مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1397، دوره 18، شماره 01، ص‌ص 379-387

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه تجربی نیروها و انرژی مخصوص در سنگ‌زنی کامپوزیت سیلیکون کارباید تقویت شده با فیبر کربن با روش‌های مختلف روان‌کاری

حامد اسماعیلی[1]، حامد ادیبی[2*]، سیدمهدی رضاعی[3]

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
* تهران، صندوق پستی 4413-15875، hadibi@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 12 آبان 1396
پذیرش: 09 دی 1396
ارائه در سایت: 29 دی 1396

کلید واژگان:
کامپوزیت پایه سرامیکی
نیروی سنگ‌زنی
روان‌کاری کمینه
سنگ‌زنی با سیال برش
سنگ‌زنی خشک

چکیده

کامپوزیت‌های پایه سرامیکی دسته جدیدی از مواد با تکنولوژی پیشرفته هستند که می‌توانند جایگزین مناسبی برای سوپر آلیاژهای فلزی باشند. این کامپوزیت‌ها به دلیل خصوصیات برجسته شامل وزن خیلی پایین، سختی و چقرمگی نسبتاً بالا و مقاومت به خوردگی و سایش زیاد، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مدرن پیدا کرده‌اند. به دلیل سختی بالا و ساختار ناهمگون، فرایند سنگ‌زنی این کامپوزیت‌ها ناپایدار و همراه با نیروها و دماهای بالا در حین فرایند ماشین‌کاری است. هدف این پژوهش غلبه بر مشکل سنگ‌زنی این کامپوزیت‌ها با تحلیل و شناخت تأثیر پارامترهای عمده سنگ‌زنی شامل سرعت برش، سرعت پیشروی و عمق بار بر نیروها، انرژی مخصوص و نسبت نیروی سنگ‌زنی در سه محیط مختلف شامل سنگ‌زنی خشک، سنگ‌زنی با سیال برشی و روش روان‌کاری کمینه می‌باشد. برای ارزیابی معنی‌دار بودن تأثیر پارامترهای ورودی بر پاسخ‌ها و همچنین به دست‌آوردن معادلات پیش‌بینی از آنالیز واریانس استفاده گردید. نتایج نشان داد که روش روان‌کاری کمینه مؤثرترین روش روان‌کاری و خنک‌کاری می‌باشد بطوری‌که موجب کاهش نیروهای مماسی سنگ‌زنی به میزان 38.88% و نیروهای عمودی به مقدار 31.16% نسبت به سنگ‌زنی خشک می‌گردد؛ در حالی‌که مقادیر کاهش نیروها در سنگ‌زنی با سیال برشی برابر 34.22% برای نیروهای مماسی و 24.81% برای نیروهای عمودی نسبت به سنگ‌زنی خشک است. همچنین ملاحظه گردید که افزایش سرعت برش باعث کاهش نیروها و نسبت نیروی سنگ‌زنی و افزایش انرژی مخصوص می‌گردد در حالی‌که افزایش سرعت پیشروی و عمق بار باعث افزایش نیروها و نسبت نیروی سنگ‌زنی و کاهش انرژی مخصوص می‌شود.

Experimental study on grinding forces and specific energy in three different environments of grinding carbon fiber reinforced silicon carbide composite

Hamed Esmaeili, Hamed Adibi*, Seyed Mehdi Rezaei

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.
* P.O.B. 15875-4413 Tehran, Iran, hadibi@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 03 November 2017
Accepted 30 December 2017
Available Online 19 January 2018

Keywords:
Ceramic matrix composite
grinding forces
minimum quantity lubrication
wet grinding
dry grinding

ABSTRACT

Ceramic matrix composites (CMCs) are a new class of high technology materials which can be utilized as a replacement for metallic super-alloys. CMCs have a vast array of applications in modern industries due to their upstanding properties, including low density, relatively high hardness and fracture toughness, and high corrosion and wear resistance. Extremely high hardness and inhomogeneous structure of CMCs cause unstable process and high grinding forces and temperature. This research was conducted in order to overcome the grinding challenges of these composites by recognizing and analyzing the effects of main process parameters comprising cutting speed, feed speed, and depth of cut on the grinding forces, specific energy, and grinding force ratio in three different environments including dry, wet and MQL grinding. To evaluate the significance of input parameters and their influence on the responses and also to derive predicting equations, Analysis of Variance (ANOVA) was employed. It was concluded that MQL technique is the most efficient cooling-lubrication method where implementation of this process reduces the tangential grinding force by 38.88% and normal grinding force by 31.16%, relative to dry grinding; however, the amount of force reduction in wet grinding is 34.22% for tangential grinding force and 24.81% for normal grinding force, relative to dry grinding. In addition, increase of cutting speed leads to reduced grinding forces and force ratio and higher amounts of specific energy, and also increase of feed speed and depth of cut cause higher grinding forces and force ratio and lower amounts of specific energy.

1- مقدمه

کامپوزیت‌های پایه سرامیکی زیردسته مواد کامپوزیتی و سرامیک‌ها هستند که شامل فیبرهای سرامیکی در داخل ماتریس سرامیکی می‌باشند. این کامپوزیت‌ها دارای خصوصیات برجسته مکانیکی و حرارتی هستند که از آن

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
H. Esmaeili, H. Adibi, S. M. Rezaei, Experimental study on grinding forces and specific energy in three different environments of grinding carbon fiber reinforced silicon carbide composite, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 01, pp. 379-387, 2018 (in Persian)

جمله می‌توان به سختی زیاد حتی در دماهای بالا، چقرمگی شکست بیشتر نسبت به سرامیک‌های مهندسی، مقاومت به خوردگی و سایش زیاد و پایداری حرارتی بالا اشاره کرد [1-3]. با توجه به وزن فوق العاده پایین و خصوصیات برجسته اصطکاکی در شرایط مختلف آب و هوایی، دیسک‌های ترمز ساخته شده از این کامپوزیت‌ها محبوبیت فراوانی را نسبت به دیسک‌های ترمز چدن خاکستری کسب کرده‌اند، بطوری‌که استفاده از دیسک‌های ترمز سرامیکی منجربه کاهش وزن 50% (20 کیلوگرم) نسبت به دیسک‌های ترمز معمول چدن خاکستری، همراه با طول عمر زیاد و عملکرد بهتر می‌گردد. برای اولین بار دیسک‌های ترمز سرامیکی در اتومبیل پورشه بطور موفقیت آمیز استفاده گردید. پس از آن، استفاده از این دیسک‌ها در اتومبیل‌های کلاس بالا بطور فزاینده‌ای گسترش یافت [5,4].

مزایای متعدد سیال‌های برشی در بهبود عملکرد ماشین‌کاری، منجربه روند افزایشی مصرف آن‌ها در فرایندهای مختلف ماشین‌کاری شده است. استفاده از سیال‌های برشی موجب روان‌کاری مکانیکی و شیمیایی سطح تماس چرخ سنگ و قطعه کار و در نتیجه کاهش نیروهای اصطکاکی در این منطقه می‌شود. همچنین، خنک کاری قطعه‌کار و چرخ سنگ، پایداری ابعادی قطعه‌کار، شستشوی محل ماشین‌کاری و جلوگیری از جوش خوردگی براده از مزایای دیگر استفاده از سیال‌های برشی است. با این حال، استفاده از این سیال‌ها با محدودیت‌هایی همراه است. به عنوان مثال، به دلیل حجم بالای استفاده از آن‌ها هزینه‌های ماشین‌کاری افزایش می‌یابد، همچنین استفاده مکرر از سیال برشی باعث مشکلات سلامتی و زیست‌محیطی می‌گردد [7,6]. برای غلبه بر این مشکلات تحقیقات گسترده‌ای در دهه‌های اخیر انجام گرفته است. در روش‌های سنگ‌زنی خشک، به دلیل عدم استفاده از سیال برشی، حرارت بالایی در منطقه تماس چرخ‌سنگ با قطعه‌کار تولید شده که منجربه پیدایش آسیب‌های حرارتی از قبیل سوختن، اکسیداسیون، ایجاد تنش‌های پسماند و ترک در سطح قطعه‌کار می‌گردد. همچنین، عدم استفاده از سیال برش باعث افزایش نیروها و انرژی مصرفی سنگ‌زنی به دلیل کاهش تعداد دانه‌های ساینده درگیر در فرایند برش می‌شود [9,8]. یکی از جایگزین‌های مناسب برای سیال‌های برشی، روش روان‌کاری کمینه (سنگ‌زنی نیمه خشک) می‌باشد که در این پژوهش نیز مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش مقدار بسیار ناچیزی از روان‌کار به طرز دقیقی به منطقه تماس بین چرخ‌سنگ و قطعه‌کار هدایت شده و عملکرد فرایند برشی را بهبود می‌بخشد. میزان روان‌کار مصرفی در این روش (50-500 ml/min) حدودا 1000 مرتبه کم‌تر از میزان روان‌کار مصرفی در حالت سیال برشی با پاشش پیوسته است [12-10].

نیروهای سنگ‌زنی یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر فرایند سنگ‌زنی است و همواره در مرکز توجه تحقیقات این فرایند بوده است. نیروهای مماسی سنگ‌زنی که در راستای مماس بر چرخ‌سنگ هستند ارتباط مستقیمی با توان و انرژی مصرفی، حرارت تولیدشده در منطقه تماس و نیروی مورد نیاز برای برداشت ماده دارند. نیروهای عمودی که در جهت عمود بر چرخ سنگ هستند باعث فرورفتن لبه برشی در داخل قطعه‌کار و تغییرشکل آن می‌شوند. این نیروها به هندسه دانه‌های ساینده (تیز یا کند بودن) و خصوصیات مکانیکی قطعه‌کار (غالبا سختی) بستگی دارند [13].

سنگ‌زنی کامپوزیت‌های پایه سرامیکی با چالش‌های فراوانی همراه است. به دلیل سختی بالا و ساختار ناهمگون این کامپوزیت‌ها، فرایند ماشین‌کاری هزینه‌بر بوده بطوری‌که 80% هزینه ساخت این کامپوزیت‌ها مربوط به فرایندهای ماشین‌کاری و پرداختکاری می‌باشد. مشکلات سنگ‌زنی این کامپوزیت‌ها شامل نیروها و دماهای بالا حین فرایند سنگ‌زنی، انرژی و توان مصرفی بالا و سایش سریع ابزار می‌باشد که منجربه پایین آمدن نسبت سنگ‌زنی و در نتیجه کارایی این فرایند می‌گردد [14]. با توجه به نسبتاً جدید و نوپا بودن همراه با عملکرد فوق العاده بالای این کامپوزیت‌ها، تحقیقاتی در زمینه سنگ‌زنی این مواد انجام گرفته است. وینرت و همکاران [15] جنبه‌های مختلف ماشین‌کاری در فرایند سوراخکاری کامپوزیت‌های پایه سرامیکی را بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که به دلیل سختی بالای قطعه کار و سایش سریع ابزار، استفاده از ابزارهای معمولی با لبه‌های برنده معین برای ماشین‌کاری این کامپوزیت‌ها نامناسب است. نتایج نشان داد که چرخ سنگ الماس با باند فلزی مناسب‌ترین گزینه برای سنگ‌زنی این کامپوزیت‌ها می‌باشد. دلیل استفاده از باند فلزی، نیروی نگهدارنده بالا و درنتیجه مقاومت در برابر سایش سریع ابزار، همچنین رسانایی بالای حرارتی نسبت به سایر باندها می‌باشد. اولمن و همکاران [16] تأثیر کاربرد سه باند مختلف شامل ویتریفاید، فلز و رزین را بر کارایی فرایند سنگ‌زنی فرم بصورت کنترل عددی[1] کامپوزیت سیلیکون کارباید تقویت شده با فیبر کربن بررسی کردند. ملاحظه گردید که علی‌رغم فرایند پایدار سنگ‌زنی در صورت استفاده از چرخ سنگ ویتریفاید و رزین، این چرخ سنگ‌ها سایش سریعی در طول فرایند دارند. این در حالیست که چرخ‌سنگ الماس با تخلخل نسبتاً زیاد، عملکرد قابل قبولی را در فرایند سنگ‌زنی دارد، بطوری‌که بهترین کیفیت سطح و پایین‌ترین میزان سایش ابزار را در میان سه نوع مختلف چرخ‌سنگ به خود اختصاص داد. توکلی و همکاران [17] سنگ‌زنی کامپوزیت‌های پایه سرامیکی با استفاده از چرخ‌سنگ تی‌تول[2] را بررسی کردند. مشاهده گردید که استفاده از چرخ‌سنگ تی‌تول موجب کاهش نیروهای سنگ‌زنی و افزایش نسبت - سنگ‌زنی می‌گردد اما سطح به دست آمده نامرغوب بوده و کیفیت نامناسبی دارد. ژانگ و همکاران [18] تأثیر جهت‌گیری الیاف بر فرایند سنگ‌زنی کامپوزیت‌های سرامیکی با فیبر کربن را بررسی کردند. نتایج تحقیقات نشان داد که جهت‌گیری الیاف تأثیر قابل‌توجهی بر نیروها و فرایند سنگ‌زنی دارد، بطوری‌که مقدار نیروها در جهت سنگ‌زنی عمود بر الیاف کم تر از مقادیر به دست آمده در جهت موازی با الیاف می‌باشد. لی و همکاران [19] تأثیر پارامترهای ورودی ماشین‌کاری التراسونیک دورانی[3] شامل سرعت اسپیندل، سرعت پیشروی و توان التراسونیک را بر نیروها و نرخ براده‌برداری مواد کامپوزیت پایه سرامیکی بررسی و مشاهده کردند که سرعت پیشروی بیشترین تأثیر را بر نیروهای ماشین‌کاری می‌گذارد و هر سه پارامتر ورودی تأثیر قابل توجهی بر نرخ براده برداری دارد. امامی [20] فرایند سنگ‌زنی به روش روان‌کاری کمینه بر روی سرامیک‌های مهندسی را آزمایش کرد. مشاهده گردید نیروهای سنگ‌زنی، انرژی مخصوص و سایش چرخ سنگ در صورت استفاده از روان‌کاری کمینه کاهش می‌یابد.

در این تحقیق، به دلیل نقش تعیین‌کننده خنک‌کار و روان‌کار، فرایند سنگ‌زنی در سه شرایط مختلف شامل سنگ‌زنی خشک، سنگ‌زنی با پاشش پیوسته سیال برشی و روش روان‌کاری کمینه انجام گرفت و نتایج آن‌ها باهم مقایسه گردید. برای شناخت و درک بیشتر، تأثیر پارامترهای مهم فرایند شامل سرعت برش، سرعت پیشروی و عمق بار بر نیروها، انرژی مخصوص و نسبت نیروی سنگ‌زنی مورد بررسی قرار گرفت. در

[1] NC-Form grinding
[2] T-Tool
[3] Rotary ultrasonic machining (RUM)

نهایت برای به دست آوردن نتایج جامع، آنالیز واریانس انجام گرفته و معادلات پیش‌بینی به دست آمد.

2- روش ساخت کامپوزیت‌های پایه سرامیکی

شکل 1 روش ساخت کامپوزیت سیلیکون کارباید تقویت شده با فیبر کربن را نشان می‌دهد. ابتدا نخ‌هایی از بافتن به تعداد 12000 فیبر کربن کنارهم ساخته می‌شوند.

این نخ‌ها کنار هم قرار گرفته و صفحاتی متشکل از نخ‌های بافته‌شده فیبر کربن به وجود می‌آورند. این صفحات بصورت متناوب روی هم قرار می‌گیرند. با سینتر کردن ورقه‌های انباشته شده در دمای 2000°C کامپوزیت گرفیت با فیبر کربن حاصل می‌شود. این کامپوزیت دارای تخلخل زیاد و خواص مکانیکی نامطلوبی است. برای پر کردن تخخل‌ها، سیلیکون مذاب به داخل تخلخل‌ها نفوذ داده شده و بعد از واکنش با کربن، سیلیکون کارباید بصورت ماتریس در کنار فیبرهای کربن تشکیل می‌گردد. عکس‌های SEM از سطح مقطع این کامپوزیت‌ها در شکل 1 نشان داده شده است [21].

3- تجهیزات و طراحی آزمایش

شکل 2 ستاپ آزمایش را نشان می‌دهد. از چرخ‌سنگ الماس با باند فلزی برای سنگ‌زنی قطعه‌کار استفاده گردید. شرایط سنگ‌زنی بطور جامع در جدول 1 آورده شده است. با توجه به قابلیت‌های ماشین سنگ‌زنی، کاهش زمان ماشین‌کاری و افزایش بازده فرایند، سطوح پارامترهای برش انتخاب گردید. قطعه‌کار مورد استفاده در آزمایشات، کامپوزیت سیلیکون کارباید تقویت شده با فیبر کربن می‌باشد که خصوصیات مکانیکی آن در جدول 2 آورده شده است. از دینامومتر پیزوالکتریک کیستلر 9255B برای اندازه گیری نیروهای سنگ‌زنی استفاده گردید. با توجه به اینکه در این تحقیق، از سه

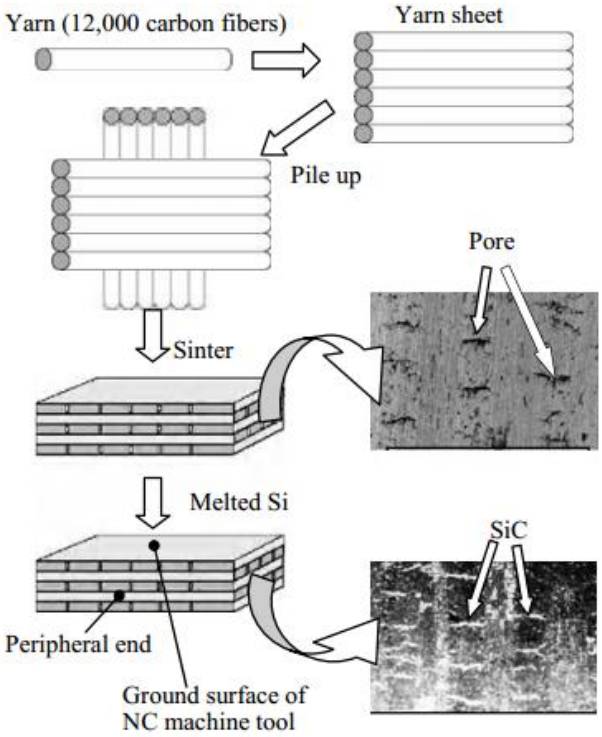

Fig. 1 preformed yarn production method of C/C and C/SiC composites [21]

شکل 1 ساخت به روش نخ‌های تابیده کامپوزیت‌های گرافیت تقویت شده با فیبر کربن و سیلیکون کارباید تقویت شده با فیبر کربن [21]

رژیم مختلف روان‌کاری و خنک کاری استفاده گردیده است، شرایط ثابتی برای هریک از آن‌ها در نظر گرفته شد. نوع روغن بکار رفته در روش روان‌کاری کمینه، روغن ذرت با ویسکوزیته سینماتیکی 0.047 Pa · s می‌باشد که جزو روغن‌های گیاهی محسوب می‌شود. در فرایند روان‌کاری کمینه، ذرات فراوان روغن که بصورت 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، سبز بودن آن است، استفاده از روغن‌های گیاهی مانند روغن بکار رفته در این پژوهش می‌تواند این هدف را تحقق ببخشد. روغن‌های گیاهی در مقایسه با روغن‌های معدنی نقطه جوش و وزن مولکولی بالایی دارند که منجربه کاهش تلفات روغن بصورت قابل توجهی می‌شود. همچنین، گلیسیرید[1] موجود در روغن‌های گیاهی به آسانی تجزیه شده و زنجیره‌های استر[2] آن‌ها توسط واکنش‌های میکروبی، اکسید شده و زیست تخریب پذیر هستند [24,23]. جدول 3 محتویات انواع اسیدهای موجود در روغن ذرت و درصد وزنی هریک از آن‌ها را نشان می‌دهد. در روش روان‌کاری کمینه،

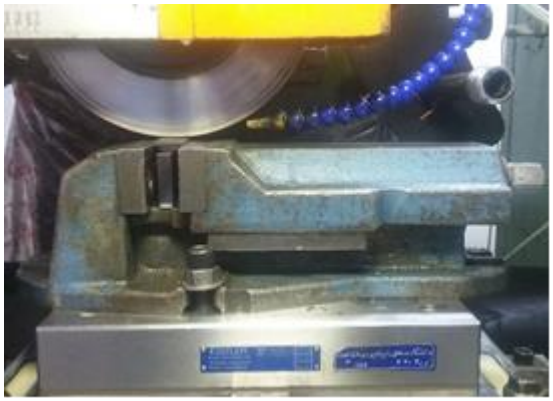

Fig. 2 Experimental setup

شکل 2 ستاپ آزمایش

جدول 1 شرایط سنگ‌زنی

Table 1 Grinding condition

نوع	مشخصات
ماشین ابزار	Hauni-Blohm HFS 204 Surface Grinding Machine
چرخ سنگ	ساینده‌های الماس با باند فلزی، D200، T10، MD25، C75
شرایط سنگ‌زنی	سنگ‌زنی خشک، سنگ‌زنی با سیال برشی، روان‌کاری کمینه
نوع خنک کار و روان‌کار	سنگ‌زنی با سیال برشی: امولسیون 3% آب و صابون روان‌کاری کمینه: روغن ذرت، $\nu = 0.047\ Pa \cdot s$
نرخ جریان	Q_{fluid}= 7.4 l/min, Q_{MQL}=100 ml/min, P_{air}= 4 bar
سرعت برش (m/s)	25, 35, 40, 45
سرعت پیشروی (mm/min)	500, 1000, 2000, 3000
عمق بار (mm)	0.1, 0.2, 0.3, 0.4
روش سنگ‌زنی	سنگ‌زنی رو به بالا

[1] Glyceride
[2] Ester chain

جدول 2 خصوصیات مکانیکی کامپوزیت سیلیکون کارباید تقویت شده با فیبر کربن [22]

Table 2 Mechanical properties of C/SiC composite [22]

چگالی (g/cm^3)	استحکام فشاری (MPa)	استحکام برشی بین لایه‌ای (MPa)	ضریب انبساط حرارتی (RT-1300°C) × 10^{-6} /°C		استحکام ضربه‌ای چارپی (kJ/m^2)	سختی شور	بازه دمایی (°C)
			⊥	∥			
1.7	210	17	1.3	10	20	75	2000

جدول 3 محتویات اسیدهای موجود در روغن گیاهی ذرت [21]

Table 3 Acid contents in corn oil [21]

نوع اسید	درصد وزنی٪
اسید اولئیک (Oleic acid)	32.55
اسید لینولئیک (Linoleic acid)	51.4
اسید پالمیتیک (Palmitic acid)	1.94
اسید استیریک (Stearic acid)	13.27
بقیه اسیدها (others)	0.84
اسیدهای چرب اشباع‌شده (Saturated fatty acids)	14
اسیدهای چرب اشباع‌نشده (Monounsaturated fatty acids)	29
اسیدهای چرب اشباع نشده (Polyunsaturated fatty acids)	57

افزایش نرخ جریان روان‌کار موجب افزایش اندازه متوسط قطرات روغن و کاهش سرعت متوسط آن‌ها می‌شود. افزایش نرخ جریان روان‌کار موجب تشکیل بیشتر رسوب روغن بر روی چرخ‌سنگ و کاهش نیروهای اصطکاک می‌گردد اما اگر نرخ جریان روغن از یک حد معینی بیشتر شود به دلیل ازدیاد فشار هیدرودینامیکی در ناحیه سنگ‌زنی موجب افزایش نیروها می‌گردد.

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 100 ml/min مناسب می‌باشد. افزایش فشار هوا و نرخ جریان گاز موجب کاهش اندازه متوسط قطرات روغن و افزایش متوسط سرعت آن‌ها می‌شود. در فشار هوای کم تر، اندازه قطرات بزرگ تر بوده و سرعت گاز حامل بسیار کم تر از حد لازم برای نفوذ مؤثر به جریان هوای لایه مرزی اطراف چرخ سنگ است. در حالی که در فشار هوای بیشتر به دلیل سرعت بالای قطره و ابعاد کوچک آن نفوذ مؤثرتری به لایه مرزی اطراف چرخ سنگ صورت می‌گیرد که منجربه روان‌کاری مؤثرتر می‌گردد. در این پژوهش، با توجه به سطوح پارامترهای برش مخصوصاً سرعت دورانی چرخ سنگ، فشار هوا برابر 4 bar انتخاب گردیده است [26,25].

به دلیل تعداد بالای آزمایشات در حالت فول فاکتوریل ($3 \times 4^3 = 192$)، از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش استفاده گردید. با توجه به تعداد فاکتورها و سطوح آن‌ها، نتیجه طراحی آزمایش بصورت ماتریس متناظر با آرایه اورتوگونال $L_{16}=4^3$ بصورت جدول 4 به دست آمده است. با علم به اینکه آزمایش‌ها در سه محیط مختلف سنگ‌زنی خشک، سنگ‌زنی با پاشش پیوسته سیال برشی و روان‌کاری کمینه انجام گرفته است، طراحی آزمایش مشابه برای هریک از این حالت‌ها خواهیم داشت که در نتیجه آن تعداد کل آزمایش‌ها ($3 \times 16 = 48$) می‌باشد. برای اطمینان از نتایج حاصل، هرکدام از آزمایش‌ها سه مرتبه تکرار شده و مقدار میانگین لحاظ گردیده است.

4- نتایج و بحث

بعد از استخراج مقادیر نیروها بر اساس ماتریس طراحی آزمایش، آنالیز

جدول 4 ماتریس طراحی آزمایش

Table 4 Experimental design matrix

ردیف	سرعت برش (m/s)	سرعت پیشروی (mm/min)	عمق بار (mm)
1	25	500	0.1
2	25	1000	0.2
3	25	2000	0.3
4	25	3000	0.4
5	35	500	0.2
6	35	1000	0.1
7	35	2000	0.4
8	35	3000	0.3
9	40	500	0.3
10	40	1000	0.4
11	40	2000	0.1
12	40	3000	0.2
13	45	500	0.4
14	45	1000	0.3
15	45	2000	0.2
16	45	3000	0.1

واریانس برای تعیین و بررسی معنی‌دار بودن مدل‌ها انجام گرفت که نتایج آن همراه با آمار توصیفی مدل‌ها در جدول 5 ارائه می‌گردد.

مقدار p در همه مدل‌ها کمتر از 0.05 بوده و مقدار فاکتور فیشر (F) برای مدل با مقدار استاندارد آن در جدول فیشر مقایسه شده و نتیجه این است که مدل‌های پیش‌بینی شده معنی‌دار هستند. شاخص ضریب تبیین تنظیم‌شده[1]، نشان دهنده مطابقت مدل با توجه به مشاهدات موجود و ضریب تبیین پیش-بینی[2] نشان دهنده مطابقت مدل برای مشاهدات جدید است. اختلاف این دو شاخص نباید بیشتر از 0.2 باشد که برای مدل‌های فوق کمتر از این مقدار است. شاخص کفایت دقت[3] نشان دهنده نسبت سیگنال به نویز[4] بوده و بیانگر قدرت تمایز و تفکیک مدل است [27]. با توجه به اینکه مقدار این شاخص بزرگتر از 4 است، مدل‌ها دارای قدرت تفکیک مناسبی هستند. معادلات پیش‌بینی نیروهای سنگ‌زنی بر اساس سرعت برش، سرعت پیشروی و عمق بار توسط آنالیز واریانس بصورت روابط (1) تا (6) ارائه می‌گردد.

سنگ‌زنی خشک:

$$F_t = 5.40 - (0.08\,v_c) + (5.54\times10^{-3}\,v_f) + (40.19\,a_e) + (0.023\,v_f\,a_e) - (1.13\times10^{-6}\,v_f^2) \quad (1)$$

$$F_n = 39.27 - (0.11\,v_c) + (0.01\,v_f) + (290.69\,a_e) + (0.023\,v_f\,a_e) - (316.87\,a_e^2) \quad (2)$$

سنگ‌زنی با سیال برشی:

$$F_t = 3.67 - (0.17\,v_c) - (2.53\times10^{-3}\,v_f) + (63.98\,a_e) + (2.01\times10^{-4}\,v_c\,v_f) - (0.76\,v_c\,a_e) + (0.02\,v_f\,a_e) - (9.58\times10^{-7}\,v_f^2) \quad (3)$$

$$F_n = 0.3 + (1.32\,v_c) + (0.01\,v_f) + (217.21\,a_e) + (0.02\,v_f\,a_e) - (0.02\,v_c^2) - (140.00\,a_e^2) \quad (4)$$

[1] Adjusted coefficient of determination (Adj-R^2)
[2] Predicted R-squared
[3] Adequate precision
[4] Signal to noise ratio (S/N)

جدول 5 نتایج آنالیز واریانس و شاخص‌های توصیفی

Table 5 Results of ANOVA and model's descriptive statistics

	روش روان‌کاری	مقدار احتمال P	مقدار فاکتور فیشر	ضریب تبیین[1]	ضریب تبیین تنظیم‌شده	ضریب تبیین پیش‌بینی	کفایت دقت
نیروی مماسی	خشک	<0.0001	846.55	0.9976	0.9965	0.9932	97.418
	معمولی	<0.0001	399.55	0.9971	0.9947	0.9903	66.470
	نیمه خشک	<0.0001	110.24	0.9822	0.9733	0.9366	34.713
نیروی عمودی	خشک	<0.0001	176.95	0.9888	0.9832	0.9713	44.959
	معمولی	<0.0001	377.75	0.9947	0.9921	0.9867	65.685
	نیمه خشک	<0.0001	372.11	0.9894	0.9867	0.9790	62.117

روان‌کاری کمینه:

$$F_t = 0.30 - (0.11\ v_c) + (7.89 \times 10^{-3}\ v_f) + (29.14\ a_e) + (0.018\ v_f\ a_e) - (1.85 \times 10^{-6}\ {v_f}^2) \quad (5)$$

$$F_n = 24.18 - (0.27\ v_c) + (0.02\ v_f) + (163.27\ a_e) \quad (6)$$

برای بررسی بیشتر و فهم دقیق‌تر تأثیر پارامترهای مهم فرایند بر نیروهای سنگ‌زنی، هرکدام از پارامترها را در محدوده موردنظر تغییر داده و دو پارامتر بعدی را ثابت نگه می‌داریم (مقادیر رفرنس شامل سرعت برش 40 m/s، سرعت پیشروی 1000 mm/min و عمق بار 0.2 mm می‌باشد). شکل 3 نمودارهای به دست آمده بر اساس روابط (1) تا (6) را نشان می‌دهند. همان‌طور که از نمودارها مشاهده می‌گردد، مقادیر به دست آمده برای نیروهای عمودی بیشتر از نیروهای مماسی است. با افزایش سرعت برش،

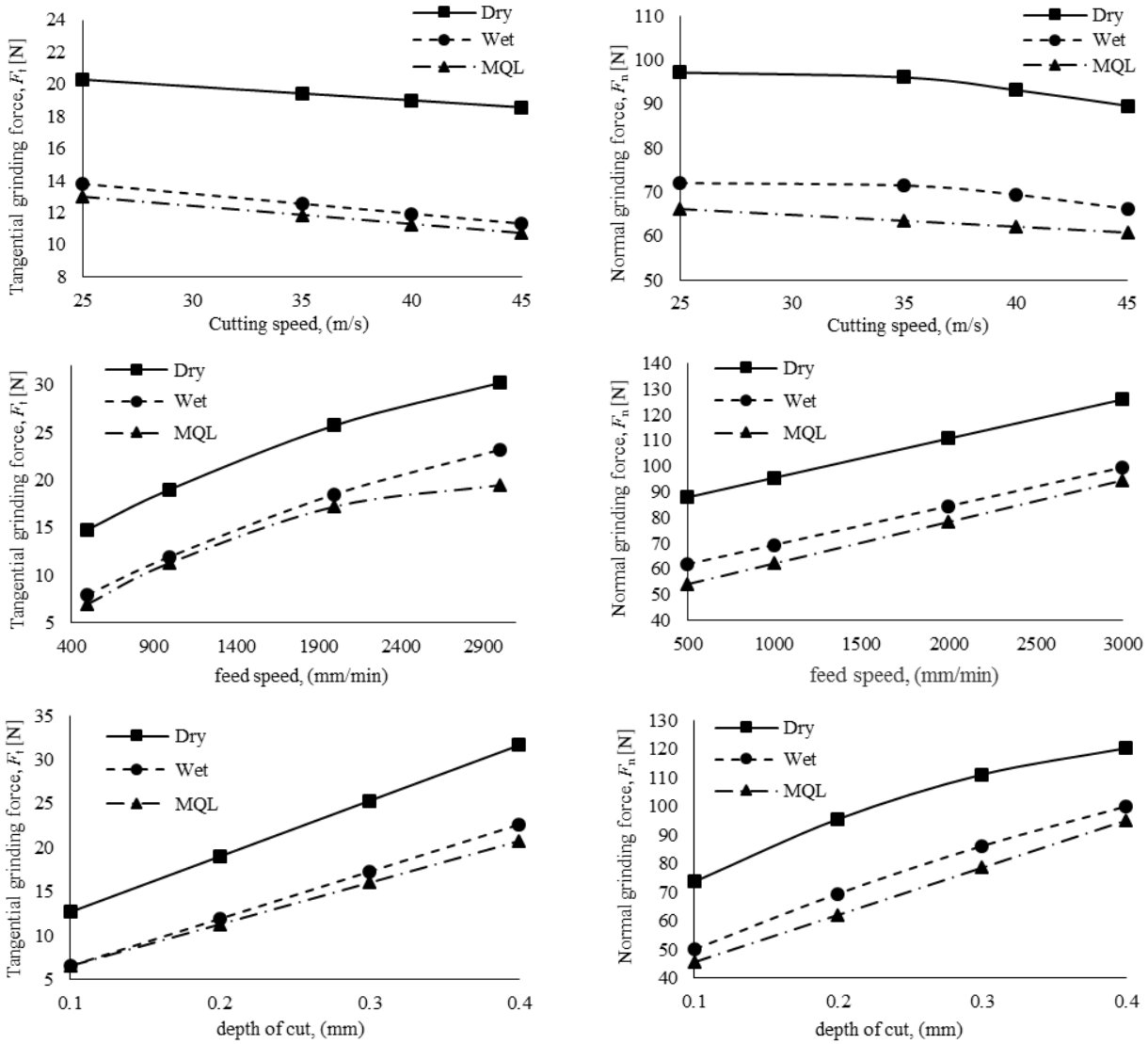

Fig. 3 The effect of main process parameters on gridning forces. Reference point: v_c=40 m/s, v_f= 1000 mm/min, a_e= 0.2 mm

شکل 3 تأثیر پارامترهای اصلی فرایند بر نیروهای سنگ‌زنی. نقطه رفرنس: v_c= 40 m/s, v_f= 1000 mm/min, a_e= 0.2 mm

[1] Coefficient of determination (R^2)

مقدار نیروها کاهش پیدا کرده است. دلیل این امر، کاهش مدت زمان تماس دانه ساینده با قطعه کار، کاهش تعداد لبه‌های برنده درگیر و در نتیجه کاهش ماکزیمم ضخامت براده تغییر شکل نیافته طبق رابطه (7) می‌باشد [28]. همچنین با افزایش سرعت برشی، دمای منطقه تماس افزایش یافته و سختی قطعه کاهش می‌یابد که منجربه کاهش نیروها می‌گردد.

$$h_{\mathrm{m}} = 2L\left(\frac{v_{\mathrm{f}}}{v_{\mathrm{c}}}\right)\left(\frac{a_{\mathrm{e}}}{D}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

با افزایش سرعت پیشروی و عمق بار، مقادیر نیروها افزایش می‌یابد. دلیل این تغییرات، افزایش طول تماس دانه ساینده با قطعه کار و همچنین افزایش ماکزیمم ضخامت براده تغییر شکل نیافته طبق رابطه (7) می‌باشد [28].

بطور متوسط، استفاده از روش روان‌کاری کمینه موجب کاهش نیروهای مماسی سنگ‌زنی به میزان 38.88% و نیروهای عمودی سنگ‌زنی به مقدار 31.16% نسبت به سنگ‌زنی خشک می‌شود. بطوری‌که، سنگ‌زنی با سیال برشی نیروهای مماسی را 34.22% و نیروهای عمودی را 24.81% نسبت به سنگ‌زنی خشک کاهش می‌دهد. در روش روان‌کاری کمینه، به دلیل سرعت بالای هوای فشرده، قطرات کوچک روغن با سرعت بالا وارد منطقه تماسی چرخ سنگ با قطعه کار می‌شوند. ذرات اسپری‌شده از طریق منابع روغن‌کاری از قبیل تخلخل چرخ‌سنگ و نیز شیارهای مربوط به دانه‌های شکسته شده چرخ‌سنگ به منطقه سنگ‌زنی نفوذ می‌کنند و منجربه ایجاد لایه روان‌کاری مرزی در این منطقه می‌شوند. سرعت بالای هوای فشرده علاوه بر انتقال روغن به منطقه تماس بین چرخ‌سنگ و قطعه‌کار، منجربه اتمیزه شدن ذرات روغن می‌شود. ذرات بسیار ریز روغن، سرعت بالای هوای فشرده و وجود مخزن روغن‌کاری در چرخ‌سنگ، نفوذ مؤثر روان‌کار به منطقه برش را فراهم می‌کند. تشکیل لایه روان‌کار مرزی منجربه کاهش چسبندگی بین دانه‌های ساینده چرخ سنگ و سطح قطعه کار از طریق واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی شده و بنابراین از خوردگی بیشتر چرخ سنگ جلوگیری می‌کند. کاهش قابل ملاحظه مکانیزم خوردگی سایش توسط روان‌کاری کمینه موجب کاهش چشمگیر نیروهای اصطکاک بین چرخ سنگ و قطعه کار شده و از این طریق نیروهای سنگ‌زنی کاهش پیدا می‌کنند. نیروهای سنگ‌زنی زیاد در سنگ‌زنی خشک و سنگ‌زنی با پاشش پیوسته سیال برشی ناشی از شرایط روان‌کاری و خنک کاری غیرمؤثر است که اکثر دانه‌های ساینده را درگیر سایش و شخم زتی می‌کند حال آنکه در صورت استفاده از روان‌کاری کمینه بدلیل درگیری اکثر دانه‌های ساینده در برش ماده، نیروها کاهش یافته و این نشان از کارایی بالای سنگ‌زنی در این روش می‌باشد [29].

برای ارزیابی کارایی فرایند سنگ‌زنی از انرژی مخصوص استفاده می‌شود که بصورت انرژی مورد نیاز برای برداشت واحد حجم ماده تعریف می‌شود. طبق رابطه (8)، این شاخص رابطه مستقیم با نیروهای مماسی سنگ‌زنی دارد.

با جایگزین کردن مقادیر نیروهای مماسی حاصل از روابط (1)، (3) و (5) در رابطه (8) انرژی مخصوص برای هریک از فرایندها به دست می‌آید. نمودارهای مقادیر انرژی مخصوص و تأثیر پارامترهای برش بر انرژی مخصوص در شکل 4 نشان داده شده است [28].

$$u = \frac{P}{Q_{\mathrm{w}}} = \frac{F_{\mathrm{t}} v_{\mathrm{c}}}{T v_{\mathrm{f}} a_{\mathrm{e}}} \quad (8)$$

طبق شکل 4، افزایش سرعت برش باعث افزایش انرژی مخصوص و در نتیجه کاهش کارایی فرایند سنگ‌زنی می‌گردد. در حالی‌که افزایش سرعت پیشروی و عمق بار باعث کاهش انرژی مخصوص و افزایش کارایی فرایند می‌شود. طبق رابطه (7)، افزایش سرعت برش باعث کاهش ماکزیمم ضخامت براده تغییر شکل نیافته و افزایش سرعت پیشروی و عمق بار باعث افزایش ماکزیمم

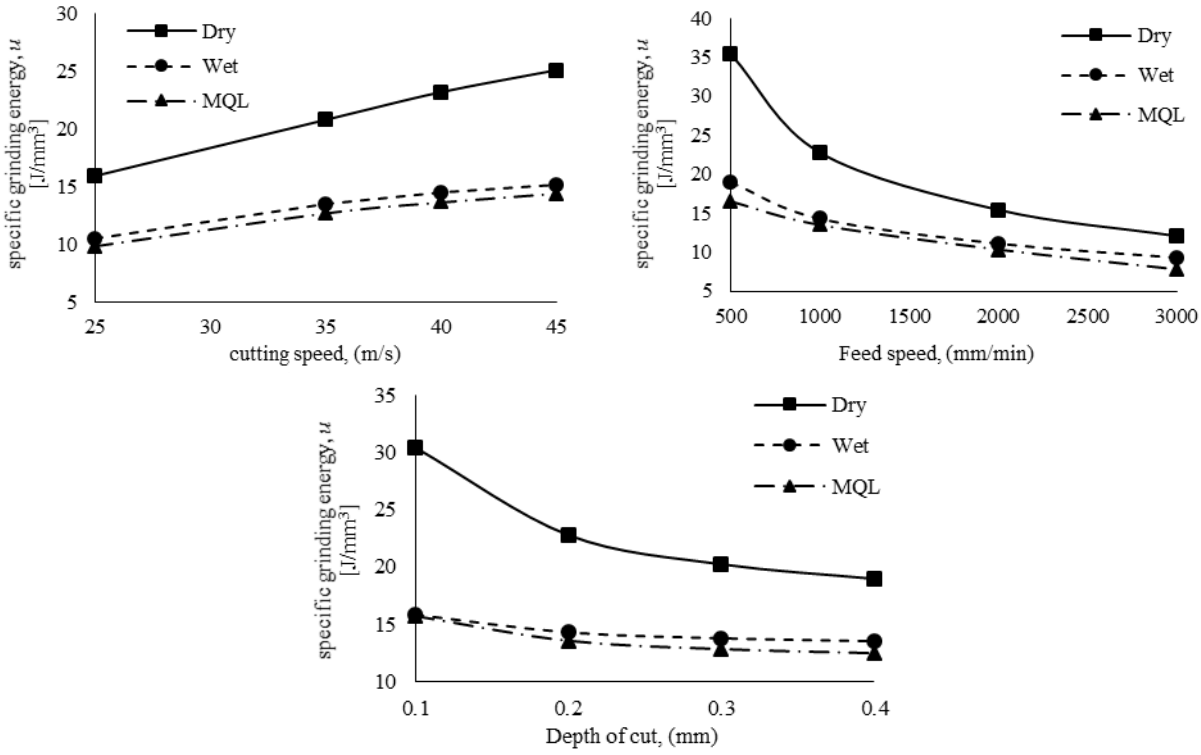

Fig. 4 The effect of main process parameters on specific grinding energy. Reference point: v_c=40 m/s, v_f= 1000 mm/min, a_e= 0.2 mm

شکل 4 تأثیر پارامترهای مهم فرایند بر انرژی مخصوص سنگ‌زنی. نقطه رفرنس: v_c= 40 m/s, v_f= 1000 mm/min, a_e= 0.2 mm

ضخامت براده تغییر شکل نیافته می‌گردد. در ضخامت‌های کوچک براده تغییر شکل نیافته مقدار تنش برشی مورد نیاز برای برش ماده بیشتر است که دلیل آن حضور فعال‌تر مکانیزم‌های دیگری غیر از تشکیل براده شامل مکانیزم‌های سایش و شخم زنی است که درصد زیادی از انرژی مخصوص سنگ‌زنی را مصرف می‌کنند. مکانیزم سایش در اثر لغزش لبه‌های برنده کند و صاف شده چرخ سنگ و اصطکاک آن‌ها با سطح قطعه کار بدون تشکیل براده به وجود می‌آید. وجود مکانیزم سایش باعث می‌شود که مقداری از انرژی سنگ‌زنی در اثر اصطکاک دانه‌ها با سطح قطعه کار مصرف شود. مکانیزم دیگر در فرایند سنگ‌زنی مکانیزم شخم زنی است که عبارت است از تغییر شکل قطعه بدون اینکه براده‌ای تشکیل شده باشد. در این حالت گوشت قطعه کار در جلوی لبه برنده دچار تغییر شکل پلاستیک شده بدون اینکه برش صورت گیرد. در واقع با کاهش ضخامت براده نتراشیده، مکانیزم‌های سایش و شخم زنی درصد بیشتری از انرژی سنگ‌زنی را مصرف می‌کنند و از طرفی چون این مکانیزم‌ها تأثیری در تشکیل براده ندارند منجربه افزایش انرژی مخصوص سنگ‌زنی در ضخامت‌های کوچک براده می‌شوند که با عنوان پدیده اثر اندازه شناخته می‌شود. این در حالیست که افزایش نرخ براده برداری از طریق افزایش سرعت پیشروی و عمق بار منجربه کمرنگ تر شدن اثر اندازه و در نتیجه کاهش انرژی مخصوص سنگ‌زنی و افزایش کارایی فرایند می‌گردد [30,28].

با مقایسه شرایط مختلف سنگ‌زنی، مشاهده می‌گردد که روان‌کاری کمینه کم ترین میزان انرژی مخصوص را به خود اختصاص داده است. با توجه به اینکه در مقایسه فرایندهای سنگ‌زنی مختلف، فرایندی که کم‌ترین انرژی مخصوص را برای حجم برداشت ماده ثابت داشته باشد کارایی آن بیشتر است، روش روان‌کاری کمینه، به دلیل عملکرد مؤثرتر روان‌کار و نفوذ بهتر در منطقه ماشین‌کاری، بیشترین کارایی را دارا می‌باشد و سنگ‌زنی خشک نیز به دلیل عدم استفاده از خنک کار و روان‌کار بدترین کارایی فرایند را دارد. بطور متوسط، سنگ‌زنی با سیال برشی باعث کاهش انرژی مخصوص به مقدار 37.40% و روان‌کاری کمینه به مقدار 41.77% نسبت به سنگ‌زنی خشک می‌گردد.

نسبت نیروی مماسی سنگ‌زنی به نیروی عمودی سنگ‌زنی، نسبت نیروی سنگ‌زنی نامیده می‌شود که به عوامل مختلفی از قبیل شرایط برش، نوع خنک‌کار، نوع دانه‌ها، هندسه دانه‌ها، جنس قطعه‌کار بستگی دارد. مقادیر پایین تر نسبت نیروی سنگ‌زنی مربوط به فرایندهای سنگ‌زنی ظریف، سنگ‌زنی فولادهای سخت و سرامیک‌ها و یا سنگ‌زنی با لبه‌های برنده کند می‌باشد در صورتی‌که مقادیر بالای آن مربوط به فرایندهای سنگ‌زنی با برداشت ماده زیاد، سنگ‌زنی زنی چدن خاکستری یا فولادهای نرم و یا سنگ‌زنی با لبه‌های برنده تیز است [13]. مقادیر نسبت نیروی سنگ‌زنی و تأثیر پارامترهای مهم فرایند بر این نسبت در سنگ‌زنی کامپوزیت سیلیکون کارباید تقویت شده با فیبر کربن در شکل 5 نشان داده شده است.

مطابق شکل 5، مقادیر نسبت نیروی سنگ‌زنی در آزمایشات، با توجه به شرایط فرایند و روش روان‌کاری بین 0.1 تا 0.3 متغیر است. با افزایش سرعت برش مقدار نسبت نیروی سنگ‌زنی کاهش می‌یابد. با مقایسه شکل 5 و شکل 3 واضح است که تأثیر سرعت برش بر نیروی مماسی بیشتر از تأثیر آن بر نیروی عمودی سنگ‌زنی است. دلیل این موضوع کاهش ماکزیمم ضخامت براده تغییر شکل نیافته با افزایش سرعت برش (طبق رابطه (7)) می‌باشد. همچنین، مشاهده می‌گردد که با افزایش سرعت پیشروی و عمق بار، نسبت نیروی سنگ‌زنی افزایش پیدا می‌کند. دلیل افزایش نسبت نیروی سنگ‌زنی در حجم برداشت ماده بالا بدلیل کم رنگ تر شدن اثر اندازه است. همان‌طور که اشاره گردید، با افزایش حجم برداشت ماده، درصد انرژی سنگ‌زنی که صرف سایش و شخم‌زنی می‌شود کاهش یافته و برعکس درصد بالای انرژی صرف برش ماده می‌شود که رابطه مستقیمی با نیروی مماسی سنگ‌زنی دارد (طبق

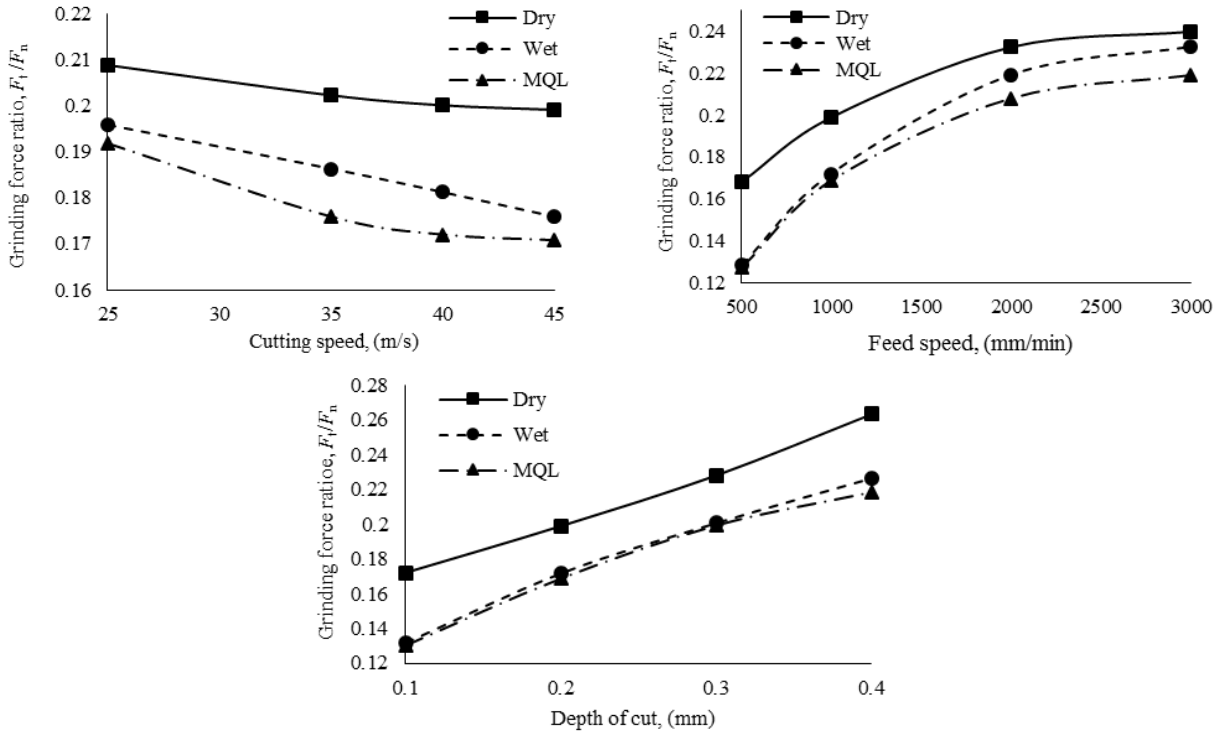

Fig. 5 The effect of main process parameters on grinding force ratio. Reference point: v_c=40 m/s, v_f= 1000 mm/min, a_e= 0.2 mm

شکل 5 تأثیر پارامترهای مهم فرایند بر نسبت نیروهای سنگ‌زنی. نقطه رفرنس: v_c= 40 m/s, v_f= 1000 mm/min, a_e= 0.2 mm

رابطه (8)). در نتیجه، مقدار نیروی مماسی نسبت به نیروی عمودی افزایش بیشتری پیدا کرده و متعاقبا نسبت نیروی سنگ‌زنی افزایش می‌یابد [30]. با مقایسه روش‌های مختلف روان‌کاری و خنک‌کاری، روان‌کاری کمینه کم ترین و سنگ‌زنی خشک بیشترین مقادیر نسبت نیروی سنگ‌زنی را به خود اختصاص داده‌اند.

5- نکات مهم در رابطه با بهینه سازی فرایند

یکی از نتایج مهم آنالیز واریانس که اهمیت فراوانی در بهینه سازی فرایند دارد، ضرایب ترم می‌باشد که مقادیر آن، ضرایب مدل مربوطه در واحدهای کدی بوده و بین 1- و 1+ به ازای هرکدام از پارامترهای فرایند متغیر است. ضرایب ترم به دست آمده در آزمایشات در جدول 6 نشان داده شده است.

با مقایسه مقادیر ضرایب ترم برای هرکدام از پارامترهای فرایند، میزان اثرگذاری نسبی آن‌ها بر خروجی مشخص می‌گردد. ضرایب ترم با علامت منفی برای سرعت برش، حاکی از رابطه عکس بین سرعت برش و نیروهای سنگ‌زنی است. همچنین با توجه به مقادیر قدرمطلق بزرگ‌تر ضرایب ترم برای عمق بار نسبت به سرعت پیشروی و سرعت برش، می‌توان نتیجه گرفت که عمق بار بیشترین اثرگذاری و سرعت برش کم ترین اثرگذاری را بر نیروهای سنگ‌زنی دارد. این نکته در بهینه سازی فرایند سنگ‌زنی کامپوزیت‌های پایه سرامیکی از جنبه نیروهای سنگ‌زنی حائز اهمیت است. به دلیل اینکه سرعت پیشروی و عمق بار درجه یکسانی در حجم برداشت ماده دارند ($Q_w = v_f a_e b$)، افزایش حجم برداشت ماده از طریق افزایش سرعت پیشروی مقرون به صرفه تر است.

6- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش فرایند سنگ‌زنی کامپوزیت پایه سرامیکی سیلیکون کارباید تقویت شده با فیبر کربن در سه شرایط سنگ‌زنی خشک، سنگ‌زنی با سیال برشی و روش روان‌کاری کمینه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به شرح زیر می‌باشد:

- بعد از انجام آزمایش‌ها بر اساس ماتریس طراحی آزمایش، آنالیز واریانس بر روی نتایج آزمایشات انجام گرفته و مشاهده گردید که مدل‌های به دست آمده معنی دار بوده و پارامترهای ورودی بر روی پاسخ‌ها تأثیرگذار هستند. همچنین معادلات پیش بینی نیروهای سنگ‌زنی بر اساس پارامترهای ورودی شامل سرعت برش، سرعت پیشروی و عمق بار به دست آمد.
- روش روان‌کاری کمینه، مؤثر ترین روش برای سنگ‌زنی کامپوزیت‌های پایه سرامیکی بوده بطوری‌که نیروهای مماسی سنگ‌زنی 38.88% و نیروهای عمودی سنگ‌زنی 31.16% نسبت به سنگ‌زنی خشک کاهش پیدا کرد. این در حالی است که استفاده از رژیم سنگ‌زنی با پاشش پیوسته سیال برشی منجربه کاهش نیروهای مماسی سنگ‌زنی به مقدار 34.22% و نیروهای عمودی سنگ‌زنی به مقدار 24.81% می‌گردد.
- کاربرد روش روان‌کاری کمینه منجربه افزایش کارایی سیستم گردید بطوری‌که انرژی مخصوص سنگ‌زنی به مقدار متوسط 41.77% نسبت به سنگ‌زنی خشک کاهش یافت، در حالی‌که مقدار کاهش انرژی مخصوص برای سنگ‌زنی با پاشش پیوسته سیال برش برابر متوسط 37.40% نسبت به سنگ‌زنی خشک است. نسبت نیروی سنگ‌زنی در فرایند سنگ‌زنی کامپوزیت سیلیکون کارباید تقویت شده با فیبر کربن بین 0.1 تا 0.3 متغیر است بطوری‌که کم ترین میزان آن برای روان‌کاری کمینه و بیشترین آن برای سنگ‌زنی خشک است.
- بر اساس معادلات پیش بینی حاصل از آنالیز واریانس، در هر سه رژیم روان‌کاری و خنک کاری، با افزایش سرعت برش، نیروها و نسبت نیروی سنگ‌زنی کاهش یافته و انرژی مخصوص افزایش پیدا می‌کند. در حالی‌که، با افزایش سرعت پیشروی و عمق بار، نیروها و نسبت نیروی سنگ‌زنی افزایش یافته و انرژی مخصوص کاهش می‌یابد.
- در میان سه پارامتر مهم فرایند شامل سرعت برش، سرعت پیشروی و عمق بار، عمق بار بیشترین تأثیرگذاری و سرعت برش کم ترین تأثیرگذاری را بر نیروهای سنگ‌زنی دارد. بطوری‌که در حالت خاص روان‌کاری کمینه، ضرایب ترم سرعت برش، سرعت پیشروی و عمق بار برای نیروهای مماسی سنگ‌زنی به ترتیب برابر 0.86-، 9.15 و 12.07 است. در حالی‌که این ضرایب برای نیروهای عمودی سنگ‌زنی به ترتیب برابر 1.12-، 20.48 و 25.83 می‌باشد.

جدول 6 ضرایب ترم به دست آمده از آنالیز واریانس

Table 6 Term coefficients provided from ANOVA

شرایط سنگ‌زنی		ضرایب ترم		
		سرعت برش	سرعت پیشروی	عمق بار
نیروهای مماسی	خشک	-1.13	7.44	9.15
	معمولی	-0.12	7.58	10.77
	نیمه خشک	-0.86	9.15	12.07
نیروهای عمودی	خشک	-2.72	20.28	24.49
	معمولی	-2.18	20.05	26.96
	نیمه خشک	-1.12	20.48	25.83

7- فهرست علایم

a_e	عمق بار (mm)
C	غلظت دانه ساینده
D	قطر چرخ‌سنگ (mm)
F_t	نیروی مماسی سنگ‌زنی (N)
F_n	نیروی عمودی سنگ‌زنی (N)
h_m	ضخامت براده تغییر شکل نیافته (µm)
L	فاصله دانه‌های ساینده روی سطح چرخ سنگ ایده‌آل (µm)
MD	اندازه دانه ساینده
P	توان سنگ‌زنی (W)
P_{air}	فشار جت هوا در روان‌کاری کمینه (bar)
Q	نرخ جریان خنک کار و روان‌کار (l/min) یا (ml/min)
Q_w	حجم برداشت ماده از قطعه کار (mm^3)
T	ضخامت چرخ‌سنگ (mm)
u	انرژی مخصوص سنگ‌زنی (J/mm^3)
v_c	سرعت برش (m/s)
v_f	سرعت پیشروی (mm/min)

علایم یونانی

ν	ویسکوزیته سینماتیکی ($Pa \cdot s$)

زیرنویس‌ها

fluid سنگ‌زنی با سیال برشی

MQL روان‌کاری کمینه

8- مراجع

[1] N. P. Bansal, J. Lamon, *Ceramic Matrix Composites: Materials, Modeling and Technology*, First Edittion, pp. 147-207, New York: John Wiley & Sons, 2015.

[2] S. Yuan, H. Fan, M. Amin, A cutting force prediction dynamic model for side milling of ceramic matrix composites C/SiC based on rotary ultrasonic machining, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 86, No. 6, pp. 37-48, 2016.

[3] Y. Wang, V. K. Sarin, B. Lin, H. Li, S. Gillard, Feasibility study of the ultrasonic vibration filing of carbon fiber reinforced silicon carbide composites, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 101, No. 4, pp. 10-17, 2016.

[4] W. Krenkel, N. Langhof, Ceramic Matrix Composites for High Performance Friction Applications, *Proceedings of the IV Advanced Ceramics and Applications Conference*, Paris: Springer, pp. 13-28, 2017.

[5] D. J. Nestler, N. Roder, A. Todt, An innovative production method for a C/C-SiC brake disc, suitable for a large-scale production, *6th International Munich Chassis Symposium*, Munich: Springer, pp. 605-627, 2015.

[6] N. Boubekri, V. Shaikh, Minimum quantity lubrication (MQL) in machining: Benefits and drawbacks, *Journal of Industrial and Intelligent Information*, Vol. 3, No. 3, pp. 205-209, 2015.

[7] B. Boswell, M. Islam, I. J. Davies, Y. Ginting, A. K. Ong, A review identifying the effectiveness of minimum quantity lubrication (MQL) during conventional machining, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 91, No. 1-4, pp. 1-20, 2017.

[8] Q. Liu, G. Huang, X. Xu, C. Fang, C. Cui, A study on the surface grinding of 2D C/SiC composites, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 93, No. 5-8, pp. 1595-1603, 2017.

[9] T. Tawakoli, M. J. Hadad, M. H. Sadeghi, A. Daneshi, S. Stöckertc, A. Rasifard, An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication—MQL grinding, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, No. 12, pp. 924-932, 2009.

[10] R. F. Damasceno, R. de Ruzzi, T. V. França, H. J. de Mello, R. B. da Silva, P. R. de Aguiar, E. C. Bianchi, Performance evaluation of various cooling-lubrication techniques in grinding of hardened AISI 4340 steel with vitrified bonded CBN wheel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 92, No. 9-12, pp. 1-12, 2017.

[11] M. M. A. Khan, M. A. H. Mithu, N. R. Dhar, Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 15, pp. 5573-5583, 2009.

[12] N. R. Dhara, S. Islama, M. Kamruzzaman, Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4340 Steel, *Gazi University Joural of Science*, Vol. 20, No. 2, pp. 23-32, 2007.

[13] I. D. Marinescu, M. P. Hitchiner, E. Uhlmann, W. B. Rowe, I. Inasaki, *Handbook of Machining with Grinding Wheels*, pp. 9-21, New York: CRC Press, 2006.

[14] B. Azarhoushang, T. Tawakoli, Development of a novel ultrasonic unit for grinding of ceramic matrix composites, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 57, No. 9, pp. 945-955, 2011.

[15] K. Weinert, T. Jansen, *Machining Aspects for the Drilling of C/C–SiC Materials*, W. Krenkel (Eds.), *Ceramic Matrix Composites*, pp. 287–301, Weinheim: Wiley-VCH, 2008.

[16] E. Uhlmann, T. B. Klein, L. Schweitzer, A. Neubrand, NC-Form grinding of carbon fibre reinforced silicon carbide composite, *Asia-Pacific Conference on Engineering Plasticity and its Applications (AEPA)*, Singapore: Key Engineering Materials, pp. 314-317, 2013.

[17] T. Tawakoli, B. Azarhoushang, Intermittent grinding of ceramic matrix composites (CMCs) utilizing a developed segmented wheel, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 51, No. 2, pp. 112-119, 2011.

[18] L. Zhang, C. Ren, C. Ji, Z. Wang, G. Chen, Effect of fiber orientation on surface grinding process of unidirectional C/SiC composites, *Applied Surface Science*, Vol. 366, No. 1, pp. 424-431, 2016.

[19] Z. C. Li, Y. Jiao, T. W. Deines, Z. J. Pei, C. Treadwell, Rotary ultrasonic machining of ceramic matrix composites: Feasibility study and designed experiments, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, No. 12, pp. 1402-1411, 2005.

[20] M. Emami, *Theoretical and Experimental Investigation of the Effects of Ultrasonic Vibrations and Minimum Quantity Lubrication on Grinding Process of Engineering Ceramics*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, 2013. (In Persian فارسی)

[21] T. Tashiro, J. Fujiwara, Y. Takenaka, Grinding of C/C-SiC composite in dry method, *Towards Synthesis of Micro-/Nano-systems*, London: Springer, pp. 351-352, 2007.

[22] W. Krenkel, *Handbook of Ceramic Composites*, pp. 117-148, Boston: Springer, 2005.

[23] B. Li, C. Li, Y. Zhang, Y. Wang, D. Jia, M. Yang, 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*, Vol. 29, No. 4, pp. 1084-1095, 2016.

[24] W. F. Ding, J. H. Xu, Z. Z. Chen, H. H. Su, Y. C. Fu, Grindability and surface integrity of cast nickel-based superalloy in creep feed grinding with brazed CBN abrasive wheels, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 23, No. 4, pp. 501-510, 2010.

[25] T. Tawakoli, M. J. Hadad, M. H. Sadeghi, Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication - MQL grinding process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 50, No. 6, pp. 521-531, 2010.

[26] M. Emami, M. H. Sadeghi, A. A. D. Sarhan, F. Hasani, Investigating the Minimum Quantity Lubrication in grinding of Al_2O_3 engineering ceramic, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 68, No. 1, pp. 632-643, 2014.

[27] A. Esmaeilzare, H. Gholipour, H. Adibi, S.M. Rezaei, Surface and subsurface damage measurements in zerodur glass-ceramic grinding process and their correlation with surfaceroughness, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 13, pp. 339-344, 2015. (in Persian فارسی)

[28] S. Malkin, C. Guo, *Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives*, Second Edition, pp. 43-74, New York: Industrial Press Inc., 2008.

[29] T. Tawakoli, M. J. Hadad, M. H. Sadeghi, Investigation on minimum quantity lubricant-MQL grinding of 100Cr6 hardened steel using different abrasive and coolant–lubricant types, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 50, No. 8, pp. 698-708, 2010.

[30] G. Boothroyd, W. A. Knight, *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, Third Edition, pp. 82-84, New York: Taylor & Francis group, 2006.