



## بهینه‌سازی فرآیند سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های ساندویچی با هسته موج‌دار

پویان قابضی<sup>۱</sup>، محمد رضا فراهانی<sup>۲\*</sup>، محمد کاظم بشارتی گیوی<sup>۳</sup>

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

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

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

\* mrfarahani@ut.ac.ir، ۵۱۵-۴۳۹۵

### چکیده

هدف از این پژوهش بررسی اثر سرعت دورانی، پیشروی و قطر ابزار بر روی میزان آسیب وارد شده به قطعه در حین عملیات سوراخ‌کاری پل‌های ساندویچی می‌باشد. پل‌های ساندویچی مورد بررسی در این پژوهش، دارای هسته‌ای مرکب از جنس فوم پی وی سی و ورق‌های موج‌دار با هندسه دوزنقه‌ای می‌باشد و لمینیت‌ها از جنس شیشه/ پلی‌استر ساخته شده‌اند. برای ساخت تمام نمونه‌ها از فرآیند VARTM استفاده شده است. برای ارزیابی اهمیت پارامترهای سوراخ‌کاری از روش طراحی آزمایش فول-فاکتوریل استفاده شده و جهت سنجش میزان آسیب وارد شده به نمونه‌ها، 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 می‌کند. همچنین، نتایج نشان داد که هر دو فاکتور با افزایش نرخ تغذیه افزایش می‌یابند درحالی‌که 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، سوراخ‌کاری، 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 پایینی، چهار منطقه آسیب دیده (پوسته‌ای شدن و هل دادن الیاف در هر دو قسمت بالا و پایینی وجود دارد) مشاهده می‌شود درحالی‌که در سوراخ‌کاری یک لمینیت دو منطقه وجود دارد. شکل ۱ مکانیزم‌های مختلف تورق در یک ورق کامپوزیتی (لمینیت) را نشان می‌دهد.



شکل ۱ مکانیزم‌های مختلف تورق در یک ورق کامپوزیتی [۱]

### ۱- مقدمه

مکانیزم سوراخ‌کاری در قطعات کامپوزیتی تقویت شده در مقایسه با مواد همسان‌گرد و همگن مانند فلز، متفاوت است. در حین سوراخ‌کاری مواد مرکب عیوب مختلفی ایجاد می‌شود که در میان آن‌ها، خروج الیاف، ترک خوردگی ماتریس و تورق<sup>۱</sup> مرسوم‌ترین عیوب هستند. پدیده تورق در هنگام ورود و خروج مته به داخل قطعه و بویژه در لایه‌های بالایی و پایینی، رخ می‌دهد. تورق در طول سوراخ‌کاری لمینیت توسط دو مکانیزم مختلف صورت می‌گیرد: پوسته‌ای شدن در لایه‌ی بالایی (کشیدن لایه به سمت بالا) و فشار (هل) دادن لایه‌ی پایینی<sup>۲</sup> [۱]. با این‌حال، 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)

روش تاگوچی پیشنهاد داده است [۷]. سیگ و شارما [۸]، یک مدل ریاضی برای دستیابی به دینامیک فرآیند سوراخ‌کاری ارائه کرده‌اند. کلیکاپ، تأثیر پارامترهای برش (سرعت، میزان تغذیه و زاویه نوک ابزار) بر تورق را بر سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های GFRP مورد بررسی قرار داده است [۹]. کارول و همکارانش ماشین‌کاری 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 داده‌اند اما چندان در زمینه پل‌های ساندویچی گزارشی ارائه نداده‌اند [۱۱]. هاجه سو [۱۲]، به بررسی پارامترهای سوراخ‌کاری از جمله سرعت برشی، پیشروی و هندسه ابزار بر میزان آسیب وارده بر نمونه نهایی پرداخته‌اند، اما کار ایشان محدود به لمینیت‌های کامپوزیتی بوده و وارد حوزه ساندویچ پل‌ها نشده‌اند. 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 می‌باشد. کاشابا و همکارانش [۱۴] به بررسی استفاده از دمپر در هنگام سوراخ‌کاری نمونه‌های کامپوزیتی و تأثیر آن بر آسیب وارده به نمونه پرداخته‌اند.

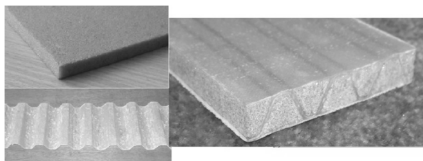
## ۲- آزمایش‌های تجربی

### ۳-۱- مواد

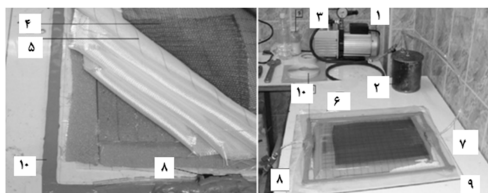
در این مطالعه از یک رزین پلی‌استر غیراشباع مناسب برای فرآیند VARTM با ویسکوزیته ۹۰-۱۲۰ (MP) ۰/۰۱٪ نفتانات کبالت به عنوان شتاب دهنده و ۱/۲۵٪ پراکسید متیل‌اتیل‌کتون به عنوان آغازگر استفاده شده است. همچنین در این مقاله در ساخت هسته از دو ماده شامل ۱- فوم پلی‌وینیل کلراید (پی‌وی‌سی)، C70.75 AIREX، با ضخامت ۱۰ mm و چگالی اسمی (kg/m<sup>3</sup>) ۸۰ و ۲- ورق موج‌دار از جنس شیشه/پلی‌استر (بخش دوزنقه‌ای شکل) با ارتفاع ۱۰ میلی‌متر، 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 شده‌اند.

### ۳-۲- ساخت نمونه‌ها

تمام نمونه‌ها با استفاده از فرآیند VARTM ساخته شده‌اند. جزئیات این فرآیند در شکل ۳ نشان داده شده است. برای تولید هسته پل ساندویچ، ابتدا فوم



شکل ۲ هسته ساخته شده از ورق موج‌دار 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- لوله‌های انتقال رزین ۸- شیرها و اتصالات ۹- لایه جداکننده ۱۰- چسب آب‌بندی

در ناحیه نزدیک به خروج مته از سوراخ، تورق، ناشی از جدا شدن لایه نازک آخر از باقی‌مانده لمینیت می‌باشد. این آسیب منجر به تضعیف سازه می‌شود، بنابراین بررسی پدیده تورق در ساندویچ پل‌های کامپوزیتی یک مسئله حیاتی است. در این مقاله، یک پل ساندویچی با هسته مرکب (از جنس ورق موج‌دار و فوم) تحت شرایط مختلف ماشین‌کاری (سرعت دورانی، پیشروی و قطر ابزار برش) مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از انجام این تحقیق یافتن بهترین شرایط ماشین‌کاری و ایجاد سوراخ در پل‌های ساندویچی با استفاده از تعریف فاکتور تورق ۱ (DF)، و فاکتور الیاف برش نخورده ۲ (UCFF)، می‌باشد.

با توجه به مطالب گفته شده در بالا و نتایج مربوط به سایر پژوهش‌ها در زمینه بررسی تورق، می‌توان گفت که بیشترین آسیب وارده در حین سوراخ‌کاری در لایه آخر ایجاد می‌شود که دلیل آن ضعیف بودن لایه‌های آخر می‌باشد و مکانیزم آن در بالا شرح داده شد بنابراین استفاده از تکنیک عکس-برداری دیجیتال می‌تواند راه‌کاری قابل اعتماد جهت اندازه‌گیری و تعیین سطوح آسیب دیده باشد که با توجه به این‌که الیاف مورد استفاده شیشه هستند این امکان وجود دارد در صورتی که استفاده از الیاف کربن به دلیل رنگ سیاه آن‌ها به کارگیری این تکنیک را با مشکل مواجه خواهد کرد.

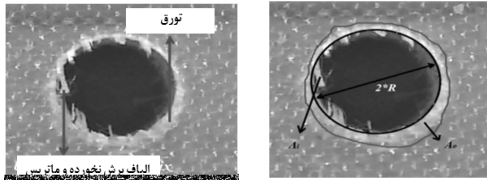
نوآوری‌های پژوهش پیش رو را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

در کارهای پیشین بیشترین تمرکز بر بررسی آسیب تورق در لمینیت‌های کامپوزیتی بوده و چندان به بررسی این عیب در پل‌های ساندویچی پرداخته نشده است و جای خالی انجام تحقیق در این زمینه به چشم می‌خورد. از طرفی پدیده ریش ریش شدن الیاف (برش نخوردن الیاف) در نمونه‌های کامپوزیتی بررسی نشده است. همچنین در زمینه بررسی قابلیت ماشین‌کاری و یا بینه‌سازی شرایط برش در پل‌های ساندویچی با هسته موج‌دار (و حتی لمینیت‌های موج‌دار کامپوزیتی) پژوهشی صورت نپذیرفته است. روش ساخت نمونه‌های کامپوزیتی نیز از روش‌های مدرن ساخت قطعات کامپوزیتی می‌باشد. بنابراین می‌توان 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 مته‌های مختلف را به صورت تحلیلی بررسی کرده‌اند. آن‌ها 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 سوراخ‌کاری یک ساندویچ پل با هسته فولادی و صفحات تقویت شده با الیاف شیشه را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. ساردیتاس و همکارانش [۴]، یک روش بینه‌سازی چند منظوره (فاکتور تورق و نرخ باربرداری) را برای سوراخ‌کاری ورق‌های کامپوزیتی لمینیت پیشنهاد دادند. تسائو و همکارانش [۵]، روش نوینی را برای کاهش تورق حین سوراخ‌کاری مواد کامپوزیتی توسط نیروی پشتیبان ارائه کردند، روش پیشنهادی نشان می‌دهد که با نرخ تغذیه بالا می‌توان 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 داده‌اند، نتایج تجربی نشان می‌دهد که با انتخاب مناسب پارامترهای برش، می‌توان کیفیت سوراخ‌ها را بهبود بخشید. پلاتنی کومار یک روش موثر برای بینه‌سازی پارامترهای سوراخ‌کاری براساس

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 ساندویچ‌های 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 به ترتیب 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 افزایش می‌یابد. 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 می‌یابد.

پی‌وی‌سی با استفاده از ااره نواری U- شکل، مدل RT-SB 305 با الگوی موج‌دار (ذوزنقه‌ای) 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 به ترتیب 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.

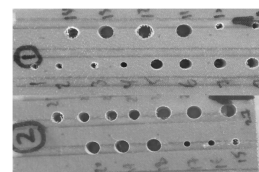
#### ۴- فاکتور تورق و الیاف برش نخورده

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 به دلیل داشتن ورق در بالا و پایین قطعه دارای ۴ ناحیه اصلی متأثر 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:

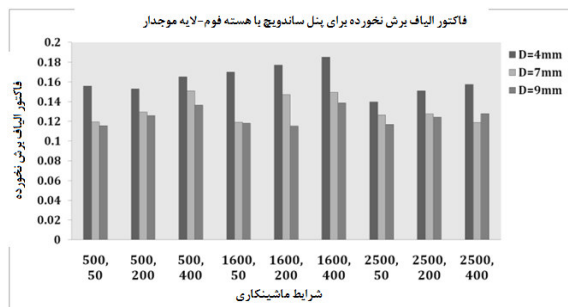
$$UCFF = \frac{A_i}{A_{Hole}} \quad (1)$$

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

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 به ترتیب 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



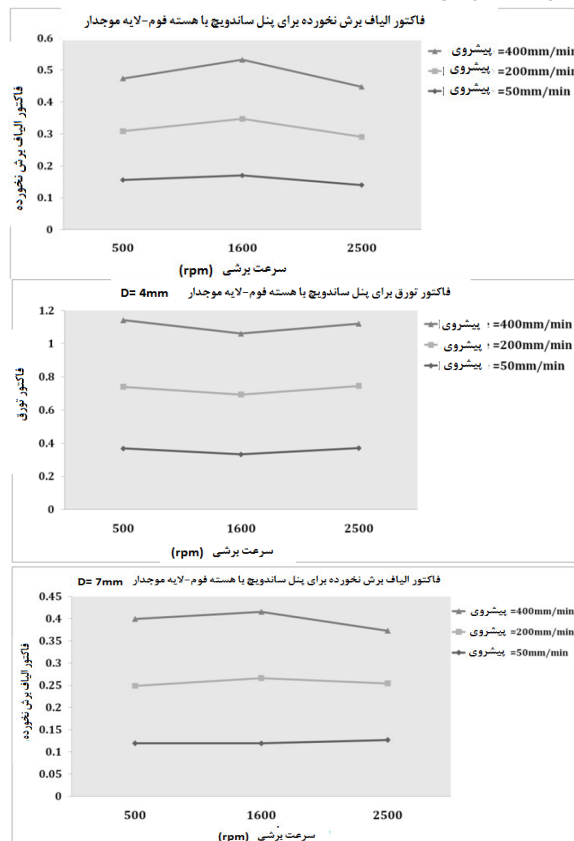
شکل ۴ ایجاد سوراخ در نمونه‌های ساندویچی



(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 میلی‌متر/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].



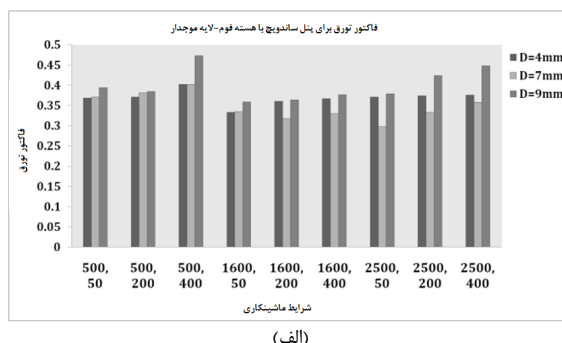
جدول ۱ طراحی آزمایش

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 (دورانی) (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 به صورت 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.

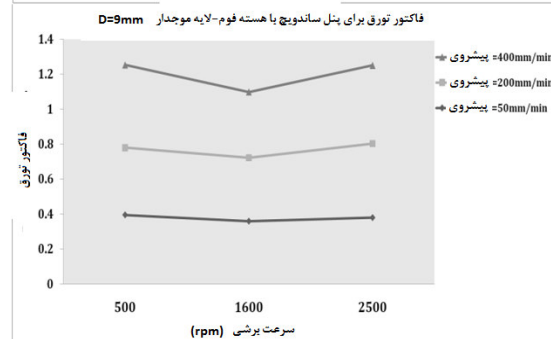
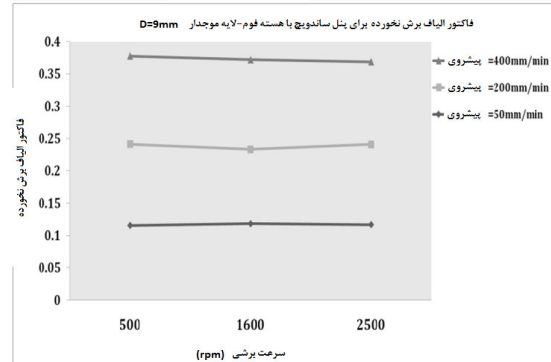
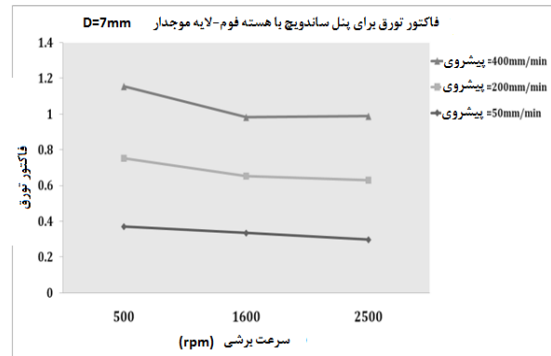
با توجه به داده‌های تجربی، به‌طور خلاصه می‌توان گفت: براساس نتایج تجربی، میزان تغذیه (پیشروی) عاملی است که بیشترین اثر را بر DF داشته و بعد از آن سرعت برشی و قطر ابزار برش به‌ترتیب بیشترین اثر را دارند. براساس نتایج تجربی، قطر ابزار برش عاملی است که بیشترین اثر را بر UCFF داشته و سپس بترتیب میزان تغذیه (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 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] Zitoune 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.