E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 12, Number 1, 2026



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

B. Zamzami[1], M. Safari[1*], M. Golzar[2]

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 evalated 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.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.18]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال دوازدهم، شماره1، بهار و تابستان 1405



مطالعه تجربی و مقایسه قطعات مسی اکستروژن و پرینت سه‌بعدی در ساخت کویل‌های سخت‌کاری القائی

بهنام زمزمی[1]، مهدی صفری[1*]، محمد گلزار[2]

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

کویل‌های مسی یکی از قسمت‌های مهم دستگاه عملیات سخت‌کاری القائی می‌باشند. فرایند ساخت سنتی این کویل‌ها با استفاده از سطح مقطع‌های مسی اکسترودشده می‌باشد. در این پژوهش به بررسی تجربی تولید سطح مقطع مسی به روش پرینت سه‌بعدی پرداخته شد. دو نمونه از جنس مس با سطح مقطع مربع توخالی تولیدشده به روش اکستروژن و پرینت سه‌بعدی، با هدف ساخت کویل‌های عملیات سخت‌کاری القائی مورد بررسی قرار گرفتند. آزمون‌های چگالی، هدایت الکتریکی، سختی و زبری سطح برطبق استانداردهای مربوطه انجام گرفت. نتایج کمی نمونه‌های اکسترودشده و پرینت سه‌بعدی به ترتیب، چگالی 99% و93% درصد چگالی تئوری مس، هدایت الکتریکی% 100/8 و99/1% نسبت به استاندارد مس آنیل‌شده، سختی50 و59 برینل و زبری متوسط سطح (Ra) 0/324-0/533 و 11/949-13/194 می‌باشند. نتایج نشان داد که نمونه اکسترودشده دارای چگالی بالاتر، هدایت الکتریکی بهتر و سطح صاف‌تر است، در حالی که نمونه پرینت سه‌بعدی با سختی بالاتر، چگالی کمتر و زبری سطح بیشتر همراه است. این یافته‌ها نشان می‌دهد از روش پرینت سه‌بعدی فلزی برای ساخت کویل‌های سخت‌کاری القائی می‌توان استفاده کرد.

کلمات کلیدی: پرینت سه‌بعدی فلزی، اکستروژن، سخت‌کاری القائی، کویل.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: مهدی صفری، m.safari@arakut.ac.ir.

1- مقدمه

عملیات حرارتی و سخت‌کاری القائی، روشی نوین و کارآمد برای گرمایش موضعی و سریع فلزات با استفاده از میدان مغناطیسی متغیر و جریان‌های گردابی است. در این فرایند، سطح قطعه فولادی در زمان کوتاهی به دمای آستنیت رسیده و سپس با پاشش مایع خنک‌کننده به سرعت سرد می‌شود. این عملیات، بدون تغییر در خواص درون قطعه، سختی و مقاومت به سایش سطح قطعه را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد [1, 2]. کویل، به‌عنوان جزء کلیدی این فرایند، معمولاً از جنس مس ساخته می‌شود تا از رسانایی الکتریکی و حرارتی بسیار بالای این فلز بهره ببرد [3]. ساخت سنتی کویل‌ها بر پایه اکستروژن، خم‌کاری و لحیم‌کاری قطعات اکسترودشده

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.18]

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 سه‌بعدی 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 اکسترودشده 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].

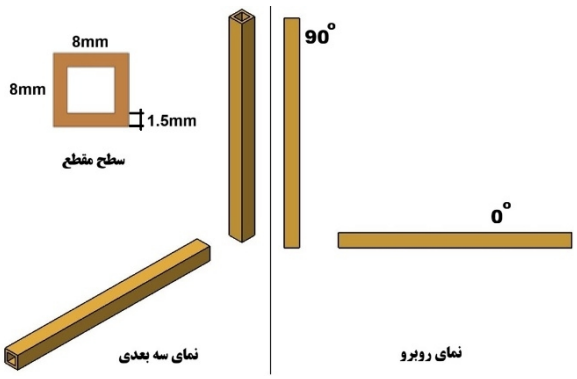
با وجود آنکه تحقیقات گسترده‌ای بر روی قابلیت تولید و بهینه‌سازی پارامترهای پرینت سه‌بعدی مس خالص انجام شده است [10, 13, 18،19] اما همچنان یک شکاف مطالعاتی در زمینه مقایسه قطعات اکسترودشده و پرینت‌شده با هندسه یکسان در مقاطع توخالی وجود دارد. از این رو، در پژوهش حاضر دو مقطع مربعی توخالی از جنس مس خالص که به دو روش اکستروژن و پرینت سه‌بعدی 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، به‌منظور پیش‌بینی رفتار قطعه حین فرایند پرینت سه‌بعدی فلزی و بهینه‌سازی استراتژی ساخت، فرایند پرینت سه‌بعدی سطح مقطع مربع توخالی در دو زاویه صفر و نود درجه با ابعاد 100 x 8 x 8 میلی‌متر مربع و به ضخامت دیواره 1/5 میلی‌متر مطابق شکل(1) با کمک نرم‌افزار انسیس ادیتیو، شبیه‌سازی گردید.



شکل1- 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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.18]

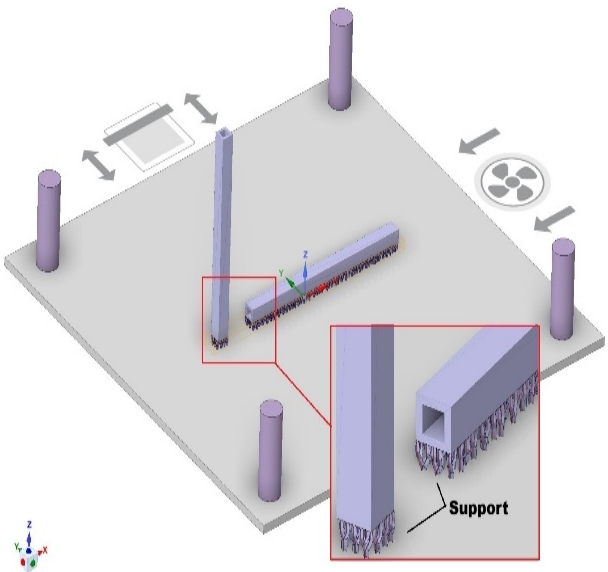
میدان کرنش معادل به‌صورت همسانگرد به المان‌های فعال‌شده اعمال می‌شود تا اثرات انقباض حرارتی ناشی از انجماد حوضچه مذاب شبیه‌سازی گردد.

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

جدول1- مشخصات پودر مس خالص.

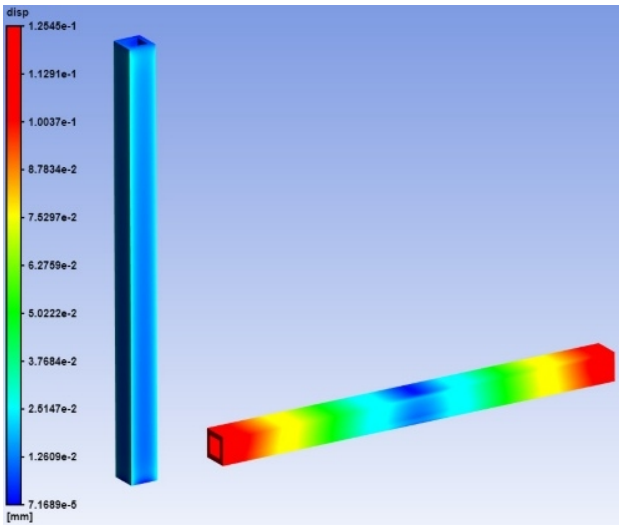
چگالی	8/94 g/cm3
تنش تسلیم	225 MPa
مدول الاستیک	110 GPa
ضریب پواسون	/335
ضریب انبساط حرارتی	17x6-10 K-1
هدایت حرارتی	401 W/mK
هدایت الکتریکی	59/6 MS/m

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.



شکل2- نمایی از ساپورت ها در دو زاویه صفر و نود درجه.

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/. 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.



شکل3- پیش بینی جابجایی قطعات پس از جدایی از صفحه پرینت.

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

با بررسی نتایج شبیه‌سازی عددی، زاویه مناسب جهت ساخت، زاویه نود درجه (در راستای محورZ) انتخاب گردید و پرینت سه‌بعدی مس با دستگاه ذوب لیزری انتخابی با لیزر فایبر استاندارد با مشخصات مطابق جدول (2) انجام شد.

جدول2- 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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

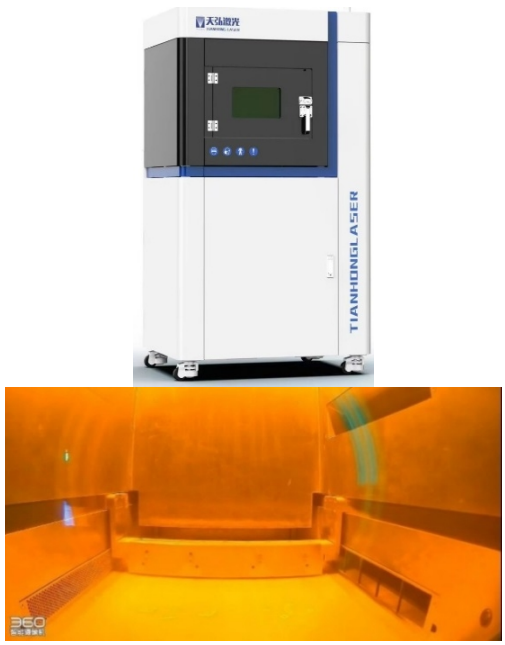
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.18]

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

جدول3- 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	(مجموع) 0.05 ≤	(مجموع) 0.03 ≤

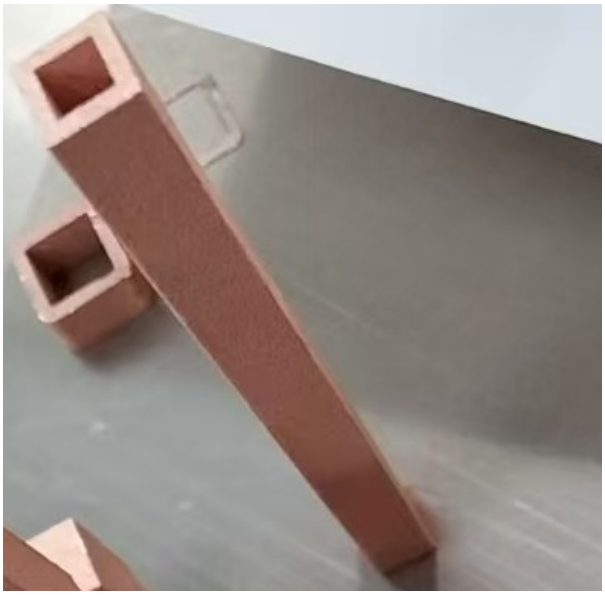
شکل (4)، نمایی از دستگاه و محیط پرینت را نمایش می‌دهـد. تنظیم پارامترهای دستگاه پرینت سه‌بعـدی بـرای سـطح مقطـع مورد نظر مطابق جدول (4) صورت پذیرفت کـه در شـکل (5) سطح مقطع مـورد نظـر روی صـفحه سـاخت دسـتگاه پرینـت سه‌بعدی مشاهده می‌گردد.



شکل4- نمایی از دستگاه و محیط پرینت سه‌بعدی مس.

جدول4- پارامترهای استفاده شده برای پرینت سه‌بعدی 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



شکل5- نمایی از صفحه ساخت و سطح مقطع پرینت‌شده.

به‌منظور انجام ارزیابی‌های تطبیقی، یک نمونـه شـاهد از جـنس مس خالص اکسـترودشـده بـا هندسـه و ابعـاد کـاملاً یکسـان (100x 8 x 8 میلی‌متر مربع به ضخامت 1/5 میلی‌متر) تهیه شد. مطابق شکل (6)، نمونه تولیدشده با روش پرینت سـه‌بعـدی در پایین و نمونه اکسترودشده در بالای تصویر مشاهده می‌گردد.



شکل6- نمونه پرینت سه‌بعدی در پایین و نمونه اکسترودشده در بالا.

3-2- آزمایش‌های تجربی

به‌منظور مقایسه جامع خواص قطعـات تولیدشـده بـا دو روش مذکور، آزمون‌های استاندارد زیر در مرکـز پـژوهش متـالورژی رازی تهران به‌انجام رسید:

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.18]

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- اندازه گیری 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].



شکل7- نمایی از دستگاه اندازه‌گیری صافی سطح.

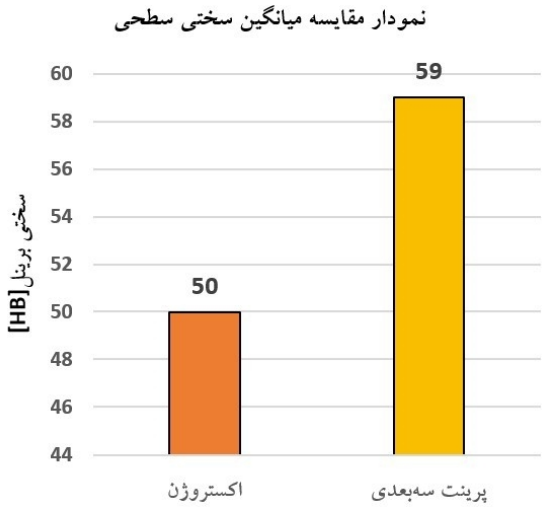
3- نتایج و بحث

3-1- ارزیابی سختی

نتایج میانگین سختی‌سنجی 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 اکسترودشده برابر50 برینل است. علت 9 برینل سختی بالاتر 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 [26،25].

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

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



شکل8- مقایسه میانگین سختی برینل برای نمونه‌های اکستروژن و پرینت سه‌بعدی.

3-2- 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 اکسترودشده برابر با 8/86 ±0/5 گرم بر سانتی‌متر مکعب، معادل 99٪ چگالی تئوری

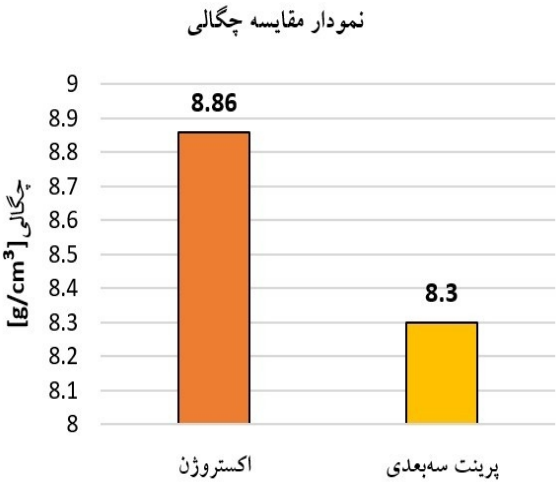
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.18]

مس است که این تراکم بالا بیانگر آن است کـه در ایـن روش، ماده اولیه تحت فشار بالا و تغییر شـکل پیوسـته قـرار گرفتـه و منافذ داخلی تا حد زیادی بسته یا حذف شده‌اند [30].

در سوی دیگر، چگالی نمونه پرینت‌شـده برابـر بـا 8/30 ±0/5 گرم بر سانتی‌متر مکعب، معادل 93٪ چگالی تئوری مس است. این افت حدود 5 درصدی چگالی، مـی‌توانـد ناشـی از وجـود تخلخل‌های ناشی از عدم ذوب کامل، حبس گاز، پاشـش ذرات و ناپایداری حوضچه مذاب و نیز بازتاب بـالای پرتـو لیـزر در مس باشد [32،31]. مس به دلیـل هـدایت حرارتـی و بازتـابش بسیار بالا، یکی از دشوارترین فلزات برای فراینـد ذوب لیـزری انتخابی به شمار مـی‌رود؛ بخـش قابـل‌تـوجهی از انـرژی لیـزر بازتاب می‌شود و حفظ حوضچه مـذاب پایـدار نیازمنـد کنتـرل دقیق توان لیزر، سرعت اسکن، فاصله هاشورها و ضخامت لایه است [33،32]. با این حال، کاهش چگالی نمونه تولیدشده بـه روش پرینت سه‌بعدی در محدوده کمتـر از حـدود 5% معمـولاً بـرای بسـیاری از کاربردهـای صـنعتی از جملـه فراینـدهای سخت‌کاری القائی قابل‌قبول تلقی می‌شود، زیـرا در ایـن روش تنها لایه سطحی قطعه تحت تأثیر حرارت قرار می‌گیرد [34].

جدول5- نتایج آزمون چگالی.

روش تولید	چگالی(g/cm^3)	درصد چگالی تئوری
اکستروژن	8/86 ± 0/5	~٪99
پرینت سه‌بعدی	8/30 ± 0/5	~٪93



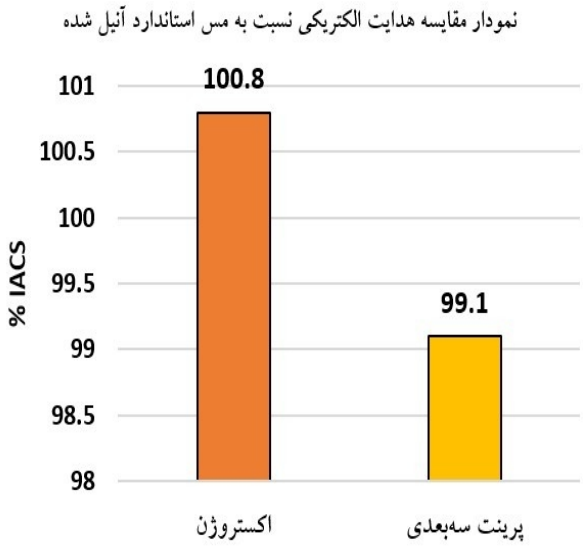
شکل9- مقایسه نتایج آزمون چگالی برای نمونه‌های اکستروژن و پرینت سه‌بعدی.

3-3- ارزیابی هدایت الکتریکی

نتایج آزمون چهار-پروب برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی در شکل (10) وجدول (6) ارائه شده است. برای مقایسـه هـدایت الکتریکی فلزها از استاندارد بین‌المللی مس آنیل‌شده یـا IACS استفاده می‌شود.

همان‌طور که در شکل (10) و جدول (6) مشـاهده مـی‌شـود، نمونه اکسترودشده، هدایت الکتریکی $5/84x\ 10^7$ زیمنس بر متر معـادل 100/8 درصـد IACS مـی‌باشـد؛ در مقابـل، نمونـه پرینـت‌شـده، هـدایت الکتریکـی $5/74\ x10^7$ زیمـنس بـر متـر معادل99/1 درصد IACS را نشان می‌دهد.

این موضوع که نمونه پرینت‌شده با وجود چگـالی93% توانسـته است رسانایی الکتریکـی خـوب معـادل99/1 درصـد IACS را حفظ کند، نشان‌دهنده خلوص بالای متالورژیکی پـودر اولیـه و اتصال متالورژیکی مناسـب بـین لایـه‌هـا اسـت. بـا ایـن‌حـال، تخلخل‌های موجود در ساختار فرایند ذوب لیزری انتخـابی بـه عنوان موانع پراکندگی الکترون‌ها عمـل کـرده و مسـیر جریـان الکتریکی را طولانی‌تر می‌کند که باعث کاهش جزئـی رسـانایی الکتریکی در نمونه پرینت‌شده گردیده است [35]. افت کمتر از 2 درصد در اسـتاندارد IACS بـرای قطعـه پرینـت سـه‌بعـدی، دستاوردی بسیار مطلوب ارزیابی می‌شود و نتایج برای سـاخت کویل، پتانسیل بالایی دارد [36].



شکل10- مقایسه نتایج آزمون هدایت الکتریکی برای نمونه‌های اکستروژن و پرینت سه‌بعدی.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.18]

جدول6- 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 اکسترودشده زبری متوسط R_a در محدوده 324/ . تا 573/ . میکرومتر را نشان می‌دهد که این کیفیت سطح، به واسطه تماس با قالب و ماهیت کششی فرایند اکستروژن می باشد [37]؛ در نقطه مقابل، نمونه پرینت‌شده زبری متوسط R_a در محدوده 11/90 تا 13/20 میکرومتر را نشان می‌دهد که به‌دلیل اثر پله‌ای ذاتی در تولید لایه‌به‌لایه و همچنین چسبیدن ذرات پودر نیمه‌ذوب‌شده به دیواره‌ها می‌باشد [38].

جدول7- نتایج زبری سطح.

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

در کویل های 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، می توان 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].

4- نتیجه‌گیری

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 اکسترودشده 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 اکسترودشده 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 (IACS %99/1) و تفاوت معناداری با نمونه اکسترودشده 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 غیرقابل‌تولید هستند) فراهم می‌آورد. برتری راهبردی فناوری

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.18]

پرینت سه‌بعدی فلزی در امکان ساخت هندسه‌های پیچیده برای کویل است؛ به‌گونه‌ای که با طراحی بهینه مسیرهای خنک‌کننده و میدان القائی، می‌توان به عملکردی دست یافت که با کویل‌های سنتی قابل مقایسه نمی‌باشد. این مزیت طراحی، استفاده از فناوری پرینت سه‌بعدی فلزی را برای نسل جدید کویل‌های سخت‌کاری القائی، به‌ویژه در کاربردهای با شکل‌های پیچیده، جذاب می‌کند.

5- برنامه آینده

طراحی، شبیه‌سازی عددی، ساخت کویل سخت‌کاری القائی به روش پرینت سه‌بعدی فلزی و بررسی تجربی در فرایند سخت‌کاری 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.

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.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.18]

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.
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.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2026.18]