



اکوبال و همکاران [۲] پوشش‌دهی به روش آبکاری را روی قطعات تولید شده با روش FDM<sup>۱</sup> مورد مطالعه قرار داده و از دو روش مختلف جهت آبکاری مس روی پلیمر ABS<sup>۲</sup> استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد در هر دو روش با گذشت زمان کیفیت آبکاری بهتر و ضخامت پوشش بیشتر می‌گردد. در این مطالعه ضخامت کلی پوشش مس نهایی در محدوده ۱۴۵-۱۴۷ μm گزارش شده است؛ همچنین مقادیر مقاومت سطحی نمونه‌ها قبل و بعد از برخی پیش‌درمان‌ها بسیار متفاوت بود (مثال: نمونه‌ای با پیش‌پوشش کرومیک مقاومت ۳×۱۰<sup>۵</sup> Ω داشت در حالی که در روشی دیگر با اعمال لایه Al-C قبل از مس، مقاومت تا ۰/۰۹ کاهش یافت؛ همچنین با اعمال پوشش آلومینیوم-کربن قبل از لایه مس، احتمال ایجاد ترک در پوشش بیشتر شده اما مقاومت الکتریکی کاهش یافته و رسانایی افزایش می‌یابد.

ابیچ و همکاران [۳] چالش‌های اعمال آبکاری نیکل روی پلیمر ABS را مورد مطالعه قرار داده و به بررسی تاثیر کیفیت سطح، زبری و پارامترهای چاپ (ضخامت لایه و هم‌پوشانی رشته‌های چاپی) بر روی کیفیت پوشش پرداختند. آنان بیان می‌کنند تغییر و اصلاح پارامترهای چاپ موجب افزایش کیفیت سطح و در نتیجه افزایش کیفیت آبکاری می‌شود.

کومار و همکاران [۴] تاثیر آبکاری نیکل بر خواص مکانیکی پلیمر PLA<sup>۳</sup> را مورد مطالعه قرار دادند. یافته‌ها نشان می‌دهد، آبکاری موجب افزایش استحکام نهایی و مدول یانگ می‌شود. در این پژوهش ضخامت‌های لایه آبکاری آزمون‌شده تقریباً ۱۵، ۳۵ و ۵۵ میکرومتر گزارش شده و مدول یانگ و مقاومت نهایی نمونه‌ها به ترتیب با افزایش ضخامت پوشش رشد کردند.

سیمونسان و همکاران [۵] به بررسی تاثیر اعمال پوشش مس بر خواص مکانیکی و رسانایی الکتریکی پلیمر PLA رسانا و غیر رسانا از طریق آبکاری پرداخته‌اند؛ بدین‌گونه که نمونه‌ها در سه زاویه ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به صفحه ساخت، چاپ شده و پوشش بر آنها اعمال گردید. آنان بر این باورند که اعمال پوشش موجب کاهش استحکام کششی تا ۲۰ درصد می‌شود اما رسانایی الکتریکی قطعات به خوبی افزایش می‌یابد.

اسریرام [۶] به بررسی اعمال پوشش مس روی پلیمر PLA چاپ‌شده با تراکم‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد پرداخت. نتایج نشان می‌دهد قطعات آبکاری شده از استحکام نهایی بیشتری برخوردار بوده و همچنین رسانایی آنها بهبود چشمگیری پیدا می‌کند.

آنجل و همکاران [۷] به بررسی اعمال پوشش مس به صورت انتخابی (فقط در نواحی دلخواه از جسم) از طریق آبکاری پرداختند. آنان بیان می‌کنند، در نواحی مورد نظر آبکاری به خوبی انجام شده و مقاومت الکتریکی تا ۵ مرتبه کاهش یافته و در نتیجه رسانایی الکتریکی مطلوبی در نواحی دلخواه ایجاد می‌شود.

خوارز و همکاران [۸] به بررسی پوشش‌های فلزی نشاندار شده بر روی ساختارهای میکروخرپاهای فلزی-پلیمری در مقیاس طولی کوچکتر از طریق کندوپاش مغناطیسی پرداختند. یافته‌ها نشان

می‌دهند خواص فلزی مطلوب از جمله استحکام، رسانایی و فعالیت شیمیایی در ریزشکته‌های فلزی-پلیمری ایجاد شده و کاربرد این میکروخرپاها گسترش می‌یابد.

استرادویو و همکاران [۹] به بررسی ترکیب چاپ سه‌بعدی نمایشگر کریستال مایع<sup>۴</sup> (LCD) و کندوپاش مغناطیسی برای تولید قطعات الکترومغناطیسی باند میلیمتری پرداخته و دو باند موج‌بر مستقیم D و H را تولید نموده و به وسیله کندوپاش، پوشش نازک مس روی سطح داخلی ساختارهای تولید شده ایجاد شد. آنان می‌گویند امکان ساخت دقیق و با کیفیت قطعات فرکانس بالا با این روش ترکیبی وجود دارد.

ژاوو و همکاران [۱۰] روشی ترکیبی برای ساخت سنسور کرنش فیلم ضخیم نقره-پالادیوم دما بالا<sup>۵</sup> را توسعه دادند؛ این فرایند برای بررسی قانون تاثیر کپسوله سازی بر کرنش‌سنج در دمای بالا در اجزای داغ سیستم، مورد مطالعه قرار گرفته است. آنان بر این باورند که با افزایش ضخامت لایه محافظ<sup>۶</sup> (YSZ)، ضریب شکست<sup>۷</sup> (GF) کاهش می‌یابد و با این روش، تهیه<sup>۸</sup> TFSG با پایداری حرارتی بالا و تضعیف کم GF برای کرنش‌سنج در قطعات داغ انجام می‌شود.

ژاوو و همکاران [۱۱] به اعمال لایه محافظ HFO<sub>2</sub> بر روی آشکارساز دمایی مقاومتی لایه ضخیم پلاتینیوم<sup>۹</sup> (RTD Pt) پرداخته‌اند؛ بدین‌گونه که لایه محافظ از طریق کندوپاش مغناطیسی، مترآکم و یکنواخت اعمال شد. آزمایش در ۳۰ ساعت و در دمای ۱۱۰۰ درجه سلسیوس انجام شده و یافته‌ها نشان می‌دهند میانگین نرخ رانش دمایی RTD Pt در مقایسه با RTD Pt محافظت نشده بهبود سه برابری داشته و علاوه بر آن پایداری حرارتی عالی و تکرار پذیری از دمای اتاق تا ۱۱۰۰ درجه را دارد.

آکتیتیز و همکاران [۱۲] به بررسی بهبود معایب مرتبط با پلیمرها و ترکیب مزایای پلیمرها و فلزات از طریق چاپ سه‌بعدی و اصلاح سطح پرداختند؛ بدین‌گونه که آزمایش با ساختارهای PLA و ماده هدف آلومینیوم و تکنیک کندوپاش RF<sup>۱۰</sup> انجام شد. آنها اذعان می‌کنند به دلیل عملیات سطحی اعمال شده زبری سطح بهبود یافته همچنین متالیزاسیون، مقاومت PLA در برابر تجزیه زیستی را افزایش می‌دهد.

مرعشی پور و شیرمردی [۱۳] به بررسی ساخت بسترهای پلاسمونیکی نقره به روش اسپاترینگ به‌منظور بهبود پراکندگی رامان سطحی (SERS) برای شناسایی وی پروتئین پرداخته‌اند. نتایج آنالیز XRD تشکیل ساختار FCC نانوذرات نقره را تأیید کرد و تصاویر FE-SEM نشان داد اندازه ذرات نقره در بازه ۱۱ تا ۸۱ نانومتر قرار دارد. همچنین، قله تشدید پلاسمونی در طول موج حدود ۱۹۳ نانومتر مشاهده شد که بیانگر خاصیت پلاسمونیکی مناسب بستر است. نتایج طیف‌سنجی SERS نشان داد این حسگر قادر به آشکارسازی وی پروتئین در غلظت‌های بسیار پایین تا حدود ۱۰<sup>-۶</sup> مولار بوده و حساسیت بالایی از خود نشان می‌دهد.

<sup>4</sup> Liquid-crystal display

<sup>5</sup> High-Temperature AgPd Thick Film Strain Gauge

<sup>6</sup> yttria-stabilized zirconia

<sup>7</sup> gauge factor

<sup>8</sup> Thick Film Strain Gauge

<sup>9</sup> platinum resistance temperature detector

<sup>10</sup> Radio-Frequency

<sup>1</sup> Fused Deposition Modeling

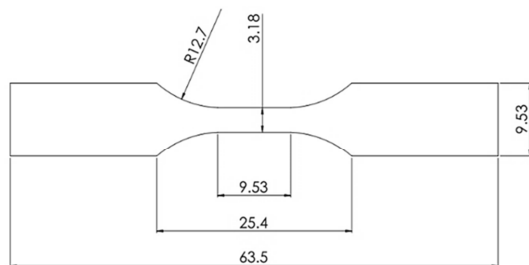
<sup>2</sup> Acrylonitrile butadiene styrene

<sup>3</sup> Poly(lactic acid)

طراحی شد تا پس از بررسی میزان چسبندگی پوشش، تاثیر پوشش بر خواص مکانیکی آن‌ها با استفاده از آزمون کشش تک محوره مورد مطالعه قرار گیرد. این استاندارد شامل نحوه آماده‌سازی نمونه، شرایط آزمون، سرعت اعمال بار و روش محاسبه پارامترهایی مانند استحکام کششی، مدول الاستیسیته و درصد ازدیاد طول تا شکست است. آزمون کشش مطابق این استاندارد امکان مقایسه دقیق رفتار مکانیکی پلیمرها را در شرایط کنترل شده فراهم می‌کند. ASTM D638 به‌طور گسترده در ارزیابی کیفیت و عملکرد مواد پلاستیکی در کاربردهای مهندسی استفاده می‌شود. شکل ۲ تصویر نمونه‌های چاپ شده با مواد مورد آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۱- خواص مکانیکی استاندارد قطعات چاپ شده [۱۷]

Property	PLA	ABS	PETG
Density (g/cm <sup>3</sup> )	۱/۲ - ۱/۲۵	۱/۰۵	۱/۲۶ - ۱/۲۹
Yield strength (MPa)	۳۶/۳ - ۴۶/۵	۳۵ - ۴۵	- ۵۴/۳ ۴۱/۱
Tensile strength (MPa)	۶۰ - ۷۲	۴۰ - ۵۰	۵۰ - ۶۰
Young's modulus (GPa)	۲/۱۳ - ۲/۷۷	۲/۱ - ۲/۴۷	- ۲/۱۶ ۲/۰۱
Poisson's ratio	۰/۳۵ - ۰/۳۸	۰/۳۴ - ۰/۳۷	- ۰/۴۰ ۰/۳۸



شکل ۱- ابعاد نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM D638 TypeV برحسب میلی‌متر

قاسمی و همکاران [۱۴] به بررسی استفاده از روش کندوپاش پلاسمایی مس به‌منظور ایجاد لایه رسانای انعطاف‌پذیر بر سطح فیلم فیبروین ابریشم پرداخته‌اند. نتایج آنالیز ATR-FTIR حضور باندهای مشخصه آمیدی نوع I، II و III را در اعداد موج حدود ۱۶۴۶، ۱۵۳۹ و ۱۲۳۰ cm<sup>-1</sup> نشان داد که بیانگر غالب بودن ساختار صفحات  $\beta$  در فیبروین ابریشم است. تصاویر SEM مورفولوژی گل‌کلمی و توزیع غیریکنواخت ساختارهای سطحی را تأیید کرد. همچنین نتایج اندازه‌گیری‌های جریان-ولتاژ نشان داد نمونه‌هایی با ساختار ریزتر، مقاومت الکتریکی کمتری داشته و عبور جریان در ولتاژهای پایین‌تر در آن‌ها تسهیل می‌شود. این نتایج قابلیت فیبروین ابریشم را به‌عنوان زیرلایه‌ای زیست‌سازگار برای کاربردهای الکترونیکی انعطاف‌پذیر نشان می‌دهد.

امامیان و همکاران [۱۵] به بررسی اثر افزودن سیلیسیم بر رفتار مکانیکی و خوردگی پوشش‌های Ta، TaC و TaSiC تولیدشده به روش کندوپاش مگنترونی پرداخته‌اند. نتایج آنالیز XPS و XRD نشان داد که پوشش TaC دارای حدود ۳/۲۶ درصد اتمی کربن بوده و در پوشش TaSiC علاوه بر ۲/۲۱ درصد اتمی کربن، حدود ۳/۱۸ درصد اتمی سیلیسیم نیز حضور دارد. بررسی تنش پسماند نشان داد که پوشش Ta دارای تنش کششی حدود ۰/۵ گیگاپاسکال بوده، در حالی که با افزودن کربن و سیلیسیم، تنش پسماند در پوشش‌های TaC و TaSiC به تنش فشاری با مقادیر تقریبی ۰/۷ و ۰/۹ گیگاپاسکال تغییر یافته است. همچنین ریزدانه‌گی و افزایش چگالی پوشش‌ها در اثر افزودن سیلیسیم، موجب بهبود مقاومت به خوردگی از طریق کاهش نفوذ محیط خوردنده به ساختار پوشش شده است.

با توجه به پیشینه پژوهش ارائه شده پوشش‌دهی با روش sputtering به صورت مستقیم روی پلیمرهای مختلف قابل استفاده در فرآیند پرینت سه بعدی مورد بررسی قرار نگرفته است. از این رو هدف از این پژوهش بررسی امکان‌پذیری اعمال پوشش با روش sputtering به صورت مستقیم روی پلیمرهای PLA، ABS، PETG<sup>۱</sup> و بررسی چسبندگی پوشش می‌باشد.

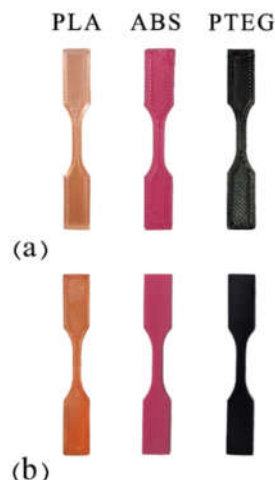
## ۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، از پلیمرهای PLA، ABS، PETG جهت ساخت نمونه‌های چاپ سه بعدی استفاده گردید که به علت کاربرد فراوان و گسترده آنها در صنعت چاپ سه‌بعدی انتخاب شده‌اند. جدول ۱ خواص مکانیکی استاندارد نمونه‌ها را نشان می‌دهد. نمونه‌ها توسط دستگاه چاپ سه‌بعدی keytec m220 pro با تراکم صد درصد، به صورت تخت و با استفاده از الگوی line و با نازل ۰/۲ mm آماده‌سازی شده‌اند. همچنین از ضخامت لایه ۰/۱۲ mm، سرعت چاپ ۸۰ mm/s، دمای بستر ۱۱۰ درجه سلسیوس جهت افزایش دقت و کیفیت ساخت استفاده گردید. دمای نازل برای نمونه‌های PLA، ABS، PETG به ترتیب برابر ۲۰۵، ۲۳۷، ۲۴۰ درجه سلسیوس انتخاب گردید. مطابق شکل ۱ هندسه نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM D638 TypeV [16]

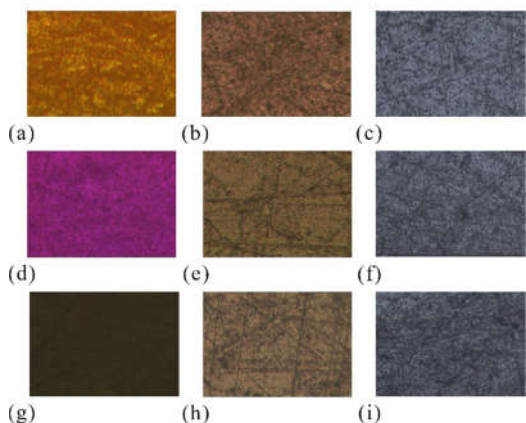
<sup>۱</sup> Percutaneous Transesophageal Gastrostomy



شکل ۳- تصویر ماکروسکوپی نمونه‌های پوشش شده با (a) کندوپاش مس و (b) کندوپاش نقره



شکل ۴- نمونه‌های چاپ سه بعدی شده (a) قبل از پرداخت و (b) بعد از پرداخت



شکل ۵- تصویر تهیه شده با میکروسکوپ نوری (a) نمونه PLA بدون پوشش (b) با پوشش مس (c) با پوشش نقره (d) نمونه ABS بدون پوشش (e) با پوشش مس (f) با پوشش نقره (g) نمونه PETG بدون پوشش (h) با پوشش مس (i) با پوشش نقره

پس از فرایند ساخت، هریک از نمونه‌ها با استفاده از محلول مناسب پرداخت شده تا زبری سطح و آلودگی‌ها حذف و سطحی یکنواخت جهت چسبندگی بهتر پوشش ایجاد گردد. نمونه‌ها با استفاده از سنباده‌های شماره ۱۰۰۰ و ۲۵۰۰ سنباده‌زنی شده و مطابق دستورالعمل‌های استاندارد چاپ سه‌بعدی، نمونه PLA با محلول کلروفرم، نمونه ABS با محلول استون و نمونه PETG با محلول دی‌کلرومتان، پرداخت شدند. این امر جهت کاهش ناهمواری‌ها و زبری سطح، افزایش سطح تماس، آماده سازی و بهبود کیفیت سطح جهت اعمال پوشش انجام گردید. زبری سطح نمونه‌ها (Ra) پیش از پرداخت و پس از آن بطور میانگین به ترتیب  $12 \mu\text{m}$  و  $0.1 \mu\text{m}$  می‌باشد. شکل ۲ تصویر نمونه‌ها را پیش از پرداخت و پس از آن نشان می‌دهد.

فرایند لایه‌نشانی با استفاده از دستگاه کندوپاش مگنترون DST3، با اعمال ولتاژ  $290 \text{ V DC}$ ، جریان  $40 \text{ mA}$ ، مدت زمان  $20$  دقیقه و در حضور گاز خنثی آرگون بر روی نمونه‌ها اعمال شده است. فشار محفظه پیش از شروع فرایند  $10^{-1} \text{ Pa}$  و پس از اعمال گاز آرگون، حین انجام فرایند لایه‌نشانی فشار محفظه  $10^{-1} \times 3/23 \text{ Pa}$  توسط فشارسنج دستگاه گزارش شده است. همچنین فاصله نمونه تا تارگت در این دستگاه  $7 \text{ cm}$  می‌باشد. جهت پوشش نمونه‌ها از دو ماده کاربرد مس و نقره که از نظر خواص الکتریکی، مکانیکی و امکان لایه نشانی مناسب هستند، استفاده گردید تا ضمن امکان‌سنجی اعمال پوشش با استفاده از تکنیک کندوپاش تاثیر نوع ماده پوشش‌شونده در این فرایند نیز بررسی گردد. از هر جنس دو نمونه با پوشش‌های مس و نقره تهیه شده که تصویر نمونه‌های پوشش‌شده در شکل ۳ و تصاویر میکروسکوپ نوری جهت بررسی حضور پوشش در شکل ۴ نمایش داده شده است.

جهت بررسی رسانایی نمونه‌ها از آزمون بیزر<sup>۱</sup> با استفاده از مولتی‌متر انجام گرفت و با توجه به طول نمونه‌ها، فاصله الکترودها از یکدیگر  $5 \text{ cm}$  انتخاب گردید. آزمون بیزر و الکترودها روی نمونه PETG با پوشش نقره در شکل ۵ نمایش داده شده است. پس از آن چسبندگی پوشش با استفاده از آزمون نوارچسب مطابق استاندارد ASTM D3359 [18] مورد بررسی قرار گرفت تا در صورت مقاومت مناسب از آزمون‌های بررسی خواص مکانیکی استفاده گردد. استاندارد ASTM D3359 روش ارزیابی چسبندگی پوشش‌ها به زیرلایه را با استفاده از آزمون برش متقاطع<sup>۲</sup> تشریح می‌کند. در این روش، الگوی مشخصی از برش‌ها روی پوشش ایجاد شده، سپس نوار چسب مخصوص روی موضع چسبانده شده و به صورت ناگهانی جدا می‌شود. سپس میزان جداشدگی یا پوسته‌شدن پوشش بررسی می‌شود. نتایج آزمون بر اساس مقیاس درجه‌بندی استاندارد گزارش می‌گردد. این استاندارد روشی ساده، سریع و متداول برای بررسی کیفیت چسبندگی پوشش‌های رنگ و لایه‌های محافظ به شمار می‌رود. شکل ۶ تصویر نمونه PETG با پوشش نقره را قبل و بعد از آزمون نوار چسب نمایش می‌دهد

<sup>1</sup> Buzzer test

<sup>2</sup> Cross-Cut

ارزیابی نتایج آزمون چسبندگی پوشش‌ها نشان می‌دهد مطابق استاندارد ASTM D3359 درجه چسبندگی پوشش 0B بوده که به معنای جدا شدن حداقل ۶۵ درصد از پوشش است و این موضوع به خوبی در شکل ۶ قابل مشاهده است. در تمامی نمونه‌ها پوشش‌های مس و نقره چسبندگی و استحکام کافی را نداشته و به راحتی در آزمون چسب و یا با تماس یک پارچه نرم از روی نمونه‌ها پاک می‌شوند. عدم چسبندگی مناسب برای هر سه پلیمر مشابه بوده و با توجه به اینکه این امر برای هر دو پوشش مس و نقره مشابه می‌باشد می‌توان بیان کرد که امکان پوشش با چسبندگی مناسب روی قطعات پلیمری چاپ سه‌بعدی با استفاده از تکنیک کندوپاش وجود ندارد. همانطور که بیان شد تغییر ماده پوشش شونده (مس و نقره) نیز تاثیری بر چسبندگی پوشش نداشته و هر دو پوشش به طور مشابهی به راحتی از روی هر سه پلیمر بلند می‌شوند. این مسئله بدین معناست که پوشش‌دهی با روش کندوپاش تاثیری بر خواص مکانیکی نمونه‌ها ندارد زیرا چسبندگی لازم بین پوشش و سطح نمونه ایجاد نمی‌گردد. از این رو نمونه‌های پوشش شده حتی در صورت انجام آزمون کشش خواص جدیدی از خود نشان نخواهند داد. به همین علت علی‌رغم آماده‌سازی نمونه‌ها مطابق استاندارد، از انجام آزمون کشش صرف‌نظر گردید. علت عدم چسبندگی پوشش فلزی بر پلیمر، می‌تواند تفاوت ضریب انبساط حرارتی بین فلز و پلیمر باشد که موجب عدم ایجاد پیوند شیمیایی و مکانیکی مناسب و قدرتمند در فصل مشترک آنها می‌شود [۱۹-۲۱]. همچنین با توجه به اینکه نمونه‌ها تحت عملیات تمیزکاری یونی (Ion Etching) قرار نگرفته‌اند، این موضوع می‌تواند یکی از علت‌های عدم چسبندگی مناسب پوشش‌ها باشد [۲۲، ۲۳].

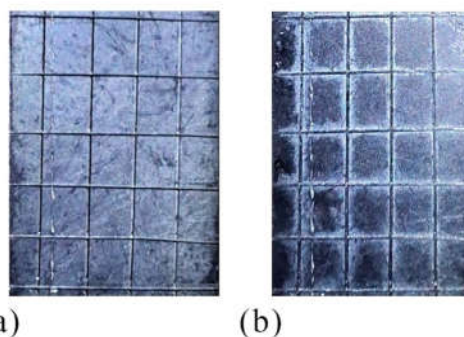
بررسی مقاومت پوشش در برابر خراش و همچنین استفاده از آن در آزمون نوارچسب نشان داد، پوشش هیچ مقاومتی در برابر خراش و تماس جسم خارجی نداشته و به راحتی جدا می‌شود که نتایج آن در شکل ۶(a) قابل مشاهده است.

همانطور که پیش‌تر بیان شد از نظر ضخامت در شرایط آزمایش یکسان پوشش نقره کیفیت و ضخامت بهتری داشته و جلوه بصری زیبایی به قطعات می‌دهد. نتایج آزمون بیزر نشان داد هر سه نمونه PLA، ABS و PETG با دو پوشش مس و نقره مورد تایید بوده و مقاومت الکتریکی ثبت شده برای نمونه‌ها به طور میانگین  $20 \Omega$  بود که رسانایی مناسب آنها را نشان می‌دهد. همچنین این موضوع علاوه بر آزمون رسانایی، نشانگر صحت لایه نشانی بر روی نمونه‌ها نیز می‌باشد. اما این رسانایی پس از تماس با پارچه یا آزمون نوارچسب از بین می‌رود و پایدار نیست.

آنچه مشخص است به علت عدم چسبندگی کافی پوشش، رسانایی الکتریکی ایجاد شده در تماس با سطوح مختلف پایدار و قابل اتکا نمی‌باشد اما استفاده از عملیات ثانویه جهت تثبیت پوشش، استفاده از لایه‌های واسطه یا بکارگیری پوشش ثانویه مانند رزین‌ها پیش از آسیب به پوشش رسانا می‌تواند این قابلیت را کاربردی‌تر نماید که بررسی این امر نیازمند مطالعه در پژوهش‌های آتی می‌باشد. ارزیابی نتایج پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد، تکنیک آبکاری به خوبی می‌تواند پوششی با چسبندگی مناسب ایجاد کند و از نظر رسانایی الکتریکی نیز کاربردی می‌باشد اما در این روش اول باید قطعات با یک پوشش



شکل ۵- تصویر آزمون بیزر روی نمونه PETG با پوشش نقره



شکل ۶- تصویر نمونه PETG با پوشش نقره (a) قبل از آزمون نوارچسب (b) بعد از آزمون نوارچسب

### ۳- نتایج و بحث

بررسی نتایج نشان می‌دهد هر دو ماده مس و نقره روی هر سه پلیمر PLA، ABS و PETG لایه‌نشانی شده‌اند و در شرایط لایه‌نشانی یکسان، ضخامت سنج دستگاه، ضخامت پوشش نقره و مس را به ترتیب ۸۲ nm و ۴۵ nm نشان می‌دهد. لذا در شرایط و زمان پوشش‌دهی یکسان پوشش نقره از ضخامت بیشتری برخوردار است. همچنین نتایج آزمون کوانتومتری نشان می‌دهد که پوشش مس و نقره روی تمام نمونه‌ها اعمال شده‌است. جدول ۲ نتایج آزمون کوانتومتری را نشان می‌دهد.

جدول ۲- نتیجه آزمون کوانتومتری (الف) نقره (ب) مس

ب		الف	
عنصر	درصد	عنصر	درصد
Cu	۹۹/۹۵	Ag	۹۹/۹۵
As	۰/۰۰۲	Bi	۰/۰۰۴
Bi	۰/۰۰۱	Cu	۰/۰۲۵
Fe	۰/۰۰۴	Fe	۰/۰۰۳
Ni	۰/۰۰۲	Pb	۰/۰۰۵
Pb	۰/۰۰۴	Sb	۰/۰۰۲
S	۰/۰۰۴	Other	۰/۰۱۱
Ag	۰/۰۲۸	-	-
Sn	۰/۰۰۲	-	-
Zn	۰/۰۰۳	-	-

- [6] Sreeram S. Modifying Infill Settings to Optimize the Conductivity and Tensile Strength of 3D Printed Parts After Copper Electroplating. 2023.
- [7] Angel K, Tsang HH, Bedair SS, Smith GL, Lazarus N. Selective electroplating of 3D printed parts. *Additive Manufacturing*. 2018;20:164–72.
- [8] Juarez T, Schroer A, Schwaiger R, Hodge AM. Evaluating sputter deposited metal coatings on 3D printed polymer micro-truss structures. *Materials & Design*. 2018;140:442–50.
- [9] Starodubov A, Bakhteev I, Kozhevnikov I, Molchanov S, Amanov T, Galushka V, et al., editors. *Studies on Additive Microfabrication of the Millimeter-band Components by LCD 3D Printing and Magnetron Sputtering*. 2023 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC); 2023: IEEE.
- [10] Zhao F, Chen G, Shao C, Wu W, Fu Y, Shi Y, et al. Combining 3-D Printing and Magnetron Sputtering Technique for Fabricating High-Temperature AgPd Thick Film Strain Gauge. *IEEE Sensors Journal*. 2023;23(23):28541–8.
- [11] Zhao F, Tang L, Qiang D, Shao C, Zhu K, Li Y, et al. 3D-printed Thick-film Platinum Resistance Temperature Detector with a Magnetron Sputtered HfO<sub>2</sub> Protective Layer. *IEEE Sensors Journal*. 2025.
- [12] Aktitiz I, Darcık F, Aydın A, Aydın K. Metallization of 3D Printed Polylactic Acid Polymer Structures via Radio-Frequency Sputtering. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2025;34(10):8610–24.
- [13] Marashipour R, Shirmardi A. Coating Of Silver Nanoparticles by Sputtering Method on Glass Substrates as Surface-Enhanced Raman Spectroscopy (SERS) Biosensor for Detection of Whey Protein. *Advances in Skin, Wound and Tissue Repair*. 2022;19(1):33–43.
- [۱۴] قاسمی م، نریمانی ف، عشق آبادی م. کندوپاش پلاسمایی به عنوان روشی نوین جهت ایجاد لایه رسانای انعطاف‌پذیر فیبروین ابریشم. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای*. ۲۰۲۳؛ ۲۴(۴):۱۳۸-۴۷.
- [15] Hosseini SA, Emamian, Minasadt, Alishahi, Mostafa. The effect of silicon doping on the mechanical and corrosion properties of tantalum carbide coating deposited by magnetron sputtering technique. *Advanced Processes in Materials Engineering*. 2022;16(4):79–93.
- [16] International A. ASTM D638-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics: ASTM International; 2015.
- [17] Total M. Total Materia – The World’s Most Comprehensive Materials Database 2026 [updated 2026/02/23. Available from: <https://www.totalmateria.com>.
- [18] Tape S. Standard test methods for measuring adhesion by tape test I. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International. 2012.
- [19] Melentiev R, Yudhanto A, Tao R, Vuchkov T, Lubineau G. Metallization of polymers and composites: State-of-the-art approaches. *Materials & design*. 2022;221:110958.
- [20] Wei C, Chen C-H. The effect of thermal and plastic mismatch on stress distribution in diamond like carbon film under different interlayer/substrate system. *Diamond and related materials*. 2008;17(7-10):1534–40.
- [21] Jen S-H, George SM, McLean RS, Carcia PF. Alucone interlayers to minimize stress caused by thermal expansion mismatch between Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films and Teflon substrates. *ACS applied materials & interfaces*. 2013;5(3):1165–73.
- [22] Panjan P, Drmovšek A, Čekada M, Panjan M. Contamination of Substrate-Coating Interface Caused by Ion Etching. *Coatings*. 2022;12(6):846.

گرافیتی رسانا پوشش شده و سپس پوشش اصلی اعمال گردد که نیاز به تمهیدات مناسب دارد [۲۴، ۲۵]. همچنین یکی دیگر از روش‌های اعمال پوشش تکنیک رسوب گذاری شیمیایی<sup>۱</sup> است. این تکنیک مانند روش آبرکاری به الکتروود و منبع تغذیه نیاز نداشته و پوشش با قراردادن نمونه‌ها در محلول‌های شیمیایی انجام می‌شود. با استفاده از این تکنیک چسبندگی مناسب و رسانایی الکتریکی قابل قبول بدست می‌آید [۲۶].

#### ۴- نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش امکان‌سنجی پوشش مستقیم به روش کندوپاش روی قطعات پلیمری ساخته شده به روش چاپ سه‌بعدی بوده و در این راستا سه ماده مختلف PLA، ABS و PETG با استفاده از دو پوشش مس و نقره پوشش گردید. نتایج نشان داد در شرایط یکسان روش کندوپاش می‌تواند پوشش نقره با ضخامت بیشتری نسبت به پوشش مس ایجاد کند که این امر سبب ایجاد ظاهر و کیفیت سطح بهتری در نمونه‌ها می‌گردد. بررسی نتایج رسانایی الکتریکی و چسبندگی پوشش نشان داد اگرچه تمامی نمونه‌ها با هر دو پوشش مس و نقره امکان انتقال جریان الکتریکی را دارند اما پوشش‌ها با کوچکترین تماس از روی سطوح پاک شده و چسبندگی مناسبی ندارد. بنابراین تکنیک کندوپاش برای اعمال پوشش مستقیم روی پلیمرها مناسب نبوده و نیاز به لایه‌های میانی یا فرایندهای ثانویه دارد که این امر نیازمند مطالعات بیشتر می‌باشد.

#### ۵- سپاسگزاری

بدینوسیله از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز از این پژوهش در قالب پژوهانه SCU.EMI1404.73332) تشکر و قدردانی می‌گردد.

#### ۶- مراجع

- [1] Nazari F, Abedi A. Investigating the effect of perforation geometry on the residual stress and mechanical behavior of 3D-printed honeycomb structure. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*. 2025;21(3):729–41.
- [2] Azhar Eqbal MIE, Sood AK, Eqbal MAJME. A comparative study on electroplating of FDM parts. 2017;8(5):930–8.
- [3] Ebbach C, Fischer D, Nickel D. Challenges in electroplating of additive manufactured ABS plastics. *Journal of manufacturing processes*. 2021;68:1378–86.
- [4] TV NK, Kulkarni M, Ravuri M, K E, S K. Effects of electroplating on the mechanical properties of FDM-PLA parts. *i-Manager’s Journal on Future Engineering and Technology*. 2015;10(3):29–37.
- [5] Simonson K, Vyshniakova K, Nawrocki R, El-Shahat A, Newell B, editors. *The Effects of Electroplating on the Mechanical Properties of Additively Manufactured Structures*. Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems; 2023: American Society of Mechanical Engineers.

<sup>1</sup> Chemical Deposition Technique

- [23] Ortiz-Membrado L, García-González S, Orrit-Prat J, Bonet R, Caro J, de Ara JF, et al. Improved adhesion of cathodic arc PVD AlCrSiN coating on ion-implanted WC-Co substrates. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2023;113:106187.
- [24] Gopal L, Sudarshan T. *Electroplating of 3D printed polymers*. SAGE Publications Sage UK: London, England; 2025. p. 631–7.
- [25] Kumar R, Kumar S. Literature Review: Electroplating of FDM-Printed ABS for Biomedical Applications. *Biomaterials and Additive Manufacturing*. 2025:69–80.
- [26] Equbal A, Sood AK. Metallization on FDM parts using the chemical deposition technique. *Coatings*. 2014;4(3):574–86.