



Improving the bending strength of fiberboard-polystyrene foam sandwich composite panels through designing grooves on the bottom surface of the outer layer

Mohammad Reza Afroushte¹, Mohammad Arabi^{2*}, Saeed Reza Farokhpayam³, Sadegh Sarabi⁴

1- MSC Student, Department of Science and Wood and Paper Industries, University of Zabol, Zabol, Iran

2- Corresponding authors, Assistant Professor, Department of Science and Wood and Paper Industries, University of Zabol, Iran. email: marabi@uoz.ac.ir

3- Associate Professor, Department of Science and Wood and Paper Industries, University of Zabol, Iran

4- PhD Student, Department of Science and Wood and Paper Industries, University of Zabol, Zabol, Iran

Received: April 2025

Accepted: August 2025

Abstract

Problem definition and objectives: One of the most critical components of sandwich panels significantly influencing overall structural performance is the adhesion line between the outer layers and inner core. This adhesion line functions as a critical junction in mechanical load transfer, particularly tensile, compressive, and shear forces. Effective adhesion between different layers is a key factor ensuring sandwich structure stability and strength. Any deficiency in this adhesion interface can lead to serious issues such as layer delamination, mechanical cracking, and ultimately structural failure. To improve mechanical adhesion and enhance sandwich panel strength, surface processing techniques represent an effective methodology. Surface processing involves creating modifications on the outer layer surface, including generating grooves, patterns, and various designs that increase contact surface area and improve mechanical bonding between layers and the inner core. Consequently, this research investigated the impact of groove design and depth on the flexural performance of sandwich panels with medium-density fiberboard (MDF) skin layers.

Methodology: In this study, medium-density fiberboard with a density of 690 kg/m³ and 3mm thickness (manufactured by Pak Chub Company) was utilized for panel skin, while expanded polystyrene foam with a density of 25 kg/m³ and 30mm thickness (produced by Arya Building Industry) served as the core material. Grooves with various designs (parallel and combined parallel-perpendicular) and different depths (0.5 and 4mm) were created on the lower surfaces of MDF layers using a CNC machine with controlled feed rate. Two adhesive types were employed: polyvinyl acetate (PVAC) and two-component polyurethane (PU). Mechanical tests were conducted according to international standards, and results were analyzed using SPSS statistical software.

Results: Findings demonstrated that polyvinyl acetate adhesive exhibited superior performance in improving sandwich panel flexural properties. Changing the adhesive from polyurethane to polyvinyl acetate increased flexural resistance and elastic modulus by approximately 67% and 59%, respectively. Creating parallel and combined grooves enhanced flexural resistance by 29% and 15%, and elastic modulus by 39% and 21% compared to control samples. Additionally,

increasing groove depth to 0.5 and 1mm resulted in flexural resistance increases of 36% and 17%, and elastic modulus improvements of 40% and 17%, respectively.

Conclusion: The research results effectively illustrated that groove pattern and depth combinations can uniformly distribute bending forces across the panel surface and prevent stress concentration at critical points. These findings highlight the significance of optimal groove design and appropriate adhesive selection in improving sandwich panel mechanical properties. The combination of PVAC with combined grooves at 1mm depth can be considered an ideal solution for achieving high flexural strength panels in industrial and engineering applications. Furthermore, the results suggest that polyurethane adhesive utilization requires optimizing production process conditions and groove design to compensate for its inherent limitations.

Keywords: Flexural strength, polystyrene foam, sandwich panel, modulus of elasticity.

بهبود مقاومت خمشی کامپوزیت پانل ساندویچی تخته فیبر- فوم پلی استایرن از طریق طراحی شیارهای سطح زیرین لایه‌های بیرونی

محمدرضا افروشته^۱، محمدعربی^۲، سعیدرضا فرخ پیام^۳، صادق سرابی^۴

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۲- نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: marabi@uoz.ac.ir

۳- دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۴- دانشجوی مقطع دکتری، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

تاریخ دریافت: اردیبهشت ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: شهریور ۱۴۰۴

چکیده

بیان مساله و اهداف: یکی از مهم‌ترین اجزای پانل‌های ساندویچی که در عملکرد کلی سازه تأثیر قابل توجهی دارد، خط چسبندگی بین لایه بیرونی و هسته داخلی است. این خط چسبندگی به عنوان یک پیوند بحرانی در انتقال بارهای مکانیکی، به‌ویژه نیروهای کششی، فشاری و برشی، عمل می‌کند. در واقع، چسبندگی مؤثر بین لایه‌های مختلف از جمله عواملی است که پایداری و استحکام سازه‌های ساندویچی را تضمین می‌کند. هرگونه نقص در این خط چسبندگی می‌تواند منجر به مشکلات جدی مانند جدا شدن لایه‌ها، ایجاد ترک‌های مکانیکی، و در نهایت شکست سازه شود. برای بهبود چسبندگی مکانیکی و افزایش استحکام پانل‌های ساندویچی، استفاده از تکنیک‌های پردازش سطح یکی از روش‌های کارآمد است. پردازش سطح شامل ایجاد تغییراتی بر روی سطح لایه بیرونی، نظیر ایجاد شیارها، الگوها و طرح‌های مختلف است که باعث افزایش سطح تماس و بهبود اتصال مکانیکی بین لایه‌ها و هسته داخلی می‌شود. از این رو، در این تحقیق تأثیر نوع طرح و عمق شیارهای ایجاد شده در سطح زیرین پوسته (تخته فیبر دانسیته متوسط) پانل‌های ساندویچی بر عملکرد خمشی آن مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روشها: در این مطالعه برای پوسته پانل ساندویچی تخته فیبر با دانسیته متوسط با دانسیته ۶۹۰ کیلو گرم بر متر مکعب و ضخامت ۳ میلی‌متر و ساخت شرکت پاک چوب و برای مغزی یا همان هسته پانل فوم پلی استایرن منبسط‌شده با دانسیته ۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب و ضخامت ۳ سانتی‌متر، ساخت شرکت صنعت ساختمان آریا در نظر گرفته شد. شیارها با طرح‌های مختلف (موازی و عمود بر طول پانل) و عمق‌های متفاوت (۰/۵ و ۴ میلی‌متر) بر سطح زیرین لایه‌های رویی و زیری تخته فیبر با دانسیته متوسط، توسط دستگاه CNC با کنترل نرخ تغذیه ایجاد شدند. از دو نوع چسب، شامل چسب پلی وینیل استات (PVAC) و پلی‌اورتان دو جزئی (PU) برای متصل کردن لایه‌ها استفاده شد. آزمون‌های مکانیکی طبق استانداردهای بین‌المللی انجام و نتایج با کمک نرم‌افزار آماری SPSS تحلیل شد.

نتایج: چسب پلی‌اورتان نسبت به چسب پلی وینیل استات عملکرد ضعیف‌تری در بهبود خواص خمشی پانل‌های ساندویچی نشان داد، بطوریکه با تغییر نوع چسب از پلی‌اورتان به پلی وینیل استات مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته به ترتیب حدود ۶۷ و ۵۹ درصد افزایش یافتند. با ایجاد شیارهای موازی و عمود بر طول پانل ساندویچی، مقاومت خمشی به ترتیب ۲۹ و ۱۵ درصد و مدول الاستیسیته به ترتیب ۳۹ و ۲۱ درصد، نسبت نمونه‌های شاهد افزایش یافت. همچنین با افزایش عمق شیار به ۰/۵ و سپس ۱ میلی‌متر مقاومت خمشی به ترتیب ۳۶ و ۱۷ درصد و مدول الاستیسیته به ترتیب ۴۰ و ۱۷ درصد افزایش نشان داد.

نتیجه‌گیری: نتایج این تحقیق به خوبی نشان داد که ترکیب الگو و عمق شیار، می‌تواند به خوبی نیروی ناشی از خمش را به‌طور یکنواخت در سطح پانل توزیع کرده و از تمرکز تنش در نقاط بحرانی جلوگیری کند. این نتایج اهمیت طراحی پهنه شیارها و انتخاب چسب مناسب را در بهبود خواص مکانیکی پانل‌های ساندویچی برجسته می‌کند. ترکیب

PVAC با شیارهای ترکیبی و عمق ۱ میلی‌متر می‌تواند به‌عنوان یک راهکار ایده‌آل برای دستیابی به پانل‌هایی با استحکام خمشی بالا در کاربردهای صنعتی و مهندسی مورد استفاده قرار گیرد. از سوی دیگر این نتایج نشان می‌دهند که برای بهره‌برداری از چسب PU لازم است شرایط فرآیند تولید و طراحی شیارها به‌گونه‌ای بهینه شوند که محدودیت‌های آن را جبران کنند.

واژه های کلیدی: پانل ساندویچی، فوم پلی‌استایرن، مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته.

مقدمه

پانل‌های ساندویچی یکی از کاربردی‌ترین اجزای سازه‌های مهندسی مدرن محسوب می‌شوند که به دلیل ساختار چندلایه و استفاده از مواد با خواص فیزیکی و مکانیکی متفاوت در لایه‌های مختلف، کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف نظیر ساخت‌وساز، دکوراسیون داخلی و حتی صنایع خودروسازی و هوافضا پیدا کرده‌اند [۲،۱]. به‌ویژه پانل‌هایی که لایه‌های بیرونی آن‌ها از مواد چوبی یا مشتقات چوبی ساخته شده است، به دلیل خواص منحصر به فرد این مواد، همچون قابلیت شکل‌پذیری، استحکام بالا، وزن کم، و مقاومت در برابر تغییرات محیطی، مورد توجه قرار گرفته‌اند [۳]. لایه‌های بیرونی پانل، که معمولاً از تخته فیبر دانسیته متوسط (MDF)، تخته چندلایه یا سایر مشتقات چوبی ساخته می‌شود، به طور مؤثری در بهبود مقاومت مکانیکی و خمشی پانل نقش دارند و همزمان نقش زیبایی‌شناختی و تزئینی در پروژه‌های معماری را نیز ایفا می‌کنند [۴]. از سوی دیگر، هسته پانل‌های ساندویچی غالباً از موادی سبک نظیر فوم پلی‌استایرن یا فوم پلی‌یورتان ساخته می‌شود که ضمن کاهش وزن کلی سازه، عایق‌بندی حرارتی و صوتی مناسبی نیز ارائه می‌دهند [۵]. این ترکیب بهینه بین مواد چوبی مقاوم و هسته سبک، پانل‌های ساندویچی را به یکی از اجزای اساسی در سازه‌های مدرن تبدیل کرده و امکان استفاده از آن‌ها در طیف وسیعی از کاربردها فراهم می‌آورد. یکی از مهم‌ترین موارد پانل‌های ساندویچی که در عملکرد کلی سازه تأثیر قابل توجهی دارد، خط چسبندگی بین لایه بیرونی و هسته داخلی است [۶]. این خط چسبندگی به عنوان یک پیوند بحرانی در انتقال بارهای مکانیکی، به‌ویژه نیروهای کششی، فشاری و برشی، عمل می‌کند. در واقع چسبندگی مؤثر بین لایه‌های مختلف از جمله عواملی است که پایداری و استحکام سازه‌های

ساندویچی را تضمین می‌کند. کیفیت این چسبندگی مستقیماً به نوع چسب، کیفیت سطح، روش‌های اعمال چسب، و حتی شرایط محیطی هنگام چسب‌زنی وابسته است [۷]. هرگونه نقص در این خط چسبندگی می‌تواند منجر به مشکلات جدی مانند جدا شدن لایه‌ها، ایجاد ترک‌های مکانیکی، و در نهایت شکست سازه شود. علاوه بر این، فشارهای ناشی از بارگذاری‌های مکانیکی به ویژه در شرایطی که اختلاف قابل توجهی میان خواص مکانیکی لایه‌های بیرونی و هسته وجود دارد، بر این خط چسبندگی تأثیرگذار است.

یکی از روش‌های کارآمد برای بهبود کیفیت این خط چسبندگی و افزایش استحکام پانل‌های ساندویچی، استفاده از تکنیک‌های پردازش سطح هسته و یا پوسته پانل است [۸]. روش‌های پردازش سطحی (مکانیکی، شیمیایی و فراوری با تابش اشعه) در لایه‌های مربوطه به پوسته و هسته پانل‌های ساندویچی می‌تواند به طور قابل توجهی بر سطح موجود و کیفیت اتصال چسب تأثیر بگذارند [۶]. فراوری مکانیکی شامل سنباده‌زنی، سند بلاست و ایجاد طرح و الگوی های مختلف شیار و خراش در عمق‌های مختلف بر سطح لایه های برون است- [۷]. الگوهای مختلف بافت مانند برآمدگی ها، شیارها یا طرح های برجسته، سطح تماس چسب را با هسته افزایش می‌دهند و متعاقباً سطح چسبندگی را افزایش می‌دهند. این سطح افزایش یافته امکان اتصال و قفل مکانیکی بهتر را فراهم می‌کند، که برای اتصال موثر، به ویژه در شرایط بارگذاری برشی، بسیار مهم است. اما باید این نکته را در نظر داشت که افزایش بیش از حد عمق شیار و یا خراش- های ایجاد شده می‌تواند باعث تمرکز تنش و در نتیجه شکست‌های زودرس شود [۶،۸]. غلامی و همکاران (۱۳۹۸) به اندازه گیری چقرمگی شکست جدایش پوسته از هسته در سازه های ساندویچی شیاردار تحت موج اول بارگذاری پرداختند. نتایج آنها نشان داد که با قرار گرفتن

می‌تواند نقش بسزایی در تعیین کیفیت چسبندگی پوسته‌های ام دی اف و هسته فوم پلی‌استایرن ایفا کند و سازندگان می‌توانند با بهینه سازی این ویژگی‌های طراحی، اتصال مکانیکی را افزایش و نفوذ چسب را افزایش دهند و عملکرد کلی ساندویچ پانل‌ها را بهبود بخشند. از این رو هدف از این مطالعه بهبود مقاومت خمشی کامپوزیت پانل‌های ساندویچی تخته فیبر-فوم پلی‌استایرن از طریق طراحی شیارهای در دو نوع طرح موازی و عمود بر طول پانل و در دو عمق مختلف در سطح زیرین لایه-های بیرونی و محل اتصال پوسته به هسته پانل است.

مواد و روش‌ها

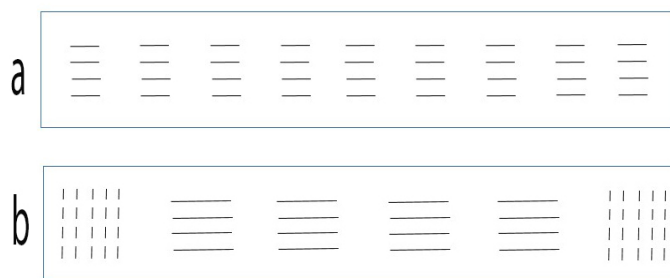
بطور کلی ساندویچ پانل‌ها اغلب از دو قسمت پوسته و هسته تشکیل می‌شوند، که جنس هسته و پوسته پانل بسته به کاربر آن می‌تواند متفاوت باشد. در این مطالعه پوسته پانل ساندویچی از MDF با دانسیته ۶۹۰ کیلوگرم بر متر مکعب و از شرکت پاک چوب تهیه شد. فوم پلی‌استایرن منبسط‌شده با دانسیته ۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب، ساخت شرکت صنعت ساختمان آریا به‌عنوان مغزی یا همان هسته پانل استفاده شد. برای ساخت پانل ساندویچی ورق نازک MDF به ابعاد ۱۰۰۰ در ۹۵ در ۳ میلی‌متر و فوم پلی‌استایرن به ابعاد ۱۰۰۰ در ۹۵ در ۳۰ میلی‌متر (به ترتیب طول، پهنای و ضخامت) برش کاری و آماده شدند.

برش کاری و ایجاد شیار MDF

برای تهیه تخته مورد نیاز در این مطالعه ابتدا الگوی برش مناسب توسط نرم افزار CutMaster تهیه شد. سپس مطابق الگوی برش ترسیمی تخته‌ها بوسیله دستگاه پانل‌بر EASY CUT3200 ساخت شرکت نوین چوب در ابعاد ۱۰۰×۹۵ سانتی‌متر برشکاری شدند. شیارهای سطحی در طرح‌ها و عمق‌های مختلف بر روی سطح زیرین ورق‌های MDF (محل اتصال پوسته به هسته) توسط دستگاه CNC مدل Unitech4۰۲۰ ساخت کشور چین با دقت بالا و توسط مته شیارزن ایجاد گردید. این الگوهای شیار شامل طرح‌های موازی و عمودی و عمود (ترکیبی) بر طول پانل بوده و در دو عمق متفاوت ۰/۵ و ۱ میلی‌متر و در فاصله ۱/۸ سانتی‌متر از لبه و همدیگر ایجاد شدند (شکل ۱). فاصله، شکل و عمق شیارها به گونه‌ای طراحی و

شیار درون هسته ساندویچ پانل، ترک اتصالی در هنگام رشد با برخورد به هر شیار متوقف شده و برای شروع مجدد رشد خود به نیروی بالاتری نیاز دارد. همین پدیده باعث افزایش مقاومت این نوع از سازه در مقابل رشد ترک در ناحیه پوسته و هسته می‌گردد [۹]. همچنین Klimek و همکاران (۲۰۱۶) یک کامپوزیت ساندویچی سبک وزن با هسته تخته لایه و پوسته تخته خرده چوب شیار دار را توسعه دادند. نتایج تحلیل شکست پانل‌ها به کمک نرم افزارهای آنالیز تصویر نشان داد که میزان تغییر شکل ایجاد شده در مناطقی که شیارها وجود داشتند نسبت به سایر مناطق بسیار کمتر است [۱۰]. مطالعات دیگر نیز نشان داده‌اند که الگوهای شیار و برجستگی می‌تواند تأثیر مهمی بر بهبود کیفیت پیوند و چسبندگی در کامپوزیت‌های ساندویچی داشته باشند. Da Silva و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که الگوهای سطحی موجب افزایش استحکام پیوند چسب تحت شرایط بارگذاری مکانیکی می‌شوند [۱۱]. Iwamoto و Yokozeki (۲۰۱۶) با ترکیب حفره‌های دایره‌ای و شبکه‌ای از شیارها در هسته پانل‌ها به بهبود چقرمگی و افزایش ۳۶ درصدی انرژی شکست دست یافتند [۱۲]. Akman و همکاران (۲۰۲۳) تأثیر عمق، عرض و تعداد شیارهای هسته را بررسی کردند و دریافتند که افزایش عمق شیارها می‌تواند مساحت سطح چسبندگی را تا ۳۰۸ درصد و استحکام برشی را تا ۱۸۰ درصد نسبت به نمونه‌های شاهد افزایش دهد [۱۳]. Truxel و همکاران (۲۰۰۶) نیز با ایجاد شیار در پانل‌هایی با لایه‌های بیرونی الیاف کربن و مغزی چوب بالزا و فوم PVC، افزایش مقاومت به شکست و توقف ترک‌ها را مشاهده کردند [۱۴]. Hirose و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که شیارهای نیم‌دایره‌ای منجر به افزایش انرژی لازم برای شکست می‌شوند، ولی پس از عبور ترک از شیار حاوی رزین، این انرژی کاهش می‌یابد [۱۵]. همچنین، Miao و همکاران (۲۰۱۵) گزارش دادند که پانل‌های ساندویچی با شکاف‌های پر یا نیمه‌پر از رزین مقاومت شکست بیشتری نسبت به پانل‌های با هسته‌های سالم یا شکاف‌های خالی دارند [۱۶]. این یافته‌ها نشان می‌دهند که طراحی مناسب شیارها می‌تواند به طور قابل توجهی خواص مکانیکی پانل‌های ساندویچی را بهبود بخشد. بنابراین ایجاد طرح و شیارهای مختلف در لایه‌های بیرونی ساندویچ پانل‌ها، به ویژه از نظر الگو و عمق شیار،

اندازه‌گیری شده‌اند که تمرکز تنش ایجاد نکنند و به مقاومت و یکپارچگی لایه‌های رویی MDF آسیب نرسانند.



شکل ۱- شماتیک طرح‌های ایجاد شده بر سطح ام دی اف (a). طرح موازی، (b). طرح ترکیبی (موازی و عمود بر طول پانل) و (c). نمونه های بدون شیار

قرار گرفتند. عملیات پرس در فشار ۰/۲ تا ۲ بار و به مدت ۳ ساعت انجام می‌شود تا زمان کافی برای گیرش کامل چسب‌ها فراهم شود. شرایط محیطی شامل دمای محیط (حدود ۲۵ درجه سانتی‌گراد) در این مرحله کنترل شد.

انجام آزمون‌های مکانیکی

آزمون‌های مکانیکی شامل مدول گسیختگی (MOR) و مدول الاستیسیته (MOE) طبق استاندارد ASTM C393 (2016) و با استفاده از دستگاه تست خمشی (Universal Testing Machine) و مطابق شکل ۲ انجام شد [۱۷]. نمونه‌ها با سرعت بارگذاری ۲ میلی‌متر در دقیقه تا رسیدن به نقطه شکست یا حداکثر خمیدگی با طول دهانه ۹۰۰ میلی‌متر تست شدند. داده‌های به‌دست‌آمده با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS ۲۶ به روش طرح فاکتوریل در قالب بلوک‌های کاملاً تصادفی تجزیه و تحلیل شده و تأثیر متغیرهای مورد بررسی از جمله عمق، طرح شیارها و نوع چسب بر استحکام و چسبندگی پانل‌های ساندویچی مورد ارزیابی قرار گرفت.

چسب زنی و ساخت پانل‌های ساندویچی

در این پژوهش از دو نوع چسب سفید نجاری (پلی-ونیل استات) و چسب پلی‌یورتان استفاده شد. چسب سفید نجاری با کد ۸۰۱ از شرکت تولیدی و صنعتی سامد مشهد و چسب پلی‌یورتان دو جزئی با کد ML518 و هاردنر HA418 با نسبت ۱۰۰ به ۳۰ (نسبت چسب به هاردنر) و سطح چسب خوری ۳۰۰ گرم بر متر مربع ساخت شرکت چسب مکرر تهیه و استفاده شد. چسب پلی‌یورتان به دلیل ویژگی انبساطی و خاصیت پرکنندگی خود به گونه‌ای اعمال می‌شود که شیارهای سطحی را پر کرده و پیوند مکانیکی محکمی ایجاد کند. در مقابل، چسب PVAC که یک چسب پایه آبی است، به صورت یکنواخت و با ضخامت کنترل‌شده‌ای بر روی سطوح MDF و فوم اعمال می‌شود. مقدار مصرف چسب برای هر دو نوع، ۳۰۰ گرم بر متر مربع در نظر گرفته شده و عملیات پخش چسب با استفاده از ابزار مناسب و با نهایت دقت انجام شد.

پس از مرحله چسب زنی، ورق‌های MDF با دقت بر روی فوم پلی‌استایرن قرار داده شدند و تحت پرس سرد



شکل ۲- آزمون تحت بارگذاری در دستگاه تست خمشی

نتایج و بحث

نتایج آنالیز واریانس تأثیر مستقل و متقابل متغیرهای مورد مطالعه نظیر نوع چسب، الگوی شیار و عمق شیار در سطوح زیرین لایه بیرونی بر مقاومت خمشی (MOR) و مدول الاستیسیته خمشی (MOE) پانل‌های ساندویچی تخته فیبر دانسیته متوسط - فوم پلی استایرن در جدول

۱ ارائه شده است. همانطور که از جدول ۱ مشخص است تأثیر مستقل و متقابل همه متغیرها به جز اثر متقابل الگوی شیار \times عمق شیار بر مقاومت خمشی (MOR) و مدول الاستیسیته خمشی (MOE) در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنی دار است.

جدول ۱- جدول تجزیه واریانس اثر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر بر مقاومت خمشی (MOR) و مدول الاستیسیته خمشی (MOE) پانل‌های ساندویچی تخته فیبر دانسیته متوسط - فوم پلی استایرن

معنی داری	درجه آزادی	F	میانگین مربعات	منابع تغییرات	خواص مکانیکی
۰/۰۰**	۱	۱۵۱/۵۱۹	۴/۵۱۶	چسب	مدول گسستگی
۰/۰۰**	۲	۱۳۲/۴۲۱	۳/۴۱۶	الگوی شیار	
۰/۰۰**	۲	۱۷۱/۳۶۴	۳/۹۱۱	عمق شیار	
۰/۰۰**	۵	۱/۰۳۹	۱۶۰/۳۴	چسب * الگوی شیار	
۰/۰۰**	۵	۱/۰۲۸	۱۱۷/۶۲۴	چسب * عمق شیار	
./۳۹۶ ns	۴	۰/۱۹۴	۱/۰۶۱	الگوی شیار * عمق شیار	
۰/۰۰**	۹	۰/۵۹۴	۶۰۰/۳۱۴	چسب * الگوی شیار * عمق شیار	مدول الاستیسیته
۰/۰۰**	۱	۱۵۱/۵۷۸	۶۳۵۴۰۲/۶۰	چسب	
۰/۰۰**	۲	۱۰۱/۸۵	۴۵۴۴۷۴/۷۱۰	الگوی شیار	
۰/۰۰**	۲	۹۸/۸۲۹	۲۴۴۲۲۵۳/۱۸	عمق شیار	
۰/۰۰**	۵	۱۶۰/۵۱۹	۱۴۶۱۵۶۶۳/۸۵	چسب * الگوی شیار	
۰/۰۰**	۵	۱۱۷/۸۳۴	۱۴۴۶۳۵۳۸/۶۰	چسب * عمق شیار	
./۳۹۷ ns	۴	۱/۰۶۰	۲۷۲۸۵۰۹/۵۹	الگوی شیار * عمق شیار	
۰/۰۰**	۹	۱۶۱/۵۸۵	۸۳۳۱۱۵۳/۵۸۳	چسب * الگوی شیار * عمق شیار	

** معنی داری در سطح اعتماد ۹۹ درصد، ns: عدم معنی داری

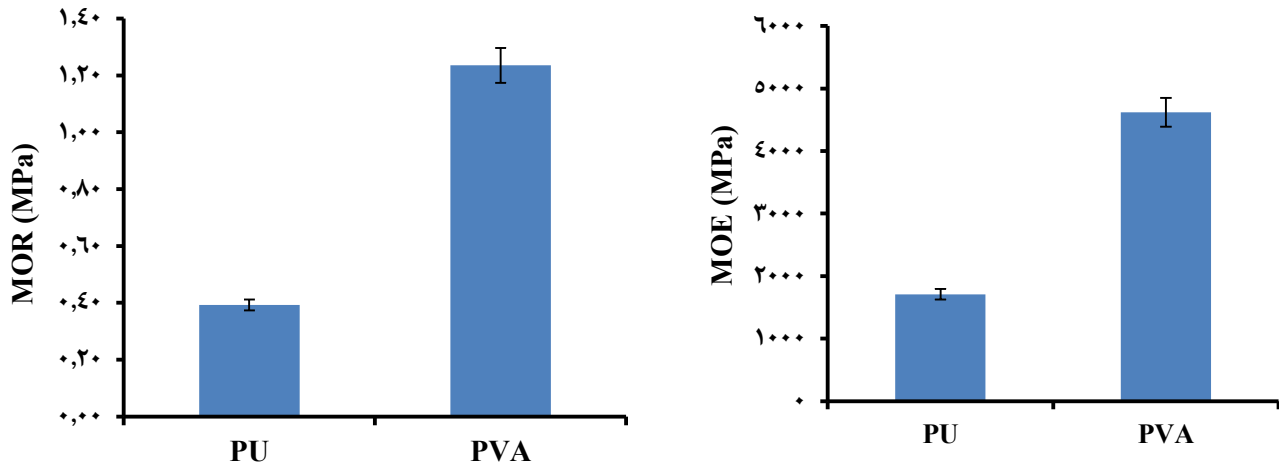
لایه‌ها می‌شود. در نتیجه نیروی اعمال شده در آزمون خمش به‌طور یکنواخت‌تری در سطح پانل توزیع می‌شود که به مقاومت بالاتر منجر می‌گردد. اما چسب PU به دلیل خاصیت انبساطی و وابستگی به رطوبت محیط برای گیرش، ممکن است حباب‌های گازی کوچکی در محل اتصال ایجاد کند. این حباب‌ها می‌توانند سطح تماس موثر بین چسب و لایه‌های MDF را کاهش دهند و به نقاط ضعف در ساختار پانل منجر شوند. علاوه بر این اگر فشار پرس در حین فرآیند تولید کافی نباشد یا به‌طور یکنواخت اعمال نشود ممکن است انبساط چسب PU باعث ایجاد فضاهای خالی یا نواحی ضعیف در خط چسبندگی شود که به کاهش مقاومت خمشی می‌انجامد. علاوه بر این چسب PU به دلیل واکنش شیمیایی پیچیده‌تر برای عملکرد بهینه نیازمند شرایط محیطی دقیق‌تری است که ممکن است در شرایط تولید آزمایشگاهی به‌خوبی فراهم نشده باشد. این در حالی است که PVAC به دلیل پایه آبی و فرآیند خشک‌شدن ساده‌تر، در گستره وسیع‌تری از شرایط محیطی به‌خوبی عمل می‌کند و پیوند پایدارتری ایجاد می‌کند. در نهایت این یافته‌ها نشان می‌دهند که ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی PVAC برای کاربرد در پانل‌های ساندویچی با مغزی فوم پلی‌استایرن مناسب‌تر است و می‌تواند بهبود قابل توجهی در مقاومت خمشی این نوع پانل‌ها ایجاد کند. مقایسه عملکرد دو نوع چسب پلی وینیل استات و اپوکسی در تولید تخته لایه (Decap) و همکاران ۲۰۲۲ و Chanda و همکاران ۲۰۲۲) نشان داد که چسب پلی وینیل استات عملکرد بهتری در خصوص تقویت خواص فیزیکی و مکانیکی تخته‌لایه در مقایسه با چسب‌های پلی‌اورتان و اپوکسی دارد [۲۱،۲۰].

اثر مستقل متغیرها مورد مطالعه بر مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته پانل‌های تخته فیبر دانسیته متوسط-فوم پلی‌استایرن

مطابق جدول ۱ و نتایج تجزیه واریانس داده‌های آزمایشگاهی تاثیر مستقل همه متغیرهای مورد مطالعه بر مقدار مقاومت خمشی (MOR) و مدول الاستیسیته (MOE) پانل‌های تخته فیبر- فوم پلی‌استایرن در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنی‌دار است.

اثر مستقل نوع چسب بر مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته

اثر مستقل نوع چسب بر مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته پانل ساندویچی تخته فیبر دانسیته متوسط - فوم پلی‌استایرن در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۳ و جدول ۱ مشخص است اثر نوع چسب بر مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته پانل‌های ساندویچی در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنی‌دار است. کمترین مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته مربوط به نمونه‌های ساخته شده با چسب پلی‌اورتان و بیشترین مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته مربوط به نمونه‌های ساخته شده با چسب پلی وینیل استات است، بطوریکه با تغییر نوع چسب از پلی‌اورتان به پلی وینیل استات مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته به ترتیب حدود ۶۷ و ۵۹ درصد افزایش می‌یابد. چسب PVAC به‌خوبی روی سطح پخش می‌شود و به دلیل خاصیت ترشوندگی بالا یک لایه یکنواخت و بدون نقص روی سطح ایجاد می‌کند. این ویژگی‌ها منجر به افزایش کیفیت خط چسبندگی و کاهش احتمال جدایش بین

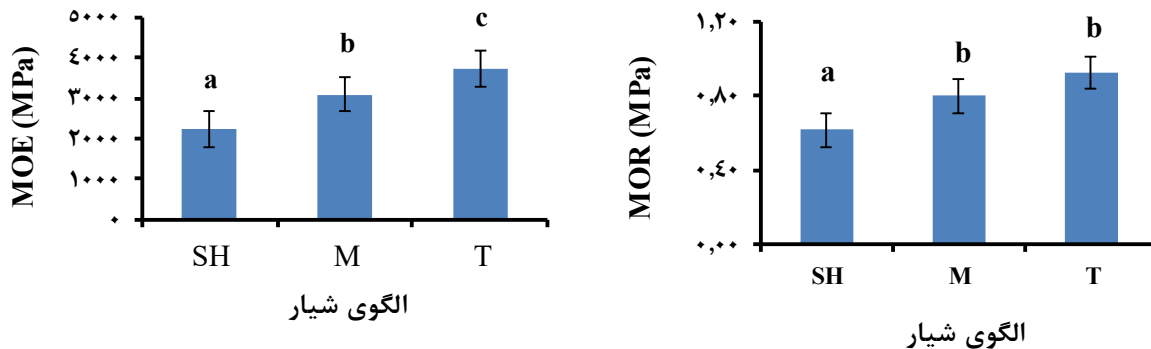


شکل ۳. اثر مستقل نوع چسب بر مقاومت خمشی (سمت راست) و مدول الاستیسیته (سمت چپ) پانل ساندویچی تخته فیبر دانسیته متوسط - فوم پلی استایرن

بر طول پانل در سه گروه مختلف قرار گرفتند. ایجاد شیارهای موازی در طول پانل ساندویچی و در محل اتصال پوسته به هسته پانل ساندویچی باعث افزایش ۳۹ درصدی مدول الاستیسیته نسبت به نمونه‌های شاهد شده است. از نظر آماری، بین مقدار میانگین مدول الاستیسیته نمونه‌های دارای دو نوع الگوی شیار موازی و ترکیبی (موازی و عمود) نیز اختلاف معنی دار است. طوریکه مدول الاستیسیته نمونه‌های با الگوی شیار ترکیبی، حدود ۲۱ درصد بیشتر از نمونه‌های با الگوی شیار موازی است. با توجه به نتایج این تحقیق و می‌توان نتیجه گرفت که شیارهای ترکیبی به دلیل طراحی خاص خود سطح تماس و چسب خوری بیشتری را بین لایه‌های MDF و مغزی فوم ایجاد می‌کنند. این افزایش سطح تماس به توزیع یکنواخت‌تر نیروهای مکانیکی کمک می‌کند و از تمرکز تنش در نقاط خاص جلوگیری می‌کند. در نتیجه نیروهای خمشی وارد شده بر پانل به صورت یکنواخت‌تری منتقل می‌شوند و احتمال شکست در نقاط بحرانی کاهش می‌یابد. این در حالی است که شیارهای موازی به دلیل تمرکز نیرو در امتداد یک جهت، عملکرد ضعیف‌تری نسبت به شیارهای ترکیبی داشته‌اند.

اثر مستقل الگوی شیار بر مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته

اثر مستقل الگوی شیار بر مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته پانل‌های ساندویچی مورد مطالعه در شکل ۴ مشخص شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بین مقاومت خمشی نمونه‌های شاهد (بدون الگوی شیار) و نمونه‌های دارای دو نوع الگو شیار موازی و موازی و عمود بر طول پانل از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری وجود دارد. طوری که با ایجاد شیارهای موازی طول پانل ساندویچی و در سطوح زیرین MDF مقاومت خمشی نسبت به نمونه‌های شاهد ۲۹ درصد افزایش یافت. از لحاظ آماری بین مقاومت خمشی نمونه‌های دارای دو نوع الگوی شیار موازی و موازی و عمود بر طول پانل اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. هرچند مقدار مقاومت خمشی در نمونه‌های ساخته شده با الگوی شیار همزمان موازی و عمود بر طول الیاف مقدار مقاومت خمشی بیشتری (در حدود ۱۵ درصد) نسبت به نمونه‌های دارای الگوی شیار موازی نشان دادند. تاثیر مستقل الگوی شیار بر مقدار مدول الاستیسیته پانل‌های ساندویچی نیز از لحاظ آماری معنی‌دار است و نمونه‌های شاهد (SH) و نمونه‌های با الگوی شیار موازی (M) و الگوی شیار موازی و عمود (T)



شکل ۴. اثر مستقل الگوی شیاری بر مدول الاستیسیته (سمت چپ) و مقاومت خمشی (سمت راست) پانل ساندویچی تخته فیبر دانسیته متوسط - فوم پلی استایرن

میلی‌متر نیز مقاومت خمشی نمونه‌ها حدود ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. تأثیر عمق شیاری بر مدول الاستیسیته پانل‌ها نیز از لحاظ آماری و با سطح اعتماد ۹۵ درصد معنی‌دار است. با ایجاد شیاری‌ها به عمق ۰/۵ میلی‌متر بر روی سطح MDF و در محل اتصال آن به هسته پانل ساندویچی، مقدار مدول الاستیسیته حدود ۴۰ درصد افزایش یافت. با افزایش عمق شیاری از ۰/۵ به ۱ میلی‌متر مقدار مدول الاستیسیته حدود ۱۷ درصد افزایش را نشان داد. اما از لحاظ آماری بین مقدار میانگین مدول الاستیسیته پانل‌های ساندویچی شیاری دار با عمق ۰/۵ و ۱ میلی‌متر در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنی‌دار نشد و این دو تیمار در یک گروه قرار گرفتند. افزایش عمق شیاری باعث افزایش سطح تماس بین لایه‌های بیرونی و مغزی پانل می‌شود. این افزایش سطح تماس به چسب اجازه می‌دهد که به عمق بیشتری نفوذ کند و پیوند مکانیکی قوی‌تری ایجاد نماید. در نتیجه نیروهای مکانیکی ناشی از خمش به‌طور یکنواخت‌تری در سراسر خط چسبندگی توزیع می‌شوند. این مسئله به‌ویژه برای چسب PVAC که به سطح تماس بیشتری برای عملکرد بهینه نیاز دارد، اهمیت دارد. علاوه بر این شیاری‌های عمیق‌تر می‌توانند به کاهش تنش‌های محلی در نقاط بحرانی کمک کنند. با نفوذ چسب به داخل شیاری‌های عمیق، نواحی ضعیف یا آسیب‌پذیر کاهش می‌یابد و پانل می‌تواند بارگذاری خمشی را بدون ایجاد ترک یا جدایش تحمل کند. به‌عبارت دیگر عمق بیشتر شیاری باعث بهبود درگیری مکانیکی و کاهش تمرکز تنش در خط چسبندگی

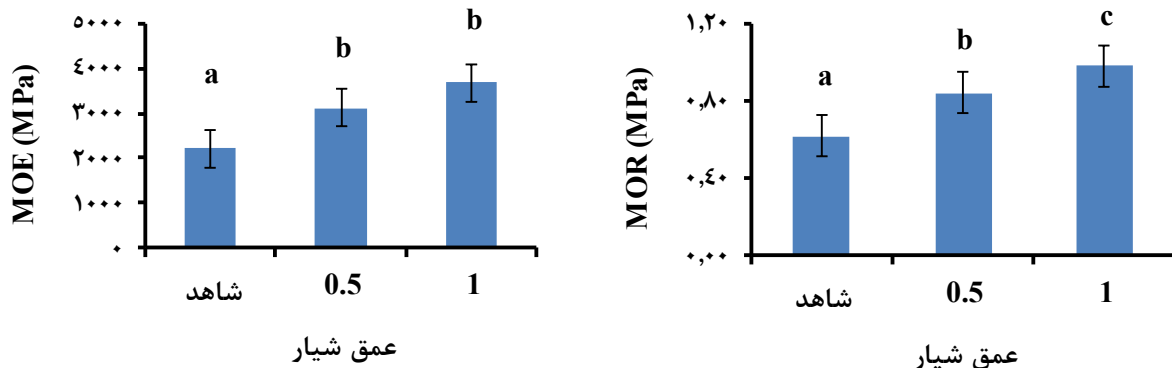
در همین راستا Iwamoto و Yokozeki (۲۰۱۶) با ترکیب حفره‌های دایره‌ای و شبکه‌ای از شیاری‌ها در هسته پانل‌ها به بهبود چقرمگی و افزایش ۳۶ درصدی انرژی شکست دست یافتند. Hirose و همکاران (۲۰۰۹) و Miao و همکاران (۲۰۱۵) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند و بیان داشتند نشان دادند که شیاری‌های نیم‌دایره‌ای منجر به افزایش انرژی لازم برای شکست می‌شوند و همچنین پانل‌های ساندویچی با شکاف‌های پر یا نیمه‌پر از رزین مقاومت شکست بیشتری نسبت به پانل‌های با هسته‌های سالم یا شکاف‌های خالی دارند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که طراحی مناسب شیاری‌ها در پوسته‌های بیرونی می‌تواند به طور قابل توجهی بر یکپارچگی ساختاری و رفتار مکانیکی آنها تأثیر بگذارد. [۱۸، ۱۷، ۱۴].

اثر مستقل عمق شیاری بر مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته

اثر مستقل عمق شیاری بر مقاومت خمشی پانل‌های ساندویچی مورد مطالعه در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق شکل ۴ تأثیر عمق شیاری بر مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته پانل‌های ساندویچی از لحاظ آماری و در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنی‌دار بوده و هر یک از نمونه‌های شاهد و نمونه‌های داری عمق ۰/۵ و ۱ میلی‌متر شیاری در سه گروه مختلف قرار گرفتند. با ایجاد شیاری با عمق ۰/۵ میلی‌متر مقاومت خمشی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های شاهد حدود ۳۶ درصد افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش عمق شیاری از ۰/۵ میلی‌متر به ۱

کند. این نتایج برای طراحی و تولید پانلهایی با عملکرد بهینه در کاربردهای صنعتی بسیار ارزشمند است. در چندین مطالعه گذشته نیز نشان داده شد که با قرار گرفتن شیار درون هسته یا پوسته ساندویچ پانل، ترک اتصالی در هنگام رشد با برخورد به هر شیار متوقف شده و برای شروع مجدد رشد خود به نیروی بالاتری نیاز دارد. همین پدیده باعث افزایش مقاومت این نوع از سازه در مقابل رشد ترک در ناحیه پوسته و هسته می‌گردد [۲۲]. همچنین افزایش عمق شیارها می‌تواند مساحت چسبندگی، استحکام برشی را افزایش [۱۵] و میزان تغییر شکل در محل ترک‌ها کاهش دهد [۱۳].

می‌شود. با این حال باید توجه داشت که افزایش بیش از حد عمق شیار ممکن است اثر معکوس داشته باشد. عمق زیاد شیار می‌تواند به کاهش ضخامت مؤثر MDF در نقاط شیار منجر شود و استحکام مکانیکی لایه بیرونی را تضعیف کند. در چنین شرایطی به جای افزایش عملکرد خمشی، پانل ممکن است در نقاط شیار دچار شکست شود. بنابراین، عمق شیار باید بهینه باشد تا هم پیوند قوی‌تری ایجاد کند و هم ساختار لایه بیرونی را حفظ نماید. به طور کلی یافته‌ها نشان می‌دهند که طراحی شیارهایی با عمق مناسب، مانند ۱ میلی‌متر می‌تواند بهبود قابل توجهی در عملکرد خمشی پانل‌های ساندویچی ایجاد



شکل ۵. اثر مستقل عمق شیار بر مدول الاستیسیته (سمت راست) و مقاومت خمشی (سمت چپ) پانل ساندویچی تخته فیبر دانسیته متوسط - فوم پلی‌استایرن

متقابل دوگانه نوع چسب و الگوی شیار، نوع چسب و عمق شیار و الگوی شیار و عمق شیار صرفنظر می‌گردد.

اثر متقابل نوع چسب، الگوی شیار و عمق شیار را بر مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته

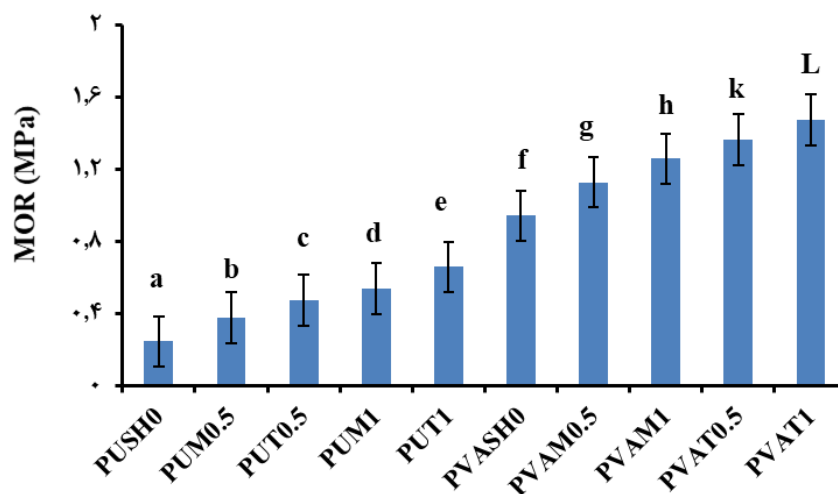
تاثیر متقابل نوع چسب، عمق شیار و الگوی شیار بر مقاومت خمشی پانل‌های ساندویچی تخته فیبر دانسیته متوسط - فوم پلی‌استایرن در شکل ۵ نشان داده شده است. شکل ۶ تاثیر متقابل نوع چسب و الگوی شیار را بر مقاومت خمشی نشان می‌دهد. مطابق شکل ۵، نمونه‌های ساخته شده با چسب پلی‌اورتان و بدون شیار کمترین مقدار مقاومت خمشی و نمونه‌های ساخته شده با الگوی

اثر متقابل متغیرها مورد مطالعه بر مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته پانل‌های تخته فیبر دانسیته متوسط - فوم پلی‌استایرن

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۱، تاثیر متقابل متغیرهای مورد مطالعه به جز اثر متقابل الگوی شیار × عمق شیار بر مقاومت خمشی (MOR) و مدول الاستیسیته (MOE) پانل‌های تخته فیبر - فوم پلی استایرن در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنی‌دار است. در این مطالعه با توجه به اینکه اثر تعاملی سه گانه نوع چسب، الگوی شیار و عمق شیار بر مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته مورد بررسی قرار می‌گیرد، از بررسی اثرات

افزایش نشان دادند. با ایجاد شیار و افزایش عمق آن، مقاومت خمشی تا ۴۱۱ درصد افزایش یافت، به طوری که بیشترین مقاومت مربوط به نمونه‌های با چسب پلی ونیل استات و شیار ۱ میلی‌متر و کمترین مقاومت مربوط به نمونه‌های بدون شیار با چسب پلی‌اورتان است. مکانیزم اصلی این بهبود، افزایش سطح تماس، نفوذ چسب در شیارها و توزیع یکنواخت‌تر تنش است که منجر به ایجاد پیوند مکانیکی قوی‌تر می‌شود

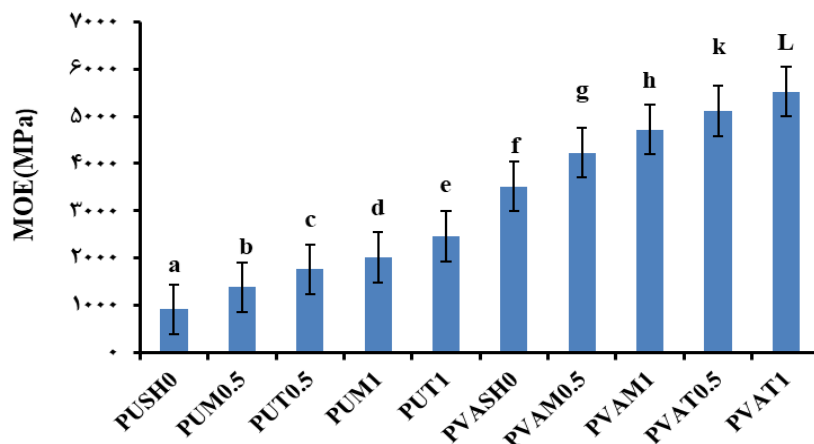
شیار ترکیبی (موازی و عمود بر جهت طول پانل) بیشترین مقاومت خمشی را از خود نشان دادند، طوری که تغییر همزمان نوع چسب از چسب پلی‌اورتان به چسب پلی ونیل استات و ایجاد شیار ترکیبی منجر به افزایش حدود ۴۸۰ درصدی مقاومت خمشی پانل‌های ساندویچی مورد مطالعه شد. مقاومت خمشی پانل‌های ساندویچی ساخته شده با تغییر الگوی شیار از شاهد به شیار موازی و سپس ترکیبی به ترتیب ۸۶ و ۲۳ درصد برای چسب پلی‌اورتان و ۲۶ و ۱۹ درصد برای چسب پلی ونیل استات



شکل ۶. اثر متقابل نوع چسب، عمق شیار و الگوی شیار بر مقاومت خمشی پانل ساندویچی تخته فیبر دانسیته متوسط -فوم پلی-استایرن

شیار از شاهد به شیار موازی و سپس ترکیبی، مقدار مدول الاستیسیته به ترتیب ۸۰ و ۲۴ درصد برای چسب پلی‌اورتان و ۲۷ و ۱۸ درصد برای چسب پلی ونیل استات افزایش یافت. همچنین تغییر نوع چسب بیشترین تاثیر را بر مقاومت خمشی نشان می‌دهد. به عنوان مثال مقاومت خمشی پانل‌های شاهد ساخته شده با چسب پلی ونیل استات حدود ۲۸۶ درصد بیشتر از مقاومت خمشی پانل‌های شاهد ساخته شده با چسب پلی‌اورتان است. در ادامه عمق شیار و سپس الگوی شیار ایجاد شده بیشترین تاثیر را بر مقاومت خمشی پانل‌های ساندویچی مورد مطالعه نشان دادند.

شکل ۷ اثرات متقابل نوع چسب، الگوی شیار و عمق شیار بر مقدار مدول الاستیسیته نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نیز مشخص است، نمونه‌هایی که با چسب پلی‌اورتان و بدون شیار ساخته شده‌اند، کمترین مقدار مدول الاستیسیته را دارند و نمونه‌های ساخته با الگوی شیار ترکیبی (موازی و عمود بر جهت طول پانل) و عمق شیار ۱ میلی‌متر و همچنین چسب پلی ونیل استات بیشترین مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته را نشان می‌دهند. تغییر همزمان نوع چسب از پلی‌اورتان به پلی ونیل استات و همچنین ایجاد شیار ترکیبی موجب افزایش حدود ۴۰۰ درصدی در مدول الاستیسیته پانل‌های ساندویچی مورد مطالعه گردید. با تغییر الگوی



شکل ۷. اثر متقابل نوع چسب، عمق شیار و الگوی شیار بر مقدار مدول الاستیسیته پانل ساندویچی تخته فیبر دانسیته متوسط - فوم پلی استایرن

- and modelling investigation. *Composites Part B: Engineering*, 79, 182-196.
- [2] Mohamed, M., Anandan, S., Huo, Z., Birman, V., Volz, J., & Chandrashekhara, K. (2015). Manufacturing and characterization of polyurethane based sandwich composite structures. *Composite Structures*, 123, 169-179.
- [3] Wisadsatorn, S., & Phohchuay, P. (2008). Utilization of sandwich insulated panels made from wood composite and cellular natural rubber. *Srinakharinwirot Sci. J.*, 34, 18-30.
- [4] Wisadsatorn, S., & Phohchuay, P. (2008). Utilization of sandwich insulated panels made from wood composite and cellular natural rubber. *Srinakharinwirot Sci. J.*, 34, 18-30.
- [5] Demirkir, C., Colak, S., & Aydin, I. (2013). Some technological properties of wood-styrofoam composite panels. *Composites Part B: Engineering*, 55, 513-517.
- [6] Naat, N., Boutar, Y., Naimi, S., Mezlini, S., & Da Silva, L. F. M. (2023). Effect of surface texture on the mechanical performance of bonded joints: a review. *The Journal of Adhesion*, 99(2), 166-258.
- [7] Da Silva, L. F., Ferreira, N. M. A. J., Richter-Trummer, V., & Marques, E. A. S. (2010). Effect of grooves on the strength of adhesively bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 30(8), 735-743.
- [8] Budhe, S., Ghumatkar, A., Birajdar, N., & Banea, M. D. (2015). Effect of surface roughness using different adherend materials on the adhesive bond strength. *Applied Adhesion Science*, 3(1), 20.
- [9] Alderucci, T., Borsellino, C., & Di Bella, G. (2022). Effect of surface pattern on strength of structural lightweight bonded joints for marine applications. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 117, 103005.

نتیجه گیری

این تحقیق با هدف بررسی اثر نوع چسب، الگوی شیار و عمق شیار بر عملکرد خمشی پانل‌های ساندویچی MDF-فوم پلی استایرن انجام شد. نتایج نشان داد چسب PVAC به دلیل ویژگی‌های قطبی و ترشوندگی بالا، در ترکیب با شیارهای ترکیبی (موازی و عمود بر طول پانل) و عمق‌های مختلف، نسبت به چسب PU عملکرد خمشی بهتری دارد. ایجاد شیار در محل اتصال پوسته به هسته موجب بهبود خواص خمشی شد و شیارهای ترکیبی با توزیع تنش در چند جهت و افزایش درگیری مکانیکی، اثرات مثبت بیشتری بر چسبندگی و مقاومت ایجاد کردند. عمق شیار نیز نقش مؤثری داشت و افزایش آن فضای بیشتری برای نفوذ چسب و بهره‌برداری بهتر از مزایای شیار فراهم کرد. ترکیب الگوی شیار مناسب و عمق بهینه، توزیع یکنواخت نیرو و جلوگیری از تمرکز تنش را ممکن ساخت. در مجموع، استفاده از PVAC با شیار ترکیبی و عمق ۱ میلی‌متر به‌عنوان راهکار ایده‌آل برای تولید پانل‌های با استحکام خمشی بالا پیشنهاد می‌شود، در حالی که استفاده از PU نیازمند بهینه‌سازی فرآیند تولید و طراحی شیار برای جبران محدودیت‌های آن است.

منابع

- [1] Fang, H., Sun, H., Liu, W., Wang, L., Bai, Y., & Hui, D. (2015). Mechanical performance of innovative GFRP-bamboo-wood sandwich beams: Experimental

- via fracture toughness tests and analyses under Mode-I type loading. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 11(6), 451-470.
- [18] Miao, X. Y., Lu, R., & Chen, X. (2021). Fracture behaviour of foam core sandwich structures with manufacturing defects using phase-field modelling. *Composite Structures*, 274, 114294.
- [19] Ghofrani, M., Pishan, S. and Talaei, A. (2014). The effect of core type and skin on the mechanical properties of lightweight sandwich Panels. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 28(4), 720-731. doi: 10.22092/ijwpr.2014.4462. (In Persian).
- [20] Núñez-Decap, M., Barra-Rodríguez, Y., Opazo-Carlsson, C., Moya-Rojas, B., Vidal-Vega, M., & Opazo-Vega, A. (2022). Use of carbon and basalt fibers with adhesives to improve physical and mechanical properties of plywood. *Applied Sciences*, 12(10), 5114.
- [21] Chanda, A., Kim, N. K., & Bhattacharyya, D. (2022). Effects of adhesive systems on the mechanical and fire-reaction properties of wood veneer laminates. *Composites Science and Technology*, 230, 109331.
- [22] Gholami, V., Taheri-Behrooz, F., & Memar Maher, B. (2022). Fracture toughness and crack growth resistance of sandwich panels with grooved cores. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 24(3), 1746-1767.
- [23] Colak, S., & Colakoglu, G. (2006). Effects of wood species and adhesive types on the amount of volatile acetic acid of plywood by using desiccator-method. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 64, 513-514.
- [24] Jorda, J., Kain, G., Barbu, M. C., Petutschnigg, A., & Král, P. (2021). Influence of adhesive systems on the mechanical and physical properties of flax fiber reinforced beech plywood. *Polymers*, 13(18),3086.
- [10] Rudawska, A., Danczak, I., Müller, M., & Valasek, P. (2016). The effect of sandblasting on surface properties for adhesion. *International journal of adhesion and adhesives*, 70, 176-190.
- [11] Da Silva, L. F., Ferreira, N. M. A. J., Richter-Trummer, V., & Marques, E. A. S. (2010). Effect of grooves on the strength of adhesively bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 30(8), 735-743.
- [12] Gholami V, Taheri-Behrooz F, Memar-Maher B. (2021). Measurement of face to core debonding fracture toughness of core grooved sandwich structures under mode I of loading. *Modares Mechanical Engineering*,21(4):263-272. URL: <http://mme.modares.ac.ir/article-15-46818-en.html> (In Persian).
- [13] Klimek, P., Wimmer, R., Brabec, M., & Sebera, V. (2016). Novel sandwich panel with interlocking plywood kagome lattice core and grooved particleboard11(1), 195-208.
- [14] Yokozeki, T., & Iwamoto, K. (2016). Effects of core machining configuration on the debonding toughness of foam core sandwich panels. *Advanced Composite Materials*, 25(1), 45-58.
- [15] Akman, E., Bora, M. Ö., Coban, O., & Oztoprak, B. G. (2021). Laser-induced groove optimization for Al/CFRP adhesive joint strength. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 107, 102830.
- [16] Truxel, A., Aviles, F., Carlsson, L. A., Grenestedt, J. L., & Millay, K. (2006). Influence of face/core interface on debond toughness of foam and balsa cored sandwich. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 8(3), 237-258.
- [17] Hirose, Y., Matsuda, H., Matsubara, G. O., Inamura, F., & Hojo, M. (2009). Evaluation of new crack suppression method for foam core sandwich panel