

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه ساه نور

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته شیمی معدنی

دانشکده علوم

گروه شیمی

سنتز و شناسایی نانو ساختارهای مس (II) اکسید از پیش ماده های

چارچوب های فلز-آلی مس (II) متخلخل

استاد راهنما

دکتر علی مرسلی

استاد مشاور

دکتر فرزین مرندی

نگارش

نادیا نصیحت شنو

شهریور ۱۳۹۰



دانشگاه پیام نور
دانشکده علوم
گروه شیمی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته شیمی گرایش شیمی معدنی خانم نادیا نصیحت شنو تحت عنوان

سنتز و شناسایی نانو ساختارهای مس(II) اکسید از پیش ماده های چارچوب های فلز-آلی مس(II) متخلخل

در تاریخ ۹۰/۶/۲۱ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با نمره ۱۹/۵ با درجه عالی به تصویب
نهایی رسید.

امضاء	با مرتبه‌ی علمی دانشیار	۱- استاد راهنما دکتر علی مرسلی
امضاء	با مرتبه‌ی علمی دانشیار	۲- استاد مشاور دکتر فرزین مرنندی
امضاء	با مرتبه‌ی علمی استادیار	۳- استاد داور دکتر مریم رنجبر
امضاء	با مرتبه‌ی علمی مربی	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی مهندس جعفر عابدینی

تقدیم ہے

در و مادر



عزیزم

تقدیر و شکر

سپاس آفریدگاری را که ما را به نور معرفت و علم میناساخت تا پرتوی از انوار خورشید دانش بیکرانش در دل

راه یابد. بر خود لازم می دانم تا پس از شکر خدا، از کلیه عزیزانی که به نحوی در انجام این پایان نامه مریاری

نمودند قدردانی کنم:

از پدر بزرگوارم و مادر دلسوزم که در تمام دوران زندگی ام مشوق و پشتیبان من بودند و از اینکه لطف بیکران و

دعای خیرشان همواره بدرقه راهم بود، صمیمانه سپاسگزارم. از زحمات بی شائبه استاد ارجمندم جناب آقای

دکتر علی مرسلی که در انجام تمامی مراحل پایان نامه عالمانه و مشفقانه یاری ام نمودند خالصانه شکر و قدردانی می

کنم و همواره و امدارر، نمودها و محبت های ایشان می باشم که باعث ایجاد انگیزه و خودباوری در وجودم شد و

هرگز درس دست اندیشیدن را که از ایشان آموختم فراموش نخواهم کرد.

چکیده

پنج چارچوب فلز-آلی (MOF) مس (II) $\{ [Cu(tpa).(dmf)] (1), [Cu(Btec)(2,2'-bipy)_2]_{\infty} (2), [Cu_3(btc)_2] (3), [Cu(BDC)(bipy)](BDCH_2) (4) \}$ و $[Cu_3(TMA)_2(H_2O)_3]_n (5)$ با استفاده از لیگاندهای کربوکسیلاتی مختلف (tpa = BDC = ترفتالیک اسید = ۱،۴-بنزن دی کربوکسیلات، Btec = پیروملیتیک اسید = ۱،۲،۴-بنزن تتراکربوکسیلات، btc = TMA = تریمسیک اسید = ۱،۳ و ۵-بنزن تری کربوکسیلات) و $2,2'-bipy = 2,2'$ -بای پیریدین، $bipy = 4,4'$ -بای پیریدین، $dmf =$ دی متیل فرمامید؛ از طریق روش سولوترمال و رفلاکس در دمای اتاق سنتز و بوسیله ی پراش پرتو-X پودری (XRPD) و طیف سنجی IR شناسایی شده اند. از روش کلسیناسیون برای سنتز نانوذرات مس اکسید با استفاده از این پیش ماده ها استفاده شده است. پس از کلسیناسیون در دمای $500^{\circ}C$ MOFهای ۱، ۲ و ۵ نانوذرات مس (II) اکسید (CuO) با ساختار تنوریت و MOFهای ۳ و ۴، مخلوطی از نانوذرات مس (II) اکسید (CuO) با ساختار تنوریت و مس (I) اکسید (Cu_2O) با ساختار کوپریت را بوجود آورد. این پنج ترکیب در دماهای ۴۰۰ و $600^{\circ}C$ نیز کلسینه شد و تأثیر دما بر روی اندازه ی نانو ذرات و ریخت شناسی آنها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد مطالعه قرار گرفت.

واژگان کلیدی: چارچوب های فلز-آلی، لیگاندهای کربوکسیلاتی، مواد متخلخل، سنتز سولوترمال،

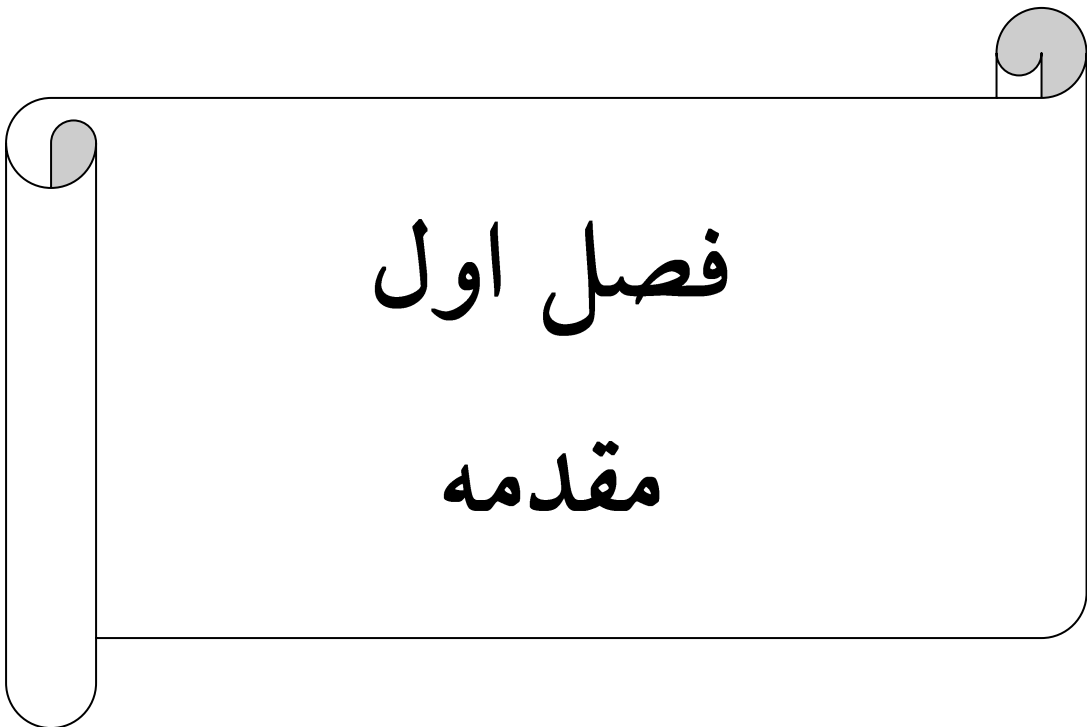
نانو مواد.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: مباحث نظری	۱
۱- مقدمه	۲
۱-۱ معرفی پلیمرهای کوئوردیناسیونی	۲
۱-۲ پلیمرهای کوئوردیناسیونی متخلخل	۴
۱-۲-۱ حفرات در پلیمرهای کوئوردیناسیونی	۵
۱-۲-۲ طراحی تخلخل پایدار	۹
۱-۳ جامدات بلورین متخلخل	۱۲
۱-۳-۱ معرفی چارچوب های فلز-آلی	۱۲
۱-۳-۱-۱ چارچوب های فلز-آلی میکرو متخلخل	۱۲
۱-۳-۱-۲ چارچوب های فلز-آلی کاتیونی	۱۶
۱-۳-۱-۳ چارچوب های فلز-آلی خشی	۱۷
۱-۳-۱-۴ چارچوب های فلز-آلی بر پایه ی متالوپورفیرین	۱۹
۱-۳-۱-۵ چارچوب های فلز-آلی از کلاسترهای اکسیدی	۲۰
۱-۳-۱-۶ چارچوب های فلز-آلی از کلاسترهای کالکوژنید	۲۱
۴-۱ معرفی واحدهای ساختاری ثانویه (SBUs)	۲۲
۱-۴-۱ لیگاندهای آلی سخت	۲۳
۲-۴-۱ کلاسترهای معدنی	۲۴
۱-۲-۴-۱ ساختارهای پیش فرض برای مربع های پیوندی	۲۵
۵-۱ ویژگی عمومی MOF-102-112؛ توصیف ساختار بلورها	۳۰
۱-۵-۱ MOF-102-110 (شبکه های دو بعدی)	۳۲
۲-۵-۱ MOF-111 - 112 (شبکه های سه بعدی)	۳۵
۶-۱ تخلخل بسیار بالا در چارچوب های فلز-آلی	۳۶
۷-۱ نانو مواد	۵۱
۱-۷-۱ انواع مواد نانو	۵۱
۱-۷-۱-۱ نانو ذرات	۵۲

۵۲.....	۲-۱-۷-۱ نانو بلورها.....
۵۳.....	۳-۱-۷-۱ نانو حفره ها.....
۵۳.....	۲-۷-۱ روش های تولید نانو ذرات در حالت جامد.....
۵۳.....	۱-۲-۷-۱ آلیاژهای مکانیکی.....
۵۴.....	۲-۲-۷-۱ دستکاری نانو.....
۵۴.....	۳-۲-۷-۱ فرایندهای مکانیکی - شیمیایی.....
۵۵.....	۸-۱ اکسیدهای فلزی.....
۵۶.....	۱-۸-۱ نانو مس اکسیدها.....
۵۸.....	۹-۱ اهداف تحقیق.....
۵۹.....	فصل دوم: بخش تجربی.....
۶۰.....	۱-۲ مواد و دستگاه های مورد استفاده.....
۶۲.....	۲-۲ روش سنتز ترکیبات.....
۶۲.....	۱-۲-۲ سنتز $[Cu(tpa).(dmf)]$ (۱).....
۶۱.....	۲-۲-۲ سنتز $[Cu(btec)(2,2'-bipy)_2]_{\infty}$ (۲).....
۶۲.....	۵-۲-۲ سنتز $[Cu(BDC)(bipy)](BDCH_2)$ (۳).....
۶۲.....	۳-۲-۲ سنتز $\{Cu-BTC\} [Cu_3(btc)_2]$ (۴).....
۶۳.....	۴-۲-۲ سنتز $\{MOF-199\} [Cu_3(TMA)_2(H_2O)_3]_n$ (۵).....
	۶-۲-۲ سنتز نانو ذرات مس اکسید از پیش ماده های چارچوب های فلز-آلی ۱،
۶۳.....	۲، ۳، ۴ و ۵.....
۶۵.....	فصل سوم: بحث و نتیجه گیری.....
۶۶.....	۱-۳ تفسیر داده های به دست آمده از ترکیب $Cu(tpa).(dmf)$ (۱).....
۶۶.....	۱-۱-۳ تک بلور $Cu(tpa).(dmf)$
۶۶.....	۱-۱-۱-۳ داده های بلورنگاری.....
۶۷.....	۲-۱-۱-۳ داده های طیفی.....
۶۹.....	۲-۱-۳ تهیه ی نانو ذرات مس (I) و مس (II) اکسید.....
۷۰.....	۱-۲-۱-۳ کلسیناسیون چارچوب فلز-آلی (۱).....
۷۶.....	۲-۳ تفسیر داده های به دست آمده از ترکیب $[Cu(btec)(2,2'-bipy)_2]_{\infty}$ (۲).....
۷۶.....	۱-۲-۳ تک بلور $[Cu(btec)(2,2'-bipy)_2]_{\infty}$

۷۶.....	۳-۲-۱-۱ داده های بلورنگاری.....
۷۹.....	۳-۲-۱-۲ داده های طیفی.....
۸۱.....	۳-۲-۲ کلسیناسیون چارچوب فلز-آلی (۲).....
۸۷.....	۳-۳ تفسیر داده های به دست آمده از ترکیب $[\text{Cu}(\text{BDC})(\text{bipy})](\text{BDCH}_2)$ (۳).....
۸۷.....	۳-۳-۱ تک بلور $[\text{Cu}(\text{BDC})(\text{bipy})](\text{BDCH}_2)$
۸۷.....	۳-۳-۱-۱ داده های بلورنگاری.....
۸۹.....	۳-۳-۲ داده های طیفی.....
۹۱.....	۳-۳-۲ کلسیناسیون پلیمر کوئوردیناسیونی متخلخل (۳).....
۹۷.....	۳-۴ تفسیر داده های به دست آمده از ترکیب $\{\text{Cu-BTC}\} [\text{Cu}_3(\text{btc})_2]$ (۴).....
۹۷.....	۳-۴-۱ داده های طیفی.....
۹۸.....	۳-۴-۲ کلسیناسیون چارچوب فلز-آلی (۴).....
	۳-۵ تفسیر داده های به دست آمده از ترکیب $[\text{Cu}_3(\text{TMA})_2(\text{H}_2\text{O})_3]_n$
۱۰۱.....	MOF-199} (۵).....
۱۰۱.....	۳-۵-۱ تک بلور $[\text{Cu}_3(\text{TMA})_2(\text{H}_2\text{O})_3]_n$
۱۰۱.....	۳-۵-۱-۱ داده های بلورنگاری.....
۱۰۳.....	۳-۵-۱-۲ داده های طیفی.....
۱۰۴.....	۳-۵-۲ کلسیناسیون چارچوب فلز-آلی (۵).....
۱۰۷.....	۳-۶ بحث و نتیجه گیری.....
۱۰۹.....	مراجع.....



فصل اول

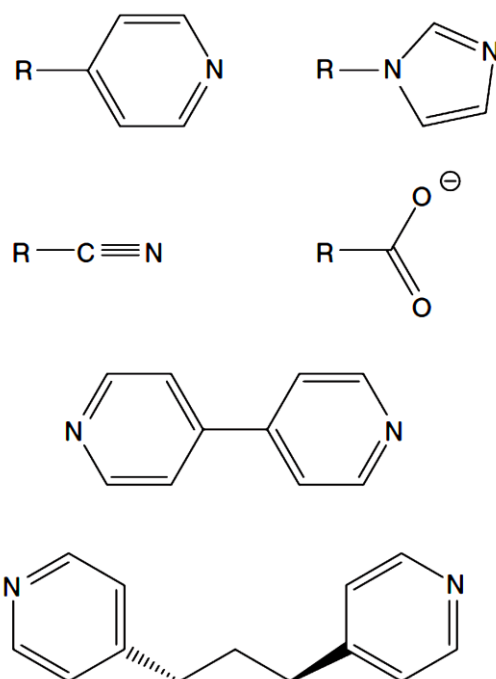
مقدمه

۱-۱ معرفی پلیمرهای کوئوردیناسیونی

یک پلیمر کوئوردیناسیونی از بهم پیوستن واحدهای سازنده اولیه شامل یون های فلزی و لیگاندهای آلی کوئوردینه شونده در یک آرایش نامحدود بوجود می آید. این واحدهای اولیه توسط پیوندهای کوئوردیناسیونی و سایر پیوندهای ضعیف شیمیایی مانند پیوندهای هیدروژنی، پیوندهای واندروالسی و اندرکنش $\pi-\pi$ به هم متصل میشود. بنابر این یک پلیمر کوئوردیناسیونی ضرورتاً شامل فلز و لیگاندهاست (گرچه آن ها اغلب مهمان ها و یون های مخالف را در بر دارند) که یونهای فلزی با عنوان گره و لیگاندهای آلی با عنوان اتصال دهنده معرفی می شوند. پیوند ایجاد شده بین فلز و لیگاند شامل کووالانسی کوئوردیناسیونی (داتیو) است که حاصل الکترون دهنده زوج الکترون آزاد لیگاند بعنوان باز لوئیس به کاتیون فلزی در نقش اسید لوئیس و اندرکنش های الکتروستاتیک بین فلز مرکزی با بار مثبت و لیگاند قطبیده با بار منفی است [۱]. یون های فلزی معمولاً فلزات واسطه و یا لانتانیدها هستند. در مورد فلزات واسطه بعلت تغییر پذیری سینتیکی، قابل دسترس بودن و پایداری ارجحیت با عناصر ردیف اول (بعلاوه Ag, Hg, Cd, Zn و در حد کمتر Pt, Pd, Au) می باشد. همچنین فلزات واسطه بعلت ماهیت قابل پیش بینی بودن هندسه کوئوردیناسیونی آن ها بیش از لانتانیدها مورد توجه اند. اخیراً لانتانیدها نیز بدلیل ویژگی لومینسانس ذاتی و نیز اتصال بیشتر که منجر به ایجاد ریخت شناسی های جالب میشود مورد توجه قرار گرفته اند. این فلزات معمولاً بصورت نمک های هالید، نیترات، پرکلرات، تترا فلوئورو بورات، هگزا فلوئورو فسفات، هگزا

فلوئورو سیلیکات یا ترفتالات مورد استفاده قرار می گیرند. آنیون های غیر کوئوردینه معمولاً ارجحیت دارند [۲]. بسته به فلز و عدد اکسایش آن عدد کوئوردیناسیونی از ۲ تا ۷ تغییر می کند.

اتصال دهنده های مورد استفاده در پلیمرهای کوئوردیناسیونی بصورت آنیونی، کاتیونی و خنثی هستند. کوچکترین و ساده ترین اتصال دهنده ها، هالیدها (F, Cl, Br, I) می باشند. همانند هالیدها یون های SCN^- و CN^- نیز توانایی پل دهنده گی دارند [۳-۴]. گرچه ماهیت نمک فلز انتخابی اهمیت دارد ولی تفاوت اصلی پلیمرهای کوئوردیناسیونی در تغییر پذیری و تنوع نامحدود طرح لیگاندهاست. با این وجود ویژگی هایی وجود دارد که در بیشتر لیگاندهای مورد استفاده، رایج می باشد (شکل ۱-۱). بعنوان مثال یک لیگاند باید دو (و یا بیشتر) محل کوئوردینه شونده متفاوت داشته باشد و این محل های کوئوردیناسیونی گروه های عاملی پیریدیل، نیتریل، ایمیدازول و یا کربوکسیلات می باشند. این لیگاندها در محدوده ی بسیار صلب (سخت) تا بسیار انعطاف پذیر (نرم) می باشند [۲].



شکل ۱-۱ ویژگی های معمول لیگاندهای مورد استفاده در ساختمان پلیمرهای کوئوردیناسیونی، گروه های دهنده و صلب.

۲-۱ پلیمرهای کوئوردیناسیونی متخلخل

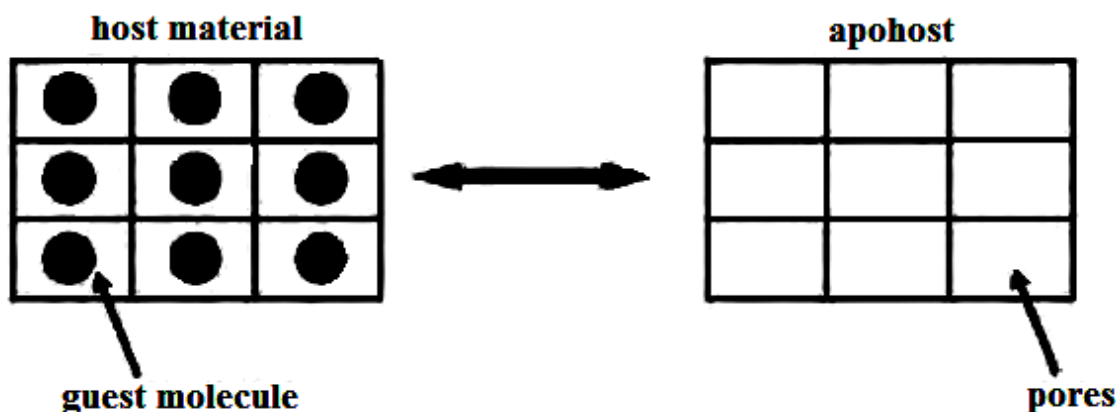
خاصیت تخلخل یکی از ویژگی های منحصر بفرد پلیمرهای کوئوردیناسیونی است که بطور گسترده مطالعه شده است. با توجه به کاربردهای صنعتی گسترده ژئولیت های طبیعی و سنتزی مانند کراکینگ پتروشیمیایی، تبادل یون، جداسازی و تصفیه گاز، این ویژگی چندان جالب توجه نیست. پلیمرهای کوئوردیناسیونی مانند ژئولیت ها از شبکه های نامتناهی شامل واحدهای ساختاری بهم پیوسته تشکیل شده اند که قابلیت فضاهای خالی در حدود اندازه ی نانومتری دارند. به دلایل منحصر بفرد، طراحی ویژگی پلیمرهای کوئوردیناسیونی و اخیراً پیشرفت در بدست آوردن سیستم های متخلخل انعطاف پذیر یا بالک، کاربردهای جدید تخلخل را فراتر از ژئولیت ها پدید آورده است. این کاربردها در زمینه هایی مانند جداسازی مولکولی، ذخیره سازی حلال و گاز و کاتالیست

ناهمگن، انگیزه‌ی اهداف تجاری را بوجود آورده است. همچنین با در نظر گرفتن عوامل اضافی در پلیمرهای کوئوردیناسیونی متخلخل کارکردهای پیشرفته بیشتری از قبیل حسگر گاز، حسگر مغناطیس مولکولی و جداسازی کایرال حاصل می‌شود [۵].

۱-۲-۱ حفرات در پلیمرهای کوئوردیناسیونی

حفرات بدین صورت تعریف می‌شوند: سوراخ‌های ریزی که مایعات یا گازها بتوانند از آن عبور کنند. بنابراین در تعریف یک ماده متخلخل نشانه‌ی تخلخل باید وراء شواهد ساختاری به اثبات برسد. اغلب این مطلب توسط ایزوترم جذب-واجذب گاز مورد مطالعه قرار می‌گیرد. مطالعات همزمان دیگر مانند مقایسه‌ی الگوی پراش پرتو-X پودری حل شدن و حل نشدن، آنالیزهای ترموگراویمتری و طیف‌سنجی IR به همین اندازه معتبر است. مطالعات ایزوترم شواهد تخلخل پایدار را مهیا می‌کند بدین معنی که در طول جذب سطحی و واجذب گونه‌های مهمان از مواد میزبان ساختار بهم نریزد. همچنین ممکن است تخلخل پایدار یا دائمی مستقیماً توسط مطالعات تعیین ویژگی ساختاری مانند پراش پرتو-X پودری یا تک بلور از مواد میزبان^۱ به اثبات برسد. اما باید بطور همزمان با مطالعات جذب گاز مورد تأیید قرار بگیرد (شکل ۱-۲).

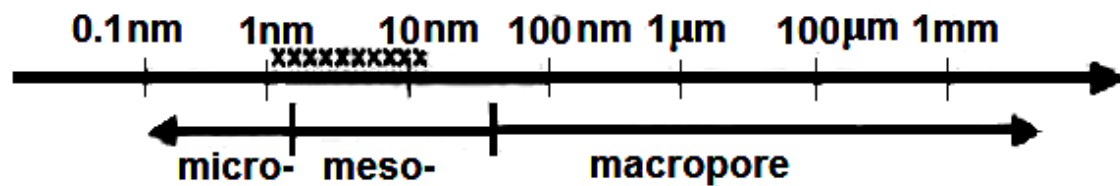
¹Apohost



شکل ۱-۲ نمایش شماتیک تخلخل پایدار، مولکول های مهمان واقع در حفرات ماده میزبان می توانند بصورت برگشت پذیر حذف شوند تا میزبان تهی پایدار تولید شود.

حفرات داخل چارچوب این مواد دارای توزیع اندازه و شکل یکنواخت در مقایسه با مواد متخلخل دیگر می باشد. بنابراین می توانند منحصراً در یک طبقه بر اساس اندازه ی حفراتشان قرار بگیرند [۶]. قطر حفره ی مواد ماکروحفره^۱ $\geq 50 \text{ nm}$ ، قطر مواد مزوحفره^۲ بین $2-50 \text{ nm}$ و مواد میکروحفره^۳ $< 2 \text{ nm}$ می باشد. بیشتر پلیمرهای کوئوردیناسیونی متخلخل در محدوده ی اندازه حفرات مزوحفره و میکروحفره قرار دارند. بنابراین عموماً برای توضیح حفرات کوچک در این زمینه، اصطلاح نانوحفره ها؛ به معنی داشتن حفراتی در محدوده ی نانوحفره ($10-20 \text{ nm}$)، مورد استفاده قرار می گیرد (شکل ۱-۳).

¹macropore
²mesopore
³micropore



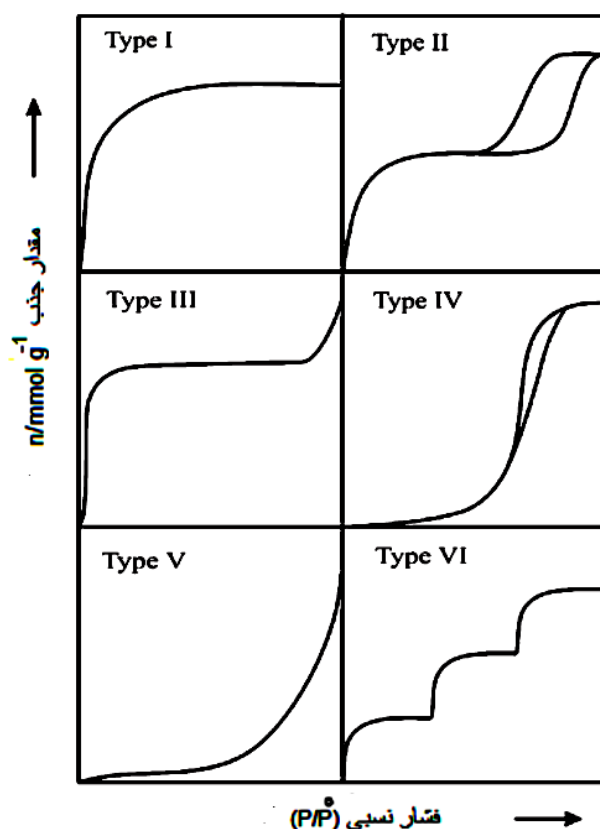
شکل ۱-۳ مقیاس اندازه های میکرو، مزو و ماکرو حفره. علامت ضربدر ناحیه ی نانوحفره ها را نشان می دهد.

مطالعات همدمای جذب گاز برای تعیین خواص پلیمرهای کوئوردیناسیونی متخلخل که اطلاعاتی را در مورد برهمکنش های مولکول مهمان-سطح، اندازه حفرات و ریخت شناسی فراهم می آورد، ضروری است. تفاوت اساسی بین جذب بوسیله میکرو حفره ها و جذب در سطحی واحد، وجود ندارد و هر دو به خوبی با روش BET^1 بیان می شود. جذب مزو حفره ها با تراکم کاپیلاری که مسئول یک جذب سطحی زیاد در ناحیه ی محدوده ی فشار میانی است کنترل می شود. این اثر که با رابطه ی کلوین نشان داده می شود وابسته به شرایط هندسی بوده و مربوط به برهمکنش های جامد-مولکول نمی باشد. جذب سطحی بوسیله ی میکرو حفره ها نتیجه ی پر شدن فضاهای با اندازه میکرو موجود، با مولکول هاست که خود نتیجه ی میدان پتانسیل قوی ست که از همپوشانی پتانسیل همه ی دیواره ها بدست می آید. این جذب بصورت جذب مولکول ها روی سطح جامد نمی باشد [۷].

برای هر نوع از حفرات شکل های ویژه ی ایزوترم جذب گاز بدست آمده که حاوی اطلاعاتی در مورد چگونگی برهمکنش مهمان و میزبان می باشد. شش نوع ایزوترم کلی وجود دارد (نوع I-VI). مواد میکرو حفره عموماً رفتار نوع I را از خود نشان می دهند که با یک افزایش با شیب تند در فشار نسبی پایین که در اصل همه ی حجم حفره پر شده است و به دنبال آن یک سطح صاف، در حالت

¹Brunauer-Emmer-Teller

اشباع، نشان داده می شود. انواع II و VI عموماً نشان دهنده ی مواد مزوحفره و نوع III، IV و V مربوط به مواد غیر متخلخل و ماکروحفره می باشد (شکل ۴-۱). تفاوت بین نوع IV و V با نوع III و VI از قدرت نسبی برهمکنش های جاذبه ی جامد- مایع و مایع- مایع ناشی می شود. وقتی برهمکنش جاذبه ی مایع- جامد قوی تر از مایع- مایع است ایزوترم جذب سطحی بصورت III و V می باشد، در حالی که عکس این حالت، به ایزوترم های جذبی نوع IV و VI منجر می شود. ایزوترم نوع III بیان کننده ی جذب روی سطح جامدات غیر متخلخل یا ماکروحفره است، در اینجا جذب چند لایه ای مرحله دار اتفاق می افتد [۸-۱۰].



شکل ۴-۱ طبقه بندی کلی ایزوترم نوع I-VI.

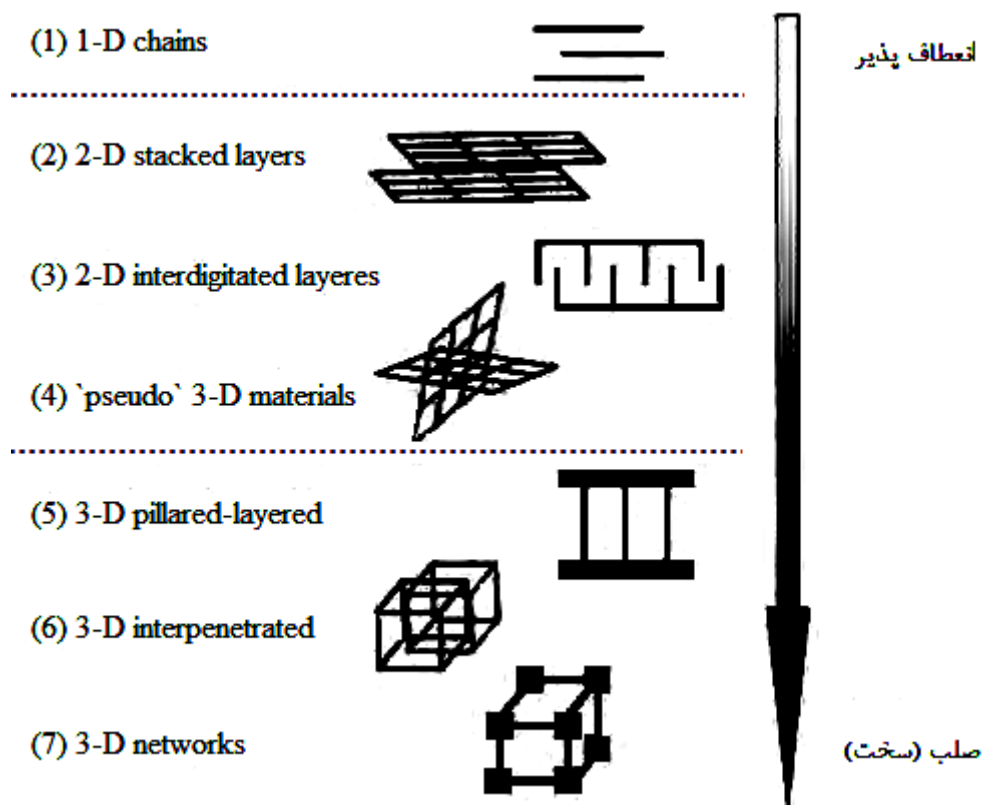
۱-۲-۲ طراحی تخلخل پایدار

بطور کلی طبیعت میل به پر کردن فضاهای خالی دارد. هر حفره یا فضای تهی که در سنتز پلیمرهای کوئوردیناسیونی بوجود می آید، معمولاً با مولکول های حلال مهمان و یا با یون های مخالف پر می شود. یک نتیجه ی دیگر این است که یک چارچوب به صورت تنگچین^۱ تشکیل می شود بطوریکه حجم خالی آشکار قابل دسترسی وجود ندارد یا اینکه تداخل شبکه ها اتفاق می افتد بطوریکه هر فضای خالی بالقوه و پنهانی پر می شود. نمونه های بسیاری از پلیمرهای کوئوردیناسیونی متخلخل نشان داده است که حذف مهمان ها از ساختار میزبان معمولاً منجر به فرو ریختن ساختار چارچوب می شود. برای دستیابی واقعی به تخلخل پایدار، شناسایی اجزاء و ریخت شناسی های ویژه ی چارچوب که مساعد برای پایداری میزبان خالی باشد، مورد نیاز است. یک مرحله کلیدی در طراحی تخلخل پایدار در ابتدا هدف گذاری یک چارچوب صلب، که اساساً تغییری بین ساختار میزبان پر و خالی مشاهده نمی شود، یا یک چارچوب انعطاف پذیر است که تحرک قابل توجه ساختار میزبان ممکن است با حلال زدایی اتفاق بیفتد اما بدون از دست دادن تخلخل. با دقت در انتخاب اجزاء چارچوب که مستعد تشکیل ریخت شناسی های ویژه هستند، مواد متخلخل بوجود می آیند.

از نظر اجزای تشکیل دهنده، نحوه ی طراحی و برهمکنش های بین مولکولی یا درون مولکولی در شبکه ی حاصل، پلیمرهای کوئوردیناسیونی انعطاف پذیر با پلیمرهای کوئوردیناسیونی صلب تفاوت دارند. برحسب روند تغییر ساختار قابل انعطاف تا صلب، هفت زیرگروه بسیار کلی به شرح

¹close packed

زیر وجود دارد: ۱- زنجیرهای یک بعدی (1D) ۲- لایه های 2D انباشته ۳- لایه های 2D در هم قفل شده ۴- مواد شبه 3D ۵- لایه های 3D ستونی ۶- ترکیبات 3D متداخل ۷- شبکه های 3D (شکل ۱-۵) [۱۱].



شکل ۱-۵ هفت دسته ی کلی پلمرهای کوئوردیناسیونی؛ مرتب شده بر اساس میزان انعطاف پذیری و سختی، طبقه بندی بر اساس ابعاد شبکه صورت گرفته است.

از منظر تاریخی اولین نوع پلمرهای کوئوردیناسیونی متخلخل عبارتند از آنهایی که فقط در حضور مولکول های مهمان حفرات دائمی و پایدار دارند. نوع دوم پلمرهای کوئوردیناسیونی متخلخل عبارتند از چارچوب های بالک و پایدار در غیاب مولکول های مهمان و نوع سوم آن هایی هستند که

¹One dimensional

چارچوب های انعطاف پذیر و دینامیک دارند که ماهیت متخلخل آن ها در واکنش به محرک خارجی

تغییر می کند. دو ترکیب $[Zn_4O(BDC)_3]_n$ [۱۲] و $[Cu(SiF_6)(4,4'-bpy)_2]$ [۱۳]، که در آن،

$BDC = 1,4$ -بنزن دی کربوکسیلات^۱ و $4,4'-bpy = 4,4'$ -بای پیریدین^۲، به عنوان نمونه های اولیه

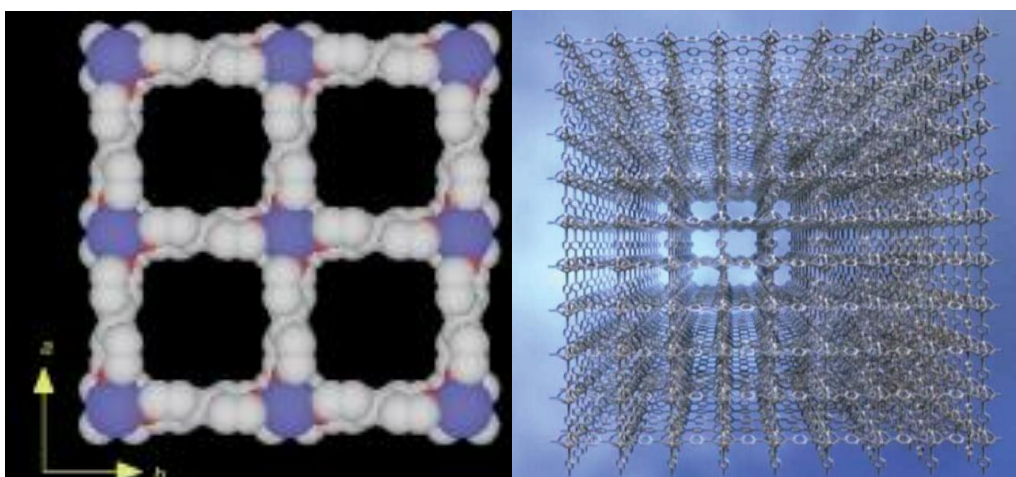
پلیمرهای کوئوردیناسیونی متخلخل نوع دوم گزارش شده اند. هر دو ترکیب پیوند دهنده ی واگرا و

صلب دارند که ساختاری با شبکه سه بعدی و مساحت سطح و حجم حفره ی بسیار بالا را بوجود

آورده است [۱۴].

(ب)

(الف)



شکل ۱-۶ نمایش حفرات در $[Zn_4O(BDC)_3]_n$ (الف) [۱۵] و $[Cu(SiF_6)(4,4'-bpy)_2]$ (ب) [۱۳].

¹1,4-benzenedicarboxylate

²4,4'-bipyridine