تحلیل خستگی و تنش مفصل منعطف در نازل های متحرک موتورهای پیشران فضایی

روح ا... طاهری نژاد[۱*] سیدجلال سیدعلیان [۲]

۱- دکتری، دانشگاه گیلان، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک

۲- کارشناس ارشد، دانشگاه امام حسین (ع)، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک

*نویسنده مخاطب، shamsr.taher93@gmail.com

چکیده

در این مقاله به تحلیل خستگی و تنش مفصل منعطف در نازل های متحرک موتورهای پیشران فضایی پرداخته شده است. مدهای خرابی خستگی در موتورهای پیشران فضایی بررسی و از چند مقاله برای بیان روش تحلیل خستگی در موتورهای پیشران فضایی کمک گرفته شده است. سپس با استفاده از یک مقاله، روند تحلیل قابلیت اطمینان خستگی برای یک نازل انعطاف‌پذیر آورده شده است. این روند بر اساس رویکردهای غیرقطعی و آماری-احتمالی بوده است. بخشی از این گزارش به حل تنشی اتصال انعطاف‌پذیر مورد نظر در کامسول اختصاص یافته است. گزارشی از مشورت با اساتید به‌نام در زمینه مکانیک آسیب و خرابی در مواد مرکب ارائه و شرحی مختصر و در عین حال قابل اعتنا در مورد روند تحلیل خستگی اتصال انعطاف‌پذیر آورده شده است. آنچه که می‌توان به عنوان خروجی این گزارش در نظر گرفت، حل تنشی اتصال انعطاف‌پذیر، تخمین خستگی اتصال با رویکردی آماری و احتمالی و هم‌چنین گام‌ها، مراحل و چالش‌های حل تحلیلی خستگی اتصال انعطاف‌پذیر است.

کلیدواژه‌ها: *نازل انعطاف پذیر، تنش، خستگی، کنترل بردار تراست*

۱- مقدمه

خستگی یک فرآیند چرخه‌ای یا متناوب است که به خرابی یک سازه مکانیکی می‌انجامد. علت آنها هم وارد شدن بارهای چرخه‌ای به یک سازه مکانیکی است، به طوری که سازه دچار تنش و کرنش‌های نوسانی شود. نکته اساسی در پدیده خستگی این است که این بارهای وارده باید به اندازه کافی بزرگ باشند تا سازه دچار تغییر شکل پلاستیک محلی یا شکسن فوری شود. پس از اینکه سازه متحمل یک تعداد سیکل معین بارگذاری شد، خرابی رخ می‌دهد به طور کلی برای پدیده آسیب خستگی دو مرحله می‌توان برشمرد. مرحله اول شروع ترک است که از سطح یک قطعه شروع می‌شود و مرحله دوم رشد ترک است که در جهت عمود بر تنش‌های اعمالی رخ می‌دهد و نهایتا هم منجر به پدیده خرابی و شکست می‌شود[۱].

از اولین گام‌های تحلیل خستگی یک سازه محاسبه بارهای دینامیکی وارد بر آن است. به عبارت بهتر تا زمانی که ارزیابی دقیقی از نوع، میزان و مدت بارهای مکانیکی و حرارتی بر سازه وجود نداشته باشد، نمی‌توان تحلیل خستگی را انجام داد.

اصولا در طراحی یک موتور پیشران فضایی مسائل زیادی باید توسط طراح لحاظ گردد. از آنجایی که سیستم پیشران در موتور پیشران فضایی یکه و واحد است و جایگزینی وجود ندارد، اطمینان از صحت و دقت عملکرد آن اهمیت دوچندان پیدا می‌کند. اساسا قابلیت اطمینان عملکرد موتور پیشران فضایی بستگی به پیش‌بینی دقیق از شرایط و یکپارچگی پیشرانش آن تحت شرایط مختلف محیطی و عملکردی دارد.

سیستم پیشرانش در طول فرآیندهای به‌کارگیری، حمل‌ونقل، انبارش و تحت بارها و کرنش‌های متناوب قرار می‌گیرد. پاسخ پیشرانش به این بارها و کرنش‌ها حائز اهمیت بالایی است. ممکن است این بارها و کرنش‌های متناوب به قدری باشد که موتور پیشران فضایی را دچار خرابی کند برخی از این شرایط و بارهای اعمالی بر روی موتور پیشران فضایی در جدول ۱ آمده است. اطلاعات این جدول از مطالب مقاله آورده شده است.

جدول ۱: تخمینی از بارهای متناوب واردشده به یک موتور پیشران فضایی[۲]

فاز ماموریتی	فرکانس کرنش اعمالی	کرنش اعمالی تقریبی قبل از شلیک موتور پیشران فضایی
ارتعاشات در فاز پرواز	۱۰۰ تا ۵۰۰ سیکل در ثانیه(cps)	۵×۱۰^{۷}
ارتعاشات در طول حمل‌ونقل زمینی	۱۰ تا ۵۰۰ سیکل در ثانیه(cps)	۵×۱۰^{۸}
سیکل تغییرات دمایی	۱ سیکل در روز	۲×۱۰^{۳}
چرخاندن‌ها و جابه‌جایی در زمان انبارش	۱ سیکل در ماه	۵×۱۰

اگرچه آسیب خستگی پدیده متداولی در موتورهای پیشران فضایی نیست، اما اهمیت بسط ضوابط و وش‌های آنالیز برای سازه تحت بارهای متناوب بسیار بالاست. علاوه برآن حد تحمل خستگی برای انواع متریال به کار رفته در سازه موتور پیشران فضایی یک پارامتر مکانیکی مهم محسوب می‌شود. در مقاله[۲] برای تحلیل و آنالیز بارهای متناوب وارد به یک موتور پیشران فضایی مسیر زیر را بیان نموده است:

۱) شناسایی مکانیزم‌ها و یا پروسه‌های داخلی در موتور پیشران فضایی که منجر به تغییر خواص مکانیکی و نهایتا خرابی در اثر بارهای متناوب می‌شوند.

۲) شناسایی متغیرهای مهم و اساسی مکانیزم‌های گفته شده و جایگاه اهمیت هر کدام از آنها و رابطه هر کدام از آنها با یکدیگر

۳) سنجش خواص بحرانی مواد که منتج به پدیده خستگی و مشخصه‌های آن می‌شود.

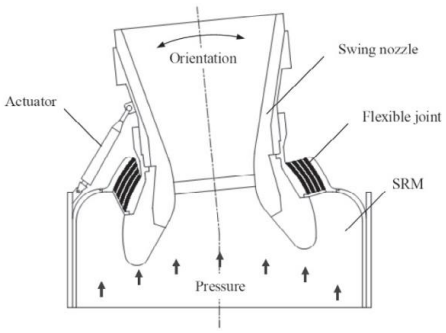
۴) پایه‌ریزی ضوابط و استانداردهای واقع‌بینانه طراحی که منجر به طرح و برنامه آنایز شکست به صورت منطقی و استدلالی باشد.

البته آنچه که در موارد بالا ذکر شد، با توجه به سال نگارش مقاله[۲] پروسه‌ای بود که قبل از گسترش کدهای آنالیز خستگی در نرم‌افزارهای تحلیل المان محدود آورده شده است و یک روند خیلی کلی است.

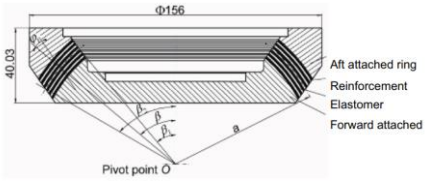
۲- تحقیق برروی تئوری و تست تحلیل خستگی اتصال انعطاف‌پذیر

اتصالات انعطاف‌پذیر یک پیوند غیرصلب و در عین‌حال محکم بین بدنه موتور پیشران فضایی و نازل متحرک است که امکان دوران نازل و تغییر بردار پیشران در موتورهای پیشران فضایی را فراهم می‌کند. موتورهای

پیشران فضایی پیشرفته که در دهه‌های اخیر طراحی و ساخته می‌شوند به این گونه از نازل‌ها مجهز شده‌اند و به قابلیت کنترل بردار پیشران (TVC) دست یافتند. اتصال انعطاف‌پذیر از حلقه‌های الاستومر و حلقه‌های فلزی یا کامپوزیتی ساخته شده است که به صورت یکی در میان برروی هم قرار می‌گیرند(شکل ۱ و شکل ۲). تمام این حلقه‌ها یک قطاع از یک کره هستند که در یک فرم انعطاف‌پذیر بر روی هم قرار گرفته‌اند. اتصال در جهت محوری سلب بوده و در برابر فشار وارده به آن از طریق موتور مقاومت می‌کند[۳].



شکل ۱: شماتیک یک نوع نازل انعطاف‌پذیر[۱۷]



شکل ۲: یک نمونه لایه‌چینی الاستومر و فلز در اتصال انعطاف‌پذیر[۳]

قابلیت و عملکرد اتصالات انعطاف‌پذیر با سنجش مشخصه‌های سازه‌ای آن ارزیابی می‌گردد. برای هر اتصال انعطاف‌پذیر دومشخصه مهم سفتی و مقاومت تعریف می‌گردد. منظور از سفتی در اتصالات انعطاف‌پذیر سفتی فشاری و همچنین سفتی زاویه‌ای تغییرشکل محوری در اثر فشار موتور می‌باشد.

۲-۱- تحلیل خستگی در اتصال انعطاف‌پذیر

یک نازل انعطاف‌پذیر در طول مدت احتراق موتور پیشران فضایی نقش کنترل بردار پیشران(TVC) را ایفا می‌کند. به همین خاطر در بازه زمانی انجام ماموریت بارها مجبور به دوران و تنظیم بردار پیشران می‌شود. مزیت اصلی نازل انعطاف‌پذیر قابلیت بالای اطمینان و توانایی حرکت در هر جهت داده شده است که این امر نیاز به اعمال نیروهای بزرگ جانبی دارد. اتصالات انعطاف‌پذیر به صورت گسترده برای نازل بوسترهای فضایی پیشران فضایی، موتور موشک‌های بالستیک، راکت‌های فضایی و... مورد استفاده قرار می‌گیرند. همانطور که در ابتدا فصل ۵ به آن اشاره شد، اتصال انعطاف‌پذیر شامل قطاع‌های الاستومری و همچنین قطاع‌های فلزی یا کامپوزیتی است که نقش تقویت‌کننده را دارند. تغییر زاویه نازل ناشی از ایجاد کرنش برشی الاستومرها در اتصال انعطاف‌پذیر است. نازل‌های انعطاف‌پذیر در طول انجام ماموریت معمولا بین ۶۰ تا ۸۰ مرتبه تغییر زاویه می‌دهند. قابلیت اطمینان نازل در هنگام ساخت در مقایسه با زمان عملکرد ممکن است متفاوت باشدف لذا قبل از شلیک موتور پیشران فضایی و در زمان تست زمینی، اطمینان‌پذیری یا همان قابلیت اطمینان نازل باید مورد ارزیابی قرار گیرد.

یکی از پدیده‌های اصلی و مهم در ایجاد خرابی در اتصالات انعطاف‌پذیر خستگی است. در مقاله[۴] به طور مبسوط روند تحلیل قابلیت اطمینان یک نازل انعطاف‌پذیر شرح داده شده است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

۲-۱-۱- تئوری آسیب خستگی

تئوری آسیب تجمیعی خطی اصلی‌ترین گزینه برای تحلیل مسائل خستگی است. بر اساس این تئوری می‌توان آسیب‌ها و علل خستگی را به صورت خطی در هم افزود و برهم نهی آنها را محاسبه کرد. وقتی که این آسیب‌های تجمیعی به یک حد معلوم برسد شکست خستگی رخ می‌دهد. براساس تئوری ماینر اگر یک سازه تحت بار S_1 در N_1 مرتبه بارگذاری دچار شکست شود، آسیب(damage) برابر است با:

$$\acute{D_1} = \frac{1}{N_1} \qquad (۱)$$

اما به طورکلی به ازای $n_2,\ldots n_k$ مرتبه اعمال بار $S_2 \ldots S_k$، خرابی برابر است با:

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \ (i = 2, \ldots . k) \qquad (۲)$$

مجموع همه این آسیب‌ها وقتیکه سازه دچار شکست می‌شود برابر است با:

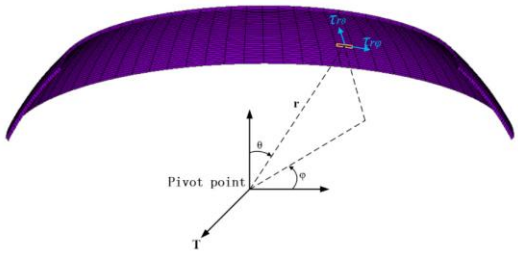
$$\sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i} = 1 \qquad (۳)$$

۲-۱-۲- بار خستگی در نازل انعطاف‌پذیر

از آنجایی که انحراف زاویه نازل انعطاف‌پذیر به واسطه تغییر شکل الاستومرهای اتصال است، پس می‌توان نتیجه گرفت که بار خستگی همان بارهای منتج به کرنش برشی در الاستومرهاست. بیشینه کرنش برشی در یک الاستومر با زاویه δ برابر با است با :

$$\gamma = \frac{\delta a}{m t_e} \qquad (۴)$$

در رابطه (۴)، کمیت a برابر شعاع مفصل (شکل ۳) ، m برابر با تعداد لایه‌های الاستومر و t_e برابر با ضخامت هر لایه از الاستومرهاست.



شکل ۳: مرکز و شعاع pivot برای یک المان از یک قطاع الاستومر[۵]

۲-۱-۳- مشخصه‌سازی آسیب در نازل انعطاف‌پذیر

شکست خستگی در نازل‌های انعطاف‌پذیر عموما به صورت شکست یا آسیب برشی در لایه‌های الاستومر نمود پیدا می‌کند. براساس تئوری ماینر، آسیب ناشی از کرنش برش γ_i برابر است با:

$$\acute{D_i} = \frac{1}{N_i} \qquad (۵)$$

در رابطه (۵)، N_i برابر با عمر خستگی الاستومرها تحت γ_i است. به

ازای یک بار واحد خستگی می توان بیان نمود که آسیب برابر است با:

$$D_1 = \sum n_i \acute{D_i} \quad (۶)$$

در رابطه (۶)، n_i زمان رسیدن کرنش برشی الاستومرها به مقدار γ_i می‌باشد. آسیب پس از n بار بارگذاری برابر با رابطه (۷) می‌باشد:

$$D = nD_1 \quad (۷)$$

در یک نتیجه‌گیری کلی آسیب خستگی برای یک نازل انعطاف‌پذیر را می‌توان به صورت رابطه (۸) بیان داشت:

$$D = \frac{K_0 - K}{K_0 - K'} \quad (۸)$$

در رابطه (۸)، K_0 برابر با سفتی زاویه‌ای و K' برابر با سفتی زاویه‌ای در لحظه شکست و آسیب است. پارامتر K نیز برابر با سفتی زاویه‌ای پس از n مرتبه چرخاندن نازل است.

۲- ۱- ۴- تست خستگی برای نازل انعطاف‌پذیر

رفتار خستگی اتصال انعطاف‌پذیر از طریق تست خستگی به دست خواهد آمد. در مقاله[۴] برای یک اتصال انعطاف پذیر رفتار خستگی آن امتحان و در جدول ۲ آمده است.

۲- ۱- ۵- قابلیت اطمینان خستگی

عمر خستگی اتصال انعطاف‌پذیر در اثر چرخانده‌شدن را می‌توان با روابط زیر بررسی نمود:

$$N = \frac{1}{D_1} = \frac{1}{\sum n_i D_i} \quad (۹)$$

یا به عبارتی دیگر:

$$N = \frac{n}{D} = \frac{n(K_0 - K')}{K_0 - K} \quad (۱۰)$$

عمر خستگی را می‌توان با استفاده از توزیع لاگنرمال توصیف نمود. تابع چگالی احتمال آن برابر می‌شود با:

$$f(N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\, N\sigma_{lgN}} exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{lgN - \mu_{lgN}}{\sigma_{lgN}}\right)\right\} \quad (۱۱)$$

بنابراین قابلیت اطمینان پس از n مرتبه چرخاندن را می‌توان بر اساس رابطه (۱۲) نوشت:

$$P_r(n) = P(N > n) = \int_n^{\infty} f(N)dN = \Phi\left(\frac{\mu_{lgN} - lgn}{\sigma_{lgN}}\right) \quad (۱۲)$$

و احتمال شکست برابر است با :

$$P_f(n) = 1 - P_r(n) \quad (۱۳)$$

جدول ۲: نتایج تست خستگی برای یک اتصال انعطاف‌پذیر

پارامترها	اتصال انعطاف‌پذیر ۱	اتصال انعطاف‌پذیر ۲
سفتی زاویه‌ای قبل از اعمال بار خستگی(K_0)	۳۲۶۰/۲ (N.m/deg)	(N.m/deg) ۳۲۵۲/۰
سفتی زاویه‌ای پس از ۶۰ مرتبه چرخاندن(K)	۳۲۲۳/۱ (N.m/deg)	(N.m/deg) ۳۲۰۵/۶
مقدار کاهش سفتی زاویه‌ای($K_0 - K$)	۳۷/۱ (N.m/deg)	۴۶/۴ (N.m/deg)
$\frac{(K_0 - K)}{K_0}$	۱/۰۴۶٪	۱/۰۴۳٪

۲- ۱- ۶- نمونه حل‌شده

در این بخش داده‌های یک تست خستگی برای یک نازل انعطاف‌پذیر در این بخش آورده می‌شود. در این نمونه عمر خستگی الاستومر نازل برابر با ۱۳۰۰۰ و ۳۰۰۰۰۰۰۰ می‌باشد. البته این مقادیر برای کرنش‌های برشی با مقادیر ۱۹۰ و ۳۰۰ درصد است(جدول ۳).

جدول ۳: کرنش برشی خستگی الاستومر در تست چرخاندن

کرنش برشی	٪ ۱۲۵-۱۹۰	٪ ۲۵۰-۳۰۰	۲۵٪>
دفعات چرخاندن	۱۰	۳	۵۹۲
عمر خستگی	۳۰۰۰۰۰۰۰	۱۳۰۰۰	∞

بر اساس اطلاعات آورده شده در جدول ۳ و هم‌چنین بر اساس رابطه‌ی (۹)، عمر خستگی N در تست چرخاندن برابر است با:

$$N = \frac{1}{D_1} = \frac{1}{\sum n_i D_i} = 4327$$

مقدار زیر فرض گرفته می‌شود:

$$V_{lgN} = 0.15$$
$$\mu_{lgN} = 3.636$$
$$\sigma_{lgN} = V_{lgN}\mu_{lgN} = 0.5454$$

احتمال شکست پس از ۶۰ مرتبه چرخاندن برابر است با:

$$P_f(60) = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_{lgN} - lgn}{\sigma_{lgN}}\right) = 1 - \Phi(3.41) = 3.35 \times 10^{-4}$$

۲- ۲- تعیین و حل معادلات تحلیلی حاکم بر خستگی اتصال انعطاف‌پذیر

اساسا تمام اتفاقات و فعل و انفعالات را می‌توان به صورت یک داده یا بسته‌ای از اطلاعات در نظر گرفت. این داده‌ها که بسته به شرایط هر مقداری می‌توانند داشته باشند، در علم مهندسی و ریاضیاتی به دو دسته مهم تقسیم می‌شوند: داده‌های قابل اندازه‌گیری یا قطعی، داده‌های غیرقابل اندازه‌گیری یا غیرقطعی. هر داده و اطلاعات بدست آمده که بیانگر یکی از پدیده‌های فیزیکی باشد را می‌توان به صورت در قالب یک داده قطعی یا غیر قطعی گنجاند.

با توجه به مطالب گفته شده در بخش قبل، مجهولات مسئله برای حل معادله احتمال حاکم بر خستگی اتصال انعطاف‌پذیر در جدول ۴ آمده است.

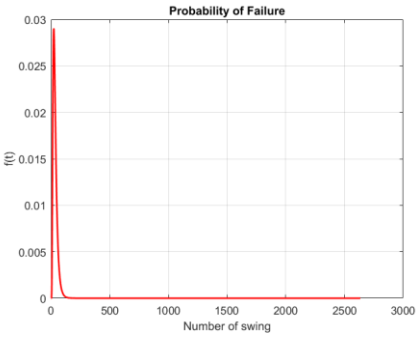
جدول ۴:پارامترهای مورد نیاز برای حل معادله تحلیلی

پارامترها	نماد
سفتی زاویه‌ای قبل از اعمال بار خستگی(K_0)	K_0
سفتی زاویه‌ای پس از n مرتبه چرخاندن(K)	K
سفتی زاویه‌ای در لحظه شکست	K'
تعداد دفعات چرخاندن	n

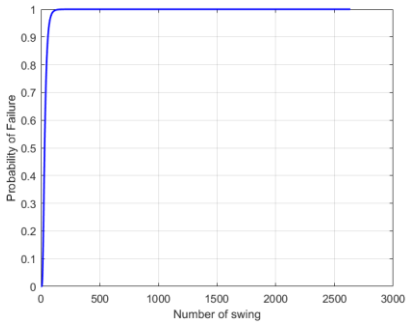
با توجه به رویکردهای گفته شده در مسئله قبل برای حل معادله قابلیت اطمینان خستگی بر اساس تابع چگالی احتمال لازم است که پس از تست عملی تحلیل خستگی برای نازل انعطاف‌پذیر موجود و به‌دست آوردن مقادیر مورد نیاز اشاره شده در جدول ۴ طبق رویکرد مقاله چگالی لاگنرمال آن را محاسبه و تابع توزیع احتمال یا به نام دیگر تابع توزیع تجمیعی آن را محاسبه می‌گردد. نگارنده با استفاده از نرم‌افزار متلب و برای یک نازل با

داده‌های فرضی، قابلیت اطمینان خستگی آن‌را محاسبه و گراف‌های مرتبط را رسم می‌نماید(شکل ۴ و شکل ۵). برای هر اتصال انعطاف‌پذیر دیگر نیز با محاسبه کمیت‌های خواسته شده مربوط به خودش می توان قابلیت اطمینان آن را محاسبه نمود (شکل ۶).

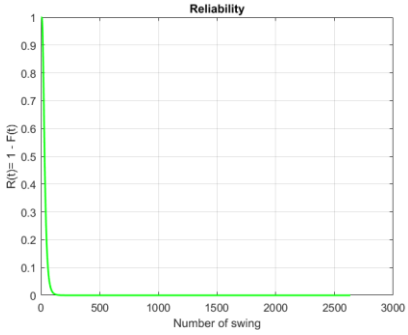
پارامتر مهم دیگر که لازم است دانسته شود، نرخ شکست در طول زمان(چرخاندن) است. نرخ شکست لاگنرمال در ابتدا افزایش یافته و پس از یک دوره مشخص کاهش می‌یابد. این بازه بیانگر زمان کنترل است. نرخ شکست از تقسیم میزان چگالی احتمال بر قابلیت اطمینان بدست می‌آید (شکل ۷).



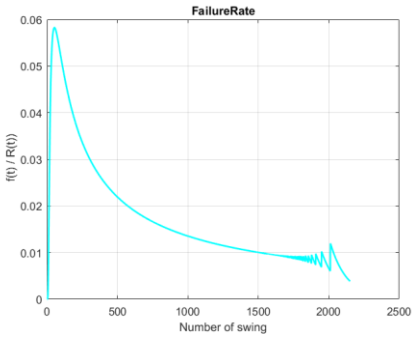
شکل ۴: نمودار چگالی احتمال لاگنرمال



شکل ۵: نمودار توزیع احتمال لاگنرمال



شکل ۶: قابلیت اطمینان اتصال انعطاف‌پذیر

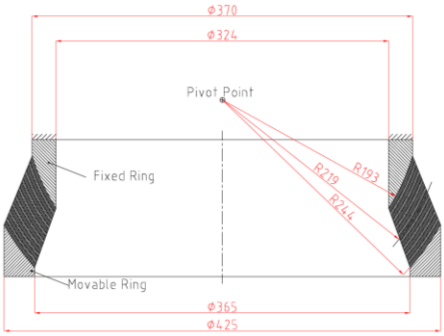


شکل ۷: نرخ شکست اتصال انعطاف‌پذیر

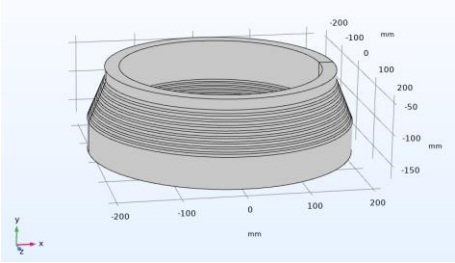
۳- شبیه‌سازی عددی در کامسول

۳-۱- ایجاد مدل

همانند تمامی حلگرهای المان‌محدود، در نرم‌افزار کامسول هم اولین قدم ایجاد مدل است. در شکل ۸ یک برش مقطعی از اتصال انعطاف‌پذیر مورد نظر نشان داده شده است. ضخامت لایه‌های مختلف الاستومر برابر با ۳/۵ میلی‌متر و ضخامت لایه‌های تقویت‌کننده برابر با ۲/۵ میلی‌متر می‌باشد. مدل کشیده شده به همراه نشانگر ابعاد در شکل ۹ آمده است.



شکل ۸: ابعاد اتصال انعطاف پذیر

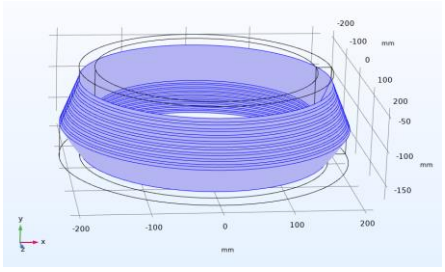


شکل ۹: مدل ایجاد شده در کامسول

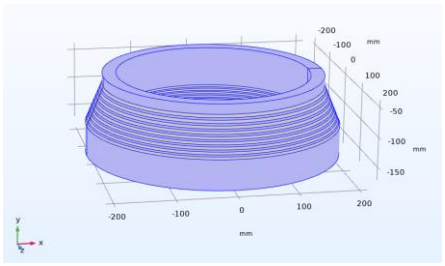
۳-۲- تعیین خواص

همانطور که در ابتدای این فصل گفته شد، برای خواص هایپرالاستیک ماده الاستومر به عنوان ورودی وجود نداشت، لذا از به جای استفاده از آباکوس، از کتابخانه کامسول کمک گرفته شد و از یکی از ماده‌های الاستومر آن به نام silicone جامد استفاده شد. البته یکسری دیگر ماده الاستومری در کتابخانه کامسول وجود دارد که میوان به صورت دلخواه آن را جایگزین کرد. با این حال، این حل صرفا حل تنشی است و پس از بدست آوردن ضرایب مورد نیاز برای شناخت ماده هایپرالاستیک، آنها را به ماده اضافه کرد. نکته مهم و اساسی‌تر اینکه یکسری خواص خستگی هم باید برای ماده داشته و

تعریف کنیم. برای ماده تقویت‌کننده و اتصال ثابت و متحرک هم از کتابخانه کامسول کمک گرفته شد و ماده انتخاب شد. از فولاد تقویت شده 460B استفاده شد. لازم به ذکر تمام خواص مواد در کامسول براحتی قابل ویرایش می‌باشد و امکان اضافه کردن خواص جدید به ماده وجود دارد.(شکل ۱۰ و شکل ۱۱).



شکل ۱۰: لایه‌های الاستومری اتصال انطاف‌پذیر(نواحی آبی‌رنگ)

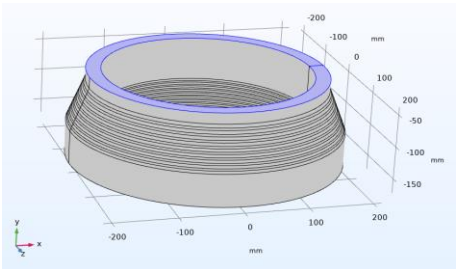


شکل ۱۱: لایه‌های تقویت‌کننده و اتصال ثابت و متحرک نازل انعطاف‌پذیر(نواحی آبی‌رنگ)

۳- ۳- تعریف قید تکیه‌گاهی

صفحه فوقانی نازل انعطاف‌پذیر کاما به صورت درگیر(گیردار) و بدون داشتن هیچ یک از درجات آزادی شش‌گانه تعریف شده است(شکل ۱۲). البته ممکن است برای اعمال ممان یک عملگر بر روی رینگ متحرک قرار بگیرد ولی نمی‌توان به عنوان نگهدارنده در نظرش گرفت.

نکته مهمی که باید اشاره شود مسئله تعریف قید تماسی بین لایه‌های الاستومر و تقویت‌کننده است. برای تعریف تماس بین دو ماده در آباکوس حتما باید یک contact تعریف شده و به فراخور مسئله سطح master و slave معرفی شده و سایر پارامترهای تماسی تعیین گردد. اما یکی از مزایای کامسول در این است که اگر دو جنس ماده در مجاورت هم قرار گرفتند، با توجه به همسایگی جئومتری آنها، یک تماس داخلی یا مرز داخل توسط نرم‌افزار بین المان‌های مجاور در نظر گرفته شده و نیازی به تعریف تماس نیست. البته برای مسائل پیچیده‌تر امکان تعریف هر نوع تماسی با خواص متفاوت وجود دارد.

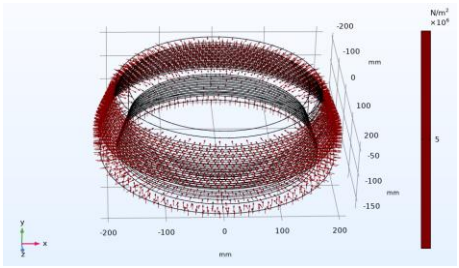


شکل ۱۲: قید گیردار(Fixed constraint) کردن صفحه فوقانی اتصال

۳- ۴- اعمال بار گسترده و ممان

در شرایط عملکردی این اتصال، تخمین زده شده است که یک بار یکپارچه به اندازه ۵۰ بار قرار می‌گیرد؛ در نتیجه یک بار یکپارچه(uniform) به همین اندازه بر دیواره بیرونی اتصال اعمال می‌گردد(شکل ۱۳).

هم‌چنین طبق آنچه در بخش‌های پیشین بیان شد، از یک عملگر برای ایجاد ممان لازم در جهت اعمال ممان لازم برای چرخاندن نازل بهره گرفته شده است. ممان تخمین زده شده برای چرخاندن نازل حدود ۲۵۰۰ نیوتن بر متر بوده است. لازم به ذکر است که دو ممان عکوس و در دو جهت خلاف یکدیگر بر روی اتصال انعطاف‌پذیر تعریف شده است. به عبارت بهتر در شبیه‌سازی کامسول دو گروه باری تعریف شده است. این دو گروه باری عینا شبیه یکدیگر تعریف شده‌اند با این تفاوت که ممان‌های معکوس به هم دارند.



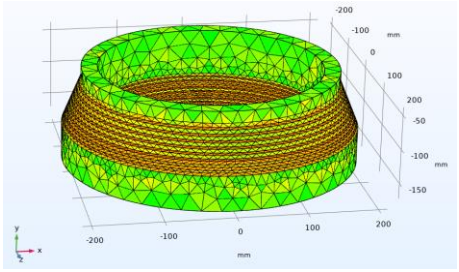
شکل ۱۳: بار یکپارچه خارجی وارد بر جداره اتصال انعطاف‌پذیر

۳- ۵- مش‌بندی

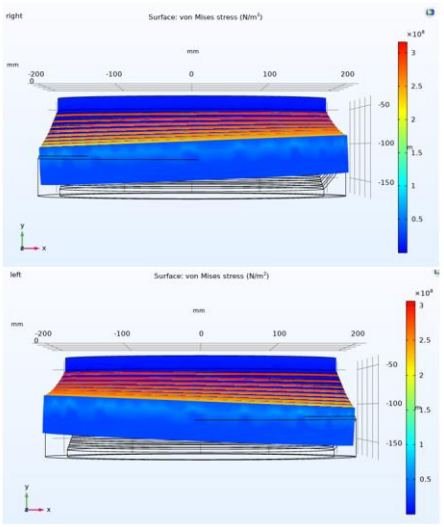
یکی دیگر از مزایای چشم‌گیر کامسول، انتخاب مش به صورت خودکار با توجه به فیزیک مسئله است. پس از تعریف فیزیک مسئله در شروع شبیه‌سازی و هم‌چنین خواص مواد حاضر در شبیه‌سازی و نوع حل، در زبانه مش می‌توان شبکه‌بندی متناسب را بر روی مدل مسئله ریخت. در این مسئله از مش مثلثی استفاده شده و برای کوتاه‌تر شدن محاسبات اندازه مش مقداری درشت‌تر انتخاب شده است (با سایز المان coarse). شکل نهایی مش‌بندی در شکل ۱۴ آمده است.

۳- ۶- حل مسئله

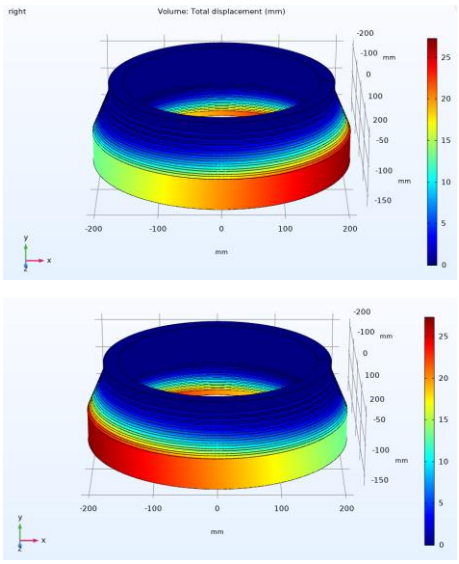
پس از کنترل مسئله، حل مسئله submit می‌شود. همانطور که در بخش گفته شد با توجه به گروه های باری، دو study مجزا تعریف شده است. نوع حل هم stationary است. در شکل ۱۵ و شکل ۱۶ تانسور تنش و میدان جابه‌جایی اتصال انعطاف‌پذیر آمده است. فایل شبیه‌سازی هم در پیوست گزارش خواهد آمد.



شکل ۱۴: مش بندی مدل



شکل ۱۵: نمای جانبی تانسور تنش از صفحه XY



شکل ۱۶: تانسور جابه‌جایی اتصال انعطاف‌پذیر

۴- الزامات محاسبه خستگی اتصال انعطاف‌پذیر

پیش از انجام فاز شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزارهای المان محدود ، بنا به دلایلی انگاره نگارنده گزارش بر این بود که انجام روند تحلیل خستگی اتصال انعطاف‌پذیر در نرم‌افزار آباکوس و یا نرم‌افزارهای دیگر از قبیل انسیس و کامسول امکان‌پذیر است. پس از انجام گام‌های قبلی وانجام تحلیل تنش پیشین مشخص شد که امکان تحلیل خستگی برای مواد الاستومر در نرم‌افزارهای یاد شده وجود ندارد. دلیل آن هم پیچیده بودن مبحث خستگی است. به گونه ای که در نرم افزار آباکوس فقط تحلیل های کم‌چرخه آن هم برای فلزات و هندسه های بسیار ساده امکان‌پذیر است. در مورد نازل انعطاف‌پذیر استفاده از نرم‌افزارهای کمکی به دلیل لایه‌گذاری‌های متفاوت که نازل را تبدیل به یک ماده مرکب کرده است هم جوابگو نیست. به عبارت بهتر تئوری‌های خستگی برای مواد و تحلیل المان محدود آن بدون نوشتن کدهای پیچیده جوابگوی حل این مسائل نیستند. پس از اطلاع از این موضوع نگارنده به بررسی راهکار برای انجام این تحلیل پرداخت. آنچه که در این فصل ارائه می‌گردد مسیری کلی است که از مصاحبه با اساتید دانشگاه برای بدست آوردن تحلیل‌های خستگی نازل انعطاف‌پذیر بدست آمده است.

۴-۱- مشورت با اساتید

از آنجایی که هیچ پایان‌نامه خاصی در زمینه تحلیل خستگی الاستومر و هایپرالاستیک در اسناد دانشگاهی وجود نداشت، لذا مشورت علمی برای انجام تحلیل خستگی با چند تن از اساتید دانشکده‌های مواد و مکانیک علم و صنعت انجام شد که نتایج آن ارائه می‌گردد. با مشورت با یکی از اساتید محترم دانشکده مهندسی مکانیک علم و صنعت، مراحل کلی برای ایجاد یک تحلیلی از خستگی نازل انعطاف‌پذیر مشخص گردید. اولین گام‌های حل این مسئله انجام تست‌های متعدد آزمایشگاهی و بررسی نتایج آن است که در این بخش به آنها اشاره می‌گردد.

۴-۲- مشخصه‌سازی و تست‌های تجربی مورد نیاز برای الاستومر

مشخصه‌سازی درست از الاستومر برای انجام یک حل تحلیلی در جهت پیش‌بینی رفتار خستگی آن یکی از مهمترین اقدامات است که باید با کمک تست‌های تجربی بدست آید. در مورد ویژگی‌های یک ماده هایپرالاستیک معمولا چهار تست گرفته می‌شود. برای حل خستگی حداقل سه تست تک محوره، دو محوره و تست برش صفحه‌ای باید گرفته شود. البته ممکن است که نتایج تست حجمی هم مورد نیاز باشد. در اطلاعات اولیه داده شده فقط یک گراف تنش-کرنشی از الاستومر داده شده که منتج از تست تک محوره است(شکل ۱۷).

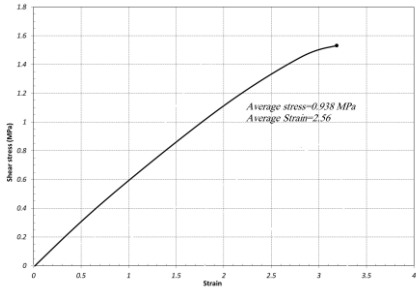
برای ماده الاستومر هایپرالاستیک اتصال انعطاف‌پذیر باید منحنی s-n دیاگرام آن با شرایط زیر در تست تجربی بدست آید:

- انجام تست برای حداقل ۱۵ نمونه آزمایشگاهی
- فرکانس تست حداکثر ۵ هرتز
- تست با بارگذاری $۱۰^۶$ سیکل برای حداقل ۵ نمونه آزمایشگاهی یاد شده

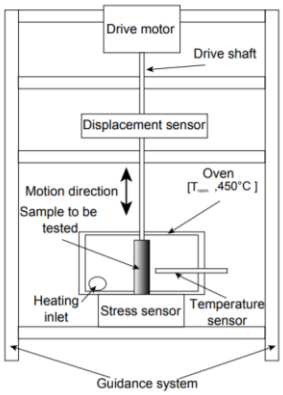
البته برای الاستومر باید تست‌های DMA (Dynamic Mechanical Thermal Analysis) هم از این ماده گرفته شود. علت آن هم افت خواص و استحکام الاستومر در طول عملیات بارگذاری و باربرداری می‌باشد. در ادامه یک معرفی اجمالی از این دو تست گفته شده آورده می‌شود.

- تست DMA: یکی از تکنیک های حرارتی می باشد که برای شناسایی مواد به خصوص پلیمرها استفاده می شود. آنالیز مکانیکی دینامیکی (DMA) را به سادگی می توان به صورت اعمال نیروی نوسانی بر روی یک نمونه و تجزیه و تحلیل پاسخ ماده به آن نیرو تعریف کرد. در این تکنیک نمونه در دستگاه آنالیز حرارتی مکانیکی دینامیکی (شکل ۱۸) قرار گرفته و فرکانس، دامنه و محدوده دمایی مناسب به عنوان داده های ورودی به دستگاه وارد می گردد. سپس دستگاه آنالیز مکانیکی دینامیکی در محدوده دمایی انتخاب شده به نمونه تنش سینوسی وارد می کند و پاسخ مکانیکی مواد در یک محیط دمایی کنترل شده اندازه گیری می شود. نتایج معمولا به صورت نمودارهای G،G' و Tan Delta به عنوان تابعی از دما ارائه می شود. این تکنیک نسبت به روشهای دیگر بسیار حساس‌تر است و می تواند مناطق انتقال کوچک که تشخیص آنها با DSC امکان پذیر نیست را تشخیص دهد. آزمون DMA امکان تشخیص اثرات حرارتی به دلیل تغییر

در مدول رفتار اتلافی ماده را فراهم می کند. از این روش میتوان خواصی مانند میل به جاری شدن (گرانروی) و سفتی (مدول) را به ترتیب از تاخیر فاز و بازگشت نمونه محاسبه کرد. این خواص اغلب به صورت قابلیت اتلاف انرژی به شکل گرما (میرایش) و قابلیت بازگشت از تغییر شکل (خاصیت کشسانی) تعریف کرد.



شکل ۱۷: نمودار تنش- کرنش تست تک‌جهته بر روی الاستومر نازل



شکل ۱۸: شماتیک یک دستگاه آنالیز دینامیکی- میکانیکی[۲۵]

۴- ۳- تست‌های تجربی مورد نیاز برای لایه فلز تقویت‌کننده

همانند آنچه برای الاستومر در مورد بدست آوردن منحنی‌های S-N دیاگرام مطرح شد، باید با همان شرایط، از لایه فلز تقویت کننده هم تست تجربی خستگی گرفته شود.

- انجام تست برای حداقل ۱۵ نمونه آزمایشگاهی
- فرکانس تست حداکثر ۵ هرتز
- تست با بارگذاری $۱۰^۶$ سیکل برای حداقل ۵ نمونه آزمایشگاهی یاد شده

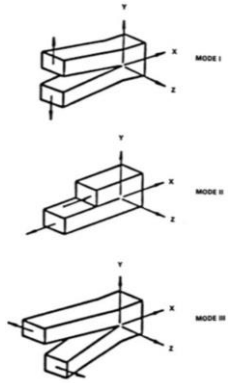
۴- ۴- مشخصه‌سازی و تست‌های تجربی مورد نیاز برای لایه چسب به کار رفته بین الاستومر و تقویت‌کننده

طبق مشورت با اساتید محترم بیان شد که یکی از مهم‌ترین گام‌ها و مراحلی که باید برای تحلیل خستگی اتصال انعطاف‌پذیر در نظر گرفته می‌شد، مشخصه‌سازی لایه چسب بین الاستومر و تقویت‌کننده است. مسئله‌ای که در ابتدا در نظر گرفته نشده بود. برای اتصال بین الاستومر و تقویت‌کننده از یک لایه نازل چسب با مشخصات خاص خود که در این مسئله نادانسته است استفاده می‌شود. در مورد تحلیل خستگی از آنجایی که ماهیت اتصال بوسیله چسب با هر نوع اتصال دیگری(مثلا جوش) متفاوت است، لذا فارغ از نازکی لایه اتصال باید ماهیت چسب در نظر گرفته شود. این مسئله به قدری مهم است که محققان حتی برای شبیه‌سازی و حل مسائل ساده‌تری مثل جدایش دو لبه‌ای اتصالی که بوسیله چسب به هم چسبیده باشند ناچار به تعریف المان چسبی در نرم‌افزارهای المان محدود و به طور خاص آباکوس هستند. لذا باید ضخامت لایه چسب و خواص مربوط به آن به طور کامل شناخته و تعریف شود.

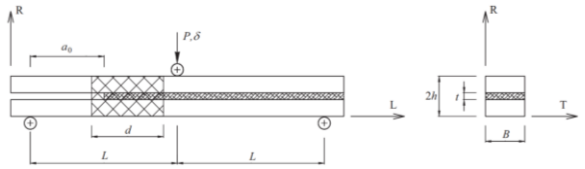
با مشورت با استاتید محترم مشخص شد که در مورد تحلیل خستگی اتصال انعطاف‌پذیر به صورت خاص باید برای چسب یک سری تست‌های مکانیکی گرفته شود که عبارت‌اند از:

- تست خواص چقرمگی شکست مدهای اول، دوم و سوم در بارگذاری خستگی
- تست خستگی نمونه در دو مد DCB و ENF

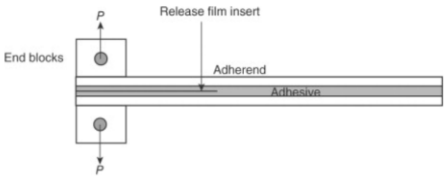
به طور کلی شکست مواد در سه مد کلی فرض می‌گردد. مد باز شدنی (مد اول)، مد برشی (مد دوم) و مد پیچشی (مد سوم) و یا ترکیبی از آنها(شکل ۱۹). دو تست خستگی اساسی که باید برای مشخصه‌سازی اتصال چسبی بین الاستومر و تقویت‌کننده انجام گردد، تست نمونه در دو مود DCB و ENF است. تست خستگی DCB مختص شکست مد اول و ENF برای شکست مد دوم می‌باشد. در شکل ۲۰ و شکل ۲۱ شماتیک این دو تست انجام شده آمده است. در یک تحقیق مختصر مشخص شد که در آزمایشگاه دانشکده هوافضا دانشگاه صنعتی امیرکبیر تجهیزات مورد نیاز برای انجام این تست‌ها وجود دارد.



شکل ۱۹: مکانیک شکست مد اول، دوم و سوم[۲۶]



شکل ۲۰: شماتیک تست ENF [۲۷]



شکل ۲۱: شماتیک تست DCB [۲۸]

۴- ۵- مسئله اساسی تغییرات دمایی

با مشورت با اساتید محترم مشخص شد که یکی از چالش‌ها و گلوگاه‌های اصلی و اساسی در تحلیل خستگی اتصال انعطاف‌پذیر مسئله تغییرات دمایی است. به‌خصوص در این مسئله چون به دلیل وجود لایه‌چینی از جنس مواد مختلف و هم‌چنین حضور الاستومر، تغییرات خواص به دلیل اعمال گرادیان دمایی انکارناپذیر بوده و باید حتما مورد ملاحظه قرار بگیرد. مسئله‌ای که توسط اساتید گفته شد این بود که اگر در فاز کارکردی اتصال انعطاف‌پذیر تغییرات دمایی وجود داشت، باید حتما تست‌های تحلیل خستگی ماده الاستومر، تقویت‌کننده و چسب که در بخش‌های قبلی بیان شد، در سایر دماهای عملکردی هم تکرار شود. این مسئله از چند جهت حائز اهمیت است؛ اول اینکه باید شرایط دمایی چرخش اتصال انعطاف‌پذیر در شرایط عملکردی دانسته شود. ممکن است که به دلیل متغیر بودن دما و سرعت و سایر شرایط آیرودینامیکی و ترمودینامیکی گاز خروجی ناشی از سوختن پیشران فضایی دمای اعمال شده به نازل در هر بخش از پرواز آن متفاوت باشد. مورد دوم دیگر اینکه پس از مشخص شدن دمای عملکردی در هر مرحله تست‌های خستگی که بیان شد در آن دماها گرفته شود که خود همین امر نیازمند داشتن شرایط آزمایشگاهی پیچیده است. به طور خلاصه مبحث تغییرات دمایی برای تحلیل خستگی اتصال انعطاف‌پذیر باید کامل مورد شناخت واقع شود و شرط دمایی در انجام تست‌های خستگی غیر قابل انکار است.

۴- ۶- نوشتن کد تحلیل خستگی UMAT

پس از بدست آمدن کامل نتایج تست تجربی خستگی که در بخش‌های قبل به آنها به صورت خلاصه اشاره شد، کار اصلی در تحلیل خستگی اتصال انعطاف‌پذیر شروع می‌شود. این نتایج به عنوان ورودی برای نوشتن یک سابروتین UMAT به کار گرفته می‌شود. بدین صورت که با شاخت کامل از مدل‌های خستگی می‌توان کدی را بسط داد که تحلیل خستگی اتصال انعطاف‌پذیر را انجام دهد. البته لازم به ذکر است که با مشورت با استاد محترم مشخص شد بدلیل وجود لایه الاستومر در این اتصال و عدم بلوغ کافی در زمینه تحلیل خستگی الاستومرها، نوشتن این کد کار بسیار پیچیده‌ای است و تخمین ایشان این بود که فقط رفع خطا همچین کدی به حداقل یکسال تا یکسال و نیم زمان نیاز دارد.

در نهایت برای تایید کد خستگی بسط داده شده باید ۱۵ نمونه کامل از اتصال انعطاف‌پذیر در ابعاد واقعی ساخته شود و تست خستگی از آنها گرفته شود. در غیر اینصورت نمی‌توان کد را مورد تایید قرار داد.

۵- نتیجه گیری

نگارنده مقاله پس از انجام مراحل تحلیل خستگی به صورت احتمالی بر اساس مقاله[۲۴], و هم‌چنین حل تنشی اتصال انعطاف‌پذیر تحت نیروها و ممان‌های وارده، برای بحث تحلیل خستگی با کمک نرم‌افزار با چند تن از اساتید دانشگاه علم و صنعت جلسه داشت و متوجه شد که اساسا حل تحلیلی همچین مسئله دارای ابعاد مختلف و پیچیدگی‌های زیادی است. اساسا حل تحلیلی خستگی برای مواد مختلف برای هندسه ها و مواد پرکاربرد و با ساده‌سازی‌های مختلف امکان‌پذیر است. بدین صورت که عمده تحلیل های خستگی به صورت تجربی و با کمک داده‌های آزمایشگاهی و بسط آنها امکان‌پذیر است. به عنوان مثال در آباکوس تحلیل خستگی فقط برای فلزات در شرایط کم‌چرخه امکان‌پذیر است. با مشورت با اساتید دانشکده مواد دریافته شد که مسئله تحلیل خستگی برای ماده الاستومر هایپرالاستیک بسیار اساسی و پیچیده است؛ به گونه ای که حتی دانشجویان مهندسی مواد در ایران هم به این مسئله ورود نکرده اند(طبق ادعای اساتید). از طرفی تئوری و مدل‌های خستگی هم برای هایپرالاستیک‌ها بسیار پیچیده تر از یک ماده فلزی است. مسئله به اینجا ختم نمی‌شود. در مورد اتصال انعطاف‌پذیر ازآنجایی که مواد مختلف و هم‌چنین لایه‌گذاری‌های متعدد شرکت دارند، عملا ماده و جنس تحت عنوان یک ماده مرکب(مثل کامپوزیت) شناخته می‌شود وحل تحلیلی خستگی آن نیازمند تست‌های متعدد تری نسبت به یک ماده هموژن است. آنچه که نگارنده گزارش یادآور می شود این است که با مشورت با اساتید امر و مطالعه منابع مشخص است که این مسئله دارای پیچیدگی‌ها و گلوگاه‌های خاص خود است. تنها مطلبی هم که از این مسئله در منابع علمی وجود دارد مربوط به یک حل کاملا غیرقطعی و آماری است که خود همین موضوع موید این است که حل تحلیلی آن داری پیچیدگی هایی است که نویسندگان مقاله[۴] را بر آن داشته است که کاملا رویکری احتمالی و آماری نسبت به مسئله اتخاذ نمایند.

مراجع

1. Ma, K.-T., et al., Mooring System Engineering for Offshore Structures. 2019: Gulf Professional Publishing.
2. Tormey, J. and S. Britton, Effect of cyclic loading on solid propellant grain structures. AIAA journal, 1963. 1(8): p. 1763-1770.
3. Ren, J., et al., Structural analysis and testing of a miniature flexible joint under pressure and vector loading. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014. 28(9): p. 3637-3643.
4. Liu, Y.-Q. and L. Wang. Fatigue reliability analysis for flexible nozzle of solid rocket motor. in 35th Joint Propulsion Conference and Exhibit. 1999.
5. Su, H., et al., Influence of pressure and deflection loads on the critical behavior of flexible joints. Composite Structures, 2017. 180: p. 772-781.