



## بررسی میزان خسارت وارد شده به کامپوزیت‌های فیبر کربن و شیشه در سوراخکاری

سجاد صیفوری<sup>1\*</sup>، سید علیرضا فاطمی<sup>2</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان  
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان  
\* رفسنجان، صندوق پستی 7713936417، [sajjad.seifoori@vru.ac.ir](mailto:sajjad.seifoori@vru.ac.ir)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 28 دی 1397

پذیرش: 28 فروردین 1398

ارائه در سایت: آبان 1398

### کلیدواژگان:

سوراخکاری

لایه لایه شدگی

کامپوزیت شیشه

کامپوزیت کربن

صفحات کامپوزیت‌های در حین دریل کاری تحت تمرکز تنش قرار می‌گیرند و مستعد لایه لایه شدن هستند. در این پژوهش اثر سرعت پیشروی مته و همچنین قطر مته در فرایند سوراخکاری صفحات کامپوزیتی بصورت تجربی بررسی شده است. برای این هدف دو نوع کامپوزیت مختلف فیبر شیشه و فیبر کربن به ضخامت‌های متفاوت در آزمایشگاه ساخته شده و عملیات سوراخکاری بر روی آنها در 54 حالت مختلف صورت گرفته است. سپس از لبه‌های سوراخ شده عکس برداری شده و توسط پردازش تصویر دیجیتال میزان لایه‌لایه‌شدگی در حالت‌های مختلف محاسبه و سپس مقایسه شده است. سرعت پیشروی بهینه سرعتی حدود 200 میلی‌متر بر دقیقه برای کامپوزیت با فیبر کربن و حدود 125 میلی‌متر بر دقیقه برای کامپوزیت با فیبر شیشه برای سرعت دوران 800 دور در دقیقه می‌باشد. با افزایش ضخامت کامپوزیت‌ها کاهش معیارهای لایه لایه شدگی مشاهده می‌شود، بطوری‌که با افزایش ضخامت کامپوزیت کربن و شیشه به 4 میلی‌متر با افزایش قطر مته، مساحت سطح لایه لایه شدگی در سرعت پیشروی یکسان، کاهش یافته است. همچنین در اکثر موارد رابطه مستقیمی بین مساحت ناحیه آسیب دیده و سرعت پیشروی وجود دارد.

## Study of damage in CFRP and GFRP composite in drilling

Sajjad Seifoori\*, Seyed Alireza Fateminia

Mechanical Engineering Department, Vali-e-Asr University, Rafsanjan, Iran.

\* P.O.B. 7713936417 Rafsanjan, Iran, [sajjad.seifoori@vru.ac.ir](mailto:sajjad.seifoori@vru.ac.ir)

### Article Information

Original Research Paper  
Received 18 January 2019  
Accepted 17 April 2019  
Available October 2019

### Keywords:

Drilling  
Delamination  
GFRP  
CFRP

### Abstract

The laminate composite plates are a candidate to delaminate when subjected to stresses concentration during the drilling operation. In this paper, the influence of drill feed rate and diameter in the delamination of composite plates is studied by experimental tests. For this purpose a carbon fiber reinforced plastic (CFRP) and glass fiber reinforced plastic (GFRP) plates with different thickness are made in laboratory and drilling is done for the 54 different drilling condition cases. Based on digital images processing (DIP) for the drilled surfaces, an image of the damaged area was used to measure the delaminated area and then compare the results. Optimum feed rate is obtained as 200 mm/min for CFRP and 125 mm/min for GFRP with the spindle speed of 800 rpm. By increasing the thickness of the composites, there is a decrease in the delamination, so that by increasing the thickness of the CFRP and the GFRP to 4 mm, with increasing diameter of the drilling tool, the area of the damage region in the same feed rate has decreased. In most cases, a directly proportional relationship was confirmed between an area of damage region and the feed rate.

### 1- مقدمه

سوراخ کاری ایجاد می‌شود. با توجه به این که سوراخ کاری معمولاً در مراحل نهایی ساخت قطعه است، ایجاد عیب در این مرحله می‌تواند بسیار زیان بار و جبران ناپذیر باشد. مواد کامپوزیتی تقویت شده، مشخصه معینی در زمینه ماشین کاری دارند که مستلزم دقت بیشتر فرایند ماشین کاری نسبت به مواد یکدست غیر کامپوزیتی می‌باشند. با توجه به اینکه قطعات کامپوزیتی برای اتصال عموماً نیاز به فرایند دریل برای پیچ و میخ دارند، با توجه به ناهمگنی و ناخالصی کامپوزیت، ابزار ماشین کاری در حین عملیات بطور ناخواسته به قطعه کار آسیب

کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن و کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه به علت خواص مکانیکی مناسب دارای کاربرد بسیاری در صنعت می‌باشند. انواع اتصالات کامپوزیتی، شامل دو نوع چسبی و مکانیکی (پیچ و پرچ) است. اتصالات چسبی کاربردهای زیادی در صنعت کامپوزیت‌ها دارد. استفاده از چسب اپوکسی برای اتصال کامپوزیت‌ها بر پایه رزین ساخته شده، مصداق اتصال مواد یک جنس می‌باشد [1]. اکثر اتصال بین سازه‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف مختلف توسط

Please cite this article using:

S. Seifoori, S. A. Fateminia, Study of damage in CFRP and GFRP composite in drilling, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 6, pp. 44- 50, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

گریلو و همکاران [7] به بررسی پارامترهای دریل کاری CFRP پرداختند. آنها برای سرعت پیشروی 2025 mm/min و سرعت چرخشی برابر 6750rpm به بهترین نتایج و یا به عبارتی کمترین مقدار لایه لایه شدگی رسیدند. آنها همچنین هر دو معیار لایه لایه شدگی و معیار اصلاح شده را برای پیش بینی مقدار آسیب CFRP، مناسب تشخیص داده و نسبت مستقیمی بین این معیارها و میزان سرعت پیشروی مشاهده کردند.

سیلوا و همکاران [8] به بررسی مساحت لایه لایه شدگی CFRP با استفاده از تکنیک پردازش تصویر پرداختند. آنها از روش تصویر برداری یا اشعه ایکس به بررسی میزان خسارت پرداختند. آنها نشان دادند که پردازش تصویر توسط اپراتور می‌تواند در میزان خسارت اعلام شده موثر باشد بنابراین استفاده از یک الگوریتم اتوماتیک یا استاندارد را پیشنهاد دادند.

ایسبیلیر و قاسمی [9] با استفاده از شبیه سازی عددی بصورت سه بعدی پارامترهای موثر در دریل نمونه CFRP را بررسی کردند. آنها نشان دادند که استفاده از step drill باعث خسارت کمتری، درمقایسه با سایر روشهای سوراخکاری در کامپوزیت کربن خواهد شد. فیتو و همکاران [10] از روش عددی به بررسی میزان خسارت در حین دریل پرداختند. آنها دو روش عددی کامل یعنی با در نظر گرفتن نفوذ دریل داخل چند لایه، حذف المانهای چند لایه و حرکت دورانی مته را با روش ساده شده پانچ مقایسه کردند. آنها نشان دادند که در روش ساده شده گرچه میزان خسارت بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده می‌شود، اما به لحاظ زمان شبیه سازی بسیار مناسب و اقتصادی تر است.

در این مقاله برای نخستین بار نتایج حاصل از دریل کامپوزیت‌های کربن و شیشه با یکدیگر مقایسه شده‌اند. از صفحات 15×15 سانتی متری کامپوزیت فیبر کربن و شیشه با آرایش فیبر 0 و 90 درجه استفاده شده است. همچنین تأثیر پارامترهای مته همچون سرعت پیشروی، قطر مته و همچنین پارامترهای صفحه کامپوزیت مانند ضخامت و جنس بر میزان لایه لایه شدگی بعد از دریل، بررسی شده است. میزان لایه لایه شدگی توسط روش پردازش تصویر محاسبه شده و از دو معیار مرسوم لایه لایه شدگی، نتایج مقایسه شده است.

## 2- کار تجربی

صفحات CFRP و GFRP استفاده شده در این مقاله همانند شکل 2 به روش چینی دستی و سپس پرس مکانیکی و در ضخامت‌های 2، 3 و 4 میلی متر ساخته شده است.

می‌رساند و باعث بالا رفتن احتمال شکست قطعه می‌شود. آسیب‌ها عموماً لایه لایه شدن، ایجاد پلیسه و زبری دیواره سطح سوراخکاری شده است.

یکی از اصلی ترین آسیب‌های وارده به کامپوزیت در اثر دریل کردن ورقه ورقه شدن کامپوزیت می‌باشد. تمرکز تنش، ورقه ورقگی و میکرو ترک‌ها مینوانند بطور عمده کارایی کامپوزیت را کاهش دهند.

در حالت کلی دو مکانیزم لایه لایه شدگی برای دریل کامپوزیت همانند شکل 1 تعریف می‌شود. لایه‌لایه‌شدگی peel-up که لایه لایه شدگی سطح روی کار را شامل می‌شود و لایه‌لایه‌شدگی pull-out که خسارت صفحه پشت کار را مشخص می‌کند [2]. برای کم کردن لایه لایه شدگی pull-out استفاده از صفحه کمکی برای پشت کار، توسط کاپلو [3] پیشنهاد شده است. او نشان داد که علی الرغم کاهش لایه لایه شدگی با گذاشتن صفحه کمکی میزان نیروی اعمالی به قطعه کار در حین دریل افزایش می‌یابد. تا کنون چندین تکنیک برای اندازه گیری لایه لایه شدگی بعد از دریل کاری کامپوزیت مطرح شده است، تأثیر پارامترهای مته توسط هوچنگ و همکاران [4] و همچنین بررسی پارامترهای دریل کاری کامپوزیت شیشه توسط رویو و همکاران [5] انجام شده است. آنها نشان دادند که افزایش سرعت چرخش (در محدوده مشخص) دریل باعث کاهش لایه لایه شدگی در کامپوزیت شیشه می‌شود و علت این پدیده، گرم شدن ماتریس با افزایش سرعت چرخشی و در نتیجه نرم تر شدن ماتریس است.

داویم و همکاران [6] به بررسی سوراخکاری روی CFRP و بررسی میزان لایه لایه شدگی با استفاده از روش پردازش تصویر پرداختند. آنها با بررسی میزان خسارت ایجاد شده به صورت تجربی و با مقایسه با میزان پیش بینی خسارت از روش پردازش تصویر، به این نتیجه رسیدند که روش پردازش تصویر برای پیش بینی ناحیه خسارت مناسب است و استفاده از معیار لایه لایه شدگی برای تخمین ناحیه آسیب دیده در کامپوزیت CFRP را پیشنهاد دادند. آنها رفتار ترد از CFRP در حین دریل مشاهده کردند.

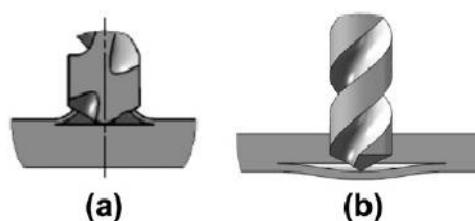


Fig. 1 Delamination mechanism a) peel-up b) pull-out [7]

شکل 1 لایه لایه شدگی peel-up و b لایه لایه شدگی pull-out [7]



Fig. 3 Drilling with NC machine with special rotation speed and feed rate

شکل 3 دستگاه NC برای ایجاد سوراخ با سرعت دوران و پیشروی مشخص

جدول 1 خواص الیاف تقویت کننده و رزین

Table 1 property of the matrix and reinforcing materials

Weight gr/cm <sup>2</sup>	$\nu$	G Gpa	E Gpa	$\rho$ Kg/m <sup>3</sup>	ماده
200	0/22	33	90	2500	الیاف شیشه
304	0/27	15	235	1800	الیاف کربن
-	0/3	1	4	1500	رزین اپوکسی (EPR 3301)

### 3- روش تحلیل

رایج‌ترین روش غیر مخرب که برای کیفیت سنجی لایه لایه شدگی مورد استفاده قرار می‌گیرد معیار رابطه (1) [6, 7] است:

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_0} \quad (1)$$

که عبارت  $D_{max}$  بیانگر ماکزیمم قطر ناحیه آسیب دیده است،  $D_0$  بیانگر قطر مته سوراخ کاری همانند شکل 4 می‌باشد.

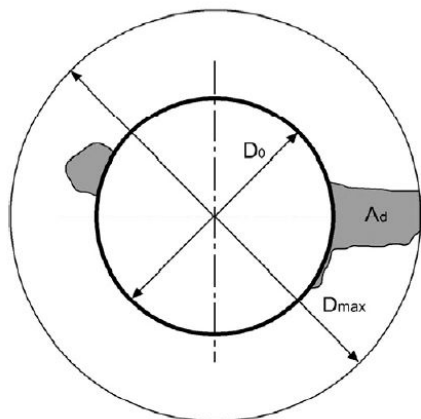


Fig. 4 Schematic representation of the geometric parameters [7]

شکل 4 الگوی بیانگر پارامترهای هندسی [7]



Fig. 2 Hand layup for manufacturing CFRP

شکل 2 لایه چینی دستی برای ساخت کامپوزیت کربن

تعداد لایه‌ها برای کامپوزیت شیشه به ترتیب ضخامت ذکر شده، 8، 12 و 16 لایه و برای کامپوزیت کربن 6، 8 و 10 لایه است. هر کدام از این صفحات توسط دستگاه NC سه محوره با سه مته به قطرهای 5، 7 و 10 میلی‌متر، سوراخ کاری شده‌اند. در شکل 3 نمایی از دستگاه استفاده شده برای تست، نشان داده شده است.

به ازای هر قطر مته، سه سرعت پیشروی 50، 80 و 125 میلی‌متر بر دقیقه برای کامپوزیت شیشه به ضخامت 4 میلی‌متر و کامپوزیت کربن ضخامت 3 میلی‌متر در نظر گرفته شده و سوراخ کاری شده است. همچنین تست‌های دیگری با سرعت‌های 200، 400 و 630 میلی‌متر بر دقیقه برای ضخامت‌های مختلف انجام شده است.

در مجموع 54 طرح سوراخ مورد بررسی قرار گرفته است. پردازش تصویر بعد از سوراخکاری توسط نرم افزار دیجی مایزر بر روی تصاویر میکروسکوپ استریو، انجام گرفته است. دور دوران مته در طی این تست‌ها ثابت و 800 rpm لحاظ شده است. هدف این پژوهش بررسی پارامترهای سرعت پیشروی و قطر مته بر روی دو معیار لایه لایه شدگی و معیار اصلاح شده لایه لایه شدگی که معیارهای غیر مخرب هستند، می‌باشد.

جنس رزین اپوکسی و سخت کننده استفاده شده QUANTOM EPR 3301 با چگالی 1500 kg/m<sup>3</sup> و مقاومت فشاری 95MPa و مقاومت کششی و خمشی بیشتر از 30 MPa است. همچنین الیاف کربن دارای چگالی 1800 kg/m<sup>3</sup> و چگالی سطحی 304 g/cm<sup>2</sup> و الیاف شیشه دارای چگالی 2500 kg/m<sup>3</sup> و چگالی سطحی 200 g/cm<sup>2</sup> هستند. خواص الیاف و رزین در جدول 1 آورده شده است.

در شکل‌های 7 تا 12 نمونه آسیب‌های ورودی به کامپوزیت‌ها در مقاطع خروجی در ضخامت، جنس، قطر مته و سرعت پیشروی متفاوت نشان داده شده است.

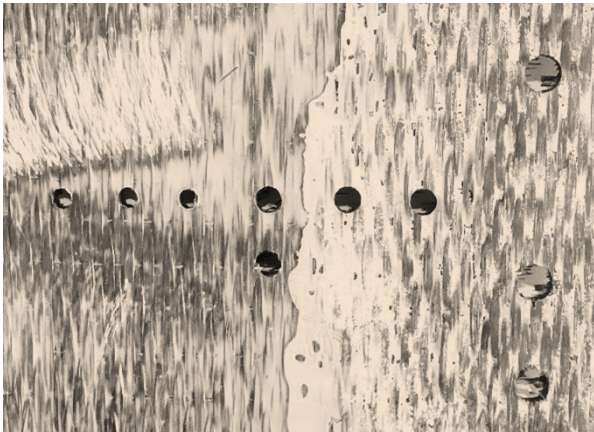


Fig. 6 Drilling of CFRP composite plate

شکل 6 سوراخکاری کامپوزیت فیبر کربن

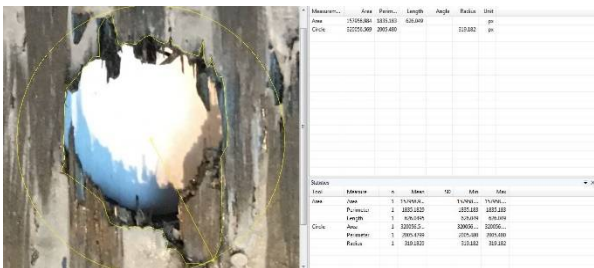


Fig. 7 Image processing for 2 mm CFRP with 10mm drilling diameter and a feed rate of 630 mm/min

شکل 7 پردازش تصویر کامپوزیت فیبر کربن ضخامت 2 میلی‌متر با مته 10 میلی‌متر و سرعت 630 میلی‌متر بر دقیقه



Fig. 8 Image processing for 3 mm CFRP with 10mm drilling diameter and a feed rate of 80 mm/min

شکل 8 پردازش تصویر کامپوزیت فیبر کربن ضخامت 3 میلی‌متر با مته 10 میلی‌متر و سرعت 80 میلی‌متر بر دقیقه

طبق بررسی‌ها صورت گرفته از شکل‌های 7 تا 12 و محاسبات انجام شده، هنگامی که مساحت لایه شده کمتر باشد، فاکتور لایه شده لایه اصلاح شده لایه شده نزدیک تر است و مساحت ناحیه آسیب دیده شده با اختلاف این دو معیار رابطه مستقیم دارد. همچنین نتایج کلی

معیار لایه لایه شدگی سطح آسیب دیده، طبق مشاهدات دارای اختلاف با نتایج تجربی است. بنابراین معیار خوبی برای سطوح آسیب دیده‌ای که بصورت غیر یکنواخت لایه لایه شده‌اند، نمی‌باشد.

برای رفع این مشکل از معیار اصلاح شده [6, 7] لایه لایه شدگی  $F_{da}$  که مساحت ناحیه آسیب دیده شده را وارد معادلات می‌کند، استفاده می‌شود:

$$F_{da} = F_d + \frac{A_d}{(A_{max} - A_0)} (F_d^2 - F_d) \quad (2)$$

که  $A_0$  و  $A_{max}$  به ترتیب نمایانگر مساحت ورقه ورقه شده، مساحت متناسب به قطر  $D_0$  و مساحت متناسب به قطر  $D_{max}$  می‌باشند.  $F_d$  از رابطه (1) معیار لایه لایه شدگی است. این معیار امکان مقایسه دو ناحیه آسیب دیده با قطر ماکزیمم یکسان و مساحت آسیب دیده شده متفاوت را می‌دهد.

هرکدام از پارامترهای مورد استفاده در رابطه (2) توسط روش پردازش تصویر بدست آمده‌اند [5-7].

#### 4- ارائه نتایج و بحث

آسیب‌های وارده به کامپوزیت در قسمت خروجی دریل به مراتب بیشتر از ورودی آن است و این پدیده با چشم غیر مسلح نیز قابل تایید است، در نتیجه معیارهای لایه لایه شدگی و اصلاح شده لایه لایه شدگی برای مقطع خروجی دریل اندازه‌گیری شده است. خسارت ایجاد شده معمولاً خسارت ترد است.

شکل‌های 5 و 6 تصویر سوراخکاری انجام شده روی دو نمونه کامپوزیت شیشه و کربن را به ترتیب نشان می‌دهند.

نمونه‌های کامپوزیت شیشه و کربن در ضخامت‌های ذکر شده، بعد از سوراخکاری با قطرهای مختلف مته و همچنین سرعت‌های متفاوت برای بررسی میزان مساحت لایه لایه شدگی توسط میکروسکوپ الکترونی عکس‌برداری شده‌اند، سپس برای بررسی میزان مساحت‌های مطرح شده در شکل 4، وارد نرم‌افزار دیجی مایزر شده‌اند.



Fig. 5 Drilling of GFRP composite plate

شکل 5 سوراخکاری کامپوزیت فیبر شیشه

بهینه برای کمترین لایه لایه شدگی با استفاده از معیار معیار اصلاح شده‌ی لایه لایه شدگی، سرعت پیشروی معادل با 125 میلی‌متر بر دقیقه برای ضخامت 4 میلی‌متری ورق کامپوزیت شیشه می‌باشد. شکل 14 نتایج مربوط به کامپوزیت کربنی را نشان می‌دهد.

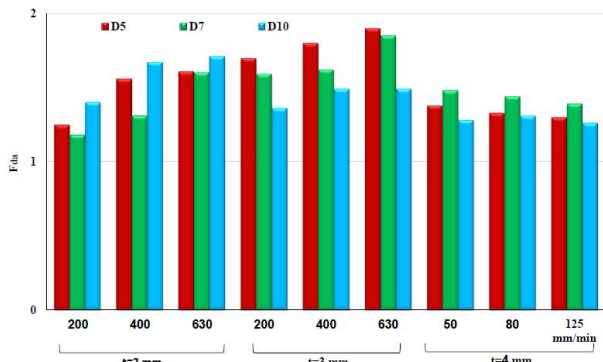


Fig. 13 Drilling condition and area of damage for GFRP based on the modify delamination theory

شکل 13 شرایط سوراخکاری و مقدار آسیب ایجاد شده برای کامپوزیت فیبر شیشه بر اساس معیار اصلاح شده لایه لایه شدگی

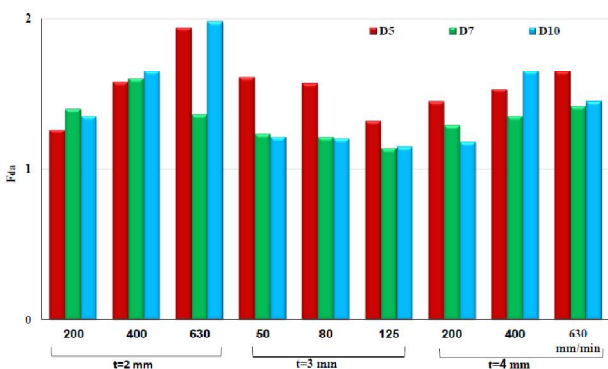


Fig. 14 Drilling condition and area of damage for CFRP based on the modify delamination theory

شکل 14 شرایط سوراخکاری و مقدار آسیب ایجاد شده برای کامپوزیت فیبر کربن بر اساس معیار اصلاح شده لایه لایه شدگی

از نتایج شکل 14 مشاهده می‌گردد که در کامپوزیت فیبر کربن سرعت پیشروی بهینه در حالت کلی حدود 200 میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد. اما با افزایش قطر مته از 5 میلی‌متر به 10 میلی‌متر سرعت پیشروی 125 میلی‌متر بر دقیقه نیز مناسب است، به عبارت دیگر برای کامپوزیت‌های کربنی افزایش قطر مته در سرعت پیشروی کمتر، آسیب کمتری نسبت به سرعت پیشروی بیشتر دارد.

همچنین همان‌گونه که از نتایج شکل‌های 13 و 14 مشاهده می‌گردد، بطور کلی با افزایش ضخامت صفحات کامپوزیتی، در هر دو نوع کامپوزیت، مقدار لایه لایه شدگی کاهش یافته است.

پردازش تصویر در محاسبه مساحت ناحیه آسیب دیده، در کامپوزیت‌های فیبر شیشه در شکل 13 نشان شده است.

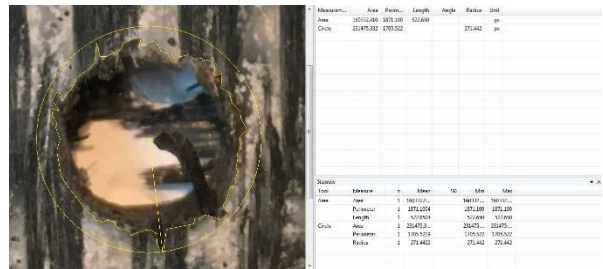


Fig. 9 Image processing for 4 mm CFRP with 10mm drilling diameter and a feed rate of 630 mm/min

شکل 9 پردازش تصویر کامپوزیت فیبر کربن ضخامت 4 میلی‌متر با مته 10 میلی‌متر و سرعت 630 میلی‌متر بر دقیقه



Fig. 10 Image processing for 2 mm CFRP with 10mm drilling diameter and a feed rate of 200 mm/min

شکل 10 پردازش تصویر کامپوزیت فیبر کربن ضخامت 2 میلی‌متر با مته 10 میلی‌متر و سرعت 200 میلی‌متر بر دقیقه

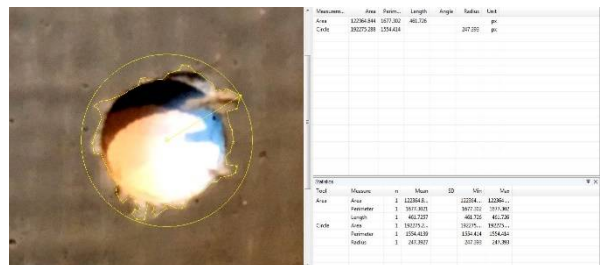


Fig. 11 Image processing for 3 mm CFRP with 7 mm drilling diameter and a feed rate of 400 mm/min

شکل 11 پردازش تصویر کامپوزیت فیبر کربن ضخامت 3 میلی‌متر با مته 7 میلی‌متر و سرعت 400 میلی‌متر بر دقیقه

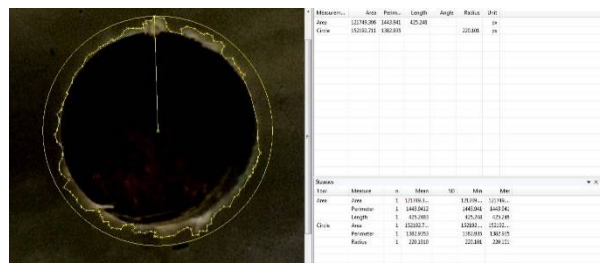


Fig. 12 Image processing for 4 mm CFRP with 10mm drilling diameter and a feed rate of 125 mm/min

شکل 12 پردازش تصویر کامپوزیت فیبر کربن ضخامت 4 میلی‌متر با مته 10 میلی‌متر و سرعت 125 میلی‌متر بر دقیقه

همان‌گونه که از نتایج شکل 13 مشاهده می‌شود، سرعت

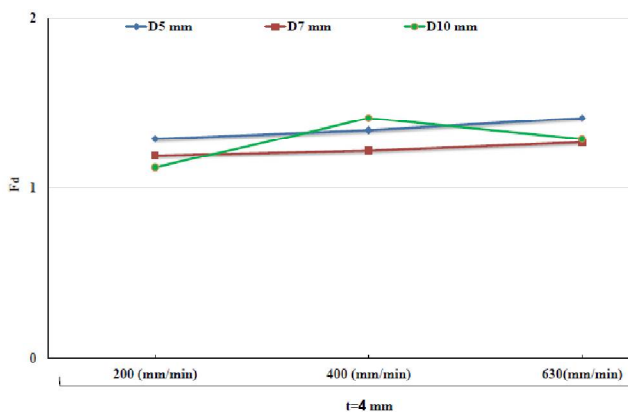


Fig. 16 The effect of feed rate on the delamination factor ( $F_d$ ) using different drill diameter for 4mm CFRP

شکل 16 تأثیر افزایش قطر مته و سرعت پیشروی بر معیار لایه لایه شدگی کامپوزیت CFRP با ضخامت 4 میلی‌متر

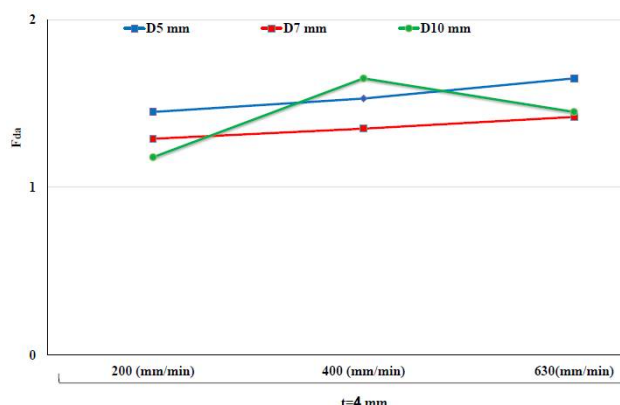


Fig.17 The effect of feed rate on the modify delamination factor ( $F_{da}$ ) using different drill diameter for 4mm CFRP

شکل 17 تأثیر افزایش قطر مته و سرعت پیشروی بر معیار اصلاح شده لایه لایه شدگی کامپوزیت CFRP با ضخامت 4 میلی‌متر

در شکل 18 خسارت‌های ایجاد شده در دو نوع کامپوزیت شیشه و کربن با ضخامت 2 میلی‌متر و در قطر مته 5 میلی‌متر با یکدیگر مقایسه شده است.

بطور کلی در شرایط سرعت دورانی و پیشروی یکسان خسارت ایجاد شده در کامپوزیت کربن در اغلب حالات کمی کمتر از کامپوزیت شیشه است و علت این پدیده می‌تواند کرنش شکست بیشتر کامپوزیت کربن نسبت به شیشه و بنابراین نرم تر بود نسبی آن نسبت به کامپوزیت شیشه باشد. لازم به ذکر است که در تست کشش انجام شده، کرنش شکست کامپوزیت شیشه 1/73% و کرنش شکست کامپوزیت کربن 1/84% بدست آمده است و بنابراین هر دو کامپوزیت رفتار مکانیکی تردی در حین عملیات سوراخکاری از خود بروز می‌دهند.

علت این پدیده می‌تواند افزایش صلبیت خمشی ورق و در نتیجه کاهش تمایل به لایه لایه شدگی pull-out باشد.

همچنین در کامپوزیت‌های با ضخامت 2 میلی‌متر با افزایش قطر مته مساحت سطح لایه لایه شدگی در سرعت پیشروی یکسان، در اکثر موارد افزایش یافته است. این در حالی است که با افزایش ضخامت کامپوزیت کربن و شیشه به 4 میلی‌متر با افزایش قطر مته، مساحت سطح لایه لایه شدگی در سرعت پیشروی یکسان، کاهش یافته است. این پدیده نیز می‌تواند باعث کاهش لایه لایه شدگی سطح خارجی (آسیب pull-out) باشد.

در شکل 15 مقدار خسارت از دو معیار لایه لایه شدگی و معیار اصلاح شده لایه لایه شدگی برای کامپوزیت شیشه به ضخامت 2 میلی‌متر و دریل به قطر 5 میلی‌متر با یکدیگر مقایسه شده اند.

همان‌طور که از شکل 15 مشاهده می‌شود، مقدار لایه لایه شدگی از معیار اصلاح شده در همه سرعت‌های پیشروی بیش از معیار لایه لایه شدگی است. این نتیجه برای همه حالت‌ها و برای هر دو کامپوزیت مشاهده می‌شود و این موضوع از رابطه (2) نتیجه می‌شود، اما نکته قابل اهمیت افزایش اختلاف بین دو معیار با افزایش سرعت پیشروی است.

اثر افزایش قطر مته و افزایش سرعت پیشروی برای یک نمونه CFRP به ضخامت 4 میلی‌متر در شکل‌های 16 و 17 برای معیار لایه لایه شدگی و معیار اصلاح شده لایه لایه شدگی نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل‌های 16 و 17 نشان داده شده است، قطر مته 7 میلی‌متر علاوه بر ایجاد کمترین خسارت، با افزایش سرعت پیشروی، دارای نرخ تغییرات خسارت پایداری بر اساس هر دو معیار است.

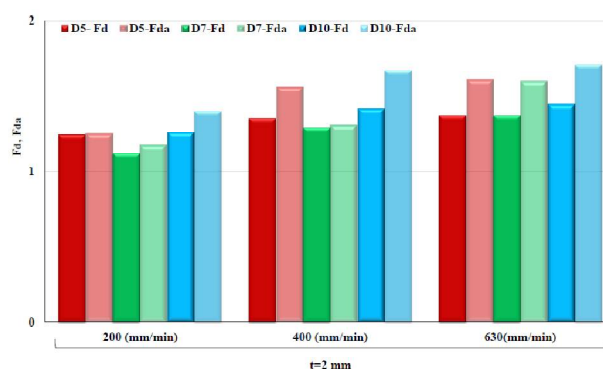


Fig. 15 comparison the damage area for 2mm GFRP between the delamination and modify delamination theory

شکل 15 مقایسه مساحت خسارت بر اساس دو معیار لایه لایه شدگی و اصلاح شده لایه لایه شدگی

خسارت، با افزایش سرعت پیشروی، دارای نرخ تغییرات خسارت پایداری بر اساس هر دو معیار است.

- در شرایط سرعت دورانی و پیشروی یکسان خسارت ایجاد شده در کامپوزیت شیشه در اغلب حالات کمی بیشتر از کامپوزیت کربن است.

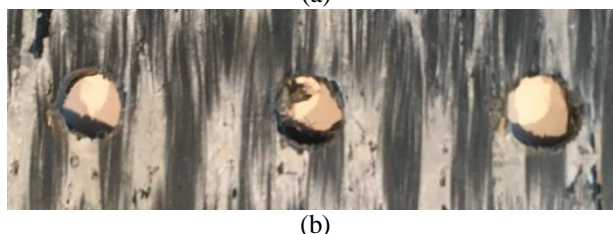


Fig. 18 comparison of the damage zone with 5 mm drill and 2mm a) GFRP, b) CFRP laminate.

شکل 18 مقایسه خسارت ایجاد شده پس از دریل با مته به قطر 5 میلی‌متر برای الف) کامپوزیت شیشه ب) کامپوزیت کربن به ضخامت 2 میلی‌متر.

## 6- مراجع

- [1] H. Rahimi, Adhesive Bonding of Polymer Composites, *Polymerization*, Vol. 3, No. 2, pp. 33-46, 2013. (فارسی)
- [2] J.P Davim, P. Reis, Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave—experimental and statistical study, *Materials & design*, Vol. 24, No. 5, pp. 315-324, 2003.
- [3] E. Capello, Workpiece damping and its effect on delamination damage in drilling thin composite laminates, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 148, No. 2, pp. 186-195, 2004.
- [4] H. Hocheng, C.C. Tsao, Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 12, pp. 1403-1416, 2006.
- [5] J.C. Rubio, A.M. Abrao, P.E. Faria, A.E. Correia, J.P. Davim, Effects of high speed in the drilling of glass fiber reinforced plastic: evaluation of the delamination factor, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, No. 6, pp. 715-720, 2008.
- [6] J.P. Davim, J.C. Rubio, A.M. Abrao, A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates, *Composites Science and Technology*, Vol. 67, No. 9, pp. 1939-1945, 2007.
- [7] T.J. Grilo, R.M.F. Paulo, C.R.M. Silva, J.P. Davim, Experimental delamination analyses of CFRPs using different drill geometries, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 45, No. 1, pp. 1344-1350, 2013.
- [8] D. Silva, J.P. Teixeira, C.M. Machado, Methodology analysis for evaluation of drilling-induced damage in composites, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(9-12), pp. 1919-1928, 2014.
- [9] O. Isbilir, E. Ghassemieh, Numerical investigation of the effects of drill geometry on drilling induced delamination of carbon fiber reinforced composites, *Composite Structures*, Vol. 105, pp. 126-133, 2013.
- [10] N. Feito, J. López-Puente, C. Santiuste, M.H. Miguélez, Numerical prediction of delamination in CFRP drilling. *Composite Structures*, Vol. 108, pp. 677-683, 2014.

## 5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق بصورت تجربی اثر پارامترهای هندسی مته و همچنین اثر جنس و ضخامت کامپوزیت با استفاده از روش پردازش تصویر بررسی شده است.

با استفاده از نتایج تجربی بدست آمده از پردازش تصویر، سطوح دریل شده و سرعت‌های پیشروی بکاربرده شده، نتایج زیر نشان داده شده است:

- برای هر دو کامپوزیت CFRP و GFRP معیار لایه لایه شدگی و معیار اصلاح شده لایه لایه شدگی برای تخمین مقدار آسیب مناسب هستند. همچنین رابطه مستقیمی بین مقدار سرعت پیشروی و مقدار مساحت آسیب ملاحظه می‌شود.
- با افزایش ضخامت کامپوزیت‌ها کاهش معیارهای لایه لایه شدگی از نوع pull-out مشاهده می‌شود.
- استفاده از معیار اصلاح شده لایه لایه شدگی که مساحت لایه لایه شده را نیز وارد محاسبات می‌کند، میتواند نقایص معیار لایه لایه شدگی را پوشش دهد.
- در ضخامت 2 میلی‌متر با افزایش قطر مته مقدار آسیب افزایش یافته و با افزایش ضخامت به 4 میلی‌متر مقدار آسیب کاهش می‌یابد.

- سرعت پیشروی مناسب برای سرعت دوران 800rpm برای دریل کامپوزیت‌ها با فیبر کربن 200 میلی‌متر بر دقیقه و برای کامپوزیت‌های فیبر شیشه حدود 125 میلی‌متر بر دقیقه است.

- در اغلب موارد قطر مته 7 میلی‌متر علاوه بر ایجاد کمترین