



Surface Quality, Efficiency and Process Optimization of Grinding Carbon Fiber-Reinforced Silicon Carbide Composite

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Esmaeili H.¹ MSc,

Adibi H.^{*1} PhD,

Rezaei S.M.¹ PhD

How to cite this article

Esmaeili H, Adibi H, Rezaei S.M. Surface Quality, Efficiency and Process Optimization of Grinding Carbon Fiber-Reinforced Silicon Carbide Composite. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(6):1409-1421.

ABSTRACT

Ceramic Matrix Composites (CMCs) are designed to overcome the main drawbacks of monolithic ceramics, especially their brittleness, in high-performance and safety-critical applications. Owing to the inherent properties of CMCs, especially heterogeneous structure, anisotropic thermal and mechanical behavior, and the hard nature of fibers or matrix, the machining process becomes extremely challenging as the generated surface suffers from undesirable quality. Taking the high hardness of ceramic matrix into account, grinding with diamond abrasives is the only efficient way for machining of CMC materials. The aim of this paper was to study the influence of grinding parameters (cutting speed, feed speed, and depth of cut) and different cooling-lubrication conditions (i.e. dry, fluid, and minimum quantity lubrication) on surface roughness, process efficiency, and tool wear. The results indicated that MQL leads to the best results in terms of surface quality and process performance. Furthermore, increasing of cutting speed and feed speed decreased and increased surface roughness, respectively, while depth of cut had an insignificant effect on the roughness value. Regarding the experimental results, four machining strategies considering quality, productivity, and efficiency criteria were developed. Eventually, the material removal mechanism was evaluated using SEM photos, indicating that brittle fracture is the dominant removal behavior of CMC materials.

Keywords Grinding, Surface Roughness, Ceramic Matrix Composite, Tool Wear

CITATION LINKS

[1] Carbon ... [2] Friction and surface fracture of a silicon carbide ceramic brake disc tested against a steel ... [3] The new challenges of machining Ceramic Matrix Composites (CMCs): Review of surface ... [4] Effect of graphite nanoparticles addition into cutting fluid on surface quality and tool wear of 16MnCr5 ... [5] A review on machining of carbon fiber reinforced ceramic ... [6] Performance improvement of eco-friendly MQL technique by using hybrid nanofluid ... [7] Study of the effect of lubricant type and tool (grinding wheel) material on the performance ... [8] Grinding characteristics and removal mechanisms of unidirectional carbon fibre reinforced ... [9] Some observations in grinding SiC and silicon carbide ceramic matrix composite ... [10] New observations of the fiber orientations effect on machinability in grinding of C/SiC ceramic ... [11] Surface topography and roughness of silicon carbide ceramic matrix ... [12] Materials removal mechanism in high-speed grinding of particulate reinforced titanium ... [13] Analytical modeling of surface roughness in precision grinding of particle reinforced metal ... [14] Minimum quantity lubrication (MQL) in machining: Benefits and ... [15] End milling of AISI 304 steel using Minimum Quantity ... [16] Study on minimum quantity lubrication (MQL) in grinding of carbon fiber-reinforced SiC ... [17] Experimental study on grinding forces and specific energy in three different environments of grinding carbon fiber reinforced silicon ... [18] Investigation of the effect of minimum quantity lubrication technique on performance of the grinding ... [19] Handbook of ceramic ... [20] Grinding temperature and energy ratio coefficient in MQL grinding of high-temperature ... [21] Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication-MQL grinding ... [22] Grinding technology: Theory and application of machining with ... [23] Surface and Subsurface Damage Measurements in Zerodur Glass-Ceramic Grinding ... [24] Handbook of machining with grinding ... [25] An Analysis of Electroplated cBN Grinding Wheel Wear and Conditioning during Creep Feed Grinding of ... [26] Experimental design and multiple response ... [27] Simultaneous Optimization of Several Response ... [28] Chapter 3 - Simple orthogonal cutting of floppy, brittle and ductile ... [29] Towards understanding the cutting and fracture mechanism in Ceramic Matrix ...

¹Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, NO. 350, Hafez Street, Valiasr Square, Tehran, Iran. Postal Code: 1591634311
Phone: +98 (21) 64543404
Fax: +98 (21) 64543404
hadibi@aut.ac.ir

Article History

Received: July 13, 2019

Accepted: December 30, 2019

ePublished: June 20, 2020

بررسی کیفیت سطح، کارایی و بهینه‌سازی فرآیند سنگ‌زنی به‌وسیله کامپوزیت سیلیکون کارباید تقویت‌شده با فیبر کربن

حامد اسماعیلی MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

حامد ادیبی* PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

سیدمهدی رضاعی PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

کامپوزیت‌های پایه سرامیکی برای غلبه بر مشکلات اصلی سرامیک‌های معمولی به‌خصوص شکنندگی آنها برای کاربردهای با حساسیت بالا در عملکرد و امنیت طراحی شده‌اند. به‌دلیل ویژگی‌های ذاتی این مواد شامل ساختار غیریکنواخت، خصوصیات مکانیکی و حرارتی ناهمگون و سختی بالای الیاف یا ماتریس، ماشین‌کاری این کامپوزیت‌ها با چالش‌های فراوانی همراه است که باعث می‌شوند سطوح ماشین‌کاری‌شده از کیفیت لازم برخوردار نباشند. با توجه به سختی بالای ماتریس سرامیکی، سنگ‌زنی با چرخ‌سنگ الماس تنها روش موفق برای ماشین‌کاری این مواد است. هدف این پژوهش، بررسی تأثیر پارامترهای سنگ‌زنی (سرعت برش، سرعت پیشروی و عمق برش) و شرایط خنک‌کاری و روانکاری (سنگ‌زنی خشک، نیمه‌خشک و تر) بر کیفیت سطح، کارایی فرآیند و سایش ابزار بود. براساس نتایج آزمایشات، سنگ‌زنی نیمه‌خشک بهترین کیفیت سطح و کارایی فرآیند را داشت. همچنین با افزایش سرعت برش و پیشروی، زبری سطح به‌ترتیب کاهش و افزایش یافت و عمق برش تأثیر چندانی بر زبری سطح نداشت. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده چهار استراتژی ماشین‌کاری با در نظر گرفتن کیفیت، کارایی و بهره‌وری طراحی شدند. با بررسی مکانیزم برداشت ماده و شکست کامپوزیت‌ها با توجه به عکس‌های میکروسکوپ الکترونی از سطح قطعه، شکست ترد، غالب‌ترین فرآیند شکست در این کامپوزیت‌هاست.

کلیدواژه: سنگ‌زنی، زبری سطح، کامپوزیت پایه سرامیکی، سایش ابزار

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۴/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۹

*نویسنده مسئول: hadibi@aut.ac.ir

مقدمه

کامپوزیت‌های پایه سرامیکی دسته جدیدی از مواد هستند که می‌توانند در شرایط سخت و دماهای عملکرد بالا کارکرد نویدبخشی داشته باشند. این مواد به‌دلیل خصوصیات برجسته شامل استحکام زیاد در دماهای بالا، مقاومت به خوردگی زیاد، مقاومت به سایش زیاد، چگالی پایین، چقرمگی شکست بالا و رسانایی حرارتی پایین پتانسیل زیادی برای کاربرد در صنایع مختلف، مخصوصاً صنایع اتومبیل‌سازی به‌دلیل وزن کم و رفتار اصطکاکی عالی در شرایط مختلف آب و هوایی دارند[1]. برای نمونه، دیسک‌های ترمز ساخته شده از این کامپوزیت‌ها عملکرد فوق‌العاده‌ای دارند و کاهش وزن

قابل ملاحظه ۵۰٪ (حدود ۲۰ کیلوگرم) همراه با کارکرد طولانی‌مدت‌تر، ایمن‌تر و آسوده‌تر را در مقایسه با دیسک‌های ترمز معمول ساخته شده از جنس چدن خاکستری دارند و خیلی سریع در حال جایگزین‌شدن هستند. به‌طوری که از زمان اولین کاربردشان در اتومبیل پورشه در سال ۲۰۰۱، اکنون سایر برندهای معروف مانند آئودی، بوگاتی، لامبورگینی و غیره از دیسک‌های ترمز ساخته شده از این کامپوزیت‌ها استفاده می‌کنند[2].

تکنولوژی ساخت این کامپوزیت‌ها به روش تفجوشی (Sintering) است. با توجه به اینکه فرآیند تفجوشی همراه با تغییر ابعاد و اعوجاج است و کاربرد این قطعات در رواداری‌های (Tolerance) بسته و مونتاژ دقیق با سایر قطعات است، فرآیندهای ماشین‌کاری و پرداخت نهایی بعدی اجتناب‌ناپذیر است[3]. همچنین، کیفیت سطح از جمله پارامترهای تأثیرگذار بر عمر و خواص مکانیکی نهایی یک قطعه مهندسی است که متأثر از پارامترهای گوناگون از جمله نیروی براده‌برداری، حرارت و اصطکاک بین قطعه‌کار و ابزار، عمق براده‌برداری، سرعت پیشروی و غیره در حین فرآیند ماشین‌کاری آن است[4]. اهمیت این پارامتر نه‌تنها در مورد قطعات مهندسی از جنس آلیاژهای ساده و متداول پایه آهن، بلکه در مورد سرامیک‌ها و کامپوزیت‌های سرامیکی نیز کاربرد دارد. به‌دلیل سختی خیلی بالای این مواد، فرآیندهای ماشین‌کاری چالش‌برانگیز و هزینه‌بر بوده، به‌طوری که سنگ‌زنی با چرخ‌سنگ الماس تنها روش ممکن برای ماشین‌کاری این مواد است[5].

سیال‌های برشی نقش مهمی در خنک‌کاری، روانکاری و دورکردن براده از منطقه ماشین‌کاری ایفا می‌کنند که منجر به بهبود کیفیت سطح و جلوگیری از سوختگی قطعه‌کار می‌شود. با این حال، استفاده از این سیال‌ها با مشکلات زیست‌محیطی و سلامتی اپراتور همراه است. از سوی دیگر هزینه سیال برشی سهم زیادی در هزینه تولید قطعات داشته است، به‌طوری که در صنایع خودروسازی به‌طور متوسط نزدیک ۳۰ تا ۱۵٪ هزینه‌های تولید صرف تهیه سیال برشی گزارش شده است[6]. برای غلبه بر این مشکلات تحقیقات گسترده‌ای در دهه‌های اخیر انجام گرفته است. در روش‌های سنگ‌زنی خشک، به‌دلیل عدم استفاده از سیال برشی، حرارت بالایی در منطقه تماس چرخ‌سنگ با قطعه‌کار تولید شده که منجر به سایش شدید، کاهش کیفیت سطح و افزایش سوختگی قطعه‌کار می‌شود. یکی از جایگزین‌های مناسب برای سیال‌های برشی، استفاده از روش روانکاری کمینه (سنگ‌زنی نیمه‌خشک) است که در آن از هوای فشرده به‌منظور اتمیزه‌کردن سیال برشی و دستیابی به قطرات بسیار ریز و نیز انتقال آن به منطقه سنگ‌زنی بهره می‌برد. تکنیک روانکاری کمینه سازگار با محیط زیست بوده و مصرف سیال برشی آن به ۰/۰۰۱٪ روش‌های متداول کاهش پیدا کرده است[7].

کیو و همکاران[8]، تأثیر جهت‌گیری الیاف و عمق برش را بر سلامت سطح، نیروهای سنگ‌زنی و مکانیزم برش کامپوزیت سیلیکون کارباید تقویت‌شده با فیبر کربن را بررسی کردند. آنها نشان دادند که

می‌شود. لازم به ذکر است که نتایج به‌دست‌آمده از آزمایشات، به روش آنالیز واریانس تحلیل شده و مدل‌های پیش‌بینی مناسب و بهینه‌سازی نتایج انجام خواهند شد.

مکانیزم خنک‌کاری و روانکاری در سنگ‌زنی خشک، نیمه‌خشک و تر

سیال‌های خنک‌کار- روانکار با وجود مزایای فراوان، مسایل زیست‌محیطی و اقتصادی متعددی را ایجاد می‌کنند. سرعت محیطی بالای چرخ‌سنگ و فشار بالای سیال برشی منجر به تولید مه و ذرات معلق در هوا می‌شود که استنشاق و یا تماس آنها با پوست، بسیار خطرناک بوده و مشکلات متعددی را برای اپراتور ایجاد می‌کند، چون بیشتر سیال‌های برشی از مشتقات نفت هستند. از این رو گزارش شده است که ۸۰٪ بیماری‌های کارگاهی، ناشی از تماس مستقیم اپراتور ماشین‌های ابزار و شکل‌دهی با سیال برشی است. این عوامل زیست‌محیطی در کنار مصرف بالای سیال برشی (سالانه ۳۲۰۰۰۰ تن در اروپا) چالشی جدی در استفاده از سیال‌های برشی ایجاد کرده است [14].

راه‌حل ارایه شده در این پژوهش برای کاهش مصرف سیال برشی و نیز کاهش مشکلات مربوط به ماشین‌کاری خشک، روش روانکاری کمینه یا ماشین‌کاری نیمه‌خشک است. در این روش مقدار بسیار ناچیزی از روانکار به‌طرز دقیقی به منطقه تماس بین چرخ‌سنگ و قطعه‌کار هدایت می‌شود و عملکرد فرآیند برشی را بهبود می‌بخشد. میزان روانکار مصرفی در این روش ۵۰-۵۰۰ میلی‌لیتر بر ساعت، حدوداً ۱۰۰۰ مرتبه کمتر از میزان روانکار مصرفی در حالت سیال برشی با پاشش پیوسته است [15].

در این روش، نازل دارای دو ورودی مجزای روغن و هوا است. هوای فشرده در خروجی نازل دارای سرعت زیادی بوده و باعث اسپری کردن روغن می‌شود. بنابراین قطرات کوچک روغن توسط هوای فشرده به‌صورت مستقیم و با سرعت بالا وارد منطقه تماسی می‌شوند. ذرات اسپری شده از طریق منابع روغن‌کاری از قبیل تخلخل چرخ‌سنگ و شیرهای مربوط به دانه‌های شکسته شده چرخ‌سنگ به منطقه سنگ‌زنی نفوذ می‌کنند و منجر به ایجاد لایه روانکاری مرزی پایدار در این منطقه می‌شوند. از سوی دیگر تخلخل چرخ‌سنگ با به دام‌انداختن ذرات اسپری و پمپ‌کردن آنها به منطقه تماس منجر به خنک‌کاری این منطقه می‌شود. سرعت بالای هوای فشرده علاوه بر انتقال روغن به منطقه تماس بین چرخ‌سنگ و قطعه‌کار، منجر به اتمیزه‌شدن ذرات روغن می‌شود [16]. شکل ۱ نفوذ خنک‌کار و روانکار به منطقه سنگ‌زنی را در سه روش سنگ‌زنی خشک، نیمه‌خشک و تر با هم مقایسه کرده است. ذرات بسیار ریز روغن، سرعت بالای هوای فشرده و وجود مخزن روغن‌کاری در چرخ‌سنگ، نفوذ موثر روانکار به منطقه برش در سنگ‌زنی نیمه‌خشک را فراهم می‌کند.

تحقیقات بسیار اندکی در زمینه تاثیر روش روانکاری کمینه بر سنگ‌زنی کامپوزیت‌های پایه سرامیکی انجام شده است. در این زمینه، اسماعیلی و همکاران [17]، تاثیر استفاده از تکنیک روانکاری

انتخاب مناسب عمق برش و جهت سنگ‌زنی تاثیر به‌سزایی در کیفیت سطح پرداخت‌کاری شده دارد، به‌طوری که با افزایش عمق برش، کیفیت سطح کاهش و نیروهای سنگ‌زنی افزایش پیدا می‌کنند. همچنین بهترین کیفیت سطح در حالت سنگ‌زنی عمود بر جهت الیاف به‌دست می‌آید. گونگ و همکاران [9]، تاثیر پارامترهای سنگ‌زنی شامل سرعت برش، سرعت پیشروی و عمق برش را بر کیفیت سطح و نیروهای سنگ‌زنی کامپوزیت سیلیکون کارباید تقویت‌شده با فیبر کربن بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت پیشروی و عمق برش، زبری سطح افزایش پیدا می‌کند و این در حالی است که افزایش سرعت برش باعث کاهش مقدار زبری سطح می‌شود. دیو و همکاران [10]، سنگ‌زنی کامپوزیت سیلیکون کارباید تقویت‌شده با فیبر کربن را با استفاده از چرخ‌سنگ الماس الکتروپلیت‌شده بررسی کردند و مشاهده نمودند که تاثیر جهت‌گیری الیاف بر روی کیفیت سطح از مقدار پیش‌بینی‌شده توسط مدل تئوری ضخامت براده تغییر شکل نیافته بیشتر است. بنابراین این تئوری قابلیت پیش‌بینی تاثیر راستای سنگ‌زنی بر کیفیت سطح سنگ‌زنی شده را ندارد. کیو و همکاران [11]، تاثیر پارامترهای سنگ‌زنی کامپوزیت سیلیکون کارباید تقویت‌شده با فیبر کربن را بر کیفیت سطح تولید شده و مکانیزم برشی بررسی کردند. نتایج نشان داد که ترک‌های به‌وجودآمده در ماتریس، شکست فیبرها، و جدایش ماتریس- فیبر متداول‌ترین نوع برداشت ماده در حین سنگ‌زنی هستند. همچنین پارامترهای سنگ‌زنی تاثیر به‌سزایی بر کیفیت سطح تولید شده به‌دلیل تغییر ضخامت براده تغییر شکل نیافته و طول قوس تماس سنگ‌زنی دارند. لیو و همکاران [12]، شبیه‌سازی المان محدود سنگ‌زنی با سرعت بالای کامپوزیت پایه تیتانیوم تقویت‌شده با ذره را انجام دادند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با حذف ذرات تقویت‌کننده مشخصه نیروهای سنگ‌زنی تغییر می‌کند و در حضور ذرات تقویت‌کننده نیروی سنگ‌زنی به‌صورت متناوب درحین سنگ‌زنی در حال تغییر است. همچنین، ضخامت براده تغییر شکل نیافته تاثیر به‌سزایی در به‌وجودآمدن عیوب سطح ماشین‌کاری شده دارد. ژانگ و همکاران [13]، مدلی تئوری برای پیش‌بینی زبری سطح کامپوزیت پایه فلزی تقویت‌شده با ذرات براساس مدل ضخامت براده تغییر شکل نیافته و مکانیزم برش متفاوت ماتریس فلزی و ذرات در حین سنگ‌زنی توسعه دادند. مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل تئوری همخوانی قابل قبولی با نتایج آزمایشات تجربی داشتند.

در این پژوهش به‌دلیل نقش تعیین‌کننده خنک‌کار و روانکار، فرآیند سنگ‌زنی در سه شرایط مختلف شامل سنگ‌زنی خشک، سنگ‌زنی با سیال برشی و روش روانکاری کمینه انجام می‌گیرد. برای شناخت و تحلیل بیشتر، تاثیر پارامترهای ماشین‌کاری شامل سرعت برش، سرعت پیشروی و عمق برش بر کیفیت سطح تولید شده و سایش ابزار مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین ریزساختار سطح قطعه بعد از فرآیند سنگ‌زنی بررسی شده و مکانیزم برداشت ماده تحلیل

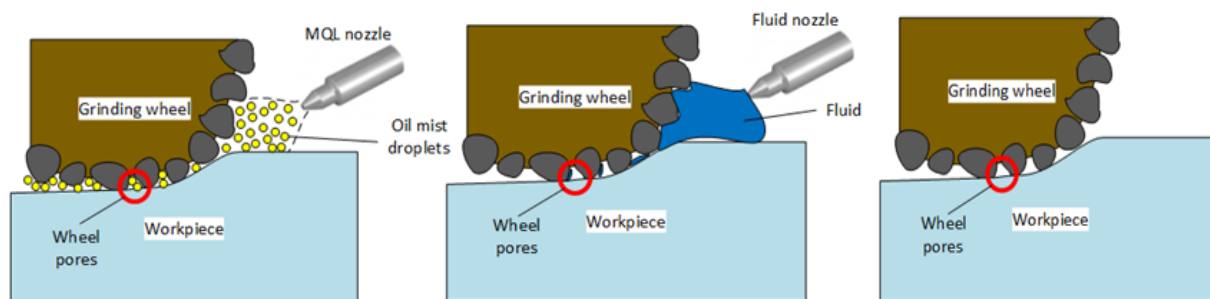
می‌دهد. با توجه به استفاده از چرخ‌سنگ الماس با باند فلزی که تخلخل پایین‌تری داشته و روغن کمتری را در خود جای می‌دهد، اندازه نرخ جریان روانکار برابر ۱۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه مناسب است. در این پژوهش، با توجه به سطوح پارامترهای برش مخصوصاً سرعت دورانی چرخ‌سنگ، فشار هوا برابر ۴ بار انتخاب شده است. لازم به ذکر است که افزایش بیش از حد فشار هوا باعث کاهش اندازه موثر ذرات روغن، پراکندگی بیشتر آنها و هزینه‌های عملکردی بالا خواهد بود. با توجه به تشکیل لایه مرزی هیدرودینامیک روانکار در اطراف چرخ‌سنگ در حال دوران با سرعت بالا، قرارگیری نازل در امتداد مورب نسبت به چرخ‌سنگ و با زاویه بهینه ۲۰-۱۰ درجه نسبت به سطح قطعه‌کار باعث نفوذ موثر ذرات روانکار به داخل منطقه برش می‌شود. همچنین، با توجه به اینکه کاهش فشار هوا و فاصله نازل تا محل تماس باعث افزایش زبری سطح و نیروهای فرآیند شده و افزایش بیش از حد فاصله نازل تا منطقه تماس باعث نفوذ ناکافی ذرات روانکار به منطقه برش خواهد شد، شرایط بهینه برای فشار هوای ۴ بار در محدوده فاصله ۸۰ میلی‌متر که در این پژوهش نیز رعایت شده است مورد استفاده قرار می‌گیرد [21]. برای اندازه‌گیری زبری سطح از زبری‌سنج ماهر پرتومتر ام ۳ (Mahr-Perthometer M3) با دقت اندازه‌گیری ۰/۰۱ میکرون استفاده شده است. سایش شعاعی چرخ‌سنگ توسط ساعت اندازه‌گیری دیجیتالی با دقت میکرومتر اندازه‌گیری شد.

به دلیل تعداد بالای آزمایشات در حالت فول فاکتوریل (۱۹۲ = ۳*۳*۴)، از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش استفاده شد. با توجه به تعداد فاکتورها و سطوح آنها، نتیجه طراحی آزمایش به صورت ماتریس متناظر با آرایه اورتوگونال $L_{16} = 4^3$ به صورت جدول ۴ به دست آمده است. با علم به اینکه آزمایشات در سه محیط مختلف سنگ‌زنی خشک، سنگ‌زنی با پاشش پیوسته سیال برشی و روانکاری کمینه انجام گرفته است، طراحی آزمایش مشابه برای هر یک از این حالت‌ها خواهیم داشت که در نتیجه آن تعداد کل آزمایشات ۴۸ = ۱۶*۳ است. برای اطمینان از نتایج حاصل، هر کدام از آزمایشات سه مرتبه تکرار شده و مقدار میانگین لحاظ شده است.

کمینه و پارامترهای سنگ‌زنی را در کاهش نیروهای سنگ‌زنی و انرژی مخصوص بر روی سیلیکون کارباید تقویت‌شده با فیبر کربن بررسی کردند. آنها نشان دادند که استفاده از روش روانکاری کمینه منجر به کاهش مقادیر نیروهای سنگ‌زنی مماسی به میزان ۳۸/۸۸٪ و نیروهای عمودی به میزان ۳۱/۱۶٪ نسبت به سنگ‌زنی خشک می‌شود. ربیعی و همکاران [18]، تاثیر استفاده از روانکاری کمینه را بر روی فولادهای سخت و نرم مورد بررسی قرار دادند. آنها گزارش دادند که در مورد فولادهای سخت، تکنیک روانکاری کمینه منجر به بهبود کیفیت سطح و کاهش نیروهای سنگ‌زنی می‌شود. /امامی و صادقی [7]، تاثیر استفاده از تکنیک روانکاری کمینه بر قابلیت سنگ‌زنی سرامیک زیرکونیا را بررسی کردند. نتایج تحقیق نشان داد که در شرایط روانکاری کمینه، انتخاب مناسب نوع روانکار و جنس ابزار می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای بر قابلیت سنگ‌زنی سرامیک زیرکونیا تاثیرگذار باشد.

تجهیزات و طراحی آزمایش

شکل ۲ چیدمان آزمایش و شماتیک تجهیز سیستم روانکاری کمینه (شرکت رویال؛ ایران) را نشان می‌دهد. از چرخ‌سنگ الماس با باند فلزی برای سنگ‌زنی قطعه‌کار استفاده شد. شرایط سنگ‌زنی به طور جامع در جدول ۱ آورده شده است. قطعه‌کار مورد استفاده در آزمایشات، کامپوزیت سیلیکون کارباید تقویت‌شده با فیبر کربن است که خصوصیات مکانیکی آن در جدول ۲ آورده شده است [19]. نوع روغن به کار رفته در روش روانکاری کمینه، روغن ذرت با ویسکوزیته سینماتیکی ۰/۰۴۷ پاسکال ثانیه است که جزو روغن‌های گیاهی محسوب می‌شود [20]. در فرآیند روانکاری کمینه، ذرات فراوان روغن که به صورت اتمیزه شده در هوا پخش می‌شوند، سلامت انسان را در معرض تهدید جدی قرار می‌دهند. با در نظر گرفتن اینکه یکی از اهداف برجسته پیدایش روش روانکاری کمینه، سبزدن آن است، استفاده از روغن‌های گیاهی مانند روغن به کار رفته در این پژوهش می‌تواند این هدف را تحقق بخشد. جدول ۳ محتویات انواع اسیدهای موجود در روغن ذرت و درصد وزنی هر یک از آنها را نشان

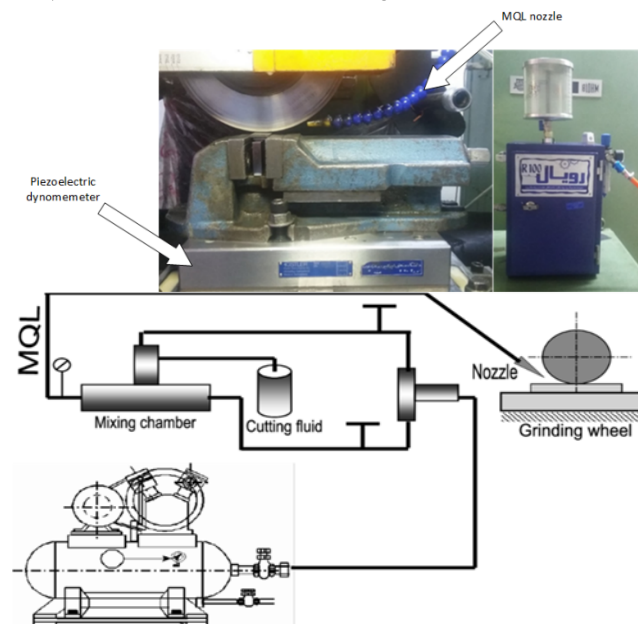


الف) روانکاری کمینه

ب) سنگ زنی با سیال برشی

ج) سنگ زنی خشک

شکل ۱) مکانیزم خنک‌کاری و روانکاری



شکل ۲) چیدمان آزمایش و سیستم روانکاری کمینه (تصویر بالا)، شماتیک مدار تجهیز روانکاری کمینه مورد استفاده در آزمایش (تصویر پایین)

جدول ۱) خلاصه‌ای از شرایط آزمایش

مشخصه	توضیح
روش سنگ‌زنی	سنگ‌زنی سطح
چرخ‌سنگ	چرخ‌سنگ الماس با باند فلزی (D200, T10, MD25, C75)
ماشین سنگ‌زنی	ماشین سنگ‌زنی سطح Hauni-Blohm HFS 204
سرعت برشی (m/s)	۲۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵
سرعت پیشروی (mm/min)	۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰
عمق برش (mm)	۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴
محیط سنگ‌زنی	خشک، تر، روانکاری کمینه
مشخصات سنگ‌زنی با سیال برشی	امولسیون ۳٪، نرخ جریان: $Q=7/4$ l/min
مشخصات روانکاری کمینه	روغن ذرت، ویسکوزیته: $\nu = 0.047$ Pa.s
نرخ جریان در روانکاری کمینه	۱۰۰ ml/min
فشار هوا	۴ bar

جدول ۲) خصوصیات مکانیکی کامپوزیت سیلیکون کارباید تقویت شده با فیبر کربن^[19]

خصوصیات	مقدار
چگالی (g/cm^3)	۱/۷
استحکام فشاری (MPa)	۲۱۰
استحکام برشی بین لایه‌ای (MPa)	۱۷
ضریب انبساط حرارتی $10^{-6} / ^\circ C \times (RT-1300^\circ C)$	$1/3 - 10$
استحکام ضربه‌ای چارپی (KJ/m^2)	۲۰
سختی شور	۷۵
پازه دمایی ($^\circ C$)	۲۰۰۰

جدول ۳) محتویات اسیدهای موجود در روغن گیاهی ذرت^[20]

نوع اسید	درصد وزنی
اسید اولئیک (Oleic acid)	۳۲/۵۵
اسید لینولئیک (Linoleic acid)	۵۱/۴
اسید پالمیتیک (Palmitic acid)	۱/۹۴
اسید استیریک (Stearic acid)	۱۳/۲۷
بقیه اسیدها (others)	۰/۸۴
اسیدهای چرب اشباع‌شده (Saturated fatty acids)	۱۴
اسیدهای چرب اشباع‌نشده (Monounsaturated fatty acids)	۲۹
اسیدهای چرب اشباع نشده (Polyunsaturated fatty acids)	۵۷

ردیف	سرعت برش (m/s)	سرعت پیشروی (mm/min)	عمق بار (mm)
۱	۲۵	۵۰۰	۰/۱
۲	۲۵	۱۰۰۰	۰/۲
۳	۲۵	۲۰۰۰	۰/۳
۴	۲۵	۳۰۰۰	۰/۴
۵	۳۵	۵۰۰	۰/۲
۶	۳۵	۱۰۰۰	۰/۱
۷	۳۵	۲۰۰۰	۰/۴
۸	۳۵	۳۰۰۰	۰/۳
۹	۴۰	۵۰۰	۰/۳
۱۰	۴۰	۱۰۰۰	۰/۴
۱۱	۴۰	۲۰۰۰	۰/۱
۱۲	۴۰	۳۰۰۰	۰/۲
۱۳	۴۵	۵۰۰	۰/۴
۱۴	۴۵	۱۰۰۰	۰/۳
۱۵	۴۵	۲۰۰۰	۰/۲
۱۶	۴۵	۳۰۰۰	۰/۱

نتایج و بحث

زبری سطح

به خاطر قابلیت فرآیند سنگ‌زنی در ایجاد صافی سطح و رواداری مطلوب، از این فرآیند معمولاً به‌عنوان فرآیند پرداخت نهایی استفاده می‌شود. رواداری و صافی سطح به هم مرتبط هستند. برای رسیدن به رواداری مطلوب لازم است صافی سطح مناسب داشته باشیم. در اکثر طراحی‌ها این رواداری است که بر روی حداکثر زبری محدودیت اعمال می‌کند و این در حالی است که عملکرد مناسب قطعه نیازمند داشتن سطح پرداخت شده است. قابلیت اعتماد مکانیکی، به خصوص برای کاربردهایی که در آن قطعه‌کار باید دارای مقاومت مکانیکی بالایی باشد تا حد زیادی به کیفیت سطح ایجاد شده از فرآیند ماشین‌کاری بستگی دارد. زبری سطح تحت تاثیر پارامترهای زیادی از جمله توپوگرافی چرخ‌سنگ، سایش چرخ‌سنگ، شرایط برش، جنس قطعه‌کار، روانکار مورد استفاده و غیره قرار دارد [22].

در این بخش قصد داریم تاثیر پارامترهای سنگ‌زنی شامل سرعت برشی، سرعت پیشروی و عمق برش و همچنین تاثیر روش روانکاری را بر زبری سطح بررسی کنیم. برای این کار با توجه به طراحی آزمایش انجام گرفته در بخش قبلی، مقادیر زبری سطح را بعد از هر آزمایش اندازه‌گیری می‌کنیم سپس بر روی نتایج به‌دست‌آمده تحلیل واریانس انجام داده و مدل پیش‌بینی زبری را براساس پارامترهای سنگ‌زنی در سه حالت سنگ‌زنی با سیال برشی، سنگ‌زنی به روش روانکاری کمینه و سنگ‌زنی خشک به‌دست‌آورده و نمودارهای مربوطه را رسم می‌کنیم.

برای بررسی ارتباط بین پارامترهای سنگ‌زنی و زبری سطح و همچنین بررسی معنی‌دار بودن نتایج و نیز استخراج مدل بین پارامترها از روش تحلیل واریانس استفاده شد. نتایج تحلیل واریانس در جدول ۵ آمده است.

همان گونه که از جداول آنالیز واریانس ملاحظه می‌شود مقدار پی (p) در همه مدل‌ها کمتر از ۰/۵ بوده که نشان می‌دهد همه داده‌های ورودی قابل قبول بوده و بر روی مقادیر خروجی تاثیرگذار هستند. مقدار فاکتور فیش (F) برای مدل با توجه به مقدار درجه آزادی مدل و درجه آزادی خطا با مقدار استاندارد آن در جدول فیش توسط خود نرم‌افزار مقایسه شده و نتیجه این است که مدل‌های پیش‌بینی‌شده معنی‌دار هستند. همچنین، اختلاف بین ضریب تبیین پیش‌بینی (Pred-R²) و ضریب تبیین تنظیم‌کننده (Adj-R²) نباید بیشتر از ۰/۲ باشد که برای مدل‌های به‌دست‌آمده بسیار کمتر از این مقدار است و بنابراین مقادیر شاخص‌های ارزیابی ضریب تبیین پیش‌بینی و ضریب تبیین تنظیم‌کننده در محدوده قابل قبولی قرار دارند. پارامتر کفایت دقت (Adeq-Precision) که نشان‌دهنده قدرت تمایز و تفکیک مدل است و مقدار آن باید بزرگ‌تر از ۴ باشد در تمام مدل‌ها مقدار این کمیت قابل قبول است [23].

مدل پیش‌بینی زبری سطح (Ra) براساس پارامترهای سنگ‌زنی شامل سرعت برش، سرعت پیشروی و عمق برش در سه حالت سنگ‌زنی با سیال برشی، سنگ‌زنی خشک و سنگ‌زنی به روش روانکاری کمینه توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت (Design-Expert) با آنالیز واریانس تخمین زده شده است که روابط مربوطه بدین صورت است:

سنگ‌زنی خشک:

$$R_a = 2.554 - (0.052 * v_c) + (4.479E - 004 * v_f) - (2.101 * a_e) + (0.029 * v_c * a_e) + (4.090E - 004 * v_c^2) - (7.000E - 008 * v_f^2) + (1.319 * a_e^2) \quad (1)$$

سنگ‌زنی با سیال برشی:

$$R_a = 1.074 - (0.033 * v_c) + (7.427E - 005 * v_f) - (0.173 * a_e) + (7.979E - 005 * v_f * a_e) + (3.890E - 004 * v_c^2) - (1.0827E - 008 * v_f^2) \quad (2)$$

روانکاری کمینه:

$$R_a = 0.468 - (8.467E - 003 * v_c) + (1.189E - 004 * v_f) - (0.058 * a_e) + (1.715E - 005 * v_f * a_e) + (7.305E - 005 * v_c^2) - (2.215E - 008 * v_f^2) \quad (3)$$

در روابط فوق سرعت برشی با واحد متر بر ثانیه، سرعت پیشروی با واحد میلی‌متر بر دقیقه و عمق برش با واحد میلی‌متر است. برای بررسی بیشتر و درک دقیق‌تر تاثیر پارامترهای مهم فرآیند بر زبری سطح، هر کدام از پارامترها را در محدوده مورد نظر تغییر داده و دو پارامتر بعدی را ثابت نگه می‌داریم. در نمودار ۱ نمودارهای به‌دست‌آمده براساس روابط ۱ و ۳ را نشان می‌دهند.

همان طور که در نمودار ۱ مشاهده می‌شود با افزایش سرعت برش زبری سطح کاهش می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌شود که بیشترین زبری سطح مربوط به سنگ‌زنی خشک و کمترین مقدار مربوط به روش روانکاری کمینه به‌دلیل روانکاری موثرتر (که در بخش‌های

افزایش زبری سطح با افزایش سرعت پیشروی، افزایش ضخامت براده تغییر شکل نیافته و رابطه مستقیم زبری با ضخامت براده تغییر شکل نیافته است.

با افزایش عمق برش، زبری سطح با شیب خیلی آهسته کاهش پیدا می‌کند. همچنین روانکاری کمینه به‌دلیل روانکاری موثرتر کمترین زبری سطح و سنگ‌زنی خشک بیشترین زبری سطح را به خود اختصاص می‌دهد. با توجه به رابطه ۵ ملاحظه می‌شود که زبری سطح رابطه مستقیمی با عمق برش ندارد اما به‌دلیل تاثیر آن بر نیروها و سایش چرخ‌سنگ باعث کاهش زبری با شیب خیلی آهسته می‌شود.

قبلی به تفصیل بحث شد) است. دلیل کاهش زبری سطح با افزایش سرعت برش ناشی از کاهش ضخامت براده تغییر شکل نیافته در سرعت‌های بالای برش طبق رابطه ۴ و رابطه مستقیم زبری سطح با ضخامت براده تغییر شکل نیافته به‌صورت رابطه ۵ است [22, 24].

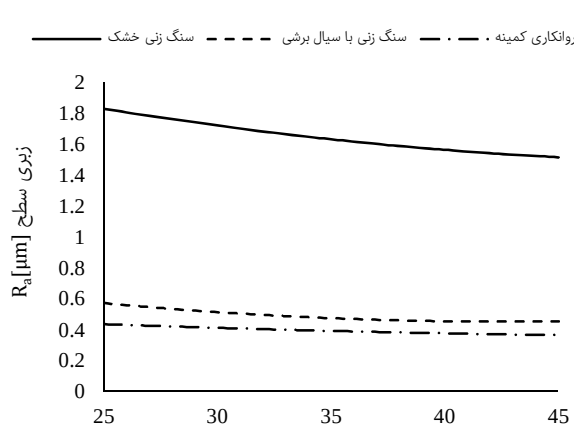
$$h_m = 2L \left(\frac{v_f}{v_c} \right) \left(\frac{a_e}{d_s} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (۴)$$

$$R_t \propto \frac{h_m^{\frac{4}{3}}}{a_e^{\frac{1}{3}}} \approx \left(\frac{v_f}{v_c} \times \frac{1}{c.r. \sqrt{d_s}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (۵)$$

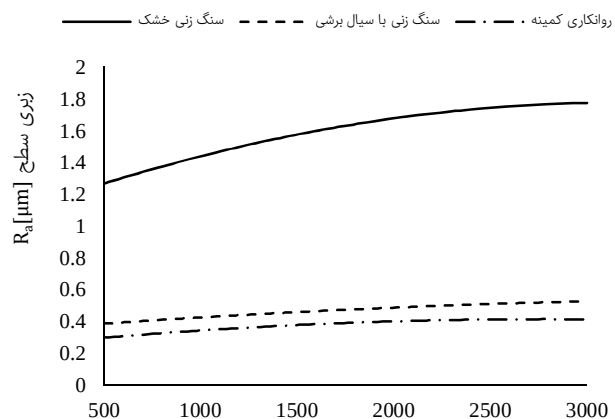
ملاحظه می‌شود که با افزایش سرعت پیشروی، زبری سطح افزایش پیدا می‌کند و همچنین بیشترین مقدار زبری مربوط به سنگ‌زنی خشک و کمترین مقدار مربوط به روانکاری کمینه است. دلیل

جدول ۵) نتایج تحلیل واریانس و شاخص‌های توصیفی

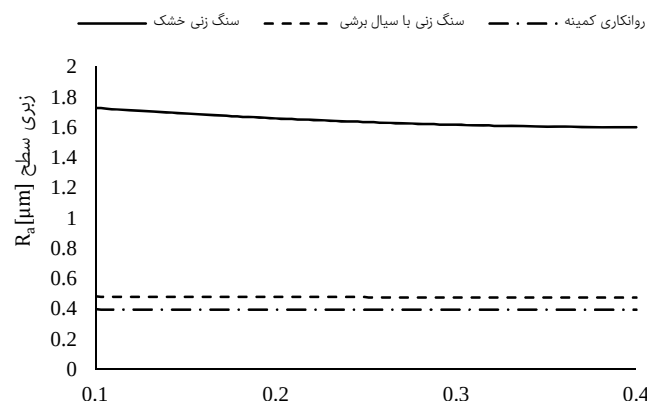
روش روانکاری	مقدار احتمال π	مقدار فاکتور فیشر	ضریب تبیین	ضریب تبیین تنظیم‌شده	ضریب تبیین پیش‌بینی	کفایت دقت
خشک	<۰/۰۰۱	۱۷۸/۱۴	۰/۹۹۲۱	۰/۹۸۵۲	۰/۹۶۶۰	۳۷/۱۳۰
تر	<۰/۰۰۱	۱۲۲/۶۵	۰/۹۹۱۶	۰/۹۸۶۱	۰/۹۷۴۵	۴۶/۱۱۷
نیمه‌خشک	<۰/۰۰۱	۷۹/۲۳	۰/۹۸۱۴	۰/۹۶۹۰	۰/۹۴۱۴	۲۹/۰۸۸



(الف)



(ب)



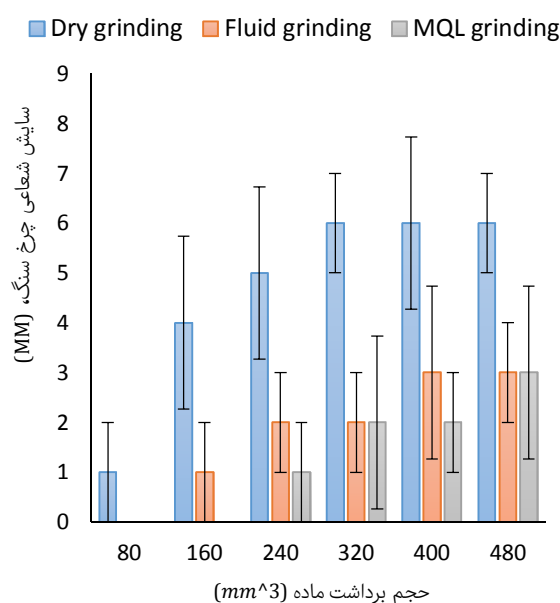
(ج)

نمودار ۱) تاثیر پارامترهای سنگ‌زنی: الف) سرعت سنگ‌زنی (متر بر ثانیه)، ب) سرعت پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)، ج) عمق برش بر زبری سطح (میلی‌متر)

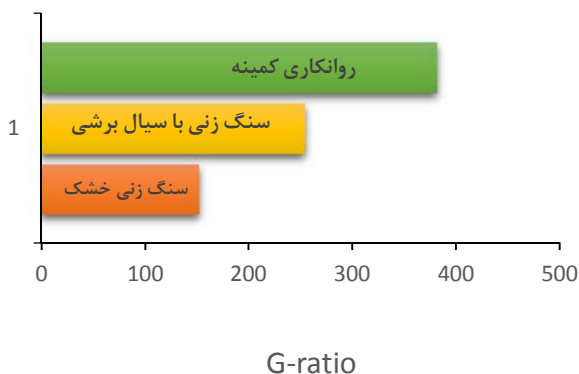
شده از قطعه‌کار به حجم خورده شده از چرخ سنگ تعریف می‌شود (رابطه ۶) [24].

$$G - ratio = \frac{V_w}{V_s} = \frac{a_e \cdot l \cdot b}{\pi \cdot d_s \cdot \Delta r_s} \quad (6)$$

نمودار ۳ مقادیر نسبت سنگ‌زنی را برای سه حالت سنگ‌زنی خشک، نیمه‌خشک و تر نشان می‌دهد. با توجه به وابستگی شدید سایش شعاعی چرخ‌سنگ به نرخ براده‌برداری، رفتار سایشی چرخ‌سنگ در نرخ براده‌برداری نسبتاً بالا بررسی شد. ملاحظه می‌شود که سنگ‌زنی خشک کمترین مقدار نسبت سنگ‌زنی را دارد. بنابراین کارایی این روش سنگ‌زنی پایین بوده و هزینه‌های ناشی از آن زیاد است. با مقایسه روش‌های بعدی شامل سنگ‌زنی با سیال برشی و روانکاری کمینه ملاحظه می‌شود که روش روانکاری کمینه نسبت سنگ‌زنی بالاتری داشته و در نتیجه بیشترین کارایی فرآیند را دارا است.



نمودار ۲) سایش شعاع چرخ‌سنگ در اثر افزایش حجم براده‌برداری؛ (شرایط برش شامل سرعت برشی ۳۵ متر بر ثانیه، سرعت پیشروی ۲۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و عمق برش ۰/۴ میلی‌متر)



نمودار ۳) نسبت سنگ‌زنی برای حالت‌های مختلف خنک‌کاری و روانکاری؛ (شرایط برش شامل سرعت برشی ۳۵ متر بر ثانیه، سرعت پیشروی ۲۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و عمق برش ۰/۴ میلی‌متر)

به دلیل اعمال نیرو به چرخ‌سنگ در حین فرآیند، چرخ‌سنگ دچار تغییراتی در اثر سایش آن می‌شود. سه نوع سایش در چرخ‌سنگ اتفاق می‌افتد که شامل انحراف پروفایل چرخ‌سنگ، انحراف گردی چرخ‌سنگ و تغییر تیزی چرخ‌سنگ است. هر کدام از این موارد باعث تغییر در شرایط فرآیند و همچنین تغییر کیفیت قطعه‌کار می‌شوند. مکانیزم سایش باعث تغییر در دانه‌های چرخ‌سنگ می‌شود. اساساً انواع مکانیزم سایش چرخ‌سنگ به سه گروه طبقه‌بندی می‌شوند: سایش دانه ساینده، شکست دانه ساینده و شکست باند. شدت هر کدام از مکانیزم‌های سایش به پارامترهای فرآیند و خصوصیات دانه ساینده و همچنین قطعه‌کار بستگی دارد. مشخصه فرآیند سایش تحت تاثیر اثرات مکانیکی و حرارتی ناشی از پارامترهای ماشین‌کاری، شرایط خنک‌کاری و روانکاری و سینماتیک فرآیند قرار دارد. خصوصیات چرخ‌سنگ توسط پایداری و نفوذ حرارتی باند چرخ‌سنگ تعیین می‌شود. همچنین، تداخل باند تاثیر مهمی بر جذب روانکار و شرایط دمایی منطقه برش دارد. دانه‌های ساینده در فاکتورهای سختی، استحکام کششی و چقرمگی با هم تفاوت دارند. بنابراین رفتار سایشی دانه‌ها، توسط سازندگان چرخ‌سنگ، باند چرخ‌سنگ، دانه‌های ساینده و فرآیند ماشین‌کاری تعیین می‌شود [22].

سایش دانه ساینده باعث افزایش نیروهای مماسی و عمودی در حین فرآیند می‌شوند تا اینکه باند نگهدارنده آن ضعیف شده و دانه ساینده از داخل باند بیرون آید. بنابراین دانه‌های جدید ساینده ظاهر شده و عملیات برش را ادامه می‌دهند. شکست دانه‌ها باعث به وجود آمدن لبه‌های برنده جدیدی شده که تیز بوده و به آسانی می‌توانند در داخل قطعه‌کار فرو رفته و عملیات برش را انجام دهند. بنابراین مقدار نیروها و انرژی سنگ‌زنی کاهش می‌یابند. مجموع دو نوع سایش از نوع شکست دانه و شکست باند چرخ‌سنگ مطلوب بوده و به آنها اثر خودتیزکنی چرخ‌سنگ گفته می‌شود [25]. سایش شعاعی چرخ‌سنگ شدیداً به نرخ براده‌برداری وابسته است. به همین دلیل، اندازه‌گیری سایش شعاعی در نرخ براده‌برداری نسبتاً بالا و در سه روش سنگ‌زنی با سیال برشی، روانکاری کمینه و سنگ‌زنی خشک انجام گرفت. مقدار این کمیت نسبت به حجم برداشت ماده اندازه‌گیری شد که نتایج آزمایش در نمودار ۲ نشان داده شده است. همان طور که در نمودار ۲ ملاحظه می‌شود، سایش شعاعی چرخ‌سنگ برای سنگ‌زنی خشک بیشترین مقدار است. دلیل بیشتر بودن مقدار سایش شعاعی در این حالت، مقدار زیاد نیروهای سنگ‌زنی در صورت عدم استفاده از سیال برشی است که ضرورت به کارگیری سیال برشی را در این فرآیند نشان می‌دهد. همچنین مقدار سایش شعاعی در روش پاشش پیوسته سیال نسبت به روانکاری کمینه بیشتر است که موثرتر بودن استفاده از روش روانکاری کمینه در کاهش هزینه‌های سنگ‌زنی را نشان می‌دهد. کارایی چرخ‌سنگ در فرآیند سنگ‌زنی توسط کمیتی به نام نسبت سنگ‌زنی سنجیده می‌شود. این کمیت به صورت حجم ماده برداشته

تغییر می‌کند. وقتی که D به مقداری غیر از صفر می‌رسد، تمامی پاسخ‌ها دارای مقدار مطلوبی هستند. از سوی دیگر، وقتی یکی از پاسخ‌ها کاملاً غیرمطلوب باشد مقدار D صفر خواهد بود. فرآیند بهینه‌سازی در این روش با هدف بیشینه‌کردن مقدار مطلوبیت کلی D انجام می‌گیرد.

در این پژوهش، چهار استراتژی با توجه به کیفیت، بهره‌وری و کارایی فرآیند تولید در نظر گرفته شده است. استراتژی کیفیت با هدف کمینه‌کردن مقدار زبری سطح، استراتژی بهره‌وری با هدف بیشینه‌کردن مقدار حجم برداشت ماده، استراتژی کارایی با هدف کمینه‌کردن مقدار نیرو و انرژی سنگ‌زنی (با استفاده از نتایج آزمایشات موجود در پژوهش^[17]) و استراتژی کلی با هدف بیشینه‌کردن بهره‌وری، کمینه‌کردن زبری سطح و افزایش کارایی فرآیند توسعه یافته‌اند. بازه متغیرها و درجه اهمیت آنها در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۷، ۱۰ راه‌حل برای استراتژی کلی نشان داده است که بیشترین مقدار مطلوبیت را دارند. هر کدام از این راه‌حل‌ها می‌توانند متناسب با نیازهای تولید استفاده شوند. جدول ۸ نتایج بهینه‌سازی را برای هر کدام از استراتژی‌ها نشان می‌دهد. مقادیر بهینه پارامترهای سنگ‌زنی در استراتژی کلی شامل سرعت برشی ۴۵ متر بر ثانیه، سرعت پیشروی ۹۶۴/۴۰۳ میلی‌متر بر دقیقه و عمق برش ۰/۴ میلی‌متر است.

ریزساختار و مکانیزم برداشت ماده

عکس میکروسکوپ الکترونی (SEM) از سطح قطعه سنگ‌زنی شده کامپوزیت C/C-SiC در شکل ۳، نحوه قرارگرفتن دسته‌های فیبر کربن در کنار ماتریس سیلیکون کارباید و شکست فیبرهای کربن را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳-ب، ۳-ج و ۳-د مشاهده می‌شود، مکانیزم شکست ترد، شامل پیدایش و رشد ترک، در داخل فیبرهای کربن و ماتریس سرامیکی مکانیزم غالب در فرآیند سنگ‌زنی این نوع کامپوزیت است.

مکانیزم برداشت ماده و عکس‌های میکروسکوپ الکترونی مرتبط با آن را از سطح قطعه سنگ‌زنی شده به روش روانکاری کمینه در سه راستای مختلف سنگ‌زنی در شکل ۴ نشان داده شده است. برخلاف سرامیک‌های معمولی که رفتار برشی یکسان از آنها در تمام راستاهای سنگ‌زنی انتظار می‌رود، کامپوزیت‌های پایه سرامیکی، مکانیزم‌های برش مختلفی را با تغییر راستای سنگ‌زنی از خود نشان می‌دهند. در مواردی که تنش‌های برشی از حد معینی کمتر باشند، هر دوی الیاف و ماتریس در مقابل بار وارده از خود مقاومت نشان می‌دهند. اما اگر تنش برشی از استحکام برشی ماتریس بیشتر باشد، ماتریس قابلیت تحمل بار را از دست داده و از الیاف جدا می‌شود، بنابراین فقط الیاف در برابر بار وارده مقاومت می‌کند. در حالتی که تنش برشی وارده از استحکام برشی کامپوزیت بیشتر باشد، در این صورت تمام کامپوزیت دچار برش می‌شود^[28]. براساس مطالب گفته شده، مکانیزم شکست کامپوزیت پایه سرامیکی توضیح داده می‌شود^[29].

همان‌طور که مشاهده شد، روش روانکاری کمینه بهترین کارایی را از لحاظ زبری سطح، طول عمر ابزار و نیروها و انرژی سنگ‌زنی در میان سه حالت سنگ‌زنی خشک، نیمه‌خشک و تر به خودش اختصاص داد. بنابراین بهینه‌سازی پارامترهای سنگ‌زنی در حالت روانکاری کمینه انجام می‌گیرد. در حالتی که بیش از یک پاسخ در بهینه‌سازی یک فرآیند درگیر باشد، بهینه‌سازی مجزای هر پاسخ غیرممکن بوده و به تعداد راه‌حل‌های برابر با تعداد پارامترهای مورد مطالعه خواهیم رسید. در این حالت، یک تابع کلی باید پیدا شود که بتواند معیارهای متناسب با هر متغیر پاسخ را در نظر بگیرد^[26]. روش تابع مطلوب که توسط درینگر و سویچ^[27] ابداع شده است برای بهینه‌سازی پارامترهای سنگ‌زنی برای دستیابی به ماکزیمم بهره‌وری و کارایی و کمترین میزان زبری سطح استفاده شد. در این روش، یک تابع مطلوب مجزا برای هر یک از پاسخ‌ها با انطباق مدل‌ها و معیارهای بهینه‌سازی به‌دست می‌آید. مقادیر مطلوبیت همواره بین صفر تا یک متغیر هستند به‌طوری که مقدار صفر، پاسخ غیرمطلوب و مقدار یک، پاسخ مطلوب است. مقادیر بین صفر و یک هم مطلوبیت نسبی را با توجه به معیارهای بهینه‌سازی نشان می‌دهد.

توابع مطلوبیت مختلفی را می‌توان مطابق با معیارهای بهینه‌سازی تعریف کرد. مقادیر قابل قبول پاسخ‌ها در بازه $(U_i - L_i)$ قرار می‌گیرد که U_i و L_i به‌ترتیب بیشترین و کمترین مقادیر پاسخ هستند. بنابراین برای دستیابی به بیشترین مقدار مطلوبیت $d_i(y_i)$ به‌صورت رابطه ۷ تعریف می‌شود^[26]:

$$d_i(\hat{y}_i(x)) = \begin{cases} 0 & \text{if } \hat{y}_i(x) < L_i \\ \left(\frac{\hat{y}_i(x) - L_i}{U_i - L_i} \right)^s & \text{if } L_i \leq \hat{y}_i(x) \leq U_i \\ 1 & \text{if } \hat{y}_i(x) > U_i \end{cases} \quad (7)$$

به‌طوری که s نشانگر اهمیت تقریب y_i به مقدار ماکزیمم است. وقتی که قرار است مقدار تابع مطلوبیت $d_i(y_i)$ به کمترین مقدار برسد معادله به‌صورت رابطه ۸ بازنویسی می‌شود^[26]:

$$d_i(\hat{y}_i(x)) = \begin{cases} 1 & \text{if } \hat{y}_i(x) < L_i \\ \left(\frac{U_i - \hat{y}_i(x)}{U_i - L_i} \right)^t & \text{if } L_i \leq \hat{y}_i(x) \leq U_i \\ 0 & \text{if } \hat{y}_i(x) > U_i \end{cases} \quad (8)$$

به‌طوری که t نشانگر اهمیت تقریب y_i به مقدار کمینه است. زمانی که فاکتورها و پاسخ‌ها توسط توابع مطلوبیت تبدیل شدند، این توابع توسط تابع مطلوبیت کل به‌صورت رابطه ۹ به هم ادغام می‌شوند تا بهترین ترکیب پارامترها به‌دست آید^[26]:

$$D = (d_1^{r_1} \times d_2^{r_2} \times \dots \times d_n^{r_n})^{\frac{1}{\sum r_i}} = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{r_i} \right)^{\frac{1}{\sum r_i}} \quad (9)$$

به‌طوری که r نشانگر اهمیت هر متغیر نسبت به دیگر متغیرها است که بین یک برای کم اهمیت‌ترین و پنج برای با اهمیت‌ترین

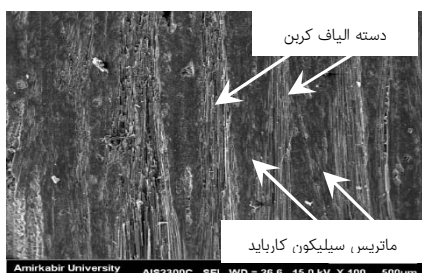
نام متغیر	نام متغیر به انگلیسی	هدف	حد پایین	حد بالا	کارایی	کیفیت	بهره‌وری	کلی	درجه اهمیت
سرعت برشی (m/s)	v_c	داخل محدوده	۲۵	۴۵	۳	۳	۳	۳	۳
سرعت پیشروی (mm/min)	v_f	داخل محدوده	۵۰۰	۳۰۰۰	۳	۳	۳	۳	۳
عمق برش (mm)	a_e	داخل محدوده	۰/۱	۰/۴	۳	۳	۳	۳	۳
نیروی برشی (N)	F_c	کمینه	۵/۸	۳۵/۹	۵	تعریف نشده	تعریف نشده	۱	۱
توان (W)	P_c	کمینه	۱۴۵	۱۱۰۹/۵	۵	تعریف نشده	تعریف نشده	۱	۱
زبری سطح R_a (μm)	R_a	کمینه	۰/۲۶۵	۰/۴۶	۵	تعریف نشده	تعریف نشده	۵	۵
نرخ براده برداری ویژه (mm ³ /mm.min)	Q'_w	بیشینه	۵۰	۱۲۰۰	۵	تعریف نشده	تعریف نشده	۵	۵

جدول ۷) ۱۰ راه‌حل با بیشترین مقدار مطلوبیت در استراتژی کلی

شماره	v_c	v_f	a_e	R_a	F_c	Q'_w	P_c	مطلوبیت	وضعیت
۱	۴۵/۰۰۰	۹۶۴/۴۰۳	۰/۴۰۰	۰/۳۱۳	۱۹/۷۲۲	۳۸۵/۷۶۱	۸۸۳/۴۱۹	۰/۴۴۸	انتخاب شده
۲	۴۵/۰۰۰	۹۵۶/۱۲۷	۰/۴۰۰	۰/۳۱۲	۱۹/۶۱۹	۳۸۲/۴۴۷	۸۷۸/۹۵۹	۰/۴۴۸	—
۳	۴۵/۰۰۰	۹۷۵/۶۷۴	۰/۴۰۰	۰/۳۱۴	۱۹/۸۶۱	۳۹۰/۲۶۶	۸۸۹/۴۵۹	۰/۴۴۸	—
۴	۴۵/۰۰۰	۹۴۶/۰۶۶	۰/۴۰۰	۰/۳۱۱	۱۹/۴۹۴	۳۷۸/۴۲۵	۸۷۳/۵۳۴	۰/۴۴۸	—
۵	۴۹/۹۹۹	۹۹۲/۱۷۴	۰/۴۰۰	۰/۳۱۵	۲۰/۰۶۵	۳۹۶/۸۶۶	۸۹۸/۲۷۶	۰/۴۴۸	—
۶	۴۴/۷۰۹	۹۶۲/۳۴۱	۰/۴۰۰	۰/۳۱۳	۱۹/۷۵۹	۳۸۴/۹۳۵	۸۷۹/۱۰۱	۰/۴۴۸	—
۷	۴۵/۰۰۰	۹۷۰/۷۷۲	۰/۳۹۷	۰/۳۱۳	۱۹/۶۴۹	۳۸۵/۳۵۰	۸۸۰/۱۰۲	۰/۴۴۸	—
۸	۴۴/۶۶۲	۹۷۸/۰۰۲	۰/۴۰۰	۰/۳۱۴	۱۹/۹۶۳	۳۹۱/۲۰۰	۸۸۶/۹۳۴	۰/۴۴۸	—
۹	۴۴/۵۳۲	۹۸۴/۹۲۷	۰/۴۰۰	۰/۳۱۵	۲۰/۰۷۶	۳۹۳/۹۷۰	۸۸۹/۱۴۰	۰/۴۴۸	—
۱۰	۴۵/۰۰۰	۹۵۸/۶۵۸	۰/۳۹۵	۰/۳۱۲	۱۹/۴۲۰	۳۷۹/۰۱۱	۸۷۰/۱۱۱	۰/۴۴۸	—

جدول ۸) نتایج بهینه‌سازی برای هر یک از استراتژی‌های ساخت

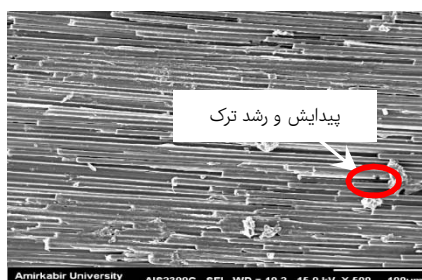
استراتژی	v_c (m/s)	v_f (mm/min)	a_e (mm)	R_a (μm)	F_c (N)	P_c (W)	Q'_w (mm ³ /mm.min)	مطلوبیت
کارایی	۴۴/۹۷۷	۵۵۹/۱۷۸	۰/۱۰۵	۰/۲۹۰	۲/۰۴۰	۵۸/۷۲۹	۱۰۵/۰۱۸	۱/۰۰۰
کیفیت	۴۵/۰۰۰	۵۰۰/۰۰۰	۰/۴۰۰	۰/۲۶۹	۱۳/۵۶۵	۶۱۷/۹۵۲	۲۰۰/۰۰۰	۰/۹۷۸
بهره‌وری	۲۵/۰۰۰	۳۰۰۰	۰/۴۰۰	۰/۴۵۷	۳۷/۳۱۰	۱۲۰۰/۰۰۰	۹۴۲/۵۰۳	۱/۰۰۰
کلی	۴۵/۰۰۰	۹۶۴/۴۰۳	۰/۴۰۰	۰/۳۱۳	۱۹/۷۲۲	۸۸۳/۴۱۹	۳۸۵/۷۶۱	۰/۴۴۸



(الف)



(ب)

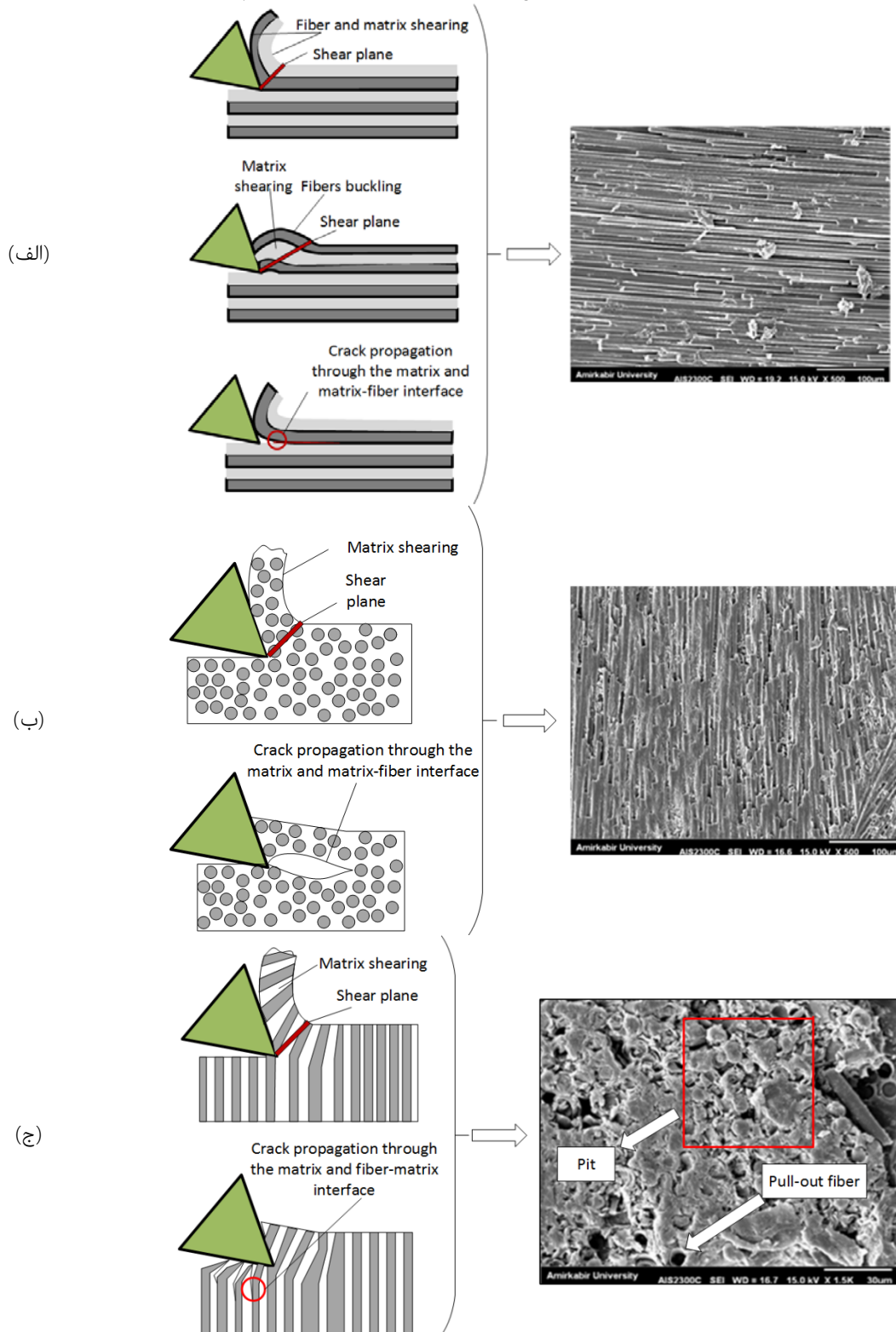


(ج)



(د)

شکل ۳) الف) نحوه قرارگیری الیاف کربن داخل ماتریس سیلیکون کارباید، ب و ج) پیدایش ترک و شکست ترد الیاف کربن، د) پیدایش ترک و شکست ترد ماتریس سرامیکی



شکل ۴) میکروسکوپ الکترونی از سطح قطعه سنگ‌زنی‌شده در راستاهای مختلف و شماتیک مکانیزم برش مرتبط با آن: (الف) در راستای موازی با جهت الیاف، (ب) راستای عمود بر جهت الیاف، (ج) راستای متناظر با جهت الیاف

ماتریس باشد. در این حالت، مکانیزم شکست، ترکیبی از واماندگی ماتریس و کمانش یا خمش الیاف به‌دلیل حرکت ابزار روی قطعه‌کار است، شکست ماتریس وقتی که تنش برشی وارد شده کمتر از استحکام برشی ماتریس باشد. در این حالت، ماده به‌دلیل پیدایش و رشد ترک در مرز ماتریس-الیاف شکسته می‌شود. قابل ذکر است

طبق شکل ۴- الف وقتی الیاف هم‌راستا با جهت سنگ‌زنی باشند، مکانیزم شکست به سه حالت مختلف طبقه‌بندی می‌شود: برش کامپوزیت وقتی که تنش برشی وارد شده از استحکام برشی کل کامپوزیت بیشتر باشد، برش ماتریس وقتی که تنش برشی وارده کمتر از استحکام برشی کامپوزیت و بیشتر از استحکام برشی

که ترک به دلیل خواص ناهمگون کامپوزیت نمی‌تواند به سطح قطعه برسد. مکانیزم برش در راستای سنگ‌زنی عمود بر الیاف به دو حالت غالب است که در شکل ۴- ب مشاهده می‌شود. برش ماتریس زمانی که تنش برشی وارد شده بیشتر از استحکام برشی ماتریس باشد. در این حالت که شبیه مکانیزم برش در سرامیک خالص سیلیکون کارباید است، برداشت ماده به دلیل واماندگی ماتریس اتفاق می‌افتد، شکست ماتریس وقتی که تنش برشی وارد شده نمی‌تواند از حد استحکام برشی ماتریس تجاوز کند. در این مکانیزم، ترک در ضعیف‌ترین قسمت ماده (مرز ماتریس- فیبر) رشد کرده و باعث شکست ورقه‌ای کامپوزیت می‌شود. مکانیزم برداشت ماده در حالتی که الیاف در راستای عمود متناظر با راستای سنگ‌زنی قرار گرفته باشند به دو حالت غالب است که در شکل ۴- ج مشاهده می‌شود. برش ماتریس زمانی که تنش برشی وارد شده بیشتر از استحکام برشی ماتریس باشد. همان طور که قبلاً توضیح داده شد در این حالت رفتار برشی ماده شبیه سرامیک سیلیکون کارباید همگن است. شکست ماتریس زمانی که تنش برشی وارد شده کمتر از استحکام برشی ماتریس باشد. در این حالت، ترک در امتداد عمودی مرز ماتریس- فیبر رشد کرده و باعث برداشت ماده به وسیله خمش یا کماتش ترد می‌شود. در زیر میکروسکوپ الکترونی، چنین حالت شکستی به صورت تشکیل گودال یا بیرون آمدن فیبرها از داخل ماتریس مشاهده می‌شود.

جمع‌بندی

در این پژوهش به بررسی تاثیر پارامترهای سنگ‌زنی و شرایط خنک‌کاری- روانکاری در سنگ‌زنی کامپوزیت سیلیکون کارباید تقویت‌شده با فیبر کربن پرداختیم. نتایج مهم به‌دست‌آمده به شرح زیر است:

۱- بعد از انجام آزمایشات زبری سطح براساس طراحی انجام شده، نتایج آنالیز واریانس نشان داد که مدل‌های به‌دست‌آمده معنی‌دار بوده و پارامترهای ورودی بر روی پاسخ‌ها تاثیرگذار هستند. همچنین معادلات پیش‌بینی زبری براساس پارامترهای ورودی شامل سرعت برش، سرعت پیشروی و عمق بار در شرایط مختلف خنک‌کاری و روانکاری به‌دست آمد.

۲- روش روانکاری کمینه موثرترین روش برای سنگ‌زنی کامپوزیت‌های پایه سرامیکی بوده به‌طوری که زبری سطح به مقدار ۷۵/۲۶٪ نسبت به سنگ‌زنی خشک و ۷۰/۱۵٪ نسبت به سنگ‌زنی با سیال برشی کاهش پیدا کرد.

۳- سایش چرخ‌سنگ و کارایی سنگ‌زنی در حالت سنگ‌زنی خشک بدترین بوده و روش روانکاری کمینه بهترین نتایج را برای سایش چرخ‌سنگ و کارایی فرآیند دارا است، به‌طوری که کارایی فرآیند سنگ‌زنی در حالت روانکاری کمینه به‌طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به سنگ‌زنی خشک افزایش پیدا کرده است.

۴- فرآیند بهینه‌سازی و توسعه استراتژی مناسب برای سنگ‌زنی

کامپوزیت سیلیکون کارباید تقویت‌شده با فیبر کربن با استفاده از روش تابع مطلوبیت پیاده‌سازی شد و چهار استراتژی با در نظر گرفتن کیفیت، کارایی و بهره‌وری استخراج شد.

۵- استراتژی کلی جامع‌ترین بوده و کارایی، کیفیت و بهره‌وری را باهم لحاظ می‌کند. در این حالت، بهترین چیدمان فرآیند شامل سنگ‌زنی با روش روانکاری کمینه و پارامترهای سرعت برشی ۴۵ متر بر ثانیه، سرعت پیشروی ۹۶۴/۴۰۳ میلی‌متر بر دقیقه و عمق برش ۰/۴ میلی‌متر است.

۶- عکس‌های میکروسکوپ الکترونی از سطح قطعه سنگ‌زنی شده و بررسی مکانیزم برداشت ماده نشان می‌دهد که شکست ترد غالب‌ترین مکانیزم برداشت ماده در فرآیند بوده و جهت‌گیری فیبرها تاثیر به‌سزایی در مکانیزم برداشت ماده دارند.

تشکر و قدردانی: از مسئول آزمایشگاه ماشین‌کاری دقیق دانشگاه صنعتی امیرکبیر به‌دلیل همکاری سازنده در انجام آزمایشات کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تاییدیه اخلاقی: مقاله حاضر با رعایت تمامی اصول اخلاقی ثبت گردیده است.

تعارض منافع: هیچ موردی از تعارض منافع در مقاله حاضر وجود ندارد.
سهم نویسندگان: حامد اسماعیلی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی ۵۰٪؛ حامد ادیبی (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی (۲۵٪)؛ سید مهدی رضایی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۲۵٪).

منابع مالی: مقاله حاضر با حمایت‌های مالی نویسندگان مقاله به ثبت رسیده است.

فهرست علائم و نشانه‌ها

a_e	عمق بار (mm)
b	پهنای چرخ‌سنگ (mm)
C	غلظت دانه ساینده
d_s	قطر چرخ‌سنگ (mm)
F_c	نیروی برشی سنگ‌زنی (N)
h_m	ضخامت براده تغییر شکل نیافته (μm)
L	فاصله مساوی دانه‌های ساینده از همدیگر روی سطح
	چرخ‌سنگ ایده‌آل (μm)
l	طول سنگ‌زنی (mm)
P_c	توان سنگ‌زنی (W)
Q_w	حجم برداشت ماده از قطعه‌کار (mm^3)
$\dot{Q}_w$	نرخ براده‌برداری ویژه ($mm^3/mm.min$)
r	ضریب شکل لبه برنده دانه ساینده
R_a	زبری سطح متوسط (μm)
R_t	زبری سطح کل (μm)
V_w	حجم ماده برداشته شده از قطعه‌کار (mm^3)
V_s	حجم ماده خورده شده از چرخ‌سنگ (mm^3)
v_c	سرعت برش (m/s)
v_f	سرعت پیشروی (mm/min)
Δr_s	سایش شعاعی چرخ‌سنگ (μm)

علائم یونانی

ν	ویسکوزیته سینماتیکی (Pa.s)
-------	----------------------------

Industrial and Intelligent Information. 2015;3(3):205-209.

15- Babu MN, Anandan V, Muthukrishnan N, Santhanakumar M. End milling of AISI 304 steel using Minimum Quantity Lubrication. Measurement. 2019;138:681-689.

16- Adibi H, Esmaeili H, Rezaei S. Study on minimum quantity lubrication (MQL) in grinding of carbon fiber-reinforced SiC matrix composites (CMCs). The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018;95(9-12):3753-3767.

17- Esmaeili H, Adibi H, Rezaei SM. Experimental study on grinding forces and specific energy in three different environments of grinding carbon fiber reinforced silicon carbide composite. Modares Mechanical Engineering. 2018;18(1):379-387. [Persian]

18- Rabiei F, Rahimi A, Hadad M, Ashrafijou M. Investigation of the effect of minimum quantity lubrication technique on performance of the grinding of HSS. Modares Mechanical Engineering. 2013;13(4):1-12. [Persian]

19- Bansal NP, editor. Handbook of ceramic composites. Berlin: Springer; 2005.

20- Li B, Li C, Zhang Y, Wang Y, Jia D, Yang M. Grinding temperature and energy ratio coefficient in MQL grinding of high-temperature nickel-base alloy by using different vegetable oils as base oil. Chinese Journal of Aeronautics. 2016;29(4):1084-1095.

21- Tawakoli T, Hadad M, Sadeghi M. Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication-MQL grinding process. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2010;50(6):521-531.

22- Malkin S, Guo C. Grinding technology: Theory and application of machining with abrasives. New York: Industrial Press Inc.; 2008.

23- Esmaeilzare A, Gholipour H, Adibi H, Rezaei SM. Surface and Subsurface Damage Measurements in Zerodur Glass-Ceramic Grinding Process and their Correlation with Surface Roughness. Modares Mechanical Engineering. 2015;15(13):339-344. [Persian]

24- Marinescu ID, Hitchiner MP, Uhlmann E, Rowe WB, Inasaki I. Handbook of machining with grinding wheels. 2nd edition. United States: CRC Press; 2019.

25- Vidal G, Ortega N, Bravo H, Dubar M, González H. An Analysis of Electroplated cBN Grinding Wheel Wear and Conditioning during Creep Feed Grinding of Aeronautical Alloys. Metals. 2018;8(5):350.

26- Candioti LV, De Zan MM, Camara MS, Goicoechea HC. Experimental design and multiple response optimization. Using the desirability function in analytical methods development. Talanta. 2014;124:123-138.

27- Derringer G, Suich R. Simultaneous Optimization of Several Response Variables. Journal of Quality Technology. 1980;12(4):214-219.

28- Atkins T. Chapter 3 - Simple orthogonal cutting of floppy, brittle and ductile materials. in: atkins t, editor. the science and engineering of cutting. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2009. pp. 35-74.

29- Gavalda Diaz O, Axinte DA. Towards understanding the cutting and fracture mechanism in Ceramic Matrix Composites. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2017;118-119:12-25.

1- Chung D. Carbon composites. 2nd edition. United States: Butterworth-Heinemann; 2016. pp. 467-531.

2- Bian G, Wu H. Friction and surface fracture of a silicon carbide ceramic brake disc tested against a steel pad. Journal of the European Ceramic Society. 2015;35(14):3797-3807.

3- Gavalda Diaz O, Garcia Luna G, Liao Z, Axinte D. The new challenges of machining Ceramic Matrix Composites (CMCs): Review of surface integrity. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2019;139:24-36.

4- Avishan B, Zamini RS. Effect of graphite nanoparticles addition into cutting fluid on surface quality and tool wear of 16MnCr5 machined steel. Modares Mechanical Engineering. 2018;18(3):56-64. [Persian]

5- Du J, Zhang H, Geng Y, Ming W, He W, Ma J, et al. A review on machining of carbon fiber reinforced ceramic matrix composites. Ceramics International. 2019;45(15):18155-18166.

6- Rabiei F, Rahimi A, Hadad M. Performance improvement of eco-friendly MQL technique by using hybrid nanofluid and ultrasonic-assisted grinding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017;93(1-4):1001-1015.

7- Emami M, Sadeghi MH. Study of the effect of lubricant type and tool (grinding wheel) material on the performance of minimum quantity lubrication in grinding of advanced ceramics. Modares Mechanical Engineering. 2018;18(2):281-292. [Persian]

8- Qu S, Gong Y, Yang Y, Wen X, Yin G. Grinding characteristics and removal mechanisms of unidirectional carbon fibre reinforced silicon carbide ceramic matrix composites. Ceramics International. 2019;45(3):3059-3071.

9- Gong Y, Qu S, Yang Y, Liang C, Li P, She Y. Some observations in grinding SiC and silicon carbide ceramic matrix composite material. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019;103:3175-3186.

10- Du J, Ming W, Ma J, He W, Cao Y, Li X, et al. New observations of the fiber orientations effect on machinability in grinding of C/SiC ceramic matrix composite. Ceramics International. 2018;44(12):13916-1328.

11- Qu S, Gong Y, Yang Y, Cai M, Sun Y. Surface topography and roughness of silicon carbide ceramic matrix composites. Ceramics International. 2018;44(12):14742-1453.

12- Liu C, Ding W, Yu T, Yang C. Materials removal mechanism in high-speed grinding of particulate reinforced titanium matrix composites. Precision Engineering. 2018;51:68-77.

13- Zhang Z, Yao P, Wang J, Huang C, Cai R, Zhu H. Analytical modeling of surface roughness in precision grinding of particle reinforced metal matrix composites considering nanomechanical response of material. International Journal of Mechanical Sciences. 2019;157-158:243-253.

14- Boubekri N, Shaikh V. Minimum quantity lubrication (MQL) in machining: Benefits and drawbacks. Journal of