METALLURGICAL ENGINEERING
The Journal of Iranian Metallurgical and Materials Engineering Society

Hydrometallurgical Synthesis of Cobalt Nanoparticles from Spent Cobalt Oxide in Thermal Energy Storage Cells

Mehrshad Farahani Jokar[1], *Mehdi Pourabdoli[2], Atiyeh Sarmadi[3]

1- M.Sc. Student in Materials Engineering (Extractive Metallurgy), Hamedan University of Technology
2- Ph.D. in Materials Engineering, Hamedan University of Technology
3- Laboratory Expert, Hamedan University of Technology

Citation: Farahani Jokar M, Pourabdoli M, Sarmadi A.Hydrometallurgical Synthesis of Cobalt Nanoparticles from Spent Cobalt Oxide in Thermal Energy Storage Cells, Metallurgical Engineering, 2026: 28(4):229 -235 https://doi.org/10.22076/me.2026.743586

https://doi.org/10.22076/me.2026.743586

ABSTRACT

In this research, the hydrometallurgical synthesis of metallic cobalt nanoparticles from spent cobalt oxide in thermal energy storage cells was investigated with the aim of recovering and reusing cobalt. The leaching process of the sample containing Co_3O_4 was carried out using sulfuric acid, and the effects of solution temperature and reaction time on the cobalt recovery process were evaluated. The results showed that the maximum extraction efficiency of cobalt ions (with a concentration of approximately 9000 ppm) was achieved under optimum conditions consisting of a reaction temperature of 85 °C and a time of 240 minutes. Subsequently, cobalt nanoparticles were synthesized from the cobalt sulfate solution under controlled conditions in the presence of sodium borohydride ($NaBH_4$) as a reducing agent and polyvinylpyrrolidone (PVP) as a surface stabilizer in an alkaline medium. During the synthesis stage, the weight ratio of $NaBH_4$ to $CoSO_4.7H_2O$ was investigated as a key parameter, and the best results were obtained at a sodium borohydride-to-cobalt sulfate weight ratio of 2 at a pH of 10.4. The leaching solution and nanoparticles were characterized using UV-Vis, XRD, DLS, and SEM analyses, and the average size of the synthesized cobalt nanoparticles under optimum conditions was reported to be 23 nm.

Keywords: *Cobalt oxide, Hydrometallurgy, Leaching, Cobalt nanoparticles.*

Received: March 4, 2025 | Accepted: September 25, 2025

Corresponding Author:
Mehdi Pourabdoli Sardroud, PhD
Address: Hamedan University of Technology, Department of Materials Engineering
Tel: +98 (81) 38411445
E-mail: mpourabdoli@hut.ac.ir

سنتز نانوذرات کبالت به روش هیدرومتالورژی از اکسید کبالت مصرف‌شده در سلول‌های ذخیره انرژی حرارتی

مهرشاد فراهانی جوکار[۱]، *مهدی پورعبدلی[۲]، عطیه سرمدی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد استخراج فلزات ، دانشگاه صنعتی همدان

۲- دکتری رشته مهندسی مواد و متالورژی ، عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی همدان

۳- کارشناس آزمایشگاه تحقیقاتی گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی همدان

چکیده

در این پژوهش، سنتز نانوذرات فلزی کبالت از اکسید کبالت مصرف‌شده در سلول‌های ذخیره انرژی حرارتی به روش هیدرومتالورژی با هدف بازیابی و استفاده مجدد از کبالت انجام شد. عملیات لیچینگ نمونه حاوی Co_3O_4 با استفاده از اسید سولفوریک انجام و تأثیر دمای محلول و زمان واکنش روی فرایند بازیابی کبالت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین بازده استخراج یون Co^{2+} (غلظت حدود ppm ۹۰۰۰) در شرایط بهینه شامل دمای واکنش ۸۵ درجه سانتی‌گراد و زمان ۲۴۰ دقیقه حاصل می‌شود. در ادامه، نانوذرات کبالت از محلول سولفات کبالت تحت شرایط کنترل‌شده و در حضور بوروهیدرید سدیم ($NaBH_4$) به‌عنوان عامل احیاکننده و پلی‌وینیل‌پیرولیدون (PVP) به‌عنوان پایدارکننده سطحی در محیط قلیایی سنتز شد. در مرحله سنتز، نسبت وزنی $NaBH_4$ به $CoSO_4 \cdot 7H_2O$ به‌عنوان پارامتر کلیدی بررسی شد و بهترین نتایج در نسبت وزنی بوروهیدرید سدیم به سولفات کبالت برابر ۲ در pH مساوی با ۱۰٫۴ به‌دست آمد. محلول لیچینگ و نانو ذرات با آزمون‌های UV-Vis، XRD، DLS و SEM مشخصه‌یابی شدند و میانگین اندازه نانو ذرات کبالت سنتز شده در شرایط بهینه، ۲۳ نانومتر گزارش شد.

واژه‌های کلیدی: اکسید کبالت، هیدرومتالورژی، لیچینگ، نانوذرات کبالت.

دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۴ | پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۳

مقدمه

در سال‌های اخیر، با پیشرفت فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی، استفاده از ترکیبات فلزی به‌ویژه اکسید کبالت در سلول‌های ذخیره انرژی حرارتی به دلیل قابلیت انجام واکنش‌های برگشت‌پذیر اکسایش-کاهش، افزایش چشم‌گیری یافته است. با این حال، پس از چندین چرخه حرارتی، به دلیل تشکیل لایه‌های Co_3O_4 و CoO به صورت متوالی در دور ذرات، سینتیک احیا و اکسیداسیون بسیار کند شده و اکسید کبالت مورد استفاده باید با اکسید کبالت نو جایگزین شود. لذا در این حالت، تبدیل اکسید کبالت مصرف شده به یک ماده با ارزش مثل کبالت فلزی اهمیت پیدا می کند. با استفاده از روش‌های بازیابی مانند هیدرومتالورژی، می‌توان اکسید کبالت را در اسید سولفوریک لیچ کرد و یون Co^{2+} وارد شده به محلول لیچینگ را به صورت کبالت فلزی رسوب داد. یون‌های کبالت را می‌توان از محلول لیچینگ با استفاده از احیا کننده‌هایی مانند بوروهیدرید سدیم در حضور پلی‌وینیل پیرولیدون (PVP) به روش شیمیایی احیا و رسوب داد.

در این تحقیق در بخش فرایند لیچینگ اکسید کبالت، تأثیر دو پارامتر دما و زمان انجام واکنش و در بخش سنتز اثر نسبت وزنی بهینه بورو هیدرید سدیم به‌عنوان عامل احیاکننده به پیش ماده حاوی کبالت (محلول سولفات کبالت) مورد بررسی قرار گرفت.. نوآوری این تحقیق استفاده از اکسید کبالت مصرف‌شده در سیستم‌های ذخیره انرژی حرارتی برای تولید نانو ذرات کبالت است. بهره‌گیری از منابع ثانویه حاوی کبالت مانند اکسید کبالت بازیافتی از سلول‌های ذخیره انرژی حرارتی، نه‌تنها از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است بلکه موجب توسعه رویکردهای مبتنی بر اقتصاد چرخشی و حفاظت از محیط‌زیست نیز می‌شود [۱-۵].

* نویسنده مسئول:

دکتر مهدی پورعبدلی سردرود

نشانی: دانشکده مهندسی مواد و معدن، گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی همدان

تلفن: ۳۸۴۱۱۴۴۵ (۸۱) ۹۸+

پست الکترونیکی: mpourabdoli@hut.ac.ir

مواد و روش‌های آزمایش

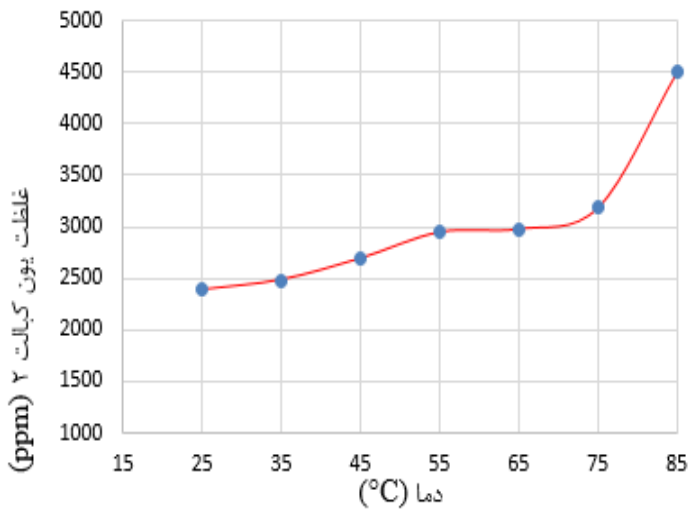
در این تحقیق از اکسید کبالت به عنوان منبع کبالت، اسید سولفوریک به عنوان حلال، بورو هیدرید سدیم به عنوان احیاکننده و پلی‌وینیل پیرولیدن به عنوان پوشاننده استفاده شد. همه مواد شیمیایی دارای درجه خلوص آزمایشگاهی بودند. مراحل اصلی تحقیق شامل مشخصه‌یابی پودر اکسید کبالت، لیچینگ اکسید کبالت در اسید سولفوریک، احیا یون‌های کبالت موجود در محلول لیچینگ با بوروهیدرید سدیم در محیط گاز آرگون و در نهایت مشخصه‌یابی نانو ذرات کبالت (با روش‌های SEM، XRD و DLS) سنتز شده بود. در مرحله اول، نمونه‌ای از اکسید کبالت به کمک آنالیز XRF و XRD مورد بررسی قرار گرفت تا ترکیب شیمیایی و ساختار فازی آن تعیین گردد. برای تعیین اندازه ذرات اکسید کبالت از دستگاه شیکر و مجموعه‌ای از الک‌های استاندارد با اندازه مش‌های متوالی (۳۸، ۴۵، ۵۳، ۶۳، ۷۵، ۹۰، ۱۲۵، ۲۱۲ و ۳۰۰ میکرون) استفاده و d80 اکسید کبالت برابر با ۱۰۰ میکرون تعیین شد. در مرحله سوم، طراحی آزمایش‌ها به‌صورت منطقی، گام‌به‌گام و با رویکرد تغییر یک متغیر در هر مرحله انجام و فاکتورهایی چون دما و زمان واکنش در شرایط مختلف بررسی شدند تا شرایط بهینه برای بیشترین بازده استخراج یون Co^{2+} حاصل شود. اندازه‌گیری غلظت یون‌های کبالت در محلول لیچینگ با استفاده از روش UV-Visible انجام شد. در مرحله چهارم، محلول سولفات کبالت حاصل از لیچینگ، تحت شرایط کنترل‌شده و در محیط گاز آرگون با استفاده از بوروهیدرید سدیم وارد مرحله سنتز نانوذرات شد. در مرحله پنجم، نانوذرات سنتز شده با استفاده از آنالیزهای XRD، SEM و DLS مشخصه‌یابی شدند. جهت مطالعه اثر حرارت روی موفولوژی نانوذرات کبالت، یک نمونه از نانوذرات کبالت سنتز شده در شرایط بهینه در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۹۰ دقیقه تحت اتمسفر گاز آرگون عملیات حرارتی شد.

نتایج و بحث

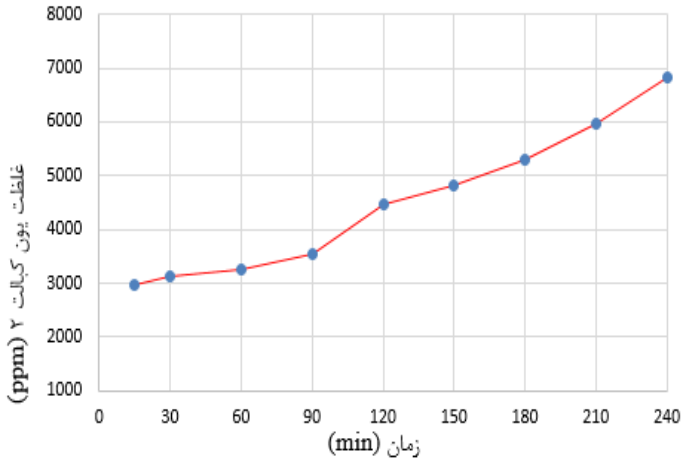
مطالعه اثر دما بر لیچینگ اکسید کبالت

دمای واکنش یکی از عوامل مهم و تعیین‌کننده در فرآیند لیچینگ محسوب می‌شود، چرا که افزایش دما معمولاً باعث افزایش سرعت واکنش، کاهش ویسکوزیته محلول و بهبود انتقال جرم بین فاز جامد و مایع می‌شود. در این تحقیق جهت بررسی تاثیر دما بر بازدهی لیچینگ، آزمایش‌های لیچینگ در دماهای مختلف بین ۲۵ تا ۸۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد، در حالی‌که سایر پارامترها (غلظت اسید، زمان، سرعت هم‌زدن و نسبت جامد به مایع) ثابت نگه داشته شدند. تاثیر دمای لیچینگ بر غلظت یون‌های حل شده در شکل ۱ ارائه شده است.

بر اساس نمودار شکل ۱، در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد کمترین بازده لیچینگ مشاهده می‌شود (حدود ۲۵۰۰ ppm). با افزایش دما تا ۸۵ درجه، غلظت یون Co^{2+} به بیش از ۴۵۰۰ ppm رسید که بیشترین مقدار در بین همه آزمایش‌های لیچینگ اکسید کبالت بوده است. این افزایش شدید در دماهای بالاتر ناشی از افزایش قابل‌توجه سرعت انحلال اکسید کبالت و بهبود واکنش با اسید سولفوریک است. بنابراین، دمای بهینه برای واکنش لیچینگ در این مطالعه، ۸۵ درجه سانتی‌گراد تعیین گردید.



شکل ۱: تاثیر دمای لیچینگ بر غلظت یون Co^{2+}
(زمان لیچینگ ۱۲۰ دقیقه، سرعت هم زدن ۵۰۰ دور در دقیقه، مولاریته اسید سولفوریک ۱ مولار و نسبت جامد به مایع ۲۰ گرم بر لیتر).



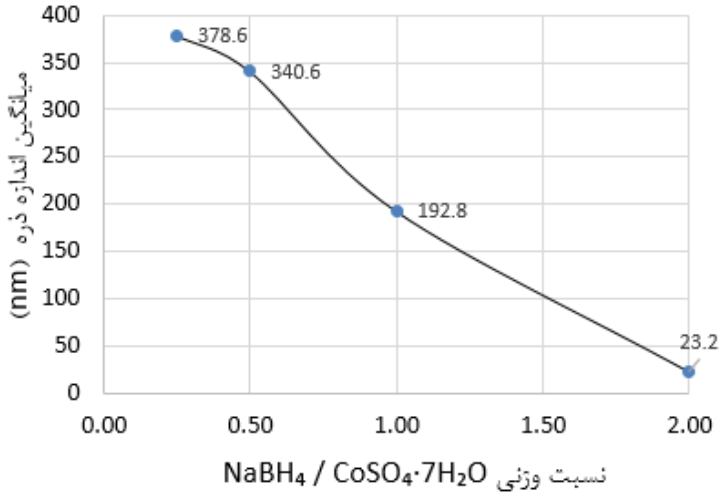
شکل ۲: تاثیر زمان بر غلظت یون‌های کبالت در محلول لیچینگ
(دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد، سرعت هم زدن ۵۰۰ دور در دقیقه، اسید سولفوریک ۱ مولار و نسبت جامد به مایع ۲۰ گرم بر لیتر).

مطالعه اثر زمان بر لیچینگ اکسید کبالت

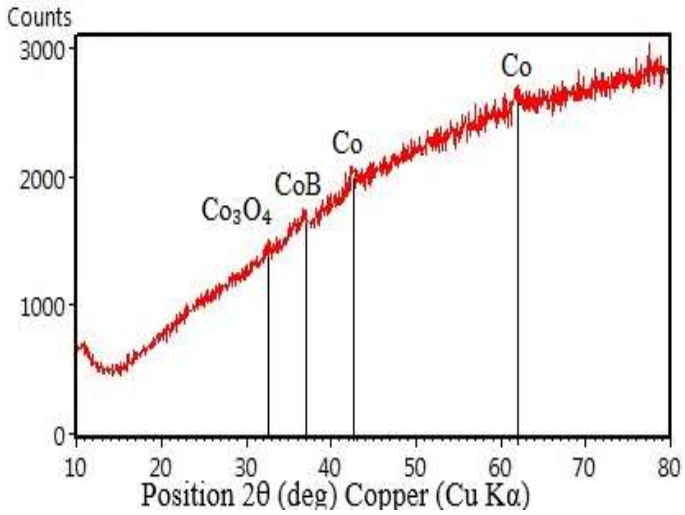
زمان تماس بین اسید و نمونه جامد یکی از پارامترهای کلیدی در فرآیند لیچینگ به‌شمار می‌آید، زیرا مستقیماً بر میزان انحلال فلز هدف اثر می‌گذارد. همان‌طور که نمودار شکل ۲ اثر زمان لیچینگ را روی انحلال یون‌های کبالت نشان می‌دهد، با افزایش زمان واکنش از ۱۵ تا ۲۴۰ دقیقه، غلظت یون Co^{2+} به‌صورت پیوسته افزایش می‌یابد. این روند صعودی بیانگر پیشرفت تدریجی فرآیند لیچینگ و افزایش انحلال اکسید کبالت در محیط اسیدی است. بیشترین بازده واکنش در زمان ۲۴۰ دقیقه به‌دست آمد که در آن، غلظت یون Co^{2+} حدوداً به ۶۸۰۰ ppm رسید. در زمان‌های کوتاه‌تر، بخشی از اکسید کبالت همچنان در محلول باقی می‌ماند و واکنش به‌طور کامل انجام نمی‌شود. بنابراین، زمان بهینه واکنش لیچینگ ۲۴۰ دقیقه تعیین شد[۳].

سنتز نانوذرات کبالت

در این پژوهش، نانوذرات کبالت با استفاده از محلول سولفات کبالت و عامل احیاکننده بوروهیدرید سدیم ($NaBH_4$) سنتز شد. در این بخش، تمرکز اصلی بر مطالعه اثر نسبت وزنی $NaBH_4$ به $CoSO_4 \cdot 7H_2O$ روی مشخصات نانو ذرات کبالت بود. هدف از آزمایش‌های این بخش، شناسایی ارتباط بین شرایط واکنش و اندازه نانو ذرات کبالت تولیدی بود.
شکل ۳ اثر تغییر نسبت وزنی عامل کاهنده بوروهیدرید سدیم ($NaBH_4$) به نمک سولفات کبالت را بر اندازه نهایی نانوذرات کبالت را نشان می‌دهد. تمامی آزمایش‌ها تحت شرایط یکسان شامل pH ثابت برابر با ۱۰٫۴۲ و دمای محیطی کنترل‌شده انجام گرفت و تنها متغیر مستقل، نسبت وزنی $NaBH_4/CoSO_4 \cdot 7H_2O$ در چهار سطح مختلف (۰٫۲۵، ۰٫۵۰، ۱٫۰۰ و ۲٫۰۰) تنظیم شد. بر اساس شکل ۳ ، با افزایش نسبت $NaBH_4/CoSO_4 \cdot 7H_2O$ از ۰٫۲۵ به ۲٫۰۰ ، کاهش چشمگیر و پیوسته‌ای در اندازه متوسط نانو ذرات مشاهده می‌شود. در نسبت ۰٫۲۵ ، میانگین اندازه ذرات حدود nm۳۷۹ بوده که نشان‌دهنده واکنش ناقص و رشد زیاد ذرات است. با افزایش این نسبت به ۰٫۵۰ و سپس ۱٫۰۰ ، اندازه ذرات به‌ترتیب به حدود ۳۴۰ nm و ۱۹۳ nm کاهش می‌یابد. در نهایت، در نسبت ۲٫۰۰، نانوذراتی با اندازه بسیار ریز و میانگین حدود nm۲۳ به‌دست آمد. این روند کاهشی بیانگر آن است که افزایش عامل کاهنده موجب افزایش سرعت هسته‌زایی و کاهش زمان رشد ذرات شده و به تولید ذرات کوچک‌تر با توزیع اندازه یکنواخت‌تر انجامیده است. همچنین، انحراف معیار پایین در نسبت ۲٫۰۰ (فقط ۱ نانومتر) دلالت بر تشکیل ذرات بسیار هم‌اندازه دارد.
به منظور بررسی فازی و ماهیت ساختاری نانوذرات سنتز شده، آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) (شکل۴) روی نمونه‌ای با اندازه ذرات کمتر از سایر آزمایش‌ها (نمونه nm ۲۳)، پس از عملیات حرارتی (در دمای °C ۷۰۰ به مدت min ۹۰) انجام شد. به‌طور کلی، نتایج XRD نشان می‌دهند که تشکیل فازهای مختلف کبالت به شدت به شرایط سنتز از جمله مقدار عامل کاهنده $NaBH_4$ وابسته است. در مقادیر پایین $NaBH_4$، احیای کبالت ناقص بوده و فاز اکسیدی Co_3O_4 به همراه مقادیر جزئی CoB و Co مشاهده شد، در حالی‌که با افزایش مقدار $NaBH_4$، احیای کبالت کامل‌تر شده و فازهای غالب به CoB و Co تبدیل می‌شوند. این یافته‌ها با نتایج شکل ۳ نیز مطابقت دارند؛ به‌طوری که در نمونه‌هایی با نسبت‌های بالاتر $NaBH_4$ ، اندازه میانگین ذرات به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یافته است (از nm ۳۷۸ در نسبت ۰٫۲۵ تا اندازه ذرات برابر ۲۳ نانومتر در نسبت ۲٫۰۰) کوچک‌تر شدن اندازه ذرات در این شرایط ناشی از افزایش نرخ جوانه‌زنی و کاهش نرخ رشد ذرات است که به تشکیل ذرات فلزی ریز و یکنواخت‌تر منجر می‌شود[۴].



شکل ۳: نمودار تغییر میانگین اندازه نانوذرات (اندازه‌گیری شده با DLS) بر حسب نسبت وزنی $NaBH_4 / CoSO_4 \cdot 7H_2O$.



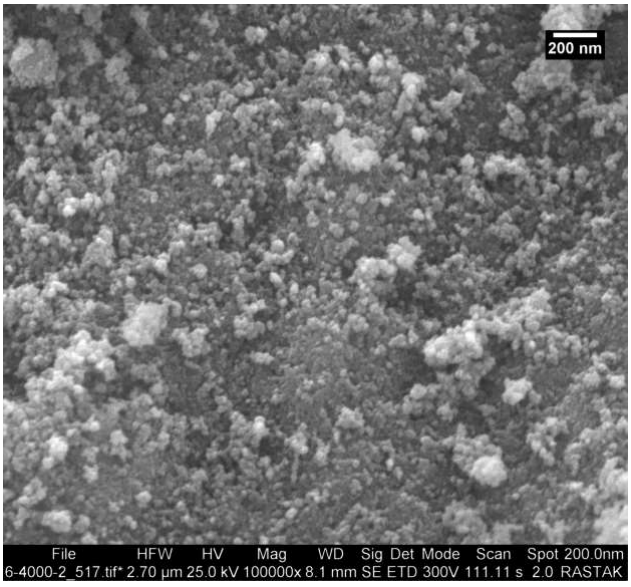
شکل ۴: آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه نانوذرات کبالت سنتز شده در شرایط بهینه (اندازه ۲۳ nm).

به‌منظور تحلیل مورفولوژی، شکل، اندازه و میزان تجمع نانوذرات کبالت، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد (شکل ۶ و ۵). تصویر SEM در شکل ۵ مربوط به نانوذرات کبالت سنتز شده در شرایط بهینه و قبل از عملیات حرارتی نشان می‌دهد که نانوذرات کبالت سنتز شده در این شرایط دارای مورفولوژی عمدتاً نامنظم هستند و تمایل به تجمع دارند. این تجمع منجر به تشکیل خوشه‌ها و توده‌هایی در مقیاس میکرومتری شده است، اگرچه واحدهای سازنده اصلی در مقیاس نانومتری قرار دارند. این میزان از تجمع می‌تواند بر خواص نهایی نانوذرات، به ویژه در کاربردهایی که سطح ویژه بالا یا پراکندگی یکنواخت نیاز دارند، تأثیر منفی بگذارد. بهینه‌سازی دقیق‌تر پارامترهای واکنش و بررسی عوامل پایدارکننده مؤثرتر ممکن است برای کاهش این تجمع ضروری باشد.

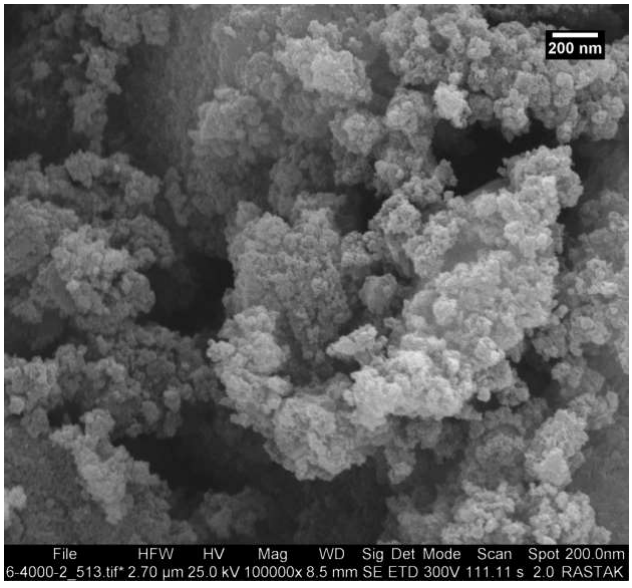
در تصویر شکل ۵، شکل کروی کلاسیک برای نانوذرات به‌وضوح قابل مشاهده نیست، اما ساختار یکنواخت سطح نمونه نشان‌دهنده‌ی تشکیل ذراتی هم‌اندازه و به‌صورت فشرده در کنار یکدیگر است. این یکنواختی موضعی ممکن است با نتایج آزمون DLS، که اندازه میانگین ذرات را حدود ۲۳ نانومتر گزارش کرده بود، هم‌راستا باشد، اگرچه خود تصویر توان تفکیک چنین اندازه‌ای را ندارد. همچنین در هیچ ناحیه‌ای از تصویر، شواهدی از تجمع ذرات، ساختارهای سوزنی یا کریستال‌های بزرگ‌تر مشاهده نمی‌شود. این موضوع نشان‌دهنده‌ی این است که حتی اگر ذرات پس از سنتز به یکدیگر چسبیده باشند، تجمع در مقیاس بزرگ اتفاق نیفتاده و محصول نهایی از نظر بافت، تا حدودی همگن باقی مانده است. این موضوع می‌تواند ناشی از حضور مؤثر عامل پایدارکننده PVP در طول سنتز باشد. در مجموع، تصویر SEM از نانوذرات کبالت سنتز شده در شرایط بهینه حاکی از تشکیل نانوذرات با مورفولوژی نامنظم است که تمایل بسیار شدیدی به تجمع گسترده در مقیاس میکرومتری از خود نشان می‌دهند. اگرچه واحدهای سازنده اصلی این توده‌ها در ابعاد نانومتری قرار دارند، اما ساختار نهایی به دلیل تجمع ، یکپارچگی نانومتری خود را از دست داده و به صورت توده‌های بزرگ و ناهمگون ظاهر شده است. این یافته‌ها بر ضرورت اعمال راهکارهای مؤثرتر جهت کنترل فرایند تجمع و دستیابی به ذرات با پراکندگی بهتر در سنتزهای آتی تأکید می‌کنند.

تصویر SEM در شکل ۶ از نانوذرات کبالت سنتز شده در شرایط بهینه پس از انجام عملیات حرارتی (۹۰ دقیقه در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد تحت اتمسفر گاز آرگون) تغییرات قابل توجهی را در مورفولوژی و اندازه نسبت به نمونه قبل از عملیات حرارتی نشان می‌دهد. برخلاف ذرات ریزتر و تجمع یافته قبل از عملیات حرارتی، نانوذرات پس از حرارت‌دهی به نظر می‌رسد که رشد کرده و بزرگ‌تر شده‌اند. این پدیده در شکل ۶ به وضوح قابل مشاهده است. در این شکل، ذرات بزرگ‌تر و ساختارهای متراکم‌تری مشاهده می‌شوند که حاکی از پدیده تف‌جوشی در دمای بالا است. این رشد ذرات منجر به کاهش تعداد نانوذرات مجزا و تشکیل توده‌های بزرگ‌تر و کاملاً به هم پیوسته می‌شود. این پدیده برای فلزات نانو در دماهای بالا معمول است، زیرا انرژی سطحی بالا باعث تمایل ذرات به کاهش سطح ویژه از طریق تف جوشی می‌شود.

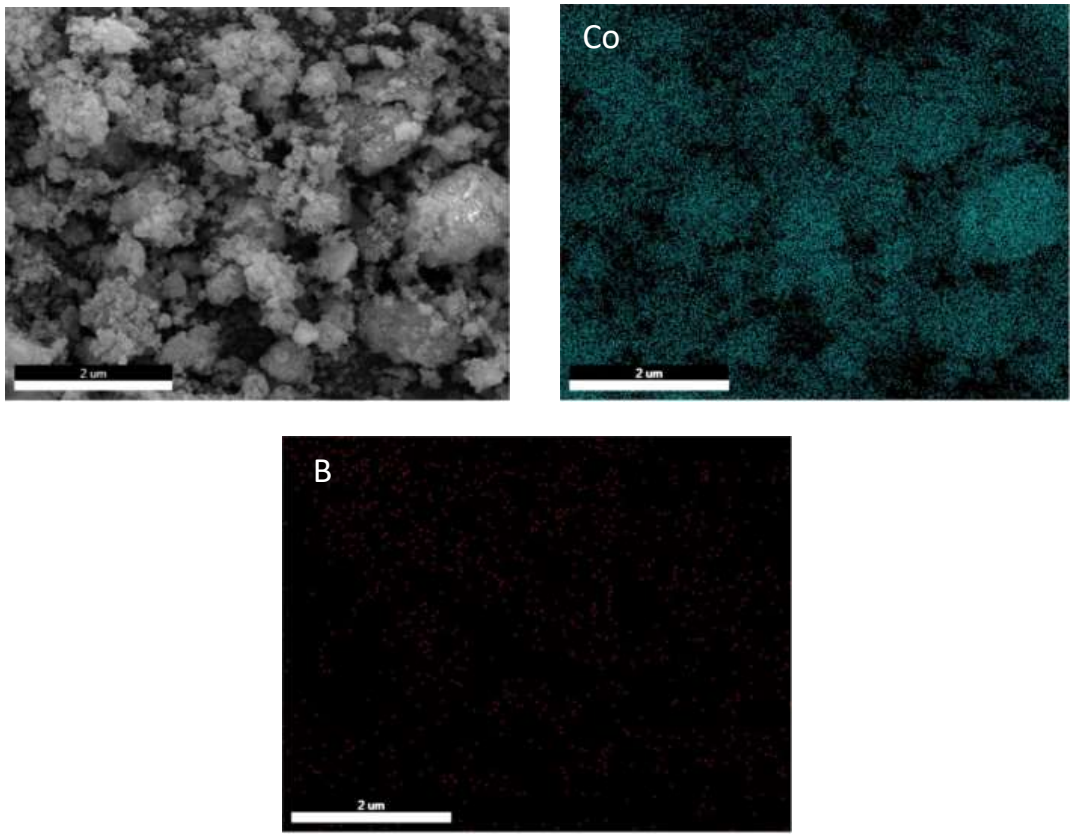
برای تکمیل بررسی ساختار و ترکیب نانوذرات سنتز شده در شرایط بهینه، از آنالیز EDS استفاده شد (شکل ۷). این آنالیز به‌منظور بررسی یکنواختی توزیع عناصر در سطح نانوذرات و تأیید حضور مؤثر عنصر کبالت در ساختار انجام شد. در تصاویر حاصل، نقشه‌های جداگانه‌ای برای دو عنصر کبالت (Co) و بور (B) ارائه شده‌اند. همانطوری که مشخص است عناصر کبالت و بور به صورت یکنواخت در ذرات پخش شده‌اند. این امر نشان می‌دهد که نانوذرات دارای ترکیب شیمیایی همگنی است.



شکل ۵: تصویر SEM نانوذرات کبالت سنتز شده در شرایط بهینه قبل از عملیات حرارتی.



شکل ۶: تصویر SEM نانوذرات کبالت سنتز شده در شرایط بهینه پس از عملیات حرارتی (۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۹۰ دقیقه، تحت گاز آرگون).



شکل ۷: تصویر EDS از نانوذرات کبالت سنتز شده در شرایط بهینه.

نتیجه‌گیری

۱- با افزایش دمای فرآیند لیچینگ از ۲۵ به ۸۵ درجه سانتی‌گراد، غلظت یون‌های استخراج‌شده Co^{2+} از حدود ۲۵۰۰ به بیش از ppm ۴۵۰۰ افزایش یافت و دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد به عنوان دمای بهینه لیچینگ گزارش شد.

۲- افزایش زمان واکنش از ۱۵ تا ۲۴۰ دقیقه باعث افزایش صعودی غلظت یون کبالت در محلول لیچینگ شد، به‌طوری‌که در زمان بهینه ۲۴۰ دقیقه غلظت استخراج‌شده کبالت به حدود ppm ۶۸۰۰ رسید.

۳- با افزایش نسبت وزنی عامل احیاکننده (بوروهیدرید سدیم $NaBH_4$) به نمک کبالت از ۰/۲۵ به ۲ در pH برابر با ۱۰/۴، اندازه میانگین ذرات به طور چشمگیری از ۳۷۹ نانومتر به ۲۳ نانومتر کاهش یافت.

۴- در نسبت‌های پایین احیاکننده، احیا به صورت کامل انجام نگرفته و فازهای اکسیدی نظیر Co_3O_4 در کنار فازهای CoB و Co تشکیل می‌شوند. این در حالی است که با افزایش نسبت احیاکننده، فازهای نهایی به سمت تشکیل فازهای CoB و Co متمایل می‌شوند.

۵- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که نانوذرات سنتزشده دارای ساختار نامنظم بوده و تمایل به کلوخه‌شدن دارند. آنالیز EDS توزیع همگن و یکنواخت عناصر کبالت و بور را در نمونه‌های سنتزشده تأیید کرد.

References

[1] Gao, H., Liu, S., Li, Y., Conte, E., & Cao, Y. (2017). A critical review of spinel structured iron cobalt oxides based materials for electrochemical energy storage and conversion. Nanomaterials, 7(11), 370.
[2] Abbruzzese, C., Veglio, F., & Ubaldini, S. (1995). Process optimization in hydrometallurgical treatment of spent cobalt-containing catalysts. Hydrometallurgy, 39(3), 265–284.
[3] Biswas, R. K., Ghosh, A., & Bhattacharyya, K. K. (2009). Kinetics of leaching of cobalt from converter slag with sulphuric acid. Hydrometallurgy, 96(1–2), 72–75.
[4] Raghavan, P., & Dai, L. (2012). Thermal stability and crystallization of Co–B amorphous alloys. Journal of Alloys and Compounds, 536, S112–S116.
[5] Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Joy, D. C., Lyman, C. E., Echlin, P., Lifshin, E., Sawyer, L., & Michael, J. R. (2017). Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis (4th ed.). Springer.