



بررسی تجربی و عددی اثر پارامترهای هندسی روی رفتار غیرخطی لولای منعطف جهت کنترل بردار تراست موتور سوخت جامد

محمدعلی رمضانی^۱، شهرام یوسفی^{۲*} و نوربخش فولادی^۳

^۱ دانشجوی دکتری هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر

^۲ دانشیار مجتمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر

^۳ دانشیار مجتمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر

یادداشت تحقیقاتی، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۰۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۷/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۰۸

چکیده

موتور پیشران سوخت جامد در انواع سامانه‌های نظامی و فضایی به کار می‌رود. این موتورها نیازمند یک سیستم هدایت و کنترل در مسیر پرواز می‌باشند. یکی از پیشرفته‌ترین و موثرترین روش‌های کنترل بردار تراست، استفاده از لولای منعطف است که برای موتورهای قطر بالا کاربرد دارد. لولای منعطف شامل، لایه‌های الاستومری (با هدف انعطاف پذیری) است که با رینگ‌های فلزی (باهدف تامین صلبیت) تقویت می‌شوند. متریال لاستیکی بکار رفته توسعه داده شده، رفتار آن از نظر حرارتی و مکانیکی و رفتار وابسته به زمان، بررسی شده است. یک لولای منعطف، طراحی و ساخته شده و در ادامه نتایج تست هیدرواستاتیک ارائه شده است. روش شبیه‌سازی رفتار غیرخطی، با کمک نرم افزار اجزاء محدود ارائه و نتایج آن باتست مقایسه شده است که نتایج شبیه‌سازی، تطابق خوبی را با تست نشان می‌دهد، با توجه به اهمیت پارامترهای هندسی (هفت پارامتر هندسی مستقل)، اثر تغییر پارامترهای هندسی روی مشخصات نیرویی و تنش با کمک روش اجزاء محدود بررسی شده است. در نهایت با استفاده از نتایج بدست آمده، راهکار طراحی بهینه لولای منعطف با کمک تغییر ابعاد هندسی ارائه شده است.

کلمات کلیدی: لولای منعطف؛ مونی ریولین؛ لاستیک طبیعی؛ روش اجزاء محدود؛ موتور سوخت جامد.

Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Geometric Parameters on Flexible joint Nonlinear Behavior for Solid rocket motor Thrust Vector Control

M. A. Ramezani¹, S. Yousefi^{2,*}, N. Fouladi³

¹ Ph.D. Student Aerospace, Malek Ashtar University of Technology, Shahin Shahr, Iran.

² Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Shahin Shahr, Iran.

³ Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Shahin Shahr, Iran.

Abstract

Solid rocket motors are propulsion devices for both satellite launchers and missiles. They require guidance and steering to fly along a programmed trajectory and to compensate for flight disturbances. In most solid rocket motors, Thrust vector control (TVC) is required. One of the most efficient methods of TVC is flexible nozzle system. The flexible nozzle consists of a flexible joint made of an elastomeric material alternating with reinforcement rings of metallic material. In this paper nonlinear simulation of flexible joint developed. The flexible joint is the most widely used device in modern nozzle. To obtain reliable design and reduce development risk nonlinear finite element analysis was performed to simulate the flexible joint structural behavior in bench test conditions. The analysis predictions show good agreement with the test. Considering the importance of geometric parameters, the effect of changing geometric parameters on the flexible joint behavioral behavior has been investigated with the help of finite element method, and a suitable flexible joint design has been proposed with the help of changing geometric dimensions with considering different input parameters.

Keywords: Flexible Joint; Mooney Rivlin; Natural rubber; Finite Element; Solid Rocket Motor.

۱- مقدمه

معمولاً بردار پیشراانه موتور سوخت جامد، در راستای محور مرکزی حامل است که از مرکز جرم می‌گذرد؛ بنابراین با انحراف در بردار پیشراانه می‌توان، گشتاور مورد نیاز برای حرکت‌های مختلف را برای طی مسیر به حامل اعمال کرد. مکانیزم‌های مختلفی برای کنترل بردار تراست موتور سوخت جامد وجود دارد، از جمله لولای منعطف^۱، جیمبال^۲، نازل چرخان^۳، گوی و کاسه^۴ و .. که در تمام این روش‌های گفته شده، روش لولای منعطف در موتورهای قطر بزرگ، وسیع ترین استفاده در جهان را دارد [۱].

در شکل ۱ نمای دوبعدی نازل منعطف که به انتهای موتور سوخت جامد متصل می‌شود، به همراه متعلقات کنترلی و لولای منعطف نشان داده شده است. لولای منعطف شامل، چندین لایه فلزی و الاستومری است که با اعمال نیرو توسط اکچوایتورهای خطی، امکان دوران نازل در جهات دلخواه ایجاد می‌کند.

وودبری^۵ آزمایشاتی انجام داد و روابط تجربی برای اشکال اولیه لولای منعطف را ارائه کرد [۱]. وودبری تنش لایه‌های فلزی بکار رفته در لولای منعطف را وابسته به فشار کاری موتور و تعداد لایه‌ها و ضخامت آن‌ها دانسته، تنش برشی لایه‌های لاستیکی را وابسته به ضخامت لایه‌های لاستیک می‌دانست. آن روابط تجربی خود را برای تنش بوجود آمده در اثر دوران لولای منعطف ارائه کرد و گفت تنش برشی لایه های لاستیکی، وابسته به ضخامت کل لایه‌های لاستیک است، نه ضخامت هر لایه که این روابط از دقت خوبی برخوردار نبودند [۲].

رام موهان^۶ در سال ۲۰۱۲، آنالیزی را روی لولای منعطف با کمک اجزاء محدود انجام داد و نتایج آن را با تست مقایسه کرد. نتایج بررسی او نشان می‌دهد، روابط تجربی موجود مخصوصاً در حالت دوران یافته لولای منعطف دقیق نیستند که لولا تحت بار اکچوایتورها قرار دارد [۳].

باپیراجو^۸ در تحقیقاتش نشان داد، تحلیل‌های خطی لولای منعطف از نتایج واقعی کاملاً فاصله دارند و برای نتایج بهتر نیاز به آنالیز غیرخطی رفتار لاستیک‌ها است [۴]. بررسی اثر درصد استفاده از لایه فلزی، روی یک نمونه لولای منعطف توسعه داده شده توسط اسوارا کومار^۹ در سال ۲۰۱۵ نشان داد که فولاد با استحکام و صلبیت بالا برای لولای منعطف مناسب است [۵]. پراکاش^{۱۰} در سال ۲۰۱۷، اثر تغییر مواد فلزی را روی نازل منعطف بررسی کرده است [۶]. با توجه به اینکه لولای منعطف از هندسه پیچیده‌ای برخوردار است، تا کنون مطالعات دقیقی روی اثر هندسه لولای منعطف انجام نشده است و تنها به بررسی اجمالی نوع متریال بکار رفته در لولای منعطف پرداخته شده است.

نازل منعطف در بوستر حامل‌های بزرگ ماهواره بر مثل شاتل^{۱۱}، آریان ۵^{۱۲}، ماهواره بر وگا^{۱۳} و بسیاری محصولات نظامی بکار رفته است.

۲- طراحی، مدلسازی و ساخت لولای منعطف

نازل منعطف شامل، چندین بخش اصلی فلزی و غیرفلزی است که با کمک زیر مجموعه لولای منعطف بکار رفته در آن، قابلیت چرخش حول نقطه دوران خود را دارد. نیروی اکچوایتورهای خطی و کورس لازم برای دوران، از پارامترهای مهمی هستند که می‌بایست در تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌ها مشخص گردند تا برای نازل منعطف اکچوایتور، مناسب طراحی شود. یک نمونه لولای منعطف، مطابق شکل ۲ و با مشخصات هندسی ارائه شده طراحی و ساخته شد. مرکز دوران، همان مرکز قطاع دایروی رینگ‌های لاستیکی و فلزی است که لولای منعطف در اثر اعمال نیروی اکچوایتور، تقریباً حول این نقطه دوران می‌کند. بدلیل رفتار غیرخطی لاستیک، نقطه دوران واقعی و هندسی روی هم نمی‌افتد؛ اما خطای آن بسیار ناچیز و قابل صرف نظر کردن است [۱].

جنس فولاد انتخاب شده برای تولید لایه‌های فلزی VCN200 است، زیرا قابلیت جوشکاری و ورقکاری مناسبی داشته و استحکام آن بالا است. از لاستیک SBR برای ساخت

¹ Flexible Joint

² Gimbal

³ Hinged

⁴ Ball and Socket

⁵ Woodberry

⁶ Anon

⁷ RamMohan

⁸ Bapi Raju

⁹ Esvara Kumar

¹⁰ Prakash

¹¹ Shuttle

¹² Ariane 5

¹³ Vega

مجموعه از چسب جهت ماندگاری و جلوگیری از زنگ زدگی استفاده شد. در شکل ۴، لایه‌های فلزی قبل و بعد از پخت لاستیک نشان داده شده است.

مدول یانگ فولاد 207Gpa و ضریب پواسون آن 0.3 است. تصویر تست کشش لاستیک در چمبر حرارتی، در شکل ۵ نشان داده شده است. این لاستیک از نظر عمر و خواص چسبندگی و مکانیکی، رفتار مناسبی دارد.

۳- بررسی اثر دما بر روی الاستومر

با توجه به اینکه هنگام عملکرد موتور، دمای بسیار بالاتری از حد تحمل لاستیک‌ها ایجاد می‌شود، از لایه عایقی به عنوان محافظ استفاده می‌شود، اما درصدی از دما بصورت ناخواسته



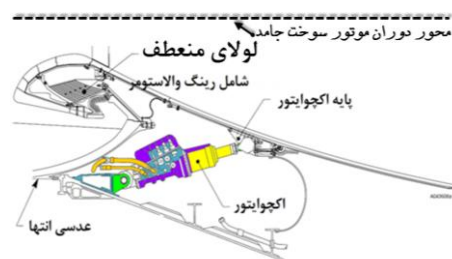
شکل ۴- لولای منعطف، رینگ های فلزی قبل از لایه چینی لایه های لاستیک (۱) بعد از پخت لایه های لاستیک (۲)



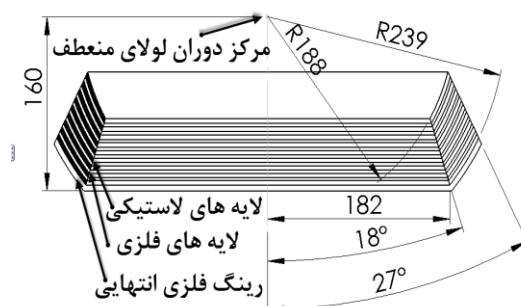
شکل ۵- تست کشش لاستیک در چمبر حرارتی

لولای منعطف استفاده شد که در آن از سولفور، فیلرکربن بلک و شتاب دهنده‌ها برای استحکام و ماندگاری بالا استفاده شد. در شکل ۳، نمای لولای منعطف ساخته شده، نشان داده شده است.

ورق فولادی ماشینکاری شده و لایه چینی لایه‌های لاستیک به صورت دستی انجام شد. در ادامه پخت لولای منعطف در آن انجام شده است. از یک لایه پرایمر برای اتصال مناسب بین لاستیک و فلز استفاده شده است و روی



شکل ۱- نازل منعطف موتور سوخت جامد شامل لولای منعطف، اکچوایتور و عدسی انتهایی موتور سوخت جامد



شکل ۲- پارامترهای هندسی لولای منعطف

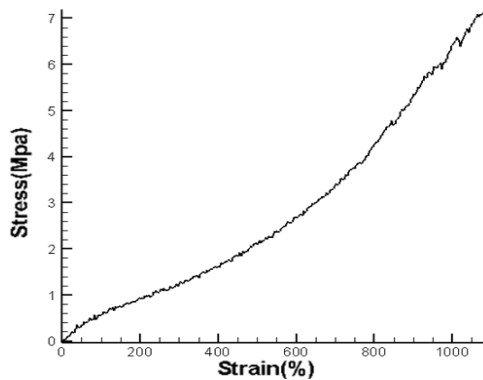


شکل ۳- لولای منعطف شامل لایه های فلزی و الاستومری بعد از ماشینکاری

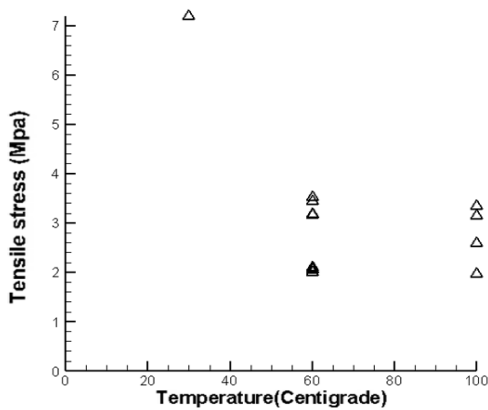
$$W = \sum_{i=0, j=0}^{\infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j, C_{00} = 0 \quad (2)$$

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3)$$

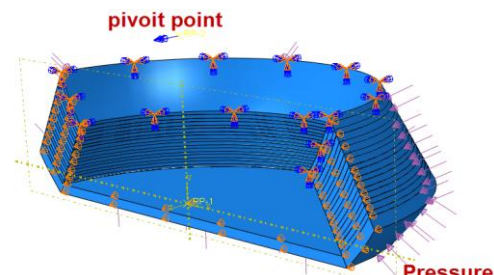
ضرایب مونی ریولین برای لاستیک SBR تولید شده در دمای محیط $C_{10}=455402$ و $C_{01}=-131465$ است. برای کاهش زمان حل مساله و با توجه به تقارن در هندسه لولای منعطف و بارگذاری، لولای منعطف به صورت شکل ۸ مدل سازی گردید.



شکل ۶- نمودار تست کشش نمونه لاستیک (۲۵°C)



شکل ۷- نتایج تست کشش لاستیک در دماهای مختلف



شکل ۸- نیروها و شرایط مرزی، فشار ۲۵ بار و دوران ۳ درجه در مرکز دوران (pivot point)

به لایه های لاستیک انتقال پیدا می کند. باتوجه به اینکه زمان عملکرد موتور محدود است، لذا می بایست حین عملکرد، محدوده افزایش دما مشخص گردد. تعیین رفتار دمایی و نرم شدگی لاستیک برای طراحی لایه محافظتی می بایست انجام شود؛ لذا روی لاستیک فوق الذکر در سه دمای 30° ، 60° ، 100° درجه تست کشش انجام شد.

در شکل ۶ نتایج تست کشش لاستیک در دمای محیط نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که در صورت افزایش دما تا 60° ، خواص لاستیک افت چشمگیری خواهد داشت و در 100° درجه، تقریباً به یک چهارم خواص اولیه می رسد. مقایسه نتایج تست کشش (حداکثر استحکام لاستیک) در دماهای مختلف، در شکل ۷ نشان داده شده است.

با توجه به رفتار غیرخطی لاستیک در اثر تغییر دما، می بایست در طراحی لایه محافظ حرارتی (جلوگیری از انتقال دمای گازهای داغ موتور) و جلوگیری از تغییر دمای لاستیک در انبار داری و نگهداری لولای منعطف، تمهیداتی در نظر گرفته شود که از جمله استفاده از بوت حرارتی پیشنهاد می شود. در نهایت می توان گفت، در صورت افزایش دما لاستیک رفتار مناسبی نخواهد داشت و دما نباید از دمای محیط بیشتر شود.

۴- شبیه سازی اجزاء محدود لولای منعطف

مدلسازی و شبیه سازی لولای منعطف ساخته شده، با نرم افزار اجزاء محدود آباکوس انجام شد. برای مدلسازی غیرخطی لاستیک، مدل های مختلفی مثل آگدن، یئو، نئوهوکین و مونی ریولی برای مدلسازی رفتارهای پیرالاستیک لاستیک ها ارائه شده است [۶]. مدل مونی ریولین، تطابق خوبی تا 30% کرنش را در نمونه تست شده داشته است. تابع انرژی کرنشی، به صورت رابطه (۱) نوشته می شود. I_1 و I_2 و I_3 تانسور کرنشی می باشند که I_3 کرنش حجمی است و برای متریبال تراکم ناپذیر یک در نظر گرفته می شود. I_1 و I_2 آنها کشش های اصلی هستند. در نهایت مونی ریولین با کمک سری تیلور، رابطه (۲) را ارائه کرده است [۷]. عموماً دوجمله اول سری و ثوابت آن برای شبیه سازی لاستیک کافی است، C_{ij} نیز از نتایج تطابق تست کشش و داده تجربی بدست می آید.

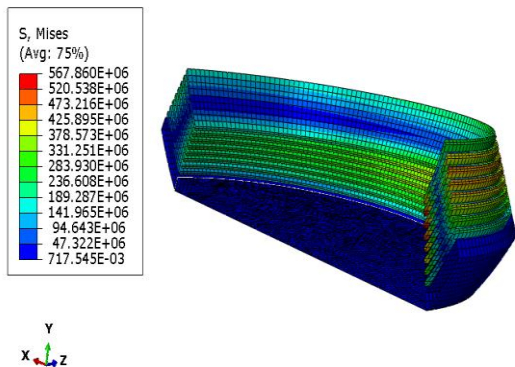
$$W = w(I_1, I_2, I_3)$$

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (1)$$

$$I_3 = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$$

$$\lambda = 1 + \epsilon$$



شکل ۹- کانتور تنش لولای منعطف (برحسب پاسکال)



شکل ۱۰- اکچوایتور خطی در تست هیدرواستاتیک

۵-۱- تست پله

جهت استخراج ضرایب کنترلی و تابع تبدیل مجموعه، از تست‌های پله استفاده می‌شود، از نتایج نیرو سنج جهت شبیه‌سازی و صحت سنجی نتایج اجزاء محدود استفاده می‌شود. نمودار نیرو- زمان برای فرمان ۳ درجه دوران در شکل ۱۱، نشان داده شده است.

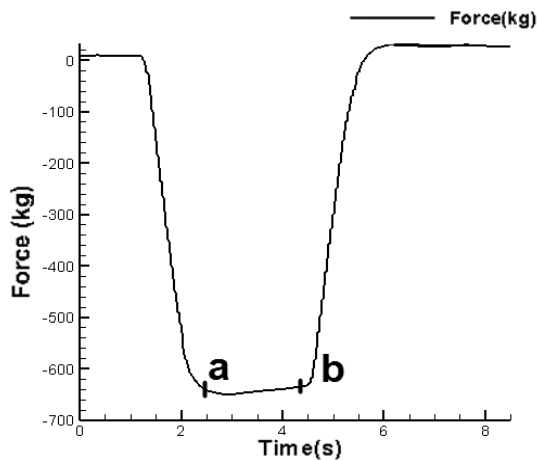
۴-۱- شرایط مرزی

شرایط مرزی شامل، دو تکیه گاه، یک فشار و یک دوران اجباری است. در این تحلیل روی مرکز دوران لولای منعطف با اعمال نیرو توسط اکچوایتور، یک دوران اجباری ۳ درجه اعمال می‌شود (این نیرو در تست هیدرواستاتیک اندازه‌گیری شده است)، این دوران برای چرخش گازهای داغ موتور و کنترل بردار تراست، توسط اکچوایتورهای خطی اعمال می‌شود. فشار داخلی شبیه ساز هیدرواستاتیک روی آن اعمال می‌شود. در تست آزمایشگاهی هیدرواستاتیک به دلیل بستن گلوگاه نازل برای جلوگیری از خروج آب، سطح مقطع گلوگاه تحت فشار تغییر می‌کند؛ لذا فشاری معادل با فشار کاری موتور محاسبه و اعمال می‌شود (فشار ۲۵ بار). رینگ فوقانی در تمام جهات مقید شده، در صفحه تقارن نیز قید تکیه گاهی سیمتริก برای نیمی از مدل که حذف شده است، قرار داده شده است. در نهایت خروجی تحلیل‌ها، تنش و کرنش رینگ‌های فلزی و لاستیکی به همراه گشتاور مورد نیاز برای دوران لولای منعطف است.

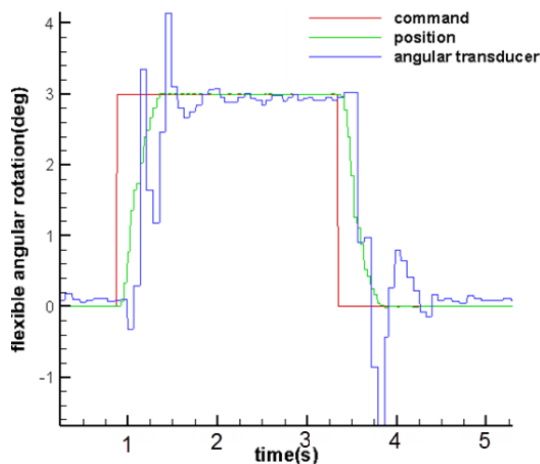
در شکل ۹ کانتور تنش لولای منعطف نشان داده شده است. نحوه دوران قطعه، کاملاً در این کانتور مشخص است. لازم به ذکر است، تنش لایه‌های لاستیک، بسیار پایین‌تر از تنش لایه‌های فلزی است. جزئیات نتایج شبیه‌سازی با نتایج تست هیدرواستاتیک، در ادامه مقایسه شده است.

۵- تست هیدرواستاتیک

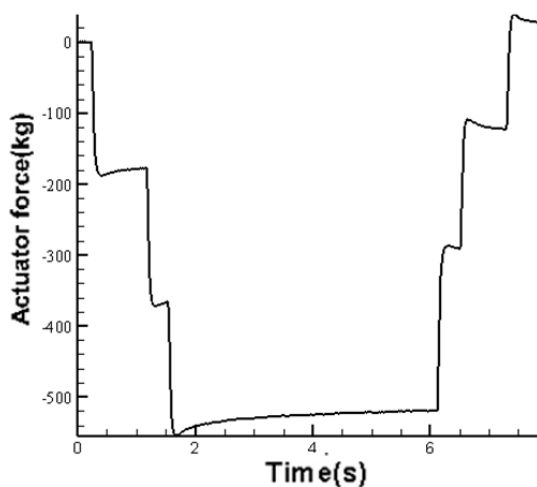
در تست هیدرواستاتیک با کمک یک مخزن سر بسته پر از آب و با کمک پمپ آب، فشار لازم روی لولای منعطف اعمال می‌شود (دمای آزمایشگاهی). با کمک اکچوایتور خطی که کنترلر آن با قابلیت کمک به زاویه سنج دیجیتال قابلیت کنترل دوران لولای منعطف را دارد، لولای منعطف ۳ درجه چرخیده و نیروسنج نصب شده روی اکچوایتور، می‌تواند نیروی دوران را اندازه‌گیری نماید. دوران ۳ درجه، مطابق دوران اعمال شده در شبیه‌سازی بادقت ۰/۰۱ درجه در تست اعمال گردید. در شکل ۱۰، نمایی از اکچوایتور خطی در هیدرواستاتیک نشان داده شده است. تست‌های انجام شده شامل، تست‌های پله و تست پله متقارن است.



شکل ۱۱- نمودار نیرو- زمان برای ۳ درجه دوران



شکل ۱۲- نمودار دوران برحسب زمان لولای منعطف



شکل ۱۳- نمودار نیرو- زمان در تست پله ای متقارن

ماکزیمم نیرو ۵۸۰ کیلوگرم است. کاهش نیرو در لحظات اولیه اجرای فرمان، بخاطر پدیده نرم شدگی^۱ در لاستیک لولای منعطف است (در شکل ۱۱ از نقطه a تا نقطه b بدلیل نرم شدگی یا همان ریلکسیشن نیرو کاهش می‌یابد، لازم به ذکر است، در این بخش تغییر زاویه دوران وجود ندارد، اکچوایاتور ثابت و لولای منعطف در زاویه ۳ درجه ثابت نگه داشته شده است)

برای بررسی دقت فرامین ارسال شده در تست پله ۳ درجه، نتایج با زاویه سنج دیجیتال و خروجی انکودر اکچوایاتور در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این شکل، رفتار اکچوایاتور در برابر فرمان پله نشان داده شده است که این دوران، معادل ۱۵ میلی‌متر جابه‌جایی خطی اکچوایاتور است. داده برداری به کمک زاویه سنج دیجیتال نیز، همین رفتار را تایید نموده است.

۵-۲- تست پله متقارن

در این تست بصورت پله‌ای فرامین افزایش زاویه دوران تا سه درجه، بصورت سه فرمان یک درجه‌ای اعمال گردید و بعد از آن به همان شکل کاهش دوران اعمال گردید. لولای منعطف در اثر تغییر شکل‌های افزایشی و کاهش، تقریباً رفتار قابل پیش بینی داشته است. طی سه فرمان هریک به میزان یک درجه، در مجموع دوران ۳ درجه رفت و برگشت انجام شده است. در لحظات اولیه اجرای فرامین به علت سرعت اجرای فرمان دوران (ده درجه برثانیه)، افتی در نیروی لازم برای نگه داشتن لولای منعطف در زاویه مورد نظر دیده می‌شود که به دلیل پدیده نرم شدگی لایه‌های لاستیک است. در شکل ۱۳، نیروی اندازه‌گیری شده توسط نیروسنج نشان داده شده است.

۶- مقایسه نتایج شبیه سازی و تست

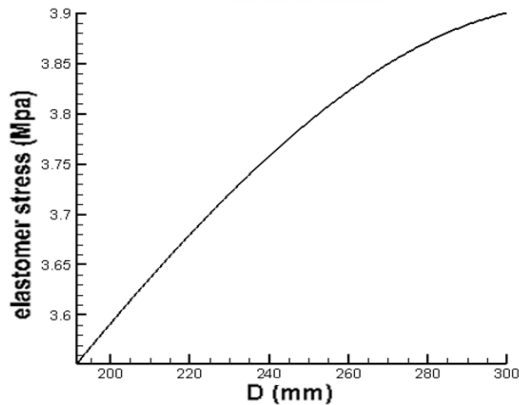
با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده و نتایج تست هیدرواستاتیک و با توجه به اینکه رفتار نرم شدگی در نرم افزار اجزاء محدود دیده نشده است و تحلیل اجزاء محدود استاتیکی است، دو نقطه a و b در شکل ۱۱ تعریف گردید. در نقطه b بعد از چندین ثانیه مقدار نیروی لازم برای نگه داشتن لولای منعطف در حالت دوران کاهش می‌یابد که به

^۱ Relaxation

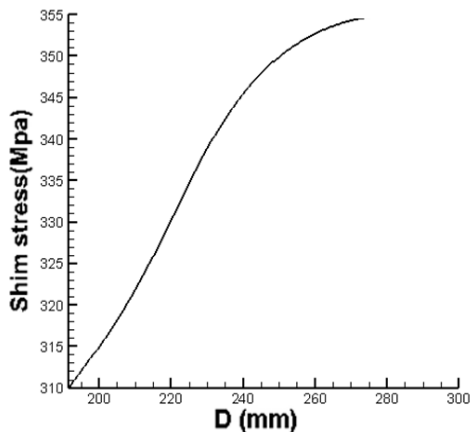
در جدول ۱ مشخصات هندسی پنج مدل هندسی با تغییر پارامتر D ارائه شده است تا اثر این پارامتر بررسی شود.

برای بررسی اثر شعاع دوران در محدوده مناسب، شعاع دوران از کم به زیاد تغییر داده شد و نتایج اجزاء محدود آن استخراج گردید.

در تمام مدل‌های فوق، فقط پارامتر D افزایش داشته است، اما پارامتر ارتفاع مرکز دوران، یک پارامتر وابسته به شعاع دوران است و به همین دلیل تغییر کرده است. در نهایت رفتار تنش بدست آمده از اجزاء محدود، در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ و رفتار گشتاور این مدل‌ها، در شکل ۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۱۵- تنش لایه‌های لاستیک بر حسب تغییر پارامتر D



شکل ۱۶- تغییر تنش لایه‌های تقویت کننده‌ها بر حسب تغییر پارامتر D

نتایج شبیه‌سازی هایپرلاستیک نزدیک است. خطای شبیه سازی نیرویی در نقطه a، حدود ۱۰٪ و در نقطه b، حدود ۷٪ است؛ بنابراین می‌توان گفت، شبیه‌سازی‌های انجام شده از دقت مطلوب و قابل قبولی برخوردار هستند.

در نهایت با توجه به اینکه شبیه‌سازی رفتار غیرخطی لولای منعطف در نرم افزار اجزاء محدود انجام شد و صحت نتایج با خطای قابل قبول تایید گردید با کمک شبیه‌سازی، اثر پارامترهای هندسی لولای منعطف بررسی گردید؛ زیرا علاوه بر جنس مواد لاستیکی و فلزی، هندسه لولای منعطف در نتایج بسیار تاثیر گذار است و می‌بایست بررسی شود.

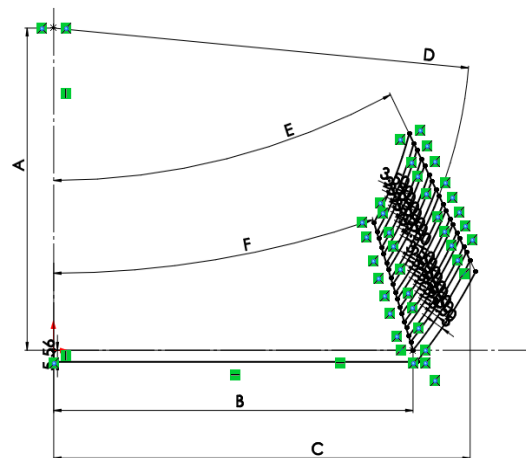
۷- بررسی اثر پارامترهای هندسی

با توجه به اینکه تاکنون اثر پارامترهای هندسی بررسی نشده است، در این بخش سعی شده تغییرات پارامترهای هندسی مستقل از هم، لولای منعطف بررسی شود و اثر تغییر هر یک از پارامترها، بطور دقیق بررسی شود.

بررسی اثر تغییرات پارامتر هندسی روی مقادیر مورد نیاز برای دوران لولای منعطف شامل:

۱. تغییر تعداد و ضخامت لاستیک
۲. تغییر تعداد و ضخامت فلز
۳. تغییر شعاع دوران شامل D
۴. تغییر قطر لولا B
۵. تغییر زاویه E
۶. تغییر زاویه F

در شکل ۱۴ پارامترهای هندسی لولای منعطف در حالت دوعبده نشان داده شده است

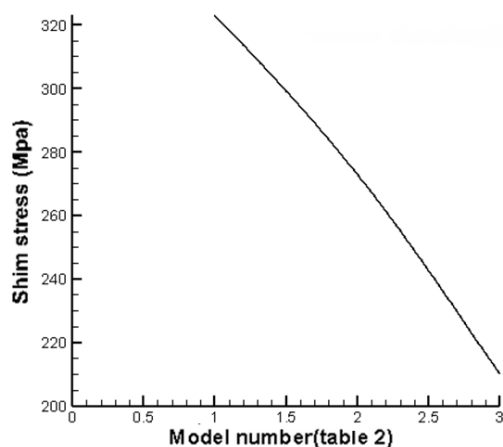


شکل ۱۴- پارامترهای هندسی لولای منعطف

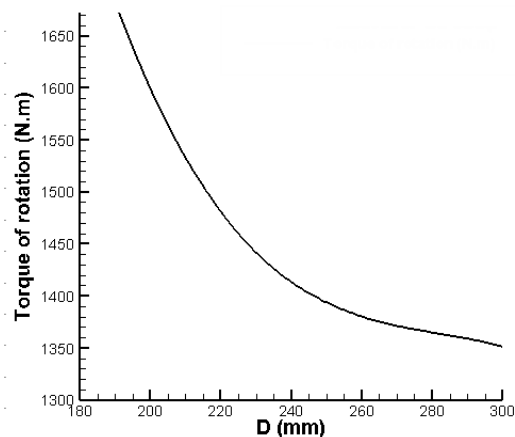
۷-۱- تغییر زوایای E و F

زوایای E و F مهمترین زوایا در هندسه لولای منعطف می‌باشند. طبق جدول ۲، زوایا تغییر و مقایسه باحالت اولیه بررسی گردید. لازم به ذکر است، تاکنون این زوایا موازی در نظر گرفته می‌شدند [۱].

نتایج نشان می‌دهد، با افزایش زاویه‌ها، تنش‌ها کم و گشتاور دوران بیشتر می‌شود. در شکل ۱۸، نمودار کاهش تنش‌ها نشان داده شده است.



شکل ۱۸- تنش لایه‌های تقویت کننده برحسب شماره مدل



شکل ۱۷- گشتاور دوران برحسب تغییر پارامتر D

می‌توان نتیجه گرفت با افزایش شعاع دوران تنش لایه‌های فلز و لاستیک افزایش می‌یابد، ولی گشتاور لازم برای دوران مجموعه کاهش می‌یابد که به تعیین نیروی اکچوایاتور منجر می‌شود. با توجه به اینکه در نهایت افزایش شعاع دوران درحالت فوق منجر به افزایش بازوی گشتاوری حامل می‌شود، افزایش شعاع دوران درطراحی مناسب است.

جدول ۱- پارامترهای هندسی ۵ مدل لولای منعطف

عنوان پارامتر	۱	۲	۳	۴	۵
A ارتفاع مرکز دوران mm	۱۲۱	۱۵۵	۱۸۳٫۸	۲۲۴	۲۷۳
B شعاع داخل mm	۱۸۲٫۵	۱۸۲٫۵	۱۸۲٫۵	۱۸۲٫۵	۱۸۲٫۵
C شعاع خارجی mm	۲۱۱٫۵	۲۱۱٫۵	۲۱۱٫۵	۲۱۱٫۵	۲۱۱٫۵
D شعاع دوران mm	۱۹۱٫۵	۲۱۱٫۵	۲۳۱٫۵	۲۶۱٫۵	۳۰۰
E زاویه خارجی	۲۷°	۲۷°	۲۷°	۲۷°	۲۷°
F زاویه داخلی	۱۸°	۱۸°	۱۸°	۱۸°	۱۸°

جدول ۲- پارامترهای هندسی با تغییر زوایای E و F

عنوان پارامتر	۱	۲	۳
A ارتفاع مرکز دوران mm	۱۵۵	۱۵۵	۱۵۵
B شعاع داخل mm	۱۸۲٫۵	۱۸۲٫۵	۱۸۲٫۵
C شعاع خارجی mm	۲۱۱٫۵	۲۱۱٫۵	۲۱۱٫۵
D شعاع دوران mm	۱۹۱٫۵	۲۱۱٫۵	۲۱۱٫۵
E زاویه خارجی	۲۷°	۱۸°	۲۷°
F زاویه داخلی	۱۸°	۱۸°	۲۷°

۲-۷- تغییر شعاع داخلی و خارجی B , C

برای بررسی اثر تغییر شعاع داخلی و خارجی، افزایش و کاهش یکسانی برای دو پارامتر C , D در جدول ۳ در نظر گرفته شد.

نتایج نشان می‌دهد، در طراحی نازل منعطف پارامترهای B , C باید حداقل مقدار ممکن را داشته باشند تا هم گشتاور مورد نیاز کاهش یابد، هم تنش‌های روی الاستومر و فلز کاهش می‌یابد.

۳-۷- تغییر ضخامت لایه لاستیک

برای بررسی اثر تغییر ضخامت لاستیک، از مدلی استفاده گردید که زوایای داخلی و خارجی موازی هستند. در این حالت تنش لایه‌های بالایی و پایینی در محدوده مشابه قرار خواهند گرفت و بررسی دقیق اثر تنش‌ها و گشتاور خروجی میسر می‌شود. در جدول ۴، سه مدل با تغییر ضخامت لایه‌های لاستیک بررسی شده است.

نتایج بررسی تغییر ضخامت لاستیک از ۲/۵ به ۳/۵ و ۴/۵ میلی‌متر نشان می‌دهد، با افزایش ضخامت لایه‌های لاستیک گشتاور به شدت کاهش می‌یابد که این موضوع برای کاهش نیروی لازم برای اکچوایتورها و منابع تغذیه و .. مناسب است، با کاهش گشتاور تنش در فلز و الاستومر افزایش نسبی می‌یابد که در طراحی می‌بایست، مدنظر قرار گیرد. در مجموع برای کاهش گشتاور، افزایش ضخامت لاستیک پیشنهاد مناسبی است. نتایج تغییر گشتاور، در شکل ۱۹ نشان داده شده است.

۴-۷- تغییر ضخامت لایه فلز

برای بررسی اثر تغییر ضخامت لایه فلزی، مطابق جدول ۵ از مدلی استفاده گردید که زوایای داخلی و خارجی موازی هستند.

جدول ۳- پارامترهای هندسی با تغییر پارامترهای B و C

عنوان پارامتر	۱	۲	۳
A ارتفاع مرکز دوران mm	۱۵۵	۱۵۵	۱۵۵
B شعاع داخل mm	۱۹۱/۵	۱۸۲/۵	۱۸۳/۵
C شعاع خارجی mm	۲۳۴	۲۱۱/۵	۲۳۵/۵
D شعاع دوران mm	۱۹۱/۵	۲۱۱/۵	۲۴۴
E زاویه خارجی	۲۷°	۲۷°	۲۷°
F زاویه داخلی	۱۸°	۱۸°	۱۸°

جدول ۴- پارامترهای هندسی با تغییر ضخامت لاستیک

عنوان پارامتر	۱	۲	۳
A ارتفاع مرکز دوران mm	۱۵۵	۱۵۵	۱۵۵
B شعاع داخل mm	۱۹۱/۵	۱۸۲/۵	۱۸۳/۵
C شعاع خارجی mm	۲۳۴	۲۱۱/۵	۲۳۵/۵
D شعاع دوران mm	۱۹۱/۵	۲۱۱/۵	۲۴۴
E زاویه خارجی	۲۷°	۲۷°	۲۷°
F زاویه داخلی	۱۸°	۱۸°	۱۸°
ضخامت لاستیک mm	۲/۵	۳/۵	۴/۵
ضخامت فلز mm	۲/۵	۲/۵	۲/۵

جدول ۵- پارامترهای هندسی با تغییر ضخامت لایه فلزی

عنوان پارامتر	۱	۲	۳
A ارتفاع مرکز دوران mm	۱۵۵	۱۶۰/۵	۱۶۶/۵
B شعاع داخل mm	۱۸۲/۵	۱۸۲/۵	۱۸۲/۵
C شعاع خارجی mm	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵
D شعاع دوران mm	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵	۲۱۱/۵
E زاویه خارجی	۲۷°	۲۷°	۲۷°
F زاویه داخلی	۲۷°	۲۷°	۲۷°
ضخامت لاستیک mm	۳/۵	۳/۵	۳/۵
ضخامت فلز mm	۲/۵	۳/۵	۴/۵

عوامل مهم طراحی لولای منعطف می‌باشند که بدلیل ماهیت غیرخطی لولای منعطف، می‌بایست رفتار آنها نسبت به تغییرات هندسی مشخص گردد. گشتاور پایین همواره مطلوب است؛ زیرا اکچواتوری با قدرت پایین تر و منبع تغذیه کوچکتر برای حامل، همواره مد نظر طراح است. در جدول ۶، این اثرات با فلش افزایشی و کاهش می‌مشخص شده است. دو فلش نمایانگر اثر بالای پارامتر هندسی است.

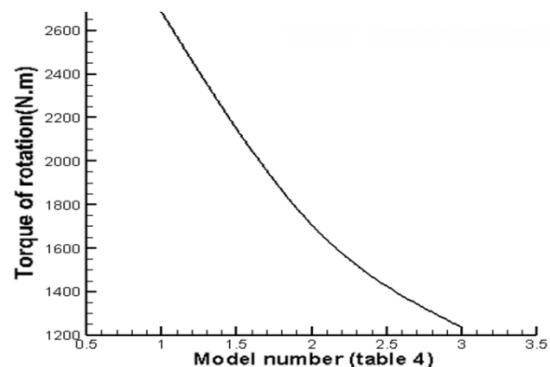
جدول ۶- اثر تغییر پارامترهای هندسی لولای منعطف

عنوان پارامتر	۱	۲	۳
B,C افزایش شعاع داخلی و خارجی	↑	↑↑	↑↑
D افزایش شعاع دوران mm	↓	↑	↑
E, F افزایش زاویه داخلی خارجی	↑↑	↓	↓
افزایش ضخامت لاستیک	↓↓	↑	↑
افزایش ضخامت فلز	↓	↓↓	↓

۸- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله یک نمونه لولای منعطف طراحی و ساخته شد و مورد آزمایش هیدرواستاتیک قرار گرفت و نتایج تست آن ارائه شد. در ادامه خواص لاستیک توسعه داده شده در ساخت لولای منعطف، مورد بررسی قرار گرفت. خواص مکانیکی و حرارتی و دینامیکی آن مورد مطالعه قرار گرفت. باتوجه به نتایج تست درچمبر حرارتی، درصورت افزایش دما تا ۶۰ درجه خواص مکانیکی افت شدیدی خواهند داشت و لذا استفاده از بوت حرارتی برای جلوگیری از انتقال گرمای موتور به لاستیک ضروری به نظر می‌رسد.

با توجه به اعمال فرامین باحداکثر سرعت اکچواتورهای ساخته شده، تغییری در رفتار لاستیک مشاهده نگردید و تنها



شکل ۱۹- گشتاور دوران برحسب شماره مدل

نتایج نشان می‌دهد، با افزایش ضخامت درمجموع گشتاور و تنش لایه‌های لاستیک تا حدی کم می‌شود، اما کاهش تنش خود لایه‌های فلزی بسیار محسوس است. هرچه مترتال صلب تر و با مشخصات مکانیکی بالاتری به عنوان تقویت کننده استفاده گردد، تنش‌ها بالا رفته، اما جابجایی محوری کم می‌گردد. با کمک مترتال با خواص مکانیکی و استحکامی بالاتر ضرایب اطمینان بیشتر می‌شود و جابه‌جایی محوری که نامطلوب است، نیز کم می‌شود؛ لذا در مجموع استفاده از مترتال‌هایی که خواص مکانیکی و استحکامی بالایی دارند پیشنهاد می‌گردد.

۷-۵- جمع بندی اثرات تغییر پارامترهای هندسی

نتایج بررسی اثر پارامترهای هندسی در جدول ۶ جمع آوری شده است. اثر بعضی تغییرات هندسی، به مراتب بیشتر از موارد دیگر است.

تنش لایه‌های لاستیکی که معمولاً استحکام کمی دارند و تنش لایه‌های فلزی به همراه گشتاور مورد نیاز برای دوران،

۴. افزایش ضخامت لاستیک، باعث کاهش شدیدگشتاور مورد نیاز شده، اما باعث افزایش تنش در قطعات فلزی و غیرفلزی می‌شود.

۵. افزایش ضخامت فلز گشتاور، دوران و تنش‌ها را کاهش می‌دهد، اما مشکل وزنی بوجود می‌آید. در نهایت با کمک روش شبیه‌سازی ارائه شده و اثر پارامترهای هندسی ارائه شده، می‌توان به طراحی لولای منعطف متناسب با ورودی‌های طراحی پرداخت.

۹- منابع و مراجع

- [1] Woodberry RHF (1974) Solid rocket thrust vector control. NASA SP-8114 4-17.
- [2] Anon, Final report-development and demonstration of an omni axial flexible seal movable nozzle for thrust vecotor control.thiokol chemical crop.1967
- [3] RamMohan V (2012) Design modeling and experimental validation of typical flex bearing joint of rocket motor nozzle. PHD thesis.
- [4] Bapi Raju V, Balakrishna Murthy V, Swetha Srinivas J (2013) Non-linear analysis of composite beam. IJAMM&C 3.
- [5] Eswara Kumar A, balakrishna Murthy V, chandra Mohan, effect of shim percentage on non-linear static behavior of flex seal of rocket nozzle. Material today: proceedings 2, pp.1427-1434, 2015.
- [6] Prakash D.a, Balakrishna Murthy V.b, Effect of Material Mismatch on Static behavior of Flex Seal, Materials Today: Proceedings 4, pp 2290-2297, 2017.
- [7] Xiaoguang Zhang, Yu Liu, and Junxue Ren, Nonlinear finite element analysis of the SRM Flexible Joint, AIAA, 2012.

مشخص گردید، در اثر گذشت زمان مقدار نیروی لازم برای نگهداشتن لولای منعطف در زاویه‌ای خاص اندکی کاهش می‌یابد که به دلیل پدیده نرم شدگی لاستیک است.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدل‌سازی هایپرولاستیک در اجزاء محدود بیشتر به رفتار لاستیک بعد از نرم شدگی نزدیک تر است و خطایی زیر ۷٪ دارد. لازم به ذکر است، در عمل می‌بایست در ابتدا نیروی بیشتری برای دوران لولای منعطف بکار برد.

در ادامه با کمک شبیه‌سازی اجزاء محدود و روش مونی ریولین برای شبیه‌سازی لاستیک‌ها، رفتار لولای منعطف مدل‌سازی گردید و رفتار لولای منعطف با نتایج تست هیدرواستاتیک مقایسه گردید و مشخص شد، نتایج شبیه‌سازی تطابق نسبتاً مناسبی با تست داشته است و با توجه به تایید صحت شبیه‌سازی اجزاء محدود با تست‌های انجام شده، به بررسی اثر پارامترهای هندسی لولای منعطف پرداخته شد. پنج پارامتر هندسی به همراه دو پارامتر تغییر ضخامت لایه‌های لاستیک و فلز، مورد بررسی قرار گرفت و جمع بندی شبیه‌سازی در این هفت حالت، در جدول ۶ ارائه شده که نتایج آن را بصورت خلاصه شامل:

۱. افزایش شعاع داخلی و خارجی مناسب نبوده، باعث افزایش تنش‌ها و گشتاور مورد نیاز می‌شود. البته کاهش آن بدلیل ثابت بودن قطر گلوبی نازل تا حد کمی امکان پذیر است.
۲. افزایش شعاع دوران، باعث کاهش گشتاور مورد نیاز برای دوران می‌شود، اما می‌بایست ضرایب اطمینان لاستیک و فلز مد نظر قرار گیرد.
۳. افزایش زوایای داخلی و خارجی، باعث کاهش تنش قطعات می‌گردد، اما گشتاور مورد نیاز دوران را بشدت افزایش می‌دهد.