



بررسی تجربی و عددی تأثیر جنس، قطر و تعداد تقویت‌کننده سیم فلزی به‌عنوان تقویت‌کننده در

هسته‌های فومی پنل‌های ساندویچی بر استحکام خمشی

فرزاد امیری^۱، جعفر اسکندری جم^۲، محمدحسین علایی^{۳*}

^۱ کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

^۲ استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

^{۳*} استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۰۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۴

چکیده

در این مطالعه، تأثیر پارامترهای مختلف سیم‌های فلزی در هسته‌های فومی پنل‌های ساندویچ به‌عنوان تقویت‌کننده جهت بهبود خواص خمشی مورد بررسی قرار گرفت. سه پارامتر شامل تعداد سیم‌ها (۱، ۲، و ۳ سیم)، جنس سیم‌ها (آلومینیومی، آهنی، و فولادی)، و قطر آن‌ها (۰٫۷۵ میلی‌متر، ۱ میلی‌متر، و ۱٫۵ میلی‌متر) به‌عنوان پارامترهای ورودی و استحکام خمشی و مدول خمشی به‌عنوان پارامترهای خروجی انتخاب شده‌اند. برای ارزیابی پارامترها و صحت‌سنجی مدل عددی با استفاده از نمونه اولیه استفاده شد و شبیه‌سازی آزمون‌های پیشنهادی با نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. نتایج نشان دادند که نمونه بهینه با اولویت استحکام به وزن شامل سه عدد سیم فولادی به قطر ۱ میلی‌متر در هر طرف است. همچنین با افزایش تعداد و قطر سیم‌ها، استحکام بالاتری را به‌همراه داشته اما این رابطه همیشه در مورد بررسی استحکام به وزن نمونه درست نیست. افزایش ویژگی‌های مکانیکی سیم منجر به افزایش کلی استحکام سازه می‌شود، به‌طوری که استحکام خمشی پنل ساندویچ تقویت‌شده با سه عدد سیم فولادی به قطر ۱ میلی‌متر حدود ۴۳٪، مدول خمشی حدود ۸۰٪، استحکام خمشی به وزن به میزان ۲۱٪ و مدول خمشی ویژه به میزان ۵۴٪ افزایش یافت.

کلمات کلیدی: کامپوزیت؛ سازه‌های ساندویچی؛ تقویت هسته فومی؛ تقویت‌کننده فلزی.

Numerical and Experimental Analysis of the Effect of Material, Diameter and Number of wires as the Reinforcements of the Foam Core in the Bending behavior of Sandwich Panels

Farzad Amiri¹, Jafar Eskandari Jam², Mohammad Hossein Alaei^{3*}

¹ MSc. Student, Mech. Eng., Malek Ashtar University, Tehran, Iran

² Prof., Mech. Eng., Malek Ashtar University, Tehran, Iran

³ Assoc. Prof., Mech. Eng., Malek Ashtar University, Tehran, Iran

Abstract

In this study, we've investigated the impact of various metallic wire parameters used to reinforce the foam cores of sandwich panels and improve bending properties. The study focused on three key parameters: the number of wires (1, 2, and 3), wire materials (aluminum, iron, and steel), and their diameters (0.75 mm, 1 mm, and 1.5 mm). These parameters were input variables, with specific bending strength and structural modulus as the output variables for the experimental design. To evaluate these parameters, a numerical model was initially validated using a physical prototype. An experiment was then designed using Mini Tab software, applying the Taguchi method, and the proposed tests were simulated using Abaqus software. Results showed that the optimal configuration, prioritizing strength-to-weight ratio, included three 1-mm diameter steel wires on each side. As the number and diameter of wires increased, overall strength generally improved, although this relationship may not always apply when assessing strength-to-weight ratios. Improving the wire's mechanical properties enhanced the structural strength. For example, the bending strength of the sandwich panel reinforced with three 1-mm diameter steel wires increased by about 43%, the bending modulus by approximately 80%, the specific strength-to-weight ratio by 21%, and the special bending modulus by 54%

Keywords: Composites; sandwich panel; Foam core; metallic reinforcement.

۱- مقدمه

از شروع اولین پرواز هواپیما، تحقیقات پیوسته ای جهت کاهش وزن کلی سازه در کنار حفظ استحکام و سفتی انجام پذیرفت که در این راستا استفاده از سازه های ساندویچی نقش مهمی ایفا می کند. این کار، برای اولین بار در جنگ جهانی دوم، بر روی سطوح کنترل یک هواپیمای انگلیسی به نام ماسکیتو^۱ با استفاده از پوسته هایی از جنس چوب چندلایه و هسته هایی از جنس چوب بالسا، سازه ساندویچی به کار گرفته شد. از این زمان به بعد با اصلاح و بهینه سازی آن ها، سازه های ساندویچی در صنایع زیادی، از ماهواره های پیشرفته تا مبلمان منازل، مورد استفاده قرار می گیرد [۱-۲].

فروود و همکاران [۳] یک روش تحلیلی ساده جهت محاسبه نسبت بهینه بین وزن پوسته و هسته به منظور دستیابی به استحکام و سفتی خمشی بالای تیرهای ساندویچی ارائه کرد. نتایج آن ها نشان داد، در صورتی که نسبت وزن هسته به وزن کل سازه، با فرض وجود یک هسته ضخیم و پوسته های نازک، به میزان دوسوم باشد، بیشترین سفتی خمشی حاصل می گردد. اقدامات متنوع دیگری جهت بالا بردن خواص پنل های ساندویچی انجام شده است. مستو و همکاران [۴] یک نمونه از هسته جدید تحت عنوان جایگزین هسته های هرمی شکل پنل ساندویچی ارائه کردند. در این پژوهش ابتدا شکل سنتی هسته های هرمی شکل ساخته و بعد از انجام آزمایش توسط نرم افزار آباکوس صحت سنجی گردید. سپس نمونه های پیشنهادی توسط همین نرم افزار مدل سازی و روی آن تحلیل انجام گردید. نوروزی و همکاران [۵] در مقاله خود در ابتدا یک هندسه هسته جدید پنل ساندویچی با هسته ای به صورت یک شبکه منظم از رویه های آلومینیومی را معرفی و رفتار آن را تحت بارگذاری فشاری بررسی کردند. سرینواسان و همکاران [۶] به بررسی پاسخ ضربه و اثر دوختن یک پنل ساندویچی فوم-شیشه/اپوکسی با الیاف بافته شده پرداختند. در این تحقیق سه نمونه به صورت بدون دوخت، دوخت متوسط و دوخته شده ی سنگین بررسی شد. در تحقیق مشابه کریشنان و همکاران [۷] پاسخ ضربه سرعت پایین پنل های ساندویچی دوخته شده با الیاف پیش آغشته به رزین را در

زوایای مختلف دوختن بررسی کردند. راماکریشنان [۸] مقاله ای باهدف ارزیابی اثر افزودن تقویت کننده نانو، به ماتریس اپوکسی در مورد رفتار ضربه با سرعت پایین پنل های ساندویچی با پوسته کولار و فوم ارائه کرد. اکثر مطالعات قبلی در مورد خسارت ضربه با سرعت پایین، آزمایش تجربی را مورد استفاده قرار دادند. مهدی جاوید و همکاران [۹] تأثیر استفاده از فوم های نانو کامپوزیتی پلیمری در بهبود خواص مکانیکی و قابلیت جذب انرژی پنل های ساندویچی به صورت تجربی و همچنین با رویکرد تعمیم، یک روش المان محدود چندمقیاسه را مورد بررسی قرار دادند.

غلامی و همکاران [۱۰] اثر ضربه سرعت بالا را بر پنل های ساندویچی با رویه های کامپوزیتی و یک هسته پلی اورتان بررسی کردند و اعلام کردند که افزایش چگالی هسته فوم، اثر قابل توجهی بر جذب انرژی دارد. داور و همکاران [۱۱] به بررسی تجربی و عددی ضربه سرعت پایین در پنل ساندویچی با دو هسته مشبک مجزا از جنس آلومینیومی و شیشه اپوکسی پرداخته و صلیبیت محل برخورد را موجب کاهش آسیب برش کردند.

وانگ و همکاران [۱۲ و ۱۳] جذب انرژی سازه های هیبریدی فلزی، کامپوزیتی و فلزی/کامپوزیتی تحت بارگذاری مایل لهیدگی را مورد بررسی قرار دادند. آن ها به طور خاص، از شبکه سیم فولادی ضدزنگ روی ضربه با سرعت پایین استفاده کردند و پاسخ این شبکه ها را برای این شرایط صفحات کامپوزیتی مورد بررسی قرار دادند. آن ها در تحقیقاتی دیگر، اثر آلیاژهای حافظه دار یا SMAs^۲ های مختلف در پنل های ساندویچی چندلایه شیشه اپوکسی تحت آزمون ضربه با سرعت پایین برای بهبود رفتار ضربه ای صفحات ساندویچی را مورد بررسی قرار داده و اعلام کردند، تعبیه شبکه های سیمی به طور قابل توجهی جذب انرژی و مقاومت در برابر ضربه و همچنین مقاومت کششی را بهبود می بخشد. محمدخانی و همکاران [۱۴] در مقاله خود، به بررسی تجربی و عددی برای بررسی جذب انرژی پنل های ساندویچی با استفاده از هسته فوم پلی اورتان و رویه های شیشه/اپوکسی تقویت شده با سیم های فولاد ضدزنگ، تحت اثر ضربه سرعت پایین پرداختند. در طول مطالعه تجربی بیست و پنج نمونه در پنج

^۱ Mosquito^۲ Shape-memory alloys

بارگذاری امکان دارد در یک پنل ساندویچی رخ دهد، می‌توان به استحکام ناکافی سازه، سفتی ناکافی سازه، کم‌انرژی سازه، جدایش پوسته از هسته، چروکیدگی پوسته، کم‌انرژی بین سلولی و موجدار شدن اشاره کرد [۲۲]. لی و همکاران [۲۳] رفتار تخریب شکستگی لانه‌زنبوری را مورد بررسی قرار دادند و فرایند شکست هسته لانه‌زنبوری در ساختارهای ساندویچی را مورد بررسی قرار دادند. پتراس و ساتکلیف [۲۴]، جزئیات نقاط مختلف شکست در تیرهای ساندویچ لانه‌زنبوری را مطالعه کرده و نقشه‌های شکست حالت را نیز توسعه دادند؛ همچنین حمزه لو و همکاران [۲۵] با تحلیل داده‌های آکوستیکی، به بررسی و تشخیص مکانیزم‌های خرابی در پنل‌های ساندویچی کامپوزیت پلی‌استر/ شیشه با هسته فوم پلی‌اورتان در آزمون خمش سه‌نقطه با اعمال تضعیف اولیه حاصل از ضربه‌های با انرژی مختلف پرداختند.

با بررسی تحقیقات گذشته مشخص شد که از بین روش‌های مختلف جهت بهبود استحکام ساختارهای ساندویچی کامپوزیتی، تأثیر وجود سیم‌های فلزی به‌عنوان تقویت‌کننده سازه ساندویچی و به‌خصوص درون هسته فومی ساندویچ پنل‌ها و همچنین بررسی پارامترهای مؤثر آن‌ها بر استحکام خمشی پنل ساندویچی تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. در این تحقیق به بررسی تأثیر جنس، قطر و تعداد تقویت‌کننده سیم فلزی به‌عنوان تقویت‌کننده در هسته‌های فومی پنل‌های ساندویچی بر استحکام خمشی به روش تجربی و عددی برای اولین بار پرداخته شده است.

۲- مواد و طراحی آزمایش

الیاف شیشه به‌دلیل دارا بودن مدول الاستیسیته عالی، چگالی پایین، مقاومت در برابر شوک‌های حرارتی، قیمت پایین و عایق الکتریکی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش از پارچه شیشه حصیری ۲۲۰ گرمی و بافت ساده به‌صورت چهار لایه در بالا و چهار لایه در پایین فوم به‌منظور ساخت پنل ساندویچی استفاده شده است. خواص مکانیکی این مواد در جدول‌های ۱ و ۲ قابل مشاهده است. به‌منظور تقویت فوم از سه نوع سیم با خواص متفاوت (فولادی مدول بالا، فولادی مدول پایین (آهنی) و آلومینیومی) در شبیه‌سازی استفاده شده که خواص آن‌ها در

چیدمان مختلف سیم در قسمت فوقانی ساندویچ پنل ساخته شد که علی‌رغم افزایش خواص جذب انرژی در نهایت یکی از چالش‌های این طرح را جدایش رویه از هسته برشمردند.

آنتونیو فورمیسانو و همکاران [۱۵] در مقاله‌ی خود از یک روش نوآورانه برای تقویت پنل‌های ساندویچی هسته فوم-فلزی استفاده کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد، فوم‌های آلومینیومی برای تضمین سبکی و عملکرد نسبتاً بالای مکانیکی، یک راه‌حل بالقوه هستند.

نجفی و همکاران [۱۶] یک پنل ساندویچی با هسته هیبریدی متشکل از کورک آگلومره و فوم پلی‌یورتان کم‌چگالی، تقویت‌شده با ساختار مشبک کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه را به‌عنوان هسته نوآورانه طراحی، ساخته و مورد آزمون قرار دادند.

جورج و همکاران [۱۷] ساندویچ پنل‌های کامپوزیت پلیمر تقویت‌شده الیاف کربن همراه با فوم تقویت‌شده با یک خرابی مشخص از جنس پلیمر تقویت‌شده با الیاف کربن را تحت عنوان ساندویچ پنل‌های هیبریدی مورد بررسی قرار دادند. سگری اوزی [۱۸] از مش‌های سیمی فولادی در پوسته پنل‌های ساندویچی استفاده کرده و به نتایج مثبتی دست یافتند. ورقه‌های سیمی به‌طور مطلوب ظرفیت‌های بارکشی کامپوزیت‌های کربن/اپوکسی را تحت تأثیر قرار دادند. ماهر و همکاران [۱۹] در کار پژوهشی خود به بررسی رفتار پنل ساندویچی مرکب هسته موج‌دار با ورق‌های کامپوزیت تقویت‌شده توسط سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار که در معرض ضربه با سرعت بالا قرار گرفته‌اند را به‌صورت تجربی بررسی کردند. آنتونیو فورمیسانو و همکاران [۲۰] بر پایه تحقیق قبلی خود موفق به ارائه یک مدل جدید دیگر از سازه‌های ساندویچی شدند که شامل یک مش فلزی درون هسته به شکل هسته موج‌دار پر شده با فوم آلومینیومی بوده است. جیفو و همکاران [۲۱] به مطالعه‌ای باهدف توسعه و شناسایی پنل‌های ساندویچی جدید مبتنی بر هسته‌های هیبریدی متشکل از میلی‌لوله‌های آلومینیومی و ماتریس پلیمری پرداختند و دو نوع هسته هیبریدی مستحکم پیشنهاد کردند. سازه‌های ساندویچی از ترکیب اجزاء مختلف تشکیل شده‌اند که این خود باعث رفتار مکانیکی پیچیده و بروز انواع مختلف خرابی در این سازه‌ها می‌گردد. از مهم‌ترین انواع تخریب در سازه‌های ساندویچی که در اثر اعمال شرایط محیطی و یا

در این تحقیق به ساخت نمونه ساندویچ پل با رویه های کامپوزیتی چندلایه و تعبیه سیم های فلزی در هسته ی آن، به منظور بررسی تأثیر پارامترهای آن بر خواص خمشی به دو روش تجربی و عددی پرداخته شده است. پارامترهای این تحقیق عبارتند از:

- تعداد تقویت کننده ها یا سیم ها در هسته (تعداد یک سیم، دو و سه عدد سیم در هر طرف پل ساندویچی)
- جنس تقویت کننده ها (آلومینیومی، آهنی و فولادی (استیل ضد زنگ))
- ابعاد تقویت کننده قطر سیم (سه قطر مختلف سیم با ابعاد ۰/۷۵، ۱ و ۱/۵ میلی متر)

علت انتخاب این پارامترها عوامل تأثیرگذار در انتخاب سیم تقویت کننده است؛ به عنوان مثال بالا رفتن وزن سازه با استفاده از تعداد سیم بیشتر و سیم ضخیم تر یا هزینه ی انجام پروژه که می تواند عامل تعیین کننده در راستای انتخاب بین سیم آهنی و استیل باشد؛ همچنین نسبت استحکام خمشی به وزن (استحکام ویژه) و مدول خمشی ویژه به عنوان پارامترهای خروجی در نظر گرفته شده اند.

فرآیندهایی که در خروجی آن ها یک مشخصه کیفی، یک خواصه مشتری یا هر مشخصه دیگری مورد نیاز است، این تحلیل ها اغلب به وسیله نرم افزارهای تحلیل آماری انجام می شود که معروف ترین آن ها مینی تب^۱ و دیزاین اکسپرت^۳ است. روش مورد استفاده در این تحقیق روش تاگوچی است که طراحی های انعطاف پذیر و مهندسی شده را به طور هم زمان تسهیل می کند و قدرتمندترین روش موجود برای کاهش هزینه محصول، بهبود کیفیت و هم زمان کاهش فاصله توسعه است. با توجه به پارامترهای بیان شده، در نهایت با استفاده از نرم افزار مینی تب و روش تاگوچی طراحی آزمایش انجام گرفت که با روش L-9 در کل تعداد ۹ عدد آزمایش توسط نرم افزار پیشنهاد شده است.

جدول ۳ قابل مشاهده است (خواص آهن دریافت شده از تولید کننده).

همچنین از رزین اپوکسی با نام تجاری آردلایت ۵۰۵۲۱ با چگالی ۰/۹۴ گرم بر سانتی متر مکعب و مدول کششی ۲ گیگاپاسکال به عنوان زمینه رویه های پل ساندویچی و همین طور به عنوان چسب از همین رزین استفاده گردید.

جدول ۱ - مشخصات پارچه شیشه [۲۶]

ویژگی	مقدار	واحد
چگالی	۲۲۰	g/m ²
ضریب هدایت حرارتی	۵/۱	10 ⁻⁶ C ⁻¹
مدول کششی	۷۰	GPa

جدول ۲ - مشخصات فوم پلی یورتان مورد استفاده [۲۶]

ویژگی	مقدار	واحد
چگالی	۳۸	Kg/m ³
ضخامت	۰/۰۴	m
مدول الاستیک	۰/۰۰۵۴	GPa

جدول ۳ - مشخصات تقویت کننده های فلزی [۲۶]

جنس	چگالی (g/cm ³)	مدول الاستیک (GPa)	نسبت بواسون
آهن	۷/۸	۱۷۰	۰/۳
آلومینیوم	۲/۸	۷۰	۰/۳
فولاد	۸	۲۱۰	۰/۳

همچنین خواص کامپوزیت شیشه/اپوکسی که توسط آزمایش های تجربی در کارگاه کامپوزیت دانشگاه مالک اشتر به دست آمده، در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴ - خواص مکانیکی کامپوزیت شیشه/اپوکسی

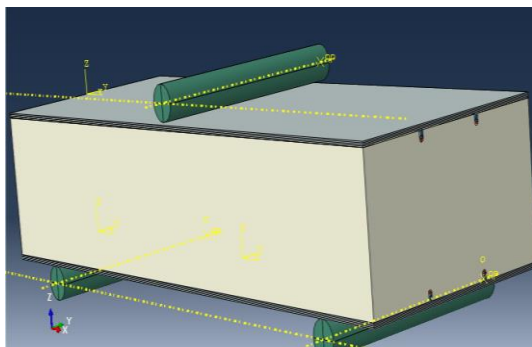
پارامتر	E ₁₁	E ₂₂	E ₃₃
مقدار	۲۶/۶	۲۶/۶	۱۰/۲
	۰/۲	۰/۲	۰/۲
	۰/۲	۰/۲	۰/۲
	۰/۲	۰/۲	۰/۲

¹ Mini tab

³ Design expert

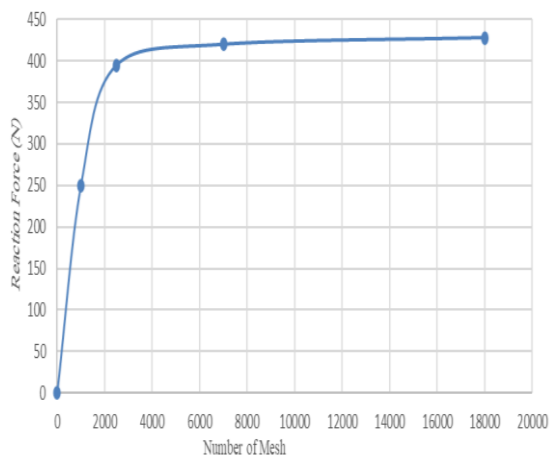
¹ Ard lite ly5052

میلی‌متر در نظر گرفته شد که در ادامه به آن پرداخته شده است.



شکل ۱- مدل مونتاژ شده پنل ساندویچی

پس از تعریف بارگذاری و شرایط مرزی به انتخاب نوع مش بندی پرداخته شده است. برای تعیین نوع المان، با توجه به این‌که ماده مورد استفاده نرم و دقت بررسی در قطعه مهم است، از المان ۸ گره‌ای و سه‌بعدی^۴ با تعداد تقریبی ۱۰۰۰۰ المان استفاده شده است. نمودار همگرایی مش در شکل ۲ قابل مشاهده است.



شکل ۲ - نمودار همگرایی مش

به منظور شبیه‌سازی نمونه‌های ساندویچ پنل چالش‌های مختلفی وجود دارد که از جمله آن می‌توان به مدل‌سازی

۳- مدل المان محدود و ساخت نمونه‌ها

نرم‌افزارهای متعددی از جمله انسیس^۱، آباکوس^۲ و غیره وجود دارند که با فراهم کردن یک محیط گرافیکی، شبیه‌سازی المان محدود را برای کاربر آسان و جذاب می‌نمایند. در پژوهش حاضر، مدل‌سازی المان محدود توسط نرم‌افزار آباکوس انجام شده است.

این مدل‌سازی شامل طراحی پوسته‌ها، هسته ساندویچ پنل و سیم‌های تقویت‌کننده است. جهت تعبیه سیم، به میزان یک برابر قطر آن از سطح فاصله گرفته و شیار مورد نظر ایجاد گردید. برای تعریف مدل ماده سیم‌های مختلف از روش جامد و همگن استفاده شده است. با توجه به ملزومات خروجی از تحلیل، نوع تحلیل‌گر را از نوع عمومی، داده‌های خروجی و نحوه اتصالات پوسته‌ها و سیم‌ها به هسته همه از نوع Tie استفاده شده است یا به عبارتی فرض در نظر گرفته شده برای این پنل‌ها اتصال کامل و بدون نقص بین سیم، فوم و رویه‌ها است؛ همچنین نوع اتصال بین قطعات از نوع تماس عمومی^۳ انتخاب شده است.

پس از تعیین نوع اتصالات موجود در قطعه به تعیین بارگذاری و شرایط مرزی پرداخته شده است. شیوه اعمال نیرو در نرم‌افزار از نوع جابه‌جایی کنترل در نظر گرفته شده است، به این صورت که مقداری مشخص برای نیرو در نظر گرفته نمی‌شود و فقط جابه‌جایی فک متحرک دستگاه خمش لحاظ می‌گردد، بدین منظور با استفاده قید شرایط مرزی، جابه‌جایی در جهت عمود بر پنل برای آزمون خمش به صورت جابه‌جایی اعمال شده است؛ همچنین برای تعیین شرایط مرزی از شرایط مرزی متقارن^۳ استفاده شده است. در نهایت طبق آزمون‌های طراحی شده، شبیه‌سازی هرکدام از حالت‌های آزمایش با استفاده از نرم‌افزار آباکوس ورژن ۶،۱۴ انجام گرفت. در شکل ۱ مدل نهایی مونتاژ شده پنل‌ها در محیط آباکوس قابل مشاهده است.

قطعه با ابعاد ۲۱۰×۷۵ میلی‌متر مدل‌سازی شد که ضخامت هسته برابر با ۴۰ میلی‌متر و ضخامت رویه‌ها برابر با ۰/۶۹۸

^۳ Ansys

^۴ Abaqus

^۵ General contact

^۶ Symmetry

^۱ C3D8R

مواد مرکب به روش لایه گذاری دستی و سنتی، فشار حاکم بر پشت قطعه (یا به عبارت دیگر بخشی که در تماس با قالب نیست) به دلیل وجود نداشتن کیسه خلاء، برابر فشار محیط خواهد بود. حال آنکه با استفاده از کیسه خلاء این فشار به میزان قابل توجهی افزایش می یابد و فرایند عمل آوری لایه ها تحت فشار صورت خواهد گرفت. برای ایجاد این فشار، قالب و لایه های قرار گرفته روی آن، در یک محفظه پلاستیکی محبوس می شوند و سپس رزین اضافی و هوای داخل محفظه تخلیه می گردد. ساخت نمونه های تجربی با روش معمول ساخت پنل های ساندویچی کمی متفاوت بوده با این تفاوت که لایه چینی رویه های بالا و پایین و اتصال آن ها به هسته به یکباره انجام شده و از چسب استفاده نگردیده است. به عبارت دیگر ابتدا لایه چینی لایه پایینی انجام شده سپس با استفاده از رزین هسته روی لایه چینی قرار گرفت و در آخر لایه ی فوقانی بر روی هسته قرار گرفته است.

این کار علاوه بر سرعت بخشیدن به فرایند ساخت، در کاهش هزینه ها بسیار مؤثر است. در نهایت رزین اضافی با استفاده از پمپ و فشار خلاء از قطعات خارج شده است.

برای ساخت نمونه بهینه، ابتدا پارچه های بافته شده از الیاف شیشه، برای تولید نمونه ها به تعداد نیاز برش داده شده است (۸ عدد برای هر نمونه). به منظور آماده سازی فوم های پلی یورتان ابتدا روی آن ها شیری به ابعاد سیم ایجاد شده است. در گام بعد سطح سیم ها توسط استون تمیز و سپس توسط کاغذ کاربید سیلیکون ۸۰ سمباده زده و دوباره توسط استون پاک سازی شده است و قبل از جایگذاری درون فوم به رزین آغشته شده اند.

در گام بعدی از یک صفحه شیشه ای، برای قرار دادن نمونه ها به منظور تکمیل فرآیند ساخت و استفاده از خلاء جهت خارج کردن رزین اضافی، استفاده شده است. ابتدا شیشه به وسیله نوار آب بند مرز بندی شده است. سپس، به دلیل تسهیل در جداسازی قطعه ها بعد از فرآیند ساخت، قالب شیشه ای به واکس جدا کننده آغشته شده است. برای این منظور در ابتدا شیشه ۳ بار به فاصله زمانی ۱۵ دقیقه واکس زده شده است. در گام بعد، لایه چینی نمونه ها انجام گردید سپس، یک لایه داکرون و یک لایه تنفس روی قطعه ها قرار داده شده است.

دقیق ضخامت رویه ها و صحت شبیه سازی های انجام شده اشاره کرد. به منظور دستیابی به ضخامت دقیق رویه های به کار برده شده در نمونه ها ابتدا یک نمونه ساده ساندویچ پنل را ساخته و پس از انجام آزمایش خمش بر روی آن، لایه ها از هسته جدا کرده و ضخامت آن ها توسط میکرومتر اندازه گرفته شد. بدین ترتیب اطلاعات کافی جهت مدل سازی لایه چینی ها استخراج شده است. به عنوان مثال در شکل ۳، ضخامت اندازه گیری شده برای پوسته را نشان می دهد. جهت صحت سنجی نتایج شبیه سازی، یک نمونه ساندویچ پنل تقویت شده با دو عدد سیم در هر طرف فوم، جنس سیم آهنی و قطر ۱/۵ میلی متر ساخته شد و تحت آزمون خمش سه نقطه قرار گرفته شد.



شکل ۳ - ضخامت اندازه گیری شده نمونه اولیه

پس از صحت گذاری بر عملکرد مدل، در گام بعد، آزمون های طراحی شده توسط نرم افزار مینی تب در محیط آباکوس مدل و خروجی های نیرو جابجایی استخراج و در قالب تنش به نرم افزار مینی تب به منظور بررسی تأثیر پارامترها بر یکدیگر و انتخاب نمونه بهینه بازگردانده و در نهایت حالت بهینه پیشنهاد داده شده ساخته شد.

برای ساخت ساندویچ پنل های کامپوزیتی یک روش معمول وجود دارد که در این روش ابتدا رویه های کامپوزیتی ساخته شده و سپس به صورت جداگانه و با اعمال چسب به هسته مرکزی متصل می شوند.

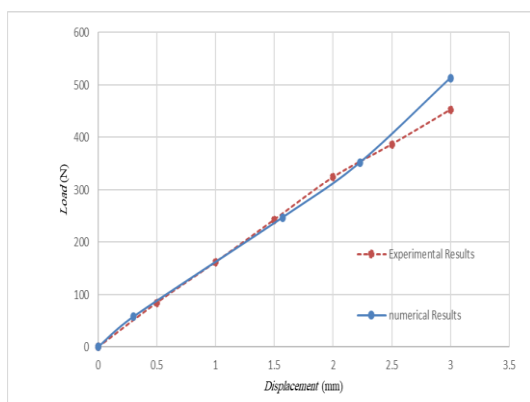
در این تحقیق کلیه نمونه ها به روش لایه چینی دستی و به کمک کیسه خلاء ساخته شده که استفاده از اعمال فشار و خلاء یکی از روش های متداول در زمینه ساخت قطعات مواد مرکب به روش لایه گذاری دستی است. در ساخت قطعات



شکل ۵- نمونه در حال آزمایش خمش سه نقطه

۴- نتایج و بحث

همان‌طور که اشاره شد، ابتدا جهت صحت سنجی شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، نمونه‌های پنل ساندویچی ساخته شد. نمونه‌ی ساخته شده همراه تقویت‌کننده سیمی شامل سیم‌های مفتول آهنی با قطر ۱/۵ میلی‌متر و تعداد دو تقویت‌کننده در هر طرف است. در شکل ۶ نتایج نیرو-جابجایی استخراج شده از آزمون خمش به‌صورت تجربی و شبیه‌سازی در محدوده الاستیک قابل‌مشاهده است. شایان‌ذکر است، نتایج مدل‌سازی‌های انجام شده در هر ۹ مورد فقط جهت استفاده در نرم‌افزار بهینه‌یابی و استخراج نمونه بهینه جهت ساخت بوده و به این دلیل و همچنین تعداد بالای آزمایش‌ها، مدل‌سازی در محدوده الاستیک انجام‌شده که دقت کافی را در راستای این هدف ارائه می‌دهد.



شکل ۶- نتایج صحت سنجی نمونه‌های اولیه

به‌منظور آماده‌سازی رزین مورد‌استفاده در این تحقیق، رزین اپوکسی LY5052 و سخت‌کننده با نسبت ۱ به ۴ و با استفاده از فرآیند همزن دستی باهم مخلوط شده است. در ادامه پس از اتمام لایه‌چینی کیسه و کیوم روی قطعه‌ها قرار داده شده است و توسط یک شیلنگ به دستگاه پمپ خلأ متصل شده است و نمونه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه توسط پمپ خلأ، تحت خلأ قرار داده شده‌اند. سه نمونه ساندویچ پنل ساده و بدون تقویت‌کننده فلزی نیز همراه نمونه‌های دیگر ساخته شد تا مقایسه بهتری صورت بگیرد (شکل ۴).



شکل ۴- قرار گرفتن نمونه‌ها تحت خلأ

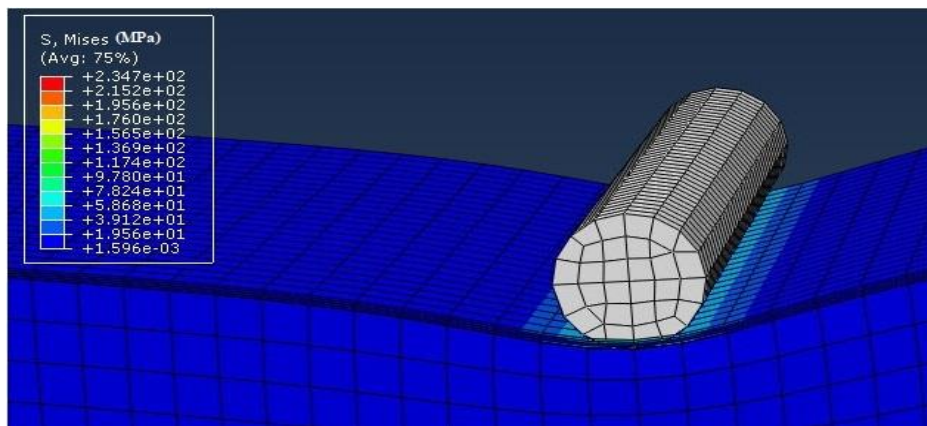
خواص خمشی قطعه، معیار مناسبی جهت ارزیابی و کنترل کیفیت آن است. همین‌طور جهت ارزیابی نمونه‌های ساخته شده از آزمون خمش سه‌نقطه استفاده شده است. نمونه‌ها به طول ۲۱۰ میلی‌متر و عرض ۷۵ میلی‌متر برش خورده و آزمون خمش مطابق با استاندارد ASTM-C393 [۲۷] روی نمونه‌ها انجام گردید.

طبق این استاندارد فاصله قرارگیری تکیه‌گاه‌ها از هم ۱۵۰ میلی‌متر بوده که در شکل قابل مشاهده است. سرعت جابجایی فک متحرک در دستگاه ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد و تعداد نمونه‌ها جهت تکرارپذیری آزمون، سه عدد انتخاب گردید.

نتایج آزمون به‌صورت نمودار نیرو-جابجایی استخراج شده است. آزمون با استفاده از دستگاه سن‌تام مدل STM_150 واقع در دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران انجام شد که در شکل ۵ نمایی از آن در حالت انجام آزمون قابل مشاهده است.

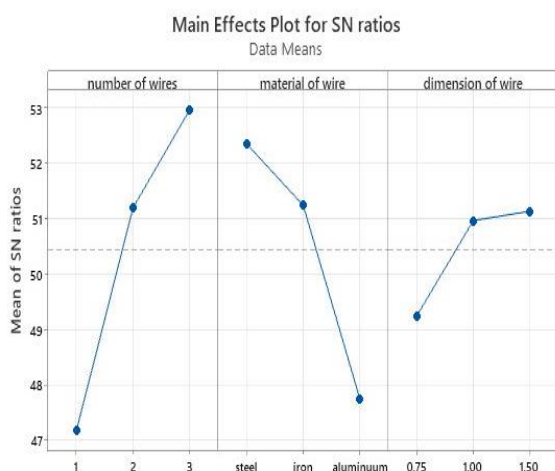
شکست یک قطعه ی مونتاژی در آن صورت نمی پذیرد. به عبارت دیگر حتی جابه جایی بیش از حد در قطعات مونتاژی سامانه ها نیز در بعضی موارد به معنی عدم کارکرد سامانه است. به این منظور در این تحقیق از عبارت استحکام به منظور بیشترین تنش در حداکثر جابه جایی مجاز برای قطعه استفاده نشده است. در این تحقیق منظور از استحکام به کاررفته در طراحی آزمایش، بیشترین تنش وارد شده در جابجایی ۳ میلی متر اطلاق می شود.

به منظور مشاهده کانتورهای تنش در شبیه سازی، نتایج برای نمونه دارای دو سیم در شکل ۷ قابل مشاهده است. همچنین معیار تخریب به میزان جابجایی ۳ میلی متر تعریف شده است؛ چراکه هدف از شبیه سازی بررسی قطعه در محدوده الاستیک بوده تا پس از شبیه سازی به نمونه بهینه دست یافت. به عبارت دیگر شبیه سازی وسیله ای جهت بهینه یابی پارامترها است و بررسی نمونه ها در محدوده غیرالاستیک شامل صرف هزینه و زمان اضافی خواهد بود. گرچه عبارت استحکام بالاترین تنشی است که در آن قطعه شکسته می شود، ولی در بسیاری از سامانه ها شکست سامانه لزوماً با



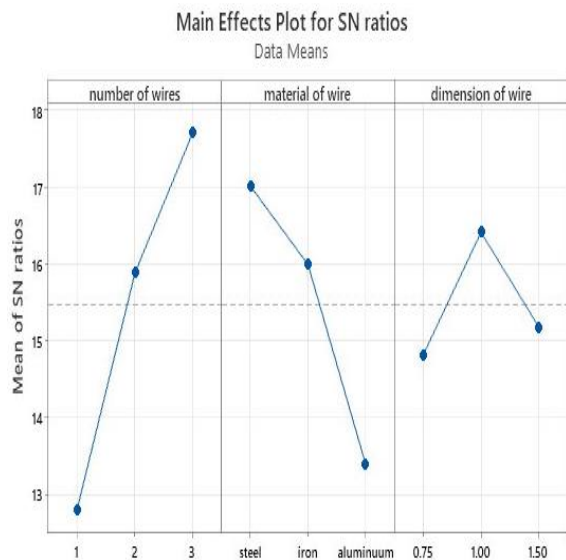
شکل ۷- کانتور تنش برای نمونه دارای دو سیم

بیشتر استفاده از سیم های فلزی را روی مدول خمشی نشان می دهد.

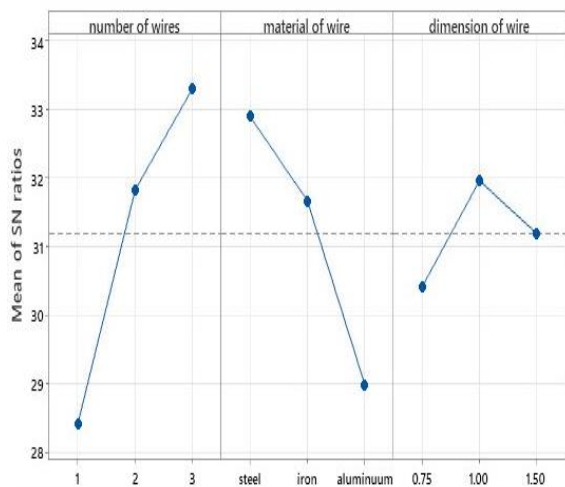


شکل ۸- نتایج بهینه یابی پارامترهای طراحی و تأثیر هر یک بر استحکام نمونه ها

در شکل های ۸ و ۹، به ترتیب تأثیر پارامترهای ورودی بر استحکام و مدول پنل های ساندویچی قابل مشاهده است. همان طور که مشاهده می شود، روند تغییرات این دو مشابه است. محور عمودی نمودارها (SN) نشان دهنده مقدار سیگنال به نویز روش تاگوچی توسط نرم افزار است. مقدار S/N یا سیگنال به نویز میزان پراکندگی را حول یک مقدار مشخص بیان می کند یا به بیان دیگر، جواب های ما در بین چند آزمایش انجام شده چگونه تغییر کرده اند. برای به دست آوردن یک مقدار بهینه، ۳ رابطه وجود دارد: (الف) مقدار کوچک تر بهترین است (ب) مقدار بزرگ تر بهترین است (ج) اندازه اسمی بهترین است) که هر کدام در شرایط خاصی کاربرد دارند. در این تحلیل از رابطه (ب) استفاده شده است. گرچه هر دو نمودار اشکال ۸ و ۹ مشابه اند نمودار مربوط به مدول خمشی مقادیر سیگنال به نویز بالاتری دارند که تأثیر

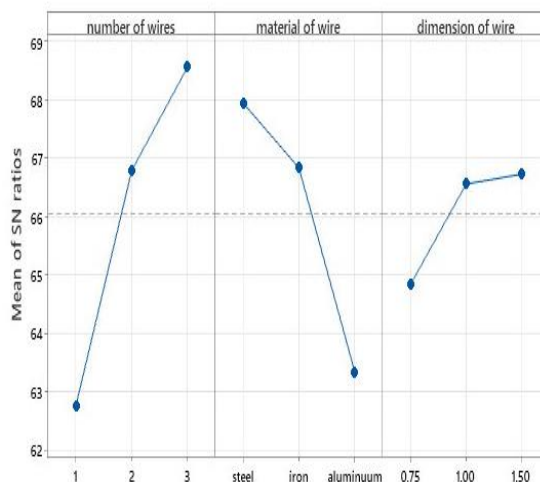


شکل ۱۰- نتایج بهینه یابی پارامترهای طراحی و تأثیر هر یک بر استحکام ویژه نمونه‌ها



شکل ۱۱- نتایج بهینه یابی پارامترهای طراحی و تأثیر هر یک بر مدول ویژه نمونه‌ها

با توجه به نمودار شکل ۱۰ با افزایش تعداد سیم استحکام به وزن نمونه افزایش می‌یابد؛ همچنین می‌توان مشاهده کرد که اختلاف نرخ سیگنال به نویز در تقویت تک سیم و دو سیم، بیشتر از این اختلاف بین حالت‌های دو سیم و سه سیم است؛ بنابراین می‌توان گفت که به دلیل افزایش وزن ناشی از افزایش تعداد سیم‌ها استحکام به وزن قطعه به تدریج کاهش یافته و یک مقدار بحرانی برای تعداد سیم‌های مورد استفاده وجود خواهد داشت که استفاده‌ی تعداد سیم



شکل ۹- نتایج بهینه یابی پارامترهای طراحی و تأثیر هر یک بر مدول خمشی نمونه‌ها

تأثیر تعداد تقویت‌کننده‌ها بر استحکام خمشی پنل ساندویچی نشان می‌دهد، هر چه تعداد سیم‌های مورد استفاده در فوم بالاتر برود خواص خمشی بهبود پیدا می‌کند که این نتیجه دور از انتظار نیست. گرچه این تأثیر برای تعداد سیم بالاتر از ۲ کم‌رنگ‌تر است که این موضوع می‌تواند به دلیل آرایش قرارگیری سیم‌ها درون فوم باشد؛ همچنین با افزایش خواص سیم مورد استفاده جهت تقویت فوم استحکام نمونه افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که اختلاف بین جنس سیم آلومینیومی و سیم آهنی به‌طور قابل توجهی بیشتر از سیم آهنی و فولادی است. با افزایش قطر سیم مقدار استحکام نمونه‌ها به‌طور کلی افزایش می‌یابد که این اختلاف بین قطر ۱ میلی‌متر و ۰/۷۵ میلی‌متر بیشتر از اختلاف بین سایز ۱ و ۱/۵ میلی‌متر است.

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، به ترتیب تأثیر پارامترهای ورودی بر استحکام و مدول ویژه پنل‌های ساندویچی قابل مشاهده است.

Response Table for Signal to Noise Ratios

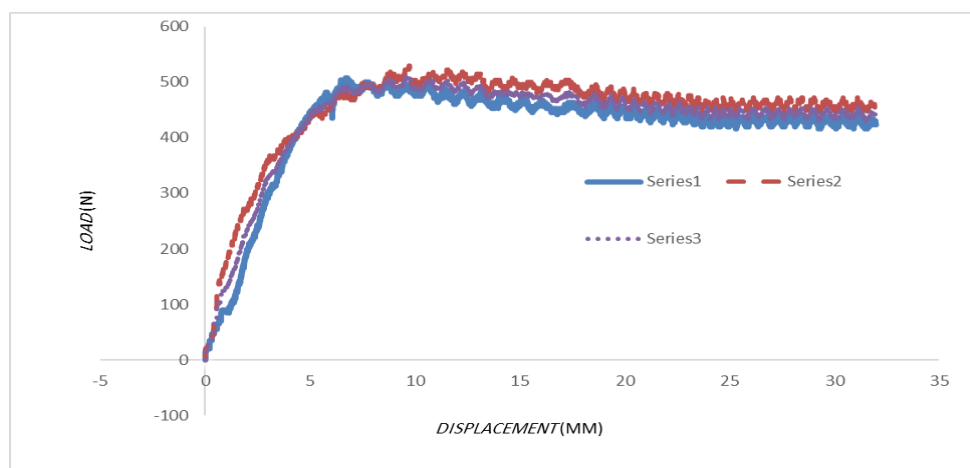
Larger is better

Level	number of wires	material of wire	dimension of wire
1	47.17	52.35	49.24
2	51.20	51.24	50.96
3	52.97	47.74	51.13
Delta	5.80	4.61	1.90
Rank	1	2	3

شکل ۱۲ - تصویر خلاصه گزارش طراحی آزمایش اثر پارامترهای ورودی بر استحکام دریافت شده از نرم افزار

به بیانی دیگر تعداد سیم های تقویت کننده ی هسته بیشترین تأثیر را روی پارامترهای خروجی گذاشته است. با توجه به نتایج طراحی آزمایش نمونه ی بهینه با مشخصات سه سیم (در هر طرف نمونه) قطر ۱ میلی متر و جنس فولادی انتخاب گردید.

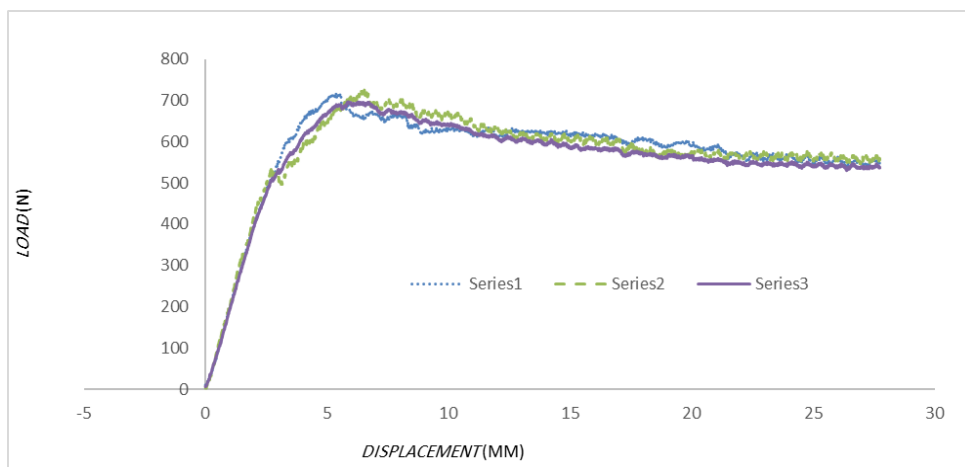
نمونه های تجربی که شامل نمونه بهینه یایی شده و نمونه تقویت نشده می باشند، طبق روش توضیح داده شده ساخته و مورد آزمون قرار گرفته است. شکل ۱۳ نتیجه آزمون خمش سه نقطه روی سه نمونه بدون تقویت کننده ساخته شده را نمایش می دهد. منظور از series 1,2,3 نمونه ی شماره ۱، ۲ و ۳ در هر یک از دو گروه تقویت شده و تقویت نشده است که در شکل های ۱۳ و ۱۴ قابل مشاهده هستند.



شکل ۱۳- نتایج نمودار نیرو-جابجایی آزمایش خمش نمونه ی بدون سیم

همان طور که اشاره گردید، سه نمونه یکسان از حالت بهینه ساخته شد. در ادامه شکل ۱۴ نتایج آزمون خمش سه نقطه روی سه نمونه همراه سیم ساخته شده به همراه میانگین مشاهده می شود.

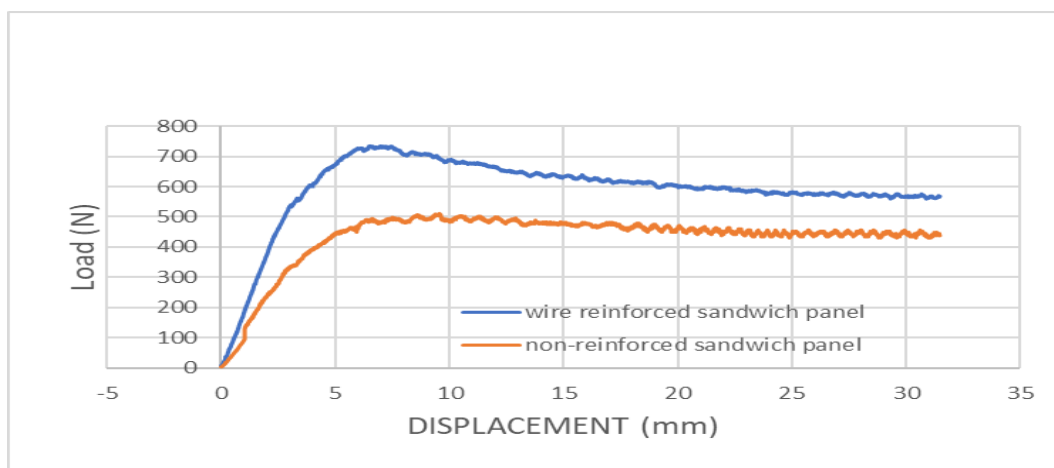
بیشتر از آن مقدار موجب بهبود خواص ویژه نخواهد شد. همان طور که در شکل ۱۱ قابل مشاهده است، در رابطه با مقایسه ی نسبت مدول به وزن نمونه ها از نظر جنس تقویت کننده های سیمی به ترتیب استیل، مفتول آهنی و آلومینیومی مدول خمشی ویژه بالاتری خواهند داشت. همان طور که در بررسی استحکام خمشی گفته شد، افزایش قطر از ۱ به ۱/۵ میلی متر افزایش مدول خمشی مطلوبی را دربر نداشته است و یک مقدار بحرانی قطر بین ۱ و ۱/۵ میلی متر جهت استفاده از سیم درون پنل ساندویچی وجود خواهد داشت که در این صورت به دست آوردن این مقدار بحرانی نیازمند انجام آزمایش های بیشتر و دقیق تر در آینده است؛ بنابراین استحکام به وزن با افزایش قطر سیم ابتدا افزایش و سپس کاهش میابد. دلیل این امر افزایش وزن سیم مورد استفاده هم زمان با افزایش قطر است. در شکل ۱۲ خلاصه ای از گزارش طراحی آزمایش قابل مشاهده است. همان طور که در جداول مشخص است، پارامترهای تعداد سیم های تقویت کننده، جنس و قطر سیم ها به ترتیب بیشترین تأثیر را روی استحکام و استحکام به وزن نمونه دارند (کمیت دلتا).



شکل ۱۴- نمودار نیرو-جابجایی نتایج آزمایش خمش نمونه‌های همراه ۳ تقویت‌کننده سیمی به همراه میانگین

نمونه‌های تقویت‌شده و بدون تقویت‌کننده قابل مشاهده است که به وضوح تأثیر مثبت وجود تقویت‌کننده‌ها را در هسته فومی پنل ساندویچی قابل مشاهده است.

به منظور بررسی و مقایسه بهتر تأثیر وجود سیم‌های فولادی در ساندویچ پنل‌های ساخته‌شده، در شکل ۱۵ نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای به صورت نمودار نیرو-جابجایی، بین



شکل ۱۵- نتایج تجربی بین نمونه‌های تقویت‌شده و ساده

شد. در جدول ۵، مقایسه مقادیر استحکام و مدول نمونه تقویت‌شده و نمونه بدون تقویت‌کننده قابل مشاهده است.

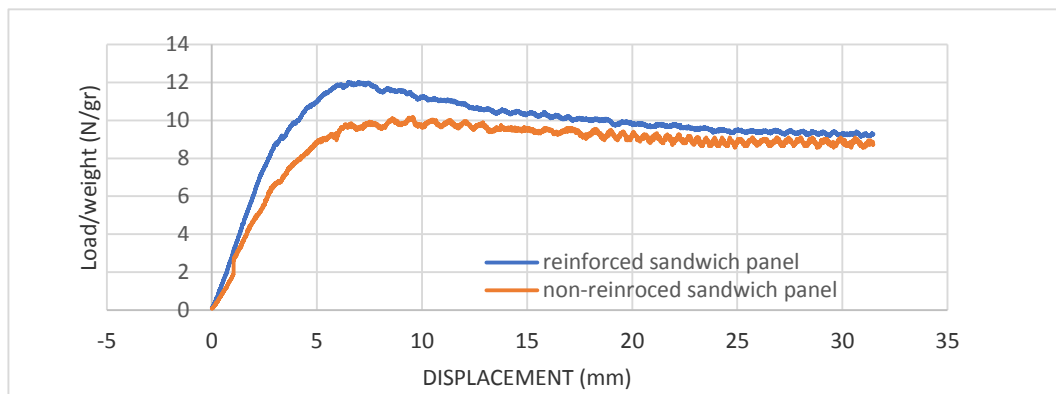
پس از انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای، با استفاده از شیب نمودار نیرو-جابجایی مقادیر مدول خمشی جهت مقایسه استخراج گردید؛ همچنین وزن نمونه‌ها قبل از انجام آزمون توسط ترازو جهت به دست آوردن مقادیر ویژه اندازه گیری

جدول ۵- مقایسه مقادیر استحکام و مدول نمونه تقویت شده و نمونه بدون تقویت کننده

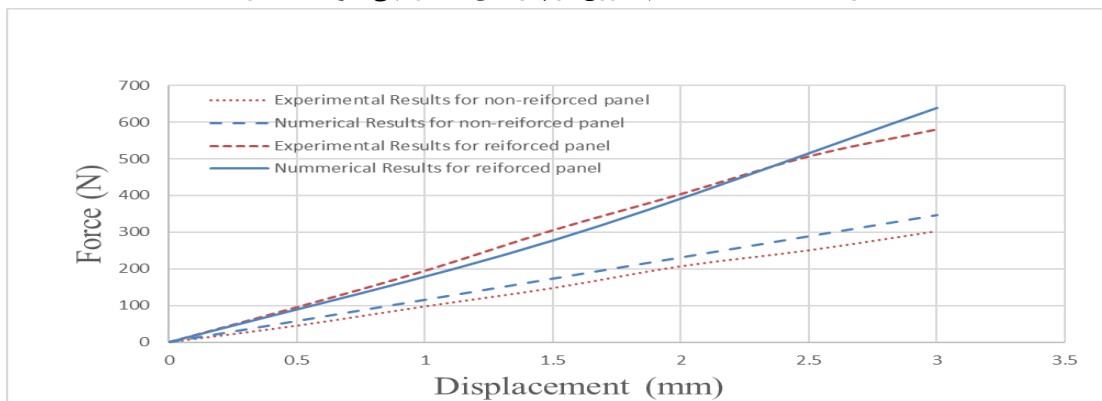
نمونه	بیشترین بار وارد شده (N)	مدول خمشی (N/mm)	وزن نمونه (gr)	استحکام به وزن (N/gr)	مدول ویژه (N/mm.gr)
بدون تقویت کننده	۵۱۱	۱۰۰/۶	۵۱/۲	۹/۹۸	۱/۹۶
تقویت شده	۷۲۹	۱۸۲	۶۰/۲	۱۲/۰۹	۳/۰۲

ساندویچی در حالت تقویت شده و بدون تقویت کننده نشان می دهد همانطور که مشاهده می شود، روند نمودار با شکل ۱۵ یکسان است. البته با نزدیک شدن به نقطه شکست نهایی هر دو نمودار نزدیک به یکدیگر شده که نتیجه از بین رفتن مقاومت سیم های تقویت کننده پس از گذشت از محدوده ۱۰ میلی متر

با توجه به مقادیر محاسبه شده در جدول ۵، مشخص شد که استحکام خمشی پنل ساندویچی تقویت شده با سه عدد سیم فولادی حدود ۴۳ درصد، مدول خمشی حدود ۸۰ درصد، استحکام به وزن به مقدار ۲۱ درصد و مدول خمشی ویژه حدوداً ۵۴ درصد نسبت به پنل ساندویچی تقویت نشده افزایش یافته است. شکل ۱۶ مقایسه نسبی میان استحکام خمشی به وزن نمونه پنل های



شکل ۱۶- مقایسه استحکام به وزن در پنل های ساندویچی تقویت شده و ساده



شکل ۱۷- مقایسه نتایج شبیه سازی و تجربی در محدوده الاستیک

است؛ اما در مورد پنل تقویت‌شده باسیم فلزی در هر سه مورد پنل ساخته‌شده بهینه و یک مورد پنل ساخته‌شده همراه دو عدد سیم آهنی که جهت صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته بود، شکست از ناحیه‌ی پوسته اتفاق افتاده و هیچ اثری از شکست فوم در این نمونه‌ها مشاهده نشده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از سیم در هسته فومی پنل ساندویچی اثرات مثبت دیگری از جمله جلوگیری از شکست فوم و در نتیجه شکست ناگهانی پنل دارد.

مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی در محدوده الاستیک (شکل ۱۷) انطباق خوبی نسبت به یکدیگر داشته (حدود ۱۵ درصد) که این مقدار با توجه به عدم تکرارپذیری در ساخت قابل توجیه است. پس از انجام آزمون خمش سه‌نقطه روی نمونه‌ها بررسی نحوه شکست جز نتایج مهم تأثیر حضور سیم است. همان‌طور که در شکل ۱۸ قابل مشاهده است، حالت و محل شکست نمونه‌ها ساندویچی آزمایش‌شده مشخص گردیده است. نتایج مقایسه بین حالت‌های تخریب نشان می‌دهد که در دو مورد از سه مورد پنل ساندویچی بدون تقویت‌کننده، شکست در محل فوم اتفاق افتاده و یا شکست ناشی از جدایش پوسته از هسته بوده



شکل ۱۸- حالت و محل تخریب نمونه‌ها ساندویچی پس از آزمایش خمش الف) شکست نمونه تقویت‌شده پس از آزمون خمش ب و ج) شکست نمونه تقویت نشده و بدون سیم

۵- نتیجه‌گیری

وجود سیم‌های فلزی درون هسته فومی پلی یورتان باعث بهبود خواص و استحکام خمشی ساندویچ پنل می‌گردد، اما استفاده از تعداد بیشتر سیم‌های تقویت‌کننده موجب افزایش وزن قطعه شده که در آن صورت، استحکام به وزن لزوماً افزایش نمی‌یابد که به دست آوردن تعداد دقیق سیم‌های مورد استفاده نیاز به بازه‌های گسترده‌تر پارامترها خواهد داشت. شکست نمونه‌های تقویت‌شده همگی از ناحیه رویه‌های کامپوزیتی اتفاق افتاد، اما در پنل‌های ساندویچی ساده شکست از ناحیه فوم اتفاق افتاد که خود نشان می‌دهد،

استفاده از سیم‌های فلزی می‌تواند از شکست ناگهانی در پنل‌های هسته فومی جلوگیری کند. اگرچه با افزایش خواص سیم مورد استفاده می‌توان به استحکام بالاتر دست یافت، اما افزایش قطر سیم‌های مصرفی در تقویت هسته همیشه باعث افزایش استحکام نشده و همان‌طور که اشاره گردید افزایش قطر تأثیر منفی روی استحکام به وزن نمونه خواهد داشت. در بین پارامترهای بررسی‌شده در این تحقیق، تعداد سیم‌ها بیشترین تأثیر و قطر تقویت‌کننده‌ها کمترین تأثیر را روی استحکام و استحکام به وزن نمونه‌ها دارند. در رابطه با پنل ساندویچی با سیم‌های تقویت‌کننده فولادی با تعداد ۳ عدد

- [5] Norouzi, H., & Mahmoodi, M. (2022). Experimental and optimization study of compression behavior of sandwich panels with new symmetric lattice cores. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: J. Mater.: Des. Applic.*, 236(3), 548-566.
- [6] Tekalur, S. A., Bogdanovich, A. E., & Shukla, A. (2009). Shock loading response of sandwich panels with 3-D woven E-glass composite skins and stitched foam core. *Composites Science and Technology*, 69(6), 736-753.
- [7] Santhanakrishnan, R., Samlal, S., Joseph Stanley, A., & Jayalatha, J. (2018). Impact study on sandwich panels with and without stitching. *Advanced Composite Materials*, 27(2), 163-182.
- [8] Ramakrishnan, K. R., Guérard, S., Zhang, Z., Shankar, K., & Viot, P. (2021). Numerical modelling of foam-core sandwich panels with nano-reinforced composite facesheets. *J. Sandwich Struct. Mater.*, 23(4), 1166-1191.
- [9] Javid, M., & Biglari, H. (2020). A multi-scale finite element approach to mechanical performance of polyurethane/CNT nanocomposite foam. *Materials Today Communications*, 24, 101081.
- [10] Ghalami-Choobar, M., & Sadighi, M. (2014). Investigation of high velocity impact of cylindrical projectile on sandwich panels with fiber-metal laminates skins and polyurethane core. *Aerospace Science and Technology*, 32(1), 142-152.
- [11] Davar, A., Azarafza, R., & Faraji Shooa, J. (2020). Experimental and numerical analysis of low-velocity impact on composite sandwich panels with grid stiffened core. *J. Sci. Tech. Compo.*, 6(4), 615-626.
- [12] Wang, C., Ramakrishnan, K. R., Shankar, K., Morozov, E., Wang, H., & Fien, A. (2021). Homogenized shell element-based modeling of low-velocity impact response of stainless-steel wire mesh. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 28(18), 1932-1947.
- [13] Wan, Y., Diao, C., Yang, B., Zhang, L., & Chen, S. (2018). GF/epoxy laminates embedded with wire nets: A way to improve the low-velocity impact resistance and energy absorption ability. *Composite Structures*, 202, 818-835.
- [14] Mohammadkhani, P., Jalali, S. S., & Safarabadi, M. (2021). Experimental and numerical investigation of Low-Velocity impact on steel wire reinforced foam Core/Composite skin sandwich panels. *Composite Structures*, 256, 112992.
- [15] Formisano, A., Viscusi, A., Durante, M., Carrino, L., De Fazio, D., & Langella, A. (2020). Experimental investigations on bending collapse modes of innovative sandwich panels with metallic foam core. *Procedia Manufacturing*, 47, 749-755.
- [16] Najafi, M., & Eslami-Farsani, R. (2020). Introducing novel sandwich panels based on of cork/polyurethane foam hybrid core and composite

سیم در هر طرف ساندویچ پنل و قطر ۱ میلی متر، بیشینه نیروی وارد شده در آزمون خمش سه نقطه ای از ۵۱۱ N به ۷۲۹ N افزایش یافت و در مقایسه با نمونه ی تقویت نشده، استحکام خمشی نمونه به میزان ۴۳ درصد و روی استحکام به وزن حدود ۲۰ درصد است.

مشخص گردید پارامترهای بررسی شده در این تحقیق بر روی مدول خمشی ویژه، رفتار مشابه به تأثیر آن ها به استحکام خمشی ویژه دارد، اما تأثیر مثبت این تقویت کننده ها روی مدول خمشی نمونه بیشتر از استحکام خمشی آن است و مدول خمشی بیشتر تحت تأثیر حضور سیم به عنوان تقویت کننده قرار می گیرد. مدول خمشی با استفاده از سیم های تقویت کننده در نمونه بهینه از مقدار $100/6 \text{ (N/mm)}$ به 182 (N/mm) و به میزان ۸۱ درصد و همچنین مدول ویژه خمشی حدود ۵۴ درصد نسبت به پنل تقویت نشده افزایش یافت.

در راستای تقویت سازه های ساندویچی با استفاده از سیم های فولادی تاکنون مطالعات مختلفی انجام شده که در آن ها از سیم درون لایه چینی رویه ها استفاده شده است و در نتایج خود علیرغم تأثیر مثبت استفاده از سیم در جذب انرژی از مشکل جدایش هسته از پوسته به دلیل حضور سیم در بررسی نحوه شکست اشاره شده که این پژوهش با بررسی و استفاده از سیم های فلزی درون هسته فومی علاوه بر نوآوری مناسب به حل این چالش پژوهشگران پیشین انجامید.

۶- مراجع

- [1] Kausar, A., Ahmad, I., Rakha, S. A., Eisa, M. H., & Diallo, A. (2023). State-Of-The-Art of Sandwich Composite Structures: Manufacturing—to—High Performance Appl.. *J. of Compo. Sci.*, 7(3), 102.
- [2] Beral, B. (2007). Airbus structure and technology—next steps and vision. In *Proceedings of 16th international conference on composite materials*. Kyoto.
- [3] Sharma, S. C., Murthy, H. N., & Krishna, M. (2004). Interfacial studies in fatigue behavior of polyurethane sandwich structures. *J. Reinfo. plas. compo.*, 23(8), 893-903.
- [4] Mesto, T., Sleiman, M., Khalil, K., Alfayad, S., & Jacquemin, F. (2023). Analyzing sandwich panel with new proposed core for bending and compression resistance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: J. Mater. Des. Applic.*, 237(2), 367-378.

- [22] Ramakrishnan, K. R., Shankar, K., Viot, P., & Guerard, S. (2012). A comparative study of the impact properties of sandwich materials with different cores. In EPJ Web of Conferences (Vol. 26, p. 01031).
- [23] Lee, J., & Lee, S. H. (2004). Flexural-torsional behavior of thin-walled composite beams. Thin-walled structures, 42(9), 1293-1305.
- [24] Petras, A., & Sutcliffe, M. P. F. (1999). Failure mode maps for honeycomb sandwich panels. Composite structures, 44(4), 237-252.
- [25] Hamzeloo, S. R., Refahi Oskouei, A., & Zakizadeh, A. M. (2020). Applying acoustic emission to investigate failure mechanisms on bending of polymer-based composite sandwich panels. J. Sci. Tech. Compos., 7(3), 1029-1039.
- [26] Carlsson, L. A., Kardomateas, G. A., Carlsson, L. A., & Kardomateas, G. A. (2011). Analysis of debond fracture specimens. Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites, 263-293.
- [27] ASTM Standard C393, (2000), Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2000.
- grid structure for marine applications. J. Sci. Tech. Compo., 7(3), 1064-1075.
- [17] George, T., Deshpande, V. S., Sharp, K., & Wadley, H. N. (2014). Hybrid core carbon fiber composite sandwich panels: Fabrication and mechanical response. Composite structures, 108, 696-710.
- [18] Uzay, Ç., & Geren, N. (2020). Effect of stainless-steel wire mesh embedded into fibre-reinforced polymer facings on flexural characteristics of sandwich structures. J. Reinfo. Plast. Compo., 39(15-16), 613-633.
- [19] Maher, R., Khalili, S. M. R. K., & Eslami-Farsani, R. (2021). The effect of Shape memory wire on the ballistic behavior of smart corrugated core sandwich panels. J. Sci. Tech. Compos., 8(2), 1612-1627.
- [20] Durante, M., Boccarusso, L., Carrino, L., Formisano, A., & Viscusi, A. (2022). Mechanical Behavior of Innovative Reinforced Aluminum Foam Panels. Key Engineering Materials, 926, 1713-1718.
- [21] Ji, G., Ouyang, Z., & Li, G. (2013). Debonding and impact tolerant sandwich panel with hybrid foam core. Composite structures, 103, 143-150.