



دانشگاه حکیم سبزواری

اولین کنفرانس بین‌المللی، پنجمین کنفرانس ملی و نمایشگاه جانبی

صنعت سیمان و افق پیش رو

ایران/تهران ۲۰-۱۹ آبان ۱۳۹۸



قابلیت اکسیدهای فلزی نانوساختار برای حذف گاز مونوکسیدکربن منتشرشده از دودکش کارخانجات سیمان

سیدعلیرضا حسینی^{۱*}، سیدمحمد مهدی نوری^۲، مهدی کاتبی^۳، مصطفی علیشاهی^۱

۱- استادیار گروه مواد و پلیمر، دانشگاه حکیم سبزواری

۲- استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشگاه حکیم سبزواری

۳- دانشجوی کارشناسی مواد و پلیمر، دانشگاه حکیم سبزواری

خلاصه

یکی از مهمترین آلاینده‌های گازی که در صنایع سیمان منتشر می‌شود، گاز مونوکسیدکربن است. این گاز سمی بوده و منجر به مسمومیت شدید می‌شود. استفاده از کاتالیست‌های اکسیدی اعمال شده بر بستر متخلخل یک روش برای حذف این ترکیب آلاینده از خروجی دودکش صنایع آلاینده مختلف از جمله کارخانجات سیمان است. در این تحقیق ساخت کاتالیست‌های اکسیدی ارزان قیمت برای حذف گاز مونوکسیدکربن، بر پایه اکسیدهای فلزی نانوساختار بعنوان جایگزین فلزات گرانبها مدنظر است. در این رابطه، کاتالیست‌های نانوساختار از جنس اکسید کبالت و اکسید مس سنتز شده و رفتار کاتالیستی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین بهبود عملکرد این کاتالیست‌ها با ایجاد ترکیب بین اکسیدها و ایجاد ترکیبات دو جزئی بررسی شده است. فرآیند ساخت ذرات کاتالیستی به روش رسوب گذاری شیمیایی همراه با اعمال امواج التراسونیک بوده است. آزمون‌های مشخصه‌یابی شامل روش‌های SEM، EDS و XRD روی ذرات کاتالیستی صورت گرفت. نتایج بررسی‌های میکروسکوپی تولید ذرات اکسیدی نانوساختار با مورفولوژی‌های مختلف را اثبات می‌کند. نتایج عملکرد کاتالیستی اکسید مس نانوساختار برای حذف CO بهتر از اکسید کبالت ساخته شده به روش مشابه است. کاتالیست‌های دوجزئی اکسیدمس/اکسیدکبالت عملکرد مطلوب‌تری نسبت به کاتالیست‌های تک‌جزئی جهت واکنش اکسیداسیون مونوکسیدکربن دارند و باعث کاهش دماهای شروع واکنش کاتالیستی به حدود ۲۰۰ درجه سانتیگراد می‌شود. البته نسبت وزنی دو اکسید بر روی عملکرد کاتالیست موثر است و نسبت اکسید مس به اکسید کبالت ۱ به ۵ بهترین نتایج را بدست می‌دهد.

کلمات کلیدی: گاز مونوکسیدکربن، کارخانجات سیمان، کاتالیست اکسیدی، نانوساختار.

* Corresponding author: دانشکده فنی و مهندسی، گروه مواد و پلیمر

Email: sar.hosseini@hsu.ac.ir



۱. مقدمه

یکی از مشکلات محیط زیستی کارخانجات سیمان انتشار حجم زیادی مونوکسیدکربن به داخل جو است. گاز مونوکسیدکربن گازی بی رنگ، بی بو و سمی است که به شدت با هموگلوبین خون ترکیب شده و باعث کاهش اکسیژن رسانی به سلول‌ها و نهایتاً مسمومیت شدید در انسان می‌شود. وجود این گاز در هوا باعث مشکلات قلبی و تنفسی می‌شود. حد مجاز مونوکسیدکربن محیط برای انسان ۵۰ ppm است و بالاتر این مقدار اثرات سمی آن ظاهر می‌شود. پس می‌بایست غلظت این گاز را در محیط کنترل نمود [۱]. این گاز بواسطه احتراق ناقص ناشی از کمبود اکسیژن در کوره‌های پخت دوار تشکیل می‌شود. همچنین وجود مواد آلی همراه مواد اولیه باعث تشکیل مونوکسیدکربن خواهد شد [۲]. تحقیقات مختلف نشان می‌دهد در محیط اطراف کارخانجات و دودکش‌های کارخانجات سیمان بیشترین آلودگی در مورد آلاینده‌های هوا مربوط به گاز CO است. در بسیاری از کارخانجات مختلف در سراسر جهان این مشکل مشاهده و گزارش شده است. در کشور آلمان، مقادیر غلظت CO از ۳۲ کوره دوار از کارخانجات سیمان اندازه‌گیری شده است که این مقادیر بعضاً تا ۲۴۰۰ ppm گزارش شده است [۳]. در پژوهشی که گودرزی [۴] و همکاران در زمینه اندازه‌گیری غلظت CO برای کارخانه سیمان دورود لرستان در ایران انجام داده‌اند، در برخی فصول سال غلظت تا ۷۲۰ ppm ثبت شده است. بخصوص در دمای پایین در زمستان این مشکل خود را بیشتر نشان می‌دهد. از آنجاییکه در فصل‌های سرد سال از مازوت به جای گاز طبیعی بعنوان سوخت کوره استفاده می‌شود، مشکلات آلودگی در این مواقع بیشتر است. این در حالی است که در است طبق استاندارد ملی ایران مقدار مجاز CO برای کارخانجات سیمان ۴۰۰ ppm می‌باشد [۵].

راه‌های مختلفی برای حذف گاز آلاینده CO از دودکش صنایع آلاینده وجود دارد که عبارتند از بهبود شرایط احتراق، افزودن غلظت اکسیژن در گاز ورودی به کوره و استفاده از دمنده‌های هوا [۲]. تمام این روش‌ها مزایا و معایب خاصی دارند که شاید مهمترین عیب آن‌ها تشکیل گاز خطرناک NO_x در شرایط حذف CO باشد. یک راه موثر برای حذف ترکیب CO استفاده از کاتالیست برای تبدیل CO به گاز کم‌خطرتر CO₂ در دودکش‌های خروجی است. این کاتالیست‌ها را بدلیل نوع واکنش انجام شده کاتالیست‌های اکسیدی می‌گویند. این کاتالیست علاوه بر کنترل گاز CO قابلیت تبدیل ترکیبات آلی فرار (VOC) به مواد کم‌خطرتر را نیز دارا می‌باشند. فلزات گروه پلاتین بطور رایج بعنوان کاتالیست‌های اکسیدی استفاده می‌شوند. ولی مشکلات این مواد از جمله قیمت بالا، در دسترس نبودن و غیرفعال شدن با ترکیبات گوگردی باعث شده است تحقیقات زیادی برای جایگزینی آن‌ها با مواد ارزان قیمت‌تر با پایداری شیمیایی و حرارتی بیشتر انجام گیرد. از جمله مواد جایگزین، ترکیبات اکسیدی فلزات بصورت نانوساختار هستند. این ترکیبات خواص کاتالیستی خوبی برای بسیاری از واکنش‌ها از خود نشان می‌دهند. ساختار نانومتری باعث افزایش سطح واکنش شده و باعث بهبود فعالیت این ترکیبات می‌شود. در این زمینه از نانوذرات اکسید روی، آهن، کبالت، مولیبدن، مس و غیره در تحقیقات مختلف برای حذف CO استفاده شده است [۷]. از بین اکسید فلزات واسطه، اکسید کبالت بهترین فعالیت برای اکسیداسیون مونوکسیدکربن از خود نشان داده است که می‌تواند به علت وجود اکسیژن متحرک در شبکه این اکسید باشد [۶]. همچنین اکسید مس و اکسید آهن نیز در تحقیقات مختلفی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. روش‌های مختلفی وجود دارد که با بکارگیری آن فعالیت کاتالیستی اکسیدهای مربوطه افزایش و خواص ترکیب بهبود می‌یابد. از جمله این روش‌ها کاهش اندازه ذرات، بهبود مورفولوژی ذرات بکار رفته و مخلوط یا کامپوزیت کردن دو یا چند جزء کاتالیستی شامل فلزات فعال و اکسیدهای فلزی است که در تحقیقات مختلفی انجام گرفته است. در این پژوهش، استفاده از ترکیبات اکسیدفلزی نانوساختار بر پایه اکسید کبالت و اکسید مس برای حذف گاز مونوکسیدکربن از جریان گاز مورد ارزیابی قرار گرفته است. استفاده از نسبت‌های مختلف متشکل از این اکسیدها در این تحقیق برای حذف CO مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در این رابطه از یک سیستم کاتالیستی آزمایشگاهی شامل یک کوره استوانه‌ای با جریان گاز حاوی CO استفاده شده



است. کاهش میزان غلظت CO در دماهای مختلف پس از عبور گاز از بستر کاتالیستی در خروجی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نمودار تبدیل CO به گاز CO₂ در دماهای مختلف رسم شده است که فعالیت کاتالیست را نشان می‌دهد.

۲. مواد و روش ها

۲-۱ ساخت کاتالیست ها

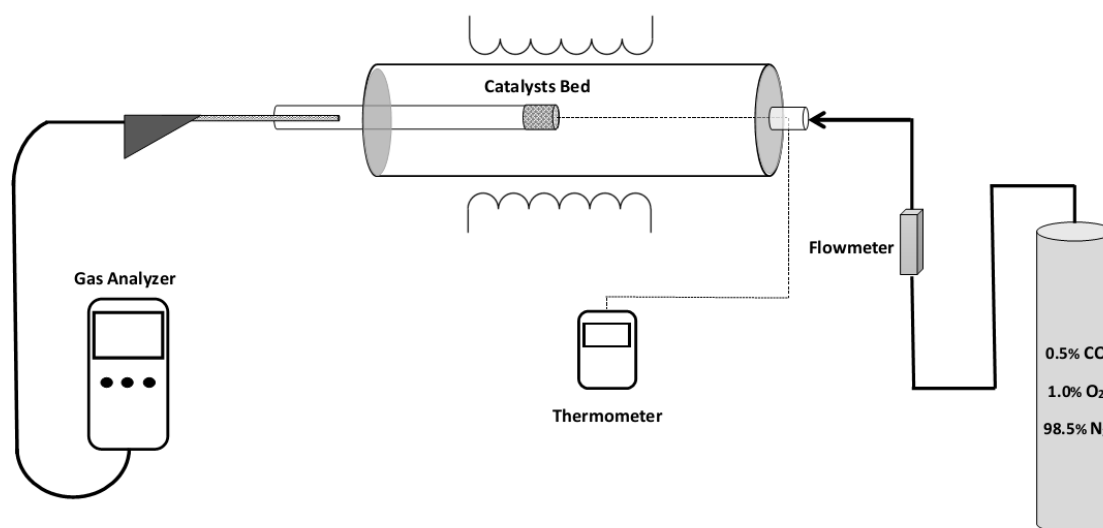
برای سنتز کاتالیست‌های اکسیدی تک‌جزیی و دو جزیی، محلول‌های سولفات مس (CuSO₄) و کبالت کلرید (CoCl₂) با غلظت مختلف به صورت جداگانه تهیه شدند. در ادامه این محلول‌ها به صورت جداگانه روی همزن مغناطیسی با نسبت مشخص مخلوط شدند. سپس تحت امواج التراسونیک توسط سونیکیتور پروبی هیدروکسید سدیم به صورت قطره‌ای با سرعت ثابت به محلول اضافه گردید. بدین صورت نانوذرات هیدروکسیدفلزی تشکیل شد. در ادامه برای شستشو، جداسازی و حذف نمک‌های محلول و محصولات اضافی از کلوئید بدست آمده، از دستگاه سانتریفیوژ استفاده شد. این عملیات برای اطمینان از حذف ترکیبات اضافی سه بار متوالی انجام گردید. رسوبات جداسازی شده در داخل آون با دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد تا خشک گردند. در پایان به منظور تشکیل فاز اکسیدی، رسوب بدست آمده تحت عملیات کلسیناسیون در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ ساعت درون کوره قرار گرفت. برای تولید کاتالیست‌های دوجزیی روش مشابهی انجام شده است، با این تفاوت که مخلوطی از دو محلول حاوی سولفات مس و کلرید کبالت استفاده شده است. مشخصات کاتالیست‌های تک جزیی و دو جزیی بررسی شده در این تحقیق در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۲ مشخصه یابی کاتالیست ها

جهت تعیین اندازه، توزیع و مورفولوژی ذرات کاتالیستی تولیدی در این پژوهش از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM استفاده شده است. این دستگاه به سیستم آنالیزکننده EDS جهت تعیین عناصر موجود در پودرها مجهز بوده است. آزمون XRD در زوایای ۲۰ تا ۸۰ درجه با استفاده از کاتد مس با طول موج ۱/۵۴ انگستروم برای تعیین فازهای تشکیل شده انجام شده است.

۲-۳ بررسی رفتار کاتالیستی

به منظور مطالعه رفتار کاتالیستی نانوذرات کاتالیستی پوشش داده شده داخل بستر قرار گرفته و در مسیر گاز حاوی مونوکسیدکربن با ترکیب ۹۸/۵ درصد N₂، ۱ درصد O₂ و ۰/۵ درصد CO قرار گرفتند. برای انجام آزمون کاتالیستی بایستی سطح کاتالیست‌ها با گاز مونوکسیدکربن در دماهای مختلف تماس پیدا کند و لذا یک بستر متخلخل مناسب نیاز است. در نتیجه از یک توری فلزی از جنس فولاد زنگ نزن استفاده شد تا هم گاز به خوبی از لا به لای منافذ توری عبور کند و هم در برابر دمای بالا مقاوم باشد. برای بستر کاتالیست از پشم شیشه مقاوم در برابر حرارت استفاده شد و سعی گردید کاتالیست به خوبی در کل سطح پشم شیشه به صورت یکنواخت پخش شود. نانوذرات کاتالیستی به مقدار ۵۰ mg توزین و در معرض گاز ورودی با جریان ۱۰۰ cc/min قرار گرفت. در طول این آزمون دمای داخل کوره با سرعت ۱۰ درجه بر دقیقه تا دمای ۵۰۰°C افزایش یافت. غلظت گاز مونوکسیدکربن در دماهای مختلف با سطح کاتالیست واکنش و غلظت گاز مونوکسیدکربن خارج شده از کوره (پس از واکنش با سطح کاتالیست) در قسمت خروجی کوره در دمای ۴۰۰°C با استفاده از دستگاه آنالایزر مدل KIMO اندازه‌گیری شد. شکل ۱ تصویر سیستم کاتالیستی مورد استفاده را نشان می‌دهد.



شکل ۱ - شمای از سیستم مورد استفاده در آزمون کاتالیستی.

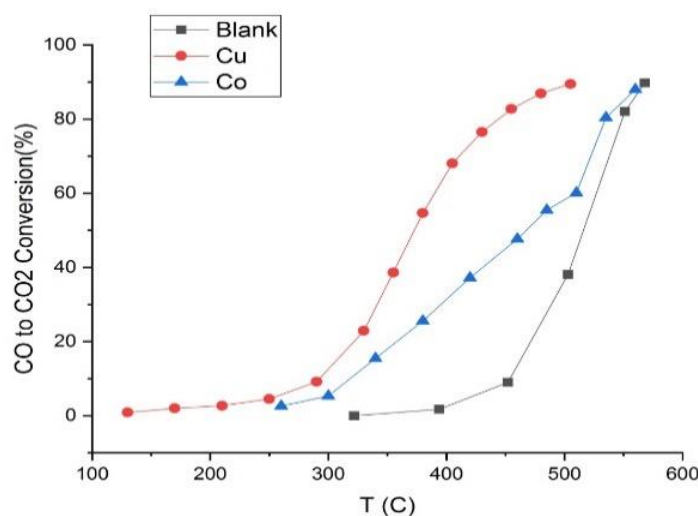
۳. نتایج و بحث

۱،۳ رفتار کاتالیستی مواد تک جزیی

رفتار کاتالیستی دو نوع کاتالیست اکسیدی کبالت و مس از دمای محیط تا دمای بالای ۵۰۰ درجه سانتیگراد مورد بررسی قرار گرفت و در هر دما میزان درصد تبدیل CO به CO₂ محاسبه گردید که نتایج آن در نمودار شکل ۲ نشان داده شده است. مقایسه رفتار کاتالیستی پودرهای نانوساختار اکسیدی تک جزیی با حالت بدون کاتالیست (نمونه شاهد) نشان می‌دهد حضور ذرات اکسیدی تاثیر مثبت قابل ملاحظه‌ای در اکسیداسیون گاز CO دارند. منحنی هر دو کاتالیست سمت چپ منحنی شاهد قرار گرفته است و با افزودن پودرهای کاتالیستی تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد دماهای واکنش کاتالیستی کاهش یافته است. دمای شروع واکنش برای کاتالیست‌های تک جزیی زیر ۳۰۰ درجه سانتیگراد است ولی برای نمونه شاهد بالای ۴۰۰ درجه می‌باشد. همچنین دمای تبدیل CO بمیزان ۵۰ درصد (دمای LOT) برای نمونه های شاهد، اکسیدمس و اکسید کبالت به ترتیب ۵۱۵، ۳۷۰ و ۴۷۰ درجه سانتیگراد است.

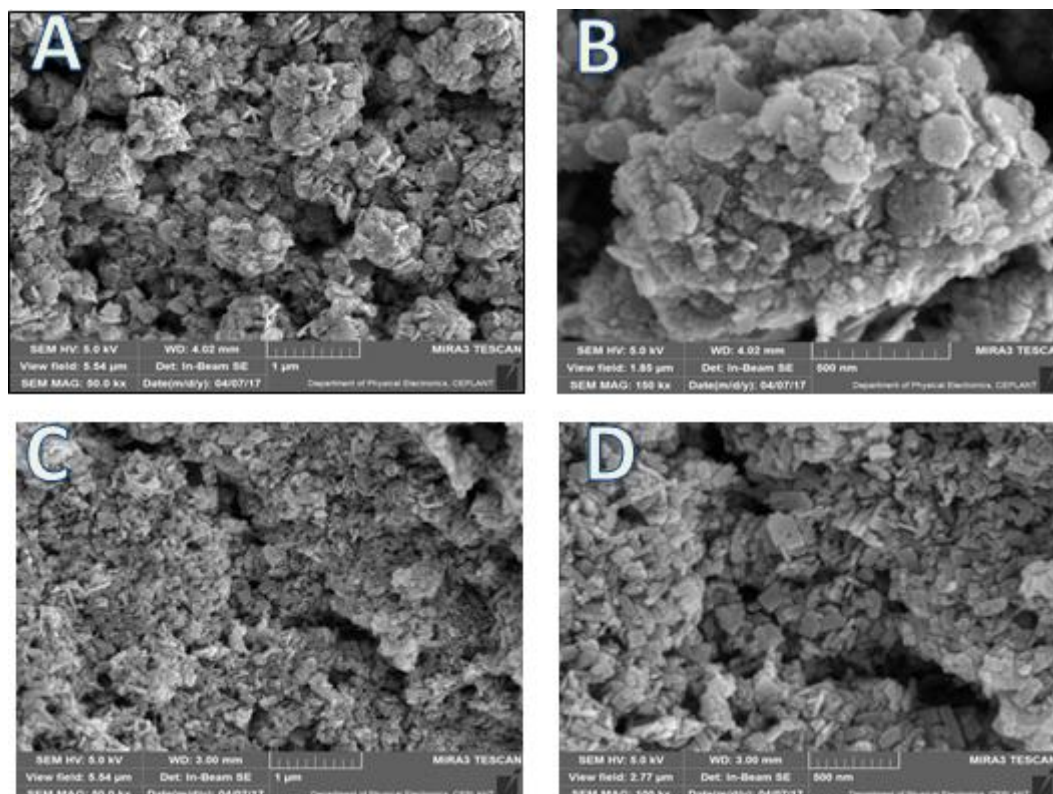
جدول ۱ - مشخصات کاتالیست‌های اکسیدی ساخته شده در این تحقیق.

Catalysts	Cu	1Cu-1Co	1Cu-4Co	1Cu-5Co	1Cu-7Co	1Cu-9Co	Co
Cu:Co ratio of solution	-	1:1	1:4	1:5	1:7	1:9	0
% Co by EDS	0	49	70	82	-	91	100
LOT	370	430	410	270	420	430	470



شکل ۲- درصد تبدیل CO به CO₂ بر حسب دما برای دو کاتالیست نانوساختار اکسید مس و اکسید کبالت و نمونه شاهد.

همین طور که از نمودار شکل ۲ مشخص است دمای LOT و دمای تبدیل صد درصد اکسید مس کمتر از اکسید کبالت بوده است. بنابراین کاتالیست اکسید مس عملکرد بهتری در تبدیل گاز CO به CO₂ نسبت به کاتالیست اکسید کبالت از خود نشان داده است. این نتیجه برخلاف نتایج بدست آمده در تحقیقات گذشته می باشد. طبق گزارشات کامر و هک [۸]. نشان داده شد که فعالیت کاتالیستی اکسید کبالت نزدیک به فلزات نجیب از جمله پلاتین می باشد به طوری که فعالیت کاتالیستی پلاتین ۱۰۰ و اکسید کبالت و اکسید مس به ترتیب ۸۰ و ۴۵ است. شنگ [۹]. به این نتیجه رسید دمای LOT تبدیل گاز CO برای اکسید کبالت ۸۰ درجه سانتیگراد کمتر از اکسید مس می باشد. علت بدست آمدن این نتیجه را می توان به مورفولوژی و اندازه ذرات تولیدی برای این کاتالیست ها می توان نسبت داد. با بررسی تصاویر SEM هر دو نوع کاتالیست در شکل ۳ مشاهده می گردد که توزیع و یکنواختی ذرات اکسید مس بهتر از اکسید کبالت است، اندازه ذرات اکسید مس حدود ۱۲۰ نانومتر و برای اکسید کبالت حدود ۲۰۰ نانومتر بوده که نشان می دهد ذرات اکسید مس ریزتر از اکسید کبالت است و همچنین نانوذرات اکسید کبالت به صورت آگلومره تشکیل شده است که سطح مفید کمتری جهت واکنش ایجاد می کند.

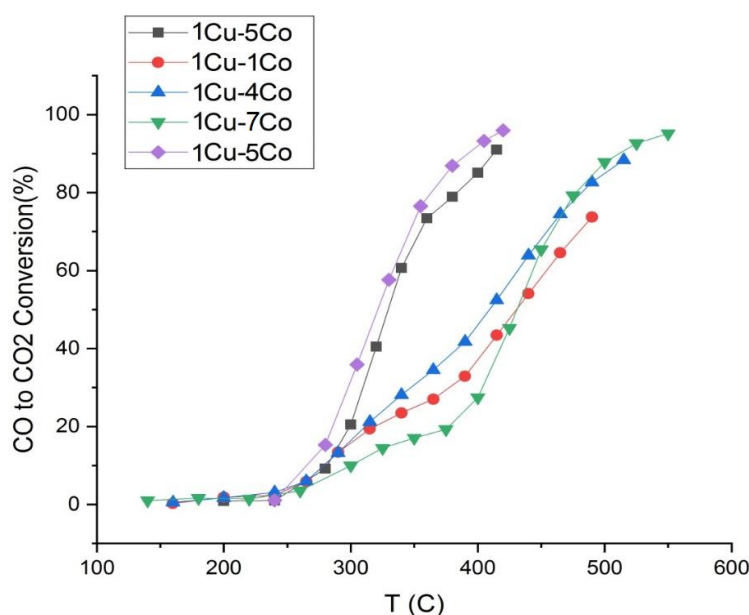


شکل ۳- تصاویر SEM مربوط به کاتالیست اکسید کبالت (A و B) و کاتالیست اکسید مس (C و D) در بزرگنمایی مختلف.

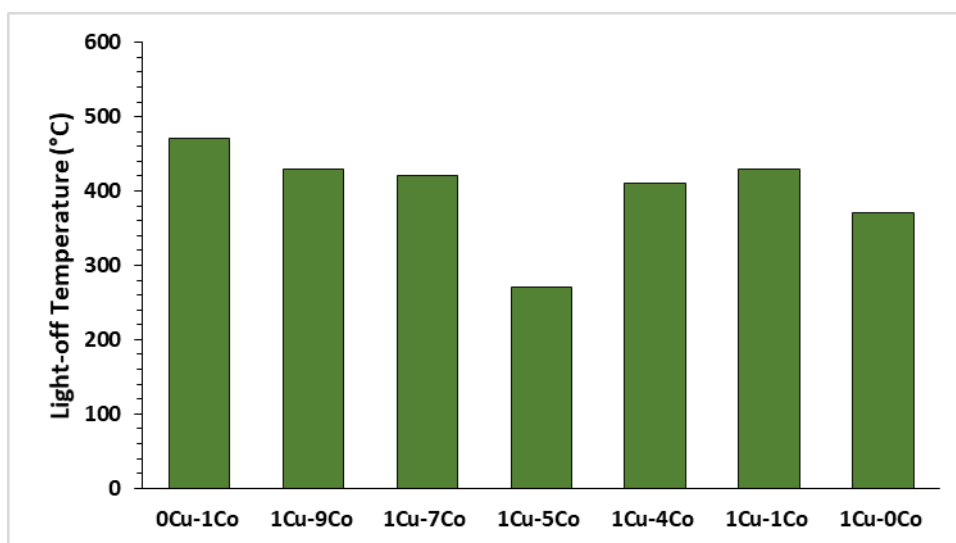
۲.۳ رفتار کاتالیستی مواد دو جزئی

یک روش بهبود فعالیت کاتالیستی اکسیدهای فلزی ترکیب این اکسیدها با یکدیگر و ایجاد ترکیبات دو جزئی و چند جزئی است. در این حالت تعداد سایت های کاتالیستی افزایش می یابد. بدین منظور از سنتز توانان ترکیبات اکسیدمس و اکسیدکبالت برای ایجاد ترکیبات کاتالیستی دو جزئی به روش قبلی استفاده شده است. اثر غلظت نمک های اولیه بر فعالیت کاتالیستی ترکیبات نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۱ نسبت غلظت نمک های اولیه کاتالیست های آورده شده است. همانطور که در جدول مشخص است نتایج درصد عناصر کبالت و مس در پودرهای بدست آمده با غلظت نمک های اولیه مطابقت دارد که نشان دهنده هم رسوبی موفق کبالت و مس و تشکیل همزمان هیدروکسیدهای مس و کبالت است.

نتایج مربوط به فعالیت کاتالیستی اکسیدهای دو جزئی در شکل ۴ آورده شده است. همین طور که از این شکل مشخص است در بین کاتالیست های دو جزئی عملکرد بهتری نسبت به کاتالیست های تک جزئی دارند. نتایج نشان می دهد بهترین شرایط برای ترکیب $1\text{Cu}-5\text{Co}$ با نسبت غلظت $\text{Cu}:\text{Co} = 1:5$ بدست آمده است. شنگ و همکارانش [۹] در تحقیقات خود نیز نتایج مشابهی بدست آورده است و بهترین نسبت را ۵ به ۱ برای ترکیب دو جزئی $\text{Cu}-\text{Co}$ معرفی نموده است. تمام کاتالیست ها تولیدی تقریباً دمای شروع فعالیت کاتالیستی یکسانی در دمای حدود ۲۰۰ درجه سانتیگراد نشان می دهند. اما پارامتر LOT برای نمونه $1\text{Cu}-5\text{Co}$ همانطور که در نمودار شکل ۵ نشان داده شده است از بقیه پایین تر است.

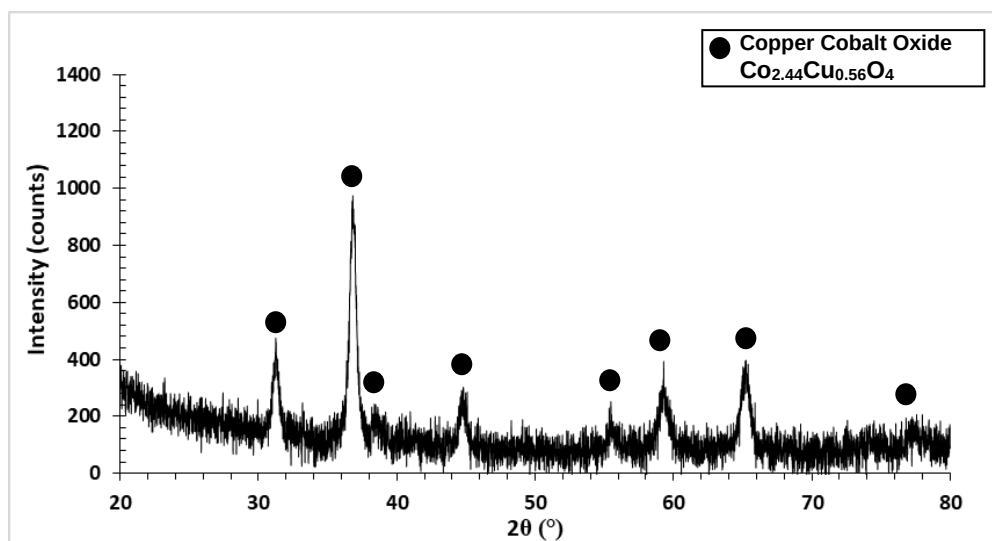


شکل ۴- درصد تبدیل CO به CO₂ بر حسب دما برای کاتالیست‌های Cu-Co با نسبت غلظت‌های متفاوت.



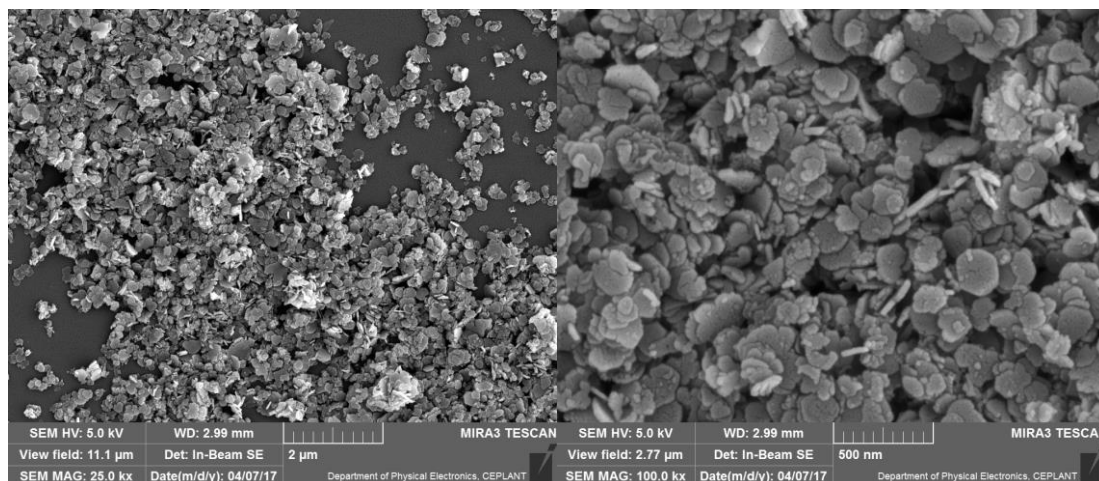
شکل ۵- مقایسه دماهای light-off (LOT) برای پودرهای مختلف.

الگوی اشعه X برای نمونه 1Cu-5Co در شکل ۶ آورده شده است. پیک‌ها به پراش فاز اسپینلی AB₂X₄ نسبت دارد که مس و کبالت در مکان‌های A و B توزیع شده‌اند. بطور دقیق‌تر ساختار فازی نانوذرات تشکیل یافته با ساختار اکسید کبالت مس با فرمول کلی با شماره کارت JCPDS، 01-078-2175 تطابق دارد که در آن X برابر ۰/۵۶ است. حضور این ترکیب با نتایج آزمون EDS برای این پودر که نسبت مس به کبالت را حدود ۱ به ۵ اندازه‌گیری کرده است، همخوانی دارد.



شکل ۶- الگوی پراش اشعه X برای نمونه کاتالیست دو جزئی 1Cu-5Co.

پهنای پیک در الگوی پراش اشعه X، ایجاد ساختارهای نانومتری برای ترکیب دوتایی را تایید می‌کند. با استفاده از رابطه شرر اندازه ذرات حدود ۲۰ نانومتر اندازه گیری شده است. تصویر SEM از این نمونه تشکیل پولک‌هایی با قطر حدود ۲۰۰ نانومتری بصورت چند ضلعی را نشان می‌دهد (شکل ۷). ضخامت این پولک‌ها حدود ۲۰ نانومتر است که نتایج بدست آمده با استفاده از رابطه شرر یکسان است. همچنین این مورفولوژی به ساختار اکسید کبالت تک جزئی در شکل ۳ شباهت دارد.

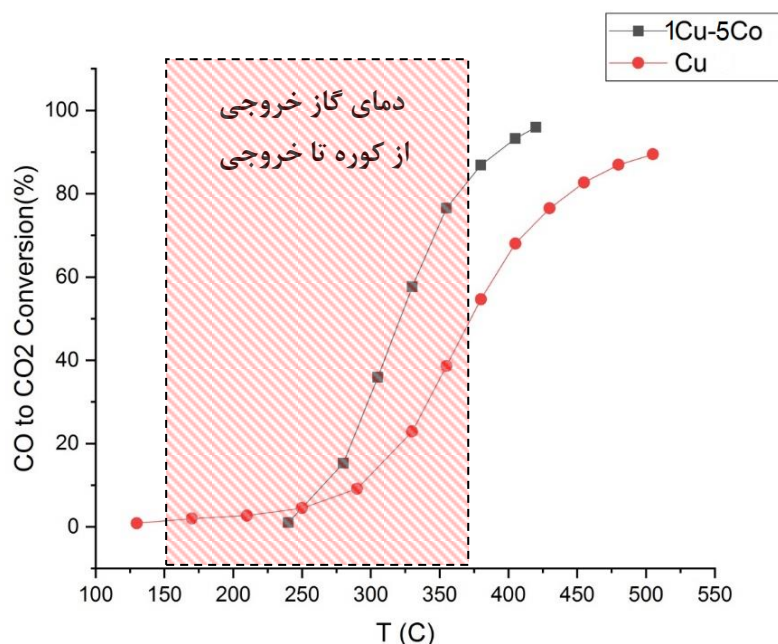


شکل ۷- تصاویر SEM برای پودرهای کاتالیست دو جزئی 1Cu-5Co.

پس از پایان آزمون فعالیت کاتالیستی برای ترکیبات دو جزئی و تک جزئی، جهت بررسی عملکرد بین این دو نوع کاتالیست برای اکسیداسیون گاز CO نمودار آن‌ها را در شکل ۸ با هم مقایسه شده است. همانطور که مشخص است نمونه 1Cu-5Co در بین مواد دو جزئی بهترین عملکرد را داشت و کاتالیست Cu در بین مواد تک جزئی بهترین عملکرد را داشت. همانطور که در این نمودار مشخص است عملکرد کاتالیست دوتایی 1Cu-5Co بهتر از کاتالیست تک جزئی اکسیدمس است و در واقع می‌توان نتیجه گرفت که با کامپوزیت شدن دو جزء کاتالیستی می‌توان درصد تبدیل گاز CO را



در دماهای پایین‌تر افزایش داد. با توجه به اینکه دمای گاز خروجی از کوره دوار در کارخانه سیمان حدود ۳۷۰ درجه سانتیگراد و دمای خروجی از دودکش حدود ۱۵۰ درجه سانتیگراد گزارش شده است، کاتالیست تولید شده در شرایط بهینه می‌تواند برای حذف گاز CO از جریان گاز در این مسیر استفاده گردد. هر چه این کاتالیست‌ها نزدیک‌تر به خروجی کوره باشند، درصد حذف CO بالاتر بوده و به نزدیک ۹۰ درصد خواهد رسید.



شکل ۸- درصد تبدیل CO به CO₂ بر حسب دما برای کاتالیست‌های 1Cu-5Co و Cu.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق قابلیت کاتالیست‌های اکسیدی نانوساختار تولید شده از اکسیدهای کبالت و اکسید مس به منظور حذف گاز مونوکسیدکربن از دودکش کارخانجات سیمان مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور از یک سیستم کاتالیستی با غلظت گاز CO معادل ۵۰۰۰ ppm استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ذرات نانوساختار می‌تواند فعالیت کاتالیستی را به طور قابل توجهی نسبت به نمونه شاهد افزایش دهد. با ایجاد ترکیبات دو تایی از اکسید کبالت و اکسید مس، می‌توان فعالیت کاتالیستی را تا حد بسیار زیادی افزایش داد. بطوریکه دمای LOT برای ترکیبات با نسبت ۱ به ۵ اکسید مس به اکسیدکبالت حدود ۲۷۰ درجه سانتیگراد کاهش می‌یابد. با توجه به شرایط گاز خروجی کارخانه سیمان این کاتالیست‌ها می‌توانند به طور موثری جهت حذف مونوکسیدکربن از طریق واکنش تبدیل کاتالیستی عمل کنند.

۱۲. مراجع

[1] IAPA (2008), "Carbon Monoxide in the Workplace", Industrial Accident Prevention Association.



- [2] Greer, W. L., (2003), “Interactions Among Gaseous Pollutants from Cement Manufacture and Their Control Technologies”, R&D Serial No. 2728, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA.
- [3] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2011), “Environmental Data of the German Cement Industry”, <https://www.vdz-online.de/publications/environmental-data>.
- [4] Goudarzi G. et al. (2017), “An assessment on dispersion of carbon monoxide from a cement factory”, Environmental Health Engineering and Management Journal, **4**(3), x-x.
- [۵] تصویب نامه هیئت وزیران، شماره ۹۵۰۵/ت ۴۹۰۶۵هـ.
- [6] Yan L., Zhang X, Ren T, Zhang H, Wang X, Suo J. (2002) “Carbon Monoxide Oxidation Using Cobalt Catalysts: A Short Review.”, **8** (3), pp. 860–1.
- [7] Alizadeh, M., Hosseini, S. A., Nouri, S. M. M., Khalighi, Z., & Delfarah, B. (2018), “Low-cost nanostructured Fe₂O₃-based composite catalysts synthesized by mechanical milling for CO oxidation reaction,” Chemical Engineering Communications, **205**(8), pp. 1041–1049.
- [8] Royer S, Duprez D. Royer S, Duprez D. (2011), “Catalytic Oxidation of Carbon Monoxide over Transition Metal Oxides,” **3** (1), pp. 24–65.
- [9] Shu J, Xia W, Zhang Y, Cheng T, Gao M. (2008), “Low-temperature Catalytic Reduction of Nitrogen Monoxide with Carbon Monoxide on Copper Iron and Copper Cobalt Composite Oxides,” **21**(4), pp. 393–400.