

# بررسی تاثیر جنس کاتد بر مورفولوژی پودر ریزدانه مس سنتز شده به روش الکترولیز پالسی

سید رسول خیام نکوئی<sup>۱\*</sup>، فرشته رشچی<sup>۲</sup> و نصراله ناصری جدا<sup>۱</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران،

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

\*r.nekouei@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۸/۰۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۱۳)

## چکیده

یکی از روش‌های تولید پودر مس با خلوص بسیار بالا، رسوب‌دهی شیمیایی پالسی (یا الکتروپالسی) است. بررسی مورفولوژی پودر و اندازه ذرات پودر مس هدف این تحقیق بوده است. در تولید این پودر، پارامترهای زیادی موثر هستند، یکی از این عوامل جنس کاتدی است که پودر بر روی آن می‌نشیند. بنابراین زیرلایه ای از جنس‌های مختلف به عنوان کاتد انتخاب شدند که عبارتند از: مس، آلومینیم، سرب، فولاد زنگ‌نزن، تیتانیم و طلا. پودرهای حاصل با روش‌های پراش اشعه ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف‌سنجی تفرق انرژی (EDS) مشخصه‌یابی شدند. از نقطه نظر کاهش اندازه دانه و راندمان جریان، نتایج نشان داد که طلا بهترین کاتد برای سنتز پودر (ایجاد ریزدانه ترین پودر) و آلومینیم بدترین کاتد می‌باشد.

## کلمات کلیدی:

پودر مس، الکتروپالسی، کاتد

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر سنتز پودرهای ریزدانه (کوچکتر از ۱۰ میکرون) توجهات زیادی را به خود جلب کرده است. پودر ریزدانه مس به دلیل خواص برجسته فیزیکی و شیمیایی، به طور گسترده در روانکارهای روغنی، خمیرهای هدایت الکتریکی، پزشکی، فیلترهای بیولوژیکی و دیگر مقاصد مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱-۲]. پودرهای ریزدانه مس به روش‌های مختلفی از جمله اتمیزه کردن، احیای اکسید مس، رسوب شیمیایی و الکتروشیمیایی تولید می‌شوند. از بین این روش‌ها، پودر تولید شده به روش الکتروشیمیایی دارای بالاترین خلوص، استحکام خام مناسب و میزان اکسیژن کمتری است [۱].

بسیاری از محققین به بررسی تولید پودر مس از محلول‌های اسیدی سولفاتی به روش‌های گالوانواستاتیکی یا پتانسیواستاتیکی پرداخته‌اند [۱-۶]. اغلب آنها به بررسی مورفولوژی پودر حاصل

در سال‌های اخیر سنتز پودرهای ریزدانه (کوچکتر از ۱۰ میکرون) توجهات زیادی را به خود جلب کرده است. پودر ریزدانه مس به دلیل خواص برجسته فیزیکی و شیمیایی، به طور گسترده در روانکارهای روغنی، خمیرهای هدایت الکتریکی، پزشکی، فیلترهای بیولوژیکی و دیگر مقاصد مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱-۲]. پودرهای ریزدانه مس به روش‌های مختلفی از جمله اتمیزه کردن، احیای اکسید مس، رسوب شیمیایی و الکتروشیمیایی تولید می‌شوند. از بین این روش‌ها، پودر تولید شده به روش الکتروشیمیایی دارای بالاترین خلوص، استحکام

رایج ترین کاتد مورد مصرف، مس است [۱۰]. هاس و همکارانش [۱۱] به سنتز نانوپودر مس به روش سونوشیمیایی بر روی کاتد طلا پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که مورفولوژی ذره تشکیل شده به جنس زیرلایه هم بستگی دارد. آنها به خوبی توانستند بر روی زیرلایه طلا، نانو پودر تولید کنند. کو و همکارانش [۱۲] نیز به سنتز نانوپودر طلا با مورفولوژی هرمی بر روی زیرلایه طلا پرداختند. هاس و همکارانش [۱۳] در تحقیقی دیگر به سنتز پودر مس بر روی کاتد تیتانیومی پرداختند. در تحقیق آنها از پراب دستگاه اولتراسونیک به عنوان کاتد استفاده شد. پرمصرف ترین کاتد صنعتی جهت تولید پودر مس، سرب است [۷]. ژو و همکارانش [۱۴] نیز از کاتد سربی استفاده کردند و به بررسی اثر افزودنی ها در سنتز پودر مس پرداختند. چولوسکایا و همکارانش [۱۵-۱۶] و تساوکا و همکارانش [۸] نانوپودر مس را بر روی کاتد فولاد زنگ نزن تولید کردند. کاتد مورد استفاده دیگر، پلاتین است [۱۷-۱۹]. واکر و همکارانش [۱۰] به تولید و بررسی مورفولوژی پودر مس در سلول حمام دولایه پرداختند. جنس کاتد از جیوه بود. اوویاس [۱۹] در تحقیقات خود به سنتز پودر مس بر روی آلومینیم پرداخت. لوکومسکا و همکارانش [۲۰] پودر ریزدانه مس را بر روی کاتدهای بسیار ریز از جنس طلا، پلاتین و فولاد زنگ نزن تولید کردند.

نکته ای که در اکثر تحقیقات بالا بارز است، این است که اغلب آنها به مطالعه تاثیر جنس کاتد بر مورفولوژی و خواص پودر پرداخته اند. اغلب آنها از همان ابتدای تحقیق یک جنس مشخص از کاتد را انتخاب کرده و تا انتهای تحقیق از همان جنس استفاده کرده اند. از این رو فقط به ذکر جنس کاتد مورد استفاده آنها بسنده شده است، زیرا که نتیجه ای در مورد مقایسه جنس کاتد در کار آنها موجود نبوده است.

در این پژوهش، پارامتر جنس کاتد به عنوان متغیر انتخاب شد و بقیه پارامترها ثابت نگه داشته شد. شش فلز به عنوان کاتد انتخاب شدند که عبارت بودند از: مس، آلومینیم، سرب، تیتانیوم، فولاد و طلا. تمام آزمایش ها به روش گالوانواستاتیکی انجام شد

در اضافه ولتاژهای بیشتر و کمتر از دانسیته جریان حدی پرداخته اند. بر اساس نتایج بدست آمده، پارامترهای زیادی بر روی مورفولوژی و خواص فیزیکی و شیمیایی پودر تاثیر دارند، که از جمله آنها می توان اضافه ولتاژ، میزان هیدروژن آزاد شده، دانسیته جریان، غلظت یون مس، غلظت اسید، دما، فاصله و جنس الکترودها و سرعت حرکت الکترولیت را نام برد. با توجه به این پارامترها، مورفولوژی پودر حاصل می تواند به صورت دانه ای، دندریتی و گل کلمی باشد [۳-۶]. برای تولید پودر مس، پارامترها باید به گونه ای ترکیب شوند که چسبندگی بر روی الکترود نداشته باشند و به راحتی از روی کاتد جدا شوند، از طرفی راندمان کاتد باید به گونه ای باشد که از لحاظ اقتصادی به صرفه باشد.

نوع کاتد در پوشش دهی به روش الکترولیز بسیار تعیین کننده و مهم است، زیرا چسبندگی پوشش به زیرلایه به جنس کاتد بستگی دارد. اما در تولید پودر باید پارامترها به گونه ای انتخاب شوند که چسبندگی به حداقل برسد و پودر به راحتی جدا شود. پارامترهای مختلفی در این مورد دخیل هستند. غلظت یون فلز کم در محلول الکترولیت، دانسیته جریان بالا، غلظت اسید بالا و جنس کاتد از جمله این عوامل هستند [۷]. علاوه بر آنچه گفته شد، خاصیت تبادل الکترون کاتد هم می تواند بر روی نرخ رسوب دهی، مورفولوژی رسوب و اندازه ذرات رسوب اثر داشته باشد.

تحقیقاتی بر روی اثر نوع آند (مصرف شدنی یا مصرف نشدنی) بر روی خواص پودر مس تولید شده به روش الکترولیز انجام شده است [۸]. کاراواستوا [۹] به بررسی سینتیک و خواص رسوب مس بر روی کاتدهای آلومینیم، روی و آهن پرداخته است. موردی که در این کاتدها مطرح است، این است که با قرار گرفتن کاتد در محیط اسیدی دو حالت رخ می دهد، برخی کاتدها با قرار گرفتن در اسید، یک لایه پسیو روی آنها ایجاد شده و مانع خورده شدن آنها می شود و برخی دیگر شروع به خورده شدن می کنند [۹].

کاتدی دو برابر دانسیته جریان آندی انتخاب شد، به همین دلیل یکی از سطوح آند پس از چربی زدایی به وسیله لاک، پوشش داده می شد.

محلول الکترولیت ترکیبی از آب، اسید سولفوریک (۱۴۰ گرم بر لیتر) و سولفات مس (۲ گرم بر لیتر مس) بود و آزمایش ها در یک بشر شیشه ای ۵۰۰ میلی لیتر انجام شد. اختلاط مواد اولیه به وسیله همزن مغناطیسی (IKA RH Basic2) با سرعت چرخش همزن ثابت انجام شد و با استفاده از گرمکن (IKA RH Basic2)، دمای الکترولیت به ۵۰ درجه سانتیگراد رسانده می شد. رویش پودر به وسیله یک کاردک تمیز انجام شد و پودر حاصل چندین بار با آب دیونیزه شستشو شده و به جهت جلوگیری از اکسید شدن، داخل اتانول ریخته می شد. از آنجایی که پودر مس حاصل از این روش عموماً به صورت آگلومره می باشد، به منظور پراکنده کردن ذرات پودر، pH محیط به ۹/۵ [۲۱] رسانده شد. در ادامه پودر حاصل به مدت ۲۰ دقیقه به وسیله همزن مغناطیسی هم زده شد و سپس به مدت ۴۰ دقیقه در حمام اولتراسونیک قرار داده شد. در پایان، پودرها به وسیله کوره (Oven) و در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد خشک شدند.

### ۲-۳- مشخصه یابی

به منظور شناسایی و اطمینان از خلوص مس کاتدی اولیه، آنالیز کوانتومتری انجام شد و خلوص مس بیشتر از ۹۹/۹٪ بود. پس از انجام آزمایش، به جهت بررسی تغییرات غلظت مس در محلول، محلول باقیمانده مورد آنالیز تیتراسیون مس قرار گرفت تا خطای حاصل از ناپیوسته بودن (Batch) سلول مشخص شود.

شناسایی پودر خشک مس توسط آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD, Xpert Philips) انجام شد. بررسی مورفولوژی و اندازه ذره پودر به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی میدان نزدیک (FESEM, CamScan MV2300) و پس از پوشش دهی با طلا انجام شد. برای بررسی اندازه ذره از نرم افزار Clemex Vision 3.5.025 استفاده شد.

و اندازه ذرات پودر و مورفولوژی پودر، مورد بررسی قرار گرفت.

### ۲- مواد و روش تحقیق

#### ۲-۱- مواد

مس کاتدی با خلوص بالای ۹۹/۹٪ به عنوان آند انتخاب شد. سولفات مس پنج آبه ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )، اسید سولفوریک با خلوص ۹۶٪ ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )، استون و اتانول، از شرکت مرک آلمان، به عنوان مواد اولیه مورد استفاده قرار گرفتند. برای کاتد، فلزات مس، سرب، تیتانیوم و آلومینیم به صورت خالص و با خلوص بالای ۹۹٪ تهیه شدند. فولاد تهیه شده از جنس زنگ نزن بود. برای کاتد طلا، زیرلایه مس انتخاب شد و پوشش طلا بر روی آن با دستگاه پوشش دهنده (BIO-RAD, E5200 Auto Sputter Coater) ایجاد شد. ضخامت پوشش حدود ۰/۵ میکرون بود.

#### ۲-۲- سنتز

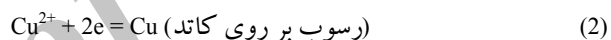
در این پژوهش، پودر مس به روش گالوانواستاتیک و به وسیله رکتیفایر (SL20RPC-IPC) با دقت دو رقم اعشار در نمایش ولتاژ و جریان، تولید شد. جریان به صورت پالسی و با زمان روشنی ۰/۲ میلی ثانیه و زمان خاموشی ۰/۸ میلی ثانیه انتخاب شد. میانگین دانسیته جریان برابر ۰/۲ آمپر بر سانتیمتر مربع بود. در هر آزمایش، دو قطعه فلز (۲۵ میلیمتر در ۴۰ میلیمتر) به عنوان دو الکترواد استفاده شد. جنس آند از مس بود و جنس کاتد در هر آزمایش تغییر می کرد. سطح الکترودها پس از شستشو با آب دیونیزه شده، با کاغذ سنباده (از جنس SiC) ۱۲۰، ۲۴۰، ۳۶۰، ۶۰۰ و ۱۲۰۰ صیقلی شدند. در ادامه به منظور چربی زدایی به مدت ۱۰ دقیقه در استون و در حمام اولتراسونیک (BANDELIN sonorex, 30W) قرار گرفتند. سطوح الکترودها پس از آبکشی و خشک کردن، بلافاصله وارد اسید سولفوریک ۱۰٪ شدند. این مرحله، به منظور حذف اکسیدهای سطحی، به مدت ۵ دقیقه و در حمام اولتراسونیک انجام شد. در ادامه آبکشی مجدد انجام شد و الکترودها وارد محلول الکترولیت شدند. دانسیته جریان

### ۳- نتایج و بحث

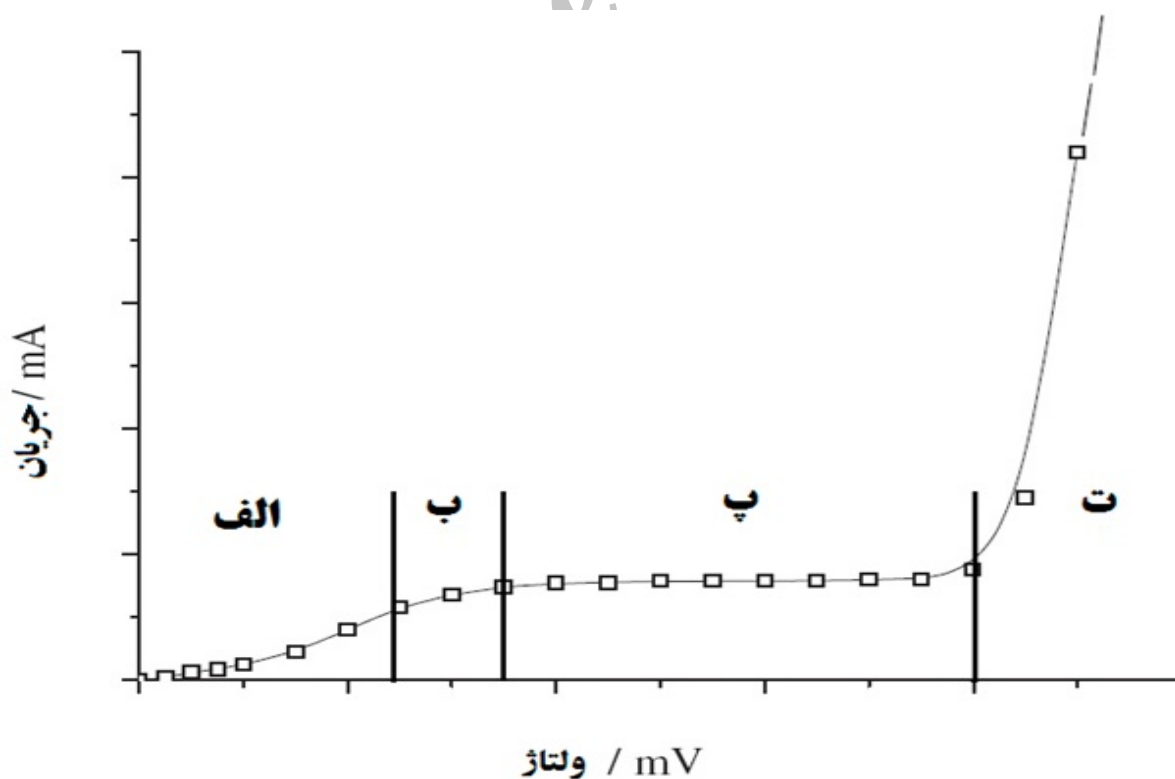
یکی از مهمترین فاکتورهای تعیین کننده سینتیک و مکانیزم جوانه زنی مس، نوع فلز زیرلایه است [۲۰]. در این پژوهش، به بررسی مورفولوژی پودر مس تولید شده به روش الکتروپالس بر روی کاتدهای مس، آلومینیم، سرب، تیتانیم، فولاد زنگ نزن و طلا پرداخته شد. بیشترین تاثیر بر مورفولوژی بر روی پودر حاصل از کاتد طلا و کمترین تاثیر بر روی پودر حاصل از کاتد آلومینیم بدست آمد.

#### ۳-۱- مکانیزم رسوب مس

واکنش آندی و کاتدی مس در معادلات ۱ و ۲، به ترتیب، نشان داده شده است.



ولتاژ تعادلی واکنش مجموع (کاتدی و آندی) صفر است، اما برای انجام واکنش و داشتن سینتیک مناسب بایستی ولتاژ اعمالی بزرگتر از صفر باشد. در شکل ۱ بخش الف، ب، پ و ت پلاریزاسیون دیده می شود [۲۲]. منطقه الف: منطقه رسوب فلز به صورت پوشش و کاملاً فشرده، منطقه ب: منطقه رسوب فلز به صورت خشن و ناهموار، منطقه پ: منطقه رسوب پودر به حالت دانه درشت و بعضاً چسبنده و منطقه ت: منطقه رسوب فلز به حالت پودر ریزدانه و بدون چسبندگی بر روی سطح کاتد است. پس برای تولید پودر، اضافه ولتاژ و دانسیته جریان باید در منطقه "ت" قرار بگیرد. عملاً در تولید پودر مس، باید دانسیته جریان و ولتاژ بالا باشد که با تصاعد گاز هیدروژن در کاتد همراه است. در تمامی آزمایشها، ولتاژ بین ۶ تا ۷ ولت تغییر می کرد. در این شرایط، فرایند به صورت کنترل نفوذی یون کنترل می شود. [۲۲]



شکل (۱): منحنی معمول پلاریزاسیون: الف) تشکیل فلز فشرده، ب) تشکیل رسوب خشن، پ) تشکیل پودر، ت) تشکیل پودر بسیار ریزدانه همراه با متصاعد شدن

هیدروژن [۲۲]

کاتدها ریزتر و مورفولوژی دندریتهای تقریباً گرد است. علاوه بر این، حالت یکنواختی دارند. پودر رسوب کرده بر روی کاتد طلا راحت تر از کاتد جدا می‌شد. آنالیز XRD (مطابق با JCPDC card No. 04-0836) [۱] و EDS پودر سنتز شده بر روی کاتد طلا در شکل ۳ آمده است، این شکل نشان دهنده خلوص بالای پودر سنتز شده است. با توجه به دقت آنالیز XRD می‌توان نتیجه گرفت که پودر تولید شده، مس خالص است. آنالیز EDS دو بار انجام شد و در هر دو بار عدد  $100\%$  ارائه شد. با توجه به دقت EDS می‌توان گفت خلوص پودر بیشتر از  $99.5\%$  است. علی‌رغم اینکه احتمال خورده شدن کاتدها در شرایط اسیدی بسیار قوی وجود دارد، اما عملاً خوردگی محسوس و قابل مشاهده‌ای در کاتد رخ نداد که می‌تواند ناشی از دو عامل باشد: ۱- زمان کوتاه فرایند (۱۵ دقیقه)، ۲- قرار گرفتن رسوبات بر روی سطح کاتد و انجام واکنش الکتروشیمیایی احیایی بر روی سطح کاتد که فرصتی برای خوردگی سطح کاتد (عمل اکسیداسیون فلز کاتد)، باقی نگذاشته است.

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق تاثیر جنس های متفاوت کاتد (مس، آلومینیوم، سرب، فولاد زنگ نزن، تیتانیم و طلا) بر روی مورفولوژی پودر مس مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

۱- پودر تولید شده بر روی تمامی کاتدها دارای خلوص بسیار بالا و ابعاد بسیار ریز بود، و آنالیزهای XRD و ESD، خلوص بالای پودر (بیش از  $99.5\%$ ) را تایید کردند.

۲- جنس کاتد تاثیر زیادی بر روی اندازه ذرات ندارد، اما با توجه به تصاویر SEM، تاثیر آن بر روی مورفولوژی پودرهای سنتز شده مشخص شد.

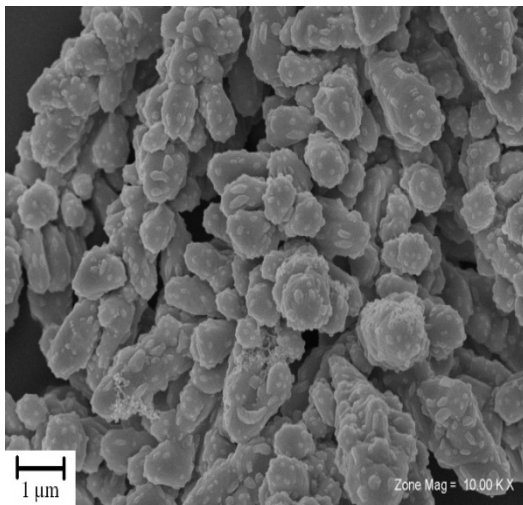
۳- در بین کاتدهای انتخاب شده، پودر سنتز شده بر روی آلومینیوم بزرگترین ابعاد و در مورد طلا کمترین ابعاد دندریتهای را داشت. مورفولوژی پودر حاصل از کاتد طلا به صورت دندریتهای کروی بود.

شکل ۲ (الف - و) نشان‌دهنده مورفولوژی پودرهای حاصله از کاتدهای به ترتیب، مس، فولاد، تیتانیم، سرب، آلومینیوم و طلا، هستند. رنگ تمامی رسوبات تقریباً قهوه‌ای تیره بود که پس از خشک شدن کمی روشن‌تر می‌شد. تیره تر بودن پودرهای ریزدانه نسبت به پودرهای درشت به دلیل انکسار نور می‌باشد. آنالیز XRD و EDS نشان می‌داد که پودر حاصله، مس خالص است. اما با گذشت زمان و قرار گرفتن پودر در معرض هوا، رنگ پودر کم کم تیره شده و به سیاه متمایل می‌شد که نشانگر اکسید شدن پودر است.

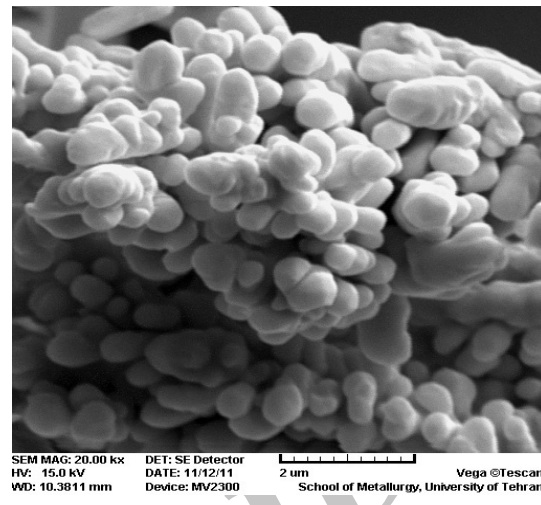
شکل ۲ - الف مورفولوژی پودر مس بر روی کاتد مسی را نشان می‌دهد. پودر رسوب کرده بر روی کاتد مسی، یکنواخت و یک دست بود. همان طور که در شکل دیده می‌شود، دندریتهای ذرات پودر به صورت تقریباً کروی و با ابعاد حدود  $200$  نانومتر هستند. شکل ۲ - ب نشان‌دهنده مورفولوژی پودر بر روی کاتد فولادی است. سطح مقطع دندریتهای این پودرها حالت کاملاً گرد ندارند. از طرف دیگر، اندازه دندریتهای بزرگتر از حالت قبل است. شکل کلی دندریتهای در دو کاتد تقریباً یکسان است.

شکل ۲ - ج و ۲ - د نشان‌دهنده پودر مس بر روی کاتد تیتانیمی و سربی است. همان طور که از شکل‌ها مشخص است، این دندریتهای حالت گرد ندارند. شکل آنها نامنظم و دارای گوشه‌های تیز است. شکل ۲ - ه پودر حاصل بر روی کاتد آلومینیومی را نشان می‌دهد. مشابه پودر تولیدی بر روی کاتد تیتانیم و سرب، این پودر نیز تقریباً هیچ شکل خاصی ندارد. از سوی دیگر، اندازه دندریتهای در پودر کاتد آلومینیومی بزرگتر است (با توجه به مقیاس تصویر). به عبارت دیگر، بین تمامی کاتدها، بدترین شرایط برای ریز دانه شدن را کاتد آلومینیومی دارد. وزن پودر رسوب کرده بر روی کاتد آلومینیومی کمتر بود که می‌تواند به دلیل پسیو شدن سطح کاتد (تشکیل لایه اکسید) [۹] و افزایش اضافه ولتاژ مورد نیاز برای رسوب فلز باشد.

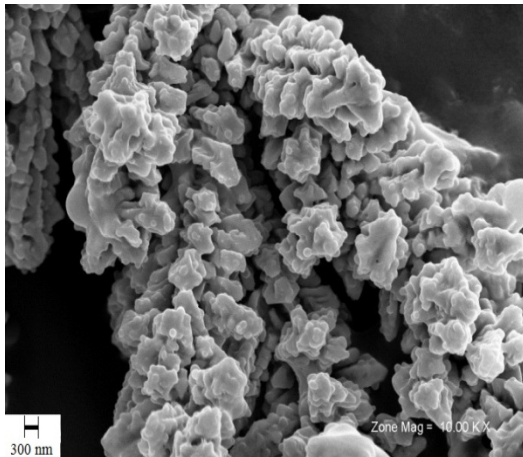
شکل ۲ - و پودر سنتز شده بر روی کاتد طلا را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است اندازه دندریتهای نسبت به بقیه



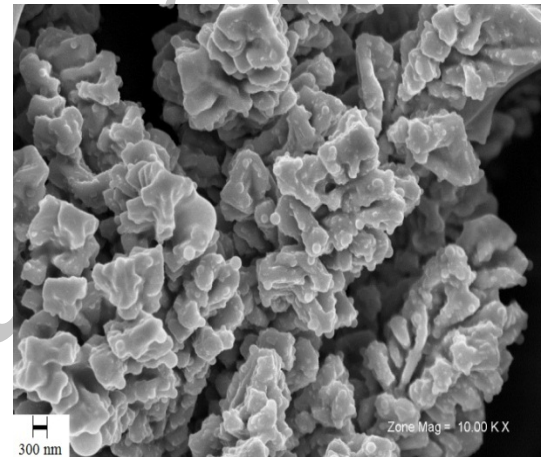
(ب)



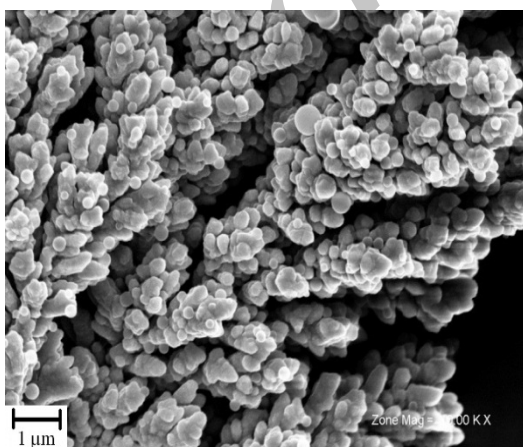
(الف)



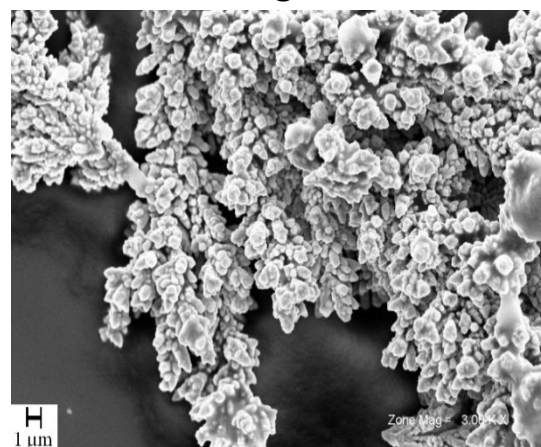
(د)



(ج)

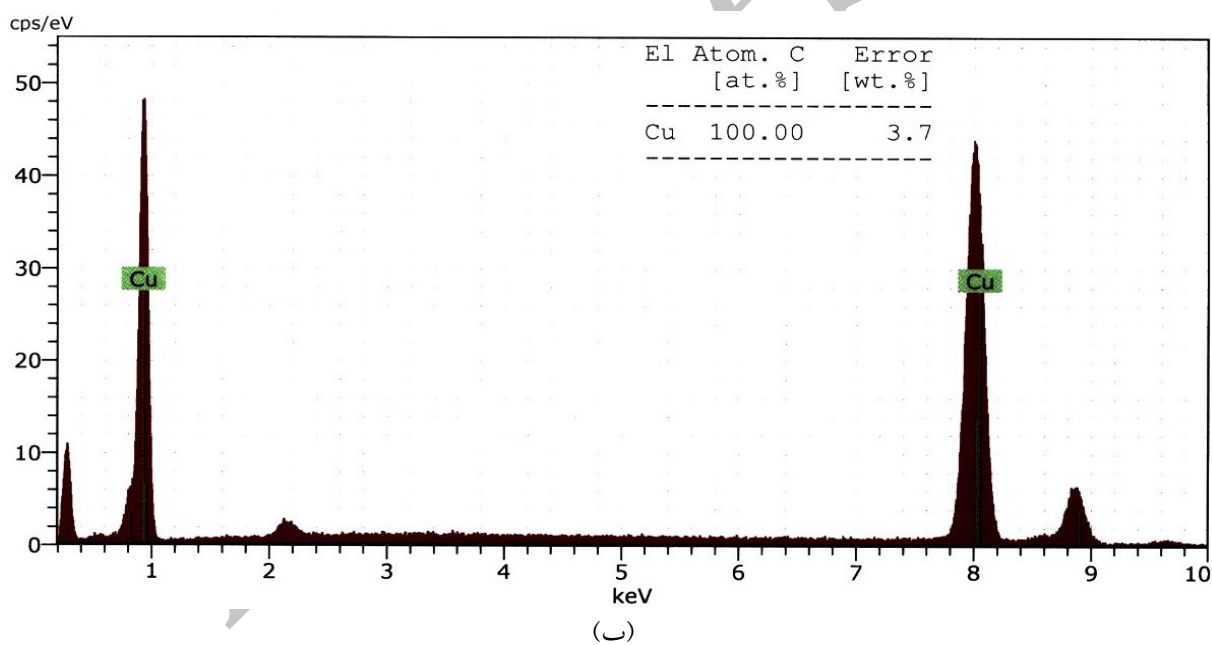
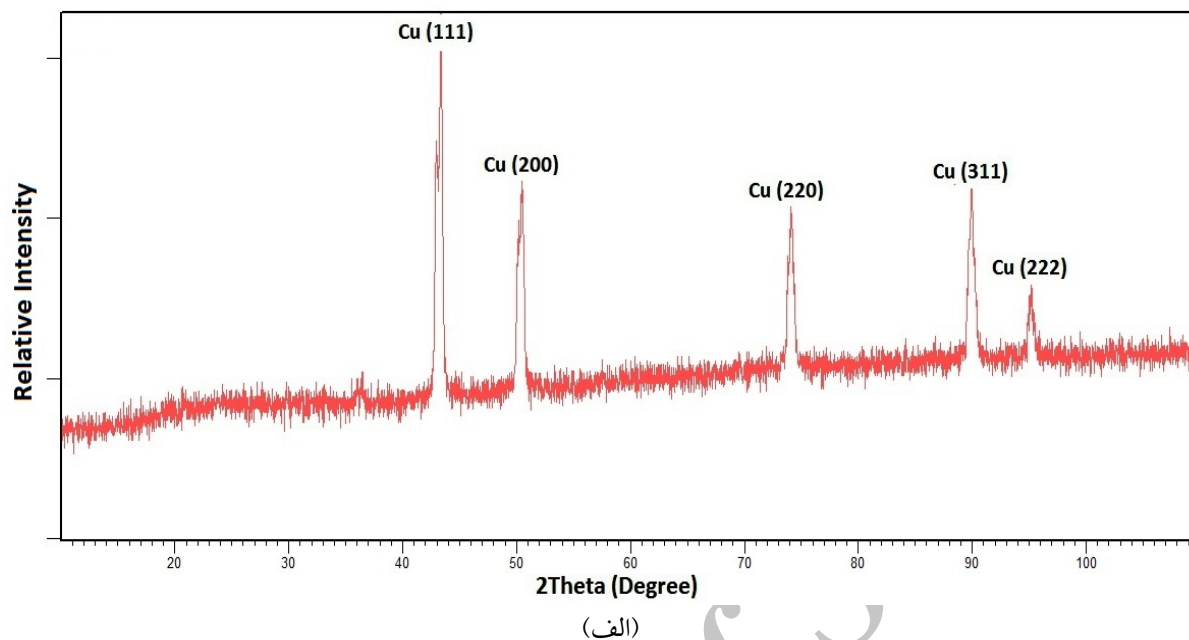


(و)



(ه)

شکل (۲): مورفولوژی پودرهای سنتز شده بر روی کاتدهای مختلف از جنس: (الف) مس، (ب) فولاد زنگ نزن، (ج) تیتانیم، (د) سرب، (ه) آلومینیم و (و) طلا.



شکل (۳): الف) الگوی XRD، ب) آنالیز EDS، پودر مس سنتز شده بر روی کاتد طلا

electrode cell”, Powder Technology, Vol. 201, pp. 57-63, 2010.

[3] N. Nikolic, L. Pavlovic, M. Pavlovic & K. Popov, “Morphologies of electrochemically formed copper powder particles and their dependence on the quantity of evolved hydrogen”, Powder Technology, Vol. 185, pp. 195-201, 2008.

[4] N. Nikolic, K. Popov, L. Pavlovic & M. Pavlovic, “The effect of hydrogen

[1] H. Wei, D. Xue-chen & Z. Lei, “Characterization of ultrafine copper powder prepared by novel electrodeposition method”, journal of Center South University Technology, Vol.16, pp. 709-712, 2009.

[2] G. Orhan, G. Hapci, “Effect of electrolysis parameters on the morphologies of copper powder obtained in a rotating cylinder

۵- مراجع

- Nanostructures by a Sonoelectrochemical Method”, *Chem. Eur. J.*, Vol. 14, pp. 4696 – 4703, 2008.
- [14] J. Xue, Q. Wu, Z. Wang & S. Yi, “Function of additives in electrolytic preparation of copper powder”, *Hydrometallurgy*, Vol. 82, pp. 154–156, 2006.
- [15] S.A. Chulovskaya, S.A. Lilin, V.I. Parfenyuk & G.V. Girichev, “Physicochemical Properties of Ultrafine Copper-Containing Powders Synthesized by Cathode Reduction”, *Russian Journal of Physical Chemistry*, Vol. 80, pp. 264–267, 2006.
- [16] S.A. Chulovskaya, A.V. Balmasov, S.A. Lilin & V.I. Parfenyuk, “Electrochemical Production of Ultradisperse Copper-Containing Particles from Organo-Aqueous Electrolyte Solution”, *Protection of Metals*, Vol. 42, pp. 394–397, 2006.
- [17] L.I. Gurevich, A.V. Pomosov, “The effect of chlorides on electrodeposition of powdered copper precipitates”, *Poroshkovaya Metallurgiya*, Vol. 1, pp. 13–20, 1969.
- [18] K.I. Popov, D.N. Keca & M.D. Maksimovic, “Formation of powdered copper deposits by constant and pulsing overpotential electrolysis”, *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 7, Vol. 77–80, 1977.
- [19] Owais, “Effect of electrolyte characteristics on electrowinning of copper powder”, *J Appl Electrochem*, Vol. 39, pp. 1587–1595, 2009.
- [20] Łukomska, A. Plewka & P. Łos, “Shape and size controlled fabrication of copper nanopowders from industrial electrolytes by pulse electrodeposition”, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 637, pp. 50–54, 2009.
- [21] X. Li, D. Zhu & X. Wang, “Evaluation on dispersion behavior of the aqueous copper nano-suspensions”, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 310, pp. 456–463, 2007.
- [22] S. Jafar, “Effects of new additives (lanolin) on the electro-deposition of copper powder”, *Engineering and Technology Journal*, Vol. 27, pp. 2308– 2321, 2009.
- codeposition on the morphology of copper electrodeposits. I. The concept of effective overpotential”, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 588, pp. 88–98, 2006.
- [5] K. Popov, T. Kostic, N. Nikolic, E. Strojilkovic & M. Pavlovic, “A new approach to metal electrodeposition at a periodically changing rate Part I. The reversing overpotential method”, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 464, pp. 245–251, 1999.
- [6] V. Maksimovic, L. Pavlovic, M. Pavlovic & M. Tomic, “Characterization of copper powder particles obtained by electrodeposition as function of different current densities”, *Journal of Application of Electrochemistry*, Vol. 39, pp. 2545–2552, 2009.
- [7] P.W. Lee, W.B. Eisen, B.L. Ferguson, R.M. German, R. Iacocca, D. Madan, H. Sanderow & Y.T. Hardbound, “ASM Metals Handbook Powder Metallurgy”, vol. 7, 9th Edition, p. 317, ASM International, Ohio, 1998.
- [8] M.V. Tesakova, V.I. Parfenyuk, “Effect of the Anode Material on the Composition and Dimensional Characteristics of the Nano-Sized Copper-Bearing Powders Produced by the Electrochemical Method”, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, Vol. 46, pp. 11–16, 2010.
- [9] M. Karavasteva, “Kinetics and deposit morphology of copper cementation onto zinc, iron and aluminium”, *Hydrometallurgy*, Vol. 76, pp. 149–152, 2005.
- [10] R. Walker, S.J. Duncan, “The morphology and properties of electrodeposited copper powder”, *Surface Technology*, Vol. 23, pp. 301–321, 1984.
- [11] Haas, S. Shanmugam & A. Gedanken, “Pulsed Sonoelectrochemical Synthesis of Size-Controlled Copper Nanoparticles Stabilized by Poly(N-vinylpyrrolidone)”, *J. Phys. Chem. B*, Vol. 110, pp. 16947–16952, 2006.
- [12] W.Y. Ko, W.H. Chen, C.Y. Cheng & k.J. Lin, “Architectural Growth of Cu Nanoparticles Through Electrodeposition”, *Nanoscale Res Lett*, Vol. 4, pp.1481–1485, 2009.
- [13] Haas, S. Shanmugam & A. Gedanken, “Synthesis of Copper Dendrite