



بهینه‌سازی فرآیند سنگزنی کامپوزیت تک جهته تقویت‌شده با الیاف کربن به روش سطح پاسخ

سید محمود موسوی^۱، امجد سازگار^{۲*}، وحید فلاح پور^۱

۱- سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران

۲- پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۳

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۵/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۳

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۶/۱۶

کلمات کلیدی:

کامپوزیت تقویت‌شده الیاف کربن

سنگزنی

زبری سطح

عمق برشی

نرخ پیشروی

خلاصه: امروزه استفاده از مواد کامپوزیتی در صنایع مختلفی هم‌چون هوافضا، حمل و نقل، ساختمان و ... رو به افزایش است. بنابراین درک صحیح از فرایندهای تولید و مونتاژ قطعات تولیدشده با این مواد امری اجتناب‌ناپذیر است. یکی از فرایندهای مهم و پرکاربرد در مونتاژ قطعات کامپوزیتی، ماشینکاری است. این فرآیند شامل دو دسته فرایندهای سنتی و نوین ماشینکاری بوده که سنگزنی از رایج‌ترین روش‌های سنتی می‌باشد. پارامترهای ماشینکاری مختلفی همچون سرعت چرخش سنگ، سرعت پیشروی، عمق برشی، مشخصات قطعه کار، اندازه و جنس ذرات ساینده و هندسه سنگ بر کیفیت ماشینکاری تأثیرگذار است. در این مطالعه تأثیر پارامترهای سنگزنی شامل نرخ پیشروی، عمق برشی، راستای الیاف و اندازه ذرات ساینده بر زبری سطح کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن مورد بررسی قرار گرفته است. قطعات از جنس الیاف کربن-اپوکسی بوده‌اند. آزمایشات با نرم افزار مینی‌تب نسخه ۱۹ و به روش سطح پاسخ طرح‌ریزی شدند. نتایج نشان دادند که اندازه ذرات و عمق برش مؤثرترین پارامترها بر زبری سطح می‌باشند. پس‌از آن نرخ پیشروی و راستای الیاف در مراتب بعدی اهمیت قرار دارند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز تأییدکننده نتایج می‌باشند. در پایان پیشنهاد شد برای روتراشی کامپوزیت از سنگ با دانه‌بندی زبر، عمق برش ۵۰ میکرومتر، نرخ پیشروی ۲۰۰ میلیمتر بر دقیقه و عمود بر الیاف استفاده شود تا به زبری کم‌تر از ۰/۵ میکرومتر دست یافت.

۱- مقدمه

انجام‌شده است. سازگار^۶ و همکارانش در تحقیقی به بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر زبری سطح در لوله‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن پرداختند و به این نتیجه رسیدند که عمق برش و اندازه ذرات ساینده مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر سنگزنی لوله‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن می‌باشند [۱]. پارک^۷ و ناکاگوا [۲] سنگزنی کامپوزیت کربن-اپوکسی را به‌وسیله سنگ الماس مورد بررسی و مطالعه قرار داده و مکانیسم‌های مختلف سنگزنی را برای آن پیشنهاد نمودند و در پایان به این نتیجه رسیدند که بهترین صافی سطح در راستای ۹۰ درجه به‌دست می‌آید. یوان^۸ و همکاران [۳] به مطالعه سنگزنی کامپوزیت کربن-اپوکسی توسط سنگ بروم نیتريد مکعبی^۹ با طرحی جدید پرداخته و تأثیر سرعت سنگ را بر نیروهای سنگزنی و نیز زبری سطح موردبررسی قرار دادند. هو و ژانگ^{۱۰} [۴] قابلیت سنگزنی

ماشینکاری کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن^۱ به‌دلیل ویژگی ناهمگنی کامپوزیت و سایندگی فاز تقویت‌کننده آن، فرآیندی پیچیده است. طی ماشینکاری، سایش سریع ابزار افتاده که سبب ایجاد برشی ناقص و ایجاد سطحی معیوب و زبر می‌شود. بنابراین درک درست تأثیر پارامترهای مختلف به‌منظور انجام صحیح فرآیند امری مهم است. در فرآیند سنگزنی پارامترهای بسیاری از جمله نرخ پیشروی^۲، عمق برشی^۳، جنس ابزار، اندازه ذرات ساینده^۴ سنگ، جنس قطعه و راستای الیاف^۵ بر کیفیت سطح مؤثرند. هم‌چنین یکی از مهم‌ترین توابع ارزیابی سطوح ماشینکاری‌شده اندازه‌گیری زبری سطح و مشاهدات میکروسکوپی می‌باشند. پژوهش‌های کمی در زمینه فرآیند سنگزنی و برشکاری کامپوزیت‌ها با ابزار ساینده

- 1 ¹ Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRPs)
- 2 ² Feed Rate (mm/min)
- 3 ³ Depth of Cut (mm)
- 4 ⁴ Grit Size
- 5 ⁵ Fiber Direction (degree)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Asazgar@aeoi.org.ir

6 ⁶ Sazgar

7 ⁷ Park

8 ⁸ Yuan

9 ⁹ Cubic Boron Nitride

10 ¹⁰ Zhang



و هندسه انتهایی ابزار را بر زبری سطح موردبررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که با انتخاب ابزاری با اندازه ذرات مناسب، غلظت ذرات کم‌تر و لبه محدب‌تر زبری سطح کمتری حاصل خواهد شد.

مطالعات متعددی بر روی ماشینکاری کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه انجام شده است. اما در این کار پژوهشی سعی بر آن شده است تا این بررسی‌ها به صورت جامع‌تری بر روی قطعه کامپوزیتی تک‌جهته تقویت‌شده با الیاف کربن و زمینه اپوکسی صورت پذیرد. به همین منظور در ابتدا آزمایش‌ها با نرم‌افزار مینی‌تب نسخه ۱۹ طرح‌ریزی شدند. طرح سطح پاسخ^۵ به روش باکس-بنکن^۶ به دلیل بررسی کامل تأثیر پارامترها و برهمکنش آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. بررسی سطح ماشینکاری شده از مهم‌ترین پارامترهای ارزیابی قابلیت ماشینکاری قطعات کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن است. بنابراین در این مطالعه به بررسی تأثیر پارامترهای ماشینکاری شامل عمق برشی، نرخ پیشروی، راستای الیاف و دانه‌بندی ذرات ساینده بر زبری سطح پرداخته و علاوه بر بررسی پارامترها به کمک طراحی آزمایش، به منظور تأیید نتایج به دست آمده، تصاویر میکروسکوپ الکترونی رومشی^۷ نیز ارائه شده است. در پایان نیز مقادیر بهینه هر پارامتر برای دستیابی به حداقل میزان زبری سطح ارائه شده‌اند.

۲- مواد و روش‌ها

در این مقاله تأثیر پارامترهای عمق برش (در بازه ۰/۵-۰/۰۵ میلی‌متر)، نرخ پیشروی (در بازه ۱۰-۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه)، زاویه راستای برش و الیاف (در بازه ۹۰-۰ درجه) و دانه‌بندی ذرات ساینده (به صورت دانه‌بندی زبر و نرم) بر سنگزنی قطعه تخت کامپوزیتی تک‌جهته کربن-اپوکسی موردبررسی قرار گرفت. قطعه کامپوزیتی متشکل از الیاف کربن ۱۲۰۰۰ و رزین اپوکسی گرماسخت بیسفنول-آ بوده است. قطعه کار به روش رشته‌پیچی^۸ تولید شد. به دلیل دود سمی ناشی از سوختن زمینه پلیمری و گردوغبار حاصل از ماشینکاری، در تمامی آزمایش‌ها از سیال خنک‌کننده استفاده شده است. ابزار ماشینکاری سنگ اکسید آلومینیوم سفید با دانه‌بندی زبر و نرم بوده است که در دستگاه چهار محور به کار برده شد. هر آزمون با یک مسیر رفت سنگ بر روی قطعه انجام شد. بنابر مطالعات و نیز اندازه‌گیری‌های تجربی قبل، تغییرات در جهت عمود بر الیاف بسیار ملموس‌تر بوده و به نظر می‌رسد

پلاستیک‌های تقویت‌شده با الیاف کربن تک‌جهته را با تحقیق در مورد تأثیر راستای الیاف و پارامترهای سنگزنی از قبیل عمق برش، نرخ پیشروی و سرعت سنگ با اندازه‌گیری نیروی سنگزنی و کیفیت سطح انجام دادند. آن‌ها دریافتند که زبری سطح و نیروی سنگزنی به طور مستقیم به عمق برش وابسته است. هوچنگ^۱ [۵] نیز در کتاب خود با عنوان «تکنولوژی ماشینکاری مواد کامپوزیتی» به بررسی روش‌های مختلف ماشینکاری کامپوزیت‌ها، سایش ابزار، کیفیت سطح، خنک‌کننده‌های مختلف و قابلیت ماشینکاری زمینه‌های مختلف پرداخته است. ساساهارا^۲ و همکاران [۶] به منظور دستیابی به نتایج بهینه در سنگزنی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن، استفاده از خنک‌کننده را در اطراف سنگ پیشنهاد نمود. در این کار پژوهشی سنگ اکسید آلومینیوم برای سنگزنی تخت مورد استفاده قرار گرفت. سه سیستم خنک‌کاری شامل: سنگزنی خشک، سنگزنی با نازل بیرونی و سنگزنی با سیال داخلی اطراف سنگ تحت بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که بارگذاری‌ها بر روی ماتریس موجود در سنگ با سیستم خنک‌کاری داخلی به شدت کاهش پیدا می‌کند. ذرات در این حالت قادرند تا الیاف را به طور کامل بدون هیچ‌گونه لایه‌لایه‌شدگی و ریش‌ریش شدن، ببرند. بنابراین، زبری سطح ماشینکاری شده تا حدود زیادی کاهش پیدا نمود. خنک‌کننده نیز قادر است تا دمای سنگزنی را تا حدود زیادی کاهش داده و زیر دمای شیشه‌ای شدن زمینه اپوکسی نگه دارد. هم‌چنین براده‌ها به طور مناسبی از منطقه برشی دفع شدند. ژاوو^۳ و همکاران [۷] دمای سنگزنی کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف را با روش تفاضل محدود سه‌بعدی موردبررسی قرار دادند. تأثیر راستای الیاف بر توزیع حرارت سنگزنی در مقادیر مختلف پیشروی قطعه کار به صورت عددی شبیه‌سازی و تحلیل شد. مشخص شده است که تأثیر جهت الیاف در پیشروی کم قابل توجه بوده و در پیشروی‌های بالاتر کمی ناشناخته است. در سنگزنی خشک دمای سنگزنی به ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد که می‌تواند به شدت به قطعه آسیب وارد کند. ژاوو و همکاران [۸] به ارزیابی مورفولوژی سطح در سنگزنی کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن در حضور نانو سیال به عنوان روان‌کننده پرداختند. وانگ^۴ و همکاران [۹] سنگزنی سطح کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن را با کمک التراسونیک انجام داده و تأثیر ابزار را بر روی آن مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها اثر متغیرهای ابزار هم‌چون اندازه ذرات، غلظت ذرات، تعداد شکاف‌ها

5 ² Response Surface Method (RSM)

6 ³ Box-Benhken

7 ⁴ Scanning Electron Microscopy (SEM)

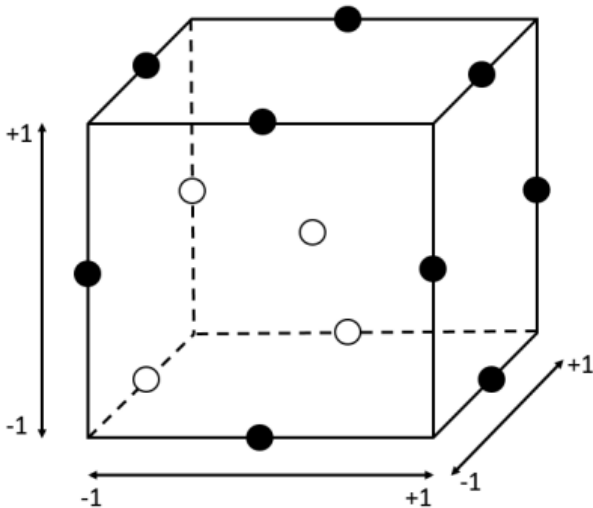
8 ⁵ Filament winding

1 ¹¹ Hocheng

2 ¹² Sasahara

3 ¹³ Gao

4 ¹ Wang



شکل ۱. طرح باکس-بنکن سه عاملی

Fig. 1. Box-Behnken three-factor design

بر اساس اطلاعات به دست آمده از داده‌های زبری سطح، نتایج ذیل حاصل شده است. شکل ۲ منحنی‌های تأثیرات اصلی هر پارامتر را بر زبری سطح و روند تغییرات آن نشان می‌دهد.

بر اساس شکل ۲، شیب هر منحنی نمایانگر اهمیت پارامتر مربوطه است. به این صورت که هرچه شیب منحنی بیشتر باشد، پارامتر مربوط به آن از اهمیت بالاتری برخوردار است. همچنین شیب مثبت و یا منفی منحنی نیز بیان‌کننده روند تغییرات تابع هدف با متغیر به صورت مستقیم و یا معکوس است. بر این اساس، دانه‌بندی ذرات ساینده مؤثرترین پارامتر بر زبری سطح است و پس از آن عمق برشی، نرخ پیشروی و راستای الیاف به ترتیب مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر زبری سطح می‌باشند. نمودار پارتو نیز میزان تأثیرگذاری هر پارامتر و اهمیت آن را نسبت به دیگر پارامترها در شکل ۳ نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۳ اندازه ذرات ساینده، عمق برش و نرخ برشی به ترتیب از مهم‌ترین پارامترهای اصلی مؤثر بر زبری سطح می‌باشند. همچنین می‌توان از اثر راستای الیاف نیز چشم‌پوشی نمود. تأثیر متقابل عمق برش-اندازه ذرات، راستا-اندازه ذرات و نرخ پیشروی-عمق برش نیز بر زبری سطح اثر دارند. به منظور بررسی بیشتر، نمودارهای تأثیرات هم‌زمان مربوط به پارامترهای مختلف در بخش‌های بعدی ارائه شده است. شکل ۳ تأثیر هم‌زمان راستای الیاف و عمق برش را نشان می‌دهد.

که احتمال خطای کمتری وجود دارد. همچنین بنا بر تجارب موجود، احتمال قرارگیری پرراب زبری سنج در شیارهای ناشی از کنده‌شدن الیاف وجود دارد که می‌تواند اطلاعات غلط در خصوص وضعیت سطح ماشینکاری شده در اختیار قرار دهد. در نهایت زبری سطح برای هر نمونه ۳ بار در جهت عمود بر الیاف اندازه‌گیری و ثبت گردید. میانگین زبری‌های اندازه‌گیری شده نیز به عنوان زبری نهایی هر نمونه ثبت شده است.

طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ:

در بسیاری از کارهای پژوهشی روش سطح پاسخ به منظور بهبود فرآیند و توصیف پارامترهای خروجی (پاسخ‌ها) با توجه به متغیرهای ورودی استفاده شده است [۱۰-۱۳]. این روش ترکیبی از روش‌های آماری و ریاضی بوده که برای مدل‌سازی مسائل مربوط به فرآیندهای مختلف مناسب است. در این روش، توابع هدف اصلی که تحت تأثیر پارامترهای ورودی فرآیند می‌باشند، بهینه خواهند شد. این روش طراحی روابط میان سطح پاسخ به دست آمده و پارامترهای ورودی قابل کنترل، کمی‌سازی خواهند شد. همچنین، امکان برآورد برهمکنش‌ها را نیز امکان‌پذیر می‌سازد. این روش طراحی به دو روش طرح باکس-بنکن و طرح مرکب مرکزی انجام خواهد شد. در این کار پژوهشی به دلیل استفاده از روش باکس-بنکن توصیفی مختصر از آن ارائه خواهد شد. روش باکس-بنکن طرح عاملی سه سطحی و ناکامل است. این طرح برای حل مشکل تعداد زیاد آزمایش‌ها در مواقعی که تعداد فاکتورها زیاد باشد، مناسب است. شکل ۱ طراحی باکس-بنکن برای سه فاکتور را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۱ این طرح هیچ نقطه‌ای از رئوس مکعب را که توسط سطوح بالا و پایین هر متغیر ایجاد شده است را شامل نمی‌شود. این موضوع به‌ویژه در شرایطی که رئوس مکعب دارای شرایط فرآیندی محدود، غیرقابل دستیابی و یا گران‌قیمت باشند، بسیار مفید است [۱۴ و ۱۵].

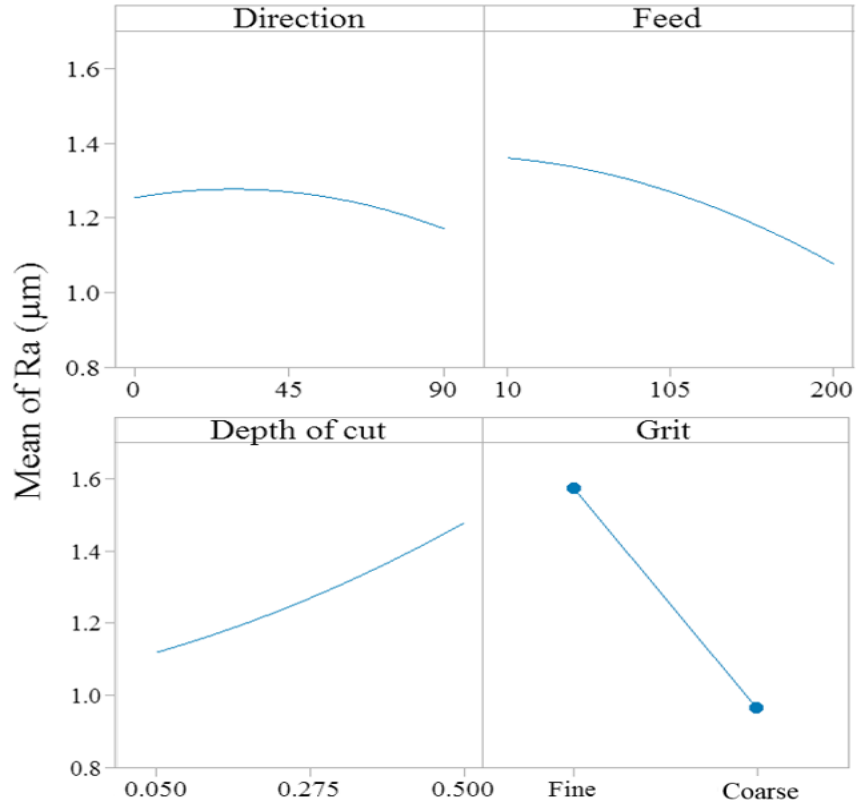
۳- نتایج و بحث

پس از طراحی آزمایش و انجام هر تست زبری سطح هر نمونه حداقل ۳ مرتبه اندازه‌گیری شده و زبری متوسط آن ثبت شده است. لازم به ذکر است که آزمایش‌ها در نقاط مرکزی برای هر دانه بندی نرم و زبر سه بار تکرار شده‌اند. نتایج زبری در این نقاط بیانگر تکرارپذیری بودن آزمایش‌ها می‌باشند. در جدول ۱ شرایط هر آزمون به همراه اطلاعات زبری متوسط مربوط به آن ارائه شده است.

جدول ۱. شرایط هر آزمون و زبری متوسط مربوط به آن

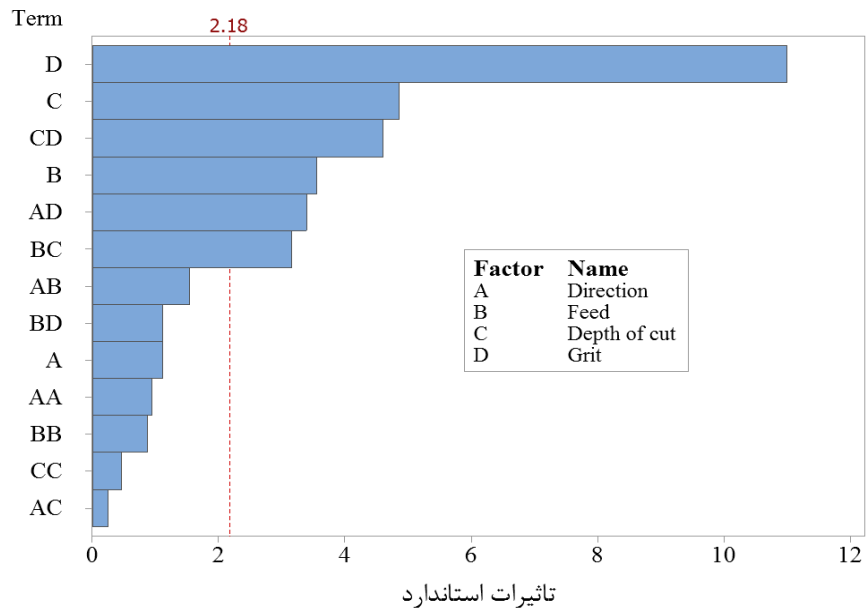
Table 1. Conditions of each test and its average roughness

شماره آزمون	زاویه راستای الیاف (درجه)	عمق برش (میلیمتر)	نرخ پیشروی (میلیمتر بر دقیقه)	دانه بندی ذرات	زبری سطح متوسط (میکرومتر)
۱	۰	۰/۲۷۵	۱۰	نرم	۱/۹۲
۲	۹۰	۰/۲۷۵	۱۰	نرم	۱/۸۷۵
۳	۰	۰/۲۷۵	۲۰۰	نرم	۱/۲۵
۴	۹۰	۰/۲۷۵	۲۰۰	نرم	۱/۱
۵	۰	۰/۰۵۰	۱۰۵	نرم	۱/۹۰
۶	۹۰	۰/۰۵۰	۱۰۵	نرم	۱/۲۹
۷	۰	۰/۵	۱۰۵	نرم	۱/۷۹
۸	۹۰	۰/۵	۱۰۵	نرم	۲/۱۳۵
۹	۴۵	۰/۰۵۰	۱۰	نرم	۱/۶۶۵
۱۰	۴۵	۰/۰۵۰	۲۰۰	نرم	۱/۴۰
۱۱	۴۵	۰/۵	۱۰	نرم	۱/۷۴
۱۲	۴۵	۰/۵	۲۰۰	نرم	۱/۹۹۵
۱۳	۴۵	۰/۲۷۵	۱۰۵	نرم	۱/۱۶۱
۱۴	۴۵	۰/۲۷۵	۱۰۵	نرم	۱/۴۶
۱۵	۴۵	۰/۲۷۵	۱۰۵	نرم	۱/۶۹۲
۱۶	۰	۰/۲۷۵	۱۰	زبر	۱/۱۹۵
۱۷	۹۰	۰/۲۷۵	۱۰	زبر	۰/۹۲
۱۸	۰	۰/۲۷۵	۲۰۰	زبر	۱/۰۳۵
۱۹	۹۰	۰/۲۷۵	۲۰۰	زبر	۱/۹۴
۲۰	۰	۰/۰۵۰	۱۰۵	زبر	۱/۰۷
۲۱	۹۰	۰/۰۵۰	۱۰۵	زبر	۰/۷۷
۲۲	۰	۰/۵	۱۰۵	زبر	۱/۰۷
۲۳	۹۰	۰/۵	۱۰۵	زبر	۰/۷۲
۲۴	۴۵	۰/۰۵۰	۱۰	زبر	۱/۰۱
۲۵	۴۵	۰/۰۵۰	۲۰۰	زبر	۰/۸۰
۲۶	۴۵	۰/۵	۱۰	زبر	۰/۹۲
۲۷	۴۵	۰/۵	۲۰۰	زبر	۱/۰۱۵
۲۸	۴۵	۰/۲۷۵	۱۰۵	زبر	۰/۹۴۲
۲۹	۴۵	۰/۲۷۵	۱۰۵	زبر	۰/۹۳۳
۳۰	۴۵	۰/۲۷۵	۱۰۵	زبر	۰/۹۵۱



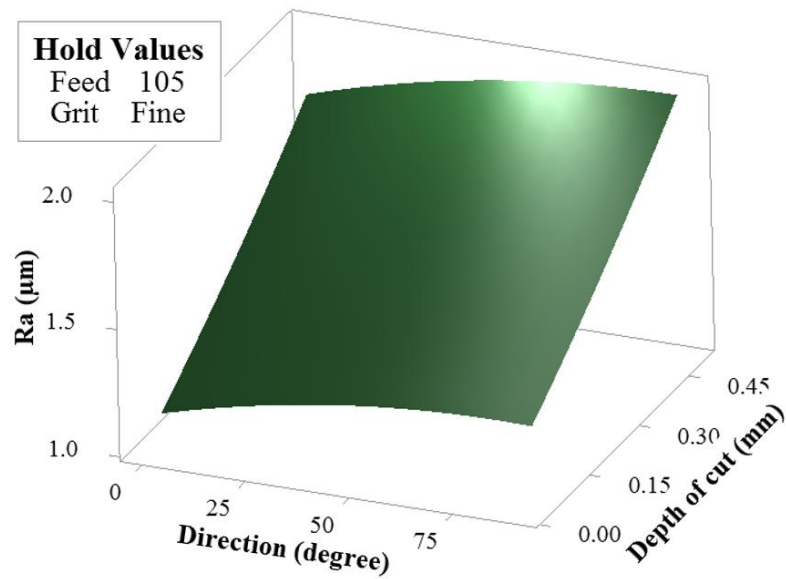
شکل ۲. منحنی تأثیرات اصلی پارامترها بر زبری سطح

Fig. 2. The main effects of the parameters on the surface roughness



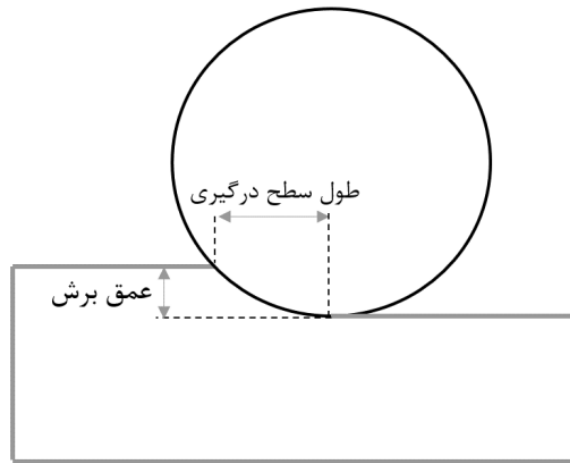
شکل ۳. نمودار پارتو و تأثیرگذاری پارامترهای مختلف بر زبری سطح

Fig. 3. Pareto diagram and the effect of parameters on surface roughness



شکل ۴. نمودار تأثیر هم‌زمان عمق برش و راستای الیاف. شرایط آزمون: نرخ پیشروی ۱۰۵ میلی‌متر بر دقیقه، سنگ نرم.

Fig. 4. The surface plot of effect of depth of cut and fiber orientation. Test conditions: feed rate of 105 mm/min, fine grind wheel.



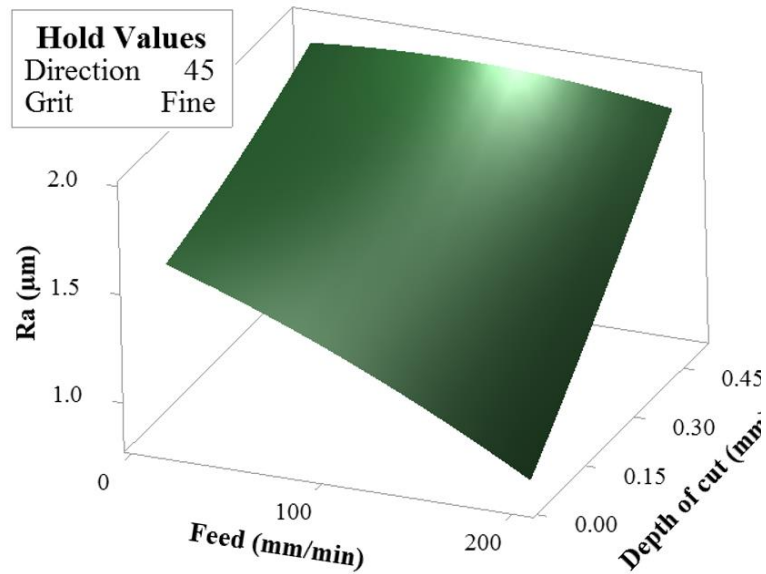
شکل ۵. طرح‌واره‌ای از رابطه عمق برش و طول سطح تماس ابزار با قطعه کار.

Fig. 5. Schematic of the relationship between depth of cut and engagement of tool and workpiece.

شکل ۶ تأثیر هم‌زمان عمق برش و نرخ پیشروی را بر زبری سطح نشان می‌دهد.

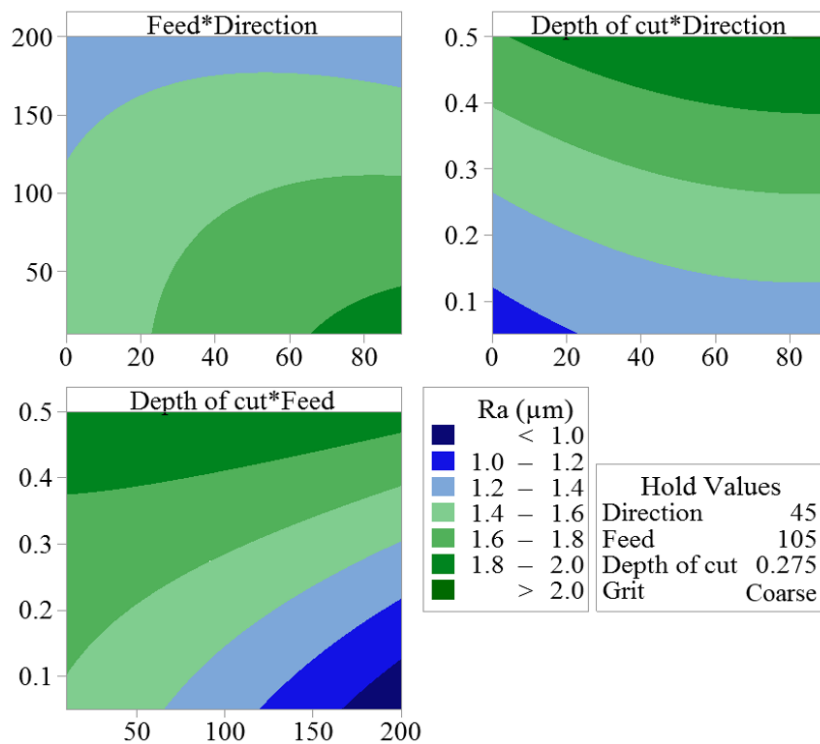
همان‌طور که از شکل ۶ مشاهده می‌شود، نرخ پیشروی بر خلاف عمق برش تأثیر معکوس بر زبری سطح دارد. به دلیل سرعت بالای چرخش سنگ در فرآیند سنگزنی، سرعت خطی عبور ذرات ساینده از سطح بسیار زیاد است. در نرخ پیشروی کم، دفعات عبور یک ذره از منطقه‌ای خاص بسیار بیشتر از

بر اساس شکل ۴ افزایش عمق برش باعث افزایش زبری سطح شده است. با افزایش عمق برشی، سطح درگیری سنگ با قطعه افزایش یافته و در نهایت نیروهای اصطکاکی افزایش خواهند یافت (شکل ۵). افزایش نیروی اصطکاک نیز باعث افزایش حرارت می‌شود که احتمال ایجاد آسیب دمایی را در پی خواهد داشت. هم‌چنین می‌توان از تأثیر ناچیز راستای برشکاری نیز چشم‌پوشی نمود [۴].



شکل ۶. نمودار تأثیر همزمان عمق برش و نرخ پیشروی. شرایط آزمون: راستای الیاف ۴۵ درجه، سنگ نرم.

Fig. 6. The surface plot of effect of depth of cut and feed rate. Test conditions: 45° fiber direction, fine grind wheel.

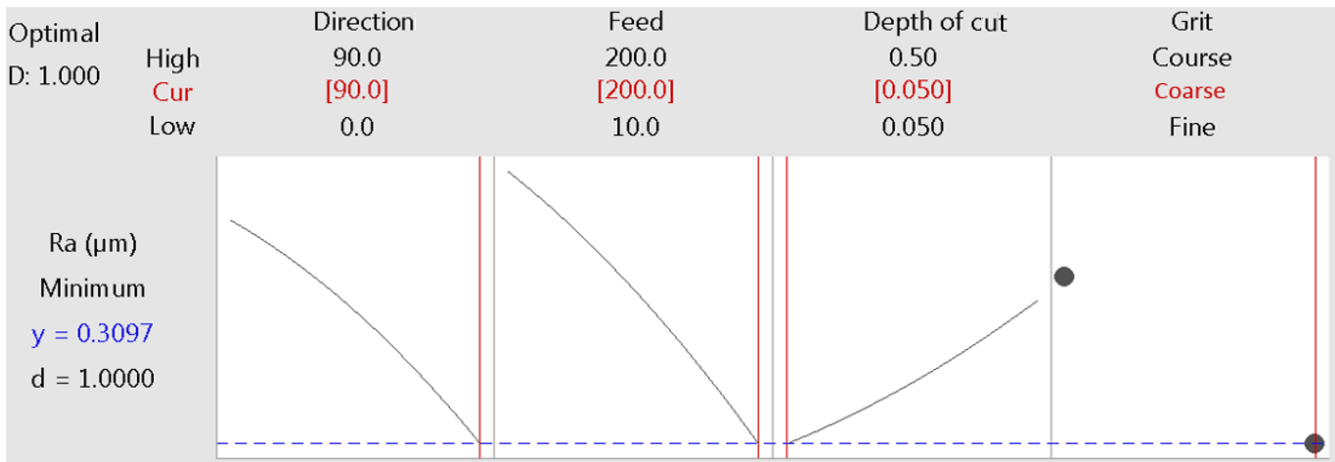


شکل ۷. نمودار اثر متقابل پارامترها بر زبری سطح

Fig. 7. The counter plot of the interaction of parameters on surface roughness

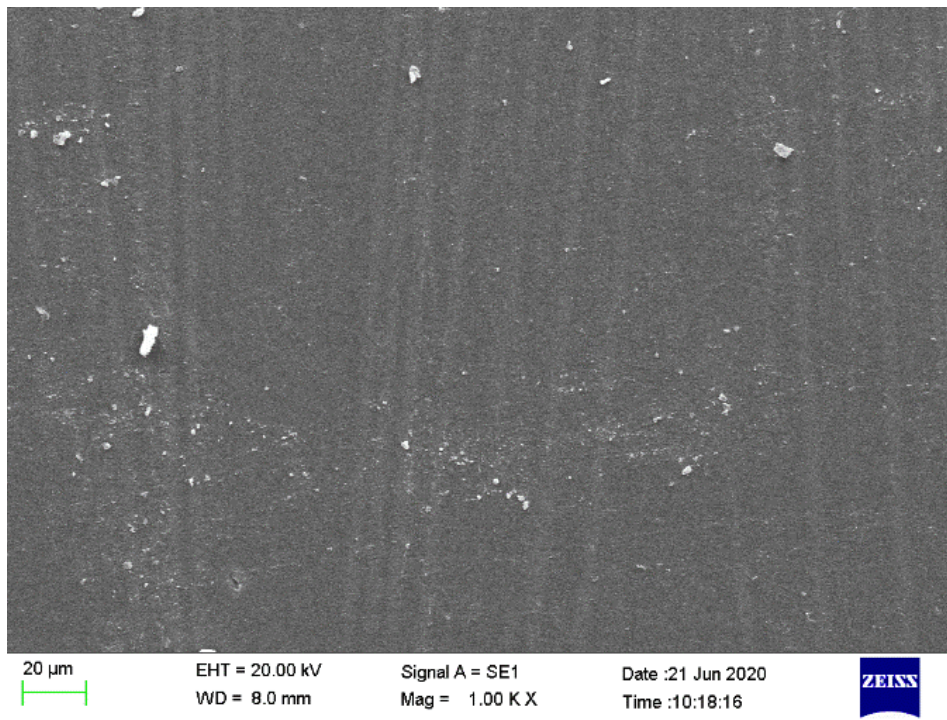
پارامترها را بر زبری سطح نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۷، برای دستیابی به حداقل زبری سطح بایستی

نرخ پیشروی بالا است. این امر موجب افزایش دمای منطقه برشی خواهد شد که آسیب‌های دمایی را در پی خواهد داشت. شکل ۷ نمودار اثرات متقابل



شکل ۸. بهینه‌سازی پارامترها برای دستیابی به حداقل میزان زبری سطح

Fig. 8. Optimization of parameters to achieve the minimum surface roughness

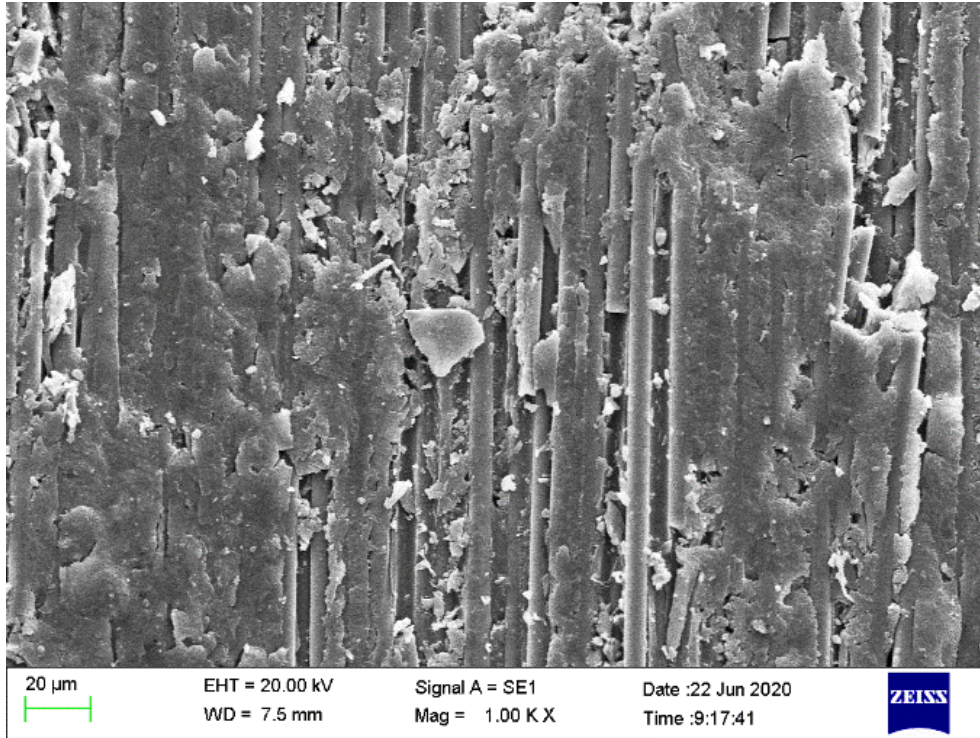


شکل ۹. تصویر SEM از سطح نمونه شماره ۲۱، شرایط ماشینکاری: عمق برش ۰/۰۵ میلی‌متر، نرخ پیشروی ۱۰۵ میلی‌متر بر دقیقه، راستای برش ۹۰ درجه و سنگ با دانه‌بندی زبر.

Fig. 9. SEM picture of machined surface with minimum surface roughness, machining conditions: depth of cut 0.05 mm, feed rate 105 mm/min, cutting direction 90° and coarse grain size.

موضوع می‌باشد که می‌توان به راحتی با تنظیم پارامترهای مختلف در مقادیر معرفی شده، به سطحی بسیار یکدست و صاف دست یافت. به منظور تأیید نتایج کمی ارائه شده در این گزارش، شکل‌های ۹ و ۱۰ تصاویر سطح ماشینکاری شده در نمونه‌های ۲۱ و ۸ می‌باشند که به ترتیب دارای کمترین و بیشترین زبری سطح می‌باشند.

ماشینکاری را در نرخ‌های برشی بالا، عمق برش کم و در راستای ایفای انجام داد. همچنین شکل ۸ مقادیر بهینه هر پارامتر را به منظور دستیابی به حداقل میزان زبری سطح نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۸ می‌توان با انتخاب مقادیر پیشنهادی توسط نرم‌افزار به حداقل زبری سطح ۰/۳ میکرومتر دست یافت. البته لازم به ذکر است که فاکتور مطلوبیت نیز در این شرایط برابر یک است که نشان‌دهنده این



شکل ۱۰. تصویر SEM از سطح نمونه شماره ۸، شرایط ماشینکاری: عمق برش ۰/۵ میلی‌متر، نرخ پیشروی ۱۰۵ میلی‌متر بر دقیقه، راستای برش ۹۰ درجه و سنگ با دانه‌بندی نرم.

Fig. 10. SEM picture of machined surface with maximum surface roughness, machining conditions: depth of cut 0.5 mm, feed rate 105 mm/min, cutting direction 90° and fine grain size.

با ذرات ساییده بزرگ‌تر به دلیل خروج راحت‌تر براده‌های چسبیده و همچنین عبور سیال خنک‌کننده از فضای میان ذرات نتایج بهتری را نسبت به سنگ نرم در اختیار قرار داده است.

- با افزایش عمق برش به دلیل افزایش سطح درگیری سنگ و قطعه، نیروهای ماشینکاری و به‌خصوص نیروی اصطکاک افزایش یافته و دمای منطقه ماشینکاری افزایش می‌یابد. افزایش دما نیز سبب افزایش آسیب‌های حرارتی خواهد شد.

- افزایش نرخ پیشروی برخلاف عمق برش سبب کاهش زبری سطح خواهد شد. با توجه به سرعت زیاد چرخش سنگ، نرخ کم پیشروی باعث عبور بیش‌ازحد ذرات ساییده از یک منطقه برشی و افزایش دمای آن منطقه می‌شود که این موضوع آسیب‌های دمایی را در پی خواهد داشت.

- می‌توان با انتخاب دانه‌بندی زبرتر، حداقل عمق برشی، نرخ پیشروی بالاتر و راستای نود درجه میان الیاف و بردار سرعت و همچنین استفاده صحیح از سیال خنک‌کننده و کنترل دمای سطح به زبری سطح کم‌تر از ۱ میکرومتر در سنگزنی قطعات تخت کامپوزیتی تک جهت تقویت‌شده با الیاف کربن دست‌یافت.

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با انتخاب سنگ با دانه‌بندی زیر، حداقل عمق برش می‌توان به سطحی مطلوب دست‌یافت. همچنین با سنگ نرم و حداکثر عمق برش در شکل ۱۰، سطحی مملو از ذوب‌شدگی زمینه و الیاف آسیب‌دیده مشاهده می‌شود. همچنین با مقایسه این دو تصویر می‌توان به تأثیر بسیار زیاد عمق برش و دانه‌بندی سنگ بر زبری سطح پی برد.

۴- نتیجه‌گیری

در این گزارش تأثیر پارامترهای عمق برشی، نرخ پیشروی، دانه‌بندی ذرات و راستای برش بر زبری سطح در فرآیند سنگزنی کامپوزیت تک‌جهته تقویت‌شده با الیاف کربن مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها با روش سطح پاسخ و با کمک نرم‌افزار مینی تب نسخه ۱۹ طرح‌ریزی شده‌اند. از نمودارها و شکل‌ها می‌توان نتایج زیر را استنباط نمود:

- دانه‌بندی ذرات، عمق برشی، نرخ پیشروی به ترتیب تأثیرگذارترین پارامترها بر زبری سطح بوده و همچنین می‌توان از تأثیر راستای برش بر زبری سطح چشم‌پوشی نمود.
- به دلیل خصوصیت چسبندگی زمینه پلیمری در کامپوزیت، سنگ

منابع

- [9] H. Wang, F. Ning, Y. Hu, P. Fernando, Z.J. Pei, W. Cong, Surface grinding of carbon fiber-reinforced plastic composites using rotary ultrasonic machining: effects of tool variables, *Advances in Mechanical Engineering*, 8(9) (2016) 1-14.
- [10] V.S. Babu, S.S. Kumar, R. Murali, M.M. Rao, Investigation and validation of optimal cutting parameters for least surface roughness in EN24 with response surface method, *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 3(6) (2011) 146-160.
- [11] B. Nikrooz, M. Zandrahimi, Optimization of process variables and corrosion properties of a multi layer silica sol gel coating on AZ91D using the Box-Behnken design, *Journal of sol-gel science and technology*, 59(3) (2011) 640-649.
- [12] S.m. Mousavi, A. Sazgar, A. Mostafanejad, Optimization of Machining Parameters in Turning of Carbon Fiber Reinforced Composite, in: 28th annual international conference of Iranian of mechanical engineers (ISME), Amirkabir university of technology, Tehran, I.R. of Iran, 2020, (in persian).
- [13] L. Wu, K.-l. Yick, S.-p. Ng, J. Yip, Application of the Box-Behnken design to the optimization of process parameters in foam cup molding, *Expert Systems with Applications*, 39(9) (2012) 8059-8065.
- [14] K. Abou-El-Hossein, K. Kadirgama, M. Hamdi, K. Benyounis, Prediction of cutting force in end-milling operation of modified AISI P20 tool steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 182(1-3) (2007) 241-247.
- [15] K. Kadirgama, K. Abou-El-Hossein, B. Mohammad, H. Habeeb, Statistical model to determine surface roughness when milling hastelloy C-22HS, *Journal of mechanical science and technology*, 21(10) (2007) 1651-1655.
- [1] S.M. Mousavi, A. Sazgar, M.H. Beheshti, Investigation of the Effect of Machining Parameters to Minimize Surface Roughness in Grinding of Carbon-Epoxy Composites, in: 28th annual international conference of Iranian of mechanical engineers (ISME), Amirkabir university of technology, Tehran, I.R. of Iran, 2020, (in persian).
- [2] K.Y. Park, T. Nakagawa, Mirror surface grinding characteristics and mechanism of carbon fiber reinforced plastics, *Journal of materials processing technology*, 52(2-4) (1995) 386-398.
- [3] H. Yuan, H. Gao, Y.J. Bao, Y.B. Wu, Grinding of Carbon/Epoxy Composites Using Electroplated CBN Wheel with Controlled Abrasive Clusters, in: *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publ, 2009, pp. 24-29.
- [4] N. Hu, L. Zhang, Grindability of unidirectional carbon fibre reinforced plastics, in: *Proceedings of the 13th International Conference on Composite Materials*, Beijing, 2001.
- [5] H. Hocheng, *Machining technology for composite materials: principles and practice*, Elsevier, 2011.
- [6] H. Sasahara, T. Kikuma, R. Koyasu, Y. Yao, Surface grinding of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) with an internal coolant supplied through grinding wheel, *Precision Engineering*, 38(4) (2014) 775-782.
- [7] H. Gao, H. Ma, Y.J. Bao, H. Yuan, R.K. Kang, Theoretical analysis of grinding temperature field for carbon fiber reinforced plastics, in: *Advanced materials research*, Trans Tech Publ, 2010, pp. 52-57.
- [8] T. Gao, C. Li, D. Jia, Y. Zhang, M. Yang, X. Wang, H. Cao, R. Li, H.M. Ali, X. Xu, Surface morphology assessment of CFRP transverse grinding using CNT nanofluid minimum quantity lubrication, *Journal of Cleaner Production*, 277 (2020) 123328.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. M. Mousavi, A. Sazgar, V. Fallahpour, *Optimization of Carbon Fiber Reinforced Composite Grinding Process by Response Surface Method*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(2) (2022) 481-490.

DOI: [10.22060/mej.2021.20145.7186](https://doi.org/10.22060/mej.2021.20145.7186)

