



## استخراج تجربی خواص ارتعاشی-میرایی یک ماده‌ی ویسکوالاستیک خاص

سیدعلی حسینی کردخیلی<sup>۱\*</sup> و رضا خراسانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

یادداشت پژوهشی؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۰۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۳/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۲۱

### چکیده

هدف از انجام این مقاله استخراج خواص ارتعاشی-میرایی یک ماده‌ی ویسکوالاستیک از یک پوشش جاذب ارتعاشی ناشناخته می‌باشد. برای این منظور از روش ارایه شده در استاندارد ASTM E756-05 استفاده و تست‌های مورد نیاز انجام پذیرفته است. این استاندارد که به منظور اندازه‌گیری خواص ارتعاشی-میرایی مواد گردآوری شده است، می‌تواند قابلیت استفاده از مواد ویسکوالاستیک به صورت مهندسی و هدفمند در کاربردهایی نظیر کنترل ارتعاشی غیرفعال در قالب پوشش‌های جاذب ارتعاش را فراهم آورد. از آنجایی که پوشش جاذب مورد بررسی از نوع میرایی مقید می‌باشد، نمونه‌ای ساندویچی مطابق دستورالعمل استاندارد ساخته شده و با رعایت قیود استاندارد و انجام تست مودال تجربی تیر ساندویچی و تیر مینای فلزی به صورت یک سر درگیر، خروجی‌های مورد نظر شامل تغییرات ضریب کاهش و مدول برشی ماده‌ی ویسکوالاستیک بر حسب فرکانس بدست آمده است. همچنین صحت آزمایش‌های انجام شده بوسیله‌ی معیارهای استاندارد مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاکی از انجام صحیح آزمایش می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** خواص ارتعاشی-میرایی؛ پوشش ویسکوالاستیک جاذب ارتعاش؛ استاندارد ASTM E756-05؛ تست مودال تجربی.

## Experimental Investigation of Vibrational-Damping Properties of a Viscoelastic Material

S. A. Hosseini Kordkheili<sup>1</sup>, R. Khorasani<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Assoc. Prof., AE. Eng., Sharif Univ., Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Ph.D. Student, AE. Eng., Sharif Univ., Tehran, Iran.

### Abstract

In this work vibrational-damping properties of a viscoelastic material of a Russian vibration absorber coating named СКЛГ-27М is investigated. For this purpose ASTM E756-05 standard is employed and corresponding experimental tests are performed step by step. This standard test method is useful to obtain vibrational-damping properties of materials and can make it possible to apply viscoelastic material in passive vibration control applications in a beneficial manner. Since the investigated vibration absorber coating is of type of constrained layer damping or CLD, a sandwich specimen is fabricated according to the standard instructions. Then by performing experimental modal testing on the sandwich specimen and base steel beams as cantilever beams, the desired outputs including variations in loss factor and shear modulus of the viscoelastic material versus frequency are obtained. Also the accuracy of conducted tests are checked out using the standard criteria which the outcomes confirm the validity of tests and results.

**Keywords:** Vibrational-Damping Properties; Viscoelastic Vibration Absorbing Coating; ASTM E756-05 Standard; Experimental Modal Test.

## ۱- مقدمه

در بحث کنترل غیر فعال ارتعاشات مکانیکی، استفاده از الاستومرها به دلیل بازدهی خوب در کاهش سطح ارتعاشات در کنار قیمت مناسب، بسیار مرسوم است [۱، ۲]؛ در نتیجه، پلیمرهای ویسکوالاستیکی در بسیاری کاربردهای مهندسی نظیر، سازه‌ی اتومبیل‌ها و هواپیماها به کار گرفته شده‌اند [۳]؛ همچنین میراگرهای ویسکوالاستیک، نقش زیادی در جذب انرژی و کاهش خسارت در ساختمان‌ها دارند [۴]. از کاربردهای دیگر مواد ویسکوالاستیک، می‌توان به استفاده آن‌ها در تکیه‌گاه به منظور اتلاف انرژی سازه و میرایی نیروهای دینامیکی اشاره کرد [۵].

بدست آوردن ضریب کاهش<sup>۱</sup>، مدول یانگ و یا مدول برشی مواد ویسکوالاستیک به عنوان مواد میرا کننده، در طراحی‌های مربوط به کاهش ارتعاش در سازه‌ها و نیز کاهش صدای منعکس‌شده در اثر این ارتعاش بسیار مفید است؛ زیرا با دانستن این پارامترها طراحی به صورت اصولی و مهندسی انجام و از تحمیل وزن اضافه به سازه جلوگیری می‌شود.

برای این منظور، از استاندارد ASTM E756-05 [۶] استفاده شده است که بیانگر دستورالعمل نحوه اندازه‌گیری صحیح خواص ارتعاشی-میرایی مواد است. از جمله این خواص، می‌توان به ضریب کاهش،  $\eta$ ، مدول یانگ،  $E$  و یا مدول برشی،  $G$  اشاره کرد. این استاندارد بر مبنای آنالیز مودال تجربی بوده و تا فرکانس ۵۰۰۰ Hz و در محدوده‌های دمایی قابل استفاده است که ماده کارایی خود را از دست نمی‌دهد. این روش تست برای آزمایش مواد سودمند است که در کاهش ارتعاشات سازه‌ای، آکوستیک ساختمان‌ها و کنترل صداهای مزاحم کاربرد دارند. این مواد شامل، فلزات، لعاب‌ها، لاستیک‌ها، پلاستیک‌ها، ماتریس‌ها اپوکسی تقویت‌شده و حتی آن دسته از چوب‌هایی شامل می‌شوند که قابلیت تبدیل شدن به نمونه تست تیر یک سر درگیر را دارند. مقالات و کارهای تحقیقاتی پرشماری از این استاندارد، به منظور اندازه‌گیری خواص ارتعاشی-میرایی مواد مورد نیاز خود استفاده کرده‌اند. ارمندی و همکاران [۷]، در مطالعه تجربی تغییرات خواص مکانیکی یک تیر بامبوی یک سر

درگیر، از استاندارد ASTM E756 استفاده کردند. آن‌ها تنظیمات آزمایش خود را که به منظور استخراج تغییرات خواص ویسکوالاستیک در امتداد دیواره بامبو صورت پذیرفت، بر پایه این استاندارد قرار داده، از معادلات توصیه شده در آن استفاده کردند. کوراک و سانلیترک [۸]، با استفاده از تکنیک OBM<sup>۲</sup> و با استفاده از فرایند ذکر شده در استاندارد، خواص کششی ماده میرایی شامل، مدول یانگ و ضرایب کاهش یک ماده میراگر را بدست آوردند. الله‌وردی زاده و همکاران [۹]، رفتار ارتعاشی تیرهای ساندویچی رئولوژیکی<sup>۳</sup> FG<sup>۴</sup> را مورد مطالعه قرار دادند. در آن پژوهش، به منظور محاسبه مدول برشی مختلط از روش استاندارد ASTM E756 استفاده شد. هوجار و ساهازوبود [۱۰]، با استفاده از تکنیک OBM و همچنین به کارگیری استاندارد مذکور، برای نمونه‌های ساندویچی دارای هسته‌هایی از مواد ویسکوالاستیک مختلف، فرکانس طبیعی و ضرایب میرایی را محاسبه کردند. منصور و همکاران [۱۱]، در کار تحقیقاتی خود در زمینه آزمون مودال نانو کامپوزیت‌ها از طریق یک الگوریتم بهینه، برای استخراج مدول یانگ از استاندارد ASTM E756 بهره بردند.

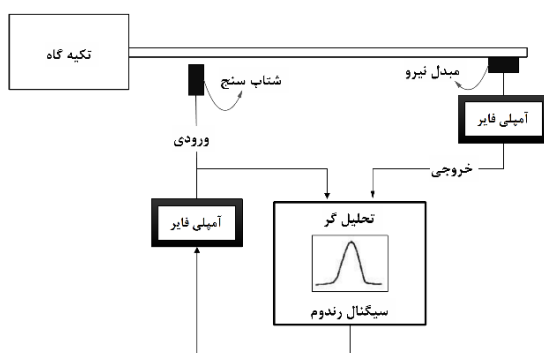
لازم به ذکر است که کارهای پر شماری در زمینه استخراج خواص ویسکوالاستیک صفحات میرا شده انجام شده است. اگ و همکاران [۱۲]، برای تخمین تجربی ضریب کاهش و مدول یانگ صفحات دولایه<sup>۵</sup> متشکل از صفحه آلومینیومی به ضخامت ۲ mm و لایه پلی اتیلن چگالی بالا (HDPE) به ضخامت ۰/۵ mm تا ۲ mm، از آزمون مودال تجربی صفحه در شرایط آزاد استفاده نموده، از یک روش جدید تحلیل مودال بر پایه الگوریتم اسپریت<sup>۷</sup> بهره بردند. به منظور شناسایی خواص میرایی و الاستیک در صفحات و پوسته‌های کامپوزیتی، مَتر و همکاران [۱۳]، از یک روش عددی-تجربی استفاده کردند. به این صورت که در بخش تجربی برای تحریک از بلندگو و برای اندازه‌گیری پاسخ، از لیزر اسکن‌کننده تداخل‌سنج<sup>۸</sup> و برای پیش‌بینی عددی از

<sup>۲</sup> Oberst Beam Method<sup>۳</sup> Rheological<sup>۴</sup> Functionally Graded<sup>۵</sup> Bilayer<sup>۶</sup> High-Density PolyEthylene<sup>۷</sup> Esprit algorithm<sup>۸</sup> Interferometer<sup>۱</sup> Loss Factor

در این اندازه‌گیری مواد به دو دسته تقسیم می‌شوند: مواد خود محافظ<sup>۱</sup> و مواد غیر خود محافظ<sup>۲</sup>. خواص ماده خود محافظ با تشکیل نمونه تیر یکنواخت و یک سر درگیر از آن ماده مطابق نمونه (a) در شکل ۱، اندازه‌گیری می‌شود. همان‌طور که در بخش ۳ توضیح داده خواهد شد، ماده ویسکوالاستیک مورد بررسی در این مقاله در یک پوشش جاذب مقید به کار رفته است؛ بنابراین خواص برشی آن مورد اهمیت است.

اندازه‌گیری خواص میرایی و برشی ماده میرایی، در دو گام انجام می‌پذیرد. در گام اول، دو تیر فلزی که تیر مبنا یا برهنه نامیده می‌شوند، به منظور اندازه‌گیری فرکانس‌های تشدید مورد آزمایش قرار می‌گیرند. در گام بعدی، یک تیر مرکب میرا شده ساندویچی مطابق نمونه (d) شکل ۱، ساخته و آزمایش می‌شود تا فرکانس‌های تشدید و ضرایب کاهش نظیر این فرکانس‌ها بدست آیند. در نهایت خواص میرایی ماده ویسکوالاستیک به کمک سختی تیر مبنا و نتایج تست تیر مرکب ساندویچی قابل محاسبه خواهد بود که در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

شکل ۲، شماتیک کلی چیدمان آزمایش را نشان می‌دهد. بعد از انتخاب و ساخت نمونه آزمایش، نمونه بوسیله یک فیکسچر مناسب بصورت یکسرگیردار جهت انجام تست‌ها مقید می‌شود. برای انجام تست به یک حس‌گر برای اندازه‌گیری نیروی تحریک و یک حس‌گر شتاب‌سنج برای اندازه‌گیری پاسخ نمونه نیاز است.



شکل ۲- شماتیک یک نمونه چیدمان آزمایش

تئوری تغییر شکل برشی مرتبه‌ی بالا با در نظر گرفتن میرایی سازه‌ای استفاده کردند.

در این مقاله، نحوه استخراج خواص میرایی و ارتعاشی ماده‌ی ویسکوالاستیک (СКЛГ-27М) به کار رفته در یک پوشش جاذب ارتعاشی ساخت روسیه با خواص ارتعاشی و میرایی ناشناخته و خارج از دسترس بیان خواهد شد تا امکان استفاده از این پوشش جاذب در کاربردهای ارتعاشی کنترل غیرفعال فراهم آید. روش به کار رفته در این مقاله، خواص ماده میرایی را به صورت غیرمستقیم و با استفاده از نظریه تیر یک سر درگیر میرا شده اندازه می‌گیرد. لازم به یادآوری است که این خواص از هندسه و نمونه آزمایش به کار رفته مستقل است. نتایج بدست آمده در مدل‌های ریاضی به منظور طراحی سیستم‌های میرایی و نیز پیش‌بینی عملکرد این سیستم‌ها، قابل استفاده است.

## ۲- اندازه‌گیری خواص برشی و میرایی مواد با استفاده از استاندارد ASTM E756-05

شماتیک چهار نمونه آزمایش مختلف پیشنهادی به منظور اندازه‌گیری خواص میرایی، کششی و برشی مواد در شکل ۱ آورده شده است. شکل‌های (۱a و ۱b) ابعاد تیر مبنا (فلزی) و ماده مورد آزمایش (در این مقاله ماده‌ی ویسکوالاستیک) را نشان می‌دهد. شکل‌های (۱b و ۱c)، مربوط به نمونه‌های آزمایش برای استخراج خواص کششی و میرایی می‌باشند. برای استخراج خواص برشی و میرایی در این مقاله، از نمونه شکل (۱d) استفاده شده است.



شکل ۱- نمونه‌های آزمایش

<sup>1</sup> Self-Supporting Material

<sup>2</sup> Non Self-Supporting Material

الف) برای نمونه‌ی (b) در شکل ۱،

$$(f_c/f_n)^2 (1 + DT) \geq 1.01 \quad (1-f)$$

ب) برای نمونه‌ی (c) در شکل ۱،

$$(f_m/f_n)^2 (1 + 2DT) \geq 1.01 \quad (1-b)$$

ج) برای نمونه (d) در شکل ۱،

$$(f_s/f_n)^2 (2 + DT) \geq 2.01 \quad (1-c)$$

این محدوده‌ها تقریبی بوده، بستگی به نسبت ضخامت ماده میرایی به تیر مبنا و سختی تیر مبنا دارد. هنگامی که در نزدیکی تقریب‌های مذکور قرار داریم، نتایج باید با دقت بیشتری اندازه‌گیری شود. از روابط فوق می‌توان درباره رفتار خطا قضاوت کرد.

## ۲-۱- روابط محاسبه‌ی خواص میرایی و برشی

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، اندازه‌گیری خواص برشی و میرایی ماده میرایی در دو گام صورت می‌پذیرد. این اندازه‌گیری خواص نیازمند فرکانس تشدید هر مود، ضریب کاهش مودال هر مود، خواص هندسی و چگالی مواد تشکیل‌دهنده برای نمونه تیر مبنا و تیر مرکب ساندویچی است.

### ۲-۱-۱- گام اول: روابط محاسبه‌ی خواص تیر مبنا

نتایج محاسبات تیر مبنا به عنوان ورودی برای اندازه‌گیری خواص میرایی مواد به کار می‌رود؛ بنابراین ابتدا به روابط مذکور اشاره می‌کنیم. مدول یانگ و ضریب کاهش تیر مبنا از معادلات (۲) و (۳) محاسبه می‌شوند [۶]:

$$E = 12\rho l^4 f_n^2 / H^2 C_n^2 \quad (2)$$

$$\eta = \Delta f_n / f_n \quad (3)$$

که در معادله فوق:

$$C_1 = 0.55959 \quad C_2 = 3.5069 \quad C_3 = 9.8194$$

$$C_n = \left(\frac{\pi}{2}\right) (n - 0.5)^2; \quad n > 3$$

### ۲-۱-۲- گام دوم: روابط محاسبه‌ی میرایی برشی نمونه

#### تست ساندویچی

مدول برشی و ضریب کاهش ماده میرایی از رابطه زیر بدست می‌آید [۶]:

در استاندارد ASTM E756-05، مطابق معمول استانداردها فرضیاتی به کار گرفته شده است که در زیر به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است.

فرض اول: همه اندازه‌گیری‌های میرایی در محدوده خطی انجام پذیرفته است و این بدان معناست که ماده میرایی مطابق نظریه ویسکوالاستیک خطی عمل کرده است. اگر نیروی اعمالی، نمونه تست را فراتر از محدوده خطی تحریک کند، نتایج بدست آمده مورد قبول نخواهد بود. برای رفتار خطی تیر، جابجایی حداکثر حالت سکون برای تیر مرکب، باید کمتر از ضخامت تیر مبنا باشد.

فرض دوم: در صورتی که نتوان دامنه نیروی اعمالی را با فرکانس ثابت نگاه داشت، پاسخ تیر را باید بر دامنه نیرو تقسیم کرد و از این نسبت یعنی تابع پاسخ فرکانسی یا FRF<sup>۱</sup> برای اندازه‌گیری میرایی استفاده کرد.

فرض سوم: تبدیل داده‌ها برای هر دو نمونه (b) یا (c) در شکل ۱ از تحلیل کلاسیک برای تیرها، استفاده می‌کند، اما شامل، ترم‌های درگیر در اینرسی دورانی و تغییر شکل برشی نمی‌گردد. این تحلیل فرض می‌کند که در هر مقطع، صفحه، صفحه باقی می‌ماند.

فرض چهارم: معادلات ارائه‌شده برای اندازه‌گیری خواص ماده میرایی در برش شامل، ترم کششی برای لایه میرایی نمی‌شود. این فرض هنگامی که مدول کششی ماده میرایی بسیار کمتر (حدود ده برابر کمتر) از فلز مورد استفاده باشد، به خوبی قابل قبول است.

فرض پنجم: معادلات مذکور فرض می‌شود که ضریب کاهش تیر فلزی صفر است. این فرض برای فولاد و آلومینیوم قابل قبول است؛ زیرا مقدار ضریب کاهش برای این دو فلز کمتر از ۰/۰۰۱ است.

به استثناء نمونه تست یکنواخت، روش آزمایش نمونه‌های دیگر بر مبنای تفاوت‌های اندازه‌گیری شده بین تیرهای میرا شده (مرکب) و میرا نشده (تیر مبنا) است. هنگامی که تفاوت‌های کوچک اعداد بزرگ وارد مسئله می‌شوند، معادلات مربوط به محاسبه خواص ماده به اصطلاح شرایط بیمارگونه پیدا کرده، ضریب خطا بالا می‌رود. برای جلوگیری از این شرایط توصیه می‌شود که [۶]:

<sup>۱</sup> Frequency response function

۳-۱- تجهیزات به کار گرفته شده در آزمایش تجهیزات مورد نیاز جهت انجام آزمایش مودال شامل، تجهیزات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری تقسیم است. تجهیزات نرم‌افزاری شامل، نرم‌افزار PULSE LabShop ساخت شرکت Brüel & Kjær برای تحلیل سیگنال‌های اندازه‌گیری شده، مدول Modal Analysis از نرم‌افزار LMS Test.Lab 10A به منظور تشخیص فرکانس‌های طبیعی، میرایی و شکل موده‌ای سازه است.

تجهیزات سخت‌افزاری مورد نیاز شامل، دستگاه تحلیل‌کننده، چکش ضربه، مبدل نیرو، شتاب‌سنج و کابل‌های اتصال می‌باشند. دستگاه تحلیل‌کننده شکل ۴، یک تحلیل‌گر شانزده کانالی ساخت شرکت Brüel & Kjær است.



شکل ۴- دستگاه تحلیل‌گر Brüel & Kjær

هم‌چنین از یک چکش ضربه ساخت شرکت Platinum Stock Products با یک سر پلاستیکی استفاده می‌شود که در شکل ۵ آورده شده است. علت عدم استفاده از لرزاننده در این آزمایش، تأثیرگذاری آن بر جرم سیستم و وارد کردن خطای بسیار در محاسبه فرکانس‌های طبیعی و شکل موده‌ای آن است.

شتاب‌سنج مورد استفاده از نوع PCB بوده، دارای حساسیت  $100.9 \frac{mV}{g}$  یا  $10.29 \frac{mV}{m/s^2}$  است. این شتاب‌سنج بوسیله موم به سازه متصل می‌شود. مبدل نیرویی از نوع PCB با حساسیت  $11.24 \frac{mV}{N}$  استفاده می‌شود. این حس‌گرها در شکل ۶ نشان داده شده‌اند.

$$G_1 = [A - B - 2(A - B)^2 - 2(A\eta_s)^2] \times \frac{2\pi C_n E H H_1}{l^2 \times ((1 - 2A + 2B)^2 + 4(A\eta_s)^2)} \quad (4)$$

$$\eta_1 = \frac{A\eta_s}{A - B - 2(A - B)^2 - 2(A\eta_s)^2} \quad (5)$$

که در معادله فوق:

$$A = \left(\frac{f_s}{f_n}\right)^2 \times \frac{(2 + DT)B}{2}$$

$$B = \frac{1}{6(1 + T)^2}$$

$$D = \frac{\rho_1}{\rho}$$

$$T = \frac{H_1}{H}$$

### ۳- آزمایش تجربی اندازه‌گیری خواص ماده

#### ویسکوالاستیک

در این قسمت از مطالب بیان شده در بخش قبل برای انجام آزمایش و استخراج خواص ماده ویسکوالاستیک پوشش جاذب روسی CKJIF-27M کمک گرفته می‌شود. این پوشش از نوع میرایی مقید یا CLD<sup>1</sup> است که از دو لایه قید متشکل از فویل آلومینیومی و دولایه ویسکوالاستیک تشکیل شده است. ضخامت لایه قید برابر  $0.1 \text{ mm}$  و ضخامت لایه ویسکوالاستیک در حدود  $0.4 \text{ mm}$  است. در شکل ۳، نمونه‌ای از این پوشش نشان داده شده است.



شکل ۳- پوشش جاذب CKJIF-27M

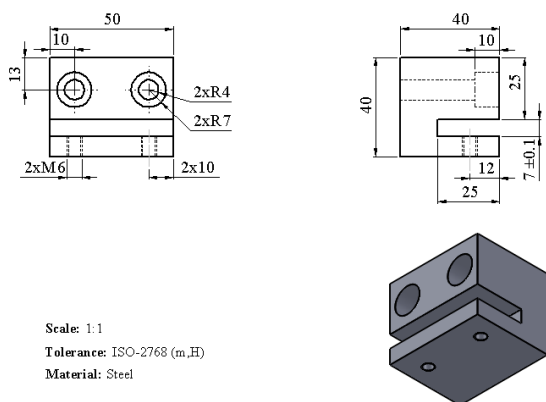
<sup>1</sup> Constrained Layer Damping

فشرده کرد تا به خوبی به یکدیگر چسبیده شوند. لازم به ذکر است، در این جا نیازی به چسب نبوده، لایه ویسکوالاستیک به خوبی روی سطح صیقلی تیرهای فولادی چسبیده می‌شود.



شکل ۷- تهیه تیر کامپوزیتی

طبق استاندارد صلب بودن تکیه‌گاه و ثابت بودن سر تیر در بدست آوردن نتایج صحیح، از اهمیت بالایی برخوردار است؛ بنابراین فیکسچری مطابق نقشه ساختی شکل ۸ تهیه گردید تا این ملزومات برآورده شوند.



شکل ۸- نقشه ساختی فیکسچر

این فیکسچر همان‌گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، به وسیله دو پیچ با قطر ۸ cm به یک سطح مبنای صلب و سنگین پیچ و مهره می‌شود، تا امکان هیچ‌گونه حرکت برای آن وجود نداشته باشد؛ هم‌چنین برای اتصال و مقید کردن تیر به فیکسچر، سوراخ‌های M6 روی سطح فیکسچر تعبیه شده است و با سفت کردن پیچ‌ها می‌توان به خوبی شرط تکیه‌گاهی ثابت را ایجاد کرد.



شکل ۵- چکش ضربه با سر پلاستیکی



(ب)

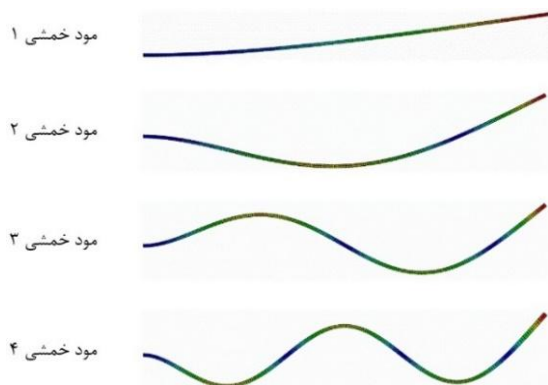
(الف)

شکل ۶- حس‌گرهای آزمایش الف) شتاب‌سنج PCB و ب) مبدل نیروی PCB

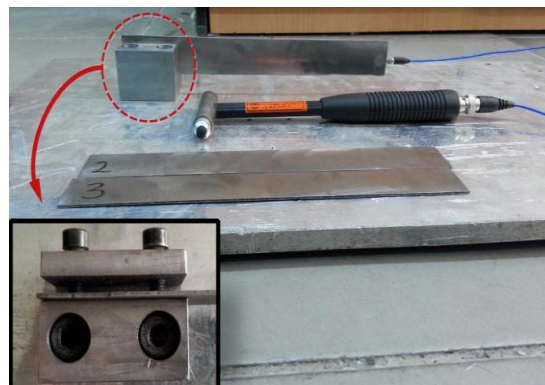
### ۳-۲- آماده‌سازی چیدمان آزمایش

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، برای اندازه‌گیری خواص برشی ماده ویسکوالاستیک، باید نمونه‌ای مشابه نمونه (d) در شکل ۱ ساخته شود. برای این منظور، سه قطعه تیر فولادی به ابعاد  $250 \text{ mm} \times 30/5 \text{ mm} \times 1/4 \text{ mm}$  تهیه شد. از آنجایی وجود خمیدگی و پیچش در تیر می‌تواند تغییراتی در فرکانس‌های طبیعی آن ایجاد نماید، با استفاده از چکش این ناصافی‌ها اصلاح و با استفاده از سوهان نرم سطوح تیرها تا حد خوبی صیقلی شد. دلیل تهیه سه تیر فولادی، انتخاب دو تیر از بین آن‌ها با خواص نزدیک‌تر به منظور ساخت تیر ساندویچی است.

برای تهیه تیر ساندویچی مطابق شکل ۷، ابتدا نمونه‌ای از پوشش جاذب به طول و عرض برابر با تیر فولادی مبنا برش می‌دهیم. سپس لایه ویسکوالاستیک را از لایه قید آلومینیومی آن جدا کرده تا بین دو تیر فولادی قرار گیرد. در گام بعدی با استفاده از یک جسم سنگین با سطح صاف، تیر ساندویچی متشکل از دو تیر فولادی و لایه ویسکوالاستیک را



شکل ۱۰- چهار شکل مود خمشی اول تیر یک سر درگیر



شکل ۹- نحوه عملکرد فیکسچر

#### ۴-۱- صحت‌سنجی نتایج آزمایش

چگالی ماده ویسکوالاستیک به عنوان یک ورودی در تحلیل وارد می‌شود؛ بنابراین با اندازه‌گیری جرم و اندازه‌های هندسی پوشش جاذب و مشخص بودن چگالی فویل آلومینومی آن رابطه (۷) را خواهیم داشت:

$$\rho_{\text{سکلگ-27م}} = \frac{m_{\text{سکلگ-27م}}}{V_{\text{سکلگ-27م}}} = 1408 \text{ kg/m}^3 \quad (7)$$

ابتدا آزمایش مودال را روی سه تیر فولادی انجام می‌دهیم. فرکانس‌های طبیعی مودهای خمشی هر کدام از تیرها، به همراه شکل مود آن‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- فرکانس‌های طبیعی مودهای خمشی تیرهای فولادی

تفاوت تیر ۳ و ۲	تیر ۳	تیر ۲	تیر ۱	تحلیلی	
۱/۱۳۴٪	۲۲/۹Hz	۲۲/۲Hz	۲۳/۳Hz	۲۳/۷Hz	f <sub>1</sub>
۰/۱۳۴۸٪	۱۵۰/۴Hz	۱۵۰/۶Hz	۱۴۹Hz	۱۴۸/۵Hz	f <sub>2</sub>
۰/۰۶۶۰٪	۴۲۴Hz	۴۲۴Hz	۴۱۹Hz	۴۱۶Hz	f <sub>3</sub>
۰/۱۱۳۴٪	۸۰۱Hz	۸۰۲Hz	۷۹۳Hz	۸۱۵Hz	f <sub>4</sub>

همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، چهار فرکانس طبیعی تیرهای شماره دو و سه بسیار به یکدیگر نزدیک بوده، بنابراین تیر ساندویچی از تیرهای دو و سه ساخته خواهد شد. در شکل ۱۱، نمودار تابع پاسخ فرکانسی تیر مبنا (تیر ۲ یا ۳) نشان داده شده است.

قبل از انجام آزمایش فرکانس‌های خمشی، تیر فولادی یک سر درگیر را از روش تحلیلی محاسبه می‌نماییم تا دید مناسبی نسبت به مقادیر آن و نیز اطمینان از نتایج بدست آمده از آزمایش مودال بدست آید. رابطه تحلیلی مذکور در معادله (۶) آورده شده است [۱۴] که در ادامه مقادیر بدست آمده از این رابطه، با مقادیر تجربی مقایسه خواهند شد.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{n}{L} \right]^2 \sqrt{EI/\rho_L} \quad (6)$$

در معادله (۶)، چگالی طولی بوده،  $n$  از جدول ۱ برای مود خمشی نام بدست می‌آید.

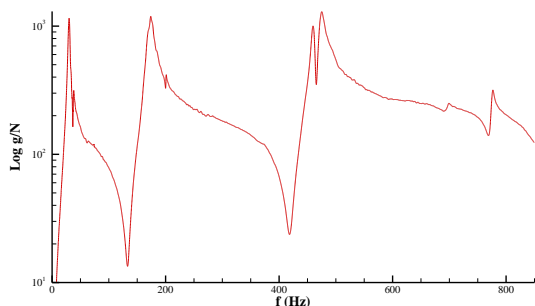
جدول ۱- ضریب  $n$  برای مود نام تیر یک سر درگیر

$n$	$i$
۱/۸۷۵	۱
۴/۶۹	۲
۷/۸۵	۳
۱۱/۰۰	۴

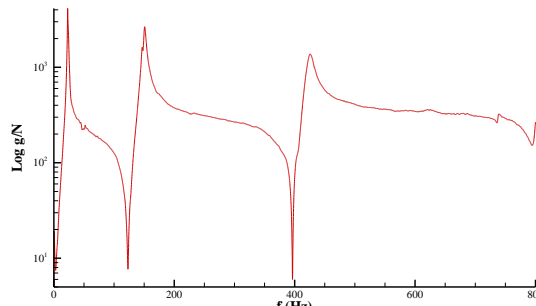
شکل ۱۰، نمایشی از چهار شکل مود خمشی اول تیر یک سر درگیر را نشان می‌دهد.

#### ۴- نتایج آزمایش

در گام اول، صحت‌سنجی تست بر اساس معیارهای استاندارد مورد بررسی قرار گرفته، سپس خواص استخراج شده ماده ویسکوالاستیک ارائه می‌شود.



شکل ۱۲- نمودار تابع پاسخ فرکانسی تیر کامپوزیتی

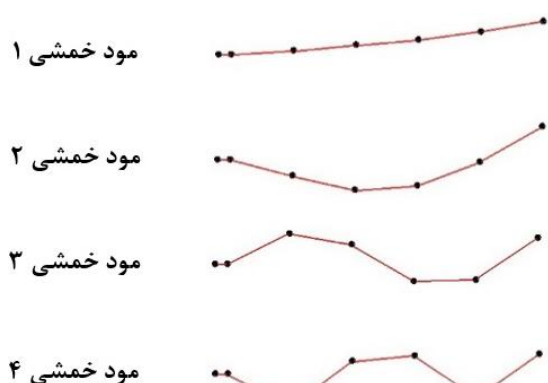


شکل ۱۱- نمودار تابع پاسخ فرکانسی تیر مینا

جدول ۴- خواص مودال تیر کامپوزیتی

ضریب کاهش ( $\eta$ )	فرکانس طبیعی (Hz)	مُد
۰/۰۵۵۴	۲۹/۶	مود خمشی اول
۰/۰۳۰۶	۱۷۲/۴	مود خمشی دوم
۰/۰۱۰۷	۴۵۹	مود خمشی سوم
۰/۰۰۴۸۰	۷۹۰	مود خمشی چهارم

با توجه به امکان پدید آمدن مودهایی به غیر از مودهایی خمشی در آزمایش مودال روی تیر مینا و تیر کامپوزیتی، لازم است برای تشخیص صحیح مودهایی خمشی، شکل مودها از فرکانس طبیعی جدا نشوند؛ بنابراین برای بدست آوردن دید خوبی از شکل مودها از آزمایش، ۵ نقطه از تیر مورد ضربه چکش قرار گرفته‌اند. شکل ۱۳، شکل مودهایی بدست آمده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- شکل مودهایی خمشی تیر مینا و تیر کامپوزیتی از آزمایش مودال

طبق استاندارد ASTM E756، برای اطمینان از نحوه عملکرد تکیه‌گاه، باید مدول کششی تیر مینا محاسبه شود که در اینجا از جنس فولاد ساخته است. انتظار می‌رود با توجه به اینکه خواص فلزات چندان تابع فرکانس نیستند، میزان مدول کششی بدست آمده در هر چهار فرکانس اول، چیزی در حدود ۲۰۰ GPa باشد؛ در غیر این صورت به احتمال زیاد باید ایراد را در تکیه‌گاه جستجو کرد. در ضمن از آنجایی که ضریب کاهش برای فولاد ناچیز است، از مقدار آن صرف نظر می‌شود. با استفاده از معادله (۲)، مدول کششی برای تیر مینا در جدول ۳ آورده شده است.

از اختلاف ناچیز بدست آمده بین مدول‌های کششی تجربی و مقدار مرسوم ۲۰۰ GPa برای فولاد، می‌توان نتیجه گرفت که تکیه‌گاه عملکرد مناسبی دارد. در ادامه، آزمایش مودال روی تیر کامپوزیتی تکرار شده که نمودار تابع پاسخ فرکانسی آن مطابق شکل ۱۲ است.

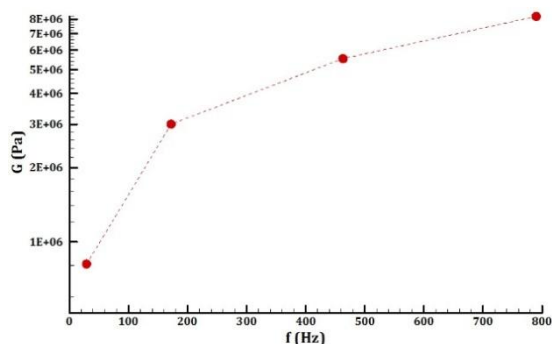
همچنین جدول ۴، خواص مودال تیر کامپوزیتی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش فرکانس طبیعی ضریب کاهش تیر کامپوزیتی کاهش می‌یابد؛ به نحوی که ضریب کاهش مود چهارم، چیزی در حدود ۹٪ ضریب کاهش مود اول است.

جدول ۳- صحت‌سنجی عملکرد تکیه‌گاه

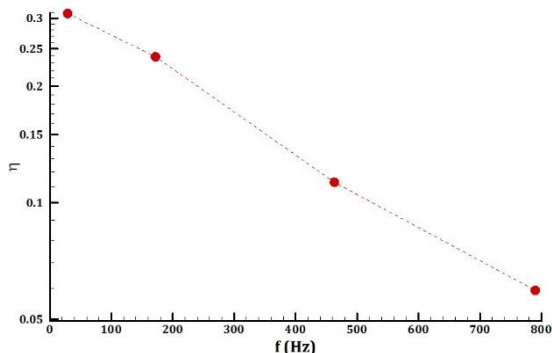
اختلاف با ۲۰۰ GPa	مدول کششی تیر مینا (GPa)	مُد
-۵/۸٪	۱۸۸/۴	مود خمشی ۱
۲/۰٪	۲۰۴	مود خمشی ۲
۴/۰٪	۲۰۸	مود خمشی ۳
۳/۱۰٪	۱۹۳/۸	مود خمشی ۴



برای درک بهتر نتایج جدول فوق، تغییرات مدول برشی و ضریب کاهش ماده ویسکوالاستیک بر حسب فرکانس، به ترتیب در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است. در این شکل‌ها دایره‌ها نقاط بدست آمده از آزمایش و روابط مهندسی و خط‌چین، تنها یک تقریب خطی از مدول برشی و ضریب کاهش بر حسب فرکانس در نقاط دیگر است.



شکل ۱۴- نمودار نیمه لگاریتمی مدول برشی ماده ویسکوالاستیک بر حسب فرکانس در دمای آزمایشگاه



شکل ۱۵- نمودار نیمه لگاریتمی ضریب کاهش ماده ویسکوالاستیک بر حسب فرکانس در دمای آزمایشگاه

همان‌طور که در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌شود، با افزایش فرکانس طبیعی مدول برشی ماده ویسکوالاستیک افزایش یافته، ضریب کاهش آن کاهش می‌یابد و مقادیر مذکور به شدت به فرکانس طبیعی وابسته است؛ همچنین شیب مثبت مدول برشی و شیب منفی ضریب کاهش در ابتدا شدیدتر بوده و از یک فرکانس به بعد از این شدت کاسته می‌شود.

مطلب دیگری که از شکل‌های فوق قابل برداشت است، تغییرات غیرخطی خواص ماده ویسکوالاستیک بر حسب

همان‌طور که در بخش ۲ بیان شد، نتایج بدست آمده از آزمایش باید با معیارهای ذکر شده در استاندارد صحت‌سنجی شوند. با استفاده از معادله (۱-ج) برای تیر کامپوزیتی، هم‌خوانی آزمایش با معیارهای استاندارد در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵- بررسی هم‌خوانی آزمایش با معیارهای استاندارد

$2.01 \leq \left(\frac{f_s}{f_n}\right)^2 (2 + DT)$		
بلی	۳/۳۲	مود خمشی اول
بلی	۲/۷۴	مود خمشی دوم
بلی	۲/۴۹	مود خمشی سوم
بلی	۲/۰۲	مود خمشی چهارم

همان‌طور در جدول فوق مشاهده می‌شود، برای چهار مود خمشی اول تیر، عبارت  $\left(\frac{f_s}{f_n}\right)^2 (2 + DT)$  از عدد 2.01 بزرگ‌تر بوده، آزمایش صورت گرفته با معیار استاندارد هم‌خوانی دارد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، خطای آزمایش در حد قابل قبولی پایین و نتایج بدست آمده معتبر است.

#### ۲-۴- خواص ماده ویسکوالاستیک CK-27M

همان‌طور که اشاره شد، با در نظر گرفتن اطلاعات تیر مبنا به عنوان ورودی برای محاسبه خواص تیر ساندویچی، می‌توان خواص ماده ویسکوالاستیک را استخراج کرد. با استفاده از معادلات (۴) و (۵) و در دمای آزمایشگاه (در حدود ۳۳°C)، خواص برشی ماده ویسکوالاستیک در جدول ۶ گردآوری شده است.

جدول ۶- خواص مودال ماده ویسکوالاستیک بر حسب

فرکانس		
فرکانس طبیعی (Hz)	مدول برشی ماده ویسکوالاستیک (MPa)	ضریب کاهش (η)
۲۹/۶	۰/۸۱۳	۰/۳۰۹
۱۷۲/۴	۳/۰۰	۰/۲۳۹
۴۵۹	۵/۵۴	۰/۱۱۳۰
۷۹۰	۸/۲۲	۰/۰۵۹۴

$H_I$  ضخامت ماده میرایی، m

$l$  طول تیر مینا، m

#### علائم یونانی

$\eta$  ضریب کاهش تیر مینا

$\eta_I$  ضریب کاهش ماده میرایی

$\eta_s$  ضریب کاهش نمونه ساندویچی

$\rho$  چگالی تیر مینا،  $\text{kg/m}^3$

$\rho_I$  چگالی ماده میرایی،  $\text{kg/m}^3$

#### زیرنویس‌ها

$n$  شماره مود

$s$  شماره نمایه: ۱، ۲، ۳ ...

#### ۷- مراجع

- [1] Nashif AD, Jones DIG, Henderson JP (1985) Vibration damping. John Wiley & Sons, New York.
- [2] Lima AMG, Rade DA, Léopore-Neto FP (2009) An efficient modeling methodology of structural systems containing viscoelastic dampers based on frequency response function substructuring. Mech Syst Signal Pr 23(4): 1272-1281.
- [3] Rao MD (2003) Recent applications of viscoelastic damping for noise control in Automobiles And Commercial Airplanes. J Sound Vib 262(3): 457-474.
- [۴] شعبانی افراپلی س، عبدالله زاده غر (۱۳۹۴) تأثیر میراگرهای ویسکوالاستیک بر کاهش خسارت لرزه‌ای قاب‌های فولادی تحت زلزله‌های حوزه دور. دومین کنفرانس بین‌المللی ژئوتکنیک و مهندسی لرزه‌ای شهری.
- [۵] زنگانه ر، کرامت عر، احمدی الف (۱۳۹۴) تأثیر مشخصات تکیه‌گاه ویسکوالاستیک مدل‌سازی شده با مدل جامع کلویین ویت بر ارتعاش محوری میله. فصل‌نامه مدل‌سازی در مهندسی ۹۳-۱۱۱: ۹۳(۴۱).
- [6] ASTM E756-05 (2010) Standard test method for measuring vibration-damping properties of materials. American Society for Testing and Materials.
- [7] Armandei M, Darwish IF, Ghavami K (2015) Experimental study on variation of mechanical properties of a cantilever beam of bamboo. Constr Build Mater 101(Part 1): 784-790.
- [8] Koruk H, Sanliturk KY (2010) On measuring dynamic properties of damping materials using oberst beam method. ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis 2: 127-134, Istanbul, Turkey.

فرکانس است؛ بنابراین با توجه به اینکه ماده ویسکوالاستیک در چه کاربردی و برای میرا کردن ارتعاشات در چه محدوده‌ای از فرکانس‌ها مورد استفاده قرار بگیرد، نیاز است تا در صورت امکان با پرهیز از برون‌یابی، اطلاعات مربوط به خواص مودال آن در محدوده فرکانسی مورد نظر اندازه‌گیری شود.

#### ۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله، خواص ارتعاشی-میرایی ماده ویسکوالاستیک یک پوشش جاذب ارتعاش به روش تجربی اندازه‌گیری شد. برای انجام این کار، از روش مندرج در استاندارد ASTM E756 استفاده گردید. از مزایای این روش، می‌توان به این مطلب اشاره کرد که در مراحل و گام‌های مختلف استاندارد، معیارهایی برای اطمینان از انجام صحیح آزمایشات تجربی قرار داده شده است؛ این موضوع به تفصیل در بخش ۴-۱ مورد بررسی قرار گرفت؛ با رعایت دقیق مراحل و معیارهای استاندارد، می‌توان تا حد بسیار خوبی از صحت نتایج خروجی اطمینان حاصل کرد.

از آن جایی که ماده ویسکوالاستیک پوشش جاذب مورد آزمایش یعنی СКЛП-27M از نوع میرایی مقید یا CLD بود، طبق دستور استاندارد یک نمونه ساندویچی به منظور اندازه‌گیری مدول برشی و ضریب کاهش ماده ویسکوالاستیک آن بر حسب فرکانس ساخته شد. این نمونه و هم‌چنین نمونه تیر مینای فولادی بوسیله یک فیکسچر، به صورت یک سر گیردار تحت آنالیز مودال قرار گرفتند و به کمک روابط موجود در استاندارد خواص مورد نظر از ماده ویسکوالاستیک استخراج گردید؛ هم‌چنین مشاهده گردید، با افزایش فرکانس مدول برشی ماده ویسکوالاستیک افزایش و ضریب کاهش آن، کاهش می‌یابد.

#### ۶- فهرست علائم

$C_n$	ضریب مود n برای تیر مینا
$E$	مدول یانگ تیر مینا، Pa
$f_n$	فرکانس تشدید مود n برای تیر مینا، Hz
$f_s$	فرکانس تشدید مود s برای تیر مرکب، Hz
$G_I$	مدول برشی ماده میرایی، Pa
$H$	ضخامت تیر مینا در راستای ارتعاش، m

- [12] Ege K, Boncompagne T, Laulagnet B, Guyader JL (2012) Experimental estimations of viscoelastic properties of multilayer damped plates in broadband frequency range. Proceedings of Internoise, New York, United States.
- [13] Matter M, Gmür T, Cugnoni J, Schorderet A (2009) Numerical-experimental identification of the elastic and damping properties in composite plates. Compos Struct 90(2): 180-187.
- [14] SS Arora (2012) Study of vibration characteristics of cantilever beams of different materials. M. Sc. Thesis, Patiala, Mechanical engineering department thapar university 23-27.
- [9] Allahverdizadeh A, Mahjoob MJ, Eshraghi I, Nasrollahzadeh N (2013) On the vibration behavior of functionally graded electrorheological sandwich beams. Int J Mech Sci 70: 130-139.
- [10] Hujare PP, Sahasrabudhe AD (2014) Experimental investigation of damping performance of viscoelastic material using constrained layer damping treatment. Procedia Materials Science, International Conference on Advances in Manufacturing and Materials Engineering 5: 726-733.
- [11] Mansour G, Tsongas K, Tzetzis D (2016) Modal testing of nanocomposite materials through an optimization algorithm. Measurement 91: 31-38.