

## بررسی فعالیت کاتالیزورهای بارگذاری شده با فلز نیکل در فرآیند هیدروژناسیون گازی ترکیبات آروماتیک

زهرا محمدیان<sup>۱</sup>، محمدحسن پیروی<sup>۲\*</sup>، نسترن پارسا فرد<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، شیمی فیزیک، گروه شیمی فیزیک و محاسباتی، دانشکده علوم شیمی و نفت، دانشگاه شهید بهشتی، تهران،

ایران

<sup>۲</sup> استاد، شیمی فیزیک، گروه شیمی فیزیک و محاسباتی، دانشکده علوم شیمی و نفت، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، شیمی فیزیک، گروه شیمی کاربردی، دانشگاه کوثر بجنورد، خراسان شمالی، ایران

نوع مقاله: ترویجی

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۳ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۷

### چکیده

هیدروژناسیون ترکیبات غیراشباع از یک طرف به دلیل الزام قوانین زیست محیطی به منظور کاهش اثرات مخرب آنها بر روی سلامتی انسان‌ها و سایر موجودات و از طرفی دیگر به جهت تولید مواد شیمیایی ارزشمند بسیار مورد توجه است. در این پژوهش یک سری از کاتالیزورهای ناهمگن شامل نیکل نشانده شده بر روی انواع مختلفی از پایه‌های کاتالیزوری با روش تلقیح تهیه شده و برای هیدروژناسیون BTX (بنزن، تولوئن و زایلن در حلال نرمال هپتان) به عنوان مدل در دمای  $150^{\circ}\text{C}$  به کار برده شده است. ویژگی‌های شیمی فیزیکی و ساختاری کاتالیزورهای تهیه شده با روش‌های جذب و واجذب نیتروژن، پراش اشعه ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله نهایی نیز فعالیت کاتالیزورهای تهیه شده در هیدروژناسیون بنزن از خوراک پلتفرمت<sup>۱</sup> و در دمای بهینه  $150^{\circ}\text{C}$  نیز مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج حاصل از مقایسه عملکرد کاتالیزورهای تهیه شده در دو خوراک به این صورت است که کاتالیزور Ni/AC-FSM-16<sup>۲</sup> برای BTX و کاتالیزور Ni/AMCF-13X<sup>۳</sup> برای حذف بنزن از خوراک پلتفرمت بهترین عملکرد را داشته‌اند.

**کلمات کلیدی:** هیدروژناسیون ترکیبات آروماتیک، گزینش پذیری، پایه‌های کامپوزیتی، فعالیت کاتالیزور

\* m-peyrovi@sbu.ac.ir

<sup>1</sup> Platformate

<sup>2</sup> Activated carbon-folded sheets mesoporous material

<sup>3</sup> Mesocellular silica foam-13X zeolite

## مقدمه

هیدروژناسیون گزینشی پیوندهای دوگانه و سه‌گانه کربن-کربن یک واکنش اساسی برای سنتز و تولید مواد شیمیایی صنعتی است. کاربرد گسترده این فرآیند در صنایع دارویی، سموم شیمیایی و پتروشیمی بر اساس هیدروژناسیون کاتالیزوری هیدروکربن‌های غیراشباع توسط کاتالیزورهای ناهمگن است. با توجه به قوانین سخت‌گیرانه زیست‌محیطی و همچنین اثرات سرطان‌زایی مواد آروماتیک، کاهش میزان انتشار این مواد غیراشباع یکی از مهم‌ترین چالش‌های دهه اخیر است [۱]. بنزین یکی از برش‌های نفت خام است که کاربرد گسترده آن به‌عنوان حلال و سوخت موتور، این ماده را به یکی از پرمصرف‌ترین ترکیبات تبدیل کرده است. بنزین تولیدی در پالایشگاه‌ها بسته به کیفیت تولید آن به‌طور میانگین حاوی ۳-۵ درصد بنزن است. این در حالی است که برابر با استانداردهای بین‌المللی میزان مجاز بنزن در بنزین ۱ درصد حجمی است که در سال ۲۰۱۱ میلادی نیز این مقدار تا ۰/۶۲ درصد در ایالات‌متحده آمریکا کاهش یافته است. مهم‌ترین عامل ایجاد بنزن در بنزین فرآیند رفورمینگ است که سبب تشکیل بیش از نیمی از این ماده در بنزین می‌شود. بنزن جزء ترکیبات آلی فرار است که به دلیل اثرات مخرب زیست‌محیطی باید غلظت آن در محیط کاهش یابد. روش‌های مختلفی برای حذف و یا کاهش میزان بنزن ارائه شده است. یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای این منظور، فرآیند جذب سطحی است. واکنش هیدروژناسیون کاتالیزوری به‌منظور اشباع ترکیبات غیر اشباع آلیفاتیک و آروماتیک، مکانیسم اصلی شناخته‌شده در صنعت برای دستیابی به این هدف است.

بر اساس گزارش‌های پیشین، عوامل مختلفی بر واکنش هیدروژناسیون تأثیرگذار است که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به دمای واکنش، فشار جزئی هریک از واکنش‌دهنده‌ها، روش تهیه کاتالیزورها، ماهیت و نوع پایه به‌کاربرده شده، میزان بارگذاری فلز واسطه، میزان پراکندگی فاز فعال (فلزی) و دمای کلسیناسیون اشاره کرد [۲]. استفاده از کاتالیزورهای ناهمگن برای فرآیندهای کاتالیزوری به‌ویژه هیدروژناسیون بسیار گسترش یافته است. کاربرد مواد متخلخل به دلیل ویژگی ساختاری آن‌ها که سبب افزایش نفوذ مولکولی واکنش‌دهنده‌ها با افزایش دسترسی به مکان‌های فعال می‌شود، سبب بهبود عملکرد و گزینش‌پذیری آن‌ها خواهد شد [۳]. استفاده از کاتالیزورهای نیکل نیز به دلیل مشابهت ساختار الکترونی نیکل به فلزات گران‌بهای هم‌گروه خود (پلاتین و پالادیم)، سهولت تهیه و مقرون‌به‌صرفه بودن از دیدگاه صنعتی بسیار مورد توجه است [۴]. همچنین تأثیر پایه‌های کاتالیزوری مختلف نظیر مزوحفره‌های سیلیکاتی، زئولیت‌ها، مواد کربنی و کامپوزیت‌های مختلف در این فرآیند مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در این گزارش، تعدادی از پایه‌های کامپوزیتی مختلف تهیه‌شده‌اند که حاوی یک جزء سیلیکاتی بوده و جزء دوم آن‌ها شامل مواد کربنی، زئولیتی و اکسید فلزی است. هدف مقاله حاضر آن است که اثر ماهیت پایه‌های کاتالیزوری تهیه‌شده در واکنش هیدروژناسیون بنزن در مخلوط BTX (به‌عنوان مدل) و خوراک پلتفرم مورد بررسی قرار گیرد تا میزان تأثیر ترکیبات آروماتیک و غیر آروماتیک دیگر موجود در مخلوط بر فعالیت و گزینش‌پذیری کاتالیزورها در فرآیند هیدروژناسیون مورد ارزیابی قرار گیرد.

## بخش تجربی

### مواد استفاده شده

نمک نیکل نیترات ۶ آبه، زئولیت ۱۳X تهیه شده از شرکت ایران زئولیت، تری متیل بنزن (TMB)، تترا اتیل اورتوسیلیکات (TEOS)، آب مقطر، آمونیاک، کلریدریک اسید، نمک آلومینیوم نیترات ۹ آبه، اتانول، کوپلیمر پلورونیک

P123، تیتانیوم دی اکسید (نوع روتیل) تهیه شده از شرکت مرک<sup>۴</sup>، ستیل تری متیل آلومینیوم بروماید (CTAB) کانمیت.

برای تهیه کامپوزیت FSM-16-Activated Carbon ۰/۹۱ گرم CTAB<sup>۵</sup> را به ۲۵ میلی لیتر آب مقطر اضافه کرده و در حین هم خوردن ۲ گرم کانمیت<sup>۶</sup> به آن اضافه شد. پس از آنکه به مدت ۷۵ دقیقه روی همزن، هم زده شد مقدار ۰/۵ گرم کربن فعال به آن اضافه شد و مجدداً به مدت ۷۵ دقیقه هم زده شد و پس از آنکه محلول سرد شد، pH آن با کلریدریک اسید ۲ مولار به ۸/۵ رسید، برای ۲/۵ ساعت دیگر هم زده شد و در نهایت ماده به دست آمده پس از صاف شدن و نیز خشک شدن به مدت یک شبانه روز، تا دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۶ ساعت کلسینه شد [۵]. کامپوزیت SBA-15-TiO<sub>2</sub> نیز طبق روش زیر تهیه می شود:

ابتدا ۴ گرم از کاپلیمر پلورونیک P123 در ۳۰ گرم آب مقطر حل شده و تحت چرخش شدید قرار می گیرد. در مرحله بعد، ۱۲۰ گرم کلریدریک اسید ۲ مولار به محلول اضافه شده و در دمای ۳۵ درجه سانتی گراد تحت چرخش قرار می گیرد. پس از تشکیل فاز همگن، ۰/۵ گرم از تیتانیوم دی اکسید و مقدار مشخصی از منبع سیلیکا که در اینجا TEOS<sup>۷</sup> است، اضافه شده و در دمای مذکور ابتدا به مدت ۲۰ ساعت و پس از آن به مدت یک شبانه روز در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد تحت چرخش قرار گرفت. فاز چگال تر پس از صاف شدن، در آن به مدت یک شبانه روز خشک شده و نهایتاً برای ۸ ساعت و در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد کلسینه شد [۶]. به منظور تهیه کامپوزیت های آلومینیوم دار مزوحفره-میکروحفره فوق، ۳ گرم از ماده فعال کننده سطحی P1۲۳ در حجم محاسبه شده ای از کلریدریک اسید تا دستیابی به محلولی با pH=۱/۵ حل شده و سپس ۰/۱ گرم از منبع آلومینیوم Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>.9H<sub>2</sub>O و ۲۰ میلی لیتر از اتانول به محلول گردید. در این مرحله نیز مقدار مشخصی از زئولیت ۱۳X به محلول اضافه گردید تا کامپوزیت با نسبت وزنی ۱:۱ از Al-MCF و زئولیت به دست آید که به صورت AIMCF-13X نام گذاری شده اند. در گام بعدی نیز ۰/۵ میلی لیتر از تری متیل بنزن<sup>۸</sup> (TMB) به همراه ۱۰ میلی لیتر از تترا اتیل اورتوسیلیکات (TEOS) به صورت قطره چکانی به مخلوط اضافه و مخلوط مورد نظر به مدت ۴ ساعت و در دمای ۴۰ °C هم زده شد. در مرحله بعد نیز مخلوطی از آب مقطر و آمونیاک به محلول اضافه گردید تا pH مخلوط به ۷ برسد. در این مرحله، مخلوط به دست آمده به اتوکلاو منتقل شد تا در دمای ۱۰۰ °C به مدت ۲۴ ساعت تحت واکنش گرمایی قرار گیرد. پودرهای به دست آمده نیز پس از خشک شدن در آن تا دمای ۵۵۰ °C و با سرعت ۱۰ °C/min در هوا کلسینه شدند [۷].

کاتالیزورهای ۲۵٪ نیکل نیز با اضافه کردن مقدار محاسبه شده ای از نمک نیکل نترات ۶ آبه به کامپوزیت ها تهیه شد. پس از تشکیل ژل ها، به مدت یک شبانه روز در آن خشک شدند و سپس تا دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۴ ساعت کلسینه شدند. هیدروژناسیون بنزن در BTX با درصدهای حجمی مشخص از بنزن، تولوئن و زایلن که در نرمال هپتان حل شده اند به عنوان خوراک مدل با استفاده از ۰/۲ گرم کاتالیزور و همچنین خوراک پلتفرمت با استفاده از ۱ گرم از هریک از کامپوزیت ها در دمای ۱۵۰ °C و فشار یک اتمسفر در میکرو راکتور پیوسته بستر ثابت انجام شد. پیش از انجام آزمایش راکتوری، کاتالیزورها در دمای ۴۰۰ °C به مدت ۲ ساعت و در جریان ۴۰ mL/min هیدروژن

<sup>4</sup> Merck

<sup>5</sup> hexadecyl trimethyl ammonium bromide

<sup>6</sup> Canemite

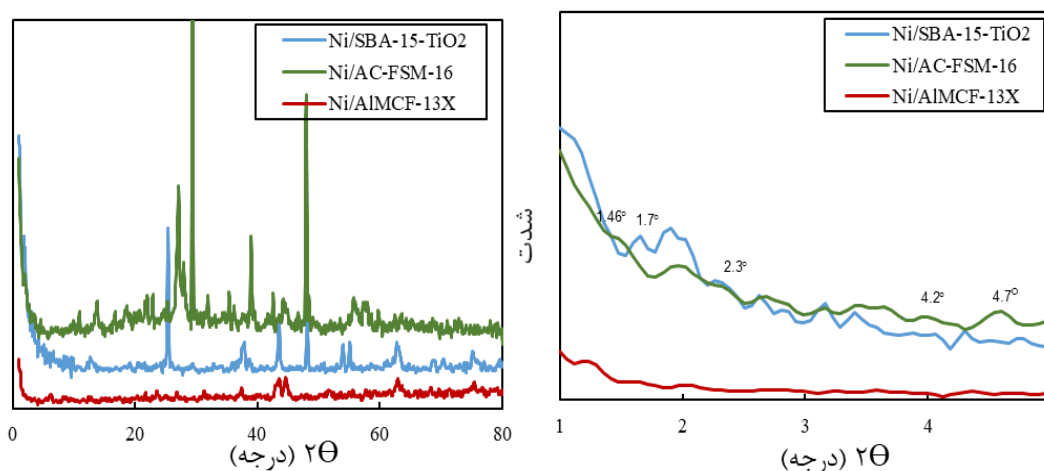
<sup>7</sup> tetraethyl orthosilicate

<sup>8</sup> Mesitylene

احیا شدند. خوراک مایع (BTX در نرمال هپتان و همچنین پلتفرمیت) نیز با فلوی ۳mL/h به درون راکتور تزریق شدند. برای آنالیز محصولات واکنش، از دستگاه کروماتوگرافی گازی متصل به آشکارساز شعله‌ای استفاده شد.

## نتایج و بحث

اولین آنالیز انجام شده جهت بررسی ساختار بلوری، الگوهای XRD کاتالیزورهای کلسینه شده است که در شکل ۱ نشان داده شده است. پراش‌های اصلی مربوط به کربن فعال در زوایای  $22^{\circ}$ – $24^{\circ}$  و  $42^{\circ}$ – $44^{\circ}$  ظاهر می‌شود که نشان‌دهنده ساختار بی شکل این ماده است. پراش‌های مربوط به ساختار دو بعدی شش وجهی مزو حفره FSM-16 نیز در  $4^{\circ}/2^{\circ}$ ،  $4^{\circ}/5^{\circ}$ – $2^{\circ}/2^{\circ}$  و  $4^{\circ}/7^{\circ}$  ظاهر می‌شود که انعکاس صفحات ۱۰۰، ۱۱۰، ۲۰۰ و ۲۱۰ این مزو حفره هستند [۸]. پیک‌های ضعیفی که در زوایای  $1/46^{\circ}$  و  $1/7^{\circ}$  ظاهر می‌شوند مربوط به انعکاس صفحات ۱۱۰ و ۲۰۰ ساختار شش‌وجهی SBA-15 و پیک ناحیه  $22^{\circ}$  نیز مربوط به ساختار سیلیکای بی شکل در این ماده است [۹].



شکل ۱- الگوی XRD کامپوزیت‌های تلقیح شده با نیکل

پراش‌هایی هم که در نواحی  $25^{\circ} = 2\theta$ ،  $36^{\circ}$ ،  $47^{\circ}$  و  $54/6^{\circ}$  مشاهده می‌شوند به ترتیب مربوط به صفحات ۱۰۱، ۱۱۲، ۲۰۰ و ۱۰۵ در ساختار تیتانیوم دی‌اکسید هستند [۶]. پراش‌های مربوط به صفحات ۳۳۱، ۴۴۰، ۵۳۳، ۶۲۴ و ۶۶۲ ساختار زئولیت ۱۳X نیز در زوایای  $15/4^{\circ}$ ،  $20/11^{\circ}$ ،  $23/30^{\circ}$ ،  $26/7^{\circ}$  و  $31^{\circ}$  مشاهده می‌گردد [۱۰]. به منظور بررسی ویژگی‌های سطحی، اندازه و حجم منافذ، جذب و واجذب گاز نیتروژن در دمای  $196^{\circ}\text{C}$  انجام شده است که نتایج آن در جدول ۱ خلاصه شده است. مساحت سطح اندازه‌گیری شده از  $712 - 331 \text{ m}^2/\text{g}$  متغیر است. بیشترین مساحت مربوط به کاتالیزور Ni/AC-FSM-16 است که تفاوت فراوانی با دیگر کاتالیزورها دارد و به نظر می‌رسد این بدان جهت است که مزو حفره‌های سیلیکاتی و مواد کربنی به صورت خالص نیز مساحت سطح بالایی دارند.

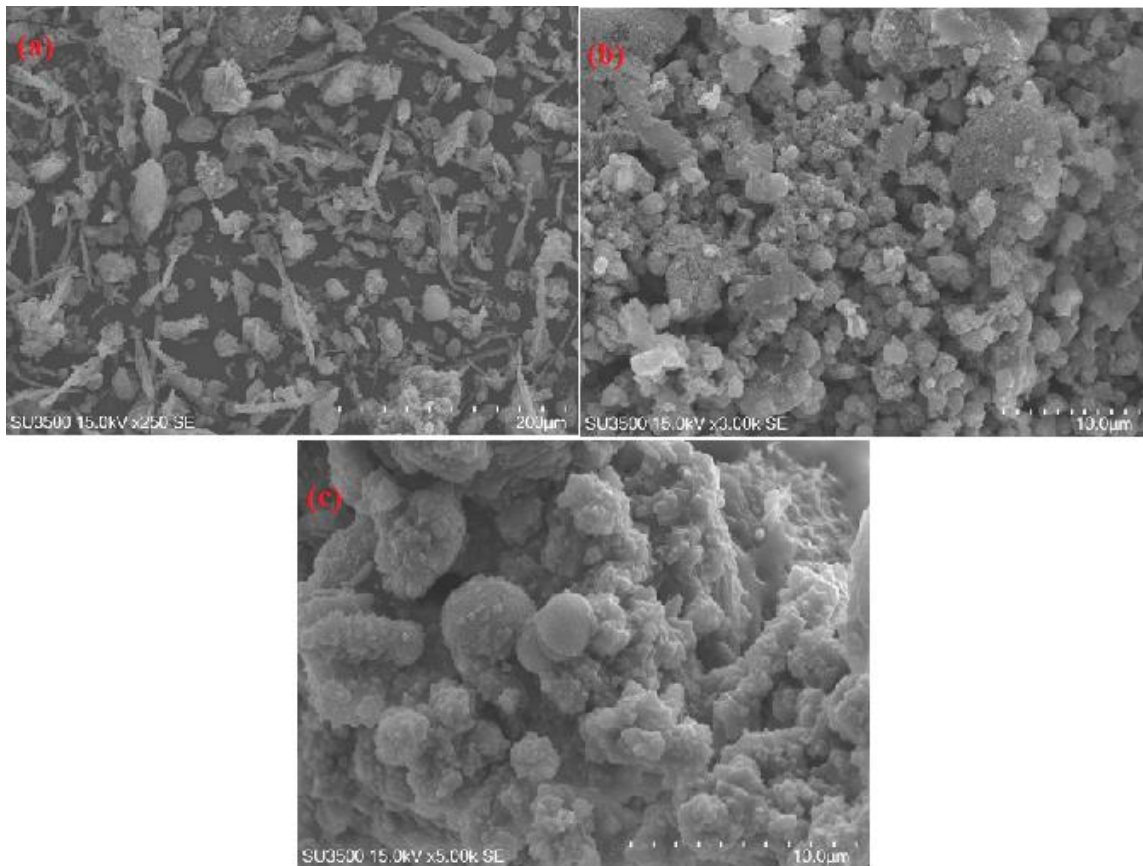
جدول ۱- خواص سطحی و بافتی کاتالیزورهای تهیه شده

کاتالیزور	$S_{\text{BET}}(\text{m}^2/\text{g})$	$d_p(\text{nm})^*$	$V_p(\text{cm}^3/\text{g})$
Ni/AC-FSM-16	۷۱۲	۲/۰۱	۰/۳۹
Ni/AIMCF-13X	۳۶۴	۳/۸۰	۰/۳۹
Ni/SBA-15-TiO <sub>2</sub>	۳۳۱	۷/۹۰	۰/۹۰

\* قطر منافذ اندازه‌گیری شده با روش جذب فیزیکی نیتروژن

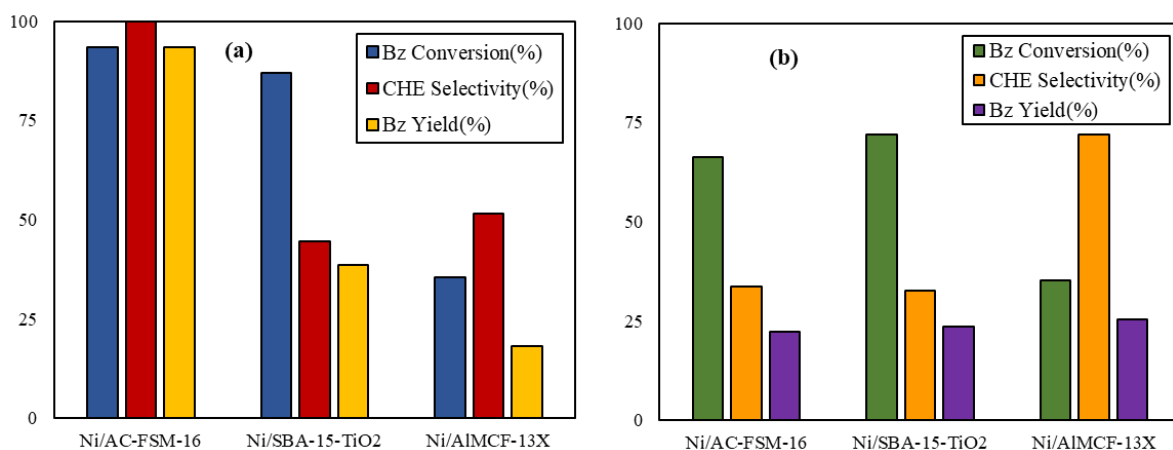
مساحت سطح ویژه بالای Ni/AC-FSM-16 شرایطی را فراهم می‌کند که پراکندگی فاز فعال فلزی و میزان دسترسی به آن‌ها برای شروع واکنش افزایش یابد. کوچک‌ترین اندازه و حجم حفره و همچنین اندازه ذرات نیز متعلق به این کاتالیزور است.

تصاویر مربوط به مورفولوژی کامپوزیت‌های تهیه‌شده نیز در شکل ۲ قابل مشاهده است. ساختار کروی شکل نانو ذرات  $TiO_2$  و درجه بالای بلورینگی آن و همچنین ساختار شش‌وجهی سیلندری شکل SBA-15 نشان از تشکیل موفق کامپوزیت مربوطه دارد. برای کاتالیزور Ni/AMCF-13X نیز ساختار متخلخل مشاهده می‌شود که به دلیل کلسینه شدن ذرات تجمع یافته‌اند. برای کاتالیزور کامپوزیت AC-FSM-16 نیز ساختار گره مانند قابل‌رؤیت است.



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به کاتالیزورهای تهیه‌شده، (a) Ni/SBA-15-TiO<sub>2</sub>، (b) Ni/AC-FSM-16 و (c) Ni/AMCF-13X

شکل ۳ نیز عملکرد کاتالیزورهای تهیه‌شده را بر خوراک BTX (شکل a) و خوراک پلتفرمت (شکل b) نشان می‌دهد. فعالیت کاتالیزورهای موردنظر در دمای ۱۵۰°C و فشار اتمسفری مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل ۳- عملکرد کاتالیزورهای نیکل با استفاده از (a) خوراک BTX و (b) پلتفرمت در دمای ۱۵۰°C

همان طور که مشاهده می‌شود (شکل a) کاتالیزور بر پایه کامپوزیت کربنی-سیلیکاتی بالاترین میزان درصد تبدیل بنزن (معادله ۱) را نشان می‌دهد. گزینش پذیری این کاتالیزور برای تولید سیکلوهگزان در مقایسه با دیگر کاتالیزورها به طور قابل توجهی بیشتر است. گزینش پذیری و بازده کاتالیزوری نیز با استفاده از معادله ۲ و ۳ محاسبه می‌گردند:

$$(1) \quad 100 * (\text{تعداد مول کلی بنزن} / \text{مول بنزن تبدیل شده}) = \text{درصد تبدیل بنزن} (\%)$$

$$(2) \quad 100 * (\text{درصد تبدیل کلی مواد آروماتیک} / \text{درصد تبدیل بنزن}) = \text{گزینش پذیری سیکلوهگزان} (\%)$$

$$(3) \quad 100 / (\text{گزینش پذیری سیکلوهگزان} * \text{درصد تبدیل بنزن}) = \text{بازده واکنش} (\%)$$

به منظور ارزیابی کلی عملکرد کاتالیزوری که هم‌زمان شامل درصد تبدیل بنزن و گزینش پذیری کاتالیزوری برای تولید سیکلوهگزان است، درصد بازده کاتالیزوری نیز محاسبه شده است. نتایج تأییدکننده آن است که کاتالیزور اشاره شده در بالا در مجموع عملکرد بسیار قابل قبولی دارد که علت آن می‌تواند پراکندگی بالای مکان‌های فعال در دسترس به دلیل مساحت سطح بالای این کاتالیزور باشد.

در شکل (b) نیز عملکرد کاتالیزورها در خوراک پلتفرمت نمایش داده شده است. در این مورد رفتار متفاوتی را از کاتالیزورها شاهد هستیم. به جز کاتالیزور Ni/AlMCF-13X، برای کاتالیزورهای دیگر درصد تبدیل بنزن کاهش یافته است که به نظر می‌رسد علت آن حضور دیگر مواد غیراشباع در خوراک پلتفرمت و رقابت آن‌ها برای هیدروژنه شدن است که این مسئله سبب کاهش گزینش پذیری آن‌ها در مقایسه با کاتالیزور اشاره شده می‌شود. با مقایسه درصد بازده کاتالیزورها، به نظر می‌رسد تفاوت قابل توجهی با یکدیگر ندارند. کاتالیزور Ni/AlMCF-13X علی‌رغم فعالیت کمتر، گزینش پذیری قابل توجهی نشان می‌دهد.

### نتیجه‌گیری

نانو ذرات نیکل بارگذاری شده روی سه‌پایه کامپوزیتی با روش تلقیح تر تهیه شدند. کاتالیزورهای تهیه شده در فشار اتمسفری برای هیدروژناسیون بنزن در مخلوط آروماتیک BTX و پلتفرمت در دمای ۱۵۰°C و در فاز گازی و پس از بارگذاری در راکتور بستر ثابت مورد ارزیابی قرار گرفتند. همچنین کاتالیزورها با روش‌های مختلفی مورد شناسایی قرار گرفتند. نتایج آزمون فعالیت تأکید کننده آن است که کاتالیزور Ni/AC-FSM-16 بهترین عملکرد را به هنگام



استفاده از خوراک BTX دارد که می‌تواند به دلیل پراکندگی بالای فاز فعال به واسطه مساحت سطح بالا باشد. باید اضافه شود که به هنگام استفاده از خوراک پلتفرمت کاتالیزورها عملکرد متفاوتی داشتند و کاتالیزور Ni/AlMCF-13X در مجموع عملکرد بهتری داشته است.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از شرکت پالایش و پخش فرآورده‌های نفتی ایران که این پروژه را مورد حمایت خود قرار دادند تشکر نمایند.

### منابع

- [1] Chen B., Dingerdissen U., Krauter J. G. E., Lansink Rotgerink H.G.J., Möbus K., Ostgard D. J., Panster P., New Developments in Hydrogenation Catalysis Particularly in Synthesis of Fine and Intermediate Chemicals, Applied Catalysis A: General, Vol. 280, 2005, No. 1, pp. 17-46.
- [2] Peyrovi M. H., Parsafard N., Mohammadian Z., Benzene Selective Hydrogenation over Supported Ni (Nano-) Particles Catalysts: Catalytic and Kinetics Studies, Chinese Journal of Chemical Engineering, Vol. 26, 2018, No. 3, pp. 521-528.
- [3] Su J., Chen J., Synthetic Porous Materials Applied in Hydrogenation Reactions, Microporous and Mesoporous Materials, Vol. 237, 2017, pp. 246-259.
- [4] Mashkovsky I.S., Baeva G.N., Stakheev A.Y., Voskoboynikov T.V., Barger P.T., Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst for Selective Hydrogenation of Benzene in Benzene-Toluene Mixture, Mendeleev Communication, Vol. 2, 2009, No. 19, pp. 108-109.
- [5] Mohammadian Z., Peyrovi M. H., Parsafard N., Catalytic Performance and Kinetics Study over Novel Ni/Activated Carbon-FSM-16 Catalysts in the BTX Mixture for Benzene Selective Hydrogenation, ChemistrySelect, Vol. 3, 2018, No. 44, pp. 12639-12644.
- [6] Mohammadian Z., Peyrovi M. H., Parsafard N., Characterization and Competitive Benzene Hydrogenation Activity of Nickel Supported on SBA-15/L<sub>x</sub>O<sub>y</sub> (L= Zn, Ti, W) Composites in an Aromatic Mixture, Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis, 2019, pp. 1-12.
- [7] Fazaeli R., Aliyan H., Ahmadi M.A., Hashemian S., Host (Aluminum Incorporated Mesocellulose Silica Foam (Al-MCF))-Guest (Tungsten Polyoxometalate) Nanocomposite Material: An Efficient and Reusable Catalyst for Selective Oxidation of Sulfides to Sulfoxides and Sulfones, Catalysis Communication, Vol. 29, 2012, pp. 48-52.
- [8] Zimowska M., Michalik-Zym A., Kryfciak-Czerwenka J., Dula R., Socha R. P., Pamin K., Bazarnik M., A Comparative Study of Direct Versus Post-Synthesis Alumination of Mesoporous FSM-16 Silica, Materials Research Bulletin, Vol. 83, 2016, pp. 623-631.
- [9] Peng D., Zhang L., Zhang G., Li G., Sun Z., Liu X., Wu M., Characterization and Photocatalytic Activity of (ZnO-CuO)/SBA-15 Nanocomposites Synthesized by Two-Solvent Method, Materials Research Bulletin, Vol. 56, 2014, pp. 119-124.
- [10] Mohammadian Z., Peyrovi M.H., Parsafard N., Activity and Stability Evaluation of Nickel Supported over Al-Meso-Microporous Hybrids in Selective Hydrogenation of Benzene, ChemistrySelect, Vol. 4, 2019, pp. 11116-11120.