



## مطالعه آماری تاثیر شرایط مختلف ماشینکاری بر میزان لایه‌لایه‌شدگی در سوراخکاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن

سعید امینی<sup>1\*</sup>، محمد براهنی<sup>2</sup>، مرتضی معینی افzal<sup>3</sup>

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، گروه دانشگاه کاشان، کاشان

2- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه غیرانتفاعی علامه نائینی، نائین

\*شهر کرد، صندوق پستی 8731751167، [Amini.s@kashanu.ac.ir](mailto:Amini.s@kashanu.ac.ir)

### اطلاعات مقاله

دریافت: 95/8/11

پذیرش: 96/2/6

### کلیدواژگان:

کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن

لایه‌لایه‌شدگی

پارامترهای ماشینکاری

ضخامت قطعه کار

### چکیده

کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن دارای کاربردهای صنعتی متعددی می‌باشند که به علت خواص مکانیکی و فیزیکی مناسب آنها می‌باشد. سوراخکاری از جمله روشهای رایج برای ایجاد اتصال بین سازه‌های از جنس مواد تقویت شده با الیاف می‌باشد. لایه‌های کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف در عملیات ماشینکاری مخصوصاً در عملیات سوراخکاری که در معرض تمرکز تنش قرار می‌گیرند، دچار آسیب لایه‌لایه‌شدگی می‌گردند. پدیده لایه‌لایه‌شدگی به شدت تحت تاثیر عواملی مانند جنس و هندسه ابزار و قطعه کار و همچنین پارامترهای ماشینکاری قرار دارد. در این پژوهش با استفاده از طراحی آزمایشات به روش تاگوچی، مطالعه‌ای تجربی بر روی فرآیند سوراخکاری کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) با ابزار از جنس کربید تنگستن به منظور بررسی میزان لایه‌لایه‌شدگی انجام گردید. پارامترهای مورد بررسی شامل پیش‌متنه‌زنی، سرعت دورانی، نرخ پیشروی، قطر ابزار و ضخامت قطعه کار می‌باشد. با توجه به آزمایشات انجام شده مشاهده گردید انجام عملیات پیش‌متنه‌زنی، افزایش سرعت دورانی و کاهش سرعت پیشروی موجب کاهش آسیب لایه‌لایه‌شدگی شده و کیفیت سوراخ را بهبود می‌بخشد. همچنین استفاده از ابزار سوراخکاری با قطر کمتر و بکارگیری کامپوزیت نازکتر منجر به کاهش مقدار لایه‌لایه‌شدگی می‌گردد. با توجه به نتایج بدست آمده، در نرم افزار مینی‌تب، آنالیز واریانس (ANOVA) جهت بررسی کیفیت سوراخ ایجاد شده و میزان تاثیرگذاری هر یک از پارامترها انجام شد. از بین پارامترهای مورد بررسی، ضخامت قطعه کار دارای بیشترین تاثیر بر مقدار لایه‌لایه‌شدگی می‌باشد. همچنین مقدار بهینه جهت به حداقل رساندن میزان لایه‌لایه‌شدگی بدست آمد.

## Statistical study of the effect of various machining parameters on delamination in drilling of carbon fiber reinforced composites

Saeed Amini<sup>1\*</sup>, Mohammad Baraheni<sup>1</sup>, Morteza Moeini Afzal<sup>2</sup>

1- Department of Manufacturing, Faculty of Mechanic, University of Kashan, Kashan, Iran

2- Department of Manufacturing, Faculty of Mechanic, University of Allame Naeini, Naein, Iran

\* P.O.B. 8731751167 Kashan, [Amini.s@kashanu.ac.ir](mailto:Amini.s@kashanu.ac.ir)

### Keywords

Carbon fiber reinforced composite  
 Delamination  
 Machining parameters  
 Workpiece thickness

### Abstract

Carbon fiber reinforced composites pose numerous industrial applications that's because of suitable mechanical and physical properties. Drilling is a common method to connect fiber reinforced material structures. Fiber reinforced composite laminates in machining operations, especially in drilling operations which are subjected to stress concentration, tend to be delaminated. Delamination phenomena is extremely under the influence of factors like tool and workpiece geometry and material as well as machining parameters. In this research, by using Taguchi experiment design method, an experimental study conducted on drilling of carbon fiber reinforced composite with tungsten carbide tool to investigate amount of delamination. Discussed parameters include predrilling, rotational speed, feed rate, tool diameter and workpiece thickness. According to conducted experiments, that's observed predrilling, rotational speed increment, feed rate decrement causes delamination damage reduction and hole quality improvement. Also using drilling tool with smaller diameter and utilization of thinner composite causes delamination reduction. As for achieved results, in Minitab software, Analysis of Variance (ANOVA) carried out to examine hole quality and effectiveness of each parameter. Through examined parameters, workpiece thickness has the most effect on the amount of delamination. Optimized parameters to reduce the delamination also obtained.

### 1-مقدمه

کامپوزیتها اهمیت فراوانی پیدا کرده است [1]. قطعات کامپوزیتی تقویت شده

با الیاف کربن با توجه به نسبت بالای استحکام به وزن، نسبت بالای مدول

کششی به وزن و استحکام بالای خستگی امروزه در صنایع مختلف بسیار حائز

در سال‌های اخیر، امروزه با توجه به گسترش کاربرد قطعات کامپوزیتی در

صنایع مختلف نظیر صنایع هوافضا، خودروسازی و غیره، ماشینکاری

### Please cite this article using:

Amini, S. Baraheni, M. and Moeini Afzal, M., "Statistical study of the effect of various machining parameters on delamination in drilling of carbon fiber reinforced composites", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 1, pp. 41-50, 2018.

نمودند. مته‌های مورد نظر در تحلیل مته مارپیچ، گرد بر، سرشمعی، هسته-دار، هسته‌دار مرکزی، هسته‌دار اره‌ای، مته پله‌ای و همچنین سوراخکاری غیر سنتی توسط واترجت می‌باشد. آنها همچنین اثر ورق حامی و پیش‌مته را بررسی نمودند [24]. یوان و همکاران [25] از ابزار الماسه هسته‌دار برای سوراخکاری کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن استفاده کردند.

کوئینگ و همکاران، در سال 1985 مطالعه‌ای در زمینه ماشینکاری پلاستیک‌های تقویت‌شده داشته و نتیجه گرفتند که نرخ پیشروی بالا در سوراخکاری منجر به ایجاد ترک در اطراف لبه خروجی سوراخ می‌شود و کیفیت سوراخ را کاهش می‌دهد [3]. روبیو و همکاران [26] مشاهده کردند که با افزایش سرعت اسپیندل، مقدار لایه‌لایه‌شدگی کاهش می‌یابد که به علت افزایش دما با افزایش مقدار دوران می‌باشد که منجر به نرم‌شدگی زمینه و کاهش لایه‌لایه‌شدگی می‌شود.

با توجه به تعداد متغیرهای تاثیرگذار که هر یک محدوده تغییرات وسیعی نیز دارند اکثر محققان از روشهای طراحی آزمایش تاگوچی برای ارزیابی فرایند استفاده نموده‌اند. تساو و هوچنگ [27] از روش تاگوچی و آنالیز واریانس<sup>2</sup> برای ارزیابی فاکتور جدایش لایه‌ای در سوراخکاری کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن توسط مته‌های مارپیچ، سرشمعی و مته گردبر استفاده نمودند. آنالیز واریانس داده‌های آزمایشگاهی نشان داد قطر مته و نرخ پیشروی مهمترین عوامل در مته‌های مختلف می‌باشند. آنها [13] در تحلیلی مشابه برای مته‌های مختلف با استفاده از الگوریتم تاگوچی و آنالیز واریانس در سوراخکاری کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن، فاکتور جدایش لایه‌ای را با استفاده از رگرسیون<sup>3</sup> خطی تخمین زدند. دیویم و همکارانش [28] از روش تاگوچی و آنالیز واریانس برای ارزیابی جدایش لایه‌ای در سوراخکاری کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن استفاده نمودند و نشان دادند که ابزار کاربیدی مارپیچی (K10) کیفیت بهتری ارائه می‌دهد. در فعالیتی مشابه دیویم و همکارانش [14] از روش تاگوچی و آنالیز واریانس برای ارزیابی جدایش لایه‌ای، زبری سطح و نیروی محوری، در سوراخکاری کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف شیشه استفاده نمودند و انرژی مخصوص برش را معیار قرار دادند تا صافی سطح مناسب را بدست آورند. انامه و همکارانش [29] با بهره‌گیری از یک مدل ترکیبی تاگوچی و بهینه‌سازی چند متغیره در سوراخکاری کامپوزیت کربن اپوکسی<sup>4</sup>، پارامترهای جدایش لایه‌ای، عرض منطقه خرابی، صافی سطح و نیروی محوری را مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که بطور کلی بهینه‌ترین شرایط با کاهش نرخ پیشروی و افزایش سرعت برشی، بدست می‌آید. گاتونده و همکارانش [30] از روش تاگوچی برای به حداقل رساندن میزان خرابی در سوراخکاری کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن استفاده نمودند. آنها با استفاده از آنالیز میانگین داده‌های آزمایشگاهی نشان دادند که زاویه راس و پس از آن نرخ پیشروی مهمترین فاکتورهای موثر می‌باشند. در فعالیتی دیگر او و همکارانش [31] از طراحی عاملی استفاده نمودند و مقادیر محاسبه‌شده فاکتور جدایش لایه‌ای با استفاده از مدل رگرسیون غیرخطی مرتبه دوم بر پایه روش پاسخ سطحی به پارامترهای فرایند مرتبط گردید. نتایج آنها نشان داد که میزان جدایش لایه-ای با افزایش سرعت برشی کاهش می‌یابد. کیلیکاپ [32] از روش تاگوچی برای یافتن پارامترهای موثر بر جدایش لایه‌ای و بهینه‌سازی آن استفاده

اهمیت می‌باشند. از طرفی این کامپوزیتها ویژگیهای خاصی در زمینه ماشینکاری دارا می‌باشند و مکانیزم براده‌برداری متفاوتی با مواد همگن دارند و بایستی ملاحظات خاصی در نظر گرفته شود [3,2]. در ساخت هواپیماهای جدید، فرآیند سوراخکاری نقش مهمی در ایجاد سوراخهای دقیق هنگام مونتاژ کامپوزیت‌های الیافدار دارا می‌باشد [4]. با وجود تنوع بسیار سازه‌های کامپوزیتی از نظر نوع ترکیب، خواص و نوع بارگذاری و کارکرد، یافتن پارامترهای ماشینکاری بهینه نیازمند هزینه و زمان زیادی می‌باشد. طبق مشاهدات تجربی، تغییرشکل پلاستیکی کمی در هنگام ماشینکاری رخ می‌دهد و مقاومت شکست آنها 100-10 برابر کمتر از فولاد می‌باشد [5].

عموماً مشکلات اساسی که در سوراخکاری کامپوزیتها مواجه هستیم عبارتند از: لایه‌لایه‌شدگی در ورودی و خروجی سوراخ، ریش‌ریش شدن در خروجی، پلیسه، زبری سطح دیواره سوراخ [6]. سوراخکاری کامپوزیت‌های لایه‌ای به شدت تحت تاثیر میزان تمایل ماده به لایه‌لایه‌شدگی و جدایش الیاف از زمینه تحت نیروهای ماشینکاری (نیرو و گشتاور محوری) می‌باشد [8,7]. لایه‌لایه‌شدگی از مهم‌ترین عیوب شایع در ماشینکاری کامپوزیت‌های لایه‌ای پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف می‌باشد که به سرعت خواص مکانیکی آنها را در عمل کاهش می‌دهد [9,10]. به علت شایع‌بودن این مشکل، تلاشهای متعددی در زمینه تعیین مقدار لایه‌لایه‌شدگی، مدلسازی و ایجاد ارتباط با پارامترهای ماشینکاری انجام شده است [5,11].

محققان متعددی درباره فرآیند سوراخکاری کامپوزیت‌های لایه‌ای، گزارش داده‌اند که کیفیت سطوح برشکاری وابستگی شدیدی به پارامترهای سوراخکاری، جنس و هندسه ابزار دارد [12-16]. نیروی محوری و جدایش لایه‌ای می‌تواند بوسیله تغییر هندسه حداقل گردد. یک رابطه مستقیم بین نیروهای برش و لایه‌لایه‌شدگی در ورودی و خروجی ابزار برای محدوده وسیعی از سرعتها مشخص شده است [17]. از ابزارهای مختلف با هندسه‌های متنوع در زوایای راس، مارپیچ و یا قطره‌ای مختلف جهت ماشینکاری کامپوزیتها استفاده شده است. آرولا و همکاران [18] طی انجام فرآیند دوربری بر روی کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف شیشه، از ابزار الماس پلی-کریستال استفاده کرده‌اند. داویم و همکاران [19] جهت سوراخکاری زمینه پلی‌استر با الیاف شیشه ابزار کاربید سمانته (K10) را بکار برده‌اند. در این بررسی نشان داده شده است که با افزایش سرعت پیشروی و سرعت برشی، مقدار لایه‌لایه‌شدگی افزایش می‌یابد. از آنجاییکه ابزارهای الماس پلی‌کریستال گران‌قیمت می‌باشند، ابزارهای دنداندار جایگزین آنها شده‌اند که عملکرد مناسبتری نیز دارا می‌باشند [17]. لاکاله و همکاران [20] برای سوراخکاری کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن، یک ابزار دنداندار طراحی کرده و تحت آزمایش قرار دادند. ولایدهام و همکارانش مشاهده نمودند که مته سه پایه، نیروی محوری به مراتب پایینتری نسبت به دو مته دیگر دارد اما گشتاور بالاتری نیاز دارد چون اغلب برش در محیط مته رخ می‌دهد [21]. تساو و همکارانش نیروی محوری را در سوراخکاری کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن با مته پله‌ای هسته‌دار تحت شرایط مختلف ماشینکاری بررسی نمودند. مزیت این نوع مته اعمال نیروی محوری بصورت محیطی می‌باشد که باعث کاهش میزان جدایش لایه‌ای می‌گردد [22]. در فعالیتی دیگر او و همکارانش به ارزیابی نیروی محوری و صافی سطح در سوراخکاری مواد کامپوزیتی با استفاده از مته سرشمعی پرداختند [23]. هوچنگ و همکارانش با استفاده از روش تحلیلی، نیروی بحرانی را برای انواع مختلف مته تعیین

<sup>2</sup> Analysis of Variance (ANOVA)

<sup>3</sup> Regression

<sup>4</sup> epoxy

<sup>1</sup> Polycrystalline Diamond (PCD)

نمودند. نتایج وی نشان داد که مهمترین فاکتورها به ترتیب نرخ پیشروی و سرعت برشی می باشند و بهترین حالت برای جدایش لایه ای در کمترین سرعت برشی و نرخ پیشروی اتفاق می افتد. شیها و همکارانش [33] از روش تاگوچی و آنالیز واریانس برای بررسی اثر هندسه مته و شرایط ماشینکاری بر عمر ابزار و کیفیت سوراخ در سوراخکاری کامپوزیت نازک تقویت شده با الیاف کربن بدون ورق حامی با مته ریز استفاده نمودند که مطابق نتایج هندسه ابزار و نرخ پیشروی مهمترین عامل تاثیر گذار بر نیروی محوری، فاکتور جدایش لایه ای و عمر ابزار می باشند. ایسیک و همکارانش [34] اثر پارامترهای ماشینکاری بر میزان خرابی در سوراخکاری کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه را توسط آنالیز واریانس بررسی نمودند که افزایش سرعت برشی و کاهش نرخ پیشروی باعث کاهش میزان جدایش لایه‌ای در ورود و خروج مته می‌شود. موهان و همکارانش [35] با استفاده از روشهای آماری تاگوچی و پاسخ سطح و با در نظر گرفتن پارامتر ضخامت نمونه علاوه بر پارامترهای ماشینکاری دریافتند که ضخامت نمونه و نرخ پیشروی تاثیر مهمتری در جدایش لایه ای در هنگام خروج مته دارند.

کارنیک و همکارانش [36] برای بررسی جدایش لایه ای در سوراخکاری کامپوزیت کربنی با سرعت بالا از روش شبکه عصبی مصنوعی استفاده نمودند و سه فاکتور سرعت پیشروی، نرخ پیشروی و زاویه راس مته را برای طراحی آزمایشها بکار بردند. کیریشنا راج و همکارانش [37] با استفاده از روش بهینه‌سازی چند متغیره الگوریتم ژنتیک، پارامترهای بهینه ماشینکاری در سوراخکاری با سرعت بالای کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن را تعیین نمودند.

کیریشنا مورتی و همکارانش [38] از روش تاگوچی و بهینه سازی فازی خاکستری بر اساس 5 خروجی نیروی محوری، گشتاور، جدایش لایه ای در ورود و خروج، عدم هم مرکزی سوراخ استفاده نمودند و دریافتند که نرخ پیشروی مهمترین عامل تاثیرگذار می‌باشد. در فعالیتی مشابه پالانیکومار [39] از آنالیز درجه بندی نسبی خاکستری<sup>1</sup> برای یافتن پارامترهای بهینه در سوراخکاری کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه استفاده نمود. لیسکو و همکارانش [40] اثر پوشش دهی بر روی مته را بر فرآیند سایش آن بررسی نمودند. آنها همچنین از یک مدل پدیده‌شناسی برای ارتباط بین نیروی محوری با پارامترهای ماشینکاری و سایش ابزار استفاده نمودند.

تحقیقهای انجام یافته تاکنون نشان می‌دهد که بررسی لایه‌لایه‌شدگی در سوراخهای ایجاد شده در کامپوزیتها از اهمیت بالایی برخوردار بوده و تحت تاثیر پارامترهای مختلفی می باشد. در این پژوهش با بهره‌گیری از روش طراحی آزمایش تاگوچی، تاثیر قطر مته، ضخامت قطعه کار کامپوزیتی و پارامترهای ماشینکاری شامل سرعت پیشروی، سرعت برشی و پیش‌مته‌زنی بر میزان لایه‌لایه‌شدگی در فرآیند سوراخکاری با استفاده از ابزار تنگستن کاربرد مورد بررسی قرار گرفته و همچنین یک رابطه آماری جهت تحلیل مقدار تاثیر این پارامترها بر میزان لایه‌لایه‌شدگی ارائه شده است. در نهایت مقادیر بهینه در راستای به حداقل رساندن مقدار لایه‌لایه‌شدگی ارائه شده است.

2- شرایط آزمایش  
در این پژوهش، رزین اپوکسی LY 160 و سفت کننده Hardner 160 با نسبت یک به چهار به عنوان زمینه کامپوزیت استفاده شدند. این رزین دارای خواص مکانیکی مناسب و ویسکوزیته پایین می‌باشد که ماده را برای کاربردهای مختلف مناسب می‌کند. همچنین از پارچه بافته از الیاف کربن نوع T700 به عنوان تقویت کننده در این تحقیق استفاده شد. جدول 1 مشخصات زمینه و الیاف بکار رفته در کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن را نشان می‌دهد. نمونه‌ها در سه ضخامت تهیه شده‌اند: 3 mm، 6 mm، 9 mm. برای دسترسی به ورقه‌ای به اندازه‌ی تقریبی 3 mm از 8 لایه کربن و همینطور برای ضخامت 6 mm از 16 لایه و برای نمونه‌ی 9 mm از 24 لایه کربن استفاده گردید. کامپوزیتها به روش دستی ساخته شده و سپس در دمای اتاق قرار گرفتند. لایه‌ها در زوایای 90 درجه نسبت بهم قرار گرفته‌اند. شماتیک لایه‌گذاری و تصویر ورودی سوراخ در قطعه کار کامپوزیتی در شکل 1 نشان داده شده است.

جهت انجام آزمایشها بصورت اتوماتیک از دستگاه دریل یونیورسال ساخت ماشین‌سازی تبریز استفاده گردید. در این پژوهش از ابزار از جنس کار باید تنگستن در شکل 2 استفاده شده است که دارای 10٪ کبالت و 88٪ تنگستن بوده و ساخت شرکت هان دیلز<sup>2</sup> ترکیه می‌باشد.

از آنجاییکه قطر ابزار بر نیروی محوری و در نتیجه بر مقدار لایه‌لایه‌شدگی تاثیر دارد [32]، جهت بررسی میزان تاثیر این پارامتر، از این ابزار در قطرهای 6 و 10 میلی‌متر تهیه گردید. همچنین جهت اندازه‌گیری و بررسی میزان لایه‌لایه‌شدگی در اطراف سوراخ، دستگاه اندازه‌گیری بینایی<sup>3</sup> شرکت ایسون<sup>4</sup> بکار گرفته شد (شکل 3).

در آزمایشها از مایع خنک کننده استفاده نشده است که به علت آلودگی کامپوزیتها به مایع خنک کاری می‌باشد. همچنین ورق کامپوزیتی بین دو صفحه فلزی قرار گرفته و محکم شد تا از هرگونه ارتعاش و جابجایی جلوگیری شود.

طراحی آزمایشات به روش تاگوچی، بطور گسترده در تحلیلهای مهندسی کاربرد دارد. بر اساس روش تاگوچی در ابتدا پارامترهای مهم و موثر در نتایج آزمایش ها شناسایی شده و تعداد سطوحی که لازم برای بررسی آنها است مشخص می شوند. سپس با استفاده از جدول های خاص طراحی آزمون تاگوچی تعداد این آزمایش ها تا حد بسیار زیادی کاهش می‌یابد که سبب افزایش دقت و کاهش هزینه‌های آزمایشها می‌شود. پس از معین شدن شرایط ویژه برای آزمایشها و پارامترهای مورد بررسی، آزمایشها انجام شده و نتایج ثبت می‌گردند. در نهایت می‌توان با تحلیل این آزمایشات، نتایج بدست آمده را تحلیل کرد. رفتار نتایج بدست آمده بر اساس آنالیز میانگین و آنالیز واریانس می باشد [41-44].

جدول 1 خواص مکانیکی و فیزیکی رزین اپوکسی LY 160 و الیاف کربن T700

Table 1 Mechanical and physical properties of LY 160 epoxy and T700 carbon fibers

خواص ماده	اپوکسی LY 160	الیاف کربن T700
مدول الاستیسیته (GPa)	3.5	230
استحکام کششی (MPa)	70	410
چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	1.20	1.8

<sup>2</sup> HANN DEELZ

<sup>3</sup> Visual Measurement Machine (VMM)

<sup>4</sup> Easson

کارنیک و همکارانش [36] برای بررسی جدایش لایه ای در سوراخکاری کامپوزیت کربنی با سرعت بالا از روش شبکه عصبی مصنوعی استفاده نمودند و سه فاکتور سرعت پیشروی، نرخ پیشروی و زاویه راس مته را برای طراحی آزمایشها بکار بردند. کیریشنا راج و همکارانش [37] با استفاده از روش بهینه‌سازی چند متغیره الگوریتم ژنتیک، پارامترهای بهینه ماشینکاری در سوراخکاری با سرعت بالای کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن را تعیین نمودند.

کیریشنا مورتی و همکارانش [38] از روش تاگوچی و بهینه سازی فازی خاکستری بر اساس 5 خروجی نیروی محوری، گشتاور، جدایش لایه ای در ورود و خروج، عدم هم مرکزی سوراخ استفاده نمودند و دریافتند که نرخ پیشروی مهمترین عامل تاثیرگذار می‌باشد. در فعالیتی مشابه پالانیکومار [39] از آنالیز درجه بندی نسبی خاکستری<sup>1</sup> برای یافتن پارامترهای بهینه در سوراخکاری کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه استفاده نمود. لیسکو و همکارانش [40] اثر پوشش دهی بر روی مته را بر فرآیند سایش آن بررسی نمودند. آنها همچنین از یک مدل پدیده‌شناسی برای ارتباط بین نیروی محوری با پارامترهای ماشینکاری و سایش ابزار استفاده نمودند.

تحقیقهای انجام یافته تاکنون نشان می‌دهد که بررسی لایه‌لایه‌شدگی در سوراخهای ایجاد شده در کامپوزیتها از اهمیت بالایی برخوردار بوده و تحت تاثیر پارامترهای مختلفی می باشد. در این پژوهش با بهره‌گیری از روش طراحی آزمایش تاگوچی، تاثیر قطر مته، ضخامت قطعه کار کامپوزیتی و پارامترهای ماشینکاری شامل سرعت پیشروی، سرعت برشی و پیش‌مته‌زنی بر میزان لایه‌لایه‌شدگی در فرآیند سوراخکاری با استفاده از ابزار تنگستن کاربرد مورد بررسی قرار گرفته و همچنین یک رابطه آماری جهت تحلیل مقدار تاثیر این پارامترها بر میزان لایه‌لایه‌شدگی ارائه شده است. در نهایت مقادیر بهینه در راستای به حداقل رساندن مقدار لایه‌لایه‌شدگی ارائه شده است.

2- شرایط آزمایش  
در این پژوهش، رزین اپوکسی LY 160 و سفت کننده Hardner 160 با نسبت یک به چهار به عنوان زمینه کامپوزیت استفاده شدند. این رزین دارای خواص مکانیکی مناسب و ویسکوزیته پایین می‌باشد که ماده را برای کاربردهای مختلف مناسب می‌کند. همچنین از پارچه بافته از الیاف کربن نوع T700 به عنوان تقویت کننده در این تحقیق استفاده شد. جدول 1 مشخصات زمینه و الیاف بکار رفته در کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن را نشان می‌دهد. نمونه‌ها در سه ضخامت تهیه شده‌اند: 3 mm، 6 mm، 9 mm. برای دسترسی به ورقه‌ای به اندازه‌ی تقریبی 3 mm از 8 لایه کربن و همینطور برای ضخامت 6 mm از 16 لایه و برای نمونه‌ی 9 mm از 24 لایه کربن استفاده گردید. کامپوزیتها به روش دستی ساخته شده و سپس در دمای اتاق قرار گرفتند. لایه‌ها در زوایای 90 درجه نسبت بهم قرار گرفته‌اند. شماتیک لایه‌گذاری و تصویر ورودی سوراخ در قطعه کار کامپوزیتی در شکل 1 نشان داده شده است.

جهت انجام آزمایشها بصورت اتوماتیک از دستگاه دریل یونیورسال ساخت ماشین‌سازی تبریز استفاده گردید. در این پژوهش از ابزار از جنس کار باید تنگستن در شکل 2 استفاده شده است که دارای 10٪ کبالت و 88٪ تنگستن بوده و ساخت شرکت هان دیلز<sup>2</sup> ترکیه می‌باشد.

از آنجاییکه قطر ابزار بر نیروی محوری و در نتیجه بر مقدار لایه‌لایه‌شدگی تاثیر دارد [32]، جهت بررسی میزان تاثیر این پارامتر، از این ابزار در قطرهای 6 و 10 میلی‌متر تهیه گردید. همچنین جهت اندازه‌گیری و بررسی میزان لایه‌لایه‌شدگی در اطراف سوراخ، دستگاه اندازه‌گیری بینایی<sup>3</sup> شرکت ایسون<sup>4</sup> بکار گرفته شد (شکل 3).

در آزمایشها از مایع خنک کننده استفاده نشده است که به علت آلودگی کامپوزیتها به مایع خنک کاری می‌باشد. همچنین ورق کامپوزیتی بین دو صفحه فلزی قرار گرفته و محکم شد تا از هرگونه ارتعاش و جابجایی جلوگیری شود.

<sup>1</sup> Analysis of grey relational grade



Fig. 3 Visual Measurement Machine

شکل 3 دستگاه اندازه‌گیری بینایی

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

در این رابطه  $D_{max}$ : حداکثر قطر لایه‌لایه‌شدگی (mm)، و  $D_0$ : قطر سوراخ (mm)، و  $F_d$ : معیار لایه‌لایه‌شدگی (mm/mm)، می‌باشد. شماتیک این روش در شکل 4 نشان داده شده است.

همواره، اندازه‌گیری مقدار لایه‌لایه‌شدگی مشکل و چالش برانگیز بوده است. بدست آوردن اندازه، شکل و موقعیت لایه‌لایه‌شدگی برای برآورد صدمات ماشینکاری ضروری می‌باشد. میکروسکوپ نوری و یا پردازش تصویر از جمله روشهایی می‌باشند که برای اندازه‌گیری لایه‌لایه‌شدگی در لایه‌های ورودی و خروجی استفاده شده‌اند [46، 49]. روش اولتراسونیک سی اسکن<sup>1</sup> نیز برای اندازه‌گیری لایه‌لایه‌شدگی در لایه‌های میانی مورد استفاده قرار می‌گیرد [50]. همچنین برخی از محققان با استفاده از روشهای اندازه‌گیری مختلف [28، 51] مقدار لایه‌لایه‌شدگی در کامپوزیتها را مورد بررسی قرار داده‌اند.

در این پژوهش برای اندازه‌گیری معیار لایه‌لایه‌شدگی ابتدا قطر سوراخ با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری بینایی اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری حداکثر قطر لایه‌لایه‌شدگی، نقاط آسیب دیده در اطراف سوراخ انتخاب و بر مبنای این نقاط، بزرگترین دایره ممکن رسم شده و قطر آن به عنوان  $D_{max}$  انتخاب شد.

جدول 2 فاکتورها و سطوح پاسخ

Table 2 Factors and response levels			فاکتورها
سطوح			
3	2	1	
-	دارای پیش‌مته	بدون پیش‌مته	پیش‌مته زنی
0	10	6	قطر ابزار
0.45	0.28	0.11	نرخ پیشروی
1400	900	450	سرعت دورانی
9	6	3	ضخامت قطعه‌کار



Fig. 1 Hole entry in CFRP (Diameter: 10 mm, Spindle Speed: 1400 rpm, Thickness: 3 mm) a) Feed rate: 0.28 mm/rev, b) Feed rate: 0.11 mm/rev

شکل 1 ورودی سوراخ در کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن (قطر 10 میلیمتر، سرعت دورانی 1400 rpm، ضخامت 3 میلیمتر) (a) نرخ پیشروی 0.28 mm/rev، (b) نرخ پیشروی 0.11 mm/rev

با در نظر داشتن توان ماشین دریل مورد استفاده و با توجه به محدوده سرعتهای پیشنهادی در منابع مختلف [46,45]، پارامترهای ماشینکاری در آزمایشها سه سرعت دورانی 450، 900 و 1400 دور بر دقیقه و نرخ پیشرویهای 0.11، 0.28 و 0.45 میلیمتر بر دور انتخاب شدند. در این پژوهش 5 فاکتور در سطوح 2 و 3 بکار گرفته شده است. جدول 2 فاکتورها و سطوح مورد نظر را نشان می‌دهد.

از آنجاییکه سطح‌بندی فاکتورها متفاوت می‌باشد، در نتیجه از روش طراحی تاگوچی با سطوح مختلف جهت طراحی آزمایشات استفاده گردید. جدول طراحی آزمایشات در جدول 3 نشان داده شده است که 36 آزمایش با این 5 فاکتور بایستی انجام شود.

### 3- نتایج و بحث

بر خلاف فلزات، کامپوزیتها از دو یا چند فاز با استحکام، سختی و هدایت حرارتی متفاوت ساخته می‌شوند. به علت ناهمسانگردی مواد استفاده‌شده در کامپوزیتها، اغلب مشکلات سوراخکاری از اینجا به وجود می‌آید. با توجه به مقالات انجام‌شده، از بین مشکلات سوراخکاری، لایه‌لایه‌شدگی مهمترین عامل در ایجاد مشکل در مجموعه‌های مونتاژی می‌باشد [17]. این پدیده در بارگذاربهای خستگی نیز قطعه را دچار مشکل می‌کند [24].

عموماً لایه‌لایه‌شدگی در عملیات سوراخکاری در لایه‌های ناحیه ورود ابزار و خروج آن در قطعه‌کار رخ می‌دهد [17]. البته در لایه‌های میانی قطعه‌کار نیز لایه‌لایه‌شدگی رخ می‌دهد که بایستی با دستگاههای دقیق اندازه‌گیری شود [48]. طبق بررسیهای محققان، در هنگام خروج ابزار به علت اعمال نیروی فشاری از ابزار به لایه‌های کنده نشده، لایه‌ها دچار خمش الاستیک می‌شوند. در ادامه که تعداد لایه‌های مقاوم کم می‌شود آنگاه مقدار تنش اعمالی بیش از تنش بین‌لایه‌ای شده و موجب شکست لایه‌ها می‌گردد که منجر به ایجاد ترک بین‌لایه‌ای در اطراف سوراخ می‌شود و در نتیجه پدیده لایه‌لایه‌شدگی رخ می‌دهد. همچنین لایه‌لایه‌شدگی در ناحیه ورود ابزار به علت اعمال نیروی ابزار به لایه‌ها و بلندکردن آنها می‌باشد که ابزار، مانند یک پیچ قدرت عمل می‌کند [45].

برای اندازه‌گیری میزان لایه‌لایه‌شدگی در کامپوزیت از روابط مختلفی بعنوان معیار لایه‌لایه‌شدگی استفاده شده است تا بتوان در شرایط و در مواد مختلف مقدار این آسیب را تحت مقایسه قرار داد که در اینجا از رابطه (1) استفاده می‌شود [45].



Fig. 2 Tungsten Carbide tool

شکل 2 ابزار کاربرد تنگستن

<sup>1</sup> Ultrasonic C-Scan

آن، ابزار از مسیر خود منحرف می‌شود. همچنین افزایش نیروی ماشینکاری موجب ایجاد ارتعاش در ابزار می‌گردد. در نتیجه طبق شکل 6، افزایش سرعت پیشروی موجب افزایش لایه‌لایه‌شدگی می‌شود.

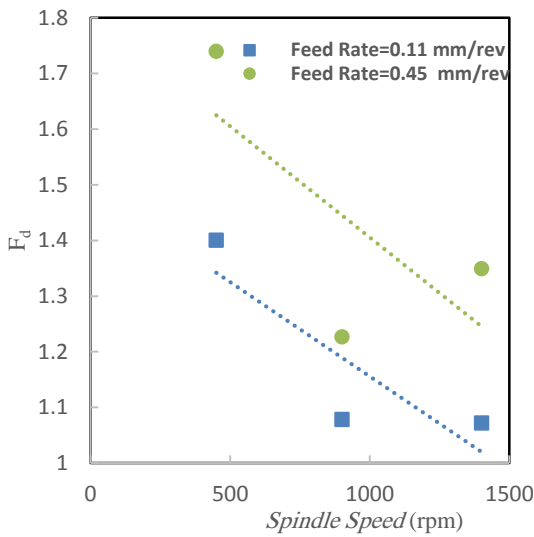


Fig. 5 Effect of spindle speed on delamination (Diameter: 10 mm, Thickness: 3mm)

شکل 5 تاثیر سرعت دورانی و سرعت پیشروی بر مقدار لایه‌لایه‌شدگی (قطر مته 10 میلیمتر، ضخامت 3 میلیمتر)

جدول 3 جدول طراحی آزمایشات تاگوچی و نتایج لایه‌لایه‌شدگی

Table 3 Taguchi design of experiments and delamination results

ردیف	پیش-مته	قطر ابزار	نرخ پیشروی	سرعت دورانی	ضخامت	لایه‌لایه‌شدگی
1	1	1	1	1	1	1.305
2	1	1	2	2	2	1.513
3	1	1	3	3	3	1.558
4	1	1	1	1	1	1.305
5	1	1	2	2	2	1.513
6	1	1	3	3	3	1.558
7	1	1	1	1	2	1.380
8	1	1	2	2	3	1.405
9	1	1	3	3	1	1.472
10	1	2	1	1	3	1.549
11	1	2	2	2	1	1.216
12	1	2	3	3	2	1.400
13	1	2	1	2	3	1.308
14	1	2	2	3	1	1.377
15	1	2	3	1	2	1.623
16	1	2	1	2	3	1.308
17	1	2	2	3	1	1.377
18	1	2	3	1	2	1.624
19	2	1	1	2	1	1.196
20	2	1	2	3	2	1.261
21	2	1	3	1	3	1.565
22	2	1	1	2	2	1.283
23	2	1	2	3	3	1.372
24	2	1	3	1	1	1.209
25	2	1	1	2	3	1.220
26	2	1	2	3	1	1.314
27	2	1	3	1	2	1.192
28	2	2	1	2	3	1.319
29	2	2	2	3	1	1.428
30	2	2	3	1	2	1.226
31	2	2	1	2	3	1.301
32	2	2	2	3	1	1.292
33	2	2	3	2	2	1.293
34	2	2	1	3	1	1.072
35	2	2	2	1	2	1.345
36	2	2	3	2	3	1.397

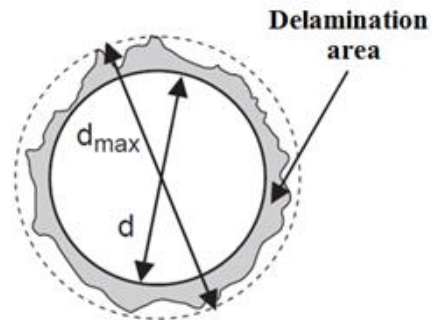


Fig. 4 Delamination area at hole

شکل 4 محدوده لایه‌لایه‌شدگی در سوراخ [45]

اعداد بدست‌آمده برای معیار لایه‌لایه‌شدگی برای شرایط تعریف‌شده ماشینکاری در جدول 3 نشان داده شده است. در ادامه نمودار رگرسیون هر یک از پارامترهای مورد بررسی تک به تک رسم شده و مورد بحث قرار گرفته است.

### 1-3- اثر سرعت دورانی

همانطور که از شکل 5 مشهود است، با ابزار به قطر 5 میلیمتر بر روی قطعه-کار به ضخامت 3 میلیمتر مشاهده می‌شود در هر کدام از سرعت‌های پیشروی، با افزایش سرعت دورانی مقدار لایه‌لایه‌شدگی کاهش می‌یابد. علت این امر آن است که هر چه سرعت دورانی بیشتر می‌شود تعداد دفعاتی که لبه‌های برنده ابزار فرصت براده‌برداری به ازای هر میلیمتر پیشروی را پیدا می‌کنند، بیشتر می‌شود. (نسبت به سرعت دورانی کمتر در همان مقدار پیشروی) و در این هنگام براده تشکیل‌شده نمی‌تواند باعث ایجاد لایه‌لایه‌شدگی شود چون توسط براده بعدی که وجود آمده (در اثر دوران ابزار و پیشروی) سریع شکسته می‌شود.

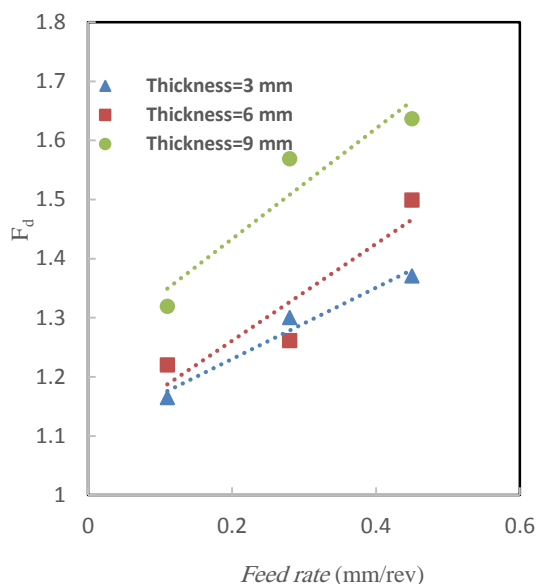
همچنین افزایش سرعت دورانی در فرآیندهای فرزکاری موجب افزایش دما می‌شود که به علت اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار می‌باشد [52]. بنابراین افزایش سرعت دورانی موجب کاهش نیرو می‌شود [53]. در نتیجه نیرو و گشتاور کمتری بر الیاف وارد آمده، سبب گرم‌شدن رزین می‌گردد و محدوده لایه‌لایه‌شدگی کاهش یافته و سبب بهبود و بالارفتن دقت سوراخ می‌گردد.

### 2-3- اثر سرعت پیشروی

نتایج حاصل از اندازه‌گیری عدد لایه‌لایه‌شدگی در شکل 6 نشان داده شده است. نتایج حاصل بیانگر این هستند که با افزایش سرعت پیشروی، عدد لایه‌لایه‌شدگی افزایش می‌یابد. عامل موثر در این زمینه می‌تواند دمای ناحیه سوراخکاری باشد. در پیشروی‌های بالا، دمای برش زیادتر می‌شود.

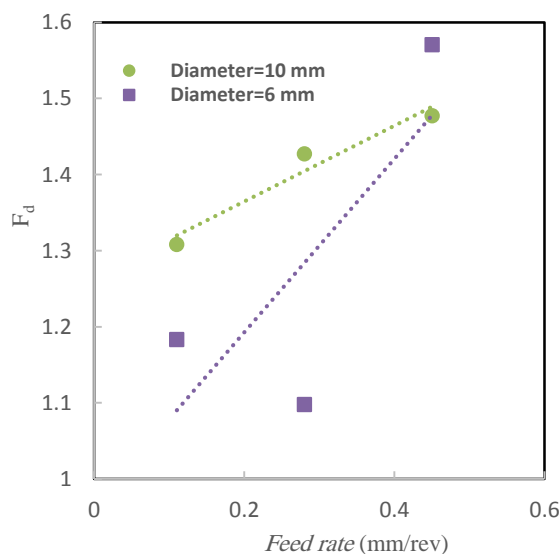
این امر سبب نرم‌تر شدن ماده زمینه که دمای ذوب پایینی دارد، می‌شود. نرم‌شدن ماده زمینه، موجب کاهش استحکام آن می‌شود و در نتیجه توانایی ماده زمینه برای نگهداشتن لایه‌ها در کنار هم کاهش می‌یابد و بدین ترتیب لایه‌ها راحتتر از هم جدا می‌شوند و لایه‌لایه‌شدگی افزایش می‌یابد. از طرفی عامل اصلی در ایجاد لایه‌لایه‌شدگی، نیروی محوری می‌باشد. زیرا افزایش سرعت پیشروی موجب افزایش نیروی ماشینکاری شده [53,38] و به دنبال

براده‌ی ایجاد شده می‌شود. چون در این حالت براده‌های ایجاد شده به صورت ریز هستند (براده‌های کوچک تشکیل می‌شوند) و اثر این براده‌ها خیلی کمتر از حالت پیوسته و بزرگ می‌باشد و از طرفی این براده‌ها از دو طرف ابزار یعنی بالا و پایین به سهولت از سوراخ خارج می‌شوند که خود این مساله هم تاثیر بسزایی در کاهش درجه حرارت در ابزار و قطعه دارد و نهایتاً منجر به کمتر شدن لایه‌لایه‌شدگی بین لایه‌ها می‌شود [55,54].



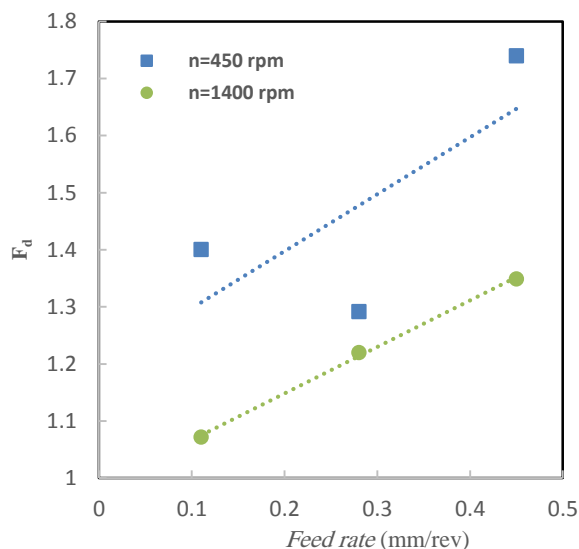
**Fig. 7** Effect of workpiece thickness on delamination (Diameter: 6mm, Spindle speed: 1400 rpm)

شکل 7 تاثیر ضخامت قطعه‌کار بر مقدار لایه‌لایه‌شدگی (بدون پیش‌مته، قطر مته 6 میلیمتر، سرعت دورانی 1400 rpm)



**Fig. 8** Effect of tool diameter on delamination (Pre-drilled, Diameter: 10 mm, Thickness: 9 mm, Spindle speed: 1400 rpm)

شکل 8 تاثیر قطر ابزار بر مقدار لایه‌لایه‌شدگی (با پیش‌مته، قطر مته 10 میلیمتر، ضخامت 9 میلیمتر، سرعت دورانی 1400 rpm)



**Fig. 6** Effect of feed rate on delamination (Diameter: 5 mm, Thickness: 3mm)

شکل 6 تاثیر نرخ پیشروی بر مقدار لایه‌لایه‌شدگی (قطر مته 5 میلیمتر، ضخامت 3 میلیمتر)

### 3-3- اثر ضخامت

مقدار لایه‌لایه‌شدگی در حالت بدون پیش‌مته و سرعت دورانی 1400 دور بر دقیقه در ضخامت‌های مختلف در شکل 7 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت قطعه‌کار میزان لایه‌لایه‌شدگی افزایش می‌یابد. در مورد بیشتر شدن ضخامت قطعه‌کار می‌توان گفت که چون در قطعه‌کارهای با ضخامت بیشتر، تعداد لایه‌ها بیشتر شده و نیروی لازم جهت سوراخکاری افزایش می‌یابد، گرمای بیشتر تولید شده و نهایتاً سبب بزرگتر شدن عدد لایه‌لایه‌شدگی می‌گردد [35].

### 3-4- اثر قطر مته

شکل 8 بیانگر تاثیر قطر مته در میزان لایه‌لایه‌شدگی می‌باشد که ابزار به قطرهای 6 و 10 میلیمتر مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به اینکه سرعت دورانی 1400 دور بر دقیقه و میزان پیشروی یکی می‌باشد، اما مشاهده می‌شود مقدار لایه‌لایه‌شدگی در مته با قطر 10 میلیمتر بیشتر از مته با قطر 6 میلیمتر می‌باشد. بین ابزار و قطعه‌کار نیروی تماسی وجود دارد و اندازه‌ی این نیرو رابطه مستقیم با میزان لایه‌لایه‌شدگی دارد یعنی هر چه قطر مته تغییر کند میزان این نیرو هم متناسب با آن تغییر می‌کند. طبق شکل 8 مشخص می‌شود که در شرایط یکسان هر چه قطر مته بیشتر شده، لایه‌لایه‌شدگی نیز بزرگتر می‌شود [50].

### 3-5- اثر پیش‌مته‌زنی

طبق شکل 9 مقدار لایه‌لایه‌شدگی در حالت پیش‌مته‌خورده کمتر می‌باشد. همانطور که در نمودار مشخص است مقدار لایه‌لایه‌شدگی صرف نظر از سرعت دورانی و میزان پیشروی که قبلاً در مورد اثر آنها صحبت شده است، متوجه می‌شویم که در شرایط مشابه مقدار لایه‌لایه‌شدگی در حالت پیش‌مته‌خورده سوراخ کاهش یافته است. یعنی پیش‌مته‌زدن در عملیات سوراخکاری باعث کاهش لایه‌لایه‌شدگی می‌شود. علت این امر این است که عملیات پیش‌مته‌زدن باعث حذف اثر جان مته و بدنبال آن حذف نیروهای

مقدار P مورد استفاده قرار می‌گیرند و در عمل مقدار P در مقالات گزارش شده و در محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار میانگین مربعات (MS) با تقسیم مقدار مجموع مربعات (SS) بر مقدار درجه آزادی بدست آمده و تاثیر مقدار تغییر هر پارامتر را بر لایه‌لایه‌شدگی نشان می‌دهد. از طرفی مقدار خطای مجموع مربعات (SS) در این پژوهش نشان می‌دهد که 10.45٪ تغییرات داده‌ها را با استفاده از این مدل نمی‌توان پیش بینی کرد که مقدار نسبتاً قابل قبولی می‌باشد.

در آزمون تاگوچی با توجه به انتخاب معیار بزرگتر بهتر، کوچکتر بهتر و یا برابری با مقدار اسمی، می‌توان سطح بهینه پارامتر را بدست آورد. در این پژوهش برای محاسبه نتایج بدست‌آمده از آزمون‌ها، از معیار کوچکتر بهتر استفاده می‌شود. دلیل این امر این نکته است که از نظر جبری، کمترین عدد برای لایه‌لایه‌شدگی، بهترین مقدار می‌باشد. جدول پاسخها در حالت کمتر بهتر برای داده‌های میانگین مقدار لایه‌لایه‌شدگی در جدول 5 نشان داده شده است.

با استفاده از ابزار آماری رتبه‌بندی<sup>2</sup> در جدول 5 بدست می‌آید که تاثیرگذارترین پارامتر موثر بر مقدار لایه‌لایه‌شدگی ضخامت بوده و سپس برترتیب پیش‌مته‌زنی، نرخ پیشروی، سرعت دورانی و قطر می‌باشد.

همچنین نمودار تاثیرات اصلی نیز در شکل 11 نشان داده شده است که میزان تاثیر هر پارامتر به تنهایی نشان داده شده است.

از این آنالیز، زمانی استفاده می‌شود که چند عامل موثر داشته باشیم. در این نمودار از کل داده‌های عمق پارگی میانگین گرفته و بصورت خط میانی در تمامی نمودارها در نظر می‌گیرد. این خط در تمامی نمودارها یکسان می‌باشد که مقدار آن 1.35 می‌باشد.

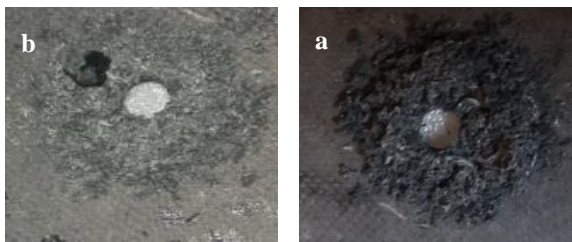


Fig. 10 a) Coarse chips (low spindle speed and high feed rate), b) Small chips (high spindle speed and low feed rate)

شکل 10 الف) براده درشت (سرعت دورانی پایین و پیشروی بالا)، ب) براده ریز (سرعت دورانی بالا و پیشروی پایین)

جدول 4 نتایج تحلیل واریانس برای مقدار لایه‌لایه‌شدگی

TABLE 4 Analysis of variance of delamination results				
پارامترها	درجه آزادی (DF)	مجموع مربعات (Adj SS)	میانگین مربعات (MS)	احتمال (P)
پیش‌مته‌زنی	1	0.143909	0.143909	0.000
قطر ابزار	1	0.000005	0.000005	0.974
سرعت پیشروی	2	0.082164	0.041082	0.002
سرعت دورانی	2	0.039596	0.019798	0.034
ضخامت	2	0.143925	0.071962	0.000
خطای مانده	21	0.104597	0.004981	
کل	29			

<sup>2</sup> Rank

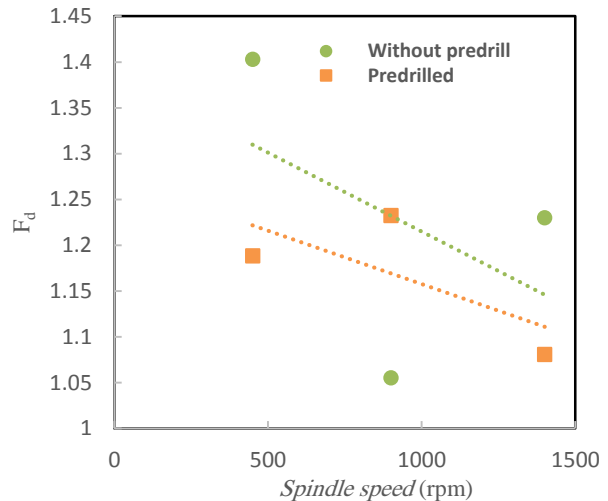


Fig. 9 Effect of predrilling on delamination (Diameter: 10 mm, Thickness: 9 mm, Spindle speed: 450 rpm, Feed rate: 0.45 mm/rev)

شکل 9 تاثیر پیش‌مته‌زنی بر مقدار لایه‌لایه‌شدگی (قطر مته 10 میلیمتر و ضخامت 9 میلیمتر، سرعت دورانی 450 rpm، سرعت پیشروی 0.45 mm/rev)

### 3-6- شکل براده تشکیل یافته

در هنگام سوراخکاری، طبق شکل 10 مشاهده می‌شود که در سرعت‌های دورانی پایین و پیشروی بالا، براده تقریباً شکل مارپیچ دارد. اما هنگامی که سرعت دورانی بالا می‌رود و پیشروی هم کاهش می‌یابد، براده به صورت پودر سیاه‌رنگی در می‌آید که نرم است و خیلی هم سبک می‌باشد. در نتیجه این براده‌ها مزاحم عملیات سوراخکاری نشده و سریع پخش می‌شوند و نیروی حاصل از براده کمتر شده و سوراخ، آسیب کمتری می‌بیند. البته بایستی توجه شود که تماس دست با این پودر باعث ایجاد سوزش شدیدی در دست می‌گردد که به دلیل وجود ذرات کربن در داخل این پودر می‌باشد و بسیار هم مضر می‌باشد و بهتر است عملیات در شرایط محافظت‌شده انجام گردد.

### 3-7- آنالیز واریانس

در این پژوهش، با استفاده از نرم افزار مینی‌تب<sup>1</sup>، عملیات آماری تحلیل واریانس بین داده‌ها انجام گردید که نتایج آن در جدول 4 نشان داده شده است. مقدار P در جدول 4، نشانگر این می‌باشد که اختلاف بین میانگین داده‌های مختلف در چه حدی مهم و قابل توجه می‌باشد. محققان سطح اهمیت حداکثر 10٪ را برای تحلیل داده‌ها در نظر می‌گیرند و مقدار P کمتر از 0.1 قابل قبول می‌باشد [56]. در این تحقیق نیز برای تمامی پارامترها بجز قطر ابزار، مقدار احتمال P کمتر از 0.05 می‌باشد و تاثیر اساسی بر مقدار لایه‌لایه‌شدگی دارند. ولی مقدار P برای پارامتر قطر ابزار 0.974 می‌باشد که مقدار زیادی است و نشانگر این می‌باشد که در مقایسه با سایر پارامترها تاثیر خیلی کمتری در مقدار لایه‌لایه‌شدگی دارد. همچنین مقدار درجه آزادی (DF) نشانگر مقدار اطلاعاتی می‌باشد که برای هر پارامتر استفاده شده است و در اینجا چون سطوح اطلاعات استفاده شده برای پارامترهای پیشروی، سرعت دورانی و ضخامت 3 بوده و بیشتر از سطوح اطلاعات برای قطر ابزار و پیش‌مته (DF = 2) می‌باشد، مقدار درجه آزادی بیشتری نیز دارا می‌باشد. مقدار مجموع مربعات (SS) و همچنین میانگین مربعات (MS) جهت محاسبه

<sup>1</sup> Minitab

شدگی می‌باشد که طبق شکل 12 با پارامترهای نرخ پیشروی 0.11، سرعت دورانی 1400 دور بر دقیقه، ضخامت 3 میلیمتر، قطر 10 میلیمتر و در حالت پیش‌مته‌خورده بدست می‌آید.

### 3-7-2- مانده‌ها و نمودارهای میانگین و سیگنال به نویز<sup>1</sup>

برای بررسی دقت مدل رگرسیون خطی و پراکندگی داده‌ها، نمودار پراکندگی مانده‌ها نسبت به مقادیر بدست آمده از رابطه 2 در شکل 13 و نمودار احتمال نرمال در شکل 14 نشان داده شده است که مشاهده می‌شود داده‌ها از پراکندگی مناسبی برخوردار می‌باشند و مقدار P کمتر از 0.1 بوده و برابر با 0.077 می‌باشد که مقدار قابل قبولی می‌باشد.

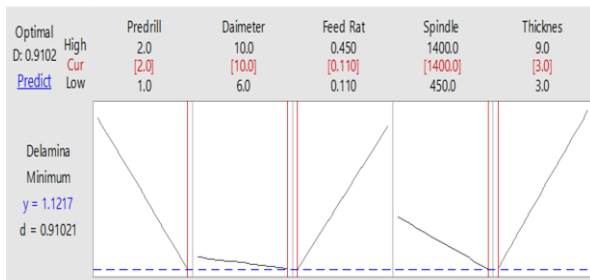


Fig. 12 Optimized parameters plot in all experiments

شکل 12 نمودار پارامترهای بهینه در کل آزمایشات

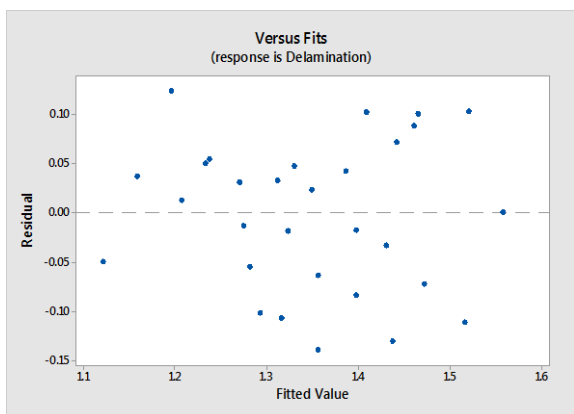


Fig. 13 Residuals plot

شکل 13 نمودار پراکندگی مانده‌ها

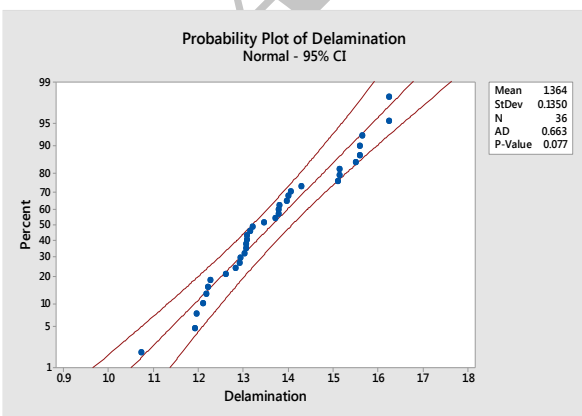


Fig. 14 Normal probability plot

شکل 14 نمودار احتمال نرمال

<sup>1</sup> Signal/Noise(S/N)

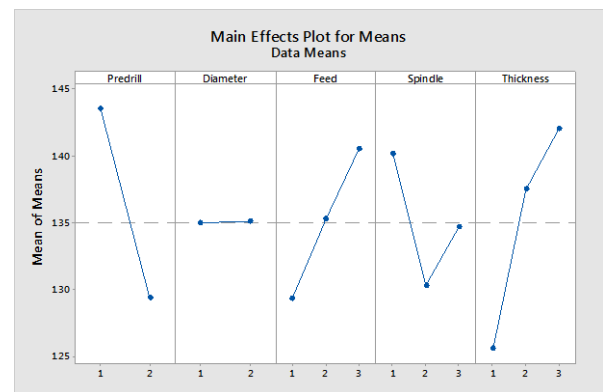


Fig. 11 Main effects plot for data means

شکل 11 نمودار تاثیرات اصلی برای میانگین داده‌ها

سیس برای مثال در نمودار پیش‌مته از کلیه داده‌های بدست آمده در

جدول 5 جدول پاسخ برای میانگین داده‌ها (کمتر بهتر)

Table 5 Response table for data means (smaller is better)

ضخامت	سرعت دورانی	سرعت پیشروی	قطر ابزار	پیش‌مته زنی	سطح
1.256	1.401	1.293	1.350	1.435	1
1.375	1.303	1.353	1.351	1.294	2
1.420	1.346	1.405			3
0.164	0.098	0.111	0.001	0.141	Delta Rank
1	4	3	5	2	

حالت بدون پیش‌مته میانگین گرفته و در نقطه 1 قرار می‌گیرد. همچنین از کلیه داده‌های بدست آمده در حالت با پیش‌مته میانگین گرفته و در نقطه 2 قرار می‌گیرد و به این ترتیب برای هر یک از سطوح مختلف در هر پارامتر میانگین گرفته و در نمودار مربوطه نشان داده می‌شود.

هر چه فاصله این خطوط از خط مرکزی بیشتر باشد نشانگر تاثیر بیشتر بر پارامتر پاسخ (لایه‌لایه‌شدگی) می‌باشد. مثلاً پارامتر ضخامت که فاصله نقاط خط از خط میانی بیشتر می‌باشد، نشان می‌دهد که این پارامتر تاثیر بیشتری در مقدار لایه‌لایه‌شدگی دارد و با کاهش ضخامت قطعه‌کار کامپوزیتی می‌توان لایه‌لایه‌شدگی را بیشتر کاهش داد.

برای مثال پارامتر قطر ابزار تاثیر چندانی بر لایه‌لایه‌شدگی ندارد و با تغییر مقادیر این پارامترها در این محدوده لایه‌لایه‌شدگی تغییر چندانی نمی‌کند.

### 3-7-1- مدل‌سازی و یافتن مقادیر بهینه

با استفاده از نتایج جدول 3 و به کمک نرم افزار مینی‌تب با انجام عملیات آماری رگرسیون خطی چند متغیره بین داده‌ها یک رابطه آماری بین معیار لایه‌لایه‌شدگی و پارامترهای مدنظر در این پژوهش، ارائه شد (رابطه 2).

$$\begin{aligned} \text{Delamination} = & 1.3873 - 0.1415\text{Predrill} \\ & - 0.00284\text{Diameter} + 0.3946\text{Feed} \\ & - 0.000051\text{Spindle} \\ & + 0.0248\text{Thickness} \end{aligned} \quad (2)$$

با مقایسه نتایج بدست آمده در جدول 3 و مدل ارائه شده، حداکثر مقدار خطای حاصل، 10٪ می‌باشد که نشان می‌دهد می‌توان با استفاده از این مدل 90٪ از مقادیر لایه‌لایه‌شدگی در سوراخکاری کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف کربن با استفاده از ابزار تنگستن کارباید را با دقت بالا پیش‌بینی نمود.

با استفاده از ابزار بهینه‌سازی و رابطه (2) مقادیر بهینه جهت انجام عملیات سوراخکاری بر روی کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن در شکل 12 نشان داده شده است. در واقع مقادیر بهینه همان کمترین مقدار لایه‌لایه-



## 4- نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر پارامترهای ماشینکاری در فرآیند سوراخکاری با استفاده از ابزار از جنس کاربید تنگستن بر روی کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن مورد بررسی قرار گرفت. از آنجاییکه در ماشینکاری کامپوزیتها با استفاده از این فرآیند، پارامتر لایه‌لایه‌شدگی حائز اهمیت می‌باشد، در این پژوهش، تاثیر مقدار پارامترهای ماشینکاری بر مقدار لایه‌لایه‌شدگی مورد بررسی قرار گرفت و پس از انجام آزمایشها نتایج زیر حاصل گردید:

- افزایش سرعت دورانی در فرآیند سوراخکاری مافوق صوت دوار موجب کاهش مقدار لایه‌لایه‌شدگی در ورودی سوراخ می‌گردد که به علت کاهش نیرو و گشتاور می‌باشد.
- افزایش مقدار سرعت پیشروی در این فرآیند موجب افت کیفیت سطحی سوراخ شده و مقدار لایه‌لایه‌شدگی را افزایش می‌دهد که به علت افزایش نیروی محوری و ارتعاش بیشتر ابزار می‌باشد.
- با افزایش ضخامت قطعه کار از 3 میلیمتر به 9 میلیمتر بعلت افزایش تعداد لایه‌ها و در نتیجه نیروی بیشتر، میزان لایه‌لایه‌شدگی افزایش می‌یابد.
- پیش‌مته‌زدن قبل از سوراخکاری نهایی باعث کاهش لایه‌لایه‌شدگی ورودی تا حداکثر 25٪ می‌شود.
- بنا بر آزمایشات انجام شده، هرچه قطر مته افزایش یابد مقدار لایه‌لایه‌شدگی نیز افزایش می‌یابد.
- در این پژوهش با استفاده از تحلیل آماری، مشخص گردید که پارامترهای تاثیرگذار بر مقدار لایه‌لایه‌شدگی بترتیب اهمیت عبارتند از : ضخامت قطعه‌کار، پیش‌مته‌زنی، سرعت پیشروی، سرعت دورانی و قطر ابزار.
- با استفاده از نرم افزار مینی‌تب، بین پارامترهای ماشینکاری و مقدار لایه‌لایه‌شدگی مدلی آماری ارائه گردید که با خطای زیر 10٪ نتایج را پیش‌بینی می‌کند.

## 5- مراجع

- [9] De Albuquerque, V. H. C. Tavares, J. M. R. S. and Durão, L. M. P., "Evaluation of Delamination Damage on Composite Plates Using an Artificial Neural Network for the Radiographic Image Analysis," *J Compos Mat*, Vol. 44, No. 9, pp. 1139-1159, 2010.
- [10] Persson, E. Eriksson, I. and Zackrisson, L., "Effects of Hole Machining Defects on Strength and Fatigue Life of Composite Laminates," *Compos Part A: Applied Sci Manuf*, Vol. 28, No. 2, pp. 141-151, 1997.
- [11] El-Sonbaty, I. and Khashaba, U. A. and Machaly, T., "Factors Affecting the Machinability of GFR/epoxy Composites," *Comp Struct*, Vol. 63, No. 3-4, pp. 329-338, 2004.
- [12] Chen, W., "Some Experimental Investigations in the Drilling of Carbon Fibre-reinforced Plastic (CFRP) Composite Laminates," *Int J Mach Tools Manufact*, Vol. 37, No. 8, pp. 1097-108, 1997.
- [13] Hocheng, H. and Tsao, C. C., "Comprehensive Analysis of Delamination in Drilling of Composite Materials with Various Drill bits" *Journal of materials processing technology*, Vol. 140, No. 1-3, pp. 335 - 339, 2003.
- [14] Davim, J. P. Reis, P. and Antonio, C. C., "Experimental Study of Drilling Glass Fiber Reinforced Plastics (GFRP) Manufactured by Hand hay - up," *Compos Sci Tech*, Vol. 64, No. 2, pp. 289 - 297, 2004.
- [15] Lazar, M-B. and Xirouchakis, P., "Experimental Analysis of Drilling Fiber Reinforced Composites," *Int J Mach tools Manuf*, Vol. 51, No. 12, pp. 937 - 946, 2011.
- [16] Abrao, A. M., "The Effect of Cutting Tool Geometry on Thrust Torce and Delamination when Drilling Glass Fibre Reinforced Plastic Composite," *Mat & Des*, Vol. 29, No. 2, pp. 508 -513, 2008.
- [17] Hocheng, H., "Machining Technology for Composite Materials," First ed., Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 333-364, 2011.
- [18] Arola, D. Ramulu, M. and Wang, D. H., "Chip Formation in Orthogonal Trimming of Graphite/epoxy Composite," *Compos Part A*, Vol. 27, pp. 121-133, 1996.
- [19] Davim, J. P. Reis, P. and Conceicao Antonio, C., "A Study on Milling of Glass Fiber Reinforced Plastics Manufactured by Hand-lay up Using Statistical Analysis (ANOVA)," *Compos Struct*, Vol. 64, pp. 493-500, 2004.
- [20] Lopez de lacalle, L. N. Lamikiz, A. Campa, F. J. and Valdivielso, A. F. D. Z., "Design and Test of a Multitooth Tool for CFRP Milling," *J Compos Mat*, Vol. 43, pp. 3275-3290, 2009.
- [21] P. Velayudham, A. and R. Krishnamurthy., "Effect of Point Geometry and Their Influence on Thrust and Delamination in Drilling of Polymeric Composites" *Journal of materials processing technology*, 2007. 185 (1-3): p. 204-209.
- [22] Tsao C.C., "Experimental Study of Drilling Composite Materials With Step - core drill" *Mat & Des*, Vol. 29, No. 9, pp. 1740 - 1744, 2008.
- [23] Tsao, C. C. and Hocheng, H., "Evaluation of Thrust Force and Surface Roughness in Drilling Composite Material Using Taguchi Analysis and Neural Network," *J Mat Proc Tech*, Vol. 203, pp. 342-348, 2008.
- [24] Hocheng, H. and Tsao, C. C., "The Path Towards Delamination-free Drilling of Composite Materials," *J Mat Proc Tech*, Vol. 167, pp. 251-264, 2005.
- [25] Yuan, S. Zhang, C. Amin, M. Fan, H. and Liu, M., "Development of a Cutting Force Prediction Model Based on Brittle Fracture for Carbon Fiber Reinforced Polymers for Rotary Ultrasonic Drilling," *The Int J Adv0 Manuf Tech*, Vol. 81, pp. 1223-1231, 2015.
- [26] Campos Rubio, J. Abrao, A. M. Faria, P. E. Esteves Correia, A. and Davim, J. P., "Effects of High Speed in the Drilling of Glass Fibre Reinforced Plastic: Evaluation of the Delamination Factor" *Int J Mach Tools & Manuf*, Vol. 48, pp. 715-720, 2008.
- [27] Akbari, S. Taheri-Behrooz, F. and Shokrieh, M. M., "Characterization of Residual Stresses in a Thin-walled Filament Wound Carbon/epoxy Ring Using Incremental Hole Drilling Method" *Compos Sci and Tech*, Vol. 94, pp. 8-15, 2014.
- [28] Davim, J. P. and Reis, P., "Study of Delamination in Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) Using Design Experiments," *Compos Struct*, Vol. 59, pp. 481-487, 2003.
- [29] Enemuoh, P. El-Gizawy, A. S. and Chukwujekwu Okafor, A., "An Approach for Development of Damage - Free Drilling of Carbon Fiber Reinforced Thermosets," *Int J Mach Tools and Manuf*, Vol. 41, No. 12, pp. 1795 - 1814, 2001.
- [1] Ishida, T. and Noma, K. Kakinuma, Y. and Aoyama, T. and Hamada, S. and Ogawa, H. and Higaino, T., "Helical Milling of Carbon Fiber Reinforced Plastics Using Ultrasonic Vibration and Liquid Nitrogen," *Procedia CIRP*, Vol. 24, pp. 13-18, 2014.
- [2] Stone, R. and Krishnamurthy, K., "A Neural Network thrust Force Controller to Minimize Delamination During Drilling of Graphite-epoxy Laminates," *Int J Mach Tools Manuf*, Vol. 36, No. 9, pp. 985-1003, 1996.
- [3] König, W. and Wulf, C. amd Grass, P. and Willerscheid, H., "Machining of fiber reinforced plastics," *Ann CIRP*, Vol. 34, No. 2, pp. 536-548, 1985.
- [4] Pei, Z. J. Khanna, N. and Ferreira, P. M., "Rotary Ultrasonic Machining of Structural Ceramics-a Review," *ceram Eng Sci Proc*, Vol. 16, No. 1, pp. 259- 78, 1995.
- [5] Hocheng, H. and Tsao, C. C., "Effects of Special Drill Bits on Drilling-induced Delamination of Composite Materials," *Int J Mach Tools & Manuf*, Vol. 46, pp. 1403-1416, 2006.
- [6] König, W. Grass, P. Heintze, A. Okcu, F. and Schmitz-Justin, C., "Developments in Drilling and Contouring Composites Containing Kevlar," *Prod Eng*, Vol. 63, No. 8, pp. 56-61, 1984.
- [7] Hocheng, H. and Puw, H., "On Drilling Characteristics of Fibre-reinforced Thermoset and Thermoplastics," *Int J Mach Tools Manufact*, Vol. 32, No. 4, pp. 583-92, 1992.
- [8] Hocheng, H. Puw, H. and Yao, K., "Experimental Aspects of Drilling of Some Fibre Reinforced Plastics," *Proceedings of the machining of composite materials symposium, Chicago, Illinois, ASM Materials week*, pp. 127-38, 1992.

- of Sci and Tech Compos, Vol. 2, No. 4, pp. 51-58, 2016. (In Persian)
- [52] Razfar, M. R., "Machining and Tool principles" First ed., Amirkabir University, Tehran, pp. 185-205, 2011. (In Persian)
- [53] Amini, S. Barani, A. R. and Paktinat, H., "Machining and Cutting Tools" First ed., Kashan University, Kashan, pp 25-44, 2013. (In Persian)
- [54] Tsao, C. C., "The Effect of Pilot Hole on Delamination when Core Drill Drilling Composite Materials," Int J Machine Tools and Manufacture, Vol. 46, No. 12-13, pp. 1653-1661, 2006.
- [55] Tsao, C. C., "Effect of Pilot Hole on Thrust Force by Saw Drill" Int J Mach Tools and Manuf, Vol. 47, No. 14, pp. 2172-2176, 2007.
- [56] Bayazidi, E. Oladi, B. Abbasi, N. and Afaridoun, K., "Statistical Analysis with Minitab 16," First ed., Aabed, Tehran, pp. 123-142, 2012.
- [30] Gaitonde, V. N. Karnik, S. R. Campos Rubio, J. Esteves Correia, A. Abrao, A. M. and Paulo Davim, J., "A Study Aimed at Minimizing Delamination Drilling of CFRP Composites," J Compos Mat, Vol. 45, No. 22, pp. 2359-2368, 2011.
- [31] Gaitonde, V. N. Karnik, S. R. Campos Rubio, J. Esteves Correia, A. Abrao, A. M. and Paulo Davim, J., "Analysis of Parametric Influence on Delamination in High – Speed Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites," J Mat Proc Technology, Vol. 203, No. 1-3, pp. 431 – 438, 2008.
- [32] Kilickap, E., "Optimization of Cutting Parameters on Delamination Based on Taguchi Method During Drilling of GFRP Composite. Expert Systems with Applications," Exp Sys with App, Vol. 37, No. 8, pp. 6116 – 6122, 2010.
- [33] shyha, I. Aspinwall, D. K. and Soo, S. L. and Bradley, S., "Drill Geometry and Operating Effects when Cutting Small Diameter Holes in CFRP," Int J Mach Tools and Manuf, Vol. 49, No. 12, pp. 1008–1014, 2009.
- [34] Isik, P. and Ekici, E., "Experimental Investigations of Damage Analysis in Drilling of Woven Glass Fiber – reinforced Plastic Composites," Int J Adv Manuf Tech, Vol. 49, No. 9, pp. 861–869, 2010.
- [35] Mohan, N. S. Kulkarni, S. M. and Ramachandra, A. "Delamination Analysis in Drilling Process of Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) Composite Materials," J Mat Proc Tech, Vol. 183, No. 1-3, pp. 265 – 271, 2007.
- [36] Karnik, S. R. Gaitonde, V. N. Campos Rubio, J. Esteves Correia, A. Abrao, A. M. and Paulo Davim, J., "Delamination Analysis in High Speed Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) using Artificial Neural Network Model" Mat & Des, Vol. 29, No. 9, pp.1768 – 1776, 2008.
- [37] krishnaraj, V. Prabukarthi, A. Ramanathan, A. Elanghovan, N., Senthil Kumar, M. Zitoune, R. and Davim, J.P., "Optimization of parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates" Compos part B: Eng, Vol. 43, No. 4, pp. 1791–1799, 2012.
- [38] Krishnamoorthy, A. Rajendra Boopathy, S. Palanikumar, K. and Davim J. P., "Application of grey fuzzy logic for the optimization of drilling parameters for CFRP composites with multiple performance characteristics" Measur, Vol. 45, No. 5, pp. 1286–1296, 2012.
- [39] Palanikumar, K., "Experimental investigation and optimization in drilling of GFRP composites," Measur. Vol. 44, No. 10, pp. 2138 – 2148, 2011.
- [40] Iliescu, D. Gehin, D. Gutierrez, M. E. and Andre Girut, F., "Modeling and Tool Wear in Drilling of CFRP" Int J Mach Tools and Manuf, Vol. 50, No. 2, pp. 204-213, 2010.
- [41] Ross, P., "Taguchi Techniques for Quality Engineering-loss Function, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance design" Second ed., McGraw-Hill publication, New York, 1988.
- [42] Taguchi, G. and Konishi, S. "Taguchi Methods, Orthogonal Arrays and Linear Graphs, Tools for Quality Engineering" First ed., Am Supplier Institute, pp. 35–85, 1987
- [43] Phadke, M. S. "Quality Engineering Using Robust Design" Prentice-Hall, Michigan, pp. 1–50, 1989.
- [44] Taguchi, G., "Taguchi on Robust Technology Development Methods," ASME Press, New York, pp. 1–40, 1993.
- [45] Sheikh-Ahmad, J. Y., "Machining of Polymer Composites" First ed., Springer, New York, pp. 197-201, 2009.
- [46] Khashaba, U. A., "Delamination in Drilling GFR-thermoset Composites," Compos Struct, Vol. 63, pp. 313–327, 2004.
- [47] Wang, H. Sun, J. Li, J. Li, W., "Investigation on Delamination Morphology During Drilling Composite Laminates," Int J of Adv Manuf Tech, Vol. 74, No. 1, pp. 257-266, 2014.
- [48] Wang, H. Sun, J. Li, J. and Li, W., "Investigation on Delamination Morphology During Drilling Composite Laminates," Int J of Adv Manuf Tech, Vol. 74, No. 1, pp. 257-266, 2014.
- [49] Davim, J. P. and Reis, P., "Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics Manufactured by Autoclave–experimental and Statistical Study," Mat and Des, Vol. 24, pp. 315–324, 2003.
- [50] Tsao, C. C. and Hocheng, H., "Taguchi Analysis of Delamination Associated with Various drill bits in drilling of composite material," Int J of Mach Tool and Manuf, Vol. 44, pp. 1085–1090, 2004.
- [51] Hakimi, E. and Amini, S., "Study of Delamination in the Process Helical Milling of Carbon Fiber-reinforced Polymer Composite" J

Archive