



بررسی پارامترهای مؤثر بر آسیب وارده به ساندویچ پنل کامپوزیتی در حین عملیات سوراخ کاری

هادی اسکندری^{1*}، ایمان دانایی²، سعید نوری³

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعت نفت، آبادان

2- دانشیار، مهندسی بازرسی فنی، دانشگاه صنعت نفت، آبادان

3- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول

* آبادان، صندوق پستی 619، eskandari@put.ac.ir

چکیده

کلیدواژگان

هدف از انجام این تحقیق یافتن بهترین شرایط ماشین کاری و ایجاد سوراخ در پنل‌های ساندویچی کامپوزیتی با استفاده از تعریف فاکتورهای تورق و الیاف برش نخورده می‌باشد. برای این کار دو قطعه ساندویچ پانل از جنس اپوکسی کولار با هسته‌های چوب بالسا و فوم پی وی سی با مته‌هایی با قطرهای مختلف و سرعت‌های چرخشی و نرخ تغذیه متفاوت در سه سطح سوراخ کاری شدند. با استفاده از روش عکس‌برداری دیجیتال که راهکاری قابل اعتماد برای اندازه‌گیری و تعیین سطوح آسیب دیده به شمار می‌رود، تصاویر به محیط نرم‌افزار ترسیمات مهندسی منتقل گردیده و با محاسبه دقیق مساحت‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که به ترتیب نرخ تغذیه، سرعت چرخشی و قطر مته بیشترین تأثیر را بر میزان عیوب ذکر شده دارد. نتایج نشان می‌دهند که کیفیت سوراخ کاری در هسته چوب بالسا به مراتب بهتر از فوم پی وی سی می‌باشد. نتایج این تحقیق می‌تواند برای بسیاری از صنایع، بخصوص در حوزه هوا فضا و نظامی کاربردی باشد.

پنل ساندویچی کامپوزیتی
پارامترهای سوراخ کاری
فاکتور تورق
فاکتور الیاف برش نخورده

Investigation the effective parameters on damages induced in composite sandwich structures through drilling

Hadi Eskandari^{1*}, Iman Danaee¹, Saeed Noori²

1- Department of Technical Inspection Engineering, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Dezfool, Iran

* P.O.B. 619 Abadan, Iran, eskandari@put.ac.ir

Keywords

Composite sandwich panel
Drilling parameters
Delamination factor
Uncut fiber factor

Abstract

There are many common defects produced during the drilling of composite sandwich panels such as delamination, uncut fiber and matrix cracking factors. In this work, we employed the Epoxy / Kevlar with Balsa wood and Polyvinyl Chloride (PVC) foam core in sandwich panel under different drilling factors i.e., cutting speed, feed rate and tool diameter and examined in three levels. The major aim of this study is to find the best conditions for producing the machining holes in sandwich panels with considering the delamination and uncut fiber factor. For better analysis, we used the digital imaging techniques as a reliable way to measure and determine the level of damages. The results showed that the machine spindle speed, feed rate and tool diameters have so effects on delamination and uncut fiber factors. The obtained results are given to assess the applicability of the mentioned sandwich panels in industrial specialty in aerospace and military purposes.

1- مقدمه

در سال‌های اخیر ساخت و استفاده از ساندویچ پنل‌های کامپوزیتی به دلیل قابلیت‌های فراگیر این مواد همچون وزن کم، مقاومت بالای خمشی، مقاومت در برابر کماتش، استحکام خستگی بالا و نیز مقاومت زیاد در برابر مواد شیمیایی و خوردنده روند رو به رشدی داشته است. غالب اتصالات مکانیکی در ساندویچ پانل‌ها نیازمند فرایند سوراخ کاری است. به دلیل ساختار خاص لایه کامپوزیتی، مکانیزم سوراخ کاری در این قطعات در مقایسه با مواد

امروزه با پیشرفت تکنولوژی، فرایند تولید و استفاده از کامپوزیت‌ها با تحولی بزرگ همراه بوده است. انواع رزین‌ها و الیاف‌های مختلف مانند شیشه، کربن، گرافیت و آرامیدها زمینه‌ساز یک انقلاب صنعتی جدید در دنیای رو به رشد امروز از جمله در صنایع دریایی و هوا و فضا بوده اند. این کامپوزیت‌ها به شکل‌های مختلف چند لایه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند.

Please cite this article using:

H. Eskandari, I. Danaee, S. Noori, Investigation the effective parameters on damages induced in composite sandwich structures through drilling, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 51-60, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

نیل به این مقاصد به نظر می‌رسد. دستیابی به این مهم تنها از طریق انجام تحقیقات پژوهش محور و مطالعات آزمایشگاهی امکان‌پذیر است. توجه به پارامترهای مختلف ماشین کاری در کامپوزیت‌ها و انجام آزمایش‌های مختلف بر روی نمونه‌های متنوع در جهت دستیابی به بهترین انتخاب و نتیجتاً افزایش بهره‌وری در تولید ضروری به نظر می‌رسد.

این تحقیق می‌کوشد تأثیر پارامترهای مختلف ماشینکاری بر آسیب‌های وارده به ساندویچ پنل کامپوزیتی در حین عملیات سوراخکاری را مورد بررسی قرار داده و شرایط مطلوب برای انجام این فرایند را تعقیب نماید.

2- مکانیزم تورق در ساندویچ پانل‌ها

از مهمترین عیوبی که ممکن است در حین فرایند سوراخ کاری پانل‌های ساندویچی اتفاق بیافتد و توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است، پدیده تورق یا جدا شدن لایه‌ها از هم می‌باشد که دارای دو نوع کلی (در فرایند سوراخ کاری) می‌باشد [3]:

- الف- بیرون زدن الیاف حین ورود مته به درون قطعه؛
- ب- خارج شدن الیاف در هنگام خروج مته از سمت دیگر قطعه.

نکته جالب توجه در مورد تورق در پنل‌های ساندویچی این است که بدلیل داشتن دو ورق در بالا و پایین قطعه، چهار ناحیه را همانند شکل 1 تحت تأثیر قرار می‌دهد [1].

تأثیر پارامترهای سوراخ کاری بر کیفیت برشی کامپوزیت‌های پلاستیکی تقویت شده با الیاف توسط تعدادی از محققان مورد بررسی قرار گرفته است [3-5]. تأثیر این پارامترها بر فاکتور تورق با اندازه‌های مختلف مته توسط هوچنگ و تسائو [6] مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

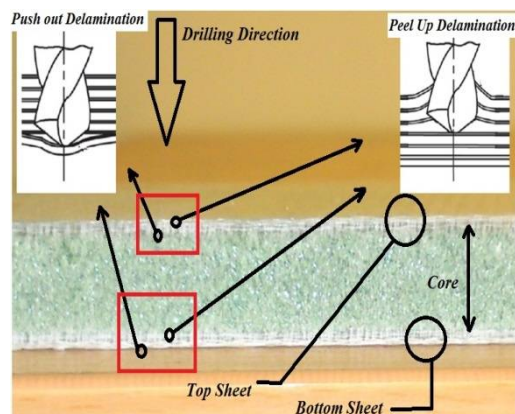


Fig. 1 The mechanisms and different delamination zones in sandwich composite panel [1]

شکل 1 مکانیزم‌ها و نواحی مختلف تورق در کامپوزیت ساندویچی [1]

همسانگرد و همگن با پیچیدگی‌های خاصی همراه است. در حین سوراخ کاری این مواد، عمدتاً عیوب مختلفی همچون بیرون زدگی الیاف، ترک خوردگی ماتریس، شکستگی و ایجاد تورق در الیاف اتفاق می‌افتد. پدیده تورق در هنگام ورود و خروج مته به داخل قطعه و به‌ویژه در لایه‌های بالایی و پایینی، رخ می‌دهد [1]. این پدیده در زمان سوراخ کاری چند لایه‌ای‌ها به دو صورت متفاوت قابل اتفاق است؛ در حالت اول به شکل پوسته‌ای شدن در لایه‌ی بالایی و کشیدن لایه به سمت بالا و در وضعیت دیگر همین فرایند برای لایه پایینی با فشار دادن لایه به سمت پایین صورت می‌پذیرد. ظهور این عیب (تورق) در یک ورق کامپوزیتی و یک پنل ساندویچی می‌تواند متفاوت باشد. در یک پنل ساندویچی، به دلیل وجود دو لایه یکی در سطح بالایی و دیگری در سطح پایینی، چهار منطقه آسیب‌دیده قابل مشاهده است. این درحالی است که در سوراخ کاری یک لایه ساده به دلیل عدم وجود هسته تنها دو منطقه تحت آسیب می‌توان تشخیص داد. در ناحیه نزدیک به خروج مته از سوراخ، عیب تورق به دلیل جدایش لایه نازک سطحی صورت می‌پذیرد. این آسیب می‌تواند منجر به تضعیف سازه گردد.

از طرفی مونتاژ سریع و راحت که اغلب به وسیله اتصالات مکانیکی انجام می‌شود، تمرکز تحقیقاتی صنایع بزرگ را بر روی کاربردها و بهینگی استفاده از کامپوزیت‌ها متمرکز نموده است. ساندویچ پانل‌های کامپوزیتی با وزن ناچیز و مقاومت بالا را می‌توان به عنوان یکی از محصولات پر کاربرد در صنایع نظامی و هوا و فضا نام برد؛ چرا که دغدغه اصلی خطوط هوایی و عامل اصلی رقابت آنها، تلاش در جهت کاهش وزن تجهیزات هوایی است. در شرایط خاص اگر هزینه طراحی و ساخت یک ماده کامپوزیتی در مقایسه با سایر مواد بیشتر شود، اما به دلیل کاستن از تعداد قطعات مورد استفاده در مونتاژ و نیز سبکتر شدن سازه که منجر به کم کردن هزینه سوخت و انرژی مصرفی می‌گردد، استفاده از آنها را سودآور می‌سازد.

کاهش یک پوند از وزن هواپیمای تجاری می‌تواند تا 360 گالن (1360 لیتر) در سوخت مصرفی سالیانه آن ذخیره نماید. این در حالیست که هزینه سوخت یک هواپیمای تجاری تا 25 درصد کل هزینه‌های عملکردی آن را شامل می‌شود [2]. بر این اساس حرکت در مسیر حفظ کیفیت و ارتقای سطح ایمنی قطعات، خط مشی اولیه کلیه صنایع بشمار می‌آید. تولید قطعات با کمترین میزان عیوب مهمترین گام در

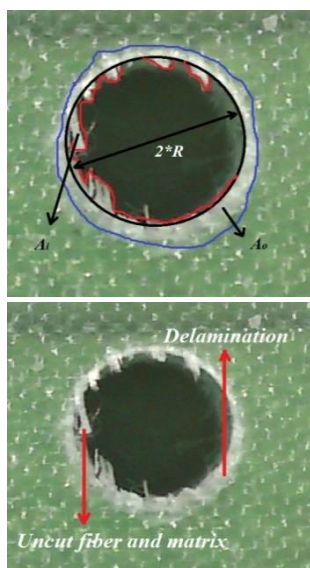


Fig. 2 The different zones used in calculation of delamination and uncut fiber factors [1]

شکل 2 نواحی مختلف جهت محاسبه فاکتور تورق و الیاف برش نخورده [1]

به همین ترتیب چگالی وزنی، مدول کششی و مدول برشی فوم PVC نیز به ترتیب 100kg/m^3 ، $2/20\text{ GPa}$ و 106 MPa می باشد. رزین استفاده شده در این تحقیق دارای علامت تجاری AXSON با مشخصه 2025LR می باشد. نسبت اختلاط رزین با هاردنر نیز به توصیه شرکت سازنده 90 به 10 در نظر گرفته شده است.

معمولاً در تولید قطعات بزرگ به شکل انبوه از روش قالب گیری انتقالی رزین (RTM^4) و یا قالب بندی انتقال رزین به کمک خلا (VARTM^5) استفاده می شود. در این روش ها رزین مورد استفاده با دست و یا پوست تماس مستقیم نخواهد داشت. در این پژوهش به دلیل کوچک بودن اندازه قطعات و کم بودن تعداد آنها، برای ساخت نمونه ها با رعایت نکات ایمنی از روش لایه گذاری دستی استفاده گردیده است. ابتدا هسته هایی با ضخامت 10 میلی متر با استفاده از اهر نواری U شکل مدل 305 RT-SB در ابعاد 200 در 100 میلی متری برش داده شده و سپس تمام سطح های آنها از هر گونه آلایند تمیز گردیده است. پس از آن دو نوار کولار به اندازه 1100 در 200 میلی متر مربع برای 5 لایه با ضخامت 0/3 میلی متر برش داده شد تا بعد از آغشته کردن سطوح با رزین آماده گردند. رزین اپوکسی آماده شده با فرچه ای بر روی تمام سطوح به طور یکنواخت پخش گردیده و پس از آن اولین لایه الیاف به دور هسته پوشانده شده و تمام حباب های موجود در

خوران و همکاران [1] با اعمال فرایند سوراخ کاری بر روی تعدادی از سازه های ساندویچی کامپوزیتی، تأثیر برخی از پارامترهای فرزکاری را در ایجاد پدیده های تورق و جدایش لایه ها بررسی نمودند. آنها دریافتند نرخ تغذیه مهمترین پارامتر مؤثر بر جدایش لایه ها می باشد. اثر پذیری تورق ناشی از سوراخ کاری یک پنل ساندویچی با هسته فولادی تقویت شده با الیاف های شیشه نیز توسط بوسکاو و همکاران [7] بررسی شده است. لئو و همکارانش [8] پیشرفت ها و تکنولوژی های روز مورد استفاده جهت سوراخ کاری سازه های کامپوزیتی را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق به انواع فرایندهای روز سوراخ کاری، جنس و هندسه مته ها، ابزار سایشی و ابزار نیروهای پیشران اشاره گردیده است. مطالعه بر روی روش های کاهش فاکتور تورق بوسیله کنترل پارامترهای سوراخ کاری نیز توسط تعداد زیادی از محققان [3-19] مورد بررسی قرار گرفته است.

در این طرح پژوهشی به ارزیابی عیوب در سوراخ کاری ساندویچ پنل با استفاده از معرفی دو فاکتور پرداخته شده است.

الف- فاکتور تورق (DF^1)؛

ب- فاکتور الیاف برش نخورده ($UCFF^2$).

این فاکتورها بصورت روابط (1) و (2) تعریف شده اند [1]:

$$DF = A_o / A_{\text{Hole}} = A_o / (\pi R^2) \quad (1)$$

$$UCFF = A_i / A_{\text{Hole}} = A_i / (\pi R^2) \quad (2)$$

که در آن، A_{Hole} مساحت دایره بر حسب mm^2 مربوط به قطر مته می باشد. A_o و A_i همان گونه که در شکل 2 نشان داده شده است به ترتیب ناحیه بین دایره مرجع (مته) و نواحی آسیب داخلی و آسیب خارجی می باشند.

3- فرایند ساخت و سوراخ کاری قطعات کولار اپوکسی

در این تحقیق از دو نوع ساندویچ پانل کامپوزیتی یکی با هسته از جنس بالسا و دیگری هسته از جنس فوم الیاف کولار-رزین اپوکسی استفاده شده است. کولار مورد استفاده با مشخصات وزنی 175 گرم در هر متر مربع و الیاف از جنس پارا آرامید با مدول ارتجاعی استاندارد و ضخامت 0/3 میلی متر از شرکت کولان استرالیا³ تهیه گردیده است. چگالی وزنی، مدول کششی و مدول برشی چوب بالسای مورد استفاده به ترتیب 100kg/m^3 ، 84 MPa و 38 MPa می باشد.

⁴ Resin transfer molding

⁵ Vacuum assisted resin transfer molding

¹ Delamination factor

² Uncut fiber factor

³ Colan Australia

جدول 1 مشخصات سوراخ‌های روی هر قطعه

شماره سوراخ	سرعت پیشروی (mm/min)	سرعت گردش اسپیندل (mm/min)	قطر مته (mm)	سطح
1	50			
2	200	500		
3	400			
4	50			
5	200	1600	4	1
6	400			
7	50			
8	200	2500		
9	400			
10	50			
11	200	500		
12	400			
13	50			
14	200	1600	6/8	2
15	400			
16	50			
17	200	2500		
18	400			
19	50			
20	200	500		
21	400			
22	50			
23	200	1600	9/2	3
24	400			
25	50			
26	200	2500		
27	400			

بین هسته و روکش به سمت طرفین تخلیه گردیده‌اند. این کار توسط یک غلطک دستی کوچک صورت پذیرفته تا بدین‌وسیله سطح قطعه کار به طور کاملاً یکنواخت و صاف و خالی از هر گونه فرورفتگی یا برآمدگی گردد. مجدداً سطح جدید با رزین آغشته به گونه‌ای آغشته شده تا کل الیاف به صورت کامل خیس درآید. سپس لایه دوم به روی لایه اول پوشانده شده و حباب‌های زیر آن مثل لایه اول تخلیه گردیده و این عمل تا ساخت لایه پنجم ادامه یافته است. این کار هم برای هسته بالسا و هم برای فوم پی وی سی بصورت یکسان انجام گردیده است. تنها به دلیل جذب رزین توسط منافذهای ریز روی چوب بالسا از رزین بیشتری استفاده شده است. بعد از آن قطعات به مدت 72 ساعت در دمای اتاق در یک جای ثابت نگهداری شده تا به صورت کاملاً پخته شده (Cure) درآمده و آماده استفاده گردد. تصویر نهایی قطعه کار در شکل 3 دیده می‌شود.

برنامه سوراخ کاری به شرح جدول 1 و در سه سطح به روش فاکتوریل کامل انجام گردیده است. در این فرایند، سوراخ کاری بر روی هر دو قطعه با استفاده از مته‌هایی از جنس فولاد کاربیدی با قطرهای 4، 6/8 و 9/2 میلی‌متر و طولهای 66، 80 و 90 میلی‌متری و با سه سرعت گردشی اسپیندل 500، 1600 و 2500 دور بر دقیقه و با سه نرخ تغذیه 50، 200 و 400 میلی‌متر در دقیقه صورت گرفته است. این عملیات به کمک دستگاه فرز CNC⁶ با مشخصه کارگیری 800×500×500 میلی‌متری و پانل کنترلی زیمنس 850 و به تعداد 27 سوراخ روی هر قطعه انجام شده است (شکل 4- الف).

در این فرایندها، از تکنیک عکس‌برداری دیجیتال توسط دستگاه Cyber-shotTM با دقت 8 مگاپیکسل جهت اندازه‌گیری و تعیین ابعاد سطوح آسیب دیده با مرجع قرار دادن قطر دایره مته (شکل 4- ب)، استفاده شده است. توالی عملیات سوراخ کاری به شرح زیر می‌باشد: ابتدا برنامه نقشه مورد نظر در محیط نرم‌افزار مهندسی طراحی SolidWorks ترسیم گردیده است.

سپس برای انتقال به دستگاه CNC، از رابط واسط نرم‌افزاری ArtCam استفاده شده و طرح مورد نظر اجرا شده است. برای این منظور برنامه هر 27 سوراخ به صورت جداگانه به دستگاه منتقل گردیده است. به منظور اطمینان از اندازه‌های سوراخ کاری توسط مته‌ها، قبل از انجام فرایند بر روی

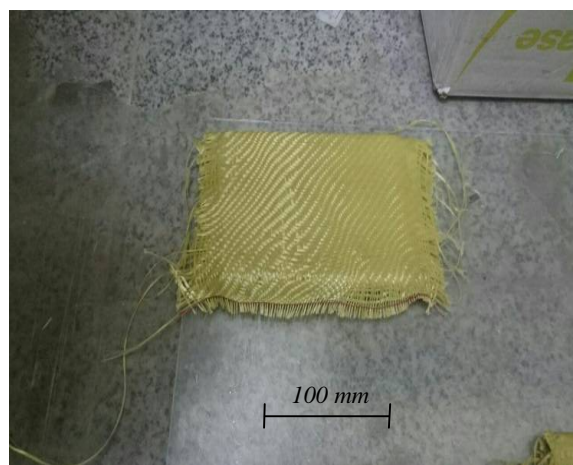


Fig. 3 The view of a composite panel sample

شکل 3 نمایی از نمونه قطعه کامپوزیتی

⁶ Computer Numeric Control

بیان شده سه سوراخ آخر مربوط به مته 4 میلی متری انجام گردیده است. همین عملیات با مته های 6/8 و 9/2 میلی متری نیز تکرار شده است. سوراخ ها از 1 الی 9 مطابق شکل 4 شماره گذاری گردیده اند.

طبق تعاریفی که در بخش 2 ارائه گردید مساحت های A_i و A_0 با استفاده از نرم افزار محاسبه گردیده اند. با توجه به تعاریف، هر چه میزان فاکتور تورق (DF) و فاکتور الیاف برش نخورده (UCCF) به عدد یک نزدیکتر باشند، میزان عیوب تورق و الیاف برش نخورده کمتر بوده و عملیات سوراخ کاری از کیفیت بالایی برخوردار خواهد بود [1]. پس از اندازه گیری مساحت های مذکور، نتایج در جداول 2 و 3 به ترتیب برای هسته چوب بالسا و فوم پی وی سی ارائه شده اند.

نمونه های کولار/اپوکسی سوراخ کاری بر روی قطعات چوبی انجام پذیرفته است. مطابق جدول 1 به کمک مته 4 میلی متری و سرعت چرخشی 500 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 50 میلی متر در دقیقه عملیات اولین سوراخ کاری اجرا گردید. برای سوراخ دوم فقط سرعت پیشروی به 200 میلی متر در دقیقه افزایش داده شده و سوراخ کاری صورت پذیرفت. در مورد سوراخ سوم فقط سرعت پیشروی به 400 میلی متر در دقیقه افزایش یافته و فرایند سوراخ کاری انجام گردیده است.

پس از آن سرعت چرخشی به 1600 دور در دقیقه افزایش یافته و با سرعت های پیشروی عنوان شده، سه فرایند سوراخ کاری بعدی اجرا شده است. مجدداً سرعت گردشی به 2500 دور در دقیقه افزایش یافته و با سرعت های پیشروی

جدول 2 فاکتورهای تورق و الیاف برش نخورده در قطعه کامپوزیتی با هسته چوب بالسا

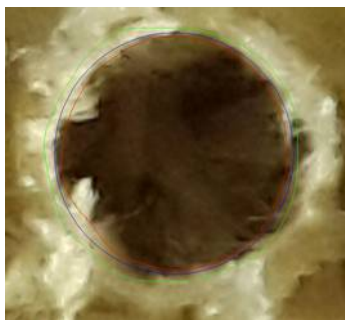
Table 2 The delamination and Uncut fiber factors in composites with Balsa core

ردیف	قطر ابزار mm	سرعت چرخشی rpm	سرعت پیشران mm/min	مساحت دایره مته برحسب mm^2	UCCF مساحت داخلی عیوب برحسب mm^2	DF مساحت بیرونی عیوب برحسب mm^2	DF	UCCF
1	4	500	50	12/56	10/77	13/59	1/1107	0/8575
2	4	500	200	12/56	11/39	13/59	1/0820	0/9068
3	4	500	400	12/56	11/42	13/52	1/0446	0/9092
4	4	1600	50	12/56	11/37	14/75	1/1744	0/9053
5	4	1600	200	12/56	11/46	13/91	1/1075	0/9268
6	4	1600	400	12/56	10/77	13/5	1/0748	0/9514
7	4	2500	50	12/56	10/75	13/61	1/0836	0/8559
8	4	2500	200	12/56	10/95	13/67	1/0406	0/9514
9	4	2500	400	12/56	11/15	13/85	1/0311	0/9713
10	6.8	500	50	36/2984	30/33	39/81	1/0967	0/8356
11	6.8	500	200	36/2984	29/43	38/98	1/0739	0/8659
12	6.8	500	400	36/2984	31/32	40/18	1/0243	0/8959
13	6.8	1600	50	36/2984	32/21	39/18	1/0794	0/8874
14	6.8	1600	200	36/2984	32/35	39/95	1/0731	0/9188
15	6.8	1600	400	36/2984	31/73	39/54	1/0342	0/9568
16	6.8	2500	50	36/2984	32/03	39/86	1/0981	0/8824
17	6.8	2500	200	36/2984	32/6	41/31	1/0554	0/9532
18	6.8	2500	400	36/2984	31/48	40/42	1/0309	0/9967
19	9.2	500	50	66/4424	60/12	73/77	1/1103	0/9048
20	9.2	500	200	66/4424	59/99	74/08	1/0698	0/9330
21	9.2	500	400	66/4424	58/87	75/68	1/0487	0/9688
22	9.2	1600	50	66/4424	57/23	72/8	1/0957	0/9366
23	9.2	1600	200	66/4424	57/69	74/01	1/0537	0/9586
24	9.2	1600	400	66/4424	55/07	75/12	1/0102	0/9748
25	9.2	2500	50	66/4424	57/66	72/81	1/0958	0/9431
26	9.2	2500	200	66/4424	56/32	72/81	1/0657	0/9681
27	9.2	2500	400	66/4424	58/99	74/67	1/0185	0/9932

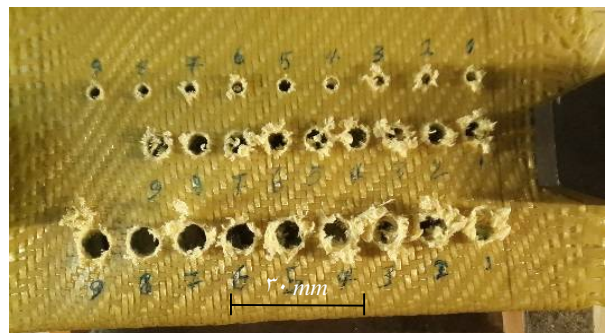
Table 3 The delamination and Uncut fiber factors in composites with PVC foam core

جدول 3 فاکتورهای تورق و الیاف برش نخورده در قطعه کامپوزیتی با هسته فوم PVC

ردیف	قطر ابزار mm	سرعت چرخشی rpm	سرعت پیشران mm/min	مساحت دایره مته mm ²	مساحت داخلی عیوب Ucff mm ²	مساحت بیرونی عیوب DF mm ²	DF	UCFF
1	4	500	50	12/56	9/17	15	1/1943	0/7301
2	4	500	200	12/56	10/42	14/79	1/1775	0/8296
3	4	500	400	12/56	10/28	14/71	1/0518	0/8981
4	4	1600	50	12/56	9/99	15/08	1/2006	0/7954
5	4	1600	200	12/56	10/64	14/12	1/1242	0/8471
6	4	1600	400	12/56	10/65	14/05	1/0390	0/9514
7	4	2500	50	12/56	10/74	13/87	1/1043	0/8551
8	4	2500	200	12/56	10/68	14/05	1/0390	0/9291
9	4	2500	400	12/56	10/53	13/83	1/0056	0/9578
10	6/8	500	50	36/2984	32/02	40/37	1/1122	0/8821
11	6/8	500	200	36/2984	32/28	39/67	1/0378	0/9168
12	6/8	500	400	36/2984	32/7	38/66	1/0100	0/9560
13	6/8	1600	50	36/2984	32/02	38/95	1/0731	0/8821
14	6/8	1600	200	36/2984	31/72	39/48	1/0326	0/9290
15	6/8	1600	400	36/2984	31/91	39/35	1/0014	0/9618
16	6/8	2500	50	36/2984	32/18	39/52	1/0612	0/8865
17	6/8	2500	200	36/2984	32/38	42/1	1/0221	0/9571
18	6/8	2500	400	36/2984	31/3	41/2	1/0083	0/9921
19	9/2	500	50	66/4424	58/23	74/93	1/1277	0/8764
20	9/2	500	200	66/4424	57/97	74/07	1/0395	0/8875
21	9/2	500	400	66/4424	58/43	71/39	1/0143	0/9246
22	9/2	1600	50	66/4424	60/38	72/23	1/0871	0/9088
23	9/2	1600	200	66/4424	58/61	71/23	1/0269	0/9273
24	9/2	1600	400	66/4424	58/39	72/05	1/0091	0/9541
25	9/2	2500	50	66/4424	59/91	71/52	1/0764	0/9318
26	9/2	2500	200	66/4424	58/2	72/99	1/0233	0/9512
27	9/2	2500	400	66/4424	58/67	72	1/0069	0/9884



(ب)



(الف)

Fig. 4 The drilled holes of sandwich composite with Balsa core, a) numbering of holes on composite sample, b) calculation of hole diameter by software
 شکل 4 نمونه سوراخ کاری شده پانل کامپوزیتی با هسته بالسا الف) شماره گذاری سوراخ های انجام شده روی قطعه، ب) اندازه گیری سوراخ ها در نرم افزار

دو عیب تورق و الیاف برش نخورده در محیط بیرونی و داخلی سوراخ دیده می شود که این عیوب به دلیل نیروی فشاری مته

4- نتایج و بحث
 در حین سوراخ کاری قطعات ساندویچ پانل های کامپوزیتی

این نتایج با روش جدیدی که تسائو و همکارانش [8] برای کاهش میزان تورق ارائه دادند همخوانی دارد. در حالت کلی برای هر سه مته در سرعت پیشران 400 میلی‌متر در دقیقه و سرعت چرخشی 2500 دور در دقیقه حدوداً کمترین میزان تورق مشاهده می‌شود. دلیل این امر را می‌توان به نبود فرصت لازم در اعمال فشار توسط مته با توجه به زمان کوتاه سوراخ کاری مربوط دانسته و لذا میزان عیب تورق کمتر می‌شود.

در شکل‌های 7 و 8 نتایج میزان الیاف برش نخورده در هر دو قطعه کار به ترتیب از جنس هسته بالسا و هسته فوم پی وی سی، با شرایط سرعت چرخشی و سرعت پیشران یکسان برای هر سه قطر مختلف مته، به صورت بسته سه رنگی مشاهده می‌گردد.

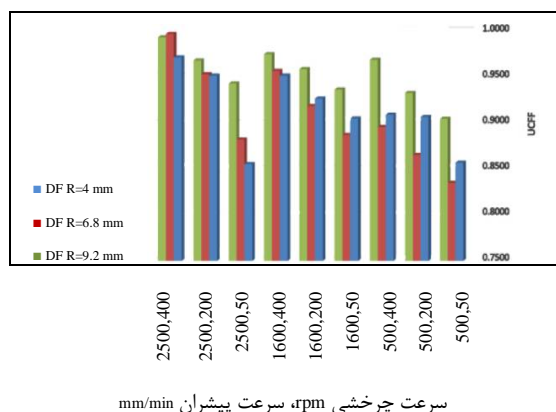


Fig. 7 The variation of uncut fiber factor in composite of Balsa core with various drill bits

شکل 7 نمودار نتایج فاکتور الیاف برش نخورده در قطعه با هسته بالسا با تغییر قطر مته

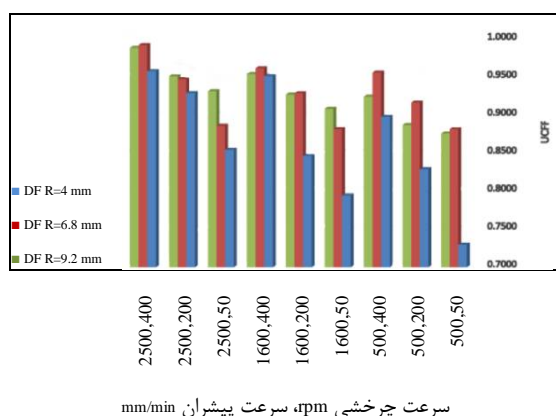


Fig. 8 The variation of uncut fiber factor in PVC foam core composite with various drill bits

شکل 8 نتایج فاکتور الیاف برش نخورده در قطعه با هسته فوم پی وی سی با تغییر قطر مته

در هنگام عملیات سوراخ کاری بوجود می‌آید. این امر بر استحکام سازه به دلیل تمرکز تنش در دیواره‌های سوراخ تأثیر گذار می‌باشد. پارامترهای مهم برای ایجاد عیوب عبارتند از قطر مته، سرعت پیشروی و سرعت چرخشی [1] که با تغییرات اعمال شده بر روی این پارامترها سعی در پیدا نمودن بهترین انتخاب برای انجام فرایند سوراخ کاری می‌باشد. برای مشاهده بهتر نتایج، نمودارهایی از جداول 2 و 3 ارائه گردیده است. شکل‌های 5 و 6 تأثیر افزایش قطر مته بر میزان تورق را به ترتیب در قطعات کولار/پوکسی از جنس هسته بالسا و هسته فوم پی وی سی، در سرعت‌های پیشران و چرخشی یکسان و با قطر مته‌های مختلف نشان می‌دهند. با توجه به نمودارها مشاهده می‌شود که در شرایط سرعت چرخشی و قطر یکسان افزایش سرعت پیشران باعث کم شدن میزان تورق و در نتیجه باعث بهبود کیفیت سوراخ می‌شود.

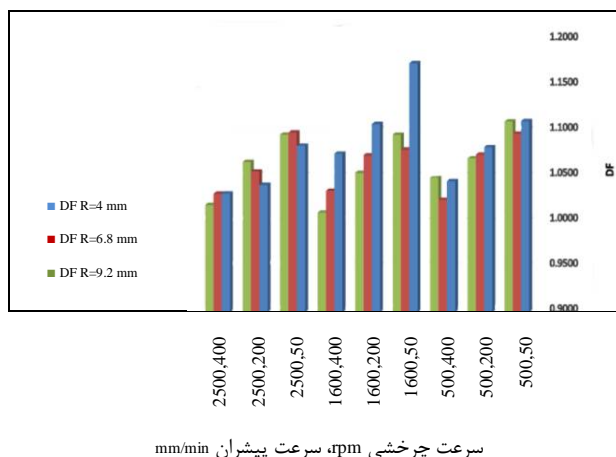


Fig. 5 The variation of delamination factor in composite of Balsa core with various drill bits

شکل 5 نمودار نتایج فاکتور تورق در قطعه با هسته بالسا با تغییر قطر مته

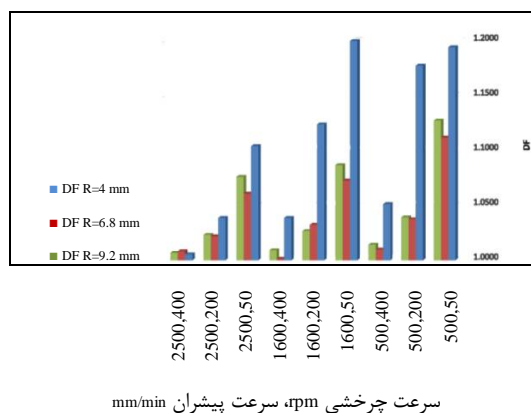
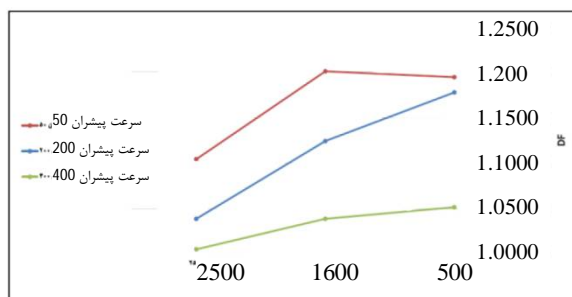


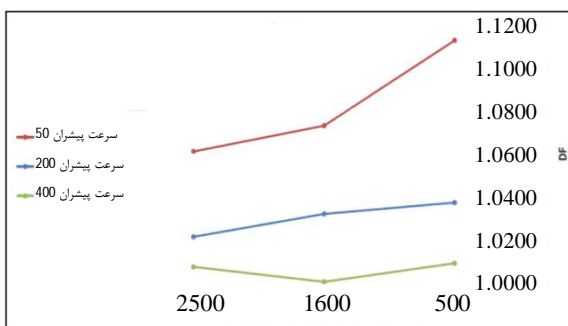
Fig. 6 The variation of delamination factor in composite of PVC foam core with various drill bits

شکل 6 نتایج فاکتور تورق در قطعه با هسته فوم پی وی سی با تغییر قطر مته

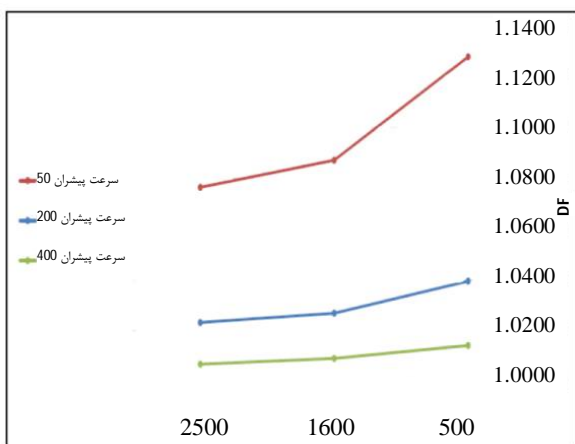
دلیل این امر را می‌توان چنین بیان نمود که در سرعت‌های بالاتر مته، به دلیل کاهش زمان سوراخ کاری و افزایش ارتعاشات عرضی ابزار و در نتیجه تقویت تنش برشی، تورق از رشد آهسته تری برخوردار خواهد بود [3]



سرعت چرخشی ابزار بر حسب دور بر دقیقه (الف)



سرعت چرخشی ابزار بر حسب دور بر دقیقه (ب)



سرعت چرخشی ابزار بر حسب دور بر دقیقه (ج)

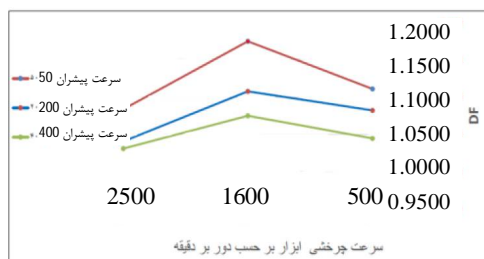
Fig. 10 The variation of delamination factor in PVC foam core composite with various drill speeds and different bit diameters, a) 4 mm, b) 6.8 mm, c) 9.2 mm

شکل 10 نمودار نتایج فاکتور تورق در قطعه با هسته فوم پی وی سی در سرعت‌های پیشران و چرخشی مختلف برای مته با قطرهای متفاوت، (الف) 4 میلی‌متر، (ب) 6/8 میلی‌متر و (ج) 9/2 میلی‌متر

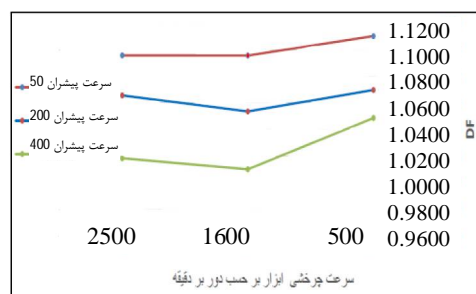
شکل‌های 11 و 12 عملکرد هسته‌های بالسا و فوم پی وی سی

با توجه به این نمودارها در هر دو قطعه ملاحظه می‌شود با افزایش قطر مته و سرعت پیشران، میزان عیوب کمتر شده و قطعه کار سالمتری تولید می‌شود. علت آن را می‌توان در جدایش راحت‌تر مواد به دلیل افزایش سرعت برشی و نرم شدن فاز ماتریس مربوط دانست [3].

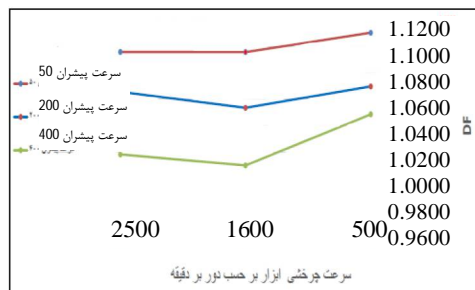
شکل‌های 9 و 10 نتایج حاصل از بررسی فاکتور تورق در قطعه به ترتیب برای کولار/پوکسی با هسته‌های بالسا و فوم پی وی سی در سرعت‌های پیشران 50، 200 و 400 میلی‌متر بر دقیقه برای مته با قطرهای 4، 6/8 و 9/2 میلی‌متر را نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد کمترین میزان عیب تورق در سوراخ کاری با سرعت 400 میلی‌متر بر دقیقه بوجود آمده و سوراخ حاصله از کیفیت بهتری نسبت به سرعت‌های دیگر برخوردار است.



(الف)



(ب)



سرعت چرخشی ابزار بر حسب دور بر دقیقه

Fig. 9 The variation of delamination factor in Balsa core composite with various drill speeds and different bit diameters, a) 4 mm, b) 6.8 mm, c) 9.2 mm

شکل 9 نمودار نتایج فاکتور تورق در قطعه با هسته بالسا در سرعت‌های پیشران و چرخشی مختلف برای مته با قطرهای متفاوت، (الف) 4 میلی‌متر، (ب) 6/8 میلی‌متر و (ج) 9/2 میلی‌متر

نقطه‌ای با مته به قطر 4 میلی‌متر و سرعت چرخش 500 دور در دقیقه و نرخ تغذیه 200 میلی‌متر در دقیقه به میزان 29/85 درصد $(0.9068)/(0.9068 - 1.1775) \times 100 = 0.2985$ می‌باشد. این اختلاف می‌تواند مربوط به اشکال در ساخت قطعه در آن نقاط و یا نامشخص بودن رفتار نقاط مختلف کامپوزیت‌ها بدلیل ناهمسانگرد بودن آنها باشد.

5- نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق یافتن مناسب‌ترین شرایط برای ماشین‌کاری و ایجاد سوراخ در پنل‌های ساندویچی کامپوزیتی با استفاده از تعاریف فاکتورهای تورق و الیاف برش نخورده می‌باشد. برای این کار دو قطعه ساندویچ پانل از جنس اپوکسی کولار با هسته‌های چوب بالسا و فوم پی وی سی را با مته‌هایی با قطرهای مختلف و سرعت‌های چرخشی و نرخ تغذیه متفاوت در سه سطح سوراخ کاری شده است.

نتایج حاصل از این تحقیق را بطور خلاصه می‌توان چنین بیان نمود:

بهترین کیفیت سوراخ با لحاظ فاکتور تورق در سرعت چرخشی 1600 دور در دقیقه و سرعت پیشران 400 میلی‌متر بر دقیقه و با مته به قطر 6/8 میلی‌متری قابل دستیابی است. نتایج نشان می‌دهد که در مجموع، کیفیت سوراخ در هسته چوب بالسا بهتر از فوم پی وی سی می‌باشد. همان‌گونه که ملاحظه گردید سطح دو یعنی سوراخ کاری با مته به قطر 6/8 میلی‌متری بهترین گزینه برای بهینه شدن فاکتور الیاف برش نخورده (میزان UCFF) می‌باشد. برای دستیابی به نتایج بهینه و مطلوب تر، می‌توان تعداد سطوح را افزایش داد. بعد از سرعت پیشروی، سرعت چرخشی بیشترین تأثیر را در میزان تورق و الیاف برش نخورده دارد. نتایج این تحقیق می‌تواند مورد استفاده بسیاری از صنایع خصوصاً هواپیمایی و نظامی واقع گردد.

6- مراجع

- [1] M. Khoran, P. Ghabezi, M. Farhani, M.K. Besharati, Investigation of drilling composite sandwich structures, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 76, pp. 1927-1936, 2015.
- [2] K. Kaw, *Mechanics of composite materials, second edition*, Taylor & Francis Group, New York, 2006.
- [3] M. Khoran, H. Amir Abadi, H.A. Safari, Investigation of drilling of composites, *Mechanical Engineering*, Vol. 104, pp. 69-78, 1394 (in Persian)

را در شرایط و حالت‌های یکسان برای تمامی سوراخ‌های ایجاد شده روی هر هسته را در برابر عیوب تعریف شده نشان می‌دهند.

شکل 11 رفتار هر دو هسته را در برابر فاکتور الیاف برش نخورده نمایش می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد در مته با سایز بالا هسته بالسا عملکرد بهتری نسبت به پی وی سی از خود نشان می‌دهد که با نتایج تحقیقات قبلی در دست‌نوشته‌جات [20] همخوانی دارد.

شکل 12 رفتار هر دو هسته را در برابر فاکتور تورق نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود رفتار هر دو هسته به غیر از در دو نقطه اولیه که اختلاف قابل توجهی از خود نشان می‌دهند، در بقیه نقاط تقریباً دارای رفتار مشابهی می‌باشند و فوم پی وی سی با اختلاف اندکی عملکرد بهتری نسبت به چوب بالسا از خود نشان داده است.

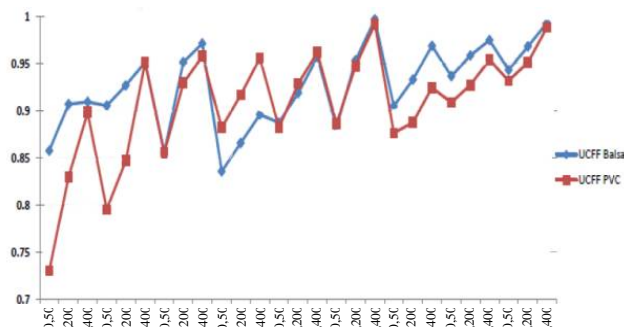
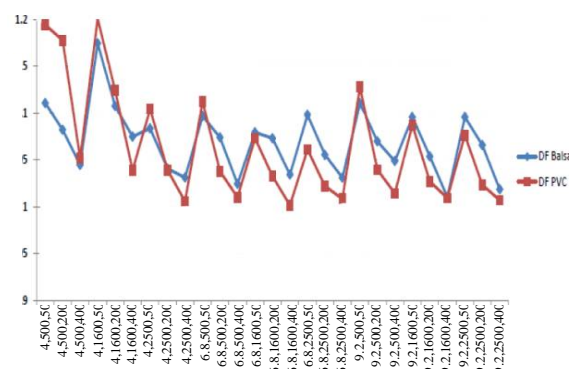


Fig. 11 The variation of Uncut fiber factor for 27 holes in composites with Balsa and PVC foam cores

شکل 11 نمودار فاکتور ریش ریش شدن الیاف برای هر دو هسته در شرایط سوراخ کاری هر 27 سوراخ



12 The variation of delamination factor for 27 holes in composites with Balsa and PVC foam cores

شکل 12 نمودار فاکتور تورق برای هر دو هسته در شرایط سوراخ کاری هر 27 سوراخ

با توجه به نمودار، حداکثر اختلاف بین عملکرد دو هسته در

- using design experiments, *Composite Structure*, Vol. 59, pp. 481–487, 2003.
- [12] S. Hamzeh, H. Mostafa, F. Masoud, Experimental investigation of machining parameters on machinability of carbon fiber/epoxy composites, *Int. J. Eng. Inn. Technol.*, Vol. 2, pp. 30-36, 2012.
- [13] E. Brinksmeier, S. Fangmann, R. Rentsch, Drilling of composites and resulting surface integrity, *CIRP Ann Manuf Technol*, Vol. 60, No. 1, pp. 57-60, 2011.
- [14] A.P. Singh, M. Sharma, I. Singh, A review of modeling and control during drilling of fiber reinforced plastic composites, *Compos Part B*, Vol. 47, pp. 118–125, 2013.
- [15] P.C. Upadhyay, J.S. Lyons, On the evaluation of critical thrust for delamination-free drilling of composite laminates, *J. Reinf Plast Compos*, Vol. 18, pp. 1287–1303, 1999.
- [16] S. Jain, D.C.H. Yang, Effects of feed rate and chisel edge on delamination in composite drilling, *Processing and Manufacturing of Composite Materials*, PED-49/MD-27, pp. 37–51, 1991.
- [17] V. Tagliaferri, G. Caprino, A. Diterlizzi, Effect of drilling parameters on the finish and mechanical properties of GFRP composites, *Int. J. Mach. Tool Manuf*, Vol. 30, No. 1, pp. 77–84, 1989.
- [18] Tsao, H. Hocheng, Y.C. Chen, Delamination reduction in drilling composite materials by active backup force, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 61, No. 1, pp. 91-94, 2012.
- [19] A.B. Sadat, Prediction of delamination load in drilling of graphite/epoxy composites, *Eng. Syst. Des. Anal.*, Vol. 3, pp. 21–27, 1996.
- [20] S. Hosein Khani, H. Mahdi Pour, Theoretical comparison of composite panels, 13th National Ocean Science Congress, Tehran, 1390 (in Persian) (فارسی).
- [4] L.M.P. Duraõ, D.J.S.J. Goncalves, M.R.S. Tavares, Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates, *Compos Struct*, Vol. 92, pp. 1545–1550, 2010.
- [5] H. Hocheng, C.C. Tsao, A treatment of drilling-induced delamination of composite materials, In: Davim JP, editor. *Drilling of composite materials*, New York: Nova Science Publishers, pp. 1–43, 2009.
- [6] H. Hocheng, C.C. Tsao, Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, pp. 335–339, 2003.
- [7] M.A.J. Bosco, K. Palanikumar, B. Durga Prasad, A. Velayudham, Influence of Machining Parameters on Delamination in Drilling of GFRP armour Steel Sandwich Composites, *Procedia Engineering*, Vol. 51, pp. 758–763, 2013.
- [8] D. Liu, Y. Tang, W.L. Cong, A review of mechanical drilling for composite laminates, *Compos Struct*, Vol. 94, No. 4, pp. 1265–1279, 2012.C.C.
- [9] V.N. Gaitonde, S.R. Kamik, J.C. Rubio, A.E. Correia, A.M. Abrao, J.P. Davim, Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites, *J. Mater. Process Technol.*, Vol. 203, pp. 431–439, 2008.
- [10] N. S. Mohan, S. M. Kulkarni, A. Ramachandra, Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 186, pp. 265–271, 2007.
- [11] J.P. Davim, P. Reis, Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) (فارسی).