

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه مراغه

دانشگاه مراغه

دانشکده علوم پایه

گروه شیمی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته شیمی آلی

با عنوان:

سنتز و شناسایی نانورآکتورهای محتوی فلز واسطه به عنوان نانوکاتالیست جهت

تبدیلات آلی

پژوهشگر:

نسرین نوروزی

استاد راهنما:

دکتر صادق رستم نیا

اساتید مشاور:

دکتر علی مرسلی

دکتر لیو شیائو

شهریور ۱۳۹۲

تقدیم به پدر و مادر عزیز و استاد گرامیم

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه

درخت پر بار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان

در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم .

والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم چرا

که این دو وجود پس از پروردگار مایه هستی ام بوده اند دستم را گرفتند و راه رفتن

را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند.

آموزگارانی که برایم زندگی؛ بودن و انسان بودن را معنا کردند

حال این برگ سبزی است تحفه درویش تقدیم آنان... .

تقدیر و تشکر

اکنون که به مدد لطف و عنایت آن قادر متعال توفیق آن را یافتم تا این مجموعه را به عنوان پایان نامه ارائه نمایم بر خود لازم میدانم تا به رسم ادب و حق شناسی نهایت ارادت قلبی ام را نسبت به استاد بزرگوار و ارجمندم جناب آقای دکتر صادق رستم نیا ابراز نمایم که راهنمائیهای ارزنده و حکیمانه ایشان همواره راهگشای و نقطه امیدی بود در لحظات دشوار تلاشم.

از مشاوران محترم جناب آقای دکتر علی مرسلی و دکتر لیو شیائو تشکر و قدردانی می کنم.

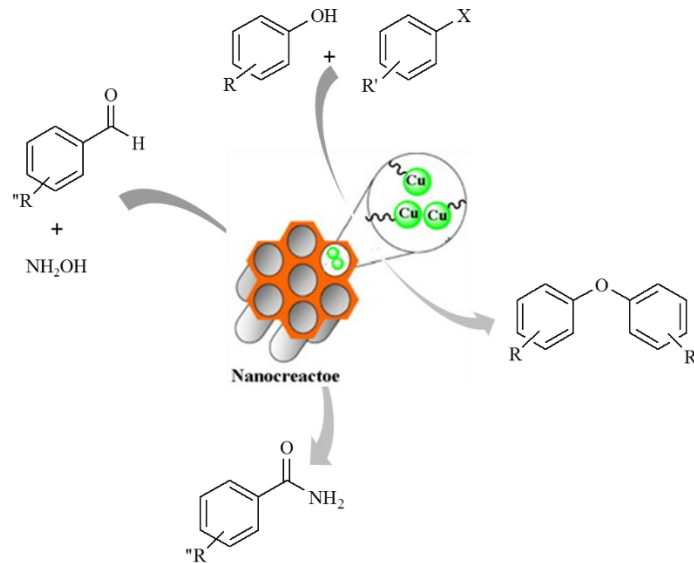
از جناب آقای دکتر بهنام سیدی که زحمت مطالعه، تصحیح و قضاوت پایان نامه این حقیر را عهده دار بوده‌اند کمال تشکر را دارم. از دکتر مرتضی ایرانیفام به عنوان نماینده تحصیلات تکمیلی سپاسگزارم. جا دارد تا مراتب قدر دانی خود را نسبت به گروه شیمی دانشگاه مراغه دکتر امینی، دکتر اسرافیلی، دکتر افتخاری، دکتر مهدوی نیا، دکتر موسوی فر به خاطر حمایت و همکاریشان که سهم قابل توجهی در این توفیق داشته اند اعلام دارم.

و در خاتمه از دوستان و همکارانم در گروه تحقیقاتی شیمی آلی و نانوشیمی (ONG) خانم پورحسن، خانم جعفری،

خانم امینی، آقای گلچین، آقای قلی پور، آقای لامعی، آقای نوری و آقای فتحی سپاسگزاری می نمایم.

نام خانوادگی دانشجو: نوری	نام: نسرين
استاد راهنما: دکتر صادق رستم نیا اساتید مشاور: دکتر علی مرسلی، دکتر لیو شیائو	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: شیمی
گرایش: آلی	گرایش: آلی
دانشگاه: مراغه	دانشکده: علوم پایه
تاریخ دانش آموختگی: ۱۳۹۲/۰۶/۲۵	
تعداد صفحه: ۹۷	
عنوان: سنتز و شناسایی نانورآکتورهای محتوی فلز واسطه به عنوان نانو کاتالیست جهت تبدیلات آلی	
کلید واژه ها: نانورآکتور، مزوپورس، نانو کاتالیست، IRMOF-3، SBA-15.	
<p>چکیده:</p> <p>در پروژه حاضر قصد داریم نانوحفره های SBA-15 و IRMOF-3 را به عنوان نانورآکتور در انجام واکنش های آلی بررسی کنیم.</p> <p>چارچوب های فلز- آلی نمونه از مواد سوپرامولکول آلی- معدنی هستند که در طول دو دهه اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده اند و از مزایایی مانند مساحت سطح بالا و قابلیت عاملدار شدن برخوردار می باشند..</p> <p>در این پروژه چارچوب فلز- آلی IRMOF-3 از کلاسترهای Zn₄O با اتصالات لیگاندی ۲- آمینوترفتالیک اسید تولید شد. این به عنوان یک نانو کاتالیست مؤثر برای واکنش تک ظرفی و سه جزئی آمین و آلدئید و دی متیل فسفیت در غیاب حلال مورد استفاده قرار گرفت تا α- آمینو فسفونات مربوطه را با بازده بالا تولید کند و چندین بار مورد استفاده مجدد قرار گرفت.</p>	
<p>SBA-15 نمونه دیگری از بسترهای ناهمگن می باشد که از اواخر قرن بیستم مورد توجه قرار گرفته است. این نانورآکتورهای مزوپورسی از ساختارهای یکنواخت، و مساحت سطح و حجم حفره ی بالایی برخوردارند.</p> <p>عاملدار کردن سطح به عنوان یکی از مراحل مهم در بکارگیری مواد مزوپورس در کاربردهای متفاوت محسوب می شود. عاملدار کردن با ارگانوسیلان ها، لایه ای از گروه های عاملی را روی سطح حفره ها ایجاد می کند که منجر به توزیع یکنواخت فلزات واسطه در کانال های SBA-15 در مرحله متعاقب می شود.</p> <p>ما در این پژوهش سطح بستر SBA-15 را با گروه عاملی نظیر آمین های مختلف اصلاح کرده و سپس فلز مس را روی آن ها نشانیدیم. شناسایی نانو کاتالیست حاصل با تکنیک های متفاوت مانند SEM، TEM، FT-IR، XRD</p>	

و TGA-DSC انجام داده و در نهایت کارایی نانوکاتالیست حاصل را برای تسریع واکنش های آلی مختلف مانند *O*-آریلاسیون و سنتز تک ظرفی آمیدها از آلدهیدهای مربوطه بررسی کردیم.



فهرست مطالب

عنوان.....	صفحه.....
فصل اول: مواد نانومتخلخل و کاربرد آنها.....	۱.....
۱-۱- مقدمه ای بر مواد نانومتخلخل.....	۲.....
۱-۲- چارچوب های فلز- آلی.....	۳.....
۱-۲-۱- نامگذاری MOFs.....	۴.....
۱-۲-۲- سنتز MOFs.....	۵.....
۱-۲-۳- طراحی MOFs برای واکنش های کاتالیستی.....	۶.....
۱-۲-۳-۱- سنتز MOFs محتوی سایت های فلزی اشباع نشده.....	۷.....
۱-۲-۳-۲- سنتز MOFs با کمپلکس های فلزی.....	۸.....
۱-۲-۳-۳- سنتز MOFs عاملدار شده با اصلاح پساستتزی.....	۸.....
۱-۲-۴- ارزیابی کارایی کاتالیستی MOFs.....	۹.....
۱-۲-۵- انواع MOFs مورد استفاده در واکنش های کاتالیستی.....	۱۱.....
۱-۲-۵-۱- MOFs با سایت های فعال فلزی.....	۱۱.....
۱-۲-۵-۲- MOFs با گروه های عاملی فعال.....	۱۱.....

- ۳-۱-۳-۱- سیلیکای مزوپورس ۱۲
- ۳-۱-۱- سنتز مواد مزوپورس ۱۲
- ۳-۱-۱- خودتجمعی مشارکتی سورفکتانت و سیلیکا برای تشکیل مزوساختار ۱۳
- ۳-۱-۲- روش قالب گیری کریستال مایع (LCT) ۱۴
- ۳-۱-۳- روش هیدروترمال ۱۴
- ۳-۱-۳-۱- سنتزهای بازی ۱۵
- ۳-۱-۳-۲- سنتزهای اسیدی ۱۵
- ۳-۱-۴- نانو کاستینگ ۱۶
- ۳-۲- مروری بر مزوپورهای SBA ۱۷
- ۳-۳- استفاده کاتالیستی از مواد مزوپورس ۱۸

فصل دوم: چارچوب فلز-آلی (IRMOF-3) به عنوان نانو کاتالیست و هدایتگر موثر برای واکنش سه جزئی

- کاباچنیک-فیلدز ۱۹
- ۲-۱- مقدمه ۲۰
- ۲-۲- سنتز α -آمینو فسفونات ها ۲۲
- ۲-۲-۱- واکنش سه جزئی ۲۳
- ۲-۲-۲- تشکیل پیوند کربن-فسفر از هیدروفسفونیل سیون شیف بازها ۲۴
- ۲-۲-۳- تشکیل پیوند کربن-کربن ۲۴
- ۲-۲-۴- تشکیل پیوند کربن-نیتروژن ۲۵

۲۵.....	۳-۲-ارائه روش جدید جهت تهیه آمینو فسفونات ها با استفاده از IRMOF-3 در پروژه حاضر
۲۶.....	۴-۲-بخش تجربی
۲۶.....	۴-۲-۱-مواد و دستگاه های مورد استفاده
۲۷.....	۴-۲-۲-روش انجام آزمایش ها
۲۷.....	۴-۲-۱- سنتز IRMOF-3
۲۷.....	۴-۲-۲- روش انجام واکنش کاباچنیک-فیلدز
۲۸.....	۴-۲-۳- شناسایی محصولات
۳۱.....	۵-۲- بحث و نتایج
۳۱.....	۵-۲-۱- سنتز و شناسایی کاتالیست
۳۵.....	۵-۲-۲- مطالعات کاتالیستی
۴۰.....	۵-۲-۳- بررسی طیف $^1\text{H NMR}$ ترکیب 2a
۴۲.....	۶-۲- نتیجه گیری
۴۳.....	فصل سوم: تهیه و بررسی فعالیت SBA-15 محتوی مس در سنتز آمیدها و واکنش های O-آریلاسیون
۴۴.....	۳-۱- مقدمه
۴۶.....	۳-۲- عاملدار کردن سیلیکای مزوپورس به روش پیوند پسانتزی
۴۷.....	۳-۲-۱- سنتز و شناسایی سیلیکای مزوپور عاملدار شده در پروژه حاضر
۴۷.....	۳-۲-۱-۱- سنتز SBA-15 و عاملدار کردن آن با گروه دی آمین
۴۸.....	۳-۲-۱-۲- کئوردیناسیون فلز مس به SBA-15 عاملدار شده

- ۴۸..... ۳-۱-۲-۳- شناسایی کاتالیست SBA-15 و نمونه عاملدار شده آن
- ۵۷..... ۳-۳- روش جدید تهیه آمیدها و آریل اترها در پروژه حاضر بر مبنای نانو کاتالیست های مزوپور
- ۵۸..... ۴-۳- پیشینه سنتز آمیدها به روش های متفاوت
- ۶۱..... ۳-۴-۱- سنتز و شناسایی محصولات آمید
- ۶۱..... ۳-۴-۱-۱- روش کلی برای سنتز آمیدها با کاتالیست SBA-15/PrNHEtNH₂/Cu(II)
- ۶۱..... ۳-۴-۲- شناسایی محصولات
- ۶۵... ۳-۴-۲- بررسی کارایی کاتالیست SBA-15/NHEtNH₂/Cu(II) در سنتز آمیدها از آلدهیدهای مربوطه
- ۷۰..... ۳-۴-۳- طیف های ¹H NMR و ¹³C NMR ترکیب **2a**
- ۷۰..... ۳-۴-۳-۱- بررسی طیف ¹H NMR ترکیب **2a**
- ۷۴..... ۳-۴-۳-۲- بررسی طیف ¹³C NMR ترکیب **2a**
- ۷۶..... ۳-۵- واکنش های O- آریلاسیون
- ۷۶..... ۳-۵-۱- پیشینه O- آریلاسیون
- ۷۸..... ۳-۵-۲- روش ساده و موثر برای سنتز آریل اترها در پروژه حاضر
- ۷۸..... ۳-۵-۳- سنتز و شناسایی محصولات آریل اترها
- ۷۸.... ۳-۵-۳-۱- روش کلی برای واکنش O- آریلاسیون با کاتالیست SBA-15/PrNHEtNH₂/Cu(II)
- ۷۹..... ۳-۵-۳-۲- شناسایی محصولات
- ۸۲..... ۳-۵-۴- بررسی کارایی SBA/Cu(II) در واکنش O- آریلاسیون
- ۸۶..... ۳-۵-۵- طیف های ¹H NMR و ¹³C NMR ترکیب **3a**

۱-۵-۵-۳- بررسی طیف ^1H NMR ترکیب **3a** ۸۶

۲-۵-۵-۳- بررسی طیف ^{13}C NMR ترکیب **3a** ۹۰

۳-۶- نتیجه گیری ۹۲

منابع و مراجع ۹۳

فهرست شکل ها

شکل	صفحه
شکل ۱-۱: پرکاربردترین ارتباط دهنده های آلی	۶
شکل ۲-۱: اصلاح پسااستتزی IRMOF-3 و کئوردیناسیون آن به سایت های Au(III)	۹
شکل ۳-۱: دو مسیر سنتز مواد مزوپورس MCM-41	۱۳
شکل ۴-۱: روش نانو کاستینگ برای تشکیل کربن مزوپورس و بازیافت سیلیکای مصرف شده	۱۷
شکل ۱-۲: الف) پیوند هیدروژنی میان گروه های آمین و اتم های اکسیژن گروه کربوکسیلات. ب) همان برهمکنش در دی متیل آمینو ترفتالات	۲۱
شکل ۲-۲: هیدرولیز پیوند Zn-کربوکسیلات و تولید گروه های Zn-OH و پروتون های کریوکسیلیک اسید	۲۲
شکل ۳-۲: روش های سنتز α -آمینوفسفونات ها	۲۳
شکل ۴-۲: تشکیل پیوند کربن-فسفر	۲۴
شکل ۵-۲: تشکیل پیوند کربن-کربن	۲۴
شکل ۶-۲: تشکیل پیوند کربن-نیترژن	۲۵
شکل ۷-۲: کاتالیست جامد متخلخل دو عاملی اسید-بازی	۲۶
شکل ۸-۲: مراحل سنتز IRMOF-3	۳۱
شکل ۹-۲: طیف FT-IR مربوط به IRMOF-3 سنتز شده	۳۱
شکل ۱۰-۲: پراش انعکاسی اشعه X (XRD) چارچوب IRMOF-3 در پروژه حاضر	۳۲
شکل ۱۱-۲: تصویر میکروسکوپ نوری IRMOF-3	۳۳
شکل ۱۲-۲: تصویر SEM مربوط به IRMOF-3 سنتز شده	۳۳

- شکل ۲-۱۳: تصویر TEM مربوط به IRMOF-3 سنتز شده ۳۴
- شکل ۲-۱۴: نمودار جذب و واجدبی نیتروژن IRMOF-3 در پروژه حاضر ۳۴
- شکل ۲-۱۵: محصولات ممکن حاصل از واکنش دی متیل فسفیت، آمین و آلدهید ۳۵
- شکل ۲-۱۶: مقایسه فعالیت کاتالیستی IRMOF-3 با کاتالیست های دیگر ۳۶
- شکل ۲-۱۷: مطالعه تأثیر مقدار کاتالیست IRMOF-3 در سنتز **3a** ۳۷
- شکل ۲-۱۸: افزایش شیمی گزین فسفیت به آلدهید و کتون ۳۹
- شکل ۲-۱۹: قابلیت بازیافت MOF در سنتز **3a** ۳۹
- شکل ۲-۲۰: طیف $^1\text{H NMR}$ ترکیب **3c** ۴۱
- شکل ۳-۱: کلردار کردن سطح مزوپورس و وکنش آن با معرف گرینیارد برای عاملدار کردن سطح سیلیکا ۴۶
- شکل ۳-۲: نمونه ای از گرافت پساسنتزی ارگانوسیلان ها روی سطح حاوی سیلانول ۴۷
- شکل ۳-۳: عاملدار کردن سطح سیلانول SBA-15 با APTMS و کثوردیناسیون متعاقب مس به آن ۴۸
- شکل ۳-۴: آنالیز XRD برای SBA-15 سنتز شده ۴۹
- شکل ۳-۵: نمودار جذب گاز نیتروژن برای SBA-15 ۴۹
- شکل ۳-۶: طیف FT-IR مربوط به SBA-15 ۵۰
- شکل ۳-۷: طیف FT-IR مربوط به SBA-15/NHEtNH₂ ۵۱
- شکل ۳-۸: تصویر SEM مربوط به مزوپور سنتز شده ۵۲
- شکل ۳-۹: تصویر SEM مربوط به SBA-15/NHEtNH₂ ۵۲
- شکل ۳-۱۰: تصویر SEM مربوط به SBA-15/NHEtNH₂/Cu(II) در پروژه حاضر ۵۳

- شکل ۳-۱۱: تصویر TEM مربوط به SBA-15 ۵۳
- شکل ۳-۱۲: تصویر TEM مربوط به SBA-15/PrNH₂EtNH₂ ۵۴
- شکل ۳-۱۳: تصویر TEM مربوط به SBA-15/NH₂EtNH₂/Cu(II) در پروژه حاضر ۵۴
- شکل ۳-۱۴: آنالیز CHN مزوپور SBA-15/PrNH₂EtNH₂ ۵۵
- شکل ۳-۱۵: آنالیز TGA/DTG مزوپور SBA-15/NH₂EtNH₂/Cu(II) در پروژه حاضر ۵۶
- شکل ۳-۱۶: آنالیز DSC مزوپور SBA-15/NH₂EtNH₂/Cu(II) در پروژه حاضر ۵۷
- شکل ۳-۱۷: نوآرایی آلدوکسیم به آمید از طریق مکانیسم آزدایی / آبدار کردن ۵۹
- شکل ۳-۱۸: نوآرایی آلدوکسیم به آمید از طریق جایگزینی آب ۶۰
- شکل ۳-۱۹: تشکیل حلقه متالوسیکل شش عضوی ۶۹
- شکل ۳-۲۰: مقایسه فعالیت کاتالیست SBA-15/Cu(II) در پروژه حاضر با کاتالیست های همگن بر مبنای گزارشات دیگر ۶۹
- شکل ۳-۲۱: بررسی قابلیت بازیابی کاتالیست در سنتز آمیدها ۷۰
- شکل ۳-۲۲: طیف ¹H NMR ترکیب **2a** ۷۲
- شکل ۳-۲۳: طیف ¹H NMR باز شده ترکیب **2a** ۷۳
- شکل ۳-۲۴: طیف ¹³C NMR ترکیب **2a** ۷۵
- شکل ۳-۲۵: کاربرد دی آریل اتر در ترکیبات بازدارنده متنوع ۷۶
- شکل ۳-۲۶: شمای کلی واکنش O-آریلاسیون ۸۲
- شکل ۳-۲۷: بررسی قابلیت بازیابی SBA-15/NH₂EtNH₂/Cu(II) در واکنش O-آریلاسیون ۸۶

شکل ۳-۲۸: طیف ^1H NMR ترکیب **3a** ۸۸

شکل ۳-۲۹: طیف ^1H NMR باز شده ترکیب **3a** ۸۹

شکل ۳-۳۰: طیف ^{13}C NMR ترکیب **3a** ۹۱

فهرست جدول ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲: مطالعه اثرات حلال و دما روی واکنش مدل	۳۶
جدول ۲-۲: سنتز مشتقات متفاوت α -آمینوفسفونات	۳۸
جدول ۱-۳: مطالعه اثرات حلال و دما روی واکنش مدل	۶۶
جدول ۲-۳: بررسی تأثیر مقدار کاتالیست در واکنش مدل	۶۶
جدول ۳-۳: بررسی تأثیر بازهای مختلف روی واکنش مدل	۶۷
جدول ۴-۳: تأثیر حضور استخلاف های متفاوت در سنتز آمیدها	۶۸
جدول ۵-۳: بررسی تأثیر حلال و دما روی واکنش O -آریلاسیون	۸۲
جدول ۶-۳: بررسی تأثیر مقدار کاتالیست SBA-15/Cu(II) روی واکنش O -آریلاسیون	۸۳
جدول ۷-۳: بررسی تأثیر بازهای متفاوت روی واکنش O -آریلاسیون	۸۳
جدول ۸-۳: بررسی تأثیر نسبت مولی PhOH/PhI روی واکنش O -آریلاسیون	۸۴
جدول ۹-۳: بررسی واکنش O -آریلاسیون در حضور مشتقات مختلف هالیدها و الکل ها	۸۵

(Abbreviations) جدول اختصارات

BDC	1,4-Benzenedicarboxylate
BTC	1,3,5-Benzenetricarboxylate
2-pymo	2-Hydroxypyrimidinolate
2,4-pydc	Pyridine-2,4-dicarboxylate
DMF	Dimethyl formamide
DMSO	Dimethyl sulfoxides,
ATA	2-Aminoterephthalate
TFA	Trifluoroacetic acid
Et	Ethyl
r.t.	Room temperature
TGA	Thermogravimetric analyses
DSC	Differential scanning calorimetry
XRD	X-ray diffractometry
BET	Brunauer–Emmett–Teller
FT-IR	Fourier transformed infrared spectra
SEM	Scanning electron micrographs
TEM	Transmission electron micrographs
MeOH	Methanol
CH ₃ CN	Acetonitrile
Ref.	Reference

فصل اول

مواد نانومتخلخل و کاربرد آنها



۱-۱- مقدمه ای بر مواد نانومتخلخل

مواد متخلخل به جهت ویژگی هایی نظیر مساحت سطح ویژه بالا، ظرفیت ذخیره سازی بالا و انتقال حرارت و الکتریسیته پایین مورد توجه ویژه ای قرار گرفته اند و کاربرد گسترده ای در مواد ساختاری سبک، بسترها و سطوح کاتالیستی، عایق های صوتی و وسایل نوری دارند. سیستم حفره این مواد می تواند مطابق با تعریف آیوپاک^۱ و براساس قطر حفره ها نامگذاری شود. حفره های کوچکتر از ۲ نانومتر میکروپورس نامیده می شوند زئولیت ها نمونه ای از میکروپورها هستند. حفره هایی که در محدوده ۲ تا ۵۰ نانومتر هستند مزوپورس نامیده می شوند خانواده M41S و SBA^۲ ها به این گروه تعلق دارند. مواد بالاتر از ۵۰ نانومتر مانند آلومینوسیلیکات های آمورف، ماکروپورس نامیده می شوند [۱].

در اینجا بیشتر روی مواد متخلخل هیبریدی آلی- معدنی بحث خواهیم کرد که در طول دو دهه اخیر بخصوص از سال ۱۹۹۵ تاکنون بیشتر مورد استفاده قرار گرفته اند. این هیبریدها به چندین روش می توانند سنتز شوند: (الف) جذب گونه های آلی در داخل حفره های بسترها (ب) ساخت قطعه به قطعه مولکول های آلی در داخل حفره ها (ج) اتصال گروه های عاملی مناسب از طریق تشکیل پیوند کووالانسی روی بستر (د) سنتز مستقیم ترکیب هیبریدی نهایی [۲].

¹ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemists)

² Santa Barbara Amorphous

چارچوب های فلز-آلی (MOFs³) و سیلیکاهای مزوپورس عاملدار شده با گروه های آلی نمونه هایی از پرکاربردترین مواد هیبریدی آلی- معدنی هستند که بیشتر آنها به ترتیب با روش های (د) و (ج) سنتز می شوند.

۲-۱- چارچوب های فلز-آلی

پلیمرهای کئوردیناسیونی (CPS⁴) مواد جامدی هستند که توسط شبکه توسعه یافته ای از یون های فلزی (یا کلاستر) کئوردینه شده به مولکول های آلی چند دندانه ای تشکیل می شوند. این تعریف گستره ی وسیعی از مواد تشکیل شده از فلزات و گونه های آلی را در بر می گیرد که ویژگی های متفاوتی نیز دارند برای مثال مواد آمورف و کریستالی، متخلخل و غیر متخلخل. در اینجا به گروهی از پلیمرهای کئوردیناسیونی با عنوان چارچوب های فلز آلی (MOFs) اشاره می شود که شامل مواد متخلخل و اغلب کریستالی هستند و شامل برهمکنش های قوی فلز-لیگاند هستند. پیوند های کئوردیناسیونی فلز-لیگاند قوی تر از پیوند های هیدروژنی هستند. بنابراین مطابق با تعریف بالا MOFs زیر مجموعه ای از خانواده وسیع CPS هستند. اهمیت های زیادی که اخیراً معطوف MOFs شده است نتیجه ای از چندین ویژگی برجسته آنها هست که عبارتند از تخلخل، شبکه های کریستالی و وجود برهمکنش فلز-لیگاند قوی. ساختار میکروپورس آنها مساحت سطح بالایی در حدود $5900 \text{ m}^2/\text{g}$ و حجم حفره ویژه $2 \text{ cm}^3/\text{g}$ را در کنار ابعاد و توپولوژی های متنوع حفره آنها فراهم می آورد. حجم حفره بالای MOFs منجر به کاربرد گسترده آنها در جداسازی و ذخیره سازی گازها، حتی گازهای انفجاری و معرف های قوی می شود. حضور برهمکنش های قوی فلز-لیگاند منجر به ایجاد تخلخل در مواد می شود که حتی با حذف کامل حلال ساختار آنها از هم فرو نمی پاشد. این ویژگی یک معیار اضافی را برای تقسیم بندی CPS به مواد دسته اول، دوم و سوم فراهم می کند [۳]. در پلیمرهای کئوردیناسیونی دسته اول پایداری حفره ها بستگی به مولکول های مهمان دارد که با حذف مولکول های مهمان ساختار حفره ها از هم فرو می پاشد. مواد دسته دوم حاوی حفره های

³ Metal-organic frameworks

⁴ Coordination polymers