



علوم و فناوری‌های نوین ایران



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

B. Zamzami¹, M. Safari^{1*}, M. Golzar²

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.



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

بهنام زمزمی¹، مهدی صفری^{1*}، محمد گلزار²

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 شده 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 شده 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 آنیل 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

1- مقدمه

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.

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 ببرد [3]. ساخت سنتی کویل ها بر پایه اکستروژن، خم کاری و لحیم کاری قطعات اکستروژده شده

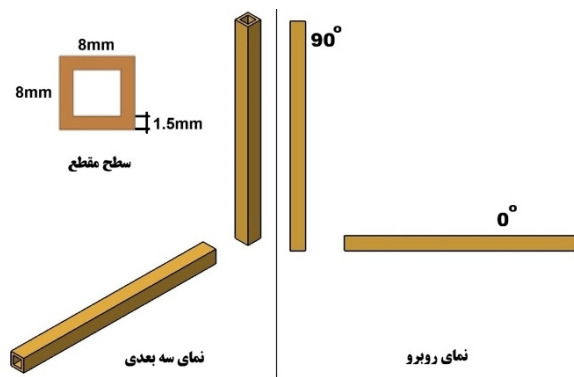
یکسان در مقاطع توخالی وجود دارد. از این رو، در پژوهش حاضر دو مقطع مربعی توخالی از جنس مس خالص که به دو روش اکستروژن و پرینت سه بعدی فلزی تولید شده‌اند، مورد ارزیابی تطبیقی قرار گرفته‌اند.

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.

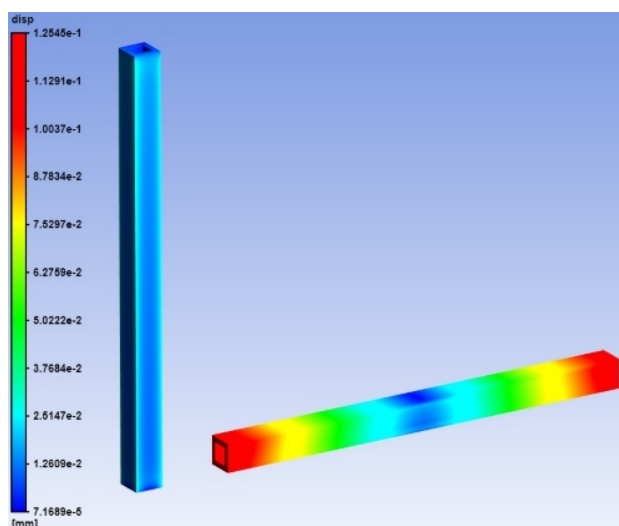
ماده ورودی در حلگر عددی، مس خالص با مشخصات مطابق جدول (1) تعریف گردید و دستگاه ذوب لیزری انتخابی استفاده شد. برای کاهش هزینه‌های محاسباتی ضمن حفظ دقت، حلگر بر پایه رویکرد الاستیک خطی و با استفاده از روش کرنش فرضی تنظیم گردید؛ در این الگوریتم ریاضیاتی، یک

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 اکستروژن‌شده 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 اکستروژن‌شده و پرینت‌شده با هندسه

نتایج حاصل از شبیه‌سازی 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 جابه‌جایی معادل 125/1 میلی‌متر را پیش‌بینی می‌کند. همچنین در این زاویه به دلیل وسعت سطوح معلق، حجم بالایی از سازه‌های نگهدارنده مورد نیاز است که به تبع آن هزینه‌های مواد مصرفی و ماشین‌کاری به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. در مقابل، شبیه‌سازی در زاویه 90 درجه (حالت عمودی) توزیع یکنواخت‌تر جابه‌جایی نزدیک به صفر را پیش‌بینی کرد که این امر، انتخاب این زاویه را برای فاز ساخت فیزیکی توجیه نمود.



شکل 3- پیش‌بینی جابجایی قطعات پس از جدایی از صفحه پرینت.

2-2- تجهیزات پرینت سه بعدی و آماده‌سازی نمونه‌ها

با بررسی نتایج شبیه‌سازی عددی، زاویه مناسب جهت ساخت، زاویه نود درجه (در راستای محور Z) انتخاب گردید و پرینت سه‌بعدی 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

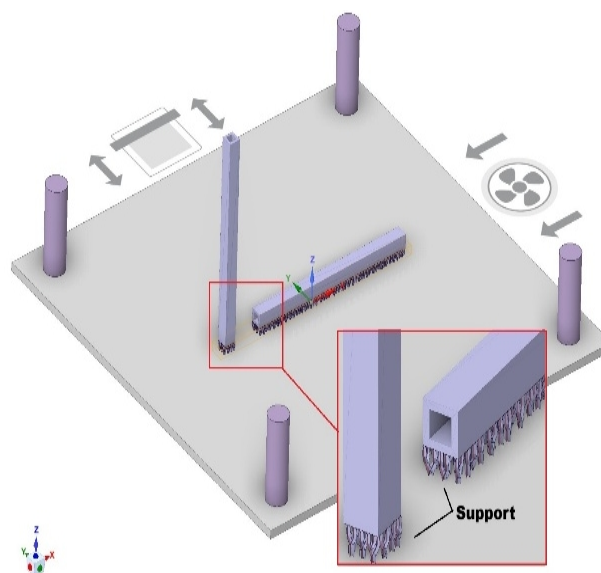
میدان کرنش معادل به صورت همسانگرد به المان‌های فعال شده اعمال می‌شود تا اثرات انقباض حرارتی ناشی از انجماد حوضچه مذاب شبیه‌سازی گردد.

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

جدول 1- مشخصات پودر مس خالص.

چگالی	8/94 g/cm ³
تنش تسلیم	225 MPa
مدول الاستیک	110 GPa
ضریب پواسون	0.335
ضریب انبساط حرارتی	17x6-10 K ⁻¹
هدایت حرارتی	401 W/mK
هدایت الکتریکی	59/6 MS/m

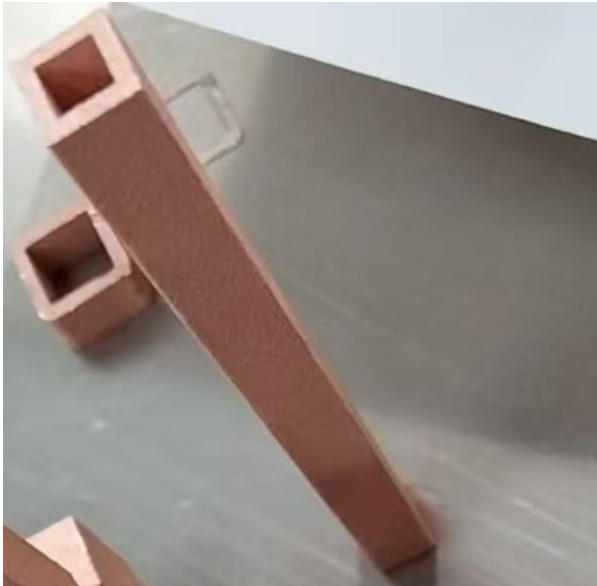
هدف از این فاز تحلیلی، استخراج بهترین زاویه ساخت با کمترین میزان پیچیدگی و کمترین نیاز به سازه نگهدارنده است؛ زیرا حذف سازه‌های نگهدارنده از قطعه نیازمند ماشین‌کاری بوده و عملاً هزینه‌های ماشین‌کاری و مصرف بیشتر ماده را افزایش می‌دهد. در این شبیه‌سازی، مطابق شکل (2)، سازه‌های نگهدارنده برای هر دو زاویه اعمال شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقدار سازه نگهدارنده در زاویه صفر درجه بیشتر از زاویه نود درجه می‌باشد.



شکل 2- نمایی از ساپورت‌ها 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 اکستروود شده با هندسه و ابعاد کاملاً یکسان (100 x 8 x 8 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 اکستروود شده در بالای تصویر مشاهده می گردد.



شکل 6- نمونه پرینت سه بعدی در پایین و نمونه اکستروود 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.

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

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.



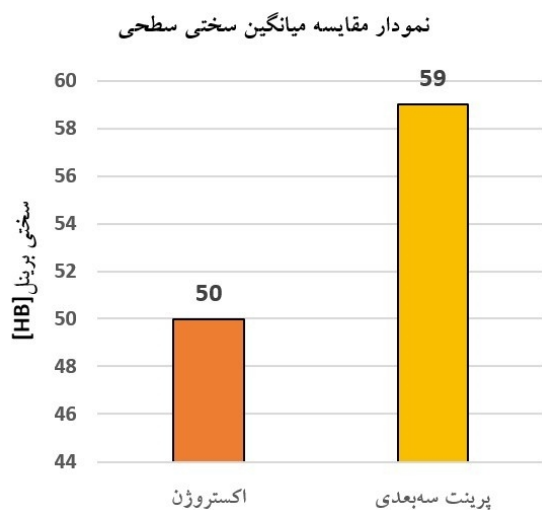
شکل 4- نمایی از دستگاه و محیط پرینت سه بعدی مس.

الف - سختی سنجی

نمونه پرینت سه بعدی را می توان به عوامل ریزساختاری و فرایندی نسبت داد. نخست آن که در فرایند ذوب لیزری انتخابی، به دلیل نرخ سرمایش بسیار بالا در حوضچه مذاب، ساختاری بسیار ریزدانه تر نسبت به فرایندهای شکل دهی متداول ایجاد می شود. بر اساس رابطه هال-پچ، کاهش اندازه دانه موجب افزایش مقاومت در برابر حرکت نابجایی ها و در نتیجه افزایش سختی و استحکام می شود [25، 26].

علاوه بر ریزدانه گی، در فرایند ذوب لیزری انتخابی به علت چرخه های مکرر حرارتی و انجماد سریع، تنش های پسماند بالا و تراکم قابل توجهی از نابجایی ها در ساختار باقی می ماند که این موضوع نیز به صورت مستقیم سختی را افزایش می دهد [27، 28، 29].

در کاربرد کوپل های القائی، افزایش سختی نمونه تولید شده به روش پرینت سه بعدی یک مزیت استراتژیک محسوب می شود؛ زیرا پایداری ابعادی و مقاومت کوپل در برابر تنش های حرارتی حین عملیات سخت کاری القائی را بهبود می بخشد [8].



شکل 8- مقایسه میانگین سختی برینل برای نمونه های اکستروژن و پرینت سه بعدی.

3-2- ارزیابی چگالی

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

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

ب- اندازه گیری چگالی

اندازه گیری چگالی بر پایه اصل ارشمیدس جهت محاسبه چگالی نسبی و کسر حجم تخلخل ها صورت پذیرفت [22].

ج- هدایت الکتریکی (آزمایش رسانایی)

اندازه گیری 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 اندازه گیری صافی سطح مدل HUATEC SRT-6600 مطابق شکل (7) صورت پذیرفت [24].



شکل 7- نمایی از دستگاه اندازه گیری صافی سطح.

3- نتایج و بحث

3-1- ارزیابی سختی

نتایج میانگین سختی سنجی در شکل (8) ارائه شده است. همان طور که در شکل دیده می شود، سختی نمونه تولید شده به روش پرینت سه بعدی برابر 59 برینل و برای نمونه اکستروژن شده برابر 50 برینل است. علت 9 برینل سختی بالاتر

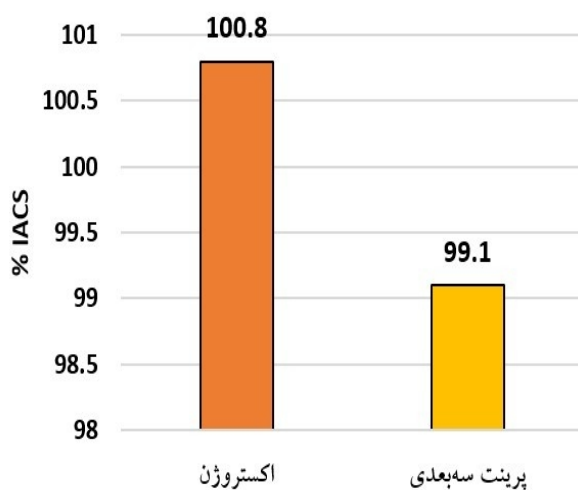
3-3- ارزیابی هدایت الکتریکی

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، 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 کوپل، 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.

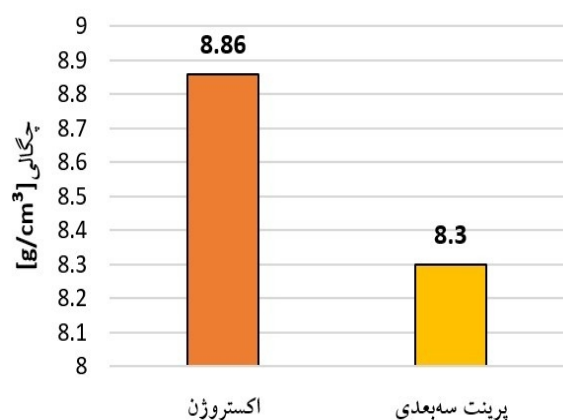
مس است که این تراکم بالا بیانگر آن است که در این روش، ماده اولیه تحت فشار بالا و تغییر شکل پیوسته قرار گرفته و منافذ داخلی تا حد زیادی بسته یا حذف شده‌اند [30].

در سوی دیگر، چگالی نمونه پرینت‌شده برابر با $8/30 \pm 0/5$ گرم بر سانتی‌متر مکعب، معادل 93% چگالی تنوری 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 [31,32]. 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 [32,33]. 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 (g/cm^3)	درصد چگالی تنوری
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 امکان‌سنجی جایگزینی روش‌های سنتی ساخت کویل‌های مسی در فرایند سخت‌کاری القائی با کمک فناوری ذوب لیزری انتخابی انجام پذیرفت. مقایسه خواص دو مقطع مربعی توخالی تولیدشده با روش‌های اکستروژن و پرینت سه‌بعدی فلزی، منجر به استنتاج نتایج کلیدی زیر گردید:

خواص فیزیکی: اگرچه نمونه اکستروژن‌شده دارای چگالی معادل 99٪ چگالی تئوری مس می‌باشد، نمونه پرینت‌شده با وجود کاهش 5 درصدی چگالی، انسجام فیزیکی لازم جهت کاربردهای صنعتی به خصوص در زمینه کویل‌های سخت‌کاری القائی را دارا می‌باشد.

بهبود مکانیکی: نمونه پرینت سه‌بعدی، سختی بالاتری نسبت به نمونه اکستروژن‌شده از خود نشان داد که این امر به حفظ فرم هندسی کویل تحت تنش‌های ترمومکانیکی حین عملیات سخت‌کاری القائی کمک شایانی می‌نماید. برای کویل‌های القائی، سختی بالاتر نمونه پرینت‌شده یک مزیت در برابر دفرمه شدن مکانیکی حین کارکرد محسوب می‌شود.

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

زبری سطح: اگرچه زبری سطح در نمونه پرینت‌شده بالاتر است، اما این عامل مانعی در عملکرد کویل‌های القائی ایجاد نمی‌کند.

چشم‌انداز صنعتی: نتایج این پژوهش نشان می‌دهد هر دو روش اکستروژن و پرینت سه‌بعدی برای کویل‌های مسی سخت‌کاری القائی می‌توانند استفاده شوند و پرینت سه‌بعدی فلزی می‌تواند راهکاری بهینه برای توسعه کویل‌های سخت‌کاری القائی پیشرفته باشد. همچنین فناوری پرینت سه‌بعدی فلزی، با وجود برخی محدودیت‌های جزئی در چگالی و صافی سطح، بستری قابل اعتماد و بهینه برای تولید نسل جدید کویل‌های سخت‌کاری القائی با هندسه‌های پیچیده و کانال‌های خنک‌کاری درونی (که با روش اکستروژن غیرقابل تولید هستند) فراهم می‌آورد. 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 سه‌بعدی	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. همان‌طور که در جدول (7) مشاهده می‌شود، نمونه اکستروژن‌شده زبری متوسط R_a در محدوده 0/324 تا 0/573. میکرومتر را نشان می‌دهد که این کیفیت سطح، به واسطه تماس با قالب و ماهیت کششی فرایند اکستروژن می‌باشد [37]; در نقطه مقابل، نمونه پرینت‌شده زبری متوسط R_a در محدوده 11/90 تا 13/20 میکرومتر را نشان می‌دهد که به دلیل اثر پله‌ای ذاتی در تولید لایه‌به‌لایه و همچنین چسبیدن ذرات پودر نیمه‌ذوب‌شده به دیواره‌ها می‌باشد [38].

جدول 7- نتایج زبری سطح.

روش تولید	Ra عرضی (μm)	Ra طولی (μm)	Rz (μm)
اکستروژن	1/438 – 1/602	0/324 – 0/573	10-3
پرینت سه‌بعدی	8/16 – 10/50	11/90 – 13/20	82-42

در کویل‌های سخت‌کاری القائی، هنگامی که زبری سطح بالا باشد، جریان الکتریکی مجبور به ردیابی پستی و بلندی‌های سطح می‌شود. این امر به طور موثر مقاومت اهمی قطعه را افزایش داده، منجر به گرمایش بیش از حد موضعی کویل می‌شود [39]. برای ساخت کویل با روش پرینت سه‌بعدی فلزی، می‌توان با استفاده از سطح مقطع‌های مختلف کانال‌های خنک‌کاری بهینه طراحی کرد و دمای خنک‌کاری کویل را بهبود بخشید. اگرچه در بسیاری از کاربردهای صنعتی این میزان زبری نیازمند عملیات پرداخت‌کاری است، اما در سیستم‌های سخت‌کاری 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 کوپل است؛ به گونه‌ای که با طراحی بهینه مسیرهای خنک‌کننده و میدان القائی، می‌توان به عملکردی دست یافت که با کوپل‌های سنتی قابل مقایسه نمی‌باشد. این مزیت طراحی، استفاده از فناوری پرینت سه بعدی فلزی را برای نسل جدید کوپل‌های سخت کاری القائی، به ویژه در کاربردهای با شکل‌های پیچیده، جذاب می‌کند.

5- برنامه آینده

طراحی، شبیه‌سازی عددی، ساخت کوپل 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.