



## بررسی فرایند چاپ کامپوزیت مس و کروم با استفاده از روش الکتروشیمیایی

علیرضا حاجی‌علی محمدی<sup>۱\*</sup>، سید محمد موسوی راد<sup>۲</sup>، وحید عابدینی<sup>۱</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: ahajiali@semnan.ac.ir

## اطلاعات مقاله

## مقاله پژوهشی

دریافت: ۳۰ خرداد ۱۴۰۳

پذیرش: ۳ آبان ۱۴۰۳

## کلیدواژگان:

ساخت افزایشی الکتروشیمیایی

ساخت افزایشی کامپوزیت

کامپوزیت مس - کروم

## چکیده

امروزه تقاضا برای ساخت قطعات فلزی که توسط ساخت افزایشی تولید می‌شوند بیشتر شده است؛ اما رویه کلی این روش‌ها، اعمال حرارت به پودر یا الکتروود فلزی است و برای اعمال این حرارت، نیازمند تجهیزات پیشرفته مانند لیزرهاست. همچنین اثر پلکانی نیز سبب ناهمسان‌گردی در قسمت نهایی شده و خواص مکانیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ساخت افزایشی الکتروشیمیایی می‌تواند نمونه‌های فلزی را در دمای اتاق تولید کند و ویژگی‌های الکتروشیمیایی ذاتی این روش امکان استفاده از فلزات مختلف را فراهم می‌کند. در این پژوهش کامپوزیتی متشکل از مس و کروم با استفاده از روش ساخت افزایشی الکتروشیمیایی ساخته شد. در این مطالعه، تأثیر ولتاژ بر شدت جریان منتقل شده به محلول‌های سولفات مس و اسید کرومیک، نحوه رسوب‌گذاری مس و کروم حین چاپ کامپوزیت و اثر پلکانی مطالعه شد. مطالعه میزان رسوب‌گذاری نشان داد که با چاپ لایه‌های کروم، این میزان کاهش می‌یابد. همچنین اعمال ولتاژ تا یک‌میزان مشخصی سبب افزایش جریان منتقل شده به محلول می‌شود. همچنین مطالعه تصویر SEM نیز نشان داد که اثر پلکانی در کامپوزیت وجود ندارد.

## Investigation of copper and chromium composite printing process using electrochemical method

Aliraza Hajiali Mohammadi<sup>1\*</sup>, Seyed Mohammad Musavi Rad<sup>2</sup>, Vahid Abedini<sup>1</sup>

1- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- MSc Graduate, Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

\* Corresponding Author's Email: ahajiali@semnan.ac.ir

## Article Information

## Original Research Paper

Received: 19 June 2024

Accepted: 24 October 2024

## Keywords:

Electrochemical Additive Manufacturing

Composite Additive Manufacturing

Copper - Chromium Composite

## Abstract

The demand for metal components fabricated through additive manufacturing techniques has risen significantly in recent times. However, the general procedure of these methods is to apply high heat to powder or metal electrodes and to apply this high heat, advanced devices such as lasers are required. Also, the staircase effect causes anisotropy in the final part and affects the mechanical properties. Electrochemical additive manufacturing enables the production of metal samples at room temperature, and the inherent electrochemical characteristics of this method allow for the utilization of various metals. This research used the electrochemical additive manufacturing method to make a composite consisting of copper and chromium. This study studied the effect of voltage on the intensity of the current transmitted to copper sulfate and chromic acid solutions, the deposition of copper and chromium during composite printing, and the staircase effect. The study of the amount of deposition showed that this amount decreases with the printing of chromium layers. Also, applying voltage up to a certain level increases the current transferred to the solution. SEM image study also showed that there is no staircase effect in the composite.

## Please cite this article using:

Hajiali Mohammadi A, Musavi Rad SM, Abedini V. Investigation of copper and chromium composite printing process using electrochemical method. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Nov 21;11(9):40-48. doi: 10.22034/ijme.2024.463355.1972 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

از لحاظ تاریخی، فناوری ساخت افزایشی<sup>۱</sup> در دهه ۱۹۸۰ معرفی شد و در ابتدا فقط به تولید یا نمونه‌سازی محصولات کوچک محدود می‌شد [۱]. از سال ۲۰۰۹، توسعه فناوری ساخت افزایشی بسیار سریع بود و کاربردهای مختلفی از مهندسی را در بخش‌های مختلف صنعتی ایجاد نمود. ساخت افزایشی اساساً با فرایند ساخت کاهشی متفاوت است و ساختار با استفاده از رویکرد "لایه به لایه" ساخته می‌شود. در این فناوری می‌توان از مواد فلزی، سرامیکی و پلیمری استفاده نمود [۱، ۲]. ساخت افزایشی یک فناوری در حال ظهور است که سبب نوآوری در طراحی، استفاده از مواد جدید، کاهش هزینه‌ها، کاهش هدررفت مواد و افزایش کارایی می‌شود.

ساخت افزایشی فلزات در مقایسه با روش‌های تولید مرسوم، سهولت ساخت را برای چاپ هندسه‌های پیچیده فراهم می‌کند [۳-۵]. روشی که بیشتر برای چاپ فلز و آلیاژ مورد استفاده قرار می‌گیرد، همجوشی بستر پودری<sup>۲</sup> [۶]، رسوب مستقیم انرژی<sup>۳</sup> [۷]، جت بایندر<sup>۴</sup>، ساخت اشیای چندلایه<sup>۵</sup>، پاشش سرد<sup>۶</sup> و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی<sup>۷</sup> است [۸-۱۰]. با این حال، عدم اطمینان به خواص قطعات ساخته شده، استفاده گسترده از این فرایندها را محدود می‌کند [۱۱]. همچنین همه این روش‌ها برای ذوب مواد به منبع گرما نیاز دارند و در برخی روش‌ها برای جلوگیری از اکسیداسیون فلز، به محفظه خلأ یا پر از گاز بی‌اثر نیاز است. سازه‌های چاپ شده نیز قبل از استفاده نیاز به سرد شدن و پردازش قابل توجهی دارند. به علاوه، روش‌های چاپ فلز گران، پیچیده و حتی خطرناک هستند، بنابراین استفاده از آن‌ها در کاربردهای گسترده محدود است [۱۲، ۱۳]. همچنین انتخاب مواد، وجود ناهمسان‌گردی، تخلخل، تنش‌های داخلی و سایر موارد نیز چالش‌های موجود بر سر راه ساخت افزایشی فلزات هستند [۱۴، ۱۵]. به علاوه، انتظار می‌رود تقاضای جهانی انرژی بین سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۵۰ نزدیک به ۵۰ درصد رشد کند [۱۶]؛ بنابراین نیاز است تا روش‌های جدیدی برای چاپ فلزات بررسی شوند؛ یکی از روش‌های جدید برای چاپ فلزات، ساخت افزایشی الکتروشیمیایی است.

ساخت افزایشی الکتروشیمیایی<sup>۸</sup> شکل نسبتاً جدیدی از ساخت افزایشی است که لایه‌هایی با ضخامت بسیار پایینی را بر روی سطح یک بستر رسانا از طریق ته‌نشین نمودن یون‌ها ایجاد می‌کند [۱۷، ۱۸] و روشی امیدوارکننده برای دستیابی به خواص مکانیکی و الکتریکی عالی با وضوح بسیار بالا است [۱۴، ۱۷]. ساخت افزایشی الکتروشیمیایی اصول رسوب الکتروشیمیایی موضعی را با روش ساخت لایه به لایه ساخت افزایشی ترکیب می‌کند تا قطعات را مستقیماً از مدل‌های طراحی به کمک رایانه ایجاد کند [۱۹]. این روش ماهیت الکتروشیمیایی دارد و می‌توان خواص مواد ته‌نشین شده را با توجه به شرایط تجربی تغییر داد. مزیت این فرایند این است که طیف گسترده‌ای از مواد و آلیاژها را می‌توان در شرایط محیطی بدون آسیب حرارتی و مهم‌تر از آن با هزینه کم رسوب داد؛ زیرا این کار به لیزر گران‌قیمت یا محیط‌های گاز بی‌اثر نیاز ندارد. همچنین این روش می‌تواند از طریق معکوس کردن پتانسیل، هم افزایشی و هم کاهشی باشد و امکان بازیافت اجزا از طریق انحلال الکتروشیمیایی را فراهم کند. در سال‌های آینده، ساختارهای ریزمقیاس چاپ شده با استفاده از روش ساخت افزایشی الکتروشیمیایی، کاربردهایی مانند حسگرهای انعطاف‌پذیر، نمایشگرها و سلول‌های خورشیدی خواهند داشت [۲۰]. این تکنیک برای کاربردهای مختلف در صنایع مختلف مانند بخش بیومدیکال برای میکرو ایمپلنت‌های سفارشی، ساخت چرخ‌دنده‌های میکرو، میکرو موتورها و قطعات الکترونیکی، نویدبخش است [۱۸]. با این حال، یکی از محدودیت‌های اصلی این فناوری سرعت است [۲۱].

چن و همکاران [۲۱] طرح جدیدی از چاپگر سه‌بعدی الکتروشیمیایی ارزان‌قیمت را ارائه دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که سازه‌های مسی چاپ شده دارای طبیعت چند بلوری هستند و با کاهش اندازه دانه با افزایش پتانسیل و در نتیجه سختی و یکرز و مقاومت الکترونیکی بالاتر می‌رود. لیو و همکاران [۲۲] با استفاده از یک نازل جدید توانستند فلزات مس و نیکل را بر روی صفحه برنجی چاپ کنند. این نازل جدید به دلیل طراحی ویژه خود، فشار داخل سرنگ را متعادل نموده و مانع از نشت الکترولیت شد. چن و همکاران [۲۳] با استفاده از یک چاپگر سه‌بعدی الکتروشیمیایی، نوارهای دوفلزی از مس و نیکل را با چاپ چهاربعدی تولید کردند.

<sup>1</sup> Additive Manufacturing (AM)

<sup>2</sup> Powder Bed Fusion

<sup>3</sup> Direct Energy Deposition

<sup>4</sup> Jet Binder

<sup>5</sup> Object Manufacturing

<sup>6</sup> Cold Spraying

<sup>7</sup> Friction Stir Welding

<sup>8</sup> Electrochemical Additive Manufacturing (ECAM)

آن‌ها متغیرهای طراحی که شامل ضخامت لایه و آرایش هندسی لایه‌های مختلف بود را مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از روش ساخت افزایشی الکتروشیمیایی امکان ساخت سازه‌های چهاربعدی کم‌هزینه و با دمای بالا مانند سازه‌ها و حسگرهای هوشمندتر را فراهم می‌کند. کاماراج و همکاران [۱۴] مهاجرت گونه‌های یونی را در طول رسوب در ساخت افزایشی میکرو الکتروشیمیایی شبیه‌سازی نمود و ویژگی‌های انتشار با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی برای درک تأثیر پارامترهای فرایند یعنی اندازه ابزار، شکاف بین الکتروود و ولتاژ مورد مطالعه قرار گرفت. این مطالعه نشان داد که یک شکاف بهینه وجود دارد که باید برای هر اندازه ابزار حفظ شود تا از حداکثر محلی‌سازی رسوب و مهاجرت سریع‌تر یون اطمینان حاصل شود. کیم و همکاران [۲۴] به مطالعه پارامترهای دمای محلول، فشار نازل و فاصله نازل تا بستر پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که فشار موجود در نازل نیز بر نرخ رشد رسوبات تأثیرگذار است. رن و همکاران [۲۵] با استفاده از فناوری ساخت افزایشی میکرو الکتروشیمیایی محلی مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی سیال<sup>۱</sup>، ریزساختارهای مسی سه‌بعدی با وضوح زیر میکرون و ساختارهای بزرگ (۴۰۰ میکرومتر) چاپ کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که زبری سطح سازه‌های بزرگ افزایش یافته است. کیم و همکاران [۲۴] سازه‌های مسی با اندازه متوسط چاپ کردند. همچنین پارامترهایی مانند دمای الکتروولیت، جریان اعمالی، فشار نازل و فاصله بین الکتروود کار و نازل پارامترها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که جریان اعمال شده به شدت بر نرخ رشد ذخایر مس و همچنین شکل آن‌ها تأثیر می‌گذارد. تحقیقات انجام شده در زمینه ساخت افزایشی الکتروشیمیایی، اغلب منجر به چاپ ساختارهای میکرو مقیاس‌ها و نانومقیاس‌ها شده است و در بیشتر مطالعات انجام شده، از مس و نیکل به‌عنوان ماده اولیه بهره بردند. باتوجه به شکاف موجود در زمینه ساخت کامپوزیت در این پژوهش‌ها و چاپ ساختارهای مقیاس متوسط (در مقیاس میلی‌متر)، در این پژوهش نمونه‌هایی از کامپوزیت مس - کروم در مقیاس متوسط با استفاده از چاپگر سه‌بعدی الکتروشیمیایی ساخته شد. در این مطالعه، تأثیر ولتاژ بر جریان منتقل شده در الکتروولیت و نحوه رسوب‌گذاری مس و کروم حین چاپ کامپوزیت مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین یکی از چالش‌های موجود در زمینه ساخت افزایشی الکتروشیمیایی، سرعت ساخت نمونه‌ها است؛ بنابراین برای کاهش زمان چاپ نمونه‌ها، از پتانسیل بالا استفاده و اثر پلکانی نیز مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

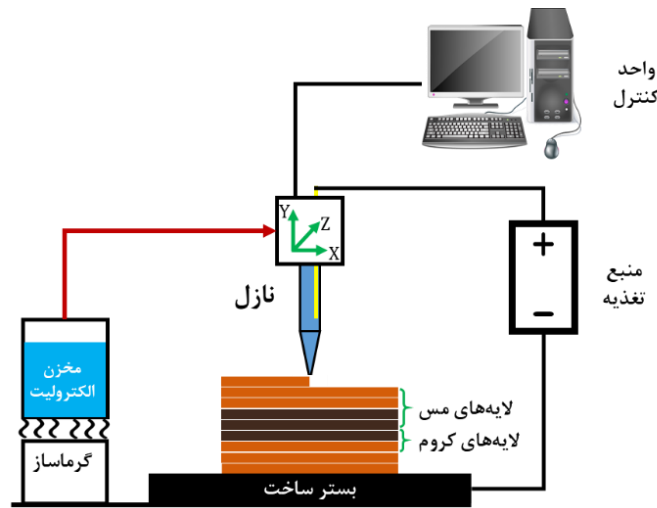
### ۲-۱- چاپگر سه‌بعدی الکتروشیمیایی

چاپگر سه‌بعدی الکتروشیمیایی مورد استفاده در این تحقیق متشکل از یک چاپگر سه‌بعدی مدل‌سازی رسوب ذوب شده است که تغییراتی درون آن ایجاد شده است. ابتدا نازل آن جدا شده و نازلی از جنس پلاستیک به‌جای آن نصب شد. سپس مخزن الکتروولیت، منبع تغذیه، الکتروود فلزی و گرماساز به آن اضافه گردید. در شکل ۱، چاپگر سه‌بعدی الکتروشیمیایی و در شکل ۲ شماتیک چاپ کامپوزیت نشان داده شده است. همچنین فهرست تجهیزات استفاده شده در تحقیق، در جدول ۱ موجود است.



شکل ۱ چاپگر سه‌بعدی الکتروشیمیایی [۲۶]

<sup>1</sup> FluidFM



شکل ۲ شماتیک چاپ کامپوزیت

بر اساس شکل ۲، ابتدا مدل سه‌بعدی طراحی و به چاپگر منتقل می‌شود. سپس الکترولیت به درون مخزن شیشه‌ای منتقل شده و گرماساز روشن می‌شود. زمانی که الکترولیت به دمای مشخص رسید، به درون نازل منتقل می‌شود. درون نازل یک الکتروود فلزی، هم جنس با فلزی که چاپ خواهد شد، قرار داده می‌شود. این الکتروود فلزی سبب انتقال بار مثبت منبع تغذیه می‌شود، همچنین یون‌های مس استخراج شده از الکترولیت را جبران می‌کند. منبع تغذیه شامل دو قطب مثبت و منفی است که قطب مثبت به الکتروود فلزی داخل نازل و قطب منفی به بستر ساخت فلزی متصل می‌گردد؛ بدین ترتیب نازل دارای بار مثبت و بستر ساخت دارای بار منفی می‌شود. سپس منبع تغذیه پتانسیل تعیین شده را اعمال می‌کند. در نهایت نازل حرکت نموده و لایه‌های فلزی را چاپ می‌نماید.

جدول ۱ تجهیزات مورد استفاده در تحقیق

مشخصات	نام
Keytech Alpha 20 (220×220×300 mm)	چاپگر سه‌بعدی FDM
۷۰ ولت	منبع تغذیه
VT-H-DM	گرماساز (صفحه داغ)
پلاستیک، حجم: ۵۰ میلی‌لیتر	نازل
شیشه	مخزن الکترولیت
قطر = ۲ میلی‌متر، طول = ۱۲ سانتی‌متر	الکترودهای فلزی (مس)
قطر = ۲ میلی‌متر، طول = ۱۸ سانتی‌متر	الکترودهای فلزی (کروم)

## ۲-۲- چاپ کامپوزیت

برای ساخت کامپوزیت از بستری آلومینیومی استفاده شد که ۱۰ دقیقه با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد پیش‌گرم می‌شود؛ بعد از آن، چاپ آغاز و کامپوزیت‌ها در ۳ ساعت چاپ می‌شوند. همچنین برای مطالعه نحوه رسوب‌گذاری مس و کروم حین چاپ کامپوزیت، زمان ۳ ساعت به ۶ بازه ۳۰ دقیقه‌ای تقسیم و هر ۳۰ دقیقه یکبار بستر ساخت از چاپگر جدا شده و وزن می‌شود. شرایط چاپ نمونه در جدول ۲ به نمایش درآمده است.

باتوجه به شکل ۲، ابتدا لایه‌هایی از مس چاپ می‌شود؛ بنابراین محلول سولفات مس به درون مخزن الکترولیت منتقل و سپس گرماساز دمای الکترولیت مس را به میزان مشخصی افزایش می‌دهد و الکترولیت به داخل نازل منتقل می‌گردد. همچنین داخل نازل الکتروودی از جنس مس قرار می‌گیرد. هنگامی که منبع تغذیه روشن می‌شود، محلول داخل نازل دارای بار مثبت می‌شود و یون مس از محلول جدا می‌گردند. یون مس دارای بار مثبت بوده و به سمت بستر ساخت فلزی که دارای بار منفی است، حرکت نموده و از نازل

خارج و به بستر می‌چسبد. بدین ترتیب با حرکت نازل در راستا مشخص، لایه‌هایی از مس بر روی صفحه ساخت چاپ می‌شود. در مرحله دوم، مخزن محلول و نازل از سولفات مس تخلیه شده و به‌جای آن از محلول اسید کرومیک استفاده می‌شود، همچنین الکترودی از جنس کروم داخل نازل قرار می‌گیرد. سپس یون‌های کروم بر روی لایه‌های مس چاپ می‌شوند. بدین ترتیب با تغییر الکترولیت و الکترودی می‌توان کامپوزیت مس و کروم را چاپ نمود.

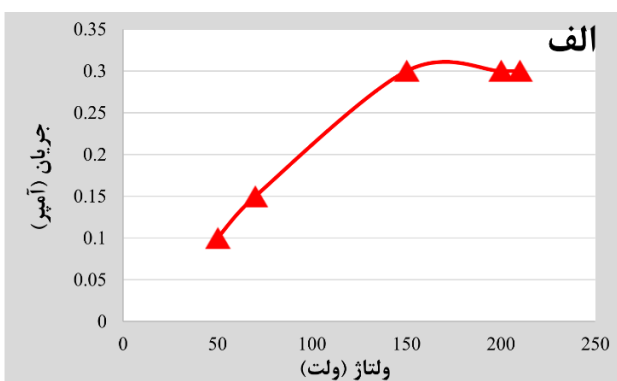
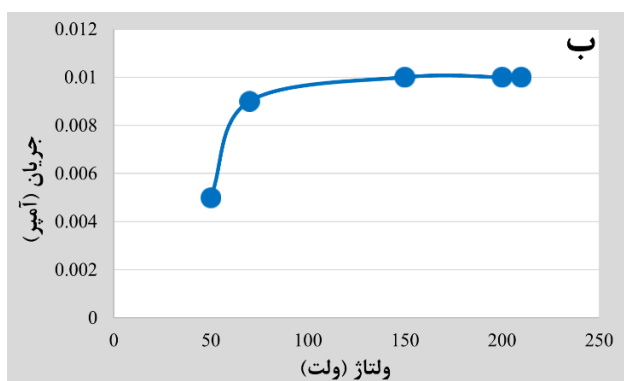
جدول ۲ شرایط چاپ کامپوزیت

شرایط	پارامترها
180 min	زمان چاپ نمونه‌ها
87 °C	دمای اولیه الکترولیت
70 v	پتانسیل
100 °C	دمای بستر ساخت
3 mm	فاصله نازل تا بستر ساخت
$1 \frac{mm}{s}$	سرعت چاپ
0.1 mm	ضخامت لایه
0.9 mm	قطر نازل
Grid	الگو چاپ
20 gr CuSo <sub>4</sub> +50 ml water	الکترولیت‌ها
20 gr H <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub> + 50 ml water	

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- تغییرات شدت جریان نسبت به ولتاژ

تغییرات شدت جریان نسبت به تغییرات ولتاژ در دمای ۸۷ درجه سانتی‌گراد برای سولفات مس و اسید کرومیک در شکل ۳ نشان داده شده است. برای این آزمون، ولتاژهای موردنظر به ترتیب به الکترولیت‌ها اعمال و نتایج ثبت شد. بدین منظور، ابتدا ۲۰ گرم از سولفات مس و ۲۰ گرم اسید کرومیک در آب با دمای اولیه ۸۷ درجه سانتی‌گراد ترکیب و به نازل منتقل شد. سپس ولتاژهای ۵۰، ۷۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۱۰ ولت به ترتیب به الکترولیت‌ها اعمال شد. همچنین برای رسوب‌گذاری مس در این آزمون از آلومینیوم و برای رسوب‌گذاری کروم از بستر مسی استفاده شد؛ زیرا لایه اکسیدی موجود بر روی آلومینیوم مانع ایجاد پوشش کروم بر روی آن می‌شود. لازم به ذکر است که الکترولیت در پایان اعمال هر یک از ولتاژها، تعویض شد. همچنین اعمال ولتاژها به‌صورت افزایشی نبوده و هر یک به‌طور مجزا به الکترولیت‌ها اعمال شدند. باتوجه‌به شکل ۳-الف، مشخص می‌شود که با افزایش ولتاژ، میزان شدت جریان محلول سولفات مس نیز بیشتر می‌شود؛ اما از ولتاژ ۱۵۰ به بعد، میزان شدت جریان تغییر نمی‌کند. شایان‌ذکر است که با افزایش ولتاژ به بیش از ۱۵۰ ولت، دمای محلول سولفات مس به‌شدت افزایش یافته و عمل تبخیر اتفاق می‌افتد.



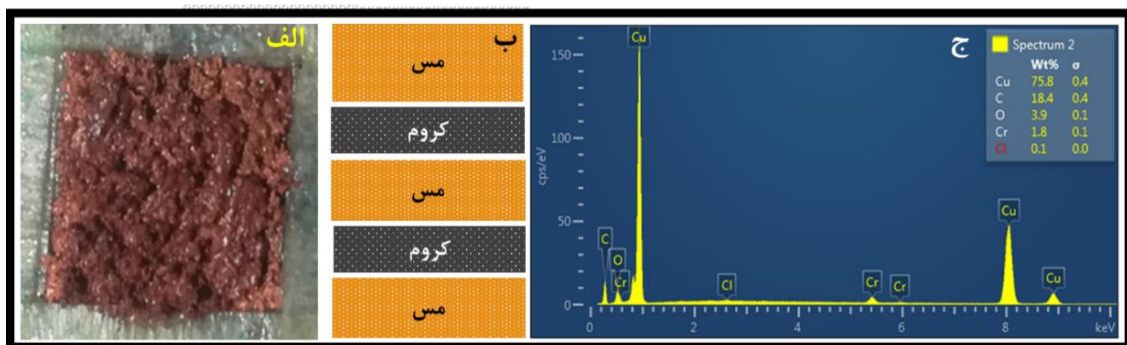
شکل ۳ تغییرات شدت جریان نسبت به تغییرات ولتاژ: الف) مس، ب) کروم

برای کروم شرایط متفاوت بود. مطابق شکل ۳-ب، مشخص شد که شدت جریان منتقل شده در محلول اسید کرومیک نسبت به محلول سولفات مس بسیار کمتر است. شکل ۳-ب، نشان می‌دهد که با افزایش ولتاژ، میزان جریان نیز افزایش می‌یابد. با افزایش ولتاژ از ۵۰ تا ۷۰، میزان شدت جریان به شدت افزایش می‌یابد؛ اما میزان شدت جریان با افزایش ولتاژ (ولتاژهای ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۱۰)، به میزان کمی افزایش می‌یابد. با اعمال ولتاژ بیش از ۱۵۰ ولت، میزان جریان تغییر نمی‌کند و ثابت می‌ماند. لازم به ذکر است که افزایش ولتاژ بیش از ۱۵۰ ولت، سبب افزایش دمای محلول اسید کرومیک شده و تبخیر آغاز می‌شود. همچنین با اعمال ولتاژ بیش از ۲۰۰ ولت، جرقه درون الکترولیت زده می‌شود و غلظت محلول نیز افزایش یافته و به بیرون فوران می‌کند که خود سبب ایجاد خطراتی برای کارور و محیط آزمایشگاه می‌شود. با گذشت دقایقی از اعمال ولتاژ ۲۱۰ ولت به محلول اسید کرومیک، دما به شدت افزایش یافته و محلول اسید کرومیک از رنگ زرشکی به سیاه تغییر رنگ می‌دهد. همچنین دمای محلول به شدت افزایش می‌یابد که در نتیجه نازل پلاستیکی ذوب شده و تغییر شکل می‌دهد. لازم به ذکر است که با گذشت زمان و اعمال پتانسیل‌های ذکر شده، الکترولیت‌ها همگنی خود را حفظ نمودند.

با توجه به شکل ۳، می‌توان مشاهده نمود که بیشترین جریان ثبت شده برای کروم، ۱۰ واحد کمتر از کمینه جریان ثبت شده برای محلول سولفات مس است. پاسخ را می‌توان با مراجعه به خواص فلزات مس و کروم به دست آورد. فلز مس میزان الکترون‌گاتیوی و رسانایی بیشتری نسبت به کروم دارد. همچنین غلظت یون‌های مس و کروم نیز متفاوت است؛ بنابراین شدت جریان ثبت شده برای مس نسبت به کروم بیشتر است.

### ۳-۲- رسوب‌گذاری مس و کروم در کامپوزیت

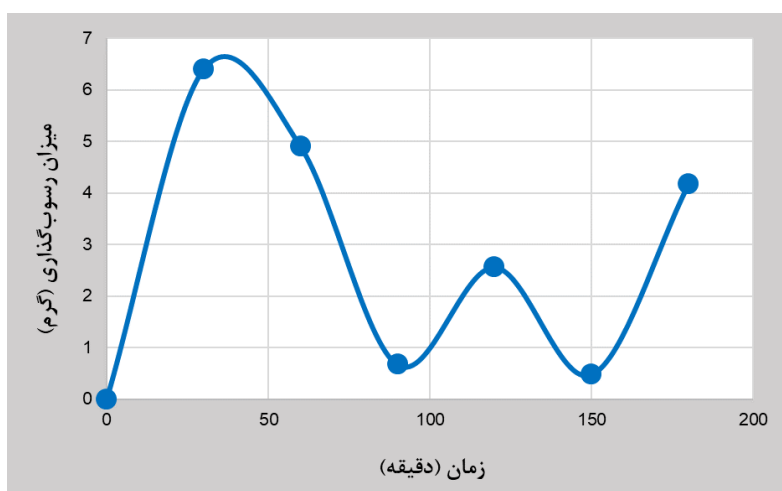
برای این بخش، یک نمونه کامپوزیت ساخته شد. کامپوزیت با تغییر الکترولیت و الکتروذلی و باتوجه به شرایط ذکر شده در جدول ۲ ساخته شد. همچنین ابعاد کامپوزیت چاپ شده  $10 \times 10$  میلی‌متر است. نتایج به دست آمده در شکل ۴ نشان داده شده است. باتوجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که نمونه نهایی در زمان ساخت ۱۸۰ دقیقه، به ارتفاع ۲/۱ میلی‌متر می‌رسد. استفاده از پتانسیل بالا سبب کاهش زمان ساخت نمونه نهایی شد؛ اما دانه‌بندی نمونه درشت‌تر شده است که این عامل خود سبب ایجاد ناهمواری‌ها در سطح نمونه گردید. با این حال می‌توان با کنترل پتانسیل، ناهمواری‌های سطحی ایجاد شده را به راحتی کاهش داد. به علاوه، برای اثبات وجود کروم در کامپوزیت، ابتدا کامپوزیت از وسط شکسته شده و تحت آنالیز EDAX قرار گرفت. باتوجه به شکل ۴-ج مشخص می‌گردد که کروم در این کامپوزیت وجود دارد.



شکل ۴ نمونه چاپ شده: الف) کامپوزیت مس - کروم، ب) چیدمان مس و کروم در کامپوزیت، ج) آنالیز EDAX

در شکل ۵ میزان رسوب‌گذاری مس و کروم حین ساخت کامپوزیت نشان داده شده است. نمودار رسوب‌گذاری کامپوزیت نشان می‌دهد که در بازه زمانی اول (۰ تا ۳۰ دقیقه)، میزان رسوب‌گذاری روندی افزایشی دارد؛ زیرا دمای محلول سولفات مس بالا است. بعد از کاهش دمای الکترولیت در بازه زمانی دوم، این میزان کاهش می‌شود. با چاپ لایه‌های کروم در بازه زمانی سوم (۶۰ تا ۹۰ دقیقه)، میزان رسوب‌گذاری به شدت کاهش می‌یابد؛ زیرا کروم هدایت الکتریکی کمتری نسبت به مس دارد و جریان ثبت شده محلول اسید کرومیک کمتر از جریان ثبت شده در محلول سولفات مس است. اما با چاپ مجدد مس بر روی کروم در بازه زمانی چهارم (۹۰ تا ۱۲۰

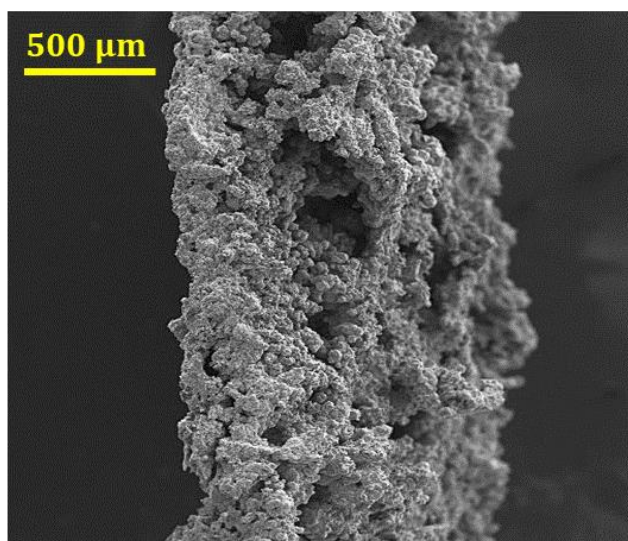
دقیقه، میزان رسوب‌گذاری دوباره افزایش می‌شود. با چاپ مجدد کروم بر روی لایه‌های مسی در بازه زمانی پنجم، میزان رسوب‌گذاری دوباره روندی کاهشی را نشان می‌دهد؛ اما با چاپ مس در آخرین بازه زمانی، نمودار روندی افزایشی را ثبت می‌کند.



شکل ۵ رسوب‌گذاری مس - کروم در حین چاپ نمونه‌ها

### ۳-۳- اثر پلکانی

در ساخت افزایشی، لایه‌ها بر روی یکدیگر قرار می‌گیرند تا یک قطعه ساخته شود. در روش‌های متداولی که برای ساخت قطعاتی فلزی استفاده می‌شوند، اثر پلکانی وجود دارد. همچنین این اثر می‌تواند بر خواص مکانیکی قطعه ساخته شده نیز تأثیر بگذارد [۱]. به همین دلیل از پهنای کامپوزیت تصویر SEM تهیه و مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۶ نمای عرضی کامپوزیت چاپ شده نشان داده شده است. با توجه به تصویر SEM، می‌توان نتیجه گرفت که اثر پلکانی در این کامپوزیت مشاهده نمی‌شود؛ زیرا رسوبات الکتروشیمیایی حاصل از ته‌نشین شدن یون‌های مس و کروم از نظر ابعاد و اندازه با یکدیگر تفاوت دارند؛ زیرا استفاده از پتانسیل بالا سبب افزایش اندازه دانه‌ها می‌گردد [۲۱]. این مسئله خود سبب ایجاد فضاهای خالی بین یون‌ها می‌شود. با تغییر الکترولیت و چاپ لایه‌های بعدی، گپ‌های ایجاد شده به دلیل اختلاف اندازه دانه‌ها توسط یون‌های بعدی پر شده و حالت پلکانی نمونه نهایی را دچار تغییر می‌کند. عدم وجود این اثر می‌تواند روش ساخت افزایشی الکتروشیمیایی را به روشی کارآمد برای چاپ فلزات تبدیل نماید؛ زیرا در نمونه‌ها چاپ شده با این روش مشکلاتی نظیر ناهمسان‌گردی وجود نخواهد داشت.



شکل ۶ نمای عرضی کامپوزیت مس - کروم

پژوهش‌های پیشین [۲۱، ۲۳، ۲۶] نشان داد که با افزایش پتانسیل، دانه‌بندی رسوبات افزایش یافته که این امر سبب افزایش ضخامت لایه خواهد شد. به علاوه، ماهیت الکتروشیمیایی عناصر نیز به دلیل خواص رسانایی، غلظت مولی و اختلاف الکترونگاتیوی با یکدیگر متفاوت هستند؛ بنابراین می‌توان با توجه به فلز مورد استفاده، پتانسیل بهینه را یافته و ضخامت لایه، دانه‌بندی کیفیت سطح و سایر موارد را واپایش کرد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش کامپوزیتی از مس و کروم با استفاده از چاپگر سه‌بعدی الکتروشیمیایی ساخته شد. همچنین نحوه رسوب‌گذاری مس و کروم حین چاپ کامپوزیت، شدت جریان منتقل شده به محلول سولفات مس و اسید کرومیک و اثر پلکانی مورد مطالعه قرار گرفت. در پایان می‌توان نتیجه گرفت با چاپ کروم در کامپوزیت، میزان رسوب‌گذاری به طور چشمگیری کاهش می‌یابد؛ اما با چاپ لایه‌های مس، این میزان دوباره روندی افزایشی را نشان می‌دهد. همچنین رسوب‌گذاری مس نیز با کاهش دمای الکترولیت روندی کاهشی نشان می‌دهد؛ زیرا دمای الکترولیت کاهش می‌یابد. ولتاژ اعمال شده با محلول‌های شیمیایی نشان داد که افزایش ولتاژ تا میزان مشخصی سبب افزایش شدت جریان منتقل شده به محلول‌ها می‌شود و با افزایش بیش از حد ولتاژ، میزان شدت جریان تغییری نمی‌کند و ثابت می‌ماند؛ اما دمای محلول‌های سولفات مس و اسید کرومیک به شدت افزایش یافته و خطراتی را برای کارکنان آزمایشگاه به همراه دارد. مطالعه تصویر SEM تهیه شده از پهنای کامپوزیت مشخص نمود که اثر پلکانی در آن وجود ندارد؛ زیرا اثری از لایه‌های چاپ شده مشاهده نمی‌شود.

#### References

- [1] Saleh Alghamdi S, John S, Roy Choudhury N, Dutta NK. Additive manufacturing of polymer materials: Progress, promise and challenges. *Polymers*. 2021 Feb 28;13(5):753. doi: 10.3390/polym13050753
- [2] Safi Jahanshahi A. Experimental investigation of the compressive strength of polylactic acid/continuous glass fiber composite material produced with an extrusion-based 3D printer using the simultaneous impregnation system of fibers and polymer. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Mar 20;11(1):51-60. doi: 10.22034/ijme.2024.442326.1929
- [3] Bhatia A, Sehgal AK. Additive manufacturing materials, methods and applications: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2023 Jan 1;81:1060-7. doi: 10.1016/j.matpr.2021.04.379
- [4] Hajialimohammadi A, Musavi Rad SM, Ghare Bagheri H. Experimental Investigation on the Effect of Using CrN and DLC Coatings on the Wear Properties of The Internal Combustion Engine Piston Ring. *Karafan Journal*. 2023 May 22;20(1):263-78. doi: 10.48301/kssa.2023.368675.2339 [In Persian]
- [5] Kolagar AM. Additive manufacturing of nickel-based superalloy gas turbine components. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022 May 22;9(3):38-45. doi: 10.22034/ijme.2022.157668 [In Persian]
- [6] Bhavar V, Kattire P, Patil V, Khot S, Gujar K, Singh R. A review on powder bed fusion technology of metal additive manufacturing. *Additive manufacturing handbook*. 2017 May 19:251-3.
- [7] Dass A, Moridi A. State of the art in directed energy deposition: From additive manufacturing to materials design. *Coatings*. 2019 Jun 29;9(7):418. doi: 10.3390/coatings9070418
- [8] Upadhyay M, Sivarupan T, El Mansori M. 3D printing for rapid sand casting—A review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017 Oct 1;29:211-20. doi: 10.1016/j.jmapro.2017.07.017
- [9] Wang Q, Sun J, Yao Q, Ji C, Liu J, Zhu Q. 3D printing with cellulose materials. *Cellulose*. 2018 Aug;25:4275-301. doi: 10.1007/s10570-018-1888-y
- [10] Duda T, Raghavan LV. 3D metal printing technology. *IFAC-PapersOnLine*. 2016 Jan 1;49(29):103-10. doi: 10.1016/j.ifacol.2016.11.111
- [11] Guo N, Leu MC. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of mechanical engineering*. 2013 Sep;8:215-43. doi: 10.1007/s11465-013-0248-8
- [12] Seol SK, Kim D, Lee S, Kim JH, Chang WS, Kim JT. Electrodeposition-based 3D Printing of Metallic Microarchitectures with Controlled Internal Structures. *Small (Weinheim an der Bergstrasse, Germany)*. 2015 Apr 27;11(32):3896-902. doi: 10.1002/sml.201500177
- [13] Mahmoudzadeh Andwari A, Pesyridis A, Esfahanian V, Salavati-Zadeh A, Hajialimohammadi A. Modelling and evaluation of waste heat recovery systems in the case of a heavy-duty diesel engine. *Energies*. 2019 Apr 11;12(7):1397. doi: 10.3390/coatings9070418

- [14] Kamaraj A, Lewis S, Sundaram M. Numerical study of localized electrochemical deposition for micro electrochemical additive manufacturing. *Procedia CIRP*. 2016 Jan 1;42:788-92. doi: [10.1016/j.procir.2016.02.320](https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.320)
- [15] Tyagi R, Kumar R, Ranjan N, editors. *Tribological Aspects of Additive Manufacturing*. CRC Press; 2024 Apr 25.
- [16] None N. *Annual Energy Outlook 2016 With Projections to 2040*. US Department of Energy (USDOE), Washington DC (United States). Energy Information Administration; 2016 Aug 1.
- [17] Mohammed M, Jones BA, Liarou E, Wilson P. Localised polymerisation of acrylamide using single-barrel scanning electrochemical cell microscopy. *Chemical Communications*. 2023;59(73):10992-5. doi: [10.1039/D3CC03582D](https://doi.org/10.1039/D3CC03582D)
- [18] Sundaram MM, Kamaraj AB, Kumar VS. Mask-less electrochemical additive manufacturing: a feasibility study. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2015 Apr 1;137(2):021006. doi: [10.1115/1.4029022](https://doi.org/10.1115/1.4029022)
- [19] Liu X, Jervis R, Maher RC, Villar-Garcia I, Naylor-Marlow M, Shearing PR, Ouyang M, Cohen LF, Brandon NP, Wu B. 3D Printed Structural Pseudocapacitors-a Multi-Scale X-Ray Tomography Study. In *Electrochemical Society Meeting Abstracts 230 2016 Sep 1 (No. 7, pp. 943-943)*. The Electrochemical Society, Inc.. doi: [10.1149/MA2016-02/7/943](https://doi.org/10.1149/MA2016-02/7/943)
- [20] Lee S, Kim JH, Wajahat M, Jeong H, Chang WS, Cho SH, Kim JT, Seol SK. Three-dimensional printing of silver microarchitectures using Newtonian nanoparticle inks. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2017 Jun 7;9(22):18918-24. doi: [10.1021/acsami.7b02581](https://doi.org/10.1021/acsami.7b02581)
- [21] Chen X, Liu X, Childs P, Brandon N, Wu B. A low cost desktop electrochemical metal 3D printer. *Advanced Materials Technologies*. 2017 Oct;2(10):1700148. doi: [10.1002/admt.201700148](https://doi.org/10.1002/admt.201700148)
- [22] Liu P, Guo Y, Wu Y, Chen J, Yang Y. A low-cost electrochemical metal 3d printer based on a microfluidic system for printing mesoscale objects. *Crystals*. 2020 Mar 28;10(4):257. doi: [10.3390/cryst10040257](https://doi.org/10.3390/cryst10040257)
- [23] Chen X, Liu X, Ouyang M, Chen J, Taiwo O, Xia Y, Childs PR, Brandon NP, Wu B. Multi-metal 4D printing with a desktop electrochemical 3D printer. *Scientific reports*. 2019 Mar 8;9(1):3973. doi: [10.1038/s41598-019-40774-5](https://doi.org/10.1038/s41598-019-40774-5)
- [24] Kim YK, Kang D, Kim HR, Kim SB, Yoo B. The characteristics of selective 3D metal additive process using electrochemical deposition and nozzle fluid dynamics. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2020 Mar 3;6:9. doi: [10.3389/fmech.2020.00009](https://doi.org/10.3389/fmech.2020.00009)
- [25] Ren W, Xu J, Lian Z, Yu P, Yu H. Modeling and experimental study of the localized electrochemical micro additive manufacturing technology based on the fluidFM. *Materials*. 2020 Jun 19;13(12):2783. doi: [10.3390/ma13122783](https://doi.org/10.3390/ma13122783)
- [26] Rad SM, Hajjalimohammadi A, Abedini V. Manufacturing of copper-chromium composite using electrochemical additive manufacturing method: a screening study. *Progress in Additive Manufacturing*. 2024 Jul 14:1-2. doi: [10.1007/s40964-024-00716-8](https://doi.org/10.1007/s40964-024-00716-8)