



Evaluation of delamination defect in drilling process of wood sandwich panels

Sakineh shirzaei^{1*}, Saeed reza Farrokh Payam², Mohammad Shamsian²,
Hossein Ali Rahdar³, Mohammad Dahmardeh Ghalehno²

- 1- Corresponding author, Ph.D. Student, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran, email: sakineh.shirzaei@gmail.com
2- Associate professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran
3- Department of Civil-Structural Engineering, Faculty of Technical and Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran

Received: May 2024

Accepted: July 2024

Abstract

Problem definition and objectives: Wooden sandwich composite panels have garnered significant attention in various engineering and construction applications due to their lightweight and high strength. In the use of sandwich panels, particularly in construction and engineering industries, establishing reliable connections between these panels and other structural components is of paramount importance. Drilling, as a critical stage in the manufacturing of such connections, plays a vital role in ensuring the stability, strength, and durability of structures. Since these panels are often subjected to cyclic loads and environmental stresses, the quality and precision of drilling directly influence the final performance of the structure. During drilling, sandwich panels are prone to layer separation, where the interaction between the drill bit and the sandwich panel layers at entry and exit points is the primary cause of process-induced defects such as delamination. Delamination is recognized as a common and unexpected defect in the machining of composite panels, significantly affecting surface quality and structural integrity. However, the optimal selection of machining parameters, proper tool geometry, effective tool types, and suitable operating conditions can minimize or even prevent such defects. These measures not only improve the process quality but also ensure the longevity and functionality of the final product. The main objective of this research is to investigate the effect of key drilling parameters on delamination and to optimize machining conditions to achieve minimal delamination and the best cutting surface quality in wooden-faced sandwich composite panels. This study focuses on machining parameters, including feed rate and drill bit diameter, as well as workpiece characteristics such as the material of the face and core layers, to identify, measure, and analyze their influence on delamination during drilling. The findings of this research provide a robust scientific foundation for optimizing drilling processes in the production of wooden composite panels and related products.

Methodology: For this purpose, panels were fabricated with three types of face materials: medium-density fiberboard (MDF) with a melamine coating, plywood, and balsa wood, combined with a constant extruded polystyrene foam core of 36 mm thickness. Drilling was performed using a CNC machine equipped with an uncoated twist drill bit at three different diameters (4, 8, and 12

mm), two feed rate levels (5 and 13 mm/s), and a fixed cutting speed of 8000 rpm. The evaluation of damaged and affected layers was conducted using digital imaging, and high-precision image processing was carried out using the Digimizer software. Subsequently, the delamination factor was calculated based on relevant scientific relations. Experimental data were analyzed within a randomized factorial design framework using analysis of variance (ANOVA) and statistical tables generated in SPSS software. The effects of individual factors as well as their interactions were thoroughly examined.

Results: The results indicated that the face material, feed rate, and drill bit diameter had the highest impact on delamination, in descending order of significance. The lowest delamination factor of 1.119 was observed in panels with MDF layers and a melamine coating, drilled with a 4 mm bit and a feed rate of 5 mm/s. Conversely, the highest delamination factor of 3.060 occurred in panels with balsa wood layers, drilled with a 12 mm bit and a feed rate of 13 mm/s.

Conclusion: These findings highlight that reducing feed rate and increasing cutting speed in CNC machining are critical for minimizing delamination in wooden sandwich composite panels, thereby enhancing the final product quality.

Keywords: Machining process, delamination defect, delamination analysis, wooden layers.

ارزیابی عیب تورق در فرآیند سوراخ‌کاری کامپوزیت پانل ساندویچی ساخته شده با رویه چوبی

سکینه شیرزائی^۱، سعیدرضا فرخ پیام^۲، محمد شمسیان^۳، حسینعلی رهدار^۴، محمد دهمرده قلعه‌نو^۵

۱- نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری کامپوزیت‌های لیگنوسلولزی، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه زابل، زابل، ایران، ایمیل: sakineh.shirzaci@gmail.com

۲- دانشیار گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

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

۴- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۵- دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه زابل، زابل، ایران

تاریخ دریافت: اردیبهشت ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: تیر ۱۴۰۳

چکیده

بیان مساله و اهداف: کامپوزیت‌های پانل ساندویچی چوبی به دلیل وزن کم و استحکام بالا توجه بسیاری را در کاربردهای مختلف مهندسی و ساختمانی به خود جلب کرده است. در کاربرد پانل‌های ساندویچی به‌ویژه در صنایع ساختمانی و مهندسی ایجاد اتصالات مطمئن میان این پانل‌ها و سایر اجزای سازه‌ای از اهمیت بالایی برخوردار است. فرآیند سوراخ‌کاری به‌عنوان یکی از مراحل کلیدی در ساخت و تولید این اتصالات، نقش حیاتی در تضمین پایداری، استحکام و دوام سازه ایفا می‌کند. از آنجا که این پانل‌ها اغلب در شرایطی به کار می‌روند که تحمل بارهای متناوب و فشارهای محیطی ضروری است، کیفیت سوراخ‌کاری و دقت در اجرای آن می‌تواند به طور مستقیم بر عملکرد نهایی سازه تأثیر بگذارد. با توجه به اینکه پانل‌ها در حین فرآیند سوراخ‌کاری مستعد جدایش لایه‌ها هستند، تعامل میان تیغه مته و لایه‌های پانل ساندویچی در لحظات ورود و خروج تیغه به این لایه‌ها، عامل اصلی بسیاری از عیوب فرآیندی نظیر تورق محسوب می‌شود. تورق به‌عنوان یکی از عیوب پیش‌بینی‌نشده و رایج در ماشین‌کاری ورقه‌های کامپوزیتی، می‌تواند به طور جدی کیفیت سطح و یکپارچگی ساختاری پانل‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. با این حال انتخاب بهینه پارامترهای ماشین‌کاری، طراحی مناسب ابزار، استفاده از انواع ابزارهای کارآمد و تعیین شرایط عملیاتی مطلوب، امکان کاهش یا جلوگیری از بروز چنین عیوبی را فراهم می‌سازد. این اقدامات نه تنها کیفیت فرآیند را ارتقا می‌دهند بلکه عمر مفید و کارایی محصول نهایی را نیز تضمین می‌کنند. هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر پارامترهای کلیدی سوراخ‌کاری بر عیب تورق و بهینه‌سازی شرایط ماشین‌کاری برای دستیابی به حداقل میزان تورق و بهترین کیفیت سطوح برش‌خورده در کامپوزیت پانل‌های ساندویچی با رویه‌های چوبی است. این مطالعه با تمرکز بر پارامترهای ماشین‌کاری شامل سرعت تغذیه و قطر مته و همچنین ویژگی‌های قطعه کار نظیر جنس لایه‌های رویی و زیری، تلاش می‌کند تا تأثیر این متغیرها را بر میزان تورق در حین عملیات سوراخ‌کاری شناسایی، اندازه‌گیری و تحلیل نماید. یافته‌های این تحقیق، مبنای علمی موثری برای بهینه‌سازی فرآیند سوراخ‌کاری در تولید کامپوزیت پانل‌های چوبی و فرآورده‌های مرتبط فراهم خواهد کرد.

مواد و روشها: برای این منظور پانل‌ها با سه نوع رویه شامل تخته فیبر با دانسیته متوسط و روکش ملامینه، تخته لایه، و چوب بالزا، و مغزی ثابت از فوم پلی‌استایرن اکسترود شده با ضخامت ۳۶ میلی‌متر ساخته شدند. فرآیند سوراخ‌کاری با استفاده از دستگاه CNC مجهز به مته پیچشی بدون پوشش، در سه قطر مختلف (۴، ۸ و ۱۲ میلی‌متر)، دو سطح سرعت تغذیه (۵ و ۱۳ میلی‌متر بر ثانیه)، و سرعت برش ثابت برابر با ۸۰۰۰ دور بر دقیقه بر روی این پانل‌ها انجام گرفت. برای ارزیابی سطوح آسیب‌دیده و خسارت‌های وارد شده به کامپوزیت، از روش تصویربرداری دیجیتال استفاده شد و پردازش تصاویر با دقت بالا در محیط نرم‌افزار Digimizer انجام گرفت. سپس فاکتور تورق با بهره‌گیری از روابط علمی مربوطه محاسبه گردید. داده‌های تجربی در چارچوب یک طرح فاکتوریل تصادفی با استفاده از تحلیل واریانس و رسم جداول

آماری در نرم افزار SPSS مورد بررسی قرار گرفتند و تأثیر هر یک از عوامل به صورت مجزا و همچنین تعاملی، تحلیل و ارزیابی شد.

نتایج: نتایج نشان داد که جنس رویه‌ها، سرعت تغذیه، و قطر مته به ترتیب بیشترین تأثیر را بر میزان تورق دارند. کمترین میزان لایه‌شدگی، معادل ۱،۱۱۹، در کامپوزیت پانل‌های ساندویچی با رویه‌های تخته فیبر با دانسیته متوسط و روکش ملامینه، قطر مته ۴ میلی‌متر، و سرعت تغذیه ۵ میلی‌متر بر ثانیه به دست آمد. در مقابل، بیشترین میزان لایه‌شدگی، برابر با ۳،۰۶۰، در پانل‌های با رویه چوب بالزا، قطر مته ۱۲ میلی‌متر، و سرعت تغذیه ۱۳ میلی‌متر بر ثانیه مشاهده شد.

نتیجه‌گیری: این نتایج نشان می‌دهد که برای کاهش عیب تورق در پانل‌های ساندویچی چوبی، کاهش سرعت تغذیه و افزایش سرعت برش در ماشین CNC از اهمیت بالایی برخوردار است و می‌تواند به بهبود کیفیت نهایی منجر شود.

واژه‌های کلیدی: فرآیند ماشین کاری، عیب تورق، تحلیل لایه‌شدگی، رویه‌های چوبی.

مقدمه

کامپوزیت‌های ساندویچی است. با توجه به ناهمگنی کامپوزیت، مکانیزم سوراخ کاری در این قطعات در مقایسه با مواد همسانگرد و همگن با پیچیدگی‌های خاصی همراه است. این ناهمگنی ساختاری چند فازی و ماهیت ناهمسانگردی کامپوزیت‌ها منجر به شکست بین لایه‌ها در حین سوراخ کاری می‌شود. به همین دلیل، حدود ۶۰ درصد از سوراخ‌های ایجاد شده روی کامپوزیت‌ها تنها در مرحله اولیه رد می‌شوند [۳]. به دلیل گران قیمت بودن ابزار برش و هزینه بالای ساخت سازه‌ها، محققان طی سالیان زیادی به دنبال ابزار با حداقل آسیب وارده جهت استفاده در سوراخ کاری کامپوزیت‌ها می‌باشند. تورق در عملیات ماشین کاری دارای دو نوع می‌باشد. نوع اول بلند شدن الیاف حین ورود مته به درون کامپوزیت (تورق در ورودی) و دومی بلند شدن الیاف و جدا شدن لایه‌ها در هنگام خروج مته از طرف دیگر کامپوزیت (تورق در خروجی) است [۴]. نکته قابل توجه در مورد جداشدگی لایه‌ها در کامپوزیت پانل ساندویچی این می‌باشد که به علت داشتن دو لایه رویی و زیری، چهار ناحیه اصلی، متأثر از این پدیده می‌شود. علاوه بر جداشدگی لایه‌ها، تغییر شکل زیرسطحی یکی دیگر از عیب‌های مهم ناشی از سوراخ کاری در عملیات ماشین کاری کامپوزیت است. جداشدگی سطحی، تغییر شکل ماتریس، بیرون آمدن فیبر، فرورفتگی ماتریس، ترک خوردگی و پوسته شدن نمونه‌های کمی از تغییر شکل‌های زیرسطحی هستند؛ بنابراین، به منظور بهبود عملکرد محصول و یکپارچگی

کامپوزیت پانل ساندویچی با اتصال دو صفحه سفت نازک به عنوان لایه‌های رویی و زیری و یک هسته سبک وزن ضخیم توسط رزین، طراحی شده است [۱]. سازه‌های ساندویچی به علت وزن کم، نسبت سفتی بالا به وزن و عملکرد خوب خمشی به‌طور گسترده در کاربردهای هوافضا، سازه‌های دریایی، صنعت خودرو و ساختمان سازی استفاده شده و مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. چوب ماسیو و فرآورده‌های صفحه‌ای مشتق شده از چوب می‌توانند به راحتی نقش صفحات رویی و حتی مغزی را ایفا کنند [۲]. در ساختمان سازی به عنوان سقف، دیوار و پارتیشن جداکننده حضور گسترده دارند و با اشتیاق طراحان داخلی به استفاده از ضخامت‌های بالا اما سبک در سازه‌های مبلمانی، استفاده از پانل‌های ساندویچی به شدت مورد توجه قرار گرفته است. پانل ساندویچی با یک جزء چوبی در اکثر اوقات می‌تواند از لایه نازکی از جنس چوب ماسیو، تخته چندلا، تخته فیبر با دانسیته متوسط و تخته رشته جهت‌دار در سطوح با مغزی ضخیمی از مواد سبک وزن به مانند فوم‌های پلاستیکی، کارتن کرکره‌ای، چوب با دانسیته کم و لانه زنبوری کاغذی تشکیل شده باشد. دستیابی به ضخامت‌های بالا و وزن ناچیز، پانل ساندویچی چوبی را کاندیدای مناسبی برای بسیاری از کاربری‌های صنعتی و خانگی کرده است. سوراخ کاری یکی از عملیات اصلی ماشین کاری برای تکمیل فرایند ساخت و مونتاژ در

۵۴ حالت مختلف انجام شد. پس از عکس برداری، توسط پردازش تصویر دیجیتال میزان لایه شدگی در حالت‌های مختلف محاسبه و مقایسه شد. سرعت پیشروی بهینه حدود ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه برای کامپوزیت با فیبر کربن و حدود ۱۲۵ میلی‌متر بر دقیقه برای کامپوزیت با فیبر شیشه و با سرعت اسپیندل ۸۰۰ دور در دقیقه به دست آمد [۸]. در کار تحقیقاتی دیگری کمترین مقدار عیب تورق با استفاده از مته پیچشی به دست آمده است که در آن پدیده تورق را در فرآیند سوراخ‌کاری تخته فیبر با دانسیته متوسط با پوشش ملامینه مورد ارزیابی قرار دادند و تأثیر پارامترهای مختلفی شامل نرخ تغذیه و سرعت برش بر سوراخ‌کاری MDF با روکش ملامینه بررسی شده است. برای این منظور از دو ابزار مختلف با هندسه ابزار متفاوت (یک مته نقطه‌ای براد و یک مته پیچشی) استفاده گردید. [۹]. فرآیند سوراخ‌کاری کامپوزیت پانل ساندویچ و پلاستیک تقویت شده با فیبر کربن توسط Yang و همکاران (۲۰۲۱) بررسی گردید. در ابتدا اثرات هندسه مته، نرخ تغذیه بر روی نیروی محوری و ناحیه تورق کامپوزیت پانل ساندویچ با ضخامت‌های هسته مختلف به‌طور تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. سپس، تجزیه و تحلیل اجزای محدود برای مدل‌سازی آسیب درون لایه‌ای و بین لایه‌ای ورق‌های رویی CFRP و همچنین شکست چسب و هسته لانه زنبوری انجام شد. مدل‌های FEA با آزمایش‌ها از نظر پاسخ‌های فرایند مته زنی و رفتارهای آسیب تأیید شدند. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر خطای نیروی محوری بین نتایج پیش‌بینی شده و تجربی به ترتیب برای پلاستیک تقویت شده با فیبر کربن و کامپوزیت پانل‌های ساندویچ ۱۲/۵ و ۷/۵ درصد است [۱۰].

با توجه به موارد بسیار اندک منابع داخلی در خصوص تورق لایه‌ها در عملیات سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های پانل ساندویچی چوبی، در این کار مطالعاتی تأثیر پارامترهای برش در مته‌زنی نظیر قطر سر مته و سرعت تغذیه و همچنین جنس لایه‌های بیرونی پانل‌ها بر لایه شدگی در تورق خروجی و آسیب وارده بر کامپوزیت‌های پانل ساندویچی چوبی بررسی شده و بهترین مقادیر عوامل یاد شده در فرآیند سوراخ‌کاری تعیین شدند.

ساختاری سوراخ‌های ماشین‌کاری شده، عیوب مواد مانند تغییر شکل زیر سطح و لایه‌برداری می‌توانند با انتخاب مناسب پارامترهای برش، هندسه ابزار، انواع ابزار و شرایط برش اصلاح شوند [۵]. سازه‌های ساندویچی به دلیل وجود برخی از عیوب و البته از نقطه نظر مکانیکی آسیب‌پذیر نشان می‌دهند. یکی از مهم‌ترین آن‌ها، تورق یا جدایش لایه‌ها است. تورق، جدایش بین لایه‌های تشکیل دهنده که شامل لایه رویی و مغزی کامپوزیت است که یک پدیده شکست متقابل ناشی از فرآیند ماشین‌کاری است که یک مشکل نسبتاً جدی است و به‌عنوان یک عیب عمده غیرمنتظره هنگام ماشین‌کاری ورقه‌های کامپوزیتی شناخته شده است. علاوه بر این، جدایش لایه‌ها می‌توانند به طور قابل توجهی رفتار کمانش سازه‌های چندلایه را تغییر دهند. لایه شدگی در سازه‌های ساندویچی سبک به طور قابل توجهی استحکام و سفتی را کاهش و رفتار دینامیکی را تغییر می‌دهند. به‌عنوان مثال بیش‌ترین لایه شدگی توسط ضربه، بارگذاری انفجاری، سوراخ‌کاری، فرورفتگی‌ها، یا سایر بارهای خاص ایجاد می‌شود [۶]. متغیرهای زیادی بر کیفیت سوراخ و میزان آسیب به وجود آمده از ماشین‌کاری مؤثر می‌باشند مانند سرعت تغذیه ماشین سوراخ‌کاری، هندسه مته مورد استفاده، سرعت برش ماشین سوراخ‌کاری، حرارت تولید شده از تماس بین قطعه چوب و ابزار و زاویه الیاف که باید تأثیر هرکدام از عوامل بر کیفیت نهایی سوراخ مورد توجه قرار گیرد. در تحقیقی که توسط Baharlooey و همکاران (۲۰۱۸) انجام شد، به تأثیر اندازه لبه برنده مته پیچشی و زاویه نوک مته بر لایه شدگی و خطای قطری سوراخ ایجاد شده در کامپوزیت کولار- اپوکسی با ایجاد صفحه پشتیبان پرداخته شد. فاکتورهای مورد بررسی برای سرعت تغذیه دارای ۳ سطح و سرعت برشی مته دارای ۳ سطح طراحی بودند. نتایج نشان داد که کمترین میانگین خطای قطری با زاویه ۱۳۵ درجه لبه برنده در مته پیچشی و کمترین میانگین پارامتر لایه شدگی در نوع مته پیچشی با زاویه ۱۳۵ درجه بدون لبه برنده می‌باشد [۷]. پژوهشی دیگر توسط Sifouri و همکاران (۲۰۱۸) صورت گرفت که اثر سرعت پیشروی و قطر مته در فرآیند سوراخ‌کاری صفحات کامپوزیتی به صورت تجربی مورد ارزیابی واقع شد. دو نوع کامپوزیت مختلف فیبر شیشه و فیبر کربن به ضخامت‌های متفاوت ساخته شد و عملیات سوراخ‌کاری بر روی آن‌ها در

مواد و روش‌ها

ساخت نمونه پانل ساندویچی

در این مطالعه برای رویه‌های کامپوزیت پانل ساندویچی از ۳ نوع جنس، بالزا (Ochroma pyramidale)، تخته فیبر با دانسیته متوسط با روکش ملامینه و تخته لایه با ضخامت ۳ میلی‌متر و برای لایه مغزی کامپوزیت، از فوم پلی استایرن اکستروود شده با دانسیته 5 ± 35 کیلوگرم بر مترمکعب و ضخامت ۳ سانتی‌متر از فروشگاه‌های معتبر داخلی استفاده گردید. از چسب پلی وینیل استات با وزن مخصوص ۰/۰۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب، $PH = 5/5$ و ۲۱٪ مواد جامد برای چسبانند رویه به لایه مغزی استفاده شد که این چسب به

صورت مایع از کارخانه تولیدی و صنعتی سامد خریداری شده بود.

ورق‌های مورد مطالعه به‌اندازه ابعاد سطح لایه مغزی برش خورده و یک طرف هر ورق مورد استفاده را به چسب پلی وینیل استات آغشته گردیده، به طوری که چسب به صورت یک لایه نازک در سطح آن ورق دیده شود، سپس لایه مغزی بین دو ورق مورد نظر در طرف چسب خورده قرار داده شد. پانل ساخته شده، به وسیله گیره‌ی دستی پرس گردید. زمان پرس سرد بین ۲ تا ۱۲ ساعت به طول انجامید. بعد از طی این مدت زمان، پانل‌های ساندویچی از درون گیره‌های پرس خارج و در نهایت کامپوزیت پانل ساندویچ به ضخامت ۳۶ میلی‌متر برای عملیات ماشین‌کاری ساخته شده است.



شکل ۱- جنس رویه‌های مورد استفاده (الف) فوم مغزی (ب)، نمونه نهایی کامپوزیت پانل ساندویچی (ج)

و رسم گردیده و برای انتقال به ماشین CNC از رابط نرم‌افزاری به نام Artcam جهت اجرای طرح استفاده شده است. در جدول ۱ پارامترهای ماشین‌کاری جهت عملیات سوراخ‌کاری آورده شده است. قابل ذکر است که پارامتر فوم پلی استایرن اکستروود شده به‌عنوان لایه مغزی قطعه کار و سرعت اسپیندل (۸۰۰۰ دور در دقیقه) از پارامترهای ماشین‌کاری به‌عنوان متغیرهای ثابت سوراخ‌کاری در نظر گرفته شده‌اند. همچنین جدول ۱ فاکتورهای مورد مطالعه در سوراخ‌کاری را به همراه کد مربوطه مشخص می‌کند.

فرآیند ماشین‌کاری

عملیات سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها با استفاده از مته مارپیچ بدون پوشش با قطرهای ۴، ۸ و ۱۲ میلی‌متر انجام شده است. جهت عملیات سوراخ‌کاری از ماشین CNC سه محوره مدل برنا ابزار ساخت کشور ایران در کارگاه MDF خارج از دانشگاه زابل استفاده گردید که دارای حداکثر دور مجاز ۱۸۰۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد که با توجه جنس و ضخامت قطعه کار و همچنین نوع تیغه محدودیت عملکرد را دارد. در ابتدا نقشه مورد نظر در محیط نرم‌افزار طراحی

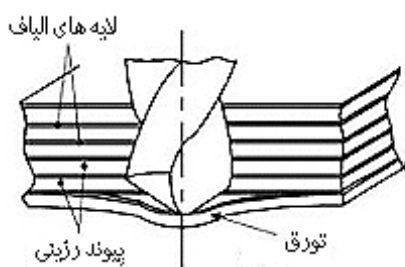
جدول ۱- مشخصات فاکتورهای مورد استفاده در سوراخ‌کاری به همراه کد نمونه

پارامترهای ماشین‌کاری			پارامترهای قطعه کار		
کد نمونه	سرعت تغذیه	کد نمونه	قطر مته	کد نمونه	جنس رویه‌ها
C ₁	۵	B ₁	۴	A ₁	بالزا
C ₂	۱۳	B ₂	۸	A ₂	تخته فیبر با دانسیته متوسط
		B ₃	۱۲	A ₃	تخته لایه

نرم‌افزاری Image analyzer انتقال داده شده و با مرجع قرار دادن مقیاس نشان داده شده در شکل ۲، قطرهای نواحی مختلف محاسبه شده است. در نهایت جهت اندازه‌گیری مقدار آسیب وارد شده به کامپوزیت از آزمون فاکتور لایه شدگی استفاده شده است که شماتیک ابعادی آن در شکل ۳ نشان داده شده است. این فاکتور از تقسیم بیشترین مقدار تورق (D_{max}) بر قطر مورد استفاده مته مورد نظر (D) در کامپوزیت پانل ساندویچی به دست می‌آید. فاکتور مورد نظر با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد:

$$F_d = \frac{D_{max}}{D} \quad (1)$$

که در آن، D_{max} : ماکزیمم مقدار تورق و D : قطر مته مورد استفاده



در عملیات ماشین‌کاری جهت انجام اولین سوراخ با استفاده از قطر ۴ و سرعت تغذیه ۵ میلی‌متر بر ثانیه و سرعت ثابت اسپیندل اجرا و برای سوراخ دوم تنها سرعت تغذیه به ۱۳ میلی‌متر بر ثانیه افزایش و سوراخ‌کاری انجام و مابقی مراحل عملیات به همین منوال صورت پذیرفت. از هر سوراخ سه تکرار انجام گرفت.

پردازش تصویر و اندازه‌گیری فاکتور تورق

جهت اندازه‌گیری فاکتور بلند شدن لایه‌ها و میزان خسارت وارده در اطراف سوراخ در لایه زیری کامپوزیت، از تکنیک دوربین کانن مجهز به عکس‌برداری دیجیتال استفاده گردید. مکانیسم تورق و نمونه سوراخ دارای لایه شدگی (متورق) بر روی کامپوزیت در شکل ۲ نشان داده شده است. از سوراخ‌های ایجاد شده بر روی کامپوزیت، تصویر واضح و دقیق دیجیتال تهیه و تصاویر به محیط

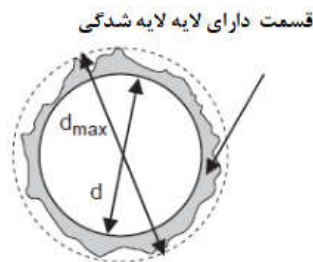


(الف)

شکل ۲- (الف) مکانیسم تورق و مدهای شکست در لایه زیرین کامپوزیت پانل ساندویچی بعد از عملیات سوراخ‌کاری



(ب) نمایی از سوراخ دارای تورق در کامپوزیت بعد از سوراخ‌کاری



شکل ۳- شماتیک ابعادی فاکتور لایه شدگی [۱۱]

تجزیه و تحلیل آماری

نتایج تجربی به دست آمده به روش فاکتوریل در قالب طرح تصادفی با رسم جداول تجزیه واریانس در نرم افزار SPSS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همچنین گروه بندی میانگین ها نیز با آزمون چند دامنه ای دانکن (DMRT) انجام شد. اثر هر کدام از فاکتورها به صورت جداگانه بررسی و نتایج مورد تحلیل قرار گرفت.

نتایج و بحث

نتایج اندازه گیری شده برای فاکتور لایه شدگی برای متغیرهای مورد مطالعه ماشین کاری در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- فاکتورهای ورودی آزمایش های انجام شده به همراه نتایج فاکتور تورق

شماره آزمایش	پارامترهای ورودی			سرعت تغذیه ($\frac{mm}{min}$)	قطر منته (mm)	نوع لایه رویی و زیری	تورق در خروجی		
	۱	۲	۳				میانگین		
۱	C ₁	B ₁	A ₁	۲/۲۲۲	۱/۸۹۵	۲/۷۹۳	۲/۳۰۳		
۲	C ₂	B ₁	A ₁	۲/۱۸۱	۲/۷۲۴	۲/۶۹۹	۲/۵۳۴		
۳	C ₁	B ₂	A ₁	۲/۱۳۲	۲/۳۹	۲/۶۵۵	۲/۳۹۲		
۴	C ₂	B ₂	A ₁	۲/۷۱۴	۲/۶۱۲	۲/۲۱۴	۲/۵۱۳		
۵	C ₁	B ₃	A ₁	۲/۲۶۳	۲/۱۷۴	۱/۳۸۵	۱/۹۴۰		
۶	C ₂	B ₃	A ₁	۳/۰۶۰	۲/۱۴۹	۲/۷۴۳	۲/۶۵۰		
۷	C ₁	B ₁	A ₂	۱/۲۲۵	۱/۲۲۶	۱/۱۱۹	۱/۱۹۰		
۸	C ₂	B ₁	A ₂	۱/۳۳۵	۱/۳۳۷	۱/۲۴۶	۱/۳۰۶		
۹	C ₁	B ₂	A ₂	۱/۲۱۸	۱/۱۷۹	۱/۲۰۲	۱/۱۹۹		
۱۰	C ₂	B ₂	A ₂	۱/۳۱۲	۱/۴۶۷	۱/۳۰۴	۱/۳۶۱		
۱۱	C ₁	B ₃	A ₂	۱/۱۴۲	۱/۲۳۲	۱/۳۱۲	۱/۲۲۸		
۱۲	C ₂	B ₃	A ₂	۱/۲۷۷	۱/۲۰۴	۱/۲۴	۱/۲۴۰		
۱۳	C ₁	B ₁	A ₃	۱/۶۹	۱/۶۸۹	۱/۴۱۵	۱/۵۹۸		
۱۴	C ₂	B ₁	A ₃	۲/۲۲۹	۲/۱۰۲	۱/۷۱۷	۲/۰۱۶		
۱۵	C ₁	B ₂	A ₃	۱/۶۶۸	۱/۵۷۵	۱/۶۵۳	۱/۶۳۲		
۱۶	C ₂	B ₂	A ₃	۱/۴۷۱	۱/۹۳۰	۱/۵۵۳	۱/۶۵۱		
۱۷	C ₁	B ₃	A ₃	۲/۰۸۶	۱/۴۸۱	۱/۷۳۴	۱/۷۶۷		
۱۸	C ₂	B ₃	A ₃	۲/۱۳۵	۱/۵۶۲	۱/۵۸۲	۱/۷۶۰		

۹۹ درصد) و بیشترین درصد مشارکت به ترتیب برای پارامترهای جنس رویه‌ها، سرعت تغذیه و قطر مته به دست آمده است.

نتایج آنالیز تجزیه و تحلیل واریانس بین داده‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است که تأثیر گذارترین پارامترها بر اساس جدول، جنس رویه‌ها و سرعت تغذیه (در سطح

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر فاکتور تورق

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	سطح معنی داری	درصد تأثیر
جنس رویه‌ها (A)	۲	۱۱/۶۷۷	۵/۸۳۹	**...	۰/۸۲۲
قطر مته (B)	۲	۰/۳۳	۰/۱۶	ns	۰/۱۳
سرعت تغذیه (C)	۱	۰/۵۲۹	۰/۵۲۹	**	۰/۱۷۳
(A) × (B) × (C)	۴	۰/۴۱۷	۰/۱۰۴	ns	۰/۱۴۱
(B) × (C)	۲	۰/۶۵	۰/۰۳۲	ns	۰/۰۲۵
(A) × (C)	۲	۰/۱۷	۰/۰۸۵	ns	۰/۰۶۳
(A) × (B)	۴	۰/۱۴۴	۰/۰۳۶	ns	۰/۰۵۳
خطا	۳۶		۰/۰۷۰		
مجموع	۵۴				

*: معنی‌داری در سطح ۱ درصد ns عدم معنی‌داری

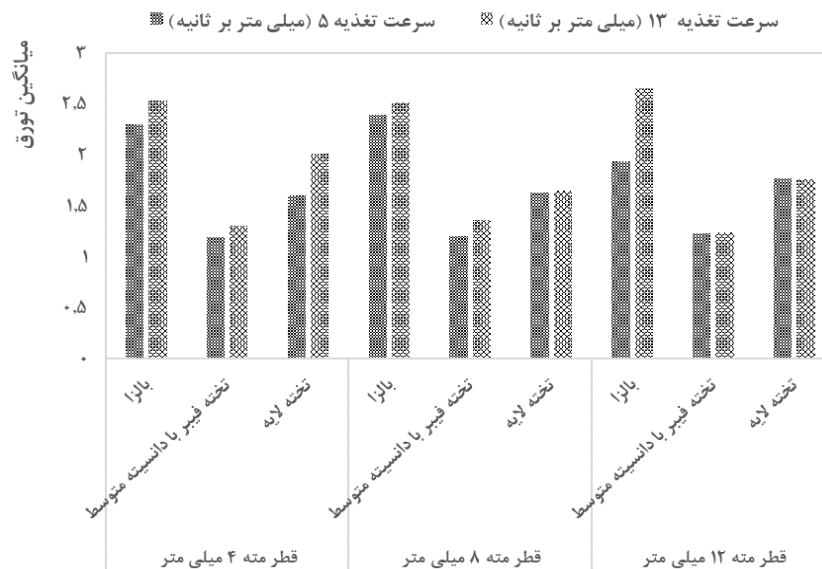
[۹،۱۴،۱۵]. افزایش سرعت تغذیه سبب ایجاد فشار در رویه‌ها قطعه کار شده که منجر به لایه شدگی در هنگام خروج مته می‌گردد. همچنین زیاد شدن نیروی محوری، باعث افزایش تورق می‌گردد؛ زیرا عملکرد مته مانند سنبه بوده و در راستای سوراخ هل داده می‌شود، بنابراین به جای لایه برداری شروع به کندن لایه می‌کند که این عمل لایه شدن کامپوزیت پانل ساندویچی و زیاد شدن تورق را در پی دارد [۱۶].

در هنگام عملیات سوراخ‌کاری MDF دارای روکش ملامینه، ذرات الیاف به طور متناوب با سطح مته در تماس هستند و این ذرات باعث لایه‌شدن می‌شوند که تأثیر مستقیم پارامترهای برش را نشان می‌دهد. لایه شدگی در MDF دارای روکش ملامینه به علت فشار وارده در ناحیه نوک مته رخ داده و الیاف برش نخورده در حین چرخش مته ایجاد می‌گردد؛ بنابراین می‌توان گفت که کمترین سرعت تغذیه برای سوراخ‌کاری MDF دارای روکش ملامینه ترجیح داده می‌شود. بالا رفتن نرخ تغذیه افزایش نیروی محوری را در پی دارد که در هنگام ورود مته به لایه‌ها و خروج از لایه‌ها باعث افزایش لایه شدگی می‌گردد؛ بنابراین می‌توان گفت که سرعت پایین پیشروی در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های چوبی برای کاهش لایه شدگی ارجحیت دارد [۱۷،۱۸] که با نتایج مقاله [۹] مطابقت دارد.

نمودار اثرات مستقل در شکل‌های ۴ الی ۶ نشان داده شده است. در فاکتور تورق در خروجی، لایه شدگی در مرز بین تخته‌ها و فوم رخ نداده که نشان دهنده مقاومت این ناحیه در برابر فشارهای وارده می‌باشد.

اثر سرعت تغذیه

از نتایج جدول تجزیه و تحلیل واریانس مشاهده می‌شود که متغیر سرعت تغذیه از نظر آماری در سطح ۹۹ درصد معنی دار و دارای درصد مشارکت ۰/۱۷۳ درصدی می‌باشد. همان‌طور که از شکل ۴ مشخص می‌باشد با افزایش سرعت تغذیه از ۵ میلی‌متر بر ثانیه به ۱۳ میلی‌متر بر ثانیه در هر سه قطر مورد مطالعه (۴، ۸ و ۱۲) فاکتور لایه شدگی نیز افزایش یافته است هر چند این مقادیر با توجه به نتایج جدول ۲ در حد اندک می‌باشند. بیشترین میانگین تورق با قطر یکسان به ترتیب در چوب بالزا، تخته لایه و MDF دارای روکش ملامینه مشاهده می‌شود. افزایش سرعت تغذیه در هنگام دریل‌کاری باعث افزایش نیروی محوری می‌شود و مقدار پارامتر لایه شدگی افزایش پیدا می‌کند. سرعت تغذیه بیش از سه برابر سرعت برش بر مقدار لایه شدگی اثر دارد [۱۲] و با کاهش این نرخ وقتی مته دستگاه به لایه‌های انتهایی کامپوزیت نزدیک می‌شود تا ۳۷ درصد فاکتور تورق کاهش پیدا می‌کند [۱۳] که با نتایج مطالعات پیشین نیز مطابقت دارد



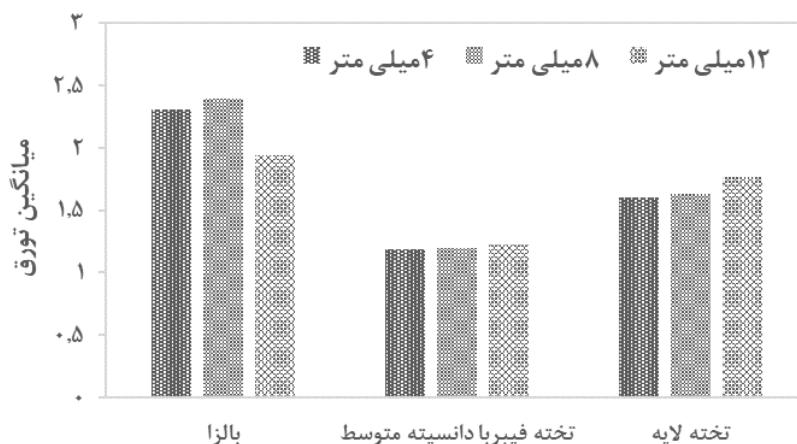
شکل ۴- اثر سرعت تغذیه بر فاکتور لایه شدگی

اثر قطر مته

از نتایج جدول تجزیه و تحلیل واریانس مشاهده می‌شود که متغیر قطر مته از نظر آماری معنی دار نمی‌باشد اما درصد مشارکت ۰/۱۳ درصدی را دارا می‌باشد. اگرچه قطر مته تأثیر آماری معنی داری ندارد، اما درصدی از تغییرات و نتایج را توضیح می‌دهد که به طور مهمی به این عامل نسبت داده می‌شود. در شکل ۵ نتایج تاثیر قطر مته در سرعت تغذیه ۵ میلی‌متر بر ثانیه نشان داده می‌شود. اثر قطر مته در نمونه‌های پانل ساندویچی با رویه بالزا از روند منظمی پیروی نمی‌کند. با افزایش قطر مته از ۴ میلی‌متر به ۸ میزان لایه شدگی زیاد و در صورت استفاده از مته شماره ۱۲ میلی‌متر مقدار لایه شدگی بیشترین کاهش را نشان می‌دهد. این درحالی است که در دیگر نمونه‌های ساندویچ شده با رویه تخته لایه و MDF دارای روکش ملامینه شاهد یک روند افزایشی ولو به میزان اندک می‌باشیم.

اگرچه تاثیر مستقل اندازه مته در اینجا بررسی می‌شود اما دلایل مشاهدات ثبت شده با جنس رویه‌های بکار گرفته شده و همچنین سرعت تغذیه بی ارتباط نمی‌باشد. یکی از دلایلی که می‌تواند باعث این اتفاق شود، می‌تواند متناسب بودن اختلاف ساختاری و خصوصیات مواد مختلف در مقابل تغییرات در قطر مته باشد. به عنوان مثال، در نمونه‌های پانل ساندویچی با رویه بالزا، با افزایش قطر

مته از ۴ میلی‌متر به ۸ میلی‌متر، مقدار لایه شدگی زیاد می‌شود. با توجه به اینکه چوب نسبت به سایر فرآورده های مرکب چوبی ناهمگن تر می‌باشد، با افزایش قطر مته، مقدار فشار ورودی به ناحیه محل سوراخ افزایش می‌یابد. این فشار بیشتر می‌تواند به ساختار چوب فشار بیشتری وارد کند که در نتیجه منجر به تخریب و پارگی‌های بیشتر شود. این نتیجه به طور غیر منتظره‌ای برای مته ۱۲ میلی‌متر کاهش دیده شد. رویه بالزا در مواجهه با سر مته اندازه ۱۲ میلی‌متر به طور متفاوتی به فشار و تغییرات حرارتی واکنش نشان داده و این باعث تغییر در رفتار تورقی آن شده است. به هر حال تعاملات پیچیده بین عوامل مختلف شامل فشار وارد شده به رویه بالزا، پراکندگی توان، رفتار رویه با توجه به نوع جنسش ممکن است این نتیجه را رقم زده باشد. در فرآیند تورق، انرژی مکانیکی از طریق ابزار (مته) به سطح ناحیه‌ای که قرار است سوراخ شود وارد می‌شود. پراکندگی توان، نشان‌دهنده این است که چگونه این انرژی به طور ناهمگن در سطح ناحیه سوراخ توزیع می‌شود؛ به عبارت دیگر، در اثر اعمال فشار و انرژی، برخی نقاط سطح ممکن است بیشتر از دیگر نقاط تحت تأثیر قرار بگیرند که این امر می‌تواند به تغییراتی در رفتار ساختاری و تورق لایه‌ها منجر شود.



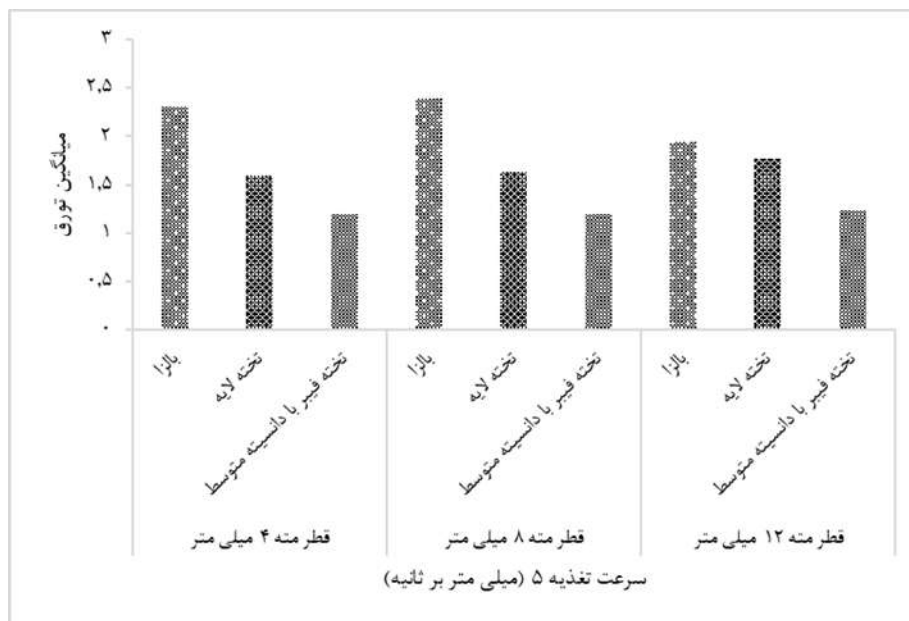
شکل ۵- اثر قطر مته بر فاکتور لایه شدگی در سرعت تغذیه ۵

داده می‌شود [۱۷] که با نتایج ارائه شده [۱۴] مطابقت دارد.

اثر جنس رویه ها

با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس جنس رویه‌ها از نظر آماری در سطح ۹۹ درصد معنادار و بیشترین درصد مشارکت (۰/۸۲۲) را دارد. شکل ۶ نتایج اثر مستقل جنس رویه‌ها را در سرعت تغذیه ۵ میلی‌متر بر ثانیه نشان می‌دهد و در همه قطرهای مورد مطالعه، ابتدا بالزا دارای بیشترین لایه شدگی و MDF دارای روکش ملامینه دارای کمترین میانگین لایه شدگی و تخته لایه حد واسط لایه شدگی بین این دو نوع کامپوزیت را دارد. MDF دارای روکش ملامینه، همگنی بیشتری نسبت به سایر متغیرهای مورد مطالعه را دارد، بنابراین کیفیت سطح بهتری داشته و چسبندگی بهتری در لایه‌ها را دارا می‌باشد و این ویژگی باعث می‌شود که ابزارزنی در سطوح آن انعطاف پذیری مناسبی داشته باشد.

اما در نمونه‌های ساندویچ شده با رویه تخته لایه و MDF دارای روکش ملامینه، این تغییرات ممکن است به دلیل ویژگی‌های متفاوت این مواد باشد که ممکن است به طور متفاوتی به تغییرات در قطر مته واکنش نشان دهند. در تخته لایه و MDF دارای روکش ملامینه با توجه به فشردگی بیشتر این فرآورده‌ها و ماهیت آن‌ها، دارای ساختمان همگن‌تری نسبت به چوب بالزا هستند. در نتیجه در مقابل فشار وارده از طرف مته و پارامترهای وابسته به لبه برش، واکنش‌های منظم‌تر و پیش‌بینی شده‌ای نشان می‌دهند. مشاهده یک روند منظم افزایشی در عیب تورق متناسب با افزایش قطر مته در دو جنس تخته لایه و MDF دارای روکش ملامینه حکایت از همین امر دارد. به‌طور کلی می‌توان گفت قطر مته بر لایه شدگی تخته کامپوزیت‌های چوبی در سوراخ‌کاری اثر گذار می‌باشد. تورق در MDF دارای روکش ملامینه به علت برخورد الیاف با سطح مته رخ می‌دهد؛ بنابراین برای کاهش لایه شدگی در عملیات سوراخ‌کاری MDF، مته‌هایی با قطر کوچک، سرعت اسپیندل بالا و سرعت تغذیه کم ترجیح



شکل ۶- اثر جنس روپه‌ها بر فاکتور لایه شدگی در سرعت تغذیه ۵ میلی‌متر بر ثانیه

ماشین‌کاری آن آسان تر و با حداقل بلند شدن الیاف و همچنین تورق دیده انجام می‌شود.

نتیجه‌گیری

هدف این مقاله یافتن شرایط بهینه برای متغیرهای مورد مطالعه برای ماشین‌کاری با استفاده از فاکتور تورق می‌باشد. بدین منظور سه کامپوزیت پانل ساندویچ چوبی با هسته فوم پلی استایرن اکستروژده را با مت‌هایی از قطرهای مختلف در دو سطح سرعت تغذیه ماشین‌کاری شده است. نتایج به طور خلاصه چنین شرح داده می‌شود. کمترین لایه شدگی در کامپوزیت پانل ساندویچی با روپه-های ساخته شده از MDF دارای روکش ملامینه با قطر مته ۴ و سرعت تغذیه ۵ (۱/۱۱۹) و بیشترین لایه شدگی در کامپوزیت پانل ساندویچی با روپه‌های ساخته شده از جنس چوب بالزا با قطر مته ۱۲ و سرعت تغذیه ۱۳ (۳/۰۶۰) به دست آمد. بعد از اثر نوع روپه‌ها، سرعت تغذیه و به دنبال آن قطر مته از متغیرهای مستقل بیشترین درصد تأثیر را بر روی سوراخ‌کاری داشته‌اند. جهت دستیابی برای شرایط بهینه سوراخ‌کاری و کاهش پارامتر تورق پیشنهاد می‌گردد سرعت برش افزایش و سرعت تغذیه کم تنظیم گردد.

لایه شدگی‌هایی که در اطراف چوب بالزا و تخته لایه مشاهده می‌شود به صورت جدا شدن لایه‌هایی از روپه مورد نظر در اطراف سوراخ ایجاد شده با دستگاه CNC می‌باشد اما در MDF دارای روکش ملامینه این امر به صورت جدا شدن فیبر است که کاهش لایه شدگی، انسجام بیشتر بافت در تخته فیبر را نشان می‌دهد. همچنین نتایج لایه شدگی مشاهده شده در خصوص تخته لایه می‌توان گفت که چون ترکیبی از رزین و چوب می‌باشد ممکن است که رزین به‌عنوان یک واسطه منجر به کاهش لایه شدگی نسبت به چوب بالزا شود و همچنین جنس لایه و فشار پرس نیز می‌تواند در کاهش لایه شدگی مؤثر باشد. به دلیل ساختار پیچیده و به هم پیوسته چوب ماسیو و نحوه قرار گرفتن عناصر در بافت آن، الیاف موجود در ناحیه‌ای که مورد فشار سر مته قرار گرفته است، پس از تحمل نیروهای وارده نهایتاً تخریب، شکسته و پاره می‌شود. این وضعیت پیوستگی الیاف به دلیل چگونگی قرار گرفتن ماده چوبی در نمونه‌های ساخته شده با روپه تخته لایه کمتر و در پانل‌های ساخته شده با MDF دارای روکش ملامینه به حداقل خود می‌رسد. در این دو نوع کامپوزیت، الیاف قبلاً پارگی و گسیختگی را تجربه کرده‌اند. به همین دلیل الیاف موجود در تخته فیبر مقاومت کمتری از خود در مقابل فشار سر مته نشان می‌دهند و

- the delamination in the drilling process of a melamine coated medium density fiberboard (MDF). *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 8(1), pp.1-10.
- [10] Yang, B., Wang, H., Chen, Y., Fu, K. and Li, Y., 2021. Experimental evaluation and modelling of drilling responses in CFRP/honeycomb composite sandwich panels. *Thin-Walled Structures*, 169, p.108279.
- [11] Chen, W.C., 1997. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37(8), pp.1097-1108.
- [12] Ghesmati-Kucheki, M., Zakeri, M., and Ayatollahi, R., 2021. Investigating the effect of different variables to reduce delamination due to drilling in composite laminates. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 8(6), pp. 15- 20 (in Persian).
- [13] Sorrentino, L., Turchetta, S. and Bellini, C., 2018. A new method to reduce delaminations during drilling of FRP laminates by feed rate control. *Composite Structures*, 186, pp.154-164.
- [14] Gaitonde, V.N., Karnik, S.R. and Davim, J.P., 2008. Prediction and minimization of delamination in drilling of medium-density fiberboard (MDF) using response surface methodology and Taguchi design. *Materials and Manufacturing Processes*, 23(4), pp.377-384.
- [15] Amini, S., Baraheni, M., and Moeini Afzal, M., 2018. Statistical Study of the Effect of Various Machining Parameters on Delamination in Drilling of Carbon Fiber Reinforced Composites, *Journal of Science and Technology of Composites*.5(1), PP.41-50. (In Persian)
- [16] Khodaparast, M. J., Azarafza, R., Vafaesezat, A. 2021. Experimental study and optimization of effective drilling parameters on fibers glass-epoxy composite, *Journal of Science and*
- منابع**
- [1] keshavarz, M., Zebarjad, S.M., and Danesh manesh, H., 2018. The effects of TiO₂ nanoparticles on physical and thermal properties of polyurethane foam and sandwich panel. *Journal of New Materials*, 49(13), PP.41-56. (In Persian)
- [2] Mohammadabadi, M., Yadama, V. and Dolan, J.D., 2021. Evaluation of wood composite sandwich panels as a promising renewable building material. *Materials*, 14(8), PP.2083.
- [3] Raj, D.S., and Karunamoorthy, L., 2016. Study of the effect of tool wear on hole quality in drilling CFRP to select a suitable drill for multi-criteria hole quality. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(5), PP.587-592.
- [4] Khoran, M., Amirabadi, H., and Safari, H.A., 2014. Examining the drilling process of composites. *Journal of mechanical engineering*, 104, PP.69-78. (In Persian)
- [5] Ma, F.J., Zhu, X.L., Kang, R.K., Dong, Z.G. and Zou, S.Q., 2013. Study on the subsurface damages of glass fiber reinforced composites. *Advanced materials research*, 797, PP.691-695.
- [6] Zhang, T., Yan, Y. and Li, J., 2017. Experiments and numerical simulations of low-velocity impact of sandwich composite panels. *Polymer Composites*, 38(4), PP.646-656.
- [7] Baharlooey, M., and Abootorabi, M., 2018. The effect of drill geometrical properties on delamination and diameter error of holes in a thin sheet of Kevlar/epoxy composite. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 5(2), PP.9-17. (In Persian)
- [8] Sifouri, S., and Fatemi, S.A., 2018. Investigating the amount of damage caused to carbon fiber and glass composite in drilling. *Manufacturing and production engineering of Iran*.6(6), PP.44-50. (In Persian)
- [9] Rakhshkhorshid, M., Emam, S.M., Lakhi, M. and Ghahremani, S., 2022. Evaluating

- International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 45, pp.370-381.
- [18] Kumar, B. S., Baskar, N., Rajaguru, K. 2020. Drilling operation: A review, Materials Today: Proceedings, 21(1), PP.926-933.
- Technology of Composites, 8(1), pp. 1411-1420. (In Persian).
- [17] Prakash, S., Palanikumar, K. and Manoharan, N., 2009. Optimization of delamination factor in drilling medium-density fiberboards (MDF) using desirability-based approach. The