

## Flexural Behavior of Sandwich Structures Consisting of Corrugated Composite Core with Different Geometries

Rahmat Allah Rahmani<sup>1</sup>, Gholamhossein Rahimi<sup>1\*</sup>, and Seyed Saeed Hosseini<sup>2</sup>

1. Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, P.O. Box: 14115-143,  
Tehran, Iran

2. Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University,  
P.O. Box: 35145-179, Semnan, Iran

Received: 7 April 2014, accepted: 20 January 2015

### ABSTRACT

An Experimental and numerical study on the flexural behavior of new types of sandwich structures with glass-epoxy skins and a combinatorial core consisting of PVC foam and a corrugated composite was performed. The purpose of inserting a corrugated composite into the core was the reinforcement of the core and so of the sandwich structure without substantial increment in its weight. Samples were prepared by vacuum assisted resin transform molding industrial technique and tested using three-point bending load test according to ASTM C393 and then the load-deflection curves were obtained. The finite element analysis was performed using Abaqus software to determine the maximum deflection of the samples. In order to increase the precision of numerical results, the tensile test was carried out according to ASTM D3039 to obtain the mechanical properties of the skins and corrugated composite. In addition to a reference sample consisting of a simple foam core, three series of samples were prepared, which consisted of corrugated composites, with square, trapezoidal and triangular geometries, inserted in a PVC foam core. For each experiment, three samples were prepared and tested and the data were used as mean values. It was revealed that the highest and lowest increases in flexural stiffness and flexural stiffness-to-weight ratio were obtained for the samples with trapezoidal and triangular geometries, respectively. Finally, the experimental and numerical results were compared and a good agreement was observed in all samples.

#### Keywords:

sandwich structure,  
geometric shape,  
corrugated core,  
composite skin,  
flexural behavior

(\*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: [rahimi\\_gh@modares.ac.ir](mailto:rahimi_gh@modares.ac.ir)

# رفتار خمشی ساختارهای ساندویچی با هسته کامپوزیتی موج دار و هندسه های متفاوت

رحمت الله رحمانی<sup>۱</sup>، غلامحسین رحیمی<sup>۱\*</sup>، سید سعید حسینی<sup>۲</sup>

۱- تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۵

۲- گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، صندوق پستی ۱۷۹-۳۵۱۴۵

دریافت: ۹۳/۱/۱۸، پذیرش: ۹۳/۱۰/۳۰

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،  
سال بیست و هشتم، شماره ۳،  
صفحه ۱۸۷-۱۷۵، ۱۳۹۴  
ISSN: 1016-3255  
Online ISSN: 2008-0883

## چکیده

در این پژوهش، مطالعه تجربی و عددی رفتار خمشی نوع جدیدی از ساختارهای ساندویچی با رویه های کامپوزیتی از جنس شیشه-اپوکسی و هسته ای ترکیبی از اسفنج PVC و کامپوزیت موج دار انجام شده است. هدف از افزودن کامپوزیت موج دار به داخل هسته، تقویت آن و در نتیجه تقویت سازه ساندویچی در برابر بارهای خمشی بدون افزایش چشمگیر وزن سازه است. پس از ساخت نمونه ها با استفاده از روش صنعتی قالب گیری انتقالی رزین به کمک خلأ نمونه ها مطابق با استاندارد ASTM C 393 تحت آزمون خمش سه نقطه ای قرار گرفت و نمودارهای نیرو-جابجایی مربوط به هر کدام به دست آمد. حل اجزای محدود برای مشخص کردن بیشترین جابجایی در نمونه ها مطابق با بار اعمالی با نرم افزار Abaqus انجام شد. برای افزایش صحت نتایج عددی، آزمون کشش برای به دست آمدن خواص مکانیکی رویه های کامپوزیتی و کامپوزیت موج دار داخل هسته مطابق با استاندارد ASTM D3039 انجام شد. در حل تجربی، افزون بر نمونه مرجع با هسته ساده اسفنجی، سه مجموعه نمونه با سه هندسه متفاوت مربعی، دوزنقه ای و مثلثی برای کامپوزیت موج دار تعبیه شده در داخل هسته ای از جنس اسفنج PVC ساخته شد. برای افزایش دقت تجربی مسئله از هر حالت سه نمونه یکسان ساخته شد و از میانگین داده ها در نتایج استفاده شد. نتایج نشان داد، بیشترین افزایش سفتی خمشی و نیز نسبت سفتی خمشی به وزن برای نمونه های با هندسه دوزنقه ای و کمترین افزایش این مقادیر برای نمونه های با هندسه مثلثی است. در نهایت، نتایج تجربی و عددی با هم مقایسه شدند که تطابق قابل قبولی بین این دو مشاهده شد.

## واژه های کلیدی

ساختار ساندویچی،  
شکل هندسی،  
هسته موج دار،  
رویه کامپوزیتی،  
رفتار خمشی

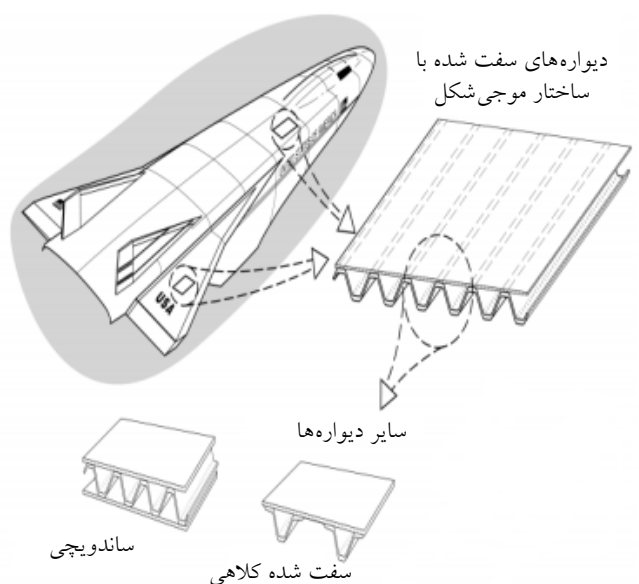
\* مسئول مکاتبات، پیام نگار:

rahimi\_gh@modares.ac.ir

## مقدمه

امروزه ارزش سوخت روزه‌روز در حال افزایش است. از مهم‌ترین چالش‌های صنایع حمل‌ونقل، یافتن ساختارهایی با نسبت استحکام یا سفتی به وزن زیاد است. ساختارهای ساندویچی با داشتن وزن مخصوص کم، استحکام و سفتی زیاد، قابلیت جذب انرژی خوب و به‌عنوان عایق گرمایی و صوتی مناسب، به‌طور گسترده در سازه‌های مدرن استفاده می‌شوند. کاربرد این ساختارها از صنایع هوافضا گرفته تا صنایع دریایی، حمل‌ونقل زمینی و صنایع خودروسازی گسترده شده است [۱]. اما با توجه به اینکه با به‌کار بردن این ساختارها در صنایع هوایی و کاهش وزن حین حفظ یا افزایش استحکام می‌توان به قابلیت‌هایی از قبیل صرفه‌جویی در مصرف سوخت، افزایش برد یا مسافر و بار قابل حمل در هواپیماهای باربری و مسافربری یا افزایش زمان گشت‌زنی در جنگنده‌ها دست یافت، کاربرد این ساختارها در صنایع هوایی نمود بیشتری دارد.

در شکل ۱ نمونه‌ای از کاربرد این ساختارها با هسته موج‌دار در فضایی‌های پیشنهادی سازمان ناسا مشاهده می‌شود [۲]. ساختارهای ساندویچی معمولاً از هسته‌ای با چگالی کم و نسبتاً ضخیم بین دو رویه با سفتی و استحکام زیاد ولی نازک‌تر از هسته تشکیل شده‌اند. ترکیب این رویه‌ها با هسته سبک سبب ایجاد ساختاری مستحکم و با استحکام به وزن استثنایی می‌شود. در ساختارهای ساندویچی رویه‌ها مانند باله‌ها در تیرهای I شکل عمل می‌کنند و نیروهای کششی و فشاری را تحمل می‌کنند. هسته نیز مانند جان تیر عمل می‌کند و ضمن نگه‌داری رویه‌ها، نیروهای برشی وارد شده بر تیر را نیز تحمل می‌کند [۳].



شکل ۱- کاربرد ساختارهای ساندویچی در صنایع هوایی [۲].

در سال ۱۸۳۰ نخستین تیرهای ساندویچی از ورق‌های آهنی که به دو طرف یک هسته چوبی متصل شده بودند، برای کاهش وزن در لکوموتیوهای برادران استفنسون استفاده شدند که موفقیت اقتصادی چشم‌گیری را برای آنها به ارمغان آورد. اما استفاده گسترده از سازه‌های ساندویچی به جنگ جهانی دوم برمی‌گردد که نخستین بار در هواپیمای موسکویت استفاده شد، به‌طوری که رویه‌ها از جنس چوب چندلا و هسته از چوب بالسا ساخته شده بود. در سال ۱۹۱۵ هاگو جانکر ساختار لانه‌زنبوری را با استفاده از دو ورق فولادی متصل به دو طرف یک شبکه سلولی شش‌ضلعی برای به‌کارگیری در هواپیماها ارائه داد که در سال ۱۹۱۹ برای نخستین بار در هواپیمای جنگنده F-13 آلمانی استفاده شد [۴].

نعمتی و همکاران [۵] اثر تغییرات چگالی هسته بر خواص مکانیکی خمشی و برشی ساختارهای ساندویچی را بررسی کردند. نتایج نشان داد، خواص مکانیکی با افزایش چگالی هسته تا حدی افزایش می‌یابد. ولی پس از رسیدن به مقدار بهینه، از مقدار وابستگی خواص مکانیکی به چگالی هسته کاسته می‌شود. آنها علت این پدیده را شدت یافتن نیروی برش و عدم قابلیت هسته در ایجاد خواص مکانیکی بهتر، در چگالی‌های بیشتر بیان کردند. Hai و همکاران [۶]، رفتار خمشی سازه‌های ساندویچی اسفنجی ساخته شده به روش نفوذ رزین را به روش تجربی و نرم‌افزاری بررسی کردند. آنها در ساخت این سازه‌ها از شکاف‌ها و سوراخ‌هایی برای جریان رزین استفاده و گزارش کردند، قطعه‌های ساخته شده با ایجاد شکاف و سوراخ دارای خواص مکانیکی مطلوب هستند.

Russo و Zuccarello [۷] رفتار مکانیکی و سازوکارهای شکست دو نوع از ساختارهای ساندویچی را به روش تجربی و نظری در بارگذاری‌های مختلف مطالعه کردند. نتایج آنها نشان داد، هر دو نوع سازه زیر بارگذاری‌های کششی، فشاری و برشی، رفتار متفاوت غیرخطی نشان می‌دهند. همچنین، مقایسه نتایج تجربی با نظری نشان داد، این نظریه‌ها دقت کافی ندارند. به‌ویژه وقتی شکست سازه بر اثر کشش در رویه اتفاق می‌افتد، نظریه‌ها در حدود ۱۵٪ خطا دارند. هنگامی که شکست سازه در اثر برش در هسته اتفاق بیفتد، خطای برآورد شده با این نظریه‌ها افزایش می‌یابد و به حدود ۱۰۰٪ برای محاسبه استحکام می‌رسد.

Belingardi و همکاران [۸] از آزمون‌های ایستا و دینامیکی برای بررسی خواص کامپوزیت‌های ساندویچی استفاده شده در بخش جلوی قطارهای تندرو استفاده و گزارش کردند، استحکام نهایی کامپوزیت به استحکام هسته به‌کاربرده شده بستگی دارد. همچنین، شکست در سازه بر اثر شکست هسته در اثر نیروهای برشی و در نتیجه جدایش بین رویه و

چندلایه ای کامپوزیتی موج دار داخل هسته، در نمونه ها استفاده شده است.

برای ماتریس کامپوزیت استفاده شده در نمونه ها، رزین اپوکسی ساخت شرکت سیکامین فرانسه با کد SR1700، چگالی  $3/157 \text{ g/cm}^3$  و گرانشی  $1700 \text{ MPa.s}$  در دمای  $20^\circ\text{C}$  به کار گرفته شد. برای سخت کننده نیز از SD2705، با چگالی  $1/04 \text{ g/cm}^3$  و گرانشی  $245 \text{ MPa.s}$  در دمای  $20^\circ\text{C}$  استفاده شد. نسبت ترکیب رزین به سخت کننده مطابق با پیشنهاد شرکت سازنده  $100$  به  $22$  بود. مدت زمان مورد نیاز برای سفت شدن ماتریس در دمای محیط پس از ترکیب رزین و سخت کننده تقریباً  $20 \text{ min}$  بود. همچنین، کمترین زمان مورد نیاز برای پخت نمونه در دمای  $25^\circ\text{C}$  هفت روز بود. این زمان در دمای  $40^\circ\text{C}$  به مدت  $24 \text{ h}$  و در دمای  $60^\circ\text{C}$  به  $6 \text{ h}$  کاهش یافت [10].

#### دستگاه ها

دستگاه کشش INSTRON مدل 5500R با قاب  $6027$  برای آزمون خمش نمونه های ساندویچی و نیز آزمون کشش پوسته های کامپوزیتی استفاده شد. اهر برش  $12$  اینچی Einhell مدل RT-SB305U برای برش اسفنج PVC به شکل های هندسی مدنظر و ایجاد قالب مربوط به آن شکل هندسی، با صفحه مدرج و قابل تنظیم این دستگاه به کار گرفته شد. همچنین، نمونه ها پس از اتصال رویه ها به هسته به روش VARTM و درآوردن نمونه ها از پوشش خلأ به وسیله این اهر با ابعاد استاندارد برش زده شدند. از دستگاه پرس سرد برای پرس هسته های ترکیبی نمونه هایی که در آنها از لایه های کامپوزیتی موج دار با شکل های هندسی مربعی، مثلثی و دوزنقه ای تعبیه شده استفاده شد. این دستگاه در دانشگاه تربیت مدرس طراحی و ساخته شد. برای ایجاد خلأ در قالب VARTM از پمپ خلأ Plama مدل VE280 با قدرت یک اسب بخار و ظرفیت روغن  $560 \text{ mL}$  استفاده شد.

#### روش ها

##### ساخت نمونه ها

ابعاد و هندسه نمونه ها با توجه به معیارهای استاندارد ASTM C 393 مربوط به تعیین خواص خمشی ساختارهای ساندویچی انتخاب شده

جدول ۱- خواص مکانیکی اسفنج به کار رفته در هسته نمونه ها [9].

$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$	G (MPa)	E (MPa)	PVC
80	0/3	30	66	C7075

هسته اتفاق می افتد. محمدی [9] رفتار ساختارهای ساندویچی با رویه های کامپوزیتی و هسته ترکیبی تقویت شده با چندلایه ای کامپوزیتی موج دار، زیر بار فشاری را به روش تجربی و عددی بررسی کرده است. نمونه های ساخته شده شامل سه هندسه مربعی، مثلثی و دوزنقه ای برای چندلایه ای کامپوزیتی موج دار داخل هسته اسفنجی بود. نتایج آزمون های انجام شده مطابق استاندارد ASTM C 364، نشان داد، استفاده از لایه کامپوزیتی موج دار در داخل هسته خواص مکانیکی و نسبت خواص مکانیکی به جرم سازه را تا حد زیادی بهبود می دهد. همچنین، هرچه شکل موج هسته به شکل موج مربعی نزدیک تر باشد، سازه خواص مکانیکی مطلوب تری را در برابر بارگذاری فشاری نشان می دهد. در پژوهش حاضر، رفتار خمشی نوع جدیدی از ساختارهای ساندویچی با رویه هایی از جنس پارچه شیشه و رزین اپوکسی و همچنین هسته ای متشکل از اسفنج PVC و یک چندلایه ای کامپوزیتی موج دار از جنس رویه ها که در داخل هسته اسفنجی تعبیه شده بود، به روش تجربی و عددی بررسی شده است. با انتخاب سه هندسه مربعی، دوزنقه ای و مثلثی برای کامپوزیت موج دار داخل هسته، اثر تغییر شکل هندسی موج بر خواص خمشی از قبیل سفتی خمشی و نسبت سفتی خمشی به وزن نمونه ها بررسی شد. برای مقایسه نمونه ها، مجموعه ای از نمونه ها با هسته ساده اسفنجی به عنوان نمونه مرجع ساخته شد. همچنین، برای صرفه جویی در وقت و هزینه در مطالعات آینده روی این نوع ساختارهای ساندویچی، همه حالت ها در نرم افزار اجزای محدود Abaqus مدل سازی و تحلیل و در نهایت با نتایج تجربی مقایسه شدند.

## تجربی

### مواد

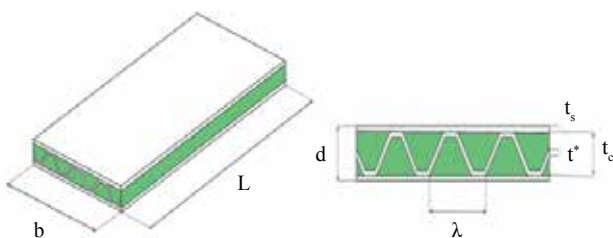
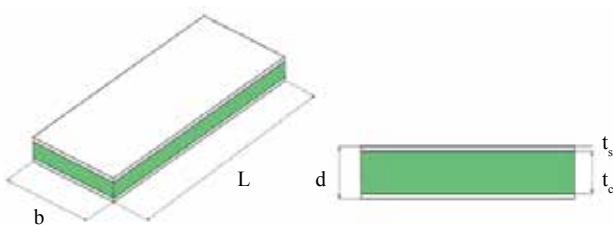
از اسفنج PVC ساخت شرکت سیکامین فرانسه با کد C7075AIREX، چگالی  $380 \text{ kg/m}^3$  و ضخامت  $10 \text{ mm}$  در هسته نمونه ها استفاده شده است. علت استفاده از این اسفنج، سلول بسته بودن و خواص برشی خوب آن در مقایسه با سایر اسفنج های موجود است. در جدول ۱ مشخصات ارائه شده توسط شرکت سازنده این نوع اسفنج آمده است [10].

همچنین از سه لایه پارچه شیشه نوع E ساخت شرکت کلان استرالیا با کد AF301، استحکام کششی  $37000 \text{ N/m}$ ، چگالی سطحی  $185 \text{ g/m}^2$ ، ضخامت  $0/15 \text{ mm}$  و بافت  $68 \times 1$  در تار و پود و زاویه های بافت  $0$  و  $90^\circ$  برای ساخت رویه های کامپوزیتی و

انجام شد. در اینجا سه‌لایه از جنس پارچه شیشه-اپوکسی که در رویه‌ها نیز به کار رفته است، برای ایجاد این چندلایه کامپوزیتی در داخل هسته‌های ترکیبی استفاده شد. پس از آماده‌شدن هسته‌ها، رویه‌ها که متشکل از سه‌لایه پارچه شیشه-اپوکسی بود، به روش VARTM به هسته‌های ساده و ترکیبی متصل شدند. در پژوهش حاضر، با توجه به پیشنهاد استاندارد ASTM و برای صحت‌سنجی تجربی داده‌ها و کاهش خطای ناشی از ساخت، از هر حالت سه نمونه یکسان ساخته شد و از میانگین داده‌های تجربی برای به‌دست آوردن نتایجی همچون سفتی خمشی و نسبت سفتی خمشی به وزن استفاده شد. همچنین، برای حذف اثرهای لبه حین ساخت نمونه‌ها، به هر دو بعد طول و عرض ۲ cm در هر طرف اضافه شد پس از ساخت نهایی، نمونه‌ها بریده و جدا شدند. در شکل ۳ تصویری از یک نمونه با هسته ساده و سه نمونه با هسته ترکیبی و سه هندسه مربعی، دوزنقه‌ای و مثلثی و با گام ۲ cm نشان داده شده است.

#### آزمون نمونه‌های خمشی

پس از ساخت و برش نهایی نمونه‌ها با ابعاد گفته شده، آزمون خمشی سه‌نقطه‌ای روی نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM C393 انجام شد. ابعاد نمونه‌ها ۳۱۰×۶۰×۱۱/۸ mm بود که با توجه به ضخامت ۱۰ mm هسته، ضخامت هر یک از پوسته‌ها ۰/۹ mm بود. از هر حالت با توجه به پیشنهاد استاندارد ASTM سه نمونه مورد آزمون قرار گرفت. شرایط آزمون برای همه نمونه‌ها یکسان بود. فاصله بین دو تکیه‌گاه ۲۵ cm و قطر پین‌های تکیه‌گاه‌ها و دماغه فک بالایی ۱۰ mm بود. همچنین، سرعت عمودی جابه‌جایی فک بالایی دستگاه حین انجام



شکل ۲- نمایی از دو نمونه با هسته‌های ساده و ترکیبی.

جدول ۲- ابعاد انتخابی برای نمونه خمشی.

مقدار (mm)	کمیت
۳۱۰	طول، L
۶۰	عرض، b
۱۱/۸	ضخامت، d
۱۰	ضخامت هسته، t <sub>c</sub>
۰/۹	ضخامت رویه، t <sub>s</sub>

است [۱۱]. این معیارها و ابعاد انتخابی به‌طور خلاصه در پنج مورد به شکل زیر و ابعاد نمونه به‌وضوح در جدول ۲ آمده است.

$$\text{ASTM C 393} \left\{ \begin{array}{l}
 1: \frac{L}{d} \geq 20 \rightarrow \frac{31}{1.18} = 26.27 > 20 \\
 2: \frac{t_s}{t_c} \leq 0.1 \rightarrow \frac{0.09}{1} = 0.09 < 0.1 \\
 3: b \geq 2 \times d \rightarrow 2 \times 1.18 = 2.36 < 6 \\
 4: b \geq 3 \times t_c \rightarrow 3 \times 1 = 3 < 6 \\
 5: b \leq \frac{L}{2} \rightarrow \frac{31}{2} = 15.5 > 6
 \end{array} \right.$$

همچنین، در شکل ۲ نمایی از ابعاد کلی و سطح مقطع دو نمونه با هسته‌های ساده و ترکیبی با هندسه دوزنقه‌ای مشاهده می‌شود. در استاندارد ASTM C 393 دو نوع نمونه یکی کوتاه و دیگری بلند تعریف می‌شود. در نمونه‌های کوتاه اثر برش و در نمونه‌های بلند اثر خمش غالب است. با توجه به ابعاد انتخابی در اینجا، نمونه‌ها از نوع بلند هستند. با مشخص شدن ابعاد و هندسه، نمونه‌ها ساخته شدند. در این پژوهش، در مجموع چهار حالت نمونه ساندویچی ساخته شد. یک حالت نمونه‌ای با هسته‌ای ساده از جنس اسفنج PVC و سه حالت دیگر نمونه‌هایی با هسته‌هایی ترکیبی متشکل از اسفنج PVC و یک چندلایه کامپوزیتی موج‌دار با سه هندسه مربعی، دوزنقه‌ای و مثلثی که در داخل هسته اسفنجی تعبیه شده است.

برای ساخت نمونه‌ها ابتدا هسته‌ها آماده می‌شوند. برای هسته مربوط به نمونه ساده فقط باید اسفنج PVC در ابعاد انتخابی پیش‌گفته برش داده شود. اما، برای نمونه‌هایی با هسته ترکیبی باید یک چندلایه‌ای کامپوزیتی با سه هندسه مربعی، دوزنقه‌ای و مثلثی در داخل هسته اسفنجی تعبیه شود. این کار با برش اسفنج PVC به شکل قطاع‌های مربعی، دوزنقه‌ای و مثلثی با گام ۲ cm ( $\lambda = 2 \text{ cm}$ ) و تعبیه کردن چندلایه کامپوزیتی در داخل آن به روش لایه‌چینی دستی

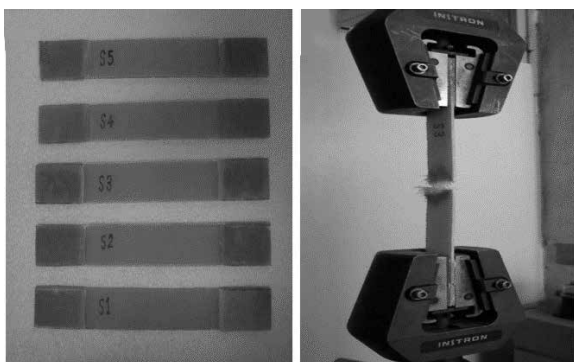


شکل ۴- آزمون خمش سه نقطه‌ای طبق استاندارد ASTM C393.

نمونه‌ها طبق همین استاندارد با دستگاه INSTRON5500R تحت آزمون کشش قرار گرفتند [۱۲]. ابعاد نمونه‌ها  $250 \times 25 \times 2/5$  mm بود. جنس نمونه‌ها از کامپوزیت پارچه شیشه-اپوکسی بود که در نمونه‌های خمش استفاده شد. همچنین، سرعت جابه‌جایی فک بالایی دستگاه حین انجام آزمون کشش  $2$  mm/min انتخاب شد. در شکل ۵ نمونه‌های کشش ساخته شده و نیز نمونه ۳ درست پس از انجام آزمون کشش نشان داده شده است.

### تحلیل عددی

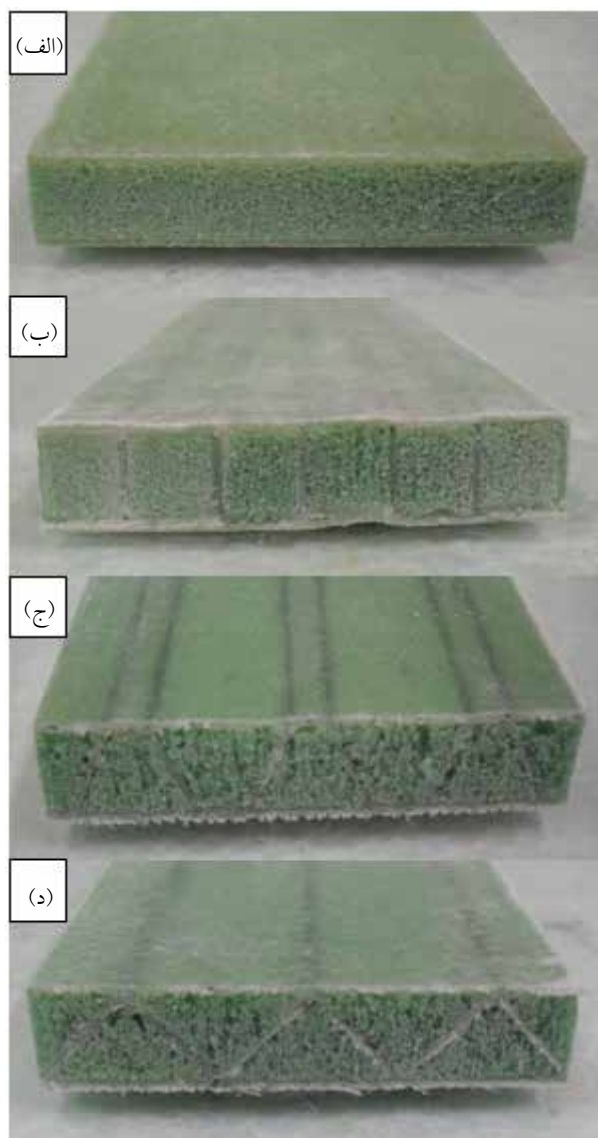
در این بخش، نحوه مدل‌سازی نمونه‌های ساخته شده در نرم‌افزار اجزای محدود بررسی شده است. البته با توجه به اینکه در اینجا تنها نتایجی از قبیل سفتی خمشی و نسبت سفتی خمشی به جرم نمونه‌ها مطرح است، این مدل‌سازی، تنها برای ناحیه کشسان انجام شده است و معیار خرابی برای مدل اجزای محدود تعریف نشده است. در این پژوهش، برای مدل‌کردن نمونه‌ها از نرم‌افزار Abaqus 6.10 استفاده شد. مدل‌سازی برای هر چهار حالت (نمونه‌ها با هسته ساده و ترکیبی و هندسه مربعی، دوزنقه‌ای و مثلثی) به‌طور جداگانه انجام شد. در ادامه، مراحل این مدل‌سازی به تفصیل شرح داده شده است.



(ب)

(الف)

شکل ۵- (الف) آزمون کشش نمونه ۳ و (ب) نمونه‌های کشش پیش از آزمون.



شکل ۳- نمونه‌های ساخته شده با هسته‌های: (الف) ساده، (ب) مربعی، (ج) دوزنقه‌ای و (د) مثلثی.

آزمون  $5$  mm/min بوده است. در شکل ۴ یک نمونه حین آزمون خمش سه نقطه‌ای با دستگاه INSTRON 5500R نشان داده شده است.

### آزمون نمونه‌های کشش

برای مدل‌کردن نمونه‌ها در نرم‌افزار اجزای محدود نیاز است که مدول کشسانی کششی پوسته کامپوزیتی که در رویه‌های بالایی و پایینی و نیز در چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته‌های ترکیبی نمونه‌ها استفاده شده مشخص باشد. به همین سبب، پنج نمونه کامپوزیتی مطابق با استاندارد مربوط به تعیین خواص کششی کامپوزیت‌ها ASTM D 3039M به روش VARTM ساخته شد.

## ابعاد و هندسه

با توجه به تقارن هندسی، بارگذاری، شرایط مرزی و نیز خواص مواد نمونه‌های ساخته شده نسبت به محور مرکزی عمود بر راستای طولی نمونه‌ها، نیمی از نمونه‌ها در نرم‌افزار اجزای محدود مدل شده‌اند. برای مدل‌کردن نمونه‌ها در نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus، در مازول Part، برای همه نمونه‌ها دو نوع Part تعریف شد. یک نوع برای رویه‌های بالا و پایین و چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته و یک نوع هم برای اسفنج PVC به‌کار رفته در داخل هسته بود. برای نوع اول از ویژگی Shell و برای نوع دوم نیز از ویژگی Solid استفاده شد. رویه بالایی، رویه پایینی و چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته‌های ترکیبی با سه شکل هندسی مختلف و نیز نوارهای اسفنجی به‌طور جدا مدل‌سازی شده و به هر کدام یک Part جداگانه اختصاص یافت. ابعاد و هندسه Partها دقیقاً به همان شکلی است که در بخش قبل آمده است، تنها با این تفاوت که در مدل‌سازی اجزای محدود با توجه به تقارن، همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، نیمی از طول نمونه‌ها مدل شده‌اند.

## خواص مواد

برای ارائه خواص مکانیکی مواد به‌کار رفته در نمونه‌ها به نرم‌افزار، در مازول Property دو نوع ماده با نام‌های composite و PVC به ترتیب برای رویه‌ها، چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته و اسفنج به‌کار رفته در هسته تعریف شده است. خواص مکانیکی اسفنج PVC به‌کار رفته در هسته دقیقاً به همان مقادیری است که در جدول ۲ آمده است. خواص مکانیکی رویه‌های کامپوزیتی و نیز چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار، با توجه به آزمون کشش انجام شده (برای مدول کشسانی رویه‌ها) و مراجع مشابه (برای مدول کشسانی برشی و نسبت پواسون) در جدول ۳ آمده است.

از آنجا که نمونه‌های ساخته شده طبق استاندارد ASTM C 393 از نوع نمونه‌های بلند بودند، اثر خمش در آنها به اثر برش غالب است. همچنین، با توجه به اینکه بیشترین تنش‌ها در یک ساختار ساندویچی در بارگذاری خمشی در رویه‌ها رخ می‌دهند و از نوع محوری هستند، در جدول ۳ ثابت کشسان کششی در دو جهت که اهمیت زیادی در

جدول ۳- خواص مکانیکی کامپوزیت به‌کاررفته در نمونه‌ها [۱۲].

$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$G_{12}$ (GPa)	$G_{13}$ (GPa)	$G_{23}$ (GPa)	$\nu$	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
۱۰/۵۸	۱۰/۵۸	۴/۱۴	۱	۴/۱۴	۰/۰۵	۱۶۵۸/۸۴

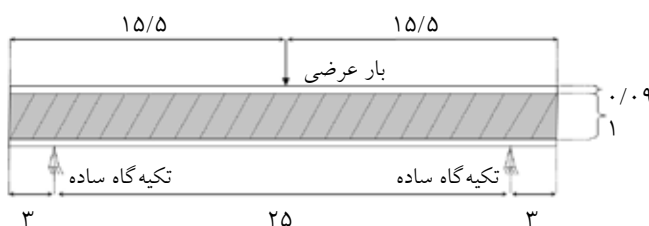
نتایج عددی دارند، از آزمون کشش انجام شده روی نمونه‌های کشش به‌دست آمده است. با توجه به اینکه نسبت سفتی خمشی به جرم نیز از نتایج بررسی شده است، بنابراین برای دادن مقدار صحیح چگالی پوسته‌های کامپوزیتی به نرم‌افزار، نمونه‌های استاندارد کشش، وزن شده و با داشتن حجم دقیق آنها مقدار نسبتاً دقیق چگالی کامپوزیت به‌کار رفته در نمونه‌ها به‌دست آمده است. ولی، مقدار نسبت پواسون و ثابت‌های کشسان برشی در جدول ۳ و حساسیت بسیار کمی در تعیین نتایج حاصل از حل اجزای محدود دارند، از مراجع مشابه آورده شده‌اند [۱۳]. با توجه به اینکه از پارچه‌های شیشه با نوع بافت ۰ و ۹۰° در پوسته‌های کامپوزیتی استفاده شده است، ثابت کشسان کششی در هر دو جهت ۰ و ۹۰° یکسان است. سه‌لایه کامپوزیتی با ضخامت ۰/۳ mm به ازای هر لایه برای رویه‌های بالایی و پایینی و نیز برای چندلایه کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته تعریف شده است. در ادامه، خواص اسفنج PVC به هسته اسفنجی مدل شده اختصاص داده می‌شود.

## نوع تحلیل و تماس‌ها

با توجه به اعمال بارگذاری با یک سرعت ثابت جابه‌جایی (5 mm/min) و نیز شبه‌ایستا بودن آن یک مرحله (Step) از نوع عمومی، ایستا و خطی تعریف شده است. در ادامه، برای اتصال بین هسته و رویه‌ها و نیز هسته اسفنجی با لایه کامپوزیتی موج‌دار و در نهایت اتصال رویه‌ها به لایه کامپوزیتی موج‌دار از قید Tie استفاده شده است. با اعمال این قید جابه‌جایی Partهای مختلف به یک اندازه خواهد بود.

## بارگذاری و شرایط مرزی

نمای از پهلوی بارگذاری و شرایط مرزی مطابق با استاندارد ASTM C393 در شکل ۶ نشان داده شده است. برای اعمال شرایط مرزی، با توجه به اینکه رویه‌های پایین نمونه‌ها دقیقاً در نقاط تماس با فک‌های پایین در شرایط تکیه‌گاه ساده هستند، همچنین با توجه به مدل‌کردن نیمی از نمونه‌ها، لبه‌ای از مدل که بارگذاری در آن انجام می‌شود، به شکل گیردار در نظر گرفته شده است. این نقاط



شکل ۶- نمای از پهلوی بارگذاری و شرایط مرزی.

توزیع آنها در مدل اجزای محدود، سعی شده است تا نتایجی دقیق‌تر به دست آید (دقت نتایج).

## نتایج و بحث

### نتایج آزمون خمش

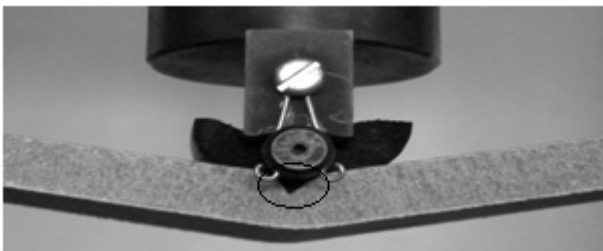
آزمون خمش سه نقطه‌ای مطابق با استاندارد ASTM C 3939 برای سه نمونه یکسان از هر حالت انجام شد. از آنجا که بیشترین تنش‌ها در ساختارهای ساندویچی زیر خمش در رویه‌های بالا و پایین رخ می‌دهد، رویه‌های کامپوزیتی نمونه‌های ساخته و بررسی شده در این پژوهش نیز بیشترین تنش‌های ایجاد شده را تحمل می‌کنند. این تنش‌ها که نوع محوری هستند، در رویه پایینی نوع کششی و در رویه بالایی نوع فشاری هستند. بنابراین، با توجه به اینکه استحکام فشاری کامپوزیت‌ها کمتر از استحکام کششی آنهاست، ابتدا رویه‌های بالایی دچار خرابی می‌شوند. این مطلب در **شکل ۸** به وضوح مشخص شده است.

نمودار نیرو برحسب جابه‌جایی برای هر سه نمونه در هر یک از چهار حالت بررسی شده به‌طور مستقیم از داده‌های تجربی حاصل از آزمون خمش نمونه‌ها به دست آمده است. سفتی خمشی مربوط به هر نمونه آزمون شده با استفاده از مقادیر نیرو در ناحیه کشسان و جابه‌جایی متناظر با آن به دست آمده است. با توجه به غالب بودن اثر خمش در نمونه‌های بلند نسبت به اثر برش، مقدار دقیق سفتی خمشی نمونه‌ها از معادله (۱) به دست می‌آید [۱۲]. در ادامه، این نمودارها برای هر حالت از نمونه‌ها بیان و بررسی شده است:

$$D = EI = \frac{PL^3}{48\delta} \quad (1)$$

### نمونه‌ها با هسته ساده

**شکل ۹** نمودار نیرو-جابه‌جایی را در نمونه ساده نشان می‌دهد. نمونه ساده نمونه‌ای است که در هسته آن هیچ تغییری ایجاد نشده و هسته



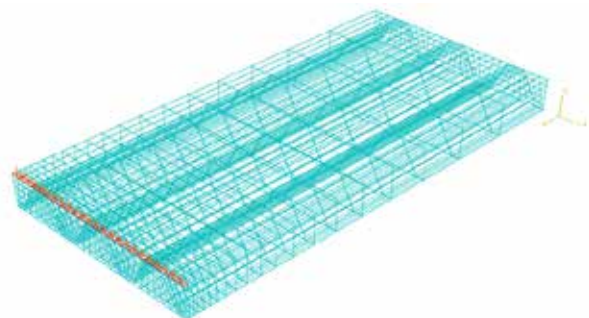
شکل ۸- شروع خرابی نمونه خمش از رویه بالایی.

از جابه‌جایی در راستاهای  $\alpha$ ،  $\gamma$  و  $z$  و نیز از چرخش حول این محورها منع شده‌اند. البته با توجه به حذف کردن نیمی از مدل به دلیل تقارن در لبه دیگر مدل صفحه تقارن نسبت به محور  $x$  تعریف شده است. همچنین، برای اعمال بارگذاری یک سطح کوچک به طول دقیقاً برابر با عرض نمونه‌ها (۶ cm) و عرض تقریباً برابر با سطح پایینی فک متحرک بالایی دستگاه کشش (تقریباً ۰/۵ mm) در رویه بالایی نمونه‌ها تعریف شده و بارگذاری به روش فشاری با توزیع یکنواخت روی این سطح و در Step ایستا و عمومی که از پیش تعریف شده بود، اعمال شده است.

البته با توجه به اینکه رفتار کلی سازه و نه رفتار سازه دقیقاً در محل بارگذاری مدنظر است، لزومی به تعریف دقیق این نوع بارگذاری در تحلیل اجزای محدود نیست و می‌توان به انواع دیگری نیز بار خمشی مدنظر را به لبه آزاد مدل اعمال کرد. به عنوان مثال، می‌توان با تعریف یک نقطه مرجع در لبه آزاد مدل و مرتبط کردن تمام گره‌های لبه آزاد به این نقطه مرجع، بار خمشی مدنظر را به شکل نیروی متمرکز معادل با گشتاور خمشی مدنظر به این نقطه مرجع اعمال کرد.

### شبکه بندی

برای شبکه‌بندی نمونه‌ها با توجه به تمرکز تنش در محل اعمال بار، اجزا در این محل بیشتر و ریزتر شده‌اند. این موضوع به وضوح در **شکل ۷** مشاهده می‌شود. برای رویه‌ها و چندلایه کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته با توجه به کوچک‌تر بودن نسبت ضخامت به عرض آنها از مقدار ۰/۰۵، از اجزای Shell S8R نوع استاندارد با میان‌یابی مرتبه دوم استفاده شده است. همچنین، برای اسفنج‌های PVC داخل هسته از اجزای 3DStress C3D8R نوع استاندارد با میان‌یابی خطی استفاده شده است. در نهایت، با تعریف یک Job، مدل ایجاد شده نهایی برای تحلیل به نرم‌افزار ارائه داده شد. پس از پایان تحلیل مدل با نرم‌افزار و مقایسه اولیه نتایج عددی با نتایج به دست آمده از آزمون‌های تجربی و مشاهده منطقی بودن نتایج عددی (صحت نتایج) با تغییر اندازه اجزای



شکل ۷- تراکم توزیع اجزا در نزدیکی نقاط اعمال بار.



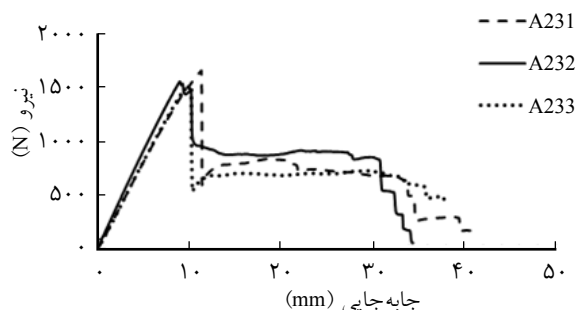
جدول ۴- نتایج تجربی آزمون خمش نمونه‌ها با هسته ساده.

نمونه	$P_m$ (N)	$\delta_m$ (mm)	M (g)	D ( $N \times m^2$ )	D/M ( $N \times m^2/g$ )
SS1	۶۳۵/۴	۹/۱۶	۶۱	۲۲/۵۸	۰/۳۷۰۱
SS2	۵۶۴/۹۴	۸/۷۴	۶۰	۲۱/۰۴	۰/۳۵۰۶
SS3	۵۳۹/۴	۶/۰۸	۶۲	۲۹/۴	۰/۴۷۴۱
میانگین انحراف معیار	۵۷۹/۹	۷/۹۹	۶۱	۲۴/۳۴	۰/۳۹۸۲
	۴۹/۷۱	۱/۶۷	۱	۴/۴۴	۰/۰۶۶۳۹

جابه‌جایی نشان داده شده در این شکل را می‌توان به سه ناحیه مجزا تقسیم‌بندی کرد:

I. ناحیه اول که نیرو به شکل خطی افزایش می‌یابد و نمونه رفتاری شبیه به ماده‌ای کشسان نشان می‌دهد. پس از این که نیرو در انتهای این ناحیه به بیشترین مقدار رسید، معمولاً شکست در رویه بالایی و در اثر تنش‌های فشاری رخ می‌دهد. چرا که در کامپوزیت‌ها به‌طور معمول استحکام فشاری کمتر از استحکام کششی است. سپس، نیرو به‌طور ناگهانی کاهش یافته و از مقدار تحمل بار نمونه به‌طور قابل ملاحظه‌ای کم می‌شود.

II. ناحیه دوم ناحیه‌ای است که نیرو پس از کاهش پیشین به مقدار کمی افزایش یافته و در ادامه تقریباً ثابت می‌ماند. در واقع پس از شکست رویه بالایی، دیگر باری به وسیله رویه بالایی تحمل نمی‌شود و بار وارد بر نمونه به هسته منتقل می‌شود. اما، با توجه به وجود چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار در داخل هسته، بخش‌های بالایی این چندلایه‌ای که در مجاورت رویه بالایی قرار دارد، خود نقش رویه‌ای جدید را برای هسته اسفنجی زیری خود ایفا می‌کند. بنابراین نمودار با خیزی دوباره مقداری بار



شکل ۱۰- نمودار نیرو-جابه‌جایی نمونه‌ها با هسته ترکیبی و هندسه مربعی.

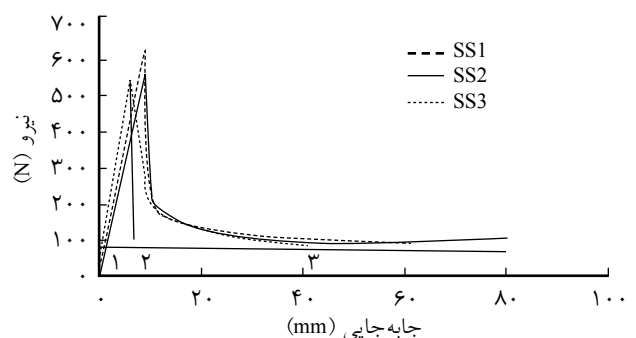
آن فقط از اسفنج PVC ساده تشکیل شده است. از این حالت مانند تمام حالت‌های دیگر سه عدد نمونه ساخته شده و با کدهای SS1، SS2 و SS3 نام‌گذاری شدند. در این شکل هر سه آزمون انجام شده روی این حالت یکجا نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۹ مشخص است، هر سه نمونه رفتار مشابهی را نشان می‌دهند. منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی نشان داده شده در این شکل را می‌توان به سه ناحیه مجزا تقسیم‌بندی کرد:

I. ناحیه اول مربوط به تغییر شکل کشسان نمونه است. نمونه در این ناحیه رفتار خطی و کشسان نشان می‌دهد.  
II. ناحیه دوم پس از کامل شدن تغییر شکل کشسان قطعه و شروع ناحیه خرابی آغاز می‌شود و نیرو به بیشترین مقدار می‌رسد. در این نقطه ترک‌هایی در قطعه به‌وجود آمده و شروع به رشد و پخش در قطعه می‌کنند که سبب شکست در نمونه و کاهش قابل توجه مقدار بار اعمال شده به نمونه می‌شوند و آن را تا حدود ۶۸/۵٪ کاهش می‌دهد.  
III. در این ناحیه تقریباً نیروهای وارد بر قطعه ثابت باقی می‌مانند. در این ناحیه ترک‌های ایجاد شده در کل قطعه منتشر می‌شوند و سبب تخریب کل نمونه می‌شوند.

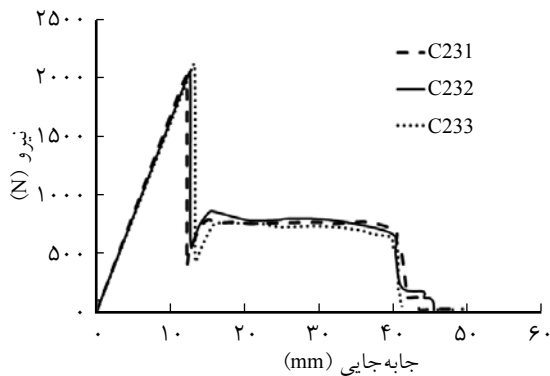
در جدول ۴ نتایج مربوط به آزمون خمش نمونه‌ها با هسته ساده آمده است.

### نمونه‌ها با هسته ترکیبی و هندسه مربعی

شکل ۱۰ نمودار نیرو-جابه‌جایی مربوط به آزمون خمش نمونه‌ها با هسته ترکیبی شامل اسفنج PVC و سه‌لایه کامپوزیت موج‌دار را با هندسه مربعی نشان می‌دهد. از این حالت مانند تمام حالت‌های دیگر سه عدد نمونه ساخته شده و با کدهای A231، A232 و A233 نام‌گذاری شده‌اند. در این شکل هر سه آزمون انجام شده روی این حالت یکجا نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۱۰ مشخص است، هر سه نمونه رفتار مشابهی نشان می‌دهند. منحنی‌های نیرو-



شکل ۹- نمودار نیرو-جابه‌جایی نمونه‌ها با هسته ساده.



شکل ۱۱ نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه‌ها با هسته ترکیبی و هندسه دوزنقه‌ای.

خمش سه نقطه‌ای برای این حالت آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزون بر سفتی خمشی، نسبت سفتی خمشی به جرم نیز در مقایسه با نمونه با هسته ساده افزایش داشته است. سفتی خمشی به‌طور میانگین به مقدار  $۱۳۴/۱\%$  و نسبت سفتی خمشی به جرم به‌طور میانگین  $۴۱/۸۳\%$  در این حالت در مقایسه با نمونه با هسته ساده افزایش داشته‌اند. علت کمتر بودن افزایش سفتی خمشی به وزن در مقایسه با سفتی خمشی، افزایش چگالی نمونه با افزودن سه‌لایه کامپوزیت شیشه-اپوکسی موج‌دار به هسته است.

#### نمونه‌ها با هسته ترکیبی و هندسه مثلثی

شکل ۱۲ نمودار نیرو-جاب‌جایی مربوط به این حالت را نشان می‌دهد. در این حالت سه‌لایه کامپوزیت موج‌دار با شکل هندسه مثلثی در داخل هسته اسفنجی تعبیه شده است. از این حالت مانند تمام حالت‌های دیگر سه عدد نمونه ساخته شده و با کدهای B231، B232 و B233 نام‌گذاری شده‌اند. در این شکل هر سه آزمون انجام

جدول ۶- نتایج خمش نمونه‌ها با هسته ترکیبی و هندسه دوزنقه‌ای.

D/M (N×m <sup>2</sup> /g)	D (N×m <sup>2</sup> )	M (g)	$\delta_m$ (mm)	$P_m$ (N)	نمونه
۰/۵۸۴۵	۵۷/۸۷	۹۹	۱۲/۱۶	۲۰۱۹	C231
۰/۵۷۶۰	۵۷/۰۳	۹۹	۱۲/۶۶	۲۰۵۳/۷	C232
۰/۵۳۳۹	۵۶/۰۶	۱۰۵	۱۳/۲۵	۲۱۱۷/۲	C233
۰/۵۶۴۸	۵۶/۹۸	۱۰۱	۱۲/۶۹	۲۰۶۳/۵	میانگین
۰/۰۲۷۰۹	۰/۹	۳/۴۶	۰/۵۴۵	۴۹/۷۶	انحراف معیار

تحمل کرده، تا زمانی که این رویه نیز دچار شکست شود. III. با ادامه بارگذاری پس از شکست بخش‌های بالایی لایه کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته بار به هسته و در ادامه به بخش پایینی لایه کامپوزیتی موج‌دار و در نهایت به رویه پایینی منتقل می‌شود. هسته در اثر فشار و پوسته پایینی در اثر کشش تخریب شده و باربرداری نمونه به سمت مقدار صفر میل می‌کند. در جدول ۵ نتایج تجربی به‌دست آمده از آزمون خمش نمونه‌ها با هسته ترکیبی شامل اسفنج PVC و سه‌لایه کامپوزیت موج‌دار از جنس شیشه-اپوکسی با هندسه مربعی آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزون بر سفتی خمشی، نسبت سفتی خمشی به جرم نیز در مقایسه با نمونه با هسته ساده افزایش داشته است. سفتی خمشی به‌طور میانگین به مقدار  $۱۲۲/۸۸\%$  و نسبت سفتی خمشی به جرم به‌طور میانگین  $۲۸\%$  در این حالت در مقایسه با نمونه با هسته ساده افزایش داشته‌اند. علت کم‌تر بودن افزایش نسبت سفتی خمشی به وزن در مقایسه با سفتی خمشی، افزایش چگالی نمونه با افزودن سه‌لایه کامپوزیت شیشه-اپوکسی موج‌دار به هسته است.

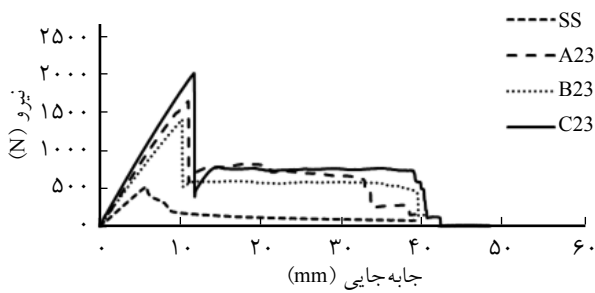
#### نمونه‌ها با هسته ترکیبی و هندسه دوزنقه‌ای

شکل ۱۱ نمودار نیرو-جاب‌جایی مربوط به این حالت را نشان می‌دهد. در این حالت سه‌لایه کامپوزیت موج‌دار با شکل هندسه دوزنقه‌ای در داخل هسته اسفنجی تعبیه شده است. از این حالت مانند تمام حالت‌های دیگر سه عدد نمونه ساخته شده و با کدهای C231، C232 و C233 نام‌گذاری شده‌اند. در این شکل هر سه آزمون انجام شده روی این حالت یکجا نشان داده شده است.

همان‌طور که از شکل ۱۱ مشخص است، هر سه نمونه رفتار مشابه با یکدیگر و رفتار کلی شبیه به رفتار نمونه‌هایی با هسته ترکیبی و هندسه مربعی نشان می‌دهند. در جدول ۶ نتایج مربوط به آزمون

جدول ۵- نتایج خمش نمونه‌ها با هسته ترکیبی و هندسه مربعی.

D/M (N×m <sup>2</sup> /g)	D (N×m <sup>2</sup> )	M (g)	$\delta_m$ (mm)	$P_m$ (N)	نمونه
۰/۴۷۹۹	۵۱/۳۵	۱۰۷	۱۱/۴۱	۱۶۴۷/۱۴	A231
۰/۵۳۲۴	۵۹/۱	۱۱۱	۹	۱۵۴۴/۶۵	A232
۰/۵۱۸۰	۵۲/۳۲	۱۰۱	۱۰/۱۶	۱۵۰۵/۵۶	A233
۰/۵۱۰۱	۵۴/۲۵	۱۰۴	۱۰/۱۹	۱۵۶۵/۷۸	میانگین
۰/۰۲۷۱۲	۴/۲۲	۵/۰۳	۱/۲	۷۳/۱۱	انحراف معیار



شکل ۱۳ نمودارهای نیرو-جاب‌جایی مقایسه‌ای نمونه‌ها.

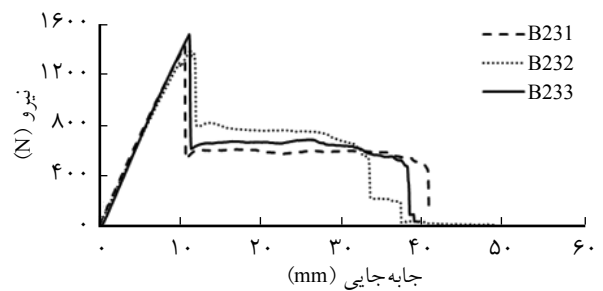
برافزایش شیب نمودار در ناحیه کشسان که نشان‌دهنده افزایش سفتی خمشی نمونه است، بیشترین مقدار بار خمشی تحمل شده به وسیله نمونه و نیز جاب‌جایی متناظر با آن، نسبت به نمونه با هسته ساده افزایش داشته‌اند.

همچنین مشاهده می‌شود، با تغییر شکل هندسی چندلایه کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته از مثالی به مربعی و سپس به دوزنقه‌ای مقدار افزایش در بیشترین بار تحملی به وسیله نمونه و جاب‌جایی متناظر با آن و نیز شیب ناحیه کشسانی بیشتر می‌شود. با توجه با مقادیر جدول‌های ۴ تا ۷ بیشترین مقدار بار خمشی تحملی به وسیله نمونه و جاب‌جایی متناظر با آن مربوط به نمونه با هندسه دوزنقه‌ای برای چندلایه کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته بوده که به ترتیب برابر با ۲۵۵/۸۲ و ۵۸/۸۲٪ است. کمترین مقدار افزایش بار خمشی تحملی مربوط به نمونه با هندسه مثلی به مقدار ۱۴۸/۰۷٪ و کمترین مقدار افزایش جاب‌جایی متناظر با بیشترین نیروی تحملی مربوط به نمونه با هندسه مربعی به مقدار ۲۷/۵۳٪ است. همچنین، بیشترین افزایش سفتی خمشی نیز مربوط به نمونه با هندسه دوزنقه‌ای برای چندلایه کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته بوده که برابر با ۱۳۴/۱٪ است. کمترین مقدار افزایش سفتی خمشی نیز مربوط به نمونه با هندسه مثلی به مقدار ۸۳/۱۵٪ است.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول‌های ۴ تا ۷، در همه حالت‌ها با هسته ترکیبی، نسبت سفتی خمشی به وزن نیز در مقایسه با نمونه دارای هسته ساده اسفنجی افزایش داشته است. بیشترین افزایش مربوط به نمونه با هندسه دوزنقه‌ای برای چندلایه کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته به مقدار ۴۱/۸۳٪ است. کمترین افزایش نیز مربوط به نمونه با هندسه مثلی برای چندلایه کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته و به مقدار ۲۱/۳۷٪ است.

### نتایج تحلیل عددی

در این بخش، نتایج حاصل از حل عددی نرم‌افزار Abaqus شامل



شکل ۱۲ نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه‌ها با هسته ترکیبی و هندسه مثلی.

شده روی این حالت یکجا نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۱۲ مشخص است، هر سه نمونه رفتار مشابه با یکدیگر و رفتار کلی شبیه به رفتار نمونه‌هایی را با هسته ترکیبی و هندسه‌های مربعی و دوزنقه‌ای نشان می‌دهند. در جدول ۷ نتایج مربوط به آزمون خمش سه‌نقطه‌ای برای این حالت آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزون بر سفتی خمشی، نسبت سفتی خمشی به جرم نیز در مقایسه با نمونه با هسته ساده افزایش داشته است. سفتی خمشی به‌طور میانگین به مقدار ۸۳/۱۵٪ و نسبت سفتی خمشی به جرم به‌طور میانگین ۲۱/۳۷٪ در این حالت در مقایسه با نمونه با هسته ساده افزایش داشته‌اند. علت کم‌تر بودن افزایش نسبت سفتی خمشی به وزن در مقایسه با سفتی خمشی، افزایش چگالی نمونه با افزودن سه‌لایه کامپوزیت شیشه-اپوکسی موج‌دار به هسته است.

### مقایسه نتایج

در شکل ۱۳ نمودارهای نیرو برحسب جاب‌جایی حاصل از آزمون تجربی نمونه‌ها با هسته ساده و هسته ترکیبی به‌طور مقایسه‌ای آورده شده است. مشاهده می‌شود، برای همه نمونه‌ها با هسته ترکیبی افزون

جدول ۷- نتایج خمش نمونه‌ها با هسته ترکیبی با هندسه مثلی.

D/M (N×m <sup>2</sup> /g)	D (N×m <sup>2</sup> )	M (g)	$\delta_m$ (mm)	$P_m$ (N)	نمونه
۰/۵۰۹۱	۴۵/۸۲	۹۰	۱۰/۶۶	۱۴۲۲/۱	B231
۰/۴۸	۴۳/۶۸	۹۱	۱۱/۳۳	۱۳۸۷/۳۳	B232
۰/۴۶۰۸	۴۴/۲۴	۹۶	۱۱/۱۶	۱۵۰۶/۵۵	B233
۰/۴۸۳۳	۴۴/۵۸	۹۲/۳۳	۱۱/۰۵	۱۴۳۸/۶۶	میانگین
۰/۰۲۴۳۱	۱/۱	۳/۲۱	۰/۳۴۸	۶۱/۳۱	انحراف معیار

جدول ۸- نتایج عددی و مقایسه آن با نتایج تجربی.

کد نمونه	M (g)	D (Nm <sup>2</sup> )	D/M (Nm <sup>2</sup> /gr)
SS	۶۱/۲ (۰/۳۲)	۲۵/۳۸ (۴/۱۸)	۰/۴۱۴۷ (۴/۰۵)
A23	۱۱۰/۶ (۳/۹)	۵۷/۷۶ (۶/۲۶)	۰/۵۲۲۲ (۲/۳۴)
C23	۱۰۱/۲ (۰/۱۹)	۵۳/۳۵ (۶/۵۸)	۰/۵۲۷۱ (۶/۸۹)
B23	۹۶/۲ (۲/۱)	۴۶/۹۷ (۵/۲۲)	۰/۴۸۸۲ (۱/۱)

اعداد داخل پرانتز درصد خطای مقادیر را نشان می‌دهند.

نسبت سفتی خمشی به وزن نیز افزایش داشته است. با افزودن یک چندلایه کامپوزیتی موج‌دار با هندسه‌های مربعی، دوزنقه‌ای و مثلثی به هسته اسفنجی ساختار ساندویچی، افزون بر افزایش خواص خمشی، بر وزن ساختار آن نیز افزوده می‌شود. بنابراین عامل مهم‌تر از سفتی خمشی، نسبت سفتی خمشی به وزن است. با توجه به یکسان بودن حجم همه نمونه‌ها، عامل نسبت سفتی خمشی به جرم مدنظر قرار گرفته است. مقایسه بین نتایج نشان داد، در همه حالت‌ها این نسبت افزایش داشته است. بیشترین افزایش مربوط به هندسه دوزنقه‌ای و کمترین مقدار مربوط به هندسه مثلثی است.

### اختصارات

B عرض کل نمونه خمش (m)

D سفتی خمشی (Nm<sup>2</sup>)

D ضخامت کل نمونه خمش (m)

E ثابت کشسان کششی (Pa)

G ثابت کشسان برشی (Pa)

I گشتاور اینرسی سطح (m<sup>4</sup>)

L طول کل نمونه خمش (m)

M جرم کل نمونه خمش (kg)

P بار خمشی (N)

tc ضخامت هسته در نمونه خمش (m)

ts ضخامت رویه در نمونه خمش (m)

t<sub>x</sub> ضخامت چندلایه کامپوزیتی موج‌دار (m)

v نسبت پواسون

ρ چگالی (kg/m<sup>3</sup>)

λ گام چندلایه کامپوزیتی موج‌دار (m)

Δ جابه‌جایی عرضی نمونه در محل بارگذاری (m)

سفتی خمشی و نسبت سفتی خمشی به جرم مربوط به هر حالت ارائه شده است. با به‌دست آوردن بیشترین مقدار جابه‌جایی متناظر با بار وارد شده که به‌طور دقیق در محل اعمال بارگذاری رخ می‌دهد، سفتی خمشی هر یک از حالت‌ها از معادله (۱) به‌دست آمده است. همچنین، با داشتن چگالی مواد به‌کار رفته در نمونه‌ها و ابعاد دقیق هر بخش از نمونه، مقدار دقیق جرم محاسبه شده با نرم‌افزار به‌دست آمده است. با داشتن مقدار جرم هر نمونه می‌توان نسبت سفتی خمشی به جرم آن را نیز به‌دست آورد. این مقادیر و مقدار اختلاف آنها با نتایج تجربی در **جدول ۸** آمده است. مقدار خطا از ۰/۱۹٪ مربوط به سفتی خمشی حالت C23 تا ۶/۸۹٪ مربوط به سفتی خمشی به وزن همین حالت، تغییر می‌کند که نشان‌دهنده تطابق قابل قبول با نتایج تجربی است.

### نتیجه‌گیری

اثر افزودن یک سه‌لایه کامپوزیتی موج‌دار از جنس شیشه-اپوکسی با گام ۲ cm و سه هندسه مربعی، دوزنقه‌ای و مثلثی به هسته اسفنجی ساختار ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی از جنس شیشه-اپوکسی، در رفتار خمشی این نوع سازه‌های ساندویچی بررسی شده است. مشاهده شد، در همه حالت‌ها با هر یک از هندسه‌های انتخابی برای چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته، افزون بر سفتی خمشی،

### مراجع

- Halimi F., Golzar M., and Beheshty M.H., Core Modification of Sandwich Panels Fabricated by Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding, *J. Compos. Mater.*, 2012.
- Rahmani R., *Flexural Behavior Investigation of Sandwich Structures with Composite Skins and Corrugated Composite and Foam Core*, MSc Thesis, Tarbiat Modares University, Iran, October 2012.
- Halimi F., *Effect of Distribution Media on Mold Filling and*

- Quality of the Final Part in a Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*, MSc Thesis, Tarbiat Modares University, Iran, August 2011.
4. Rahmani R., Rahimi G.H., and Ghabezi P., Effective Flexural Stiffness of a New Type Sandwich Panel with Composite Skins and Corrugated Composite-Foam Core Under Transverse Loading, *The International Conference on Experimental Solid Mechanics and Dynamics (X-Mech-2012)*, Iran University of Science and Technology, Iran, 6-7 March, 2012.
  5. Nemati S., Eskandarijam J., and Beheshty M.H., Effect of Density of Middle Layer of Hard Polyurethane Foam on Flexural Properties of Sandwich Walls with Glass-Epoxy Skins, *Iran. J. Polym. Sci. Technol (Persian)*, **1**, 3-16, 2010.
  6. Fang Hai, Liu Weiqing, Lu Weidong, Li Wan, Flexural Properties of Grooved Perforation Sandwich Composite, *J. Wuhan University of Technology*, **25**, 583-587, 2010.
  7. Russo A. and Zuccarello B., Experimental and Numerical Evaluation of the Mechanical Behavior of GFRP Sandwich Panels, *Compos. Struct.*, **81**, 575-586, 2007.
  8. Belingardi G., Cavatorta M.P., and Duella R., Material Characterization of a Composite-Foam Sandwich for the Front Structure of a High Speed Train, *Compos. Struct.*, **61**, 13-25, 2003.
  9. Mohammadi A.A., *Experimental and Numerical Analysis Buckling Behavior of Sandwich Structures with Composite Skins and Corrugated-Composite Foam Core*, MSc Thesis, Tarbiat Modares University, Iran, Summer 2014.
  10. Rahimi G.H. and Rahmani R., Pitch Effect on Flexural Behavior of Sandwich Structure with Composite Skins and a Corrugated Combinatorial Core with Trapezoidal Geometry, *Modares Mechan. Eng.*, **14**, 194-202, 2014.
  11. Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions, Annual Book of ASTM Standard, C 393, 2002.
  12. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Annual Book of ASTM standard, D3039M, 2002.
  13. KawA.K., *Mechanics of Composite Materials*, 2nd ed., Taylor and Francis, New York, Chapt. 3, 2006.