[9] به صفحات فلزی متصل گردیده است.

در جدول 2 خواص هر دو الاستومر مقایسه شده است [۲].

جدول ۲- مقایسه خواص دو الاستومر

	بوستر MV	موتور ۵۰۰
جنس الاستومر	پلی ایزوپرن	پلی اورتان
سختی	۳۰ Hs	Hs40
سکانت مدول برشی	۲/۱ kg/cm^2	۳/۲ kg/cm^2
حد کرنش نهایی	٪۳۰۰	٪۳۰۰
حد استحکام کششی	۱۳۰kg/cm^2	۱۵۰ kg/cm^2
مدول یانگ در ٪۳۰۰	۱۵ kg/cm^2	۲۰ kg/cm^2

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

فرآیند تولید

فرآیند تولید قطعهٔ مفصل انعطاف‌پذیر طرح حاضر از پنج مرحلهٔ اصلی تشکیل شده است.

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

8.Huntsman
9.Teroson

Archive of SID
www.SID.ir

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 قطاعی از کره انجام پذیرد و سپس قطعهٔ نهایی با نهایت دقت تحت عملیات حرارتی قرار گیرد. در مرحلهٔ عملیات حرارتی نهایی در صورت اعمال سیکل نامناسب قطعه دچار تابیدگی می‌شود که صلاح‌پذیر نیست [۸] .

همچنین با توجه به اینکه در فرایند 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 تضمین‌کنندهٔ اتصال لایه‌های فولادی و الاستومری است.

آماده‌سازی رزین

رزین مورد استفاده از نوع پلی‌اورتان با کد ۵۰۷۵ از شرکت هانتزمن 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 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 به‌سرعت 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 قطعهٔ نهایی تأثیرگذار است. مدت زمان اعمال خلأ ۵ دقیقه است.

پس از ریخته‌گری باید رزین در دمای حدود ۴۰ الی ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت پخته شود تا خواص نهایی خود را به‌دست آورد. پس از این مرحله، قطعهٔ نهایی مورد ماشین‌کاری قرار می‌گیرد و ابعاد آن نهایی می‌شود. در شکل (۴) قطعهٔ 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 افست[10] گشتاور اینرسی، گشتاور جاذبه‌ای، گشتاور بوت عایق، گشتاور نیروهای آیرودینامیکی داخلی، گشتاور نیروهای آیرودینامیکی خارجی [۱].

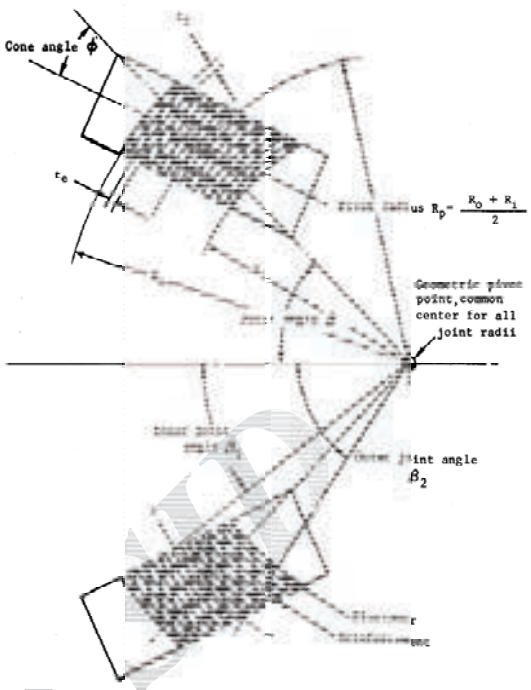
از میان گشتاورهای نام‌برده، اهمیت گشتاور فنر مفصل و گشتاور نیروهای آیرودینامیکی داخلی حایز اهمیت است. بنابراین این دو مقدار باید برای تخمین نیروی عملگر محاسبه شود. برای محاسبهٔ نیروی ناشی از گشتاور فنر مفصل دو روش وجود دارد:

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

$$\frac{Tq}{\theta} = \frac{0.156 G r_o^3 r_i^3 (\beta_2 - \beta_1)}{r_o^3 - r_i^3} \qquad (۱)$$

10. Offset

Archive of SID
www.SID.ir



شکل۶- نمایش نمادهای بکاررفته در رابطهٔ (۱)

در آن: T_qگشتاور چرخشی مفصل، θ زاویهٔ دوران مفصل که در اینجا برابر ۷ درجه است. r_o ,r_i به ترتیب شعاع داخلی و خارجی و β_1 و β_2 زاویهٔ داخلی و خارجی مفصل هستند. G نیز مدول برشی مؤثر است که از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید.

$$G = G_o + A\sigma^2 \qquad (۲)$$

$$A = -0.2595\times10^6 \qquad (۳)$$

$$\sigma^2 = \frac{Pc\sin^2\beta 2}{(\sin^2\beta_2 - \sin^2\beta_1)\cos^2\phi} \qquad (۴)$$

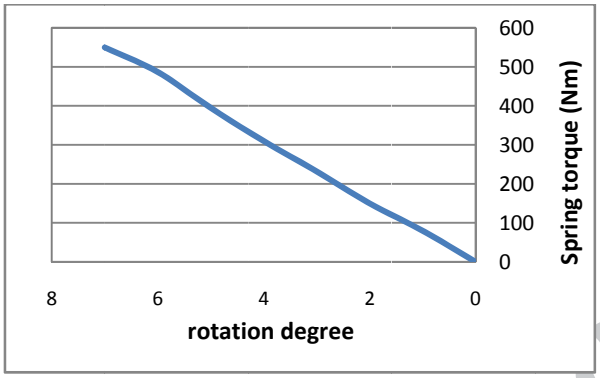
در رابطهٔ بالا P_c فشار موتور و ϕ زاویهٔ مخروط است. همچنین کلیهٔ پارامترهای هندسی معادلهٔ (۴) در شکل (۶) نشان داده شده است. G_o سکانت مدول برشی الاستومر است. با توجه به این روابط مقدار این گشتاور برای دوران ۷ درجه برابر ۶۰۰ نیوتن متر است.

رابطهٔ محاسبه گشتاور (۱) حداکثر ۸٪ خطا دارد [۱]. بنابراین با استفاده از آزمایش هیدرواستاتیک مقدار دقیق این نیرو تعیین می‌شود.

به‌منظور ارزیابی کارایی مفصل منعطف طراحی شده، ۲ مرحله آزمایش روی آن انجام شد که در همهٔ آنها قطعه، کارایی مناسبی را نشان داد. این دو مرحله آزمایش عبارتند از :

آزمایش نشتی: در این آزمایش قطعه و موتور مونتاژ و آب‌بند شده و توسط کمپرسور هوا ۸ بار فشار در داخل آن اعمال شده و سپس نشتی بین لایه‌ها و اتصالات کنترل شد. سپس مدت ۲۴ ساعت این فشار حفظ شد که در این مدت زمان هیچ کاهش فشاری دیده نشد.

آزمایش هیدرواستاتیک ۷۰ بار: در این آزمایش توسط دستگاه آزمایش هیدرواستاتیک با استفاده از آب داخل محفظهٔ فشار ۷۰ بار اعمال شد و در این شرایط، که شرایط کارکرد موتور است باکمک 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 زاویهٔ دوران به‌دست آمد. مقدار این نیرو برای دوران ۷ درجه‌ای حدود ۳۰ کیلوگرم نیرو برآورد شد و پس از جابه‌جایی‌های متعدد هیچگونه نشتی یا صدمه در قطعه مشاهده نشد. در شکل (۷) تغییرات گشتاور فنری مفصل با زاویهٔ دوران نشان داده شده است. این نمودار، با توجه به فشار جک هیدرولیک و بازوی گشتاوری رسم شده است.



شکل ۷- تغییرات گشتاور فنری مفصل با زاویه دوران

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

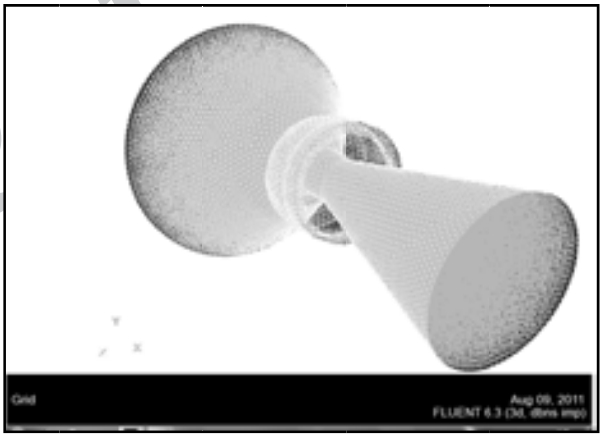
شکل ۸- موتور با اتصال انعطاف‌پذیر در آزمایش هیدرواستاتیک ۷۰ بار

www.SID.ir

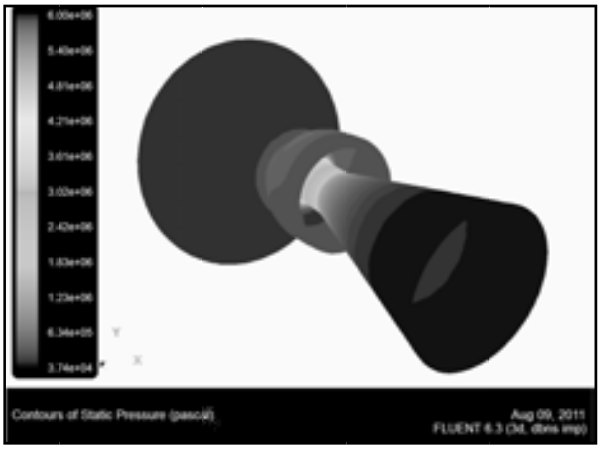
محاسبهٔ گشتاور آیرودینامیک داخلی

به‌منظور به‌دست‌آوردن 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 به‌دست می‌آید. این مقادیر در شکل (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است.

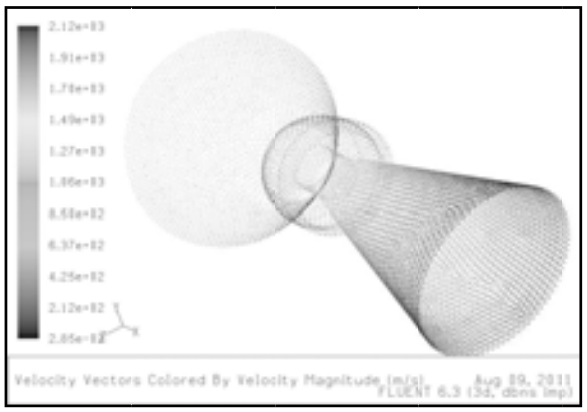
قرارگرفتن قسمت متحرک نازل در برابر جریان، بر جریان درون نازل تأثیر دارد. به‌نحوی‌که لبه‌ای از قسمت متحرک نازل که در برابر جریان قرار می‌گیرد باعث ایجاد افزایش فشار در ناحیهٔ برخورد می‌شود. لبه‌ای از قسمت متحرک نازل که از مسیر مستقیم جریان دور می‌شود، باعث انبساط و کاهش فشار سیال می‌شود. به این ترتیب دو نقطهٔ پرفشار و کم‌فشار دقیقاً روبه‌روی 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



شکل ۱۱- بردارسرعت 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 درنظرگرفتن هر دو گشتاور فنر مفصل و گشتاور آیرودینامیکی مقدار نیروی مورد نیاز محرک برابر ۵۰ کیلوگرم نیرو برآورد شد که با درنظرگرفتن 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- قطعهٔ 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 قطر۵۰۰ 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 به‌دست آمد که برای موتور با پیشران ۴۲۳۸ کیلوگرم نیرو عدد بسیار مناسبی

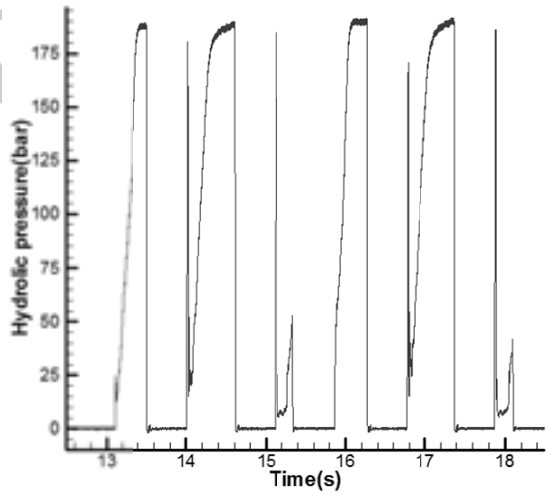
Archive of SID
www.SID.ir

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

برای اندازه‌گیری مقدار فشار داخل محفظهٔ 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 به‌منظور به‌دست‌آوردن نیروهای پیشران اصلی طراحی شد که به‌وسیلهٔ 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 انعطاف‌پذیر در شرایط آزمایش گرم نشان داده شده است.



شکل ۱۳- تغییرات فشار عملگر هیدرولیک

بحث و بررسی

هدف از اجرای این طرح، ارائهٔ یک الاستومر مناسب برای استفاده در مفصل انعطاف‌پذیر است که علاوه بر داشتن تمام شرایط فنی لازم، فرآیند به‌کارگیری آن نیز ساده و کم‌هزینه باشد و نیاز به تجهیزات خاص نداشته باشد.

انتخاب طراح در این طرح الاستومری از خانوادهٔ 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.

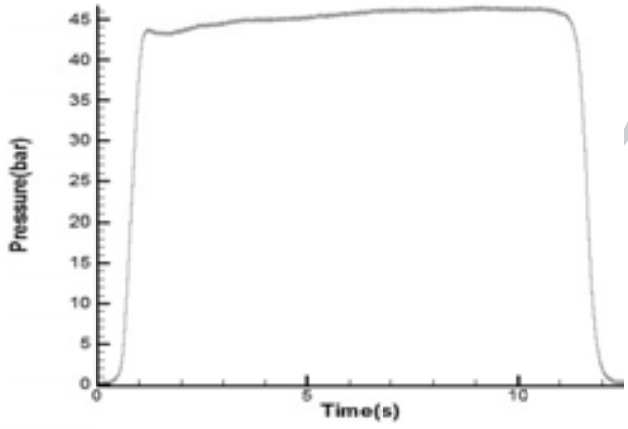
الاستومر انتخابی از لحاظ خواص مکانیکی در حد لاستیک طبیعی است که یک الاستومر متداول در زمینهٔ مفصل انعطاف‌پذیر است، و در عین حال با استفاده از یک پرایمر مخصوص چسبندگی مناسبی نیز با فولاد دارد.

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 قطعهٔ تولید شده اجرا شد که در کلیه مراحل قطعهٔ مذکور کارایی مورد نظر را از خود نشان داد.

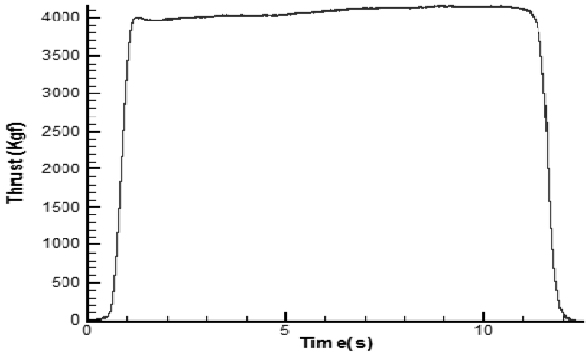
بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت طرح مفصل انعطاف‌پذیر شرح داده شده کارایی لازم را برای استفاده در یک موتور عملیاتی را داشته و قابلیت تولید در ابعاد بزرگ را نیز دارا می‌باشد.

همچنین به‌نظر 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، تضمین‌کنندهٔ کارایی اتصال انعطاف‌پذیر است.

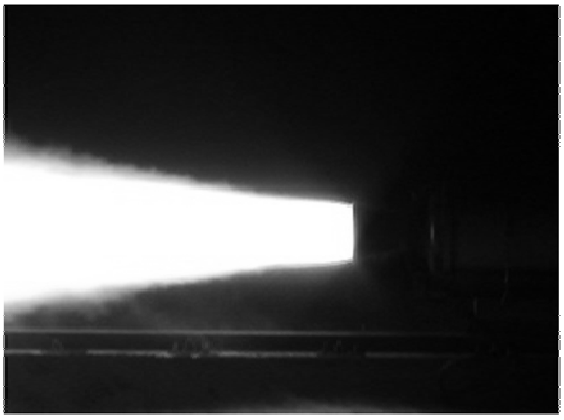


شکل ۱۴- منحنی فشار موتور با مفصل انعطاف‌پذیر در آزمایش گرم

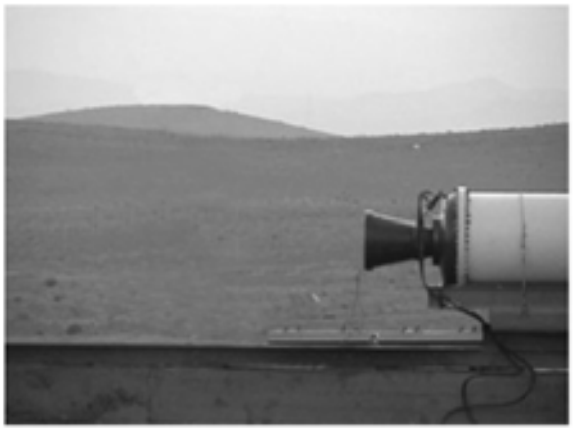


شکل ۱۵- منحنی نیروی پیشران موتور با مفصل انعطاف‌پذیر در آزمایش گرم

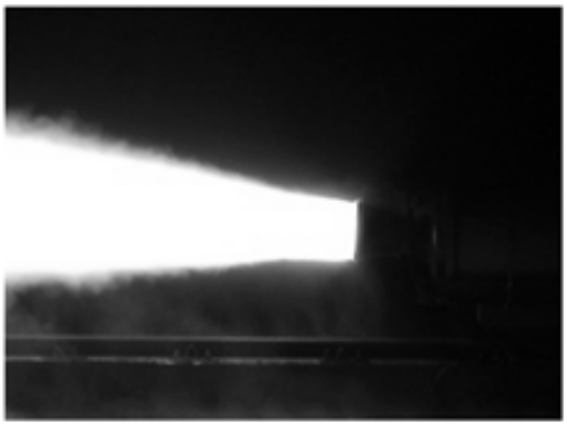
www.SID.ir



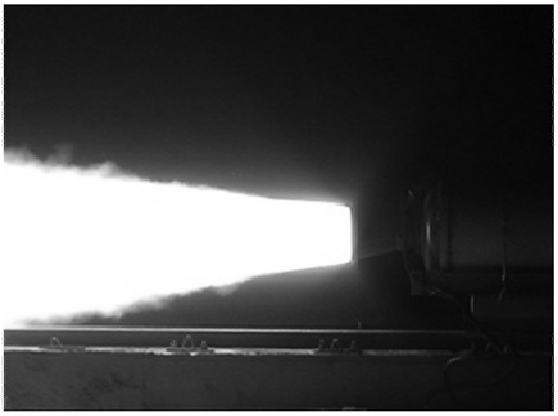
الف- نمای موتورسوخت جامد به همراه نازل متحرک قبل از آزمایش گرم



ب- شعلهٔ موتور در زاویهٔ صفر درجهٔ نازل



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



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

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

مراجع

[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 11th Propulsion Conference*, Anaheim, California, 75-1221, 1975.

[4] Shani, Sh., Putter, Sh. and Peretz A., "Development of a High-Performance Flexible Joint for Thrust Vector Control," *31st 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," *41st 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).

Archive of SID
www.SID.ir