

سنتز و شناسایی نانو کاتالیست پالادیم تثبیت شده بر بستر کربن نیتريد گرافیتی به عنوان یک کاتالیست ناهمگن در واکنش جفت شدن سوزوکی در آب

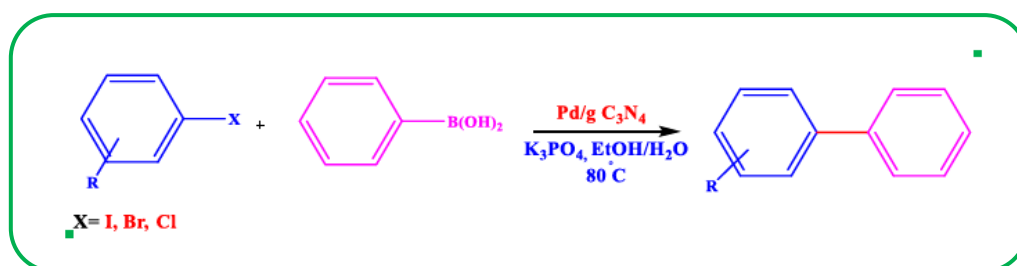
زهرا بازاریار *

گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ۶۳۶۱۶۶۳۹۷۳، ایران

تاریخ دریافت: ۲۱ فروردین ۱۴۰۳ تاریخ پذیرش: ۲۷ مهر ۱۴۰۳

چکیده: واکنش جفت شدن سوزوکی به عنوان یک روش موثر، کاربردهای زیادی در توسعه صنعت داروسازی پیدا کرده است. در این مطالعه، از یک روش ساده و کارآمد برای واکنش تشکیل پیوند کربن-کربن با استفاده از کاتالیست ناهمگن پالادیم/کربن نیتريد گرافیتی (Pd/g-C₃N₄) بدون استفاده از لیگاند بین فنیل بورونیک اسید و آریل هالیدهای مختلف در محیط آبی استفاده شد. همه واکنش ها در شرایط بهینه در حلال آب/اتانول، دمای ۸۰ درجه سانتیگراد و در حضور ۰/۰۲ گرم از کاتالیست با بازده خوب تا عالی انجام شد. این روش را می توان به طور موثر برای دامنه ای از آریل هالیدهای فعال و غیرفعال استفاده کرد. نتایج نشانگر فعالیت کاتالیستی خوب این کاتالیست و بازیابی ساده کاتالیست، حداقل ۴ بار در چرخه واکنش است. همچنین کاتالیست Pd/g-C₃N₄ با روش های میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)، پراش پرتو ایکس (XRD)، آنالیز پلاسمای جفت شده القایی (ICP) و روش آزمون های تخلخل سنجی و سطح (BET) مشخصه یابی شد.

کلید واژه: واکنش جفت شدن سوزوکی، پالادیم، کاتالیست ناهمگن، کربن نیتريد گرافیتی



۱- مقدمه

گزینش پذیری بیشتر، و قابلیت اجرا در شرایط ملایم، واکنش سوزوکی به یک ابزار قدرتمند در تهیه مولکول های ارزشمند تبدیل شده است [۱۸-۱۶]. از سوی دیگر، تثبیت کاتالیست های همگن بر روی بسترهای جامد، عمل بازیابی و استفاده دوباره از کاتالیست های فلزی را آسان می سازد. از این جهت، این کاتالیست ها هم از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه بوده و هم مشکلات زیست محیطی کمتری را ایجاد می نمایند. پایداری و واکنش پذیری این سامانه های کاتالیستی بستگی زیادی به بستر جامد مورد استفاده دارد [۱۹ و ۲۰]. در سال های اخیر؛ مطالعه بر روی بسترهای جامد ناهمگن مانند نیمه رساناها، پلیمرها و سیلیکاها مورد علاقه فراوان پژوهشگران بوده است [۲۴-۲۱]. در میان نیمه رساناها، کربن نیتريد گرافیتی به عنوان یک نیمه رسانای عاری از فلز، ویژگی های امیدبخش بسیاری مانند ویژگی های الکترونیکی، نوری، ساختاری و فیزیکوشیمیایی منحصر به

واکنش سوزوکی به عنوان یک روش حیاتی و کلیدی در حوزه شیمی آلی، از ابتدای دهه ۱۹۷۰ میلادی تاکنون، موضوع تحقیقات فراوانی بوده و مسیری روشن به سوی تهیه مولکول های مهم و کاربردهای مختلف فناوری ارائه داده است [۶-۱]. اهمیت این واکنش بیشتر به این موضوع مربوط می شود که یکی از ابداع کنندگان این واکنش (آکیرا سوزوکی) موفق به کسب جایزه نوبل شیمی در سال ۲۰۱۰ شد [۷-۱۰]. واکنش سوزوکی در ساده ترین شکل آن، واکنش بین یک آریل هالید با فنیل بورونیک اسید در حضور کاتالیست هایی مانند پالادیم، نقره، نیکل، کبالت و آهن برای تهیه ترکیب های دی فنیل است [۱۱-۱۵]. از زمان ارائه واکنش سوزوکی، پژوهشگران با به کارگیری روش های نوآورانه و پیشرفته، این واکنش را به یکی از زمینه های پرکاربرد در شیمی آلی تبدیل کرده اند. با افزایش بهره وری،

در پایان، ۱۵ میلی‌لیتر از محلول یک مولار سدیم بورهیدرید برای کاهش Pd(II) به Pd(0) به کار گرفته شد. محصول خاکستری-سیاه سانتزیفیوژ و سه بار با آب و الکل شستشو، در نهایت، به مدت ۲ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک گردید.

۲-۳- روش عمومی برای انجام واکنش سوزوکی با نانوکاتالیست سنتز شده

ابتدا در یک لوله آزمایش، مخلوطی از یک مشتق آریل هالید (۱ میلی‌مول)، فنیل بورونیک اسید (۱ میلی‌مول) و ۰/۰۲ گرم از کاتالیست Pd/g-C₃N₄ در ۲ میلی‌لیتر حلال آب/اتانول (۱:۱) در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد تهیه و در جو هوا به هم زده شد. پیشرفت واکنش به وسیله کروماتوگرافی لایه نازک با استفاده از تانک حلال پترولیوم اتر و اتیل استات با نسبت حجمی ۴ به ۱ دنبال شد. مخلوط واکنش تا دمای محیط سرد، با اتیل استات رقیق و سپس صاف شد. محلول زیر صافی به قیف جدا کننده منتقل و سه بار با آب مقطر شستشو داده شد.

۳- نتایج و بحث

کاتالیست پالادیم/کربن نیتريد گرافیتی (Pd/g-C₃N₄) با موفقیت سنتز و با روش های XRD, BET, SEM و TEM و ICP مشخصه‌یابی و برای واکنش جفت‌شدن بین بورونیک اسید و آریل هالیدها با بازده خوب تا عالی استفاده شد.

۳-۱- بررسی طیف زیرقرمز

برای تایید سنتز کاتالیست Pd/g-C₃N₄، بررسی‌های طیف‌بینی زیرقرمز در محدوده ۴۰۰-۴۰۰۰ cm⁻¹ انجام شد (شکل ۱). در طیف g-C₃N₄، نوار مشخص در ۸۱۰ cm⁻¹ مربوط به خمیدگی خارج از صفحه C-N حلقه هتروسیکلیک است. همچنین نوارهای موجود در ۱۲۰۰ تا ۱۶۰۰ cm⁻¹ مربوط به ارتعاش کششی C=N و حلقه هتروسیکلیک است. از آنجا که هیچ نوار مشخص دیگری در طیف Pd/g-C₃N₄ ظاهر نشده، هیچ پیوند شیمیایی بین اتم پالادیم و g-C₃N₄ مانند پیوندهای Pd-N و Pd-C وجود ندارد. برای طیف Pd⁰/g-C₃N₄، نوار مشخص در ۱۶۵۰-۱۲۰۰ cm⁻¹ و ۸۱۰ cm⁻¹ به وضوح قابل تشخیص است. این نشان می‌دهد که بارگذاری پالادیم ساختار g-C₃N₄ را تغییر نداده است که این موضوع همچنین توسط تحلیل الگوی پداش پرتو ایکس تأیید شد.

فردی دارد که باعث می‌شود این مواد به عنوان گروه جدیدی از نانومواد چندمنظوره برای استفاده در کاربردهای الکتريکی، کاتالیستی و انرژی شناخته شوند. با بررسی ویژگی‌های مواد فلزی و غیرفلزی و قراردادن ترکیب‌های مختلف روی سطح کربن نیتريد گرافیتی، می‌توان به این ترکیب ویژگی‌های متفاوتی بخشید که آن را مناسب برای کاتالیز کردن انواعی از ترکیب‌های آلی می‌نماید [۲۵]. در این پژوهش، هدف این است تا واکنش جفت‌شدن سوزوکی را با استفاده از نانوکاتالیست سنتز شده Pd/g-C₃N₄ بررسی کنیم. نانوکاتالیست سنتز شده در واکنش جفت‌شدن سوزوکی محصول با بازده خوب تا عالی را به دست می‌دهد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد و دستگاه های مورد نیاز

همه حلال‌ها و مواد شیمیایی مورد نیاز برای انجام واکنش‌ها از شرکت‌های مرک، فلوکا، سیگما-آلدريج خریداری و بدون خالص‌سازی بیشتر استفاده شدند. واکنش‌ها در جو هوا انجام شدند برای تعیین خلوص و پیشرفت واکنش‌ها از کروماتوگرافی لایه نازک استفاده گردید. اندازه حفره‌ها و حجم کلی آن‌ها و سطح موثر کاتالیست با آنالیز تخلخل سنجی BET با دستگاه بلزورب ۱۸ در دمای نیتروژن مایع به دست آمد. درصد مقدار فلز پالادیم تثبیت شده بر روی بستر کربن نیتريد گرافیتی با استفاده از آنالیز پلاسما جفت‌شده القایی با دستگاه ای‌آرای مدل ۳۴۱۰ محاسبه گردید. میانگین اندازه قطر ذرات با آنالیز پراش پرتو ایکس و با استفاده از دستگاه فیلیپس اکسپرت اِپی‌دی با تابش Cu Kα, λ= 1.5418 Å انجام شد. جهت بررسی اندازه و یکنواختی نانوکاتالیست تهیه شده از تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی با استفاده از دستگاه تسکن میرا ۲۱ و تصویرهای میکروسکوپ الکترونی عبوری با استفاده از دستگاه فیلیپس-ای‌ام ۲۰۸ اس انجام شد. طیف‌های رزونانس مغناطیسی هسته هیدورژن و کربن برخی از محصولات با استفاده از دستگاه بروکر آوانس به ترتیب با قدرت‌های ۴۰۰ و ۱۰۰ مگاهرتز گرفته شدند.

۲-۲- تهیه کاتالیست Pd/g-C₃N₄

کاتالیست کربن نیتريد گرافیتی (g-C₃N₄) با بسپارش حرارتی ملامین تهیه شد. برای این منظور، ۵ گرم ملامین در یک بوتله چینی با درپوش قرار گرفت و در کوره با دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت قرار داده شد تا پودر کربن نیتريد به دست آید [۲۶]. سپس Pd/g-C₃N₄ به شکل زیر سنتز شد: ۰/۵ گرم g-C₃N₄ در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب به مدت ۵ دقیقه تحت تابش امواج فراصوت قرار گرفت. سپس، ۲۵ میلی‌لیتر محلول یک مولار هیدروکلریک اسید با پالادیم نیتترات (۱۵ میلی‌گرم) به محلول اولیه اضافه و به مدت نیم ساعت به هم زده شد. پس از آن، محلول یک مولار سدیم هیدروکسید به مخلوط افزوده شد تا pH به ۱۰ برسد.

۳-۳- آنالیز تخلخل سنجی

با استفاده از آنالیز تخلخلسنجی جذب و واجذب گاز نیتروژن، مساحت سطح، قطر و حجم کلی حفره‌های نانوکاتالیست سنتز شده اندازه‌گیری شد (جدول ۱).

جدول ۱. نتایج آنالیز تخلخلسنجی برای کاتالیست

Pd/g-C ₃ N ₄	
۳۷/۳۵	مساحت سطح (m ² .g ⁻¹)
۳۸/۳۵	قطر حفره‌ها (nm)
۰/۳۵۶۳	حجم حفره‌ها (cm ³ .g ⁻¹)

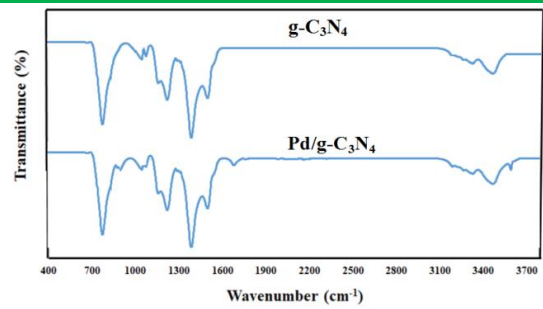
۴-۳- آنالیز پلاسمای جفت‌شده القایی

مقدار فلز پالادیم نشاندهنده بر روی بستر کاتالیست با روش پلاسمای جفت‌شده القایی به دست آمد. با توجه به داده‌های به دست آمده، مقدار پالادیم نشاندهنده شده 1/69 درصد (۰/۶۸۲ مول درصد) بود.

۵-۳- بررسی ریخت و اندازه ذرات با میکروسکوپ

الکترونی عبوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی

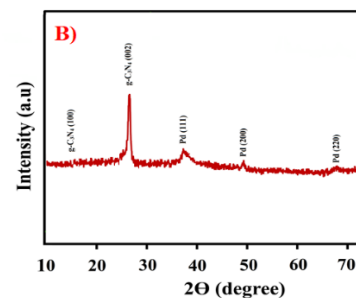
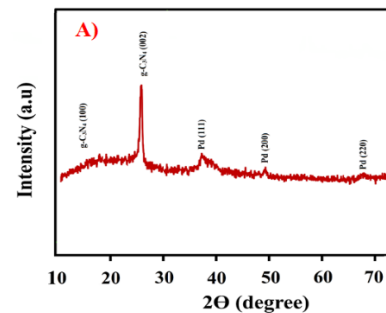
تصویرهای میکروسکوپ الکترونی عبوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی از کاتالیست Pd/g-C₃N₄، به خوبی فرار گرفتن پالادیم بر روی بستر کربن نیتريد در اندازه نانومتری را نشان می‌دهد (شکل‌های ۳A و ۳B). همان‌طور که در شکل ۳A مشاهده می‌شود، نانوذرات پالادیم تقریباً به صورت همگن در کاتالیست توزیع شده‌اند. نقاط کوچک تاریک در عکس میکروسکوپ الکترونی عبوری، نانوذرات پالادیم را نشان می‌دهند. همچنین تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (شکل ۳B) نشان می‌دهند که کاتالیست دارای یک ریخت صفحه‌ای هست، که باعث افزایش مساحت سطح و توزیع یکنواخت مکان‌های فعال می‌شود که تاثیر زیادی بر افزایش فعالیت کاتالیست می‌گذارد. همچنین از کاتالیست بعد از بازیابی تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گرفته شد که نشان می‌دهد ریخت کاتالیست بعد از بازیابی تغییر نکرده است.



شکل ۱. طیف زیرقرمز مربوط به g-C₃N₄ و Pd/g-C₃N₄.

۲-۳- الگوی پراش پرتو ایکس

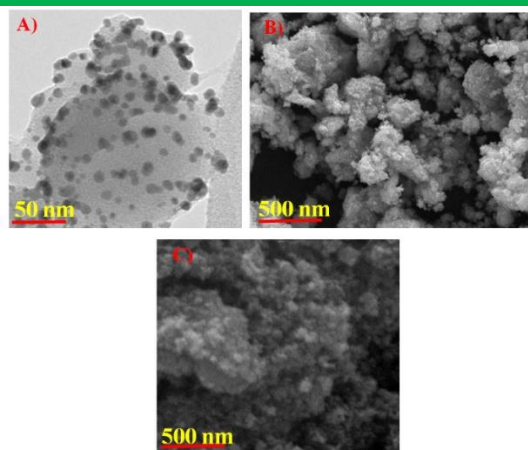
شکل ۲A الگوی پراش پرتو اشعه ایکس مربوط به کاتالیست Pd/g-C₃N₄ سنتز شده را نشان می‌دهد. پیک در زاویه ۲θ برابر با ۲۷/۴ درجه مربوط به صفحه (۰۰۲)، است که شبکه بلوری نانوذرات کربن نیتريد را نشان می‌دهد (JCPDS شماره ۸۷-۱۵۲۶) پیک‌های موجود در زاویه‌های پراش ۳۹/۶۶، ۴۶/۴۶ و ۶۷/۴۷ درجه مربوط به صفحه‌های (۱۱۱)، (۲۰۰) و (۲۲۰) مربوط به نانوذرات پالادیم در نانوکاتالیست سنتز شده می‌باشد (JCPDS شماره ۰۵-۰۶۸۱) [۲۷]. میانگین اندازه بلورک‌های نانوکاتالیست بر اساس رابطه دی‌بی-شرر برابر ۲۵-۳۰ نانومتر محاسبه شد. در زاویه ۲θ = ۲۷/۴ درجه، بیشینه شدت پیک پراش پرتو ایکس برای کاتالیست سنتز شده مشاهده می‌شود. همچنین ماهیت کاتالیست بازیابی شده با آنالیز پراش پرتو ایکس بررسی شد که شدت پیک‌ها کمی کاهش پیدا کرده است (شکل ۲A).



شکل ۲. (A) الگوی پراش پرتو ایکس کاتالیست Pd/g-C₃N₄ و (B) الگوی پراش پرتو ایکس کاتالیست C₃N₄ بازیابی شده.

ردیف‌های ۲-۷). علاوه بر این، از حلال‌های مختلف استفاده شد، در حالی که سایر شرایط واکنش بدون تغییر باقی ماند. حلال‌های اپروتیک مانند دی‌متیل سولفوکسید، *N,N*-دی‌متیل فرمالید، کلروفرم، استونیتریل و دی‌اکسان در این سامانه کاتالیستی موثر نبودند (جدول ۲، ردیف‌های ۱-۸)، همچنین مخلوط اتانول/آب (۱:۱) و دی‌اکسان/آب (۱:۱) نیز مورد آزمایش قرار گرفتند و فعالیت‌های خوبی را نشان دادند (جدول ۲، ردیف‌های ۱۲ و ۱۳). بنابراین، مخلوط حلال‌های اتانول/آب (۱:۱) به عنوان یک حلال سبز برای این واکنش انتخاب شد. همچنین مقدار کاتالیست $Pd/g-C_3N_4$ بهینه شد (جدول ۲، ردیف‌های ۱۴ و ۱۵). در حضور ۰/۰۲ گرم کاتالیست، بهترین نتیجه حاصل شد. همچنین، بررسی اثر دما نشان داد که در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد بهترین نتیجه به دست می‌آید.

پس از بهینه‌کردن شرایط واکنش، عملکرد کاتالیست $Pd/g-C_3N_4$ در واکنش جفت‌شدن آریل‌ی‌دها، آریل‌برمی‌دها و آریل‌کلریدهای گوناگون با فنیل بورنیک اسید بررسی شد. همه واکنش‌ها در مخلوط آب/اتانول (۱:۱) به عنوان حلال، پالادیم/کربن نیتريد گرافیتی (۰/۰۲ گرم) به عنوان کاتالیست و پتاسیم کربنات (یک میلی‌مول) به عنوان باز در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد (جدول ۳). بهره واکنش‌ها برای آریل‌های با استخلاف‌های الکترون‌کشنده و الکترون‌دهنده متفاوت است. آریل‌های با گروه‌های الکترون‌دهنده بهره بیشتری را نسبت گروه الکترون‌کشنده نشان دادند (جدول ۳) همچنین آریل‌ی‌دها نسبت به آریل‌برمی‌دها (جدول ۳، ردیف‌های ۱۰-۱۲) و آریل‌کلریدها (جدول ۳، ردیف ۱۳-۱۵) واکنش‌پذیری بهتری نشان دادند.

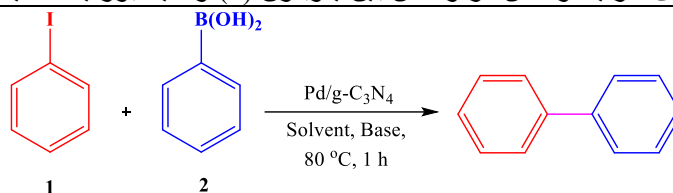


شکل ۳. A) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری کاتالیست $Pd/g-C_3N_4$ (B) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی کاتالیست $Pd/g-C_3N_4$ و C) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی کاتالیست $Pd/g-C_3N_4$ بازیابی‌شده.

۳-۶- بررسی‌های کاتالیستی

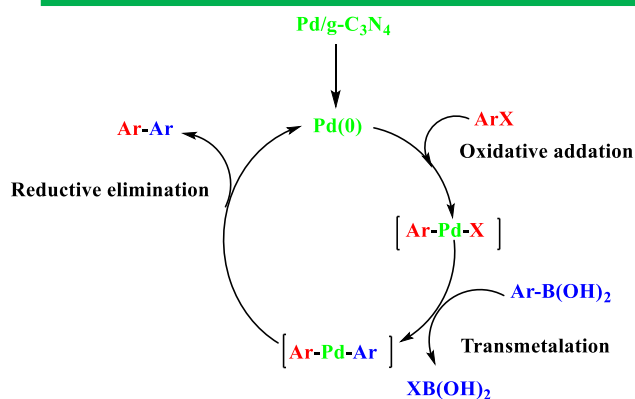
فعالیت کاتالیست $Pd/g-C_3N_4$ در واکنش سوزوکی بین آریل‌های هالیدها و آریل‌بورنیک اسید بررسی شد. از آنجا که این سامانه کاتالیستی به اکسیژن حساس نیست، واکنش‌ها در جو هوا انجام شد. برای بهینه‌سازی شرایط واکنش، واکنش بین یدوبنزن (1) و فنیل بورنیک اسید (2) به عنوان واکنش الگو انتخاب شد. نتایج تجربی در جدول ۲ آورده شده است. بر طبق نتایج، واکنش بدون کاتالیست، انجام نمی‌گیرد (جدول ۲، ردیف ۱). سپس نوع باز بهینه شد، بر اساس این نتایج، پتاسیم کربنات بهتر از بازهای دیگر مانند سزیم کربنات، سدیم هیدروکسید و پتاسیم فسفات بود (جدول ۲،

جدول ۲. بهینه‌سازی شرایط واکنش در واکنش بین یدوبنزن (1) و فنیل بورنیک اسید (2) الف



ردیف	مقدار کاتالیست (گرم)	حلال (۱ میلی‌لیتر)	باز (یک میلی‌مول)	بازده (%)
۱	۰/۰۱	دی‌اکسان	پتاسیم کربنات	۰
۲	۰/۰۱	-	پتاسیم کربنات	۰
۳	۰/۰۱	دی‌اکسان	-	۱۰
۴	۰/۰۱	دی‌اکسان	پتاسیم کربنات	۵۶
۵	۰/۰۱	دی‌اکسان	سزیم کربنات	۵۴
۶	۰/۰۱	دی‌اکسان	سدیم هیدروکسید	۳۴
۷	۰/۰۱	دی‌اکسان	پتاسیم فسفات	۴۹
۸	۰/۰۱	دی‌متیل سولفوکسید	پتاسیم کربنات	۳۷
۹	۰/۰۱	<i>N,N</i> -دی‌متیل فرمالید	پتاسیم کربنات	۴۵
۱۰	۰/۰۱	کلروفرم	پتاسیم کربنات	۲۱
۱۱	۰/۰۱	استونیتریل	پتاسیم کربنات	۵۲
۱۲	۰/۰۱	آب/اتانول	پتاسیم کربنات	۷۰
۱۳	۰/۰۱	آب/دی‌اکسان	پتاسیم کربنات	۶۷
۱۴	۰/۰۲	آب/اتانول	پتاسیم کربنات	۸۹
۱۵	۰/۰۳	آب/اتانول	پتاسیم کربنات	۸۲

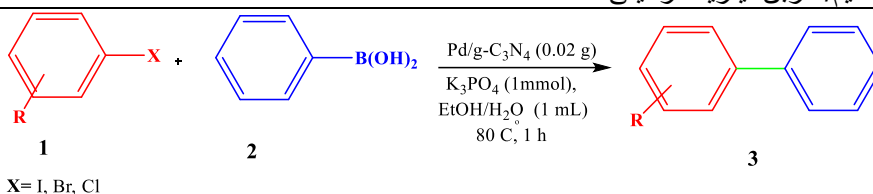
الف شرایط واکنش: یدوبنزن (۱ میلی‌مول)، فنیل بورنیک اسید (۱ میلی‌مول)، حلال، کاتالیست، باز، زمان ۱ ساعت و دما ۸۰ درجه سانتی‌گراد.

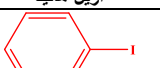
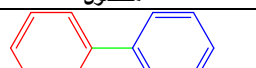


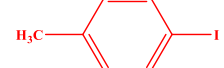
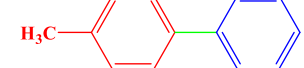
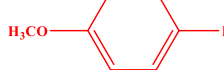
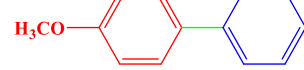
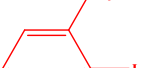
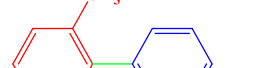
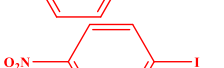
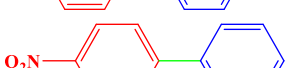
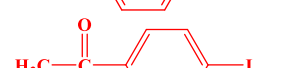


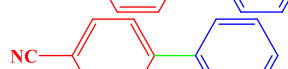



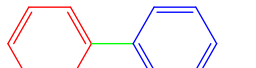

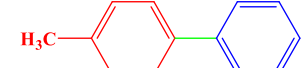


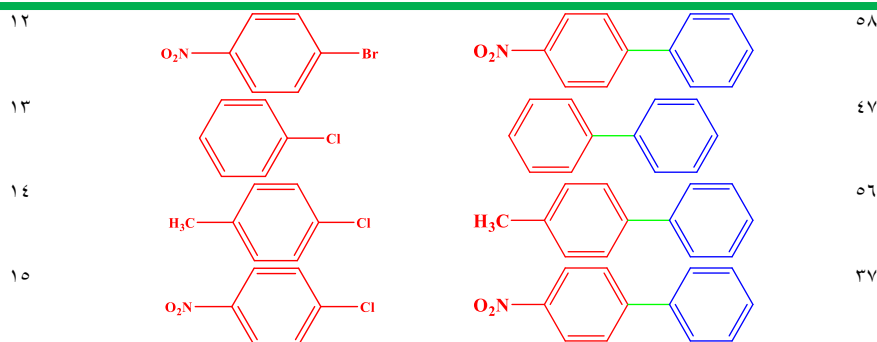
شکل ۴. سازوکار پیشنهادی برای واکنش جفت‌شدن کربن-کربن سوزوکی.

۷-۳. سازوکار پیشنهادی برای واکنش جفت‌شدن سوزوکی سازوکار پیشنهادی برای واکنش سوزوکی با استفاده از کاتالیست Pd/g-C₃N₄ در شکل ۴ نشان داده شده است. در مرحله اول که یک واکنش افزایش-اکسایشی است، Pd⁰ پیوند کربن-هالوژن را شکافته و به درون این پیوند انتقال می‌یابد و کمپلکس Ar-Pd(II)-X تولید می‌شود. سپس، این کمپلکس می‌تواند یک حلقه آریل دیگر از فنیل بورونیک اسید فعال‌شده را بپذیرد و کمپلکس Ar-Pd-Ar تشکیل دهد در انتها، کمپلکس پالادیم که دارای دو حلقه آریل هست می‌تواند یک واکنش حذف-کاهشی انجام دهد تا پیوند کربن-کربن تشکیل شود و گونه Pd⁰ بازآفرینی و چرخه کاتالیستی جدیدی را آغاز کند.

جدول ۳. واکنش جفت‌شدن سوزوکی آریل هالیدها با فنیل بورونیک اسید در حضور کاتالیست پالادیم/کربن نیتريد گرافیتی الف



ردیف	آریل هالید	محصول	بازده
۱			۸۹
۲			۹۵
۳			۹۰
۴			۹۷
۵			۸۵
۶			۷۳
۷			۸۱
۸			۷۶
۹			۷۹
۱۰			۷۵
۱۱			۸۱



الف شرایط واکنش: آریل هالید (۱ میلی مول)، فنیل بورنیک اسید (۱ میلی مول)، آب/اتانول (۱ میلی لیتر)، $Pd/g-C_3N_4$ (۰/۰۲ g)، پتاسیم کربنات (۱ میلی مول) زمان ۱ ساعت و دمای ۸۰ درجه سانتی گراد.

۸-۳- بازیابی کاتالیست

بازیابی کاتالیست‌ها به ویژه وقتی در کاتالیست از فلزات گرانبها استفاده می‌شود، قابلیت استفاده دوباره کاتالیست یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های است که باید بررسی شود. برای بازیابی کاتالیست $Pd/g-C_3N_4$ بعد از اتمام واکنش بین یدوبنزن و فنیل بورنیک اسید، کاتالیست با استفاده از سانتریفوژ جدا و چندین مرتبه با آب و اتانول شستشو و در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در آن خشک گردید. سپس کاتالیست بازیابی شده، دوباره در همین واکنش مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به نتایج به‌دست آمده (جدول ۴)، کاتالیست $Pd/g-C_3N_4$ به‌طور رضایت‌بخشی، چهار بار متوالی بدون کاهش چشمگیر در فعالیت اولیه بازیابی و مورد استفاده دوباره قرار گرفت.

جدول ۴. بررسی بازیابی کاتالیست $Pd/g-C_3N_4$

بازده (%)	دفعات بازیابی کاتالیست
۸۹	۱
۸۹	۲
۸۵	۳
۸۵	۴

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، ابتدا نانوکاتالیست ناهمگن پالادیم بر روی بستر کربن نیتريدگرافیتی سنتز و شناسایی شد. سپس، برای انجام واکنش سوزوکی بین آریل هالیدها و فنیل بورنیک اسید با بازده خوب تا عالی مورد استفاده قرار گرفت. از برتری‌های این کاتالیست می‌توان به اندازه ذرات کاتالیست که در مقیاس نانو است، سطح فعال بالا، قابلیت بازیابی و استفاده دوباره (حداقل ۴ بار در چرخه واکنش) و زمان به نسبت کوتاه برای انجام واکنش اشاره کرد.

سپاسگزارى

نویسنده مقاله از حمایت های مالی معاونت آموزشی و پژوهشی دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان صمیمانه تشکر می نماید.

*عهده دار مکاتبات

نشانی: ایران، استان خوزستان، شهر بهبهان، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، دانشکده علوم پایه، بخش شیمی
پیام نگار: z.bazyar@bkatu.ac.ir

مراجع

- [1] Y. Zang, S. Gao, B. Jing, H. Sun, J. Wang, J. Liu, F. Miao, L. Xu, J. Mater. Sci. **58**, 170 (2023).
- [2] K. R. Chaudhari, A. P. Wadawale, A. K. Pathak, S. Dey, Inorg. Chem. **63**, 1427 (2024).
- [3] Y. Zhou, L. Qiu, J. Li, W. Xie, J. Am. Chem. Soc. **145**, 28146 (2023).
- [4] K. Islam, V. Arora, B. Vikas, Nag, A. Kumar, ChemCatChem. **14**, 202200440 (2022).
- [5] M. Neysi, D. Elhamifar, Front. Chem. **11**, 1112911 (2023).
- [6] S. Kargar, D. Elhamifar, Materials Today Chemistry. **17**, 100318 (2020).
- [7] A. K. King, A. Brar, G. Li, M. Findlater, Organometallics. **42**, 2353 (2023).
- [8] Y. Watanabe, H. Morozumi, H. Mutoh, K. Hagiwara, M. Inoue, Angew. Chem. **135**, 202309688 (2023).
- [9] A. Ahmed, I. Mushtaq, S. Chinnam, Future J. Pharm. Sci. **9**, 67 (2023).
- [10] C. Palladino, T. Fantoni, L. Ferrazzano, A. Tolomelli, W. Cabri, ACS Sustain. Chem. Eng. **11**, 15994 (2023).
- [11] L. Riva, G. Nicastro, M. Liu, C. Battocchio, C. Punta, A. Sacchetti, Gels **8**, 789 (2022).
- [12] J. Lakshmi Devi, B. R. Naidu, K. Venkateswarlu, Mol. Catal. **522**, 112237 (2022).
- [13] S. Nasr, Journal of Electronic Materials **52**, 5362 (2023).

- [21] M. Shaker, D. Elhamifar, *New J. Chem.* **44**, 3445 (2020),
- [22] M. Neysi, D. Elhamifar, *Sci. Rep.* **12**, 7970 (2022).
- [23] M. Shaker, D. Elhamifar, *Mater. Today Chem.* **18**, 100377 (2020).
- [24] M. Hosseini-Sarvari, Z. Bazyar, *Chem. Select* **3**, 1898 (2018).
- [25] J. Wen, J. Xie, X. Chen, X. Li, *Appl. Surf. Sci.* **391**, 72 (2017).
- [26] T. P. Vijayakumar, M. D. Benoy, J. Duraimurugan, G. S. Kumar, M. Shkir, P. Maadeswaran, A. S. Kumar, K. A. R. Kumar, *Diamond Related Mater.* **121**, 108735 (2022).
- [27] X. Zhao, J. Xie, X. Liu, X. Liu, *Appl Organometal Chem.* **33**, e4623 (2019).
- [14] K. Matsubara, K. Tomomatsu, A. Tajiri, A. Watanabe, Y. Koga, R. Ishikawa, Y. Yamada, *Eur. J. Inorg. Chem.* **2022**, 202100870 (2022).
- [15] K. Goswami, D. Das, P. Bera, S. Roy, M. M. Seikh, P. K. Sinha, A. Gayen, *J. Mol. Struct.* **1299**, 137136 (2024).
- [16] T. Suzuki, K. Tanaka, C. Wakabayashi, E. Saita, M. Yoshida, *Nat. Chem. Biol.* **10**, 930 (2014).
- [17] F. Dehghani Firuzabadi, Z. Asadi, *Inorg. Nano. Met. 1* (2023).
- [18] H. Maati, O. Amadine, Y. Essamlali, I. Ayouch, H. Mahi, K. Abdelouahdi, M. Zahouily, *J. Mol. Struct.* **1294**, 136347 (2023).
- [19] A. Mastalir, A. Molnár, *ChemCatChem.* **15**, 202300643 (2023).
- [20] M. Ashraf, M. S. Ahmad, Y. Inomata, N. Ullah, M. N. Tahir, T. Kida, *Coord. Chem. Rev.* **476**, 214928 (2023).