



اثر گام بر رفتار خمشی ساختارهای ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی و هسته‌ی ترکیبی موج‌دار با هندسه‌ی دوزنقه‌ای

غلامحسین رحیمی^{۱*}، رحمت‌الله رحمانی^۲

۱- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

*rahimi_gh@modares.ac.ir، ۱۴۱۱۵۱۴۳، صندوق پستی

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۲ مهر ۱۳۹۲

پذیرش: ۲۰ دی ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۱۴ تیر ۱۳۹۳

کلید واژگان:

ساختارهای ساندویچی

هسته‌ی موج‌دار

رویه‌های کامپوزیتی

اثر گام

رفتار خمشی

چکیده

در این مقاله مطالعه تجربی و عددی بر روی رفتار خمشی نوع جدیدی از ساختارهای ساندویچی با رویه‌هایی از جنس شیشه-اپوکسی و هسته‌ای ترکیبی از فوم و کامپوزیت موج‌دار با هندسه‌ی دوزنقه‌ای انجام شده است. پس از ساخت نمونه‌ها با استفاده از تکنیک انتقال رزین به کمک خلأ، نمونه‌ها بر طبق استاندارد تحت آزمایش قرار گرفته و نمودارهای نیرو-جابجایی مربوط به هر کدام بدست آمد. حل المان محدود برای مشخص کردن بیش‌ترین جابه‌جایی در نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شد. در حل تجربی، سه سری نمونه با هسته‌های ترکیبی و سه گام مختلف در کامپوزیت موج‌دار با هندسه‌ی دوزنقه‌ای تعبیه شده در هسته‌ای فومی و یک سری نمونه با هسته‌ی ساده‌ی فومی ساخته شد. به منظور صحت‌سنجی تجربی مسئله، از هر حالت سه نمونه‌ی یکسان ساخته شد و از میانگین داده‌ها در نتایج استفاده شد. نشان داده شد که سفتی خمشی با کاهش گام کامپوزیت موج‌دار داخل هسته، افزایش می‌یابد، اما نسبت سفتی خمشی به جرم با کاهش گام، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در نهایت نتایج تجربی و عددی با هم مقایسه شدند که تطابق قابل قبولی بین این دو مشاهده شد.

Pitch effect on flexural behavior of sandwich structure with composite skins and a corrugated combinatorial core with trapezoidal geometry

Gholam Hossein Rahimi*, Rahmat Rahmani

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

*P.O.B. 14115143 Tehran, rahimi_gh@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 04 October 2013
Accepted 10 January 2014
Available Online 05 July 2014

Keywords:
Sandwich Structures
Corrugated Core
Composite Skins
Pitch Effect
Flexural Behavior

ABSTRACT

In this paper the experimental and numerical study on flexural behavior of new type sandwich structures with glass-epoxy skins and a combinatorial core consist of foam and corrugated composite with trapezoidal geometry was investigated. After sample production by vacuum assisted resin transform molding technique; samples were tested according to standard and then the related load-deflection curves were obtained. Finite element analysis was applied for determining maximum deflection of samples by ABAQUS software. In experimental three series of samples with combinatorial core and three different pitch for trapezoidal corrugated composite in a foam core and one series of sample with simple foam core; have been product. In order to experimental accuracy of problem; three same samples have been product in each case and the average data have been used for results. It has been shown that the flexural stiffness was increased with decreasing in pitch; and the flexural stiffness to mass ratio was increased at first but then was decreased with decreasing in pitch. Finally the experimental and numerical results were compared and a reasonable agreement between them has been observed.

۱- مقدمه

می‌شوند. جنس رویه‌ها و هسته می‌تواند از مواد مختلفی انتخاب شود. به عنوان نمونه برای رویه‌ها می‌توان از چوب، آلومینیوم، پلاستیک و یا کامپوزیت استفاده کرد که امروزه مورد آخر به دلیل مزایای ویژه‌ای از قبیل نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت در برابر خوردگی کاربرد بیشتری دارد. برای هسته نیز می‌توان از چوب، انواع فوم‌ها، هسته‌های موج‌دار و اشکال مختلف لانه‌نبوری استفاده کرد که هر یک مزایا و معایب مخصوص به خود را دارند، به عنوان مثال چوب بالسا یک هسته‌ی سبک با استحکام بالاست، اما اگر در

ساختارهای ساندویچی نوعی از ساختارهای ترکیبی هستند که شامل دو رویه‌ی نازک اما قوی و با خواص مکانیکی خوب و هسته‌ای نسبتاً ضعیف‌تر و با چگالی کمتر ولی ضخیم‌تر از رویه‌ها در میان آن‌ها، می‌باشند. چنین سازه‌ای مزایایی از قبیل نسبت سفتی خمشی و یا استحکام خمشی به وزن بالا را فراهم می‌آورد. ساختارهای ساندویچی با توجه به نوع و جنس رویه‌ها و هسته و همچنین نحوه اتصال بین این دو، به انواع مختلف تقسیم بندی

Please cite this article using:

Gh.H. Rahimi, R. Rahmani, Pitch effect on flexural behavior of sandwich structure with composite skins and a corrugated combinatorial core with trapezoidal geometry, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 5, pp. 194-202, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

سازه بر اثر کشش در رویه اتفاق می‌افتد تئوری‌ها در حدود ۱۵٪ خطا دارند و وقتی شکست سازه بر اثر برش در هسته اتفاق بیفتد، خطای برآورد شده توسط این تئوری‌ها افزایش داشته و به حدود ۱۰۰٪ برای محاسبه استحکام می‌رسد [۴].

نیاز و لیاقت در سال ۲۰۰۸ مسئله‌ی ضربه با سرعت کم بر روی یک پانل ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی از جنس شیشه-پوکسی و هسته‌ی لانه‌زنبوری از جنس آلومینیوم را مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی مسئله‌ی ضربه به دو روش تحلیلی و عددی مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج این دو روش با نتایج آزمون‌های تجربی مقایسه شده است. در قسمت تحلیلی یک مدل اصلاح شده و روش‌های تحلیلی برای پیش‌بینی رفتار پانل‌های ساندویچی در حین اعمال ضربه با سرعت کم بر پایه حل استاتیکی برای دو حالت تکیه‌گاه صلب و گیردار ارائه شده است. سپس با در نظر گرفتن اثر نرخ کرنش در خواص مکانیکی، مدل برای حل تحلیل دینامیکی اصلاح گردید. در قسمت عددی مسئله‌ی ضربه به طور کامل در نرم‌افزار انسیس مدل‌سازی شده و مورد تحلیل قرار گرفته است. با انجام آزمایش‌های تجربی اثر پارامترهای مختلف نظیر انرژی ضربه زننده، شرایط تکیه‌گاهی، ضخامت رویه‌های کامپوزیتی و شکل ضربه‌زننده در تخریب ایجاد شده در هنگام ضربه مورد بررسی قرار گرفت. منحنی‌های نیرو-زمان دو مدل تحلیلی و عددی در چندین حالت مختلف با نتایج تجربی مقایسه شده و کاربرد این دو مدل مورد ارزیابی قرار گرفت [۵]. ایسلام و آروینتان در سال ۲۰۱۰ در یک تحقیق یک نوآوری در پانل‌های ساندویچی با پوسته‌هایی از شیشه-پلیمر و هسته‌ای از فنولیک اصلاح شده برای کاربردهای ساختمانی و دیگر سازه‌ها ایجاد کردند. رفتار این نوع پانل‌ها به گونه‌ای مورد بررسی قرار گرفت که بتوان اثرات مربوط به خطای نصب را نیز ارزیابی کرد. پانل‌هایی با دو و چهار لبه‌ی ساپورت شده و همچنین با جهت الیاف متفاوت و با وجود یک سیستم تثبیت بین پانل و پایه‌ی تیر آهنی، تحت اثر بارگذاری متمرکز و گسترده‌ی یکنواخت مورد آزمایش قرار گرفتند تا استحکام و مکانیزم شکست و خرابی آن‌ها مشخص شود. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که این پانل‌ها تحت هر دو شرایط بارگذاری رفتاری مشابه از خود نشان می‌دهند. علاوه بر این متوجه شدند که سیستم تثبیت، اثر قابل توجهی روی تغییر شکل و مد خرابی ندارد [۶].

حلیمی و همکاران در سال ۲۰۱۱ امکان ساخت قطعات ساندویچی با هسته‌ای از جنس فوم PVC و رویه‌هایی از جنس شیشه-پوکسی را با استفاده از تکنیک VARTM مورد مطالعه قرار دادند. ایشان برای بررسی و بهینه‌سازی ساخت سازه‌های ساندویچی با استفاده از روش VARTM متغیرهای: استفاده از الیاف با نفوذپذیری بالا، ایجاد الگوهای مختلف تکرار سوراخ بر روی هسته و ایجاد انواع مختلف شیار بر سطح پایینی هسته‌ی فومی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها تأثیر سوراخ‌ها و شیارهای ایجاد شده در هسته بر نحوه‌ی جریان رزین، زمان تولید، وزن نهایی قطعه، خواص مکانیکی و استحکام چسبندگی رویه به هسته را بررسی کردند. نتایج نشان داد که در حالت‌هایی که بر روی هسته سوراخ‌ها و شیارها با الگوهای مختلف ایجاد گردید، قطعه‌ی سالمتری تولید شد ولی در حالتی که از الیاف با نفوذپذیری بالا استفاده شد، قطعه‌ی سالمتری تولید نشد. الگوهای ایجاد شده در بیش‌ترین حالت سبب افزایش ۸٪ وزن قطعه شدند. این در حالی است که زمان تولید قطعات در حدود ۴۰٪ کاهش یافته و نیروی بیشینه در خمش در حدود ۳۸٪ افزایش می‌یابد. نتایج آزمون چسبندگی رویه به هسته نشان داد که شیارها و سوراخ‌های ایجاد شده تأثیر زیادی بر استحکام چسبندگی رویه به هسته ندارند و سبب افزایش اندک در بیش‌ترین نیروی لازم برای رشد ترک می‌گردند و تنها به صورت

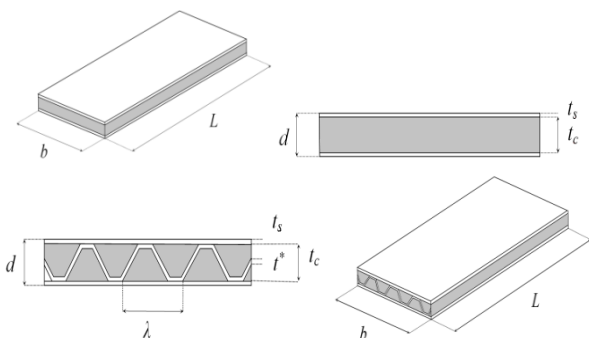
معرض رطوبت قرار گیرد دچار پوسیدگی و خرابی می‌شود. هسته‌ی فومی به سختی چوب بالسا نیست ولی در برابر رطوبت مقاوم و نفوذناپذیر است و همچنین ویژگی عایق بودن را داراست. هسته‌های هانی‌کمب نیز بسیار قوی و سخت هستند، اما گران‌قیمت هستند و نحوه‌ی اتصال آن به رویه‌ها مشکل و نیازمند مهارت‌های خاصی است.

در سال ۱۸۳۰ میلادی نخستین تیرهای ساندویچی که از ورق‌های آهنی که به دو طرف یک هسته‌ی چوبی متصل شده بودند، به منظور کاهش وزن در لکوموتیوهای برادران استفنسون استفاده شده و موفقیت اقتصادی چشم‌گیری را برایشان به ارمغان آورد. اما استفاده وسیع از سازه‌های ساندویچی به جنگ جهانی دوم برمی‌گردد که نخستین بار در هواپیمای موسکویت استفاده شد. به طوری که رویه‌ها از جنس چوب چندلا و هسته از چوب بالسا ساخته شده بود. در سال ۱۹۱۵ هاگو جانکر یک ساختار هانی‌کمب را با استفاده از دو ورق فولادی که به دو طرف یک شبکه سلولی شش ضلعی متصل بودند را برای استفاده در هواپیماها ارائه داد که در سال ۱۹۱۹ برای نخستین بار در هواپیمای جنگنده F-13 آلمانی استفاده شد [۱]. بویل و همکاران در سال ۲۰۰۱ در یک تحقیق پانل‌های ساندویچی ارتوتروپیک با الیاف تقویت شده‌ی پلاستیک، تحت بار فشاری غیرمحموری برای کماتش را مورد آزمایش قرار دادند. پانل‌هایی با هسته‌ی فوم PVC^۱ خطی و بالسا در دو اندازه با نسبت منطری به ترتیب ۲ و ۱/۳، با تکنیک VARTM^۲ ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند. دو لبه‌ی کوتاه‌تر پانل‌ها گیردار شده و دو لبه‌ی بزرگ‌تر روی تکیه‌گاه ساده قرار داده شدند. بارگذاری الاستیک کماتش پانل‌ها با نسبت منطری ۱/۳ برای پانل با هسته‌ی بالسا، ۴۰۰ کیلونیوتن و برای پانل با هسته‌ی فوم ۲۶۷ کیلونیوتن است. این بارگذاری برای نسبت منطری ۲ برای پانل‌هایی با هسته‌ی بالسا و فوم به ترتیب ۳۳۴ و ۲۴۰ کیلونیوتن است. نتایج آزمایشگاهی برای پانل‌هایی با هسته‌ی بالسا برای هر دو اندازه در حدود ۵٪ تا ۸٪ با نتایج تحلیلی و عددی متفاوت بود. درحالی‌که این تفاوت برای پانل با هسته‌ی فوم بین ۱۵٪ تا ۲۳٪ بود. بارگذاری مربوط به فروریختن پانل ساندویچی پس از کماتش با هسته‌ی بالسا و فوم و با نسبت منطری ۱/۳، به ترتیب ۶۹۴ و ۳۴۷ کیلونیوتن بود. درحالی‌که با نسبت منطری ۱/۲ این مقادیر به ترتیب ۵۹۲ و ۳۳۴ کیلونیوتن بود. تحلیل عددی پس از کماتش به خوبی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت داشت [۲].

گوپتا و همکاران در سال ۲۰۰۲ رفتار سازه‌های کامپوزیتی ساندویچی را در بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای مطالعه نمودند. آن‌ها در آزمایش‌های خود از دو نسبت ۱۶ به ۱ و ۵ به ۱ (نسبت طول دهانه به ضخامت نمونه) برای نمونه‌ها استفاده نمودند و گزارش کردند، برای قطعات با نسبت ۱۶ به ۱ تنش‌های خمشی ۳۰٪ بیشتر و تنش‌های برشی ۵۰٪ کمتر از نمونه‌های با نسبت ۵ به ۱ است. همچنین بیان کردند در نمونه‌های با نسبت ۱۶ به ۱ شکست سازه به علت شکست رویه و پس از آن شکست هسته بر اثر فشار اتفاق می‌افتد و برای نسبت ۵ به ۱ شکست در اثر برش در هسته و تسلیم شدن هسته اتفاق می‌افتد [۳]. روسو و زوکارلو در سال ۲۰۰۷ رفتار مکانیکی و مکانیزم‌های شکست دو نوع از سازه‌های ساندویچی را به صورت تجربی و عددی در بارگذاری مختلف مطالعه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که هر دو نوع سازه تحت بارگذاری‌های کششی، فشاری و برشی، رفتار متفاوت غیر خطی از خود نشان می‌دهند. همچنین مقایسه‌ی نتایج تجربی با تئوری نشان داد که این تئوری‌ها از دقت کافی برخوردار نمی‌باشند، به ویژه وقتی شکست

1- Poly Vinyl Chloride

2- Vacuum Assisted Resin Transfer Molding



شکل ۱ شماتیکی از دو نمونه با هسته‌های ساده و ترکیبی و سطح مقطع‌های مربوط

جدول ۱ خواص فوم بکار رفته در هسته‌ی نمونه‌ها [۸]

PVC	(MPa) E	(MPa) G	ν	(kg/m ³) ρ
C7075	۶۶	۳۰	۰/۳	۸۰

جدول ۲ ابعاد انتخابی برای کمیت‌های تعریف شده در نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM

کمیت	مقدار (سانتیمتر)
l	۳۱
b	۶
d	۱/۱۸
t_c	۱
t_s	۰/۰۹
t^*	۰/۰۹
λ	۳ و ۲ و ۱

در استاندارد آورده شده در بالا دو نوع نمونه تعریف می‌شود، یکی نمونه‌ی کوتاه و دیگری نمونه‌ی بلند؛ که در نمونه‌های کوتاه اثر برش و در نمونه‌های بلند اثر خمش غالب است. با توجه به ابعاد انتخابی در اینجا، نمونه‌ها از نوع بلند می‌باشند. با مشخص شدن ابعاد و هندسه‌ی نمونه‌ها به ساخت نمونه‌ها پرداخته شد. در این تحقیق در مجموع چهار حالت نمونه‌ی ساندویچی ساخته شده است. یک حالت نمونه‌ای با هسته‌ای ساده از جنس فوم PVC که با کد SS مشخص می‌شوند و سه حالت دیگر نمونه‌هایی با هسته‌هایی ترکیبی متشکل از فوم PVC و یک چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار با هندسه‌ی دوزنقه‌ای با سه گام مختلف که در اینجا ۱، ۲ و ۳ سانتیمتر انتخاب شده است و به ترتیب با کدهای C1، C2 و C3 مشخص می‌شوند. برای ساخت نمونه‌ها ابتدا هسته‌ها آماده می‌شوند. برای هسته‌ی مربوط به نمونه‌ی ساده، تنها باید فوم PVC در ابعاد انتخابی گفته شده در بالا برش داده شود. اما برای نمونه‌هایی با هسته‌ی ترکیبی بایستی یک چندلایه‌ای کامپوزیتی با هندسه‌ی دوزنقه‌ای و با سه گام متفاوت، در داخل هسته‌ی فومی تعبیه شود؛ که این کار با برش فوم PVC به شکل قطاع‌های دوزنقه‌ای با سه گام مورد نظر و تعبیه کردن چندلایه‌ای کامپوزیتی در داخل آن به روش لایه‌چینی دستی صورت می‌گیرد. در اینجا تعداد ۳ لایه از جنس پارچه شیشه-اپوکسی که در رویه‌ها نیز استفاده شده است، برای ایجاد این چندلایه‌ای کامپوزیتی دوزنقه‌ای در داخل هسته‌های ترکیبی استفاده شده است.

پس از آماده شدن هسته‌ها، رویه‌ها که متشکل از سه لایه پارچه شیشه-اپوکسی است، به روش VARTM به هسته‌های ساده و ترکیبی متصل شده‌اند. در این تحقیق با توجه به پیشنهاد استاندارد و به منظور صحت‌سنجی تجربی داده‌ها و کاهش خطای ناشی از ساخت، از هر حالت سه نمونه‌ی یکسان ساخته و از میانگین داده‌های تجربی برای بدست آوردن نتایجی همچون سفتی خمشی و نسبت سفتی خمشی به جرم استفاده شده است. همچنین

محلی از رشد ترک پیشگیری می‌کنند [۷].

در مقاله‌ی حاضر علاوه بر سفتی خمشی، نسبت سفتی خمشی به وزن نوع جدیدی از ساختارهای ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی از جنس شیشه-اپوکسی و هسته‌ی ترکیبی متشکل از فوم و یک چندلایه‌ای کامپوزیتی از جنس رویه‌ها و با هندسه‌ی دوزنقه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این با تغییر گام چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار در داخل هسته به بررسی اثر این پارامتر در رفتار خمشی این نوع سازه‌های ساندویچی پرداخته شده است. برای مقایسه نمونه‌ها علاوه بر نمونه‌هایی با هسته‌ی ترکیبی، یک سری نمونه با هسته‌ی ساده‌ی فومی نیز ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. حل المان محدود مسئله به عنوان روشی دیگر برای مشخص کردن بیش‌ترین جابه‌جایی در راستای بارگذاری، سفتی خمشی و نسبت سفتی خمشی به وزن نمونه‌ها، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شد. در پایان نتایج تجربی و عددی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۲- تحلیل تجربی

۲-۱- مواد مصرفی

از فوم PVC با رنگ سبز ساخت شرکت سیکامین فرانسه با کد C7075، با چگالی ۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ضخامت ۱۰ میلی‌متر در هسته‌ی نمونه‌ها استفاده شده است. علت استفاده از این نوع فوم، سلول بسته بودن و خواص برشی خوب آن در مقایسه با دیگر فوم‌های موجود است. جدول ۱ حاوی مشخصات ارائه شده توسط شرکت سازنده این نوع فوم است.

همچنین از پارچه شیشه از نوع E ساخت شرکت کلان استرالیا با کد AF301، استحکام کششی ۳۷۰۰ نیوتون بر مترمربع، چگالی سطحی ۱۸۵ گرم بر مترمربع، ضخامت ۰/۱۵ میلی‌متر و بافت ۶۸×۱ در تار و پود و زوایای بافت صفر و نود درجه [۹]، برای ساخت رویه‌های کامپوزیتی و چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار دوزنقه‌ای داخل هسته، در نمونه‌ها استفاده شده است.

برای ماتریس کامپوزیت مورد استفاده در نمونه‌ها از رزین اپوکسی ساخت شرکت سیکامین فرانسه با کد SR1700، چگالی ۱/۱۵۷ گرم بر سانتیمتر مکعب و لزجت ۱۷۰۰ مگاپاسکال-ثانیه در دمای ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، استفاده شده است. برای هاردنر نیز از SD2705 با سرعت واکنش استاندارد، چگالی ۱/۰۴ گرم بر سانتیمتر مکعب و لزجت ۲۴۵ مگاپاسکال-ثانیه در دمای ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، استفاده شده است. نسبت ترکیب رزین به هاردنر مطابق با پیشنهاد شرکت سازنده ۱۰۰ به ۲۲ است. مدت زمان مورد نیاز برای سفت شدن ماتریس در دمای اتاق، پس از ترکیب رزین و هاردنر تقریباً ۲۰ دقیقه است. همچنین کمترین زمان مورد نیاز برای پخت نمونه در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد، هفت روز است. این زمان در دمای ۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به ۲۴ ساعت و در دمای ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به ۶ ساعت کاهش می‌یابد [۱۰].

۲-۲- ساخت نمونه‌ها

ابعاد و هندسه‌ی نمونه‌ها با توجه به معیارهای استاندارد مربوط به تعیین خواص خمشی ساختارهای ساندویچی انجمن آزمون و مواد آمریکا (ASTM-C393) انتخاب شده است [۱۱]. این ابعاد انتخابی در جدول ۲ آورده شده‌اند. همچنین در شکل ۱ شماتیکی از ابعاد کلی و سطح مقطع دو نمونه با هسته‌های ساده و ترکیبی مشاهده می‌شود.



شکل ۳ آزمون خمش سه نقطه‌ای طبق استاندارد ASTM-C393



شکل ۴ (الف) آزمون کشش نمونه‌ی شماره ۳؛ (ب) نمونه‌های کشش

۳- تحلیل عددی

در این بخش به نحوه‌ی مدل‌سازی نمونه‌های ساخته شده در نرم‌افزار المان محدود پرداخته 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 ناحیه‌ی الاستیک انجام شده است و معیار خرابی برای مدل المان محدود تعریف نشده است؛ اما می‌توان با داشتن خواص مکانیکی هسته و پوسته‌های کامپوزیتی چه در رویه‌ها و چه در چندلایه‌ی کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته، به تحلیل عددی نمونه‌ها پس از خرابی پرداخت. برای رسیدن به این هدف بایستی ابتدا با آزمون‌های استاندارد کشش و فشار برای رویه‌های کامپوزیتی به همراه نصب کرنش‌سنج‌ها در جهت‌های بارگذاری و عمود بر آن، نمودارهای تنش-کرنش مربوط به حالت‌های فشاری و کششی رویه‌های کامپوزیتی بکار رفته در نمونه‌ها بدست آید. علاوه بر این نمودار تنش-کرنش مربوط به بارگذاری خمشی برای هسته‌ی فومی، بایستی مطابق با استاندارد مربوطه بدست آید. سپس با استفاده از این نمودارها می‌توان به تعریف معیار خرابی برای نرم‌افزار المان محدود پرداخت و از این طریق رفتار نمونه حین و پس از خرابی را به صورت عددی تحلیل کرد. در این تحقیق برای مدل کردن نمونه‌ها از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. مدل‌سازی برای هر چهار حالت به صورت جداگانه انجام شده است. در ادامه مراحل این مدل‌سازی به تفصیل شرح داده شده است.

۳-۱- ابعاد و هندسه

با توجه به تقارن هندسی، بارگذاری، شرایط مرزی و همچنین خواص مواد نمونه‌های ساخته شده نسبت به محور مرکزی عمود بر راستای طولی نمونه‌ها، نیمی از نمونه‌ها در نرم‌افزار المان محدود مدل شده‌اند. به منظور مدل کردن

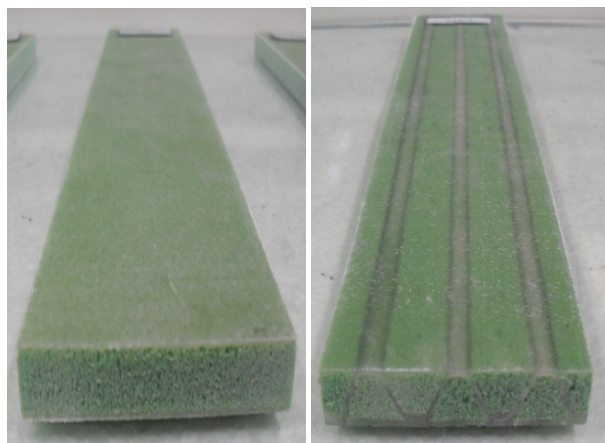
برای در نظر نگرفتن اثرات لبه‌ای در حین ساخت نمونه‌ها، به هر دو بعد طول و عرض ۲ سانتیمتر در هر طرف اضافه شده و پس از ساخت نهایی نمونه‌ها بریده و از نمونه‌ها جدا شده است. در شکل ۲ تصویری از یک نمونه با هسته‌ی ساده و یک نمونه‌ی با هسته‌ی ترکیبی با گام ۲ سانتیمتر مشاهده می‌شود.

۲-۳- آزمون نمونه‌های خمش

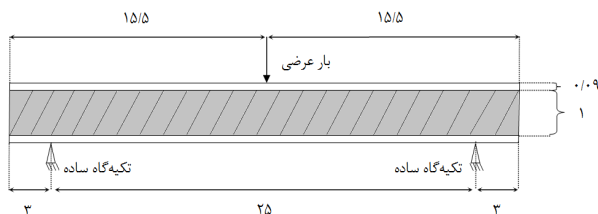
پس از ساخت و برش نهایی نمونه‌ها در ابعاد استاندارد، آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌ها بر طبق استاندارد ASTM-C393 و با استفاده از دستگاه کشش اینسترن 5500R با قاب ۶۰۲۷ انجام گرفته است. ابعاد نمونه‌ها $11/8 \times 60 \times 310$ میلی‌متر است؛ که با توجه به ضخامت ۱۰ میلی‌متری هسته، ضخامت هر یک از پوسته‌ها ۰/۹ میلی‌متر است. از هر حالت با توجه به پیشنهاد استاندارد سه نمونه مورد آزمون قرار گرفت. شرایط آزمون برای همه‌ی نمونه‌ها یکسان است. فاصله‌ی بین دو تکیه‌گاه ۲۵ سانتیمتر و قطر پین‌های تکیه‌گاه‌ها و نوک دماغه ۱۰ میلی‌متر است. همچنین سرعت عمودی جابه‌جایی فک بالایی دستگاه در حین انجام آزمون ۵ میلی‌متر بر دقیقه بوده است. در شکل ۳ یک نمونه در حین آزمون خمش سه نقطه‌ای توسط دستگاه اینسترن 5500R مشاهده می‌شود.

۲-۴- آزمون نمونه‌های کشش

به منظور مدل کردن نمونه‌ها در نرم‌افزار المان محدود نیاز است که مدول الاستیک کششی پوسته‌ی کامپوزیتی که در رویه‌های بالایی و پایینی و همچنین در چندلایه‌ی کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته‌های ترکیبی نمونه‌ها استفاده شده مشخص باشد. به همین سبب ۵ نمونه‌ی کامپوزیتی کشش مطابق با استاندارد مربوط به تعیین خواص کششی کامپوزیت‌ها (ASTM-D3039M) و به روش VARTM ساخته شد و بر طبق همین استاندارد و توسط دستگاه اینسترن 5500R تحت آزمون کشش قرار گرفت [۱۲]. ابعاد نمونه $25 \times 25 \times 250$ میلی‌متر است. جنس نمونه‌ها دقیقاً از جنس کامپوزیت پارچه‌ی شیشه-پوکسی که در نمونه‌های خمش استفاده شده است. همچنین سرعت جابه‌جایی فک بالایی دستگاه در حین انجام آزمون کشش ۲ میلی‌متر بر دقیقه بوده است. در شکل ۴ نمونه‌های کشش ساخته شده و همچنین نمونه‌ی شماره ۳ درست پس از انجام آزمون کشش مشاهده می‌شود.



شکل ۵ (الف) نمونه‌ی با هسته‌ی ساده؛ (ب) نمونه‌ی با هسته‌ی ترکیبی



شکل ۵ شماتیک نمای از پهلو بارگذاری و شرایط مرزی (ابعاد به سانتیمتر است).

۳-۳- نوع تحلیل و تماس‌ها

پس از سرهم کردن پارت‌ها در ماژول سرهم‌بندی، با توجه به اعمال بارگذاری با یک نرخ ثابت جابه‌جایی (۵ میلی‌متر بر دقیقه) و همچنین استاتیکی بودن آن، یک گام از نوع عمومی، استاتیک و خطی در ماژول استپ تعریف شده است.

در ادامه به منظور اتصال بین هسته و رویه‌ها و همچنین هسته‌ی فومی با لمینیت کامپوزیتی موج‌دار و نهایتاً اتصال رویه‌ها به لمینیت کامپوزیتی موج‌دار از قید گر گرفته استفاده شده است. با اعمال این قید جابه‌جایی پارت‌های مختلف به یک اندازه خواهد بود.

۳-۴- بارگذاری و شرایط مرزی

نمای از پهلو بارگذاری و شرایط مرزی مطابق با استاندارد گفته شده به صورت شماتیک در شکل ۵ مشاهده می‌شود که ابعاد در آن به سانتیمتر بیان شده است. برای اعمال شرایط مرزی، با توجه به اینکه رویه‌های پایین نمونه‌ها دقیقاً در نقاط تماس با فک‌های پایین در شرایط تکیه‌گاه ساده می‌باشند و همچنین با توجه به مدل کردن نیمی از نمونه‌ها تکیه‌گاه گیردار را به لبه انتهایی مدل اعمال می‌کنیم. این نقاط از جابه‌جایی در راستاهای x و y و z و همچنین از چرخش حول این محورها منع شده‌اند. البته با توجه به حذف کردن نیمی از مدل به دلیل تقارن در لبه‌ی دیگر مدل صفحه‌ی تقارن نسبت به محور x تعریف شده است. همچنین برای اعمال بارگذاری یک سطح کوچک به طول دقیقاً برابر با عرض نمونه‌ها (۶ سانتیمتر) و عرض تقریباً برابر با سطح پایینی فک متحرک بالایی دستگاه کشش (تقریباً ۵ میلی‌متر) در رویه‌ی بالایی نمونه‌ها تعریف شده و بارگذاری به صورت فشاری و با توزیع یکنواخت بر روی این سطح و در گام استاتیکی و عمومی که از پیش تعریف شده بود، اعمال شده است.

البته با توجه به اینکه رفتار کلی سازه مد نظر است و نه رفتار سازه دقیقاً در محل بارگذاری، لزومی بر تعریف دقیقاً این نوع بارگذاری در تحلیل المان محدود نیست و می‌توان به انواع دیگری نیز بار خمشی مورد نظر را به لبه‌ی آزاد مدل اعمال کرد. به عنوان مثال می‌توان با تعریف یک نقطه‌ی مرجع در لبه‌ی آزاد مدل و مرتبط کردن تمام نودهای لبه‌ی آزاد به این نقطه‌ی مرجع، بار خمشی مورد نظر را به صورت نیروی متمرکز معادل با گشتاور خمشی مورد نظر به این نقطه‌ی مرجع اعمال کرد.

۳-۵- مش‌بندی

برای مش‌بندی نمونه‌ها با توجه به تمرکز تنش در محل اعمال بار، المان‌ها در این محل بیشتر و ریزتر شده‌اند؛ که این مسئله به وضوح در شکل ۶ مشاهده می‌شود. برای رویه‌ها و چندلایه‌ی کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته، با توجه به کوچک‌تر بودن نسبت ضخامت آن‌ها به عرضشان از مقدار 0.05 ، از المان‌های پوسته S8R از نوع استاندارد با میان یابی مرتبه‌ی دوم استفاده شده است. همچنین برای فوم‌های PVC داخل هسته از المان‌های سه‌بعدی تنش

نمونه‌ها در نرم‌افزار المان محدود آباکوس، در ماژول پارت، برای همه‌ی نمونه‌ها دو نوع پارت تعریف شده است. یک نوع برای رویه‌های بالا و پایین و چندلایه‌ی کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته و یک نوع هم برای فوم PVC به کار رفته در داخل هسته. برای نوع اول در فضای سه بعدی، از حالت تغییرشکل‌پذیر، با ویژگی پوسته و از تکنیک گسترش استفاده شده است. برای نوع دوم نیز در فضای سه بعدی، از حالت تغییرشکل‌پذیر، با ویژگی جامد و باز هم از تکنیک گسترش استفاده شده است. رویه‌ی بالایی، رویه‌ی پایینی، چندلایه‌ی کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته‌های ترکیبی با گام‌های مختلف و همچنین نوارهای فومی، به صورت جدا مدل‌سازی شده و به هر کدام، یک پارت جداگانه اختصاص یافت. تعداد پارت‌های ایجاد شده برای هر نمونه با توجه به گام چندلایه‌ی کامپوزیتی موج‌دار بکار رفته در هسته‌های ترکیبی متفاوت است. ابعاد و هندسه‌ی پارت‌ها دقیقاً به همان شکلی است که در بخش ۲-۲ آورده شده است تنها با این تفاوت که در مدل‌سازی المان محدود با توجه به تقارن، همانطور که پیش‌تر گفته شد، نیمی از طول نمونه‌ها مدل شده‌اند.

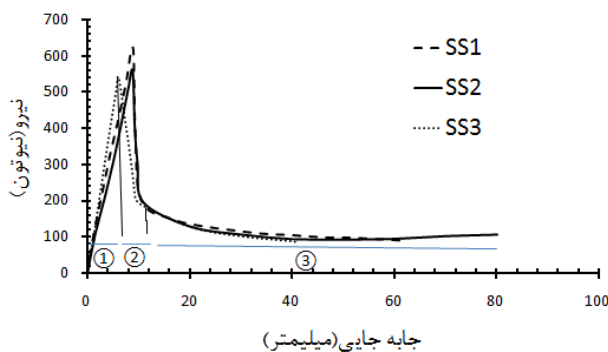
۳-۲- خواص مواد

برای ارائه خواص مکانیکی مواد بکار رفته در نمونه‌ها به نرم‌افزار، در ماژول خواص دو نوع ماده به نام‌های کامپوزیت و PVC به ترتیب برای رویه‌ها، چندلایه‌ی کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته و فوم به کار رفته در هسته تعریف شده است. خواص مکانیکی فوم PVC به کار رفته در هسته دقیقاً به همان مقادیری است که در جدول ۱ آورده شده است. خواص مکانیکی رویه‌های کامپوزیتی و همچنین چندلایه‌ی کامپوزیتی موج‌دار نیز با توجه به آزمون کشش انجام شده و نیز با توجه به مراجع مشابه به صورت جدول ۳ است.

از آنجا که نمونه‌های ساخته شده بر طبق استاندارد از نوع نمونه‌های بلند می‌باشند و اثر خمش در آن‌ها بر اثر برش غالب است و 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 الاستیک کششی در دو جهت که اهمیت زیادی در نتایج عددی دارند، از آزمون کشش انجام شده روی نمونه‌های کشش بدست آمده است. همچنین با توجه به اینکه نسبت سفتی خمشی به جرم نیز از نتایج مورد بررسی است، بنابراین برای دادن مقدار درست و صحیح چگالی پوسته‌های کامپوزیتی به نرم‌افزار، نمونه‌های استاندارد کشش، وزن شده و با داشتن حجم دقیق آن‌ها، مقدار نسبتاً دقیق چگالی کامپوزیت بکار رفته در نمونه‌ها بدست آمده است. ولی مقدار نسبت پواسون و ثابت‌های الاستیک برشی که در جدول ۳ آمده است و حساسیت بسیار پایینی در تعیین نتایج حاصل از حل المان محدود دارند، از مراجع مشابه آورده شده‌اند. با توجه به اینکه از پارچه‌های شیشه با نوع بافت صفر و نود درجه در پوسته‌های کامپوزیتی استفاده شده است، ثابت الاستیک کششی در هر دو جهت صفر و نود درجه یکسان است. در همین ماژول در قسمت کامپوزیت لایپ سه لایه کامپوزیتی با ضخامت 0.3 میلی‌متر به ازای هر لایه، برای رویه‌های بالایی و پایینی و همچنین برای چندلایه‌ی کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته تعریف شده است. در ادامه یک بخش همگن از جنس فوم PVC که خواص مکانیکی آن از پیش برای نرم‌افزار تعریف شده بود، ایجاد شده و به پارت‌های از پیش ایجاد شده مربوط به هسته‌ی فومی، اختصاص داده می‌شود.

جدول ۳ خواص کامپوزیت بکاررفته در نمونه‌ها [۱۳]

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)	ν	ρ (kg/m ³)
۱۰/۵۸	۱۰/۵۸	۴/۱۴	۱	۴/۱۴	۰/۰۵	۱۶۵۸/۸۴



شکل ۸ نمودار نیرو-جابه‌جایی نمونه‌ها با هسته‌ی ساده

جدول ۴ نتایج تجربی آزمون خمشی نمونه‌ها با هسته‌ی ساده

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

۴-۱-۱- نمونه‌ها با هسته‌ی ساده

شکل ۸ نمودار نیرو-جابه‌جایی در نمونه‌ی ساده را نشان می‌دهد. نمونه‌ی ساده نمونه‌ای است که در هسته‌ی آن هیچ تغییری ایجاد نشده است و هسته‌ی آن تنها از فوم 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 شده‌اند. در این شکل هر سه آزمون انجام شده بر روی این حالت، یکجا نشان داده شده است.

همانطور که از شکل ۸ مشخص است هر سه نمونه رفتار مشابهی را از خود نشان می‌دهند. منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی نشان داده شده در این شکل را می‌توان به سه ناحیه مجزا تقسیم‌بندی کرد:

- ناحیه‌ی اول مربوط به تغییر شکل الاستیک نمونه است. نمونه در این ناحیه رفتار خطی و الاستیک از خود نشان می‌دهد.
- ناحیه‌ی دوم پس از کامل شدن تغییر شکل الاستیک قطعه و شروع ناحیه‌ی خرابی، آغاز می‌شود و نیرو به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد. در این نقطه ترک‌هایی در قطعه به وجود آمده و شروع به رشد و پخش در قطعه می‌کنند و سبب شکست در نمونه شده و موجب افت قابل توجهی در قابلیت باربرداری نمونه می‌شوند و آن را تا حدود ۶۸/۵٪ کاهش می‌دهد.
- در ناحیه‌ی سوم 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 خمشی نمونه‌ها با هسته‌ی ساده آمده است.

۴-۱-۲- نمونه‌ها با هسته‌ی ترکیبی و گام ۱ سانتیمتر

شکل ۹ نمودار نیرو-جابه‌جایی مربوط به آزمون خمشی نمونه‌ها با هسته‌ی ترکیبی شامل فوم PVC و سه لایه کامپوزیت موج‌دار با گام ۱ سانتیمتر را نشان می‌دهد. از این حالت مانند تمام حالت‌های دیگر، سه عدد نمونه ساخته شده و با کدهای C11، C12 و C13 نام‌گذاری شده‌اند. در این شکل هر سه آزمون انجام شده بر روی این حالت، یکجا نشان داده شده است.

C3D8R از نوع استاندارد با میان‌یابی خطی استفاده شده است. در نهایت با تعریف یک محیط اجرایی، مدل ایجاد شده نهایی برای تحلیل به نرم‌افزار ارائه داده شد. پس از پایان تحلیل مدل توسط نرم‌افزار و مقایسه‌ی اولیه نتایج عددی با نتایج بدست آمده از آزمون‌های تجربی و مشاهده منطقی بودن نتایج عددی (صحت نتایج)، با تغییر اندازه‌ی المان‌ها و توزیع آن‌ها در مدل المان محدود، سعی شده است تا نتایجی دقیق‌تر بدست آید (دقت نتایج).

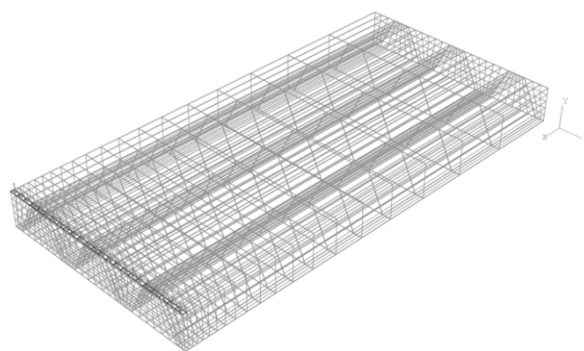
۴- بررسی نتایج

۴-۱-۲- نتایج آزمون خمشی

آزمون خمشی سه نقطه‌ای مطابق با استاندارد ASTM-C3939 برای سه نمونه‌ی یکسان از هر حالت انجام شد. از آنجایی که بیش‌ترین تنش‌ها در ساختارهای ساندویچی تحت خمشی، در رویه‌های بالا و پایین رخ می‌دهد، رویه‌های کامپوزیتی نمونه‌های ساخته و آزمایش شده در این تحقیق نیز بیش‌ترین تنش‌های ایجاد شده را تحمل می‌کنند. این تنش‌ها که از نوع محوری هستند، در رویه پایینی از نوع کششی و در رویه بالایی از نوع فشاری هستند؛ بنابراین با توجه به اینکه استحکام فشاری کامپوزیت‌ها غالباً کمتر از استحکام کششی آن‌ها است، ابتدا رویه‌های بالایی دچار خرابی می‌شوند. این مطلب در شکل ۷ به وضوح مشخص شده است.

نمودار نیرو بر حسب جابه‌جایی برای هر سه نمونه در هر یک از چهار حالت مورد بررسی، به طور مستقیم از داده‌های تجربی حاصل از آزمون خمشی نمونه‌ها بدست آمده است. سفتی خمشی مربوط به هر نمونه آزمون شده، با استفاده از مقادیر نیرو در ناحیه‌ی الاستیک و جابه‌جایی متناظر با آن، بدست آمده است. با توجه به غالب بودن اثر خمشی در نمونه‌های بلند نسبت به اثر برش، مقدار دقیق سفتی خمشی نمونه‌ها از رابطه‌ی (۱) بدست می‌آید [۱۲]. در ادامه به بیان و بررسی این نمودارها برای هر یک حالت از نمونه‌ها پرداخته شده است.

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



شکل ۶ تراکم توزیع المان در نزدیکی نقاط اعمال بار



شکل ۷ شروع خرابی نمونه‌ی خمشی از رویه‌ی بالایی

– ناحیه‌ی دوم ناحیه‌ای است که نیرو پس از افت پیشین، به مقدار کمی افزایش یافته و در ادامه تقریباً ثابت می‌ماند. در واقع پس از شکست رویه‌ی بالایی، دیگر باری توسط رویه‌ی بالایی تحمل نمی‌شود و بار وارد بر نمونه بر هسته منتقل می‌شود. اما با توجه به وجود چندلایه‌ی کامپوزیتی موج‌دار در داخل هسته، قسمت‌های بالایی این چندلایه که در مجاورت رویه‌ی بالایی قرار دارد، خود نقش رویه‌ای جدید برای هسته‌ی فومی زیرین خود را ایفا می‌کند؛ بنابراین نمودار با خیزی دوباره مقداری بار تحمل کرده تا زمانی که این رویه نیز دچار شکست شود.

– با ادامه بارگذاری، پس از شکست قسمت‌های بالایی چندلایه‌ی کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته، بار به هسته و در ادامه به قسمت پایینی چندلایه‌ی کامپوزیتی موج‌دار و در نهایت به رویه‌ی پایینی منتقل می‌شود. هسته در اثر فشار و پوسته‌ی پایینی در اثر کشش تخریب شده و باربرداری نمونه به سمت مقدار صفر میل می‌کند.

در جدول ۵ نتایج تجربی بدست آمده از آزمون خمش نمونه‌ها با هسته‌ی ترکیبی شامل فوم PVC و سه لایه کامپوزیت موج‌دار از جنس شیشه-اپوکسی با گام ۱ سانتیمتر آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود علاوه بر سفتی خمشی، نسبت سفتی خمشی به جرم نیز در مقایسه با نمونه‌ای با هسته‌ی ساده افزایش داشته است. سفتی خمشی به طور میانگین به مقدار ۱۷۹/۷۴٪ و نسبت سفتی خمشی به جرم به طور میانگین ۳۴/۰۷٪ در این حالت در مقایسه با نمونه‌ای با هسته‌ی ساده افزایش داشته‌اند. علت کمتر بودن افزایش نسبت سفتی خمشی به وزن در مقایسه با سفتی خمشی، افزایش چگالی نمونه با افزودن سه لایه کامپوزیت شیشه-اپوکسی موج‌دار به هسته است.

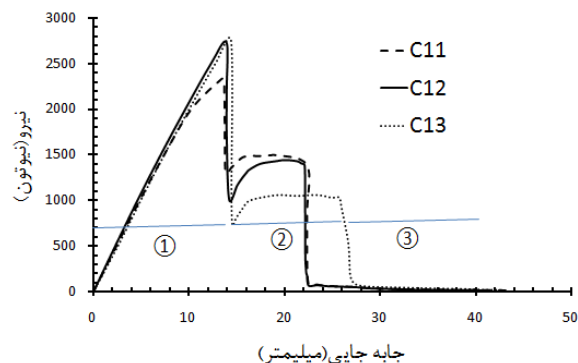
۴-۱-۳- نمونه‌ها با هسته‌ی ترکیبی و گام ۲ سانتیمتر

شکل ۱۰ نمودار نیرو-جابه‌جایی مربوط به این حالت را نشان می‌دهد. در این حالت سه لایه کامپوزیت موج‌دار با شکل هندسه‌ی دوزنقه‌ای و گام ۲ سانتیمتر در داخل هسته فومی تعبیه شده است. از این حالت مانند تمام حالت‌های دیگر، سه عدد نمونه ساخته شده و با کدهای C21، C22 و C23 نام‌گذاری شده‌اند. در این شکل هر سه آزمون انجام شده بر روی این حالت، یکجا نشان داده شده است.

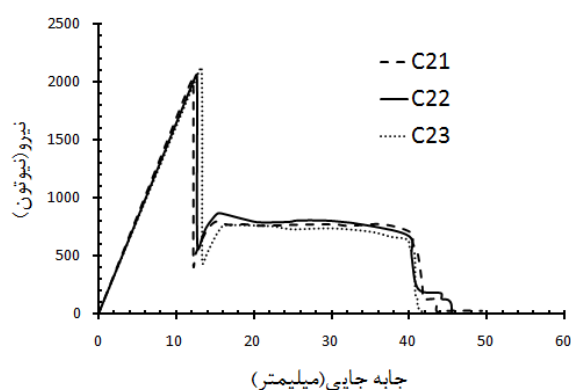
همانطور که از شکل ۱۰ مشخص است هر سه نمونه رفتار مشابه با یکدیگر و رفتار کلی شبیه به رفتار نمونه‌هایی با هسته‌ی ترکیبی و گام ۱ سانتیمتر را از خود نشان می‌دهند. در جدول ۶ نتایج مربوط به آزمون خمش سه نقطه‌ای برای این حالت آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود علاوه بر سفتی خمشی، نسبت سفتی خمشی به جرم نیز در مقایسه با نمونه‌ای با هسته‌ی ساده افزایش داشته است. سفتی خمشی به طور میانگین به مقدار ۱۳۴/۱٪ و نسبت سفتی خمشی به جرم به طور میانگین ۴۱/۸۳٪ در این حالت در مقایسه با نمونه‌ای با هسته‌ی ساده افزایش داشته‌اند. علت کمتر بودن افزایش نسبت سفتی خمشی به وزن در مقایسه با سفتی خمشی، افزایش چگالی نمونه با افزودن سه لایه کامپوزیت شیشه-اپوکسی موج‌دار به هسته است.

۴-۱-۴- نمونه‌ها با هسته‌ی ترکیبی و گام ۳ سانتیمتر

شکل ۱۱ نمودار نیرو-جابه‌جایی مربوط به این حالت را نشان می‌دهد. در این حالت سه لایه کامپوزیت موج‌دار با شکل هندسه‌ی دوزنقه‌ای و گام ۳ سانتیمتر در داخل هسته فومی تعبیه شده است. از این حالت مانند تمام حالت‌های دیگر، سه عدد نمونه ساخته شده و با کدهای C31، C32 و C33 نام‌گذاری شده‌اند. در این شکل هر سه آزمون انجام شده بر روی این حالت، یکجا نشان داده شده است.



شکل ۹ نمودار نیرو-جابه‌جایی نمونه‌ها با هسته‌ی ترکیبی با گام ۱ سانتیمتر



شکل ۱۰ نمودار نیرو-جابه‌جایی نمونه‌ها با هسته‌ی ترکیبی با گام ۲ سانتیمتر

جدول ۵ نتایج خمش نمونه‌ها با هسته‌ی ترکیبی با گام ۱ سانتیمتر

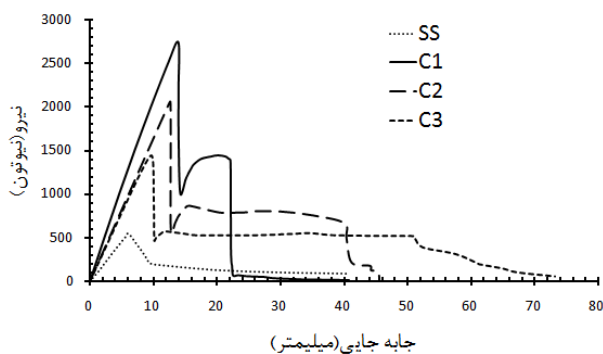
	D/M (Nm ² /g)	D (Nm ²)	M (g)	δ_m (mm)	P_m (N)	
C11	۰/۵۴۵۹	۶۷/۷	۱۲۴	۱۳/۴۱	۲۳۳۳/۷	
C12	۰/۵۵۹۶	۷۱/۰۷	۱۲۷	۱۳/۹۱	۲۷۳۴/۸	
C13	۰/۴۹۶۲	۶۵/۵۱	۱۳۲	۱۴/۴۱	۲۷۴۲/۹	
میانگین	۰/۵۳۳۹	۶۸/۰۹	۱۲۷/۶	۱۳/۹۱	۲۶۰۳/۸	
انحراف معیار	۰/۰۳۳۳	۲/۸	۴/۰۴	۰/۵	۲۳۳/۹	

جدول ۶ نتایج خمش نمونه‌ها با هسته‌ی ترکیبی با گام ۲ سانتیمتر

	D/M (Nm ² /g)	D (Nm ²)	M (g)	δ_m (mm)	P_m (N)	
C21	۰/۵۸۴۵	۵۷/۸۷	۹۹	۱۲/۱۶	۲۰۱۹	
C22	۰/۵۷۶۰	۵۷/۰۳	۹۹	۱۲/۶۶	۲۰۵۳/۷	
C23	۰/۵۳۳۹	۵۶/۰۶	۱۰۵	۱۳/۲۵	۲۱۱۷/۲	
میانگین	۰/۵۶۴۸	۵۶/۹۸	۱۰۱	۱۲/۶۹	۲۰۶۳/۵	
انحراف معیار	۰/۰۲۷۰۹	۰/۹	۳/۴۶	۰/۵۴۵	۴۹/۷۶	

همان طور که از شکل ۹ مشخص است هر سه نمونه رفتار مشابهی را از خود نشان می‌دهند. منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی نشان داده شده در این شکل را می‌توان به سه ناحیه‌ی مجزا تقسیم‌بندی کرد:

– ناحیه‌ی اول که نیرو به صورت خطی افزایش می‌یابد و نمونه رفتاری شبیه به یک ماده‌ی الاستیک از خود نشان می‌دهد. پس از این که نیرو در انتهای این ناحیه به بیش‌ترین مقدار خود رسید، معمولاً شکست در رویه‌ی بالایی و در اثر تنش‌های فشاری رخ می‌دهد. چراکه در کامپوزیت‌ها به طور معمول استحکام فشاری پایین‌تر از استحکام کششی است. سپس نیرو به طور ناگهانی افت کرده و از میزان تحمل بار نمونه به طور قابل ملاحظه‌ای کاسته می‌شود.



شکل ۱۲ نمودارهای نیرو-جابه‌جایی مقایسه‌ای نمونه‌ها

۴-۲- نتایج تحلیل عددی

در این قسمت نتایج حاصل از حل عددی نرم‌افزار آباکوس، از قبیل سفتی خمشی و نسبت سفتی خمشی به جرم مربوط به هر حالت ارائه شده است. با بدست آوردن بیش‌ترین مقدار جابه‌جایی متناظر با بار وارده که دقیقاً در محل اعمال بارگذاری رخ می‌دهد، سفتی خمشی هر یک از حالت‌ها از رابطه (۱) بدست آمده است. با توجه به جدول ۸ مشاهده می‌شود که بیش‌ترین میزان سفتی خمشی منتج از حل عددی مربوط به نمونه با هسته‌ی ترکیبی با گام یک سانتیمتر برای لمینیت کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته، است. این حالت با داشتن سفتی خمشی برابر با $60/98$ نیوتون در مترمربع، افزایش تقریباً 140 درصدی در سفتی خمشی را نسبت به نمونه با هسته‌ی ساده به خود اختصاص داده است. این در حالی است که نمونه با هسته‌ی ترکیبی با گام 3 سانتیمتری برای لمینیت کامپوزیتی موج‌دار با داشتن سفتی خمشی برابر با $49/88$ نیوتون در مترمربع و با افزایش تقریباً 96 درصدی نسبت به نمونه هسته‌ی ساده، کمترین افزایش در سفتی خمشی را نسبت به نمونه با هسته‌ی ساده داشته است. همچنین با داشتن چگالی مواد بکار رفته در نمونه‌ها و ابعاد دقیق هر بخش از نمونه، مقدار دقیق جرم محاسبه شده توسط نرم‌افزار بدست آمده است. با داشتن مقدار جرم هر نمونه می‌توان نسبت سفتی خمشی به جرم آن را نیز بدست آورد. این مقادیر و مقدار اختلاف آن‌ها با نتایج تجربی به درصد در جدول ۸ آمده است. برخلاف ویژگی سفتی خمشی نمونه‌ها، میزان سفتی خمشی به وزن نمونه‌ها، بیش‌ترین افزایش نسبت به نمونه با هسته‌ی ساده را در نمونه به هسته‌ی ترکیبی و گام 3 سانتیمتری برای لمینیت کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته داشته است؛ که این افزایش با توجه به مقادیر جدول ۸ تقریباً 18 درصد است. این در حالی است که کمترین افزایش در میزان سفتی خمشی به وزن نمونه‌ها نسبت به نمونه با هسته‌ی ساده، مربوط به نمونه با هسته‌ی ترکیبی و گام 1 سانتیمتر برای لمینیت کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته است؛ که این افزایش با توجه به مقادیر جدول ۸ تقریباً 18 درصد است. مقدار خطا از $0/01\%$ که مربوط به سفتی خمشی حالت C1 است تا $8/53\%$ که مربوط به سفتی خمشی به وزن همین حالت است، تغییر می‌کند که نشان دهنده تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی است.

۵- نتایج و بحث

در این مقاله اثر افزودن یک چندلایه‌ی کامپوزیتی موج‌دار از جنس شیشه-اپوکسی با هندسه‌ی دوزنقه‌ای و با سه گام مختلف، به هسته‌ی فومی یک ساختار ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی از جنس شیشه-اپوکسی، در رفتار خمشی این نوع سازه‌های ساندویچی بررسی شده است. مشاهده شد که در همه‌ی حالت‌ها با هر یک از گام‌های انتخابی برای چندلایه‌ی کامپوزیتی

همانطور که از شکل ۱۱ مشخص است هر سه نمونه رفتار مشابه با یکدیگر و رفتار کلی شبیه به رفتار نمونه‌هایی با هسته‌ی ترکیبی و گام ۱ و ۲ سانتیمتر را از خود نشان می‌دهند.

در جدول ۷ نتایج مربوط به آزمون خمشی سه نقطه‌ای برای این حالت آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود علاوه بر سفتی خمشی، نسبت سفتی خمشی به جرم نیز در مقایسه با نمونه‌ای با هسته‌ی ساده افزایش داشته است. سفتی خمشی به طور میانگین به مقدار $115/2\%$ و نسبت سفتی خمشی به جرم به طور میانگین $37/01\%$ در این حالت در مقایسه با نمونه‌ای با هسته‌ی ساده افزایش داشته‌اند. علت کمتر بودن افزایش نسبت سفتی خمشی به وزن در مقایسه با سفتی خمشی، افزایش چگالی نمونه با افزودن سه لایه کامپوزیت شیشه-اپوکسی موج‌دار به هسته است.

۴-۱-۵- مقایسه آزمون خمشی نمونه‌ها

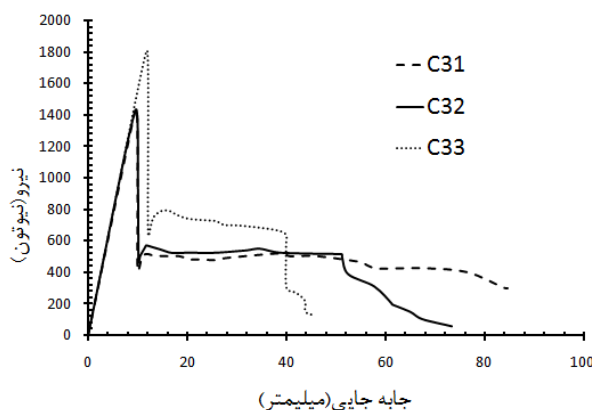
در شکل ۱۲ نمودارهای نیرو بر حسب جابه‌جایی حاصل از آزمون تجربی نمونه‌ها با هسته‌ی ساده و هسته‌ی ترکیبی به صورت مقایسه‌ای آورده شده است. مشاهده می‌شود که برای همه نمونه‌ها با هسته‌ی ترکیبی علاوه بر افزایش شیب نمودار در ناحیه‌ی الاستیک که نشان دهنده‌ی افزایش سفتی خمشی نمونه است، میزان بیش‌ترین بار خمشی تحمل‌شده توسط نمونه و همچنین جابه‌جایی متناظر با آن، نسبت به نمونه با هسته‌ی ساده افزایش داشته‌اند. میزان این افزایش نسبت به نمونه با هسته‌ی ساده نیز به ترتیب از حالت C3 به C2 و C1 افزایش داشته است.

جدول ۷ نتایج خمشی نمونه‌ها با هسته‌ی ترکیبی با گام ۳ سانتیمتر

	D/M (Nm ² /g)	D (Nm ²)	M (g)	δ_m (mm)	P_m (N)	
C31	۰/۵۴۷۰	۵۰/۳۳	۹۲	۹/۷۴	۱۴۳۸/۹	
C32	۰/۵۵۷۷	۵۲/۴۳	۹۴	۹/۷۴	۱۴۳۴/۶	
C33	۰/۵۳۲۲	۵۴/۲۹	۱۰۲	۱۱/۹۱	۱۸۰۲/۵	
میانگین	۰/۵۴۵۶	۵۲/۳۵	۹۶	۱۰/۴۶	۱۵۵۸/۷	
انحراف معیار	۰/۰۱۲۸	۱/۹۸	۵/۲۹	۱/۲۵	۲۱۱/۱۶	

جدول ۸ نتایج عددی و مقایسه‌ی آن با نتایج تجربی

کد نمونه	M (g)	خطا (%)	D (Nm ²)	خطا (%)	D/M (Nm ² /g)	خطا (%)
SS	۶۱/۲	۰/۳۲	۲۵/۳۸	۴/۱۸	۰/۴۱۴۷	۴/۰۵
C1	۱۲۴/۴	۲/۵۸	۶۰/۹۸	۱۱/۰۱	۰/۴۹۰۲	۸/۵۳
C2	۱۰۱/۲	۰/۱۹	۵۲/۳۵	۶/۵۸	۰/۵۲۷۱	۶/۸۹
C3	۹۴/۲	۱/۸۹	۴۹/۸۸	۴/۸۳	۰/۵۲۹۵	۲/۹۹



شکل ۱۱ نمودار نیرو-جابه‌جایی نمونه‌ها با هسته‌ی ترکیبی با گام ۳ سانتیمتر

موج‌دار داخل هسته، علاوه بر سفتی خمشی، نسبت سفتی خمشی به وزن نیز افزایش داشته است.	M	جرم کل نمونه‌ی خمشی (g)
علاوه بر این مشاهده می‌شود که با کاهش گام چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته از ۳ سانتیمتر به ۲ و ۱ سانتیمتر میزان افزایش در میزان بیش‌ترین بار تحمیلی توسط نمونه و جابه‌جایی متناظر با آن و همچنین شیب ناحیه‌ی الاستیک، بیشتر می‌شود. با توجه با مقادیر جدول‌های ۴ تا ۷ بیش‌ترین افزایش در میزان بار خمشی تحمیلی توسط نمونه و جابه‌جایی متناظر با آن مربوط به نمونه با گام ۱ سانتیمتر برای چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته است که به ترتیب برابر با ۳۴۸/۹۹٪ و ۷۴/۰۹٪ است. کمترین این افزایش نیز مربوط به نمونه با گام ۳ سانتیمتر و به ترتیب برابر با ۱۶۸/۷۸٪ و ۳۰/۹۱٪ است. همچنین بیش‌ترین افزایش در سفتی خمشی نیز مربوط به نمونه با گام ۱ سانتیمتر برای چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته است که برابر با ۱۷۹/۷۴٪ است. کمترین میزان افزایش در سفتی خمشی نیز مربوط به نمونه با گام ۳ سانتیمتر و به مقدار ۱۱۵/۲٪ است.	P	بار خمشی (N)
اما با افزودن یک چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار با هندسه‌ی دوزنقه‌ای به هسته‌ی فومی یک ساختار ساندویچی، علاوه بر افزایش خواص خمشی آن، بر وزن ساختار نیز افزوده می‌شود؛ بنابراین پارامتر مهم‌تر از سفتی خمشی، نسبت سفتی خمشی به وزن است. با توجه به یکسان بودن حجم همه‌ی نمونه‌ها، پارامتر نسبت سفتی خمشی به جرم مدنظر قرار گرفته است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول‌های ۴ تا ۷، در همه‌ی حالت‌ها با هسته‌ی ترکیبی، این نسبت نیز در مقایسه با نمونه‌ای با هسته‌ی ساده‌ی فومی افزایش داشته است. بیش‌ترین این افزایش مربوط به نمونه‌ای با گام ۲ سانتیمتر برای چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته و به مقدار ۴۱/۸۳٪ است. کمترین این افزایش نیز مربوط به نمونه‌ای با گام ۱ سانتیمتر برای چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته و به مقدار ۳۴/۰۷٪ است.	t_c	ضخامت هسته در نمونه‌ی خمشی (m)
	t_s	ضخامت رویه در نمونه‌ی خمشی (m)
	t^*	ضخامت چندلایه‌ی کامپوزیتی موج‌دار (m)
	ν	نسبت پواسون
	ρ	چگالی (kg/m^3)
	λ	گام چندلایه‌ی کامپوزیتی موج‌دار (m)
	δ	جابه‌جایی عرضی نمونه در محل بارگذاری (m)

۷- مراجع

- [1] Application of sandwich panels, Accessed 25 October 2011; <http://www.sandwichpanels.org/index.html>.
- [2] M.P. Boyle, J.C. Roberts, P.D. Wienhold, G. Bao, G.J. White, Experimental, numerical and analytical results for buckling and post-buckling of orthotropic rectangular sandwich panels, *Composite Structures*, No. 52, pp. 375-380, 2001.
- [3] N. Gupta, E. Woldeesenbet, S. Sankaran, Response of Syntactic Foam Core Sandwich Structured Composite to Three-Point Bending, *Journal of Sandwich Structure and Material*, No. 4, pp. 13-25, 2002.
- [4] A. Russo, B. Zuccarello, Experimental and numerical evaluation of the mechanical behavior of GFRP sandwich panels, *Composite Structures*, No. 81, pp. 575-586, 2007.
- [5] A. Niaz, G.H. Liaghat, Experimental investigation of low speed impact on sandwich panel with honeycomb core, and comparison with finite element resulet, M.Sc thesis, Department of Mechanical engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2008. (In Persian)
- [6] M.M. Islam, T. Aravinthan, Behaviour of structural fibre composite sandwich panels under point load and distributed load, *Composite Structures*, No. 93, pp. 206-215, 2010.
- [7] F. Halimi, M. Golzar, M.H. Beheshti, Effect of distribution media on mold filling and quality of the final part in a vacuum assisted resin transfer molding, M.Sc thesis, Department of Mechanical engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2011. (In Persian)
- [8] C7075 PVC foam, Accessed 21 April 2012; www.corematerials.com.
- [9] AF301 E-glass woven, Accessed 8 June 2012; http://www.colan.com.au/prod_01.html.
- [10] SR1700 epoxy resin, Accessed 10 June 2012; <http://www.sicom.com/products-core-32.aspx>.
- [11] Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions, C393-00, December 2002.
- [12] Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, D3039/D3039M, December 2002.
- [13] A.K. Kaw, *Mechanics of composite materials*, second ed., pp. 19-40, New York, Taylor & Francis, 2006.

۶- فهرست علائم

b	عرض کل نمونه‌ی خمشی (m)
D	سفتی خمشی ($\text{N}\times\text{m}^2$)
d	ضخامت کل نمونه‌ی خمشی (m)
E	ثابت الاستیک کششی (Pa)
G	ثابت الاستیک برشی (Pa)
I	گشتاور اینرسی سطح (m^4)
L	طول کل نمونه‌ی خمشی (m)