

مدل سازی تیرساندویچی لاستیکی کاملاً مقید با توجه به خواص ویسکوالاستیک آن

بهنام قبادی پور
 علی رهروی*
 منصور علیزاده
 آزاده ضیایی جزی

کارشناس ارشد مکانیک، پژوهشکده زیر سطحی اصفهان
 دانشجوی دکترا، دانشگاه علم و صنعت، دانشکده مهندسی مکانیک
 استادیار، دانشگاه علم و صنعت، دانشکده مهندسی مکانیک
 مربی، موسسه آموزش عالی بنیان

چکیده

در این مقاله نحوه اندازه گیری خواص هایپرالاستیک و ویسکوالاستیک برای لاستیک ها از طریق آزمون توضیح داده شده و در ادامه یک تیر ساندویچی با هسته ی لاستیکی شبیه سازی و نتایج آن با آزمون مقایسه گردیده است. نحوه ی اندازه گیری هر یک از متغیرهای فوق از طریق آزمایش توضیح داده می شود. به اختصار تئوری های مربوطه، برای توصیف داده های اندازه گیری شده ی آزمایش، ارائه خواهد شد. سپس خواص مورد نیاز اندازه گیری شده، برای شبیه سازی در نرم افزار ABAQUS بکار می رود و براساس روش های مختلف مدل سازی شده و میرایی های متفاوت بررسی می شود و در نهایت نتایج آن با نتایج آزمون و نتایج تحلیلی مقایسه می شود.

واژه های کلیدی: خواص الاستیک، ویسکوالاستیک، هایپرالاستیک، مدل اجزاء محدود، ارتعاش.

Simulation of Rubber Constrained Layered Damping with Respect to the Viscoelastic Properties

B. Ghobadipour
 A. Rahrovi
 M. Alizadeh
 A. ZiaeeJazi

Noise and Vibration Department, Underwater Vessel Group
 Ph.D. Student, Iran University of Science and Technology, Mechanical Engineering
 Assistant Professor, Iran University of Science and Technology, Mechanical Engineering
 M.Sc., Faculty of Computer Department, Bonyan University

Abstract

In this study, the method of measuring the viscoelastic and hyper-elastic property of rubbers is explained. After that a sandwich cantilever with core of rubber is simulated and the simulated results are compared with experimental results. The main parameters like loss factor and storage module for simulating rubber behavior are explained. Next, the ways for measuring of these parameters is described. Finally, this property is used for ABAQUS and results is compared with experimental test.

Keywords: Rubber, Property of Rubber, Viscoelastic, Hyper-elastic, Finite Element Model, Vibration.

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: ali_rahrovi@iust.ac.ir

۱- مقدمه

سر و صدا و ارتعاشات موضوع مهمی است که در تمامی سازه‌ها و اجزاء باعث سلب راحتی و تخریب و آسیب دیدن قطعات می‌شود. همچنین همه روزه در هر وسیله‌ای در اطرافمان با آن سروکار داریم و دائماً خواستار کاهش بیشینه یا رفع آن هستیم. به عنوان مثال در هر صنعتی از قبیل صنایع خودروسازی، هواپیما، زیر دریایی، ماشین آلات صنعتی گرفته تا صنایع عمرانی پل و برج سازی و ... به آن می‌پردازند. روش‌های معمول اضافه کردن مواد مستهلک کننده غیر فعال به بدنه و استفاده از ضربه‌گیرهایی به عنوان مستهلک کننده ارتعاشات وارده از سوی عوامل ارتعاشی از قبیل تجهیزات دوار و موتورها، پروانه‌ها، پمپ‌ها و بعضاً ارتعاشات خود زمین و ... و استفاده از صفحات لاستیکی نازک به عنوان جداساز ارتعاشی در بین سازه‌های اجزاء برای کاهش نویز و سطح ارتعاش آن قابل ذکر است. به هر حال پیشگویی نویز و ارتعاش بسیار مهم است. یکی از روش‌های پذیرفته شده و مؤثر در کاهش ارتعاشات و سر و صدا، استفاده از مواد ویسکوالاستیک به صورت مقید شده^۱ است. فاکتور اتلاف مواد ویسکوالاستیک و همچنین خاصیت فنری لایه‌ی مقید جداساز ارتعاشی لایه‌ای که به سازه متصل شده در کاهش انرژی ارتعاشی و دامنه ارتعاشات بسیار مؤثر است. بنابراین وقتی سازه‌ی اصلی به شکل خمشی ارتعاش می‌کند لایه ویسکوالاستیک در معرض یک تغییر شکل بزرگ قرار می‌گیرد و انرژی جنبشی آن به گرما تبدیل می‌شود [۱]. در زمینه لایه‌های جاذب ارتعاش از سال ۱۹۵۰ روش‌های متفاوتی برای نشان دادن رفتار مواد ویسکوالاستیک بوسیله افراد زیادی ارائه شده است. یکی از روشهای مشابه سازی رفتار مواد ویسکوالاستیک مدل کردن مدول برشی بوسیله یک سری از نوسان کننده‌های میرا شونده کوچک می‌باشد. بر اساس همین ایده دو تن از دانشمندان، آنالیز گذرا و حالت پایدار صفحه ساندویچی را انجام دادند [۲]. فصل مشترک همه مطالعات اخیر این است که در مدل انتخاب شده پارامترهای مواد به صورت دقیق معلوم یا تخمین زده شوند.

در ویسکوالاستیک خطی به ویژه رفتار دینامیکی شبه‌الاستیک‌ها دو مطلب اساسی مورد توجه است که عبارتند از قسمت حقیقی و موهومی مدول برشی. این متغیرها به شدت به دما و فرکانس وابسته هستند. ناشیف کلیاتی پیرامون چگونگی استفاده از تیر یک سر درگیر را برای استخراج مدول برشی مختلط و وابسته به فرکانس، برای دماهای مختلف یک ماده ویسکوالاستیک بدست آورد [۳-۴]. که نتایج آن را در استاندارد ASTM756-98 می‌توان یافت. در این مقاله از نتایج این استاندارد استفاده شده است.

۲- شبیه سازی رفتار لاستیک

در این مقاله از لاستیک با پایه نیتریل (آکریل نیتریل بوتادین)، که یکی از لاستیک‌های مرسوم است استفاده شده است. این لاستیک دارای ۳۵ درصد کربن سیاه است. این لاستیک باید از قبل با یک لایه نازک چسب به فولاد متصل شده باشد و سپس به صورت ولکانیزه شده به صفحات فولادی به صورت کاملاً مقید بچسبد. این لاستیک در حالت ارتعاشی از خود خاصیت ویسکوالاستیک نشان می‌دهد. لاستیک‌ها علاوه بر خواص ویسکوالاستیک دارای خاصیت هایپرالاستیک (فراکشسانی) نیز می‌باشند. بنابراین برای شبیه‌سازی رفتار لاستیک باید خواص هایپر الاستیک آنها نیز مشخص گردد. البته در پاره‌ای از موارد می‌توان به جای تعریف خواص هایپرالاستیک با تعریف خواص الاستیک نیز به نتایج خوبی دست یافت.

هر ماده می‌تواند با مدل ساختمانی خاصی توصیف گردد. این مدل رابطه بین تنش و کرنش را به صورت کلاسیک بیان می‌کند. اگرچه این مدل تقریبی برای بعضی مواد قابل قبول است ولی تنش در بسیاری از مواد به خواص دیگری علاوه بر کرنش نیز وابسته است، برای مثال لاستیک‌ها دارای رفتار بسیار پیچیده‌ای هستند. رفتار لاستیک کشسان و غیرخطی است و در بیشتر علوم مهندسی خاصیت میراکنندگی قابل ملاحظه آنرا که در نمودار پسماند^۲ ناشی از اعمال نیروهای چرخه‌ای نمایان می‌گردد، مد نظر دارند. اصطلاح فرا کشسانی^۳ برای توصیف رفتار مواد شبه کشسان با شکل پذیری محدود استفاده می‌گردد. این رفتار به وسیله تابع انرژی کرنشی، ذخیره انرژی در ماده بر واحد حجم مرجع، و به صورت تابعی از کرنش در یک نقطه ماده بیان می‌شود، که در ذیل به صورت کوتاه بعضی از آن‌ها معرفی می‌گردد.

۲-۱- معادلات توابع انرژی کرنشی

معادله چند جمله‌ای^۴ [۵]:

$$U = \sum_{i+j=1}^{def} C_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j \sum_{l=1}^N \frac{1}{D_l} (J_{el} - 1)^{2l} \quad (1)$$

اگر در معادله چند جمله‌ای $j=0$ قرار داده شود معادله چند جمله‌ای کاهش یافته^۵ به دست می‌آید.

مدل یاه^۶:

$$U = \sum_{i=1}^3 C_{10} (\bar{I}_1 - 3)^i \sum_{l=1}^3 \frac{1}{D_l} (J_{el} - 1)^{2l} \quad (2)$$

مدل آگدین^۱ [۶]

² hysteretic

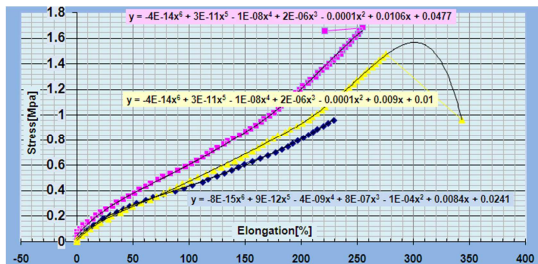
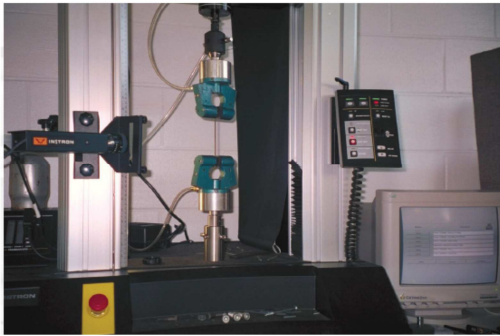
³ Hyperelasticity

⁴ Polynomial

⁵ Reduce polynomial

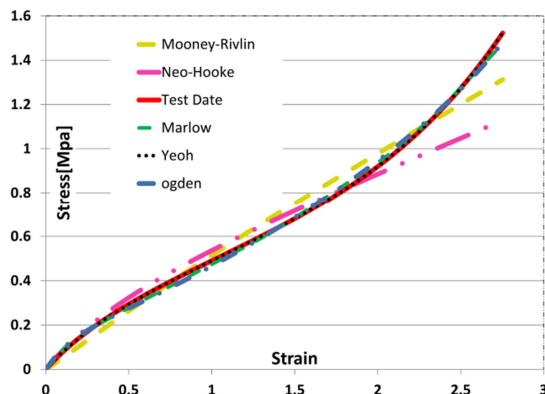
⁶ Yeoh

¹ Constrained layer



شکل ۱- آزمون تک محوره لاستیک و نمودار تنش-کرنش سه آزمون تک محوره برای نمونه‌ی لاستیک

اگر این اطلاعات را وارد Edit Material نماییم و با توجه به نکات ذکر شده مدل‌های نئو-هوک، چند جمله‌ای درجه ۱ (مونی ریولین)، آگدن، یاه و مارلو را ارزیابی کنیم می‌توان نتایج نموداری و ضرایب مدل‌های مورد نظر را ببینیم. همان‌طور که در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ می‌بینید بهترین مدل انرژی کرنشی مدل مارلو و بعد نئو هوک و یاه است.



شکل ۲- مقایسه توابع انرژی کرنشی با نمودار آزمون تک محوره

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i} \quad (3)$$

مدل آردا-بویس^۲: [۷]

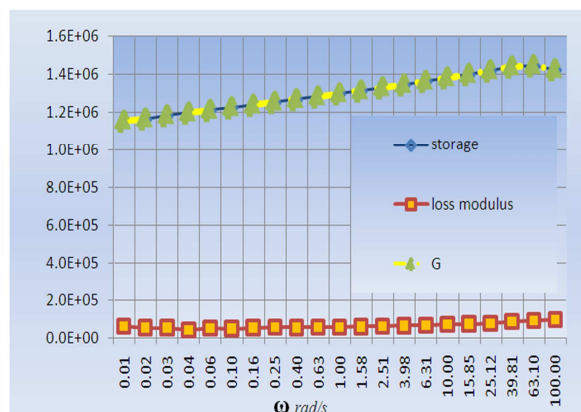
$$U = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_m^{2i-2}} (\bar{I}_1^i - 3^i) + \frac{1}{D} \left(\frac{J_{el}^2 - 1}{2} - \ln J_{el} \right) \quad (4)$$

که در آن $C_1 = \frac{1}{20}$, $C_2 = \frac{1}{1050}$, $C_3 = \frac{11}{7000}$, $C_4 = \frac{19}{7000}$ و $C_5 = \frac{519}{673750}$ است.

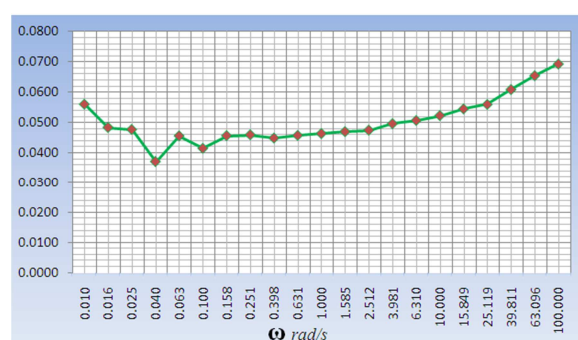
روش استاندارد برای تعیین رفتار مواد فراکشسان به دست آوردن نمودار تنش-کرنش آزمایش‌های تجربی است. تغییرشکل‌ها ممکن است تک محوره^۳، دومحوره^۴ و صفحه‌ای^۵ باشد و در موقعی که ماده تراکم پذیر است، تغییر شکل حجمی^۶ نیز وجود دارد. در این مدل ضرایب مواد در تابع انرژی کرنشی بر اساس داده‌های تجربی و با استفاده از ریشه کوچکترین مربعات تنظیم و کالیبره می‌شود تا خطای نسبی مربوط به تنش کمینه گردد. خواص مکانیکی لاستیک مورد نظر یعنی خواص هایپرلاستیک آن در آزمایشگاه اندازه گیری می‌شود. برای مدل کردن لاستیک در ABAQUS باید نتایج سه آزمون تک محوره، دومحوره و صفحه‌ای را از لاستیک مورد نظر داشته باشیم. ولی در ایران فقط آزمون تک محوره وجود دارد. برای این منظور از آزمون کشش تک محوره سه قطعه‌ی دمبل شکل یکسان استفاده می‌شود. نتایج بدست آمده به صورت شکل ۱ ارائه شده است. [۸]

نتایج آزمون دو محوره در حدود ۱/۵ الی ۲ برابر آزمون تک محوره بوده و آزمون صفحه‌ای ما بین آن است. در حالتی که فقط داده‌های آزمون تک محوره را داریم استفاده از روش مارلو با دقت بسیار بالا برای مودهای دیگر مناسب است. مدل نئو-هوک و یاه قابل قبول بوده و مدل آردا دقت کمتری دارد. مدل‌های چند جمله‌ای و آگدن و واندروالس اصلاً مناسب نیستند. ولی اگر هر سه مدل آزمون را داشته باشیم استفاده از سه مدل آخر تطابق خوبی دارد [۹].

¹ Ogden
² Arruda-Boice
³ uniaxial
⁴ biaxial
⁵ planar
⁶ volumetric

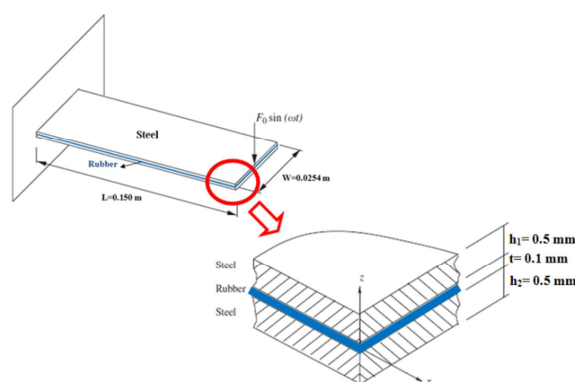


شکل ۵- نتایج آزمون، تغییرات مدول برشی ذخیره ساز و اتلاف و مدول برشی کلی (pa) بر حسب فرکانس



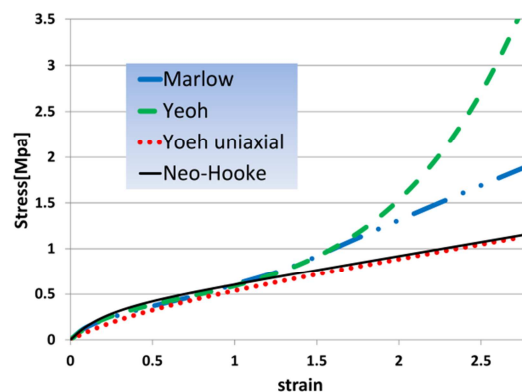
شکل ۶- نتایج آزمون، تغییرات تانژانت اتلاف لاستیک بر حسب فرکانس

این تیر یک سر درگیر از دو لایه بالایی و پایینی فولادی و لایه میانی لاستیکی تشکیل شده است و دارای طول ۱۵۰ میلیمتر و عرض ۲۵/۴ میلیمتر است. ضخامت لایه های فولادی ۰/۵ میلیمتر و ضخامت لایه ی لاستیکی ۰/۱ میلیمتر است و نیروی یک نیوتنی به صورت فرکانسی به آن اعمال می شود [۱].

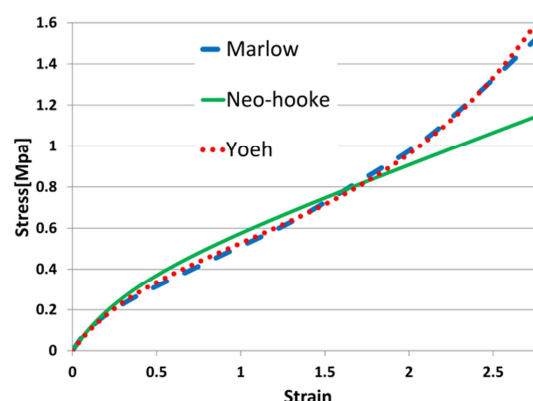


شکل ۷- ابعاد تیر ساندویچی مورد آزمایش

رفتار ویسکو الاستیک هنگامی مشاهده می شود که مانند شکل های ۸ و ۹ مدول برشی ماده تابعی از فرکانس باشد.



شکل ۳- مدل های مناسب انرژی کرنشی در آزمون دو محوره

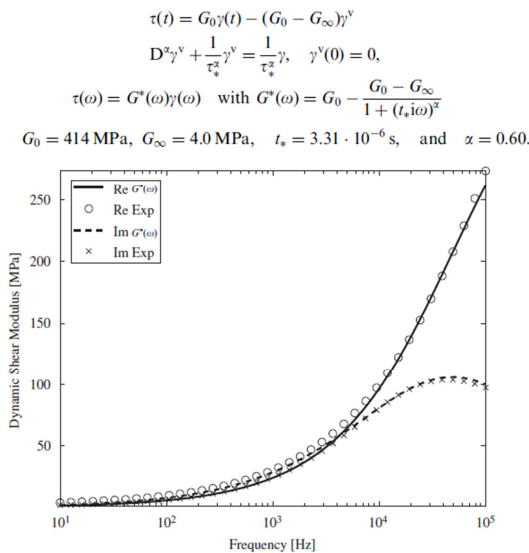


شکل ۴- مدل های مناسب انرژی کرنشی در حالت صفحه ای

برای لاستیک مورد آزمایش مقدار مدول اتلاف و ذخیره ساز وابسته به فرکانس به صورت شکل ۵ نمایش داده شده است. برای تعریف حالت ویسکوالاستیک ماده لازم است. و این دو کمیت با هم به صورت $\frac{G_l}{G_s} = \tan \delta$ ارتباط دارند. برای لاستیک مورد نظر آزمون خواص ویسکوالاستیک شامل اندازه گیری مدول برشی، مدول بالک و زاویه اتلاف آن ها با استفاده از آزمون های فرکانسی DMTA انجام شد. نتایج آن در شکل ۵ و ۶ قابل مشاهده است.

با توجه به آزمایشات انجام شده روی لاستیک می توان دیاگرام مدول بالک-فرکانس و مدول بالک-زمان را بدست آورد.

لاستیک با پایه نیتریل اساساً یک ماده ویسکوالاستیک است و به دلیل کرنش های کوچک و خطی که در این مسئله خاص دارد، می توان رفتار این ماده را بجای هایپرلاستیک، الاستیک فرض کرد و با این فرض نتایج قابل قبولی در شبیه سازی بدست آورد. لایه نازک لاستیک به وسیله صفحات فلزی تیر یک سر درگیر شکل ۷ مقید می شود که رسانای گرمای خوبی هستند و فرض هم دما بودن برای لاستیک نیز فرض درستی است.



شکل ۱۰- مقایسه منحنی آزمون مدول برشی و روش کسر کاهش یافته

یک آزمون برشی با کرنش کوچک را در نظر بگیرید این کرنش برشی متناوباً با زمان تغییر می‌کند.

$$\gamma(t) = \gamma_0 \exp(i\omega t) \quad (5)$$

فرض می‌شود که این قطعه ویسکوالاستیکی مدت زمان طولانی تحت نوسان بوده است و به حالت پایدار رسیده است.

$$\tau(t) = (G_s(\omega) + iG(\omega))\gamma_0 \exp(i\omega t) \quad (6)$$

این مدول (مختلط) را می‌توان به کمک تبدیل فوریه به صورت بی بعد $g^*(\omega)$ بدست آورد.

$$g(t) = \frac{G_R(t)}{G_\infty} - 1 \quad (7)$$

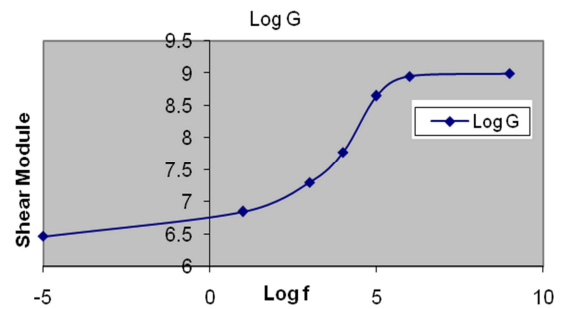
$$G_s(\omega) = G_\infty (1 - \omega \Re g^*(\omega))$$

$$G_l(\omega) = G_\infty (\omega \Re g^*(\omega)) \quad (8)$$

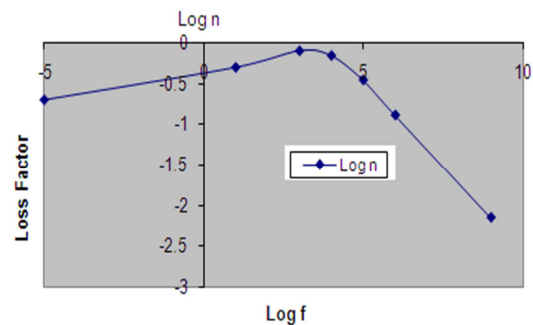
هنگامی که تنش چند محوره در مدل وجود داشته باشد ABAQUS فرض می‌کند مدول برشی و مدول حجمی از هم مستقل هستند. رفتار مدول حجمی با دو قسمت مدول حجمی ذخیره شونده $K_s(\omega)$ و مدول حجمی هدر رفتگی $K_l(\omega)$ تعریف می‌شود. شبیه مدول برشی این مدول را نیز می‌توان به کمک تبدیل فوریه $k^*(\omega)$ و مدول حجمی وابسته به زمان $K_R(t)$ بی بعد نمود.

$$K_s(\omega) = K_\infty (1 - \omega \Re k^*(\omega)) \quad (9)$$

$$K_l(\omega) = K_\infty (\omega \Re k^*(\omega))$$



شکل ۸- نتایج آزمون، تغییرات لگاریتم مدول بر حسب لگاریتم فرکانس



شکل ۹- نتایج آزمون، تغییرات لگاریتم فاکتور بر حسب لگاریتم فرکانس

تعداد زیادی متغیر داخلی و در نتیجه تعداد زیادی کمیت نیاز است تا رفتار ویسکوالاستیک بیان شود. با استفاده از روش کسرهای کاهش یافته تعداد پارامترهای مورد نیاز به طور محسوسی کاهش می‌یابد. روش کسرهای کاهش یافته خطی به خوبی با داده‌های تجربی برای محدوده وسیعی از فرکانس‌ها و پلیمرهای مختلف مطابقت دارد (شکل ۱۰).

با استفاده از روش کسرهای کاهش یافته می‌توان مدول برشی حقیقی و موهومی لاستیک را به صورت معادلات زیر برای استفاده در نرم افزار المان محدود بدست آورد. همان طور که می‌بینید اختلاف اندکی بین نتایج آزمون و فرم کسر کاهش یافته وجود دارد [۱].

۳- مدل‌سازی ماده ویسکوالاستیک در نرم افزار ABAQUS

نرم‌افزار ABAQUS رفتار مواد ویسکوالاستیک را در دو حوزه عمده بررسی می‌کند [۵ و ۶]:

۱- حوزه زمان

۲- حوزه فرکانسی

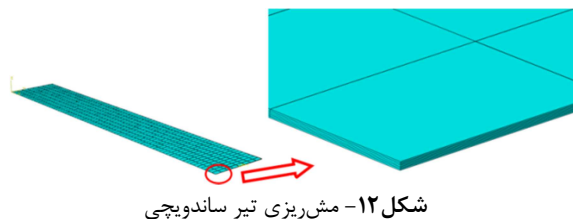
در حوزه زمان تغییر شکل‌های زیاد این مواد با زمان و در حوزه فرکانس رفتار موادی که وابسته به فرکانس است را بررسی می‌کند.

است. در جدول ۱ خواص فولاد و لاستیک مورد استفاده آمده است. در این شبیه سازی خواص ویسکوالاستیک ماده لاستیک، با استفاده از مطالب قبل و در قسمت Tabular به صورت زیر وارد می شود.

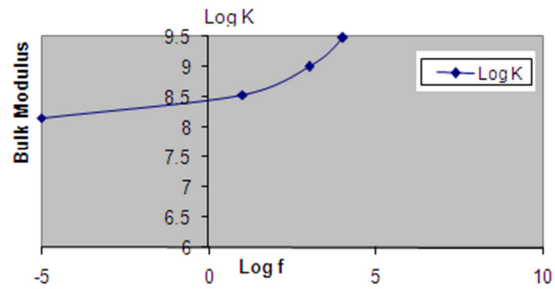
جدول ۲- وارد نمودن خواص ویسکوالاستیک در نرم افزار ABAQUS

Re(ω)	Im(ω)	Re(k)	Im(k)
0.2000	0.0000	0.2000	0.0000
1.2069	-1.4138	1.2069	-1.4138
5.5172	-5.8966	5.5172	-5.8966
14.4828	-19.6897	14.4828	-19.6897
54.3103	154.1724	54.3103	154.1724
40.3448	309.3448	40.3448	309.3448
2.4138	343.8276	2.4138	343.8276

لاستیک به صفحه فولادی چسبانیده شده است پس در مرحله Interaction از قید tie برای اتصال لایه ی فولادی به لایه ی لاستیکی استفاده می شود (از قید shell to solid و Partiton هم می توان استفاده نمود). در مرحله بعد نیروی یک نیوتنی به یک انتهای تیر ساندویچی اعمال می شود و انتهای دیگر کاملاً مقید می گردد. لاستیک باید با المان^۳ (C3D8H) و پوسته فولادی با المان^۴ (S4R) مش ریزی شود.



در ادامه جواب های حاصل از کد نویسی روش In-house و روش تحلیلی (شکل ۱۳) با پاسخ های نرم افزار در شرایط مدل سازی و میرایی متفاوت فولاد با توجه به شکل های ۱۴ تا ۱۶ مقایسه شده است و مطابقت مناسب این نتایج نشان داده شده است [۱]. با توجه به شکل ۱۷ با قرار دادن لاستیک بدون خواص ویسکوالاستیک در میان تیر فولادی کاهش چشمگیری در مقدار فرکانس طبیعی تیر بوجود خواهد آمد و اگر لاستیک به صورت واقعی و با خواص ویسکوالاستیک مدل شود علاوه بر نکته بالا کاهش زیادی در پاسخ فرکانسی دیده می شود.



چهار روش برای تعریف خواص مواد ویسکوالاستیک در حوزه فرکانسی وجود دارد که عبارتند از:

- ۱- تعیین ضرایب سری پرنی
 - ۲- نتایج آزمایش خزش^۱
 - ۳- نتایج آزمایش واهلش^۲
 - ۴- تعیین ضرایب وابسته به فرکانس
- روش تعیین ضرایب وابسته به فرکانس خود به دو بخش روش Formula و روش Tabular تقسیم بندی می شود. روابط روش Formula به صورت:

$$\begin{aligned} g^* &= g_1^* f^{-a} \\ k^* &= k_1^* f^{-a} \end{aligned} \quad (10)$$

روابط این بخش به شرح ذیل است

$$\begin{aligned} \omega \Re g^*(\omega) &= G_1 / G_{\infty} \\ \omega \Re g^*(\omega) &= 1 - G_s / G_{\infty} \\ \omega \Re k^*(\omega) &= K_1 / K_{\infty} \\ \omega \Re k^*(\omega) &= 1 - K_s / K_{\infty} \end{aligned} \quad (11)$$

۴- شبیه سازی تیر یک سر درگیر در نرم افزار آباکوس

در آباکوس در مرحله ی اول دو لایه فلزی به صورت Shell و لایه لاستیکی به صورت Solid مدل می شود.

جدول ۱- خواص الاستیک اجزاء

جنس	چگالی kg/m^3	مدول یانگ GPa	ضریب پواسن
فولاد	۷۸۰۰	۲۱۰	۰٫۳
لایه NBR	۱۲۵۰	۱	۰٫۴۹۳۹

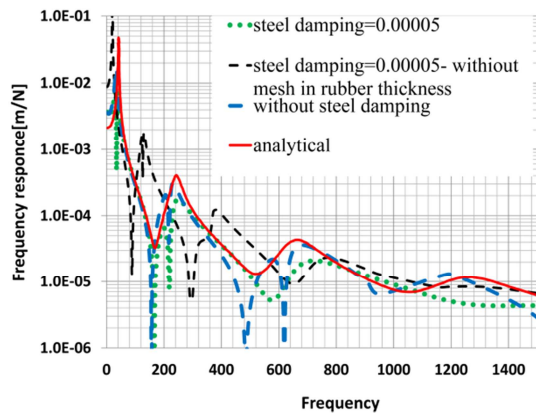
مرحله بعدی وارد نمودن خواص مواد است. قسمت فلزی از جنس فولاد گالوانیزه ASTM A653 است و جنس ماده ویسکوالاستیک از نوع لاستیکی NBR (اکریل نیتریل بوتادین)

³ 8-node linear brick, hybrid, constant pressure

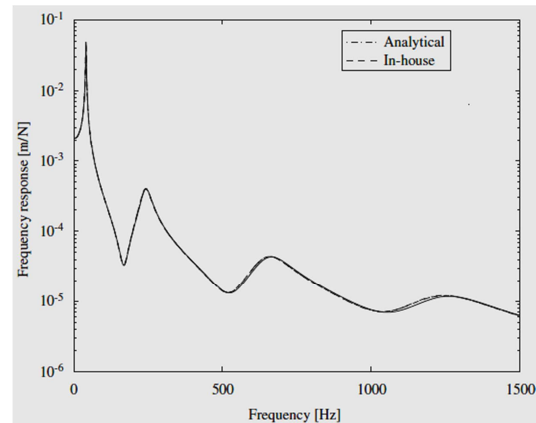
⁴ A 4-node doubly curved thin or thick shell,

¹ Creep test data

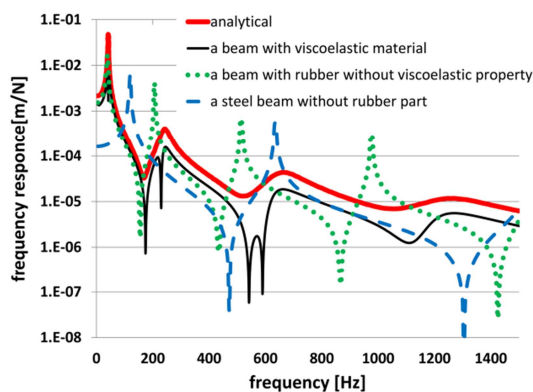
² Relaxation test data



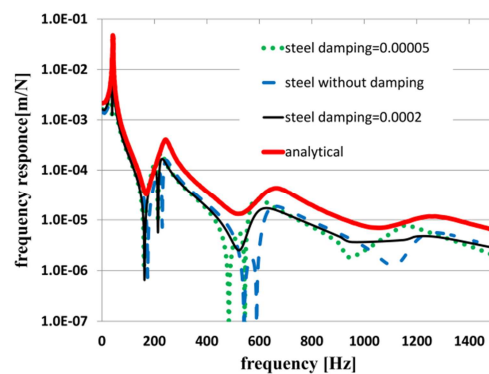
شکل ۱۶- پاسخ فرکانسی ABAQUS با تماس صفحات لاستیک با فلز به صورت tie و با میرایی های متفاوت فلز



شکل ۱۳- مقایسه پاسخ فرکانسی حل تحلیلی و حاصل از روش کد نویسی In-house[1]



شکل ۱۷- مقایسه پاسخ فرکانسی تیر در حالت های بدون لاستیک در وسط فولاد، با لاستیک و بدون خواص ویسکوالاستیک، مدل دارای لاستیک مقید با خواص ویسکوالاستیک و مدل تحلیلی



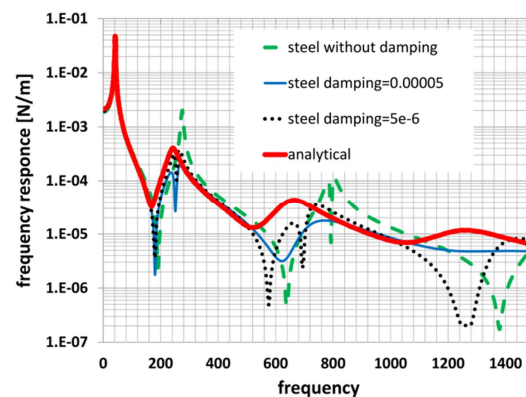
شکل ۱۴- نمودار جابجایی-فرکانسی بدست آمده در ABAQUS با تماس صفحات لاستیک با فلز به صورت Solid to shell

۵- نتیجه گیری

برای شبیه سازی رفتار لاستیک ها باید خواص های پیر الاستیک و ویسکوالاستیک آنها را به کمک آزمون بدست آورد. برای بدست آوردن خواص های پیرالاستیک باید حداقل نتایج یکی از آزمون های تک محوره، دومتوجه، صفحه ای را داشته باشیم البته در بعضی موارد که تغییر شکل و کرنش لاستیک کم است می توان بجای تعریف خواص های پیرالاستیک خواص الاستیک برای آنها تعریف کرد. همچنین برای خواص ویسکوالاستیک باید نتایج آزمون مدول برشی ذخیره شونده و هدر رفتگی مواد ویسکوالاستیک برای زمان های متفاوت یا فرکانس های متفاوت را بدست آورد سپس به کمک نرم افزار ABAQUS می توان رفتار مواد لاستیکی را با دقت بالایی شبیه سازی نمود.

فهرست علائم

G_0	مدول برشی لحظه ای، N/m^2
G_∞	مدول برشی نهایی، N/m^2
$G_R(t)$	مدول برشی وابسته به زمان، N/m^2



شکل ۱۵- پاسخ فرکانسی مدل ABAQUS به صورت Partition مدل شده و با میرایی های متفاوت فلز

[9] modeling rubber and viscoelastic with abaqus, abaqus workshop 2009.

مدول برشی هدر رفتگی، N/m^2	G_l
مدول برشی ذخیره شونده، N/m^2	G_s
مدول حجمی وابسته به زمان، N/m^2	$K_R(t)$
مدول حجمی هدر رفتگی، N/m^2	K_l
مدول حجمی ذخیره شونده، N/m^2	K_s
عدد مختلط	g_1^*
عدد مختلط	k_1^*
مقادیر حقیقی	a
مقادیر حقیقی	b
مدول الاستیسیته، N/m^2	E
فرکانس	f
مدول برشی، N/m^2	G
$\sqrt{-1}$	i
مدول حجمی، N/m^2	K
متغیر برش	γ
ضریب پواسن	ν
تنش برشی، N/m^2	τ
سرعت زاویه‌ای، rad/s	ω
تابع انرژی کرنشی J	U
نسبت حجمی مجموع	J
نسبت حجمی الاستیک	J_{el}

مدل سازی تیرساندویچی لایه‌ای کاملاً ...

مراجع

- [1] Alvelid M., Enelund M., "Modeling of constrained thin rubber layer with emphasis on damping", Journal sound and vibration, Vol.300, pp. 662-775, 2007.
- [2] Meunier M., Shenoi R.A., "Forced response of Frp sandwich panels with viscoelastic materials", Journal of sound and vibration, Vol.263, Issue1, pp.131-151, 2003.
- [3] Nashif A.D., Jones D.I.G., Henderson J.P., "Vibration Damping", Wiley, New York, 1985.
- [4] ASME Manual MS-4. New York, The American Society of Mechanical Engineers, See also URL <http://www.asme.org/pubs/MS4.html>, ASME 2003.
- [5] Rösler J., Harders H., Bäker M., "Mechanical behaviour of engineering materials metals, ceramics, polymers, and composites", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [6] Hibbit C., Karlsson T., Sorensen H., "ABAQUS Documentation Manuals". Version 6.7, 2007.
- [7] Christopherson. J., NakhaieJazar G., "Dynamic Behavior Comparison Of Passive Hydraulic Engine Mounts", Journal sound and vibration, Vol.290, Issue 3-5, pp. 1040-1070, 2006.
- [8] Ashby M.F., Jones D.H., "Engineering Materials", 2nd edition, Utterworth Heinemann, 1996.