

بررسی سوراخ کاری لوله‌های کامپوزیتی تولیدشده به روش رشته‌پیچی با استفاده از روش طراحی عاملی

محمد مهدی سهامی پور دهقان، حسین حیدری*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۸ تیر ۱۳۹۶
بازنگری: ۵ مهر ۱۳۹۶
پذیرش: ۲۱ مهر ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲۲ مهر ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

لوله‌های کامپوزیتی
سوراخ کاری
فاکتور جدایش لایه‌ای
مقاومت باقیمانده فشاری
طراحی آزمایش عاملی کامل

چکیده: سوراخ کاری یکی از فرآیندهای اصلی ماشین کاری برای تکمیل کردن فرآیند ساخت و مونتاژ در لوله‌های کامپوزیتی می‌باشد. هنگام سوراخ کاری ممکن است آسیب‌هایی نظیر جدایش لایه‌ای و ترک ماتریس در اطراف سوراخ، باعث افت استحکام باقیمانده لوله‌های کامپوزیتی شود. در این مقاله اثر پارامترهای سوراخ کاری نظیر سرعت اسپیندل، سرعت پیشروی، قطر و شکل مته سوراخ کاری بر نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه‌ای، برای لوله‌های کامپوزیتی که به روش رشته‌پیچی تولید شده‌اند، به کمک روش طراحی عاملی بررسی گردید. مطابق نتایج پارامترهای تأثیرگذار بر فاکتور جدایش لایه‌ای به ترتیب شکل هندسی مته، سرعت پیشروی، قطر مته و سرعت اسپیندل تعیین گردید. مطابق نتایج با انتخاب ابزار مته ماریچ با قطر ۱۲ میلی‌متر، سرعت اسپیندل ۱۰۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه، میزان فاکتور جدایش لایه‌ای به حداقل اندازه ممکن می‌رسد. بهترین و بدترین نمونه سوراخ کاری شده از نظر ابعاد منطقه خرابی تحت آزمایش فشار قرار داده شد و استحکام باقیمانده فشاری آن بررسی گردید. مطابق نتایج با کاهش فاکتور جدایش لایه‌ای استحکام باقیمانده فشاری افزایش می‌یابد. همچنین اگر پارامترهای ورودی در سوراخ کاری به درستی انتخاب گردد، در مته ماریچ ۸ میلی‌متری نسبت به مته بردپوینت با همان قطر، در حدود ۱۲ درصد استحکام باقیمانده فشاری افزایش می‌یابد.

۱- مقدمه

امروزه به واسطه توسعه صنایع مختلف، نیاز به مواد کامپوزیتی بیش از پیش احساس می‌شود. مهم‌ترین مزیت مواد کامپوزیتی مقاومت ویژه بالا، مقاومت به خوردگی و نسبت استحکام به وزن پایین می‌باشد [۱]. با گسترش صنعت هوافضا و خودروسازی و صنایع دیگر، لوله‌های کامپوزیتی با روش رشته‌پیچی^۱ سهم عظیمی از تولیدات را به خود اختصاص دادند [۲]. لوله‌های کامپوزیتی تحت فشار که به روش رشته‌پیچی با الیاف شیشه تولید می‌شوند و به صورت گسترده در صنایع انتقال سیال، مخازن تحت فشار، صنایع فضایی، نظامی و خودروسازی به کار گرفته می‌شوند. این لوله‌ها با الیاف مختلف تحت زاویه‌های مختلف و لایه چینی متعدد طراحی و ساخته می‌شوند. در این میان الیاف شیشه به دلیل مزیت‌های بسیاری نظیر استحکام بالا، قیمت پایین و مقاومت شیمیایی بالا بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از فرآیندهای مهم در تکمیل ساخت و مونتاژ لوله‌های کامپوزیتی، سوراخ کاری آن‌ها می‌باشد [۳].

ماشین کاری کامپوزیت‌ها جزء مراحل پایانی و تکمیل‌کننده بوده که مشکلات خاص خود را دارد و هرگونه عیبی در آن موجب رد شدن قطعه می‌گردد که به این سبب هزینه‌های زیادی را به همراه دارد [۴]. برخلاف

ماشین کاری فلزات که هندبوک‌های بسیاری در جهت انتخاب بهترین پارامترهای برش آن انتشار یافته است [۵، ۶]، منابع بسیار کمی برای سوراخ کاری لوله‌های کامپوزیتی وجود دارد. سوراخ کاری لوله‌های کامپوزیتی در مقایسه با فلزات، دشوار و متفاوت است. عواملی مانند ناهمسانگردی^۲ حاصل از الیاف تقویت‌کننده، عدم انتقال حرارت مناسب، برش هم‌زمان ماتریس نرم و الیاف سخت، قابلیت ماشین کاری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اگرچه روش‌های مختلفی برای ایجاد سوراخ بر روی قطعات کامپوزیتی وجود دارد، با این وجود هنوز سوراخ کاری با مته، مقرون به صرفه‌ترین روش برای ایجاد سوراخ جهت اتصال لوله‌های کامپوزیتی می‌باشد [۷]. تاکنون تحقیقات انجام‌شده در زمینه سوراخ کاری کامپوزیت‌ها اغلب بر روی صفحات تخت بوده و به سوراخ کاری لوله‌های کامپوزیتی توجه چندانی نشده است. از طرفی به علت دارا بودن شکل و ساختار متفاوت، نمی‌توان نتایج به‌دست‌آمده از سوراخ کاری صفحات تخت را با لوله‌های کامپوزیتی تطبیق داد.

مهم‌ترین عیوبی که در سوراخ کاری لوله‌های کامپوزیتی دیده می‌شود شامل شکست ماتریس، جدایش لایه‌ای^۳، بیرون کشیدگی الیاف، انقباض سوراخ و سوختگی ماتریس است که باعث تأثیر بر خواص مکانیکی اجزا و کاهش مقاومت نهایی لوله می‌شود [۸، ۹].

جدایش لایه‌ای از مهم‌ترین عیوب سوراخ کاری کامپوزیت‌ها بوده که

1 Filament winding

2 Anisotropy

3 Delamination

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: heidary@tafreshu.ac.ir

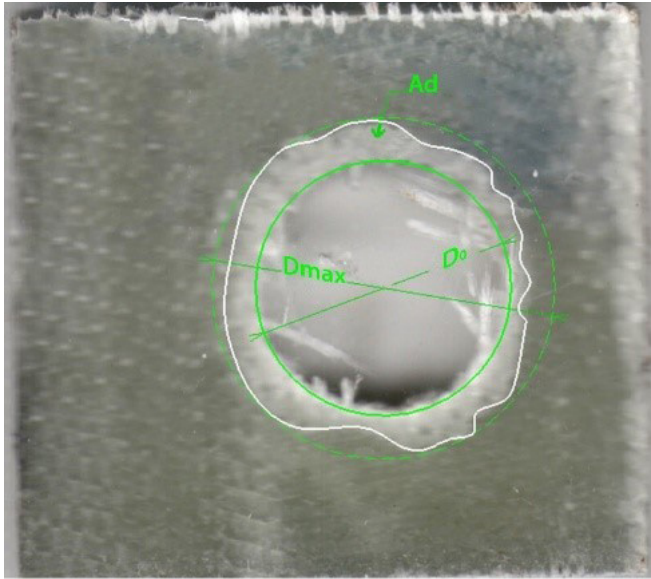


Fig. 2. Measurement of the delaminated area at drill exit

شکل ۲: اسکن دیجیتالی منطقه جدایش بین لایه‌های در خروج مته

میزان جدایش لایه‌های و بیرون کشیدگی الیاف در نمونه‌های سوراخ کاری شده توسط روش‌های میکروسکوپ نوری، رادیوگرافی^۳ و اسکن دیجیتالی^۴ (شکل ۲) عکس برداری می‌شود [۱۵]. پس از تصویربرداری می‌توان توسط نرم افزارهای پردازش تصویر ناحیه خرابی را مشخص نموده و قطر حداکثر خرابی و مساحت ناحیه ای که دچار جدایش لایه‌های شده است را به دست آورد. برای تعیین میزان خرابی از فاکتور جدایش لایه‌های (F_d) مطابق با رابطه (۱) استفاده می‌شود.

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

دیویم^۵ و همکاران [۱۶]، فاکتور جدایش لایه‌های اصلاح شده را مطابق با رابطه (۲) ارائه نمودند. آن‌ها در این فاکتور اندازه ترک و اندازه ناحیه خرابی را با هم در نظر گرفتند.

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

که در آن D_0 قطر اسمی مته، A_0 مساحت اسمی سوراخ ایجاد شده با مته، D_{max} حداکثر اندازه قطر خرابی، A_{max} اندازه ناحیه خرابی با قطر D_{max} و A_d مساحت ناحیه خرابی می‌باشد.

دیویم و همکاران [۱۷] اثر پارامترهای سوراخ کاری شامل سرعت برشی و نرخ پیشروی، بر آسیب و زبری سطح الیاف شیشه که به وسیله لایه چینی دستی ساخته شده‌اند را، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با کمک تکنیک تاگوچی^۶ آزمایش‌های خود را طراحی کردند و با استفاده از دو نوع مته،

- 3 Radiography
- 4 Digital scanner
- 5 Davim
- 6 Taguchi Method

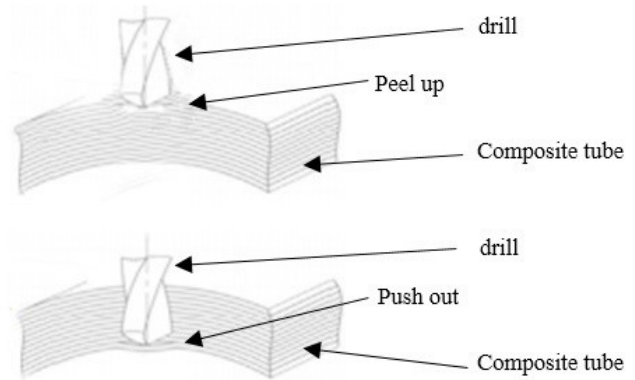


Fig. 1. Peel up and push down Delamination

شکل ۱: جدایش لایه‌های در هنگام ورود و خروج مته

به‌طور معمول در هنگام ورود و خروج مته اتفاق می‌افتد. به جدایش لایه‌های در هنگام ورود مته پیل آپ^۱ و به جدایش لایه‌های در هنگام خروج مته پوش اوت^۲ می‌گویند (شکل ۱).

جدایش لایه‌های در هنگام ورود و خروج مته، متأثر از تغییرات نیروی محوری، سرعت اسپیندل، سرعت پیشروی و هندسه مته می‌باشد. در هنگام سوراخ کاری، لبه‌های برشی مته با لوله تماس برقرار می‌کند، نیروی برشی اعمال شده در جهت محیطی، یک نیرو در راستای محوری به سمت بالا ایجاد می‌کند که باعث ایجاد جدایش لایه‌های در سطح بالایی ورقه کامپوزیتی می‌شود. زمانی که مته به انتهای قطعه می‌رسد ضخامت لایه‌های بریده شده لوله کم می‌شود. در چنین شرایطی تنش ناشی از نیروی محوری از مقاومت بین لایه‌های فراتر می‌رود و جدایش لایه‌های شدیدی رخ می‌دهد [۱۰، ۱۱].

برای بررسی فرآیند سوراخ کاری لوله‌های کامپوزیتی، پارامترهای قابل تنظیم فرآیند نظیر سرعت برشی، سرعت پیشروی، قطر و شکل هندسی مته بسیار مهم و تأثیرگذار می‌باشند. با تنظیم صحیح و انتخاب مناسب این پارامترها، راندمان ماشین کاری بالا رفته و آسیب‌های احتمالی قطعات تولیدی کاهش می‌یابد و در نتیجه در هنگام به کارگیری در سازه‌های کامپوزیتی، عملکرد اجرایی آن‌ها بالا می‌رود [۱۲]. در ایجاد جدایش لایه‌های، سرعت پیشروی و شکل هندسی مته از پارامترهای مهم و بحرانی فرآیند سوراخ کاری کامپوزیت‌ها می‌باشند. همچنین قطر مته سوراخ کاری، سرعت اسپیندل، جنس و نحوه‌ی قرارگیری الیاف نیز در کیفیت سوراخ ایجاد شده بسیار تأثیرگذار است [۱۳-۱۴].

۱-۱- نحوه اندازه‌گیری جدایش لایه‌های

برای بررسی کیفیت سوراخ کاری و تعیین معیاری جهت مقایسه میزان جدایش لایه‌های، پس از انجام سوراخ کاری، مقاطع در ابعاد مناسب اطراف سوراخ بریده می‌شود. در مرحله بعدی باید از ناحیه تخریب شده اطراف سوراخ، عکس برداری شود و ناحیه خرابی اندازه‌گیری شود.

- 1 Peel Up
- 2 Push Out

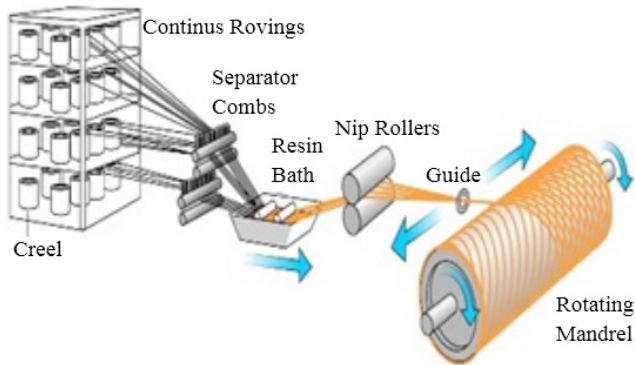


Fig. 3. Schematic of filament winding process

شکل ۳: طرح خلاصه روش رشته‌پیچی

شده است. در این روش الیاف آغشته به رزین^۴ روی ماندردل^۵ مخصوص با زوایای مختلف پیچیده می‌شوند و سپس در هوا و یا کوره تحت شرایط خاص پخته می‌شوند.

ترتیب ساخت و قرارگیری الیاف بدین شکل است که ابتدا الیاف شیشه بافته شده (پارچه) به عنوان پایه در سه لایه با ضخامت ۱ میلی‌متر بر روی ماندردل پیچیده می‌شود، سپس الیاف آغشته به رزین اپوکسی^۶ ۸۲۸، با زاویه ۴۵ درجه به ضخامت ۱ میلی‌متر بر روی پارچه قرار می‌گیرد، آنگاه الیاف با زاویه بسیار کمی در کنار هم روی یکدیگر به ضخامت ۱ میلی‌متر پیچیده می‌شوند (شکل ۴). در نهایت بعد از اتمام پیچش الیاف، نمونه‌ها از دستگاه مخصوص رشته‌پیچی جدا می‌شوند و در دستگاه گردانی قرار می‌گیرند تا فرآیند پخت رزین در دمای محیط به صورت یکنواخت انجام گردد و لوله به استحکام نهایی خود برسد. مزیت این دستگاه این است که فرآیند پخت روی دستگاه رشته‌پیچی انجام نمی‌گردد از این جهت میزان تولید می‌تواند بالاتر رود، از طرفی با چرخش مداوم، مانع توزیع غیر یکنواخت رزین می‌گردد.

لازم به ذکر می‌باشد که قطر نمونه ۱۰۵ میلی‌متر و ضخامت نهایی نمونه‌ها ۳±۰/۳ میلی‌متر می‌باشد. جدول ۱ خواص مکانیکی رزین، پارچه‌ها

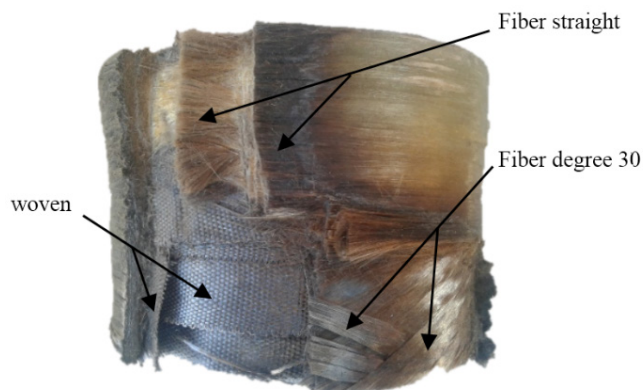


Fig. 4. Pipe manufactured by filament winding process

شکل ۴: لوله ساخته شده به وسیله روش رشته‌پیچی

برداسپر^۱ و ستاب لنس^۲ با پارامترهای برش یکسان آزمایش‌های خود را انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با کاهش نرخ پیشروی و سپس سرعت برشی، نیروی محوری و میزان خرابی کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها دریافتند که با پارامترهای برش یکسان، مته برد اسپر نسبت به مته استاب لنس عملکرد بهتری دارد و آسیب کمتری در ورق‌های کامپوزیت الیاف شیشه ایجاد نموده است.

ابراو^۳ و همکاران [۱۸] تأثیر هندسه ابزار برشی بر نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه‌ای هنگام سوراخ‌کاری ورق‌های کامپوزیتی با الیاف شیشه را مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها آزمایش‌های خود را با انتخاب چهار مته با هندسه و ترکیب متمایز انجام دادند و تأثیر پارامترهای برش را مطالعه نمودند. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که نیروی محوری کمتری با استفاده از مته گردبر مشاهده شد، درحالی‌که مته با سه لبه برش، بالاترین نیروی محوری را داشت. در نهایت، به این نتیجه دست یافتند که در محدوده برش، با افزایش نرخ پیشروی و سرعت برش، ناحیه آسیب‌دیده افزایش می‌یابد.

ظریف کریمی و همکاران [۱۹]، تأثیر پارامترهای سوراخ‌کاری شامل سرعت برشی، نرخ پیشروی و زاویه رأس مته بر مقاومت باقیمانده کششی ورق‌های کامپوزیتی پلیمر/ شیشه را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش آسیب‌های سوراخ‌کاری، مقاومت باقیمانده کششی کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها نشان دادند که افزایش زاویه رأس مته باعث افزایش نیروی محوری، فاکتور جدایش لایه‌ای و کاهش مقاومت باقیمانده کششی می‌شود [۲۰].

در تحقیق حاضر اثرات پارامترهای ماشین‌کاری نظیر سرعت اسپیندل، سرعت پیشروی و همچنین شکل و قطر مته بر روی فاکتور جدایش لایه‌ای، هنگام سوراخ‌کاری لوله‌های کامپوزیتی که به روش رشته‌پیچی تولید شده‌اند، مورد بررسی قرار می‌گیرد. از سه سطح سرعت اسپیندل و سه سطح سرعت پیشروی و همچنین دو نوع مته با اشکال هندسی متفاوت در دو قطر مختلف استفاده می‌شود. در نهایت نیز با تحلیل داده‌ها و مشخص کردن اندازه ناحیه خرابی، نمونه‌هایی که کم‌ترین و بیش‌ترین میزان خرابی را داشته، تحت آزمایش فشار قرار می‌دهیم و استحکام باقیمانده فشاری آن‌ها را به‌دست می‌آوریم. لازم به ذکر است تشخیص اینکه جدایش لایه‌ای در بین کدام لایه‌ها اتفاق افتاده است، بسیار دشوار بوده و عملاً جدایش لایه‌ای اندازه‌گیری شده برآیند جدایش لایه‌ای رخ داده در لایه‌های مختلف می‌باشد.

۲- تحقیقات آزمایشگاهی

۲-۱- نمونه اولیه

نمونه لوله‌های کامپوزیتی با استفاده از روش رشته‌پیچی آماده شده است. در شکل ۳ طرح خلاصه و شماتیکی از دستگاه رشته‌پیچی به نمایش گذاشته

- 4 Resin
- 5 Mandrel
- 6 Epoxy

- 1 Brad & spur
- 2 Stub Length
- 3 Abro

جدول ۱: خواص مکانیکی الیاف شیشه و رزین

Table 1. Mechanical properties of fiber glass and resin

نوع ماده	تنش تسلیم (MPa)	مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسون
الیاف شیشه	۲۴۰۰	۷۳	۰/۲
اپوکسی ۸۲۸	۶۹	۲/۷۵	۰/۳

و الیاف لوله کامپوزیتی که مورد آزمایش سوراخ کاری قرار گرفته شده است را نشان می دهد. الیاف به کار گرفته شده در جنس پارچه ها، الیاف شیشه می باشد.

۲-۲- تجهیزات

آزمایش سوراخ کاری توسط ماشین فرز انیورسال^۱ ماشین سازی تبریز، مدل FP4M انجام می گیرد. قید و بند^۲ مخصوصی جهت نگهداری لوله ساخته شده است تا لوله هیچ گونه حرکتی نداشته باشد و مته بدون سر خوردن از سطح کار، به خوبی سوراخ کاری را انجام دهد. برای اندازه گیری نیروی محوری از دستگاه لودسل^۳ مدل DEE-C3 با ظرفیت ۱۰۰ کیلوگرم، متعلق به شرکت Kele استفاده شده است. مته استاندارد معمولی ماریچ^۴ با جنس HSS و زاویه رأس ۱۱۸ و مته مخصوص بردپوینت^۵ با جنس HSS در قطرهای ۸ و ۱۲ میلی متر مطابق با شکل ۵ برای آزمایش به کار گرفته شده اند.



Fig. 5. Drills used in this study a) twist drill b) brad point drill

شکل ۵: مته های به کار گرفته شده در این تحقیق (الف) مته ماریچ (ب) مته بردپوینت

برای افزایش دقت آزمایش ها، تکرار هر آزمایش دوبار در نظر گرفته شده و به جهت جلوگیری از واکنش های شیمیایی ناخواسته از مایع روان کار و خنک کننده استفاده نشده است [۲۱]. مجموعه آزمایش در شکل ۶ نشان داده شده است. در ابتدا لوله کامپوزیتی در قید و بند قرار می گیرد و توسط پیچ مخصوصی محکم بین فک های آن نگه داشته می شود. ابزار مته توسط اسپیندل دستگاه فرز به گردش درمی آید و به کمک بوش راهنمایی که در بالای مجموعه تعبیه شده است، مته به سطح لوله هدایت می شود و با پیشروی دستگاه، عمل سوراخ کاری انجام می گردد. لودسلی که در زیر قید و بند تعبیه شده است در حین سوراخ کاری تغییرات لحظه ای نیروی محوری را

- 1 Universal Milling Machine
- 2 Jig & fixture
- 3 Load cell
- 4 Twist drill
- 5 Brad point drill

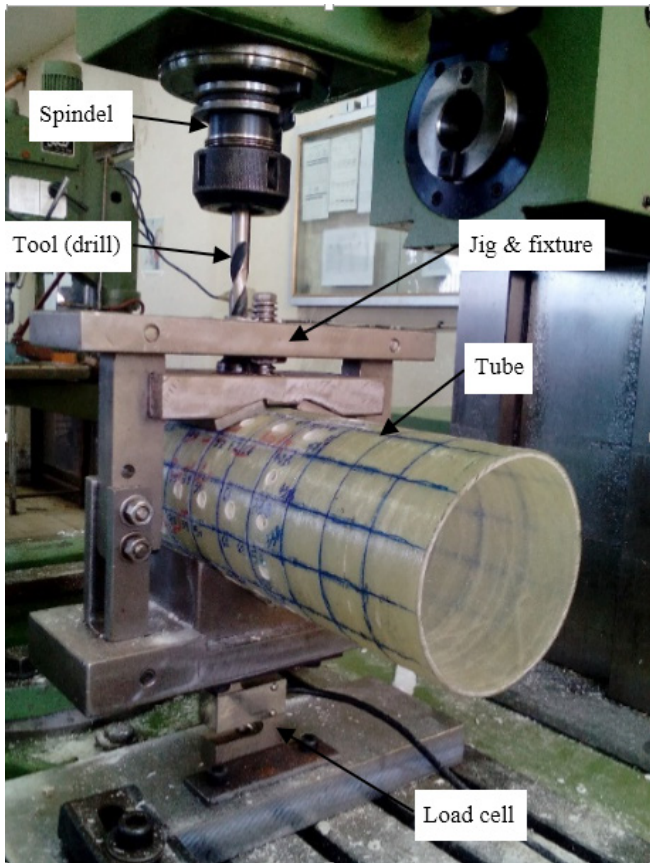


Fig. 6. Experimental setup

شکل ۶: مجموعه آزمایش

گزارش می کند و توسط کابلی به کامپیوتر انتقال می دهد و در صفحه نمایش نمودار تغییرات نیرو در واحد زمان رسم می گردد. پس از انجام آزمایش ها مقاطع سوراخ کاری شده، برش می خورد و توسط اسکن دیجیتالی، قطعات اسکن می شوند.

۲-۳- طراحی آزمایش

طراحی آزمایش شامل یک سری آزمون می باشد که به طور آگاهانه در متغیرهای ورودی فرآیند تغییراتی ایجاد می گردد تا از این طریق میزان تغییرات حاصل در پاسخ خروجی فرآیند مشاهده شود. طراحی آزمایش ابزاری مناسب برای درک صحیح فرآیندها و عوامل مؤثر بر آن ها می باشد و در مسیر تعیین صحیح هدف، کلیدی ترین بخش مطالعه است. در طراحی آزمایش، به منظور رسیدن به پاسخ، فاکتورها به صورت هم زمان باهم آزمایش می شوند و برهم کنش بین فاکتورها در نظر گرفته می شود و اهداف آن، بهینه سازی و بهبود راندمان فرآیند می باشد. پیش نیاز مرحله بهینه سازی، غربال گری است. غربال گری انتخاب فاکتورهای مؤثر بر فرآیند می باشد که بهینه سازی، روی این فاکتورهای تأثیرگذار، به منظور رسیدن به نقطه نهایی انجام می گردد. یکی از نمونه های غربال گری طراحی عاملی کامل^۷ می باشد. طراحی

- 6 Design of experiment
- 7 Full factorial

جدول ۲: فاکتورهای ورودی و سطح‌های مربوط در آزمایش سوراخ کاری لوله‌ها

Table 2. Input factors and levels in drilling of composite pipes

سطح‌ها	سرعت پیشروی (mm/min)	سرعت اسپیندل (rpm)	شکل مته	قطر مته (mm)
۱	۲۵	۲۵۰	ماریچ	۸
۲	۵۰	۵۰۰	بردپوینت	۱۰
۳	۱۰۰	۱۰۰۰	-	-

دقیقاً بررسی کنیم چون ممکن است، همیشه نیرو به صورت مداوم بر روی لوله کامپوزیتی اعمال نشود و به واسطه پارامترهای مختلف ورودی، تماس ابزار با لایه‌های مختلف، اصطکاک ابزار در ناحیه برش و پدیده خم‌شدگی، نیرو تغییرات زیادی داشته‌باشد. در هر نقطه از لبه‌های برش مته، نیروهای وارده را می‌توان به سه نیروی عمود بر هم F_v ، F_z و F_h تجزیه نمود، نیروی افقی F_h بر روی هر دو لبه عمل می‌کند و مساوی و متقابل به هم بوده و همدیگر را خنثی می‌کنند. نیروی F_z تأثیرگذار بر گشتاور می‌باشد، نیروی عمودی F_v حاصل نیروی واردشده از طرف لبه‌های برشی مته می‌باشد، نیروی F_{ch} روی جان مته^۲ عمل می‌کند و مانع نفوذ مته به داخل کار می‌شود. نیروی F_r اصطکاک بین حاشیه مته و سطح قطعه کار و اصطکاک بین براده و سطح شیار می‌باشد. شکل ۷ نیروهای وارد بر مته را نشان می‌دهد [۲۴].

شکل ۸-الف تغییرات نیروی محوری در آزمایش سوراخ کاری با نرخ پیشروی ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه، سرعت اسپیندل ۱۰۰۰ دور در دقیقه و مته

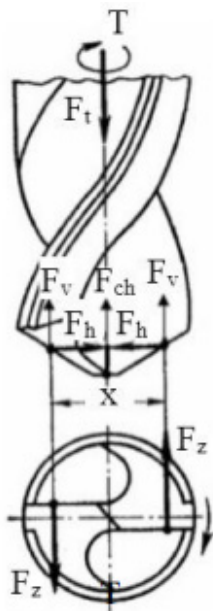


Fig. 7. Force reactions on drill bit

شکل ۷: عکس‌العمل نیروها روی مته [۲۵]

آزمایش عاملی را معمولاً برای انتخاب فاکتورهای مؤثر برای بهینه‌سازی به کار می‌برند. این روش تمام حالت‌های ممکن فاکتورها در سطوح مختلف را بررسی می‌کند، فاکتورها ممکن است کمی یا کیفی باشند. در این روش تعداد آزمایش‌ها از حاصل ضرب سطح‌های هر فاکتور، در تعداد تکرار آزمایش‌ها به دست می‌آید.

در این مقاله طراحی آزمایش با استفاده از روش طراحی عاملی کامل انجام شده است. روش طراحی عاملی کامل به دلیل بررسی تمام حالت‌های ممکن مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی نسبت به دیگر روش‌ها می‌باشد ولی از آنجایی که هدف بررسی هرچه دقیق‌تر آزمایش‌ها می‌باشد، این روش در طراحی آزمایش به کار گرفته شده است. برای طراحی آزمایش‌ها و آنالیز داده‌ها از نرم‌افزار مینی تب^۱ کمک گرفته شده است. در طراحی آزمایش، با توجه به تحقیقات گذشته محققان، مؤثرترین پارامترهای فرآیند سوراخ کاری و سطح‌های آن انتخاب گردید [۱۳، ۱۸، ۲۲، ۲۳]. سرعت اسپیندل و پیشروی هر کدام در سه سطح و پارامترهای قطر و شکل هندسی مته هر کدام در دو سطح به عنوان پارامترهای ورودی و نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه‌ای به عنوان مهم‌ترین پاسخ‌های خروجی در نظر گرفته شده است.

در این تحقیق با توجه به اینکه دو بار تکرار در نظر گرفته شده است، ۷۲ آزمایش انجام گرفته و میزان خرابی و حداکثر نیروی محوری آن‌ها ارائه شده است. جدول ۲ فاکتورها و پارامترهای مورد آزمایش به همراه سطوح متغیر هر پارامتر را نشان می‌دهد.

جدول ۳ آزمایش طراحی شده به کمک روش طراحی عاملی کامل به همراه نتایج تجربی نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه‌ای را نشان می‌دهد. برای محاسبه‌ی فاکتور جدایش لایه‌ای، نمونه‌ها پس از سوراخ کاری بریده شده و با استفاده از اسکنر دیجیتالی با رزولوشن ۱۸۰۰ dpi آزمایش می‌گردند.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- تحلیل نیروی محوری

با توجه به مطالعات گذشته محققان و آزمایش‌های انجام شده در سوراخ کاری کامپوزیت‌ها، بیشترین جدایش لایه‌ای در هنگام خروج مته رخ می‌دهد. یکی از دلایل مؤثر در به وجود آمدن جدایش لایه‌ای، نیروی محوری اعمالی در حین خروج مته است. با افزایش نیروی محوری، جدایش لایه‌ای بیشتر می‌شود اما لزوماً این یک قانون همیشگی نمی‌باشد زیرا دلایل متعددی بر روی تغییرات نمودار نیرو، تأثیرگذار می‌باشد. با بررسی نمودارهای نیرو و آنالیز تغییرات آن در هنگام عبور مته از لایه‌های مختلف لوله، نتایج جالب توجهی به دست می‌آید. ممکن است در شرایطی نیروی محوری افزایش یابد، اما میزان جدایش لایه‌ای ناچیز باشد؛ زیرا پارامترهای تأثیرگذار بر فاکتور جدایش لایه‌ای، بسیار زیاد می‌باشد و با تغییر هر پارامتر، میزان جدایش لایه‌ای تغییر می‌یابد. از این رو نمی‌توان ادعا نمود با در نظر گرفتن حداکثر نیرو، به نتایج قابل قبولی دست یابیم. به همین دلیل باید تغییرات نمودارهای نیرو را

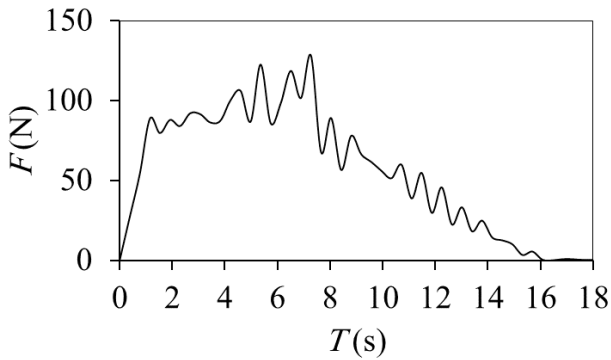
2 Chisel edge

1 Minitab

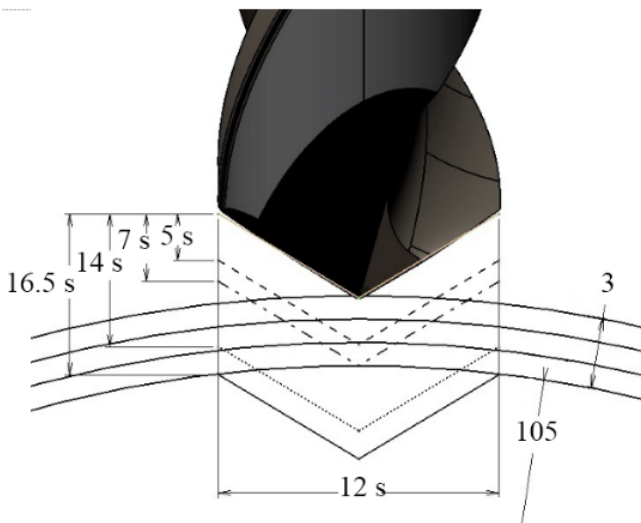
جدول ۳: طراحی آزمایش عاملی کامل با نتایج نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه‌ای

Table 3. Full factorial design of experiment with thrust force and delamination factor results

شماره آزمایش	سرعت اسپیندل (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	نام مته	قطر مته (mm)	نیروی محوری (N)	فاکتور جدایش لایه‌ای	شماره آزمایش	نیروی محوری (N)	فاکتور جدایش لایه‌ای
۱	۲۵۰	۲۵	بردپوینت	۸	۱۵۴/۰۳	۳/۷۶۲	۳۷	۱۶۱/۷۳	۴/۸۷۲
۲	۲۵۰	۲۵	بردپوینت	۱۲	۱۵۵/۵۱	۴/۰۸۹	۳۸	۱۵۴/۳	۳/۷۷۶
۳	۲۵۰	۲۵	مارپیچ	۸	۱۶۳/۴۴	۲/۷۰۷	۳۹	۱۶۱/۸۹	۲/۹۳۹
۴	۲۵۰	۲۵	مارپیچ	۱۲	۱۵۸/۷۶	۱/۴۵۱	۴۰	۱۶۰/۰۸	۲/۱۸۷
۵	۲۵۰	۵۰	بردپوینت	۸	۱۶۰/۳۵	۷/۴۷۹	۴۱	۱۶۷/۴۵	۵/۲۰۴
۶	۲۵۰	۵۰	بردپوینت	۱۲	۱۶۵/۲	۳/۱۱	۴۲	۱۶۵/۲	۶/۵۴
۷	۲۵۰	۵۰	مارپیچ	۸	۱۵۳/۴۲	۲/۳۲۳	۴۳	۱۵۳/۴۲	۲/۸۶۷
۸	۲۵۰	۵۰	مارپیچ	۱۲	۱۲۳/۱۷	۱/۴۴۵	۴۴	۱۶۶/۵۲	۲/۰۵۵
۹	۲۵۰	۱۰۰	بردپوینت	۸	۱۳۳/۰۱	۵/۲۷۸	۴۵	۱۶۱/۴۵	۴/۳۱۳
۱۰	۲۵۰	۱۰۰	بردپوینت	۱۲	۱۴۵/۷۱	۴/۷۳۲	۴۶	۱۴۵/۷۱	۴/۴۰۱
۱۱	۲۵۰	۱۰۰	مارپیچ	۸	۱۳۹/۹۵	۵/۵۰۵	۴۷	۱۳۹/۹۵	۲/۵۷۴
۱۲	۲۵۰	۱۰۰	مارپیچ	۱۲	۱۶۳/۷۱	۲/۴۱۸	۴۸	۱۶۴/۳۲	۳/۹۸۵
۱۳	۵۰۰	۲۵	بردپوینت	۸	۱۶۲/۸۳	۲/۹۴۲	۴۹	۱۲۶/۸	۳/۸۷۷
۱۴	۵۰۰	۲۵	بردپوینت	۱۲	۱۶۳/۷۷	۳/۴۸۶	۵۰	۱۲۳/۹۹	۴/۱۵۱
۱۵	۵۰۰	۲۵	مارپیچ	۸	۱۶۰/۷۴	۱/۸۱۲	۵۱	۱۶۲/۲۸	۲/۲۷۱
۱۶	۵۰۰	۲۵	مارپیچ	۱۲	۱۶۴/۰۴	۱/۱۷۴	۵۲	۱۶۵/۶۹	۲/۴۱۷
۱۷	۵۰۰	۵۰	بردپوینت	۸	۱۴۱/۴۳	۵/۱۷۴	۵۳	۱۴۱/۴۳	۴/۸۴
۱۸	۵۰۰	۵۰	بردپوینت	۱۲	۱۴۵/۸۹	۵/۷۰۵	۵۴	۱۲۶/۵۸	۴/۲۸۹
۱۹	۵۰۰	۵۰	مارپیچ	۸	۱۶۵/۱۴	۲/۲۵۷	۵۵	۱۶۳/۹۳	۲/۶۱۴
۲۰	۵۰۰	۵۰	مارپیچ	۱۲	۱۶۳/۲۷	۱/۴۵۲	۵۶	۱۳۳/۱۸	۱/۶۳۵
۲۱	۵۰۰	۱۰۰	بردپوینت	۸	۱۶۳/۸۲	۶/۵۷۷	۵۷	۱۶۵/۰۹	۷/۲۵۱
۲۲	۵۰۰	۱۰۰	بردپوینت	۱۲	۱۶۱/۲۹	۴/۴۶۹	۵۸	۱۶۳/۳۳	۵/۰۱۴
۲۳	۵۰۰	۱۰۰	مارپیچ	۸	۱۵۰/۷۳	۵/۰۱۴	۵۹	۱۵۰/۷۳	۲/۶۹۸
۲۴	۵۰۰	۱۰۰	مارپیچ	۱۲	۱۳۵/۸۸	۱/۴۵۷	۶۰	۱۵۶/۸۹	۲/۴۵۳
۲۵	۱۰۰۰	۲۵	بردپوینت	۸	۱۴۹/۴۱	۲/۳۹۹	۶۱	۱۶۷/۲۳	۲/۵۵۹
۲۶	۱۰۰۰	۲۵	بردپوینت	۱۲	۱۶۶/۰۸	۳/۰۷۸	۶۲	۱۶۱/۸۹	۳/۰۷۵
۲۷	۱۰۰۰	۲۵	مارپیچ	۸	۱۳۳/۴۱	۱/۹۹۲	۶۳	۱۳۰/۵۹	۱/۹۷۲
۲۸	۱۰۰۰	۲۵	مارپیچ	۱۲	۱۲۸/۲۸	۱/۴۲۲	۶۴	۱۳۹/۶۲	۱/۹۰۷
۲۹	۱۰۰۰	۵۰	بردپوینت	۸	۱۲۸/۷۸	۴/۶۸۶	۶۵	۱۶۰/۶۳	۵/۴۴۹
۳۰	۱۰۰۰	۵۰	بردپوینت	۱۲	۱۲۰/۹۱	۴/۴۸۹	۶۶	۱۶۲/۶۱	۴/۷۲۲
۳۱	۱۰۰۰	۵۰	مارپیچ	۸	۱۵۲/۷۱	۲/۵۵۸	۶۷	۱۶۹/۷۶	۲/۲۲۹
۳۲	۱۰۰۰	۵۰	مارپیچ	۱۲	۱۶۵/۵۳	۱/۵۵	۶۸	۱۵۶/۳۹	۱/۹۷
۳۳	۱۰۰۰	۱۰۰	بردپوینت	۸	۱۱۳/۳۸	۶/۸۲۹	۶۹	۱۳۳/۱۲	۶/۸۳۳
۳۴	۱۰۰۰	۱۰۰	بردپوینت	۱۲	۱۲۸/۸۳	۵/۴۱۵	۷۰	۱۴۵/۳۴	۵/۳۰۵
۳۵	۱۰۰۰	۱۰۰	مارپیچ	۸	۱۵۵/۹۵	۳/۹۸۴	۷۱	۱۲۰/۶۹	۴/۹۷۹
۳۶	۱۰۰۰	۱۰۰	مارپیچ	۱۲	۱۳۷/۸	۱/۸۲۵	۷۲	۱۰۹/۴۲	۲/۱۵۵



(الف)



(ب)

Fig. 8. Force versus time b) drill bit position during drilling process ($f=25 \text{ mm/min}$, $n=1000 \text{ rpm}$, $d=12 \text{ mm}$, Twist drill)

شکل ۸: (الف) نمودار نیروی محوری برحسب زمان (ب) موقعیت مته در حین سوراخ کاری لوله ($f=25 \text{ mm/min}$, $n=1000 \text{ rpm}$, $d=12 \text{ mm}$, Twist drill)

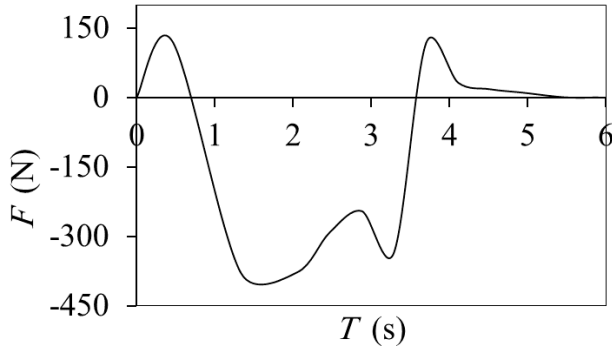
ثانیه بعد از درگیری به مقدار صفر می‌رسد. در شکل ۹-ب نمودار موقعیت مته نمایش داده شده است.

نمودار نیروی محوری نمونه‌ای در بدترین شرایط سوراخ کاری از لحاظ منطقه خرابی در شکل ۱۰-الف آورده شده است. سوراخ کاری انجام شده با سرعت پیشروی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، سرعت اسپیندل ۱۰۰۰ دور در دقیقه و مته به قطر ۸ میلی‌متر انجام گرفته است. در شکل ۱۰-ب نمودار موقعیت این مته نمایش داده شده است. با توجه به اینکه در این آزمایش سرعت پیشروی بسیار زیاد می‌باشد، در شروع فرآیند، با تماس نوک مته با سطح لوله کامپوزیتی، نیروی محوری به شدت افزایش می‌یابد و سپس به صورت ناگهانی افت نیرو در نمودار پدید می‌آید و به سمت منفی حرکت می‌کند. بعد از آن قله‌های پایداری به وجود می‌آید و سپس به آرامی در ثانیه ۷ نیروی محوری به صفر می‌رسد. لازم به ذکر است، هنگامی که سرعت پیشروی مته بالا می‌رود، پدیده‌ای به نام خم‌شدگی در جداره‌ی لوله اتفاق می‌افتد و در

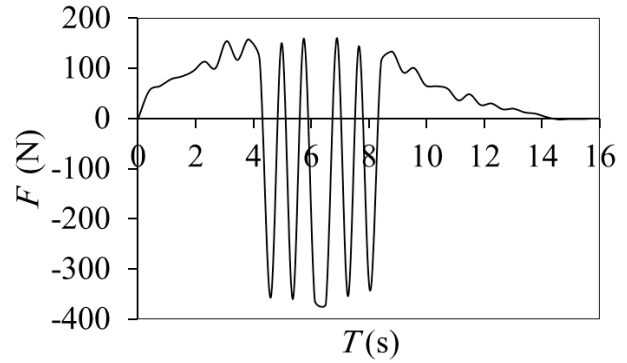
مارپیچ به قطر ۱۲ میلی‌متر را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است پارامترهای ذکر شده نمونه‌ای از شرایط ایده آل پارامترهای سوراخ کاری می‌باشد. در شروع فرآیند، با تماس نوک مته با سطح لوله کامپوزیتی، بر اثر نیروی F_{ch} ، نیروی محوری در نمودار به شدت افزایش می‌یابد. زیرا نوک مته به خوبی براده‌برداری نمی‌کند و باعث خم‌شدن لوله و به وجود آمدن پدیده خم‌شدگی می‌شود. با ادامه پیشروی، نوک مته و لبه‌های برش به داخل جداره‌ی لوله نفوذ می‌کند و جداره‌ی خم‌شده به صورت ناگهانی به سمت مته حرکت می‌کند؛ این تکان‌های ناگهانی را می‌توان به شکل افت نیرو و حتی تغییر نیروی منفی و ناگهانی در نمودارها مشاهده نمود. افت‌های نمودارها را می‌توان به مکانیزم جدایش لایه‌ای و پدیده خم‌شدگی نسبت داد [۲۶]. در ادامه سوراخ کاری طول لبه برش افزایش می‌یابد که ممکن است به صورت تدریجی افزایش نیرو را به همراه داشته باشد، نیرو تا لحظه درگیری فاز ۲ مته افزایش می‌یابد، با مشارکت فاز مته نیروی محوری کاهش می‌یابد، همچنین با خروج نوک مته نیروی F_{ch} برداشته می‌شود و از طرفی طول لبه برش شروع به کاهش یافتن می‌کند. از این جهت، نیروی محوری نیز به صورت پله‌ای کاهش می‌یابد و در نهایت به مقدار صفر می‌رسد. شکل ۸-ب موقعیت مته در ثانیه‌های مختلف هنگام سوراخ کاری لوله را نشان می‌دهد. در این تست ۷ ثانیه بعد از درگیری، نوک مته از جداره‌ی لوله خارج می‌شود و رفته رفته طول درگیری لبه برنده کاهش می‌یابد؛ از این جهت میزان نیروی محوری کاهش می‌یابد و بعد از ۱۶/۵ ثانیه، کار سوراخ کاری به اتمام رسیده و اندازه نیروی محوری به صفر می‌رسد.

در هنگام سوراخ کاری لوله‌ها، لزوماً همیشه شکل نمودار نیروی محوری مانند شکل ۸ نمی‌باشد و با تغییر پارامترهای برش و شرایط ماشین کاری، تغییرات زیادی را می‌توان مشاهده نمود. شکل ۹-الف نمودار تغییرات نیروی محوری را در آزمایش سوراخ کاری با سرعت پیشروی ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه، سرعت اسپیندل ۵۰۰ دور در دقیقه و مته مارپیچ به قطر ۸ میلی‌متر را نشان می‌دهد. میزان خرابی در این حالت نیز ناچیز می‌باشد، هنگامی که نوک مته سعی در نفوذ به جداره‌ی لوله می‌کند، نیروی محوری به سرعت افزایش می‌یابد، ۲/۵ ثانیه بعد از درگیری هیچ‌گونه نفوذی انجام نمی‌گیرد و نوک مته لوله را خم می‌کند و پدیده خم‌شدگی رخ می‌دهد. سپس نوک مته نفوذ می‌کند و لبه‌های برش، عمل براده‌برداری را انجام می‌دهند. با مشارکت لبه‌های ابزار و افزایش طول برش، نیروی محوری افزایش می‌یابد. با رسیدن نوک مته به لایه دوم لوله، قله‌هایی در نمودار رخ می‌دهد. هر افت در نمودار را می‌توان به باز شدن یا رشد ترک، پدیده خم‌شدگی و اصطکاک بین ابزار و الیاف شیشه نسبت داد. ۸/۵ ثانیه بعد از درگیری، نوک مته از جداره لوله، خارج می‌شود و تغییرات متعدد و ناگهانی تمام می‌شوند. با بیرون آمدن جان مته، نیرو مانع نفوذ، از نوک مته برداشته می‌شود و طول لبه برش، شروع به کاهش یافتن می‌کند، در نتیجه مقدار نیرو هر لحظه کاهش می‌یابد و در ۱۴

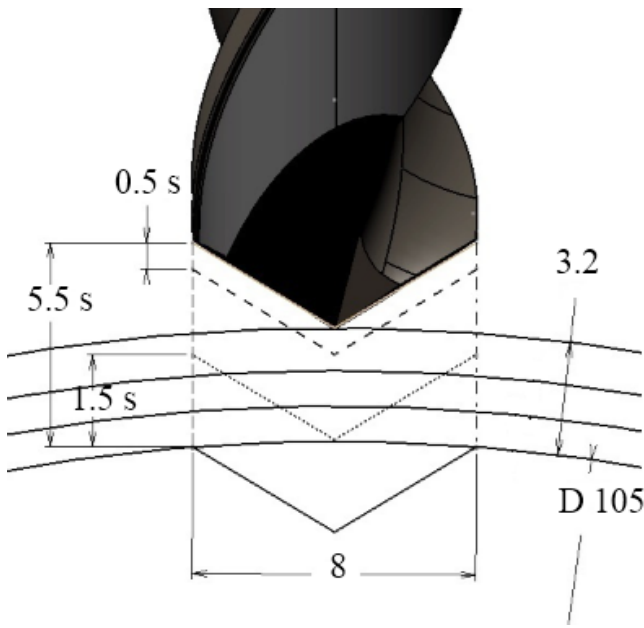
- 1 Indentation
- 2 Margin



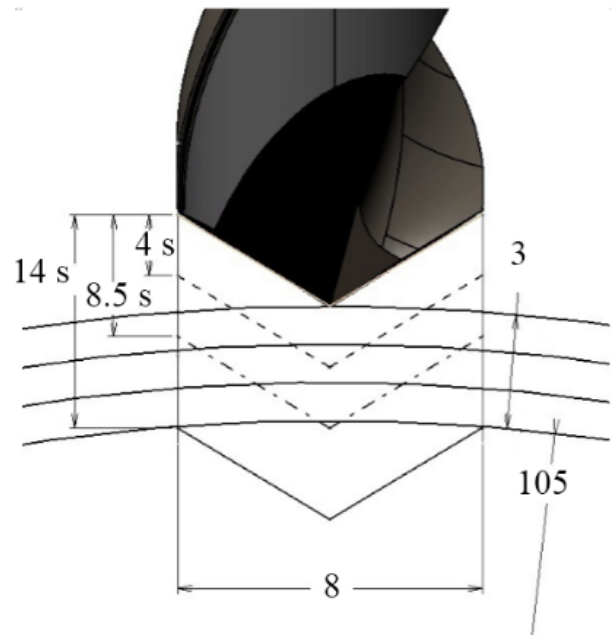
(الف)



(الف)



(ب)



(ب)

Fig. 10. a) Force versus time b) drill bit position during drilling process ($f=100$ mm/min, $n=1000$ rpm, $d=8$ mm, Twist drill)

شکل ۱۰: الف) نمودار نیروی محوری برحسب زمان ب) موقعیت مته در حین سوراخ کاری لوله
($f=100$ mm/min, $n=1000$ rpm, $d=8$ mm, Twist drill)

Fig. 9. a) Force versus time b) drill bit position during drilling process ($f=25$ mm/min, $n=500$ rpm, $d=8$ mm, Twist drill)

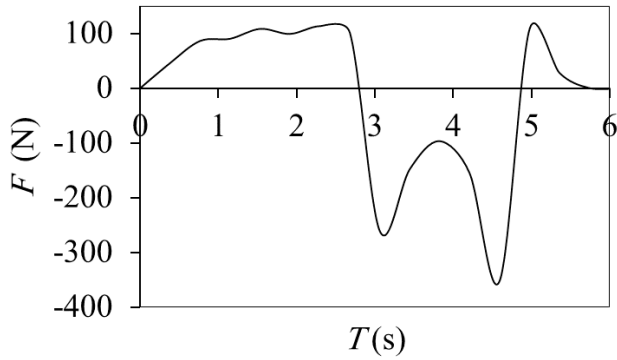
شکل ۹: الف) نمودار نیروی محوری برحسب زمان ب) موقعیت مته در حین سوراخ کاری لوله
($f=25$ mm/min, $n=500$ rpm, $d=8$ mm, Twist drill)

هنگامی که مته به داخل جداره نفوذ می‌کند، جداره‌ی خم‌شده آزاد می‌شود و به صورت ناگهانی به سمت مته حرکت می‌کند و در عمل دوباره موقعیت راست اولیه خود را می‌گیرد. در طول این تکان ناگهانی، سرعت پیشروی واقعی^۳ به شدت افزایش می‌یابد و همه مواد برش نخورده، پشت سر هم برش می‌خورند، واضح است که این وضعیت به راحتی می‌تواند باعث به وجود آمدن جدایش لایه‌ای شود. زمانی که جان مته از جداره لوله بیرون می‌آید، میزان نیروی محوری به شدت کاهش می‌یابد، نمودار نسبی نیروی محوری مته برحسب تابعی از زمان (شکل ۱۰) به وضوح، جنبش کاهش سریع در لحظه خروج جان مته را نشان می‌دهد، از طرفی بعد از خروج جان مته، طول لبه برش نیز شروع به کاهش یافتن می‌کند از این جهت، مقدار نیروی محوری

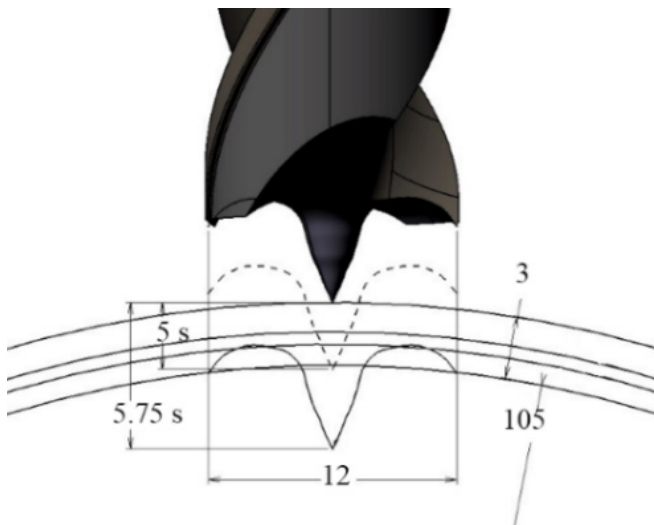
برخی از نقاط نوک مته، زاویه درگیری در تماس واقعی منفی می‌شود و در این قسمت‌ها به جای برش، بر روی جداره‌ی لوله فشار وارد می‌شود [۲۶]. شکل ۱۱ چگونگی افزایش نرخ پیشروی و تغییر در مکانیسم برش در نوک مته را نشان می‌دهد [۲۶]. هنگامی که پدیده خم‌شدگی اتفاق می‌افتد در اصل زاویه آزاد^۱ مته به سمت صفر میل می‌کند. لبه برش به خوبی براده برداری نمی‌کند و فقط بر لایه‌های کامپوزیت فشار وارد می‌کند که باعث خم شدن جداره توخالی لوله کامپوزیتی می‌شود و نقطه‌های درگیر مته، مانند یک پنچ^۲ عمل می‌کنند. این وضعیت تا زمانی که جداره لوله در برابر نفوذ مته نیرو را تحمل کند و یا جان مته از جداره لوله بیرون بیاید، ادامه می‌یابد؛

- 1 Clearance angle
- 2 Punch

3 Actual feed



(الف)



(ب)

Fig. 12. a) Force versus time b) drill bit position during drilling process ($f=100$ mm/min, $n=1000$ rpm, $d=8$ mm, Brad point drill)

شکل ۱۲: الف) نمودار نیروی محوری بر حسب زمان ب) موقعیت مته در حین سوراخ کاری لوله ($f=100$ mm/min, $n=1000$ rpm, $d=8$ mm, Brad point drill)

است که سرعت اسپیندل و سپس سرعت پیشروی بیشترین تأثیر را بر روی نیروی محوری دارد ولی همان طور که در بررسی نمودارهای تحلیلی نیرو توضیح داده شد، صرفاً کاهش نیروی محوری ملاک به دست آوردن کمترین میزان خرابی نیست؛ زیرا مکانیزم‌های مختلفی در سوراخ کاری لوله‌های کامپوزیتی فعال هستند. اعتقاد بر این است که این عوامل به دینامیک قطعه کار، شرایط تولید و ابزاری که در آن نیرو اعمال می‌کند، مرتبط است [۲۶]. با توجه به مقادیر شکل ۱۳-ب، شکل هندسی مته بیشترین تأثیر را بر روی فاکتور جدایش لایه‌ای دارد و بعد از آن به ترتیب سرعت پیشروی و سپس تغییر قطر مته تأثیرگذار می‌باشند و سرعت اسپیندل کمترین تأثیر را بر روی فاکتور جدایش لایه‌ای می‌گذارد.

علاوه بر مشکلاتی مانند پدیده خم‌شدگی که هنگام سرعت پیشروی بالا به وجود می‌آورد، شکل و نحوه درگیری مته نیز بسیار تأثیرگذار می‌باشد.

به صورت پله‌ای، کاهش می‌یابد و به سمت صفر میل می‌کند. علاوه بر اینکه سرعت پیشروی، سرعت اسپیندل و قطر ابزار بر روی نمودار تغییر نیرو و افزایش خرابی تأثیرگذار می‌باشد، شکل هندسی مته نیز تأثیر زیادی در افزایش جدایش لایه‌ای دارد. آزمایش‌هایی که توسط مته بردپوینت انجام گرفته شده است خرابی‌های زیادی در اطراف سوراخ به وجود آورده است.

در شکل ۱۲-الف و ب نمودار نیروی محوری تست سوراخ کاری و مسیر حرکت مته بردپوینت آورده شده است. سوراخ کاری با سرعت پیشروی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، سرعت اسپیندل ۱۰۰۰ دور در دقیقه و مته به قطر

Low actual feed speed: the twist drill cuts the material

High actual feed speed: the drill point acts like a punch

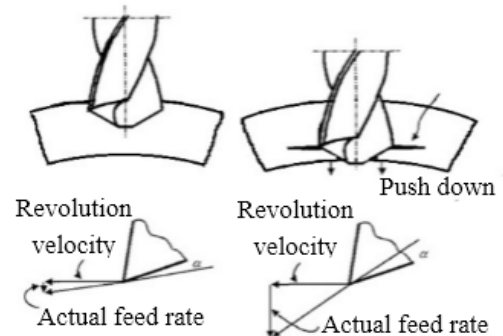


Fig. 11. Punch and bending mechanism of pipe during drilling process

شکل ۱۱: مکانیزم نفوذ و خم‌شدگی لوله در حین سوراخ کاری [۲۶]

۸ میلی‌متر انجام گرفته است. با توجه به سرعت پیشروی بالا و تغییرات به وجود آمده در نمودار نیروی محوری، کاملاً واضح است که در این آزمایش نیز، پدیده خم‌شدگی به وجود آمده است.

با توجه به شکل خاص مته بردپوینت، میزان جدایش لایه‌ای به شدت افزایش می‌یابد، نوک مته در ابتدا به جداره لوله می‌رسد و باعث افزایش نیروی محوری می‌شود سپس رفته‌رفته نفوذ می‌کند که در این حال طول لبه برشی زیاد می‌شود و نیرو از مقاومت خمشی لوله بیشتر می‌شود و باعث خم‌شدگی جداره لوله می‌شود و مانند پانچ عمل می‌کند و قبل از اینکه لبه‌های گردبر محیطی مته عملیات برش را انجام دهند، نوک مته باعث شروع جدایش لایه‌ای می‌شود و با پدیده خم‌شدگی میزان جدایش لایه‌ای افزایش می‌یابد.

۳-۲- تأثیر پارامترهای ماشین کاری بر نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه‌ای

برای تعیین اثر هر متغیر بر مقادیر پاسخ، نمودار نتایج تأثیر پارامترهای ورودی، از جمله سرعت اسپیندل، سرعت پیشروی، قطر و شکل مته، بر روی نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه‌ای، در شکل ۱۳-الف و ب آورده شده است. همچنین به علت حجم انبوه مطالب، از توضیح نمودار اثرات متقابل پارامترها، صرف نظر شده است. با توجه به مقادیر شکل ۱۳-الف مشخص

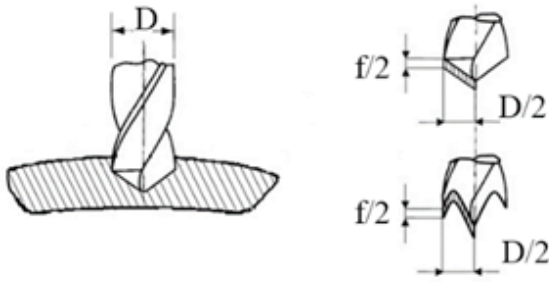
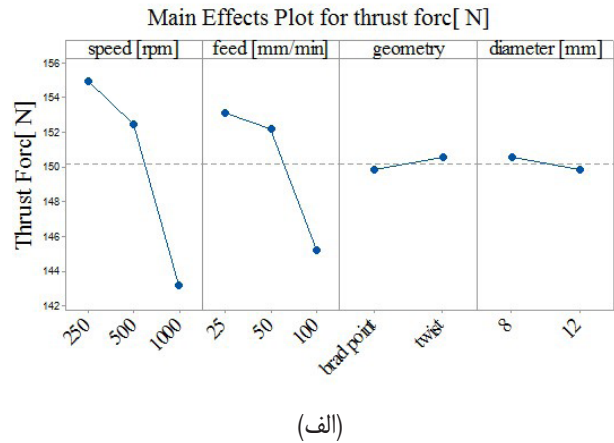
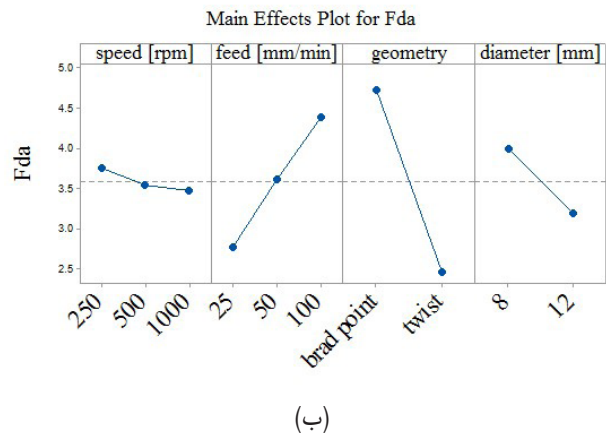


Fig. 14. Schematic of cutting area for twist and brad point drill
 شکل ۱۴: طرح شماتیک مقطع برش براده برای مته مارپیچ و مته بردپوینت [۱۷]



(الف)



(ب)

Fig. 13. Effect of input parameters on a) thrust force b) delamination factor

شکل ۱۳: نمودار تأثیر پارامترهای ورودی بر (الف) نیروی محوری (ب) فاکتور جدایش لایه‌ای

۳-۳- اثر متقابل پارامترهای ورودی بر خروجی
 آنالیز پاسخ سطح برای تأثیر هم‌زمان پارامترهای ورودی نظیر سرعت پیشروی و سرعت اسپیندل بر مقادیر نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه‌ای در شکل ۱۵-الف و ب آورده شده است. همان‌طور که مشخص می‌باشد، نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه‌ای با افزایش سرعت پیشروی و همچنین کاهش سرعت اسپیندل در وضعیت بحرانی قرار دارند. با توجه به شکل ۱۵-الف مشخص است که مقادیر سرعت اسپیندل بین ۴۰۰ تا ۹۰۰ دور در دقیقه، میزان نیروی محوری به حداقل ممکن می‌رسد. با توجه به پاسخ سطح شکل ۱۵-ب در می‌یابیم که با افزایش سرعت اسپیندل و کاهش سرعت پیشروی مقدار فاکتور جدایش لایه‌ای به حداقل مقدار خود می‌رسد. با مقادیر سرعت اسپیندل بین ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ دور در دقیقه و مقادیر سرعت پیشروی بین ۲۵ تا ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه بهترین نتایج یعنی کمترین میزان خرابی را می‌توان به دست آوردیم. همان‌طور که ذکر شد برای به دست آوردن کمترین میزان خرابی می‌بایست از مته مارپیچ استاندارد استفاده گردد زیرا شکل هندسی مته تأثیر زیادی بر میزان جدایش لایه‌ای می‌گذارد. همچنین در محدوده انتخاب قطر اگر محدودیتی وجود نداشته باشد، بهتر است از مته با قطر ۱۲ میلی‌متر استفاده شود، زیرا با افزایش قطر مته راندمان بیشتر می‌شود و میزان جدایش لایه‌ای کمتری نیز به دست می‌آید.

۳-۴- آنالیز واریانس

در جدول‌های ۴ و ۵ مقادیر مرتبط با آنالیز واریانس^۱ نیروی محوری بر حسب پارامترهای سرعت اسپیندل و سرعت پیشروی و قطر مته برای مته مارپیچ و بردپوینت به صورت جداگانه آورده شده است.
 در واقع *P-Value*، میزان وابستگی پارامترهای معادله به مقادیر پاسخ را مشخص می‌کند و هر یک از پارامترها که مقدار *P-Value* آن کمتر از ۰/۰۰۵ باشد نشان‌دهنده وابستگی شدید این پارامتر به مقادیر پاسخ می‌باشد؛ بنابراین در مته مارپیچ و بردپوینت، به ترتیب سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی و قطر مته بیشترین تأثیر را بر نیروی محوری می‌گذارد.

شکل ۱۴ تفاوت بین میزان و نحوه درگیری در مته بردپوینت و مته مارپیچ را نشان می‌دهد [۱۷]. در مته‌ها حرکت اصلی برش در عمل سوراخ‌کاری، حرکت چرخشی مته بوده و حرکت تغذیه در جهت مستقیم و در امتداد محور مته می‌باشد. برای عمل سوراخ‌کاری هر دو حرکت باید به مته داده شود. مته‌های مارپیچ و بردپوینت داری دو لبه برنده دارند که هر یک به سهم خود در برداشت براده مشارکت می‌نمایند. بار مته یعنی عمقی از ماده که توسط یک دندان در امتداد حرکت تغذیه و برای هر دور گردش توسط مته برداشته می‌شود. بار همان درگیری تغذیه مته است و معادل نصف نرخ پیشروی مته می‌باشد.
 با توجه به شکل مته مارپیچ، اندازه طول درگیری لبه برنده آن، نسبت به مته بردپوینت کمتر است و براده‌های حاصل از ایلف شیشه به راحتی در مته مارپیچ تخلیه می‌شوند اما در مته بردپوینت انباشت براده زیاد است و باعث می‌شود لبه برنده به خوبی عمل برش را انجام ندهد و جدایش لایه‌ای بیشتری اتفاق بیفتد. همچنین در مته‌های بردپوینت، نوک مته بلندتر از لبه‌های گردبر محیط مته می‌باشد و قبل از اینکه لبه‌های برنده محیطی، عمل گردبری را انجام دهند، نوک مته باعث شروع جدایش لایه‌ای می‌شود.

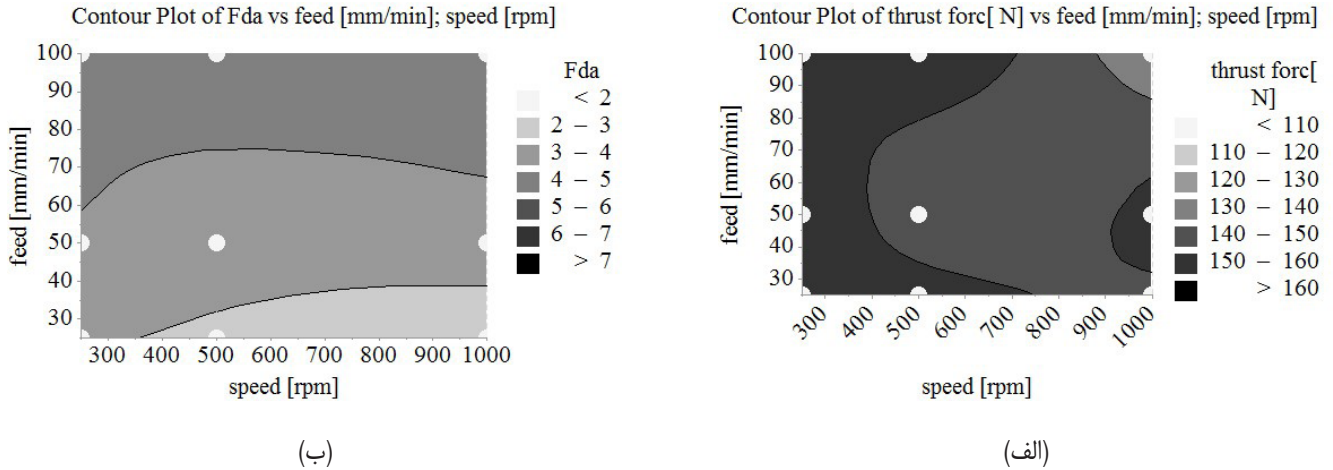


Fig. 15. Response surface diagram for a) thrust force b) delamination factor

شکل ۱۵: نمودار پاسخ سطح برای الف) نیروی محوری ب) فاکتور جدایش لایه‌ای

جدول ۴: آنالیز واریانس پارامترهای مؤثر بر نیروی محوری برای مته ماریچ

Table 4. Analysis of variance of effective parameters on thrust force for twist drill

T-Value	SE Coef	Coef	P-Value	F-Value	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجات آزادی	نماد	پارامترها
-	-	-	-	۲/۸۵	۶۰۳/۲۴	۱۸۰۹/۷۱	۳	-	رگرسیون خطی
۱۲/۴۸	۱۳/۹	۱۳۳/۸	۰/۰۰۰	-	-	-	-	-	مته ماریچ
-۲/۳۶	۰/۰۰۷۷	-۰/۰۱۸۳۶	۰/۰۲۴	۵/۵۸	۱۱۸۰/۰۲	۱۱۸۰/۰۲	۱	S	سرعت اسپیندل
-۱/۶۸	۰/۰۰۷۷	-۰/۱۳۰۴	۰/۱۰۳	۲/۸۲	۵۹۵/۲۷	۵۹۵/۲۷	۱	F	سرعت پیشروی
-۰/۴۰	۱/۲۱	-۰/۴۹	۰/۶۸۹	۰/۱۶	۳۴/۴۳	۳۴/۴۳	۱	D	قطر مته
-	-	-	-	-	۲۱۱/۴۳	۶۷۶۵/۸۳	۳۲	-	خطا
-	-	-	۰/۱۳۹	۱/۷۲	۲۷۶/۴۱	۳۸۶۹/۷۸	۱۴	-	Lack-of-Fit
-	-	-	-	-	۱۶۰/۸۹	۲۸۹۶/۰۵	۱۸	-	خطا باقیمانده
-	-	-	-	-	-	۸۵۷۵/۵۴	۳۵	-	در مجموع
$R-sq = ۲۱/۱۰\%$			$R-sq(adj) = ۱۳/۷۱\%$			$R-sq(pred) = ۰/۰۰\%$			

معادلات رگرسیون ارتباط بین فاکتور جدایش لایه‌ای اصلاح شده با پارامترهای ورودی سوراخ‌کاری برای مته ماریچ در معادله (۵) و برای مته بردپیونت در معادله (۶) آورده شده است.

$$Twist F_{da} = 4.18 - 0.000342S + 0.01745F - 0.2547D \quad (5)$$

$$Brad\ point\ F_{da} = 4.96 - 0.000329S + 0.02432F - 0.1455D \quad (6)$$

با استفاده از معادلات رگرسیون خطی فاکتور جدایش لایه‌ای، می‌توان هنگام استفاده و تنظیم سرعت برشی، نرخ پیشروی و انتخاب قطر مناسب جهت سوراخ‌کاری، نهایت دقت را به کار برد تا به مقدار قابل قبول و ایده آل فاکتور جدایش لایه‌ای برسیم. مقدار ایده‌آل و انتخاب بهترین پارامترها زمانی است که ما بتوانیم برای افزایش کارایی و سرعت تولید، حداکثر

معادلات رگرسیون ارتباط بین نیروی محوری و پارامترهای ورودی سوراخ‌کاری برای مته ماریچ در معادله (۳) و برای مته بردپیونت در معادله (۴) آورده شده است.

$$Twist F_{th} = 173.8 - 0.01836S - 0.1304F - 0.49D \quad (3)$$

$$Brad\ point\ F_{th} = 161.6 - 0.01366S - 0.0896F + 0.14D \quad (4)$$

در جدول‌های ۶ و ۷ مقادیر مرتبط با آنالیز واریانس فاکتور جدایش لایه‌ای برحسب پارامترهای سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی و قطر مته برای مته ماریچ و بردپیونت آورده شده است. در مته ماریچ سرعت اسپیندل کم‌ترین تأثیر را بر فاکتور جدایش لایه‌ای می‌گذارد، در حالی که در مته بردپیونت به ترتیب سرعت اسپیندل و قطر مته کمترین تأثیر را بر فاکتور جدایش لایه‌ای می‌گذارند.

جدول ۵: آنالیز واریانس پارامترهای مؤثر بر نیروی محوری برای مته بردپوینت
Table 5. Analysis of variance of effective parameters on thrust force for brad point drill

T-Value	SE Coef	Coef	P-Value	F-Value	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجات آزادی	نماد	پارامترها
-	-	-	۰/۳۰۶	۱/۲۶	۳۱۲/۴۰۵	۹۳۷/۲۱	۳	-	رگرسیون خطی
۱۰/۷۰	۱۵/۱	۱۶۱/۶	۰/۰۰۰	-	-	-	-	-	مته ماریچ
-۱/۶۲	۰/۰۰۸۴۳	-۰/۰۱۳۶۶	۰/۱۱۵	۲/۶۳	۶۵۳/۳۷۶	۶۵۳/۳۸	۱	S	سرعت اسپیندل
-۱/۰۶	۰/۰۸۴۳	-۰/۰۸۹۶	۰/۲۹۶	۱/۱۳	۲۸۰/۹۷۱	۲۸۰/۹۷	۱	F	سرعت پیشروی
۰/۱۱	۱/۳۱	۰/۱۴	۰/۹۱۵	۰/۰۱	۲/۸۶۷	۲/۸۷	۱	D	قطر مته
-	-	-	-	-	۲۴۸/۷۷۱	۷۹۶۰/۶۷	۳۲	-	خطا
-	-	-	۰/۲۹۸	۱/۳۰	۲۸۵/۴۲۸	۳۹۹۶/۰۰	۱۴	-	Lack-of-Fit
-	-	-	-	-	۲۲۰/۲۵۹	۳۹۶۴/۶۷	۱۸	-	خطا باقیمانده
-	-	-	-	-	-	۸۸۹۷/۸۸	۳۵	-	در مجموع
$R-sq = ۱۰/۵۳\%$			$R-sq(adj) = ۲/۱۵\%$			$R-sq(pred) = ۰/۰\%$			

جدول ۶: آنالیز واریانس پارامترهای مؤثر بر فاکتور جدایش بین لایه‌ای در مته ماریچ
Table 6. Analysis of variance of effective parameters on delamination factor for twist drill

T-Value	SE Coef	Coef	P-Value	F-Value	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجات آزادی	نماد	پارامترها
-	-	-	۰/۰۰۰	۱۲/۳۹	۶/۸۰۱۵	۲۰/۴۰۴۵	۳	-	رگرسیون خطی
۵/۸۹	۰/۷۰۹	۴/۱۸۰	۰/۰۰۰	-	-	-	-	-	مته ماریچ
-۰/۸۶	۰/۰۰۰۳۹۶	-۰/۰۰۰۳۴۲	۰/۳۹۴	۰/۷۵	۰/۴۰۹۲	۰/۴۰۹۲	۱	S	سرعت اسپیندل
۴/۴۱	۰/۰۰۰۳۹۶	۰/۰۱۷۴۵	۰/۰۰۰	۱۹/۴۱	۱۰/۶۵۴۳	۱۰/۶۵۴۳	۱	F	سرعت پیشروی
-۴/۱۳	۰/۰۶۱۷	-۰/۲۵۴۷	۰/۰۰۰	۱۷/۰۲	۹/۳۴۱۰	۹/۳۴۱۰	۱	D	قطر مته
-	-	-	-	-	۰/۵۴۸۹	۱۷/۵۶۶۰	۳۲	-	خطا
-	-	-	-	۰/۷۵	۰/۴۶۱۷	۶/۴۶۳۵	۱۴	-	Lack-of-Fit
-	-	-	-	-	۰/۶۱۶۸	۱۱/۱۰۲۵	۱۸	-	خطا باقیمانده
-	-	-	-	-	-	۳۷/۹۷۰۵	۳۵	-	در مجموع
$R-sq = ۵۳/۷۴\%$			$R-sq(adj) = ۴۹/۴۰\%$			$R-sq(pred) = ۳۹/۷۲\%$			

شکل هندسی مته و سپس پیشروی در میزان فاکتور جدایش لایه‌ای بسیار تأثیرگذار می‌باشد و پارامترهای قطر مته و سرعت اسپیندل تأثیر کمتری بر فاکتور جدایش لایه‌ای داشته‌اند. واضح هست که مته ماریچ میزان خرابی بسیار کمتری نسبت به مته بردپوینت دارد و برای به دست آوردن میزان خرابی کمتر و نتیجه مناسب‌تر باید مته ماریچ با حداقل سرعت پیشروی را انتخاب کنیم. همچنین در صورت امکان قطر مته را ۱۲mm و سرعت اسپیندل را حداکثر انتخاب نماییم.

۳-۵- مقایسه مقاومت باقیمانده فشاری

مقاومت باقیمانده فشاری با استفاده از دستگاه تست فشار با تناژ ۱۵

سرعت پیشروی را داشته باشیم درحالی‌که جدایش لایه‌ای به مرز قابل قبول و تعیین شده‌ی خود برسد. مقدار بهینه انتخاب پارامترهای سوراخ‌کاری در جدول ۸ آورده شده است.

در این تحقیق بهترین انتخاب بهینه برای کمترین مقدار خرابی با سرعت اسپیندل ۱۰۰۰ rpm سرعت پیشروی ۲۵ mm/min و مته ماریچ استاندارد با قطر ۱۲mm حاصل می‌شود. البته همان‌طور که به اثبات رسید سرعت اسپیندل کمترین تأثیر را بر میزان جدایش لایه‌ای می‌گذارد، به نحوی که با سرعت بین ۱۰۰۰ تا ۵۰۰ دور در دقیقه نتایج تقریباً یکسانی به دست می‌آید. همان‌طور که قبلاً در اثرات پارامترها، بر مقدار فاکتور جدایش لایه‌ای توضیح دادیم، در نمودار بهینه‌سازی هم کاملاً واضح و مشخص است که به ترتیب

جدول ۷: آنالیز واریانس پارامترهای مؤثر بر فاکتور جدایش بین لایه‌ای در مته بردپوینت

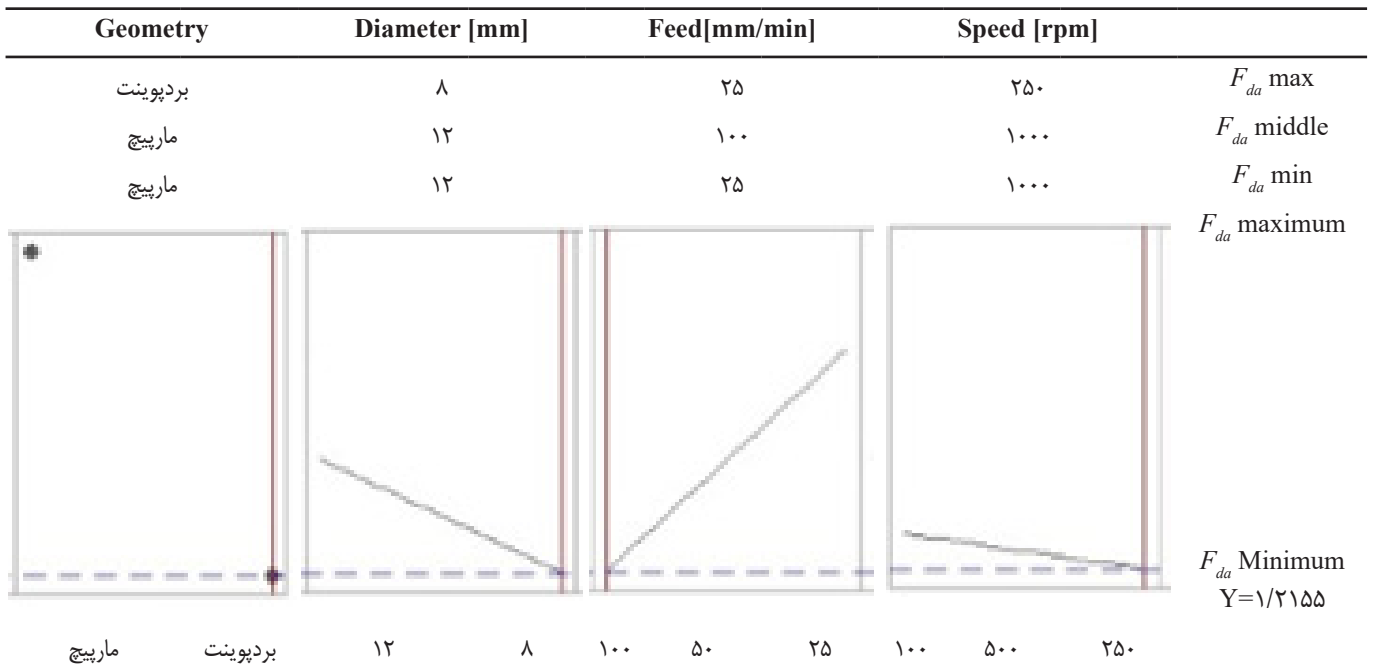
Table 7. Analysis of variance of effective parameters on delamination factor for brad point drill

پارامترها	نماد	درجات آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F-Value	P-Value	Coef	SE Coef	T-Value
رگرسیون خطی	-	۳	۲۴/۱۲۷۵	۸/۰۴۲۵	۷/۲۹	۰/۰۰۱	-	-	-
مته ماریچ	-	-	-	-	-	۰/۰۰۰	۴/۹۶	۱/۰۱	۴/۹۳
سرعت اسپیندل	S	۱	۰/۳۷۸۰	۰/۳۷۸۰	۰/۳۴	۰/۵۶۲	-۰/۰۰۰۳۲۹	۰/۰۰۰۵۶۱	-۰/۵۹
سرعت پیشروی	F	۱	۲۰/۶۹۹۱	۲۰/۶۹۹۱	۱۸/۷۶	۰/۰۰۰	۰/۰۲۴۳۲	-۰/۰۰۵۶۱	۴/۳۳
قطر مته	D	۱	۳/۰۵۰۴	۳/۰۵۰۴	۲/۷۶	۰/۱۰۶	-۰/۱۴۵۵	۰/۰۸۷۵	-۱/۶۶
خطا	-	۳۲	۳۵/۳۰۹۴	۱/۱۰۳۴	-	-	-	-	-
Lack-of-Fit	-	۱۴	۲۳/۲۲۶۵	۱/۶۵۹۰	۲/۴۷	۰/۰۳۷	-	-	-
خطا باقیمانده	-	۱۸	۱۲/۰۸۳۰	۰/۶۷۱۳	-	-	-	-	-
در مجموع	-	۳۵	۵۹/۴۳۶۹	-	-	-	-	-	-

$R-sq = ۴۰/۵۹\%$ $R-sq(adj) = ۳۵/۰۲\%$ $R-sq(pred) = ۲۴/۹۹\%$

جدول ۸: نمودار بهینه‌سازی برای پارامترهای سوراخ‌کاری

Table 8. Optimization diagram for drilling parameters



اسپیندل ۵۰۰ دور در دقیقه و پیشروی ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه با مته ماریچ انجام گرفته شده است و تست شماره ۳۳ با سرعت اسپیندل ۱۰۰۰ دور در دقیقه و پیشروی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه با مته بردپوینت انجام گرفته است. نتایج تست فشار هر سه نمونه آزمایش در شکل ۱۷ آورده شده است. قدر مطلق نیروی فشاری برحسب تن و زمان برحسب ثانیه نمایش داده شده است. با توجه به نتایج کاملاً مشخص است که نمونه بدون سوراخ‌کاری در تناژ ۱۲/۵۳ تن تسلیم شده است و شکست در ماتریس آن اتفاق افتاده است، تست شماره ۱۵ به عنوان نمونه ی ایده‌آل از نظر میزان جدایش لایه‌ای، در

تن انجام می‌گیرد. بدین منظور در نمونه کامپوزیتی به ارتفاع ۴۰ میلی‌متر فرایند سوراخ‌کاری انجام گردیده و سپس این نمونه به صورت عمودی توسط دو صفحه فلزی تحت فشار قرار می‌گیرد. نرخ سرعت بارگذاری فشاری ۱۰ میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد. شکل ۱۶ مجموعه آزمایش تست فشار را نشان می‌دهد.

در انجام آزمایش‌ها بهترین و بدترین شرایط را برای مته به قطر ۸ میلی‌متر انتخاب کرده‌ایم و سوراخ‌کاری را انجام داده‌ایم؛ همچنین نمونه‌ای بدون سوراخ‌کاری مورد آزمایش فشار قرار داده‌ایم. تست شماره ۱۵ با سرعت



Fig. 16. Specimen and experimental set up of compression test

شکل ۱۶: نمونه و مجموعه آزمایش تست فشار

به درستی انتخاب گردد، در حدود ۱۲ درصد استحکام باقیمانده فشاری در لوله‌های کامپوزیتی بالاتر می‌رود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر پارامترهای ورودی از جمله: سرعت اسپیندل، سرعت پیشروی، قطر و شکل مته بر نیروی محوری و فاکتور جدایش لایه‌ای اصلاح شده با استفاده از روش طراحی آزمایش عاملی کامل بررسی شده است. یک نمونه از بهترین و یک نمونه از بدترین حالت‌ها، انتخاب گردیده و مقاومت فشاری باقیمانده آن‌ها را به دست آورده‌ایم که نتایج آن در زیر آورده شده است:

- دیاگرام مقادیر نیروی محوری از زمان ورود مته به قطعه کار تا زمان خروج آن رسم شده و مورد تحلیل قرار گرفته شده است. با توجه به نمودارهای به دست آمده اگر پدیده خم‌شدگی در لوله‌ها رخ ندهد، قله‌های کاهشی کوتاه می‌شوند که در این صورت جدایش لایه‌ای کاهش می‌یابد و مقدار فاکتور جدایش لایه‌ای کمتر می‌شود.
- نمودارهای میزان وابستگی مقادیر پاسخ برای فاکتورهای مورد بررسی رسم شده است و بر اساس نتایج آن، شکل مته بیشترین تأثیر را بر مقادیر فاکتور جدایش لایه‌ای داشته و بعد از آن به ترتیب قطر مته و سرعت اسپیندل تأثیرگذار می‌باشند.
- با بررسی نمودار اثرات متقابل فاکتورهای ورودی و فاکتور

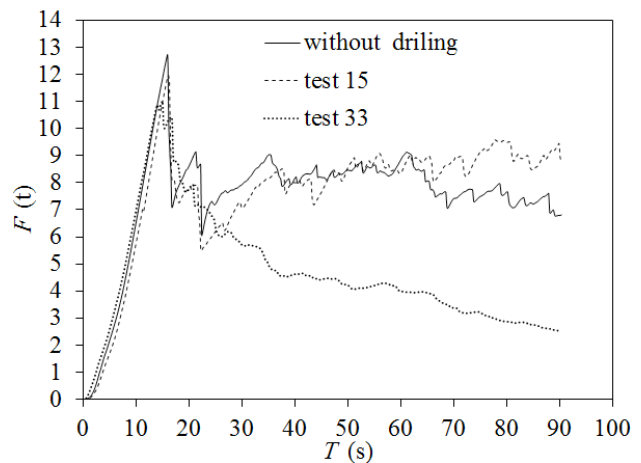


Fig. 17. Residual compression strength versus time

شکل ۱۷: نمودار نیروی فشاری باقیمانده بر حسب زمان

تناژ ۱۱/۹۱ تن تسلیم شده است و تست شماره ۳۳ به عنوان انتخاب حداکثر اندازه جدایش لایه‌ای، در تناژ ۱۰/۵ تن تسلیم شده است.

همان‌طور که مشخص است، هنگامی که در بدترین شرایط، سوراخ‌کاری انجام می‌گردد استحکام فشاری آن نسبت به نمونه‌ی بدون سوراخ ۱۷ درصد پایین می‌آید و در نمونه‌ای که بهترین شرایط سوراخ‌کاری را دارد در مقایسه با نمونه بدون سوراخ ۵ درصد استحکام فشاری آن کاهش یافته است. در نتیجه اگر پارامترهای سوراخ‌کاری هنگام استفاده از مته ۸ میلی‌متر

- Optimization, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 14 (2017) 464-484.
- [7] H. Hocheng, C.C. Tsao, The path towards delamination-free drilling of composite materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 167(2-3) (2005) 251-264.
- [8] A.M. Abrão, P.E. Faria, J.C.C. Rubio, P. Reis, J.P. Davim, Drilling of fiber reinforced plastics: A review, *Journal of Materials Processing Technology*, 186(1-3) (2007) 1-7.
- [9] N. Bhatnagar, I. Singh, D. Nayak, Damage Investigation in Drilling of Glass Fiber Reinforced Plastic Composite Laminates, *Materials and Manufacturing Processes*, 19(6) (2004) 995-1007.
- [10] J.P. Davim, P. Reis, Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments, *Composite Structures*, 59(4) (2003) 481-487.
- [11] M.-B. Lazar, P. Xirouchakis, Experimental analysis of drilling fiber reinforced composites, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(12) (2011) 937-946.
- [12] D. Liu, Y. Tang, W.L. Cong, A review of mechanical drilling for composite laminates, *Composite Structures*, 94(4) (2012) 1265-1279.
- [13] 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*, 185(1-3) (2007) 204-209.
- [14] H. Hocheng, C.C. Tsao, H.T. Chen, Utilizing internal icing force to reduce delamination in drilling composite tubes, *Composite Structures*, 139 (2016) 36-41.
- [15] C.C. Tsao, H. Hocheng, Computerized tomography and C-Scan for measuring delamination in the drilling of composite materials using various drills, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(11) (2005) 1282-1287.
- [16] 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*, 67(9) (2007) 1939-1945.
- [17] 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*, 64(2) (2004) 289-297.
- [18] A.M. Abrão, J.C.C. Rubio, P.E. Faria, J.P. Davim, The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite, *Materials & Design*, 29(2) (2008) 508-513.
- [19] N. Zarif Karimi, H. Heidary, M. Ahmadi, Residual جدایش لایه‌ای مشخص است که مته ماریچج نسبت به مته بردپوینت میزان خرابی کمتری دارد.
- آنالیز پاسخ سطح نمایانگر این موضوع می‌باشد که با کاهش سرعت پیشروی و افزایش سرعت اسپیندل، جدایش لایه‌ای کاهش می‌یابد.
 - در این تحقیق با انتخاب ابزار مته ماریچج استاندارد با قطر ۱۲ میلی‌متر، سرعت اسپیندل ۱۰۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه، خمش لوله در حین سوراخ‌کاری به حداقل ممکن خود می‌رسد و مته عمل برش را به‌درستی انجام می‌دهد و چنانچه موقعیت نفوذ مته به درستی انتخاب گردد و همچنین لرزش در قطعه‌کار ایجاد نشود، میزان فاکتور جدایش لایه‌ای به حداقل اندازه ممکن خود می‌رسد.
 - با توجه به دیاگرام تست فشار عمودی لوله‌های سوراخ شده، مشخص گردید که اگر پارامترهای ورودی سرعت اسپیندل ۱۰۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه، در سوراخ‌کاری لوله‌های کامپوزیتی انتخاب گردد، در مته ماریچج ۸ میلی‌متری نسبت به مته بردپوینت ۸ میلی‌متری حدود ۱۲ درصد استحکام باقیمانده فشاری در لوله‌های کامپوزیتی بالاتر می‌رود.
- منابع**
- [1] L.M.P. Durão, J.M.R.S. Tavares, V.H.C. de Albuquerque, D.J.S. Gonçalves, Damage evaluation of drilled carbon/epoxy laminates based on area assessment methods, *Composite Structures*, 96 (2013) 576-583.
- [2] S. Akbari, F. Taheri-Behrooz, M.M. Shokrieh, Characterization of residual stresses in a thin-walled filament wound carbon/epoxy ring using incremental hole drilling method, *Composites Science and Technology*, 94 (2014) 8-15.
- [3] C.C. Tsao, H. Hocheng, Effect of eccentricity of twist drill and candle stick drill on delamination in drilling composite materials, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(2) (2005) 125-130.
- [4] I. El-Sonbaty, U.A. Khashaba, T. Machaly, Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites, *Composite Structures*, 63(3-4) (2004) 329-338.
- [5] H. Abdollahi, R. Mahdavinjad, M. Ghambari, M. Moradi, Investigation of green properties of iron/jet-milled grey cast iron compacts by response surface method, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 228(4) (2014) 493-503.
- [6] M. Moradi, E. Golchin, Investigation on the Effects of Process Parameters on Laser Percussion Drilling Using Finite Element Methodology; Statistical Modelling and

- [23] S. Jain, D.C.H. Yang, Effects of feedrate and chisel edge on delamination in composite drilling, Transactions of the ASME, *Journal of Engineering for Industry*, 115 (1993) 398-405.
- [24] V.A. Arshinov, G.A. Alekseev, *Metal Cutting Theory and Cutting Tool Design*, MIR, 1973.
- [25] V. Chandrasekharan, S.G. Kapoor, R.E. DeVor, A Mechanistic Approach to Predicting the Cutting Forces in Drilling: With Application to Fiber-Reinforced Composite Materials, *Journal of Engineering for Industry*, 117(4) (1995) 559-570.
- [26] E. Capello, Workpiece damping and its effect on delamination damage in drilling thin composite laminates, *Journal of Materials Processing Technology*, 148(2) (2004) 186-195.
- tensile strength monitoring of drilled composite materials by acoustic emission, *Materials & Design*, 40 (2012) 229-236.
- [20] R. Mishra, J. Malik, I. Singh, J.P. Davim, Neural network approach for estimating the residual tensile strength after drilling in uni-directional glass fiber reinforced plastic laminates, *Materials & Design*, 31(6) (2010) 2790-2795.
- [21] I. Singh, N. Bhatnagar, P. Viswanath, Drilling of uni-directional glass fiber reinforced plastics: Experimental and finite element study, *Materials & Design*, 29(2) (2008) 546-553.
- [22] W.-C. Chen, Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37(8) (1997) 1097-1108.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Sahami poor Dehghan, H. Heidaryb, Experimental Study in Drilling Composite Pipes Manufactured by Filament Winding Process Using Full Factorial Design Method, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(3) (2018) 489-504.
DOI: 10.22060/mej.2017.13076.5526

