



# Evaluation of Chip Formation Process in the Grinding of GFRP and CFRP

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Khoran M.<sup>1</sup>,  
Azarhoushang B.<sup>2</sup>,  
Amirabadi H.<sup>3</sup>

### How to cite this article

Khoran M, Azarhoushang B, Amirabadi H. Evaluation of chip formation process in the grinding of GFRP and CFRP. Modares Mechanical Engineering. Modares Mechanical Engineering, 2021; 21(12):849-857.

<sup>1</sup> Mechanical Engineering, Esfarayen university of Technology, Esfarayen, Iran.

<sup>2</sup> Department of Engineering, Neyshabur University, Neyshabur, Iran.

<sup>3</sup> Mechanical Engineering, Hochschule Furtwangen University, Tuttlingen, Germany.

### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering, Esfarayen university of Technology, Esfarayen, Iran.

Phone: -

Fax: -

m.khoran@esfarayen.ac.ir

### Article History

Received: March 19, 2021

Accepted: August 16, 2021

ePublished: October 15, 2021

## ABSTRACT

Today, polyether ether ketone composites are widely used in the medical and aerospace industries due to their high strength-to-weight ratio, anti-allergic properties, high buckling resistance and fatigue. Grinding has a high specific energy among traditional cutting processes. Usually, a high portion of energy will convert to heat. Because heat has an important role in polymer grinding, the heat modeling of it is necessary. In addition to the energy of chip formation during material removal, there are other energies such as plowing and friction energy. The contribution of each of these energies affects the efficiency of the process. By theoretical calculating of the cutting energy and comparing it with the experimental specific grinding energy, the portion of chip formation energy versus friction and plowing energy can be calculated. By performing differential scanning calorimetry test and theoretical calculations, the amount of chip formation energy was 0.089 and 0.119 joules per cubic millimeter for GFRP and CFRP, respectively. While the experimental results of grinding showed a minimum specific energy of 2.2 J/mm<sup>3</sup> and 2.4 J/mm<sup>3</sup> for GFRP and CFRP, respectively. This difference indicates the very high portion of plowing energy in the grinding of this material and especially polymeric materials. The percentage of the chip-forming energy that enters the workpiece as heat was calculated to be 27%. Therefore, it can be stated that all energy except 73% of the chip formation energy enters the workpiece.

**Keywords** Polyether Ether Ketone Composite, Grinding specific energy, Chip Formation Energy, Plowing

## CITATION LINKS

[1] Statistical study of surface roughness in turning of peek composites. [2] Investigation of machining behavior of Polyether Ether Ketone in Single grit scratch test. [3] The effects of cryogenic cooling on the grinding process of polyether ether ketone (PEEK). [4] Surface grinding of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) with an internal coolant supplied through grinding wheel. [5] Study of Surface Roughness on Milling Unfilled-polyetheretherketones Engineering Plastics. [6] Effects of Cutter Geometrical Features on Machining Polyetheretherketones (PEEK) Engineering Plastic. [7] Varying CFRP workpiece temperature during slotting: Effects on surface metrics, cutting forces and chip geometry. [8] Examination of the Material Removal of unreinforced, thermoplastic Polymers by Scratch Tests. [9] Physical cutting model of polyetheretherketone composites. [10] Mirror surface grinding characteristics and mechanism of carbon fiber reinforced plastics. [11] Thermal Aspects of Grinding, Part 1, Energy Partition. [12] Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives. [13] Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, and Lapping. [14] PEEK Data sheet. [15] Machining of Polymer Composites.

## ارزیابی انرژی فرایند تشکیل براده در سنگ زنی کامپوزیت با الیاف کربن و شیشه

محمد خوران\*

گروه مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی اسفراین، اسفراین، ایران

حسین امیرآبادی

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه نیشابور، نیشابور، ایران

بهمن آذروشنگ

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فورت وانگن، توتلینگن، آلمان

### چکیده

امروزه کامپوزیت‌های پلی‌اتر کتون به دلیل نسبت استحکام به وزن و سفتی بالا، خواص ضدآلرژیکی، مقاومت بالا در مقابل کماتش و خستگی به وفور در صنایع پزشکی و هوا-فضا مورد استفاده قرار می‌گیرند. سنگ‌زنی دارای انرژی مخصوص بالایی در بین فرایندهای سنتی براده برداری می‌باشد. معمولاً سهم بسیار بالای از انرژی فرایند به گرما تبدیل خواهد شد. با توجه به اینکه حرارت نقش بسیار مهمی را در سنگ‌زنی پلیمرها بازی می‌کند، لزوم مدل‌سازی حرارت آن احساس می‌گردد. علاوه بر انرژی تشکیل براده در حین براده برداری ماده، انرژی‌های دیگری چون شخم‌زنی و اصطکاک نیز وجود دارند. سهم هر یک از این انرژی‌ها در راندمان فرایند تاثیر گذار است. می‌توان با محاسبه انرژی برش و مقایسه آن با انرژی مخصوص سنگ‌زنی بصورت تجربی، سهم انرژی تشکیل براده را در مقابل انرژی اصطکاک و شخم‌زنی محاسبه نمود. با انجام آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی و محاسبات تئوری، مقدار انرژی تشکیل براده برابر  $(\frac{1}{\text{mm}^3}) 0.089$  برای کامپوزیت با الیاف شیشه و  $(\frac{1}{\text{mm}^3}) 0.118$  برای کامپوزیت با الیاف کربن بدست آمد. در صورتی که نتایج تجربی سنگ‌زنی نشان دهنده حداقل انرژی مخصوص  $(\frac{1}{\text{mm}^3}) 0.272$  و  $(\frac{1}{\text{mm}^3}) 0.274$  به ترتیب برای کامپوزیت با الیاف شیشه و کربن بود. این اختلاف نشان دهنده سهم بسیار بالای انرژی شخم‌زنی در سنگ‌زنی این ماده و به طور خاص مواد پلیمری است. سهم انرژی تشکیل براده که به صورت حرارت وارد قطعه‌کار می‌شود ۲۷ درصد محاسبه شد. می‌توان بیان کرد همه انرژی به جز ۲۳ درصد از انرژی تشکیل براده، وارد قطعه‌کار می‌گردد.

**کلیدواژه‌ها:** کامپوزیت پلی‌اتر کتون، انرژی مخصوص سنگ‌زنی، انرژی تشکیل براده، شخم‌زنی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۲۵

\* نویسنده مسئول: m.khoran@esfarayen.ac.ir

### ۱- مقدمه

کامپوزیت ماده‌ی متشکل از دو یا چند ماده غیر همجنس است که منجر به تولید ماده‌ای جدید با استحکام بالاتر از ماده زمینه می‌شود. نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت بالا نسبت به محیط‌های شیمیایی از جمله مزایای کامپوزیت‌ها می‌باشد. کامپوزیت‌های پلیمری به دو گروه مواد تقویت شده با ذرات و تقویت شده با الیاف تقسیم بندی می‌شوند. کامپوزیت پلی‌اترکتون با الیاف شیشه (GFRP) و کربن (CFRP) در گروه مواد تقویت شده با ذرات تقسیم‌بندی می‌شود. پلیمر زمینه (پلی‌اتر کتون) یک

پلیمر ترموپلاستیک می‌باشد. در این کامپوزیت توزیع ذرات در فاز زمینه به صورت تصادفی صورت می‌گیرد. این ذرات به طور کامل خواص کامپوزیت را تحت تاثیر قرار خواهد داد، به طور مثال وجود تقویت کننده منجر به کاهش ضریب سایش و ضریب انبساط حرارتی خواهد شد. این تغییرات خواص، مسلماً قابلیت ماشینکاری این ماده را نیز تغییر می‌دهد. این ماده ترموپلاستیکی توانایی حفظ استحکام تا دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و مقاومت در مقابل عوامل شیمیایی را دارد و در ساخت پمپ، کمپرسور، پیستون، قطعات فضا پیما، اتومبیل، صنایع شیمیایی استفاده می‌گردد. امروزه پیک و کامپوزیت‌های آن در حال جایگزینی با آلومینیوم در صنایع هوایی به دلیل توانایی عملکرد بالا در دمای بالا است [1].

در فرایند سنگ‌زنی از ابزاری به نام چرخ سنگ برای براده برداری استفاده می‌شود. چرخ سنگ دارای سه بخش، دانه‌های ساینده (وظیفه براده برداری)، چسب (نگهدارنده ذرات ساینده و وظیفه شکل‌دهی به چرخ سنگ)، خلل و فرج (انتقال مواد خنک‌کننده به منطقه برش و نیز انتقال براده) است. در سنگ‌زنی نه تنها شکل، اندازه و توزیع لبه برنده بلکه شرایط خلل و فرج سطح نیز نقش مهمی را ایفا می‌کند. دانستن میزان حرارت ورودی به قطعه‌کار در حین تشکیل براده و درصد آن در مدل‌سازی‌های حرارتی و نیز تعیین انرژی برداشت براده بسیار قابل اهمیت است. حرارت تولیدی تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر زبری سطح و پر شدن خلل و فرج چرخ سنگ (بارگیری) به علت پایین بودن درجه حرارت ذوب پلیمرها دارد. شکل ۱ تصویری از یک پلیمر سنگ خورده را نشان می‌دهد که نقاط ذوب شدگی پلیمر در آن کاملاً مشهود است.

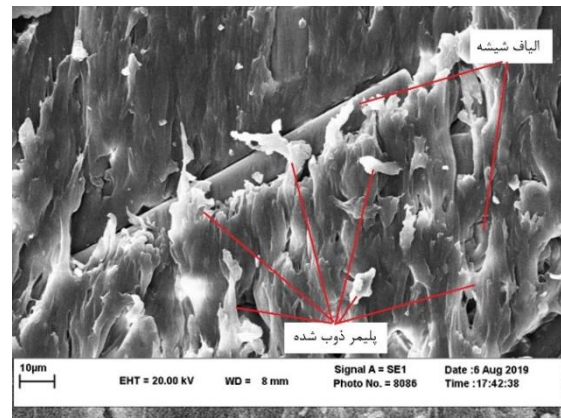
خوران و همکاران [2] آزمون تک دانه ساینده پلیمر پیک را مورد مطالعه قرار دادند. آنها مشخص نمودند مکانیزم براده برداری حاکم، مکانیزم مواد چکش‌خوار بود و حداقل انرژی مخصوص (در آزمون تک دانه ساینده) به مقدار  $2/5 \text{ J/mm}^3$  میل می‌کند. آنها در پژوهشی دیگر تاثیر خنک‌کننده برودتی بر میزان حرارت حین فرایند سنگ‌زنی پیک را مورد مطالعه قرار داد. مشخص نمود دما نقش تاثیر گذاری بر مشخصات خروجی سنگ‌زنی دارد و خنک‌کننده برودتی به عنوان یک روش موثر در کاهش دما، باعث بهبود یکپارچگی سطح و افزایش نیروی سنگ‌زنی خواهد شد [3]. ساساهارا و همکاران [4] با مطالعه سنگ‌زنی کامپوزیت با الیاف کربن مشخص نمودند که حرارت نقش تعیین‌کننده‌ی در خروجی‌های سنگ‌زنی دارد. بنابراین روش‌های مختلفی را برای کاهش حرارت در حین سنگ‌زنی این ماده مورد مطالعه قرار دادند. به علت بالا رفتن حرارت از دمای شیشه‌ای پلیمر در ناحیه ماشینکاری، نقاط سوختگی و نرم شدگی در سطح ماشینکاری شده مشاهده می‌شود. نرم شدن پلیمرها حین ماشینکاری، ایجاد پلیسه و تمیز کردن سطح را تحت تاثیر قرار می‌دهد [5].

پلیمرها نسبت به فلزات دارد زیرا تغییر شکل‌های الاستیک آزاد شده در این مواد بسیار بیشتر از فلزات است [10]. مقدار انرژی‌ای که فقط صرف تغییر شکل براده در فولادها می‌شود توسط مالکین محاسبه شد [11]. او اثبات نمود ۰/۴۵ درصد انرژی تشکیل براده صرف تغییر شکل پلاستیک ماده و شکل‌گیری براده می‌شود و مابقی آن به حرارت تبدیل می‌شود. بیشتر انرژی تولید شده در اثر اصطکاک، سایش و همچنین مقدار انرژی صرف شده در اثر پدیده شخم‌زنی به صورت حرارت وارد قطعه‌کار می‌شود [12]. برای مدل‌سازی حرارت، دانستن انرژی تشکیل براده ضروری است. با در نظر گرفتن استحکام پایین کامپوزیت‌های پلیمری (در مقابل فلزات) بدیهی است که مقدار شخم‌زنی و لغزش دانه ساینده بر روی قطعه‌کار بالا می‌باشد. این پژوهش پیش‌زمینه مطالعه جامع رفتار حرارتی سنگ‌زنی کامپوزیت پیک می‌باشد. با مطالعه پیشینه پژوهش انجام شده مشخص شد تحقیقاتی بر روی سنگ‌زنی این ماده، مدل‌سازی حرارت و بدست آوردن انرژی‌های تشکیل براده صورت نگرفته است. لذا لزوم مطالعه و محاسبه انرژی تشکیل براده در فرایند سنگ‌زنی این ماده با هدف مدل‌سازی حرارتی احساس می‌گردد. به این منظور، سنگ‌زنی ماده به صورت تجربی انجام شد. محاسبه انرژی مخصوص سنگ‌زنی، محاسبه انرژی مورد نیاز تا نقطه ذوب، محاسبه انرژی تشکیل براده و سهم حرارت ورودی به قطعه‌کار (کامپوزیت پیک با الیاف شیشه و کربن) از مواردی است که تا کنون بررسی نگردیده و در این مقاله به آن پرداخته می‌شود.

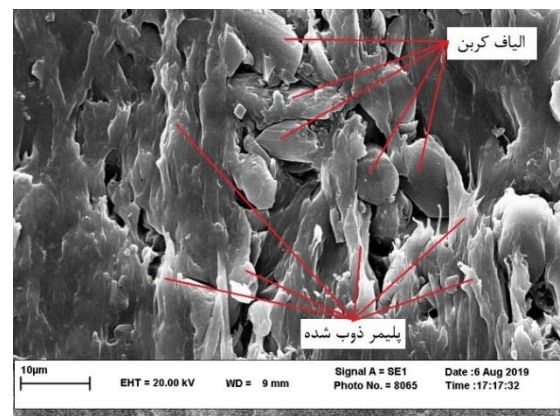
## ۲- مواد و تجهیزات

### ۲-۱- تجهیزات و ابزارها

نتایج آنالیز طیف سنجی انرژی پرتو ایکس در شکل ۱ آورده شده است. از ماشین سنتر سه محوره موگا (Muga) برای انجام آزمون‌های تجربی استفاده شد. حداکثر سرعت دورانی این ماشین ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و حداکثر پیشروی ۱۲ متر بر دقیقه می‌باشد. دستگاه تیزکاری دورانی (Rotary Dressing) به ضخامت دیسک ۰/۸ و قطر ۱۰۸ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. تعداد پاس تیزکاری ۳ مرتبه و هر بار ۱۰ میکرومتر بوده است. در شکل ۲ نمایی از چیدمان تجهیزات آزمون‌های تجربی و شماتیک فرایند آورده شده است. چرخ سنگی با کد 10C100H12VQ به قطر ۳۰ میلی‌متر از جنس کاربید سیلیسیم مورد استفاده قرار گرفت. از میکروسکوپ الکترونی مدل LEO 1450VP برای مطالعه سطح قطعه‌کار استفاده گردید. برای سنجش نیروی سنگ‌زنی از دینامومتر کیستلر 9257B با توان اندازه‌گیری  $\pm 5$  کیلونیوتن در جهت x و y و -۵ تا +۱۰ کیلونیوتن در جهت z استفاده گردید. برای بررسی‌های حرارتی پلیمر و محاسبه تغییرات آنتالپی از دستگاه گرماسنج روبشی تفاضلی METTLER TOLEDO کشور سوئیس با سرعت دماهی ۲۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه در اتمسفر هوا استفاده گردیده است.



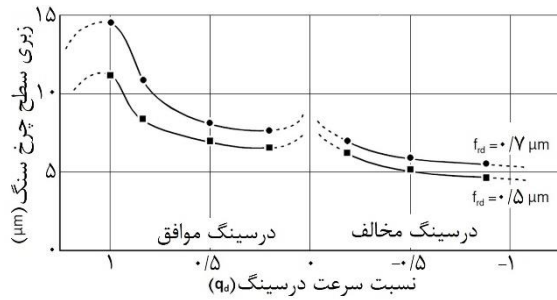
(الف)



(ب)

شکل ۱) ذوب سطح قطعه‌کار کامپوزیت (الف) الیاف شیشه، (ب) الیاف کربن

ایزماشا پیشنهاد داد از ابزار تیزتر برای ماشینکاری پلیمرها و کامپوزیت‌های زمینه پلیمری استفاده شود، زیرا منجر به ایجاد تنش برشی بهینه در پلاستیک خواهد شد، که این موضوع اجازه می‌دهد بتوان از نرخ پیشروی بالاتری استفاده کرد. تنش برشی بالا، نرخ کرنش پلیمر را (به علت داشتن کرنش الاستیک بالا و رفتار ترموپلاستیک) بالا می‌برد [6]. اشورت و همکاران [7] به مطالعه رفتار حرارتی کامپوزیت حین ماشینکاری پرداختند. مشخص شد عیب‌های حرارتی منجر به جهت‌گیری الیاف، تغییر رنگ ماتریس، افزایش بیرون زدگی الیاف و عیب‌های نهفته خواهد شد. کامپلاد و بیرمن [8] با انجام آزمون تک دانه ساینده بر روی پلیمر پیک به این نتیجه رسیدند که مطالعات حرارتی برای این ماده ضروری است. داویم [9] تاثیر وجود الیاف تقویت کننده در پلیمر پلی اتر اترکتون را بر پارامترهای ماشینکاری از قبیل نسبت ضخامت براده (R)، تغییر شکل براده (ε)، زاویه اصطکاک (ρ)، زاویه برش (φ)، تنش نرمال (σ) و تنش برشی (τ) در صفحه برش در حالت برش متعامد مورد بررسی قرار داد. مشخص شد تمام موارد ذکر شده به غیر از تنش برشی و تغییر شکل براده، بالاتر از پلیمر خالص است. بدلیل کم بودن استحکام پلیمرها و تغییر شکل آنها حین فرایند، پدیده اسپارک اوت (spark-out) نقش بسیار مهمی در سنگ‌زنی



شکل ۳) تاثیر نسبت سرعت درسینگ بر زبری سطح چرخ سنگ [13]

جدول ۱) خواص کامپوزیت با الیاف شیشه و کربن [14]

پارامترها	CFRP	GFRP
دانشیه (gr/cm <sup>3</sup> )	۱/۴	۱/۵۱
سختی (شور D)	۹۱	۸۹
استحکام کششی (MPa)	۱۲۰	۸۰
تغییر طول تا شکست (%)	۷	۵
مدول یانگ (GPa)	۶/۵	۶
ضریب انتقال حرارت (W/m.°K)	۰/۹۲	۰/۴۲۹
دمای ذوب (°C)	۳۴۳	۳۴۳
ضریب انبساط خطی (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	۲۵	۳۰
دمای استفاده دراز مدت (°C)	-۲۰.....۲۵۰	-۲۰.....۲۵۰

جدول ۲) پارامترهای طراحی آزمایش

پارامترها	مقادیر
سرعت برشی (m/s)	۱۵، ۱۰، ۵
سرعت پیشروی (mm/min)	۳۰۰۰، ۲۰۰۰، ۱۰۰۰
عمق برش (μm)	۵۰، ۳۰، ۱۰
نسبت سرعت درسینگ q <sub>d</sub>	۰/۹، ۰/۳، -۰/۳

این آزمون‌ها به صورت سنگ زنی موافق و به صورت خشک اجرا شد. پارامترهای دیگر سنگ زنی برای تمامی آزمایش‌ها ثابت بود. نسبت سرعت درسینگ از رابطه ۱ قابل محاسبه است. مقادیر منفی نسبت سرعت درسینگ نشان دهنده حالت درسینگ مخالف و مقادیر مثبت نشان دهنده درسینگ موافق است.

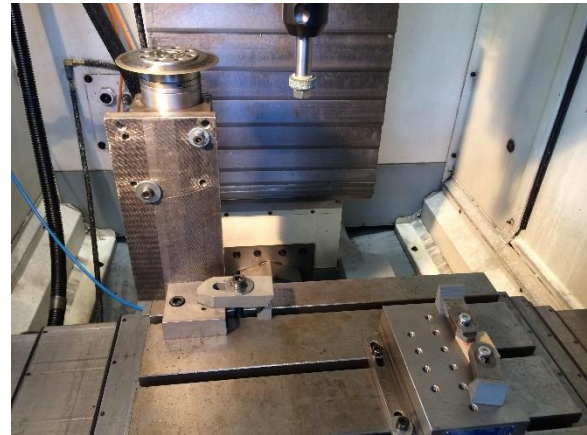
$$q_d = \pm \frac{v_R}{v_S} \quad (1)$$

به طوری که  $v_R$  سرعت برشی چرخ درسینگ بر حسب (m/s) و  $v_S$  نشان دهنده سرعت چرخ سنگ بر حسب (m/s) است.

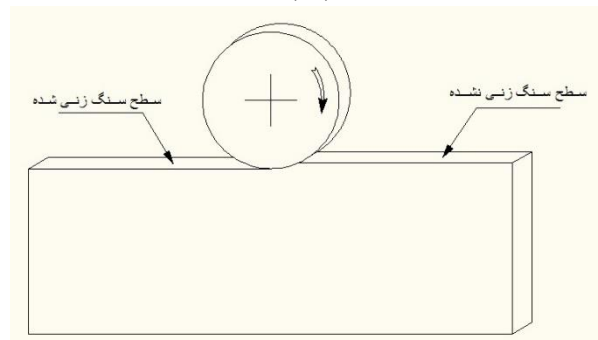
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- آزمون تجربی سنگ زنی

آنچه در انجام آزمون تجربی سنگ زنی مورد نیاز است محاسبه انرژی مخصوص لازم برای براده برداری است. به انرژی لازم جهت برداشت حجم واحدی از ماده، انرژی مخصوص گفته می‌شود. انرژی مخصوص این فرایند از دیگر فرایندهای ماشینکاری سنتی براده برداری بیشتر است، به این معنی که برای برداشت حجم واحدی از براده توسط این فرایند، انرژی بیشتری نسبت به دیگر



الف)



ب)

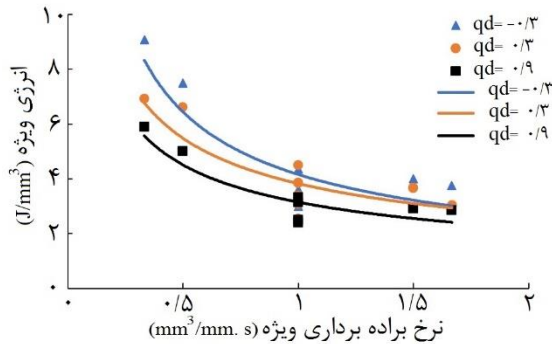
شکل ۲) چیدمان تجهیزات انجام آزمایش تجربی الف) چیدمان تجهیزات سنگ زنی ب) شماتیک سنگ زنی

#### ۲-۲- ماده

برای انجام آزمون‌های تجربی، نمونه‌های آزمایش از میلگردی به قطر ۶ سانتی‌متر و به ضخامت ۶/۵ میلی‌متر بریده و به ابعاد ۴۰×۴۰ میلی‌متر آماده گردید و سنگ زنی تخت بر روی سطح ۶/۵ میلی‌متر انجام گرفت. خواص این مواد در جدول ۱ آورده شده است. کامپوزیت‌های مورد مطالعه دارای ۳۰ درصد ذرات با توزیع تصادفی می‌باشد. این ماده از شرکت قوشلینگ (Röchling) با برند تجاری سوستاپیک (SustaPEEK) تهیه گردید.

#### ۲-۳- طراحی آزمایش

فرایند سنگ زنی یکی از روش‌های ماشینکاری می‌باشد که دارای تعداد زیادی پارامترهای ورودی قابل تنظیم است. در بین آنها سرعت برشی، سرعت پیشروی، عمق برش و نسبت سرعت درسینگ (Dressing Speed ratio (q<sub>d</sub>)) با توجه به تجربه و آزمون‌های اولیه صورت گرفته توسط نویسندگان و مطالعات انجام شده انتخاب گردید. در آزمون‌های اولیه مشخص شد سرعت برشی و نسبت سرعت درسینگ (رابطه ۱) دارای اهمیت بالاتری هستند، لذا در انتخاب آزمون‌ها به این دو مورد بیشتر توجه شد. آزمون‌ها به گونه‌ای انتخاب گردید که بتوان تمامی حدود آزمون (از کمترین مقدار تا بیشترین مقدار) را در خروجی مورد مطالعه قرار داد تا نرخ‌های براده برداری مختلفی ایجاد گردد.



شکل ۴) نمودار تغییرات انرژی مخصوص سنگ‌زنی با تغییر در نرخ براده برداری ویژه GFRP

از این نقطه به بعد هر چه نرخ براده برداری مخصوص بیشتر شود، مقدار تغییرات انرژی مخصوص بسیار کم خواهد بود.

### ۳-۲- محاسبه انرژی خالص برش

رابطه ۳ نشان دهنده انرژی سنگ‌زنی کل است که خود شامل سه انرژی تشکیل براده، انرژی شخم‌زنی و انرژی لغزش می‌باشد [11].

$$e = e_{ch} + e_{pl} + e_{sl} \quad (3)$$

جاییکه  $e_{ch}$  انرژی تشکیل براده،  $e_{pl}$  انرژی شخم‌زنی و  $e_{sl}$  انرژی لغزش است.

مجموع انرژی تشکیل براده و انرژی شخم‌زنی انرژی برش نامیده می‌شود. با افزایش ضخامت براده تغییر شکل نیافته، انرژی شخم‌زنی کاهش می‌یابد، در نتیجه انرژی برش کاهش خواهد یافت. علاوه بر ضخامت، مقدار انرژی شخم‌زنی و لغزش به جنس قطعه-کار نیز بستگی دارد. آنچه در این پژوهش مورد نظر است و محاسبه آن اهمیت دارد انرژی تشکیل براده است، منظور از انرژی تشکیل براده، مفهوم کلاسیک انرژی در برش است. معمولاً حدود ۷۵ درصد از انرژی کل تشکیل براده را انرژی برشی و ۲۵ درصد باقی مانده را انرژی اصطکاک تشکیل می‌دهد.

تحت شرایط بی دررو، میزان انرژی که صرف تغییر شکل پلاستیک می‌شود و به عنوان ورودی فرایند سنگ‌زنی است محدود به انرژی جذب شده برای تبدیل حجم واحد از براده از حالت جامد تا نقطه ذوب آن ماده است. برای محاسبه مقدار انرژی جذب شده توسط ماده تا نقطه ذوب، از تغییرات آنتالپی ماده از دمای محیط تا نقطه ذوب استفاده می‌شود. آنالیز حرارتی DSC برای پلیمرها می‌تواند تغییرات آنتالپی این ماده را مشخص کند. شکل ۵ نمودار تغییرات آنتالپی ماده که با انجام آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی بدست آمده را نشان می‌دهد.

از نمودار شکل ۵ مشخص است تغییرات آنتالپی ماده از دمای محیط تا نقطه ذوب برای کامپوزیت با الیاف شیشه برابر  $(\frac{J}{g})$  و برای کامپوزیت با الیاف کربن برابر  $(\frac{J}{g})$  است. با توجه به وزن مخصوص کامپوزیت‌ها که  $(\frac{gr}{cm^3})$  برای الیاف شیشه و  $(\frac{gr}{cm^3})$  برای کامپوزیت با الیاف کربن است،

فرایندهای ماشینکاری صرف می‌شود. انرژی مخصوص از رابطه ۲ محاسبه می‌گردد [12].

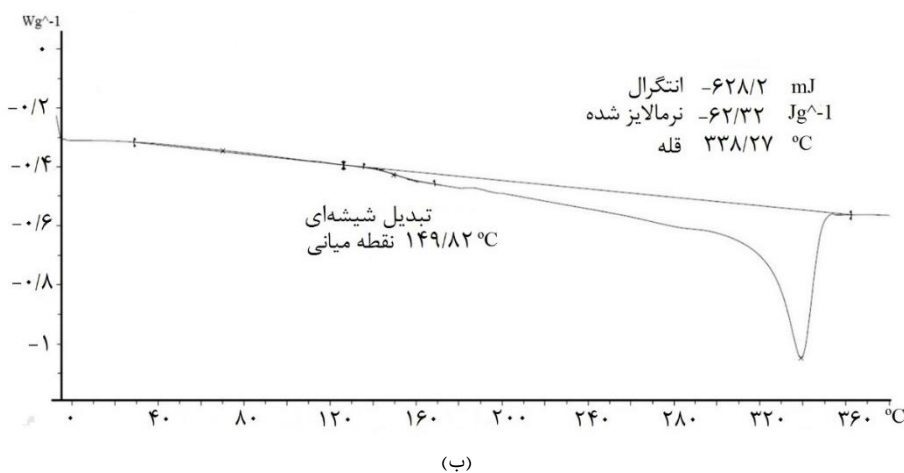
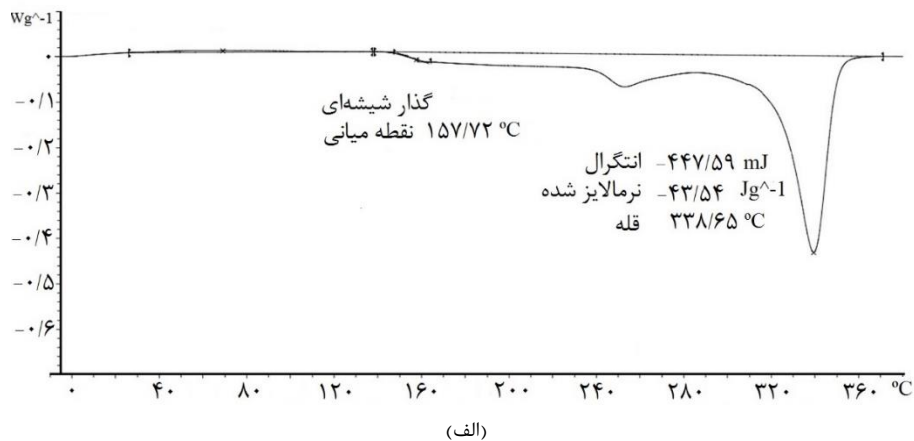
$$e_c = \frac{F_t \cdot v_c}{Q_w} \quad (2)$$

که در آن  $e_c$  انرژی مخصوص بر حسب  $J/mm^3$ ،  $v_c$  سرعت برشی بر حسب  $(mm/s)$ ،  $Q_w$  نرخ براده برداری بر حسب  $(mm^3/s)$  و  $F_t$  نیروی مماسی بر حسب  $(N)$  است.

رابطه انرژی مخصوص برحسب نرخ براده برداری مختلف ماده کامپوزیت با الیاف شیشه در شکل ۳ نشان داده شده است. نرخ براده برداری مخصوص از تقسیم نرخ براده برداری به ضخامت چرخ سنگ محاسبه می‌گردد. در این پژوهش چون ضخامت چرخ سنگ بیشتر از ضخامت قطعه کار می‌باشد، نرخ براده برداری مخصوص از تقسیم نرخ براده برداری به ضخامت قطعه کار محاسبه می‌گردد. چون تعداد آزمون سنگ‌زنی واقعی انجام شده برای کامپوزیت با الیاف کربن از مقدار مشخصی که بتواند تغییرات درست انرژی مخصوص را نشان دهد کمتر بود، لذا نویسندگان از آوردن نمودار آن خودداری نمودند و فقط نمودار مربوط به کامپوزیت با الیاف شیشه آورده شده و مورد تحلیل قرار گرفته است. شیب تغییرات انرژی مخصوص در نرخ‌های براده برداری کم، بسیار زیاد است و با زیاد شدن نرخ براده برداری، انرژی مخصوص به مقدار کمتری میل می‌کند، زیرا نرخ براده برداری مخصوص کم به معنی ضخامت براده تغییر شکل نیافته کمتر است. کم بودن ضخامت براده منجر به شخم‌زنی و لغزش بالاتر و نسبت کمتر برش در فرایند براده برداری خواهد شد.

نسبت سرعت درسینگ ۰/۳- موجب کند شدن دانه‌های ساینده چرخ سنگ و توپوگرافی صاف‌تری خواهد شد، در نتیجه اصطکاک بیشتری بین دانه و قطعه کار به وجود خواهد آمد و نیروی ماشینکاری بالاتری برای برداشت براده (به علت وجود دانه‌های کند) نیاز است. با تغییر استراتژی درسینگ از حالت مخالف به موافق دانه‌ها تیزتر شده و نیروها کاهش خواهد یافت. افزایش نسبت درسینگ از ۰/۳ به ۰/۹ نیز منجر به ایجاد دانه‌های به مراتب تیزتر و کاهش بیشتر نیرو می‌شود. دانه ساینده تیز، نفوذ راحت‌تری به درون قطعه کار دارد و در نتیجه نیاز به نیروی براده برداری کمتری خواهد داشت.

از نمودار شکل ۴ مشخص است، انرژی مخصوص در نسبت سرعت درسینگ ۰/۹ کمترین مقدار را دارد. اختلاف بین انرژی‌های مخصوص با در نظر گرفتن تغییر در نسبت سرعت درسینگ، در نرخ براده برداری‌های کم بسیار قابل ملاحظه است ولی در نرخ‌های براده برداری بالا تاثیر کمتری دارد. هر چه نسبت سرعت درسینگ منجر به تولید دانه‌های تیزتر گردد، انرژی مخصوص کمتری برای براده برداری نیاز است. انرژی مخصوص در عمق‌های برشی بالاتر به مقدار  $J/mm^3$  ۲/۲ میل می‌کند.

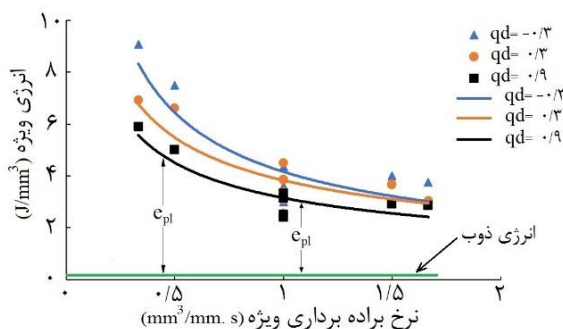


شکل ۵) تغییرات آنتالپی در آزمون DSC کامپوزیت، الف) پلی اتراترکتون با الیاف شیشه، ب) پلی اتراترکتون با الیاف کربن

ویسکوز این ماده و همچنین تغییر شکل ماده در اثر نیرو به جای تشکیل براده، مقادیر بدست آمده برای میزان انرژی شخم‌زنی منطقی است.

جدول ۳) حداکثر انرژی مخصوص تشکیل براده

نوع کامپوزیت	حداکثر انرژی تشکیل براده ( $\frac{J}{mm^3}$ )
CFRP	۰/۱۱۸
GFRP	۰/۰۸۹



شکل ۶) رابطه بین انرژی مخصوص سنگ‌زنی و انرژی شخم‌زنی در کامپوزیت با الیاف شیشه

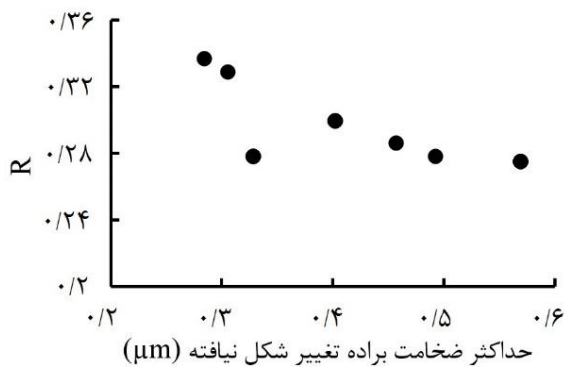
میزان انرژی ( $\frac{J}{cm^3}$ ) ۶۷ و ( $\frac{J}{cm^3}$ ) ۸۸/۵ به ترتیب برای کامپوزیت با الیاف شیشه و الیاف کربن بوده است که به عبارت دیگر به ترتیب ( $\frac{J}{mm^3}$ ) ۰/۰۶۷ و ( $\frac{J}{mm^3}$ ) ۰/۰۸۸۵ خواهد بود. از آنجایی که انرژی مخصوص برشی ۷۵ درصد انرژی مخصوص کل تشکیل براده را شامل می‌شود، بنابراین جدول ۳ مقادیر حداکثر انرژی مخصوص تشکیل براده برای هر یک از دو کامپوزیت را به نمایش می‌گذارد. با انجام آزمون‌های تجربی سنگ‌زنی می‌توان حداقل انرژی ویژه را محاسبه نمود. این پارامتر در بازه تست‌های انجام شده، ۲/۲ ( $\frac{J}{mm^3}$ ) برای کامپوزیت شیشه می‌باشد. لازم به ذکر است که حداقل انرژی در حداکثر نرخ براده برداری ویژه و شرایط درسینگ دورانی موافق (مقادیر مثبت درسینگ) بدست خواهد آمد.

مشخص است تنها مقدار بسیار کمی از انرژی ورودی صرف برش می‌شود و مکانیزم دیگری که انرژی بسیار بالایی را به خود اختصاص داده است، شخم‌زنی می‌باشد. لذا می‌توان بیان نمود این اختلاف نشان‌دهنده سهم بسیار بالای انرژی شخم‌زنی در سنگ‌زنی این ماده است.

باید ذکر شود که شخم‌زنی در تمام مراحل اول تا سوم سنگ‌زنی اتفاق خواهد افتاد. این اختلاف در شکل ۶ مشخص شده است. با در نظر گرفتن جنس مورد مطالعه، با توجه به بالا بودن جریان

می‌آید.  $r$  نسبت پهنا به ضخامت میانگین براده است. در این پژوهش با مشاهده براده‌ها مقدار  $r$ ،  $\gamma$  در نظر گرفته شده است. با جایگذاری رابطه‌های ۸ و ۷ و ۶ و ۵ در رابطه ۴، مقدار  $R$  محاسبه می‌گردد. شکل ۷ رابطه بین  $R$  و ضخامت براده تغییر شکل نیافته را نشان می‌دهد. سهم حرارت ورودی به قطعه‌کار ( $R$ ) تقریباً مقداری بین ۰/۲۷ تا ۰/۳۳ است. منطقی‌تر هرچه ضخامت براده تغییر شکل نیافته بیشتر شود این سهم به مقدار کمتری میل می‌کند. برای ادامه محاسبات، مقدار  $R$  برابر مقدار متوسط آن یعنی ۰/۳ در نظر گرفته شد. به عبارت دیگر ۳۰ درصد از انرژی برشی در حین تشکیل براده در قالب حرارت وارد قطعه‌کار می‌شود. این ضریب با توجه به کم بودن ضریب انتقال حرارت کامپوزیت مورد مطالعه منطقی است. با فرض عدم انتقال انرژی اصطکاک بین ابزار و براده به قطعه‌کار و با در نظر گرفتن این نکته که انرژی برشی ۷۵ درصد از انرژی تشکیل براده را شامل می‌شود. سهم انرژی تشکیل براده که به صورت حرارت وارد قطعه‌کار می‌گردد برابر ۰/۲۲/۵ = ۳×۰/۷۵ است.

با مطالعه پیشینه پژوهش مشخص شد برای در نظر گرفتن خطاها و افت‌های احتمالی، ضریب تصحیح ۱/۲ در محاسبات لحاظ شود که عدد  $27 = 1/2 \times 22/5$  بدست خواهد آمد و فرض بر ثابت بودن آن است. لذا همه انرژی ناحیه تماس به جز ۷۳ درصد از انرژی تشکیل براده وارد قطعه‌کار می‌شود. کل حرارت تولیدی در ناحیه سنگ‌زنی بین چرخ سنگ، قطعه‌کار، براده و سیال خنک کننده تقسیم می‌گردد. کسر شار حرارتی هر یک از اجزای شرکت کننده در سنگ‌زنی برابر جمع میزان  $R_w$  (کسر شار حرارتی به قطعه‌کار)،  $R_s$  (کسر شار حرارتی به چرخ سنگ)،  $R_{ch}$  (کسر شار حرارتی به براده)،  $R_{kss}$  (کسر شار حرارتی به مایع خنک کننده) است که از رابطه ۹ محاسبه می‌گردد [13]. لازم به ذکر است در محاسبات صورت گرفته در این پژوهش از بحث انتقال حرارت بوسیله تشعشع بدلیل مقدار بسیار کم آن و همچنین بدلیل انجام آزمون‌ها در حالت خشک از پارامترهای انتقال حرارت به محیط صرفنظر خواهد شد.



شکل ۷ سهم انرژی ورودی بر حسب تغییرات در ضخامت براده تغییر شکل نیافته در کامپوزیت با الیاف شیشه

$$R_w + R_s + R_{ch} + R_{kss} = 1 \quad (9)$$

تفاوت اندک بین انرژی‌های تشکیل براده در بین هر دو ماده، نشان دهنده بالا بودن انرژی تشکیل براده در کامپوزیت با الیاف کربن می‌باشد که بدلیل استحکام بالا و نیز ضریب انتقال حرارت بالاتر آن نسبت به کامپوزیت با الیاف شیشه است.

### ۳-۳- محاسبه درصد انرژی تشکیل براده

انرژی صرف شده در فرایند با دمای ایجاد شده در ناحیه سنگ‌زنی رابطه مستقیم دارد. باید در نظر داشت فرایند سنگ‌زنی دارای سرعت برشی بالاتری است. لذا این فرایند، یک فرایند بی دررو در نظر گرفته می‌شود. در مدل‌سازی‌ها معمولاً ساده‌سازی‌هایی و فرض‌های انجام خواهد گرفت. لذا فرض بر این است که کل انرژی به غیر از انرژی شکل‌گیری براده به حرارت تبدیل می‌گردد (معادله ۳). انرژی تشکیل براده در خود انرژی شخم‌زنی و غیره را نیز دارد. مالکین راه حل مناسبی را برای محاسبه مقدار انرژی که فقط صرف تغییر شکل براده می‌شود ارائه داده است [11]. در این پژوهش از این رویه استفاده خواهد شد. آوت واتر و شاو سهم انرژی ورودی به قطعه‌کار را با محاسبه مقدار  $R$  مشخص نمودند.

$$R = \frac{0.665 \cot \theta}{\sqrt{L} + 0.665 \cot \theta} \quad (4)$$

$$L = \frac{v_c l}{2\alpha} \quad (5)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{r \cos \alpha}{1 - r \sin \alpha} \right) \quad (6)$$

در معادلات بالا  $R$  سهم حرارتی،  $\theta$  زاویه صفحه برش،  $l$  طول منبع حرارتی،  $v_c$  سرعت برشی چرخ سنگ،  $\alpha$  موجود در رابطه  $L$ ، ضریب نفوذ حرارتی که برای کامپوزیت پیک با الیاف شیشه برابر  $(\text{mm}^2/\text{s})$  ۰/۰۸۵ و کامپوزیت با الیاف کربن  $(\text{mm}^2/\text{s})$  ۰/۱۲۵ است [15].  $L$  که پارامتر بدون بعدی است که بستگی به هندسه و ضریب نفوذ حرارتی دارد، است.  $r$  نسبت ضخامت براده که با انجام آزمون تجربی، ۰/۶۲ برای کامپوزیت با الیاف شیشه و ۰/۶ برای کامپوزیت با الیاف کربن به دست آمده است.  $\alpha$  موجود در محاسبه زاویه صفحه برش مقدار زاویه براده است. مقدار زاویه براده در سنگ‌زنی معمولاً ۶۰- درجه در نظر گرفته می‌شود [11]. با داشتن زاویه براده و نسبت ضخامت براده، زاویه صفحه برش برابر ۱۱/۴ درجه خواهد بود. مقدار طول منبع حرارتی را می‌توان با داشتن زاویه صفحه برش و مقدار ضخامت براده تغییر شکل نیافته از معادله ۷ محاسبه نمود [11].

$$l = \frac{h_{cu}}{2 \sin \theta} \quad (7)$$

$h_{cu}$  ضخامت براده تغییر شکل نیافته حداکثر است که از رابطه ۸ محاسبه می‌گردد [12].

$$h_{cu, \max} = \left[ \frac{4}{C \cdot r} \left( \frac{v_f}{v_s} \right) \left( \frac{a_e}{d_s} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

$v_f$  سرعت پیشروی،  $v_s$  سرعت چرخ سنگ،  $a_e$  عمق بار و  $d_s$  قطر معادل چرخ سنگ می‌باشد.  $C$  نشان دهنده تعداد دانه‌های فعال است که با تهیه تصویر از سطح چرخ سنگ و ساده سازی بدست

است. بالا بودن انرژی تشکیل براده در کامپوزیت با الیاف کربن بدلیل استحکام بالا و نیز ضریب انتقال حرارت بالاتر آن نسبت به کامپوزیت با الیاف شیشه می‌باشد. اختلاف معنادار بین انرژی تشکیل براده و مقدار انرژی مخصوص سنگ‌زنی از آزمون سنگ‌زنی واقعی نشان دهنده سهم بسیار بالای انرژی شخم‌زنی در مقابل انرژی برش خالص در این مواد است. میزان سهم انرژی تشکیل براده که در قالب حرارت وارد قطعه‌کار می‌شود برای هر دو ماده حدود ۲۷ درصد بدست آمد. لذا می‌توان بیان نمود همه انرژی به جز ۷۳ درصد از انرژی تشکیل براده وارد قطعه‌کار می‌گردد.

**تاییدیه اخلاقی:** نویسندگان اظهار می‌دارند که این مقاله با رعایت کامل اصول اخلاق پژوهشی نگارش گردیده است.

**تعارض منافع:** تمامی مطالب ذکر شده در متن این نوشتار توسط نویسندگان انجام شده و هیچ موسسه و یا فردی در تهیه آن نقش نداشته است.

**سهم نویسندگان:** سهم هر یک از نویسندگان به‌صورت مساوی بوده است. محمد خوران (نویسنده اول و نویسنده مسئول)، نگارنده مقاله، پژوهشگر اصلی و مسول مکاتبات؛ حسین امیرآبادی (نویسنده دوم) و بهمن آذرهوشنگ (نویسنده سوم)، تامین کننده تجهیزات، روش‌شناس، پژوهشگر کمکی، تایید کنندگان علمی بحث.

**منابع مالی:** تمامی منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است.

#### منابع

- 1- Petropoulos G, Mata F, Davim JP. Statistical study of surface roughness in turning of peek composites. *Materials & Design*. 2008;29(1):218-23.
- 2- Khoran M, Azarhoushang B. Investigation of machining behavior of Polyether Ether Ketone in Single grit scratch test. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020;6(9):54-62.
- 3- Khoran M, Amirabadi H, Azarhoushang B. The effects of cryogenic cooling on the grinding process of polyether ether ketone (PEEK). *Journal of Manufacturing Processes*. 2020;56:1075-87.
- 4- Sasahara H, Kikuma T, Koyasu R, Yao Y. Surface grinding of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) with an internal coolant supplied through grinding wheel. *Precision Engineering*. 2014;38(4):775-82.
- 5- Izamshah R, Azam MA, Hadzley M, Ali MM, Kasim MS, Aziz MA. Study of surface roughness on milling unfilled-polyetheretherketones engineering plastics. *Procedia Engineering*. 2013;68:654-60.
- 6- Izamshah R, Husna N, Hadzley M, Amran M, Shahir M, Amri M. Effects of cutter geometrical feature on machining polyetheretherketone (PEEK) engineering plastic. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2014;6:863-72.
- 7- Ashworth S, Fairclough JP, Sharman AR, Meredith J, Takikawa Y, Scaife R, Kerrigan K. Varying CFRP workpiece temperature during slotting: Effects on surface metrics, cutting forces and chip geometry. *Procedia CIRP*. 2019;85:37-42.

$$R_w = \frac{q_w}{q_t} \quad (10)$$

در رابطه بالا  $q_w$  شار حرارتی ورودی به قطعه‌کار و  $q_t$  شار حرارتی کل است.

با توجه به محاسبات انجام گرفته در این بخش، مشخص شد کل شار حرارتی ناحیه سنگ‌زنی به غیر از ۷۳ درصد از انرژی تشکیل براده وارد قطعه‌کار می‌گردد لذا می‌توان سهم انرژی ورودی به قطعه‌کار را به صورت زیر بیان کرد.

$$\varepsilon = \frac{0.23e_{ch} + e_{pl} + e_{sl}}{e} = \frac{e - 0.73e_{ch}}{e} \quad (11)$$

$$e_c = \frac{F_t \cdot v_s}{Q_w} \quad (12)$$

که در آن  $\varepsilon$  نسبت حرارت تولیدی است که وارد قطعه‌کار می‌شود،  $e$  انرژی کل سنگ‌زنی،  $e_{ch}$  انرژی تشکیل براده که برای کامپوزیت با الیاف شیشه برابر  $(\frac{1}{\text{mm}^3})$  و کامپوزیت با الیاف کربن  $(\frac{1}{\text{mm}^3})$  بوده است. ضریب ۷۳ درصد محاسبه شده برای کامپوزیت با الیاف شیشه و کربن برای فلزات (انواع مختلف فولادها) ۴۵ درصد محاسبه شده است. کم بودن مقدار حرارت ورودی به قطعه‌کار از محل تشکیل براده را می‌توان به دلیل پایین بودن ضریب انتقال حرارت کامپوزیت پیک و نیز زیاد بودن تغییر شکل‌های الاستیک و پلاستیک حین تشکیل براده دانست.

#### ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به بالا بودن حرارت تولیدی در فرایند سنگ‌زنی و نیز نقش بسیار با اهمیت و کلیدی حرارت در ماشینکاری به‌خصوص سنگ‌زنی کامپوزیت‌های پلیمری، لذا لزوم مدل‌سازی حرارت آن احساس می‌گردد. از سوی دیگر لازمه مدل‌سازی، محاسبه ضرایب مدل‌سازی و بررسی بنیادی فرایند تشکیل براده در سنگ‌زنی است. در این پژوهش سرعت برشی، پیشروی، عمق برش، نسبت سرعت درسینگ به عنوان ورودی انتخاب گردید تا بتوان با محاسبات تحلیلی مقادیر انرژی برش خالص و درصد انرژی تشکیل براده را مورد کنکاش قرار داد. مشخص شد عمق برش حداکثر تأثیر را بر نیروی سنگ‌زنی دارد، در صورتی که پیشروی حداقل تأثیر را داشت. لذا پیشنهاد می‌شود، برای افزایش نرخ براده برداری سرعت پیشروی افزایش یابد. تغییر در نسبت سرعت درسینگ از مخالف به موافق موجب کاهش نیروی سنگ‌زنی خواهد شد، لذا حداقل انرژی مخصوص در نسبت سرعت درسینگ موافق  $(+0/9)$ ، در بازه ورودی‌های پژوهش صورت گرفته، به مقدار  $(\frac{1}{\text{mm}^3})$  و  $2/2$  و  $(\frac{1}{\text{mm}^3})$  به ترتیب برای کامپوزیت با الیاف شیشه و کربن میل کرد. کاهش بیشتر انرژی مخصوص از این نقطه به بعد بسیار اندک خواهد بود. با افزایش سرعت برشی نیروی سنگ‌زنی به علت کاهش ضخامت براده موثر، کاهش مساحت صفحه برش و افزایش حرارت، کاهش خواهد یافت. با انجام آزمون کالریمتری مشخص شد حداکثر انرژی مخصوص تشکیل براده برای کامپوزیت با الیاف شیشه و کربن به ترتیب برابر  $(\frac{1}{\text{mm}^3})$  و  $0/89$  و  $(\frac{1}{\text{mm}^3})$  بوده



- 11-Malkin S, Anderson RB. Thermal aspects of grinding: part 1—energy partition.
- 12-Malkin S, Guo C. Grinding technology: theory and application of machining with abrasives. Industrial Press Inc.; 2008.
- 13-Klocke F, Kuchle A. Manufacturing processes. Berlin: Springer; 2009.
- 14-R. Company. PEEK Data sheet [Internet]. Available from: <https://www.roechling-industrial.com/>.
- 15-Sheikh-Ahmad JY. Machining of polymer composites. New York: Springer; 2009.
- 8- Kamplade K, Biermann D. Examination of the Material Removal of unreinforced, thermoplastic Polymers by Scratch Tests. Production Engineering. 2019;13(6):713-9.
- 9- Davim JP, Mata F. Physical cutting model of Polyetheretherketone composites. Materials & Design. 2006;27(10):847-52.
- 10-Park KY, Nakagawa T. Mirror surface grinding characteristics and mechanism of carbon fiber reinforced plastics. Journal of materials processing technology. 1995;52(2-4):386-98.