



## مطالعه تجربی و بهبود فرآیند ساخت سیم وایرکات برنجی

سارا آمری<sup>۱</sup>، رامین هاشمی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: rhashemi@iust.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

## مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۹ شهریور ۱۴۰۲

پذیرش: ۱۶ دی ۱۴۰۲

## کلیدواژگان:

سیم برش

دستگاه وایرکات

سیم‌های وایرکات

الکتروود سیمی

سیم‌های به‌کار رفته در فرآیند وایرکات به‌عنوان عامل برش قطعه کار از اهمیت بالایی در این روش ماشین‌کاری نوین برخوردارند. عواملی مانند قطر سیم‌ها، جنس آن‌ها و روش ساختشان باعث می‌شود تا تولید آن‌ها به‌سادگی امکان‌پذیر نباشد. در پژوهش پیش رو یک نوع سیم پرکاربرد در صنعت داخل کشور انتخاب (تولید شده در کشور چین)، بررسی و آنالیز شده است. در مراحل اولیه پژوهش نمونه سیم چینی آنالیز عنصری شد و ترکیبات آن استخراج شد، سپس تحت آزمون کشش قرار گرفت و خواص مکانیکی آن نیز به دست آمد. در مراحل بعدی سیم باهدف بومی‌سازی فرآیند ساخت آن توسط دو روش ریخته‌گری و اکستروژن ساخته شد و مجدداً تحت آنالیزهای شیمیایی و آزمون کشش قرار گرفت. همچنین در مرحله نهایی تمامی سیم‌های ساخته‌شده بر روی دستگاه وایرکات تحت پارامترها و شرایط یکسان قرار داده و بر روی یک قطعه کار آزمایش شدند. نوآوری مهم پژوهش کنونی در روش ساخت سیم وایرکات به روش اکستروژن به‌منظور تولید انبوه در داخل کشور می‌باشد. نمونه سیم ساخته شده، تا ۸۰٪ استحکام بیشتری نسبت به سیم چینی داشته و همچنین ۱۰ برابر نرم‌تر از آن است که این افزایش استحکام و نرمی بیشتر منجر به مقاومت بیشتر سیم و کاهش احتمال پارگی آن حین عملیات ماشین‌کاری می‌شود.

## Experimental study and improving the manufacturing process of brass wire in wire-cut machining

Sara Ameri<sup>1</sup>, Ramin Hashemi<sup>2\*</sup>

1- MSc Student, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

\* Corresponding Author's Email: rhashemi@iust.ac.ir

## Article Information

## Original Research Paper

Received: 20 September 2023

Accepted: 6 January 2024

## Keywords:

Wire EDM

Wire EDM Device

Wire EDM Wires

Wire Electrode

## Abstract

The wires used in the wire EDM process are of great importance in this new machining process as the cutting agent of the workpiece. Factors such as the diameter of these wires, their material, and their manufacturing method make their production simply not possible. In the upcoming research, a widely used type of Chinese wire in the domestic industry has been selected, examined, and analyzed. In the early stages of the research, the Chinese wire sample was elementally analyzed and its compounds were extracted, then it was subjected to a tensile test and its mechanical properties were also extracted. In the next steps, the wire was made with the aim of making a Chinese model by two methods of casting and extrusion and was again subjected to chemical analysis and tensile test. Also, in the final stage, all the wires made on the wire EDM machine were put under the same parameters and conditions and tested on a piece of work. The important innovation of the current research is in making wire EDM wire by extrusion method for mass production inside the country. The manufactured wire sample has up to 80% more strength than Chinese wire and is also 10 times softer than that, which increases the strength and softness of the wire leading to greater resistance of the wire and reducing the possibility of its tearing during machining operations.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Ameri S, Hashemi R. Experimental study and improving the manufacturing process of brass wire in wire-cut machining. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 July 23;10(5):79-91. doi: 10.22034/IJME.2024.412534.1823 [In Persian]

## ۱- مقدمه

ماشین کاری وایرکات<sup>۱</sup> فرآیندی است که در آن از یک ابزار سیمی برای برش یک قطعه کار استفاده می‌شود. ابزار سیمی را می‌توان از هر ماده‌ای تهیه کرد، اما معمولاً از فولاد ساخته می‌شود. یک دستگاه وایرکات از سه مؤلفه اصلی تشکیل شده است: قرقره، موتورهای محرک و سیستم کنترل.

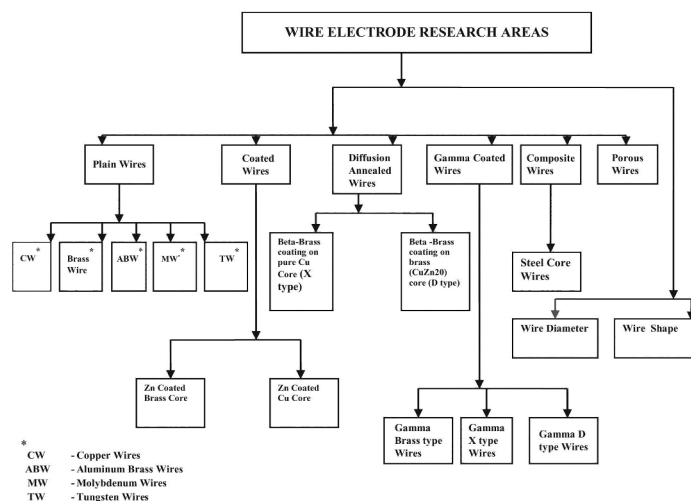
مواد متنوعی به‌عنوان سیم‌های برش در فرآیند وایرکات استفاده می‌شود که هرکدام بسته به نوع قطعه کار و شرایط برش خواص متفاوتی دارد. یکی از مشکلات بزرگ این سیم‌ها فناوری ساخت آن‌ها است. آن‌ها به دلیل قطر کم و خواص خاص خود از روش‌های مشخص و مخصوصی ساخته می‌شوند و کشور حجم بسیاری از آن‌ها را از طریق واردات برای صنعتگران تامین می‌کند. در این پژوهش به بررسی روش اکستروژن در ساخت یک سیم پرکاربرد در صنعت داخل کشور پرداخته شده است.

سیم‌های برش از اهمیت بالایی در فرآیند وایرکات برخوردار هستند. این سیم‌ها اغلب از خارج از کشور وارد شده و هزینه گزافی را به کشور تحمیل می‌کنند. برخی از آن‌ها قابلیت ساخت در کشور را داشته اما قابل تولید انبوه نیستند. در پژوهش کنونی یک نمونه سیم چینی پرکاربرد در صنعت داخل ایران را بررسی کرده و روشی به‌منظور تولید انبوه آن پیشنهاد شده است.

ابتدا نمونه سیم چینی تحت آنالیزهای شیمیایی و آزمون‌های بررسی خواص مکانیکی قرار گرفت تا خواص آن مشخص شود. در ادامه از دو روش ریخته‌گری و اکستروژن به‌منظور تولید سیمی مشابه استفاده شد و در تمامی حالات سیم مذکور مورد آنالیزهای شیمیایی و آزمون‌های مکانیکی قرار گرفت. در نهایت روش مناسب باهدف استحکام و ویژگی‌های مطلوب و تولید انبوه پیشنهاد داده شد. سیم‌های برنجی علاوه بر کاربرد در ماشین کاری به روش وایرکات، کاربردهای دیگری نیز دارند که عبارت‌اند از: کاربردهای معمول سیم برنجی شامل اتصالات الکتریکی، فنرها، جواهرات، بست‌های مکانیکی، اجزای آزمایشگاهی و ابزار دقیق و پرچها است. بخش‌های صنعتی که از استفاده از این محصول سود می‌برند عبارت‌اند از: هوافضا، خودروسازی، کشتی‌سازی و مهندسی برق [۱].

در بحث تمیزکاری، سیم برنجی یک محصول ایده‌آل برای استفاده در برس‌ها برای تمیز کردن قطعات اکستروژن شده است. این آلیاژ در مقایسه با سیم فولادی و فولادی زنگ‌نزن نرم‌تر است و فلزات سخت‌تر را خراش نمی‌دهد. برنج به‌عنوان یک ماده بدون جرقه و غیر مغناطیسی برای استفاده در محیط‌های کاری خطرناک بی‌خطر است و همچنین برای استفاده در دماهای عملیاتی بالا (تا ۳۰۰ درجه فارنهایت) مناسب است [۱].

حیطه‌های پژوهشی متفاوت و متنوعی در بحث ماشین کاری تخلیه الکتریکی و انواع سیم‌های وایرکات وجود دارد که به‌طور خلاصه، طرح‌واره‌های از انواع آن‌ها را در شکل ۱ مشاهده شده است.



شکل ۱ دسته‌بندی حوزه‌های پژوهشی سیم‌های وایرکات [۲]

<sup>۱</sup> Wire EDM (WEDM)

خواص مورد نیاز برای الکتروود سیمی عبارت‌اند از: خواص الکتریکی، خواص هندسی، خواص فیزیکی و خواص مکانیکی. رسانایی یک ماده تعیین می‌کند که انرژی با چه سرعتی از منبع تغذیه به نقطه واقعی برش منتقل شود [۳]. بالا بودن کیفیت سطح سیم باعث برش سریع‌تر می‌شود.

خواص مکانیکی ضروری الکتروود سیم، استحکام کشش، افزایش طول و صافی سطح آن است. استحکام کشش بالا نشان‌دهنده توانایی الکتروود سیم برای تحمل کشش در حین ماشین‌کاری است. افزایش طول بیان می‌کند که سیم در حین برش قبل از پاره شدن چقدر تغییر طول می‌دهد. صاف بودن سطح در تغذیه خودکار سیم مهم است [۴]. سیم‌های نرم (تنش تسلیم حدود ۴۰۰ مگاپاسکال) برای برش مخروطی و سیم‌های با استحکام کششی بالا (تنش تسلیم در حدود ۸۰۰ مگاپاسکال) برای برش با دقت بالا استفاده می‌شود [۲].

در پژوهش اسلاتینو [۵] مواد مختلف الکتروود سیم برای بهبود عملکرد وایرکات مورد مطالعه قرار گرفته است. کومار و همکاران [۶] در سال ۲۰۲۲ پژوهشی را تحت عنوان بررسی نسبت سایش سیم وایرکات در فرآیند ماشین‌کاری کامپوزیت‌های با ماتریس آلومینیومی انجام دادند. آن‌ها تأثیر پارامترهای فرآیند را بر نسبت سایش الکتروود سیم<sup>۱</sup> در طول ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی بررسی کردند. نتایج تجربی برای توسعه مدل پیش‌بینی WWR استفاده شد. تلاش‌ها برای به دست آوردن کیفیت ماشین‌کاری از طریق شناسایی شرایط بهینه ماشین‌کاری برای به حداقل رساندن WWR صورت گرفت.

پژوهشی توسط چاندو و یاداو و همکاران [۷] در سال ۲۰۲۲ بر روی تأثیر انواع جنس‌های سیم وایرکات بر روی عرض شکاف ایجاد شده در کامپوزیت‌های آلومینیوم انجام شد. چاندو و یاداو در مورد بررسی تأثیر مواد سیمی مانند سیم برنجی بدون روکش، مفتول برنجی با پوشش نفوذی و روی در عرض دهانه در سیم برش وایرکات حین ماشین‌کاری مواد کامپوزیتی زمینه فلزی هیبریدی جدید آلومینیوم تحقیقاتی انجام داد. روش ریخته‌گری سرد<sup>۲</sup> برای ترکیب مواد کامپوزیتی زمینه فلزی هیبریدی آلومینیومی استفاده می‌شود به‌گونه‌ای که آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با ۵٪ کاربید سیلیکون<sup>۳</sup> و ۵٪ گرافیت تقویت شده است. مشخص شد که عملکرد ماشین‌کاری مواد کامپوزیتی با ماتریس فلزی هیبریدی آلومینیومی جدید در WEDM با سیم برنجی، حداقل عرض شکاف برش را نتیجه داد.

رامامورثی و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۵ پژوهشی تحت عنوان تجزیه و تحلیل عملکرد الکتروودهای سیمی در ماشین‌کاری آلیاژ Ti-6Al-4V با استفاده از فرآیند ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی انجام دادند. یان و همکاران [۹] در سال ۲۰۲۰ پژوهشی باهدف تولید پایدار کیفیت سطح قطعه کار با یکنواختی بالا در ماشین‌کاری وایرکات با ایجاد ریزساختار سطح روی الکتروود سیمی انجام دادند. در مرحله اول، یک تحقیق تجربی در مورد یکنواختی کیفیت سطح قطعه کار زمانی که از الکتروود سیمی پوشش داده شده روی<sup>۴</sup> استفاده می‌شود، اجرا شد. می‌توان دریافت که زبری سطح (Ra) و کیفیت سطح در ناحیه میانی (و به دنبال آن ناحیه بالا و پایین) بدترین حالت خود را داشتند. یکنواختی Ra می‌تواند تا ۰/۴۴ باشد. علاوه بر این، فرآیند تولید SMWE شرح داده شده است که شامل ریخته‌گری، پوشش، بازپخت و پردازش پلاستیک است. مکانیزم تشکیل ریز ساختار سطح روی الکتروود سیمی بر اساس ضریب انبساط حرارتی لایه پوشش کمتر از هسته سیم است. سپس در مقایسه با ZCWE، بهبودهای SMWE بر روی ویژگی تخلیه و یکنواختی کیفیت سطح قطعه کار تحلیل شدند.

ژانگ و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۲۳ پژوهشی را تحت عنوان روش جبران سایش الکتروود سیمی برای ماشین‌کاری میکرو وایرکات انجام دادند. باهدف بررسی سایش الکتروود سیمی در میکرو وایرکات، روشی برای معرفی ولتاژ جبرانی بین بازه پالس (T<sub>off</sub>) در این مقاله پیشنهاد شده است. این روش می‌تواند اثر الکترو شیمیایی موجود در WEDM را افزایش دهد و WEW را با استفاده از اثر رسوب کاهش یون فلزی جبران کند. آزمایش تأیید پالس بدون بار به‌طور غیرمستقیم امکان سنجی روش جبران را نشان می‌دهد. ولتاژ جبرانی خیلی زیاد بر دی‌یونیزاسیون T<sub>off</sub> و پایداری ماشین‌کاری تأثیر می‌گذارد و مقدار آن باید کمتر از ولتاژ نگهداری تخلیه معمولی باشد. حداقل ضخامت لایه بازسازی شده حدود ۴/۷ میکرومتر در ۱۵ ولت است که ۶۲/۴ درصد کمتر از ولتاژ جبرانی است. دی‌الکتریک با رسانایی بالا می‌تواند WEW را کاهش دهد، در حالی که ولتاژ جبرانی می‌تواند این اثر را تا حد زیادی افزایش دهد. در مقایسه با مرحله اولیه برش، الکتروود سیمی مورد استفاده در میکرو وایرکات اساساً تا زمانی که سطح برش از ۵۰۰۰۰ میلی‌متر مربع

<sup>1</sup> Wire Wear Rate (WWR)

<sup>2</sup> Stir Casting

<sup>3</sup> SiC

<sup>4</sup> Zinc Coated Wire Electrode (ZCWE)

فرا تر رود، سایش ندارد و سرعت برش بالای ۴۵ میلی‌متر مربع در دقیقه باقی می‌ماند. توزیع عناصر بر روی سطح الکتروود سیم نشان می‌دهد که قدرت الکتروولیز با روش جبران WEDM بهبود می‌یابد.

دالی و همکاران [۱۱] به بررسی تأثیر استفاده از قطرهای مختلف سیم در WEDM و تأثیر آن بر ویژگی‌های عملکردی مانند انحراف ابعادی، اضافه‌برش، مصرف سیم، زبری سطح، ضخامت لایه بازسازی، ریزسختی، تغییرات ریزساختاری و متالورژیکی پرداختند. برای پیش‌بینی زبری سطح، مدلی با در نظر گرفتن قطر سیم توسعه داده شد. علاوه بر این، مصرف سیم برای قطر سیم‌های کوچک‌تر کاهش یافت که باعث افزایش کارایی هزینه و حل مشکلات مربوط به دفع زباله می‌شود. گنجاندن سیم‌های با قطر کمتر در WEDM باعث افزایش دقت با بهره‌وری، کاهش ضایعات سیم و قطعه کار شده و تأثیر زیست‌محیطی کمتری داشت.

سائیاراج و همکاران [۱۲] آزمایشی با استفاده از آرایه متعام L9 تاگوچی انجام دادند. هر آزمایش تحت ترکیب‌های مختلف پالس به موقع، زمان خاموش شدن پالس و جریان اوج انجام شد. ترکیب پارامترهای ماشینکاری بهینه با استفاده از تحلیل نسبت سیگنال به نویز (S/N)، آنالیز میانگین و تحلیل واریانس (ANOVA) به دست آمد. مطالعه نشان داد که روش تاگوچی برای حل مسئله بیان شده با حداقل تعداد مسیر مناسب است.

چاوداری و همکاران [۱۳] در پژوهش خود ماشین‌کاری وایرکات را برای ماشین‌کاری بر روی سوپرآلیاژ Inconel 718 اتخاذ بررسی کردند. پژوهشگران یک روش ماشینکاری غیر متعارف را اتخاذ کرده‌اند. محققان در مطالعه خود، از مولیدن و برنج به عنوان دو الکتروود سیمی متفاوت بر اساس مزایای آن‌ها برای مشاهده اثر عناصر مذکور در WEDM استفاده کردند. برای طرح آزمایش، از آرایه متعام L9 استفاده شد که سه پارامتر را در سه سطح برای هر دو الکتروود سیم در نظر گرفت. برای توجه به نتیجه و اهمیت عوامل ورودی مانند جریان تخلیه، زمان روشنی پالس روشن و زمان خاموشی پالس بر روی پارامترهای خروجی مانند نرخ حذف مواد و زبری سطح، تجزیه و تحلیل واریانس برای بررسی نتایج استفاده شده است.

سریتینیمز [۱۴] ماشین‌کاری یک ماده از جنس HfTaTiVZr با ماشین‌کاری وایرکات ارزیابی شد. ماده مذکور با کاهش حجم مواد در هر پاس، در سه پاس با دقت برش داده شد و در نتیجه کیفیت سطح بهتری با سرعت برش بهینه و سرعت حذف فلز حاصل شد. با این حال، برش خشن نتایج بهتری نسبت به فرآیندهای نیمه تمام در حفظ خواص مکانیکی داشت.

سینگ و همکاران [۱۵] الکترودهای سیمی با کارایی بالا را مورد مطالعه قرار دادند. مطالعه دیگری بر روی تأثیر مواد الکتروود سیم بر سرعت حذف مواد، زبری سطح و شکل موج تخلیه متمرکز بود [۱۶]. الکترودهای سیم برنجی با روکش روی با هدف بررسی اثرات آنها بر عملکرد وایرکات در ترکیب با کمک لرزش اولتراسونیک بررسی شده است [۱۷].

یک الکتروود سیمی جدید برای بهبود ویژگی‌های ماشینکاری کامپوزیت SiCp/Al با حجم بالا در وایرکات توسط چن و همکاران پیشنهاد شد [۱۸]. فرآیند آماده‌سازی این الکتروود سیمی شامل ریخته‌گری، پوشش دهی، بازیخت می‌باشد. نتایج تجربی بهبودهایی را در مقایسه با الکترودهای سیم معمولی نشان داد. در بسیاری از پژوهش‌های امروزی همچنان به بررسی یکارچگی و خواص سطحی، [۱۹]. شرایط مختلف سایش [۲۰] و بررسی و بهینه‌سازی شرایط مختلف ماشینکاری با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی [۲۱] پرداخته شده است.

در پژوهش کنونی به مقایسه دو روش برای ساخت یک نمونه سیم چینی برنجی پر کاربرد در صنعت داخل کشور پرداخته شد و در نهایت یک روش به‌عنوان روش بهتر انتخاب شد. در اولین گام خواص سیم چینی با استفاده از تست کشش و آنالیز به روش کوانتومتری استخراج شده و دو نمونه سیم با روش‌های اکستروژن و ریخته‌گری با ترکیبات عنصری نزدیک به سیم چینی ساخته و مجدداً آزمون کشش روی آن‌ها گرفته شد. در گام آخر نتایج با یکدیگر مقایسه شدند. نوآوری پژوهش پیش رو در تعیین روش ساخت اکستروژن به همراه ذکر عملیات بین مرحله‌ای و مراحل تکمیلی لازم به‌منظور تولید انبوه سیم برنجی وایرکات (معادل با نمونه سیم چینی) با روش اکستروژن است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- سیم شماره ۱

سیم شماره ۱ ابتدا با روش ریخته‌گری ساخته شد و یک قطعه طویل استوانه‌ای شکل با سطحی تقریباً زیر ساخته شد.

ریخته‌گری برنج، همان‌طور که از نام آن پیداست، شامل استفاده از برنج به‌عنوان فلز مذاب است. ریخته‌گری برنجی را می‌توان فقط به روش ریخته‌گری با قالب ماسه‌ای انجام داد. در ریخته‌گری ماسه‌ای، برنج مذاب داخل قالب ماسه‌ای ریخته شده و سپس قالب به وسیله هوا خنک می‌شود. پس از انجماد فلز، تخریب قالب صورت می‌گیرد. پس از عملیات ریخته‌گری و به‌منظور ایجاد سطحی صاف قبل از فرآیند کشش، یک عملیات روتراشی جزئی روی قطعه ریخته‌گری شده انجام شد و در نهایت قطعه آماده کشش شد.

## ۲-۲- سیم شماره ۲

به‌منظور ساخت سیم شماره ۲ از روش اکستروژن استفاده شد. شکل ۲ تصویر دستگاه اکستروژن شرکت نوین شمش استفاده شده در ساخت سیم شماره ۲ را نمایش می‌دهد.



شکل ۲ دستگاه اکستروژن استفاده‌شده در پژوهش کنونی

فرآیند اکستروژن بر خلاف ریخته‌گری، صافی سطح مناسبی را به‌منظور کشش نتیجه می‌دهد لذا پس از اکستروژن قطعه اولیه سیمی می‌توان مستقیماً فرآیند کشش سیم را شروع کرد.

## ۲-۳- کشش سیم

سیم شماره ۱ توسط دستگاه‌های مخصوص کشش در جواهرسازی طی ۱۵ مرحله کشیده شد. قطر سیم اولیه ۱ میلی‌متر بود و در هر مرحله به مقدار ۰,۰۵ میلی‌متر عملیات کشش صورت گرفت و در نهایت سیم به قطر ۰,۲۵ میلی‌متر رسید. پس از هر مرحله به‌منظور حذف تنش‌های پسماند ایجاد شده روی سیم، فرآیند آنیل صورت گرفت. در شکل ۳ دستگاه نورد مخصوص کشش سیم در جواهرسازی و تغییر قطر سیم توسط آن قابل مشاهده است.



شکل ۳ کاهش قطر سیم توسط دستگاه نورد

کاهش قطر سیم از ۳ میلی‌متر به مقدار ۱ میلی‌متر توسط دستگاه قالب و حدیده صورت گرفت اما کاهش قطر آن تا مقدار نهایی توسط حدیده انجام شد. آنیل‌های بین مرحله‌ای نیز توسط مشعل‌هایی در محیط کارگاه صورت گرفت.

سیم شماره ۲ توسط دستگاه‌های طبلك و دوزه طی چند مرحله کشیده شد. پس از هر مرحله به‌منظور حذف تنش‌های پسماند ایجاد شده روی سیم، فرآیند آنیل صورت گرفت. ابتدا سر سیم اولیه به وسیله دستگاه سنگ فرز دستی و چکش کاری پخ زده شده تا سیم وارد قالب کشش شود.

مجموعه دستگاه‌های طبلك و دوزه در شکل ۴ نمایش داده شده‌اند. دستگاه شامل چند قرقره (طبلك) است که سیم دور آن پیچیده می‌شود و از یک سر دیگر تحت کشش قرار می‌گیرد. شکل ۵ مرحله کشش سیم از داخل قالب کشش را نمایش می‌دهد.



شکل ۴ مجموعه دستگاه‌های کشش



شکل ۵ محل کشش سیم از داخل قالب کشش

لازم به ذکر است تمامی سیم‌ها به قطر نهایی ۰/۲۵ میلی‌متر و طول ۲۰ متر رسیدند و سپس باقی مراحل بر روی بخشی از طول آن‌ها انجام شد.

## ۲-۴- آزمایش کشش سیم

به‌منظور بررسی خواص هر سیم، یک آزمون کشش مجزا روی هر سیم صورت گرفت و نمودار تنش-کرنش آن استخراج شد. تمامی آزمون‌ها توسط دستگاه کشش SANTAM مدل stm-50 با ظرفیت ۵ تن انجام شدند. در شکل ۶ تصویر تجهیزات آزمایشگاهی به‌منظور انجام آزمون کشش روی هر سیم نشان داده شده است.



شکل ۶ آموزش کشش سیم تولیدشده روی دستگاه مربوطه

## ۲-۵- تشخیص عناصر سیم

روش‌های متفاوتی به منظور بررسی عناصر موجود در یک ماده وجود دارد. یکی از ساده‌ترین روش‌ها روش کوانتومتری است اما از آنجایی که سیم بسیار نازک است نمی‌توان با این روش و دستگاه مربوطه به بررسی عناصر موجود در آن پرداخت لذا با استفاده از روش‌هایی مانند شیمی تر به بررسی عناصر موجود پرداخته شد.

روش شیمی تر، روشی کلاسیک برای اندازه‌گیری عناصر و یا ترکیبات در یک نمونه است. هر چند این روش یک روش قدیمی محسوب می‌شود ولی به دلیل هزینه پایین و امکان اندازه‌گیری ترکیبات، یک روش پرکاربرد در صنعت است و امروزه به صورت گسترده در صنایع مختلف استفاده می‌شود.

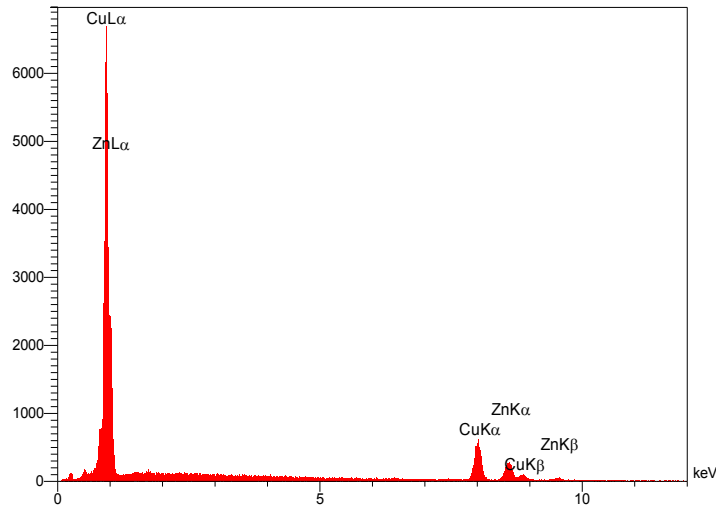
## ۲-۶- عناصر تشکیل دهنده سیم‌ها

عناصر تشکیل دهنده نمونه سیم چینی به همراه درصد وزنی هرکدام پس از آزمون آنالیز عنصری، به شرح جدول ۱ بود. آزمایش آنالیز عنصری در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت محیطی ۳۰٪ و طبق استاندارد (ISO/IEC 17025 (2005) انجام شد. طبق جدول ۱ موثرترین عناصر تشکیل دهنده، مس و روی می‌باشند.

جدول ۱ آنالیز شیمیایی نمونه سیم چینی

عناصر	درصد وزنی
Cu	۶۰/۲۹
Zn	۳۹/۶۳
Pb	۰/۰۴۴
Fe	۰/۰۲۳
Sb	۰/۰۱۲

سیم ساخته شده به دلیل نازک بودن امکان آزمایش به روش کوانتومتری را نداشت لذا از روش شیمی تر و پراش پرتوایکس به منظور بررسی عناصر تشکیل دهنده استفاده شد. شکل ۷ نتایج پراش پرتوایکس را نشان می‌دهد.



شکل ۷ نمودار نتیجه پراش پرتوایکس روی سیم ساخته شده

پیک‌های ایجاد شده روی شکل ۷ مربوط به عناصر Cu و Zn هستند. همان‌طور که انتظار می‌رفت مانند عناصر تشکیل دهنده نمونه سیم چینی، بیشترین سهم مربوط به عنصر مس و پس از آن مربوط به روی است. بزرگترین پیک مربوط به عنصر مس و سپس مربوط به عنصر روی می‌باشد. در جدول ۲ مقادیر کمی درصد عناصر مس و روی در سیم‌های ساخته شده آورده شده است.

جدول ۲ درصد عناصر مس و روی در سیم‌های ساخته شده

عنصر	درصد وزنی	درصد اتمی
Cu	۵۹/۴۸	۶۰/۱۶
Zn	۴۰/۵۲	۳۹/۸۴
Sum	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰

## ۲-۷- آزمایش سیم بر روی دستگاه وایرکات

پس از آماده‌سازی و اتمام مراحل کشش، سیم‌ها بر روی دستگاه وایرکات آزمایش شدند. هر دو سیم ساخته شده در میانگین سرعت پیشروی ۳/۰۱۸ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شدند. این سرعت از مقدار کمینه ۲ میلی‌متر بر دقیقه تا مقدار بیشینه ۴/۴ میلی‌متر بر دقیقه تغییر داده شد تا بررسی دقیق‌تری روی سیم انجام شود. فرآیند برش در یک مسیر مستقیم از لبه قطعه کار انجام شد. در شکل ۷ تصویر قطعه نهایی پس از برش با سیم ساخته شده قابل مشاهده است.



شکل ۸ مسیر برش نهایی روی قطعه



## ۳- نتایج و بحث

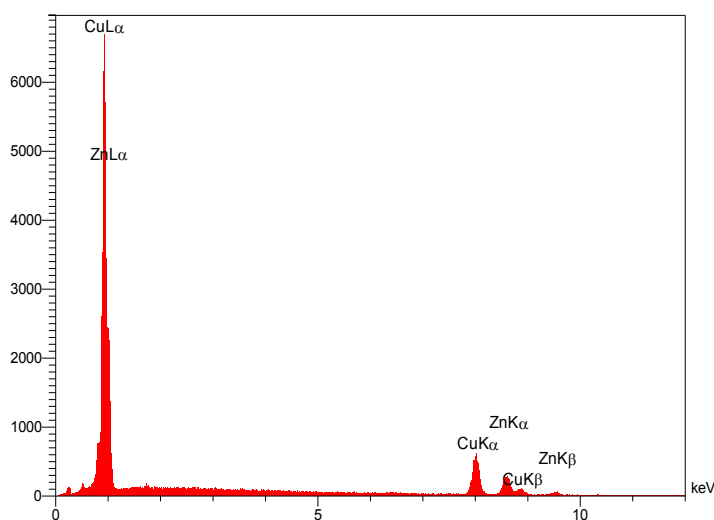
## ۳-۱- عناصر تشکیل دهنده سیمها

عناصر تشکیل دهنده نمونه سیم چینی به همراه درصد وزنی هرکدام پس از آزمون آنالیز عنصری، به شرح جدول ۱ بود. آزمایش آنالیز عنصری در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت محیطی ۳۰٪ و طبق استاندارد (ISO/IEC 17025 (2005) انجام شد. طبق جدول ۱ موثرترین عناصر تشکیل دهنده، مس و روی می باشند.

جدول ۳ آنالیز شیمیایی نمونه سیم چینی

عنصر	درصد وزنی
Cu	۶۰/۲۹
Zn	۳۹/۶۳
Pb	۰/۰۴۴
Fe	۰/۰۲۳
Sb	۰/۰۱۲

سیم ساخته شده به دلیل نازک بودن امکان آزمایش به روش کوانتومتری را نداشت لذا از روش شیمی تر و پراش پرتوایکس به منظور بررسی عناصر تشکیل دهنده استفاده شد. شکل ۹ نتایج پراش پرتوایکس را نشان می دهد.



شکل ۹ نمودار نتیجه پراش پرتوایکس روی سیم ساخته شده

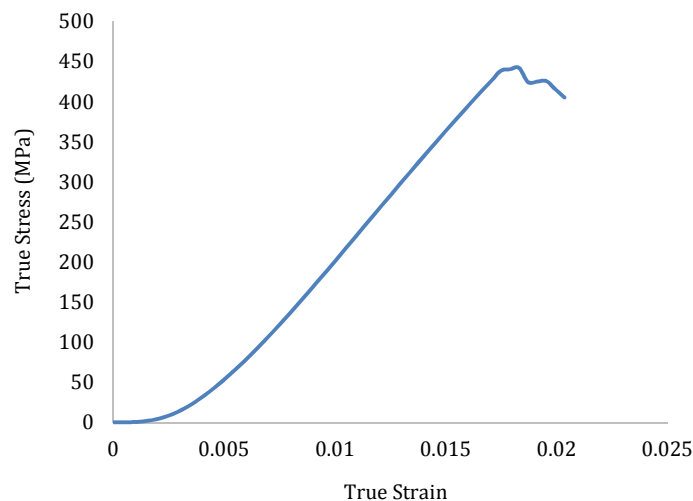
پیکهای ایجاد شده روی شکل ۸ مربوط به عناصر Zn و Cu هستند. همان طور که انتظار می رفت مانند عناصر تشکیل دهنده نمونه سیم چینی، بیشترین سهم مربوط به عنصر مس و پس از آن مربوط به روی است. بزرگترین پیک مربوط به عنصر مس و سپس مربوط به عنصر روی می باشد. در جدول ۲ مقادیر کمی درصد عناصر مس و روی در سیمهای ساخته شده آورده شده است.

جدول ۴ درصد عناصر مس و روی در سیم‌های ساخته شده

عنصر	درصد وزنی	درصد اتمی
Cu	۵۹/۴۸	۶۰/۱۶
Zn	۴۰/۵۲	۳۹/۸۴
Sum	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰

### ۳-۲-آزمون کشش

نتایج آزمون کشش نمونه سیم چینی به صورت نمودار تنش-کرنش حقیقی به صورت زیر توسط دستگاه آزمون کشش استخراج شد. طبق شکل ۹ تنش نهایی قابل تحمل توسط نمونه سیم چینی برابر با ۴۴۵ مگاپاسکال برآورد شد. پس از کرنش ۰/۱۸ حالت آسیب ناپایدار در سیم رخ داده و تا کرنش ۰/۲۱ این ناپایداری پیشروی کرده و سیم گسیخته می‌شود. نتایج تنش و کرنش نهایی نمونه سیم چینی در جدول ۵ گزارش داده شده است.

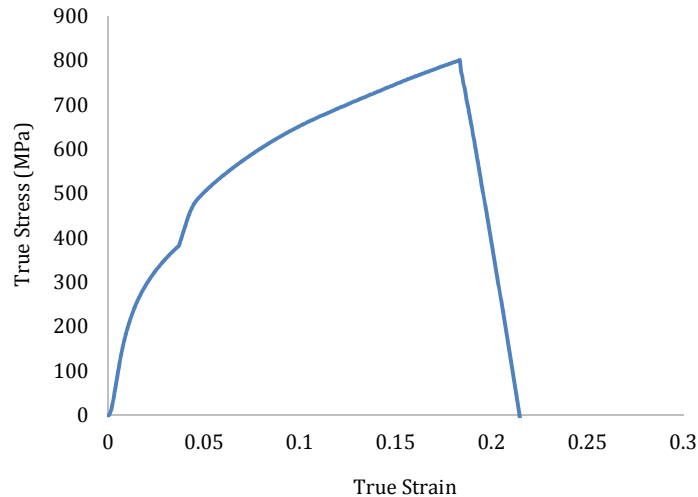


شکل ۱۰ نمودار تنش-کرنش حقیقی آزمون کشش نمونه سیم چینی

جدول ۵ تنش و کرنش نهایی نمونه سیم چینی

کرنش نهایی	تنش نهایی (مگاپاسکال)
۰/۱۸	۴۴۵

نتایج آزمون کشش سیم شماره ۱ در قالب نمودار تنش-کرنش به صورت زیر توسط دستگاه آزمون کشش استخراج شد. طبق شکل ۱۰ تنش نهایی قابل تحمل توسط نمونه سیم شماره ۱ برابر با ۸۰۰ مگاپاسکال برآورد شد. پس از کرنش ۰/۱۸ پدیده گلوئی شدن و آسیب در سیم رخ داده و سیم گسیخته می‌شود. بر خلاف نمونه سیم چینی، در نمودار تنش-کرنش سیم شماره ۱ روند یکنواخت‌تری مشاهده می‌شود. این‌طور به نظر می‌آید که بخش تغییر شکل پلاستیک سیم شماره ۱ از مقدار کرنش ۰/۰۴ تا ۰/۱۸ رخ می‌دهد. نتایج تنش و کرنش نهایی نمونه سیم شماره ۱ در جدول ۶ گزارش داده شده است.

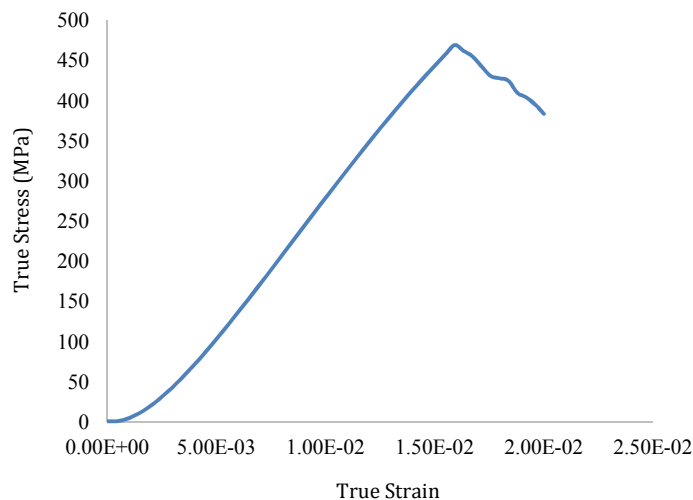


شکل ۱۱ نمودار تنش-کرنش حقیقی آزمون کشش سیم شماره ۱

جدول ۶ تنش و کرنش نهایی نمونه سیم شماره ۱

کرنش نهایی	تنش نهایی (مگاپاسکال)
۰,۱۸	۸۰۰

نتایج آزمون کشش سیم شماره ۲ در قالب نمودار تنش-کرنش به صورت زیر توسط دستگاه آزمون کشش استخراج شد. طبق شکل ۱۱ تنش نهایی قابل تحمل توسط سیم شماره ۲ برابر با مقدار ۴۷۰ مگاپاسکال است. روند کلی تغییرات نمودار مانند سیم چینی است. این امر می‌تواند بدان دلیل باشد که فرایند ساخت سیم شماره ۲ و سیم چینی مشابه است. هر دو نمودار پس از مقدار کرنش ۰/۰۱۸ دچار پدیده آسیب شده و استحکام نهایی یکسانی دارند. نتایج تنش و کرنش نهایی نمونه سیم شماره ۲ در جدول ۷ گزارش داده شده است.



شکل ۱۲ نمودار تنش-کرنش حقیقی آزمون کشش سیم شماره ۲

جدول ۷ تنش و کرنش نهایی نمونه سیم شماره ۲

تنش نهایی (مگاپاسکال)	کرنش نهایی
۴۷۰	۰,۱۸

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به مطالعه و بررسی روشی برای ساخت و تولید انبوه نوعی سیم برنجی به منظور استفاده در فرآیند وایرکات پرداخته شده است. یکی از معایب سیم‌های وایرکات، نبود روش‌های مناسب به منظور ساخت یا حتی تولید انبوه است که باید با تکنیک‌هایی مانند مهندسی معکوس و... خواص و عناصر آن سیم مد نظر کشف شده و به نحوی که مناسب تولید انبوه و عرضه به بازار باشد ساخته شود.

در پژوهش کنونی به مقایسه دو روش برای ساخت یک نمونه سیم چینی برنجی پر کاربرد در صنعت داخل کشور پرداخته شد و در نهایت یک روش به عنوان روش بهتر انتخاب شد.

نوآوری پژوهش پیش رو در تعیین روش ساخت اکستروژن به همراه ذکر عملیات بین مرحله‌ای و مراحل تکمیلی لازم به منظور تولید انبوه سیم برنجی وایرکات (معادل با نمونه سیم چینی) با روش اکستروژن است. نتایج کلی پژوهش کنونی را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

- روش اکستروژن گزینه مناسب‌تری برای ساخت و تولید انبوه سیم برنجی وایرکات است.
- در تولید سیم به روش اکستروژن، نیازی به فرآیند تکمیلی ساینس کردن سیم نیست.
- فرآیند اکستروژن در تولید سیم، به جای روش ریخته‌گری خواص مکانیکی و سطحی بهتری را نتیجه می‌دهد.
- سرعت ساخت سیم در روش اکستروژن نسبت به روش ریخته‌گری بیشتر است.
- در نمونه سیم ساخته شده با روش پیشنهادی جدید، تنش نهایی به مقدار ۸۰٪ بیشتر از نمونه سیم چینی می‌باشد که امری مطلوب است و امکان ماشینکاری در شرایط کشش و سرعت سیم بیشتر را نیز فراهم می‌کند.
- نمونه سیم ساخته شده با روش پیشنهادی جدید، به مقدار ۱۰ برابر نرمی بیشتری را نسبت به سیم چینی از خود نشان می‌دهد که امری مطلوب است، چراکه احتمال پارگی ناگهانی حین ماشینکاری کم‌تر می‌شود.

#### References

- [1] Kapoor J, Singh S, Khamba JS. Recent developments in wire electrodes for high performance WEDM. In Proceedings of the world congress on engineering 2010 Jun;2:1-4.
- [2] Kapoor J, Singh S, Khamba JS. High-performance wire electrodes for wire electrical-discharge machining—a review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2012 Nov;226(11):1757-73. doi: 10.1177/0954405412460354
- [3] Masatada N, Naoyuki O, Hirokazu S. Development of electrode wires (“CUT WIRE”) for high-performance wire electro-discharge machining. Sumitomo electric technical review. 1999;154:43-8.
- [4] Singh J, Singh R, Kumar R. Review on effects of process parameters in wire cut EDM and wire electrode development. Int J Innov Res Sci Technol. 2016 Apr;2:701-6.
- [5] Slătineanu L, Dodun O, Coteață M, Nagîț G, Băncescu IB, Hrițuc A. Wire electrical discharge machining—A review. Machines. 2020 Oct 28;8(4):69. doi: 10.3390/machines8040069
- [6] Kumar H, Kumar R, Manna A, Kumar A. Analysis of wire electrode wear ratio during WEDM of Al-metal matrix composite. Materials Today: Proceedings. 2022 Jan 1;62:7618-24. doi: 10.1016/j.matpr.2022.05.004
- [7] Yadav BS, Muniappan A, Harikrishna KL, Rajkumar K. Performance of different wire electrode materials on kerf width in WEDM of aluminum hybrid composite. Materials Today: Proceedings. 2022 Jan 1;62:1347-55. doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.802
- [8] Ramamurthy A, Sivaramakrishnan R, Muthuramalingam T, Venugopal S. Performance analysis of wire electrodes on machining Ti-6Al-4V alloy using electrical discharge machining process. Machining science and technology. 2015 Oct 2;19(4):577-92. doi: 10.1080/10910344.2015.1085314
- [9] Yan H, Kabongo DB, Yan Z, Han F, Chen Z. Sustainable production of high-uniformity workpiece surface quality in wire electrical discharge machining by fabricating surface microstructure on wire electrode. Journal of Cleaner Production. 2020 Jun 20;259:120881. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120881

- [10] Zhang M, Guo H, Guo C, Qiu M, Liu Z. Compensation method of wire electrode wear for reciprocating micro wire electrical discharge machining. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023 Jan 27;86:136-42. doi: [10.1016/j.jmapro.2022.12.049](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.12.049)
- [11] Dhale SR, Deshmukh BB. WEDM with different diameter wire electrodes on Inconel 718: Improved dimensional deviation, wire consumption and surface quality. *Materials Today: Proceedings*. 2023 Jan 1;72:896-903. doi: [10.1016/j.matpr.2022.09.088](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.088)
- [12] Sathiyaraj S, Venkatesan S, Ashokkumar S. Wire electrical discharge machining (WEDM) analysis into MRR and SR on copper alloy. *Materials Today: Proceedings*. 2020 Jan 1;33:1079-84. doi: [10.1016/j.matpr.2020.07.123](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.123)
- [13] Chaudhari R, Patel H, Sheth M, Prajapati N, Fuse K, Abhishek K, Vora J. Effect of different tool electrodes (wire) of WEDM process of inconel 718. In *Recent Advances in Mechanical Infrastructure: Proceedings of ICRAM 2021 2022* (pp. 317-327). Springer Singapore. doi: [10.1007/978-981-16-7660-4\\_28](https://doi.org/10.1007/978-981-16-7660-4_28)
- [14] Ceritbinmez F, Günen A, Akhtar MA, Patel K, Mukherjee S, Yünlü L, Kanca E. Surface integrity characteristics in wire-EDM of HfTaTiVZr refractory high entropy alloy. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2022 Oct 9:1-8. doi: [10.1080/2374068X.2022.2130869](https://doi.org/10.1080/2374068X.2022.2130869)
- [15] Kapoor J, Singh S, Khamba JS. High-performance wire electrodes for wire electrical-discharge machining—a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2012 Nov;226(11):1757-73. doi: [10.1177/0954405412460354](https://doi.org/10.1177/0954405412460354)
- [16] Muttamara A, Nakwong P. Enhancing Wire-EDM Performance with Zinc-Coated Brass Wire Electrode and Ultrasonic Vibration. *Micromachines*. 2023 Apr 16;14(4):862. doi: [10.3390/mi14040862](https://doi.org/10.3390/mi14040862)
- [17] Muttamara A, Nakwong P. Enhancing Wire-EDM Performance with Zinc-Coated Brass Wire Electrode and Ultrasonic Vibration. *Micromachines*. 2023 Apr 16;14(4):862. doi: [10.3390/mi14040862](https://doi.org/10.3390/mi14040862)
- [18] Chen Z, Zhou H, Wu C, Zhang G, Yan H. A new wire electrode for improving the machining characteristics of high-volume fraction SiCp/Al composite in WEDM. *Materials*. 2022 Jun 9;15(12):4098. doi: [10.3390/ma15124098](https://doi.org/10.3390/ma15124098)
- [19] Mandal K, Sarkar S, Mitra S, Bose D. Surface roughness and surface topography evaluation of Al 6065-T6 alloy using wire electro-discharge machining (wire EDM). *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2020 Jan 2;6(1):75-83. doi: [10.1080/2374068X.2019.1704547](https://doi.org/10.1080/2374068X.2019.1704547)
- [20] Poros D, Zaborski S, Wisniewska M. Experimental model on the wire wear for WEDM of hard to machine materials. *Journal of Machine Engineering*. 2019;19. doi: [10.5604/01.3001.0013.6234](https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.6234)
- [21] Alduroobi AA, Ubaid AM, Tawfiq MA, Elias RR. Wire EDM process optimization for machining AISI 1045 steel by use of Taguchi method, artificial neural network and analysis of variances. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 2020 Dec;11:1314-38. doi: [10.1007/s13198-020-00990-z](https://doi.org/10.1007/s13198-020-00990-z)