



علوم و فناوری جوئکاری ایران



# Experimental comparison of extruded and 3D-printed copper parts for manufacturing induction hardening coils

**B. Zamzami<sup>1</sup>, M. Safari<sup>1\*</sup>, M. Golzar<sup>2</sup>**

1- Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Received 19 March 2026 ; Accepted 26 May 2026

## Abstract

Copper coils are essential components of induction hardening machines. The traditional manufacturing process of these coils utilizes extruded copper profiles. In this study, the production of copper profiles using metal 3D printing was experimentally investigated. Two copper samples with hollow square cross-sections, produced by extrusion and metal 3D printing, were evaluated for the purpose of manufacturing induction hardening coils. Density, electrical conductivity, hardness, and surface roughness tests were performed in accordance with the relevant standards. The quantitative results for the extruded and 3D-printed samples were, respectively: density of 99% and 93% of the theoretical density of copper; electrical conductivity of 100.8% and 99.1% relative to the annealed copper standard; Brinell hardness of 50 and 59 HB; and surface roughness (Ra) of 0.324-0.533 and 11.949-13.194. The results indicated that the extruded sample possessed higher density, superior electrical conductivity, and a smoother surface, whereas the 3D-printed sample exhibited higher hardness, lower density, and greater surface roughness. These findings demonstrate that metal 3D printing can be utilized for the manufacturing of induction hardening coils.

**Keywords:** Metal additive Manufacturing, Extrusion, Induction hardening, Coil.

 \*Corresponding Author: M. Safari, [m.safari@arakut.ac.ir](mailto:m.safari@arakut.ac.ir).



## مطالعه تجربی و مقایسه قطعات مسی اکستروژن و پرینت سه بعدی در ساخت کویل های سخت کاری القائی

بهنام زمزمی<sup>1</sup>، مهدی صفری<sup>1\*</sup>، محمد گلزار<sup>2</sup>

1- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران.

2- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

دریافت مقاله: 1404/12/28؛ پذیرش مقاله: 1405/03/05

### چکیده

کویل های مسی یکی از قسمت های مهم دستگاه عملیات سخت کاری القائی می باشند. فرایند ساخت سنتی این کویل ها با استفاده از سطح مقطع های مسی اکستروژده می باشد. در این پژوهش به بررسی تجربی تولید سطح مقطع مسی به روش پرینت سه بعدی پرداخته شد. دو نمونه از جنس مس با سطح مقطع مربع توخالی تولید شده به روش اکستروژن و پرینت سه بعدی، با هدف ساخت کویل های عملیات سخت کاری القائی مورد بررسی قرار گرفتند. آزمون های چگالی، هدایت الکتریکی، سختی و زبری سطح بر طبق استانداردهای مربوطه انجام گرفت. نتایج کمی نمونه های اکستروژده و پرینت سه بعدی به ترتیب، چگالی 99% و 93% درصد چگالی تئوری مس، هدایت الکتریکی 100/8% و 99/1% نسبت به استاندارد مس آیل شده، سختی 50 و 59 برینل و زبری متوسط سطح (Ra) 0/533-0/324 و 11/949-13/194 می باشند. نتایج نشان داد که نمونه اکستروژده دارای چگالی بالاتر، هدایت الکتریکی بهتر و سطح صاف تر است، در حالی که نمونه پرینت سه بعدی با سختی بالاتر، چگالی کمتر و زبری سطح بیشتر همراه است. این یافته ها نشان می دهد از روش پرینت سه بعدی فلزی برای ساخت کویل های سخت کاری القائی می توان استفاده کرد.

**کلمات کلیدی:** پرینت سه بعدی فلزی، اکستروژن، سخت کاری القائی، کویل.

\* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: مهدی صفری، [m.safari@arakut.ac.ir](mailto:m.safari@arakut.ac.ir)

### 1- مقدمه

این عملیات، بدون تغییر در خواص درون قطعه، سختی و مقاومت به سایش سطح قطعه را به طور چشمگیری افزایش می دهد [1, 2]. کویل، به عنوان جزء کلیدی این فرایند، معمولاً از جنس مس ساخته می شود تا از رسانایی الکتریکی و حرارتی بسیار بالای این فلز بهره برد [3]. ساخت سنتی کویل ها بر پایه اکستروژن، خم کاری و لحیم کاری قطعات اکستروژده

عملیات حرارتی و سخت کاری القائی، روشی نوین و کارآمد برای گرمایش موضعی و سریع فلزات با استفاده از میدان مغناطیسی متغیر و جریان های گردابی است. در این فرایند، سطح قطعه فولادی در زمان کوتاهی به دمای آستنیت رسیده و سپس با پاشش مایع خنک کننده به سرعت سرد می شود.

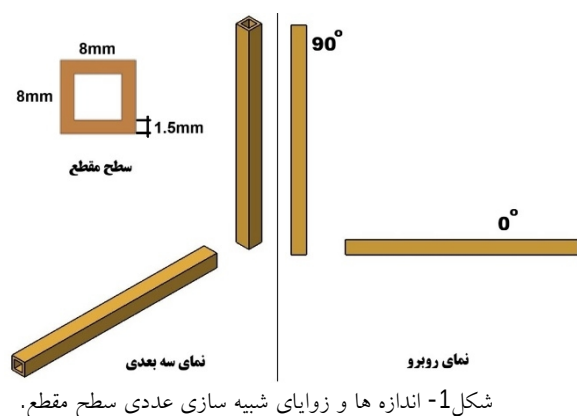
یکسان در مقاطع توخالی وجود دارد. از این رو، در پژوهش حاضر دو مقطع مربعی توخالی از جنس مس خالص که به دو روش اکستروژن و پرینت سه بعدی فلزی تولید شده‌اند، مورد ارزیابی تطبیقی قرار گرفته‌اند.

هدف از این پژوهش، بررسی همزمان چگالی، هدایت الکتریکی، سختی و زبری سطح جهت تبیین ارتباط نظام‌مند میان روش ساخت و خواص نهایی است تا مبنایی علمی برای انتخاب بهینه فرایند تولید نسل جدید کویل‌های سخت‌کاری القائی فراهم گردد.

## 2- روش تحقیق

### 2-1- شبیه سازی عددی فرایند پرینت سه بعدی فلزی

پیش از آغاز فاز ساخت فیزیکی، به منظور پیش‌بینی رفتار قطعه حین فرایند پرینت سه بعدی فلزی و بهینه‌سازی استراتژی ساخت، فرایند پرینت سه بعدی سطح مقطع مربع توخالی در دو زاویه صفر و نود درجه با ابعاد  $8 \times 8 \times 100$  میلی‌متر مربع و به ضخامت دیواره  $1/5$  میلی‌متر مطابق شکل (1) با کمک نرم‌افزار انسیس ادیتو، شبیه‌سازی گردید.



شکل 1- اندازه ها و زوایای شبیه سازی عددی سطح مقطع.

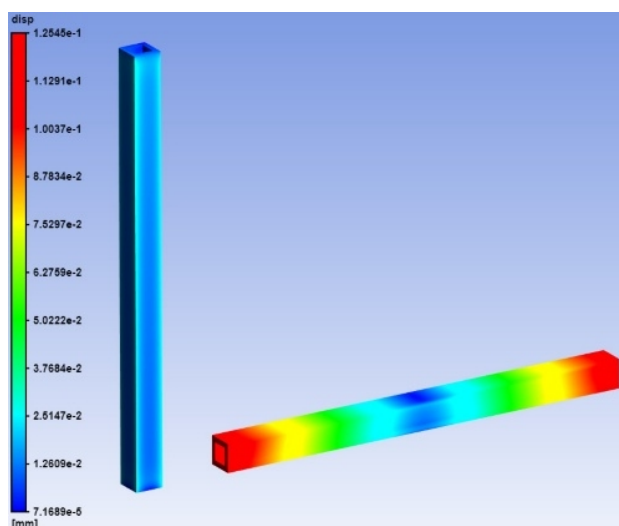
ماده ورودی در حلگر عددی، مس خالص با مشخصات مطابق جدول (1) تعریف گردید و دستگاه ذوب لیزری انتخابی استفاده شد. برای کاهش هزینه‌های محاسباتی ضمن حفظ دقت، حلگر بر پایه رویکرد الاستیک خطی و با استفاده از روش کرنش فرضی تنظیم گردید؛ در این الگوریتم ریاضیاتی، یک

می‌باشد [3, 4]. اگرچه فرایند اکستروژن قطعاتی با ساختار متراکم، چگالی بالا و کیفیت سطحی و رسانایی مطلوب تولید می‌کند، اما محدودیت‌های زیادی در ایجاد هندسه‌های پیچیده دارد. این محدودیت‌ها مانع از اجرای طراحی‌های پیشرفته نظیر کانال‌های خنک‌کننده داخلی و بهینه‌سازی توزیع میدان مغناطیسی می‌شوند [4, 5, 6]. علاوه بر این، در طول فرایند سخت‌کاری با فرکانس بالا، عبور جریان‌های الکتریکی شدید از کویل منجر به تولید میدان‌های مغناطیسی متغیر و قدرتمندی می‌شود. برهم‌کنش این میدان‌ها با جریان الکتریکی، ارتعاشات الکترومغناطیسی یا نیروهای لورنتس بسیار بزرگی را ایجاد می‌کند که به همراه تنش‌های حرارتی ناشی از گرمایش، کویل را تحت چرخه‌های خستگی ترمومکانیکی شدیدی قرار می‌دهد که می‌تواند منجر به تغییر شکل پلاستیک و خرابی زودرس کویل شود [7, 8].

فناوری‌های پرینت سه بعدی فلزی، به‌ویژه روش ذوب لیزری انتخابی، برای پرینت قطعات مسی مورد توجه قرار گرفته‌اند. این روش امکان ساخت یکپارچه قطعات پیچیده را فراهم می‌کند [9, 10, 11]. مطالعات نشان داده‌اند که با بهینه‌سازی پارامترهای روش ذوب لیزری انتخابی نظیر افزایش توان لیزر، تنظیم سرعت اسکن و استراتژی بازذوب لایه‌ها می‌توان چگالی نمونه‌ها را ارتقا داد [12, 13]؛ همچنین انتخاب دقیق زاویه و جهت ساخت نیز بر خواص نهایی بسیار مؤثر است [14]. با این وجود، قطعات پرینت‌شده معمولاً به دلیل حضور تخلخل‌های ریز، هدایت الکتریکی کمتر و زبری سطح بالاتری نسبت به نمونه‌های اکستروژده شده دارند [15, 16]. در نقطه مقابل، انجماد سریع و شکل‌گیری ریزساختار سلولی در فرایند ذوب لیزری انتخابی باعث افزایش سختی قطعه می‌شود که این ویژگی می‌تواند مقاومت بهتری در برابر نیروهای مخرب لورنتس ایجاد نماید [17].

با وجود آنکه تحقیقات گسترده‌ای بر روی قابلیت تولید و بهینه‌سازی پارامترهای پرینت سه بعدی مس خالص انجام شده است [10, 13, 18, 19] اما همچنان یک شکاف مطالعاتی در زمینه مقایسه قطعات اکستروژده و پرینت‌شده با هندسه

نتایج حاصل از شبیه سازی عددی فرایند ذوب لیزری انتخابی مطابق شکل (3) حاکی از آن است که در زاویه ساخت صفر درجه (حالت افقی)، قطعه پس از جدایش از صفحه ساخت، بیشینه جابه جایی معادل 125/، میلی متر را پیش بینی می کند. همچنین در این زاویه به دلیل وسعت سطوح معلق، حجم بالایی از سازه های نگهدارنده مورد نیاز است که به تبع آن هزینه های مواد مصرفی و ماشین کاری به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. در مقابل، شبیه سازی در زاویه 90 درجه (حالت عمودی) توزیع یکنواخت تر جابه جایی نزدیک به صفر را پیش بینی کرد که این امر، انتخاب این زاویه را برای فاز ساخت فیزیکی توجیه نمود.



شکل 3- پیش بینی جابجایی قطعات پس از جدایی از صفحه پرینت.

## 2-2- تجهیزات پرینت سه بعدی و آماده سازی نمونه ها

با بررسی نتایج شبیه سازی عددی، زاویه مناسب جهت ساخت، زاویه نود درجه (در راستای محور Z) انتخاب گردید و پرینت سه بعدی مس با دستگاه ذوب لیزری انتخابی با لیزر فایبر استاندارد با مشخصات مطابق جدول (2) انجام شد.

جدول 2- مشخصات دستگاه ذوب لیزری انتخابی.

| تکنولوژی پرینت | توان (W) | طول موج (nm) | قطر پرتو لیزر (μm) | نوع تیغه ریکوتر | گاز محافظ              |
|----------------|----------|--------------|--------------------|-----------------|------------------------|
| ذوب بستر پودر  | 500      | 1080-1060    | 100-70             | نرم (سیلیکونی)  | گاز آرگون با خلوص بالا |

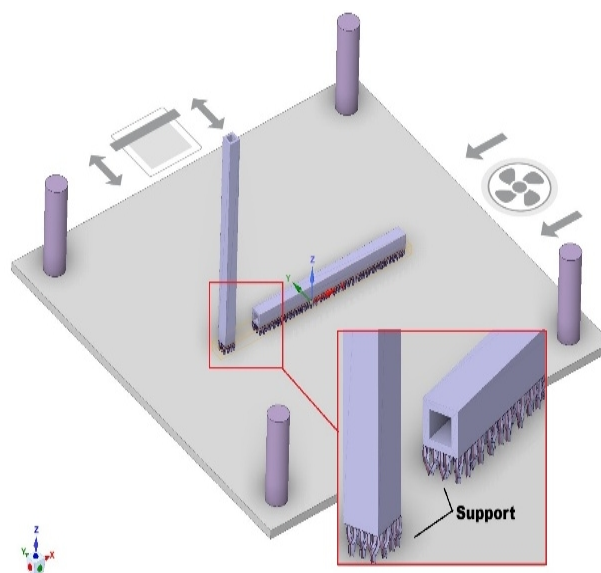
میدان کرنش معادل به صورت همسانگرد به المان های فعال شده اعمال می شود تا اثرات انقباض حرارتی ناشی از انجماد حوضچه مذاب شبیه سازی گردد.

همچنین فاصله سازه نگهدارنده بین قطعه و صفحه ساخت، 5 میلی متر در نظر گرفته شد.

جدول 1- مشخصات پودر مس خالص.

|                    |                         |
|--------------------|-------------------------|
| چگالی              | 8/94 g/cm <sup>3</sup>  |
| تنش تسلیم          | 225 MPa                 |
| مدول الاستیک       | 110 GPa                 |
| ضریب پواسون        | 0/335                   |
| ضریب انبساط حرارتی | 17x6-10 K <sup>-1</sup> |
| هدایت حرارتی       | 401 W/mK                |
| هدایت الکتریکی     | 59/6 MS/m               |

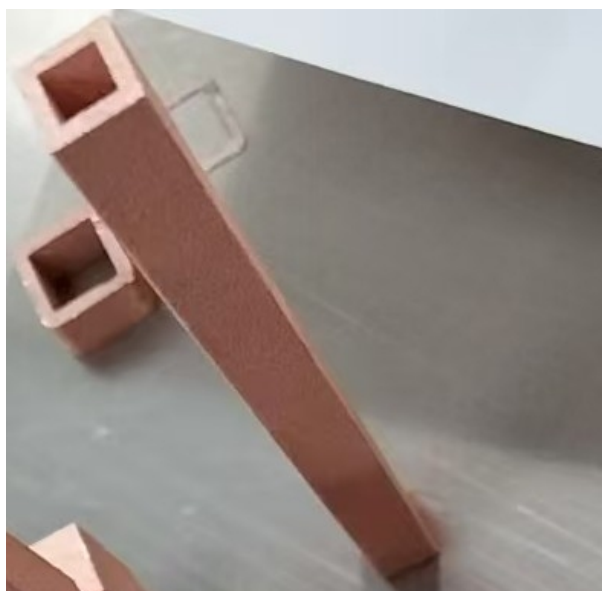
هدف از این فاز تحلیلی، استخراج بهترین زاویه ساخت با کمترین میزان پیچیدگی و کمترین نیاز به سازه نگهدارنده است؛ زیرا حذف سازه های نگهدارنده از قطعه نیازمند ماشین کاری بوده و عملاً هزینه های ماشین کاری و مصرف بیشتر ماده را افزایش می دهد. در این شبیه سازی، مطابق شکل (2)، سازه های نگهدارنده برای هر دو زاویه اعمال شده است. همان طور که ملاحظه می شود، مقدار سازه نگهدارنده در زاویه صفر درجه بیشتر از زاویه نود درجه می باشد.



شکل 2- نمایی از ساپورت ها در دو زاویه صفر و نود درجه.

جدول 4- پارامترهای استفاده شده برای پرینت سه بعدی مس

| توان لیزر (w) | سرعت اسکن (mm/s) | فاصله هاشورها (mm) | ضخامت لایه (mm) | زاویه چرخش لایه ها (درجه) |
|---------------|------------------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| 450           | 900              | 0/100              | 0/030           | 90-67-0                   |



شکل 5- نمایی از صفحه ساخت و سطح مقطع پرینت شده.

به منظور انجام ارزیابی های تطبیقی، یک نمونه شاهد از جنس مس خالص اکستروده شده با هندسه و ابعاد کاملاً یکسان (8 x 8 x 100 میلی متر مربع به ضخامت 1/5 میلی متر) تهیه شد. مطابق شکل (6)، نمونه تولید شده با روش پرینت سه بعدی در پایین و نمونه اکستروده شده در بالای تصویر مشاهده می گردد.



شکل 6- نمونه پرینت سه بعدی در پایین و نمونه اکستروده شده در بالا.

### 2-3- آزمایش های تجربی

به منظور مقایسه جامع خواص قطعات تولید شده با دو روش مذکور، آزمون های استاندارد زیر در مرکز پژوهش متالورژی رازی تهران به انجام رسید:

برای ساخت، از پودر اتمیزاسیون گازی مس خالص در محدوده توزیع ذرات بین 15 تا 53 میکرومتر و اندازه متوسط 30 تا 35 میکرومتر (D50) استفاده شد. ترکیب شیمیایی پودر مس خالص برای فرایند پرینت سه بعدی و شمش مس خالص برای فرایند اکستروژن مطابق جدول (3) می باشد [20].

جدول 3- جدول ترکیب شیمیایی پودر و شمش مس خالص.

| شمش مس خالص         | پودر مس خالص        | عنصر (wt.%) |
|---------------------|---------------------|-------------|
| $\geq 99.95$        | $\geq 99.90$        | Cu (مس)     |
| $\leq 0.02$         | $\leq 0.05$         | O (اکسیژن)  |
| $\leq 0.03$         | $\leq 0.02$         | Ag (نقره)   |
| $\leq 0.01$         | $\leq 0.02$         | Fe (آهن)    |
| $\leq 0.005$        | $\leq 0.01$         | S (گوگرد)   |
| $\leq 0.005$        | $\leq 0.005$        | Pb (سرب)    |
| $\leq 0.005$        | $\leq 0.005$        | Zn (روی)    |
| $\leq 0.005$        | $\leq 0.01$         | Ni (نیکل)   |
| $\leq 0.03$ (مجموع) | $\leq 0.05$ (مجموع) | سایر عناصر  |

شکل (4)، نمایی از دستگاه و محیط پرینت را نمایش می دهد. تنظیم پارامترهای دستگاه پرینت سه بعدی برای سطح مقطع مورد نظر مطابق جدول (4) صورت پذیرفت که در شکل (5) سطح مقطع مورد نظر روی صفحه ساخت دستگاه پرینت سه بعدی مشاهده می گردد.



شکل 4- نمایی از دستگاه و محیط پرینت سه بعدی مس.

## الف - سختی سنجی

اندازه‌گیری‌های سختی مطابق استاندارد ASTM E10:2023 به روش برینل با فرورونده ساچمه به قطر 2/5 میلی‌متر، نیروی اعمالی 187/5 کیلوگرم‌نیرو و با زمان اعمال نیروی 10-15 ثانیه در سه نقطه برای هر نمونه صورت گرفت [21].

## ب - اندازه‌گیری چگالی

اندازه‌گیری چگالی بر پایه اصل ارشمیدس جهت محاسبه چگالی نسبی و کسر حجم تخلخل‌ها صورت پذیرفت [22].

## ج - هدایت الکتریکی (آزمایش رسانایی)

اندازه‌گیری هدایت الکتریکی با استفاده از تکنیک چهار-پروب مطابق استاندارد ASTM B193:2020 انجام شد [23].

## د - زبری سطح

بررسی زبری سطح در دو جهت طولی و عرضی مطابق استاندارد BS EN ISO 21920-3:2022 با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری صافی سطح مدل HUATEC SRT-6600 مطابق شکل (7) صورت پذیرفت [24].



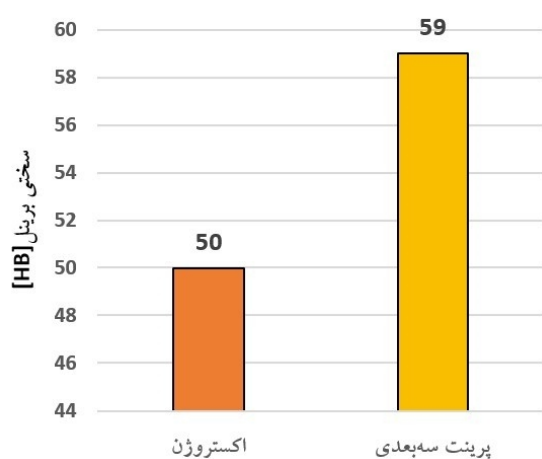
شکل 7- نمایی از دستگاه اندازه‌گیری صافی سطح.

نمونه پرینت سه‌بعدی را می‌توان به عوامل ریزساختاری و فرایندی نسبت داد. نخست آن‌که در فرایند ذوب لیزری انتخابی، به دلیل نرخ سرمایش بسیار بالا در حوضچه مذاب، ساختاری بسیار ریزدانه‌تر نسبت به فرایندهای شکل‌دهی متداول ایجاد می‌شود. بر اساس رابطه هال-پچ، کاهش اندازه دانه موجب افزایش مقاومت در برابر حرکت نابجایی‌ها و در نتیجه افزایش سختی و استحکام می‌شود [25، 26].

علاوه بر ریزدانه‌گی، در فرایند ذوب لیزری انتخابی به علت چرخه‌های مکرر حرارتی و انجماد سریع، تنش‌های پسماند بالا و تراکم قابل توجهی از نابجایی‌ها در ساختار باقی می‌ماند که این موضوع نیز به صورت مستقیم سختی را افزایش می‌دهد [27، 28، 29].

در کاربرد کوئل‌های القائی، افزایش سختی نمونه تولیدشده به روش پرینت سه‌بعدی یک مزیت استراتژیک محسوب می‌شود؛ زیرا پایداری ابعادی و مقاومت کوئل در برابر تنش‌های حرارتی حین عملیات سخت‌کاری القائی را بهبود می‌بخشد [8].

نمودار مقایسه میانگین سختی سطحی



شکل 8- مقایسه میانگین سختی برینل برای نمونه‌های اکستروژن و پرینت سه‌بعدی.

## 3- نتایج و بحث

## 1-3- ارزیابی سختی

نتایج میانگین سختی سنجی در شکل (8) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، سختی نمونه تولیدشده به روش پرینت سه‌بعدی برابر 59 برینل و برای نمونه اکستروژن برابر 50 برینل است. علت 9 برینل سختی بالاتر

## 2-3- ارزیابی چگالی

نتایج آزمایش ارشمیدس برای بررسی چگالی، در جدول (5) و شکل (9) ارائه شده است. همان‌طور که در جدول (5) و شکل (9) دیده می‌شود، چگالی نمونه اکستروژن شده برابر با  $8/86 \pm 0/5$  گرم بر سانتی متر مکعب، معادل 99٪ چگالی تئوری

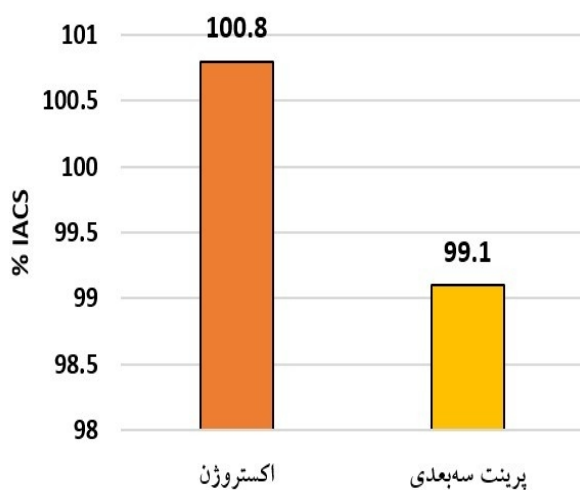
### 3-3- ارزیابی هدایت الکتریکی

نتایج آزمون چهار-پروب برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی در شکل (10) و جدول (6) ارائه شده است. برای مقایسه هدایت الکتریکی فلزها از استاندارد بین‌المللی مس آنیل شده یا IACS استفاده می‌شود.

همان‌طور که در شکل (10) و جدول (6) مشاهده می‌شود، نمونه اکستروژنه شده، هدایت الکتریکی  $5/84 \times 10^7$  زیمنس بر متر معادل 100/8 درصد IACS می‌باشد؛ در مقابل، نمونه پرینت‌شده، هدایت الکتریکی  $5/74 \times 10^7$  زیمنس بر متر معادل 99/1 درصد IACS را نشان می‌دهد.

این موضوع که نمونه پرینت‌شده با وجود چگالی 93% توانسته است رسانایی الکتریکی خوب معادل 99/1 درصد IACS را حفظ کند، نشان‌دهنده خلوص بالای متالورژیکی پودر اولیه و اتصال متالورژیکی مناسب بین لایه‌ها است. با این حال، تخلخل‌های موجود در ساختار فرایند ذوب لیزری انتخابی به عنوان موانع پراکندگی الکترون‌ها عمل کرده و مسیر جریان الکتریکی را طولانی‌تر می‌کند که باعث کاهش جزئی رسانایی الکتریکی در نمونه پرینت‌شده گردیده است [35]. افت کمتر از 2 درصد در استاندارد IACS برای قطعه پرینت سه‌بعدی، دستاوردی بسیار مطلوب ارزیابی می‌شود و نتایج برای ساخت کوئل، پتانسیل بالایی دارد [36].

نمودار مقایسه هدایت الکتریکی نسبت به مس استاندارد آنیل شده



شکل 10- مقایسه نتایج آزمون هدایت الکتریکی برای نمونه‌های اکستروژن و پرینت سه‌بعدی.

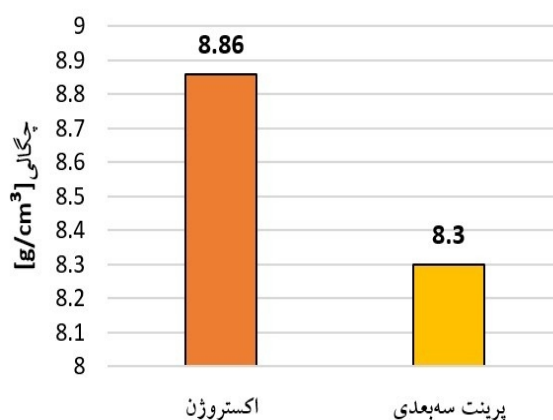
مس است که این تراکم بالا بیانگر آن است که در این روش، ماده اولیه تحت فشار بالا و تغییر شکل پیوسته قرار گرفته و منافذ داخلی تا حد زیادی بسته یا حذف شده‌اند [30].

در سوی دیگر، چگالی نمونه پرینت‌شده برابر با  $8/30 \pm 0/5$  گرم بر سانتی‌متر مکعب، معادل 93% چگالی تئوری مس است. این افت حدود 5 درصدی چگالی، می‌تواند ناشی از وجود تخلخل‌های ناشی از عدم ذوب کامل، حبس گاز، پاشش ذرات و ناپایداری حوضچه مذاب و نیز بازتاب بالای پرتو لیزر در مس باشد [32,31]. مس به دلیل هدایت حرارتی و بازتابش بسیار بالا، یکی از دشوارترین فلزات برای فرایند ذوب لیزری انتخابی به شمار می‌رود؛ بخش قابل‌توجهی از انرژی لیزر بازتاب می‌شود و حفظ حوضچه مذاب پایدار نیازمند کنترل دقیق توان لیزر، سرعت اسکن، فاصله هاشورها و ضخامت لایه است [33,32]. با این حال، کاهش چگالی نمونه تولیدشده به روش پرینت سه‌بعدی در محدوده کمتر از حدود 5% معمولاً برای بسیاری از کاربردهای صنعتی از جمله فرایندهای سخت‌کاری القائی قابل قبول تلقی می‌شود، زیرا در این روش تنها لایه سطحی قطعه تحت تأثیر حرارت قرار می‌گیرد [34].

جدول 5- نتایج آزمون چگالی.

| روش تولید     | چگالی ( $\text{g/cm}^3$ ) | درصد چگالی تئوری |
|---------------|---------------------------|------------------|
| اکستروژن      | $8/86 \pm 0/5$            | ~99%             |
| پرینت سه‌بعدی | $8/30 \pm 0/5$            | ~93%             |

نمودار مقایسه چگالی



شکل 9- مقایسه نتایج آزمون چگالی برای نمونه‌های اکستروژن و پرینت سه‌بعدی.

## 4- نتیجه گیری

پژوهش حاضر با هدف امکان سنجی جایگزینی روش های سنتی ساخت کویل های مسی در فرایند سخت کاری القائی با کمک فناوری ذوب لیزری انتخابی انجام پذیرفت. مقایسه خواص دو مقطع مربعی توخالی تولید شده با روش های اکستروژن و پرینت سه بعدی فلزی، منجر به استنتاج نتایج کلیدی زیر گردید:

**خواص فیزیکی:** اگرچه نمونه اکستروژن شده دارای چگالی معادل 99٪ چگالی تئوری مس می باشد، نمونه پرینت شده با وجود کاهش 5 درصدی چگالی، انسجام فیزیکی لازم جهت کاربردهای صنعتی به خصوص در زمینه کویل های سخت کاری القائی را دارا می باشد.

**بهبود مکانیکی:** نمونه پرینت سه بعدی، سختی بالاتری نسبت به نمونه اکستروژن شده از خود نشان داد که این امر به حفظ فرم هندسی کویل تحت تنش های ترمومکانیکی حین عملیات سخت کاری القائی کمک شایانی می نماید. برای کویل های القائی، سختی بالاتر نمونه پرینت شده یک مزیت در برابر دفرمه شدن مکانیکی حین کارکرد محسوب می شود.

**عملکرد الکترومغناطیسی:** میزان افت رسانایی الکتریکی در نمونه پرینت شده بسیار ناچیز بوده (99/1 % IACS) و تفاوت معناداری با نمونه اکستروژن شده ندارد.

**زبری سطح:** اگرچه زبری سطح در نمونه پرینت شده بالاتر است، اما این عامل مانعی در عملکرد کویل های القائی ایجاد نمی کند.

**چشم انداز صنعتی:** نتایج این پژوهش نشان می دهد هر دو روش اکستروژن و پرینت سه بعدی برای کویل های مسی سخت کاری القائی می توانند استفاده شوند و پرینت سه بعدی فلزی می تواند راهکاری بهینه برای توسعه کویل های سخت کاری القائی پیشرفته باشد. همچنین فناوری پرینت سه بعدی فلزی، با وجود برخی محدودیت های جزئی در چگالی و صافی سطح، بستری قابل اعتماد و بهینه برای تولید نسل جدید کویل های سخت کاری القائی با هندسه های پیچیده و کانال های خنک کاری درونی (که با روش اکستروژن غیر قابل تولید هستند) فراهم می آورد. برتری راهبردی فناوری

جدول 6- نتایج آزمون هدایت الکتریکی.

| روش تولید     | % IACS | هدایت الکتریکی (S/m) |
|---------------|--------|----------------------|
| اکستروژن      | 100/8  | $5/84 \times 10^7$   |
| پرینت سه بعدی | 99/1   | $5/74 \times 10^7$   |

## 3-4- ارزیابی زبری سطح

نتایج آزمایش زبری سطح برای هر دو نمونه در جدول (7) ارائه شده است. همان طور که در جدول (7) مشاهده می شود، نمونه اکستروژن شده زبری متوسط  $R_a$  در محدوده 324/، تا 573/، میکرومتر را نشان می دهد که این کیفیت سطح، به واسطه تماس با قالب و ماهیت کششی فرایند اکستروژن می باشد [37]؛ در نقطه مقابل، نمونه پرینت شده زبری متوسط  $R_a$  در محدوده 11/90 تا 13/20 میکرومتر را نشان می دهد که به دلیل اثر پله ای ذاتی در تولید لایه به لایه و همچنین چسبیدن ذرات پودر نیمه ذوب شده به دیواره ها می باشد [38].

جدول 7- نتایج زبری سطح.

| روش تولید     | Ra عرضی (μm)  | Ra طولی (μm)  | Rz (μm) |
|---------------|---------------|---------------|---------|
| اکستروژن      | 1/438 – 1/602 | 324/ – 573/   | 10-3    |
| پرینت سه بعدی | 8/16 – 10/50  | 11/90 – 13/20 | 82-42   |

در کویل های سخت کاری القائی، هنگامی که زبری سطح بالا باشد، جریان الکتریکی مجبور به ردیابی پستی و بلندی های سطح می شود. این امر به طور موثر مقاومت اهمی قطعه را افزایش داده، منجر به گرمایش بیش از حد موضعی کویل می شود [39]. برای ساخت کویل با روش پرینت سه بعدی فلزی، می توان با استفاده از سطح مقطع های مختلف کانال های خنک کاری بهینه طراحی کرد و دمای خنک کاری کویل را بهبود بخشید. اگرچه در بسیاری از کاربردهای صنعتی این میزان زبری نیازمند عملیات پرداخت کاری است، اما در سیستم های سخت کاری القائی، این مقیاس از زبری تأثیر مخرب و افت محسوسی بر راندمان تمرکز میدان مغناطیسی کویل نخواهد داشت [37].

- 12-A. A. Popovich et al., "Microstructure and mechanical properties of copper produced by selective laser melting," *Mater. Des.*, vol. 113, pp. 121-132, 2017.
- 13-M. Colopi, A. Demir, M. Caprio, and B. Previtali, "Selective laser melting of pure copper with a high-power laser," *Procedia CIRP*, vol. 74, pp. 59-63, 2018.
- 14-P. Schüßler et al., "Characterization of the metal fused filament fabrication process for manufacturing of pure copper inductors," *Materials*, vol. 16, no. 20, p. 6678, Oct. 2023. doi: 10.3390/ma16206678.
- 15-R. Li, J. Liu, Y. Shi, L. Wang, and W. Jiang, "Density, surface quality, and mechanical properties of selective laser melted pure copper," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 439, pp. 1038-1046, 2018.
- 16-C. Silbernagel, L. Gargalis, S. Ashcroft, and R. Hague, "Electrical resistivity of additively manufactured pure copper," *Addit. Manuf.*, vol. 29, p. 100834, 2019.
- 17-J. P. Kruth, L. Froyen, J. Van Vaerenbergh, P. Mercelis, M. Rombouts, and B. Lauwers, "Selective laser melting of iron-based powder," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 149, no. 1-3, pp. 616-622, 2004.
- 18-K. Trevisan et al., "Additive manufacturing of pure copper by selective laser melting: Process parameter optimization," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 88, pp. 1-13, 2017.
- 19-I. Yadroitsev, P. Krakhmalev, and I. Yadroitsava, "Single track formation in selective laser melting of copper powder," *Phys. Procedia*, vol. 39, pp. 481-489, 2012.
- 20-"Standard Specification for Oxygen-Free Electrolytic Copper—Refinery Shapes," ASTM B170-24, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2024.
- 21-"Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials," ASTM E10-23, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2023.
- 22-Razi Metallurgical Research Center Lab Reports, Sample Nos. 17658-1 and 17658-2.
- 23-"Standard Test Method for Resistivity of Electrical Conductor Materials," ASTM B193-20, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2020.
- 24-BS EN ISO 21920-3, Geometrical Product Specifications (GPS), Surface Texture: Profile, Part 3: Specification Operators, 2022.
- 25-Hall, E. O. "The deformation and ageing of mild steel: III Discussion of results." *Proceedings of the Physical Society Section B*, 64:747-753, 1951.
- 26-Petch, N. J. "The cleavage strength of polycrystals." *Journal of the Iron and Steel Institute*, 174: 25-28, 1953.
- 27-Li, R., Liu, J., Shi, Y., Wang, L., Jiang, W. "Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59: 1025-1035, 2012.
- 28-Mercelis, P., Kruth, J. P. "Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting." *Rapid Prototyping Journal*, 12(5): 254-265, 2006.
- 29- Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., Emmelmann, C.

پرینت سه بعدی فلزی در امکان ساخت هندسه‌های پیچیده برای کوئل است؛ به گونه‌ای که با طراحی بهینه مسیرهای خنک‌کننده و میدان القائی، می‌توان به عملکردی دست یافت که با کوئل‌های سنتی قابل مقایسه نمی‌باشد. این مزیت طراحی، استفاده از فناوری پرینت سه بعدی فلزی را برای نسل جدید کوئل‌های سخت کاری القائی، به ویژه در کاربردهای با شکل‌های پیچیده، جذاب می‌کند.

## 5- برنامه آینده

طراحی، شبیه سازی عددی، ساخت کوئل سخت کاری القائی به روش پرینت سه بعدی فلزی و بررسی تجربی در فرایند سخت کاری القائی، برنامه بعدی این تیم می‌باشد.

## منابع

- 1-G. E. Totten, "Handbook of Induction Heating." CRC Press, 2007.
- 2-S. Zinn and S. L. Semiatin, "Elements of Induction Heating: Design, Control, and Applications," 1st ed. Materials Park, OH, USA: ASM International, 1988.
- 3-B. Zamzami, A. M. Babaei, and M. Safari, "Optimization of induction hardening process using response surface methodology," in *Proc. 32nd Annu. Int. Conf. of the Iranian Soc. of Mech. Eng. (ISME)*, Arak, Iran, 2024.
- 4-J. R. Davis, Ed., "Copper and Copper Alloys." Materials Park, OH, USA: ASM International, 2001.
- 5-M. Li and S. J. Zinkle, "Physical and mechanical properties of copper and copper alloys," in *Comprehensive Nuclear Materials*, Elsevier, pp. 667-690, 2012.
- 6-W. Zhang, J. Li, and L. Wang, "Topology optimization of induction heating coils for improved energy efficiency," *Struct. Multidiscipl. Optim.*, vol. 63, pp. 2485-2498, 2021.
- 7-V. Chabina, M. Kovac, and A. Sabik, "Lorentz force and thermo-mechanical stresses in induction heating coils," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 3, pp. 1-4, 2015.
- 8-D. Loveless, A. Lear, and B. Naranjo, "Failure analysis and life estimation of induction heating coils," *J. Fail. Anal. Prev.*, vol. 17, no. 5, pp. 885-893, 2017.
- 9-D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, and C. Emmelmann, "Additive manufacturing of metals," *Acta Mater.*, vol. 117, pp. 371-392, 2016.
- 10-A. K. Brika, M. Letenneur, C. A. Dion, and V. Brailovski, "3D printing of pure copper: A review," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 111, pp. 523-542, 2020.
- 11-T. A. Mai et al., "Additive manufacturing of solid and porous copper components for advanced cooling applications," *Mater. Des.*, vol. 158, pp. 121-133, 2018.

- 35-Silbernagel, C., Ashcroft, I., Dickens, P., & Galea, M. "Electrical resistivity of pure copper processed by laser powder bed fusion." Additive Manufacturing, 24, 350-359, 2018.
- 36-P. Schüßler et al., "Characterization of the Metal Fused Filament Fabrication Process for Manufacturing of Pure Copper Inductors," Materials, vol. 16, no. 20, p. 6678, Oct. 2023.
- 37-Shubo Gao et al., "High-strength and high-conductivity pure copper by powder bed fusion with a medium-power infrared laser," Materials & Design., vol. 258, p.1-9, 2025.
- 38-L'Huillier, A. G., et al. "Impact of surface roughness on the high-frequency electrical performance of additive manufactured copper conductors." IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 10(11), 1845-1853, 2020.
- 39-Rudnev, V., Loveless, D., & Cook, R. Handbook of Induction Heating (2nd ed.). CRC Press, 2017.
- "Additive manufacturing of metals." Acta Materialia, 117: 371-392, 2016.
- 30-ASM Handbook, Volume 14A: Metalworking: Bulk Forming. ASM International, 2005.
- 31-Cunningham, R., Zhao, C., Parab, N., et al. "Keyhole threshold and morphology in laser melting revealed by ultrahigh-speed x-ray imaging." Science, 363: 849-852, 2019.
- 32-Colopi, M., Demir, A. G., Caprio, L., Previtali, B. "Limits and solutions in processing power single-mode fiber laser." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 104: 2473-2486, 2019.
- 33- Weingarten, C., Buchbinder, D., Pirch, N., et al. "Formation and reduction of hydrogen porosity during selective laser melting of AlSi10Mg." Journal of Materials Processing Technology, 221: 112-120, 2015.
- 34- Rudnev, V., "Induction Gear Hardening: The practice and science of modern induction heat-treating," Gear Solutions Magazine, 2018.