



## فصلنامه علمی ((دفاع هوافضایی))

دوره ۱، شماره ۴، اسفند ۱۴۰۱

عنوان مقالات

### مقاله پژوهشی

## اثر ضخامت لایه کامپوزیتی موج‌دار تعبیه شده در هسته فومی بر رفتار خمشی ساختارهای ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی و هسته ترکیبی موج‌دار با هندسه مربعی

رحمت اله رحمانی<sup>۱</sup>، مصطفی لیوانی<sup>۲</sup>، سید مهدی حجازی فرد<sup>۳</sup>

۱. تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک
۲. تهران، دانشگاه هوایی شهید ستاری، دانشکده مهندسی هوافضا.
۳. تهران، دانشگاه هوایی شهید ستاری، دانشکده مهندسی هوافضا

### اطلاعات مقاله

### چکیده

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۲

### کلمات کلیدی:

ساختارهای ساندویچی، هسته موج‌دار، هندسه مربعی، رویه‌های کامپوزیتی، اثر ضخامت، رفتار خمشی



نویسنده مسئول:

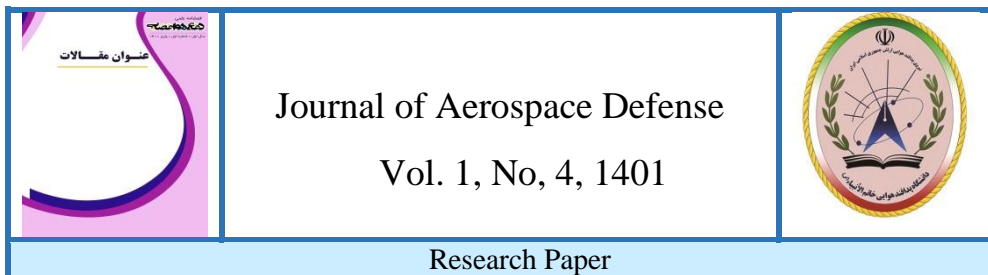
رحمت اله رحمانی

ایمیل:

[Rahmani.Rahmat.a@ut.ac.ir](mailto:Rahmani.Rahmat.a@ut.ac.ir)

**استناد به مقاله:** رحمت اله رحمانی، مصطفی لیوانی، سید مهدی حجازی فرد، اثر ضخامت لایه کامپوزیتی موج‌دار

تعبیه شده در هسته فومی بر رفتار خمشی ساختارهای ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی و هسته ترکیبی موج‌دار با هندسه مربعی، دوره ۱، شماره ۴، اسفند ۱۴۰۱.



## Effect of corrugated composite laminate thickness imprinted in foam core on flexural behavior of sandwich structure corrugated combinatorial core with composite skins and a with rectangular geometry

Rahmat Alah Rahmani<sup>1</sup>, Mostafa Livani<sup>2</sup>, Seyed Mehdi Hejazi Fard<sup>3</sup>

1. Tehran, Khatam Alanbia Air Deffence University, Department of Mechanical Engineering

2. Tehran, Sahid Sattari University, Department of Aerospace Engineering

3. Tehran, Sahid Sattari University, Department of Aerospace Engineering

### Article Information

Accepted: 1401/12/14

Received: 1402/06/12

### :Keywords

Sandwich Structures,  
Corrugated Core,  
Rectangular Shape,  
Composite Skins, Thickness  
Effect, Flexural Behavior



### Corresponding author:

Mohammad pourjafargholi

### Email:

mpourjafargholi@gmail.com

### Abstract

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 rectangular geometry was investigated in this paper. 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 thicknesses for rectangular shape 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 increasing in thickness; and the flexural stiffness to mass ratio was increased so on; but the rate of this increasing was decreased from 3 to 5 layers of corrugated composite laminate in PVC foam. Finally the experimental and numerical results were compared and a reasonable agreement between them has been observed.

**HOW TO CITE:** Rahmat Alah Rahmani, Mostafa Livani, Seyed Mehdi Hejazi Fard, Effect of corrugated composite laminate thickness imprinted in foam core on flexural behavior of sandwich structure with composite skins and a corrugated combinatorial core, Journal of Aerospace Defense, Vol. 1, No. 4, 1401.

## ۱. مقدمه

تلاشهای بین‌المللی به طور مداوم برای جستجوی مواد جدید، بهتر و کارآمدتر ادامه دارد. هدف اصلی این تلاش‌ها بهبود کیفیت، کارایی و دوام ساختارهای تولید شده با این مواد جدید می‌باشد. مواد جدید موجب ایجاد چالش‌های جدید در طراحی و بکارگیری این مواد این مواد شده است. مواد کامپوزیتی به عنوان یکی از این مواد جدید به علت خواص منحصر به فرد خود مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته‌اند. در دهه گذشته مواد کامپوزیتی ساندویچی مورد استقبال فراوان صنایع؛ مانند صنایع هوافضا، صنایع دریایی، صنایع حمل و نقل و صنایع ساختمان‌سازی قرار گرفته‌اند. وزن کم در حین داشتن خواص مکانیکی خوب، مقاومت عالی در برابر خوردگی و عوامل شیمیایی؛ سبب ایجاد این فرصت منحصر به فرد در صنایع شده است. ساختارهای ساندویچی نوعی از ساختارهای ترکیبی هستند که شامل دو رویه 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 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 لانه‌زنبوری استفاده کرد که هر یک مزایا و معایب مخصوص به خود را دارند، به عنوان مثال چوب بالسا یک هسته سبک با استحکام بالاست، اما اگر در معرض رطوبت قرار گیرد دچار پوسیدگی و خرابی می‌شود. هسته 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 نحوه اتصال آن به رویه‌ها مشکل و نیازمند مهارت‌های خاصیت.

در سال ۱۸۳۰ میلادی نخستین تیرهای ساندویچی که از ورقهای آهنی که به دو طرف یک هسته 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 طوریکه 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 شده پلاستیک، تحت بار فشاری

غیرمحموری برای کمانش را مورد آزمایش قرار دادند. پانل‌هایی با هسته فوم PVC<sup>۱</sup> خطی و بالسا در دو اندازه با نسبت منظری به ترتیب ۲ و ۱/۳، با تکنیک VARTM<sup>۲</sup> ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند. دو لبه کوتاهتر پانل‌ها گیردار شده و دو لبه بزرگتر روی تکیه‌گاه ساده قرار داده شدند. بارگذاری الاستیک کمانش پانل‌ها با نسبت منظری ۱/۳ برای پانل با هسته بالسا، ۴۰۰ کیلونیوتن و برای پانل با هسته فوم ۲۶۷ کیلونیوتن می‌باشد. این بارگذاری برای نسبت منظری ۲ برای پانل‌هایی با هسته بالسا و فوم به ترتیب ۳۳۴ و ۲۴۰ کیلونیوتن می‌باشد. نتایج آزمایشگاهی برای پانل‌هایی با هسته بالسا برای هر دو اندازه در حدود ۵٪ تا ۸٪ با نتایج تحلیلی و عددی متفاوت بود. در حالی که این تفاوت برای پانل با هسته فوم بین ۱۵٪ تا ۲۳٪ بود. بارگذاری مربوط به فروریختن پانل ساندویچی پس از کمانش با هسته‌های بالسا و فوم و با نسبت منظری ۱/۳، به ترتیب ۶۹۴ و ۳۴۷ کیلونیوتن بود. در حالی که با نسبت منظری ۲، این مقادیر به ترتیب ۵۹۲ و ۳۳۴ کیلونیوتن بود. تحلیل عددی پس از کمانش 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 می‌باشد. 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 مقایسه نتایج تجربی با تئوری نشان داد که این تئوری‌ها از دقت کافی برخوردار نمی‌باشند، به ویژه وقتی شکست 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 مسئله ضربه با سرعت کم بر روی یک پانل ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی از جنس شیشه-اپوکسی و هسته لانه‌زنبوری از جنس آلومینیوم را مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی مسئله 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

1. Poly Vinyl Chloride

2. Vacuum Assisted Resin Transfer Molding

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 مسئله 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 آراوینتان 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 لبه ساپورت شده و همچنین با جهت الیاف متفاوت و با وجود یک سیستم تثبیت بین پانل و پایه تیر آهنی، تحت اثر بارگذاری متمرکز و گسترده یکنواخت مورد آزمایش قرار گرفتند تا استحکام و مکانیزم شکست و خرابی آنها مشخص شود. نتایج این آزمایشات 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-اپوکسی 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 هسته فومی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها تأثیر سوراخ‌ها و شیارهای ایجاد شده در هسته بر نحوه 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، قطعه سالمتری تولید شد ولی در حالتی که از الیاف با نفوذپذیری بالا استفاده شد، قطعه سالمتری تولید نشد. الگوهای ایجاد شده در بیشترین حالت سبب افزایش ۸٪ وزن قطعه شدند. این در حالیست 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 صورت محلی از رشد ترک پیشگیری می‌کنند [۷].

در مقاله 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 هندسه 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 ساده فومی نیز ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. حل‌المان 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.

## ۱- تحلیل تجربی

### ۱-۲- 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 هسته نمونه‌ها استفاده شده است. علت استفاده از این نوع فوم، سلول بسته بودن و خواص برشی خوب آن در مقایسه با دیگر فوم‌های موجود می‌باشد. جدول ۱ حاوی مشخصات ارائه شده توسط شرکت سازنده این نوع فوم می‌باشد. همچنین از پارچه شیشه از نوع E ساخت شرکت کلان استرالیا با کد AF301، استحکام کششی ۳۷۰۰۰ 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.

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

PVC	$E$ (MPa)	$G$ (MPa)	$\nu$	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
C7075	۶۶	۳۰	۰/۳	۸۰

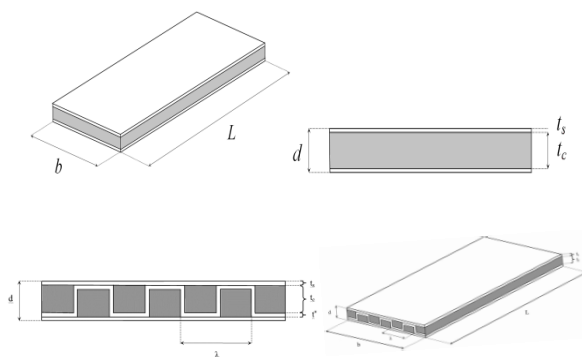
برای ماتریس کامپوزیت مورد استفاده در نمونه‌ها از رزین اپوکسی ساخت شرکت سیکامین فرانسه با کد SR1700، چگالی ۱/۱۵۷ گرم بر سانتیمتر مکعب و لزجت ۱۷۰۰ مگاپاسکال-ثانیه در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد، استفاده شده است. برای هاردنر نیز از SD2705 با سرعت واکنش استاندارد، چگالی ۱/۰۴ گرم بر سانتیمتر مکعب و لزجت ۲۴۵ مگاپاسکال-ثانیه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

درجه سانتیگراد، هفت روز می‌باشد. این زمان در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد به ۲۴ ساعت و در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد به ۶ ساعت کاهش می‌یابد [۱۰].

## ۲-۲- ساخت نمونه‌ها

ابعاد و هندسه 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.

در استاندارد آورده شده در بالا دو نوع نمونه تعریف می‌شود، یکی نمونه کوتاه و دیگری نمونه 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 هندسه نمونه‌ها به ساخت نمونه‌ها پرداخته شد. در این تحقیق در مجموع چهار حالت نمونه 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 هندسه مربعی با سه ضخامت مختلف، که در اینجا ۱، ۳ و ۵ لایه انتخاب شده است و به ترتیب با کدهای A1، A3 و A5 مشخص می‌شوند. برای ساخت نمونه‌ها ابتدا هسته‌ها آماده می‌شوند. برای هسته مربوط به نمونه ساده، تنها باید فوم PVC در ابعاد انتخابی گفته شده در بالا برش داده شود. اما برای نمونه‌هایی با هسته ترکیبی بایستی یک چندلایه‌ای کامپوزیتی با هندسه مربعی و با سه ضخامت متفاوت، در داخل هسته فومی تعبیه شود. که این کار با برش فوم PVC به شکل قطاع-های مربعی با سه ضخامت مورد نظر و تعبیه کردن چندلایه‌ای کامپوزیتی در داخل آن به روش لایه‌چینی دستی صورت می‌گیرد. در اینجا از جنس پارچه شیشه-اپوکسی که در رویه‌ها نیز استفاده شده است، برای ایجاد این چندلایه‌ای کامپوزیتی مربعی در داخل هسته‌های ترکیبی استفاده شده است.

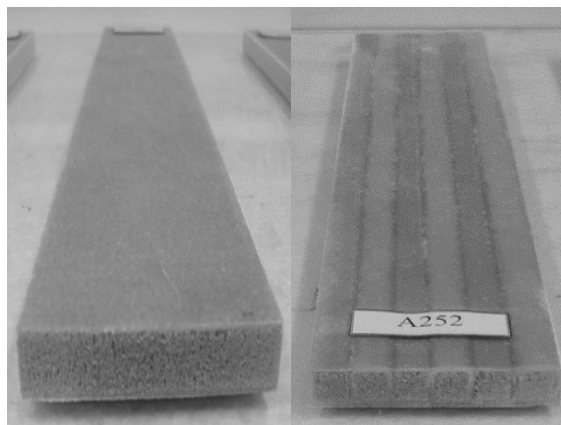


شکل ۱ شماتیکی از دو نمونه با هسته‌های ساده و ترکیبی و سطح مقطع‌های مربوط

**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 و ۰/۰۳
	۰/۱۵
$\lambda$	۲

پس از آماده شدن هسته‌ها، رویه‌ها که متشکل از سه لایه پارچه شیشه-اپوکسی می‌باشد، 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 نمونه یکسان ساخته و از میانگین داده‌های تجربی برای بدست آوردن نتایجی همچون سفتی خمشی و نسبت سفتی خمشی به جرم استفاده شده است. همچنین 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 هسته ساده و یک نمونه با هسته ترکیبی با هندسه مربعی و ضخامت ۵ لایه برای لمینیت کامپوزیتی موج‌دار مشاهده می‌شود.



شکل ۲-الف) نمونه با هسته ساده (شکل ۲-ب) نمونه با هسته ترکیبی



### 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  $۱۱/۸ \times ۶۰ \times ۳۱۰$  میلیمتر می‌باشد. که با توجه به ضخامت ۱۰ میلیمتری هسته، ضخامت هر یک از پوسته‌ها  $۰/۹$  میلیمتر می‌باشد. از هر حالت با توجه به پیشنهاد استاندارد سه نمونه مورد آزمون قرار گرفت. شرایط آزمون برای همه نمونه‌ها یکسان است. فاصله بین دو تکیه‌گاه ۲۵ سانتیمتر و قطر پین‌های تکیه‌گاه‌ها و نوک دماغه ۱۰ میلیمتر می‌باشد. 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 پوسته کامپوزیتی که در رویه‌های بالایی و پایینی و همچنین در چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته‌های ترکیبی نمونه‌ها استفاده شده مشخص باشد. به همین سبب ۵ نمونه 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  $۲۵ \times ۲/۵ \times ۲۵۰$  میلیمتر می‌باشد. جنس نمونه‌ها دقیقاً از جنس کامپوزیت پارچه شیشه-اپوکسی که در نمونه‌های خمش استفاده شده، می‌باشد. 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 نمونه شماره ۳ درست پس از انجام آزمون کشش مشاهده می‌شود.



شکل ۳ آزمون خمش سه نقطه‌ای طبق استاندارد ASTM-C393



شکل ۴-الف) آزمون کشش نمونه شماره ۳ شکل ۴-ب) نمونه‌های کشش

## ۲- تحلیل عددی

در این بخش به نحوه 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 ناحیه الاستیک انجام شده است و معیار خرابی برای مدل المان محدود تعریف نشده شده است. اما می‌توان با داشتن خواص مکانیکی هسته و پوسته‌های کامپوزیتی چه در رویه‌ها و چه در چندلایه 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 هسته 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 نمونه‌ها در نرم‌افزار المان محدود آباکوس، در مازول پارت، برای همه نمونه‌ها دو نوع پارت تعریف شده است. یک نوع برای رویه‌های بالا و پایین و چندلایه‌ای 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 تغییر شکل پذیر، با ویژگی پوسته و از تکنیک گسترش استفاده شده است. برای نوع دوم نیز در فضای سه بعدی، از حالت تغییر شکل پذیر، با ویژگی جامد و باز هم از تکنیک گسترش استفاده شده است. رویه‌ی بالایی، رویه‌ی پایینی، چندلایه‌ای 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. ابعاد و هندسه 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، چندلایه‌ای 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 چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار نیز با توجه به آزمون کشش انجام شده و نیز با توجه به مراجع مشابه به صورت جدول ۳ می‌باشد.

از آنجا که نمونه‌های ساخته شده بر طبق استاندارد از نوع نمونه‌های بلند می‌باشند و اثر خمشی 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 می‌باشد، 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 لایه سه لایه کامپوزیتی با ضخامت  $0/03$  میلیمتر به ازای هر لایه، برای رویه‌های بالایی و پایینی و همچنین برای چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته به ترتیب ۱، ۳ و ۵ لایه 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 هسته فومی، اختصاص داده می‌شود.

### 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.

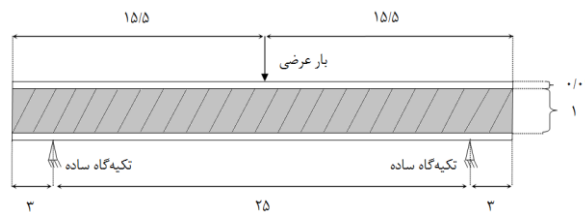
در ادامه به منظور اتصال بین هسته و رویه‌ها و همچنین هسته فومی با لمینیت کامپوزیتی موج‌دار و نهایتاً اتصال رویه‌ها به لمینیت کامپوزیتی موج‌دار از قید گر استفاده شده است. با اعمال این قید جابه‌جایی پارت‌های مختلف به یک اندازه خواهد بود.

### 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

جدول ۳ خواص کامپوزیت بکاررفته در نمونه‌ها [۱۳]

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



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

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 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 سانتیمتر) و عرض تقریباً برابر با سطح پایینی فک متحرک بالایی دستگاه کشش (تقریباً ۵/ میلی‌متر) در رویه بالایی نمونه‌ها

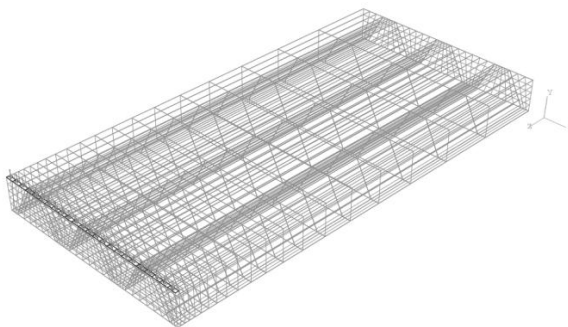
تعریف شده و بارگذاری به صورت فشاری و با توزیع یکنواخت بر روی این سطح و در گام استاتیکی و عمومی که از پیش تعریف شده بود، اعمال شده است.

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 لبه آزاد مدل اعمال کرد. به عنوان مثال می‌توان با تعریف یک نقطه مرجع در لبه آزاد مدل و مرتبط کردن تمام نودهای لبه آزاد به این نقطه مرجع، بار خمشی مورد نظر را به صورت نیروی متمرکز معادل با گشتاور خمشی مورد نظر به این نقطه 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 چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته، با توجه به کوچکتر بودن نسبت ضخامت آن‌ها به عرضشان از مقدار ۰/۰۵، از المانهای پوسته S8R از نوع استاندارد با میانمایی مرتبه دوم استفاده شده است.

همچنین برای فوم‌های PVC داخل هسته از المان‌های سه‌بعدی تنش C3D8R از نوع استاندارد با میانمایی خطی استفاده شده است. در نهایت با



شکل ۶ تراکم توزیع المان در نزدیکی نقاط اعمال بار

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

### ۳- بررسی نتایج

#### ۴-۱- نتایج آزمون خمش

آزمون خمش سه نقطه‌ای مطابق با استاندارد ASTM-C3939 برای سه نمونه یکسان از هر حالت انجام شد. از آنجایی که بیشترین تنش‌ها در ساختارهای ساندویچی تحت خمش، 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 می‌باشد، 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 خمش نمونه‌ها بدست آمده است. سفتی خمشی مربوط به هر نمونه آزمون



شکل ۷ شروع خرابی نمونه خمش از رویه بالایی

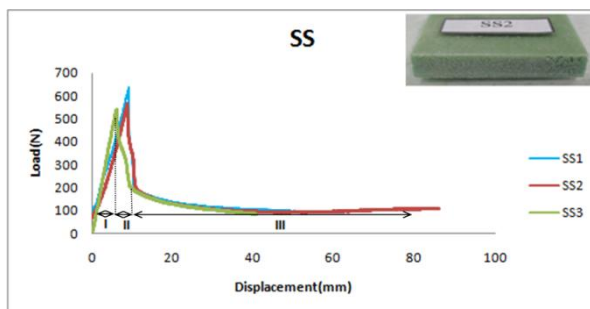
شده، با استفاده از مقادیر نیرو در ناحیه الاستیک و جابه‌جایی متناظر با آن، بدست آمده است. با توجه به غالب بودن اثر خمش در نمونه‌های بلند نسبت به اثر برش، مقدار دقیق سفتی خمشی نمونه‌ها از رابطه (۱) بدست می‌آید [۱۲]. در ادامه به بیان و بررسی این نمودارها برای هر یک حالت از نمونه‌ها پرداخته شده است.

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

#### ۴-۱-۱- نمونه‌ها با هسته ساده

شکل ۸ نمودار نیرو-جابه‌جایی در نمونه ساده را نشان می‌دهد. نمونه ساده نمونه‌ای است که در هسته آن هیچ تغییری ایجاد نشده است و هسته 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.



شکل ۸ نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه‌ها با هسته ساده

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

- ناحیه اول مربوط به تغییر شکل الاستیک نمونه می‌باشد. نمونه در این ناحیه رفتار خطی و الاستیک از خود نشان می‌دهد.
  - ناحیه دوم پس از کامل شدن تغییر شکل الاستیک قطعه و شروع ناحیه 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 آنرا تا حدود ۶۸/۵٪ کاهش می‌دهد.
  - در ناحیه 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 خمش نمونه‌ها با هسته ساده آمده است.

#### ۴-۱-۲- نمونه‌ها با هسته ترکیبی و ضخامت یک لایه برای لمینیت موج‌دار

شکل ۹ نمودار نیرو-جاب‌جایی مربوط به آزمون خمش نمونه‌ها با هسته ترکیبی شامل فوم PVC و یک لایه کامپوزیت موج‌دار با هندسه مربعی را نشان می‌دهد. از این حالت مانند تمام حالت‌های دیگر، سه عدد نمونه ساخته شده و با کدهای A11، A12 و A13 نام‌گذاری شده‌اند. در این شکل هر سه آزمون انجام شده بر روی این حالت، یکجا نشان داده شده است.

جدول ۴ نتایج تجربی آزمون خمش نمونه‌ها با هسته ساده

$D/M$	$D$	$M$	$m\delta$	$P_m$	-
۰/۳۷۰۱	۲۲/۵۸	۶۱	۹/۱۶	۶۳۵/۴	SS1
۰/۳۵۰۶	۲۱/۰۴	۶۰	۸/۷۴	۱/۹۴	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

همانطور که از شکل ۹ مشخص است هر سه نمونه رفتار مشابهی را از خود نشان می‌دهند. منحنی‌های نیرو-جابجایی نشان داده شده در این شکل را می‌توان به سه ناحیه مجزا تقسیم‌بندی کرد،

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

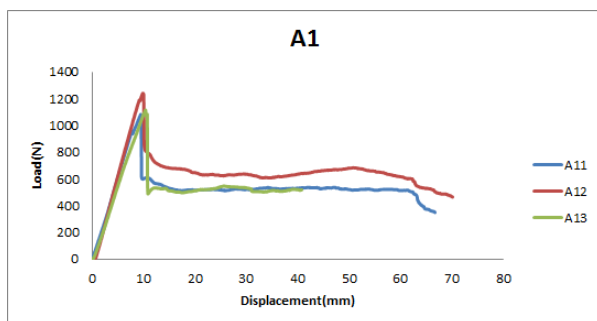
- ناحیه دوم ناحیه‌ای است که نیرو پس از افت پیشین، به مقدار کمی افزایش یافته و در ادامه تقریباً ثابت می‌ماند. در واقع پس از شکست رویه بالایی، دیگر باری توسط رویه بالایی تحمل نمی‌شود و بار وارد بر نمونه بر هسته منتقل می‌شود. اما با توجه به وجود یک لایه کامپوزیت موج‌دار با هندسه مربعی در داخل هسته، قسمت‌های بالایی این لایه که در مجاورت رویه بالایی قرار دارد، خود نقش رویه‌ای جدید برای هسته 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 لایه کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته، بار به هسته فومی و در ادامه به قسمت 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 بدست آمده از آزمون خمش نمونه‌ها با هسته ترکیبی شامل فوم PVC و یک لایه کامپوزیت موج‌دار از جنس شیشی-اپوکسی با هندسه مربعی آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود علاوه بر سفتی خمشی، نسبت سفتی خمشی به جرم نیز در مقایسه با نمونه‌ای با هسته ساده افزایش داشته است. سفتی خمشی به طور میانگین به مقدار ۵۷.۸۸٪ و نسبت سفتی خمشی به جرم به طور میانگین ۸.۴۱٪ در این حالت در مقایسه با نمونه‌ای با هسته



ساده افزایش داشته‌اند. علت کمتر بودن افزایش نسبت سفتی خمشی به وزن در مقایسه با سفتی خمشی، افزایش چگالی نمونه با افزودن یک لایه کامپوزیت شیشه-اپوکسی موج‌دار به هسته می‌باشد.



شکل ۹ نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه‌ها با هسته ترکیبی با ضخامت یک لایه برای لمینیت موج‌دار

جدول ۵ نتایج خمش نمونه‌ها با هسته ترکیبی با ضخامت یک لایه برای لمینیت موج‌دار

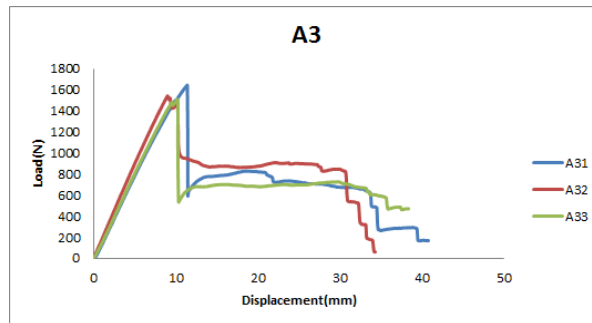
$D/M$	$D$	$M$	$m\delta$	$P_m$	-
$(\frac{Nmm^2}{cm^2})$	$(Nmm^2)$	$(N)$	$(\frac{mm}{cm})$	$(N)$	
۰/۴۵۲۰	۳۹/۷۸	۸۸	۹/۴۱	۱۲۴	A11
۰/۴۳۰۶	۳۹/۶۲	۹۲	۹/۸۲	۱۵۵	A12
۰/۴۱۲۵	۳۵/۸۹	۸۷	۱/۶۶	۱۷	A13
۰/۴۳۱۷	۳۸/۴۳	۸۹	۹/۹۶	۱۱۶	میانگین
۰/۰۱۹۷۷	۲/۲	۲/۶۴	۱/۶۳۷	۹۰/۴۱	انحراف

#### ۴-۱-۳- نمونه‌ها با هسته ترکیبی و ضخامت سه لایه برای لمینیت موج‌دار

شکل ۱۰ نمودار نیرو-جاب‌جایی مربوط به این حالت را نشان می‌دهد. در این حالت سه لایه کامپوزیت موج‌دار با شکل هندسه مربعی در داخل هسته فومی تعبیه شده است. از این حالت مانند تمام حالت‌های دیگر، سه عدد نمونه ساخته شده و با کدهای A31، A32 و A33 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 هسته ترکیبی ضخامت یک لایه برای لمینیت موج‌دار 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

هسته ساده افزایش داشته است. سفتی خمشی به طور میانگین به مقدار ۱۲۲.۸۸٪ و نسبت سفتی خمشی به جرم به طور



شکل ۱۰ نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه‌ها با هسته ترکیبی با ضخامت سه لایه برای لمینیت موج‌دار

جدول ۶ نتایج خمش نمونه‌ها با هسته ترکیبی با ضخامت سه لایه برای لمینیت موج‌دار

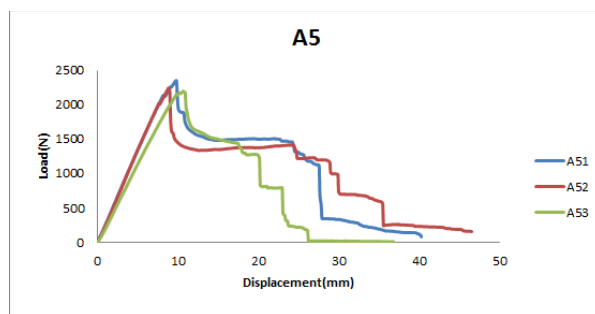
$D/M$	$D$	$M$	$m\delta$	$P_m$	-
۰/۴۷۹۹	۵۱/۳۵	۱۰۷	۱/۴۱	۱/۱۴	A31
۰/۵۳۲۴	۵۹/۱	۱۱۱	۹	۱/۶۵	A32
۰/۵۱۸۰	۵۲/۳۲	۱۰۱	۱/۱۶	۱/۵۶	A33
۰/۵۱۰۱	۵۴/۲۵	۱۰۴	۱/۱۹	۱/۷۸	میانگین
۰/۰۲۷۱۲	۴/۲۲	۵/۰۳	۱/۲	۷۳/۱۱	انحراف

میانگین ۲۸.۱٪ در این حالت در مقایسه با نمونه‌ای با هسته 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 می‌باشد.

#### ۴-۱-۴- نمونه‌ها با هسته ترکیبی و ضخامت پنج لایه برای لمینیت موج‌دار

شکل ۱۱ نمودار نیرو-جاب‌جایی مربوط به این حالت را نشان می‌دهد. در این حالت پنج لایه کامپوزیت موج‌دار با شکل هندسه مربعی داخل هسته فومی تعبیه شده است. از این حالت مانند تمام حالت‌های دیگر، سه عدد نمونه ساخته شده و با کدهای A51، A52 و A53 نام‌گذاری شده‌اند. در این شکل هر سه آزمون انجام شده بر 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 ضخامت یک و سه لایه را از خود نشان می‌دهند. در جدول ۷ 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 هسته ساده افزایش داشته است. سفتی خمشی به طور میانگین به مقدار ۲۳۹.۸۱٪ و نسبت سفتی خمشی به جرم به طور میانگین ۴۷.۱۱٪ در این حالت در مقایسه با نمونه‌ای با هسته ساده افزایش داشته‌اند. علت کمتر بودن افزایش نسبت سفتی خمشی به وزن در مقایسه با سفتی خمشی، افزایش چگالی نمونه با افزودن پنج لایه کامپوزیت شیشه-اپوکسی موج‌دار به هسته می‌باشد.



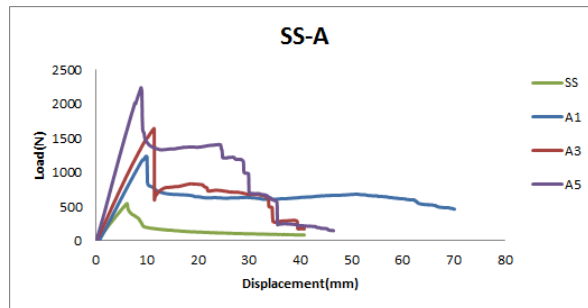
شکل ۱۱ نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه‌ها با هسته ترکیبی با ضخامت پنج لایه برای لمینیت موج‌دار

جدول ۷ نتایج خمش نمونه‌ها با هسته ترکیبی با ضخامت پنج لایه برای لمینیت موج‌دار

$D/M$	$D$	$M$	$m\delta$	$P_m$	-
$\frac{Nm^2}{m^2}$	$\frac{Nm^2}{m^2}$	$\frac{Nm^2}{m^2}$		$\frac{N}{m^2}$	
۰/۱۶۰۵۲	۸۷/۷۶	۱۴۵	۹/۷۵	۱/۸۵	A51
۰/۱۶۰۹۰	۸۶/۴۹	۱۴۲	۸/۸۳	۱/۷۹	A52
۰/۱۵۴۳۲	۷۳/۸۸	۱۳۶	۱/۶۶	۱/۱۰	A53
۰/۱۵۸۵۸	۸۲/۷۱	۱۴۱	۹/۷۴	۱/۲۴	میانگین
۰/۰۳۶۹۴	۷/۶۷	۴/۵۸	۱/۹۱۵	۸۳/۳۸	انحراف

#### ۴-۱-۵- مقایسه آزمون خمش نمونه‌ها

در شکل ۱۲ نمودارهای نیرو بر حسب جاب‌جایی حاصل از آزمون تجربی نمونه‌ها با هسته ساده و هسته ترکیبی به صورت مقایسه‌ای آورده شده است. مشاهده می‌شود که برای همه نمونه‌ها با هسته ترکیبی علاوه بر افزایش شیب نمودار در ناحیه الاستیک که نشان دهنده افزایش سفتی خمشی نمونه می‌باشد، میزان بیشترین بار خمشی تحمل‌شده توسط نمونه و همچنین جاب‌جایی متناظر با آن، نسبت به نمونه با هسته ساده افزایش داشته‌اند. میزان این افزایش نسبت به نمونه با هسته ساده نیز به ترتیب از حالت A5 به A3 و A1 افزایش داشته است.



شکل ۱۲ نمودارهای نیرو-جاب‌جایی مقایسه‌ای نمونه‌ها

#### ۴-۲- نتایج تحلیل عددی

در این قسمت نتایج حاصل از حل عددی نرم‌افزار ABAQUS، 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 هسته ترکیبی با ضخامت پنج لایه برای لمینیت کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته، می‌باشد. این حالت با داشتن سفتی خمشی برابر با ۷۵.۷ نیوتون در مترمربع، افزایش تقریباً ۱۹۸ درصدی در سفتی خمشی را نسبت به نمونه با هسته ساده به خود اختصاص داده است. این در حالی است که نمونه با هسته ترکیبی با ضخامت یک لایه برای لمینیت کامپوزیتی موج‌دار با داشتن سفتی خمشی برابر با ۴۱.۰۷ نیوتون در مترمربع و با افزایش تقریباً ۶۲ درصدی نسبت به نمونه هسته ساده، کمترین افزایش در سفتی خمشی را نسبت به نمونه با هسته 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. همانند ویژگی سفتی خمشی نمونه‌ها، میزان سفتی خمشی به وزن نمونه‌ها، بیشترین افزایش نسبت به نمونه با هسته ساده را در نمونه با هسته ترکیبی و ضخامت پنج لایه برای لمینیت کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته داشته است. که این افزایش با توجه به مقادیر جدول ۸، تقریباً ۲۷ درصد می‌باشد. این در حالی است که کمترین افزایش در میزان سفتی خمشی به وزن نمونه‌ها نسبت به نمونه با هسته ساده، مربوط به نمونه با هسته ترکیبی و ضخامت یک لایه برای لمینیت کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته می‌باشد. که این افزایش با توجه به مقادیر جدول ۸ تقریباً ۱۳ درصد می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد لایه‌های لمینیت کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته فومی از ۱ به ۳ و سپس به ۵؛ مقدار پارامتر نسبت خمشی به جرم به میزان کمتری افزایش می‌یابد. چراکه برای حالت A3 این پارامتر به میزان تقریباً ۲۶ درصد افزایش داشته است؛ و این مقدار در مقایسه با حالت A5 که ۲۷

درصد افزایش داشته است، تفاوت چندانی ندارد. مقدار خطا از ۲.۳۴٪ که مربوط به سفتی خمشی به جرم حالت A3 می‌باشد تا ۱۰.۱۴٪ که مربوط به سفتی خمشی به جرم حالت است A5، تغییر می‌کند، که نشان دهنده تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی می‌باشد.

جدول ۸ نتایج عددی و مقایسه آن با نتایج تجربی

خطا r(%)	D/M Nm <sup>2</sup> /g	خطا r(%)	D (Nm <sup>2</sup> )	خطا r(%)	M (g)	کد نمونه
۴/۰۵	۰/۴۱۴۷	۴/۱۸	۲۵/۳۸	۳۲	۶۱/۲	SS
۸/۲۳	۰/۴۶۸۸	۶/۶۴	۴۱/۰۷	۱۵۸	۸۷/۶	A1
۲/۳۴	۰/۵۲۲۲	۶/۲۶	۵۷/۷۶	۱۹۳	۱۶	A3
۱/۴۱	۰/۵۲۷۸	۸/۸۵	۷۵/۷	۱۶۸	۱۴	A5

#### ۴- تقدیر و تشکر

در این مقاله از دانشگاه پدافند هوایی که در تامین نیازهای آزمایشگاهی همکاری لازم را نمودند تشکر و قدردانی می‌نمایم.

#### ۵- نتایج و بحث

در این مقاله اثر افزودن یک چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار از جنس شیشه-اپوکسی با هندسه مربعی و با سه ضخامت مختلف، به هسته فومی یک ساختار ساندویچی با روبه‌های کامپوزیتی از جنس شیشه-اپوکسی، در رفتار خمشی این نوع سازه‌های ساندویچی بررسی شده است. مشاهده شد که در همه حالت‌ها با هر یک از ضخامت‌های انتخابی برای چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته، علاوه بر سفتی خمشی، نسبت سفتی خمشی به وزن نیز افزایش داشته است.

علاوه بر این مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته از یک به سه و سپس به پنج لایه میزان افزایش در بیشترین بار تحملی توسط نمونه و همچنین شیب ناحیه الاستیک، بیشتر می‌شود. با توجه با مقادیر جدول‌های ۴ تا ۷ بیشترین افزایش در میزان بار خمشی تحملی توسط نمونه مربوط به نمونه با ضخامت پنج لایه برای چندلایه‌ای کامپوزیتی موج-دار داخل هسته می‌باشد که برابر با ۲۸۹.۵۹٪ می‌باشد. کمترین این افزایش نیز مربوط به نمونه با ضخامت یک لایه و برابر با ۹۵.۰۶٪ می‌باشد. همچنین بیشترین افزایش در سفتی خمشی نیز مربوط به نمونه با ضخامت پنج لایه برای چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته می‌باشد که برابر با ۲۳۹.۸۱٪ می‌باشد. کمترین میزان افزایش در سفتی خمشی نیز مربوط به نمونه با ضخامت یک لایه و به مقدار ۵۷.۸۸٪ می‌باشد.

اما با افزودن یک چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار با هندسه مربعی به هسته 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 می‌باشد. با توجه به یکسان بودن حجم همه نمونه‌ها، پارامتر نسبت سفتی خمشی به جرم مدنظر قرار گرفته است. با توجه به نتایج ارائه شده

در جدول‌های ۴ تا ۷، در همهٔ حالت‌ها با هستهٔ ترکیبی، این نسبت نیز در مقایسه با نمونه‌ای با هستهٔ سادهٔ فومی افزایش داشته است. بیشترین این افزایش مربوط به نمونه‌ای با ضخامت پنج لایه برای چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته و به مقدار ۴۷.۱۱٪ می‌باشد. کمترین این افزایش نیز مربوط به نمونه‌ای با ضخامت یک لایه برای چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته و به مقدار ۸.۱۱٪ می‌باشد. اما کاملاً مشهود است که با افزایش ضخامت چندلایه‌ای کامپوزیتی موج‌دار از سه به پنج لایه بر روند صعودی افزایش پارامتر نسبت سفتی خمشی به جرم بطور قابل توجهی کاسته می‌شود؛ چراکه این پارامتر برای حالت A3 (سه لایه لمینیت کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته فومی) تقریباً ۲۷ درصد نسبت به نمونه ساده رشد داشته است ولی برای حالت A5 (پنج لایه لمینیت کامپوزیتی موج‌دار داخل هسته فومی) تنها با اختلاف یک درصدی به مقدار ۲۸ درصد نسبت به نمونه ساده رشد داشته است. این اختلاف کم حالت A5 نسبت به حالت A3 ناشی از افزایش قابل توجه وزن نمونه با افزایش تعداد لایه‌های کامپوزیتی داخل هسته از سه به پنج می‌باشد.

#### فهرست علائم

$b$	عرض کل نمونهٔ خمش (m)
$D$	سفتی خمشی ( $N \times m^2$ )
$d$	ضخامت کل نمونهٔ خمش (m)
$E$	ثابت الاستیک کششی (Pa)
$G$	ثابت الاستیک برشی (Pa)
$I$	گشتاور اینرسی سطح ( $m^4$ )
$L$	طول کل نمونهٔ خمش (m)
$M$	جرم کل نمونهٔ خمش (g)
$P$	بار خمشی (N)
$t_c$	ضخامت هسته در نمونهٔ خمش (m)
$t_s$	ضخامت رویه در نمونهٔ خمش (m)
$t^*$	ضخامت چندلایهٔ کامپوزیتی موج‌دار (m)
$v$	نسبت پواسون
$\rho$	چگالی ( $kg/m^3$ )
$\lambda$	گام چندلایهٔ کامپوزیتی موج‌دار (m)
$\delta$	جابه‌جایی عرضی نمونه در محل بارگذاری (m)

## ۶- 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. Woldesenbet, 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.3AComposites.com](http://www.corematerials.3AComposites.com).
- [9] AF301 E-glass woven, Accessed 8 June 2012; [http://www.colan.com.au/prod\\_01.html](http://www.colan.com.au/prod_01.html).
- [10] SR1700 epoxy resin, Accessed 10 June 2012; <http://www.sicomin.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.