



بهینه سازی فرآیند سوراخ کاری کامپوزیت های ساندویچی با هسته موج دار

پویان قابضی^۱، محمد رضا فراهانی^{۲*}، محمد کاظم بشارتی گیوی^۳

۱- دانشجوی دکتری تخصصی، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران

* تهران، صندوق پستی ۵۱۵-۱۴۳۹۵، mrfarahani@ut.ac.ir

چکیده

هدف از این پژوهش بررسی اثر سرعت دورانی، پیشروی و قطر ابزار بر روی میزان آسیب وارد شده به قطعه در حین عملیات سوراخ کاری پل های ساندویچی می باشد. پل های ساندویچی مورد بررسی در این پژوهش، دارای هسته ای مرکب از جنس فوم پی وی سی و ورق های موج دار با هندسه دوزنقه ای می باشد و لمینیت ها از جنس شیشه / پلی استر ساخته شده اند. برای ساخت تمام نمونه ها از فرآیند VARTM استفاده شده است. برای ارزیابی اهمیت پارامترهای سوراخ کاری از روش طراحی آزمایش فول-فاکتوریل استفاده شده و جهت سنجش میزان آسیب وارد شده به نمونه ها، از دو فاکتور استفاده شده است: ۱- فاکتور تورق، ۲- فاکتور الیاف برش نخورده. نتایج تجربی نشان داد که نرخ پیشروی و قطر مته به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر روی فاکتور تورق دارند؛ اما نتایج تجربی برای UCFF، نشان داد که قطر ابزار بیشترین اثر را دارد و با افزایش قطر UCFF نیز افزایش پیدا می کند. همچنین، نتایج نشان داد که هر دو فاکتور با افزایش نرخ تغذیه افزایش می یابند در حالی که یک نقطه بهینه برای سرعت برشی و قطر ابزار در ارزیابی UCFF، وجود دارد. از طرفی افزایش قطر ابزار منجر به کاهش DF شده و بطور کلی در بررسی تأثیر سرعت برشی بر روی مقدار UCFF، یک نقطه حداکثر وجود دارد.

کلید واژگان: سرعت برشی، سوراخ کاری، نرخ تغذیه، پل ساندویچی، تورق

Optimization of drilling process on corrugated core sandwich panels

Pouyan Ghabezi, Mohammad reza Farahani*, Mohammad kazem Besharati Givi

School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 14395- 515, Tehran, Iran, mrfarahani@ut.ac.ir

ABSTRACT

The objective of this work is to investigate the influence of cutting speed (rpm), feed rate (mm/min) and tool diameter (mm) on the uncut fiber and delamination damage of a type of composite sandwich structures including PVC foam, Trapezoidal corrugated sheets and faces made of E-Glass/polyester. VARTM method has been used for manufacturing of samples. A design of experiments (full factorial) was used to assess the importance of the drilling parameters. The drilling operation was assessed based on two introduced factors including the delamination factor (DF) and uncut fiber factor (UCFF). Minitab software has been used for obtaining the role of each parameter on output factor. Analysis of the experimental results for DF indicated that the feed rate and drill diameter were the most significant and insignificant parameters, respectively. But, experimental results for UCFF showed that the tool diameter has greatest influence where UCFF increased with increasing diameter, too. Also, the results revealed that the both factors increase with the increase of feed rate. There is an optimum point for cutting speed and tool diameter in evaluation of UCFF. Whereas, increasing tool diameter leads to decrease of DF and generally there is a maximum point in variation of cutting speed for UCFF.

Keywords: Cutting Speed, Delamination, Drilling, Feed Rate, Sandwich Panel.

کامپوزیتی و پل ساندویچ تفاوت وجود دارد، در یک پل ساندویچ، به دلیل وجود دو لمینیت یکی در سطح بالایی و دیگری در سطح پایین، چهار منطقه آسیب دیده (پوسته ای شدن و هل دادن الیاف در هر دو قسمت بالا و پایین وجود دارد) مشاهده می شود در حالی که در سوراخ کاری یک لمینیت دو منطقه وجود دارد. شکل ۱ مکانیزم های مختلف تورق در یک ورق کامپوزیتی (لمینیت) را نشان می دهد.



شکل ۱ مکانیزم های مختلف تورق در یک ورق کامپوزیتی [۱]

۱- مقدمه

مکانیزم سوراخ کاری در قطعات کامپوزیتی تقویت شده در مقایسه با مواد همسان گرد و همگن مانند فلز، متفاوت است. در حین سوراخ کاری مواد مرکب عیوب مختلفی ایجاد می شود که در میان آن ها، خروج الیاف، ترک خوردگی ماتریس و تورق^۱ مرسوم ترین عیوب هستند. پدیده تورق در هنگام ورود و خروج مته به داخل قطعه و بویژه در لایه های بالایی و پایینی، رخ می دهد. تورق در طول سوراخ کاری لمینیت توسط دو مکانیزم مختلف صورت می گیرد: پوسته ای شدن در لایه ی بالایی (کشیدن لایه به سمت بالا) و فشار (هل) دادن لایه ی پایینی^۲ [۱]. با این حال، بین تورق ایجاد شده در ورق

1. Delamination
2. Peeling up
3. Pushing out

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

P. Ghabezi, M.R. Farahani, M.K. Besharati Givi, Optimization of drilling process on corrugated core sandwich panels, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 107-112, 2015 (in Persian فارسی)

در ناحیه نزدیک به خروج مته از سوراخ، تورق، ناشی از جدا شدن لایه نازک آخر از باقی مانده لمینیت می باشد. این آسیب منجر به تضعیف سازه می شود، بنابراین بررسی پدیده تورق در ساندویچ پنل های کامپوزیتی یک مسئله حیاتی است. در این مقاله، یک پنل ساندویچی با هسته مرکب (از جنس ورق موج دار و فوم) تحت شرایط مختلف ماشین کاری (سرعت دورانی، پیشروی و قطر ابزار برش) مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از انجام این تحقیق یافتن بهترین شرایط ماشین کاری و ایجاد سوراخ در پنل های ساندویچی با استفاده از تعریف فاکتور تورق ۱ (DF)، و فاکتور الیاف برش نخورده ۲ (UCFF)، می باشد.

با توجه به مطالب گفته شده در بالا و نتایج مربوط به سایر پژوهش ها در زمینه بررسی تورق، می توان گفت که بیشترین آسیب وارده در حین سوراخ کاری در لایه آخر ایجاد می شود که دلیل آن ضعیف بودن لایه های آخر می باشد و مکانیزم آن در بالا شرح داده شد بنابراین استفاده از تکنیک عکس برداری دیجیتال می تواند راه کاری قابل اعتماد جهت اندازه گیری و تعیین سطوح آسیب دیده باشد که با توجه به این که الیاف مورد استفاده شیشه هستند این امکان وجود دارد در صورتی که استفاده از الیاف کربن به دلیل رنگ سیاه آن ها به کارگیری این تکنیک را با مشکل مواجه خواهد کرد.

نوآوری های پژوهش پیش رو را می توان به شرح زیر بیان کرد:

در کارهای پیشین بیشترین تمرکز بر بررسی آسیب تورق در لمینیت های کامپوزیتی بوده و چندان به بررسی این عیب در پنل های ساندویچی پرداخته نشده است و جای خالی انجام تحقیق در این زمینه به چشم می خورد. از طرفی پدیده ریش ریش شدن الیاف (برش نخوردن الیاف) در نمونه های کامپوزیتی بررسی نشده است. همچنین در زمینه بررسی قابلیت ماشین کاری و یا بهینه سازی شرایط برش در پنل های ساندویچی با هسته موج دار (و حتی لمینیت های موج دار کامپوزیتی) پژوهشی صورت نپذیرفته است. روش ساخت نمونه های کامپوزیتی نیز از روش های مدرن ساخت قطعات کامپوزیتی می باشد. بنابراین می توان با توجه به نکات ذکر شده اهمیت پژوهش در این زمینه را امری نو قلمداد کرد.

۲- پیشینه پژوهش

هوچنگ و همکارانش [۲]، اثر هندسه مته های مختلف را به صورت تحلیلی بررسی کرده اند. آن ها تورق در انواع مختلف مته (core drill and step drill saw drill, candle stick drill) را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. بوسکو و همکارانش [۳]، اثر پارامترهای برش بر روی تورق را در سوراخ کاری یک ساندویچ پنل با هسته فولادی و صفحات تقویت شده با الیاف شیشه را مورد ارزیابی قرار داده اند. ساردیتاس و همکارانش [۴]، یک روش بهینه سازی چند منظوره (فاکتور تورق و نرخ باربرداری) را برای سوراخ کاری ورق های کامپوزیتی لمینیت پیشنهاد دادند. تسائو و همکارانش [۵]، روش نوینی را برای کاهش تورق حین سوراخ کاری مواد کامپوزیتی توسط نیروی پشتیبان ارائه کردند، روش پیشنهادی نشان می دهد که با نرخ تغذیه بالا می توان قطعات کامپوزیتی را با هزینه کم و تورق ناچیز تولید کرد. زایتون و همکارانش [۶]، تأثیر پارامترهای گشتاور، نیروی محوری و کیفیت سطح را به صورت تجربی مورد بررسی قرار داده اند، نتایج تجربی نشان می دهد که با انتخاب مناسب پارامترهای برش، می توان کیفیت سوراخ ها را بهبود بخشید. پلاتی کومار یک روش موثر برای بهینه سازی پارامترهای سوراخ کاری براساس

روش تاگوچی پیشنهاد داده است [۷]. سیگ و شارما [۸]، یک مدل ریاضی برای دستیابی به دینامیک فرآیند سوراخ کاری ارائه کرده اند. کلیکاپ، تأثیر پارامترهای برش (سرعت، میزان تغذیه و زاویه نوک ابزار) بر تورق را بر سوراخ کاری کامپوزیت های GFRP مورد بررسی قرار داده است [۹]. کارول و همکارانش ماشین کاری کامپوزیت بافته شده SiC/SiC و کامپوزیت مونولیتیک با الیاف Si3N4/BN با استفاده از لیزر دی اکسید کربن را مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. محققان زیادی پدیده تورق در قطعات کامپوزیتی را به صورت تحلیلی و تجربی مورد بررسی قرار داده اند اما چندان در زمینه پنل های ساندویچی گزارشی ارائه نداده اند [۱۱]. هاجه سو [۱۲]، به بررسی پارامترهای سوراخ کاری از جمله سرعت برشی، پیشروی و هندسه ابزار بر میزان آسیب وارده بر نمونه نهایی پرداخته اند، اما کار ایشان محدود به لمینیت های کامپوزیتی بوده و وارد حوزه ساندویچ پنل ها نشده اند. کاپلو [۱۳] نشان داد که میزان آسیب در هنگام خروج مته بسیار بیشتر از میزان آسیب وارده به نمونه در هنگام ورود مته به درون قطعه می باشد. کاشابا و همکارانش [۱۴] به بررسی استفاده از دمپر در هنگام سوراخ کاری نمونه های کامپوزیتی و تأثیر آن بر آسیب وارده به نمونه پرداخته اند.

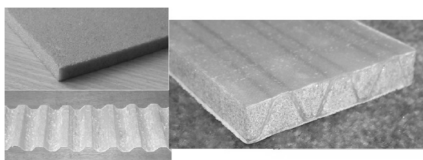
۳- آزمایش های تجربی

۳-۱- مواد

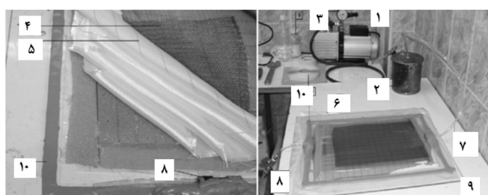
در این مطالعه از یک رزین پلی استر غیراشباع مناسب برای فرآیند VARTM با ویسکوزیته ۹۰-۱۲۰ (MP) ۰/۰۱٪ نفتانات کبالت به عنوان شتاب دهنده و ۱/۲۵٪ پراکسید متیل اتیل کتون به عنوان آغازگر استفاده شده است. همچنین در این مقاله در ساخت هسته از دو ماده شامل ۱- فوم پلی وینیل کلراید (پی وی سی)، C70.75 AIREX، با ضخامت ۱۰ mm و چگالی اسمی ۸۰ (kg/m³) و ۲- ورق موج دار از جنس شیشه/پلی استر (بخش دوزنقه ای شکل) با ارتفاع ۱۰ میلی متر، استفاده شده است (شکل ۲). صفحات بالا و پایین از ۶ لایه الیاف بافته شده (۰/۹۰) از جنس E-galss با چگالی سطحی ۲۰۰ گرم بر متر مربع ساخته شده اند.

۳-۲- ساخت نمونه ها

تمام نمونه ها با استفاده از فرآیند VARTM ساخته شده اند. جزئیات این فرآیند در شکل ۳ نشان داده شده است. برای تولید هسته پنل ساندویچ، ابتدا فوم

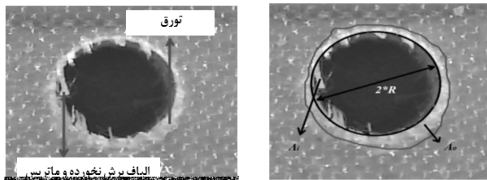


شکل ۲ هسته ساخته شده از ورق موج دار و فوم پی وی سی



شکل ۳ اجزای فرآیند VARTM؛ ۱- پمپ خلاء ۲- مخزن ایمنی ۳- فشارسنج ۴- لایه توزیع ۵- لایه داکرون ۶- کیسه خلاء ۷- لوله های انتقال رزین ۸- شیرها و اتصالات ۹- لایه جداکننده ۱۰- چسب آب بندی

1. Delamination Factor
2. Uncut Fiber Factor



شکل ۵. نواحی مختلف جهت محاسبه فاکتور تورق و الیاف برش نخورده

دیجیتال اسکن شده است. برای هر سوراخ سه ناحیه مختلف مطابق شکل ۵ مشخص داده شده است. برای این کار تمامی تصاویر به محیط نرم‌افزار AUTO CAD برده شده و با مرجع قرار دادن قطر دایره مته، مساحت نواحی مختلف محاسبه شده است. سپس با استفاده از روابط ۱ و ۲ فاکتورهای مورد ارزیابی استخراج شده‌اند.

۵- طراحی آزمایش (فول فاکتوریل)

به منظور بررسی فاکتورهای معرفی شده در این پژوهش، سرعت برشی، قطر ابزار و نرخ پیشروی در سه سطح مطابق جدول ۱ مورد بررسی قرار گرفته‌اند که جهت دستیابی به نتایج تجربی بهتر از سیستم طراحی آزمایش بصورت فول فاکتوریل استفاده شده است.

۶- نتایج تجربی

در سوراخ‌کاری پنل ساندویچی‌های کامپوزیتی پدیده تورق در خروجی سوراخ ناشی از نیروی پیشروی (نیروی محوری) می‌باشد که از طریق نوک مته به لایه‌های انتهایی هر پنل وارد می‌شود و بدلیل کاهش ضخامت همراه با پیشروی مته، مقاومت قطعه در برابر نیروی محوری رفته رفته کاهش یافته که منجر به پاره شدن الیاف می‌شود (به جای برش الیاف). این امر باعث ایجاد عیوب اساسی در سازه شده خصوصاً در هنگام ایجاد سوراخ به‌منظور ایجاد اتصال مکانیکی، کم کردن تورق اطراف سوراخ امری حیاتی می‌باشد. علاوه بر این، تورق و عدم برش نامناسب الیاف، باعث تمرکز تنش و در نتیجه کاهش استحکام مکانیکی سازه کامپوزیتی می‌شوند. اغلب مهندسان تمایل به بهینه‌سازی پارامترهای فرآیندی برای رسیدن به کیفیت مطلوب دارند. این شرایط بهینه می‌تواند شامل مقادیر حداقل و یا حداکثر برای پارامترهای ورودی باشد. برای تولید سوراخ مناسب در کاربردهای صنعتی، کنترل پارامترهای فرآیندی مانند سرعت برشی، میزان تغذیه و قطر مته مورد نیاز می‌باشد.

در این بخش، اثر پارامترهای سوراخ‌کاری (سرعت برشی، میزان تغذیه و قطر مته) بر DF و UCFF حین سوراخ‌کاری پنل ساندویچی با هسته موج‌دار با رسم نمودار و گراف‌های مناسب بصورت تجربی بررسی شده است. شکل ۶ نتایج تجربی مربوط به تاثیر قطر مته بر DF و UCFF را نشان می‌دهد (در محور افقی، اعداد اول و دوم به‌ترتیب نشان دهنده سرعت برشی (دور بر دقیقه) و نرخ تغذیه (میلی‌متر/دقیقه) می‌باشد). با توجه به این شکل می‌توان دریافت که با افزایش قطر مته، فاکتور تورق تقریباً کاهش می‌یابد اما برای قطر ۹ میلی‌متر مقدار آن افزایشی می‌باشد. در حالی که با افزایش قطر مته، فاکتور الیاف برش نخورده سیری نزولی دارد. به طور کلی می‌توان گفت برای سوراخ‌کاری پنل‌های ساندویچی با هسته موج‌دار، قطر بهینه ابزار برابر با ۷ میلی‌متر می‌باشد. نیروی تماسی بین ابزار و قطعه‌کار با افزایش قطر مته در حال افزایش است، اما نسبت نیرو به سطح مقطع (فشار، تنش) کاهش می‌یابد که باعث کاهش آسیب وارده به الیاف و ماتریس می‌شود، بنابراین به‌طور کلی فاکتور الیاف برش نخورده کاهش می‌باشد.

پی‌وی‌سی با استفاده از اهر نواری U- شکل، مدل RT-SB 305 با الگوی موج‌دار (خوزنقه‌ای) برش خورده و سپس پارچه‌های شیشه‌ای بین آن‌ها خوابانده شده است.

۳-۳- ابزار

فرآیند سوراخ‌کاری در تمام نمونه‌های ساندویچی با استفاده از مته‌های ساخته شده از فولاد HSS براساس استاندارد DIN 338، با قطرهای ۴، ۷ و ۹ میلی‌متر، زاویه راس ۱۱۸ درجه و به‌ترتیب با طول‌های ۴۳، ۶۹ و ۸۱ میلی‌متر، انجام گرفته است. به‌منظور انجام فرآیند سوراخ‌کاری، از یک ماشین فرز اونیورسال مدل DECKEL FP4M با توان ۴ کیلووات، سرعت اسپیندل ۵۰ تا ۲۵۰۰ دور بر دقیقه، سرعت تغذیه ۸-۶۳۰ (میلی‌متر بر دقیقه) استفاده شده است.

۳-۴- سوراخ‌کاری

سوراخ‌های موجود در پنل‌های ساندویچی با سه سرعت اسپیندل ۵۰۰، ۱۶۰۰ و ۲۵۰۰ دور بر دقیقه، نرخ تغذیه، ۵۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و قطر ۴، ۷ و ۹ میلی‌متر ایجاد شده‌اند. در طول فرآیند سوراخ‌کاری از مایع خنک کننده استفاده نشده است. به‌منظور ارزیابی تورق در اطراف سوراخ از تکنیک عکس‌برداری دیجیتال سایبرشات با استفاده از یک دوربین با رزولوشن ۸/۱ مگاپیکسل و با قابلیت فوکوس خودکار، استفاده شده است. سوراخ‌های ایجاد شده در شکل ۴ نشان داده شده‌اند.

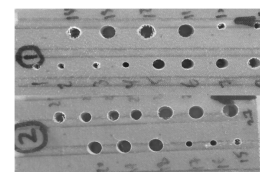
۴- فاکتور تورق و الیاف برش نخورده

آسیب‌های متنوعی در فرآیند سوراخ‌کاری مواد کامپوزیتی از جمله ترک خوردگی ماتریس، خروج الیاف، الیاف برش نخورده، شکستگی الیاف و تورق وجود دارد. یکی از مهمترین این عیوب که توجه پژوهش‌گران را به خود جلب کرده است، تورق یا جدا نشدن لایه‌ها از هم می‌باشد که دارای دو نوع کلی (در فرآیند سوراخ‌کاری) می‌باشد: ۱- بیرون زدن الیاف حین ورود مته به درون قطعه و ۲- خروج الیاف در هنگام خروج مته از طرف دیگر قطعه. نکته جالب توجه در مورد تورق در پنل‌های ساندویچی این است که به‌دلیل داشتن ورق در بالا و پایین قطعه دارای ۴ ناحیه اصلی متاثر از این پدیده می‌باشد. در این مقاله به ارزیابی تورق در پنل ساندویچی با استفاده از معرفی دو فاکتور پرداخته شده است. الف) فاکتور تورق (DF (Delamination Factor (رابطه ۱) و ب) فاکتور الیاف برش نخورده UCFF(Uncut Fiber Factor (رابطه ۲). این فاکتورها بصورت زیر تعریف شده‌اند:

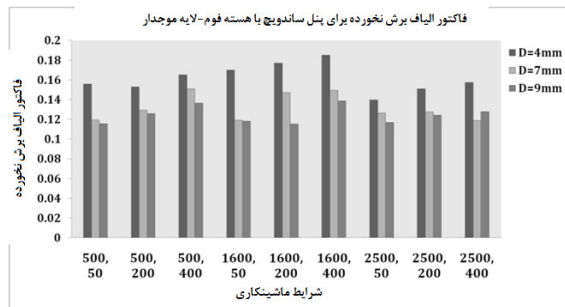
$$UCFF = \frac{A_i}{A_{Hole}} \quad (1)$$

$$DF = \frac{A_0}{A_{Hole}} \quad (2)$$

که در آن، A_{Hole} مساحت دایره مربوط به قطر مته می‌باشد. A_0 و A_i همان‌گونه که در زیر نشان داده شده است به‌ترتیب ناحیه بین دایره مرجع (مته) و ناحیه آسیب داخلی و ناحیه بین دایره مرجع (مته) و ناحیه آسیب خارجی می‌باشند. هر دو سطح بالا و پایین برای هر نمونه با استفاده از تکنیک عکاسی



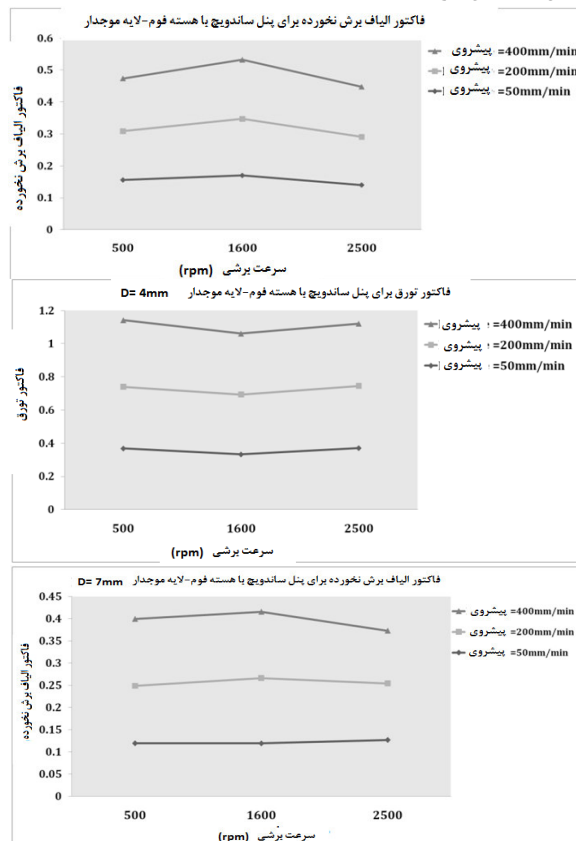
شکل ۴. ایجاد سوراخ در نمونه‌های ساندویچی



(ب)

شکل ۶ اثر قطر مته بر الف (DF) و ب (UCFF).

اثر سرعت برشی (۵۰۰، ۱۶۰۰ و ۲۵۰۰ دور بر دقیقه) و نرخ تغذیه (۵۰، ۲۰۰، ۴۰۰ میلی متر/دقیقه) بر DF و UCFF در شکل ۷ نشان داده شده است. از شکل ۷، مشاهده می‌شود که اثر پیشروی قابل توجه‌تر از سرعت برشی است. به نظر می‌رسد که سرعت برشی دارای اثر ناچیزی بر هر دو فاکتور تورق و الیاف جدا نشده می‌باشد؛ اما با توجه به نتایج، می‌توان دریافت که با افزایش سرعت برشی برای DF و UCFF بترتیب نقطه حداقل و حداکثر وجود دارد. به طور کلی، DF در سرعت برشی سطح ۲ (۱۶۰۰ دور بر دقیقه) کم‌ترین مقدار است، درحالی‌که در مورد UCFF رفتار معکوسی از خود نشان می‌دهد. در ابتدا با افزایش سرعت برشی و به دلیل نرم شدن فاز ماتریس، جدایش مواد راحت‌تر صورت می‌گیرد، در سرعت‌های بالاتر مته به دلیل کاهش زمان سوراخ‌کاری و افزایش ارتعاشات عرضی ابزار تورق رشد آهسته‌ای خواهد داشت. درحالی‌که در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های لمینیت، تورق با افزایش سرعت اسپیندل تمایل به کاهش دارد [۴].



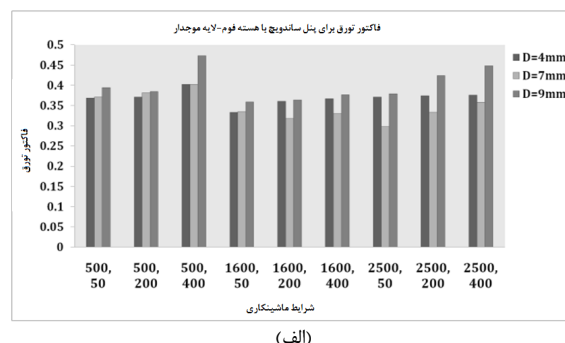
جدول ۱ طراحی آزمایش

سطح	سرعت برشی (rpm)	نرخ پیشروی (mm/min)	قطر ابزار (mm)
۱	۵۰۰	۵۰	۴
۲	۱۶۰۰	۲۰۰	۷
۳	۲۵۰۰	۴۰۰	۹

جدول ۲ نتایج مربوط به آزمون‌های تجربی برای یافتن فاکتور تورق و فاکتور الیاف برش نخورده را با استفاده از روابط (۱) و (۲) برحسب نرخ تغذیه، سرعت برشی و قطر ابزار برشی نشان می‌دهد.

جدول ۲ نتایج تجربی مربوط به سوراخ‌کاری ساندویچ پنل

نمونه	قطر ابزار D (mm)	سرعت برشی V (rpm)	نرخ تغذیه F (mm/min)	DF	UCFF
۱	۴	۵۰۰	۵۰	۰/۳۶۸	۰/۱۵۵
۲	۴	۵۰۰	۲۰۰	۰/۳۷۱	۰/۱۵۳
۳	۴	۵۰۰	۴۰۰	۰/۴۰۲	۰/۱۶۵
۴	۴	۱۶۰۰	۵۰	۰/۳۳۲	۰/۱۶۹
۵	۴	۱۶۰۰	۲۰۰	۰/۳۶۰	۰/۱۷۷
۶	۴	۱۶۰۰	۴۰۰	۰/۳۶۷	۰/۱۸۵
۷	۴	۲۵۰۰	۵۰	۰/۳۷۱	۰/۱۳۹
۸	۴	۲۵۰۰	۲۰۰	۰/۳۷۴	۰/۱۵۰
۹	۴	۲۵۰۰	۴۰۰	۰/۳۷۵	۰/۱۵۷
۱۰	۷	۵۰۰	۵۰	۰/۳۷۰	۰/۱۱۹
۱۱	۷	۵۰۰	۲۰۰	۰/۳۸۱	۰/۱۲۹
۱۲	۷	۵۰۰	۴۰۰	۰/۴۰۲	۰/۱۵۰
۱۳	۷	۱۶۰۰	۵۰	۰/۳۳۵	۰/۱۱۹
۱۴	۷	۱۶۰۰	۲۰۰	۰/۳۱۷	۰/۱۴۷
۱۵	۷	۱۶۰۰	۴۰۰	۰/۳۲۹	۰/۱۴۹
۱۶	۷	۲۵۰۰	۵۰	۰/۲۹۷	۰/۱۲۶
۱۷	۷	۲۵۰۰	۲۰۰	۰/۳۳۲	۰/۱۲۷
۱۸	۷	۲۵۰۰	۴۰۰	۰/۳۵۷	۰/۱۱۸
۱۹	۹	۵۰۰	۵۰	۰/۳۹۴	۰/۱۱۵
۲۰	۹	۵۰۰	۲۰۰	۰/۳۸۴	۰/۱۲۵
۲۱	۹	۵۰۰	۴۰۰	۰/۴۷۳	۰/۱۳۶
۲۲	۹	۱۶۰۰	۵۰	۰/۳۵۸	۰/۱۱۸
۲۳	۹	۱۶۰۰	۲۰۰	۰/۳۶۳	۰/۱۱۵
۲۴	۹	۱۶۰۰	۴۰۰	۰/۳۷۶	۰/۱۳۸
۲۵	۹	۲۵۰۰	۵۰	۰/۳۷۸	۰/۱۱۶
۲۶	۹	۲۵۰۰	۲۰۰	۰/۴۲۴	۰/۱۲۴
۲۷	۹	۲۵۰۰	۴۰۰	۰/۴۴۷	۰/۱۲۷



(الف)

افزایش آسیب وارده می‌شود که با نتایج مربوط به لمینیت‌ها مطابقت دارد اما با افزایش سرعت برشی در سوراخ‌کاری پنل‌های ساندویچی، تغییرات تورق و میزان الیاف برش نخورده به‌صورت سهمی بوده روندی خطی نداشته، که با نتایج مربوط به لمینیت‌ها مغایرت داشته و در واقع شرایط بهینه برای سوراخ‌کاری ساندویچ پنل‌ها و لمینیت‌ها متفاوت می‌باشد که باید در انتخاب پارامترهای ماشین‌کاری (سرعت برشی) دقت شود. از نتایج تجربی می‌توان دریافت که میزان آسیب وارده به نمونه‌های کامپوزیتی به‌گونه‌ای است که تورق بخش بیشتری از آسیب را در مقایسه با میزان الیاف برش نخورده در بر می‌گیرد و روند تغییرات سهم هر عیب با تغییر سرعت برشی متفاوت بوده و روندی عکس هم دارند.

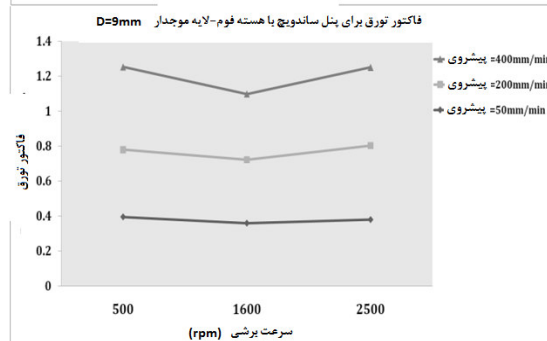
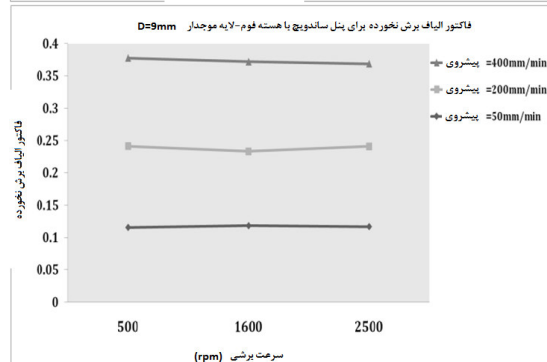
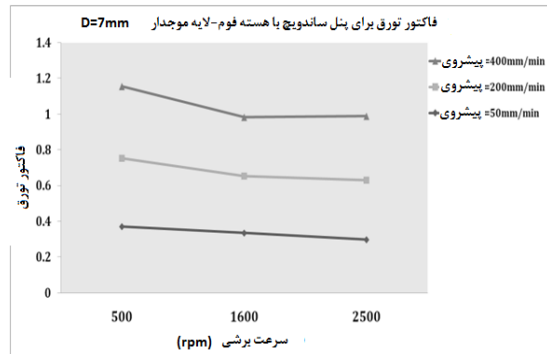
با توجه به داده‌های تجربی، به‌طور خلاصه می‌توان گفت: براساس نتایج تجربی، میزان تغذیه (پیشروی) عاملی است که بیشترین اثر را بر DF داشته و بعد از آن سرعت برشی و قطر ابزار برش به‌ترتیب بیشترین اثر را دارند. براساس نتایج تجربی، قطر ابزار برش عاملی است که بیشترین اثر را بر UCFF داشته و سپس بترتیب میزان تغذیه (پیشروی) و سرعت برشی بیشترین اثر را دارند. نتایج نشان می‌دهند که DF و UCFF با افزایش نرخ تغذیه افزایش می‌یابند. نتایج تجربی نشان داد که یک نقطه بهینه برای قطر مته و سرعت برشی برای DF وجود دارد (سطح ۲).

UCFF با افزایش قطر مته کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که برای حداکثر UCFF یک مقدار مشخص سرعت برشی وجود دارد (سطح ۲). با افزایش تعداد سطوح می‌توان برای مقادیر بهینه به نتایج قابل اعتمادتری دست یافت.

بهترین کیفیت سوراخ بر اساس عامل تورق با شرایط نرخ تغذیه برابر ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه (سطح ۱)، سرعت برشی برابر ۱۶۰۰ دور بر دقیقه (سطح ۲) و قطر مته، ۷ میلی‌متر (سطح ۲) حاصل می‌شود. بهترین کیفیت سوراخ براساس عامل الیاف برش نخورده با شرایط نرخ تغذیه ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه (سطح ۱)، سرعت برشی برابر ۲۵۰۰ دور بر دقیقه (سطح ۳) و قطر مته ۹ میلی‌متر (سطح ۳) حاصل می‌شود. بدترین کیفیت سوراخ براساس عامل تورق با شرایط نرخ تغذیه ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه (سطح ۳)، سرعت برشی ۵۰۰ دور بر دقیقه (سطح ۱) و قطر مته ۹ میلی‌متر (سطح ۳) حاصل می‌شود. بدترین کیفیت سوراخ براساس عامل الیاف برش نخورده با شرایط نرخ تغذیه ۴۰۰ میلی‌متر بر دقیقه (سطح ۳)، سرعت برشی ۱۶۰۰ دور در دقیقه (سطح ۳) و قطر مته ۴ میلی‌متر (سطح ۱) حاصل می‌شود. به طور کلی، مقادیر عامل تورق برای سازه‌های ساندویچی کامپوزیتی، بیشتر از مقادیر عامل الیاف برش نخورده می‌باشد.

۸- مراجع

- [1] Mohan N.S, Kulkarni S.M, Ramachandra A., Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials, *Journal of Materials Processing Technology* 186 265-271, (2007).
- [2] Hocheng H., Tsao C.C., Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 140, pp 335-339, 2003.
- [3] Bosco M.A.J., Palanikumar K., Durga Prasad B., Velayudham A., Influence of Machining Parameters on Delamination in Drilling of GFRP-armour Steel Sandwich Composites, *Procedia Engineering Volume* 51, Pages 758-763, 2013.



شکل ۷ بررسی اثر سرعت برش و میزان تغذیه در DF

این شکل نشان می‌دهد که نرخ تغذیه ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه بهترین گزینه برای به‌دست آوردن یک سوراخ با بهترین کیفیت می‌باشد. نرخ تغذیه تاثیر قابل توجهی بر UCFF دارد و باعث کاهش تورق می‌شود.

۷- نتایج و جمع‌بندی

آزمایش‌های تجربی برای بررسی دو شاخص تورق و الیاف جدا نشده در سوراخ‌کاری پنل ساندویچ با هسته موجدار و فوم PVC انجام گرفته است. اثر سرعت برشی، پیشروی و قطر ابزار برش بر کیفیت سوراخ مورد بررسی قرار گرفته است. مقادیر متوسط دو فاکتور تورق و الیاف جدا نشده را برحسب پارامترهای مورد بررسی نشان می‌دهد. با توجه به کارهای پژوهشی صورت گرفته توسط دیگر محققان بر روی لمینیت‌های کامپوزیتی، بطورکلی نیروی برشی و گشتاور با افزایش پیشروی بیشتر می‌شوند. از طرف دیگر افزایش سرعت برشی، نیرو و گشتاور را کاهش می‌دهد. پس تورق با افزایش پیشروی بیشتر می‌شود. هر گونه افزایش در سرعت‌های برشی و سرعت پیشروی باعث افزایش گشتاور شده و تورق را افزایش می‌دهد [۱۲، ۱۱].

اما با توجه به نتایج به‌دست آمده در این پژوهش افزایش پیشروی باعث

- [9] Kilickap E, Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method during drilling of GFRP composite, *Expert Systems with Applications*, Volume 37, Issue 8, August, pp 6116-6122, 2010.
- [10] Carroll, J.W, Todd, J.A, Ellingson, W.A, Polzin, B.J, Laser machining of ceramic matrix composites, *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, Vol 21 (3), pp 323-330, 2000.
- [11] Davim, J.P. and Reis, P., Study of Delamination in Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRPs) Using Design of Experiments, *Compos. Struct*, Vol 59, pp 481-487, 2003.
- [12] Hachesu, V., investigation of damage during drilling of composite materials, *proceeding of national conference of manufacturing and production*, Islamic azad university of najafabad, 1386.
- [13] Capello. E., Workpiece damping and delamination damage in drillin thin composite laminates. *Journal of material Processing Technology*, Vol 148, 186-195, 2004.
- [14] Khashaba. UA, Seif. MA, Elhamid. MA, Drilling analysis of chopped composites. *Part A: applied science and manufacturing*, Vol 38, pp 61-70, 2007.
- [4] Sardiñas R. Q., Reis P., Davim J. P., Multi-objective optimization of cutting parameters for drilling laminate composite materials by using genetic algorithms, *Composites Science and Technology*, Volume 66, Issue 15, 1 December 2006, Pages 3083-3088.
- [5] Tsao C.C, Hocheng H, Chen Y.C, Delamination reduction in drilling composite materials by active backup force, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 61, Issue 1, , Pages 91-94, 2012.
- [6] Zitoun R, Krishnaraj V. Collombet F, Study of drilling of composite material and aluminium stack, *Composite Structures*, Volume 92, Issue 5, April 2010, Pages 1246-1255.
- [7] Palanikumar K., Experimental investigation and optimisation in drilling of GFRP composites, *Measurement*, Volume 44, Issue 10, December 2011, pp 2138-2148.
- [8] Singh A. P, Sharma M., Modelling of Thrust Force during Drilling of Fibre Reinforced Plastic Composites, *Procedia Engineering*, Volume 51, pp 630-636, 2013.