



بررسی زبری سطح در تراش کاری لوله‌های کامپوزیتی با الیاف شیشه و رزین اپوکسی

مجید آزادحسن¹، احسان شکوری^{2*}، پیام سرائیان²

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران

2- استادیار، مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران

* تهران، صندوق پستی 19585/936 e_shakouri@iaiu-tnb.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 30 مهر 1395

پذیرش: 16 آبان 1395

ارائه در سایت: 05 دی 1395

کلید واژگان:

زبری سطح

کامپوزیت اپوکسی-شیشه

تراش کاری

چکیده

امروزه کامپوزیت‌ها در مقایسه با فلزها، با توجه به برخورداری از خواص مکانیکی بالا نسبت به وزن و مقاومت به خوردگی مناسب، کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف از جمله هوافضا، خودروبی و دفاعی پیدا نموده‌اند. ماشین کاری این مواد با توجه به ساختار مرکب آنها، از پیچیدگی خاصی برخوردار است. دستیابی به شرایط بهینه ماشین کاری، بسته به نوع نیاز، با توجه به نوع الیاف و رزین مصرف شده در کامپوزیت‌ها، به بررسی دقیق و تحلیل‌های مناسب نیاز دارد. در تحقیق حاضر، لوله‌های کامپوزیتی از جنس شیشه-اپوکسی به ضخامت 5 میلی‌متر، که اغلب در بدنه سازه‌های هوافضایی کاربرد دارند، با لایه چینی دستی تولید شده‌اند و زبری سطح آنها پس از فرایند تراش کاری اندازه‌گیری شده است. بدین منظور، جهت بدست آوردن حداقل زبری در فرایند تراش کاری، نوع ابزار در دو حالت، و سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برشی، در سه سطح مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. پس از طراحی آزمایش با روش تاگوچی و انجام آزمایش بر روی نمونه‌های از پیش ساخته شده، زبری سنجی و تحلیل‌های مد نظر انجام پذیرفت. در نهایت نتیجه‌گیری گردید که حداقل میزان زبری از ابزار با سطوح براده‌شکن، سرعت برشی 100 m/min، نرخ پیشروی 0.05 mm/rev و عمق برشی 1.5 mm بدست خواهد آمد.

Evaluation of surface roughness in turning of epoxy-glass composite tubes

Majid Azad Hassan, Ehsan Shakouri*, Payam Saraeian

Department of Manufacturing Engineering, Islamic Azad University- North Tehran Branch, Tehran, Iran.

*P.O.B. 19585/936 Tehran, Iran, e_shakouri@iaiu-tnb.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 21 October 2016
Accepted 06 November 2016
Available Online 25 December 2016

Keywords:

Surface Roughness
Epoxy-glass Composite
Turning

ABSTRACT

Today, composite materials are used extensively in aerospace automotive and defense industries compared to metals, because of their high strength to weight ratio and good corrosive resistance. Machining of these materials regard to their composite structure is complicated. Achieving optimal machining conditions, depending on the needs, requires proper analysis and careful investigation based on the type of fiber and resin used in composites. In this study, composite pipes made of glass-epoxy to a thickness of 5 millimeters, which are often used in the body of Aerospace structures, are produced by hand lay-up and their surface roughness is measured after turning process. In order to obtain the minimum roughness in the turning process, tool type in two modes, cutting speed, feed rate, and depth of cut are studied at three different levels. After the design of experiments with Taguchi method and tests on samples of pre-built, roughness measurements carried out surveys and analyzes. Finally, it is concluded that the minimum value of the surface roughness is obtained by tools with chip-breaking levels, cutting speed 100 m/min, feed rate 0.05 mm/rev, and the depth of cut 1.5 mm.

1- مقدمه

کاربرد بیشتری در این صنایع پیدا نموده‌اند. کامپوزیت‌های شیشه اپوکسی در ساخت بدنه سازه‌های هوافضایی و ریدوم‌ها³ کاربرد فراوانی دارند. معمولاً ماشین کاری در کامپوزیت‌ها، جهت رساندن به اندازه مورد نظر، سوراخ کاری و مونتاژ، که از مراحل مهم ساخت و تولید در آنها محسوب می‌گردد، انجام می‌گردد. با توجه به ساختار مرکب کامپوزیت‌ها و قرارگیری آنها در دسته مواد الاستوپلاستیک⁴، ماشین کاری این مواد باید با مطالعه و بررسی کافی انجام شود. در صورتی که این موضوع قبل از ماشین کاری مورد بررسی قرار نگیرد، احتمال تخریب مواد، عدم کیفیت مناسب سطحی، جدایش الیاف از

امروزه کامپوزیت‌ها در صنایع نظامی و خودروسازی کاربرد زیادی پیدا نموده‌اند. استحکام ویژه¹ بالای کامپوزیت‌ها در مقایسه با فلزها، کاربرد این مواد در تجهیزهای هوافضایی را بیش از پیش گسترش داده است، به طوری که در یکی از بررسی‌ها، تا 50 درصد وزن یک هواپیمای مسافربری از کامپوزیت‌ها تشکیل شده است [1]. ساخت بدنه و نازل موشک‌ها، امروزه از دیگر جنبه‌های کاربرد این مواد می‌باشند. کامپوزیت‌های شیشه اپوکسی² یکی از این مواد است، که با دارا بودن خواص مکانیکی مطلوب و هزینه کم،

³ Radome

⁴ Elasto-Plastic

¹ $\sigma_{sp} = \sigma_{ult} / \rho$

² GFRE- Glass Fibers Reinforced Epoxy

Please cite this article using:

M. Azad Hassan, E. Shakouri, P. Saraeian, Evaluation of surface roughness in turning of epoxy-glass composite tubes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 629-636, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

رزین و در برخی موارد شکست در قطعه کار وجود خواهد داشت. کیفیت سطح از جمله پارامترهایی می‌باشد که پس از ماشین کاری سطوح کامپوزیتی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

کیفیت سطح در سازه‌های فضایی، مؤثر در آیرودینامیک و افت امواج راداری می‌باشد که در برخی موارد کیفیت پایین سطوح، موجب رشد عیوب و تورق در قطعه کار می‌شود. همچنین زبری سطح در سطوح کامپوزیتی، می‌تواند جزء یکی از مراحل آماده‌سازی سطوح قبل از رنگ آمیزی باشد. بدین منظور مقدار زبری سطح پس از فرایند ماشین کاری، از جمله موارد با اهمیت است.

زبری سطح در ماشین کاری کامپوزیت‌ها، متأثر از متغیرهای ماشین کاری، متغیرهای ابزار، شرایط محیطی و جنس قطعه کار می‌باشد [2]. پژوهشگران در زمینه ماشین کاری مواد کامپوزیتی و تأثیر پارامترهای مختلف بر میزان زبری سطح، مطالعاتی انجام داده‌اند که به برخی از این پژوهش‌ها اشاره می‌گردد.

کومار و همکاران بهینه‌سازی نیروهای برشی در تراش کاری کامپوزیت با الیاف تک جهته شیشه به کمک الگوریتم ژنتیک را مورد مطالعه قرار داده‌اند [2]. در این مقاله میزان نیروهای برشی در تراش کاری کامپوزیت‌ها، با بررسی پارامترهایی از جمله شعاع نوک ابزار، زاویه براده، میزان پیشروی، سرعت برشی، عمق برشی و شرایط محیطی، با استفاده از روش تاگوچی بررسی و بهینه شده است. همچنین رابطه بین نرخ پیشروی، سرعت برشی، عمق برشی و شرایط محیطی با نیروی ماسی به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است. فریا و همکاران، نیروی ماشین کاری و میزان فرسایش ابزار در سوراخ کاری کامپوزیت‌ها با الیاف تقویتی شیشه را مورد بررسی قرار داده‌اند [3]. نتایج آنها نشان داده است که به ترتیب در ابزار با فولاد تندبر، ابزار کاربیدی و ابزار کاربیدی با پوشش تیتانیوم، کمترین فرسایش حاصل می‌شود. وینرت و کمپمن تأثیر دمای برش در ماشین کاری کامپوزیت‌ها را بررسی نموده‌اند و به این نتیجه دست یافته‌اند که با افزایش سرعت برشی و نرخ پیشروی، مقدار دما در ابزار بالا رفته که همین موضوع باعث ازدیاد فرسایش ابزار می‌شود [4]. دیویم و همکاران، تحقیقی بر روی قابلیت ماشین کاری پلیمرها، با الیاف تقویتی و بدون الیاف تقویتی انجام داده‌اند [5]. نتایج آنها نشان داده است که ایجاد نیروی شعاعی، بالاترین تأثیر را در کیفیت سطوح دارد و نوع ابزار نیز در ایجاد این نیرو تأثیرگذار می‌باشد، به گونه‌ای که زاویه براده کوچک و وجود براده‌شکن موجب بهبود کیفیت سطوح می‌شود. سیلوا و همکاران پژوهشی را در رابطه با ارائه مدلی با دقت بالا، برای برش متعامد در پلیمرهای بدون الیاف و با الیاف تقویتی انجام داده‌اند [6]. نتایج بدست آمده از پژوهش فوق، نشان می‌دهد با افزودن 30 درصد الیاف تقویتی به پلی‌آمید، تأثیر بسزایی بر روی پارامترها از جمله نیروهای ماشین کاری، ضریب فشردگی براده و میزان تغییر شکل براده، بوجود خواهد آورد. نیروهای ماشین کاری در کامپوزیت تقویت شده با الیاف، کمتر از حالتی می‌باشد که الیاف وجود ندارند. همچنین فشرده شدن و تغییر شکل براده، وابستگی زیادی به زاویه برش دارد، بطوری که با کاهش زاویه برش، نسبت تراکم کاهش خواهد یافت. همچنین نتایج مدل ارائه شده در این پژوهش، شباهت زیادی به نتایج عملی دارد، بخصوص در حالتی که الیاف به عنوان ماده تقویتی در کامپوزیت استفاده می‌شود. راجاسکران و همکاران برای مدل نمودن زبری سطح در تراش کاری کامپوزیت با الیاف تقویتی کربن با ابزار الماسه¹ از منطق فازی

استفاده نموده‌اند [7]. نتایج حاصل از پژوهش فوق بدین شرح می‌باشد که نرخ پیشروی نسبت به سایر پارامترها تأثیر بیشتری بر میزان زبری دارد به طوری که با افزایش نرخ پیشروی، زبری سطح افزایش، ولی با افزایش سرعت برشی در سطوح انتخاب شده، زبری سطوح کاهش می‌یابد. مدل بدست آمده از این پژوهش، با توجه به مقایسه‌های انجام شده، نتایج رضایت بخشی داشته است. کومار و همکاران نیروی برشی بهینه در تراش کاری کامپوزیت با الیاف تقویتی شیشه در شرایط محیطی مختلف با ابزار الماس چند بلوری² را مورد بررسی قرار داده‌اند [8]. در نتایج این تحقیق، تأثیر شعاع نوک ابزار، زاویه براده، سرعت برشی و شرایط محیطی، بر کیفیت سطح قطعه کار، مطالعه شده است. کومار و همکاران بهینه سازی کیفیت سطوح قطعه‌های کامپوزیتی با الیاف تقویتی شیشه را در ماشین کاری با ابزار الماسی چند بلوری، مورد بررسی قرار داده‌اند [9]. نتایج تحقیق فوق نشان داده است که به ترتیب نرخ پیشروی، سرعت برشی و عمق برشی از تأثیرگذاری بیشتری بر صافی سطوح برخوردار بوده و زاویه براده و شرایط محیطی تأثیر کمتری در صافی سطح داشته‌اند. راجاسکران و همکاران صافی سطح در تراش کاری کامپوزیت با الیاف تقویتی کربن با ابزار سرامیکی را بررسی نموده‌اند [10]. نتایج آنها نشان داده است که استفاده از ابزار سرامیکی، زبری سطوح را با انتخاب مناسب سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برشی، می‌توان کنترل کرد. کومار و ستسنگی پژوهشی را تحت عنوان بهینه سازی شرایط ماشین کاری با استفاده از روش تاگوچی در ماشین کاری کامپوزیت با ابزار کاربیدی انجام داده‌اند [11]. نتایج بدین صورت بود که، سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برشی، بیشترین به کمترین می‌باشد. و اساساً پژوهشی را در خصوص بهینه‌سازی میزان زبری سطوح و تورق در فرزکاری کامپوزیت با الیاف تقویتی به کمک روش تاگوچی انجام داده است [12]. نتایج حاصل نشان داده است که میزان عمق برشی، تأثیر بیشتری بر زبری سطوح و میزان سرعت برشی تأثیر بیشتری بر تورق دارد. سیواسنکران و همکاران تأثیر پارامترهای ماشین کاری بر میزان زبری سطح در لوله‌های کامپوزیتی با الیاف تقویتی شیشه با ابزار الماس چند بلوری³ را مورد بررسی قرار داده‌اند [13]. نتایج آنها نشان داده است که برای الیاف بافته شده منظم⁴، حداقل سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برشی، بهترین نتیجه را فراهم می‌نماید و برای الیاف درهم⁵، حداکثر سرعت برشی، با حداقل پیشروی و حداقل عمق برشی، شرایط بهینه را ایجاد می‌نماید. پریدا و همکاران بهینه‌سازی شرایط ماشین کاری جهت بدست آوردن صافی سطح بالا در کامپوزیت با الیاف تقویت شده گرافیت را مورد مطالعه قرار داده‌اند [14]. نتایج این تحقیق نشان داده است که حداقل سرعت برشی با کمترین سطح انتخابی از نرخ پیشروی و عمق برشی، بهترین نتایج را برای میانگین ارتفاع زبری به همراه خواهد داشت، ولی برای حداکثر ارتفاع زبری، سرعت و نرخ پیشروی در حد وسط و عمق برشی در بالاترین سطح در این پژوهش می‌باشد. سنبتاتی و همکاران در خصوص عوامل مؤثر بر ماشین کاری کامپوزیت‌های شیشه اپوکسی پژوهشی را انجام داده‌اند [15]. نتیجه بدست آمده اینگونه بود که افزایش هم‌زمان قطر ابزار سوراخ کاری به همراه سرعت برشی، اثر قابل توجهی بر زبری سطوح دارد به گونه‌ای که در نمونه‌های با درصد حجمی الیاف بالاتر، افزایش هم‌زمان این دو پارامتر، زبری سطح را افزایش می‌دهد. وانگ و همکاران مقاله‌ای را تحت عنوان بررسی

² PCD³ Poly Crystalline Diamond⁴ Woven⁵ Chopped¹ CBN

در شکل 3 نمونه دستگاه زبری‌سنج⁵ مورد استفاده نشان داده شده است. دستگاه فوق قابلیت ثبت میانگین ارتفاع زبری یا همان Ra را دارا بوده که به عنوان خروجی آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

ابزارهای برشی مورد استفاده در این ماشین‌کاری، از نوع اینسرت DNMG فول‌گرید⁶ و نیتريد بورون مکعبی⁷ ساخت شرکت‌های استورم و بیکر بوده است. هولدر مورد استفاده در آزمایش‌های فوق از نوع راست 25×25 ساخت شرکت نوین بوده است. اینسرت و هولدر مربوطه در شکل 4 نمایش داده شده است.

هدف از پژوهش فوق استخراج میانگین ارتفاع زبری بوده است که برای دستیابی به حداقل این پارامتر، بررسی لازم انجام شده است. میانگین ارتفاع زبری Ra به صورت شماتیک در شکل 5 نمایش داده شده است.

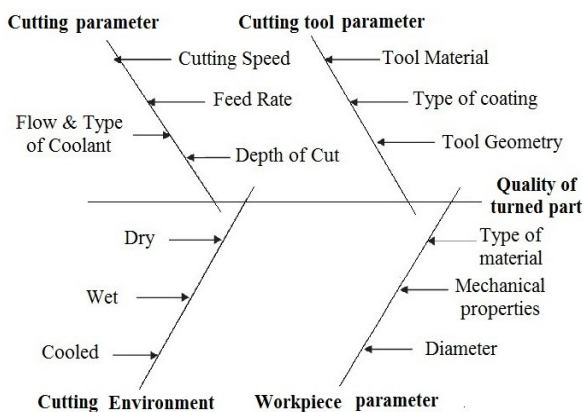


Fig 1 Ishikawa cause effect diagram of a turning process [18]

شکل 1 نمودار استخوان ماهی متغیرهای مؤثر در فرایند تراش کاری [18]

جدول 1 مشخصات کامپوزیت شیشه اپوکسی

Table 1 Composite properties (GFRE)

پارامتر	سازنده	مشخصه
رزین	Huntsman	LY564 (100)
هاردنر	Huntsman	HY560 (27)
الیاف	Interglas	Woven 0/90-E-Glass (E90-110) 300 g/m ²
استحکام کششی کامپوزیت	-	201.3 MPa
استحکام خمشی کامپوزیت	-	374.26 MPa



Fig 2 Lathe machine and machining set up

شکل 2 دستگاه تراش و نحوه ماشین‌کاری

نیروی ماشین‌کاری و حرارت به وجود آمده در فرزکاری کامپوزیت با الیاف کربن به چاپ رسانده‌اند [16]. نتایج آنها نشان داده است که سرعت چرخشی محور دستگاه از جمله پارامترهای کلیدی در دمای برشی می‌باشد. اگر دمای ماشین‌کاری از دمای انتقال حرارت الیاف شیشه بیشتر باشد، کیفیت سطوح ماشین‌کاری شده، به شدت کاهش می‌یابد. همچنین نرخ پیشروی از جمله پارامترهای کلیدی می‌باشد که نیروی برشی را در فرزکاری مواد کامپوزیتی، تحت تأثیر قرار می‌دهد و این نیرو هم‌زمان، به سرعت برشی و عمق برشی وابسته می‌باشد. رزین و همکاران یک مدل الاستوپلاستیک برای شبیه‌سازی ساختار براده و عیوب زیر سطحی در مواد مرکب با الیاف تقویتی کربن، تهیه کرده‌اند [17]. در این پژوهش به کمک نرم‌افزار آباکوس¹ که با روش‌های عددی بهینه شده بود، استفاده شده است و حالت ماده توسط نرم‌افزار، شبیه‌سازی شد. با توجه به شرایط اتصال بین زمینه و الیاف و پیش‌بینی آسیب‌ها، نتایج به دست آمده با نرم‌افزار، بسیار به نتایج عملی شبیه بود. همچنین این مدل برای پیش‌بینی نیروهای برشی به صورت دقیق کاربرد داشته و میزان تورق در کامپوزیت با الیاف کربن را به درستی تشخیص خواهد داد.

به طور کلی با توجه به اینکه تراش کاری قطعه‌های کامپوزیتی در صنایع نظامی کاربرد زیادی پیدا نموده است و زبری سطح به عنوان یک پارامتر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، باید بررسی دقیق و علمی در این زمینه انجام شود. برای پرداختن به این موضوع، کلیه متغیرهای مؤثر بر کیفیت سطوح قطعه‌های تراش کاری شده شناسایی شده است. این متغیرها در قالب شکل استخوان ماهی 1 به تصویر کشیده شده است. در این پژوهش پس از ساخت قطعه‌های کامپوزیتی به صورت لوله‌ای شکل، عملیات روتراشی با دستگاه تراش با ترکیبی از پارامترهای مؤثر انجام شد. پارامترها شامل دو نوع ابزار برشی² و سرعت برشی، عمق برشی و نرخ پیشروی هر کدام در سه سطح، است که پس از آن زبری سطح هر قطعه مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. طراحی آزمایش در این مطالعه به روش تاگوشی انجام شد و هدف از پژوهش حاضر بدست آوردن شرایط بهینه ماشین‌کاری با توجه به پارامترهای منتخبی، برای دستیابی به حداقل میزان زبری سطح، می‌باشد.

2- مواد و تجهیزات

قطعه‌های مورد آزمایش از پارچه‌های بافته شده از الیاف شیشه و رزین اپوکسی، ساخته شده‌اند که مشخصه‌های هر کدام طبق مشخصه فنی سازنده در جدول 1 بیان گردیده است و استحکام درج شده در جدول 1 حاصل نتایج آزمایشگاهی از نمونه‌های تهیه شده می‌باشد. رزین و هاردنر به عنوان زمینه باید با نسبت ترکیب مشخص ساخته شود. پارچه‌ها پس از آغشته‌سازی به این ترکیب، روی لوله پلیمری به صورت دستی لایه چینی شده است که پس از آن به مدت 2 ساعت در دمای 50 درجه در کوره پخت³ گردیده است. پس از اتمام فرایند ساخت، کلیه نمونه‌ها با دستگاه تراش⁴ طبق طراحی آزمایش انجام شده، ماشین‌کاری شده‌اند تا به قطر نهایی 89 میلی‌متر برسند. در شکل 2 دستگاه و حالت ماشین‌کاری نشان داده شده است. لازم به یادآوری است، با توجه به ساخت قطعه‌های اولیه با طول بلند، پس از سپری شدن فرایند ساخت، قطعه‌ها، به طول‌های کوچکتر و مد نظر، برش خورده‌اند. برای بررسی میزان زبری در سطوح، از زبری‌سنج استفاده شده است که

¹ ABAQUS

² Full Grade & CBN

³ Cure

⁴ TN50BR

⁵ Mahr-Marsurf PS1

⁶ Full Grade (Storm)

⁷ CBN-Cubic Boron Nitride (Becker)

جدول 2 مشخصه‌های ابزار

Full grade	CBN	ابزار
STORM	BECKER	شرکت سازنده
DNMG 150608-PM	DNMG PBC-40	نوع
0.8	0.8	شعاع نوک (mm)
دارد	ندارد	براده شکن
55	55	زاویه گوه (درجه)
CVD	ندارد	پوشش

جدول 3 پارامترها و سطوح انتخابی فرایند

نوع ابزار	عمق برش mm	نرخ پیشروی mm/rev	سرعت برشی m/min	سطوح
Full grade	0.5	0.05	100	سطح 1
CBN	1	0.11	140	سطح 2
-	1.5	0.16	200	سطح 3

به ذکر است که، نتایج درج شده، حاصل میانگین حداقل سه بار متوالی اندازه‌گیری در هر قطعه از سه موضع متفاوت است که در طول 17.5mm راستای محور لوله، روی سطح قطعه کار انجام شده است.

3- نتایج و بحث

پس از اندازه‌گیری زبری، جهت تحلیل، نتایج جمع‌آوری شد. نتایج اندازه‌گیری زبری در جدول 5 نشان داده شده است.

محدوده میزان زبری با توجه به حداقل و حداکثر میزان اندازه‌گیری شده، در شکل 6 نشان داده شده است که میانگین این اعداد برای کلیه تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به پراکندگی نتایج و تعداد نسبتاً بالای آزمایش‌ها، تشخیص تأثیر هر پارامتر به راحتی امکان‌پذیر نیست. از این‌رو استفاده از نرم افزارهای تحلیل آماری الزام‌آور می‌باشد.

پس از تحلیل‌های انجام شده، به کمک مدل رگرسیونی، دو معادله ریاضی استخراج شده است. معادله‌های فوق از حداقل درجه ممکنه برخوردار می‌باشد به‌گونه‌ای که تقریبی نسبتاً مناسب از میانگین ارتفاع زبری را

جدول 4 انتخاب 18 حالت آزمایش با تاگوچی

شماره آزمایش	نوع ابزار	سرعت برشی V	نرخ پیشروی f	عمق برشی D
1	Full grade	100	0.05	0.5
2	Full grade	100	0.11	1.0
3	Full grade	100	0.16	1.5
4	Full grade	140	0.05	0.5
5	Full grade	140	0.11	1.0
6	Full grade	140	0.16	1.5
7	Full grade	200	0.05	1.0
8	Full grade	200	0.11	1.5
9	Full grade	200	0.16	0.5
10	CBN	100	0.05	1.5
11	CBN	100	0.11	0.5
12	CBN	100	0.16	1.0
13	CBN	140	0.05	1.0
14	CBN	140	0.11	1.5
15	CBN	140	0.16	0.5
16	CBN	200	0.05	1.5
17	CBN	200	0.11	0.5
18	CBN	200	0.16	1.0



Fig. 3 Roughness measuring device and how to test surface roughness

شکل 3 دستگاه زبری‌سنج و نحوه زبری سنجی



Fig. 4 Tools and tool holder used

شکل 4 ابزارها و هولدر مورد استفاده

مشخصات هر دو ابزار برشی استفاده شده در این تحقیق در جدول 2 ذکر شده است.

جدول 3 پارامترهای ماشین‌کاری مد نظر در این پژوهش به همراه سطوح مختلف آن را نشان می‌دهد. پارامترها و سطوح انتخابی با توجه به پیشینه پژوهش انتخاب گردیده است.

طراحی آزمایش تاگوچی¹ به کمک نرم‌افزار مینیتی‌تب جهت کاهش تعداد آزمایش انجام شده است. در صورتی که تمام حالت‌های ماشین‌کاری برای مطالعه فوق انجام شود 54 نمونه مورد نیاز بود که موجب صرف هزینه و زمان زیاد می‌گردید، از این‌رو با روش فوق 18 نمونه تهیه و مورد آزمایش قرار گرفته است.

با توجه به پارامترها و سطوح انتخابی، عملیات ماشین‌کاری روی قطعه‌ها با توجه به جدول 4 که نتیجه طراحی آزمایش است، انجام شد. پس از ماشین‌کاری، زبری سنجی روی سطوح انجام شده است. پس از استخراج زبری تمام قطعات، نتایج به عنوان خروجی مورد پایش قرار گرفته است. لازم

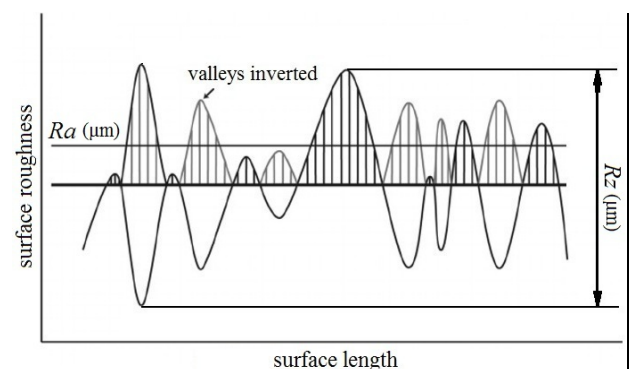


Fig. 5 Schematic of the surface roughness

شکل 5 شماتیک زبری سطح

¹ Taguchi-DOE

² Minitab 17

جدول 5 نتایج حاصل از آزمایش‌ها

Table 5 The results of the tests

شماره آزمایش	متوسط میزان زبری Ra (μm)
1	3.79
2	4.70
3	5.40
4	6.63
5	5.63
6	6.01
7	7.10
8	6.06
9	5.42
10	5.01
11	6.27
12	7.04
13	8.90
14	7.84
15	10.58
16	6.80
17	8.32
18	8.96

ترکیب ابزار با نرخ پیشروی، سرعت برشی و عمق برشی را دارد ولی میزان تأثیر هر کدام متفاوت می‌باشد.

مقدار ضریب تعیین¹ برای مدل نهایی برابر با 89.90% به دست آمده است، به این معنی که مدل برازش شده تا 89.90% از کل تغییر زبری سطح را پوشش می‌دهد. از سوی دیگر بر اساس مقدار P برای فاکتور عدم انطباق، معنی‌دار نبودن این فاکتور اثبات شد. شکل 7 نمودار احتمال نرمال بودن باقیمانده‌ها را نشان داده است. در شکل فوق، داده‌ها تقریباً بر روی خط مورب قرار گرفته است و نشان می‌دهد، مانده‌ها چگونه از یک توزیع نرمال پیروی می‌کنند.

این موضوع بیانگر توزیع نرمال خطا است [19]. این مطلب تایید کننده کیفیت خوب مدل برازش شده است. همچنین نمودار مقادیر باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده زبری در شکل 8 نشان داده شده است. شکل فوق مقدار مانده‌ها را در مقابل مقادیر پیش‌بینی پاسخ نشان می‌دهد. نمودار فوق باید دارای پراکندگی تصادفی، که نشان دهنده طیف ثابت مانده در سراسر نمودار است، باشد. نمودار فوق مبین مقدار انحراف معیار مقدار واقعی از مقدار پیش‌بینی شده می‌باشد.

در شکل‌های 9 الی 11 تأثیر ترکیبی پارامترهای مختلف با ابزار بر روی زبری سطوح نمایش داده شده است. شکل 9 تأثیر دو پارامتر سرعت برشی و نوع ابزار بر میزان زبری سطح را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشخص شده است، سرعت برشی در کمینه مقدار خود و ابزار از نوع فول‌گرید نتایج

مشخص می‌نماید. ولی همان‌گونه که توضیح داده شد، با توجه به ماهیت قطعه‌های کامپوزیتی و عدم رفتار یکنواخت این مواد، باید برای قطعه‌های کامپوزیتی از جنس متفاوت، آزمایش‌های مورد نیاز جهت صحت‌گذاری انجام شود.

معادله (1-الف) و معادله (1-ب) بدست آمده از مدل ریاضی در ذیل آورده شده است. رابطه (1-الف) برای ابزار فول‌گرید و رابطه (1-ب) برای ابزار نیتريد بورون مکعبی استخراج گردیده است به گونه‌ای که با جاگذاری سطوح، زبری بدست خواهد آمد.

$$Ra = (1.972 + 0.175 \times V - 0.036 \times D + 0.058 \times f)^2 \quad (1\text{-الف})$$

$$Ra = (2.332 + 0.175 \times V - 0.072 \times D + 0.116 \times f)^2 \quad (1\text{-ب})$$

تحلیل واریانس اولیه انجام شده برای میانگین زبری سطح در جدول 6 درج شده است. پس از حذف پارامترهای بی‌معنی، ابزار و سرعت برشی به صورت مستقل دارای بیشترین تأثیر و ترکیبی ابزار با عمق برشی، سرعت برشی و نرخ پیشروی، در گام بعد تأثیرگذار می‌باشند. نتایج فوق حکایت از معنی‌دار بودن تأثیر پارامترهای اصلی از جمله نوع ابزار و سرعت برشی و

جدول 6 تحلیل واریانس مدل زبری سطح

Table 6 analysis of variance model surface roughness

عامل	درجه آزادی	مجموع مربعات	مقدار F	مقدار P
مدل	13	48.68	10.21	0.018
Tool	1	20.06	54.71	0.0018
V	2	16.48	22.47	0.0067
f	2	1.56	2.12	0.2353
D	2	0.40	0.55	0.6158
Tool×V	2	1.96	2.67	0.1834
Tool×f	2	1.57	2.14	0.2338
Tool×D	2	3.48	4.75	0.0879
D×f	0	0.000		
D×V	0	0.000		
f×V	0	0.000		
باقیمانده	4	1.47		
کل	17	50.15		

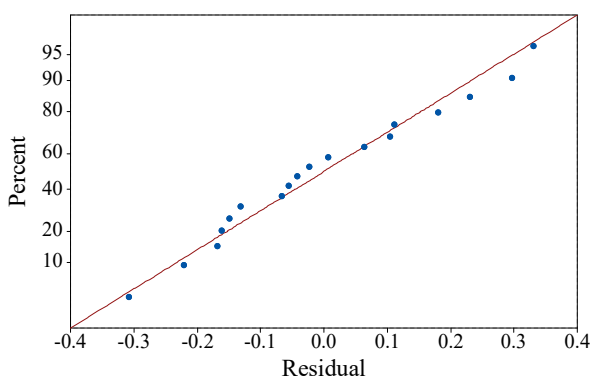


Fig. 7 Normal plot of residuals

شکل 7 نمودار احتمال نرمال

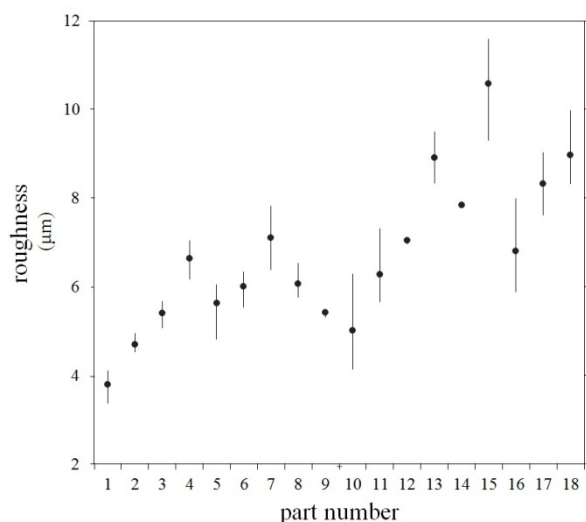


Table 6 Groups of roughness measurements

شکل 6 محدوده اندازه گیری شده زبری

¹ R-Squared

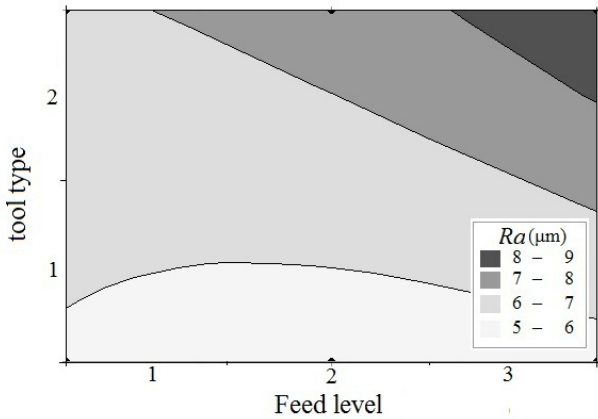


Fig. 10 The impact of feed rate and type of tools on the roughness plot
 شکل 10 نمودار تأثیر هم‌زمان نرخ پیشروی و نوع ابزار بر میزان زبری Ra

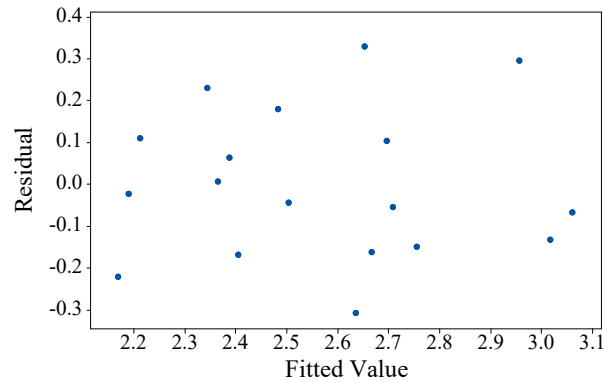


Fig. 8 Residual predicted plot

شکل 8 نمودار باقیمانده‌های پیش بینی شده

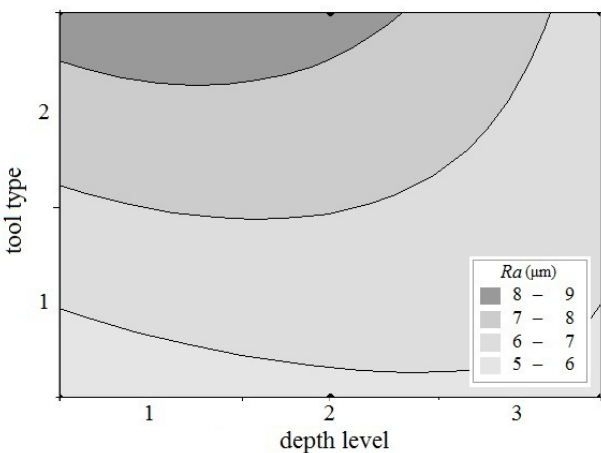


Fig. 11 The impact of cutting depth and type of tools on the roughness plot

شکل 11 نمودار تأثیر هم‌زمان عمق برشی و نوع ابزار بر میزان زبری Ra

برای صحه‌گذاری این موضوع، پس از تهیه نمونه و فراهم نمودن شرایط ماشین‌کاری روی یکی از قطعه‌ها، کنترل لازم صورت گرفت که زبری 3.2 الی 3.8 میکرومتر اندازه‌گیری گردید که تحلیل‌های انجام شده، مورد تأیید قرار گرفت. همچنین جهت میزان تأثیر هر پارامتر می‌توان از نمودار اثرات اصلی که در شکل 13 به تصویر کشیده شده است، استفاده نمود. در این نمودار میزان تغییرات هر پارامتر، نشان دهنده تأثیرگذاری آن پارامتر است. همانطور که مشاهده می‌شود سرعت برشی بیشترین تغییرات و نرخ پیشروی کمترین تغییرات را در بروز زبری دارند. سرعت برشی و پس از آن نوع ابزار، عمق برشی و نرخ پیشروی بیشترین تأثیر در بروز میانگین زبری را نشان می‌دهند و تقریبی از میانگین نتایج زبری به ازای هر سطح در ستون عمودی این نمودار نشان داده شده است.

4- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این پژوهش زبری سطح در فرایند تراش کاری لوله‌های کامپوزیتی شیشه اپوکسی با ضخامت 5mm که با لایه چینی دستی ساخته شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. طراحی آزمایش با روش تاگوچی صورت گرفته و متغیرهای این پژوهش نوع ابزار، سرعت برشی، نرخ پیشروی و میزان عمق برشی بوده، که ابزار در دو نوع و مابقی پارامترها در سه سطح مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، دو مدل ریاضی برای میزان زبری متوسط

میانگین زبری سطح را بهبود داده است که نوع ابزار به علت وجود براده شکن و کاهش سرعت برشی به علت کاهش نیروهای ماشین‌کاری، باعث این موضوع شده است. در شکل 10 تأثیر هم‌زمان نرخ پیشروی و نوع ابزار بر میزان زبری به نمایش در آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد نرخ پیشروی زیاد و عدم استفاده از ابزار براده شکن باعث افزایش زبری می‌گردد، زیرا نرخ پیشروی زیاد باعث افزایش هم‌زمان نیروهای ماشین‌کاری و عبور سریع ابزار از سطوح ماشین‌کاری شده می‌گردد و ابزار زمان کافی برای برش مواد به طور منظم را ندارد. در شکل 11 تأثیر نوع ابزار و عمق برشی به صورت هم‌زمان بر میزان زبری نمایش داده شده است. ابزار نیتريد بورون مکعبی با عمق برشی در سطوح اول و دوم بدترین نتایج را داشته است. و این موضوع می‌تواند ناشی از عدم وجود براده شکن و احتمال بروز پدیده شخم زنی باشد.

همچنین در طراحی آزمایش¹ در روش تاگوچی می‌توان نمودار سیگنال به نویز² را در شکل 12 مشاهده نمود. نتیجه کلی که می‌توان از نمودار سیگنال به نویز گرفته شود این است که ابزار فول‌گرید، سرعت برشی 100m/min، نرخ پیشروی 0.05mm/rev و عمق برشی 1.5mm بهترین شرایط و نتایج را برای دستیابی حداقل میزان زبری برای ما فراهم می‌آورد. البته باید یاد آور گردید نتایج شرایط فوق با عمق 0.5mm نیز مشابه شرایط 1.5mm می‌باشد و اختلاف ناچیزی در نتایج مشاهده گردیده است.

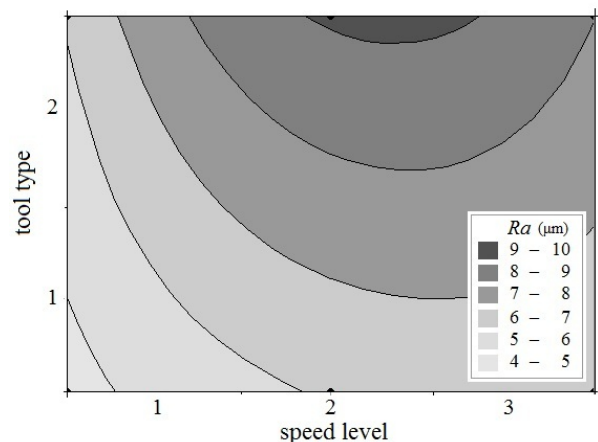


Fig. 9 The impact of cutting speed and type of tools on the roughness plot

شکل 9 نمودار تأثیر هم‌زمان سرعت برشی و نوع ابزار بر میزان زبری

¹DOE
²S/N

- تهیه دو مدل ریاضی برای هر ابزار می‌تواند پیش‌بینی نسبتاً مناسبی برای میزان Ra با شرایط ماشین‌کاری متفاوت داشته باشد.

به عنوان پیشنهاد برای مطالعه آینده می‌توان مدل ریاضی وابسته به سایر پارامترها را در زبری سطح استخراج نمود. همچنین نوع کامپوزیت‌های کربن فنولیک می‌تواند پیشنهاد بعدی برای ماشین‌کاری و تحلیل داده‌ها انتخاب گردد و می‌توان با کمک نرم‌افزارهای شبیه‌سازی، با تعیین شرایط ماشین‌کاری، کیفیت سطوح را شبیه‌سازی و پیش‌بینی نمود.

5- فهرست علائم

D	میزان باردهی (mm)
f	نرخ پیشروی (mm/rev)
Min	واحد زمان دقیقه
Ra	میانگین ارتفاع زبری (μm)
Rev	دور در اجسام دورانی
V	سرعت برشی (m/min)
μm	واحد اندازه‌گیری (10^{-3}mm)
CBN	ابزار نیتريد بورون مکعبی
PCD	ابزار الماس چند بلوری

6- تقدیر و تشکر

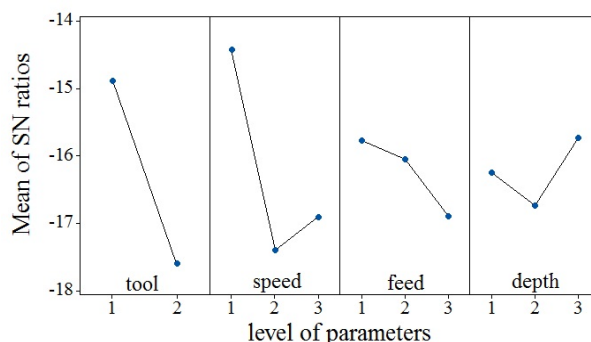
با تشکر از جناب آقای مهندس وحید مجیدی که در سیر مراحل، با تجربه کاری مفید خود و جناب مهندس امیر راستی که با تجهیزهای آزمایشگاهی، ما را در این پژوهش یاری نمودند.

7- مراجع

- [1] N. V. Nayak, Composite materials in aerospace applications, *International Journal of Scientific and Research Publications*, Vol. 4, No. 9, pp. 1-10, 2014.
- [2] Kumar, M. Gupta, P. Satsangi, Multiple-response optimization of cutting forces in turning of UD-GFRP composite using Distance-Based Pareto Genetic Algorithm approach, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 18, No. 4, pp. 680-695, 2015.
- [3] P. Faria, R. Campos, A. Abrao, G. Godoy, J. Davim, Thrust force and wear assessment when drilling glass fiber-reinforced polymeric composite, *Journal of composite materials*, Vol. 42, No. 14, pp. 1401-1414, 2008.
- [4] K. Weinert, C. Kempmann, Cutting temperatures and their effects on the machining behaviour in drilling reinforced plastic composites, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 6, No. 8, pp. 684-689, 2004.
- [5] J. P. Davim, L. R. Silva, A. Festas, A. Abrão, Machinability study on precision turning of PA66 polyamide with and without glass fiber reinforcing, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 2, pp. 228-234, 2009.
- [6] L. R. Silva, J. P. Davim, A. Abrão, P. Faria, Merchant Model Applied to Precision Orthogonal Cutting of Pa66 Polyamide with and without Glass Fiber Reinforcing, *Journal of Composite Materials*, Vol. 43, No. 23, pp. 2727-2737, 2009.
- [7] T. Rajasekaran, K. Palanikumar, B. Vinayagam, Application of fuzzy logic for modeling surface roughness in turning CFRP composites using CBN tool, *Production Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 191-199, 2011.
- [8] S. Kumar, M. Gupta, P. Satsangi, H. Sardana, Cutting forces optimization in the turning of UD-GFRP composites under different cutting environment with polycrystalline diamond tool, *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol. 4, No. 2, pp. 106-121, 2012.
- [9] S. Kumar, P. Satsangi, H. Sardana, Optimization of surface roughness in turning unidirectional glass fiber reinforced plastics (UD-GFRP) composites using polycrystalline diamond (PCD) cutting tool, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, Vol. 19, No. 3, pp. 163-174, 2012.
- [10] T. Rajasekaran, K. Palanikumar, B. Vinayagam, Turning CFRP composites with ceramic tool for surface roughness analysis, *Procedia Engineering*, Vol. 38, No. 340, pp. 2922-2929, 2012.

استخراج گردیده است. همچنین میزان تأثیرگذاری هر پارامتر و نوع تأثیر هر سطح از هر پارامتر، نتایجی بود که از پژوهش فوق بدست آمده است. به صورت کلی، نتایجی که از پژوهش فوق استخراج گردیده است به شرح ذیل می‌باشد.

- ابزار فول گرید، سرعت برشی 100m/min، نرخ پیشروی 0.05mm/rev و عمق برشی 1.5mm بهترین شرایط را برای دستیابی به حداقل میزان زبری برای ما فراهم می‌آورد.
- ابزار فول‌گرید به علت دارا بودن سطوح براده شکن و همچنین وجود پوشش، بهترین نتایج را سبب گردیده است. سطوح براده شکن در ایجاد زاویه براده دخیل بوده است و ابزار نیتريد بورون مکعبی این زاویه را ندارد، لذا ابزار فول‌گرید نتایج بهتری را رقم می‌زند.
- کمترین سطح از سطوح سرعت برشی به علت بروز حداقل نیروی ماشین‌کاری، باعث حداقل زبری می‌گردد.
- نرخ پیشروی کم به علت کاهش نیروهای ماشین‌کاری و همچنین برش مناسب مواد از سطح قطعه‌کار، زبری را کاهش می‌دهد.
- عمق برشی در تمام سطوح در ابزار فول‌گرید رفتار نسبتاً یکنواختی از خود نشان می‌دهد اما با در نظر گرفتن حداکثر راندمان که زمان ماشین‌کاری را کاهش می‌دهد، عمق 1.5mm پیشنهاد می‌شود.
- نوع ابزار و سرعت برشی در مرحله اول و پس از آن تأثیر ترکیبی ابزار با عمق برشی، سرعت برشی و نرخ پیشروی بر میزان زبری تأثیر می‌گذارند.



Signal-to-noise: Smaller is better
Fig. 12 Main Effects plot for S/N ratios Ra

شکل 12 نمودار سیگنال به نویز Ra

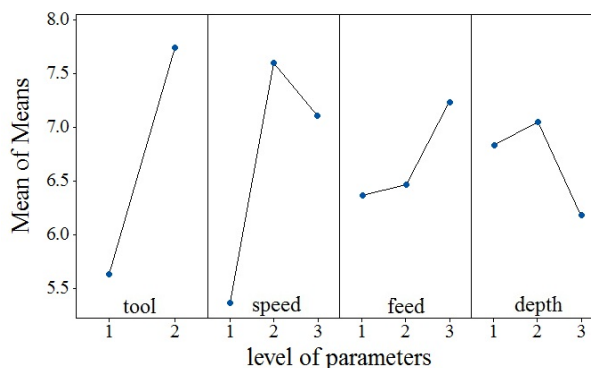


Fig. 13 Main effects plot for means Ra

شکل 13 نمودار اثرات اصلی Ra

- of GFR/epoxy composites, *Composite structures*, Vol. 63, No. 3, pp. 329-338, 2004.
- [16] H. Wang, J. Sun, J. Li, L. Lu, N. Li, Evaluation of cutting force and cutting temperature in milling carbon fiber-reinforced polymer composites, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 82, No. 9-12, pp. 1517-1525, 2016.
- [17] S. Zenia, L. B. Ayed, M. Nouari, A. Delamézière, An elastoplastic constitutive damage model to simulate the chip formation process and workpiece subsurface defects when machining CFRP composites, *Procedia CIRP*, Vol. 31, No. 7, pp. 100-105, 2015.
- [18] M. Gupta, S. Kumar, Investigation of surface roughness and MRR for turning of UD-GFRP using PCA and Taguchi method, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 18, No. 1, pp. 70-81, 2015.
- [19] H. Hassanpour, A. Rasti, M. H. Sadeghi, M. Hosein, A. R. O. Saadatbakhsh, Effect of cutting fluid application on surface roughness in hard milling of 4340-alloyed steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 50-60, 2015. (in Persian فارسی)
- [11] S. Kumar, P. Satsangi, Multiple-response optimization of turning machining by the taguchi method and the utility concept using uni-directional glass fiber-reinforced plastic composite and carbide (k10) cutting tool, *Journal of Mechanical Science And Technology*, Vol. 27, No. 9, pp. 2829-2837, 2013.
- [12] R. Sreenivasulu, Optimization of surface roughness and delamination damage of GFRP composite material in end milling using Taguchi design method and artificial neural network, *Procedia Engineering*, Vol. 64, No. 85, pp. 785-794, 2013.
- [13] S. Sivasankaran, P. Harisagar, E. Saminathan, S. Siddharth, P. Sasikumar, Effect of process parameters in surface roughness during turning of GFRP pipes using PCD insert tool, *Procedia Engineering*, Vol. 97, No. 8, pp. 64-71, 2014.
- [14] A. kumar Parida, R. Das, A. Sahoo, B. Routara, Optimization of Cutting Parameters for Surface Roughness in Machining of gfrp Composites with Graphite/fly Ash Filler, *Procedia Materials Science*, Vol. 6, No. 177, pp. 1533-1538, 2014.
- [15] I. El-Sonbaty, U. Khashaba, T. Machaly, Factors affecting the machinability