



## اثر ویژگی‌های هندسی مته بر تورق و خطای قطری سوراخ‌های ایجاد شده در ورق نازک کامپوزیت کولار-اپوکسی

داریوش بهارلویی<sup>1</sup>، محمد مهدی ابوترابی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

\* یزد، صندوق پستی 89195-741، abootorabi@yazd.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

استفاده از کامپوزیت‌ها در صنایع هوافضا به دلیل خواص منحصر بفرد آن‌ها به طور گسترده‌ای رو به افزایش است، تا آنجا که در برخی از هواپیماها بیش از نیمی از وزن هواپیما را مواد کامپوزیتی تشکیل می‌دهد. فرایند سوراخ‌کاری یکی از پرکاربردترین عملیات ماشین‌کاری به منظور مونتاژ قطعات کامپوزیتی و اتصال آن‌ها به یکدیگر است. تورق و خطای قطری سوراخ از مهم‌ترین عیوبی است که در هنگام سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف، ایجاد و باعث کاهش کارایی سازه کامپوزیتی می‌شود. هدف از انجام این پژوهش، بررسی تأثیر زاویه سر مته و اندازه لبه برنده عرضی مته پیچشی بر تورق و خطای قطری سوراخ در سوراخ‌کاری ورق نازک کولار-اپوکسی با صفحه پشتیبان است. آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل کامل و در 3 سطح برای نرخ پیشروی و 3 سطح برای سرعت برشی مته طراحی و انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که کمترین میانگین خطای قطری سوراخ در سوراخ‌کاری با مته پیچشی با زاویه رأس 135° با لبه برنده عرضی مته و کمترین میانگین فاکتور تورق در سوراخ‌کاری با مته پیچشی با زاویه 135° بدون لبه برنده عرضی مته به دست می‌آید.

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 12 دی 1396

پذیرش: 09 اسفند 1396

ارائه در سایت: شهریور 1397

کلیدواژه‌گان:

سوراخ‌کاری

تورق

خطای قطری سوراخ

کولار 49

مته

## The effect of drill geometrical properties on delamination and diameter error of holes in a thin sheet of Kevlar/epoxy composite

Dariush Baharlooeey, Mohammad Mahdi Abootorabi\*

Department of Mechanical Engineering, yazd University, yazd, Iran

\* P.O.B. 89195-741 yazd, Iran, abootorabi@yazd.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received 02 January 2018  
Accepted 28 March 2018  
Available Online September 2018

### Keywords:

Drilling  
Delamination  
Hole diameter error  
Kevlar 49  
Drill bit

### Abstract

The use of composites in the aerospace industries is widespread due to their unique properties, as in some planes, more than half the weight of the aircraft is composed of composite materials. Drilling is one of the most widely used machining operations to assemble composite parts and connect them to each other. Delamination and hole diameter errors are the most important defects that occur during drilling of fiber-reinforced composites which reduce the efficiency of composite structures. The purpose of this research is to investigate the effect of twist drill point angle and size of chisel edge on delamination and diameter error of the hole in drilling of a thin sheet of Kevlar/epoxy composite with a supporter plate. The experiments were designed and implemented with full factorial design and in 3 levels for feed rate and 3 levels for cutting speed. The obtained results showed that the lowest mean diameter error of the hole is obtained in drilling with a 135-degree point angle drill with chisel edge and the lowest mean delamination factor in drilling is obtained with a 135-degree point angle drill without the chisel edge.

### 1- مقدمه

آن‌ها بستگی دارد. از روش‌های مختلفی برای سوراخ کردن کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود که از روش‌های مدرن می‌توان به برش لیزری و برش به وسیله جت آب و از روش‌های سنتی می‌توان به سوراخ‌کاری با مته‌های پیچشی اشاره کرد که هنوز از لحاظ اقتصادی و کیفیت قابل قبول است [1].

سوراخ‌کاری مواد کامپوزیتی به دلیل ناهمگن و ناهمسانگرد بودن با مشکلات بیشتری نسبت به آلیاژهای فلزی همراه است.

کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف به طور گسترده‌ای در هواپیماها و سازه‌های فضایی به دلیل دارا بودن خواصی چون استحکام و چقرمگی زیاد، دمپینگ ارتعاشات و ضریب انتقال حرارتی پایین استفاده می‌شوند. سوراخ‌کاری این مواد برای مونتاژ آن‌ها امری اجتناب ناپذیر است و کارایی سازه‌های کامپوزیتی تا حد زیادی به کیفیت سوراخ‌های ایجاد شده روی

Please cite this article using:

D. Baharlooeey, M. M. Abootorabi, The effect of drill geometrical properties on delamination and diameter error of holes in a thin sheet of Kevlar/epoxy composite, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 9-17, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

اطراف سوراخ می‌شود. از معدود مطالعات صورت گرفته در زمینه سوراخ کاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کولار می‌توان به تحقیقی اشاره کرد که توسط باتاچاریا و هوریگان [5] انجام شده است. از نظر ایشان سوراخ کاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کولار با مته‌های استاندارد معمولی به دلیل چقرمگی و انعطاف پذیری این الیاف نسبت به کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن و شیشه با مشکلات متعددی همراه است. با توجه به استفاده گسترده از این کامپوزیت در صنایع خاص مانند ساخت قایق‌های بادبانی و هواپیماها، انجام تحقیق در مورد سوراخ کاری کامپوزیت کولار و چگونگی به حداقل رساندن عیوب موجود در آن از اهمیت زیادی برخوردار است.

طبق نظر خاشابا و سائو [6,7]، برای سوراخ کاری بدون عیب کامپوزیت‌های پلیمری، نیاز به انجام تحقیقات بسیاری برای انتخاب شرایط بهینه ماشین کاری است. پارامترهای هندسی موجود در لبه برنده مته‌های پیچشی باعث پیچیدگی فرایند سوراخ کاری می‌شود. یکی از این پارامترها، لبه برنده عرضی مته است که از پارامترهای نامطلوب ابزار به شمار می‌رود. سهم اثر لبه برنده عرضی مته بر نیروی محوری اغلب بین 40 تا 60% درصد گزارش شده است.

ولایودهام و کریشنامورتی تأثیر هندسه نوک ابزار بر نیروی محوری و تورق را در سوراخ کاری ورق پلاستیکی تقویت شده با الیاف شیشه بررسی کردند. مته‌های مورد استفاده در این آزمایش از جنس کارباید با هندسه متفاوت نوک مته است. طبق نظر آن‌ها در بین پارامترهای هندسی مته، لبه برنده عرضی مته و زاویه رأس مته بیشترین تأثیر را بر نیروی محوری ایجاد شده در هنگام سوراخ کاری دارد [8].

سهم لبه برنده عرضی مته از نیروی محوری تولید شده در هنگام سوراخ کاری به وسیله مته پیچشی اغلب بین 40 تا 60% گزارش شده است [9]. از این رو سائو و هوچنگ [10] تأثیر اندازه لبه برنده عرضی مته و پیش‌مته را بر نیروی محوری ایجاد شده در سوراخ کاری کامپوزیت‌ها مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای انجام دادن پیش‌مته از مته با قطری به اندازه لبه برنده عرضی مته اصلی استفاده کردند تا اثر لبه برنده عرضی مته را در سوراخ کاری نهایی از بین ببرند. طبق نتایج آن‌ها حذف اثر لبه برنده عرضی مته باعث کاهش چشمگیر نیروی محوری شده است.

هیسل و فیفروت [11] تأثیر زاویه رأس مته و افزایش سرعت برشی را بر نیروی محوری و کیفیت سوراخ‌ها (تورق، نوع براده و ...) مورد مطالعه قرار دادند. کامپوزیت مورد استفاده در

یکی از مهم‌ترین عیوب ایجاد شده در سوراخ کاری کامپوزیت‌ها، جدایش لایه‌های کامپوزیت در اطراف سوراخ است که تورق نام دارد. تورق ایجاد شده از این جهت حائز اهمیت است که می‌تواند با مرور زمان از استحکام تنش لهیدگی و قابلیت تحمل بار کامپوزیت کاسته و روی کارایی قطعه کار اثر نامطلوب بگذارد. بسیاری از کامپوزیت‌ها در مرحله مونتاژ به دلیل بروز عیوب حین ماشین کاری مرجوع می‌شوند که به دلیل قیمت بالای مواد کامپوزیتی هزینه زیادی را به سیستم وارد می‌کند [2].

مارینو پرز و همکاران [3] تأثیر سرعت برشی و ترکیبات قطعه (نوع پارچه، چیدمان، زمینه و ...) بر نیروی محوری و گشتاور ایجاد شده در فرایند سوراخ کاری پلیمر تقویت شده با پارچه کربن را با انجام آزمایش‌های تجربی و تحلیل آماری بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که نوع رزین و ایجاد سوراخ‌های متوالی بیشترین تأثیر و نوع پارچه و سرعت چرخشی اسپیندل کمترین تأثیر را بر نیروی محوری بیشینه سوراخ کاری دارند. دلیل افزایش نیرو در انجام سوراخ کاری متوالی، افزایش دما و سایش ابزار گزارش شده است. با افزایش دما، مدول الاستیک کاهش یافته و سایش ابزار باعث افزایش سطح تماس ابزار و قطعه کار می‌شود. کاهش مدول الاستیک باعث کاهش و سایش ابزار باعث افزایش نیروی بیشینه سوراخ کاری شده است. کاپلو و همکاران [4] تأثیر فرایند سوراخ کاری ورق پلاستیک تقویت شده با الیاف شیشه را بر روی رفتار مکانیکی کامپوزیت مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تأثیر پارامترهای سوراخ کاری بر نوع آسیب و گسترش صدمه وارده بر کامپوزیت را بررسی و تحلیل کردند. صدمه وارده به کامپوزیت، در سطح گسترده (محدوده تورق) و در مقیاس کوچک (ترک) مورد بحث قرار گرفت. علاوه بر این، آزمایش با پشت‌بند و بدون پشت‌بند انجام شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که بیرون زدگی الیاف با وجود استفاده از پشت‌بند و حرارت ناشی از مته پیچشی، عمدتاً متأثر از پیشروی است.

الیاف کربن، کولار و شیشه بیشترین کاربرد را در تقویت کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف دارند. در زمینه سوراخ کاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن و شیشه تحقیقات بسیاری صورت گرفته است ولی در مورد سوراخ کاری کامپوزیت‌های تقویت شده به وسیله الیاف کولار اطلاعات محدودی وجود دارد. سوراخ کاری هر کدام از این کامپوزیت‌ها با مشکلات ویژه‌ای همراه است. به طور مثال در سوراخ کاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن، سایش ابزار به دلیل ساییده بودن الیاف کربن باعث افزایش نیروی محوری و تورق در

این تحقیق به وسیله الیاف شیشه تقویت شده و ابزار مورد استفاده مته پیچشی کاربایدی با 4 زاویه رأس متفاوت بوده است. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش زاویه رأس مته باعث بهبود کیفیت در ورودی سوراخ و کاهش کیفیت در خروجی سوراخ شده است.

پارامترهای هندسی ابزار مثل زاویه رأس مته، اندازه لبه برنده عرضی مته، زاویه ماریج، زاویه آزاد تأثیر زیادی بر نیروی محوری، گشتاور و تورق ایجاد شده در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف دارند [12-14]. طبق نتایج شبیه‌سازی گائو و همکاران در زمینه سوراخ‌کاری کامپوزیت تقویت شده به وسیله الیاف کربن، با افزایش زاویه رأس مته نیروی محوری سوراخ‌کاری افزایش می‌یابد [15].

تأثیر چشمگیر اندازه لبه برنده عرضی مته و زاویه رأس مته بر نیروی محوری سوراخ‌کاری که دلیل اصلی بروز تورق در کامپوزیت‌های لایه‌ای است، باعث شده تا تحقیقاتی در این زمینه صورت گیرد. در مورد کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه و کربن مطالعاتی انجام شده اما در زمینه کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کولار اطلاعات محدودی موجود است. هدف اصلی این مقاله، بررسی تأثیر زاویه سر مته و اندازه لبه برنده عرضی مته پیچشی بر تورق و خطای قطری سوراخ در سوراخ‌کاری ورق نازک کولار-اپوکسی با صفحه پشتیبان است. تأثیر سرعت برشی مته و پیشروی نیز بر کیفیت سوراخ‌های ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفته است.



Fig. 1 Twist drill bit used in experimental tests

شکل 1 مته پیچشی مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی



Fig. 2 Experimental tests implementation and composite sheet clamping

شکل 2 نحوه انجام آزمایش‌های تجربی و گیره‌بندی ورق کامپوزیت

2- آزمایش‌های تجربی

کامپوزیت مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی، اپوکسی تقویت شده با پارچه کولار 49 است. ضخامت این کامپوزیت mm 1/4 است و 8 لایه پارچه کولار 49 در آن به کار رفته است. این کامپوزیت به روش لایه‌چینی دستی ساخته و بعد از ساخت به ابعاد  $29 \times 21 \text{ mm}^2$  برش داده شده است.

از یک دستگاه فرز CNC سه‌محوره مدل VMC 1000 برای انجام فرایند سوراخ‌کاری استفاده شده است. برای پیدا کردن محدوده پارامترها و نوع ابزار مناسب برای سوراخ‌کاری کامپوزیت کولار-اپوکسی، آزمایش‌های زیادی در محدوده وسیعی از پارامترها انجام گردید. بعد از انجام آزمایش‌های اولیه، با استفاده از 3 سرعت چرخشی 200، 1000 و 3000 rpm برای اسپیندل، 3 سطح  $6/3$ ،  $31/4$  و  $94/2 \text{ m/min}$  برای سرعت برشی و 3 سطح 100، 24 و  $300 \text{ mm/min}$  برای نرخ پیشروی انتخاب شد. در آزمایش‌های نهایی از مته پیچشی HSS با سه زاویه رأس  $85^\circ$

مهندسی ساخت و تولید ایران، مهر و آبان 1397، دوره 5 شماره 2

زاویه رأس مته بدون حذف لبه برنده عرضی مته بر میانگین فاکتور تورق در سوراخ‌کاری ورق کولار اپوکسی را نشان می‌دهد.



Fig. 4 Delamination zone, its diameter and nominal hole diameter

شکل 4 ناحیه تورق ایجاد شده، قطر ناحیه متورق و قطر نامی سوراخ



Fig. 5 Uncut fibers created in Kevlar/epoxy composite drilling

شکل 5 الیاف برش نخورده ایجاد شده در سوراخ‌کاری کامپوزیت کولار-اپوکسی

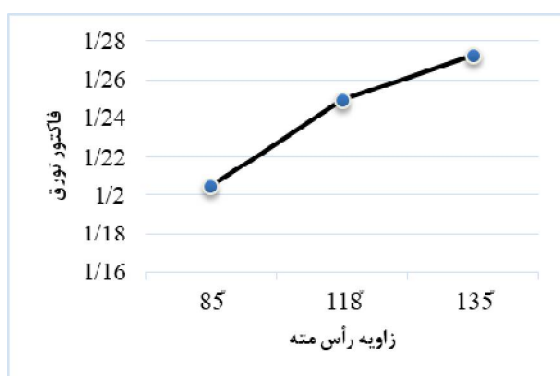


Fig. 6 Effect of tool point angle on delamination factor (with chisel edge)

شکل 6 نمودار تأثیر زاویه رأس مته بر فاکتور تورق (با لبه برنده عرضی مته)

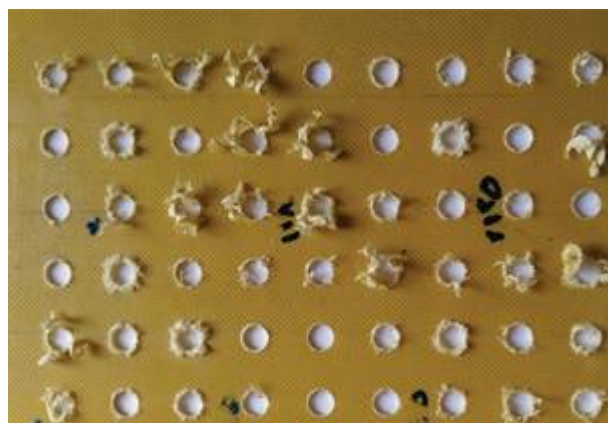


Fig. 3 Composite sheet sample after drilling test

شکل 3 نمونه ورق کامپوزیتی بعد از انجام آزمایشهای سوراخ‌کاری

برای اندازه‌گیری خسارت وارده ناشی از سوراخ‌کاری به کامپوزیت، از فاکتورهای تورق و خطای قطری سوراخ استفاده شده است. برای اندازه‌گیری ناحیه تورق، به وسیله یک منبع نوری از زیر کامپوزیت نور تابیده و از بالا عکس‌برداری با کیفیت بالا انجام شده است. به دلیل ضخامت کم کامپوزیت، قسمت‌های آسیب‌دیده و متورق با قسمت‌های سالم کامپوزیت اختلاف رنگ پیدا کرده و به راحتی قابل تشخیص است. فاکتور تورق از رابطه (1) قابل محاسبه است [16]:

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

که  $D_{max}$  بزرگترین قطر دایره منطقه آسیب‌دیده و  $D$  اندازه نامی سوراخ است (شکل 4).

بعد از تورق، خطای قطری سوراخ دومین مشکل عمده در سوراخ‌کاری کامپوزیت کولار-اپوکسی است که به دلیل ایجاد الیاف برش‌نخورده به وجود می‌آید. تراکم الیاف برش‌نخورده باعث کوچکتر شدن اندازه سوراخ نسبت به اندازه اسمی می‌شود. شکل 5 نمونه‌ای از الیاف برش‌نخورده‌ای است که به دلیل انتخاب نامناسب پارامترهای برشی در سوراخ‌کاری کامپوزیت کولار-اپوکسی ایجاد شده‌است. خطای قطری سوراخ از رابطه (2) قابل محاسبه است:

$$E_h = D - D_{min} \quad (2)$$

که  $D_{min}$  قطر واقعی سوراخ است.

### 3- نتایج و بحث

قدم اول در این پژوهش بررسی اثر زاویه سر مته بر میزان تورق و خطای قطری سوراخ است. نتایج مطالعات دورا و همکاران [17] در زمینه سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن حاکی از تأثیر زاویه رأس مته بر کاهش عیوب ایجاد شده در حین سوراخ‌کاری است. شکل 6 تأثیر افزایش

پشتیبان، تأثیر مؤلفه  $F_{1y}$  نسبت به مؤلفه  $F_{1x}$  کمتر است. با افزایش زاویه رأس مته، مؤلفه نیروی عمود بر راستای مته ( $F_{1x}$ ) کاهش یافته و باعث کاهش فاکتور تورق می‌شود.

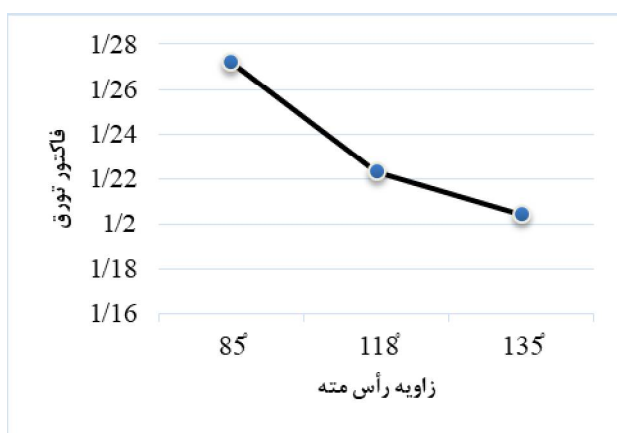


Fig. 7 Effect of tool point angle on delamination factor in drill without chisel edge

شکل 7 تأثیر زاویه رأس مته بر فاکتور تورق در مته بدون لبه برنده عرضی مته

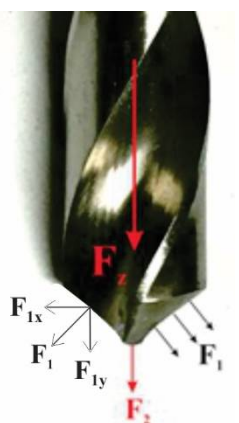


Fig. 8 Cutting forces imposed on drill in drilling process

شکل 8 نیروهای وارده بر مته در عملیات سوراخ‌کاری [6]

شکل 9 میانگین خطای قطری اندازه‌گیری شده در سوراخ‌کاری با زاویه رأس مته مختلف بدون حذف لبه برنده عرضی مته را نشان می‌دهد. کمترین میانگین خطا به ترتیب مربوط به مته با زاویه رأس  $135^\circ$ ،  $85^\circ$  و  $118^\circ$  است. کشیده شدن الیاف برش نخورده کوتاه باعث تشکیل الیاف برش نخورده بلند و افزایش تراکم آن‌ها و در نهایت افزایش خطای قطری سوراخ می‌شود. سرعت برشی بالا و پیشروی کم مهم‌ترین عامل ایجاد الیاف برش نخورده و خطای قطری سوراخ در سوراخ‌کاری کامپوزیت کولار-اپوکسی است. نیروی زیاد سوراخ‌کاری در نرخ‌های پیشروی زیاد نیز می‌تواند باعث تشکیل الیاف‌های برش نخورده بلند با ضخامت زیاد شود.

برای افزایش دقت میانگین مقادیر ثبت شده در سوراخ‌کاری‌های انجام شده با هر مته، سه سوراخ از نه سوراخ زده شده که بیشترین فاکتور تورق و خطای قطری سوراخ را داشتند از میانگین‌گیری شکل‌های 6 و 7 و 9 و 10 حذف شده‌اند. شکل 6 به وضوح نشان می‌دهد که افزایش زاویه سر مته باعث افزایش فاکتور تورق شده است که دلیل آن افزایش نیروی محوری و در نهایت جدایش بین لایه‌های کامپوزیت است. افزایش نیروی محوری با افزایش زاویه سر مته در این حالت به دلیل پهن شدن و دور شدن از شکل گوه‌ای ناحیه سر مته است که نفوذ به داخل قطعه‌کار را سخت‌تر می‌کند [18]. کمترین فاکتور تورق به دست‌آمده در زوایای  $85^\circ$ ،  $118^\circ$  و  $135^\circ$  به ترتیب  $1/18$ ،  $1/16$  و  $1/18$  بوده است. سینگ و همکاران نیز نشان دادند که آسیب ایجاد شده در سوراخ‌کاری با زاویه رأس مته  $90^\circ$  درجه، کمتر از آسیب ایجاد شده در سوراخ‌کاری با زاویه رأس  $104^\circ$  و  $118^\circ$  است.

بر اساس مطالعات لازار و زیروچاکیس [19]، توزیع نیروی سوراخ‌کاری در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های لایه‌ای تقویت‌شده با الیاف بلند، به بهبود عیوب میان‌لایه‌ای مانند تورق کمک می‌کند و بیشینه نیروی سوراخ‌کاری در زمان تماس نوک مته با اولین لایه کامپوزیت و زمان خروج نوک مته از قطعه‌کار، نقطه شروع تورق در خروجی سوراخ است. از نظر آن‌ها هندسه مته به خصوص لبه برنده عرضی مته و پیشروی محوری بیشترین تأثیر را بر کاهش نیروی بحرانی دارد.

شکل 7 نمودار فاکتور تورق بر حسب زاویه رأس مته در سوراخ‌کاری با مته پیچشی بدون لبه برنده عرضی مته را نشان می‌دهد. نتایج به دست‌آمده عکس نتیجه به دست آمده در سوراخ‌کاری با مته پیچشی با لبه برنده عرضی مته (شکل 6) است و با افزایش زاویه رأس مته از  $85^\circ$  به  $135^\circ$ ، از مقدار فاکتور تورق کاسته شده است. با توجه به نظر خاشابا [6]، حدود 40 تا 60٪ از نیروی محوری  $F_z$  مربوط به نیروی  $F_2$  (شکل 8) است که در لحظه ورود مته به ورق کامپوزیت وارد می‌شود. با حذف اثر لبه برنده عرضی مته به وسیله پیش‌مته، می‌توان نیروی محوری سوراخ‌کاری را تا 50٪ کاهش داد [20].

برای توضیح چگونگی کاهش تورق با افزایش زاویه رأس مته در حالت بدون لبه برنده عرضی می‌توان از شکل 8 استفاده نمود. تفاوت این حالت با حالت قبلی که مته با لبه برنده عرضی بررسی شد در آن است که با حذف لبه برنده عرضی مته، نیروی  $F_1$  نقش تأثیرگذار بر فاکتور تورق را ایفا می‌کند. نیروی  $F_1$  از دو مؤلفه  $F_{1x}$  و  $F_{1y}$  تشکیل شده است. به دلیل وجود صفحه

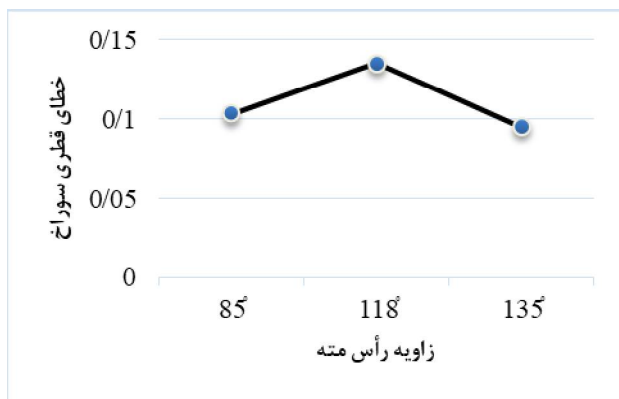


Fig. 10 Mean diameter error in drilling with different point angles (drill without chisel edge)

شکل 10 میانگین خطای قطری در سوراخ‌کاری‌های انجام شده با زوایای مختلف رأس مته بدون لبه برنده عرضی مته

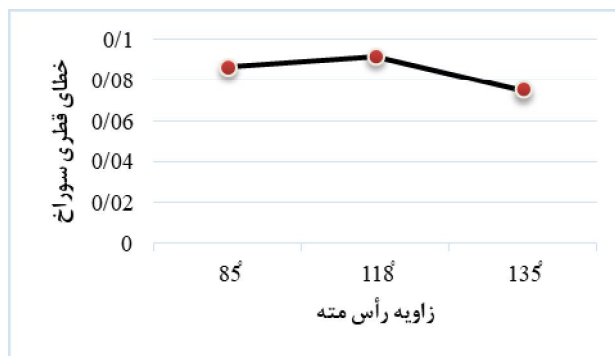


Fig. 9 Mean diameter error in drilling with different point angles (drill with chisel edge)

شکل 9 میانگین خطای قطری در سوراخ‌کاری‌های انجام شده با زوایای مختلف رأس مته با لبه برنده عرضی مته

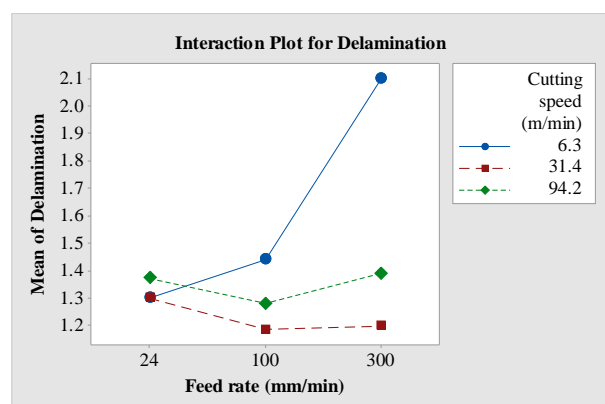


Fig. 11 Delamination factor vs. feed rate and cutting speed in different cutting speed in drilling with 135-degree point angle drill (with chisel edge)

شکل 11 فاکتور تورق برحسب نرخ پیشروی و سرعت برشی در مقادیر مختلف سرعت برشی در سوراخ‌کاری با مته دارای زاویه رأس 135° با لبه برنده عرضی مته

در سرعت برشی 31/4 و 94/2 m/min، با افزایش نرخ پیشروی و رسیدن به نسبت مناسب بین سرعت برشی و نرخ پیشروی، از فاکتور تورق کاسته شده و پس از عبور از نرخ پیشروی 100 mm/min دوباره به دلیل افزایش نیروی محوری فاکتور تورق اندکی افزایش یافته است.

شکل 12 اثر متقابل سرعت برشی و نرخ پیشروی بر فاکتور تورق هنگام سوراخ‌کاری با مته بدون لبه برنده عرضی مته را نشان می‌دهد. در سرعت برشی 6/3 m/min و نرخ پیشروی 24 mm/min تورق کمی مشاهده می‌شود ولی به دلیل طولانی‌بودن زمان، سوراخ‌کاری با این پارامترها از لحاظ اقتصادی به صرفه نیست. در سرعت 6/3 m/min، با افزایش نرخ پیشروی تا 300 mm/min فاکتور تورق با شیب یکسانی افزایش پیدا می‌کند.

این نوع الیاف برش نخورده به دلیل کشیدگی یا هل دادن الیاف به جای برش آن توسط لبه برنده مته ایجاد می‌شود.

یکی از دلایل افزایش خطای قطری سوراخ، برش نخوردن و فشار دادن الیاف به خارج سوراخ است. با افزایش زاویه رأس مته از 118° به 135°، نیروی محوری سوراخ‌کاری و در نتیجه نیروی  $F_{1x}$  افزایش می‌یابد. به دلیل افزایش زاویه رأس مته، مؤلفه افقی  $F_{1x}$  که در راستای عمود بر محور مته است درصد کمتری از کل نیروی  $F_1$  را تشکیل می‌دهد. به نظر می‌رسد در مته با زاویه رأس 135°، مقدار عددی نیروی افقی  $F_{1x}$  کمتر از حالت 118° بوده و در نتیجه، فشار دادن الیاف به اطراف و خطای قطری سوراخ نیز کاهش یافته است.

شکل 10 خطای قطری سوراخ در سوراخ‌کاری‌های انجام شده با 3 مته با زاویه رأس 85°، 118° و 135° که لبه برنده عرضی مته آن‌ها حذف شده است را نشان می‌دهد. مشابه شکل 9، در مته‌های بدون لبه برنده عرضی مته نیز کمترین میانگین خطا در مته با زاویه رأس 135° درجه و بیشترین میانگین خطا در سوراخ‌کاری با مته دارای زاویه رأس 118° اتفاق افتاده است. با توجه به نتایج مطلوب به دست آمده با مته با زاویه رأس 135°، در ادامه پارامترهای برشی تأثیرگذار بر فاکتور تورق در سوراخ‌کاری با این مته مورد بررسی قرار گرفته است. اثر متقابل نرخ پیشروی و سرعت برشی بر فاکتور تورق در سوراخ‌کاری با مته دارای زاویه رأس 135° با لبه برنده عرضی مته در شکل 11 نشان داده شده است. در سرعت برشی 6/3 m/min با افزایش نرخ پیشروی از 24 تا 300 mm/min، فاکتور تورق افزایش پیدا کرده است.

کمترین مقدار تورق در سرعت 6/3 m/min در پیشروی 24 mm/min به دست آمد و پس از آن با افزایش نرخ پیشروی، افزایش نیروی محوری سبب افزایش فاکتور تورق شده است.

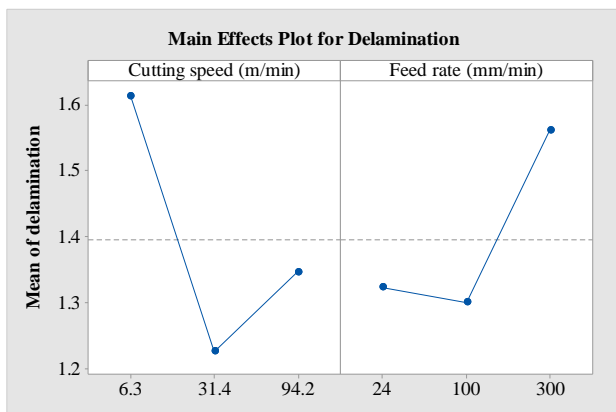


Fig. 13 Main effects plot of cutting speed and feed rate on delamination factor with 135-degree point angle drill (with chisel edge)

شکل 13 نمودار اثرات اصلی پارامترهای سرعت برشی و نرخ پیشروی بر فاکتور تورق در سوراخ‌کاری با مته دارای زاویه رأس  $135^\circ$  با لبه برنده عرضی مته

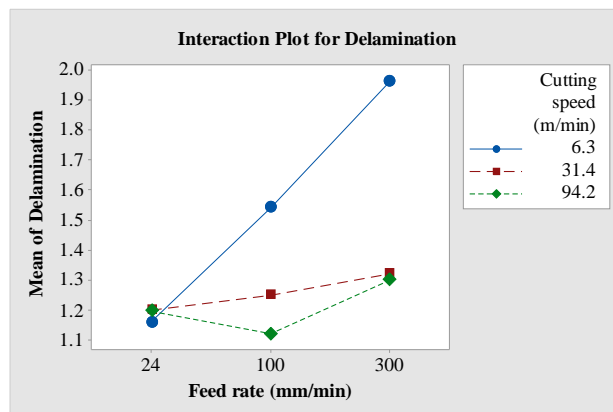


Fig. 12 Delamination factor vs. feed rate and cutting speed in different cutting speed in drilling with 135-degree point angle drill (without chisel edge)

شکل 12 فاکتور تورق برحسب نرخ پیشروی و سرعت برشی در مقادیر مختلف سرعت برشی در سوراخ‌کاری با مته دارای زاویه رأس  $135^\circ$  بدون لبه برنده عرضی مته

این دو پارامتر تأثیر زیادی روی نیروی سوراخ‌کاری و تورق داشته به طوری که نیروی سوراخ‌کاری با افزایش سرعت برشی مته کاهش و با افزایش نرخ پیشروی، قطر مته و درصد حجمی الیاف افزایش می‌یابد. پارامترهای بهینه برشی به دست آمده در سوراخ‌کاری انجام شده توسط فادنیس و همکاران [22] بر روی اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن نیز، سرعت برشی زیاد ( $>600$  rpm) و نرخ پیشروی کم ( $<1500$  mm/min) گزارش شده است.

کمترین میزان متوسط فاکتور تورق در سرعت برشی  $31/4$  m/min و نرخ پیشروی  $100$  mm/min، به دلیل اعمال نیروی محوری متعادل مشاهده شده است. رعایت نسبت مناسب بین پارامترهای سوراخ‌کاری به کنترل تورق کمک می‌کند. نرخ پیشروی زیاد و سرعت برشی کم موجب اعمال نیروی محوری زیاد و در نتیجه الیاف برش نخورده بلند و تورق می‌شود. نرخ پیشروی کم و سرعت برشی زیاد نیز موجب افزایش مدت زمان تماس ابزار با قطعه کار و افزایش دمای ناشی از اصطکاک می‌شود. دمای زیاد باعث کم شدن ثبات زمینه کامپوزیت و نرم شدن بیش از حد الیاف و تشکیل پرزهای متراکم می‌شود.

نمودار اثرات اصلی پارامترهای سرعت برشی مته و نرخ پیشروی بر فاکتور تورق در سوراخ‌کاری با مته با زاویه  $135^\circ$  بدون لبه برنده عرضی مته در شکل 14 نشان داده شده است. با حذف لبه برنده عرضی مته نیروی محوری  $F_1$  (شکل 8) از بین رفته و نیروی  $F_2$  نیروی تأثیرگذار بر فاکتور تورق است. با توجه به شکل 14، با افزایش سرعت برشی از  $6/3$  تا  $31/4$  m/min با شیبی تند از میزان فاکتور تورق کاسته شده و پس از عبور از سرعت برشی  $31/4$  m/min این کاهش با شیبی ملایم‌تر ادامه

این افزایش تورق به دلیل افزایش نیروی محوری است که با توجه به پایین بودن سرعت برشی و بالا بودن نرخ پیشروی ایجاد می‌شود. در سرعت برشی  $31/4$  m/min رفتاری مشابه سرعت  $6/3$  m/min مشاهده می‌شود با این تفاوت که شیب افزایش فاکتور تورق که به دلیل بالاتر بودن سرعت برشی مته و در نتیجه کاهش نیروی محوری کمتر است.

شکل 13 نمودار اثرات اصلی پارامترهای سرعت برشی و نرخ پیشروی بر فاکتور تورق در سوراخ‌کاری با مته با زاویه  $135^\circ$  با لبه برنده عرضی مته را نشان می‌دهد. با افزایش سرعت برشی از  $6/3$  تا  $31/4$  m/min از فاکتور تورق کاسته شده و بعد از آن تا سرعت برشی  $94/2$  m/min، این روند افزایشی است. علت افزایش تورق از سرعت  $94/2$  m/min به بعد افزایش بیش از حد دما و نرم شدن الیاف تقویت‌کننده است که باعث کشیده شدن الیاف به جای برش آن‌ها می‌شود. نرخ پیشروی کم افزایش دمای بیش از حد باعث کاهش ثبات زمینه کامپوزیت و تورق شده به همین دلیل با افزایش نرخ پیشروی از  $24$  تا  $100$  mm/min کاهش فاکتور تورق مشاهده می‌شود و با افزایش پیشروی از  $100$  تا  $300$  mm/min فاکتور تورق افزایش زیادی یافته است. دلیل این افزایش تورق افزایش نیروی محوری بوده که در برخی مقالات به آن اشاره شده است. طبق گزارش‌های پانچاگنولا و پالانیاندی [21] در مقاله مروری آن‌ها در زمینه سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های پلیمری و نانوپلیمری، به طور کلی کمترین میزان تورق در نرخ پیشروی کم و سرعت برشی بالا به دست می‌آید.

لبه برنده عرضی مته در سرعت برشی  $94/2 \text{ m/min}$  و پیشروی  $100 \text{ mm/min}$  به ترتیب با فاکتور تورق  $1/06$  و  $1/08$  به دست آمد که به ترتیب 4 و 3 درصد نسبت به بهترین نتیجه کسب شده با مته با زاویه رأس  $118^\circ$  بهبود داشته‌است.

- کمترین مقدار خطای قطری سوراخ به دست آمده در سوراخ‌کاری با مته پیچشی با زاویه رأس  $135^\circ$  و بدون لبه برنده عرضی مته در سرعت برشی  $94/2 \text{ m/min}$  و پیشروی  $100 \text{ mm/min}$  به اندازه  $0/01 \text{ mm}$  بوده که 20% نسبت به بهترین نتیجه به دست آمده با مته  $118^\circ$  بهبود داشته‌است.

- کمترین میانگین خطای قطری سوراخ در سوراخ‌کاری با مته پیچشی با زاویه رأس  $135^\circ$  در حالت با لبه برنده عرضی مته و کمترین میانگین فاکتور تورق در حالت بدون لبه برنده عرضی مته به دست آمده‌است.

- در سوراخ‌کاری با مته همراه با لبه برنده عرضی مته، افزایش زاویه رأس مته باعث افزایش فاکتور تورق و در سوراخ‌کاری با مته با حذف لبه برنده عرضی مته، افزایش زاویه رأس مته سبب کاهش فاکتور تورق شده‌است.

## 5- مراجع

- [1] V. Tagliaferri, G. Caprino, A. Diterlizzi, Effect of drilling parameters on the finish and mechanical properties of GFRP composites, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 30, No. 1, pp. 77-84, 1990/01/01, 1990 .
- [2] W. L. Zhang Linbo, Wang Xin, Study on vibration drilling of fiber reinforced plastics with hybrid variation parameters method, *Composites*, Vol. Part A 34, pp. 237-244, 2003 .
- [3] J. L. Merino-Pérez, R. Royer, E. Merson, A. Lockwood, S. Ayvar-Soberanis, M. B. Marshall , Influence of workpiece constituents and cutting speed on the cutting forces developed in the conventional drilling of CFRP composites, *Composite Structures*, Vol. 140, pp. 621-629, 2016 .
- [4] E. Capello, V. Tagliaferri, Drilling Damage of GFRP and Residual Mechanical Behavior—Part I: Drilling Damage Generation, 2001 .
- [5] D. Bhattacharyya, D. P. W. Horrigan, A study of Hole Drilling in kevlar composites, *Composres Science and Technology*, Vol. 58, pp. 267-283, 1998
- [6] U. A. Khashaba, Drilling of polymer matrix composites: A review, *Journal of Composite Materials*, Vol. 47, No. 15, pp. 1817-1832, 2013 .
- [7] C. C. Tsao, Experimental study of drilling composite materials with step-core drill, *Materials & Design*, 2008 .

دارد. با افزایش نرخ پیشروی از 24 تا  $100 \text{ mm/min}$  و افزایش نیروی سوراخ‌کاری فاکتور تورق افزایش یافته‌است و این روند در نرخ پیشروی 100 تا  $300 \text{ mm/min}$  با شیب تندتری ادامه یافته‌است.

دلیل کاهش تورق با افزایش سرعت برشی در سوراخ‌کاری کامپوزیت کولار-اپوکسی، کاهش نیروی محوری است که عامل اصلی بروز تورق است.

طبق گزارشات پنچاگنولا و پالانیادی [21] در مقاله مروری آن‌ها در زمینه سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های پلیمری و نانوپلیمری، به طور کلی کمترین میزان تورق در نرخ پیشروی کم و سرعت برشی بالا به دست می‌آید. این دو پارامتر تأثیر زیادی روی نیروی سوراخ‌کاری و تورق داشته‌به طوری که نیروی سوراخ‌کاری با افزایش سرعت برشی مته کاهش و با افزایش نرخ پیشروی، قطر مته و درصد حجمی الیاف افزایش می‌یابد.

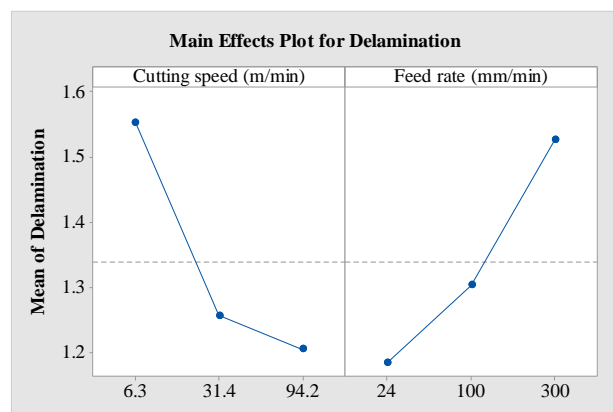


Fig. 14 Main effects plot of cutting speed and feed rate on delamination factor with  $135^\circ$ -degree point angle drill (without chisel edge)

شکل 14 نمودار اثرات اصلی پارامترهای سرعت برشی و نرخ پیشروی بر فاکتور تورق در سوراخ‌کاری با مته دارای زاویه رأس  $135^\circ$  بدون لبه برنده عرضی مته

## 4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر زاویه رأس مته، لبه برنده عرضی مته و پارامترهای ماشین‌کاری بر فاکتور تورق و خطای قطری سوراخ در سوراخ‌کاری ورق کولار-اپوکسی با صفحه پشتیبان مورد بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تجربی انجام شده به شرح زیر است:

- در سوراخ‌کاری با مته بدون لبه برنده عرضی افزایش سرعت برشی و کاهش نرخ پیشروی باعث کاهش تورق و بهبود کیفیت سوراخ‌ها می‌شود.

- کمترین مقدار فاکتور تورق، در سوراخ‌کاری با مته پیچشی با زاویه رأس  $85^\circ$  در هر دو حالت با لبه برنده عرضی مته و بدون



- Engineering Manufacture*, Vol. 226, No. 1, pp. 28-42, 2012 .
- [16] F. Lissek, J. Tegas, M. Kaufeld, Damage Quantification for the Machining of CFRP: An Introduction about Characteristic Values Considering Shape and Orientation of Drilling-induced Delamination, *Procedia Engineering*, Vol. 149, pp. 2-16, 2016 .
- [17] L. M. P. Durão, M. F. S. F. de Moura, A. T. Marques , Numerical simulation of the drilling process on carbon/epoxy composite laminates, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 37, pp. 1325-1333, 2006 .
- [18] V. N. Gaitonde, S. R. Karnik, J. C. Rubio, A. E. Correia, A. M. Abrão, J. P. Davim, Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 203, No. 1-3, pp. 431-438, 2008 .
- [19] M.-B. Lazar, P. Xirouchakis, Experimental analysis of drilling fiber reinforced composites, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 51, No. 12, pp. 937-946, 2011 .
- [20] M. S. Won, C. K. H. Dharan, Chisel Edge and Pilot Hole Effects in Drilling Composite Laminates, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 124, No. 2, pp. 242-247, 2002 .
- [21] K. K. Panchagnula, K. Palaniyandi, Drilling on fiber reinforced polymer/nanopolymer composite laminates: a review, *Journal of Materials Research and Technology*, 2017 .
- [22] V. A. Phadnis, F. Makhdum, A. Roy, V. V. Silberschmidt, Drilling in carbon/epoxy composites: Experimental investigations and finite element implementation, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 47, No. Supplement C, pp. 41-51, 2013.
- [8] A. Velayudham, R. Krishnamurthy, Effect of point geometry and their influence on thrust and delamination in drilling of polymeric composites, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 185, No. 1-3, pp. 204-209, 2007 .
- [9] S. Jain, D. C. H. Yang, Delamination-Free Drilling of Composite Laminates, *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 116, No. 4, pp. 475-481, 1994 .
- [10] C. C. Tsao, H. Hocheng, The effect of chisel length and associated pilot hole on delamination when drilling composite materials, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, No. 11, pp. 1087-1092, 2003 .
- [11] U. Heisel, T. Pfeifroth, Influence of Point Angle on Drill Hole Quality and Machining Forces When Drilling CFRP, *Procedia CIRP*, Vol. 1, pp. 471-476, 2012 .
- [12] J. P. Davim, P. Reis, C. C. António, Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up, *Composites Science and Technology*, Vol. 64, No. 2, pp. 289-297, 2004 .
- [13] L. M. P. Durão, D. J. S. Gonçalves, J. M. R. S. Tavares, V. H. C. de Albuquerque, A. Aguiar Vieira, A. Torres Marques, Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates, *Composite Structures*, Vol. 92, No. 7, pp. 1545-1550, 2010 .
- [14] B. R. N. Murthy, L. L. R. Rodrigues, N. Y. Sharma, D. Anjaiah , Influence of process parameters on the quality of hole in drilling of GFRP composites - an experimental investigation using DOE, in *Proceeding of*, 87-90 .
- [15] D.-M. Guo, Q. Wen, H. Gao, Y.-J. Bao, Prediction of the cutting forces generated in the drilling of carbon-fibre-reinforced plastic composites using a twist drill, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of*