

اثر ساختار اسفنجی بر رفتار اتلافی کامپوزیت‌های پلیمری

E Effect of Foam Structure on the Damping Behavior of Polymer Composites

چکیده

انرژی‌های ناخواسته معمولاً مضر، عامل صدمه و کاهش عمر مفید سیستم‌ها هستند. بنابراین لازم است این ارتعاشات جذب یا کنترل شوند. یک عامل مهم در مطالعه سیستم‌های مکانیکی، اتلاف یا میرایش انرژی است. اتلاف به عنوان توانایی یک ماده در جذب انرژی و تبدیل آن به گرما تعریف می‌شود. اتلاف انرژی در یک سیستم دارای دو بخش اتلاف ساختاری و اتلاف موادی است. اتلاف ساختاری وابسته به خواص هندسی ساختار و اجزای آن است و اتلاف موادی ناشی از اصطکاک درونی و وابسته به خواص ذاتی ماده است. در این پژوهش به بررسی مبانی اتلاف انرژی، مدلسازی و روش‌های اندازه‌گیری آن پرداخته می‌شود. همچنین اتلاف ساختاری به عنوان مکانیزم غالب جذب انرژی در مواد کامپوزیتی مورد بررسی قرار می‌گیرد و اسفنج به عنوان نوعی ساختار در کامپوزیت‌های پلیمری اسفنجی به عنوان عاملی مهم در کنترل انرژی معرفی می‌شود. ساز و کارهای اصلی حاکم بر رفتار مکانیکی اسفنج پلیمری در جذب انرژی، خمش و کشش دیواره‌های سلولی است که به خواص مکانیکی توده پلیمر، چگالی اسفنج، ریز ساختار سلولی از قبیل اندازه، شکل و نوع سلول وابسته است. در اسفنج‌های لاستیکی ریز ساختار از طریق شرایط فرایندی از جمله دما و زمان اسفنج شدن و میزان عامل فومزا کنترل می‌شوند. به صورت کلی قابلیت جذب بالای انرژی در اسفنج‌های لاستیکی ناشی از تغییر شکل زیاد در بارگذاری‌های مکانیکی است.

کلمات کلیدی: اتلاف ساختاری، فاکتور اتلاف، جذب انرژی، کامپوزیت‌های پلیمری، اسفنج لاستیکی

نوع مقاله: پژوهشی

جواد طولابی^۱، محمدرضا پورحسینی^{۲*}، محمد خیبری^۳، محمود رضوی زاده^۴، میلاد علیزاده سوره^۵

۱- کارشناسی ارشد دانشگاه مالک اشتر، پژوهشکده کامپوزیت، تهران، ایران

۲- دکترای تخصصی، استادیار، عضو هیئت علمی پژوهشکده کامپوزیت دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۳- دکترای تخصصی، استادیار، عضو هیئت علمی پژوهشکده کامپوزیت دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۴- کارشناسی ارشد دانشگاه مالک اشتر، پژوهشکده کامپوزیت، تهران، ایران

۵- کارشناسی ارشد دانشگاه مالک اشتر، پژوهشکده کامپوزیت، تهران، ایران

mr_pourhossainy@yahoo.com

ایمیل نویسندگان و عهده‌دار مکاتبات:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۶

مقدمه

ترموالاستیک، اثر جریان گردابی در مواد مغناطیسی، حرکت جابه‌جایی در فلزات و حرکت زنجیره در پلیمرها است. و به‌طور کلی نوع میرایی داخلی وجود دارد: اتلاف ویسکوالاستیک^۱ و اتلاف رفت و برگشتی^۲.

در این پژوهش به بررسی اتلاف ساختاری، مکانیزم‌های اتلاف و روش‌های اندازه‌گیری آن به‌ویژه در کامپوزیت‌های دارای ساختار اسفنجی پرداخته می‌شود.

اتلاف ساختاری

میرایی ساختاری ناشی از اتلاف انرژی مکانیکی در اثر حرکت نسبی بین اجزا در یک ساختار مکانیکی است که دارای نقاط اتصال، مفاصل و یا گیره‌ها است. اصطکاک و یا تماس بین اجزا مختلف در یک سیستم مکانیکی، مکانیزم و عامل اصلی اتلاف انرژی در سیستم‌ها است. از آنجا که اتلاف انرژی به ویژگی‌های خاص سیستم مکانیکی وابسته است، تعریف مدلی که نشان‌دهنده میرایی ساختاری باشد بسیار دشوار است. مدل اصطکاک کولمب^۳ به‌عنوان یک قاعده مورد استفاده برای توصیف اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک است. میرایی ساختاری معمولاً به‌وسیله اندازه‌گیری تخمین زده می‌شود، اما مقادیر اندازه‌گیری شده نشان‌دهنده میرایی کلی در سیستم‌های مکانیکی است. در نتیجه لازم است که مقادیر برای انواع دیگر موارد میرایی را برآورد کرده و آن‌ها را از مقدار اندازه‌گیری شده به‌منظور به‌دست آوردن مقدار میرایی ساختاری کم کنیم. میرایی ساختاری بسیار بزرگ‌تر از میرایی داخلی است و نشان‌دهنده بخش بزرگی از اتلاف انرژی در سازه‌های مکانیکی است [۳].

مدل‌سازی رفتار اتلاfi

میرایش یا اتلاف انرژی بیشتر در قطعات تحت بارگذاری دینامیکی اهمیت دارد. بنابراین تفاوت بین تحلیل بارگذاری استاتیک

ارتعاشات بیش از حد و یا صداهای بلند سبب ناشنوایی افراد، کاهش کارایی، هدر رفتن انرژی و کاهش طول عمر تجهیزات در صنایع می‌شود؛ بنابراین کنترل ارتعاشات ناخواسته از اهمیت بالایی برخوردار است. مفهوم میرایی در یک سیستم ساختاری می‌تواند معانی متفاوتی را در شاخه‌های مختلف داشته‌باشد. آنالیز دینامیکی شامل درک، ارزیابی و اصلاح رفتار دینامیکی ساختاری است که شامل بسیاری از عبارات همچون فرکانس‌های طبیعی، نسبت میرایی و... است. میرایی یکی از روش‌های مختلف به‌منظور رسیدن یک سازه به عملکرد بهینه، زمانی که در معرض لرزش، طوفان، باد یا انواع دیگر اختلالات ضربه‌ای و اختلالات ارتعاش قرار می‌گیرد، پیشنهاد شده است. [۱]. بنابراین کنترل ارتعاشات و جذب انرژی‌های مشخص نیازمند تسلط به مفاهیمی از قبیل ارتعاشات و علوم وابسته است. یکی از متغیرهای کنترل‌کننده ارتعاش، نوع ساختار میراگر است. در این پژوهش ابتدا به بررسی مفاهیم میرایش و سپس اثر ساختارهای متفاوت بر میرایش انرژی از جمله اسفنج‌های پلیمری پرداخته شده است. یک متغیر مهم در مطالعه سیستم‌های دینامیکی، اتلاف یا میرایش انرژی است. اتلاف به‌عنوان توانایی یک ماده در جذب انرژی و تبدیل آن به گرما تعریف می‌شود. مکانیزم‌های اتلاف انرژی در یک سیستم به‌طور کلی ناشی از دو بخش است [۲]:

(۱) **اتلاف ساختاری**^۱ (وابسته به خواص هندسی ساختار و اجزای آن)

(۲) **اتلاف موادی**^۲ (ناشی از اصطکاک درونی و وابسته به خواص ذاتی ماده)

اتلاف موادی

این نوع اتلاف وابسته به ماهیت طبیعی ماده است و ناشی از نقص‌های ریزساختاری، ناخالصی‌ها، مرزدانه‌ها، اثرات

1. Structure Damping
5. Coulomb

2. Material Damping

3. Viscoelastic Damping

4. Hysteretic Damping

استفاده قرار داد [۵]. معادله (۱) معادله کلی ارتعاش در حالت ارتعاشات آزاد با استهلاك ویسکوز است.

$$\ddot{x} + 2\zeta w_n \dot{x} + w_n^2 x = 0 \quad (۱)$$

$$\zeta = \text{نسبت میرایی}^۲$$

$$c_c = \text{ضریب میرایی بحرانی}$$

$$x = \text{دامنه ارتعاش}$$

$w_n =$ فرکانس طبیعی (فرکانسی است که سیستم طبیعتاً و بدون دخالت نیروهای خارجی تمایل به انجام آن دارد)

ارتعاشات آزاد با استهلاك ویسکوز بر حسب نسبت میرایی: سیستم کم میرا: در این حالت سیستم دارای نوسانی است که در هر سیکل دامنه نوسان کاهش می یابد تا نهایتاً سیستم در وضعیت تعادل استاتیکی خود می ایستد مطابق معادله (۱). این حالت را کم میرایی^۳ می نامند که در صنعت کاربرد زیادی دارد. در این حالت دامنه نوسانات به صورت لگاریتمی کاهش می یابد [۴].

$$\zeta < 1 \text{ or } c < c_c \text{ or } \frac{c}{2m} < \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (۲)$$

$$x(t) = e^{-\zeta w_n t} \left\{ x_0 \cos \sqrt{1-\zeta^2} w_n t + \frac{\dot{x}_0 + \zeta w_n x_0}{\sqrt{1-\zeta^2} w_n} \sin \sqrt{1-\zeta^2} w_n t \right\} \quad (۳)$$

حالت میرایی بحرانی: در این حالت رفتار الاستیک و ویسکوز قطعه با هم برابر است.

$$\zeta = 1 \text{ or } c = c_c \text{ or } \frac{c}{2m} = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (۴)$$

$$x(t) = [x_0 + (\dot{x}_0 + w_n x_0)t] e^{-w_n t} \quad (۵)$$

حالت میرایی بالا: در این حالت (t) x دارای توابعی نمایی با توان منفی است که اکیداً نزولی می باشند و امکان هیچ نوسانی وجود ندارد. این حالت دارای میرایی زیاد بوده و اصطلاحاً میرایی بالا^۴ نامیده می شود. این حالت در صنعت کاربرد چندانی ندارد و برای مثال می توان به مکانیزم های

و دینامیک امری مهم در اتلاف انرژی است. اولین تفاوت قابل توجه، متغیر زمانی بودن مسائل دینامیکی است. در مسائل دینامیکی بارگذاری و در نتیجه پاسخ های سازه شامل: تغییر مکان ها، نیروهای داخلی، همگی با زمان تغییر می کنند بنابراین در تحلیل دینامیکی بر خلاف تحلیل استاتیکی نمی توان به یک پاسخ ثابت دست یافت، بلکه پاسخ را باید در طی زمان و در لحظه های متفاوت به دست آورد. بنابراین تحلیل دینامیکی بسیار وقت گیرتر و پیچیده تر از تحلیل استاتیک است. همچنین در مسائل دینامیکی از آنجا که تغییر مکان ها وابسته به زمان هستند سبب ایجاد شتاب و سرعت در سازه می شود که برای مقابله با شتاب نیروهای اینرسی ایجاد می شود. نیروهای داخلی سازه نه تنها باید با بارگذاری اعمال شده بر آن در تعادل باشد بلکه باید با نیروهای اینرسی ناشی از شتاب (و میرایی ناشی از سرعت) نیز در تعادل باشد. نیروهای اینرسی که در مقابل شتاب های سازه مقاومت می کنند مهم ترین وجه تمایز یک مساله دینامیک سازه هستند [۴].

المان های لازم در یک سیستم ارتعاشی شامل موارد زیر است [۴]:
 - یک جرم m که نیروی اینرسی $m\ddot{x}$ را تولید می کند.
 - یک فنر به سختی k که نیروی مقاوم kx را تولید می کند.
 - یک جزء استهلاك کننده مانند دمپر که انرژی را هدر بدهد. اگر ضریب استهلاك ویسکوز c باشد نیروی استهلاك تولید شده برابر $c\dot{x}$ است.

حالت های مختلف اتلاف ساختاری انرژی به دو حالت کلی ارتعاشات آزاد و ارتعاشات اجباری تقسیم می شود. ارتعاشات آزاد خود در دو حالت ارتعاشات آزاد با استهلاك ویسکوز و ارتعاشات آزاد با میرایی کلمب مورد بررسی قرار می گیرند.

ارتعاشات آزاد با استهلاك ویسکوز

برت^۱ در سال ۱۹۷۳ مدل های مختلف توصیف مواد ویسکوالاستیک را مورد مطالعه قرار دارد و برای بیان رفتار استهلاك نیرو و میرایش در این مواد، مدل ویت-کلون را مورد

1. Bert 2. Damping Ratio 3. Under - Damped 4. Over - Damped

برگرداننده درب سالن‌ها اشاره کرد.

گذرا بوده که به تدریج مستهلک شده و اثر آن از بین می‌رود.

ارتعاشات آزاد با میرایی کولمب

همان طور که ذکر شد، فاکتورهای مختلفی از قبیل اصطکاک یا اثرات سایشی باعث میرایی ساختاری می‌شوند. مهم‌ترین شکل میرایی ساختاری، میرایی لغزش است. این شکل از میرایی توسط اصطکاک کولمب در یک اتصال ساختاری ایجاد می‌شود که به عوامل بسیاری از قبیل نیروهای مشترک یا خواص سطحی بستگی دارد [۷-۵].

$$x(t) = A_1 \sin \omega_n t + A_2 \cos \omega_n t - \frac{\mu N}{k} \quad (12)$$

μ = ضریب اصطکاک

$$N = \text{نیروی عمود بر سطح}$$

روش‌های تعیین نسبت میرایی

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری اتلاف انرژی وجود دارد که بر حسب پاسخ سیستم به دو دسته تقسیم می‌شوند [۸]:

۱- پاسخ سیستم نسبت به زمان

۲- پاسخ سیستم نسبت به فرکانس

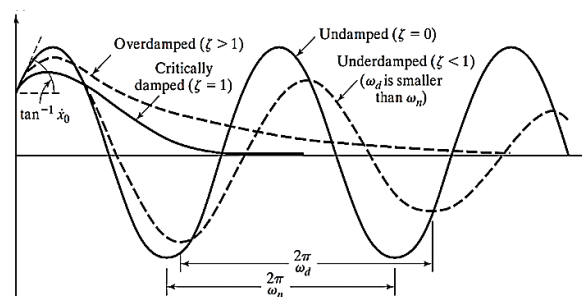
از جمله روش‌های تعیین نسبت میرایی عبارتند از: روش کاهش لگاریتمی، روش پاسخ تک مرحله‌ای، حلقه اتلاف، روش ضریب بزرگ‌نمایی^۲ و روش پهناپی پیک^۳. مبنای تعیین نسبت میرایی در این روش‌ها ارزیابی دامنه نوسان نسبت به زمان یا ارزیابی دامنه نوسان در فرکانس مشخص است. مثلاً در روش کاهش لگاریتمی یک تحریک اولیه به سیستم یک درجه آزادی با میرایی ویسکوز اعمال می‌شود و با توجه به کاهش دامنه نوسان به نسبت زمان ضریب میرایی محاسبه می‌شود. میزان میرایش سیستم عموماً با این روش محاسبه می‌شود [۸].

$$\delta = \ln \frac{A_1}{A_2} = \frac{1}{k} \ln \frac{A_i}{A_{i+k}} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (13)$$

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (14)$$

$$\zeta > 1 \text{ or } c > c_c \text{ or } \frac{c}{2m} > \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (6)$$

$$x(t) = c_1 e^{(-\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} + c_2 e^{(-\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} \quad (7)$$



شکل ۱: حالت‌های مختلف میرایی [۵].

Figure 1: Different damping modes [5].

شکل ۱ نشان می‌دهد که دامنه حرکت در حالت استهلک بحرانی در کوتاه‌ترین زمان نسبت به دو نوع دیگر مستهلک شده و سیستم سریع‌تر به حالت سکون می‌رسد لذا این حالت در سیستم‌هایی به کار می‌رود که نیاز به استهلک سریع ارتعاشات را دارند [۴].

ارتعاشات اجباری با استهلک ویسکوز

معادله حرکت سیستم یک درجه آزادی میرا شونده تحت بار هارمونیک با معادله (۱) بیان می‌شود:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = p \sin \bar{\omega}t \quad (8)$$

$$x(t) = x_c(t) + x_p(t) \quad (9)$$

$$x_c(t) = (A \sin \omega_d t + B \cos \omega_d t) e^{-\zeta \omega t} \quad (10)$$

$$x_p(t) = (G_1 \sin \bar{\omega}t + G_2 B \cos \bar{\omega}t) \quad (11)$$

$$x_c(t) = \text{جواب عمومی}$$

$$x_p(t) = \text{جواب خصوصی}$$

A: دامنه نوسان

اختلاف دو نمودار جواب خصوصی و عمومی ناشی از پاسخ

δ = نسبت دامنه‌ها

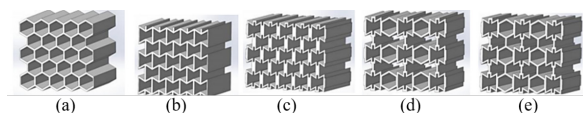
در جدول (۱) ضریب اتلاف برای مواد مختلف آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود لاستیک‌ها به دلیل دارا بودن رفتار ویسکوالاستیک بیشترین میزان جذب انرژی را دارند.

جدول ۱: ضریب اتلاف مواد [۸].

Table 1: Material loss coefficient [8].

Representative Damping Ratios	
System	Viscous Damping Ratio
Metals (in elastic range)	<0.01
Continuous Metal Structures	0.02 to 0.04
Metal Structure with Joints	0.03 to 0.07
Aluminum / Steel Transmission Lines	≈0.0004
Auto Shock Absorbers	≈0.3
Rubber	≈0.05

مفاصل و... می‌شود. به منظور بررسی اثر ساختار بر خواص مکانیکی گو و همکاران اثر زاویه، ضخامت و تعداد دیواره سلولی در ساختارهای هانی کامب و اکستیک مورد مطالعه قرار دادند نتایج نشان داد که با افزایش زاویه، ضخامت و تعداد دیواره سلولی ظرفیت جذب انرژی افزایش می‌یابد [۱۰، ۱۱]. اینگرو^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۷ رفتار جذب انرژی ساختارهای سلولی پلیمر آکریلونیتریل بوتادین استایرن (شکل ۲) که از لحاظ شکل سلولی، ضخامت و زوایای دیواره سلول و تعداد سلول با هم تفاوت داشتند را از طریق آزمون تنش-کرنش فشاری در شرایط ثابت آزمون بررسی کردند [۱۲].



شکل ۲: طراحی ساختار سلولی: (a) هانی کامب، (b) اکستیک ۱، (c) اکستیک ۲، (d) اکستیک-هانی کامب ۱، (e) اکستیک-هانی کامب ۲ [۱۲].
Figure 2: Cell design structures: (a) honeycomb, (b) auxetic-1, (c) auxetic-2, (d) auxetic-honeycomb1 (AH-V1), and (e) auxetic-honeycomb2 (AH-V2) [۹].

نتایج (جدول ۲) نشان داد که ساختارها خواص مکانیکی متفاوتی نسبت به آزمون تنش-کرنش فشاری داشتند. همان طور که نشان داده شد ساختار اکستیک^۲ توانایی جذب انرژی بالاتری نسبت به سایر ساختارها دارد که وابسته به مکانیزم متفاوت تغییر شکل تحت فشار است؛ همچنین دانسیته نسبی ساختار نقش مهمی در جذب انرژی دارد. جذب انرژی ساختار اکستیک ۱، ۷۰ درصد بیشتر نسبت به ساختار هانی کامب و ۳۰ درصد بیشتر نسبت به ساختار اکستیک ۲ دارد. همچنین جذب انرژی ویژه ساختار اکستیک ۱، ۸ درصد بیشتر از نسبت به ساختار هانی کامب و ۱۳ درصد بیشتر نسبت به ساختار اکستیک دارد [۱۲].

پس از مطالعه اتلاف انرژی و مفاهیم آن در این بخش به بررسی رفتار اتلافی کامپوزیت‌های پلیمری و اثر ساختار اسفنجی بر میزان اتلاف انرژی پرداخته می‌شود.

تأثیر هندسه قطعه بر جذب انرژی

ساختارهای لانه‌زنبوری^۱ یافت شده در طبیعت الهام بخش ساخت سازه‌هایی با چگالی پایین و استحکام بالا هستند که کاربردهای مختلفی در زمینه معماری، حمل و نقل، مهندسی مکانیک، هوافضا، مهندسی شیمی، پزشکی و... دارند. ساختار لانه‌زنبوری، مقاومت بالا و چگالی کم، توانایی جذب انرژی ضربه را به سازه‌های کامپوزیتی می‌بخشد. در سال‌های اخیر، مطالعات انجام شده بر روی ساختارهای اکستیک^۲ لانه‌زنبوری، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. ساختارهای اکستیک، ساختاری با نسبت پواسون منفی است که خواص مکانیکی منحصر به فرد و توانایی جذب انرژی بهتری را ارائه می‌دهد [۹]. هدف طراحی ساختارهای اکستیکی افزایش میزان جذب انرژی با تغییر اتلاف ساختاری توسط تغییر هندسه سازه است. تغییرات هندسه باعث تغییر اتلاف ناشی از اتصالات،

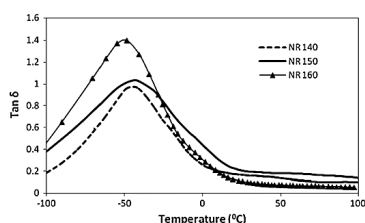
1. Honey comb

2. Auxetic

3. Ingrole

اسفنج پلیمری

اسفنج‌های پلیمری، سبک‌وزن بوده و دارای مزایایی از لحاظ عملکرد، میرایش ضربه و کاهش هزینه هستند. آن‌ها در زمینه‌های مختلفی از جمله ساخت، عایق صدا و بسته‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این نوع ساختارهای پلیمری، خمش و کشش دیواره‌های سلولی، مکانیسم‌های اصلی هستند که واکنش ساختاری آن‌ها به تغییر شکل مکانیکی را کنترل می‌کنند [۱۷]. توانایی انجام این حرکات مکانیکی به شدت وابسته به چگالی اسفنج، ریز ساختار سلولی از قبیل اندازه سلول، شکل و نوع (باز یا بسته) سلول و خواص مکانیکی پلیمر است. برای تولید اسفنج با ریز ساختار، خواص و هم‌چنین کاربرد مشخص، باید متغیرهای زیادی مورد مطالعه و تحت کنترل قرار بگیرد. این متغیرها شامل متغیرهای فرمول بندی مانند: نوع لاستیک، نوع و درصد عامل اسفنج‌زا، نوع و درصد شتاب‌دهنده، نوع و درصد نانو ذرات، و هم‌چنین متغیرهای فرایندی مانند دما و زمان پخت، دما و زمان پخت و اسفنج شدن، فشار اسفنج شدن و... است. این متغیرها بر ویژگی‌های اسفنج مانند چگالی اسفنج، سرعت پخت، چگالی اتصالات عرضی ماتریس لاستیکی، متوسط اندازه سلول‌ها، پخش اندازه سلول‌ها، ضخامت دیواره سلول‌ها، نوع سلول‌ها (باز یا بسته بودن)، شکل سلول‌ها و... مؤثر بوده و در نهایت خواص فیزیکی، مکانیکی و کاربردی اسفنج را کنترل می‌کنند. نجیب و همکارانش تأثیر دمای اسفنج شدن بر ریز ساختار و رفتار دینامیکی لاستیک طبیعی بررسی کردند [۱۹، ۱۸]. افزایش دمای اسفنج شدن سبب تولید گاز با فشار بیشتر و در نتیجه سلول بزرگ‌تر می‌شود. و هرچه سلول بزرگ‌تر شود چگالی بیشتر کاهش می‌یابد و در نتیجه لاستیک اتلاف انرژی بیشتری دارد [۲۰].



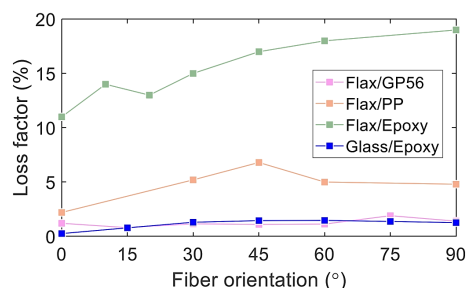
شکل ۴: رفتار اتلاف فوم لاستیک طبیعی در دماهای متفاوت اسفنج شدن [۲۰].
Figure 4: Loss behavior of natural rubber foam at different foaming temperatures [20].

جدول ۲: خواص مکانیکی ساختارهای سلولی تحت آزمون فشاری

Figure 2: Mechanical properties of cellular structures under compression test

Design	Compressive Strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Energy Absorbed ($\times 10^4 \text{J/m}^3$)	Specific Energy Absorbed (J/kg)
Honeycomb	1.62	35.83	0.55	23.19
Auxetic 1	3.87	52.82	0.71	22.11
Auxetic 2	6.43	20.45	0.93	25.14
AH-V1	2.48	13.89	0.52	16.99
AH-V2	2.43	25.7	0.58	17.90

زاویه الیاف در کامپوزیت‌های لیفی به‌عنوان یک عامل ماکروسکوپیک اتلاف مطرح می‌شود، در مطالعات زیادی تأثیر زاویه الیاف را در کامپوزیت‌های چندلایه مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۳]. در شکل ۳ رفتار اتلاف انرژی کامپوزیت اپوکسی با الیاف کتان و شیشه و کامپوزیت پلی‌پروپیلن با الیاف کتان نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در کامپوزیت کتان-اپوکسی سبز بیشترین رفتار اتلافی در محدوده ۷۵-۷۰ درجه الیاف است و برای سایر کامپوزیت‌ها در محدوده ۴۵ درجه است و همین رفتار برای کامپوزیت‌های الیاف کربن و شیشه نیز صادق است. هم‌چنین مشاهده می‌شود که کامپوزیت با زاویه ۹۰ درجه الیاف رفتار اتلافی بیشتری نسبت به صفر درجه دارد و به‌طور کلی اصطکاک بین لیف و زمینه در فصل مشترک مکانیزم غالب اتلاف انرژی در کامپوزیت‌های لیفی است [۱۶-۱۴].

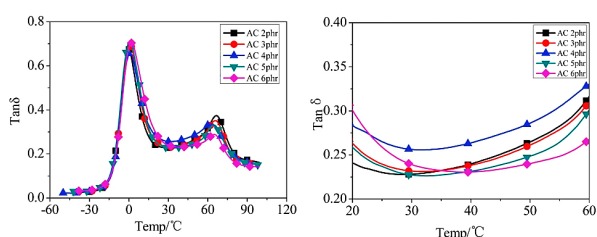


شکل ۳: تغییرات رفتار اتلافی با تغییر زاویه الیاف در کامپوزیت‌های تک‌جهته [۱۴].
Figure 3: Variation of loss factor as function of fiber orientation in UD composites [9].

جدول ۴: چگالی اسفنج در درصدهای متفاوت عامل اسفنج‌زا [۱۸].

Table 4: Foam density in different percentages of foaming agent [21].

Items	Un-foamed density g/cm ³	Foam density g/cm ³	Foaming ratio
AC (Phr)			
2	1.117	0.737	1.516
3	1.199	0.630	1.903
4	1.225	0.391	3.133
5	1.231	0.346	3.558



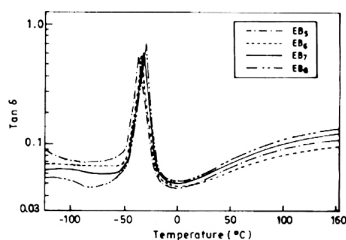
شکل ۶: اثر ساختار اسفنجی بر رفتار اتلافی اسفنج EVM/PLA [۲۱].

Figure 6: Effect of foam structure on the dissipative behavior of EVM/PLA foam [21].

مهاپاترا^۳ و همکارانش در سال ۲۰۰۵ در پژوهشی به بررسی رابطه بین ساختار اسفنجی و خواص پرداختند. لاستیک اتیلن پروپیلن در درصدهای ۰-۶ phr عامل اسفنج‌زای آزودی کربن‌آمید تهیه شد. و با استفاده از رابطه بین مدول ذخیره و چگالی فوم رابطه‌ای برای فاکتور اتلاف بر حسب چگالی ارائه دادند (روابط ۲۰ و ۲۱). طبق این رابطه فاکتور اتلاف با کاهش چگالی افزایش میابد [۲۲].

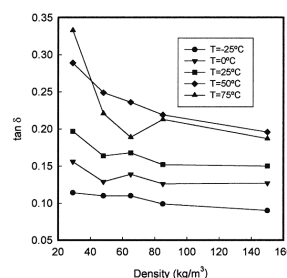
$$E' = a\rho^b \quad (20)$$

$$\tan \delta = m \log E' + c \quad (21)$$



شکل ۷: اثر ساختار اسفنجی بر رفتار اتلافی اسفنج EPDM [۲۲].

Figure 7: Effect of foam structure on the dissipative behavior of EPDM foam [22].



شکل ۵: فاکتور اتلاف اسفنج در دماهای متفاوت [۲۱].

Figure 5: Foam loss factor at different temperatures [21].

مطالعات پرز^۱ و همکارانش نشان داد که ایجاد ساختارهای اسفنجی در پلیمرها سبب افزایش توانایی جذب انرژی می‌شود. در این تحقیق پنج اسفنج پلی‌اتیلن در چگالی‌های متفاوت تهیه شد و به منظور بررسی رفتار دینامیکی، آزمون دینامیکی مکانیکی گرفته شد. نتایج نشان داد که کاهش چگالی به دلیل اسفنج شدن سبب افزایش چشمگیر جذب انرژی می‌شود [۲۱].

جدول ۳: متغیرهای ساختار اسفنجی [۲۱].

Table 3: Foam structure variables [21].

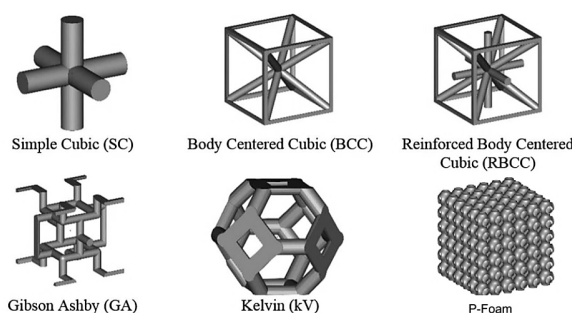
Sample	Density(kg/m ³)	Mean cell size (μm)	Mean cell wall thickness (μm)	Fraction of mass in the struts (%)
NA29	29	405	2.7	58
NA48	48	286	4.8	59
NA65	65	204	6.6	45
NA85	85	258	8.9	47
NA150	150	246	16.1	52

همچنین جیا^۲ و همکارانش در سال ۲۰۱۵ اثر اسفنج کردن بر رفتار دینامیکی مکانیکی آلیاژ پلی‌لاکتیک‌اسید و کوپلیمر اتیلن‌وینیل استات را بررسی کردند. عوامل مختلفی همچون نوع عامل پخت، زمان اسفنج شدن و میزان عامل اسفنج‌زا و... در نظر گرفته شد. نمونه‌های با ۲-۶ phr عامل اسفنج‌زا تهیه شد و نتایج نشان داد که کاهش چگالی سبب بهبود جذب انرژی می‌شود [۱۸].

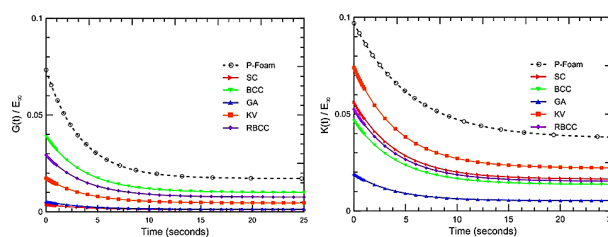
نتیجه گیری

مکانیزم اتلاف انرژی در یک سیستم به طور کلی ناشی از دو بخش است: ۱- اتلاف ساختاری: این نوع اتلاف مربوط به هندسه سیستم است و بیشتر در مورد مواد صلب نقش می یابد. این اتلاف ناشی از اصطکاک بیرونی اجزا، مفاصل، گیره ها و... است. ۲- اتلاف موادی (داخلی): اتلاف داخلی به ویژگی های طبیعت ماده مثل مدول و میزان رفتار ویسکوالاستیک آن ها برمی گردد و ناشی از اصطکاک درونی زنجیرها در پلیمرها و یا حرکت دانه ها در فلزات و... است. دستیابی به سیستمی با توانایی جذب انرژی بالا در کاربرد مناسب زمانی ایده آل است که این دو مکانیزم اتلاف بهینه گردند. مطالعات نشان داد که اتلاف ساختاری در کامپوزیت های پلیمری عامل کنترل کننده اتلاف انرژی است و اسفنج به عنوان نوعی ساختار در کامپوزیت های پلیمری اسفنجی نقش چشمگیری در جذب یا اتلاف انرژی را دارد.

در سال ۲۰۱۸ خان^۱ و همکاران جذب انرژی های دینامیکی - مکانیکی ساختار فومی با دیگر ساختارها را مقایسه کردند. مدل هایی با ساختار و چگالی متفاوت به روش ویسکوالاستیک غیرخطی مدل سازی شد. نتایج افت مدول بالک و مدول برشی بر حسب زمان نشان داد که اسفنج بیشترین افت مدول با زمان را داشته و بیشترین میزان جذب یا اتلاف انرژی را دارد [۱۷].



شکل ۸: ساختارهای متفاوت سلولی [۱۷].
Figure 8: Different cell structures [17].



شکل ۹: افت مدول آسایش در ساختارهای متفاوت الف) مدول برشی، ب) مدول بالک [۱۷].
Figure 9: Relaxation modulus in different structures a) Shear modulus, b) Bulk modulus [17].

سیاسگزاری IRM

مراجع

1. Geethamma V.G., Asaletha R., Kalarikkal N., and Thomas S., Vibration and Sound Damping in Polymers. *Resonance*, 19(9), 821-33, 2014.
2. Martinez Rodriguez M., Analysis of Structural Damping, Lulea university of thchnology, Russian, 2006.
3. Chevalier Y., Damping in Materials and Structures: An Overview. *Generalized Models and Non-classical Approaches in Complex Materials 2*, 1-27, 2018.
4. Chopra AK., Dynamics of Structures, Pearson Education India, 2007.
5. Bert CW., Material damping: An Introductory Review of Mathematic Measures and Experimental Technique, *Journal of Sound and Vibration*, 29, 129-153, 1973.
6. Hammad AH., and Moustafa EB., Study Some of The Structural, Optical, and Damping Dropterties of Phosphate Glasses Gontaining Borate, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 544, 120209,2020.
7. Mevada H., and Patel D., Experimental Determination of Structural Damping of Different Materials. *Procedia Engineering*, 144, 110-115, 2016.
8. Orban F., Damping of Materials and Members in Structures, In *Journal of Physics: Conference Series* , 268, 012022, 2011.
9. Wei L., Zhao X., Yu Q., and Zhu G., A Novel Star Auxetic Honeycomb with Enhanced In-plane Crushing Strength, *Thin-Walled Structures*, 149, 106623. 2020.
10. Gao Q., Wang L., Zhou Z., Ma ZD., Wang C., and Wang Y., Theoretical, Numerical and Experimental Analysis of Three-dimensional Double-V Honeycomb, *Materials & Design*, 139, 380-391, 2018.
11. Gao Q., Ge C., Zhuang W., Wang L., and Ma Z., Crashworthiness Analysis of Double-Arrowed Auxetic Structure Under Axial Impact Loading, *Materials & Design*, 161, 22-34, 2019.
12. Ingrole A., Hao A., and Liang R., Design and Modeling of Auxetic and Hybrid Honeycomb Structures for In-plane Property Enhancement, *Materials & Design*, 117, 72-83, 2017.
13. Berthelot JM., Assarar M., Sefrani Y., and El Mahi A., Damping Analysis of Composite Materials and Structures, *Composite Structures*, 85, 189-204, 2008.
14. Liu T., Butaud P., Placet V., and Ouisse M., Damping Behavior of Plant Fiber Composites: A Review, *Composite Structures*, 275, 114392, 2021.
15. Daoud H., Rebiere JL., Makni A., Taktak M., El Mahi A., and Haddar M., Numerical and Experimental Characterization of The Dynamic Properties of Flax Fiber Reinforced Composites, *International Journal of*

applied mechanics, 8, 1650068, 2016.

16. Rahman M.Z., Jayaraman K., and Mace BR., Vibration Damping of Flax Fibre-reinforced Polypropylene Composites, *Fibers and Polymers*, 18, 2187-2195, 2017.
17. Toulabi J., Khabiri M., Pourhossainy MR., Razavizadeh M., and Saadat Tagharoodi M., Effect of Cell Morphology on Energy Absorption of Nitrile Rubber Foam, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, 33, 497-507, 2021.
18. Jia L., Fu G., and Shi X., Foaming and Damping Properties of Ethylene Vinyl-acetate Copolymer/poly-lactic Acid Blends, *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 54, 190-202, 2015.
19. Fereidoon A., Memarian S., Albooyeh A., and Tarahomi S., Influence of Mesoporous Silica and Hydroxyapatite Nanoparticles on the Mechanical and Morphological Properties of Polypropylene, *Materials & Design*, 57, 201-210, 2014.
20. Najib NN., Ariff ZM., Bakar AA., and Sipaut CS., Correlation Between the Acoustic and Dynamic Mechanical Properties of Natural Rubber Foam: Effect of Foaming Temperature. *Materials & Design*, 32, 505-511, 2011.
21. Rodriguez-Pérez MA., and De Saja JA., Dynamic Mechanical Analysis Applied to the Characterisation of Closed Cell Polyolefin Foams, *Polymer testing*, 19, 831-848, 2000.
22. Mahapatra SP., and Tripathy DK., Dynamic Mechanical Properties of Conductive Carbon Black-Reinforced Closed Cell Microcellular Oil-extended EPDM Rubber Vulcanizates: Effect of Blowing Agent, Temperature, Frequency, and Strain. *Journal of applied polymer science*, 102, 1600-1608, 2006.
23. Khan KA., and Abu Al-Rub RK., Modeling Time and Frequency Domain Viscoelastic Behavior of Architected Foams, *Journal of Engineering Mechanics*, 144, 04018029, 2018.

IRM

Effect of Foam Structure on the Damping Behavior of Polymer Composites

J. Toulabi¹, M.R. Pourhossainy^{2*}, M. Khabiri³, M. Razavi Zadeh⁴, M. Alizade sureh⁵

1. Master of Malek Ashtar University, Composite Research Institute, Tehran, Iran
2. PhD, Assistant Professor, Faculty Member of the Composite Research Institute of Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
3. PhD, Assistant Professor, Faculty Member of the Composite Research Institute of Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
4. PhD, Assistant Professor, Faculty Member of the Composite Research Institute of Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
5. Master of Malek Ashtar University, Composite Research Institute, Tehran, Iran

Corresponding author E-mail: mr_pourhossainy@yahoo.com

Abstract

Junk energy is usually harmful, causing damage and reducing the useful life of systems. Therefore, this vibrations are required to be absorbed or controlled. One important factor in the study of dynamic systems is damping energy or loss of energy. Damping of energy is defined as the capability of a material in absorbing energy and converting it into heat. Damping in a system consists of two parts: structural damping and material damping. Structural damping depends on the geometrical properties of the structure and its components, and the material damping is due to internal friction and is dependent on the intrinsic properties of the material. In this study, the principles of energy dissipation, modeling, and measurement methods are discussed. Structural damping is also considered as the dominant mechanism of energy absorption in composite materials and sponge as a structure in sponge polymer composites is introduced as an important factor in energy control. The main mechanisms of the mechanical behavior of polymer foam is in energy absorption, bending and stretching of the cell wall, which depends on the mechanical properties of polymer, foam density, cell morphology, such as size, shape, and type. Cell morphology of rubber foams are controlled by process conditions such as foaming temperature, time and the amount of foaming agent. In general, the high energy absorption capacity of rubber foams is due to high deformation in mechanical loads

Keywords: Structural Damping, Damping Ratio, Absorbing Energy, Polymer Composites, Rubber Foam