



بررسی تأثیر متغیرهای مختلف جهت کاهش تورق ناشی از سوراخکاری در چندلایه‌های کامپوزیتی

هادی قسمتی کوچکی¹، مهناز ذاکری^{2*}، مجیدرضا آیت‌اللهی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- استادیار، آزمایشگاه تحقیقاتی سازه‌های پیشرفته هوافضایی، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی 3381-16765، m.zakeri@kntu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف، به علت خواص مکانیکی عالی که دارند، جایگزین مناسبی برای بسیاری از مواد سنتی بوده و طی سال‌های اخیر به طور گسترده در صنایع مختلف بکار می‌روند. از طرفی عملیات ماشین‌کاری، بحث جدایی‌ناپذیر در زمینه ساخت و تولید قطعات در صنایع گوناگون محسوب می‌شود. از اینرو و با علم بر آن که چندلایه‌های کامپوزیتی حین عملیات ماشین‌کاری بویژه بحث سوراخکاری، دچار آسیب تورق می‌شوند، نیاز است توجه ویژه در این زمینه صورت گیرد تا ضمن کاهش هزینه و زمان تولید، ایمنی و سلامت سازه‌ها نیز تضمین شود. با توجه به کمبود منابع داخلی که اثرات متغیرهای مختلف فرآیند سوراخکاری، در جهت کاهش پدیده تورق را به صورت دقیق بررسی کرده باشند؛ در مقاله حاضر سعی شده است که تأثیر متغیرهای مختلف شامل هندسه مته، سرعت پیشروی، سرعت برش، نیروی پیشروی، پیش‌ته‌زنی و نوع خنک‌کاری در جهت کمینه کردن فاکتور تورق، ارزیابی شوند.

این مقاله به عنوان یکی از مقالات برتر در هفدهمین همایش ملی و ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی ساخت و تولید ایران (ICME2021) انتخاب شده است.

کلیدواژگان:

مواد مرکب

سوراخکاری

فاکتور تورق

نیروی پیشروی، خنک‌کاری

Investigating the effect of different variables to reduce delamination due to drilling in composite laminates

Hadi Ghesmati-Kucheki¹, Mahnaz Zakeri^{2*}, Majid Reza Ayatollahi¹

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Aerospace Engineering Department, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 16765-3381 Tehran, Iran, m.zakeri@kntu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 15 April 2021

First Decision: 26 April 2021

Accepted: 7 July 2021

Keywords:

Composites

Drilling

Delamination factor

Cooling

Abstract

Fiber-reinforced polymer matrix composites, due to their excellent mechanical properties, are a good alternative to many traditional materials and have been widely used in various industries in recent years. On the other hand, machining operations are an integral part of manufacturing and production of parts in various industries. Therefore, knowing that the composite layers are damaged during machining operations, especially drilling, it is necessary to pay special attention in this regard, in order to reduce the cost and production time, to ensure the health and safety of the structures. Due to the lack of internal resources that have carefully studied the effects of various variables in the drilling process in order to reduce the delamination phenomenon; In the present paper, we have tried to evaluate the effect of different variables including drill geometry, speed, cutting speed, advancing force, pre-drilling and type of cooling in order to minimize the delamination factor.

1- مقدمه

می‌گیرند. پلیمرهای تقویت شده با الیاف (FRP)¹ از جمله متداول‌ترین چندلایه‌های کامپوزیتی هستند.

ماشین‌کاری این نوع مواد به علت سفتی و خاصیت سایندگی بالایی که دارند، پیچیده‌تر و دشوارتر از مواد همگن مانند فلزات است. دریل‌کاری یکی از عملیات‌های متداول ماشین‌کاری، جهت

امروزه چندلایه‌های کامپوزیتی، به علت دارا بودن نسبت استحکام و سفتی به وزن بالا، مقاومت در برابر عناصر خورنده، قابلیت شکل‌دهی ساده و ظرفیت جذب انرژی بالایی که دارند، به طور گسترده در صنایع مختلفی مانند هوافضا، خودروسازی، کشتی‌سازی و بسیاری از صنایع دیگر، مورد استفاده قرار

¹ Fiber Reinforced Polymer

Please cite this article using:

H. Ghesmati-Kucheki, M. Zakeri, M. Reza Ayatollahi, Investigating the effect of different variables to reduce delamination due to drilling in composite laminates, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 6, pp. 15- 20, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

عملیات منجر به تورق فشاری، تحت بارگذاری مود اول و دوم (برش صفحه‌ای)، می‌شود که در شکل 1- ب نمایش داده شده است [2].

در ادامه، اهداف این مطالعه بیان شده و سپس روش‌های سنجش تورق معرفی می‌شوند. همچنین تأثیر متغیرهای مختلف موجود در عملیات سوراخکاری، بر میزان تورق بررسی و ارزیابی خواهد شد.

2- بیان مسئله و ذکر اهداف

با توجه به آنچه در بخش مقدمه بیان شد، تورق ناشی از سوراخکاری یکی از مهمترین عوامل در زمینه آسیب و تخریب چندلایه‌های کامپوزیتی به شمار می‌رود. متغیرهای مختلفی مانند سرعت پیشروی مته، سرعت برش، هندسه مته، پیش مته زنی، نوع خنک‌کاری (خشک یا برودتی) بر میزان تورق ناشی از سوراخکاری مؤثر هستند. با توجه به کمبود مراجع داخلی در زمینه بررسی دقیق این عوامل در راستای کاهش پدیده تورق، در مقاله حاضر سعی شده است با مرور منابع موجود، ارزیابی و تحلیل مناسبی از تأثیر عوامل مذکور در راستای کمینه سازی میزان تورق ناشی از سوراخکاری در چند کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه و کربن صورت گیرد.

3- روش تحقیق

با توجه به ماهیت غیرشفاف چندلایه‌های کامپوزیتی، به ویژه کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن (CFRP)¹، تشخیص چشمی تورق، اندازه، شکل و موقعیت آن در کامپوزیت‌های سوراخکاری شده، کار دشوار و در اغلب موارد غیر ممکن می‌باشد. بنابراین برای این کار از آزمون‌های غیر مخرب استفاده می‌شود. در جدول 1، روش‌های متداول برای تشخیص تورق در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه (GFRP)² و الیاف کربن به همراه کاربرد و توضیحات هر روش، جمع بندی و بصورت خلاصه ارائه شده است.

در شکل 2 شماتیکی از ناحیه تورق در چندلایه‌های کامپوزیتی نشان داده شده است. بعد از تعیین ناحیه آسیب دیده، لازم است به صورت کمی، اندازه این ناحیه مشخص شود. بدین منظور چن [6] جهت تعیین مقدار تورق، پارامتری بنام فاکتور تورق (F_d) را معرفی کرد. این پارامتر، مطابق رابطه (1)، از تقسیم بزرگترین اندازه تورق (D_{max}) بر قطر اسمی مته (D_0)

سرهم‌بندی قطعات کامپوزیتی به شمار می‌رود. حین این عملیات، آسیب‌های مختلفی مانند تورق، انقباض سوراخ و بیرون کشیدگی الیاف رخ می‌دهد. تورق، آسیب بحرانی و چالش برانگیز در زمینه سوراخکاری قطعات کامپوزیتی بوده که منجر به افت استحکام قطعه سوراخکاری شده، می‌گردد [1].

تورق ناشی از سوراخکاری مواد کامپوزیتی، به دو دسته تورق پوسته شدن (پیل آپ) و تورق فشاری (پوش داون) تقسیم می‌شود. در شکل 1، شماتیکی از انواع تورق حین عملیات سوراخکاری چندلایه‌های کامپوزیتی، قابل مشاهده است. هنگام تماس و ورود نوک مته درون قطعه کار، اولین لایه روی لایه پایینی می‌لغزد. این عمل، که مطابق شکل 1- الف، بارگذاری با مود سوم رشد ترک (برش خارج صفحه‌ای) محسوب می‌شود، عامل اولیه تورق پوسته شدن گزارش شده است. از آنجا که حین عملیات سوراخکاری، الیاف به صورت مطلوب بریده نشده و هنگام پیشروی مته دریل، لبه الیاف کشیده می‌شود، این پدیده باعث رخ داد تورق پوسته شدن بر اثر مود اول یا بازشدگی ترک بارگذاری می‌شود.

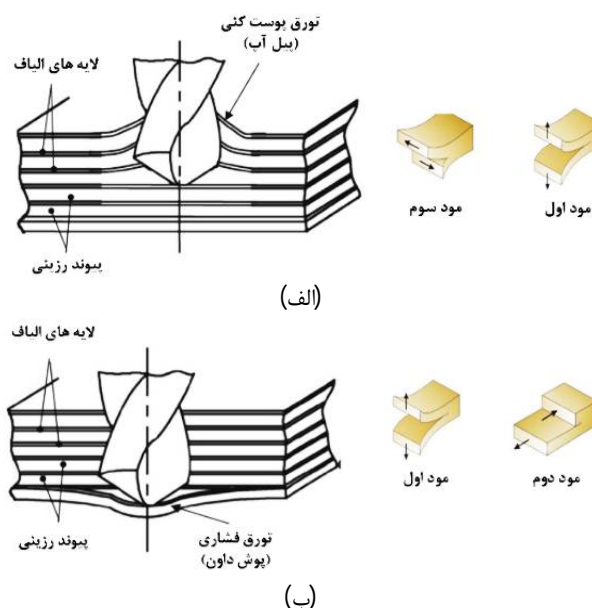


Fig. 1 Mechanisms of delamination: (a) peel-up and (b) push-down
 شکل 1 انواع تورق حین عملیات سوراخکاری (الف) تورق پوسته شدن، (ب) تورق فشاری

هنگامی که مته دریل به لایه‌های انتهایی قطعه کامپوزیتی می‌رسد، با توجه به وجود تعداد کمی از لایه‌های برش نخورده در مقابل آن، استحکام قطعه کاهش می‌یابد. لذا با افزایش میزان نیروی پیشروی مته نسبت به استحکام ماده، مته مانند یک پانچ عمل کرده و بدون برش مطلوب، قطعه را سوراخ می‌کند. این

¹ Carbon Fiber Reinforced Polymer

² Glass Fiber Reinforced Polymer

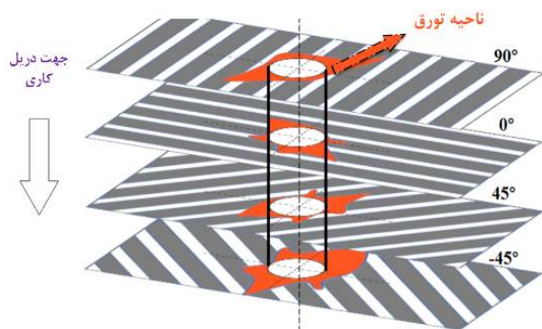


Fig. 2 Schematics of the delamination area in the composite laminates
شکل 2 شماتیکی از ناحیه تورق در چندلایه‌های کامپوزیتی

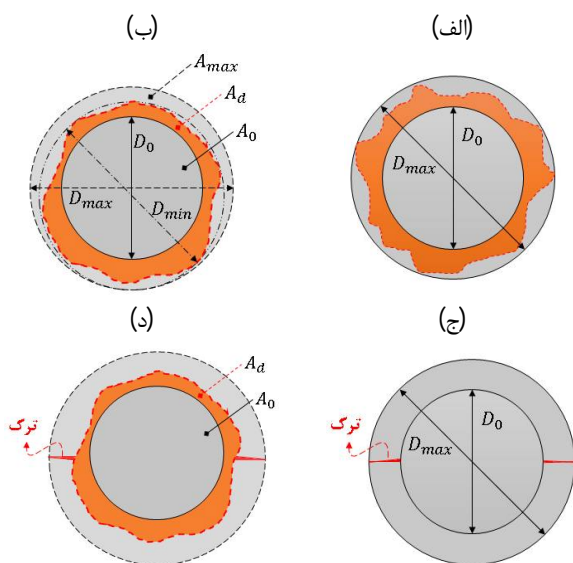


Fig. 3 Various types of geometry of drilling induced delamination in the composite laminates
شکل 3 انواع هندسه تورق حاصل از سوراخکاری در چندلایه‌های کامپوزیتی

با مقایسه شکل‌های 3- الف و ب، مشاهده می‌شود که پارامتر چن هیچ تمایزی بر میزان تورق در این دو وضعیت قائل نیست؛ در حالی که میزان تورق موجود در قسمت (ب) کمتر از قسمت (الف) است. برای حل این مشکل، داسیلوا [7] پارامتر مشابهی به نام فاکتور تورق کمینه معرفی کرد که طبق رابطه (2) تعیین می‌شود:

$$F_{dmin} = \frac{D_{min}}{D_0} \quad (2)$$

مطابق شکل 3- ب، D_{min} حداقل قطر ممکن برای دایره غیر هم مرکزی است که ناحیه تورق را پوشش می‌دهد.

پارامترهای ارائه شده توسط چن و داسیلوا، فاکتورهای یک بعدی جهت سنجش میزان تورق هستند. در فاکتورهای یک بعدی، سنجش میزان تورق فقط بر اساس قطر دایره فرضی صورت می‌گیرد. مشکلی که این فاکتورها دارند، عدم تخمین دقیق میزان تورق است. به عنوان مثال هر دوی این فاکتورها،

بدست می‌آید. در شکل 3- الف، شماتیکی از نحوه تعیین این پارامترها قابل مشاهده است.

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

پارامتر چن برای تخمین اندازه تورق ناشی از سوراخکاری در کامپوزیت‌های GFRP مناسب است، زیرا در این کامپوزیت‌ها، مشابه با شکل 3- الف، تورق شکل منظمی دارد. در حالی که هندسه تورق حاصل از سوراخکاری در کامپوزیت‌های CFRP نامنظم بوده و اغلب ترک‌هایی در اطراف آن مشاهده می‌شود (شکل‌های 3- ب تا د).

جدول 1 روش‌های متداول اندازه‌گیری شکل و اندازه تورق، و کاربردهای آنها
Table 1 Common methods used to determine the shape and size of delamination, and their applications

کاربرد	نتیجه اندازه‌گیری	روش اندازه‌گیری
اندازه‌گیری تورق نزدیک به سطح در کامپوزیت‌های GFRP (کامپوزیت‌های روشن)		میکروسکوپی [2]
اندازه‌گیری تورق نزدیک به سطح در کامپوزیت‌های GFRP (کامپوزیت‌های روشن)		اسکن دیجیتالی [3]
اندازه‌گیری تورق نزدیک به سطح در کامپوزیت‌های CFRP (کامپوزیت‌های تیره)		تصویر برداری بر پایه لیزر [4]
اندازه‌گیری تورق در کامپوزیت‌های CFRP و GFRP * به علت بازتاب امواج بوسیله الیاف شیشه، این روش برای کامپوزیت‌های GFRP توصیه نمی‌شود.		سی اسکن [5]
اندازه‌گیری دقیق و سه بعدی تورق در کامپوزیت‌های CFRP و GFRP * تا به امروز از نظر علمی دقیق‌ترین روش است ولی با توجه به هزینه و زمان بر بودن و محدودیت در ابعاد قطعه، از نظر صنعتی کمتر مورد توجه بوده است.		اشعه ایکس [6]

مشخصه‌های مته دریل پیچشی است که نقش کلیدی در پدیده تورق دارد. بنابر گزارش برخی محققان، افزایش این زاویه منجر به افزایش نیروی پیشروی و در نتیجه افزایش میزان تورق می‌شود. طبق گزارش گایتاند و همکاران [11] با بکارگیری مته دریل با زاویه راس کم (85 درجه)، فاکتور تورق تا 45 درصد کاهش می‌یابد. همچنین طبق گزارش هیسل و فیفروث [12]، زاویه راس کوچک منجر به کاهش تورق فشاری در کامپوزیت‌های CFRP می‌شود.

پارامترهای دریل کاری شامل سرعت پیشروی و برش نیز تأثیرات قابل توجهی بر مقدار فاکتور تورق در کامپوزیت‌های FRP دارند. بسیاری از محققان گزارش کرده‌اند که با افزایش سرعت پیشروی، فاکتور تورق افزایش می‌یابد. علت این امر، افزایش نیروی افزایش نیروی پیشروی به تبع افزایش سرعت پیشروی، ذکر شده است [13]. در زمینه تأثیر سرعت برش بر فاکتور تورق، نظرات مختلفی وجود دارد. برخی محققان بیان کرده‌اند که با افزایش سرعت برش، فاکتور تورق افزایش می‌یابد. طبق نظر این محققان با افزایش سرعت برش، سفتی رزین در اثر حرارت تولید شده کاهش پیدا کرده و چندلایه در سطح بار کمتری دچار تورق می‌شود [14]. در مقابل برخی از محققان گزارش کرده‌اند که با افزایش سرعت برش، فاکتور تورق کاهش می‌یابد [15].

جهت رسیدن به یک بازه بهینه برای دست یابی به سوراخی با مقدار فاکتور تورق کمینه، کارهای آماری توسط برخی از پژوهشگران صورت گرفته و بیان شده است که سرعت برش نسبتاً زیاد (150 الی 200 متر بر دقیقه) و سرعت پیشروی نسبتاً کم (0/01 الی 0/05 میلی‌متر بر دور) در این زمینه توصیه شده است [16]. طی انجام این کارهای آماری، گزارش شده است که تأثیر سرعت پیشروی بر تورق فشاری ناشی از سوراخکاری در کامپوزت‌های CFRP بیش از 60 درصد و تأثیر سرعت برش کمتر از 20 درصد می‌باشد [15].

از سوی دیگر برخی از محققان دریافته‌اند که با کاهش سرعت پیشروی هنگام رسیدن مته دریل به لایه‌های انتهایی، می‌توان فاکتور تورق را تا 37 درصد کاهش داد [13]. در این راستا، استون و کریشنامورتی [17]، به منظور بهینه سازی نیروی پیشروی حین سوراخکاری در جهت تقلیل تورق، از شبکه عصبی برای کنترل سرعت پیشروی هنگام رسیدن مته به لایه‌های انتهایی، استفاده کردند.

بنابر نتایج موجود، رابطه بین نیروی پیشروی و فاکتور تورق خطی بوده و با افزایش این نیرو، اندازه تورق افزایش می‌یابد.

هیچ تمایزی میان میزان تورق موجود در شکل‌های 3- الف و ج، قائل نیستند.

برای حل این مشکل، فاکتورهای دو بعدی که میزان تورق را بر حسب مساحت دایره فرضی می‌سنجند، توسط محققان ارائه شد. یکی از فاکتورهای دو بعدی، پارامتر پیشنهادی فراز و همکاران [8] می‌باشد که مطابق رابطه (3) تعیین می‌شود. در این رابطه، A_0 مساحت اسمی سوراخ مته و A_d مساحت ناحیه آسیب می‌باشد.

$$F_a = \left(\frac{A_d}{A_0} \right) \% \quad (3)$$

مشکل این پارامتر زمانی بروز می‌کند که اطراف ناحیه تورق، ترک‌های درشتی شکل گرفته باشد. در این مواقع، پارامتر پیشنهادی فراز و همکاران، نمی‌تواند میزان دقیق ناحیه تورق را تخمین بزند. به عنوان مثال این پارامتر تمایزی مابین میزان تورق موجود در شکل‌های 3- ب و د، قائل نیست. در حالی که تورق موجود در شکل 3- د به مراتب خطرناک‌تر از 3- ب است. برای حل این مشکل، داویم و همکاران [9] با ترکیب فاکتور تورق یک و دو بعدی، فاکتور تورق معادل را مطابق رابطه (4) ارائه دادند.

$$F_{da} = F_d + \frac{A_d}{(A_{max} - A_0)} (F_d^2 - F_d) \quad (4)$$

که A_{max} مساحت مربوط به اندازه بیشینه تورق بر اساس قطر D_{max} می‌باشد. در این معیار، بخش اول معادله نشانگر اثر اندازه ترک (فاکتور تورق معمول (F_d)) بوده و بخش دوم نمایانگر اثر مساحت ناحیه آسیب می‌باشد.

فاکتورهای تورق ذکر شده، تنها قادر به تخمین میزان تورق درون صفحه‌ای هستند؛ جهت تخمین میزان تورق بوجود آمده در سه بعد، ژو و همکاران [10] اخیراً پارامتر جدیدی مطابق رابطه (5) معرفی کردند. در این فاکتور تورق، نسبت مساحت ناحیه تورق به مساحت اسمی سوراخ (شکل 3- د) محاسبه شده و با عمل تجمیع، روی همه لایه‌ها بسط داده می‌شود.

$$F_v = \frac{V_d}{V_0} = \frac{1}{P} \sum_{k=1}^P \frac{A_d^k}{A_0} \quad (5)$$

V_d حجم تجمیعی ناحیه تورق، V_0 حجم اسمی سوراخ و P تعداد کل لایه‌های حاوی تورق می‌باشد.

در ادامه، به بررسی تأثیر متغیرهای مختلف دریل کاری بر مقدار فاکتور تورق پرداخته می‌شود.

4- ارائه نتایج و بحث

در سوراخکاری به کمک دریل، زاویه راس مته یکی از

مطابق شکل 4، نمودار فاکتور تورق بر حسب نیروی پیشروی برای کامپوزیت‌های CFRP و GFRP قابل مشاهده است. مطابق این شکل، می‌توان دریافت که با افزایش نیروی پیشروی، فاکتور تورق نیز در هر دو نوع کامپوزیت افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه این است که در مقدار نیروی پیشروی یکسان، مقدار فاکتور تورق در کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن، کمتر از الیاف شیشه است و این یعنی تأثیر نیروی پیشروی بر میزان تورق در کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن، کمتر از الیاف شیشه است. نکته دیگر این که تورق زمانی بوجود می‌آید که میزان نیروی پیشروی از یک مقدار حدی بیشتر شود، این مقدار حدی را نیروی بحرانی گویند.

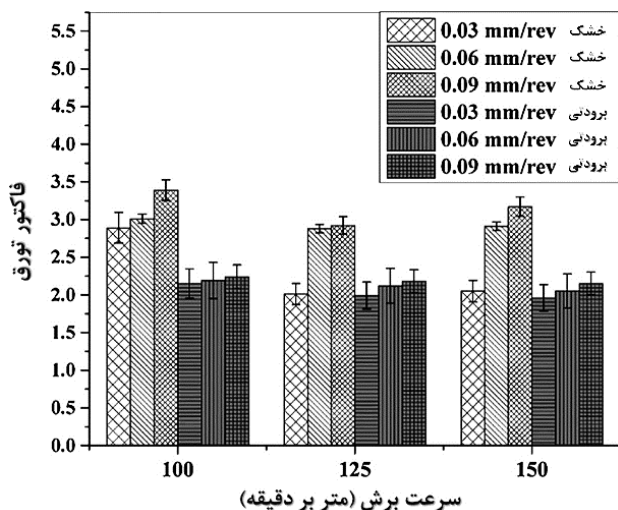


Fig. 5 Effect of dry and cryogenic conditions on the delamination factor for different cutting speeds [20]

شکل 5 تأثیر شرایط محیطی خشک و برودتی بر فاکتور تورق با سرعت‌های برش مختلف [20]

5- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر متغیرهای مختلف در راستای کاهش تورق ناشی از سوراخکاری در چندلایه‌های کامپوزیتی پرداخته شد. ابتدا پدیده تورق معرفی شده و اهمیت بررسی آن ذکر شد. سپس روش‌های سنجش‌گیری شکل، اندازه و موقعیت آسیب تورق، شرح داده شده و فاکتور تورق بر اساس روابط موجود جهت اندازه‌گیری اندازه ناحیه تورق، معرفی و بررسی شد.

در نهایت تأثیر متغیرهای مختلف در فرآیند سوراخکاری بر مقدار فاکتور تورق مورد تحلیل قرار گرفت که خلاصه‌ای از مهمترین نتایج این ارزیابی به شرح زیر است:

- افزایش زاویه راس مته دریل پیچشی، منجر به افزایش نیروی پیشروی و در نتیجه افزایش مقدار فاکتور تورق در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف می‌شود.

- با افزایش سرعت پیشروی مته، نیروی پیشروی افزایش یافته و مقدار فاکتور تورق افزایش می‌یابد. تأثیر سرعت پیشروی

در شکل 4، رابطه نیروی پیشروی و فاکتور تورق [13]

در شکل 4، نیروی بحرانی برای کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن تقریباً برابر 320 نیوتن و برای الیاف شیشه برابر 160 نیوتن می‌باشد.

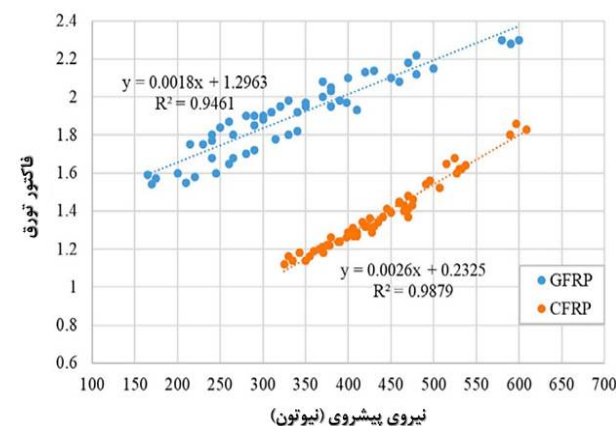


Fig. 4 Relationship between the thrust force and delamination factor [13]

شکل 4 رابطه نیروی پیشروی و فاکتور تورق [13]

میزان سهم لبه برنده در نیروی پیشروی، از 40 تا 60 درصد گزارش شده است. از سوی دیگر، برخی تحقیقات نشان داده است که با پیش مته زنی (ایجاد سوراخ اولیه) با قطری برابر با قطر لبه برنده، می‌توان نیروی پیشروی و در نتیجه مقدار فاکتور تورق را کاهش داد [18]. با این حال، با توجه به دو مرحله‌ای بودن این روش، زمان فرآیند سوراخکاری و در نتیجه هزینه تولید افزایش می‌یابد. برای حل این مشکل، می‌توان از مته‌های پله‌ای استفاده نمود. طی این فرآیند، پله اول مته سوراخی با قطر کوچک ایجاد کرده و پله دوم، قطر سوراخ را تا میزان مورد نظر افزایش می‌دهد. با این فرآیند، نیروی پیشروی و در نتیجه فاکتور تورق تا حد قابل توجهی کاهش می‌یابد.

برای کاهش میزان آسیب تورق، خنک‌کاری حین فرآیند

- Master Thesis, Nova University, Lisboa, Portugal, 2013.
- [8] A. Faraz, D. Biermann, K. Weinert, Cutting edge rounding: an innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, pp. 1185–96, 2009.
- [9] J. Davim, J. Rubio, A. Abrao, A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates, *Composites Science and Technology*, Vol. 67, pp. 1939–45, 2007.
- [10] J. Xu, C. Li, S. Mi, Q. An, M. Chen, Study of drilling-induced defects for CFRP composites using new criteria, *Composite Structures*, Vol. 201, pp. 1076–87, 2018.
- [11] VN. Gaitonde, SR. Karnik, JC. Rubio, AE. Correia, AM. Abrão, JP. Davim, Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 203, pp. 431–8, 2008.
- [12] U. Heisel, T. Pfeifroth, Influence of point angle on drill hole quality and machining forces when drilling CFRP, *Procedia CIRP*, Vol. 1, pp. 471–6, 2012.
- [13] L. Sorrentino, S. Turchetta, C. Bellini, A new method to reduce delaminations during drilling of FRP laminates by feed rate control, *Composite Structures*, Vol. 186, pp. 154–64, 2018.
- [14] V. Krishnaraj, A. Prabukarthi, A. Ramanathan, N. Elanghovan, MS. Kumar, R. Zitoune, et al., Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates, *Compos Part B- Engineering*, Vol. 43, pp. 1791–9, 2012.
- [15] H. Heidary, NZ. Karimi, G. Minak, Investigation on delamination and flexural properties in drilling of carbon nanotube/polymer composites, *Composite Structures*, Vol. 201, pp. 112–20, 2018.
- [16] J. Ahmad, *Machining of polymer composites*, Boston, MA: Springer, 2009.
- [17] R. Stone, K. Krishnamurthy, A neural network thrust force controller to minimize delamination during drilling of graphite-epoxy composites, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 36, pp. 985–1003, 1996.
- [18] MS. Won, H. Dharan, Chisel edge and pilot hole effects in drilling composite laminates, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 124, No. 2, pp. 242–7, 2002.
- [19] S. Joshi, K. Rawat, A.S.S. Balan, A novel approach to predict the delamination factor for dry and cryogenic drilling of CFRP, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 262, pp. 521–31, 2018.
- بر مقدار فاکتور تورق، بیش از سه برابر سرعت برش می‌باشد.
- مقدار بهینه برای سرعت برش و پیشروی جهت کمینه کردن مقدار فاکتور تورق، به ترتیب 150 الی 200 متر بر دقیقه و 0/01 الی 0/05 میلی‌متر بر دور، پیشنهاد شده است.
- در صورت کاهش سرعت پیشروی هنگام رسیدن مته دریل به لایه‌های انتهایی، می‌توان مقدار فاکتور تورق را تا 37 درصد کاهش داد.
- با افزایش نیروی پیشروی و بالا رفتن از مقدار بحرانی، تورق در چندلایه ایجاد شده و مقدار فاکتور تورق پیوسته به صورت خطی افزایش می‌یابد.
- با پیش مته‌زنی با قطری برابر قطر لبه برنده می‌توان نیروی پیشروی و در نتیجه مقدار فاکتور تورق را کاهش داد.
- خنک‌کاری برودتی با نیتروژن مایع در مقایسه با خنک کاری خشک، منجر به کاهش مقدار فاکتور تورق به میزان مطلوبی خواهد شد.

6- مراجع

- [1] J. Fleischer, R. Teti, G. Lanza, P. Mativenga, H. Möhring, A. Caggiano, Composite materials parts manufacturing, *CIRP Ann-Manuf Technol*, Vol. 67, pp. 603–26, 2018.
- [2] G. Caprino, V. Tagliaferri, Damage development in drilling glass fiber reinforced plastics, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 35, No. 6, pp. 817–829, 1995.
- [3] UA. Khashaba, Delamination in drilling GFR-thermoset composites, *Composite Structures*, Vol. 63, pp. 313–27, 2004.
- [4] MA. Seif, UA. Khashaba, R. Rojas-Oviedo, Measuring delamination in carbon/epoxy composites using a shadow moiré laser based imaging technique, *Composite Structures*, Vol. 79, pp. 113–8, 2007.
- [5] CC. Tsao, H. Hocheng, Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, pp. 1085–90, 2004.
- [6] WC. Chen, Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 37, No. 8, pp. 1097–108, 1997.
- [7] DNR. Da Silva, Image processing methodology for assessment of drilling induced damage in CFRP,