



نشریه علمی پژوهشی
کامپوزیت
علوم و فناوری
<http://jstc.iust.ac.ir>



مطالعه تاثیر پارامترهای ماشین کاری بر میزان لایه لایه شدگی در فرآیند ماشین کاری مافوق صوت دوار با ابزار الماسه هسته دار بر روی کامپوزیت GFRP

محمد براهنی^۱، سعید امینی^{۲*}

۱- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان
۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان
* کاشان، صندوق پستی ۸۷۳۱۷۵۱۱۶۷، Amini.s@kashanu.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه به علت خواص مکانیکی و فیزیکی مناسب آن‌ها دارای کاربردهای صنعتی متعددی هستند. سوراخ کاری از جمله روش‌های رایج برای ایجاد اتصال بین سازه‌های از جنس مواد تقویت‌شده با الیاف می‌باشد. فرآیند ماشین کاری مافوق صوت دوار از روش‌های نوین در ماشین کاری کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف می‌باشد که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. لایه‌های کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف در عملیات ماشین کاری مخصوصاً در عملیات سوراخ کاری که در معرض تمرکز تنش قرار می‌گیرند، دچار آسیب لایه لایه شدگی می‌شوند. پدیده لایه لایه شدگی به شدت تحت تاثیر عواملی مانند جنس و هندسه ابزار و همچنین پارامترهای ماشین کاری قرار دارد. از این رو در سال‌های اخیر از ابزارهای جدید مانند ابزار الماسه هسته دار با توجه به کاهش نیرو و انجام هم‌زمان عملیات سوراخ کاری و سنگ‌زنی داخل سوراخ، در سوراخ کاری کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف، استفاده می‌کنند. در این پژوهش به بررسی میزان لایه لایه شدگی در کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP) با درصد الیاف ۶۵٪ در فرآیند ماشین کاری مافوق صوت دوار با ابزار الماسه هسته دار، با توجه به پارامترهای ماشین کاری پرداخته شده است. با توجه به آزمایشات انجام شده مشاهده شد افزایش سرعت برشی و کاهش سرعت پیش‌روی موجب کاهش آسیب لایه لایه شدگی شده و کیفیت سوراخ را بهبود می‌بخشد. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده، در نرم افزار مینی‌تپ، یک رابطه آماری بین پارامترهای ماشین کاری و لایه لایه شدگی ارائه شد. با توجه به مدل به دست آمده، سرعت برشی تاثیر بیشتری بر میزان لایه لایه شدگی دارد.</p>	<p>دریافت: ۹۵/۲/۱۷ پذیرش: ۹۵/۶/۲</p> <p>کلیدواژگان: کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف شیشه ابزار الماسه هسته دار لایه لایه شدگی ماشین کاری مافوق صوت دوار</p>

Study of the effect of machining parameters on delamination in rotary ultrasonic machining process of glass fiber reinforced polymer composite by diamond core tool

Mohammad Baraheni, Saeed Amini*

Department of Manufacturing, Faculty of Mechanic, University of Kashan, Kashan, Iran
* P.O.B. 8731751167 Kashan, Iran, Amini.s@kashanu.ac.ir

Keywords
Glass fiber reinforced composite
Diamond core tool
Delamination
Rotary ultrasonic machining

Abstract
Glass fiber reinforced composites pose numerous industrial applications that are because of suitable mechanical and physical properties. Drilling is a common method to connect fiber reinforced material structures. Rotary ultrasonic machining is one of the new methods in machining of fiber reinforced composites that is highly attractive in recent years. Fiber reinforced composite laminates in machining operations, especially in drilling operations which are subjected to stress concentration, tend to be delaminated. Delamination damage is strongly influenced by factors such as tool material and geometry and also machining parameters. Therefor in recent years, new tools such as diamond core drills are used in drilling of fiber reinforced composites due to their lower force creation and simultaneous drilling operation and hole internal grinding. In this research, delamination of glass fiber reinforced composites (GFRP) with a percentage of 65% fiber in rotary ultrasonic machining process using diamond core drill regarding machining parameters have been discussed. According to conducted experiments, it was observed that cutting speed increment and feed rate reduction, decreases the delamination damage and improves hole quality. Also based on achieved results, a statistical relationship between machining parameters and delamination in Minitab software offered. According to the resulting model, cutting speed has a greater impact on the amount of delamination.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:
Baraheni, M. and Amini, S., "Study of the effect of machining parameters on delamination in rotary ultrasonic machining process of glass fiber reinforced polymer composite by diamond core tool", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 1, pp. 66-74, 2017.

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه به علت خواص مکانیکی عالی و کاربردهای هوافضا، نظامی و حمل و نقل بطور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. در کاربردهای ساختمانی نیز از الیاف شیشه با استحکام بالا و عموماً با زمینه رزین اپوکسی^۱ استفاده می‌شود زیرا که خواص شیمیایی و مکانیکی بالایی تحت شرایط مختلف بارگذاری دارا می‌باشند [۲]. از طرفی این کامپوزیت‌ها ویژگی‌های خاصی در زمینه ماشین‌کاری دارا می‌باشند و مکانیزم براده برداری متفاوتی با مواد همگن دارند و بایستی ملاحظات خاصی در نظر گرفت [۳]. در ساخت هواپیماهای جدید، فرآیند سوراخ‌کاری نقش مهمی در ایجاد سوراخ‌های دقیق هنگام مونتاژ کامپوزیت‌های الیاف‌دار دارا می‌باشد [۴]. انتخاب شرایط ماشین‌کاری مناسب کامپوزیت‌ها به علت وجود الیاف ساینده سخت و زمینه نرم، مشکل می‌باشد. طبق مشاهدات تجربی، تغییر شکل پلاستیکی کمی در هنگام ماشین‌کاری رخ می‌دهد و مقاومت شکست آن‌ها ۱۰-۱۰۰ برابر کمتر از فولاد می‌باشد [۵].

عموماً مشکلات اساسی که در سوراخ‌کاری کامپوزیت‌ها مواجه هستیم عبارتند از: لایه‌لایه‌شدگی در ورودی و خروجی سوراخ، ریش‌ریش شدن در قطر خارجی، پلیسه، زبری سطح دیواره سوراخ [۶]. 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 [۷، ۸]. لایه‌لایه‌شدگی از مهم‌ترین عیوب شایع در ماشین‌کاری کامپوزیت‌های لایه‌ای پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه می‌باشد که به سرعت خواص مکانیکی آن‌ها را در عمل کاهش می‌دهد [۹، ۱۰]. به علت شایع بودن این مشکل، تلاش‌های متعددی در زمینه تعیین مقدار لایه‌لایه‌شدگی، مدل‌سازی و ایجاد ارتباط با پارامترهای ماشین‌کاری انجام شده است [۵، ۱۱].

محققان متعددی درباره فرآیند سوراخ‌کاری کامپوزیت‌های لایه‌ای، گزارش داده‌اند که کیفیت سطوح برش‌کاری وابستگی شدیدی به پارامترهای سوراخ‌کاری، جنس و هندسه ابزار دارد [۷، ۸، ۱۲]. یک رابطه مستقیم بین نیروهای برش و لایه‌لایه‌شدگی در ورودی و خروجی ابزار برای محدوده وسیعی از سرعت‌ها مشخص شده است [۱۳]. از ابزارهای مختلف با هندسه‌های متنوع در زوایای راس، ماریچ و یا قطرهای مختلف جهت ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها استفاده شده است. آرولا و همکاران [۱۴] طی انجام فرآیند دوربری بر روی کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف شیشه، از ابزار الماس پلی‌کریستال^۲ استفاده کرده‌اند. داویم و همکاران [۱۵] جهت سوراخ‌کاری زمینه پلی‌استر با الیاف شیشه ابزار کاربید سماتنه (K10) را به‌کار برده‌اند. در این بررسی نشان داده شده است که با افزایش سرعت پیش‌روی و سرعت برشی، مقدار لایه‌لایه‌شدگی افزایش می‌یابد. از آنجایی که ابزارهای الماس پلی‌کریستال گران‌قیمت می‌باشند، ابزارهای دندانه‌دار جایگزین آن‌ها شده‌اند که عملکرد مناسب‌تری نیز دارا می‌باشند [۱۳]. لاکاله و همکاران [۱۶] برای سوراخ‌کاری کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن، یک ابزار دندانه‌دار طراحی کرده و تحت آزمایش قرار دادند. یوان و همکاران [۱۷] از ابزار الماسه هسته‌دار برای سوراخ‌کاری کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن استفاده کردند.

کوئینگ و همکاران، در سال ۱۹۸۵ 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 [۳]. روبیو و همکاران [۱۸] 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.

اصل استفاده از ارتعاش جهت کمک به براده‌برداری در ماشین‌کاری برای اولین بار توسط کومابی معرفی شد [۱۹]. اصل این تکنیک بر افزودن فرکانس (۴۰-۱۶ کیلوهرتز) و دامنه ارتعاش کم (۳۰-۲ میلی‌متر) در جهت پیش‌روی به ابزار یا قطعه‌کار می‌باشد [۲۰]. تاکایاما و کاتو [۲۱] دریافت کردند که نیروی محوری میانگین در سوراخ‌کاری را می‌توان با ارتعاش مافوق‌صوت کاهش داد و همچنین می‌توان براده‌ها را کوچکتر کرد. با کاهش نیرو می‌توان تشکیل لبه انباشته را نیز کاهش داد. بنابراین می‌توان با کمک ارتعاش مافوق‌صوت، کیفیت سوراخ را بهتر کرد. جانگ و همکاران [۲۲] اثبات کردند که کاربرد فرکانس ۱۶ کیلوهرتز موجب سفتی ابزار سوراخ‌کاری، کاهش لغزش ابزار و خطای اندازه سوراخ می‌شود. جانگ و وانگ [۲۳] ارتعاشات را در سوراخ‌کاری پلاستیک‌های تقویت‌شده با الیاف به‌کار بردند و مشاهده شد که لایه‌لایه‌شدگی بهبود یافت [۲۴]. آرولا و همکاران [۲۵] آزمایشات سوراخ‌کاری سنتی و سوراخ‌کاری ارتعاشی را بر روی پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف شیشه جهت ارزیابی نیروی محوری، سایش جانبی و فاکتور لایه‌لایه‌شدگی انجام دادند. آن‌ها رابطه خوبی بین نیروی محوری و لایه‌لایه‌شدگی یافته و دریافتند که می‌توان با کنترل برخط نیروی محوری، سوراخ‌کاری بدون ایرادی انجام داد. دنبات و همکاران [۲۶] فرآیند سوراخ‌کاری مافوق-صوت دوار را جهت سوراخ‌کاری کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه به‌کار بردند. مشاهده شد که از لایه‌لایه‌شدگی در ورودی و خروجی سوراخ جلوگیری شده و کیفیت سوراخ در مقایسه با حالت سنتی بهتر می‌باشد.

فرآیند ماشین‌کاری مافوق‌صوت دوار یک فرآیند ترکیبی می‌باشد که با افزودن ارتعاش با فرکانس بالا به روش سنگ‌زنی سنتی ایجاد می‌شود [۲۷]. پی و همکاران [۲۸] برای اولین بار از ماشین‌کاری سطحی مافوق‌صوت دوار استفاده کرده و تاثیر پارامترهای عمق برش، نرخ پیش‌روی و ابزار برشی بر کیفیت سطح و نرخ براده‌برداری را بررسی کردند. لی و همکاران [۲۹] فرآیند ماشین‌کاری مافوق‌صوت دوار را بر روی کامپوزیت‌های سرامیکی تحت بررسی قرار داده و مشاهده کردند که این فرآیند دارای نیروی کمتر، نرخ براده‌برداری و کیفیت سوراخ بهتر در مقایسه با سوراخ‌کاری سنتی می‌باشد. همچنین در این تحقیق نشان داده شد که نرخ پیش‌روی تاثیر به‌سزایی بر نیروی برش‌کاری دارد.

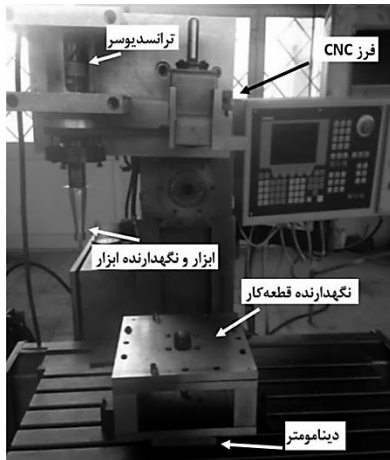
تحقیق‌های انجام‌یافته تاکنون نشان می‌دهد که بررسی کیفیت سوراخ‌های ایجاد شده در کامپوزیت‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است و لایه‌لایه‌شدگی از جمله موارد مهم در این زمینه می‌باشد. در این پژوهش تاثیر پارامترهای ماشین‌کاری شامل سرعت پیش‌روی و سرعت برشی بر میزان لایه‌لایه‌شدگی در فرآیند سوراخ‌کاری مافوق‌صوت دوار با استفاده از ابزار الماسه هسته‌دار مورد بررسی قرار گرفته است و همچنین یک رابطه آماری جهت تحلیل مقدار تاثیر این پارامترها بر میزان لایه‌لایه‌شدگی ارائه شده است.

۲- شرایط آزمایش

در این پژوهش، رزین اپوکسی ML605 و سفت‌کننده پلی‌آمین (HA-11) به عنوان زمینه کامپوزیت استفاده شدند. این رزین دارای خواص مکانیکی

1. Epoxy
2. Polycrystalline Diamond (PCD)

خنک‌کاری می‌باشد. همچنین ورق کامپوزیتی بین دو صفحه فلزی قرار گرفته و محکم شد تا از هرگونه ارتعاش و جابجایی جلوگیری شود.



شکل ۲ آماده‌سازی فرآیند ماشین‌کاری مافوق صوت دوار

در این پژوهش به‌علت سایش شدید ابزار بر اثر تماس با الیاف شیشه از ابزار الماسه هسته‌دار در شکل ۳ برای جلوگیری از سایش ابزار استفاده شده است. از آنجاییکه هر چه قطر ابزار بیشتر باشد نیروی محوری بیشتری ایجاد شده و مقدار آسیب لایه‌لایه‌شدگی نیز افزایش می‌یابد [۳۲]، در نتیجه در این تحقیق، از ابزار با قطر پایین ۶ میلی‌متر استفاده شده است. این ابزار ساخت شرکت اسکات^۲ آلمان به ضخامت دیواره ۱/۵ میلی‌متر و دانه‌بندی D64 می‌باشد که دارای عمق بخش الماسه ۶ میلی‌متر است. جهت اتصال ابزار به صورت پیچی به سر دستگاه فرز یک نگهدارنده طراحی شد که در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ (الف) ابزار الماسه هسته‌دار، (ب) نگهدارنده ابزار، (ج) مجموعه ابزار ارتعاشی

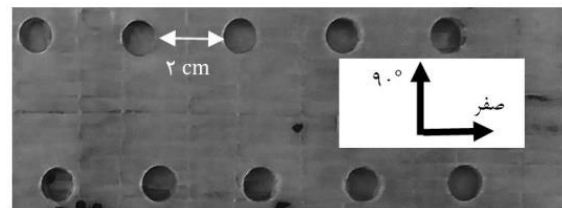
همچنین موقعیت سوراخ‌ها به فاصله ۲ سانتی‌متر (۳ برابر قطر سوراخ) از هم قرار گرفتند. بدین وسیله از تاثیر متقابل لایه‌لایه‌شدگی سوراخ‌ها بر همدیگر جلوگیری می‌شود (شکل ۱). موقعیت سوراخ‌ها نسبت به دیواره‌ها و نسبت به هم بر مقدار لایه‌لایه‌شدگی تاثیرگذار می‌باشند که در این پژوهش مورد بررسی قرار نگرفته است. البته فیتو و همکاران [۳۳] نشان داده‌اند که این فاصله‌ها تاثیر قابل‌توجهی بر مقدار لایه‌لایه‌شدگی ندارند و می‌توان از آن‌ها چشم‌پوشی کرد. همچنین جهت اندازه‌گیری و بررسی میزان لایه‌لایه‌شدگی در اطراف سوراخ، دستگاه اندازه‌گیری بینایی^۳ شرکت ایسون به‌کار گرفته شد (شکل ۴).

مناسب و ویسکوزیته پایین می‌باشد که ماده را برای کاربردهای مختلف مناسب می‌کند. همچنین از الیاف شیشه نوع E (تولید شده توسط شرکت گروت^۱) تک‌سویه به‌عنوان تقویت‌کننده در این تحقیق استفاده شد. خواص الیاف و زمینه در جدول ۱ آورده شده است. کامپوزیت‌های با لایه‌های نازک به‌روش دستی ساخته شده و به مدت ۶ روز در دمای اتاق قرار گرفته‌اند. قطعات نمونه طبق استاندارد ASTM D3039 [۳۰] از لایه‌ها بریده شده‌اند.

جدول ۱ خواص مکانیکی و فیزیکی رزین اپوکسی و الیاف شیشه E [۳۱]

خواص ماده	اپوکسی ML506	الیاف شیشه E
مدول الاستیسیته (GPa)	۲/۷۹	۴۱
استحکام کششی (MPa)	۷۶/۱	۲۰۰۰
مدول برشی (GPa)	۱۵/۲۴	۱۵/۲۴
نسبت پواسون	۰/۳۵	۰/۳
چگالی (g/cm ³)	۱/۱۱	۲/۴۸
ضریب انبساط حرارتی (1/°C)	۶۲	۴/۹

قطعه کامپوزیتی از ۸ لایه ساخته شده است. الیاف به صورت یک‌جهت در لایه‌ها جایگذاری شده‌اند. چهار لایه ابتدایی به‌ترتیب با زوایای صفر و نود درجه قرار گرفته‌اند و چهار لایه بعدی نیز بصورت قرینه می‌باشند. ضخامت قطعه، ۱ میلی‌متر می‌باشد. شماتیک لایه‌گذاری و تصویر ورودی سوراخ در قطعه‌کار کامپوزیتی در شکل ۱ نشان داده شده است. مقدار درصد الیاف نسبت به زمینه اپوکسی ۶۵/۳۵ می‌باشد.



(الف)



(ب)

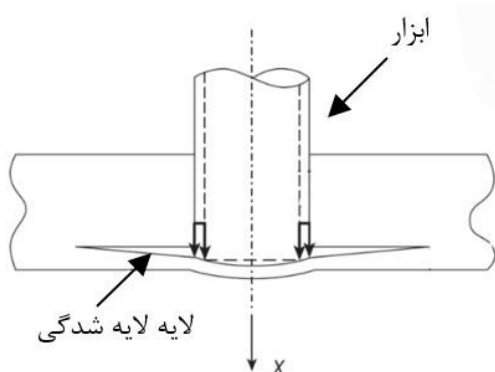
شکل ۱ (الف): تصویر ورودی سوراخ، (ب): شماتیک لایه‌گذاری در قطعه‌کار

جهت انجام آزمایش‌ها از دستگاه فرز CNC اونیورسال نوع FP4M ساخت ماشین‌سازی تبریز با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر و ترانسدیوسر مافوق صوت با فرکانس تشدید 20 ± 1 کیلوهرتز استفاده شد. در نتیجه بایستی هندسه مجموع ابزار و نگهدارنده ابزار به نحوی طراحی می‌شد که فرکانس تشدید در این محدوده قرار داشته باشد. برای انجام این کار، از نرم افزار آباکوس استفاده شده و پس از تغییرات مکرر در هندسه مجموعه ابزار ارتعاشی، فرکانس تشدید ۱۹۳۱۹ هرتز به‌دست آمد. آماده‌سازی فرآیند ماشین‌کاری مافوق صوت دوار در شکل ۲ نشان داده شده است. جهت اعمال فرکانس تشدید به مجموعه ارتعاشی از ژنراتور مدل MPI استفاده شد. در آزمایش‌ها از مایع خنک‌کننده استفاده نشده است که به‌علت آلودگی کامپوزیت‌ها به مایع

1. Gruit

2. SCHOTT
3. Visual Measurement Machine(VMM)

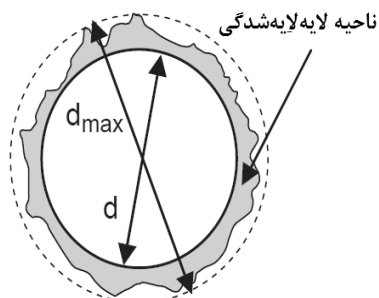
الاستیک می‌شوند. در ادامه که تعداد لایه‌های مقاوم کم می‌شود آن‌گاه مقدار تنش اعمالی بیش از تنش بین‌لایه‌ای شده و موجب شکست لایه‌ها می‌شود که منجر به ایجاد ترک بین‌لایه‌ای در اطراف سوراخ می‌شود و در نتیجه پدیده لایه‌لایه‌شدگی رخ می‌دهد. همچنین لایه‌لایه‌شدگی در ناحیه ورود ابزار به علت اعمال نیروی ابزار به لایه‌ها و بلندکردن آن‌ها می‌باشد که ابزار، مانند یک پیچ قدرت عمل می‌کند [۳۷].



شکل ۶ شماتیک لایه‌لایه‌شدگی در سوراخ‌کاری با ابزار الماسه هسته‌دار [۳۵] برای اندازه‌گیری میزان لایه‌لایه‌شدگی در کامپوزیت از روابط مختلفی به‌عنوان 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 (۱) استفاده می‌شود [۳۷].

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

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 ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷ محدوده لایه‌لایه‌شدگی در محل سوراخ [۳۷]

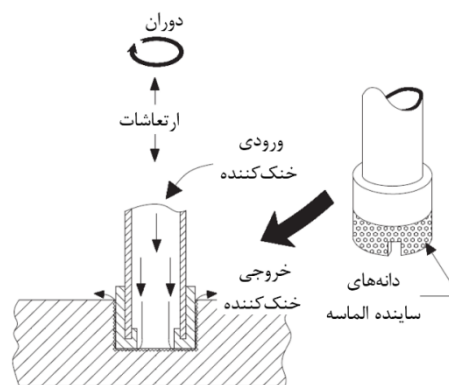
همواره، اندازه‌گیری مقدار لایه‌لایه‌شدگی مشکل و چالش برانگیز بوده است. به‌دست‌آوردن اندازه، شکل و موقعیت لایه‌لایه‌شدگی برای برآورد صدمات ماشین‌کاری ضروری می‌باشد. میکروسکوپ نوری و یا پردازش تصویر از جمله روشهایی می‌باشند که برای اندازه‌گیری لایه‌لایه‌شدگی در لایه‌های ورودی و خروجی استفاده شده‌اند [۳۸، ۳۹]. روش اولتراسونیک سی اسکن^۱ نیز برای اندازه‌گیری لایه‌لایه‌شدگی در لایه‌های میانی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴۰]. همچنین برخی از محققان با استفاده از روشهای اندازه‌گیری تنش پسماند [۴۱]، آکوستیک امپیشن [۴۲]، مقدار لایه‌لایه‌شدگی در کامپوزیت‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند.



شکل ۴ دستگاه اندازه‌گیری بینایی

۳- انجام آزمایش‌ها و نتایج

بر خلاف فلزات، کامپوزیت‌ها از دو یا چند فاز با استحکام، سختی و هدایت حرارتی متفاوت ساخته می‌شوند. به‌علت ناهمسانگردی مواد استفاده‌شده در کامپوزیت‌ها، اغلب مشکلات سوراخ‌کاری از اینجا به وجود می‌آید. اخیراً به کمک ایجاد ارتعاش مافوق‌صوت در ابزار سوراخ‌کاری می‌توان نیرو را کم کرده و در نتیجه از کیفیت سطحی بهتری بهره برد. در این روش، ابزار در راستای محوری ارتعاش کرده و با تعداد دفعات بالا (مثلاً ۲۰ هزار بار) در هر ثانیه ابزار را به مقدار دامنه ارتعاش، حرکت می‌دهد و همچنین ابزار در حال دوران نیز می‌باشد. شماتیک این روش در شکل ۵ نشان داده شده است.

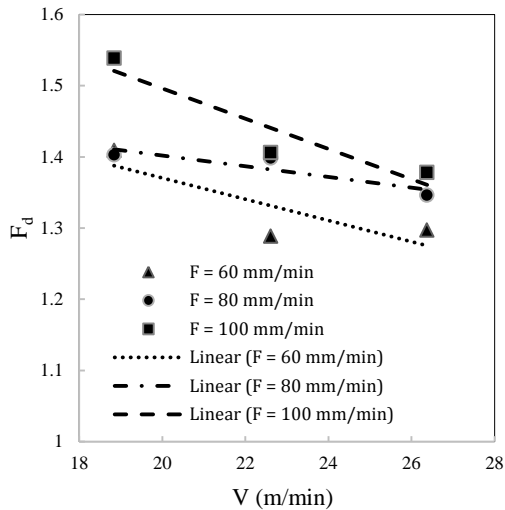


شکل ۵ شماتیک فرآیند ماشین‌کاری مافوق‌صوت دوار [۳۴]

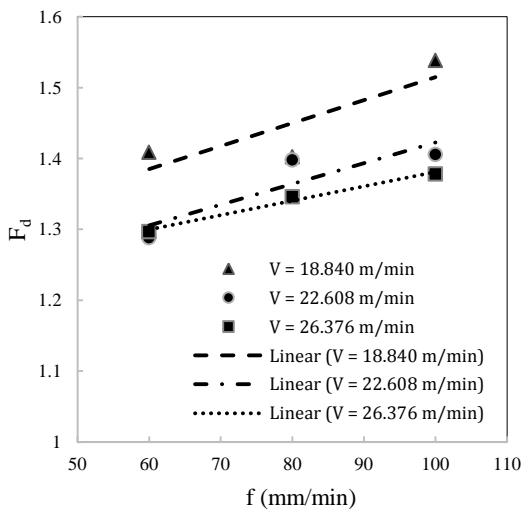
با توجه به مقالات انجام‌شده، از بین مشکلات سوراخ‌کاری، لایه‌لایه‌شدگی مهمترین عامل در ایجاد مشکل در مجموعه‌های مونتاژی می‌باشد [۱۳]. این پدیده در بارگذاریهای خستگی نیز قطعه را دچار مشکل می‌کند [۳۵]. لایه‌لایه‌شدگی در هنگام سوراخ‌کاری رخ می‌دهد که در سوراخ‌کاری با ابزار الماسه هسته‌دار در شکل ۶ نشان داده شده است.

عموماً لایه‌لایه‌شدگی در عملیات سوراخ‌کاری در لایه‌های ناحیه ورود ابزار و خروج آن در قطعه‌کار رخ می‌دهد [۱۳]. البته در لایه‌های میانی قطعه‌کار نیز لایه‌لایه‌شدگی رخ می‌دهد که بایستی با دستگاه‌های دقیق اندازه‌گیری شود [۳۶]. طبق بررسیهای محققان، در هنگام خروج ابزار به‌علت اعمال نیروی فشاری از ابزار به لایه‌های کنده نشده، لایه‌ها دچار خم

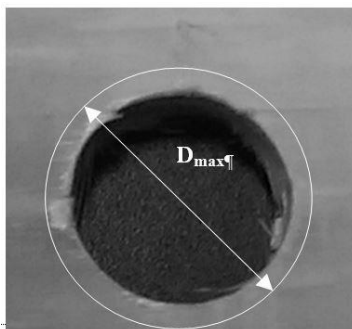
1. Ultrasonic C-Scan



شکل ۸ تاثیر سرعت برشی بر مقدار لایه‌لایه‌شدگی در ورودی سوراخ



شکل ۹ تاثیر سرعت پیش‌روی بر مقدار لایه‌لایه‌شدگی در ورودی سوراخ



شکل ۱۰ مقدار قطر سوراخ و ناحیه لایه‌لایه‌شدگی

از آنجایی که در این پژوهش از کامپوزیت با درصد بالای الیاف شیشه (حدود ۶۵٪) استفاده شده است، لایه‌ها چسبندگی خوبی نداشته و در نتیجه لایه انتهایی بر اثر نیروی وارد شده از ابزار جدا شد. این پدیده نشان می‌دهد که استفاده از درصد بالای الیاف در کامپوزیت‌ها موجب تضعیف چسبندگی بین لایه‌ها و ایجاد آسیب در هنگام استفاده در صنایع مختلف می‌شود و بایستی در محلهای اتصال که نیاز به سوراخ‌کاری می‌باشد تا حد امکان

در این پژوهش برای اندازه‌گیری معیار لایه‌لایه‌شدگی ابتدا قطر سوراخ با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری بینایی اندازه‌گیری شد. همچنین 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.

با در نظر داشتن توان ماشین فرز CNC و با توجه به محدوده سرعت‌های پیشنهادی در منابع مختلف [۳۸، ۳۹]، پارامترهای ماشین‌کاری در آزمایش‌ها سه سرعت دورانی ۱۰۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۴۰۰ دور بر دقیقه و پیش‌روی‌های ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شدند. همچنین دامنه ارتعاشی ابزار بر اساس مقدار فرکانس ارتعاشی تنظیم شد. اعداد به‌دست‌آمده برای معیار لایه‌لایه‌شدگی برای شرایط مختلف ماشین‌کاری در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲ مقدار لایه‌لایه‌شدگی در ورودی سوراخ در سرعت‌های مختلف

شماره	سرعت پیش‌روی (mm/min)	سرعت برشی (m/min)	Fd
۱	۶۰	۱۸/۸۴۰	۱/۴۰۸۹
۲	۶۰	۲۲/۶۰۸	۱/۲۸۸۵
۳	۶۰	۲۶/۳۷۶	۱/۲۹۶۹
۴	۸۰	۱۸/۸۴۰	۱/۴۰۲۵
۵	۸۰	۲۲/۶۰۸	۱/۳۹۸۰
۶	۸۰	۲۶/۳۷۶	۱/۳۴۵۹
۷	۱۰۰	۱۸/۸۴۰	۱/۵۳۸۵
۸	۱۰۰	۲۲/۶۰۸	۱/۴۰۵۷
۹	۱۰۰	۲۶/۳۷۶	۱/۳۷۸۱

شکل‌های ۸ و ۹ به‌ترتیب رابطه لایه‌لایه‌شدگی در ورودی سوراخ را با سرعت برشی و سرعت پیش‌روی و همچنین رگرسیون^۱ خطی از نتایج را نشان می‌دهند. در شکل‌های ۸ و ۹، برای نمایش متناسب محورها، مقادیر سرعت دورانی به صورت سرعت برشی گزارش شده‌اند که عبارتند از: ۱۸/۸۴۰، ۲۲/۶۰۸ و ۲۶/۳۷۶.

همان‌طور که در شکل ۹ مشهود است، افزایش سرعت برشی موجب کاهش مقدار لایه‌لایه‌شدگی در ورودی سوراخ می‌شود. افزایش سرعت برشی در فرآیندهای فرزکاری موجب افزایش دما می‌شود که به‌علت اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار می‌باشد [۴۳]. بنابراین افزایش سرعت برشی موجب کاهش نیرو می‌شود [۴۴]. در نتیجه نیرو و گشتاور کمتری بر الیاف وارد آمده، سبب گرم‌شدن رزین می‌شود و محدوده لایه‌لایه‌شدگی کاهش می‌یابد و سبب بهبود و بالارفتن دقت سوراخ می‌شود. از طرفی افزایش سرعت پیش‌روی موجب افزایش نیروی ماشین‌کاری شده [۴۴] و به دنبال آن، ابزار از مسیر خود منحرف می‌شود. همچنین افزایش نیروی ماشین‌کاری موجب ایجاد ارتعاش در ابزار می‌شود. در نتیجه طبق شکل ۹، افزایش سرعت پیش‌روی موجب افزایش لایه‌لایه‌شدگی می‌شود.

شکل ۱۰ مقدار قطر سوراخ و حداکثر قطر ناحیه لایه‌لایه‌شدگی در یکی از قطعات نمونه که توسط نرم‌افزار اندازه‌گیری شده است را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل ۱۰ نشان داده شده است لایه‌لایه‌شدگی فقط در راستای چینش الیاف ایجاد شده است. علت این پدیده، قرارگیری الیاف در یک جهت خاص صفر و نود درجه در ورق کامپوزیتی می‌باشد.

1. Regression

لایه‌لایه‌شدگی و سرعت پیش‌روی و سرعت برشی در محدوده سرعت‌های مورد استفاده، ارائه شد (رابطه ۲).

$$F_d = 1.49516 + 0.00273397 F - 0.0145555 V \quad (2)$$

از آنجایی که در رابطه ۲، مقدار ضریب سرعت برشی بیشتر از ضریب سرعت پیش‌روی می‌باشد، سرعت برشی بیشترین تاثیر را بر معیار لایه‌لایه‌شدگی دارد و از لحاظ عملی، این امر می‌تواند به علت اثر بیشتر سرعت برشی بر مقدار نیروی محوری باشد.

با مقایسه نتایج به دست آمده در جدول ۲ و مدل ارائه شده، حداکثر مقدار خطای حاصل، ۳/۲۳٪ می‌باشد که نشان می‌دهد می‌توان با استفاده از این مدل برای پیش‌بینی لایه‌لایه‌شدگی در سوراخ‌کاری کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه با استفاده از ابزار الماسه هسته‌دار با دقت بالا بهره برد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر پارامترهای ماشین‌کاری در فرآیند نوین سوراخ‌کاری به کمک ارتعاشات مافوق صوت با استفاده از ابزار الماسه هسته‌دار بر روی کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه مورد بررسی قرار گرفت. ابزار الماسه هسته‌دار دارای روکش الماسه با ساختار دانه‌بندی شده و مقاوم در برابر سایش می‌باشد. در واقع عملیات سوراخ‌کاری و سنگ‌زنی در این فرآیند با یک ابزار انجام می‌شود که موجب تسریع در انجام عملیات ماشین‌کاری می‌شود. از طرفی هم ارتعاشات مافوق صوت موجب خروج آسانتر ورقه کامپوزیتی و براده‌ها از داخل ابزار الماسه هسته‌دار گشته و موجب کاهش حرارت در ناحیه اطراف ابزار می‌شود. در نتیجه از سایش ابزار کاسته شده و عمر ابزار افزایش می‌یابد. این امر موجب شده است که فرآیند سوراخ‌کاری مافوق صوت دوار با استفاده از ابزار الماسه هسته‌دار از لحاظ هزینه مقرون به صرفه بوده و در سالهای اخیر در ماشین‌کاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف مورد استفاده قرار گیرد.

از آنجایی که 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 با ابزار الماسه هسته‌دار نتایج زیر حاصل شد:

۱- افزایش سرعت برشی در فرآیند سوراخ‌کاری مافوق صوت دوار موجب کاهش مقدار لایه‌لایه‌شدگی در ورودی سوراخ می‌شود که به علت کاهش نیرو و گشتاور می‌باشد.

۲- 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.

۳- در این پژوهش با استفاده از تحلیل آماری، مشخص شد که پارامتر سرعت برشی بیشترین تاثیر را بر مقدار لایه‌لایه‌شدگی دارد.

۴- با استفاده از نرم افزار مینی‌تب، بین پارامترهای ماشین‌کاری و مقدار لایه‌لایه‌شدگی مدلی آماری ارائه شد که با خطای حدود ۳٪ نتایج را پیش‌بینی می‌کند.

بنابراین در صنعت و جهت مونتاز کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه، استفاده از ابزار الماسه هسته‌دار به کمک ارتعاشات مافوق صوت روش مناسبی می‌باشد و جهت کاهش آسیب لایه‌لایه‌شدگی بایستی مقدار پیش‌روی کم و سرعت برشی بالا مورد استفاده قرار گیرد.

چسبندگی لایه‌ها را تقویت نمود. همچنین روند این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از سرعت‌های پیش‌روی پایین و سرعت‌های برشی بالا برای اجتناب از لایه‌لایه‌شدگی در ورودی سوراخ هنگام استفاده از ابزار الماسه هسته‌دار مناسب می‌باشد.

تعدادی رابطه تجربی توسط محققان بین معیار لایه‌لایه‌شدگی F_d و پارامترهای هندسی ابزار یا پارامترهای ماشین‌کاری در مواد مختلف و محدوده سرعت‌های متنوع ارائه شده است [۳۸، ۴۰، ۴۱]. این روابط میزان تاثیر سرعت پیش‌روی، سرعت برشی و قطر ابزار را بر مقدار لایه‌لایه‌شدگی در ورودی و خروجی سوراخ نشان می‌دهند. تحلیل‌های آماری نشان می‌دهند که سرعت برشی، بیشترین تاثیر فیزیکی و آماری را بر معیار لایه‌لایه‌شدگی دارد [۳۸، ۴۱]. البته برخی محققان، پارامتر سرعت پیش‌روی را دارای تاثیر بیشتر می‌دانند [۴۲].

در این پژوهش، با استفاده از نرم افزار مینی‌تب^۱، عملیات آماری تحلیل واریانس بین داده‌ها انجام شد که نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است. مقدار P در جدول ۳، نشان‌گر این می‌باشد که اختلاف بین میانگین داده‌های مختلف در چه حدی مهم و قابل توجه می‌باشد. محققان سطح اهمیت ۵٪ را برای تحلیل داده‌ها در نظر می‌گیرند و مقدار P کمتر از ۰/۰۵ قابل قبول می‌باشد [۴۵]. در این تحقیق نیز برای هر دو پارامتر سرعت برشی و پیش‌روی مقدار احتمال P کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد و هر دو پارامتر تاثیر اساسی بر مقدار لایه‌لایه‌شدگی دارند. همچنین مقدار درجه آزادی (DF) نشان‌گر مقدار اطلاعاتی می‌باشد که برای هر پارامتر استفاده شده است و در اینجا چون اطلاعات استفاده شده برای هر پارامتر سرعت برشی و پیش‌روی یکسان می‌باشد مقدار درجه آزادی هر کدام، عدد یک به دست آمده است. مقدار مجموع مربعات (SS) و همچنین میانگین مربعات (MS) جهت محاسبه 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 به دست آمده و تاثیر مقدار تغییر هر پارامتر را بر لایه‌لایه‌شدگی نشان می‌دهد که طبق جدول ۳، مشاهده می‌شود سرعت برشی دارای اهمیت بالاتری می‌باشد. در این پژوهش، به علت یکسان بودن درجه آزادی هر دو پارامتر ماشین‌کاری، مقدار میانگین مربعات (MS) و مجموع مربعات (SS) یکسان به دست می‌آیند. از طرفی مقدار خطای مجموع مربعات (SS) در این پژوهش نشان می‌دهد که ۰/۰۷٪ تغییرات داده‌ها را با استفاده از این مدل نمی‌توان پیش‌بینی کرد که مقدار قابل قبولی می‌باشد.

جدول ۳ نتایج تحلیل واریانس برای مقدار لایه‌لایه‌شدگی در ورودی سوراخ

پارامترها	مجموع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	درجه آزادی (DF)	احتمال (P)
سرعت برشی	۰/۰۱۸۰۴۸۰	۰/۰۱۸۰۴۸۰	۱	۰/۰۰۹۵۳۱۹
سرعت پیش‌روی	۰/۰۱۷۹۳۹۰	۰/۰۱۷۹۳۹۰	۱	۰/۰۰۹۶۶۰۱
خطا	۰/۰۰۷۷۰۸۶	۰/۰۰۱۲۸۴۸		

تاکنون مدل آماری برای فرآیند مافوق صوت دوار با ابزار الماسه هسته‌دار ارائه نشده است. با استفاده از نتایج جدول ۳ و به کمک نرم افزار مینی‌تب با انجام عملیات آماری رگرسیون خطی بین داده‌ها یک رابطه آماری بین معیار

1. Minitab

۵- مراجع

- [26] Debnath, K. Singh, I. and Divedi, A., "Rotary Mode Ultrasonic Drilling Of Glass Fiber-Reinforced Epoxy Laminates," *Journal Of Composite Materials*, Vol. 49, No. 8, pp. 949-963, 2014.
- [27] Bertsche, E. Ehmman, K. and Malukhin, K., "An Analytical Model Of Rotary Ultrasonic Milling," *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 65, Pp. 1705-1720, 2013.
- [28] Uhlmann, E. and Spur, G., "Surface Formation In Creep Feed Grinding Of Advanced Ceramics With And Without Ultrasonic Assistance," *CIRP Ann Manuf Technol*, Vol. 47, No. 1, pp. 249-252, 1998.
- [29] Li, Z.C. Jiao, Y. Deines, T.W. Pei, Z.J. and Treadwell, C., "Rotary Ultrasonic Machining Of Ceramic Matrix Composites: Feasibility Study And Designed Experiments," *Int J Mach Tool Manuf*, Vol. 45, Pp. 1402-1411, 2005.
- [30] Standard Test Method For Tensile Properties Of Polymer Matrix Composite Materials, Annual Book Of ASTM Standard, 08.01, D 3039M-95a, 1997.
- [31] Torabizadeh, M.A., "Tensile, Compressive And Shear Properties Of Uni-Directional Glass/Epoxy Composites Subjected To Mechanical Loading And Low Temperature Services," *Indian Journal Of Engineering Material Science*, Vol. 20, Pp. 299-309, 2013.
- [32] Tsao, C.C. And Hocheng, H., "Evaluation Of Thrust Force And Surface Roughness In Drilling Composite Material Using Taguchi Analysis And Neural Network," *Journal Of Material Processing Technology*, Vol. 203, pp. 342-348, 2008.
- [33] Feito, N. Diaz-Álvarez, J. Díaz-Álvarez, A. Luis Cantero, J. and Hénar Miguélez, M., "Experimental Analysis Of The Influence Of Drill Point Angle And Wear On The Drilling Of Woven Cfrps," *Materials*, Vol. 7, pp. 4258-4271, 2014.
- [34] Liu, J. Zhang, D. Qin, L. and Yan, L., "Feasibility Study Of The Rotary Ultrasonic Elliptical Machining Of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP)," *International Journal Of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 53, pp. 141-150, 2012.
- [35] Hocheng, H. and Tsao, C.C., "The Path Towards Delamination-Free Drilling Of Composite Materials," *Journal Of Material Processing Technology*, Vol. 167, pp. 251-264, 2005.
- [36] Wang, H. Sun, J. Li, J. and Li, W., "Investigation On Delamination Morphology During Drilling Composite Laminates," *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 74, No. 1, pp. 257-266, 2014.
- [37] Sheikh-Ahmad, J.Y., "Machining Of Polymer Composites," First ed., Springer, New York, USA, Pp. 197-201, 2009.
- [38] Davim, J.P., and Reis, P., "Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics Manufactured By Autoclave-Experimental And Statistical Study," *Materials And Design*, Vol. 24, pp. 315-324, 2003.
- [39] Khashaba, U.A., "Delamination In Drilling GFR-Thermoset Composites," *Composite Structures*, Vol. 63, Pp. 313-327, 2004.
- [40] Tsao, C.C. and Hocheng, H., "Taguchi Analysis Of Delamination Associated With Various Drill Bits In Drilling Of Composite Material," *International Journal Of Machine Tool And Manufacture*, Vol. 44, pp. 1085-1090, 2004.
- [41] Davim, J.P. and Reis, P., "Study Of Delamination In Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) Using Design Experiments," *Composite Structures*, Vol. 59, pp. 481-487, 2003.
- [42] Hakimi, E. and Amini, S., "Study Of Delamination In The Process Helical Milling Of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composite," In Persian, *Journal Of Science And Technology Of Composites*, Vol. 2, No. 4, pp. 51-58, 2016.
- [43] Razfar, M.R., "Machining and Tool Principles," In Persian, First ed., Amirkabir University, Tehran, Iran, pp. 185-205, 2011.
- [44] Amini, S. Barani, A.R. and Paktinat, H., "Machining and Cutting Tools," In Persian, First Ed., Kashan University, Kashan, pp 25-44, 2013.
- [45] Bayazidi, E. Oladi, B. Abbasi, N. and Afaridoun, K., "Statistical Analysis with Minitab 16," First Ed., Aabed, Tehran, Iran, pp 123-142, 2012.
- [1] Davim, J.P. Campos Rubio, J. and Abrao, A.M., "A Novel Approach Based On Digital Image Analysis To Evaluate The Delamination Factor After Drilling Composite Laminates," *Composites Science and Technology*, Vol. 67, pp. 1939-1945, 2007.
- [2] Nagarajan, V.A. Sundaram, S. and Rajadurai, J.S., "A Novel Approach Based On Digital Image Analysis To Evaluate Refined Delamination Factor For E-Glass 21xk43 Gevetex/LY556/DY063 Epoxy Composite Laminates," *Engineering Manufacture*, Vol. 225, Part B, pp. 1977-1982, 2011.
- [3] König, W. Wulf, C. 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. 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," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 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," *Production Engineer*, 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 Manuf*, 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.
- [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," *Journal of Composite Materials*, 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," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 28, No. 2, pp. 141-151, 1997.
- [11] El-Sonbaty, I. Khashaba, U.A. and Machaly, T., "Factors Affecting The Machinability Of GFR/Epoxy Composites," *Composite Structures*, 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 Manuf*, Vol. 37, No. 8, pp. 1097-108, 1997.
- [13] Hocheng, H., "Machining Technology for Composite Materials," First ed., Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 333-364, 2011.
- [14] Arola, D. Ramulu, M. and Wang, D.H., "Chip Formation In Orthogonal Trimming Of Graphite/Epoxy Composite," *Composite Part A*, Vol. 27, pp. 121-133, 1996.
- [15] Davim, J.P. and Reis, P. and Conceicao Antonio, C., "A study on milling of glass fiber reinforced plastics manufactured by hand-lay up using statistical analysis (ANOVA)," *Composite Structures*, Vol. 64, pp. 493-500, 2004.
- [16] Lopez de lacalle, L. N. and Lamikiz, A. and Campa, F.J. and Valdivielso, A. F.D.Z., "Design and Test of a Multitooth Tool for CFRP Milling," *Journal of Composite Materials*, Vol. 43, pp. 3275-3290, 2009.
- [17] 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 International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 81, pp. 1223-1231, 2015.
- [18] 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," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 48, pp. 715-720, 2008.
- [19] Kumabe, J., "Fundamentals and Application of Vibration Cutting," Jikkyo Publishing, Japan, 1979.
- [20] Azarhoushang, B. and Akbari, J., "Ultrasonic-Assisted Drilling of Inconel 738-LC," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, pp. 1027-1033, 2007.
- [21] Takeyama, H. and Kato, S., "Burrless Drilling By Means Of Ultrasonic Vibration," *Annals of CIRP*, Vol. 40, No. 1, pp. 83-86, 1991.
- [22] Zhang, D.Y. Feng, X. J. Wang, L.J. and Chen, D.C., "Study On The Drill Skidding Motion In Ultrasonic Vibration Microdrilling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 34, No. 6, pp. 847-857, 1994.
- [23] Zhang, D.Y. and Wang, L.J., "Investigation Of Chip In Vibration Drilling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 38, No. 3, pp. 165-176, 1998.
- [24] Zhang, L.B. Wang, L.J. and Wang, X., "Study On Vibration Drilling Of Fiber Reinforced Plastics With Hybrid Variation Parameters Method," *Composites: Part A*, Vol. 34, pp. 237-244, 2003.
- [25] Arul, S. Vijayaraghavan, L. Malhotra, S.K. and Krishnamurthy, R., "The Effect Of Vibratory Drilling On Hole Quality In Polymeric Composites," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp. 252-259, 2006.

