

# همنهشت نانوذرات ترکیبات اکسید کبالت به روش احتراقی محلول و مشخصه‌سازی

مهسا دلال براتی<sup>۱</sup>، بهنام خوش اندام<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه سمنان

۲- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه سمنان

پیام‌نگار: [bkhoshandam@semnan.ac.ir](mailto:bkhoshandam@semnan.ac.ir)

## چکیده

هدف از کار حاضر، همنهشت (سنتز) و مشخصه‌سازی نانوذرات ترکیبات کبالت به روش همنهشت احتراقی محلول است. به این منظور، واکنشگاهی طراحی و ساخته شد؛ از ویژگی‌های واکنشگاه، سادگی و کارایی بالای آن بوده که امکان انجام واکنش در مقیاس کوچک را فراهم آورده است. از نیترات کبالت شش‌آبه به‌عنوان اکسیدکننده و گلاسیسین به‌عنوان سوخت استفاده شد. همنهشت با حضور گلاسیسین در نسبت استوکیومتری به‌مدت یک ساعت و در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس انجام شد. محصول با تجزیه‌های پراش پرتو ایکس و ریزبین الکترونی روبشی نشر میدانی مشخصه‌یابی شد. تجزیه XRD، همنهشت موفق نانوذرات ترکیبات کبالت را تأیید کرد و اندازه متوسط بلورک‌های تشکیل شده با استفاده از معادله شرر برابر ۵۰ نانومتر محاسبه شد. تجزیه FE-SEM، ساختار متخلخل مواد را به خوبی نشان داد و اندازه متوسط ذرات در محدوده زیر ۶۰ نانومتر برآورد شد. از این رو اهمیت کار حاضر در تولید این نانوذرات با یک روش بسیار مقرون به‌صرفه با بازده بالا است.

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۱/۲۷

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۲/۱۰

شماره صفحات: ۴۷ تا ۵۴

**کلیدواژه‌ها:** روش همنهشت

احتراقی محلول، ترکیبات

اکسید کبالت، نانوذرات

## ۱. مقدمه

فناوری نانو از پیشرفته‌ترین فناوری‌های دنیاست که در حال حاضر برای تولید بسیاری از مواد خاص صنعتی استفاده می‌شود. کاربردهای گسترده نانو فناوری، عامل مهمی در فراگیر شدن آن است. همنهشت ذرات در مقیاس نانو، امکان کنترل و هدایت خواص ذاتی مواد از جمله خواص مغناطیسی، دمای ذوب و رنگ را بدون

تغییر در ترکیب شیمیایی، به‌وجود می‌آورد. تولید نانومواد به‌دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بی‌نظیرشان، که ناشی از ابعاد کوچک آن‌ها در مقایسه با سایر مواد در مقیاس توده<sup>۱</sup> است، مورد توجه جهانی قرار گرفته‌است [۱].

در بین تعداد زیادی از اکسیدهای فلزات واسطه که به‌دلیل خواص جالب توجه الکترونیکی، الکتریکی، کاتالیزوری، مغناطیسی و

\* سمنان، دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز

1. Bulk

کاربردهای گسترده آن‌ها تقریباً در هر شاخه‌ای از علم و فناوری، مورد توجه قرار گرفته‌اند، نانوذرات اکسید کبالت ( $\text{Co}_3\text{O}_4$ ) که دارای ساختار اسپینل طبیعی<sup>۱</sup> هستند، به‌طور گسترده بررسی شده‌اند. این مواد، به‌دلیل کاربردهای گسترده در باتری‌های لیتیوم-یون، نیمه‌هادی‌های مغناطیسی، سنسورهای گاز، کاتالیزورهای ناهمگن، دستگاه‌های الکترو-کرومی، ذخیره انرژی خورشیدی و رنگدانه‌ها، مواد نشر میدانی<sup>۲</sup>، ابرخازن‌ها، حسگرهای زیست‌شناختی، حافظه‌های مغناطیسی و تصویربرداری‌های رزونانسی، به‌عنوان انواعی از مواد چندمنظوره<sup>۳</sup> در نظر گرفته می‌شوند. نانوذرات اکسید کبالت ( $\text{Co}_3\text{O}_4$ ) به‌دلیل ساختار بلوری و اسپینل طبیعی، به‌صورت آرایه‌ای شبیه به مکعب از یون‌های اکسید هستند که در آن، یون‌های  $\text{Co(II)}$  مکان‌های چهارضلعی را اشغال می‌کنند، درحالی‌که یون‌های  $\text{Co(III)}$  در مکان‌های هشت ضلعی جای می‌گیرند [۲].

در سال‌های اخیر، تلاش زیادی برای توسعه پودرهای اکسید کبالت ( $\text{CoO}$  و  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ) در ابعاد نانو انجام شده است. ذرات اکسید کبالت (II، III) و اکسید کبالت (II) ( $\text{CoO}$ ) تا حد زیادی به‌وسیلهٔ مجموعه گسترده‌ای از روش‌های شیمیایی خیس مانند خشک کردن انجمادی<sup>۴</sup>، پیرولیز پاششی<sup>۵</sup>، ته‌نشینی هم‌زمان<sup>۶</sup>، همنهشت با حلالیت کنترل شده<sup>۷</sup>، سل-ژل<sup>۸</sup> و همنهشت احتراقی<sup>۹</sup> تهیه شده‌اند [۳].

در صنعت، پودرهای اکسید به‌طور کلی به‌وسیلهٔ واکنش‌های حالت جامد با درجهٔ حرارت بالا ساخته می‌شوند؛ به‌گونه‌ای که محصولات مورد نظر، با ننگ داشتن مخلوط جامدهای واکنش دهنده در دمای بالا، به سادگی تشکیل می‌شوند. محصولات حاصل، معمولاً ناهمگن، درشت، ناخالص و دور از نسبت‌های استوکیومتری است که می‌تواند ناشی از عدم اختلاط مواد در سطح مولکولی باشد [۱].

در سال ۱۹۶۷ مرزانو<sup>۱۰</sup> و همکارانش، مفهوم همنهشت درجهٔ حرارت بالای خودپخش شونده<sup>۱۱</sup> (SHS) را که به‌عنوان همنهشت احتراقی نیز شناخته می‌شود، بر اساس بررسی‌های گسترده‌شان در زمینهٔ آغشته<sup>۱۸</sup> و نگه‌دارنده‌های فعال<sup>۱۹</sup>. این فرآیندها انواع مختلفی از مواد

۱. Normal Spinel  
2. Field-Emission Materials  
3. Multifunctional Materials  
4. Freeze-Drying  
5. Spray-Pyrolysis  
6. Co-Precipitation  
7. Solubility-Controlled Synthesis  
8. Sol-gel  
9. Autocombustion Synthesis  
10. Merzhano  
11. Self-Spreading High-Temperature Synthesis

12. Self-Sustained
13. Patil
14. Solution Combustion synthesis
15. Redox
16. Mukasyan
17. Self-Propagating Sol-Gel Combustion
18. Impregnated Inert
19. Active Supports

مربوطه مشخصه‌سازی محصول همنهشت شده، برای حصول اطمینان از تشکیل محصول مطلوب مورد مطالعه قرار گرفته‌است.

## ۲. روش آزمایشگاهی

### ۲-۱ مواد

برای همنهشت نانوذررات کبالت از نیترات کبالت شش‌آبه  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ، با درصد خلوص ۹۹/۰٪ و CAS-No: 10026-22-9 به‌عنوان اکسیدکننده و گلیسین  $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})$ ، با درصد خلوص ۹۸/۵٪ و CAS-No: 56-40-6 به‌عنوان سوخت استفاده شده‌است. از آب دیونیزه نیز به‌عنوان حلال در انجام واکنش‌ها استفاده شد. کلیه مواد شیمیایی از شرکت مرک آلمان و با خلوص بالا تهیه شده است.

### ۲-۲ واکنشگاه شیمیایی

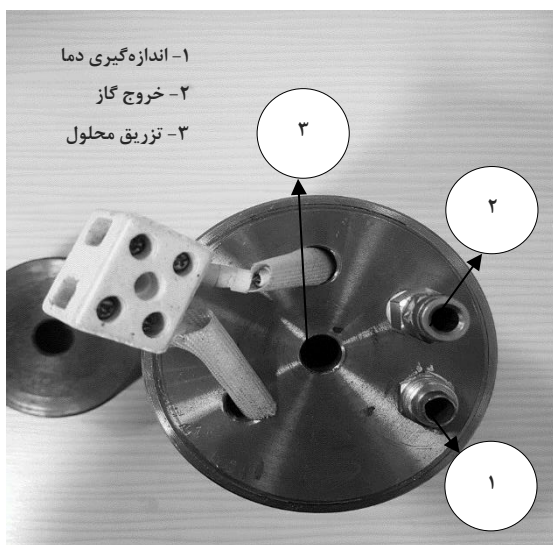
واکنشگاه طراحی‌شده از جنس استیل زنگ‌نزن ۳۱۶ و دارای ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر، قطر خارجی ۱۰ سانتی‌متر و قطر داخلی ۹/۸ سانتی‌متر است. در بالای واکنشگاه، پنج سوراخ خروجی به قطر ۱ سانتی‌متر تعبیه شده‌است. انتهای واکنشگاه، محل قرار گرفتن ماده جهت انجام واکنش احتراقی است. این قسمت دارای اتصال به فرم رزوه‌ای است. واکنشگاه از انتها باز می‌شود و حفره‌ای به قطر ۱/۵ سانتی‌متر و عمق ۲ سانتی‌متر در انتهای واکنشگاه تعبیه شده که مواد واکنشگر برای انجام واکنش به این قسمت تزریق می‌شوند. دیواره داخلی واکنشگاه برای ایجاد گرمای مورد نیاز برای انجام واکنش‌ها، با المنت سرامیکی پوشیده شده است. در شکل (۱)، نمایی از واکنشگاه ساخته شده به‌همراه اتصالات انتهایی آن (الف) و نمای بالای واکنشگاه و حفره‌های تعبیه‌شده آن (ب) مشاهده می‌شود. سوراخی که در مرکز قرار گرفته است، به‌منظور تزریق محلول واکنشگر به درون حفره است. یکی از سوراخ‌ها به‌منظور قرار گرفتن ترموکوپل برای اندازه‌گیری دما است و دو سوراخ دیگر، محل خروجی سیم‌های المنت به‌منظور وصل شدن به کنترل‌گر دما است. آخرین خروجی نیز برای خارج شدن گازهای حاصل از احتراق تعبیه شده‌است.

را می‌توانند همنهشت کنند. در این کار برای اولین بار یک فناوری پیوسته برای تولید پودرهای نانو با استفاده از روش احتراقی محلول به کار گرفته شد [۵]. یینگ<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۸، چندسازه لایه‌ای نانومواد را که حاوی  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$ ،  $\text{Cr}_2\text{AlC}$  و  $\text{TiC}$  بود، با استفاده از همنهشت احتراقی پیش‌رونده دما بالا همراه با شستشوی اسیدسیتریک همنهشت کردند. طی انجام این فرآیند چگالی، سختی، مقاومت خمشی و چقرمگی شکست بررسی شد [۶]. تونیولو<sup>۲</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۰، با استفاده از نیترات کبالت، اوره و گلیسین به‌عنوان سوخت و به‌روش احتراقی محلول، اکسید کبالت را همنهشت کردند. در این تحقیق، نسبت‌های مختلف سوخت به اکسیدکننده مورد مطالعه قرار گرفت [۳]. فیل<sup>۳</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۴، با استفاده از روش احتراقی محلول، اکسید کبالت را تولید کردند که به‌عنوان ماده پیش‌ساز کاتالیزور برای همنهشت  $\text{NaHB}_4$  مورد استفاده قرار گرفت [۷]. وحدت‌واسعی و همکارانش در سال ۲۰۱۸، با استفاده از روش احتراقی محلول، اکسید روی را همنهشت کردند. همنهشت احتراقی محلول به‌عنوان یک روش ساده، چندمنظوره و سازگار با محیط زیست مورد استفاده قرار گرفته است [۸].

از برتری‌های همنهشت به‌روش احتراقی محلول، می‌توان به ساده بودن فرآیند و نیاز به انرژی کم‌تر، تجهیزات آسان، خلوص بیشتر محصولات به‌دست آمده، خودکفا بودن واکنش و مزایای دیگر اشاره کرد. موارد ذکر شده، قابل اجرا برای طیف گسترده‌ای از مواد فلزی، سرامیک و مواد چندسازه است. بنابراین، همنهشت احتراقی محلول، روشی بسیار مناسب برای همنهشت انواع اکسیدهای فلزی و برای کاربردهای مختلف است که در کار حاضر مورد بررسی قرار گرفته‌است.

لذا در مقاله پیش رو، همنهشت نانو ذرات اکسید کبالت درون یک واکنشگاه که طراحی و ساخت این واکنشگاه ساده با حجم کوچک به هدف بررسی این‌گونه از واکنش‌ها صورت پذیرفته، انجام شد. از نیترات کبالت به‌عنوان منبع اکسیژن و جامد حاوی کبالت، و از گلیسین به‌عنوان سوخت استفاده شد. همچنین آزمایش‌های

1. Ying  
2. Toniolo  
3. Pfeil



(ب)



(الف)

شکل ۱. (الف) نمایی از واکنشگاه ساخته شده به همراه اتصالات رزوه‌ای، (ب) نمای بالای واکنشگاه و سوراخ‌های آن.

### ۳-۲ روش هم‌نهشت نانوذرات

بدون هیچ‌گونه عملیات اضافی از قبیل شستشو، آهک‌نگی (کلسیناسیون) و یا پودرسازی مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این، نمونه هم‌نهشت شده پس از جمع‌آوری، در ظرف مخصوص نگهداری شد تا تحت تأثیر عوامل محیطی مانند نور و رطوبت قرار نگیرد؛ سپس برای انجام تجزیه به آزمایشگاه فرستاده شد.

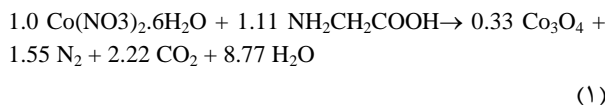
برای انجام هم‌نهشت، در ابتدا مقدار ۵ سی‌سی آب دی‌یونیزه به همراه ۰/۹۱۳ گرم از نیترات کبالت شش‌آبه و ۰/۲۱۶ گرم از سوخت گلایسین با نسبت معین سوخت به اکسیدکننده، در یک بشر به حجم ۲۵ سی‌سی مخلوط شد و سپس به مدت ۲۰ دقیقه بر روی همزن مغناطیسی با دور متوسط و در دمای ۵۰ درجه سلسیوس قرار گرفت. محلول حاصل بعد از مخلوط شدن، با استفاده از سرنگ به همراه شلنگ به داخل واکنشگاه و از طریق حفره مخصوص به واکنشگاه تزریق شد. در ادامه، واکنشگاه در زیر هود قرار گرفت و با روشن شدن واکنشگاه، دمای واکنشگاه تنظیم شد و ترموکوپل نیز در محل مناسب خود قرار گرفت و بدین ترتیب، واکنش شروع شد. به محض تنظیم دما با استفاده از کرنومتر، تغییرات دما در هر ۱۰ ثانیه ثبت شد. با گذشت زمان مورد نظر برای انجام واکنش، واکنشگاه خاموش شد تا دمای آن کاهش یابد. با بازکردن درب واکنشگاه به صورت آهسته، پودر جامد حاصل از واکنش احتراقی مشاهده و جمع‌آوری شد. در شکل (۲)، پودر جامد حاصل از واکنش هم‌نهشت احتراقی نشان داده شده است. در مرحله پایانی، با استفاده از قاشقک، پودر حاصل جمع‌آوری و با ترازوی دیجیتال توزین شد. لازم به ذکر است که محصول خروجی از واکنشگاه،



شکل ۲. پودر جامد حاصل از واکنش احتراقی.

### ۳. نتایج و بحث

واکنش احتراقی مربوط به ترکیب نیترات کبالت شش‌آبه و سوخت گلاسیسین در حالت استوکیومتری در رابطه (۱) آورده شده است:



در این واکنش، مقدار مؤلفه نسبت سوخت به اکسیدکننده برابر با ۱/۱۱ است [۳].

مقدار محصول حاصل از واکنش، پس از وزن‌کشی برابر با ۰/۷۶ گرم به دست آمد. مجموع مقدار واکنش‌دهنده‌های اولیه نیز با توجه به نسبت‌های مولی، برابر با ۱/۱۲۹ گرم محاسبه شد. با توجه به این که عملکرد تولید را می‌توان از نسبت مقدار محصول تولیدشده به واکنش‌دهنده‌های اولیه به دست آورد؛ بنابراین عملکرد تولید اکسید کبالت طبق رابطه (۲) برابر با ۶۷/۳ درصد است.

عملکرد تولید اکسید کبالت =

$$\frac{\text{مقدار گرم محصول تولیدشده}}{\text{مقدار گرم واکنش‌دهنده‌های اولیه}} \times 100 = 67.3\%$$

(۲)

### ۳-۱- شناسایی و مشخصه‌سازی ماده همنهشت شده

از تجزیه‌های پراش پرتو ایکس و تصاویر ریزبین الکترونی روبشی نشر میدانی برای مشخصه‌سازی محصول همنهشت‌شده استفاده شد.

### ۳-۱-۱ تجزیه پراش پرتو ایکس (XRD)

به منظور حصول اطمینان از ترکیبات همنهشت‌شده از مواد اولیه، مشخصات ماده تشکیل‌شده به وسیله تجزیه XRD بررسی شد. هم‌چنین به منظور تعیین اندازه بلورک‌های تشکیل‌شده، نوع فازهای به وجود آمده و تعیین ساختار بلوری از این تجزیه استفاده شد. برای بررسی تشکیل ماده همنهشت‌شده، منحنی پراش پرتو ایکس نمونه همنهشت‌شده در محدوده زاویه‌های (۲θ) برابر با ۱۰ تا ۹۰ درجه) و با نرخ افزایش زاویه ۰/۰۶ درجه به‌ازای هر ثانیه به دست آمد. این تجزیه، با استفاده از دستگاه پراش اشعه ایکس مدل براکر<sup>۱</sup> ساخت کشور آمریکا انجام شد. لازم به ذکر است، ولتاژ شتاب‌دهنده

1. BRUKER

دستگاه برابر با ۳۵ کیلوولت و شدت جریان آن نیز برابر با ۳۰ میلی‌آمپر بود. لامپ اشعه ایکس از جنس مس و طول موج آن برابر با ۱/۵۴۱ آنگستروم است.

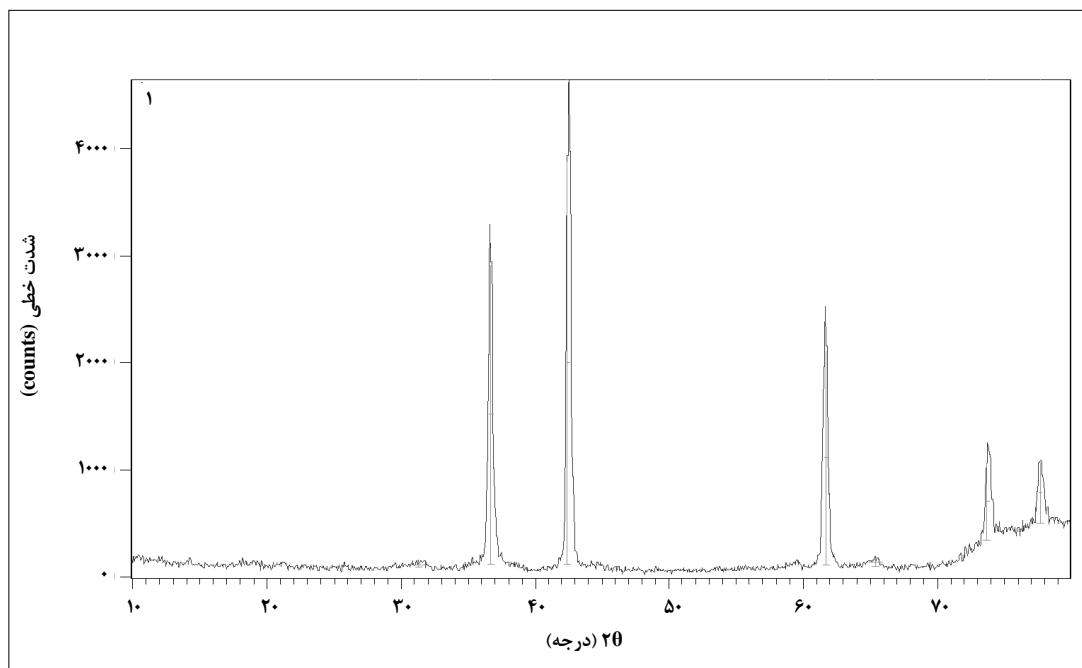
نتایج حاصل از تجزیه XRD نمونه همنهشت‌شده (شکل (۳))، حضور فازهای اکسید کبالت (CoO) و اکسید کبالت (III) (Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) را به وضوح نشان می‌دهد. پیک‌های تند و تیز مشخص‌شده در منحنی، حاکی از ساختار بلوری مواد همنهشت‌شده است. مقایسه نمودار پیک‌های فازهای نمونه همنهشت‌شده با پیک‌های استاندارد فازهای اکسیدهای کبالت (شماره 00-048-1719 برای CoO و شماره 98-006-3000 برای Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) نیز این موضوع را تأیید می‌کنند (شکل (۴)). لازم به ذکر است که همنهشت با حضور سوخت گلاسیسین در نسبت استوکیومتری انجام شده است و منحنی تغییرات دمای واکنشگاه تا رسیدن به دمای ثابت ۲۰۰ درجه سلسیوس، که به وسیله کنترل گرما ثبت شده، در شکل (۵) آورده شده است. مطابق با این شکل، دمای واکنشگاه در مدت تقریباً ۵ دقیقه به دمای حداکثری ۲۵۰ درجه سلسیوس افزایش یافته و با گذشت حدود ۳ دقیقه دیگر، دمای واکنشگاه به ۲۰۰ درجه سلسیوس کاهش یافته است. سپس واکنشگاه به مدت یک ساعت در دمای ثابت ۲۰۰ درجه سلسیوس نگه‌داشته شده تا واکنش کامل گردد. اندازه متوسط بلورک‌های تشکیل‌شده با استفاده از تجزیه XRD و معادله شرر برابر ۵۰ نانومتر محاسبه شد.

### ۳-۱-۲ تجزیه ریزبین الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM)

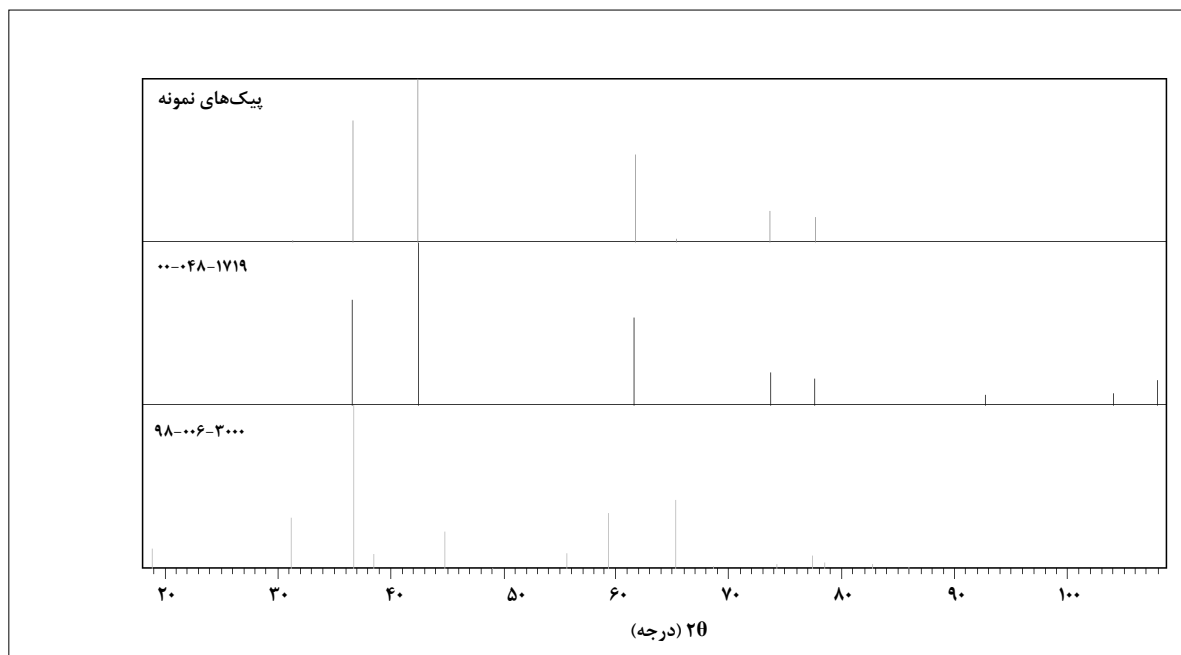
تجزیه به وسیله دستگاه FESEM با مدل MIRA III (ساخت کشور چک) انجام شد. شکل (۶) تصاویر FESEM مربوط به نمونه همنهشت شده را در بزرگنمایی‌های مختلف بین ۲۰۰ نانومتر تا ۲۰ میکرومتر نشان می‌دهد.

تصاویر به وضوح، تخلخل بالا را نشان می‌دهد که احتمالاً به علت آزاد شدن مقدار زیادی گاز در طول واکنش احتراق است. این روش، اهمیت تهیه مواد مشخص را به وضوح می‌تواند تأیید کند. علاوه بر این، در بزرگنمایی‌های کوچکتر، تشکیل ذرات کوچکتر به طور کاملاً مشخص مشاهده می‌شوند که در کنار هم قرار گرفته و حالتی از توده‌های نسبتاً یک‌دست و به هم پیوسته را تشکیل داده‌اند. در برخی قسمت‌ها از تجمع این واحدهای کوچک

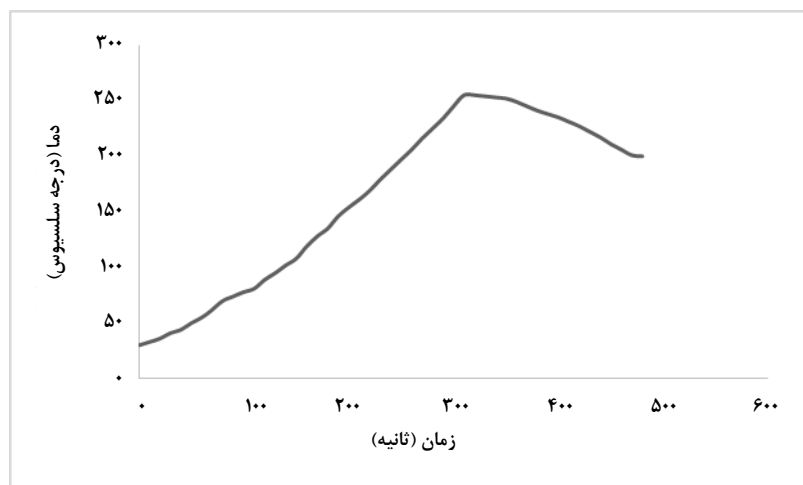
در کنار هم، حفره‌های نسبتاً بزرگی نیز ایجاد شده است. با توجه به  
تساوی، اندازه تعدادی از ذرات مشخص شده است که در محدوده ۳۵ تا ۵۱ نانومتر تغییر می‌کند. به طور کلی می‌توان گفت اندازه ذرات  
حدوداً در محدوده زیر ۶۰ نانومتر است.



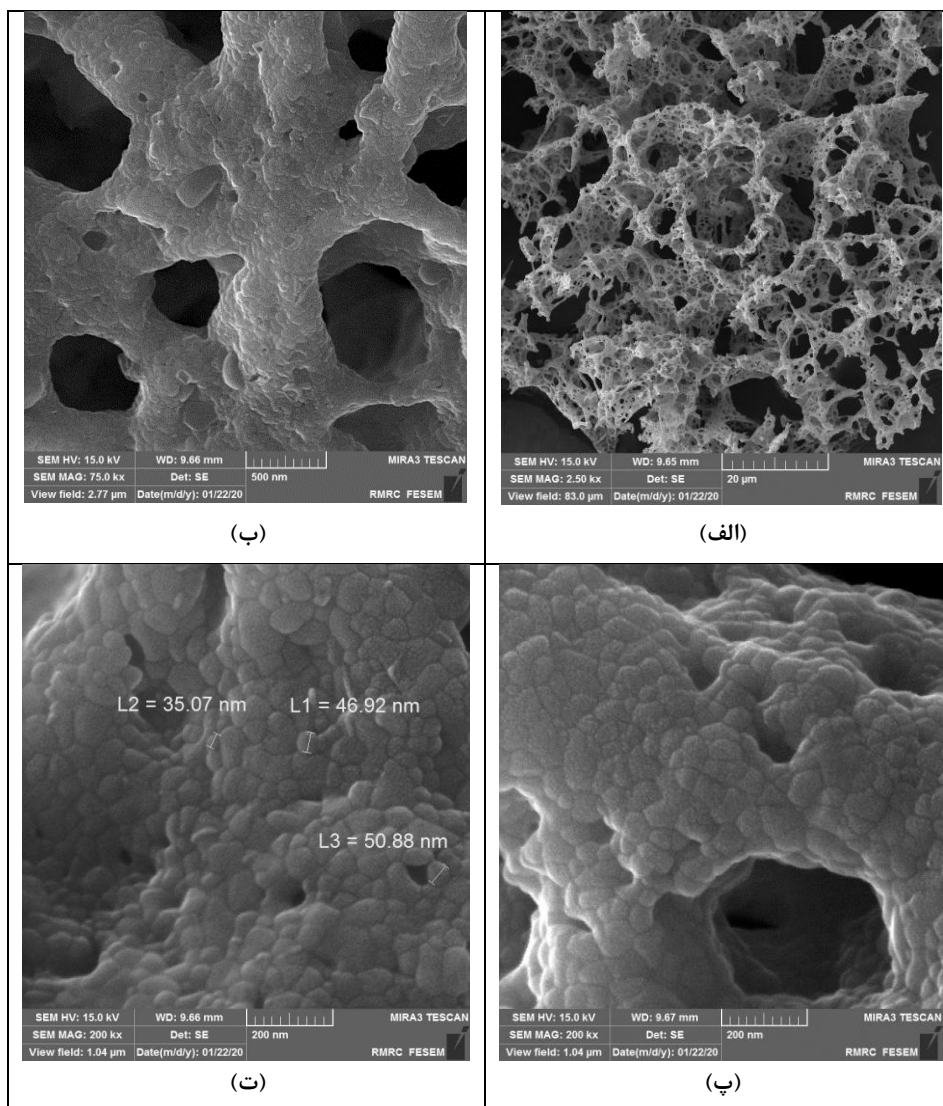
شکل ۳. منحنی پراش پرتو ایکس نمونه همزهشت شده



شکل ۴. مقایسه نمودار پیک‌های فازهای نمونه همزهشت شده (منحنی بالا) با پیک‌های استاندارد فازهای  
اکسیدهای کبالت CoO (منحنی وسط) و  $\text{Co}_3\text{O}_4$  (منحنی پایین).



شکل ۵. منحنی تغییرات دمای واکنشگاه با زمان تا رسیدن به دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس.



شکل ۶. تصاویر FE-SEM مربوط به نمونه همنهشت شده در بزرگنمایی‌های (الف) ۲۰ میکرومتر، (ب) ۵۰۰ نانومتر، (پ) ۲۰۰ نانومتر، (ت) ۲۰۰ نانومتر.

## ۴. نتیجه گیری

هدف از انجام این پژوهش، هم‌نهشت نانوذرات ترکیبات اکسیدهای کبالت به روش احتراقی محلول بوده است. به این منظور، واکنشگاهی طراحی و ساخته شد. از ویژگی‌های واکنشگاه طراحی شده، سادگی، کارآمد بودن، اندازه کوچک، اشغال فضای کم و امکان هم‌نهشت و انجام واکنش در حجم کوچک است. در صورت لزوم، با شبیه‌سازی‌های فیزیکی، می‌توان طراحی و ساخت الگوهای از این نوع واکنشگاه را در مقیاس نیمه‌صنعتی انجام داد. هم‌نهشت موفق نانوذرات، با حضور گلاسیسین به عنوان سوخت و نیترات کبالت شش‌آبه به عنوان اکسیدکننده در این واکنشگاه انجام شد. عملکرد تولید اکسید کبالت نیز برابر با ۶۷/۳ درصد محاسبه شد. تجزیه XRD برای نمونه هم‌نهشت شده، نشان داد که نانوذرات اکسیدهای کبالت (CoO و  $Co_3O_4$ ) با موفقیت و خلوص بالا هم‌نهشت شده‌اند. علاوه بر این، پیک‌های تند و تیز منحنی XRD، حاکی از ساختار بلورین نانوذرات هم‌نهشت شده است. اندازه متوسط بلورک‌های تشکیل شده با استفاده از تجزیه XRD و معادله شرر برابر ۵۰ نانومتر محاسبه شد. طبق تجزیه FESEM، اندازه ذرات هم‌نهشت شده در محدوده زیر ۶۰ نانومتر برآورد شده است و بنابراین، مطابق با تعریف مواد در مقیاس نانو، ذرات هم‌نهشت شده اکسیدهای کبالت در محدوده نانومواد می‌باشد. تصاویر FESEM به وضوح، تخلخل بالای نانوذرات را نشان می‌دهد که احتمالاً به علت آزاد شدن مقدار زیادی گاز در طول واکنش احتراق بوده است. بنابراین، کار حاضر به خوبی، تولید نانوذرات را به کمک این روش در مقیاس آزمایشگاهی نشان می‌دهد که می‌تواند به مقیاس صنعتی نیز گسترش یابد.

## مراجع

- [1] Wen, W., Wu, J. M., "Nanomaterials via solution combustion synthesis: a step nearer to controllability", RSC Advances, Vol. 4, pp. 58090-58100, (2014).
- [2] Dubey, S., Kumar, J., Kumar, A., Sharma, Y. C., "Facile and green synthesis of highly dispersed cobalt oxide ( $Co_3O_4$ ) nano powder: Characterization and screening of its eco-toxicity", Advanced Powder Technology, Vol. 29, pp. 2583-2590, (2018).
- [3] Toniolo, J. C., Takimi, A., Bergmann, C. P., "Nanostructured cobalt oxides ( $Co_3O_4$  and CoO) and metallic Co powders synthesized by the solution combustion method", Materials Research Bulletin, Vol. 45, pp. 672-676, (2010).
- [4] Li, F. T., Ran, J., Jaroniec, M., Qiao, S. Z., "Solution combustion synthesis of metal oxide nanomaterials for energy storage and conversion", Nanoscale, Vol. 7, pp. 17590-17610, (2015).
- [5] Mukasyan, A., Dinka, P., "Novel approaches to solution-combustion synthesis of nanomaterials", International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis, Vol. 16, pp. 23-35, (2007).
- [6] Ying, G., He, X., Li, M., Li, Y., Du, S., "Synthesis and mechanical properties of nano-layered composite", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 506, pp. 734-738, (2010).
- [7] Pfeil, T., Pourpoint, T., Groven, L., "Effects of crystallinity and morphology of solution combustion synthesized  $Co_3O_4$  as a catalyst precursor in hydrolysis of sodium borohydride", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 39, pp. 2149-2159, (2014).
- [8] Vasei, H. V., Masoudpanah, S., Adeli, M., Aboutalebi, M., "Solution combustion synthesis of ZnO powders using various surfactants as fuel", Journal of Sol-Gel Science and Technology, Vol. 89, pp. 586-593, (2019).