



پارامترهای موثر بر خواص برشی ساندویچ پنل با رویه کامپوزیت وینیل استر - الیاف شیشه و هسته پلی وینیل کلراید

مهدی عبدالهی آذغان^۱، یوسف امیریان^۲، رضا اسلامی فارسانی^{۳*} و علی علیزاده^۴

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

^۲ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، سازه کشتی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

^۳ دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

^۴ استادیار، مجتمع ساخت و فرایند تولید گروه کامپوزیت، دانشگاه مالک اشتر، تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۱۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۹

چکیده

در این پژوهش، تاثیر نوع چسب اپوکسی (Epon 828 و Araldite EA 1103)، ناحیه هم‌پوشانی (۱۲/۵ و ۲۵) و اصلاح سطحی کامپوزیت پلیمری بر رفتار برشی ساندویچ پنل‌های با هسته فوم پلی وینیل کلراید (PVC) C7075 و رویه کامپوزیت پلیمری (وینیل استر - الیاف شیشه) به صورت تجربی و شبیه‌سازی، مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج، نمونه حاوی چسب Epon استحکام برشی بیشتر و درصد کرنش کمتری در مقایسه با نمونه حاوی چسب Araldite ارائه داد. نمونه‌های با ناحیه هم‌پوشانی ۱۲/۵ mm خواص برشی بیشتری در مقایسه با نمونه‌های با ناحیه هم‌پوشانی ۲۵ mm داشتند که علت آن وجود حباب و عیوب بیشتر در سطح هم‌پوشانی بیشتر است. نمونه‌هایی که کامپوزیت پلیمری آن‌ها با کاغذ سنباده ۱۰۰ اصلاح سطحی شدند، خواص برشی بیشتری نسبت به نمونه‌های اصلاح سطحی شده با کاغذ سنباده ۶۰ داشتند که علت آن افزایش سطح تماس و نفوذ بهتر چسب به داخل تخلخل‌ها است. بررسی مکانیزم شکست نشان داد که دو مکانیزم شکست چسب و پارگی فوم PVC، باعث تخریب ساندویچ پنل می‌شوند که غلبه مکانیزم پارگی فوم بر شکست چسب افزایش خواص برشی ساندویچ پنل را سبب می‌شود. نتایج نشان داد که تطابق قابل قبولی میان نتایج تجربی و شبیه‌سازی وجود دارد.

کلمات کلیدی: ساندویچ پنل؛ اتصالات چسبی؛ عملیات سطحی؛ رویه کامپوزیتی؛ خواص برشی.

The Effective Parameters on Shear Properties of Sandwich Panels with Glass Fibers-Vinyl Ester Composite Skin and Polyvinyl Chloride Core

M. Abdollahi Azghan¹, U. Amirian², R. Eslami-Farsani^{3,*}, A. Alizadeh⁴

¹ MSc, Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

² MSc, Department of Marine Sciences and Ship Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

³ Associate Professor, Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

⁴ Assistant Professor, Faculty of Materials & Manufacturing Processes, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract

In this study, the effects of adhesive type (Epon 828 and Araldite EA 1103), the overlapping area (12.5 and 25 mm), and the surface treatment of the polymer composite on the shear behavior of the sandwich panels with a foam core of polyvinyl chloride (PVC) C7075 and a polymer composite skin (glass fibers-vinyl ester) were investigated by finite element simulation and experiment. The results revealed that the sample with Epon adhesive exhibited higher shear strength and lower strain percentage value compared to the sample containing the Araldite adhesive. The samples with an overlapping area of 12.5 mm showed higher shear properties compared to those with a 25 mm overlapping area which is due to the presence of more bubbles and imperfections on the overlapping surface. Due to increased contact area and penetration of the adhesive into the porosities, surface-modified polymer composites with 100-grit sandpapers exhibited higher shear properties in comparison with those surface modified with 60-grit sandpapers. Also, the investigation of the fracture mechanism showed that the two mechanisms of the adhesive fracture and the rupture of the PVC foam led to the destruction of the sandwich panel. Since the foam rupture mechanism overcame the adhesive fracture, the shear properties of the sandwich panel were increased. The results showed that there was a good agreement between the experimental and simulation results.

Keywords: Sandwich Panel; Adhesive Bonds; Surface Treatment; Composite Skin; Shear Properties.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، ساخت و استفاده از ساندویچ پنل‌ها به دلیل قابلیت‌های فراگیر این مواد هم‌چون وزن کم، مقاومت بالای خمشی، مقاومت در برابر کمانش و نیز استحکام خستگی بالا روند رو به رشدی داشته است. یکی از اصلی‌ترین نگرانی‌ها در مورد چنین ساختارهایی، احتمال ترک و تورق در سطح مشترک هسته و رویه، بر اثر تمرکز تنش‌های برشی عرضی ناشی از اختلاف سختی بین رویه‌ها و هسته است که می‌تواند باعث افت شدید قابلیت اطمینان سازه شود [۱].

از مسائل مهم در سازه‌های ساندویچی، انتخاب مناسب جنس هسته و رویه‌ها است [۲]. فوم‌های پلی وینیل کلراید (PVC^۱)، یکی از پلیمرهای گرمانرم پرکاربرد با مزایای اقتصادی بالاست که با توجه به خواص مکانیکی و فیزیکی بسیار خوب در صنایع مختلف کاربرد داشته و در حجم بالایی تولید می‌شود. علاوه بر این خواص می‌توان به مقاومت بالا در شرایط نامناسب جوی، مقاومت سایشی بالا، هزینه تولید پایین و عمر بالا نیز اشاره کرد [۳].

کامپوزیت‌های پایه پلیمری، بخش مهمی از انواع کامپوزیت‌ها را تشکیل می‌دهند که در قسمت‌های مختلفی از صنعت مانند، صنایع هوافضا، کشتی‌سازی، خودروسازی و مواردی از این قبیل به کار گرفته می‌شوند. در سال‌های اخیر استحکام به وزن بالا، هزینه تمام شده کم و نیز مقاومت در برابر مواد شیمیایی و خورنده کامپوزیت‌های پلیمری، باعث جایگزینی این مواد بجای ورق‌های فلزی شده است [۴].

اتصال هسته به رویه در پنل‌های ساندویچی به روش‌های گسترده اتصال مکانیکی و چسبی تقسیم می‌شوند. این نوع روش‌ها می‌توانند برای اتصال‌ها هسته به انواع رویه از جمله فلزی و کامپوزیتی کاربرد داشته باشند. در طول تاریخ اتصالات برای تولید سازه‌ها و ماشین‌آلات مکانیکی، بسیار مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با گذشت زمان و با ساخت قطعات پیچیده‌تر و بزرگ‌تر، لزوم استفاده از اتصالات با استحکام بالا بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است [۵].

غالب اتصالات مکانیکی در پنل‌های ساندویچی نیازمند فرایند سوراخ‌کاری است. به دلیل ساختار خاص لایه کامپوزیتی، مکانیزم سوراخ‌کاری در این قطعات در مقایسه با مواد همسانگرد و همگن با پیچیدگی‌های خاصی همراه است. در حین سوراخ‌کاری این مواد، عمدتاً عیوب مختلفی همچون، بیرون زدگی الیاف، ترک خوردگی ماتریس، شکستگی و ایجاد تورق در الیاف اتفاق می‌افتد. پدیده تورق هنگام ورود و خروج مته به داخل قطعه و به ویژه در لایه‌های بالایی و پایینی، رخ می‌دهد [۶]. از این رو اتصالات مکانیکی شاید روش سریع برای اتصال هسته به رویه باشد، ولی باعث ایجاد خسارت و تورق در پنل‌های ساندویچی می‌شود [۷].

اتصال چسبی جایگزینی مناسب برای اتصال اجزای ساندویچ پنل به جای اتصال مکانیکی است. مواردی از قبیل، وزن و هزینه ساخت کم از جمله مزایای اتصال چسبی در مقایسه با اتصال مکانیکی است. علاوه بر این، اتصال چسبی انعطاف‌پذیری و سهولت ساخت و همچنین چسبندگی بالا را نیز فراهم می‌کند. به همین علت استفاده از آن در صنایع پیشرفته (مانند هواپیما و خودرو) و صنایع سنتی (مانند ساختمان، وسایل ورزشی و بسته‌بندی) دیده می‌شود [۸].

مارکوس و همکاران [۹]، از سیلیکون RTV 106 و اپوکسی XN-1244 و ترکیبی از این دو به عنوان چسب برای اتصال آلومینیوم و سرامیک استفاده کردند. نمونه‌های تهیه شده در دماهای اتاق و 100°C تحت آزمون برش قرار گرفتند. بیشترین تحمل نیروی وارده در دمای اتاق مربوط به نمونه با چسب اتصالی اپوکسی XN-1244 و کم‌ترین آن مربوط به چسب اتصالی سیلیکونی RTV 106 بود. در دمای 100°C میزان تحمل نیروی وارده برای نمونه با چسب اتصالی سیلیکونی RTV 106 به شدت کاهش پیدا کرد و بیشترین نیروی شکست مربوط به ترکیبی از هر دو چسب بود. در هر دو دمای محیط و 100°C ، بیشترین میزان میانگین جابجایی برای نمونه با چسب سیلیکونی RTV 106 و کم‌ترین آن مربوط به چسب اتصالی اپوکسی XN-1244 بود.

بوده و همکاران [۱۰]، به صورت تجربی زبری سطح چسبنده‌های مختلفی از جمله آلومینیوم و چوب را در

^۱ Polyvinyl Chloride

با توجه به کارهای انجام شده (که به آن اشاره شد)، تاکنون تحقیقات کمی در زمینه تاثیر پارامترهای موثر از قبیل، نوع چسب، اصلاح سطحی رویه کامپوزیتی و ناحیه همپوشانی بر خواص برشی ساندویچ پنل‌های با رویه کامپوزیتی انجام شده است؛ در حالی که یکی از اساسی‌ترین بخش‌های مورد استفاده در صنعت کشتی‌سازی و هواپیمایی است. براین اساس، در تحقیق فعلی، خواص برشی و مکانیزم-های تاثیرگذار بر این خواص در ساندویچ پنل‌های با هسته PVC C7075 و رویه کامپوزیت پلیمری بررسی شد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد اولیه

در تحقیق حاضر، به منظور ساخت لایه کامپوزیت پلیمری از رزین وینیل استر^۲ RESITAN VE 2095 (شرکت شیمی افسون، ایران) به عنوان زمینه کامپوزیت استفاده شد. این رزین، مقاومت شیمیایی عالی در برابر خوردگی را برای طیف گسترده‌ای از اسیدهای آلی و معدنی، مواد قلیایی، مواد شیمیایی اکسید کننده و نمک فراهم کرده و خواص مکانیکی مناسبی ارائه می‌کند. در کنار رزین وینیل استر از کبالت و دی‌متیل آنیل^۳ به عنوان شتاب دهنده و از متیل اتیل کتون پرواکساید^۴ به عنوان سخت کننده استفاده شد.

الیاف شیشه با بافت حصیری و چگالی سطحی g/cm^2 ۲۰۰ (محصول شرکت بایتکس^۵ ترکیه) به عنوان تقویت کننده کامپوزیت پلیمری مورد استفاده قرار گرفت؛ همچنین فوم PVC C7075 با ضخامت ۲ mm (محصول شرکت Airex) به عنوان هسته ساندویچ پنل بکار گرفته شد. این فوم دارای خواص استحکام و سفتی ویژه بالا، مقاومت به ضربه عالی، مقاوم در برابر نفوذ آب و مقاومت شیمیایی بالا است. دو چسب Epon 828 و Araldite EA 1103 از خانواده اپوکسی نیز به عنوان چسب اتصال بین کامپوزیت پلیمری و فوم PVC استفاده شدند. جدول ۱، خواص فیزیکی و مکانیکی چسب‌های Epon 828 و Araldite EA 1103 را نشان می‌دهد.

اتصالات چسبی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها افزایش خواص مکانیکی در ناحیه اتصال را به زبری سطح مرتبط دانستند.

میرزاپور و همکاران [۱۱]، پنل‌های ساندویچی با مشخصات لایه میانی فوم پلی اورتان^۱ سخت و جداره‌های شیشه- اپوکسی را تحت آزمون خمشی سه نقطه‌ای قرار دادند و چسبندگی لایه میانی به جداره‌ها را بررسی کردند. تحلیل نتایج به دست آمده نشان داد، با افزایش چسبندگی بین لایه میانی و جداره‌ها می‌توان ساختار ساندویچی دارای خواص خمشی بسیار بهتر به دست آورد.

داسیلوا و همکاران [۱۲]، تاثیر نوع و ضخامت چسب بر استحکام برشی چسب اتصال بین چند مواد مختلف را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند، با افزایش ضخامت چسب اتصالی، استحکام برشی ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد؛ همچنین آن‌ها دریافتند چسب با چقرمگی بالا، استحکام برشی ناحیه اتصال را کاهش می‌دهد.

چوی و همکاران [۱۳]، تاثیر ضخامت چسب بر تمرکز تنش در ناحیه اتصال را بررسی کردند. آنها مشاهده کردند، با افزایش ضخامت چسب، تمرکز تنش در ناحیه اتصال کاهش می‌یابد که باعث بهبود خواص مکانیکی ناحیه اتصال می‌شود. سبزی‌کار و همکاران [۱۴]، خواص خمشی تیرهای ساندویچی با رویه کامپوزیت الیاف‌فلز و هسته فوم پلی‌اورتان را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند، جدایش بین هسته و رویه در فصل مشترک این دو اتفاق می‌افتد؛ لذا اتصال چسبی بین هسته و رویه در ساختار ساندویچی مسئله بسیار مهمی در ساخت نمونه‌های مورد استفاده در صنعت است.

خندان و همکاران [۱۵]، اثر ضخامت هسته و رویه در پنل‌های ساندویچی با هسته فوم و رویه‌های آلومینیومی را تحت بارگذاری انفجاری به صورت تجربی و عددی مطالعه کردند. نتایج نشان داد که بین داده‌های تجربی و عددی تطابق خوبی وجود دارد. همچنین مشخص شد با افزایش ضخامت فوم و ضخامت رویه پستی ساختار ساندویچی، جابجایی رویه پستی کاهش یافته و میزان جذب انرژی آن افزایش یافته است.

² Vinyl Ester

³ Dimethylanil

⁴ Methyl Ethyl Ketone Peroxide

⁵ Bitex

¹ Polyurethane

۲-۳- اصلاح سطحی کامپوزیت پلیمری

در این پژوهش عملیات سطحی کامپوزیت به منظور افزایش چسبندگی بین کامپوزیت و چسب مورد استفاده در ناحیه اتصال به روش مکانیکی (سنباده زنی) انجام شد. در روش آماده‌سازی مکانیکی، ابتدا سطح کامپوزیت با استون روغن-زدایی شد. سپس اصلاح مکانیکی تحت زاویه ۴۵ درجه با سنباده‌های ۶۰ و ۱۰۰ انجام گرفت. بعد از این مرحله، به منظور حذف تکه‌های باقی‌مانده، از پارچه‌های بدون پرز استفاده شد. شکل ۱، سطح کامپوزیت پلیمری اصلاح شده به روش سنباده‌زنی و فیلرهای نصب شده برای کنترل ضخامت چسب را نشان می‌دهند.



شکل ۱- آماده سازی سطح کامپوزیت و فوم PVC: الف) سطح کامپوزیت پلیمری اصلاح شده به روش سنباده‌زنی و ب) فیلرهای نصب شده برای کنترل ضخامت

۲-۴- شماره‌گذاری نمونه‌ها

با توجه به متغیرهای موجود، شماره‌گذاری نمونه‌ها بر اساس نوع چسب، مساحت ناحیه همپوشانی و اصلاح سطحی کامپوزیت پلیمری انجام شد. در جدول ۲، متغیرها و کد هر نمونه آمده است.

۲-۵- آزمایش تک لبه برشی

برای بررسی خواص برشی نمونه‌های ساندویچ پنل از آزمون تک لبه برشی توسط دستگاه هانسفیلد (مدل H25KS) با استاندارد ASTM D 1002-01 [۱۶] استفاده شد. نمونه‌ها تحت بارگذاری با نرخ کرنش ۲ mm/min قرار گرفتند. داده‌های نیرو-جابجایی در کامپیوتر متصل به دستگاه ثبت شده

جدول ۱- خواص فیزیکی و مکانیکی چسب‌های Epon 828

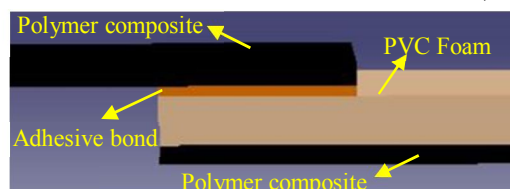
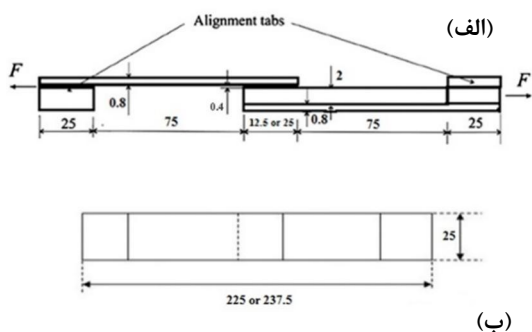
Araldite EA 1103 و		
Araldite EA 1103	Epon 828	نوع چسب
۲۵۰	۱۱۰-۱۵۰	گران‌روی در ۲۵°C (p)
۱/۱۶	۱/۱۶	چگالی در ۲۵°C (g/cm ³)
۲	۷	زمان پخت برای رسیدن به بیشترین استحکام در ۲۵°C (روز)
۳۸	۶۹	استحکام کششی (MPa)
۱/۷	۲/۷۵	مدول کششی (GPa)

۲-۲- ساخت کامپوزیت پلیمری و آماده‌سازی فوم

PVC

ابتدا برای ساخت لایه کامپوزیت، پلیمر وینیل استر چهار جزئی شامل وینیل استر، کبالت ۱٪، متیل اتیل کتون پروکساید ۵۰٪ و دی متیل آنیلین به ترتیب با نسبت وزنی ۱۰۰، ۰/۱۶، ۰/۷ و ۰/۰۷ گرم با هم آمیخته و به مدت ۵ دقیقه هم زده شدند. سپس نمونه‌های کامپوزیت پلیمری با روش لایه‌گذاری دستی شامل ۴ لایه الیاف شیشه (به ابعاد ۱/۸ × ۲۵ × ۱۲۵ mm³) ساخته شدند و به منظور پخت نهایی و حذف حباب‌های ایجاد شده، در دمای ۲۵ °C به مدت ۳ روز تحت فشار ۲ kPa قرار گرفتند. در نهایت نیز به منظور پخت نهایی و دستیابی به حداکثر میزان استحکام، نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۲۰ °C قرار داده شدند. در این پژوهش از مرجع [۱۲] برای ساخت کامپوزیت استفاده شد.

با توجه به استحکام پایین فوم PVC و به منظور جلوگیری از تخریب فوم در زیر فک دستگاه کشش، یک کامپوزیت پلیمری به پشت آن چسبانده شد. اتصال بین فوم PVC و کامپوزیت پلیمری ۵ روز بعد از مرحله ساخت کامپوزیت پلیمری توسط اپوکسی به عنوان چسب با ضخامت ۰/۴ mm انجام پذیرفت. برای این‌که تاثیر مساحت ناحیه اتصال مورد بررسی قرار گیرد، از دو مساحت هم‌پوشانی مختلف با اندازه‌های ۲۵ و ۱۲/۵ میلی‌متر استفاده شد.



شکل ۲- شماتیک: (الف) دو بعدی نمونه آزمون تک لبه برشی (ابعاد بر حسب میلی‌متر) و (ب) سه بعدی ساندویچ پنل

هریک از المان‌های هسته یا المان‌های تماسی مربوط به چسب از حد مجاز خود بیشتر بود، بار مربوط به آن مرحله به عنوان بار قابل تحمل در نظر گرفته شد و بر اساس آن استحکام و انرژی شکست بدست آمد. با توجه به این که در تست‌ها نیز تمامی شکست‌ها در هسته و یا چسب بود، لذا اولین شکست در چسب و یا هسته به عنوان حد استحکام معرفی شد. تعداد المان‌های مدل، ۱۵۵۳ عدد و تعداد گره‌ها، ۱۱۰۶۷ عدد در نظر گرفته شدند؛ همچنین دو سر مدل به صورت گیردار محدود شده و فقط جابجایی یک سر مدل در راستای طولی جهت اعمال بارگذاری آزاد پیش‌بینی شد. شکل ۳، نماهای مختلف شبکه‌بندی ساندویچ پنل را نشان می‌دهد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تاثیر نوع چسب بر خواص برشی ساندویچ پنل
در جدول ۳، خلاصه خواص برشی ساندویچ پنل بصورت تجربی و همچنین عددی (تحلیل اجزای محدود) و در شکل-های ۴، ۵ و ۶ نیز به ترتیب، استحکام برشی، کرنش و انرژی شکست نمونه‌های ساندویچ پنل حاصل از آزمون تجربی آمده است. با توجه به شکل ۴، در شرایط یکسان، میزان استحکام برشی در نمونه‌های حاوی چسب Epon استحکام برشی بیشتری نسبت به نمونه حاوی چسب Araldite از خود نشان

و با تقسیم نیرو به مساحت فصل مشترک اولیه، تنش برشی محاسبه شد. قابل ذکر است که جهت اثبات تکرارپذیری نتایج، هر آزمون حداقل سه بار روی نمونه‌های مشابه انجام شد و نتایج نهایی، حاصل میانگین‌گیری از داده‌های خروجی است. شکل ۲، شماتیک نمونه آزمون تک لبه برشی و اندازه هر قسمت را نشان می‌دهد. به منظور جلوگیری از ایجاد تنش حاصل از خمش حین آزمون برشی، در ناحیه اتصال از تبهایی در دو طرف انتهای نمونه استفاده شد.

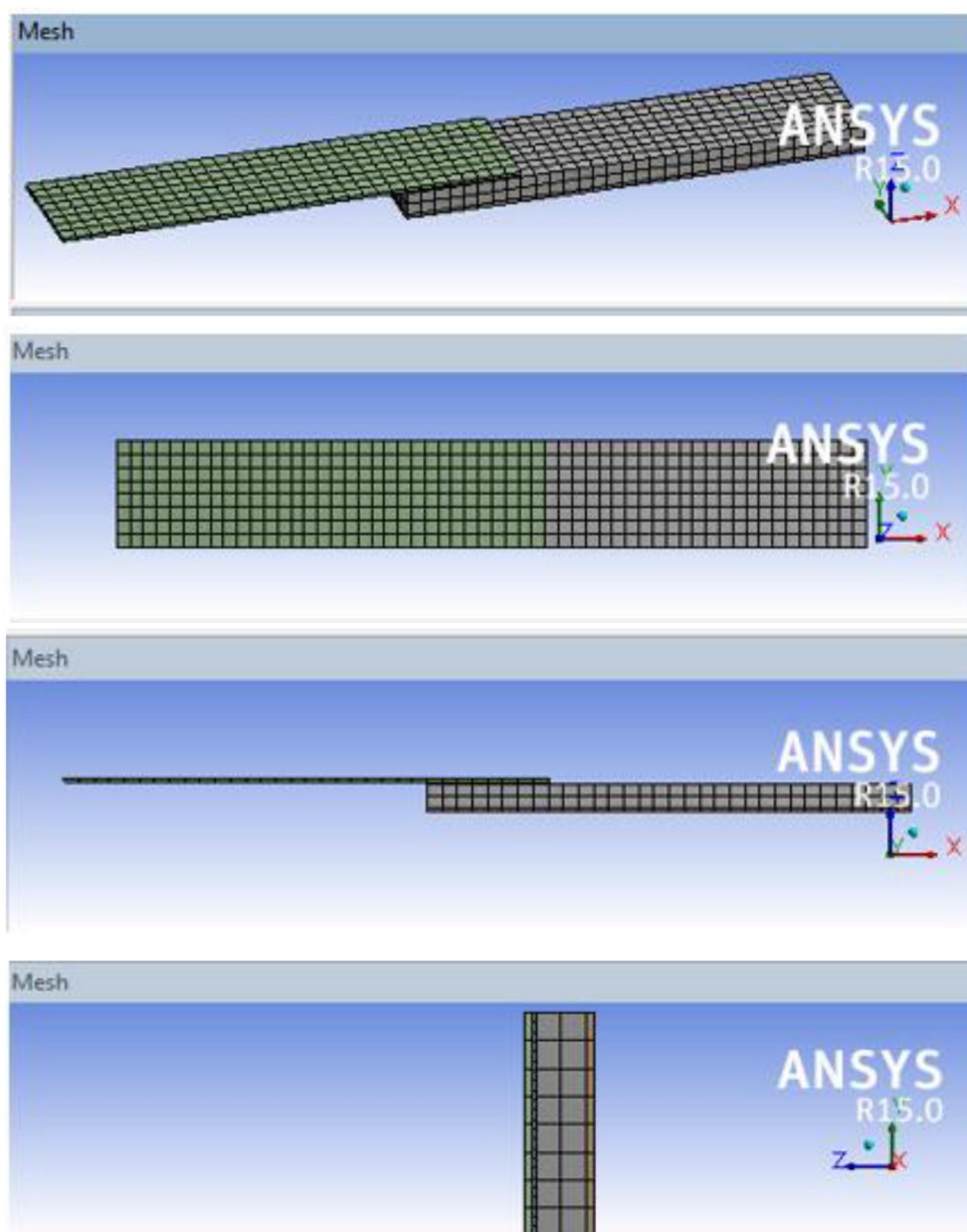
جدول ۲- اطلاعات ساندویچ پنل‌ها

کد نمونه*	نوع چسب مورد استفاده	شماره سنباده	ناحیه هم‌پوشانی (mm)
E1	Epon 828	۶۰	۲۵
E2	Epon 828	۶۰	۱۲/۵
E3	Epon 828	۱۰۰	۲۵
E4	Epon 828	۱۰۰	۱۲/۵
A1	Araldite EA 1103	۶۰	۲۵
A2	Araldite EA 1103	۶۰	۱۲/۵
A3	Araldite EA 1103	۱۰۰	۲۵
A4	Araldite EA 1103	۱۰۰	۱۲/۵

*"E" و "A" به ترتیب، نشان دهنده چسب اپوکسی Epon 828 و Araldite EA 1103 می‌باشند.

۲-۶- بررسی عددی آزمایش تک لبه برشی

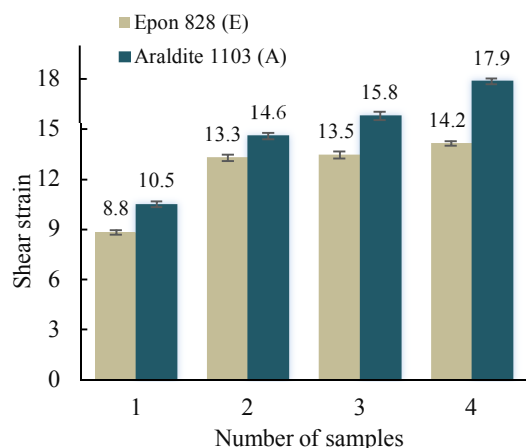
به منظور بررسی صحت نتایج تجربی آزمایش تک لبه برشی، تحلیل اجزای محدود با استفاده از نرم افزار انسیس انجام گرفت. در مدل اجزای محدود از المان‌های سه بعدی جهت بررسی تاثیر نوع چسب، ناحیه هم‌پوشانی و اصلاح سطحی کامپوزیت پلیمری استفاده شد. هسته با استفاده از المان SOLSH190، رویه‌های کامپوزیتی با استفاده از المان SHELL 181 و ناحیه اتصال چسبی با استفاده از المان تماسی CONTA174 مدل شدند که ناحیه اتصال، تماس سطح پایین و سطح بالا را برقرار می‌نماید. بار به صورت افزایشی اعمال شده و در هر مرحله، تنش در مدل مورد بررسی قرار گرفت. در هر مرحله، در صورتی که تنش در



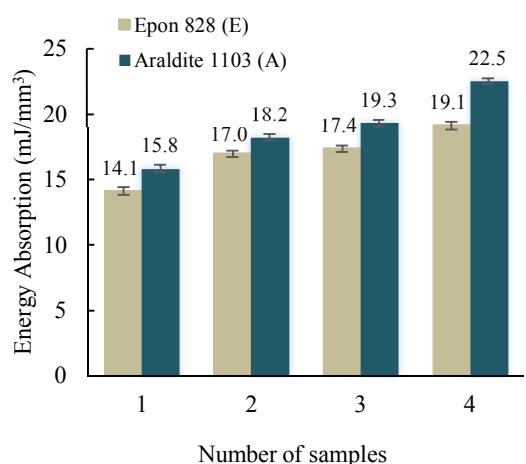
شکل ۳- شبکه‌بندی ساندویچ پنل

لذا Epon می‌تواند به راحتی در داخل تخلخل‌های روی سطح کامپوزیت پلیمری و شبکه فوم PVC نفوذ کرده و چسبندگی بین اجزای ساندویچ پنل را افزایش دهد. این افزایش چسبندگی باعث افزایش استحکام برشی نمونه‌های حاوی چسب Epon می‌شود. علاوه بر این، استحکام بالای چسب Epon نسبت به Araldite بعد از مرحله پخت اولیه [۱۷، ۱۲]

می‌دهند. به طوری که برای نمونه E1، میزان استحکام برشی (۱/۷۶ MPa) حدود ۲۹ درصد نسبت به نمونه A1 (۱/۲۴ MPa) بیشتر است و در نمونه E4 استحکام برشی (۲/۹۲ MPa)، حدود ۱۹ درصد بالاتر از نمونه A4 (۲/۴۶ MPa) است. با توجه به این که میزان گران‌روی چسب Epon بعد از اختلاط نسبت به Araldite بسیار کمتر است،



شکل ۵- تاثیر نوع چسب، ناحیه هم پوشانی و اصلاح سطحی بر کرنش برشی ساندویچ پنل‌ها



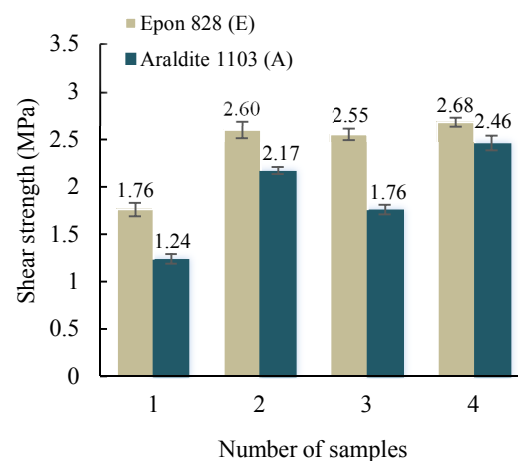
شکل ۶- تاثیر نوع چسب، ناحیه هم پوشانی و اصلاح سطحی بر انرژی شکست ساندویچ پنل‌ها

شکل ۵، درصد کرنش ساندویچ پنل‌های با رویه کامپوزیتی را نشان می‌دهد. در شرایط یکسان، میزان کرنش برشی در نمونه‌های حاوی چسب Araldite نسبت به نمونه‌های حاوی چسب Epon بیشتر است. بیشترین درصد کرنش (۱۷/۹٪) مربوط به نمونه A4 است که این ویژگی در شرایط یکسان برای چسب Epon (نمونه E4)، ۱۴/۲٪ است؛ همچنین کرنش برشی نمونه E1، ۸/۸٪ نسبت به نمونه A1 (۱۰/۵٪) کمتر است؛ بنابراین نمونه‌های حاوی چسب Epon رفتار تردتری نسبت به نمونه‌های حاوی چسب Araldite از خود نشان می‌دهند که علت آن تردی ذاتی چسب Epon بعد از مرحله پخت است.

یکی دیگر از عوامل بالا بودن استحکام برشی نمونه‌های سری E نسبت به نمونه‌های A است.

جدول ۳- تاثیر پارامترهای موثر بر خواص برشی ساندویچ پنل PVC

کد نمونه	استحکام برشی (MPa)		کرنش برشی		انرژی شکست (ml/mm³)	
	عددی	تجربی	عددی	تجربی	عددی	تجربی
E1	۱/۸۴	۸/۸	۱۰/۱	۱۴/۱	۱۶۳	۱۶۳
E2	۲/۶۴	۱۳/۳	۱۴/۲	۱۷/۰	۱۹۴	۱۹۴
E3	۲/۵۵	۱۳/۵	۱۴/۹	۱۷/۴	۲۰۶	۲۰۶
E4	۲/۶۸	۱۴/۲	۱۵/۵	۱۹/۱	۲۴۳	۲۴۳
A1	۱/۲۴	۱۰/۵	۱۱/۱	۱۵/۸	۱۷۴	۱۷۴
A2	۲/۱۷	۲/۲۶	۱۴/۶	۱۸/۲	۲۱۳	۲۱۳
A3	۱/۷۶	۱/۸۵	۱۵/۸	۱۹/۳	۲۲۷	۲۲۷
A4	۲/۴۶	۲/۵۸	۱۷/۹	۲۲/۵	۲۷۱	۲۷۱



شکل ۴- تاثیر نوع چسب، ناحیه هم پوشانی و اصلاح سطحی بر استحکام برشی ساندویچ پنل‌ها

A4، ۱۸/۷ درصد است که در مقایسه با نمونه E4 (۱۵/۵ درصد)، کرنش کمتری دارد. علاوه بر این، میزان انرژی شکست A4، $27/8 \text{ mJ/mm}^3$ است که نسبت به نمونه E4 ($24/3 \text{ mJ/mm}^3$)، حدود ۱۳ درصد بیشتر است. اطلاعات بدست آمده از دو نوع چسب مورد استفاده، نشان داد که نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی مطابقت دارد.

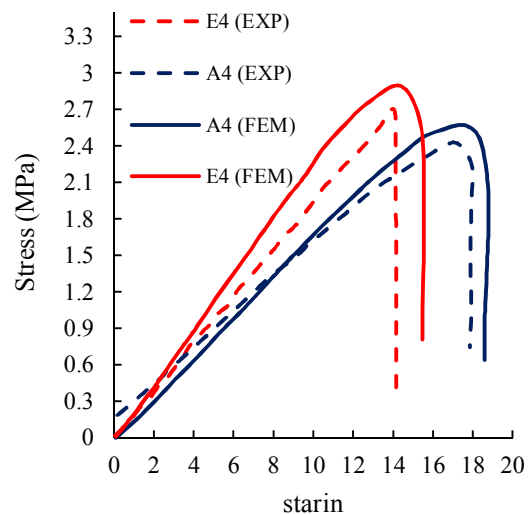
۲-۳- تاثیر ناحیه هم‌پوشانی بر خواص برشی ساندویچ پنل

با افزایش ناحیه هم‌پوشانی بین کامپوزیت و فوم PVC در ساندویچ پنل، میزان تحمل بار اعمالی توسط چسب افزایش می‌یابد، در نتیجه نمونه می‌تواند نیروی بیشتری را تحمل کند؛ اما در محاسبه استحکام برشی، چون نیروی اعمالی تقسیم بر سطح مقطع ناحیه هم‌پوشانی می‌شود، لذا استحکام برشی در نمونه‌های با ناحیه هم‌پوشانی بیشتر نسبت به نمونه با ناحیه هم‌پوشانی کمتر است.

با توجه به شکل ۴، استحکام برشی نمونه E2 تحت شرایط یکسان با ناحیه هم‌پوشانی $12/5 \text{ mm}$ ، $0/84 \text{ MPa}$ (حدود ۳۲ درصد) نسبت به نمونه E1 (با ناحیه هم‌پوشانی 25 mm) بیشتر است. در شرایط مشابه، استحکام برشی نمونه A2، $0/93 \text{ MPa}$ (۴۳ درصد) بیشتر از نمونه A1 است. افزایش سطح ناحیه هم‌پوشانی میزان عیوب موجود در چسب را نیز افزایش می‌دهد؛ بنابراین با افزایش ناحیه هم‌پوشانی، قسمت‌های با چسبندگی نامناسب و ناهمسان بودن قسمت‌های مختلف چسب نیز افزایش می‌یابد که این عوامل باعث کاهش استحکام برشی در چسب می‌شوند. به دلایل مشابه، درصد کرنش برشی و انرژی شکست در نمونه‌های با ناحیه هم‌پوشانی 25 mm کمتر از نمونه‌های با ناحیه هم‌پوشانی $12/5 \text{ mm}$ می‌باشند.

همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، نمونه‌های شبیه‌سازی شده که شرایط یکسانی به غیر از ناحیه هم‌پوشانی دارند، خواص تقریباً مشابهی را در مقایسه با نمونه‌های تجربی ارائه می‌دهند. به عنوان مثال، میزان استحکام برشی برای نمونه E2 با ناحیه هم‌پوشانی حدود ۴۷ درصد بیشتر از نمونه E1 است که در نمونه تجربی این تفاوت ۴۸ درصد است.

شکل ۶، میزان انرژی جذب شده هنگام شکست را برای ساندویچ پنل‌های با شرایط متفاوت نشان می‌دهد. با توجه به این‌که میزان انرژی شکست از محاسبه سطح زیر منحنی تنش-کرنش محاسبه می‌شود، میزان انرژی شکست برای نمونه‌های حاوی چسب Epon از Araldite کمتر است. به عنوان مثال، شکل ۷، نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های E4 و A4 در دو حالت تجربی (EXP) و شبیه‌سازی (FEM) را نشان می‌دهد. با توجه به بالا بودن میزان کرنش چسب Araldite نسبت به Epon و شکل ۵، میزان کرنش بر اثر اعمال تنش برشی نمونه حاوی Araldite نسبت به نمونه حاوی Epon بیشتر است. به همین علت علی‌رغم استحکام برشی بالای نمونه‌های حاوی چسب Epon، میزان کرنش بالای نمونه‌های حاوی چسب Araldite، باعث افزایش مقادیر انرژی شکست در نمونه‌های حاوی چسب Araldite می‌شود؛ به طوری که در نمونه‌های E4 میزان انرژی شکست برابر $19/1 \text{ mJ/mm}^3$ است که نسبت به نمونه مشابه با چسب Araldite (A4) حدود ۱۸ درصد کمتر است.



شکل ۷- نمودار تنش-کرنش آزمایش تک لبه برشی نمونه‌های E4 و A4 با نوع چسب متفاوت

با توجه به جدول ۳، در نمونه‌های شبیه‌سازی شده که شرایط یکسانی به غیر از نوع چسب دارند، میزان استحکام برشی برای نمونه E1 ($1/84 \text{ MPa}$)، حدود ۲۷ درصد بیشتر از نمونه A1 ($1/45 \text{ MPa}$) است؛ همچنین کرنش نمونه

۹ درصد بیشتر است؛ همچنین استحکام برشی نمونه A4 نسبت به نمونه A2 نیز 0.32 MPa بیشتر است. در مورد خواص کرنش برشی و انرژی شکست نیز نمونه‌های شبیه‌سازی رفتار مشابهی با نمونه‌های تجربی از خود نشان می‌دهند.

اتیکاه و همکاران [۱۹]، تاثیر زبری سطح ماکروسکوپی بر استحکام اتصال چسبی بین ورق آلومینیوم و فولاد را مورد مطالعه قرار دادند و از چند نوع سنباده برای ایجاد زبری سطح متفاوت اتصالات لب به لب و از چسب انعطاف پذیر با ضخامت اتصال یکسانی استفاده کردند. آنها مشاهده کردند که با افزایش شماره سنباده، زبری آن کاهش یافته و استحکام برشی ناحیه اتصال افزایش می‌یابد.

در حالت کلی، استفاده از سنباده با شماره ۱۰۰ باعث افزایش بیشتر سطح اتصال شده و امکان نفوذ بیشتر چسب را فراهم می‌کند. به همین دلیل چسبندگی بین کامپوزیت پلیمری و چسب افزایش یافته و استحکام برشی کل ساندویچ پنل را افزایش می‌دهد.

۳-۴- مکانیزم شکست در آزمایش تک لبه برشی ساندویچ پنل

۳-۴-۱- مکانیزم شکست در نمونه‌های حاوی چسب Epon شکل ۸، سطح شکست در نمونه‌های حاوی چسب Epon 828 (نمونه‌های E1 تا E4) را نشان می‌دهد. مکانیزم شکست در نمونه E1، شکست از چسب است که در آن بر اثر اعمال تنش برشی، تخریب ساندویچ پنل از چسب اتفاق افتاده است. در نمونه‌های E2 تا E4 دو مکانیزم شکست چسب (فلش‌های قرمز) و پارگی فوم PVC، باعث تخریب ساندویچ پنل‌های مورد نظر شده است که از چپ به راست مکانیزم پارگی فوم PVC بر شکست چسب غلبه کرده است. در نمونه‌های حاوی چسب Epon، به علت گرانروی پایین چسب، نفوذ داخل فوم PVC به راحتی صورت می‌گیرد که باعث افزایش استحکام برشی فوم نیز می‌شود؛ بنابراین هنگام اعمال نیروی برشی زمانی که نفوذ چسب به داخل فوم و تخلخل‌های کامپوزیت پلیمری بهتر صورت گیرد، استحکام برشی نمونه افزایش خواهد یافت؛ همین علت عامل بهتر بودن استحکام برشی این نوع ساندویچ پنل‌ها در مقایسه با ساندویچ پنل حاوی چسب Araldite است.

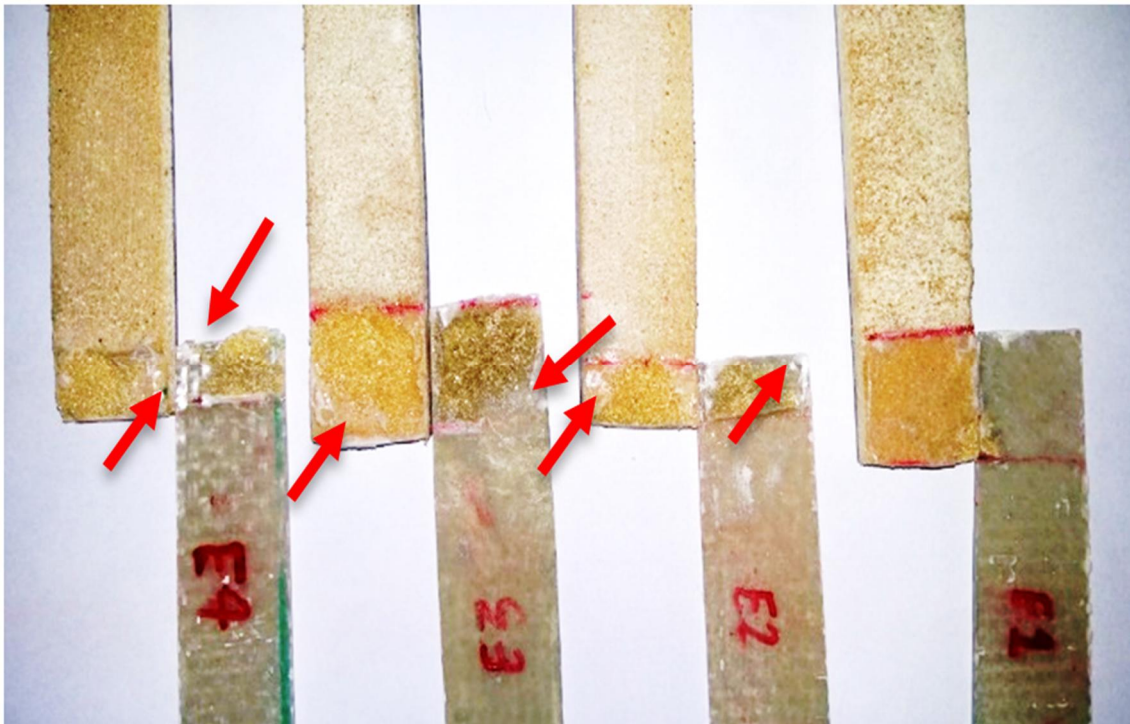
در تحقیق انجام شده توسط سینان و همکاران [۱۸]، اثر فاصله‌ی همپوشانی بر استحکام اتصالات چسبی بررسی شد. آنها نمونه‌های تولید شده در سه نوع مختلف از فاصله همپوشانی را (که توسط سه چسب پایه اپوکسی رایج متصل شده‌اند)، مورد مطالعه قرار دادند. بیشترین مقادیر استحکام برشی بدست آمده در محل اتصال، در فاصله‌ی همپوشانی کم‌تر بود. همانطور که از نتایج این تحقیق نیز مشخص است، با افزایش فاصله‌ی همپوشانی، استحکام برشی کاهش می‌یابد.

۳-۳- تاثیر اصلاح سطحی کامپوزیت پلیمری بر خواص برشی ساندویچ پنل

سنباده‌زنی سطح باعث نفوذ هر چه بهتر چسب داخل تخلخل‌های ایجاد شده می‌شود. این نفوذ افزایش چسبندگی بین کامپوزیت پلیمری و فوم PVC را به دنبال دارد که نتیجه آن افزایش خواص مکانیکی سازه‌های ساندویچ پنل است. در این پژوهش تاثیر دو شماره متفاوت کاغذ سنباده (۶۰ و ۱۰۰) بر خواص برشی ساندویچ پنل مورد بررسی قرار گرفت.

با توجه به شکل ۴، در نمونه‌های با شرایط یکسان و سنباده متفاوت، نمونه‌هایی که کامپوزیت پلیمری آن‌ها با سنباده ۱۰۰ اصلاح سطحی شده‌اند، استحکام برشی بیشتری را نسبت به نمونه‌های با سنباده ۶۰ از خود نشان می‌دهند. به عنوان مثال، استحکام برشی نمونه‌های E2 و E4 (که بجز شماره کاغذ سنباده، شرایط یکسانی را دارند) به ترتیب $2/60$ MPa و $2/92$ می‌باشند که استحکام برشی E4 (با سنباده ۱۰۰) حدود ۱۲ درصد بیشتر از E2 (با سنباده ۶۰) است؛ همچنین در نمونه‌های با چسب Araldite، استحکام برشی A4، 0.29 MPa بیشتر از A2 است. درصد کرنش و انرژی شکست نیز رفتار مشابه استحکام برشی را از خود نشان می‌دهند، به طوری که درصد کرنش در نمونه E3، ۹ درصد بیشتر از نمونه E1 است. در موارد مشابه، درصد کرنش برای نمونه A3، حدود $5/3$ درصد بیشتر از A1 است.

بررسی نتایج نمونه‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهد، نمونه‌هایی که سطح کامپوزیت پلیمری آن‌ها با سنباده ۱۰۰ اصلاح سطحی شده‌اند، خواص برشی بهتری در مقایسه با نمونه‌های دیگر دارند. به عنوان مثال، استحکام برشی نمونه E4، $2/89$ MPa است که نسبت به نمونه E2 ($2/64$ MPa)، حدود



شکل ۸- سطح شکست نمونه‌های E1 تا E4

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تاثیر نوع چسب اپوکسی (Epon 828 و Araldite EA 1103)، منطقه هم‌پوشانی (۲۵ و ۱۲/۵) و اصلاح سطحی کامپوزیت پلیمری (با کاغذ سنباده‌های ۶۰ و ۱۰۰)، بصورت تجربی و شبیه‌سازی شده بر خواص برشی چسب اتصالی بین فوم PVC C7075 و کامپوزیت وینیل استر با ۴ لایه الیاف شیشه به عنوان تقویت کننده مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نهایی این پژوهش به شرح ذیل است:

۱- نتایج شبیه‌سازی و تجربی نشان داد، استحکام برشی نمونه‌های حاوی چسب Epon بیشتر از نمونه‌های حاوی چسب Araldite است در شرایط یکسان، برای نمونه حاوی چسب Epon، میزان استحکام برشی تجربی و عددی، به ترتیب، حدود ۲۹ و ۲۱ درصد نسبت به نمونه حاوی چسب Araldite بیشتر است؛ اما درصد کرنش ساندویچ پنل‌های حاوی چسب Epon کمتر از Araldite است.

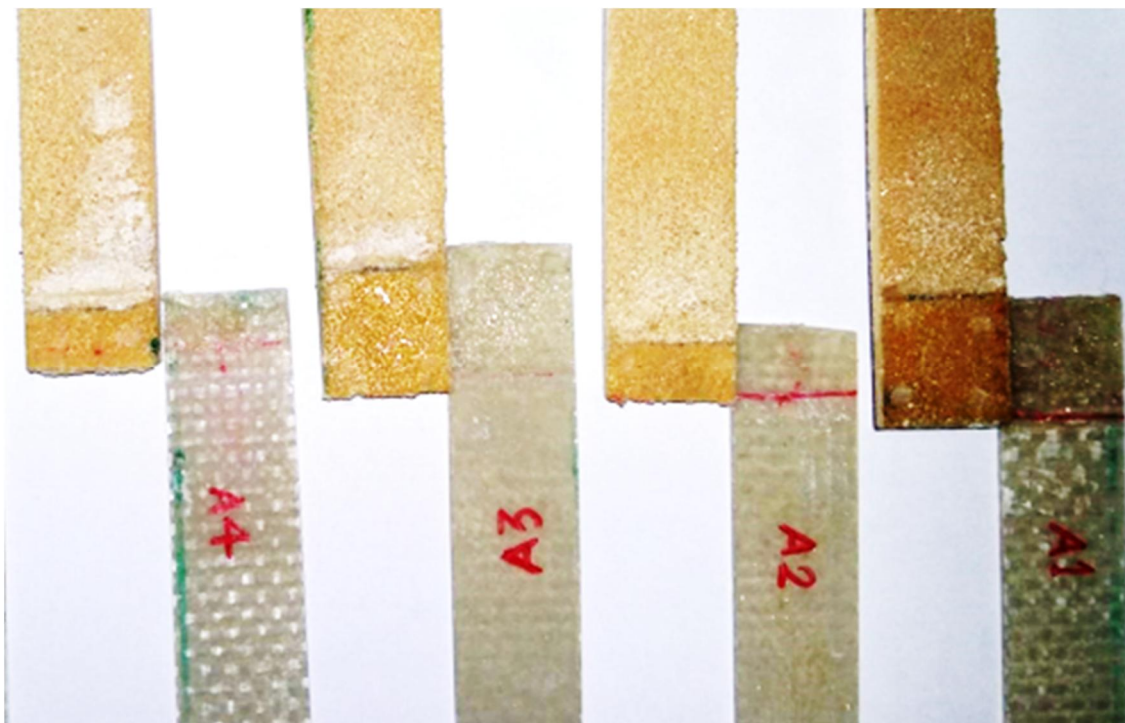
۲-۴-۳- مکانیزم شکست در نمونه‌های حاوی چسب Araldite

شکل ۹، سطح شکست نمونه‌های حاوی چسب EA Araldite (نمونه‌های A1 تا A4) را نشان می‌دهد که در آنها مکانیزم شکست، شکست چسب مورد استفاده است. در این نمونه‌ها به علت گران‌وری بالای چسب مورد استفاده، نفوذ داخل فوم PVC و تخلخل‌های کامپوزیتی پلیمری بسیار کم بوده است. همین اتفاق باعث تضعیف چسبندگی بین اجزای ساندویچ پنل می‌شود که کاهش خواص برشی در مقایسه با ساندویچ پنل‌های حاوی چسب Epon را به دنبال دارد.

در حالت کلی، دو مکانیزم شکست چسب و پارگی فوم PVC تعیین کننده خواص برشی ساندویچ پنل‌ها می‌باشند. در صورتی که نفوذ پلیمر داخل شبکه فوم و تخلخل‌های سطح کامپوزیت پلیمری به راحتی انجام شود، استحکام برشی ساندویچ پنل افزایش یافته و مکانیزم شکست از شکست چسب به پارگی فوم تغییر خواهد یافت.

۳- هر دو نتیجه آزمون تجربی و شبیه‌سازی نشان داد، خواص برشی نمونه‌هایی که اصلاح سطحی کامپوزیت پلیمری آنها با کاغذ سنباده ۱۰۰ انجام شده، بیشتر از کاغذ سنباده ۶۰ است.

۲- خواص برشی نمونه‌های با ناحیه هم‌پوشانی ۲۵ mm در مقایسه با نمونه‌های با ناحیه هم‌پوشانی ۱۲/۵ mm، کمتر است.



شکل ۹- سطح شکست در نمونه‌های A1 تا A4

۵- مراجع

- [6] Abdollahi Azghan M, Eslami-Farsani R (2018) The effects of stacking sequence and thermal cycling on the flexural properties of laminate composites of aluminium-epoxy/basalt-glass fibres. *Mater Res Express* 5(2): 25-32.
- [7] Kaw AK (2005) *Mechanics of composite materials* CRC press. Taylor & Francis. 2nd edn. United Kingdom.
- [8] Banea M, Da Silva LF (2009) Adhesively bonded joints in composite materials: An overview. *P I Mech Eng L-J Mat* 223(1): 1-18.
- [9] Marques E, Magalhães D, Da Silva LF (2011) Experimental study of silicone-epoxy dual adhesive joints for high temperature aerospace applications. *Materialwiss Werkst* 42 (5): 471-477.
- [10] Budhe S, Ghumatkar A, Birajdar N, Banea M (2015) Effect of surface roughness using different adherend materials on the adhesive bond strength. *Appl Adhes Sci* 3(1): 20-30.
- [11] Mirzapour A, Beheshty MH, Vafayan M (2013) The response of sandwich panels with rigid
- [1] Kant T, Patil H (1991) Buckling loads of sandwich columns with a higher-order theory. *J Reinf Plast Comp* 10(1): 102-109.
- [2] Zhang J, Supernak P, Mueller-Alander S, Wang CH (2013) Improving the bending strength and energy absorption of corrugated sandwich composite structure. *Mater Des* 52: 767-773.
- [3] Parton H, Verpoest I (2005) In situ polymerization of thermoplastic composites based on cyclic oligomers. *Polym Compos* 26(1): 60-65.
- [4] Packham D (1983) *The adhesion of polymers to metals: The role of surface topography. adhesion aspects of polymeric coatings*. First edn. Springer, Boston.
- [5] Adams RD, Comyn J, Wake WC, Wake W (1997) *Structural adhesive joints in engineering*. springer science & business media. 2nd edn. Chapman & hall, London.

انفجاری. مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها
۸(۳): ۹۱-۱۰۶.

- [16] Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading. ASTM International. (2001) D 1002-01.
- [17] Resin E (2005) 828 Data Sheet, Shell Chemical Co. 60.
- [18] Solmaz AS, Turgut A (2012) the effects of adhesive thickness, surface roughness and overlap distance on joint strength in prismatic plug-in joints attached with adhesive. *Int J Phys Sci* 7(17): 2580-2586.
- [19] Atikah N, Afendi M, Hirmaliza, Majid M, Amira N, Mazlee MN (2014) Strength of ductile adhesive butt joint bonded with dissimilar adherents: Effect of surface roughness. *Appl Mech Mater* 554: 366-370.

polyurethane foam cores under flexural loading. *Iran Polym J* 14(12): 1082-1088.

- [12] Da Silva LF, Rodrigues T, Figueiredo M, De Moura M, Chousal J (2006) Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength. *J Adhesion* 82(11): 1091-1115.
- [13] Choi K, Condon J, Ferracane J (2000) The effects of adhesive thickness on polymerization contraction stress of composite. *J Dent Res* 79(3): 812-817.
- [14] Sabzikar Boroujerdy M, Dariushi S, Sadighi M (2013) Bending properties of sandwich beams with fiber metal laminate face sheet. *Iranian Journal of Polymer Science and Technology* 25(5): 375-382.

[۱۵] خندابی ر، خدارحمی ح، حسینی ر، ضیاء شمامی م (۱۳۹۷)
مطالعه تجربی و عددی اثر ضخامت هسته و رویه در پانل‌های
ساندویچی با هسته فوم و رویه‌های آلومینیومی تحت بارگذاری