



## Investigation of the Effect of Diamond Additive Percentage on the Mechanical and Wear Properties of Bronze-Diamond Composite for Use in Industries

Ali Alizadeh<sup>\*1</sup> , Majid Jafari Mafard<sup>2</sup> , Mohsen Heydari Bani<sup>3</sup> , Jafar Eskandari Jam<sup>1</sup> ,  
Majid Eskandari Shahraki<sup>4</sup>

1. Professor, Materials and Manufacturing Technologies University Complex, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

2. MSc in Mechanical Engineering, Materials and Manufacturing Technologies University Complex, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

3. PhD in Mechanical Engineering, Materials and Manufacturing Technologies University Complex, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

4. PhD Candidate in Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

### Abstract

Particle-reinforced metal matrix composites are among the latest engineering materials, and their rapid development in recent years can be attributed to their exceptional properties, including high specific strength, wear resistance, corrosion resistance, high elastic modulus, and wide-ranging applications. These materials are used in various industries such as aerospace, telecommunications, electronics, automotive, defense, and many other commercial and consumer products. In this study, the effect of the percentage of diamond particles with a size of 100 micrometers on the mechanical and wear properties of bronze-diamond composites is investigated. Composite powders with varying diamond percentages in a bronze matrix are prepared using a ball mill to mix the bronze and diamond powders, and the resulting composite powders are consolidated through hot pressing. Using scanning electron microscopy, the effect of diamond content on their uniform distribution, the microstructure of the bronze matrix, and the mechanical and wear properties are examined. This study investigates the effect of different weight percentages of diamond particles (8%, 10%, 12%) on the properties of bronze-diamond composites. The results indicate that adding diamond to the metal matrix reduces flexural strength. Furthermore, as the weight percentage of diamond increases, flexural strength decreases, while wear resistance improves with higher diamond content.

### Keywords

Diamond  
Composite  
Mechanical Properties  
Wear Properties  
Bronze

Received: 19.03.2025

Revised: 27.05.2025

Accepted: 31.05.2025

### \*Corresponding Author

Ali Alizadeh

Email

[a\\_alizadeh@mut.ac.ir](mailto:a_alizadeh@mut.ac.ir)

## 1- Introduction

Metal matrix composites (MMCs) are generally produced using either melting methods or powder metallurgy. Melting methods can include various techniques such as vortex casting, centrifugal casting, composite casting, squeeze casting, melt infiltration, in-situ processes, and spray co-deposition. However, for tools incorporating

diamond in their structure, melting methods are not viable because diamond, a form of carbon, transforms into graphite at 700°C in air. To prevent oxidation and graphitization, high sintering temperatures must be avoided. Particle-reinforced metal matrix composites are widely used as drilling

### How to Cite this Article:

[1] A. Alizadeh, M. Jafari Mafard, M. Heydari Bani, J. Eskandari Jam, and M. Eskandari Shahraki, "Investigation of the Effect of Diamond Additive Percentage on the Mechanical and Wear Properties of Bronze-Diamond Composite for Use in Industries," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 7–25, 2026, <https://doi.org/10.22034/stme.2025.513227.1111>. (in Persian)



bits, saw blades, grinding discs, and honing stones [1-3].

Tools produced by hot pressing typically contain diamonds embedded in a metal powder matrix, sintered in graphite molds. The resulting diamond/matrix composite is attached to a steel core via brazing or laser welding [4]. In brazed tools, diamonds form a single layer using a filler phase, typically composed of copper, nickel, or silver alloys, which is brazed to the steel core [5]. Generally, metal matrix composites are manufactured through various methods, with hot pressing being the method of choice in this study, involving parameters such as pressure, temperature, and atmosphere. Key factors influencing the production of diamond-containing metal matrix composites include the matrix material, added metals, powder size, alloying status, and the mechanical, physical, and chemical properties of the matrix. Additionally, the matrix's ability to bond with diamond is highly significant. Similarly, diamonds with varying sizes and metallic or non-metallic coatings play a crucial role in improving the matrix-diamond interface. To evaluate the performance and effective properties of these composites, various mechanical property tests, including wear, hardness, and flexural strength tests, must be conducted.

## 2- Research Materials

### 2-1- Bronze Powder

Bronze powder with a composition of Cu-20wt.%Sn, manufactured in China with 98% purity, atomized using inert gas, and having an average particle size of 45 microns, was used. The bronze powder particles used are elliptical in shape. The morphology of the bronze powder particles used in this study is shown in Figure 1.

### 2-2- Cobalt Powder

Pure cobalt powder, manufactured in Germany with 99.99% purity, atomized using inert gas, and having an average particle size of 1 micron, was used. The cobalt powder particles used are fine and amorphous in shape.

### 2-3- Diamond Powder

Diamond powder, manufactured in China with 99% purity and an average particle size of 100 microns,

was used. The diamond powder particles used are angular in shape.

### 2-4- Diamond Powder with 15 Micron Size

Diamond powder, manufactured in China with 99% purity and an average particle size of 15 microns, was used.

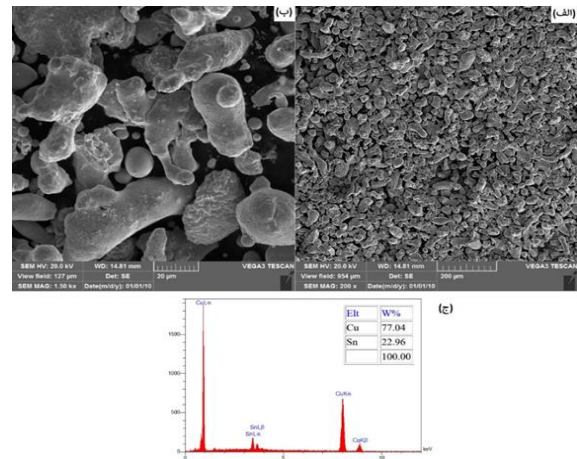


Figure 1: (a) and (b) Morphology of bronze particles with the composition Cu-20wt.%Sn, along with (c) EDS elemental analysis

## 3- Equipment

### 3-1- High-Energy Mill

For the mechanical alloying process of Bronze-Co-Diamond, a high-energy ball mill equipped with a water-cooling system and a controlled atmosphere was used.

### 3-2- Balance

For weighing the powders, a KIA Electronic BL2 balance with an accuracy of 0.01 grams was used.

### 3-3- Glovebox

To prevent oxidation of the milled powders during the unloading of the mill chamber, all steps of opening the mill chamber and unloading were performed in a glovebox under an inert argon gas atmosphere.

### 3-4- Hydraulic Press

For compacting samples for combustion and mechanical tests, a hydraulic press with a capacity of 100 tons, equipped with a pressure regulation and maintenance sensor, was used.

### 3-5- Furnace and Press under Inert Atmosphere

For hot pressing and sintering of Bronze-Co-Diamond samples, a chamber with a controlled

atmosphere and a working temperature of 1000°C was used.

### 3-6- Mold

For cold pressing, hot pressing, and sintering of samples, a hot-work mold with a diameter of 4 cm and a height of 10 cm, made of H13 hot-work steel, was used.

## 4- Project Methodology

The sample preparation process in this study involves the production of composite powders and their sintering through hot pressing. The density of the prepared composite samples is presented in Table 1. The composite mixture consists of cobalt with a specific gravity of 8.9 g/cm<sup>3</sup>, bronze (Cu-15Sn) with a specific gravity of 8.68 g/cm<sup>3</sup>, and diamond (D100 and D15) with a specific gravity of 3.5 g/cm<sup>3</sup>. The theoretical density was calculated using the rule of mixtures, and the sample densities was determined using the Archimedes method. Analysis of the results in Table 1 shows that the relative density of the samples ranges between 96% and 99%.

Table 1: Density of the prepared composite samples

Sample	Sample Density (g/cm <sup>3</sup> )	Theoretical Density (g/cm <sup>3</sup> )	Relative Density (%)
1	8.61	8.680	99.1
2	8.59	8.702	98.7
3	7.95	8.184	97.1
4	8.07	8.287	97.3
5	7.93	8.184	96.8
6	7.76	8.080	96.0

### 4-1- Preparation of Composite Powders

#### 4-2- Determination of Metal Element

##### Percentages and Diamond Reinforcement Type

To investigate the effect of diamond content on the properties of bronze-diamond composites, diamond particles were added to the bronze matrix at 8%, 10%, and 12% by weight. Additionally, to study the effect of cobalt addition on composite properties, 10% by weight of cobalt was added to some samples. Initially, bronze powder with a composition of 85Cu-15Sn was prepared, and in subsequent samples, 9% by weight of cobalt was added to the mixture. It should be noted that copper

and tin powders were used as pre-prepared bronze powder in separate samples.

### 4-3- High-Energy Milling

To prepare the composite powders, the bronze matrix powder, along with diamond (and cobalt powder in some samples), was placed in the milling chamber. A 2% by weight stearic acid was added as a process control agent (PCA) to prevent powder adhesion to the milling balls. The ball-to-powder weight ratio was set at 30:1, using 900 grams of 5 mm diameter 304 stainless steel balls. The milling process was conducted at a speed of 430 rpm for three durations of 4 hours in a water-cooled chamber for the respective samples.

### 4-4- Sintering of Composite Samples

The powders produced through high-energy milling, weighing 30 grams, were poured into a mold and cold-pressed at a pressure of 200 bar. After cold pressing, the mold was transferred to a hot-pressing chamber. To ensure an inert atmosphere, argon gas was injected into the hot-pressing chamber throughout the process. After heating to 600°C, the mold and powders were held for one hour to achieve uniform temperature, followed by the application of a pressure of 200 MPa. After one hour, the pressure was released, and the furnace was turned off. Once the furnace cooled, the composite part was removed from the mold.

## 5- Conclusion

In this study, the hardness, wear resistance, and the effect of varying weight percentages of diamond particles on the properties of bronze-diamond composites were investigated. The results showed that samples without diamond exhibited higher density compared to those containing diamond. Additionally, the addition of diamond to the metal matrix reduced flexural strength, likely due to the presence of ceramic diamond particles in the bronze matrix. As the weight percentage of diamond increased, the flexural strength decreased. However, with an increase in diamond content, the wear resistance of the composites improved.

## 6- References

- [1] C. Artini, M. L. Muolo, and A. Passerone, "Diamond-metal interfaces in cutting tools: a review," *Journal of Materials Science*, Vol. 47, No. 7, pp. 3252–3264, 2012, doi: [10.1007/s10853-011-6164-6](https://doi.org/10.1007/s10853-011-6164-6).

---

[2] L. J. de Oliveira, R. P. da R. Paranhos, R. d. S. Guimarães, G. S. Bobrovitchii, ɔ M. Filgueira, “Use of PM Fe–Cu–SiC composites as bonding matrix for diamond tools,” *Powder Metallurgy*, Vol. 50, No. 2, pp. 148–152, 2007. [Online]. Available: doi: [10.1179/174329007X161982](https://doi.org/10.1179/174329007X161982)

[3] Y.-Z. Hsieh ɔ S.-T. Lin, “Diamond tool bits with iron alloys as the binding matrices,” *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 72, No. 2, pp. 121–125, 2001. [Online]. Available: doi: [10.1016/S0254-0584\(01\)00419-9](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(01)00419-9)

[4] H. Tönshoff, H. Hillmann-Apmann, ɔ J. Asche, “Diamond tools in stone and civil engineering industry: cutting principles, wear and applications,” *Diamond and Related Materials*, Vol. 11, No. 3-6, pp. 736–741, 2002. [Online]. Available: doi: [10.1016/S0925-9635\(01\)00526-2](https://doi.org/10.1016/S0925-9635(01)00526-2)

[5] J. C. Sung ɔ M. Sung, “The brazing of diamond,” *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 27, No. 2, pp. 382–393, 2009. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.ijrmhm.2008.09.006](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.09.006)



## بررسی اثر درصد افزودنی الماس بر خواص مکانیکی و سایشی کامپوزیت برنز-الماس

علی علیزاده\*<sup>۱</sup>، مجید جعفری مفرد<sup>۲</sup>، محسن حیدری بنی<sup>۳</sup>، جعفر اسکندری جم<sup>۱</sup>، مجید اسکندری شهرکی<sup>۴</sup>

۱- استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۲- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۳- دکتری، مهندسی مکانیک، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۴- دانشجوی دکتری، مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

### چکیده

### کلمات کلیدی

الماس

کامپوزیت

خواص مکانیکی

خواص سایشی

برنز

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۹

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۰۶

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰

\*نویسنده مسئول

علی علیزاده

ایمیل

[a\\_alizadeh@mut.ac.ir](mailto:a_alizadeh@mut.ac.ir)

کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت‌شده با ذرات، یکی از جدیدترین مواد مهندسی بوده و توسعه سریع آن‌ها در سال‌های اخیر را می‌توان به دلیل خواص بسیار عالی از جمله استحکام ویژه، مقاومت سایشی، مقاومت به خوردگی، مدول الاستیک بالا و کاربردهای گسترده آن دانست. این مواد در صنایع مختلف از جمله هوافضا، ارتباطات، الکترونیک، خودروسازی، صنایع دفاعی و بسیاری دیگر از محصولات تجاری و مصرفی کاربرد دارند. در این تحقیق اثر درصد افزودنی ذرات الماس با اندازه ذرات ۱۰۰ میکرومتر بر خواص مکانیکی و سایشی کامپوزیت برنز-الماس بررسی می‌گردد. پودرهای کامپوزیتی با درصد‌های مختلف الماس در زمینه برنز با استفاده از آسیاب سایشی جهت مخلوط کردن پودرهای برنز و الماس آسیاب می‌شوند و در انتها پودرهای کامپوزیتی به روش پرس داغ تفجوش می‌شوند. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، اثر مقدار الماس بر توزیع یکنواخت آن‌ها و ریزساختار زمینه برنزی و همچنین خواص مکانیکی و سایشی نیز بررسی می‌شود. در این تحقیق اثر حضور درصد‌های وزنی مختلف ذرات الماس (۱۲٪-۱۰٪-۸٪) بر خواص کامپوزیت برنز الماس مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان داد با اضافه کردن الماس به زمینه فلزی، استحکام خمشی کاهش می‌یابد. ضمن اینکه هرچه درصد وزنی الماس افزایش می‌یابد، استحکام خمشی کاهش و با افزایش درصد الماس، مقاومت به سایش نیز افزایش پیدا می‌کند.

### ۱- مقدمه

اکسیداسیون و گرافیت شدن آن باید از دمای پخت بالا اجتناب کرد. کامپوزیت‌های زمینه فلزی-ذره ساینده به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان مت‌های حفاری، تیغه‌های اره و دیسک‌های سنگ‌زنی و سنگ هونینگ استفاده می‌شود [۱-۳].

اکثر ابزارهای الماس به شکل ساختاری کامپوزیتی با ذرات الماس هستند که در یک زمینه فلزی قرار داده شده‌اند. متداول‌ترین ابزارهای الماسی را می‌توان به سه دسته فلزی، شیشه‌ای و رزینی با توجه به عامل اتصال استفاده‌شده تقسیم‌بندی کرد [۴]. در میان این سه دسته،

به‌طورکلی کامپوزیت‌های زمینه فلزی به دو روش ذوبی یا متالورژی پودر ساخته می‌شوند. روش ذوبی می‌تواند شامل انواع مختلفی اعم از ریخته‌گری گردابی، ریخته‌گری گریز از مرکز، ریخته‌گری ترکیبی، ریخته‌گری کوبشی، رخنه‌دهی مذاب، فرآیندهای درجا و فرآیند هم‌نشست پاششی باشد. برای تولید ابزارهایی که در ساختار آن‌ها از الماس استفاده شده است نمی‌توان از روش‌های ذوبی استفاده کرد، زیرا الماس حالتی از کربن است که در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد در هوا تبدیل به گرافیت می‌شود، بنابراین برای جلوگیری از

### How to Cite this Article:

[1] A. Alizadeh, M. Jafari Mafard, M. Heydari Bani, J. Eskandari Jam, and M. Eskandari Shahraki, "Investigation of the Effect of Diamond Additive Percentage on the Mechanical and Wear Properties of Bronze-Diamond Composite for Use in Industries," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 7-25, 2026, <https://doi.org/10.22034/stme.2025.513227.1111>. (in Persian)



• به حداقل رساندن مقدار فلزات کاتالیزوری برای محافظت از الماس در برابر گرافیت شدن

• انجام عملیات پخت در کمترین دماهای ممکن

به همین دلیل، تلاش‌های اصلی به سمت جستجوی آلیاژهایی است که دارای نقطه ذوب پایین یا دمای پخت پایین و خواص مکانیکی مناسب مشخص می‌شوند.

ظرفیت نگهداری الماس، متشکل از نیروی جذب فیزیکی<sup>۱</sup>، نیروی لایه‌گذاری مکانیکی<sup>۲</sup> و نیروی پیوند شیمیایی<sup>۳</sup> است. تکنیک‌های بهبودیافته در این خصوص به سه نوع اصلی خلاصه می‌شوند: (۱) عملیات سطحی الماس: پوشش‌دهی فلزی و زبر کردن سطح الماس، (۲) اصلاح زمینه فلزی: افزودن عناصر تشکیل‌دهنده کاربرد قوی، عناصر خاکی کمیاب و برخی عناصر غیرفلزی و پیش‌آلیاژسازی یا تصفیه پودرهای زمینه و (۳) تغییر در فن‌آوری فرآیند آماده‌سازی: تنظیم فرآیند تف‌جوشی و استفاده از فن‌آوری‌های جدید.

علاوه بر این، روش‌های مورد استفاده در ارزیابی استحکام نگهداری الماس شامل سه دسته می‌شوند: (۱) روش‌های مبتنی بر ابزارهای تشخیص: میکروسکوپ الکترونی روبشی، پراش پرتو ایکس، طیف‌سنجی پراکنده انرژی (EDS) و طیف‌سنجی رامان، (۲) روش‌های آزمون مکانیکی: روش تحلیلی استحکام خمشی، روش آزمون حلقه کششی<sup>۴</sup> و سایر روش‌های آزمون برای استحکام پیوند شیمیایی و (۳) روش‌های محاسبه تحلیلی و عددی [۱۱].

کلید افزایش ظرفیت نگهداری الماس، بهبود وضعیت پیوند سطحی بین زمینه و الماس است.

به‌عنوان یک نتیجه از واکنش شیمیایی کامپوزیت‌های زمینه فلزی، سه رفتار پیوندی مختلف بین الماس و فلز در تحقیقات مشاهده می‌شود: (۱) تخریب الماس و تشکیل گرافیت: عناصر با اثر کاتالیزوری بر کربن منجر به گرافیت شدن و تخریب الماس می‌شوند. ظرفیت نگهداری الماس به دلیل لایه گرافیت روی سطح الماس ضعیف است. (۲) تشکیل کاربرد: یک کاربرد تولیدشده به‌صورت اپیتاکسی<sup>۵</sup> روی سطوح الماس رشد می‌کند و باعث ایجاد پیوند قوی بین کربن و فلز می‌شود. (۳) رفتار بی اثر: هنگامی که هیچ واکنش شیمیایی یا فرآیند نفوذ رخ نمی‌دهد، رفتار بی اثر رخ می‌دهد و الماس‌ها فقط به‌صورت

ابزارهای الماس با پیوند فلزی به دلیل استحکام چسبندگی بالا، شکل‌پذیری خوب و عمر طولانی، به‌ویژه در پردازش مواد سخت و شکننده، بیشترین کاربرد را دارند [۵]. ابزارهای کامپوزیت فلز-الماس که خود تیز شونده هستند، نزدیک به شکل نهایی تولید می‌شوند و راندمان تولید بالایی دارند، به‌طور گسترده برای پرداخت سطوح، اره کردن و آسیاب کردن مواد شکننده سخت مانند سرامیک، سنگ و بتن استفاده می‌شوند. کبالت (Co) به دلیل شکل‌پذیری خوب، سازگاری شیمیایی با الماس و مطابقت نرخ سایش با الماس، کامپوزیت زمینه فلزی<sup>۱</sup> رایج برای ابزارهای هونینگ است. با این حال، در حال حاضر، [۶]، مضرات زیست‌محیطی [۷] و هزینه بالای آن و بی‌ثباتی اقتصادی که نوسانات عرضه را ایجاد می‌کند، انجام می‌شود [۸]. امیدوارکننده‌ترین کاندیداهایی که می‌توانند جایگزین زمینه کبالت شوند، آلیاژهای مبتنی بر Cu، Fe، Ti هستند. زمینه‌های مبتنی بر Cu، Fe-Cu-Co و Mn-Cu-Sn نیز برای تهیه ابزار الماس استفاده می‌شوند [۹]. ابزارهای الماسی مبتنی بر مس دارای خواص عالی و هزینه آماده‌سازی کم بوده و توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند [۱۰]. زمینه باید سازگاری شیمیایی و پیوند مکانیکی خوبی با الماس داشته باشد، یعنی باید بتواند با الماس بدون آسیب رساندن به آن واکنش دهد و در حین سرویس آن را نگه دارد. برای تناسب با قطعه کار، سختی زمینه باید با سختی قطعه کار مرتبط باشد. به‌عنوان مثال، برنز برای برش سنگ مرمر یا تخته سنگ مناسب است، در حالی که کامپوزیت Co+WC (بسیار سخت‌تر از برنز) می‌تواند برای برش بتن استفاده شود. زمینه‌های Co، Bronze + Co، Co+WC و W مجموعه‌ای از زمینه‌های ممکن با سختی بالا هستند. در نتیجه، مهم‌ترین پارامترهایی که در طراحی یک زمینه فلزی باید در نظر گرفته شوند عبارت‌اند از: [۱]

- ترکیب و اندازه پودرها
- دما و زمان عملیات پخت،
- چگالی قطعه به‌دست‌آمده
- امکان تشکیل لایه سطحی بین الماس و زمینه

<sup>۱</sup> اپیتاکسی (Epitaxy) به‌نوعی رشد کریستال یا رسوب مواد اشاره دارد که در آن لایه‌های کریستالی جدید با یک یا چند جهت کاملاً مشخص نسبت به لایه بذر کریستالی تشکیل می‌شوند.

<sup>۱</sup> Metal Matrix Composites

<sup>۲</sup> Physical Adsorption Force

<sup>۳</sup> Mechanical Inlaying Force

<sup>۴</sup> Chemical Bonding Force

<sup>۵</sup> Tension Ring Test Method

ابزارهای تولیدشده به روش پرس گرم، دارای الماس‌هایی هستند که معمولاً با تفجوشی در قالب‌های گرافیتی در یک پودر فلز قرار داده می‌شوند. کامپوزیت الماس/زمینه تولیدشده به این روش، با استفاده از لحیم کاری یا جوش لیزری به هسته فولادی متصل می‌شود [۱۶]. در ابزارهای لحیم کاری شده، الماس‌ها با استفاده از یک فاز پرکننده که عموماً از آلیاژ مس، نیکل یا نقره تشکیل شده است، یک لایه منفرد را تشکیل می‌دهند که به هسته فولادی لحیم می‌شود [۸]. اگر فاز پرکننده به درستی انتخاب شود، الماس در ابزارهای لحیم کاری محکم‌تر از الماس‌های پرس داغ نگه داشته می‌شود. در نتیجه ارتفاع بیرون‌زدگی و سرعت برش آن‌ها بیشتر و عمر ابزار بیشتر می‌شود. علاوه بر این، در ابزارهای لحیم کاری شده، می‌توان با استفاده از یک الگو، دانه‌ها را به‌طور منظم توزیع کرد. این فرآیند از اتلاف و جدایش الماس از زمینه جلوگیری می‌کند. از طرف دیگر، آلیاژ باید به اندازه کافی الماس را تر کند و نقطه ذوب فاز پرکننده باید تا حد امکان پایین باشد تا آسیب به حداقل برسد. در دسته سوم ابزارها، یک زمینه نیکل با آبکاری الکتریکی به زیرلایه ابزار متصل می‌شود و الماس‌ها به‌طور مکانیکی در لایه نیکل به دام می‌افتند. ابزارهایی با یک لایه سنگ ساینده عمدتاً با آبکاری الکتریکی تولید می‌شوند. برآمدگی ذره کمتر از ۵۰-۴۰ درصد اندازه متوسط ذره است.

فرآیند پرس گرم در قالب صلب با استفاده از بارگذاری در امتداد محور عمودی همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است انجام می‌شود. برای جلوگیری از آسیب قالب، قالب گرافیتی در یک اتمسفر محافظ یا محفظه خلاء محصور می‌شود. بارگذاری در امتداد محور عمودی تحت فشار یک سیستم هیدرولیک خارجی است. اگرچه فشار در امتداد محور عمودی اعمال می‌شود، اما فشار شعاعی نیز روی دیواره قالب وجود دارد. اختلاف تنش عمودی و شعاعی باعث ایجاد تنش برشی می‌شود که در اتصال ذرات به یکدیگر مؤثر است. این تنش برشی متناسب با تنش اعمال شده است. چگالش اولیه شامل بازآرایی ذرات و جریان پلاستیک است. با پیشرفت تراکم، خزش توسط نفوذ مرز دانه و نفوذ حجمی کنترل می‌شود [۱۷].

برای حالت پرس داغ با گرمایش القایی، قالب از گرافیت ساخته می‌شود، اما از گرمایش مقاومتی نیز استفاده می‌شود. سایر مواد قالب شامل فلزات نسوز و آلیاژهای آن‌ها و گاهی سرامیک‌هایی مانند آلومینا یا کاربید سیلیکون در تنش‌های کم استفاده می‌شود. سازگاری انبساط حرارتی بین پودر فشرده و ابزار برای جلوگیری از ترک خوردن، یکی

مکانیکی در زمینه فلزی به هم متصل می‌شوند؛ بنابراین انتظار می‌رود که نگهداری الماس از طریق اعمال فلز روی سطح الماس با پوشش عناصر تشکیل‌دهنده کاربید قوی (Cr, W, V, Ti, Mo) و غیره) قبل از مخلوط شدن با پودرهای زمینه فلزی تقویت شود. پوشش الماس با فلز کاربیدساز یکی از مؤثرترین و گسترده‌ترین روش‌های محافظت از الماس در برابر گرافیت شدن و بهبود چسبندگی بین زمینه و الماس است. به همین دلیل، حفاظت از الماس به ویژه برای زمینه‌های مبتنی بر آهن، کبالت و نیکل مناسب است، در حالی که برای زمینه‌های مبتنی بر مس ضروری نیست، زیرا مس هیچ تمایلی به گرافیت شدن الماس نشان نمی‌دهد.

عموماً، سایش منجر به متلاشی شدن و از بین رفتن ماده در مجاورت سطح می‌شود [۱۲]. این از دست رفتن ماده از اهمیت اقتصادی بسیاری برخوردار می‌باشد، لذا شناخت و بررسی رفتار تریبولوژیکی مواد در راستای کنترل پدیده سایش و توسعه مواد جدید اهمیت بسیار زیادی دارد. به همین علت تاکنون تحقیقات بسیاری در این زمینه صورت گرفته است [۱۳].

سایش خراشان، زمانی اتفاق می‌افتد که ذرات نوک تیز یا خشن بر یک سطح نرم‌تر فرو روند و سطح را خط بیاندازند یا تکه‌هایی از آن جدا کنند. این سایش به دو مکانیزم دو جسمه و سه جسمه تقسیم می‌شود. در سایش دو جسمه، یک جسم سخت بر روی جسم مقابل که نرم است، سایش ایجاد می‌کند و در سایش سه جسمه، ذرات سخت ساینده، بین دو سطح سایشی گیر کرده و باعث ایجاد سایش می‌شوند [۱۴].

در سایش چسبان، با افزایش بار اعمالی، فشار زیاد ناشی از بار باعث می‌شود تا زبری‌هایی که در تماس با یکدیگر هستند تغییر شکل پلاستیک دهند و این حالت تا زمانی ادامه می‌یابد که سطح تماس به قدر کافی بزرگ شود تا بار را تحمل نماید. نیروهای برشی بزرگ در مناطق موضعی جمع شده و باعث می‌گردد تا یکی از آن‌ها دچار شکست شود. سپس، ماده از قسمت شکسته شده جدا می‌شود و به سطح مقابل انتقال می‌یابد.

پرس گرم (HP)، پرس گرم ایزواستاتیک (HIP) و لحیم کاری فرآیندهای مرسوم هستند که برای تهیه ابزارهای الماس بسیار نازک استفاده می‌شوند. با این حال، معایبی برای این روش‌ها وجود دارد، از جمله ضخامت زیاد، درجه آلیاژی پایین و دقت محدود برش به دلیل نسبت ابعاد بزرگ [۱۵].

کنترل کننده فرآیند، نسبت وزنی گلوله به پودر، اتمسفر آسیاب کاری، درجه حرارت آسیاب کاری.

موریگوچی و همکاران [۲۱] رفتار تفجوشی و خواص کاربیده‌های الماس/سیمان را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند، حضور الماس در زمینه‌هایی مانند کاربیده‌های سماتنه، چقرمگی ابزارهای برش و پرداخت را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد.

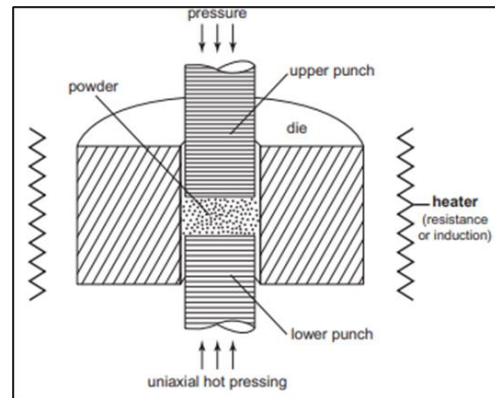
نایدیچ [۲۲] ترشوندگی مواد جامد توسط فلزات مایع را بررسی کرد. او دریافت درجه تر شدن یک بستر توسط یک فلز مایع عمدتاً به شدت فعل و انفعالات سطحی بستگی دارد. با توجه به تفاوت کم انرژی بین الماس و گرافیت، رفتار مشابهی از نظر ترشوندگی برای هر دو ماده قابل انتظار است.

کلوتز و همکاران [۲۳] تأثیر پارامترهای لحیم کاری و ترکیب آلیاژ بر مورفولوژی سطح مشترک الماس لحیم شده را بررسی کردند. برای محافظت از الماس در برابر گرافیت شدن، گاهی اوقات مقادیر کمی از عناصر فعال مانند کروم، تیتانیوم یا وانادیوم به زمینه اضافه می‌شود، زیرا آن‌ها به‌عنوان سازنده کاربید عمل می‌کنند. یک راه حل جایگزین استفاده از الماس‌های با پوشش تیتانیوم است. آن‌ها دریافتند در هر دو مورد، یک لایه نازک کاربید روی سطح الماس شکل می‌گیرد و از گرافیت شدن جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، لایه نازک کاربید انسجام بهتر بین الماس و زمینه را تضمین می‌کند، زیرا با استفاده از برهم‌کنش شیمیایی به الماس می‌چسبد.

ژائو و دوآن [۲۴] ظرفیت نگهداری الماس در ماتریس‌های پیوند فلزی را مطالعه کردند. آن‌ها دریافتند مورفولوژی سطحی اطراف الماس با پوشش تنگستن مطلوب‌تر است زیرا ترک‌های کمتری را نشان می‌دهد.

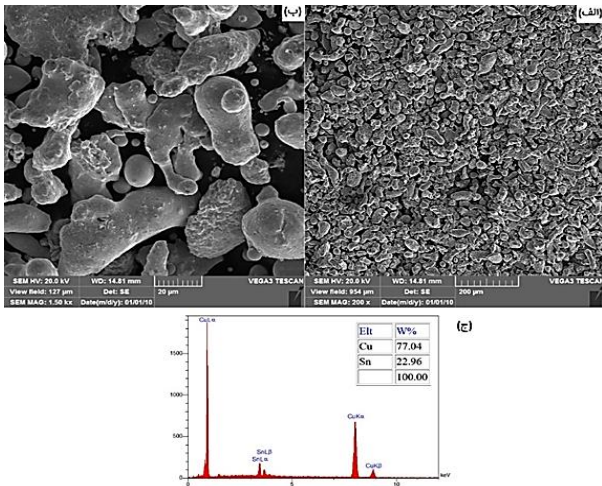
ژو و همکاران [۲۵] لحیم کاری الماس توسط آلیاژ Ag-Cu-Zn با پودر کروم و رابط‌های ریزساختار را مورد مطالعه قرار دادند. آزمایش‌های انجام‌شده روی یک زمینه فلزی Cu-Sn-Fe-Ni-misch نشان داد که استفاده از الماس‌های پوشش داده شده با Ti، استحکام گسیختگی عرضی را تا ۲۱ درصد نسبت به الماس‌های بدون پوشش افزایش می‌دهد و برهم‌کنش الماس/زمینه را محکم‌تر می‌کند و میزان استهلاک قدرت سنگ‌زنی را کاهش می‌دهد. همه این شواهد به چسبندگی بهتر بین الماس و زمینه و اثر محافظتی پوشش در برابر گرافیت شدن و اکسیداسیون الماس اشاره دارد. پراش پرتو ایکس زاویه

دیگر از نکاتی است که باید در حین خنک شدن مورد نیاز قرار گیرد. یک راه حل این است که پودر در دمای محیط فشرده شود [۱۷].



شکل ۱: شماتیکی از پرس داغ تک‌محوری که در آن فشار در امتداد محور عمودی توسط پانچ‌های گرافیتی اعمال می‌شود و پودر در یک قالب گرم شده، قرار می‌گیرد [۱۷]

استفانسکو [۱۸] و بلوچر [۱۹] فرآیند نفوذ فشار فلز مایع برای تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی را بررسی کردند. نتایج نشان داد اجزاء متالورژی پودر که توسط پرس سرد تک‌محور تولید شده‌اند درجه‌ای از آنیزوتروپی خواص را به دلیل گرادیان دانسیته از خود نشان می‌دهند. مک کالو و همکاران [۸] پاسخ مکانیکی کامپوزیت‌های  $Al_2O_3-Al$  تقویت‌شده با الیاف پیوسته تولیدشده توسط ریخته‌گری نفوذی تحت فشار را مورد بررسی قرار دادند. برای تولید کامپوزیت زمینه فلزی تقویت‌شده با ذرات سرامیکی از فرآیند آلیاژسازی مکانیکی استفاده شده است. در این عملیات، پودرهای نرم (پودر فلزی) لایه‌ای شده و پودرهای ترد (پودر سرامیکی) شکسته می‌شود و بین لایه‌های پودر فلزی محبوس می‌شود. اگر زمان آسیاب بالا باشد می‌تواند باعث شود که اندازه پودرهای سرامیکی به محدوده نانومتری برسد؛ بنابراین پودری به دست می‌آید که در اطراف آن لایه‌ای از پودر نرم فلزی قرار گرفته و در داخل آن پودر ترد سرامیکی در ابعاد نانومتری وجود خواهد داشت و با فرآیندهای بعدی مانند پرس، زینتر و اکستروژن می‌توان نمونه‌های نانو کامپوزیتی با توزیع فاز ترد نانومتری در یک زمینه فلزی نرم به دست آورد. فلمینگ [۲۰] فرآیند و مسیر پیش رو شکل‌دهی نیمه جامد را مورد بررسی قرار داد. عواملی که در فرآیند آلیاژسازی مکانیکی روی نوع و ساختار محصول نهایی بدون در نظر گرفتن طبقه و ترکیب پودر تأثیر می‌گذارند عبارت‌اند از: انرژی آسیاب، محفظه آسیاب کاری، زمان آسیاب کاری، سرعت آسیاب کاری، جنس، ابعاد و توزیع اندازه گلوله‌های آسیاب، میزان پر شدن محفظه آسیاب، عامل



شکل ۲: الف) و ب) مورفولوژی ذرات برنز با ترکیب Cu-20wt.%Sn به همراه ج) آنالیز عنصری EDS

## ۲-۲- پودر کبالت

پودر کبالت خالص ساخت کشور آلمان با درصد خلوص ۹۹/۹۹٪ اتمیزه شده به وسیله گاز خنثی با متوسط اندازه ذره ۱ میکرون استفاده شده است. ذرات پودر کبالت مورد استفاده به صورت ریز و بی شکل هستند. مورفولوژی ذرات پودر کبالت خالص مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۳ نشان داده شده است.

## ۲-۳- پودر الماس

پودر الماس ساخت کشور چین با درصد خلوص ۹۹٪ با متوسط اندازه ذره ۱۰۰ میکرون استفاده شده است. ذرات پودر الماس مورد استفاده به صورت گوشه دار است. مورفولوژی ذرات پودر الماس مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۴ نشان داده شده است.

کم<sup>۱</sup> انجام شده بر روی لایه نازک پوشش تیتانیوم روی الماس، نشان دهنده وجود کاربید Ti در فصل مشترک پوشش الماس/ تیتانیوم است. ژو و همکاران [۲۶] اثرات پوشش Ti بر عملکرد کامپوزیت‌های الماس با پیوند فلزی حاوی خاک کمیاب را بررسی کردند. نتایج آزمایشات نشان داد که چرخ سنگ‌زنی رزین تولید شده با الماس دارای روکش Ti و Ni دارای طول عمر ۱ تا ۱/۲ برابر بیشتر از پیوند ساینده الماس معمولی در هنگام استفاده است. نه تنها وضوح چرخ سنگ‌زنی به خوبی تضمین شده است، بلکه هزینه افزایش یافته نیز نسبتاً ناچیز است. البته، نسبت ساینده‌های پوشش داده شده می‌تواند بدون نگرانی در مورد هزینه بیشتر باشد.

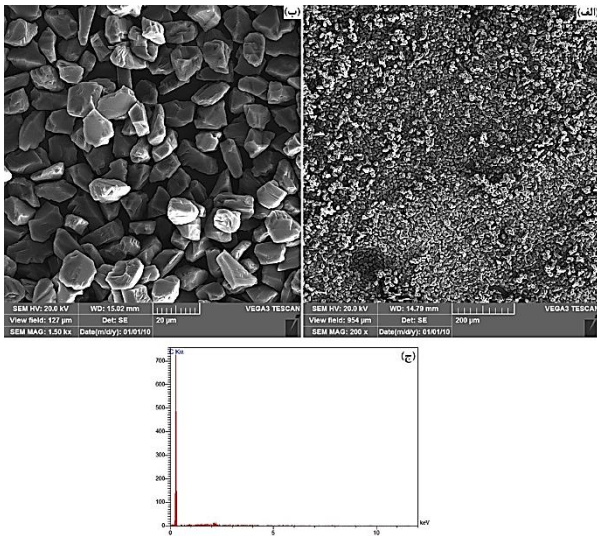
به‌طور کلی کامپوزیت‌های زمینه فلزی به چندین روش مختلف تولید می‌شوند که روش مورد نظر و قابل استفاده در این تحقیق پرس داغ است که پارامترهای مختلفی مانند فشار، دما و اتمسفر را دارد. پارامترهای مؤثر برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی حاوی الماس؛ جنس زمینه و فلزات اضافه شده به آن، اندازه پودرها، آلیاژی بودن یا نبودن آن‌ها و خواص مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی زمینه است. ضمن اینکه خواص ماتریس زمینه برای اتصال با الماس نیز بسیار تأثیرگذار است. همین‌طور الماس با اندازه‌های مختلف و پوشش‌ها فلزی و غیرفلزی برای بهبود فصل مشترک زمینه و الماس بسیار تأثیرگذار است. برای بررسی کارایی و خواص کارآمد این نوع کامپوزیت‌ها باید از روش‌های آزمایش خواص مکانیکی متعددی اعم از آزمون سایش، سختی و استحکام خمشی استفاده نمود.

## ۲- مواد اولیه و تحقیق

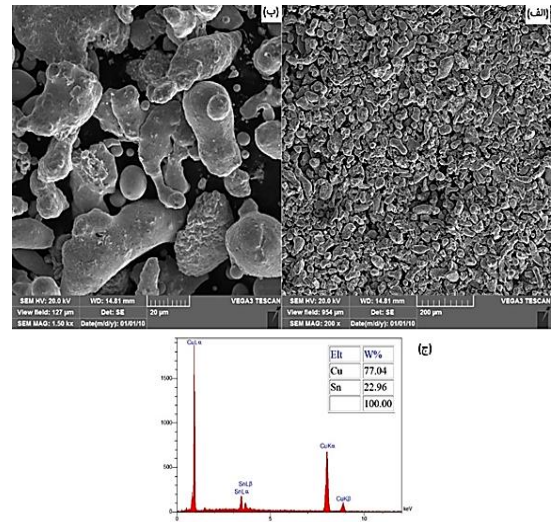
### ۲-۱- پودر برنز

پودر برنز با ترکیب Cu-20wt.%Sn ساخت کشور چین با درصد خلوص ۹۸٪ اتمیزه شده به وسیله گاز خنثی با متوسط اندازه ذره ۴۵ میکرون استفاده شده است. ذرات پودر برنز مورد استفاده به صورت بیضوی شکل هستند. مورفولوژی ذرات پودر برنز مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Grazing Incidence X-ray



شکل ۵: الف) و ب) مورفولوژی ذرات الماس با اندازه‌ی ۱۵ میکرون به همراه ج) آنالیز عنصری EDS



شکل ۳: الف) و ب) مورفولوژی ذرات کبالت به همراه ج) آنالیز عنصری EDS

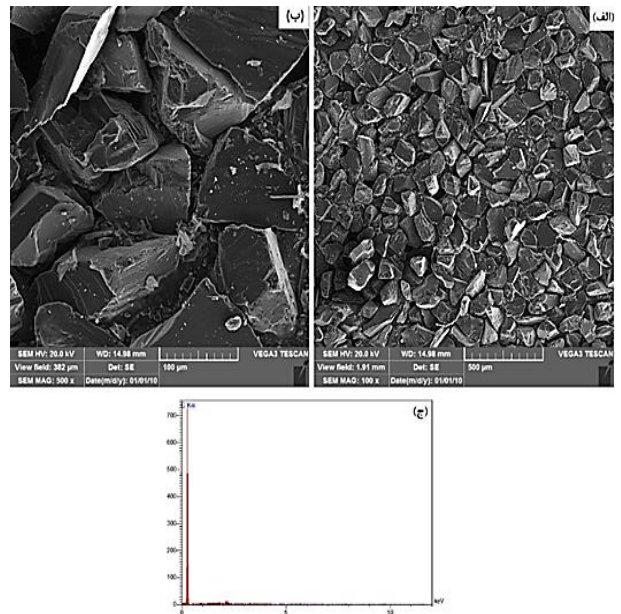
### ۳- تجهیزات

#### ۳-۱- آسیاب پرانرژی

برای انجام فرآیند آلیاژسازی مکانیکی Bronze-Co-Diamond از یک آسیاب گلوله‌ای از نوع سایشی مجهز به سیستم خنک‌کننده آبگرد و اتمسفر کنترل‌شده، استفاده شده است. تصویر دستگاه آسیاب سایشی مورد استفاده در این پروژه در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: آسیاب سایشی



شکل ۴: الف) و ب) مورفولوژی ذرات الماس به همراه ج) آنالیز عنصری EDS

#### ۲-۴- پودر الماس با اندازه ۱۵ میکرون

پودر الماس ساخت کشور چین با درصد خلوص ۹۹٪ با متوسط اندازه ذره ۱۵ میکرون استفاده شده است. ذرات پودر الماس مورد استفاده به صورت گوشه‌دار است (شکل ۵).



شکل ۸: سیستم پرس داغ تحت اتمسفر خنثی

#### ۴- آزمون‌ها

##### ۴-۱- بررسی ریزساختار

تغییر ریزساختار نمونه‌های زینتر شده به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN مجهز به طیف‌سنج EDS مورد بررسی قرار گرفته است. برای مطالعه ریزساختار نمونه‌های زینتر شده، سطح قطعات با سمباده‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۲۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ سمباده‌زنی و پولیش شده‌اند.

##### ۴-۲- استحکام خمشی و سختی سنجی

به منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های زینتر شده از آزمون‌های خمش سه نقطه‌ای و سختی سنجی راکول B استفاده شده است. آزمون خمش سه نقطه‌ای تحت استاندارد ASTM D790 انجام شد. نمونه‌های خمش با مقطع مستطیل دارای طول ۳۰ میلی‌متر، ضخامت ۳ میلی‌متر و عرض ۵ میلی‌متر هستند. سرعت حرکت فک  $3 \text{ mm/min}$  و  $1/6$  و طول تکیه‌گاه ۲۳ میلی‌متر است. آزمون خمش، با دستگاه Santam STM 150، ساخت کشور ایران صورت پذیرفته است. استحکام خمشی توسط فرمول زیر محاسبه می‌گردد.

$$\delta = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (1)$$

در رابطه فوق،  $\sigma$  استحکام خمشی، F نیروی وارد شده بر قطعه، L در طول تکیه‌گاه، b عرض و d ضخامت نمونه خمش است.

##### ۴-۳- چگالی سنجی

چگالی نمونه‌ها، به روش غوطه‌وری یا ارشمیدس طبق استاندارد ASTM B962 اندازه‌گیری شده است. چگالی تئوری توسط قانون مخلوط‌ها محاسبه شده است.

##### ۳-۲- ترازو

برای توزین پودرها، از ترازو کیا الکترونیک مدل BL2 با دقت یک صدم گرم استفاده شده است.

##### ۳-۳- گلاوباکس<sup>۱</sup>

برای جلوگیری از اکسیداسیون پودرهای آسیاب شده در حین تخلیه محفظه آسیاب، کلیه مراحل باز کردن درب محفظه آسیاب و تخلیه آن، در گلاوباکس و تحت اتمسفر گاز خنثی آرگون انجام گرفته است.

##### ۳-۴- پرس هیدرولیک

به منظور متراکم‌سازی نمونه‌ها برای آزمون احتراق و آزمون‌های مکانیکی از دستگاه پرس هیدرولیکی با ظرفیت ۱۰۰ تن مجهز به سنسور تنظیم و نگاهداری فشار استفاده شده است. در شکل ۷ تصویر این دستگاه نشان داده شده است.



شکل ۷: پرس هیدرولیک ۱۰۰ تن مجهز به سنسور تنظیم و نگاهداری فشار

##### ۳-۵- کوره و پرس تحت اتمسفر خنثی

به منظور تفجوشی پرس داغ نمونه‌های Bronze-Co-Diamond از محفظه تحت اتمسفر با دمای کاری  $1000^\circ\text{C}$  استفاده شده است (شکل ۸).

##### ۳-۶- قالب

برای پرس سرد و پرس گرم و تفجوشی نمونه‌ها از قالب گرم‌کار با قطر ۴ cm و ارتفاع ۱۰ cm از جنس فولاد گرم کار H13 استفاده شده است.

<sup>1</sup> Glove Box

پودرهای مس و قلع در نمونه‌های مجزا از قبل به‌صورت پودر از پیش آماده‌شده برنز استفاده‌شده‌اند.

### ۳-۵- آسیاب پراثری

برای تهیه پودرهای کامپوزیتی، پودر زمینه برنز به همراه الماس (و پودر کبالت در برخی از نمونه‌ها) داخل محفظه آسیاب ریخته شد. مقدار ۲ درصد وزنی اسید استئاریک به‌عنوان PCA به‌منظور جلوگیری از چسبیدن پودر به گلوله‌های آسیاب اضافه شده است. نسبت وزن گلوله به پودر در این آسیاب ۱:۳۰ انتخاب‌شده که به مقدار ۹۰۰ گرم گلوله فلزی از جنس استیل ۳۰۴ به قطر ۵mm استفاده گردید. فرآیند آسیاب با سرعت ۴۳۰rpm و با سه مدت زمان ۴ ساعت در یک محفظه‌ی آبگرد برای نمونه‌های مربوطه انجام گردید.

### ۴-۵- زینتر نمونه‌های کامپوزیتی

پودرهای تولید شده به روش آسیاب پراثری با وزن ۳۰ گرم به درون قالب ریخته شده سپس با فشار ۲۰۰bar پرس شدند. پس از پرس سرد قالب به درون محفظه‌ی پرس داغ منتقل شد. به‌منظور اطمینان از خنثی بودن اتمسفر محفظه، گاز آرگون در طول فرآیند به داخل محفظه پرس داغ تزریق شد. پس از افزایش دما تا ۶۰۰°C، به‌منظور هم‌دما شدن قالب و پودرها، پس از یک ساعت فشار ۲۰۰MPa اعمال شد. پس از یک ساعت فشار حذف و کوره خاموش شد. پس از سرد شدن کوره، قطعه کامپوزیتی از قالب خارج شد.

## ۶- نتایج

### ۱-۶- چگالی

چگالی نمونه‌های کامپوزیتی ساخته‌شده در جدول ۱ آورده شده است. مخلوط کامپوزیتی نمونه‌ها شامل کبالت با وزن مخصوص  $8/9 \text{ g/cm}^3$ ، برنز Cu-15Sn با وزن مخصوص  $8/68 \text{ g/cm}^3$ ، الماس D15 و D100 با وزن مخصوص  $3/5 \text{ g/cm}^3$  و چگالی تئوری با استفاده از قانون مخلوط و چگالی نمونه‌ها با استفاده از روش ارشمیدس محاسبه گردید. با بررسی نتایج جدول ۱ مشاهده می‌شود که چگالی نسبی نمونه‌ها بین ۹۶٪ تا ۹۹٪ هستند.

شکل ۱۰ نتایج به‌دست‌آمده از آزمون چگالی سنجی را نشان می‌دهد. در این شکل محور سمت چپ نشان‌دهنده چگالی ظاهری نمونه‌ها است و محور سمت راست بیان‌کننده‌ی میزان چگالی نسبی نمونه‌ها است.

$$\rho_c = (\rho_m X_m) + (\rho_f X_f) \quad (2)$$

در رابطه بالا  $\rho$  چگالی الیاف یا ماتریس و  $X$  درصد آن‌ها می‌باشد.

### ۴-۴- آزمون سایش

کلیه آزمایش‌های سایش در یک سرعت و مسافت لغزش ثابت و بار اعمالی 20N صورت پذیرفته است. آزمایش‌های انجام شده به روش پین روی دیسک فولادی سخت شده در دمای محیط و در مسافت ۱۰۰۰m انجام شده‌اند. در انتهای هر مرحله، ابتدا سطح نمونه‌ها توسط یک برس نرم تمیز و با الکل شسته شده و سطح آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۹ تصویر دستگاه آزمون سایش نشان داده شده است.



شکل ۹: دستگاه آزمون سایش به روش پین روی دیسک

### ۵- روش انجام پروژه

مراحل ساخت نمونه‌ها در این پژوهش شامل فراوری پودر کامپوزیتی، تفجوشی پودرها به روش پرس داغ است. در ادامه هر یک از این مراحل تشریح خواهد شد.

### ۱-۵- تهیه انواع پودر کامپوزیت

### ۲-۵- تعیین درصد‌های عناصر فلزی مختلف و نوع

### تقویت‌کننده‌ی الماس

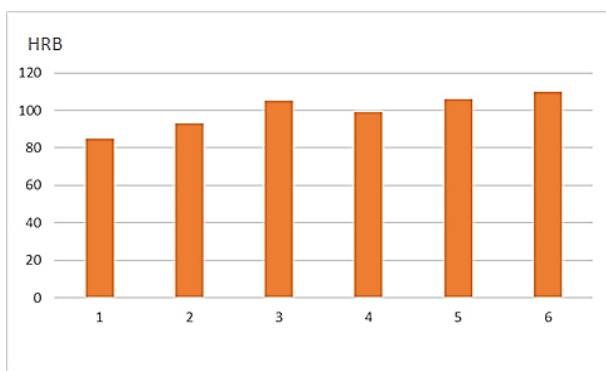
به‌منظور بررسی اثر مقدار الماس بر خواص کامپوزیت برنز-الماس، مقادیر ۸، ۱۰ و ۱۲ درصد الماس به زمینه برنز اضافه شده است. همچنین برای بررسی اثر افزودن کبالت بر خواص کامپوزیت‌ها، مقدار ۱۰ درصد وزنی کبالت به برخی از نمونه‌ها اضافه گردید. ابتدا پودر برنز با نسبت ترکیب 85Cu-15Sn و سپس در نمونه‌های بعدی با اضافه کردن ۹ درصد وزنی کبالت به ترکیب، تهیه شدند. لازم به ذکر است

جدول ۱: چگالی نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده

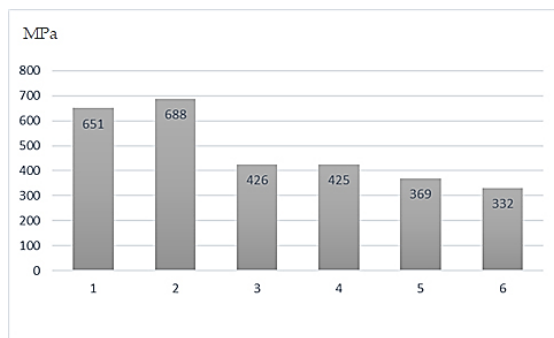
نمونه	چگالی نمونه	چگالی تئوری	چگالی نسبی
۱	۸/۶۱	۸/۶۸۰	۹۹/۱
۲	۸/۵۹	۸/۷۰۲	۹۸/۷
۳	۷/۹۵	۸/۱۸۴	۹۷/۱
۴	۸/۰۷	۸/۲۸۷	۹۷/۳
۵	۷/۹۳	۸/۱۸۴	۹۶/۸
۶	۷/۷۶	۸/۰۸۰	۹۶

### ۳-۶- استحکام خمشی

در شکل ۱۲ نتایج استحکام خمشی سه نقطه‌ای نمونه‌های ۱ تا ۶ آورده شده است. با مشاهده شکل ۱۲ می‌توان گفت حضور کبالت در زمینه برنز باعث ریزدانه شدن و توزیع یکنواخت فازهای بین فلزی زمینه می‌شود که در نتیجه استحکام خمشی نمونه ۲ نسبت به نمونه ۱ افزایش یافته است. همچنین با اضافه کردن الماس به زمینه فلزی، استحکام خمشی کاهش می‌یابد که احتمالاً این کاهش به دلیل حضور ذرات سرامیکی الماس در زمینه برنز است و هرچه درصد وزنی الماس افزایش می‌یابد، استحکام خمشی کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۱۱: مقادیر سختی نمونه‌های ساخته شده با اندازه‌گیری به روش راکول B (HRB)



شکل ۱۲: نتایج استحکام خمشی سه نقطه‌ای نمونه‌های کامپوزیتی

### ۴-۶- بررسی سطوح شکست

شکل ۱۳ تا شکل ۱۸ به ترتیب تصاویر سطح شکست حاصل از آزمون خمشی سه نقطه‌ای نمونه‌های ۱ تا ۶ را نشان می‌دهند. شکل ۱۳ سطح شکست نمونه ۱ که حاوی پودر آلایژی آسیاب نشده برنز را نشان می‌دهد، با مشاهده دیپیل‌ها و سطح برآمده که در شکل ۱۳-ب نشان داده شده، می‌توان گفت که در این نمونه شکست نرم اتفاق افتاده است. در شکل ۱۴ مربوط به نمونه ۲ به‌طور واضحی مشخص است که رشد ترک از میان دانه‌ها عبور کرده و شکست ترد اتفاق افتاده است و

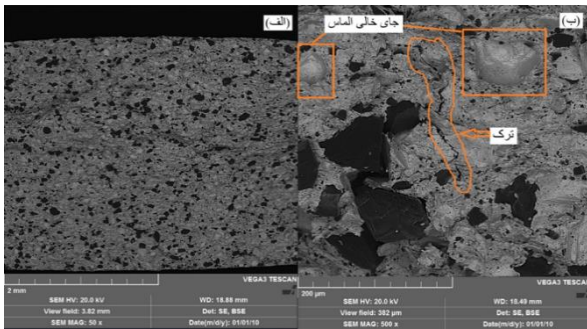


شکل ۱۰: نتایج به دست آمده از آزمون چگالی

با توجه به شکل ۱۰، نمونه‌های ۱ و ۲ که بدون الماس هستند چگالی بیشتری نسبت به نمونه‌های دارای الماس دارند و دلیل آن حضور الماس است؛ زیرا چگالی الماس بسیار کمتر از برنز است و با افزایش درصد وزنی آن، چگالی کامپوزیت کاهش می‌یابد. با مقایسه چگالی نسبی نمونه‌های ۴ تا ۶ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش الماس میزان شکل‌پذیری زمینه در حین تفجوشی پرس داغ کاهش پیدا می‌کند، در نتیجه حفرات بسیار ریز در ساختار باقی می‌ماند و باعث می‌شود که چگالی نسبی کامپوزیت‌ها کمتر از نمونه‌های آلایژی باشند. همچنین، عدم اتصال مناسب زمینه و ذرات الماس در فصل مشترک با افزایش درصد الماس، افزایش می‌یابد و این امر نیز باعث کمتر شدن چگالی نسبی می‌شود.

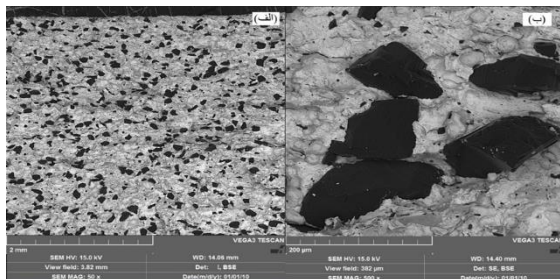
### ۲-۶- سختی سنجی

شکل ۱۱ مقادیر سختی نمونه ۱ تا ۶ را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود سختی نمونه ۲ بیشتر از سختی نمونه ۱ است که علت آن می‌تواند حضور کبالت در زمینه برنز و ریز شدن دانه‌ها و توزیع یکنواخت فازهای مس-قلع در زمینه باشد. همچنین افزودن الماس به زمینه برنز باعث افزایش سختی از HRB ۸۵ به HRB ۱۱۰ در نمونه حاوی ۱۲ درصد وزنی الماس (نمونه ۶) می‌شود.



شکل ۱۶: تصاویر SEM سطح شکست نمونه ۴ (الماس ۸٪ wt)

شکل ۱۷ و شکل ۱۸ تصاویر SEM سطح شکست نمونه‌های ۵ و ۶ را نشان می‌دهد. در این دو نمونه توزیع الماس‌ها مناسب بوده و تخریب کمتری در سطح آن‌ها مشاهده می‌شود. در این دو نمونه برخلاف نمونه‌هایی که ۴ ساعت آسیاب شده بودند دیمپل‌هایی مشاهده می‌شود که اندازه‌های کوچکی دارند و با توجه به اندازه‌شان می‌توان گفت که مربوط به الماس‌ها نیستند و این دیمپل‌ها در زمینه کامپوزیت شکل گرفته‌اند و می‌توان گفت تقریباً در زمینه شکست نرم-تری نسبت به نمونه‌ها با آسیاب ۴ ساعت اتفاق افتاده است و نتایج استحکام خمشی (شکل ۱۲) این را تأیید می‌کند.

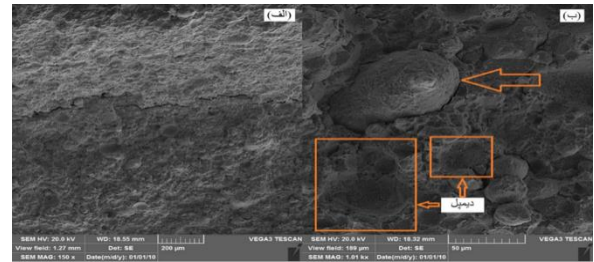


شکل ۱۷: تصاویر SEM سطح شکست نمونه ۵ (الماس ۱۰٪ wt)

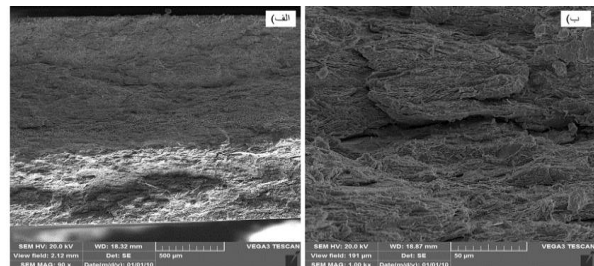
#### ۴-۵- بررسی رفتار سایشی

یکی از راهکارهای مؤثر جهت مطالعه رفتار سایشی مواد، بررسی سطوح سایش از نظر مورفولوژی و ترکیب شیمیایی سطح، میزان و تغییرات ضریب اصطکاک، لایه‌های شکل گرفته روی سطح و براده‌های حاصل از سایش آن است. در ادامه با استفاده از تصاویر میکروسکوپی، سطح سایش، ذرات ناشی از سایش، نمودارهای اصطکاک و آنالیزهای عنصری نمونه‌های ۱ تا ۶ بررسی می‌شوند.

می‌توان گفت که این اتفاق به دلیل آسیاب شدن پودرها و ریزدانه شدن آن‌ها است.



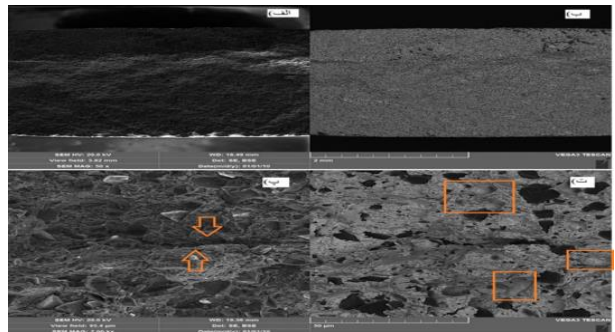
شکل ۱۳: تصویر SEM سطح شکست نمونه ۱ (برنز)



شکل ۱۴: تصاویر SEM سطح شکست نمونه ۲ (برنز-کبالت)

شکل ۱۵ تصاویر SEM سطح شکست نمونه ۳ که حاوی الماس ۱۵ میکرون بود را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که الماس در نمونه به‌طور مناسبی توزیع شده و ساختاری همگن در کنار زمینه را تشکیل داده است. در این نمونه به علت ریز بودن اندازه الماس‌ها جدایش الماس در تصاویر دیده نمی‌شود و به نظر می‌رسد اتصال مناسبی بین ذرات الماس و زمینه برقرار باشد. در این شکل یک ترک دیده می‌شود که چندان عمیق نبوده و رفتار آن با الماس‌ها قابل‌رؤیت نیست.

شکل ۱۶ تصاویر SEM سطح شکست نمونه ۴ را نشان می‌دهد. در این نمونه توزیع الماس مناسب بوده است. در این نمونه جدایش سطحی الماس مشاهده می‌شود.

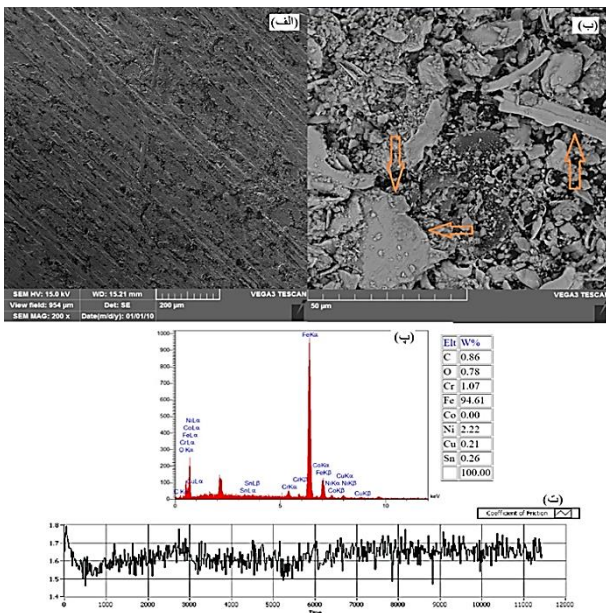


شکل ۱۵: تصاویر SEM سطح شکست نمونه ۳ (برنز- الماس با اندازه ۱۵

میکرون)

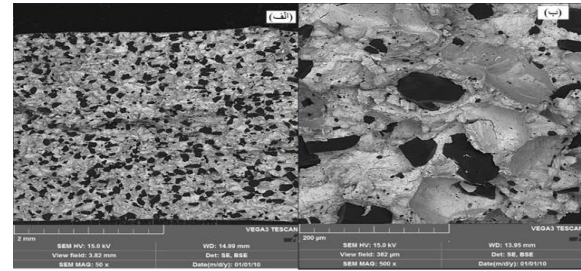
مقاومت به سایش بالاتری نسبت به نمونه ۱ دارد و می‌توان گفت این اتفاق به دلیل وجود کربالت در ترکیب نمونه ۲ است.

شکل ۲۱-الف تصویر SEM سطح سایش نمونه ۳ را نشان می‌دهد در این شکل مشاهده می‌شود که خطوط سایش در سرتاسر نمونه به وجود آمده‌اند و هیچ‌گونه کنده‌شدگی از سطح نمونه مشاهده نمی‌شود. پس می‌توان گفت که این نمونه رفتار سایش خراشان بسیار مناسبی از خود نشان داده است. شکل ۲۱-ب براده‌های حاصل از سایش نمونه ۳ را نشان می‌دهد که مشاهده می‌شود براده‌های به وجود آمده تماماً از نوع خراشان بوده است. به علت اندازه ۱۵ میکرونی الماس‌ها این براده‌های به وجود آمده ریز هستند. شکل ۲۱-پ نمودار تغییرات ضریب اصطکاک نمونه ۳ را نشان می‌دهد.



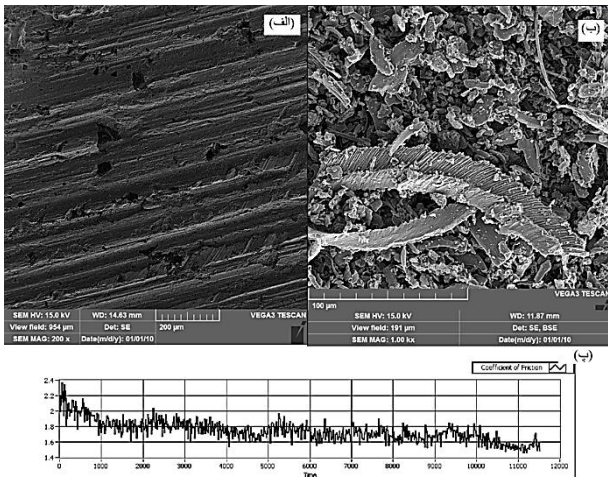
شکل ۱۹: الف) تصویر SEM سطح سایش، ب) تصویر براده‌ی حاصل از سایش و پ) آنالیز EDS براده‌های حاصل از سایش و ت) نمودار ضریب اصطکاک برحسب زمان نمونه ۱ (برنز)

شکل ۲۲-الف تصویر SEM سطح سایش نمونه ۴ را نشان می‌دهد. در این نمونه توزیع الماس مناسب بوده و تخریب کمتری صورت گرفته است. در این نمونه شیارهای طولی منظمی با عمق بالا مشاهده می‌شود که بیانگر مکانیزم سایش خراشان در این نمونه است و در شکل ۲۲-ب مشاهده می‌شود که براده‌های حاصل از سایش نمونه ۴ نسبتاً درشت بوده و با توجه به مورفولوژی آن‌ها می‌توان گفت که از سطح دیسک براده‌های طولی جدا شده‌اند که این موضوع نیز بیانگر وجود سایش چسبان در نمونه است. به‌طور کلی هم سایش خراشان و هم سایش چسبان در این نمونه مشاهده می‌شود و می‌توان گفت که مقاومت به



شکل ۱۸: تصاویر SEM سطح شکست نمونه ۶ (الماس ۱۲٪ wt با آسیاب ۳۰ دقیقه)

شکل ۱۹-الف تصویر SEM سطح سایش نمونه ۱ را نشان می‌دهد، در این شکل مشاهده می‌شود که خطوط منظمی طی سایش در سطح به وجود آمده با این حال پستی و بلندی‌های کوچکی در نمونه مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد تغییر شکل پلاستیک در این نمونه وجود داشته ولی شدید نبوده است. شکل ۱۹-ب براده‌های حاصل از سایش نمونه ۱ را نشان می‌دهد و مشخص است که براده‌های به نسبت بزرگ با اشکال مختلف دیده می‌شود و با توجه به آنالیز EDS این ذرات که در شکل ۱۹-پ آورده شده است، می‌توان فهمید که اکثر این براده‌های تشکیل شده آهن بوده و از سطح دیسک سایش کنده شده است و شکل و ظاهر این براده‌ها نشان می‌دهد که نیروی اصطکاک بین دو نمونه بالا بوده که ذرات به این شکل از سطح دیسک کنده شده‌اند. همچنین می‌توان گفت که این نمونه مقاومت به سایش بالایی را دارا است. شکل ۱۹-ت نمودار ضریب اصطکاک نمونه ۱ برحسب زمان را نشان می‌دهد. شکل ۲۰-الف تصویر SEM سطح سایش نمونه ۲ را نشان می‌دهد. در تصویر دیده می‌شود که مناطق مختلفی از سطح نمونه کنده شده و در مناطق دیگر تغییر شکل پلاستیک شدیدی دیده می‌شود. با این حال مناطقی هم کاملاً به‌صورت خطوط صاف وجود دارد که بیانگر سایش خراشان است. شکل ۲۰-ب براده‌های حاصل از سایش را نشان می‌دهد که اشکال بزرگ و متفاوتی دارند و با توجه به آنالیز EDS این براده‌ها می‌توان نتیجه گرفت که اغلب این براده‌ها از سطح دیسک کنده شده‌اند و اصطکاک بین دیسک و نمونه بالا بوده و به همین دلیل هم در نمونه و هم در دیسک سایش چسبان اتفاق افتاده و براده‌هایی با اندازه‌های بزرگ کنده شده‌اند. شکل ۲۰-ت نمودار ضریب اصطکاک نمونه ۲ را نشان می‌دهد. در این نمونه ضریب اصطکاک بالاتری نسبت به نمونه ۱ مشاهده می‌شود به‌طوری‌که در ابتدای آزمون ضریب اصطکاک به‌طور متوسط ۱/۸ و در انتهای آزمون ۱/۹ است و تقریباً روند ثابتی دارد. به‌خاطر بالاتر بودن ضریب اصطکاک براده‌های درشت‌تری نسبت به نمونه قبلی به وجود آمد و در کل بنابر دلایل ذکر شده این نمونه

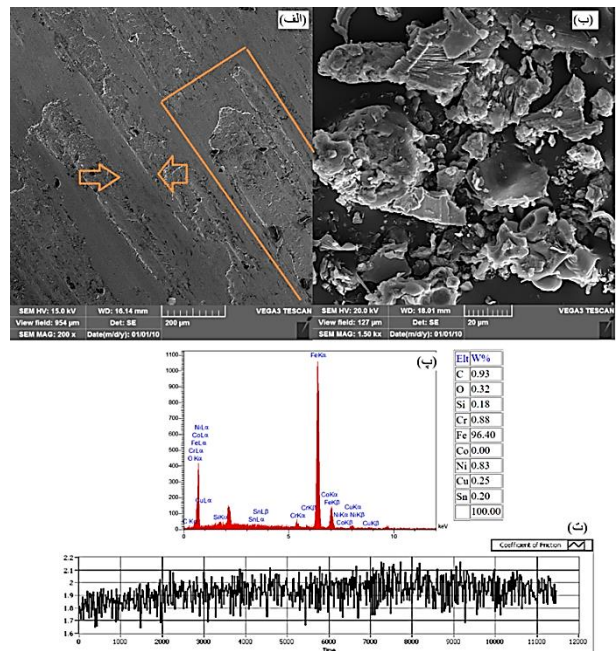


شکل ۲۲: الف) تصویر SEM سطح سایش، ب) تصویر براده‌ی حاصل از سایش و پ) نمودار ضریب اصطکاک برحسب زمان نمونه ۴ (برنز-الماس) ۸٪ (wt)

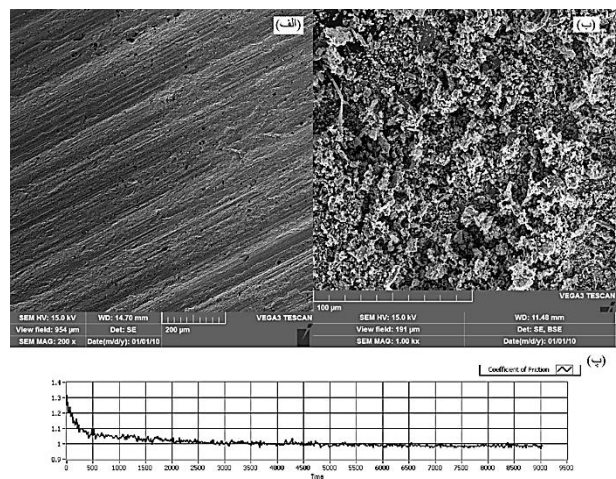
شکل ۲۳-الف تصویر SEM سطح سایش نمونه ۵ را نشان می‌دهد در این نمونه مشاهده می‌شود که الماس وضعیت ظاهری بهتری دارد و حداقل تخریب مشاهده می‌شود به شکلی که در طول فرآیند سایش زمینه‌ی کامپوزیت دچار سایش شدیدی نشده است. دلیل این اتفاق می‌تواند اتصال خوب الماس و دیسک سایش باشد به نحوی که الماس‌ها اجازه تماس دیسک به زمینه کامپوزیت را نمی‌دهند و سایش غالباً با الماس انجام می‌شود. شکل ۲۳-ب براده‌های حاصل از سایش نمونه ۵ را نشان می‌دهد که در آن مشاهده می‌شود که براده‌های ریزتری نسبت به براده‌های نمونه ۴ به وجود آمده که این موضوع بیانگر این است که نمونه با مکانیزم سایش خراشان سطح دیسک سایش را تحت تأثیر قرار داده است. شکل ۲۳-پ تغییرات ضریب اصطکاک نمونه ۵ را نشان می‌دهد که مشاهده می‌شود که ضریب اصطکاک در این نمونه پایین تر از نمونه ۴ بوده و نحوه کاهش ضریب اصطکاک در این نمونه بسیار مناسب است و بیانگر مکانیزم سایش خراشان مناسبی است.

شکل ۲۴-الف تصویر SEM سطح سایش نمونه ۶ را نشان می‌دهد. در این نمونه مشاهده می‌شود که دیسک سایش نتوانسته سطح این نمونه و یا زمینه‌ی آن را تخریب کند و هیچ‌گونه خطوط طولی و یا کنده‌شدگی در سطح نمونه مشاهده نمی‌شود و با توجه به شکل ۲۴-ب می‌توان گفت که نمونه کاملاً دیسک را خورده و در طی فرآیند سایش هیچ تخریبی در خود نمونه صورت نگرفته است همان‌طور که در شکل ۲۴-پ مشاهده می‌شود رفتار سایشی این نمونه همانند نمونه ۵ بوده و تفاوت چندانی مشاهده نمی‌شود ولی در این نمونه با توجه به

سایش مناسبی نسبت به نمونه‌های حاوی کبالت، ندارد. شکل ۲۲-پ ضریب اصطکاک نمونه ۴ را نشان می‌دهد که دارای یک منحنی نزولی است ولی همچنان ضریب اصطکاک بالاتری نسبت به نمونه‌های دارای کبالت دارد.



شکل ۲۰: الف) تصویر SEM سطح سایش، ب) تصویر براده‌ی حاصل از سایش و پ) آنالیز EDS براده‌های حاصل از سایش و ت) نمودار ضریب اصطکاک برحسب زمان نمونه ۲ (برنز-کبالت)



شکل ۲۱: الف) تصویر SEM سطح سایش، ب) تصویر براده‌ی حاصل از سایش و پ) نمودار ضریب اصطکاک برحسب زمان نمونه ۳ (برنز-الماس) با اندازه ۱۵ میکرون

### ۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، سختی، سایش و اثر حضور درصدهای وزنی مختلف ذرات الماس بر خواص کامپوزیت برنز الماس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد نمونه‌هایی که بدون الماس هستند چگالی بیشتری نسبت به نمونه‌های دارای الماس دارند. همچنین با اضافه کردن الماس به زمینه فلزی، استحکام خمشی کاهش می‌یابد که احتمالاً این کاهش به دلیل حضور ذرات سرامیکی الماس در زمینه برنز است و هرچه درصد وزنی الماس افزایش می‌یابد، استحکام خمشی کاهش پیدا می‌کند. ضمن اینکه با افزایش درصد الماس، مقاومت به سایش نیز افزایش پیدا می‌کند.

### ۸- منابع

[1] C. Artini, M. L. Muolo, and A. Passerone, "Diamond-metal interfaces in cutting tools: a review," *Journal of Materials Science*, Vol. 47, No. 7, pp. 3252–3264, 2012, doi: [10.1007/s10853-011-6164-6](https://doi.org/10.1007/s10853-011-6164-6).

[2] L. J. de Oliveira, R. P. da R. Paranhos, R. d. S. Guimarães, G. S. Bobrovitchii, و M. Filgueira, "Use of PM Fe-Cu-SiC composites as bonding matrix for diamond tools," *Powder Metallurgy*, Vol. 50, No. 2, pp. 148–152, 2007. [Online]. Available: doi: [10.1179/174329007X161982](https://doi.org/10.1179/174329007X161982)

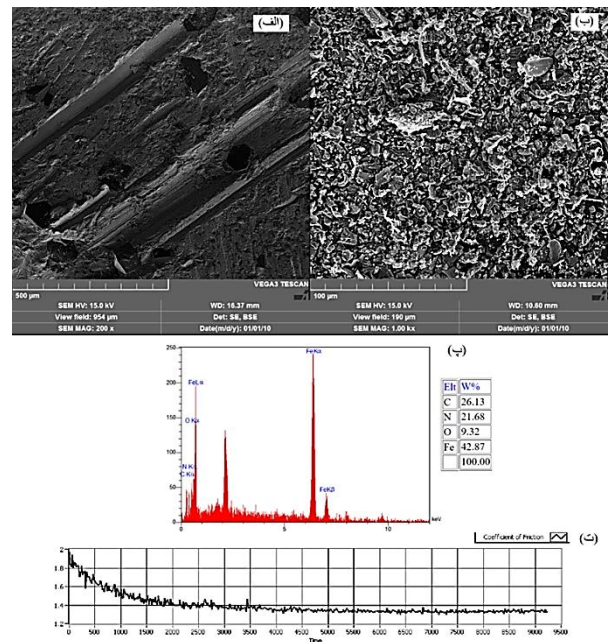
[3] Y.-Z. Hsieh و S.-T. Lin, "Diamond tool bits with iron alloys as the binding matrices," *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 72, No. 2, pp. 121–125, 2001. [Online]. Available: doi: [10.1016/S0254-0584\(01\)00419-9](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(01)00419-9)

[4] P. Han, F.-r. Xiao, W.-j. Zou, و B. Liao, "Effect of different oxides addition on the thermal expansion coefficients and residual stresses of Fe-based diamond composites," *Ceramics International*, Vol. 40, No. 3, pp. 5007–5013, 2014. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.ceramint.2013.10.130](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.10.130)

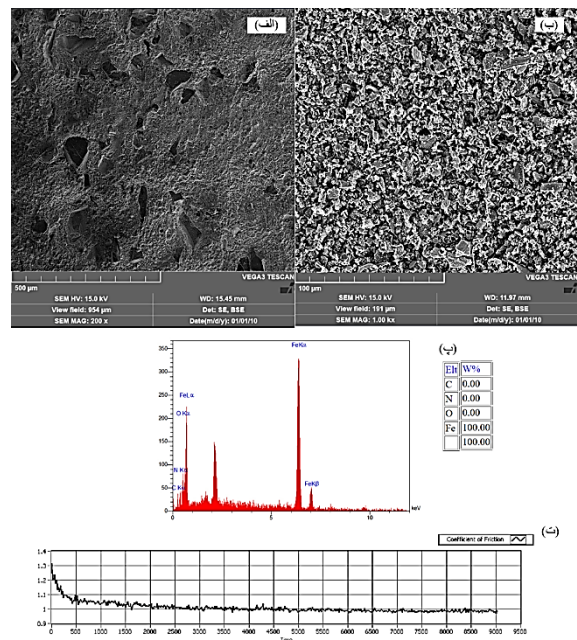
[5] Y.-Z. Hsieh, J.-F. Chen, و S.-T. Lin, "Pressureless sintering of metal-bonded diamond particle composite blocks," *Journal of Materials Science*, Vol. 35, pp. 5383–5387, 2000. [Online]. Available: doi: [10.1023/A:1004855130887](https://doi.org/10.1023/A:1004855130887)

[6] D. Lison, "Human toxicity of cobalt-containing dust and experimental studies on the mechanism of

تصویر سایش آن می‌توان گفت که مقاومت به سایش بسیار بالایی در آن مشاهده شد.



شکل ۲۳: (الف) تصویر SEM سطح سایش، (ب) تصویر براده‌ی حاصل از سایش و (پ) آنالیز EDS براده‌های حاصل از سایش (ت) نمودار ضریب اصطکاک برحسب زمان نمونه ۵ (برنز-کبالت-الماس ۱۰ wt% با آسیاب ۱ ساعت)



شکل ۲۴: (الف) تصویر SEM سطح سایش، (ب) تصویر براده‌ی حاصل از سایش، (پ) آنالیز EDS براده‌های حاصل از سایش (ت) نمودار ضریب اصطکاک برحسب زمان نمونه ۶ (برنز-کبالت-الماس ۱۲ wt% با آسیاب ۳۰ دقیقه)

- [15] H. Dong, "A study of mechanical properties and microstructure of Cu-based matrixes for diamond ultrathin sawing," *Results in Physics*, Vol. 12, pp. 748–753, 2019. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.rinp.2018.12.063](https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.12.063)
- [16] H. Tönshoff, H. Hillmann-Apmann, و J. Asche, "Diamond tools in stone and civil engineering industry: cutting principles, wear and applications," *Diamond and Related Materials*, Vol. 11, No. 3-6, pp. 736–741, 2002. [Online]. Available: doi:[10.1016/S0925-9635\(01\)00526-2](https://doi.org/10.1016/S0925-9635(01)00526-2)
- [17] R. German, *Sintering: from empirical observations to scientific principles*. Butterworth-Heinemann, 2014.
- [18] D. M. Ştefănescu, "Issues in liquid processing of particulate metal matrix composites," in *Key Engineering Materials*, Vol. 79: Trans Tech Publ, pp. 75–90, 1993. [Online]. Available: doi:[10.4028/www.scientific.net/KEM.79-80.75](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.79-80.75)
- [19] J. T. Blucher, "Discussion of a liquid metal pressure infiltration process to produce metal matrix composites," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 30, No. 3, pp. 381–390, 1992. [Online]. Available: doi:[10.1016/0924-0136\(92\)90206-A](https://doi.org/10.1016/0924-0136(92)90206-A)
- [20] M. Flemings, "Semi-solid forming: the process and the path forward," *Metallurgical Science and Technology*, Vol. 18, No. 2, 2000.
- [21] H. Moriguchi, K. Tsuduki, A. Ikegaya, Y. Miyamoto, و Y. Morisada, "Sintering behavior and properties of diamond/cemented carbides," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 25, No. 3, pp. 237–243, 2007. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.ijrmhm.2006.08.007](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2006.08.007)
- [22] J. V. Naidich, "The wettability of solids by liquid metals," in *Progress in Surface and Membrane Science*, Vol. 14: Elsevier, pp. 353–484, 1981. [Online]. Available: doi: [10.1016/B978-0-12-571814-4.50012-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-571814-4.50012-1)
- [23] U. E. Klotz, C. Liu, F. A. Khalid, و H.-R. Elsener, "Influence of brazing parameters and alloy composition on interface morphology of brazed diamond," *Materials Science and Engineering: A*, interstitial lung disease (hard metal disease)," *Critical Reviews in Toxicology*, Vol. 26, No. 6, pp. 585–616, 1996. [Online]. Available: doi:[10.3109/10408449609089892](https://doi.org/10.3109/10408449609089892)
- [7] J. Gál, A. Hursthouse, P. Tatner, F. Stewart, و R. Welton, "Cobalt and secondary poisoning in the terrestrial food chain: data review and research gaps to support risk assessment," *Environment International*, Vol. 34, No. 6, pp. 821–838, 2008. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.envint.2007.12.004](https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.12.004)
- [8] J. C. Sung و M. Sung, "The brazing of diamond," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 27, No. 2, pp. 382–393, 2009. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.ijrmhm.2008.09.006](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.09.006)
- [9] L. Wang, Q. Xia, و Y. Li, "The effects of high pressure processing and slightly acidic electrolysed water on the structure of Bacillus cereus spores," *Food Control*, Vol. 79, pp. 94–100, 2017. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.foodcont.2017.03.025](https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.03.025)
- [10] J. S. Konstanty, E. Baczek, A. Romanski, و D. Tyrala, "Wear-resistant iron-based Mn–Cu–Sn matrix for sintered diamond tools," *Powder Metallurgy*, Vol. 61, No. 1, pp. 43–49, 2018. [Online]. Available: doi:[10.1080/00325899.2017.1412356](https://doi.org/10.1080/00325899.2017.1412356)
- [11] X. Zhao و L. Duan, "A review of the diamond retention capacity of metal bond matrices," *Metals*, Vol. 8, No. 5, p. 307, 2018. [Online]. Available: doi:[10.3390/met8050307](https://doi.org/10.3390/met8050307)
- [12] R. Colaço و R. Vilar, "Abrasive wear of metallic matrix reinforced materials," *Wear*, Vol. 255, No. 1-6, pp. 643–650, 2003. [Online]. Available: doi: [10.1016/S0043-1648\(03\)00081-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00081-8)
- [13] J. Kauzlarich و J. Williams, "Archard wear and component geometry," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol. 215, No. 4, pp. 387–403, 2001. [Online]. Available: doi:[10.1243/1350650011543286](https://doi.org/10.1243/1350650011543286)
- [14] J. Zhang, "Wear regimes and transitions in ceramic particulate-reinforced aluminum alloys," 1995.

*Mechanical Engineering*, Vol. 19, No. 3, p. 354, 2008.

[26] X. Xu, X. Tie, و H. Wu, "The effects of a Ti coating on the performance of metal-bonded diamond composites containing rare earth," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 25, No. 3, pp. 244–249, 2007. [Online]. Available: doi:[10.1016/j.ijrmhm.2006.07.001](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2006.07.001)

Vol. 495, No. 1-2, pp. 265–270, 2008. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.msea.2007.10.118](https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.10.118)

[24] X. Zhao و L. Duan, "A review of the diamond retention capacity of metal bond matrices," *Metals*, Vol. 8, No. 5, p. 307, 2018. [Online]. Available: doi:[10.3390/met8050307](https://doi.org/10.3390/met8050307)

[25] Y. Zhou, F. Zhang, C. Wang, "Brazing of Diamond by Ag-Cu-Zn Alloy with Cr Powder and the Microstructure of the Interfaces," *China*