

ساخت و بررسی خواص ساختاری نانوکاتالیست‌های NiO/MgO تهیه شده به روش سل-ژل اصلاح شده

علی عبیدآوی^{۱*} و سهراب سنجابی^۲

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز، گروه مهندسی مواد، اهواز، ایران

۲- دانشگاه تربیت مدرس، گروه مهندسی مواد، تهران، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۲/۱۰/۳۰، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۲/۱۲/۱۲، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۳/۰۱/۱۸

چکیده

اکسید نیکل بر پایه اکسید منیزیا به عنوان کاتالیست و در فرآیندهای ریفرمینگ متان برای تولید گاز سنتزی، کاربردهای فراوانی در صنایع شیمیایی و متالورژیکی دارد. در این تحقیق نانوکریستال‌های NiO/MgO با درصد‌های مختلف نیکل (۱۰ و ۱۵ درصد وزنی) و با استفاده از روش سل-ژل اصلاح شده تهیه شدند. عملیات حرارتی کلسیناسیون پیش ماده‌ها بعد از بدست آمدن ژل پلیمری در دماهای ۷۰۰ °C و ۸۰۰ °C و به مدت ۴ ساعت انجام گردید. جهت مشخصه‌یابی نانوکریستال‌ها، از آنالیزهای XRD، BET-BJH، FESEM-EDX و TGA-DTA استفاده شد. نتایج حاصل از آنالیز اشعه ایکس نشان دادند که با افزایش میزان نیکل و همچنین دمای عملیات حرارتی کلسیناسیون اندازه کریستالی نانوذرات به میزان ناچیزی (۱۷ تا ۲۵ نانومتر) افزایش می‌یابد. همچنین نانوذرات بدست آمده دارای ساختار مزوچفره هستند و توزیع اندازه حفرات در نانوکریستال‌های NiO/MgO با ۱۰ درصد وزنی همگن‌تر است، در حالیکه مساحت سطح ویژه در هر دو یکسان و در حدود ۳۰ m²/g می‌باشد. نتایج حاصل از بررسی‌های مورفولوژی سطح توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی نشان می‌دهند که نانوذرات بدست آمده با ۱۵ درصد وزنی نیکل، کوچکتر، به شکل کروی و دارای توزیع همگن‌تری هستند.

واژه‌های کلیدی: نانوکاتالیست، اکسید نیکل، منیزیا، سل-ژل اصلاح شده، خواص ساختاری.

۱- مقدمه

کربنات و در صنایع فولاد جهت تولید آهن اسفنجی در فرآیند ریفرمینگ متان استفاده می‌شود [۱،۲]. غیرفعال شدن کاتالیست، یکی از مشکلاتی است که در این فرآیند رخ می‌دهد که ناشی از انباشتگی کک بر روی سطح کاتالیست می‌باشد [۳،۴]. استفاده از کاتالیست‌های فلزات نجیب مانند Pt، Ru، Pd و غیره بر پایه‌های اکسیدی در مقابل تشکیل کک حساسیت کمتری از خود نشان می‌دهند [۵-۷]. اما بدلیل دسترسی محدود به فلزات نجیب و قیمت بالای آنها، تمایل زیادی به استفاده از نیکل

امروزه از کاتالیست نیکل بر پایه منیزیا جهت تولید گاز سنتزی، که از فرآیندهای ریفرمینگ متان حاصل می‌شود، استفاده می‌گردد. گاز سنتزی مخلوطی از هیدروژن و منواکسید کربن است که در فرآیندهای شیمیایی و متالورژی متعددی بکار گرفته می‌شود. گازهای فوق در صنایع پتروشیمی برای تولید محصولات پتروشیمی همچون سنتز آمونیاک، متانول، فیشر-تروپش، تولید

*عده‌دار مکاتبات: علی عبیدآوی

نشانی: اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، گروه مهندسی مواد

تلفن: ۰۶۱۱-۲۲۳۳۲۱۶۳، دورنگار: ۰۶۱۱-۲۲۳۳۲۱۶۳، پست الکترونیکی: aliobedavi@yahoo.com

بررسی خواص ساختاری نانوکریستال‌های NiO/MgO مانند فازهای بدست آمده، اندازه کریستالی نانوذرات، مورفولوژی و اندازه ذرات و همچنین مساحت سطح ویژه، اندازه حفرات و توزیع اندازه حفرات توسط آنالیزهای دستگاهی مورد بررسی قرار گرفتند.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- مواد اولیه

از نیترات نیکل آبدار $(\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$ و نیترات منیزیم $(\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$ به عنوان پیش ماده‌های نیکل و منیزیم استفاده شد. از اسید سیتریک بی‌آب $(\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7)$ و دی‌اتیلن گلیکول مونواتیلن اتر به عنوان عوامل ایجاد کننده رزین پلیمری و از آب دوبار تقطیر به عنوان حلال استفاده شد. همه مواد مصرفی با درجه خلوص بالا و از نوع مرک بودند.

۲-۲- تجهیزات

به منظور ساخت نانوکریستال‌های NiO/MgO، در ابتدا مقدار مناسبی از نیترات نیکل (۱۰ و ۱۵ درصد وزنی) را در آب دوبار تقطیر حل کرده و سپس دی‌اتیلن گلیکول مونواتیلن اتر (DGME) و اسید سیتریک با نسبت مولار ۴ به آرامی به محلول فوق اضافه شد.

سپس نیترات منیزیم در آب دوبار تقطیر حل شده و به آرامی به محلول فوق اضافه و تحت همزن به مدت یک ساعت در دمای 50°C قرار داده شد. سپس جهت تغلیظ محلول، دما به 80°C رسانده شد و به مدت یک ساعت تحت همزدن قرار داده شد. با حرارت بیشتر محلول تا دمای 120°C و به مدت یک ساعت، باقیمانده حلال تبخیر شده و تبدیل به زیروژل شد. برای تکمیل خشک شدن و حذف حلال آلی، زیروژل به مدت یک ساعت و در دمای 200°C در آون قرار داده شد.

در این حالت، پودر خاکستری رنگ به عنوان پیش ماده کاتالیست بدست آمد. پیش ماده حاصله به مدت ۴ ساعت در کوره و در دمای 700°C و 800°C حرارت داده شد که در نهایت یک پودر سبز رنگ به عنوان کاتالیست NiO/MgO بدست آمد.

(بدلیل فراوانی و ارزان بودن و همچنین قابلیت بالای کاتالیستی نسبت به فلزات دیگر) بوجود آمده و تلاش‌ها برای افزایش مقاومت در برابر انباشتگی کک بر روی سطح کاتالیست ادامه دارد [۸].

روش‌های مختلفی برای افزایش فعالیت و پایداری کاتالیست نیکل در فرآیند ریفرمینگ متان استفاده شده است از جمله، استفاده از پایه‌های کاتالیستی مختلف [۹]، استفاده از ارتقاء دهنده‌ها [۱۰]، تغییر شرایط واکنش، روش‌های سنتز مختلف [۱۱] و بررسی پارامترهای سنتز مانند دمای کلسیناسیون، میزان نیکل [۱۲] و غیره می‌باشند. ثابت شده است که اندازه کریستالی نیکل و پایه کاتالیست نقش مهمی بر روی فعالیت و پایداری کاتالیستی در فرآیند ریفرمینگ متان بازی می‌کنند [۱۳]. مطالعات اخیر نیز نشان می‌دهد که کاتالیست NiO/MgO که در آن فاز NiO با پایه کاتالیزور، تشکیل محلول جامد (NiO-MgO) می‌دهد مانع از انباشتگی کک بر روی سطح کاتالیزور و مانع از غیرفعال شدن آن می‌شود. تاکنون کاتالیست نیکل بر روی پایه‌های اکسیدی به روش‌های مختلفی از جمله روش تلقیح [۱۴، ۱۵]، هم‌رسوبی [۱۶]، سل-ژل و غیره سنتز شده است. روش سل-ژل روشی بسیار مناسب جهت سنتز کاتالیست‌های فلزی با پراکندگی بالا و یکنواخت فلز بر روی پایه و همچنین پایداری بالا در مقابل تشکیل کک می‌باشد. از این روش بدلیل امتیازات متعدد، جهت ساخت کاتالیست‌های $\text{Ni}/\text{MgO}/\text{ZrO}_2$ و $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ و غیره استفاده شده است [۱۷، ۱۸]. اما تاکنون گزارشی مبنی بر سنتز نانوکریستال‌های NiO/MgO به روش سل-ژل اصلاح شده (پچینی) داده نشده است. پچینی در سال ۱۹۶۷ با معرفی روشی به همین نام که در واقع اصلاحی بر روش سل-ژل کلاسیک است، توانست در پیچه‌ای جدید را برای سنتز ساختارهای اکسید فلزی بگشاید. اساس شیمی این روش آبدایی (استری شدن) از یک کربوکسیلیک اسید و یک الکل است [۱۹].

در این تحقیق، نانوکریستال‌های NiO/MgO در بارگذارهای مختلف نیکل (۱۰ و ۱۵ درصد وزنی) و با استفاده از روش سل-ژل اصلاح شده (پچینی) در دو دمای کلسیناسیون (700°C و 800°C) تهیه شدند. سپس جهت

۳- نتایج و بحث

۳-۱- روش‌های بررسی خواص فیزیکی و شیمیایی

نانوکریستال‌های NiO/MgO

ساختار فازی و کریستالی نمونه‌ها توسط آنالیز پراش اشعه X (X-ray diffraction) مدل Philips Xpert، با ولتاژ ۴۰ kV و جریان ۳۵ mA (پرتونگاری با تشعشع CuK_{α} ، $\lambda=1/0.5406 \text{ \AA}$) مشخص شد. نمونه‌ها در محدوده ۸۰-۳۰ درجه با گام ۰/۰۲ مورد آنالیز قرار گرفتند. همچنین با استفاده از داده‌های XRD اندازه کریستالی را می‌توان با استفاده از رابطه دی‌بی-شرر که در معادله ۱ آمده است، به صورت تخمینی اندازه‌گیری کرد که:

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

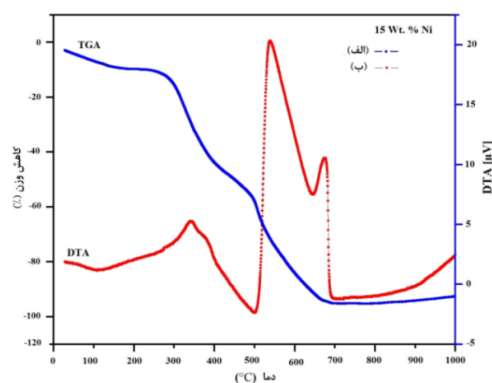
در این فرمول β پهنای نصف ارتفاع پیک ماکزیمم است، D اندازه کریستالی و k عددی ثابت، در حدود ۰/۹ است، λ طول موج اشعه X است که از روی دستگاه خوانده می‌شود و θ زاویه‌ای است که از روی محور افقی XRD خوانده می‌شود. برای تعیین ترکیب شیمیایی از آنالیز EDX استفاده شد. همچنین مورفولوژی سطح و اندازه ذرات تشکیل شده توسط FESEM مشخص شد. جهت بررسی چگونگی تخریب ساختاری کاتالیزورهای تهیه شده و تعیین دمای عملیات حرارتی مناسب جهت کلسیناسیون کاتالیزورها و همچنین پایداری گرمایی نمونه‌ها از آنالیز حرارتی که شامل آنالیز گرماوزنی (TGA) و گرماسنجی افتراقی (DSC) می‌باشد، استفاده شد. بدین منظور نمونه‌ها در محدوده دمای اتاق تا دمای 1000°C و با نرخ افزایشی $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ مورد بررسی قرار گرفتند. جهت انجام این آنالیز از اتمسفر N_2 با دبی ثابت $10 \text{ ml}/\text{min}$ استفاده شد (دستگاه مورد استفاده PI Thermal Science STA 1500). برای بدست آوردن مساحت سطح ویژه، حجم حفرات و توزیع اندازه حفرات نانوکریستال‌های تهیه شده، از روش جذب و دفع نیتروژن (آنالیز BET برای محاسبه مساحت سطح ویژه کاتالیزور و از روش BJH برای تعیین توزیع اندازه و حجم حفرات) استفاده شد (دستگاه Belsorp mini II ساخت شرکت ژاپنی Bel Japan). قبل

از اندازه‌گیری لازم است آب و دیگر گازهای موجود در ظرف اندازه‌گیری و روی سطح نمونه حذف شود. برای این منظور نمونه‌ها در دمای 250°C و به مدت ۴ ساعت گاززدایی شده‌اند.

۳-۲- نتایج حاصل از آنالیز حرارتی TGA-DTA

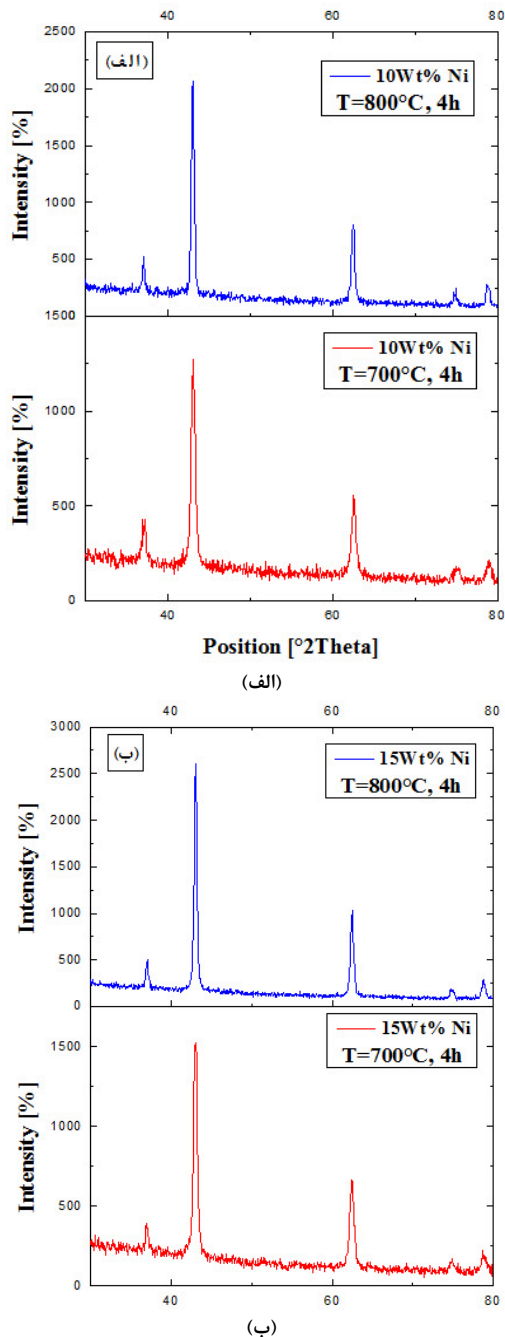
تصاویر ۱-الف و ۱-ب به ترتیب نمودارهای آنالیز حرارتی گرماوزنی و دیفرانسیلی افتراقی نانوکریستال‌های NiO/MgO را که در آنها میزان نیکل ۱۵ درصد وزنی است را نشان می‌دهد.

درصد کاهش وزن کلی، حدود ۸۶٪ وزن پیش ماده اولیه است و این کاهش وزن در ۴ مرحله رخ می‌دهد. اولین مرحله کاهش وزن از 100°C الی 309°C است. این مقدار کاهش وزن در حدود ۹ درصد پیش ماده اولیه می‌باشد که پیک گرماگیر در دمای حدود 110°C متعلق به تبخیر آب جذب شده بر روی سطح و در ساختمان پیش ماده است. دومین و سومین مرحله کاهش وزن به ترتیب در گستره دمایی $309-422^{\circ}\text{C}$ و $422-516^{\circ}\text{C}$ اتفاق می‌افتد که میزان کاهش وزن در هر کدام به ترتیب برابر با ۳۰ و ۱۰ درصد پیش ماده اولیه می‌باشد که به تخریب ترکیب‌های آلی و خروج نیترات‌ها مربوط می‌شود که با توجه به نمودار DSC، پیک گرمازا در دماهای 347°C مربوط به این تحولات می‌باشد.



شکل ۱: نتایج آنالیز حرارتی نانوکریستال‌های NiO/MgO تهیه شده با استفاده از روش سل-ژل اصلاح شده، الف) TGA و ب) DSC.

چهارمین مرحله کاهش وزن در محدوده دمای $516-690^{\circ}\text{C}$ رخ می‌دهد، که این مقدار در حدود ۳۶



شکل ۲: نتایج آنالیز XRD نانوکریستال‌های NiO/MgO در دماهای ۷۰۰ و ۸۰۰ °C حاوی، الف) ۱۰ wt.% نیکل و ب) ۱۵ wt.% نیکل.

۳-۴- بررسی نتایج FESEM و EDX

شکل ۳ مورفولوژی سطح نانوکریستال‌های NiO/MgO با درصدهای مختلف بارگذاری نیکل را نشان می‌دهد. شکل‌های ۳-الف، ۳-ب و شکل‌های ۳-ج، ۳-د به ترتیب

درصد پیش ماده اولیه است که به دی‌هیدرو اکسیداسیون هیدروکسیدهای منیزیم و تجزیه کمپلکس‌های نیکل-منیزیم نسبت داد. از دمای ۶۹۰ °C به بعد کاهش وزن خاصی مشاهده نمی‌شود.

۳-۳- نتایج XRD نانوکریستال‌های NiO/MgO

تصاویر ۲-الف و ۲-ب به ترتیب الگوهای پراش اشعه X برای نانوکریستال‌های NiO/MgO با درصدهای مختلف نیکل ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی و دمای کلسینه مختلف، را نشان می‌دهد.

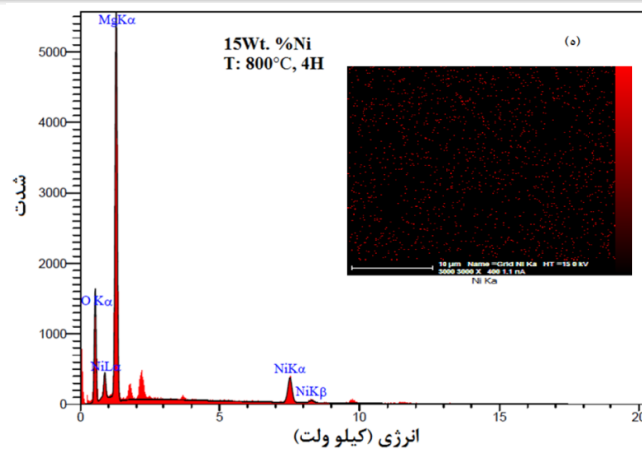
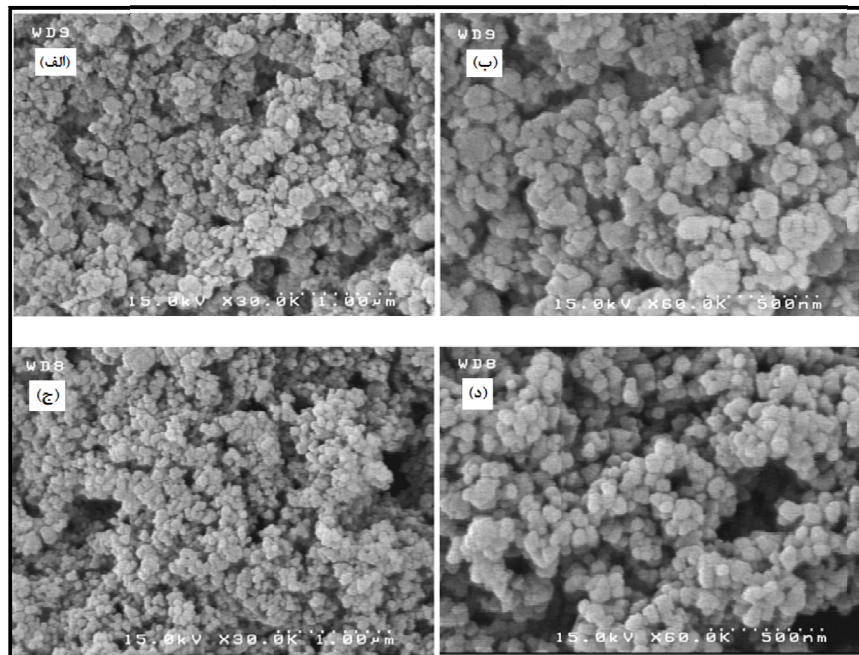
در شکل ۲-الف، کاتالیست NiO/MgO 10 wt.% و دمای کلسیناسیون ۷۰۰ °C پیک‌های تیز در زوایای ۳۷/۴۴۳۰، ۴۳/۰۶۵۴، ۶۲/۶۹۴۹، ۷۵/۰۲۶۲ و ۷۸/۹۱۸۱ درجه به ترتیب به صفحات (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰)، (۳۱۱) و (۲۲۲) تعلق دارند. نتایج حاصل از آنالیز فاز، فقط حضور فاز پریکلز (MgO) را نشان می‌دهد که به خوبی با کارت استاندارد ۰۶-۰۸۷-۰۱ با پارامتر شبکه ۴/۲ آنگستروم سازگار است. با افزایش میزان نیکل از ۱۰ تا ۱۵ درصد وزنی (در شکل ۲-ب، دمای کلسیناسیون ۷۰۰ °C)، پیک‌های کمی به سمت چپ و زوایای کوچکتر و دقیقاً در زوایای ۳۶/۹۰۵۳، ۴۳/۰۶۰۶، ۶۲/۴۲۸۰، ۷۴/۸۸۹۹ و ۷۸/۷۷۱۹ درجه ظاهر شدند که نشان دهنده تشکیل محلول جامد MgO-NiO می‌باشد.

نتایج حاصل از قسمت به خوبی با نتایج رضایی و همکارانش مطابقت دارد [۲۰].

همچنین همانطور که در شکل ۲ دیده می‌شود با افزایش میزان نیکل و دمای کلسیناسیون، شدت پیک‌ها افزایش و پهنای آنها کاهش می‌یابد. افزایش شدت پیک‌ها نشان دهنده افزایش درجه کریستالی نانوذرات و کاهش پهنای آنها نشان دهنده بزرگ شدن اندازه ذرات کریستالی است که این موضوع به علت بهم پیوستن ذرات نیکل در بارگذاری‌های بالا و رشد ذرات در دماهای بالا می‌باشد. در جدول ۱، خواص ساختاری نانوکریستال‌های NiO/MgO آورده شده است. همانطوریکه مشاهده می‌شود اندازه کریستالی ترکیب NiO/MgO کلسینه شده در دمای ۷۰۰ °C، با افزایش میزان نیکل از ۱۰ تا ۱۵ درصد وزنی از ۱۷ نانومتر به ۱۹ نانومتر افزایش می‌یابد.

جدول ۱: تاثیر میزان نیکل و دمای کلسیناسیون بر روی خواص ساختاری نانوکریستال های NiO/MgO.

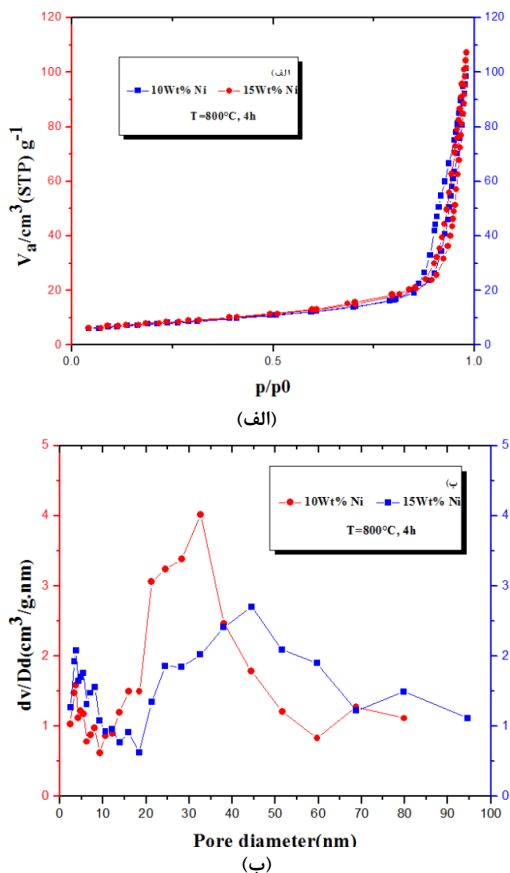
Ni content (wt.%)- Temperature	S _{BET} (m ² /g)	Pore volume (cm ³ /g)	Average pore sizes (nm)	Average crystallite size (nm)
۱۰-۷۰۰	۳۰	۰/۱۴۲۹	۲۳/۱۵۷	۱۷
۱۰-۸۰۰	-	-	-	۲۵/۵
۱۵-۷۰۰	۳۰	۰/۱۶۲۱	۲۳/۷۳۱	۱۹
۱۵-۸۰۰	-	-	-	۲۵



شکل ۳: تصاویر SEM در بارگذارهای مختلف نیکل نانوکریستال های NiO/MgO در بزرگنمایی های مختلف، الف و ب) ۱۰ درصد وزنی، ج و د) ۱۵ درصد وزنی و ه) آنالیز EDX نانوکریستال های NiO/MgO با ۱۵ درصد وزنی نیکل و آنالیز map ذرات نیکل.

نیکل به شکل کروی و دارای ذراتی در ابعاد نانومتری هستند. اما در ۱۵ درصد وزنی ذرات کروی تر و از هم جدا هستند در حالیکه ذرات تشکیل شده در نانوکریستال های

مربوط به بارگذارهای ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی نیکل می باشند که در دمای ۷۰۰ °C و به مدت ۴ ساعت کلسینه شده اند. شکل ذرات در هر دو میزان بارگذاری



شکل ۴: الف) نمودارهای جذب/واجذب نیتروژن و ب) توزیع اندازه حفرات نانوکریستال‌های NiO/MgO در نسبت‌های مختلف نیکل.

۴- نتیجه‌گیری

نانوکریستال‌های NiO-MgO در بارگذاری‌های مختلف نیکل و دمای کلسیناسیون مختلف و با استفاده از روش سل-ژل اصلاح شده سنتز شدند. نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشند:

- نتایج حاصل از آنالیز فاز در نانوکاتالیست NiO/MgO با ۱۰ درصد وزنی نیکل، فقط حضور فاز پریکلاز (MgO) را نشان داد که با افزایش میزان نیکل تا ۱۵ درصد وزنی، محلول جامد MgO-Ni تشکیل می‌شود.

- نتایج حاصل از آنالیز اشعه ایکس نشان داد که با افزایش میزان نیکل و همچنین دمای عملیات حرارتی کلسیناسیون اندازه کریستالی افزایش می‌یابد که این میزان در دمای ۷۰۰ °C، با افزایش میزان نیکل از ۱۰ تا ۱۵ درصد وزنی از ۱۷ به ۱۹ nm افزایش می‌یابد.

NiO/MgO ۱۰ wt.% کمی آگلومره شدند ولی دارای اندازه‌های در مقیاس نانومتری هستند. اندازه ذرات در نانوکاتالیست با ۱۰ درصد وزنی و ۱۵ درصد وزنی به ترتیب در حدود ۹۰ و ۵۰ نانومتر تخمین زده شد. شایان ذکر است که اندازه و شکل ذرات در میزان بارگذاری ۱۵ درصد وزنی نسبت به ۱۰ درصد وزنی یکنواخت‌تر می‌باشند. میزان نیکل بارگذاری شده بر روی پایه کاتالیزور MgO نیز توسط آنالیز EDX در شکل ۳-ه بررسی شده است. نتایج حاصل از آنالیز EDX نانوکریستال‌های NiO/MgO با ۱۵ درصد وزنی، حضور عناصر Ni، Mg و O را نشان می‌دهد که توافق خوبی بین میزان اسمی عناصر بارگذاری شده با میزان بارگذاری شده واقعی (حاصل از آنالیز EDX) وجود دارد. همچنین آنالیز map در شکل ۳-ه علاوه بر اینکه حضور نانوذرات نیکل را در نانوکاتالیست NiO/MgO نشان می‌دهد، پراکندگی و توزیع بالای نیکل را نیز نشان می‌دهد.

۳-۵- نتایج آنالیز جذب سطحی نیتروژن

جهت بررسی تاثیر میزان نیکل بر روی مساحت سطح ویژه، نوع و اندازه حفرات، توزیع اندازه حفرات و حجم حفرات نانوکریستال‌های NiO/MgO، ۲ نمونه با بارگذاری‌های مختلف نیکل تهیه شدند. دما و زمان عملیات حرارتی کلسیناسیون (۷۰۰ °C و ۴ ساعت) ثابت در نظر گرفته شد. تصاویر ۴-الف و ۴-ب به ترتیب نمودارهای جذب/واجذب نیتروژن و توزیع اندازه حفرات حاصل از روش BJH را در بارگذاری‌های مختلف نیکل نشان می‌دهد. همچنین، نتایج حاصل از آنالیز جذب سطحی نیتروژن، در این دمای نسبتاً بالای کلسیناسیون (۷۰۰ °C و ۴ ساعت) نشان دهنده بالا بودن مساحت سطح ویژه برای هر دو نمونه بود. با وجود افزایش میزان نیکل از ۱۰ تا ۱۵ درصد وزنی مساحت سطح ویژه کاهش پیدا نکرد بطوریکه مساحت سطح ویژه در هر دو میزان بارگذاری ثابت و در حدود ۳۰ m²/g می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از آنالیز BJH نشان می‌دهد که نانوکاتالیست‌های NiO/MgO با ۱۰ درصد وزنی نیکل نسبت به ۱۵ درصد وزنی نیکل دارای حفرات کوچکتر و توزیع اندازه حفرات همگن‌تری هستند.

- [2] Z. Yang, W. Ding, Y. Zhang, X. Lu, Y. Zhang, P. Shen, *International Journal of Hydrogen Energy*, **35**, 2010, 6239.
- [3] G. Jianjun, L. Hui, Z. Hong, C. Dingfeng, Z. Xiaoming, *Applied Catalysis A: General*, **273**, 2004, 75.
- [4] T. Andrey, T. Tatsuo, H. Satoshi, S. Kunio, T. Katsuomi, H. Takashi, *Journal of Catalysis*, **213**, 2003, 191.
- [5] J.T. Richardson, M. Garrait, J.K. Hung, *Appl. Catal. A*, **255**, 2003, 69.
- [6] Z. Hou, O. Yokota, T. Tanaka, T. Yashima, *Applied Surface Science*, **233**, 2004, 58.
- [7] K. Takehira, T. Shishido, P. Wang, T. Kosaka, K. Takaki, *J. Catal.*, **221**, 2004, 43.
- [8] A. Cybulski, J.A. Moulijn, "Structured Catalysts and Reactors", Marcel Dekker Inc., 1998.
- [9] H. Li, H. Xu, J. Wan, *Journal of Natural Gas Chemistry*, **20**, 2011, 1.
- [10] S. Libs, A. Kiennemann, A. Barama, *Catalysis Today*, **113**, 2006, 194.
- [11] P.G. Savva, K. Goundani, *Applied Catalysis B: Environmental*, **79**, 2008, 199.
- [12] S. Zhang, J. Wang, *Journal of Natural Gas Chemistry*, **17**, 2008, 179.
- [13] K. Young, H. Roh, *International Journal of Hydrogen Energy*, **33**, 2008, 2036.
- [14] J. Feng, Y. Ding, Y. Guo, W. Li, *Fuel*, **109**, 2013, 110.
- [15] C. Wang, T. Wang, L. Ma, Y. Gao, *Energy Conversion and Management*, **51**, 2010, 446.
- [16] R. Zanganeh, M. Rezaei, A. Zamaniyan, *Advanced Powder Technology*, Available online 25 February, 2014.
- [17] G. Gonc, M.K. Lenzi, O.A. Santos, L.M. Jorge, *Journal of Non-Crystalline Solids*, **352**, 2006, 3697.
- [18] L. Chen, X. Sun, *Applied Catalysis A: General*, **265**, 2004, 123.
- [19] M. Pechini, US Patent 3, 330, 697 (1967).
- [20] F. Meshkani, M. Rezaei, *Journal of Natural Gas Chemistry*, **20**, 2011, 198.

- نتایج حاصل از بررسی‌های مورفولوژی سطح توسط FESEM نشان می‌دهد که در هر دو میزان بارگذاری نیکل، اندازه ذرات در ابعاد نانومتری است که نانوذرات بدست آمده با ۱۵ درصد وزنی نیکل، کوچکتر، به شکل کروی و دارای توزیع همگن‌تری هستند.

- نتایج حاصل از آنالیز جذب سطحی نیتروژن، نشان داد که نانوکاتالیست‌ها دارای ساختار مزوحفره هستند و توزیع اندازه حفرات در نانوکریستال‌های NiO/MgO با ۱۰ درصد وزنی همگن‌تر است، در حالیکه مساحت سطح ویژه در هر دو یکسان و در حدود $30 \text{ m}^2/\text{g}$ می‌باشد.

سپاسگزاری

بدینوسیله نویسندگان این مقاله، کمال تشکر و قدردانی را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز بدلیل حمایت‌های بی‌دریغ آن واحد دانشگاهی اعلام می‌دارد.

مراجع

- [1] J.R. Nielsen, *Catal. Today*, **63**, 2000, 159.