

## سنتز ائروژل‌های سیلیکایی نانومتخلخل جهت جذب و جداسازی مواد هیدروکربنی از آب

لیلا امیرخانی<sup>۱</sup>، حسن برگزین<sup>۱</sup>، جعفر صادق مقدس<sup>۲</sup>، محمد مهدی احدیان<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، مرکز تحقیقات پدیده‌های انتقال، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۲. دانشیار مهندسی شیمی، مرکز تحقیقات پدیده‌های انتقال، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند

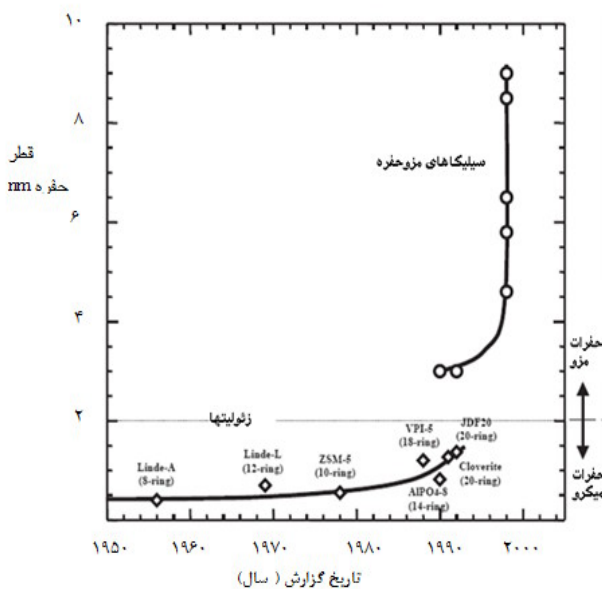
تبریز (Jafar.moghaddas@sut.ac.ir)\*

۳. استادیار مهندسی شیمی، پژوهشکده فناوری نانو، دانشگاه صنعتی شریف

مشخصات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله : دریافت ۳۰ دی ۱۳۸۸ دریافت پس از اصلاحات ۲۲ خرداد ۱۳۸۹ پذیرش نهایی ۴ مهر ۱۳۸۹	ائروژل‌های سیلیکایی توسط روش خشک کردن در فشار محیط و با ماده اولیه سدیم سیلیکات با موفقیت در این کار سنتز شد و برای اولین بار جذب ترکیبات BTX توسط این مواد مورد بررسی قرار گرفت. اثر پارامترهای مختلف در سنتز ائروژل سیلیکایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از ایزوپروپیل الکل، حلال هگزان نرمال و ۲۰ درصد حجمی تری متیل کلرو سیلان در مرحله اصلاح سطح، منجر به ائروژل‌های سیلیکایی نانومتخلخل با سطح ویژه بسیار بالا می‌گردد. تعیین خواص ائروژل‌های سنتز شده نتایجی چون دانسیته برابر $0.11 \text{ gr/cm}^3$ ، زاویه تماس ۱۴۳ درجه با آب، سطح ویژه برابر $600 \text{ m}^2/\text{gr}$ ، توزیع باریک اندازه حفرات به طور متوسط $16 \text{ nm}$ و پایداری حرارتی بیش از $380^\circ\text{C}$ را نشان دادند. پس از سنتز و تعیین ویژگی‌ها، به بررسی خواص جذب این ترکیبات و مقایسه آنها پرداخته شد. در غلظت‌های بالا جذب انواع مواد آلی، نشان داد ائروژل‌های سیلیکایی ظرفیت جذب بسیار بالاتری نسبت به جاذب کربن اکتیو دارند. بررسی ایزوترم جذب برای ترکیبات BTX در غلظت‌های پایین، نشان داد ائروژل‌های سیلیکایی با دقت خوبی از مدل فروندلیچ تبعیت می‌کنند.
کلمات کلیدی : سیلیکا ائروژل نانومتخلخل جذب سطحی آلاینده‌های آلی خشک کردن در فشار محیط ایزوترم	
* عهده دار مکاتبات	حقوق ناشر محفوظ است.

## ۱- مقدمه

اندازه حفرات بین ۲ تا ۵۰ نانومتر، نانومتخلخل یا مزومتخلخل و مواد دارای اندازه حفرات بیشتر از ۵۰ نانومتر، ماکرومتخلخل نامیده می‌شوند [۳]. قابلیت تولید مواد نانو متخلخل، به کمک شناخت فناوری نانو و به خصوص روش سل ژل حاصل شده است. انواع مختلفی از مواد متخلخل تولید می‌شوند که مناسب است جایگاه دقیق ائروژل‌ها نسبت به آنها بررسی گردد. در شکل (۲) موقعیت ائروژل‌ها نسبت به سایر مواد متخلخل نشان داده شده است. ائروژل‌ها جزء مواد مزومتخلخل هستند که اندازه حفرات بین ۲ تا ۵۰ نانومتر و دارای تخلخل بالای ۷۰ درصد بوده و به عنوان جاذب کاربرد دارند [۳]. اندازه حفرات مواد متخلخل تاثیر بسیار زیادی در کارایی و خواص آنها دارد.



شکل (۱): تاریخچه ساخت مواد مزومتخلخل سیلیکایی [۳].

کنترل اندازه حفرات و تولید موادی با بازه باریک توزیع اندازه حفرات هدف اصلی فناوری نانو در این حیطه است. مواد نانومتخلخل به دو صورت حفرات منظم و نامنظم تولید می‌شوند. روش‌های تولید نانوساختارهای متخلخل منظم و نامنظم بسیار متفاوت است. ائروژل‌ها جزء مواد نانومتخلخل نامنظم (آمورف) می‌باشند. در شکل (۲) اندازه توزیع اندازه حفرات و میزان تخلخل مواد گوناگون ارائه شده است [۳، ۴].

فناوری نانو در انواع فرایندها وارد شده و سبب ایجاد تحولات چشمگیری در صنایع مختلف شده است. ساختارهای مختلفی از نانومواد به صورت نانوذره، نانولوله، نانوسیم، نانوپوسته، نانوامولسیون، نانولایه، نانوفیبر و نانوشیپوره و ... هم‌اکنون به صورت تجاری و یا تحقیقاتی مورد استفاده هستند. دو چالش عمده در استفاده از انواع نانومواد وجود دارد: امکان پخش شدن و ایجاد اثرات سوء آنها در محیط زیست و امکان تجمع یافتن و کلوخه شدن نانومواد و رسوب و کاهش کارایی آنها به واسطه فعالیت بالای سطحی. به منظور رفع این دو چالش اساسی، دسته دیگری از نانومواد که در سال‌های اخیر توجه بسیار زیادی به آن شده است، ائروژل‌ها می‌باشند [۱]. در صورتی که بتوان ژل را بدون اینکه ساختار جامد آن تغییر نماید، خشک نمود و مایع درون حفرات آن را با هوا جایگزین نمود ائروژل تشکیل می‌شود. ائروژل‌ها از به هم پیوستن نانومواد در ساختار سه‌بعدی با اندازه حفرات نانومتری به دست می‌آیند [۲]. به عبارت دیگر ائروژل‌ها ساختارهای نانومتخلخل از مواد مختلف می‌باشند که اندازه حفرات در آنها در ابعاد چند نانومتر است. ائروژل‌ها علاوه بر اینکه خصوصیات نانوذرات را دارا می‌باشند مشکل پخش شدن نانوذرات در محیط زیست و همچنین به هم پیوستن و رسوب آنها را از بین می‌برند. اولین ساختار ائروژل سیلیکایی در سال ۱۹۳۱ توسط کیستلر<sup>۱</sup> از آب شیشه ساخته شد [۱، ۲]. با گذشت زمان انواع ائروژل‌ها از مواد اولیه مختلف ساخته و در کاربردهای مختلفی مورد استفاده قرار گرفت. ساخت ژئولیت‌ها به عنوان مواد دارای اندازه حفرات کمتر از ۲ نانومتر از زمان‌های بسیار دور صورت می‌گرفته است ولی توانایی ساخت موادی با اندازه حفرات کنترل شده بین ۲ تا ۵۰ نانومتر از سال‌های ۱۹۹۰ به بعد صورت گرفته است. در شکل (۱) تاریخچه تولید ساختارهای نانومتخلخل نشان داده شده است. طبق تعریف سازمان آیوپاک<sup>۲</sup>، مواد دارای اندازه حفرات کمتر از ۲ نانومتر، میکرومتخلخل، مواد دارای

<sup>1</sup> Kistler  
<sup>2</sup> IUPAC

با توجه به سطح ویژه بسیار بالا و قابلیت کنترل اندازه حفرات و گروه‌های عاملی سطحی، در حوزه جداسازی انواع مواد از یکدیگر بسیار پتانسیل بالایی دارند. جداسازی آلاینده‌های مختلف از مایعات، گازها و خاک به کمک ائروژل‌های سیلیکایی صورت گرفته است [۷-۹].

کاربرد ائروژل‌های سیلیکایی به عنوان جاذب برای حذف آلاینده‌های BTX از آب توسط ائروژل‌های سیلیکایی سنتز شده بر پایه سدیم سیلیکات و خشک کردن در فشار محیط تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. کارهای انجام شده برای حذف ترکیبات BTX توسط ائروژل‌های سیلیکایی بر اساس آلکوکساید‌های سیلیکونی بوده که موادی گران‌قیمت و خطرناک بوده و این امر مانع تجاری‌سازی تولید ائروژل‌ها می‌شود [۷].

عمده‌ترین چالش در سنتز ائروژل‌های سیلیکایی ابداع روش‌های نوین جهت تولید ارزان‌تر آنها می‌باشد.

در این مقاله سنتز ائروژل‌های سیلیکایی از ماده اولیه آب شیشه و به روش خشک‌سازی در دما و فشار محیط صورت گرفته و با مواد گوناگونی خواص سطحی آنها تحت فرایند قرار گرفته است. تولید به روش خشک‌سازی در شرایط اتمسفریک و ماده اولیه سدیم سیلیکات ارزان‌ترین روش تولید ائروژل‌های سیلیکایی می‌باشد که در این کار اثر چندین پارامتر از جمله اثر الکل‌های مختلف، حلال‌های مختلف، درصدهای مختلف مواد بهبود دهنده سطح و نوع ماده بهبود دهنده سطح در سنتز این مواد مورد بررسی قرار گرفته تا بهترین کیفیت با هزینه کم حاصل گردد. در این تحقیق، کارایی ائروژل‌های سیلیکایی در جداسازی مواد هیدروکربنی مختلف از آب مورد بررسی قرار گرفته است. جذب مواد آلی در دو حالت جذب مواد هیدروکربنی در غلظت‌های بالا و جذب ترکیبات BTX از آب در غلظت‌های پایین برای اولین بار آزمایش شده و نتایج حاصل بررسی و با جاذب‌های متداول مقایسه شده است.

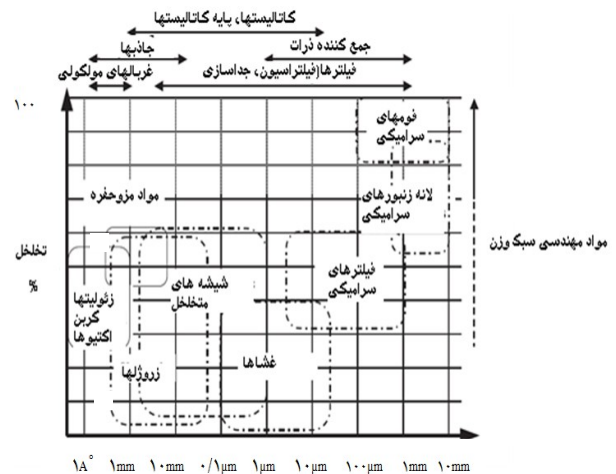
## ۲- آزمایش‌ها

### ۲-۱- مواد اولیه

در سنتز ائروژل سیلیکایی از سدیم سیلیکات با

ائروژل‌های سیلیکایی از مواد اولیه مختلفی مانند الکوکسیدها، آب شیشه، فوم شیشه و ... تولید می‌شوند. تحقیقات صورت گرفته عمدتاً بر مبنای تولید ائروژل‌ها از انواع الکوکسیدها و خشک‌سازی به روش فوق بحرانی بوده است [۲، ۴].

نیاز به کاهش هزینه‌های تولید و روش ایمن‌تر و کم هزینه‌تر سبب گشته تا هم‌اکنون توجه عمده به تولید ائروژل‌های سیلیکایی از آب شیشه و به روش خشک‌سازی در محیط اتمسفر صورت گیرد [۵].



شکل (۲): مقایسه توزیع اندازه حفرات و میزان تخلخل مواد مختلف با مواد نانومتخلخل [۳].

ائروژل‌های سیلیکایی که با انواع روش‌ها تولید می‌شوند دارای سطح ویژه ۵۰۰ تا ۱۶۰۰ متر مربع بر گرم، چگالی ۰/۰۰۵ تا ۰/۱ گرم بر سانتی‌متر مربع، اندازه حفرات ۲ تا ۵۰ نانومتر (مزومتخلخل)، اندازه ذرات ۵ تا ۲۰ نانومتر، ضریب انتقال حرارت بسیار پایین در حدود ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۲ وات بر متر کلونین، اندیس عبوردهی حدود ۱ و ثابت دی الکتریک پایین می‌باشند [۲]. با توجه به خصوصیات منحصر به فردی که این نوع مواد دارند، دارای کاربردهای بسیار زیادی در صنایع مختلف هستند، از جمله استفاده به عنوان پایه کاتالیست، غشاهای جداسازی گازها، جمع کننده گرد و غبار فضایی، استفاده در راکتورهای چرنکوف<sup>۱</sup>، سیستم‌های ایتیکی، عایق‌های حرارتی، عایق‌های صوتی، پوشش‌های آب‌گریز، خازن‌ها و ... [۲، ۶].

<sup>۱</sup> Cherenkov

## ۲-۲-۲- مرحله پیرسازی و تعویض حلال

بعد از تشکیل ژل، به ژل حاصل به مدت ۳ ساعت زمان داده می‌شود تا مرحله پیرسازی را، در محیط غیرقابل نفوذ بوسیله هوا طی کند. مرحله پیرسازی به منظور کامل شدن واکنش‌های تشکیل ژل و نیز استحکام ساختار ژل می‌باشد و خطر شکستن آن را کاهش می‌دهد. مرحله تشکیل ژل و پیرسازی در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد انجام می‌گیرد. بعد ژل حاصل به مدت ۳۶ ساعت به ترتیب در الکل و حلال قرار داده می‌شود تا مرحله پیرسازی در الکل و تعویض حلال را طی کند. این مرحله هم در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد انجام می‌شود. کل فرایندهای مرحله پیرسازی و تعویض حلال و مراحل بعدی اصلاح سطح در دمای ۶۰ درجه انجام می‌گیرد تا سرعت انجام واکنش‌ها بیشتر و زمان انجام واکنش‌ها کوتاه‌تر شود، به دلیل فرار بودن حلال‌های بکاررفته در انجام واکنش‌ها امکان انجام واکنش در دماهای بالاتر وجود ندارد. زمان بهینه نیز برای انجام واکنش‌ها ۳۶ ساعت می‌باشد، چرا که در زمان‌های کمتر واکنش‌ها به طور کامل انجام نشده و ساختار مطلوب ایجاد نمی‌شود.

## ۲-۲-۳- مرحله اصلاح سطح و خشک کردن ژل

به کمک درصد مشخصی از عوامل اصلاح سطح در حلال عملیات اصلاح سطح به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد انجام می‌شود. بعد از طی این مرحله و تخلیه محلول اصلاح سطح، ژل اصلاح شده خشک می‌شود. مراحل خشک کردن به ترتیب به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط، بعد به مدت یک ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد و یک ساعت در دمای ۱۶۰ درجه سانتیگراد صورت می‌گیرد. افزایش دما در طول مرحله خشک کردن به منظور جلوگیری از ایجاد شوک حرارتی به صورت تدریجی انجام می‌شود.

چگالی نسبی ۱/۳۵ شامل  $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$  با نسبت وزنی ۳/۳: ۱، هیدروکسید آمونیوم، هگزان نرمال، هپتان نرمال ایزوپروپیل الکل<sup>۱</sup> (IPA)، اتانول، متانول، تری متیل کلرو سیلان<sup>۲</sup> (TMCS) و هگزا متیل دی سیلان<sup>۳</sup> (HMDZ) استفاده شد، که همگی از شرکت مرک آلمان تهیه شدند. برای فرایند تعویض یون محلول سدیم سیلیکات، از رزین‌های تعویض یونی IR-120H<sup>+</sup> Amberlite که مربوط به شرکت مرک آلمان بود، استفاده شد.

## ۲-۲- سنتز ائروژل‌های سیلیکایی

به طور کلی سنتز ائروژل‌های سیلیکایی به سه مرحله کلی تقسیم می‌شود: ۱- آماده‌سازی ژل، ۲- مرحله پیرسازی<sup>۴</sup> و تعویض حلال، ۳- مرحله اصلاح سطح و خشک کردن ژل. شکل (۳) دیاگرام مراحل مختلف سنتز را نشان می‌دهد.

## ۲-۲-۱- آماده سازی ژل

محلول سدیم سیلیکات با چگالی ۱/۳۵ به کمک آب دیونیزه تا حدی رقیق می‌شود که به چگالی ۱/۰۷ برسد. سپس از رزین‌های تبادل یونی برای جایگزینی یون‌های  $\text{Na}^+$  با یون‌های  $\text{H}^+$  استفاده می‌شود و برای این کار از نسبت هم‌حجم این رزین‌ها استفاده می‌شود و محلول سدیم سیلیکات با رزین‌ها به مدت ۱۵ دقیقه مخلوط می‌شود تا عمل تبادل به طور کامل انجام شود. قبل از انجام عمل تبادل یونی pH محلول در حدود ۱۱/۵ الی ۱۳ می‌باشد، ولی پس از انجام تبادل یونی به علت آزاد شدن یون‌های  $\text{H}^+$ ، pH محلول به ۱ الی ۲ می‌رسد.

برای تشکیل ژل، باید pH محلول حاصل با افزودن کاتالیست هیدروکسید آمونیوم یک مولار بین ۳/۸ تا ۵ تنظیم شود. سپس محلول حاصل به ظروف تفلونی درب‌دار منتقل شده و زمان لازم برای تشکیل ژل داده می‌شود، که ممکن است این زمان از چند دقیقه تا چندین ساعت (بسته به pH سل) طول بکشد.

<sup>1</sup> Isopropylalcohol

<sup>2</sup> Trimethylchlorosilane

<sup>3</sup> Hexamethyldisilazane

<sup>4</sup> Aging

(Philips) استفاده شد.

## ۲-۴- تعیین ظرفیت جذب ائروژل‌های سیلیکایی

جذب ترکیبات آلی در دو قسمت جداگانه مورد بررسی قرار گرفت: جذب ترکیبات آلی در غلظت‌های بالا به منظور یافتن حداکثر ظرفیت جذب ائروژل‌های سیلیکایی و جذب ترکیبات BTX در غلظت‌های پایین به منظور بررسی کارایی جاذب و یافتن مکانیسم جذب جاذب از طریق مقایسه با مدل‌های جذب سطحی.

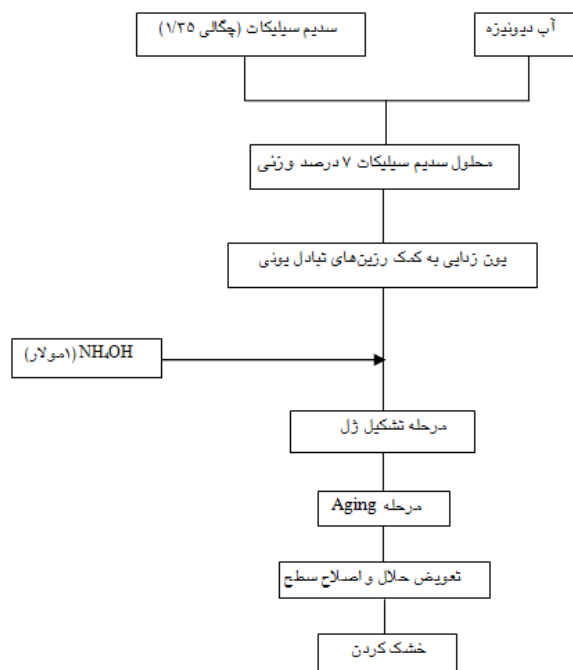
## ۲-۴-۱- جذب در غلظت‌های بالا

جذب در غلظت‌های بالا به صورت سیستم خشک (جذب از ماده خالص) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج با جاذب تجاری کربن اکتیو گرانولی با خصوصیات فیزیکی معلوم مقایسه گردید. به منظور یافتن حداکثر ظرفیت جذب ترکیبات آلی توسط ائروژل‌های سیلیکایی، ترکیبات آلی مختلف از جمله سه نوع ترکیب نفتی (بنزین، نفت سفید و نفت خام)، دو آلکان (هگزان و هپتان) و سه ترکیب آروماتیک (بنزن، تولوئن، زایلن) مورد آزمایش قرار گرفتند.

ابتدا جاذب توسط ترازوی دیجیتالی (با دقت  $10^{-5}$  گرم) وزن شده ( $m_1$ ) و بعد داخل ترکیب آلی قرار گرفت و پس از آنکه به طور کامل توسط مایع خیس شد، از داخل مایع برداشته و بر روی کاغذ صافی قرار داده شد تا مایع آلی جذب نشده از آن جدا شود و بار دیگر به دقت توزین گردید ( $m_2$ ). ظرفیت جاذب (Q) توسط رابطه (۱) بدست آمده و بر اساس جرم ماده جذب شده بر واحد جرم (۱ گرم) جاذب گزارش می‌شود.

$$Q = (m_2 - m_1) / m_1 \quad (1)$$

با توجه به فوق آب‌گریز بودن نمونه‌های ائروژل و عدم امتزاج پذیری ترکیبات هیدروکربنی با آب در غلظت‌های بالا و باقی ماندن این ترکیبات بر روی سطح آب، نتایج به دست آمده برای جداسازی این ترکیبات از آب در غلظت‌های بالا توسط ائروژل‌های سیلیکایی با نتایج بدست آمده در سیستم خشک یکسان بود.



شکل (۳): دیاگرام کلی از مراحل مختلف سنتز

## ۲-۳- آنالیز نمونه‌ها و تعیین ویژگی‌ها

چگالی توده ائروژل‌ها با توزین حجم مشخص از نمونه توسط ترازو با دقت  $10^{-5}$  به دست آمد. مساحت سطح بوسیله آنالیز BET (BEL، ژاپن) از مقدار گاز  $N_2$  جذب شده در فشارهای نسبی مختلف تعیین شد. پخش اندازه حفرات از نتایج BJH بدست آمد. آب‌گریزی نمونه‌ها با تعیین زاویه تماس ( $\theta$ ) آب با سطح ائروژل تعیین شد. پیوندهای آلی و غیر آلی موجود در ائروژل‌ها با استفاده از آنالیز جذب اشعه مادون قرمز (FTIR، PU Philips 9800)، که اطلاعاتی درباره پیوندهای شیمیایی مختلف -OH، Si-OH، Si-O-Si، Si-C، و C-H می‌دهد، مطالعه شد. کاهش وزن تفاضلی و تغییرات فازی نمونه‌ها در اثر تغییرات دما توسط تجزیه TG در محیط هوا، با استفاده از دستگاه TG-DTA نوع Diamond Pyris شرکت Perkin Elmer، از دمای ۳۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد و با نرخ حرارت دهی  $10^\circ C/min$  انجام شد. مورفولوژی و ساختار حفرات سیلیکا ائروژل توسط آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM، TS5136MM) انجام شد. برای تعیین غلظت ترکیبات BTX موجود در آب در غلظت‌های پایین از دستگاه طیف‌سنجی ماوراء بنفش- مرئی (UV/VIS)

## ۲-۴-۲- جذب ترکیبات BTX در غلظت‌های پایین

به منظور بررسی کارایی جاذب در جذب ترکیبات آلی حل شده در آب در غلظت‌های پایین، آلاینده‌های بنزن، تولوئن و زایلین در سیستم ناپیوسته از آب حذف شدند.

## ۲-۴-۲-۱- سینتیک جذب

برای بدست آوردن نتایج دقیق، آزمایشات جذب باید تحت شرایط تعادلی انجام گیرد. به منظور یافتن مینیمم زمان تعادلی برای حذف ترکیبات آلی، نمونه‌های آب حاوی آلاینده‌های بنزن، تولوئن و زایلین با غلظت اولیه معلوم، به طور جداگانه در ظروف در بسته در معرض مقدار مشخصی از جاذب پودری در شرایط یکسان قرار گرفت و در بازه‌های زمانی مشخص غلظت نهایی پس از جدا کردن جاذب، توسط دستگاه طیف سنجی ماوراء بنفش- مرئی تعیین شد. زمان تعادلی وقتی بدست آمد که با گذشت زمان تغییری در غلظت ثانویه مشاهده نشد. ظرفیت جذب (گرم بر گرم جاذب) در زمان مشخص توسط رابطه (۲) بدست می‌آید:

$$q = \frac{V(C_0 - C_e)}{m} \quad (2)$$

که  $q$  ظرفیت جذب،  $C_0$  غلظت اولیه،  $C_e$  غلظت نهایی،  $m$  برابر جرم جاذب و  $V$  حجم محلول است [۷، ۱۰].

## ۲-۴-۲-۲- تعادل جذب

پس از تعیین زمان تعادلی برای حذف ترکیبات BTX از آب، ایزوترم جذب این ترکیبات از آب بوسیله مخلوط کردن مقدار ۰/۰۲ گرم از جاذب در حجم معلوم آب حاوی آلاینده در ظروف در بسته، در غلظت‌های اولیه مختلف بدست می‌آید. جذب آلاینده‌ها در دمای محیط انجام می‌شود. به منظور جلوگیری از ایجاد خطاهای ناشی از تبخیر آلاینده‌ها، حجم کم ظروف در بسته حاوی سیستم جذب، شامل هوا بود.

## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- تاثیر حلال‌های مختلف در خواص فیزیکی ائروژل‌های سنتز شده

در طول مرحله اصلاح سطح، گروه‌های عاملی OH- بر روی سطح ژل‌های مرطوب، که باعث فروپاشی و خرد شدن ژل‌ها در طول مرحله انقباض می‌شوند، به گروه‌های عاملی هیدروکربنی اصلاح می‌شوند که واکنش نشان نمی‌دهند. قبل از مرحله اصلاح سطح به عنوان یک پیش نیاز، آب درون حفرات باید با مایعات آلی جایگزین شود. به منظور سنتز ائروژل‌ها با خواص فیزیکی مورد نظر مثل: شفافیت بالا، چگالی پایین، آب‌گریزی بالا، یکپارچگی، پایداری حرارتی بالا، به کمک ماده اولیه آب شیشه، الکل‌ها و حلال‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفت.

برای مطالعه اثر الکل‌ها و حلال‌های مختلف در خواص فیزیکی ائروژل‌های سنتز شده، سه نوع الکل و دو نوع حلال استفاده شده است که در جدول (۱) نحوه استفاده از ترکیبات آمده است. الکل‌ها و حلال‌های انتخاب شده جزء معمول‌ترین الکل‌ها و حلال‌ها می‌باشند که در سنتز ائروژل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

جدول (۱): الکل‌ها و حلال‌های مورد استفاده در سنتز ائروژل

نمونه	الکل	حلال	محلول اصلاح سطح
۱	ایزوپروپیل الکل	هگزان	TMCS+ هگزان
۲	اتانول	هگزان	TMCS+ هگزان
۳	متانول	هگزان	TMCS+ هگزان
۴	ایزوپروپیل الکل	هپتان	TMCS+ هپتان
۵	اتانول	هپتان	TMCS+ هپتان
۶	متانول	هپتان	TMCS+ هپتان

شکل (۴) ائروژل‌هایی که به کمک سه نوع الکل و دو نوع حلال در شرایط مشابه سنتز شده است را نشان می‌دهد. از شکل مشخص است که نمونه ۱ نسبت به سایر نمونه‌ها شفاف‌تر است. شفافیت نمونه‌ها را می‌توان به کمک دستگاه اسپکتروفوتومتر مرئی و ماورای بنفش تعیین کرد. در مورد نمونه بسیار شفاف ۱ در طول موج



شکل (۴): نمونه‌های ائروژل سنتز شده با الکل‌ها و حلال‌های مختلف و فاز استخراج شده (محلول زرد رنگ)

جدول (۲): خواص فیزیکی نمونه‌های ائروژل سنتز شده توسط حلال‌های مختلف

شماره	نمونه‌ها	چگالی (g/m <sup>3</sup> )	شفافیت	درصد کاهش حجم	زاویه تماس
۱	TMCS/ n-Hexane /IPA	۰/۱۱	بسیار شفاف	۵	۱۴۳° (فوق آب گریز)
۲	TMCS/ n-Hexane /Ethanol	۰/۴۱	شفاف	۴۰	۱۲۰° (آب گریز)
۳	TMCS/ n-Hexane /Methanol	۰/۸	کدر	۶۰	۹۰° (آبدوست)
۴	TMCS/ n-Heptane /IPA	۰/۱۴	شفاف	۱۰	۱۳۰° (فوق آب گریز)
۵	TMCS/ n-Heptane /ethanol	۰/۴۴	شفاف	۴۴	۱۰۰° (آب گریز)
۶	TMCS/ n-Heptane /Methanol	۰/۹	کدر	۶۵	۹۰° (آبدوست)

در مرحله پیرسازی، واکنش‌های انعقاد کامل نشده و ژل حالت نیمه پایدار دارد. از طرف دیگر در مرحله پیرسازی مولکول‌های سیلیکا با دیواره واکنش داده و باعث تقویت آنها می‌شود و بعضی از مولکول‌های سیلیکا از دیواره جدا شده و در محلول حفرات حل می‌شوند. در مرحله اصلاح سطح، عوامل اصلاح سطح با الکل‌ها واکنش می‌دهد. گزارش شده است که استفاده از الکل سرعت واکنش بالای TMCS با آب حفرات، که منجر به ترک خوردگی ائروژل می‌شود، را کاهش

۷۰۰ نانومتر ۷۰ درصد شفافیت داشتیم. در مورد نمونه های شفاف درصد شفافیت بین ۴۰ تا ۷۰ بود و نمونه های کدر درصد شفافیت زیر ۴۰ درصد بود. نمونه شماره ۲ و ۵ از سایر نمونه‌ها یکپارچه‌تر بوده و ترک‌های ظاهری کمتری دارند. همچنین از شکل مشخص است که اصلاح سطح نمونه‌های شماره ۳ و ۶ به صورت کامل انجام نشده است و نمونه‌ها افت حجمی زیادی دارند. نتایج خواص بالک نمونه‌های سنتز شده در جدول (۲) لیست شده است. همان‌طوریکه می‌توان از جدول (۲) نیز مشاهده کرد، نمونه ۱ چگالی کمتر، شفافیت بیشتر، فوق آب‌گریزی، و مینیمم کاهش حجم را دارد، که نشان می‌دهد مرحله اصلاح سطح به طور کامل انجام شده است. اصلاح نمونه‌های ۳ و ۶ به طور کامل انجام نشده است. نمونه‌های ۲ و ۵ تا حدی یکپارچه است، اما چگالی بالا و کاهش حجم نشان می‌دهد که اصلاح سطح به اندازه نمونه‌های ۱ و ۴ انجام نشده است. نمونه ۴ خصوصیات حجمی خوبی چون شفافیت و چگالی پایین را نشان می‌دهد، اما در مقایسه با نمونه ۱ یکپارچه نیست و از طرفی نمونه ۱ بسیار شبیه نمونه‌های سنتز شده به روش فوق بحرانی است. بنابراین در ادامه، آزمایشات مختلف برای تعیین خواص نمونه ۱ انجام شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که نوع الکل‌ها و حلال‌ها بر خواص فیزیکی ائروژل‌های سنتز شده کاملاً موثر است [۱۱].

الکل‌ها برای کاهش کشش سطحی آب حفرات با دیواره‌های جامد بکار می‌روند و باعث می‌شوند آب حفرات به طور نسبی با الکل‌ها جایگزین شوند. این کار به این دلیل انجام می‌شود که عوامل اصلاح سطح می‌توانند با آب حفرات واکنش شدیدی داده و باعث شکست دیواره‌های جامد شوند. الکل‌های مختلف کشش سطحی مختلفی دارند. در این تحقیق درصدهای الکل‌های بکار رفته کاملاً مشابه بود. علاوه بر این الکل‌ها بر تغییر pH آب نیز اثر دارند.

می‌دهد [۱۲]. متانول و اتانول الکل‌های نوع اول هستند و پروپانول الکل نوع دوم است. کشش سطحی آنها به ترتیب برابر ۲۲/۶، ۲۲/۲۷ و ۲۱/۷ است.

از نظر کشش سطحی، می‌توان گفت که استخراج آب حفرات برای اتانول بیشترین، سپس به ترتیب برای متانول و ایزوپروپیل الکل است. نتایج نشان داد که استخراج آب حفرات برای اتانول ۳ میلی‌لیتر، برای متانول ۲ میلی‌لیتر، اما در مورد ایزوپروپیل الکل، ۱/۸ میلی‌لیتر است. این نتایج نشان داد که با وجود کشش سطحی پایین ایزوپروپیل الکل، مکانیسم واکنش بین الکل‌ها و TMCS بسیار مهم بوده و در حجم استخراج آب درون حفرات اثر می‌گذارد. نقش مهم دیگر الکل‌ها این است که الکل می‌تواند با TMCS واکنش داده، و از واکنش سریع بین TMCS با آب حفرات و گروه‌های OH- دیواره که منجر به ترک خوردگی ائروژل می‌شود، جلوگیری کند [۱۳]. از طرف دیگر، اتانول به طور برگشت پذیر با TMCS واکنش داده و منجر به کاهش غلظت TMCS می‌شود. از آنجا که واکنش TMCS با گروه‌های OH- دیواره انجام می‌شود، واکنش TMCS با الکل در جهت عکس تولید TMCS و تکمیل واکنش‌های تغییر گروه‌های OH- سطح به گروه‌های CH<sub>3</sub> انجام می‌شود [۱۲]. اگر بتوان سرعت واکنش بین TMCS و آب حفرات را کاهش داد، می‌توان از ترک خوردگی ائروژل‌ها جلوگیری کرد [۵]. همان‌طوریکه از ائروژل‌های سنتز شده می‌توان مشاهده کرد، ائروژل‌های سنتز شده با اتانول، یکپارچه‌تر از بقیه هستند. در مورد متانول، واکنش با TMCS به طور کامل برگشت‌پذیر نبوده، و وقتی مرحله پیرسازی ژل مرطوب با متانول انجام شود، واکنش بین TMCS و گروه‌های OH- دیواره با واکنش بین TMCS با متانول به طور غیرقابل برگشت تغییر می‌کند. این باعث می‌شود که TMCS کافی برای کامل شدن واکنش‌های اصلاح سطح وجود نداشته باشد. این پدیده برای هر دو نمونه سنتز شده با حلال‌های هگزان و هپتان مشاهده شد که در شکل (۴) مشخص است.

اختلاف شفافیت ائروژل‌های سنتز شده با الکل‌های مختلف ناشی از این واقعیت است که الکل‌های مختلف

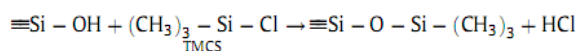
می‌توانند pH آب حفرات را در مرحله پیرسازی تحت تاثیر قرار دهند. اختلاف بین pH مواد اولیه می‌تواند به طور مستقیم در سایز حفرات، پخش سایز حفرات، قطرات و سفتی ائروژل‌ها تاثیر داشته باشد. شفافیت ائروژل‌ها می‌تواند تحت تاثیر اندازه حفرات و پخش سایز حفرات قرار گیرد. بنابراین باید اختلاف شفافیت را برای ائروژل‌های سنتز شده با الکل‌های مختلف انتظار داشت.

حلال‌هایی چون هگزان و هپتان برای انتقال عوامل اصلاح سطح به داخل حفرات ژل و خارج کردن محصولات واکنش از داخل حفرات بکار می‌رود. این حلال‌ها مکانیسم واکنش بوسیله عوامل اصلاح سطح را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد، ولی می‌تواند مقاومت نفوذی را تحت تاثیر قرار دهد. واضح است که مولکول‌های TMCS قبل از واکنش با گروه‌های سطحی OH- باید از محیط حلال نفوذ کنند. بنابراین اگر حلال از نفوذ آسان TMCS جلوگیری کند، واکنش ممکن است به طور غیرکامل انجام شود یا سرعت واکنش کاهش یابد. قطبیت حلال‌ها می‌تواند سرعت نفوذ TMCS را تحت تاثیر قرار دهد. همان‌طور که در شکل (۴) نیز مشخص است، ترک‌های ایجاد شده توسط محلول اصلاح سطح هگزان کمتر از محلول هپتان است. اندازه ترک‌ها با سرعت واکنش TMCS با آب حفرات و گروه‌های سطحی OH- رابطه دارد. بنابراین سرعت واکنش TMCS در هپتان از محلول هگزان بیشتر بوده و محلول هگزان برای سنتز سیلیکا ائروژل‌های یکپارچه بهتر است [۱۴، ۱۵]. در ادامه سایر ویژگی‌های سیلیکا ائروژل‌های سنتز شده با IPA و محلول هگزان با روش‌های مختلف آزمایش شده و نتایج مورد بررسی قرار گرفته است.

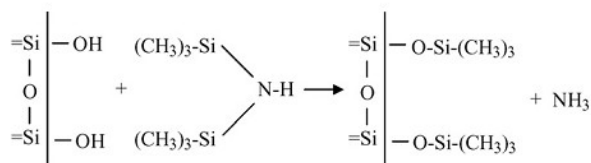
### ۳-۲- تاثیر عوامل اصلاح سطح بر خواص فیزیکی ائروژل‌های سنتز شده

در این مرحله دو عامل اصلاح سطح TMCS و HMDZ برای بررسی اثر عوامل اصلاح سطح بر خواص فیزیکی ائروژل‌های سنتز شده بکار برده شد. الکل و حلال به کار برده شده در این مرحله ایزوپروپیل الکل و هگزان بود. در شکل (۵) می‌توان نمونه‌های سنتز





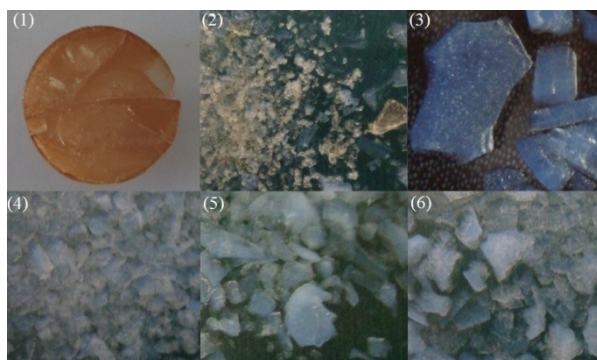
این واکنش برای عامل اصلاح سطح HMDZ نیز به صورت واکنش زیر می باشد:



### ۳-۳- اثر درصد مواد اصلاح سطح بکاررفته در

#### خواص فیزیکی ائروژل‌های سنتز شده

برای بهینه سازی میزان مواد اصلاح سطح بکاررفته در مرحله اصلاح سطح ژل‌ها درصدهای مختلفی از TMCS و HMDZ در مرحله اصلاح سطح بکار رفت تا اثر این عوامل مورد بررسی قرار گیرد. در شکل (۶) می‌توان اثر این عامل را بر خصوصیات ظاهری ائروژل‌ها مشاهده کرد. درمورد TMCS درصدهای مختلف از ۸ تا ۳۵ درصد مورد آزمایش قرار گرفت و این نتیجه بدست آمد که مقدار ۲۰ درصد حجمی TMCS برای انجام اصلاح سطح کامل نمونه‌ها کافی می‌باشد. پس از بکاربردن ۲۰ درصد حجمی عامل اصلاح سطح چگالی نمونه‌ها ثابت ماند.



شکل (۶): درصدهای مختلف TMCS (۱) ۸٪ (۲) ۱۵٪ (۳) ۲۰٪ (۴) ۲۵٪ (۵) ۳۰٪ (۶) ۳۵٪

نتایج مربوط به طیف FTIR بر روی نمونه‌ها گواهی بر این امر بود.

شده را به کمک دو عامل اصلاح سطح مختلف مشاهده کرد.

همان‌طوریکه از جدول (۳) مشخص است چگالی نمونه‌های اصلاح شده با کمک HMDZ نسبت به نمونه‌های اصلاح شده با TMCS بیشتر است. این امر به دلیل وزن مولکولی بیشتر HMDZ است که باعث ایجاد ممانعت فضایی شده و انجام واکنش اصلاح سطح و نفوذ مولکول‌های HMDZ را داخل حفرات ساختار ژل سخت تر می‌کند.



(الف)



(ب)

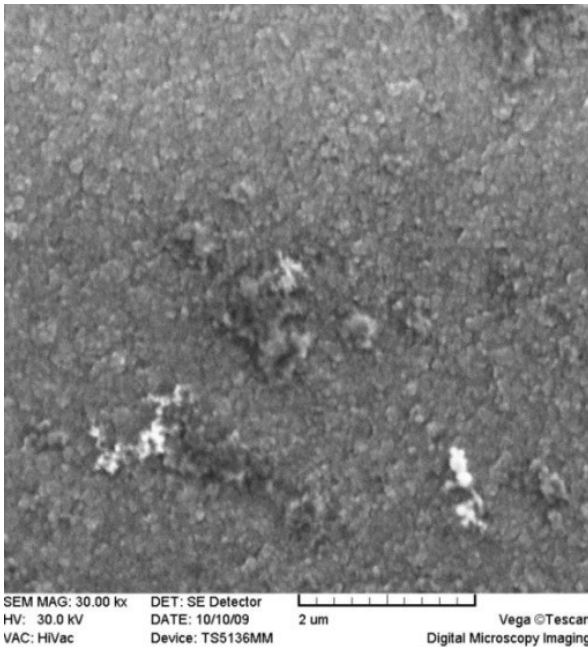
شکل (۵): ائروژل‌های سنتز شده توسط عوامل اصلاح سطح (الف) HMDZ (ب) TMCS

جدول (۳): خواص فیزیکی ائروژل‌های سنتز شده توسط

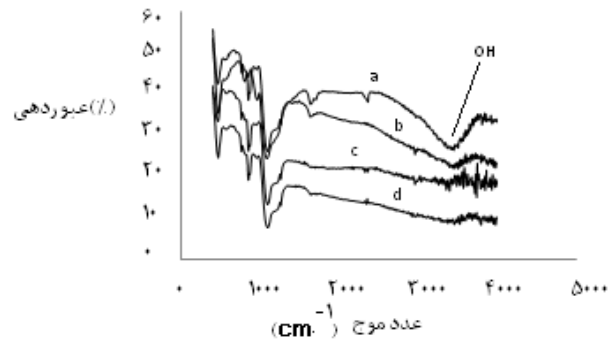
عوامل اصلاح سطح TMCS و HMDS

اصلاح کننده	چگالی	شفافیت	درصد کاهش حجم	زاویه تماس
TMCS	۰/۱۱	بسیار شفاف	۵	(۱۴۳)°
HMDZ	۰/۴	بسیار شفاف	۳۵	(۱۲۰)°

واکنش اصلاح سطح ژل سیلیکا با عامل اصلاح سطح TMCS به صورت زیر است:



شکل (۸): نتیجه مربوط به تست SEM ائروژل سنتز شده



شکل (۷): طیف FTIR برای نمونه های سنتز شده با (a) ۱۵٪، (b) ۲۰٪، (c) ۲۵٪، (d) ۳۵٪ TMCS در محلول اصلاح سطح

همان طور که از شکل (۷) نیز مشخص است، پیک مربوط به پیوند OH- در نمونه ای که با ۲۰٪ TMCS اصلاح شده است، از بین رفته است و بنابراین اصلاح سطح نمونه ها با ۲۰٪ کافی می باشد.

جدول (۴): ویژگی های ائروژل های سنتز شده در شرایط بهینه

۰/۱۱ (gr/m <sup>3</sup> )	چگالی
۱۴۳ <sup>0</sup>	درجه آب گریزی
٪۵	درصد کاهش حجم
۵۷۹ (m <sup>2</sup> /gr)	سطح ویژه
۲/۳۸ (cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> )	حجم کل حفرات
۱۶/۵ (nm)	متوسط اندازه حفرات
۳۸.۰ <sup>0</sup> C	پایداری حرارتی

### ۳-۵- ظرفیت جذب ائروژل های سیلیکایی

#### ۳-۵-۱- جذب ترکیبات آلی در غلظت های بالا

جدول (۵) میزان جذب جرمی مواد هیدروکربنی (گرم جذب شده به گرم جاذب) برای جاذب ائروژل سیلیکایی و کربن اکتیو تجاری را نشان می دهد. نتایج نشان می دهند که سیلیکا ائروژل ظرفیت جذب بسیار بالاتری را نسبت به کربن فعال دارد. به طوریکه نسبت جذب ائروژل سیلیکایی به کربن فعال در مورد نفت سفید و نفت خام به ترتیب ۱۹ و ۷۸ برابر است. همان طور که از جدول نیز مشخص است افزایش ظرفیت جذب سیلیکا ائروژل برای ترکیبات مختلف به صورت زیر است:

ترکیبات نفتی < آلکان ها > ترکیبات آروماتیک

### ۳-۴- تعیین خواص ائروژل های سنتز شده

پس از بررسی پارامترهای مختلف چون تاثیر الکل ها و حلال های مختلف، عوامل اصلاح سطح مختلف و بهینه سازی درصد عوامل اصلاح سطح بکار رفته در سنتز ائروژل های سیلیکایی، این نتیجه بدست آمد که استفاده از ایزوپروپیل الکل، حلال هگزان نرمال و ۲۰ درصد حجمی تری متیل کلروسیلان در مرحله اصلاح سطح، منجر به ائروژل های سیلیکایی نانومتخلخل با سطح ویژه بسیار بالا می گردد. در این بخش خواص ائروژل های سنتز شده در این شرایط، با تست های Contact angle، SEM، BET، BJH، TG/DTA اندازه گیری شد و نتایج در جدول (۴) آمده است. نتیجه مربوط به تست SEM نمونه سنتز شده نیز در شکل (۸) آمده است. همان طوری که از شکل نیز مشخص است نمونه های سنتز شده دارای ساختار نانو متخلخل هستند.

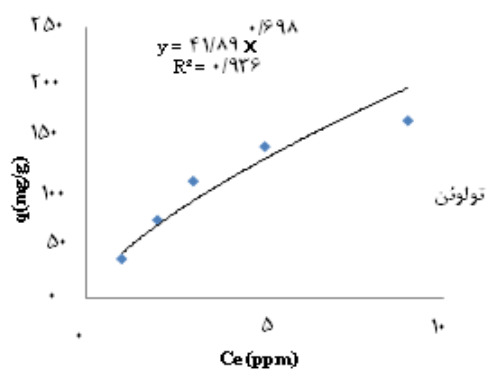
معادله تئوری یا تجربی، برای تفسیر یا پیش‌گویی داده‌های جذب ضروری است.

از مدل‌های مهمی که به طور گسترده در حذف آلاینده‌های آلی از آب بکار می‌رود، ایزوترم فروندلیچ می‌باشد که به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود:

$$q = K_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

که در این رابطه،  $q$  ظرفیت جذب یک جاذب،  $C_e$ ، غلظت تعادلی جذب شونده،  $K_f$  نماینده ظرفیت جذب یک جاذب و پارامتر  $n$  بیانگر اثر غلظت بر ظرفیت جذب و نیز نشان‌دهنده شدت جذب است. در جدول (۶) پارامترهای مربوط به معادله فروندلیچ را برای جذب ترکیبات BTX توسط ائروژل‌های سیلیکایی سنتز شده در این کار آمده است و جهت مقایسه با جاذب کربن اکتیو گرانولی<sup>۱</sup> (GAC) و کربن نانو تیوب<sup>۲</sup> (CNTs)، پارامترهای مربوط به این جاذب‌ها هم در جدول آمده است [۱۶].

مقادیر بالای  $K_f$  و  $n$  برای جذب ترکیبات BTX از آب برای جاذب سیلیکا ائروژل سنتز شده در این کار نسبت به سایر جاذب‌های معمول، نشان‌دهنده قدرت جذب بالای ائروژل‌های سیلیکایی می‌باشد که ناشی از سطح ویژه و تخلخل بالای این مواد نسبت به سایر جاذب‌های معمول و نیز سطح آلی دوست آنها می‌باشد.



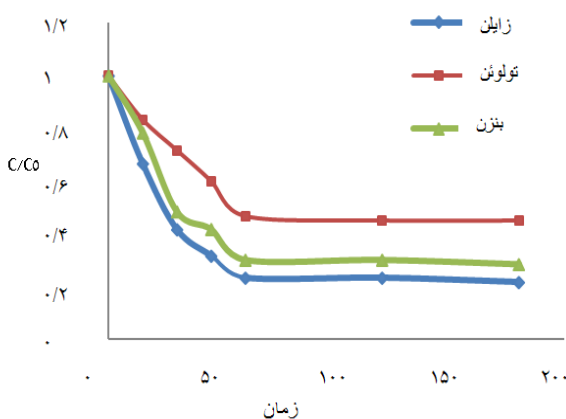
(الف)

جدول (۵): ظرفیت جذب ائروژل‌های سیلیکایی در غلظت‌های بالا و مقایسه با جاذب کربن اکتیو (گرم جذب شونده بر گرم جاذب)

آلاینده	ظرفیت جذب سیلیکا ائروژل (گرم بر گرم جاذب)	ظرفیت جذب کربن فعال (گرم بر گرم جاذب)
بنزین	۶/۹	۱/۷
ترکیبات نفتی	۸	۰/۴۲
نفت سفید	۷/۸	۰/۱
نفت خام	۶/۶	۲/۷
آلکان‌ها	۷/۱۳	۱/۳
هپتان	۵	۲/۲۷
بنزن	۷	۱/۶۹
تولوئن	۵/۵	۱/۲
زایلن		

### ۳-۵-۲- جذب ترکیبات BTEX در غلظت‌های پایین

ابتدا زمان جذب تعادلی برای ترکیبات BTX به طور جداگانه یافته می‌شود. شکل (۹) نمودار تغییرات غلظت بر حسب زمان را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است زمان تعادلی جذب برای تمام ترکیبات BTX تقریباً برابر ۶۰ دقیقه است. همان‌طور که از شکل نیز مشخص است، پس از گذشت این زمان تغییری در غلظت ثانویه محلول‌ها مشاهده نمی‌شود.



شکل (۹): تاثیر زمان تماس بر حذف ترکیبات BTX

ایزوترم‌های جذب تولوئن، زایلن و بنزن از آب، توسط ائروژل‌های سیلیکایی در شکل (۱۰) آمده است. یک همبستگی بین داده‌های تعادلی با استفاده از

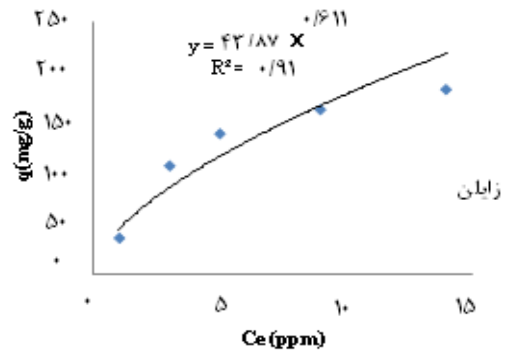
<sup>1</sup> Granular Activated Carbon

<sup>2</sup> Multiwalled Carbon Nanotubes

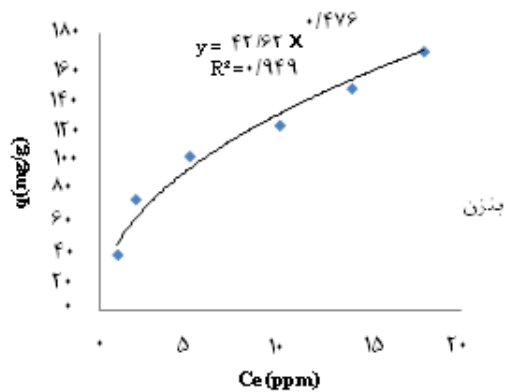
بهبود دهنده سطح، اثر الکلها و حلالهای مختلف، در سنتز سیلیکا ائروژل خالص مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصله نشان داد که استفاده از حلالهای ایزوپروپیل الکل و هگزان و ۲۰ درصد حجمی تری متیل کلو سیلان (TMCS) در مرحله اصلاح سطح بهترین نتایج را می‌دهد. در سنتز ائروژلهای سیلیکایی در این کار سعی شده تا با حداقل هزینه و متداولترین مواد و حلالها این کار انجام شود. تعیین خواص ائروژلهای سنتز شده نتایجی چون دانسیته برابر ۰/۱۱ گرم بر سانتی متر مکعب، ۱۴۳ درجه آب گریزی، مورفولوژی یکنواخت، سطح ویژه برابر ۶۰۰ متر مربع بر گرم، توزیع باریک اندازه حفرات به طور متوسط ۱۶ نانومتر، نشانده شدن گروههای عاملی مورد نظر بر روی سطح دیواره و پایداری حرارتی بیش از ۳۸۰ درجه سلسیوس، را نشان دادند. پس از سنتز و تعیین ویژگیها، به بررسی خواص جذب این ترکیبات و مقایسه آنها پرداخته شد. جذب ترکیبات BTX از آب به کمک ائروژلهای سیلیکایی سنتز شده بر پایه ماده اولیه سدیم سیلیکات و خشک سازی در فشار محیط برای اولین بار در این کار بررسی شده است که نتایج بدست آمده تطابق خوبی با معادله ایزوترم فروندلیچ دارد که مقادیر نسبتا بالای پارامترهای معادله فروندلیچ نسبت به جاذبهای نشان دهنده ظرفیت جذب بالای این ترکیبات است.

## مراجع

- [1] G.Q. Lue, X.S. Zhao, (2004), "nanoporous materials science and engineering".
- [2] A.S. Dorcheh, M.H. Abbasi, (2008), "Silica aerogel: synthesis, properties and characterization", *Journal of materials processing technology*, 199, 10-26.
- [3] H. Hosono, Y. Mishima, H. Takezoe, K. J.D. MacKenzie, (2006), "Nanomaterials: From Research to Applications", *Elsevier Ltd*.
- [4] A.B.A. Krishnan, E.B.V. Shankar, V.E.B.I. Srivastava, M.B.A. Singh, C.B. Radha, (2006), "Modern Aerogels".
- [5] S.W. Hwang, H.H. Jung, S.H. Hyun, Y.S. Ahn, (2007), "Effective preparation of crack-free silica aerogels via ambient drying", *Journal of Sol-Gel*



(ب)



(ج)

شکل (۱۰): ایزوترمهای جذب (الف) تولوئن (ب) زایلن (ج) بنزن، بر روی جاذب سیلیکا ائروژل

جدول (۶): پارامترهای معادله فروندلیچ برای جذب ترکیبات BTX

	بنزن		تولوئن		زایلن	
	$K_f$	$1/n$	$K_f$	$1/n$	$K_f$	$1/n$
سیلیکا ائروژل	۴۲/۶۲	۰/۴۷۶	۴۱/۸۹	۰/۶۹۸	۴۳/۸۷	۰/۶۱۱
GAC [16]	۱۵/۴۵	۰/۴۵	۳۵/۸۰	۰/۳۵۷	۵۴/۸۲	۰/۴
CNTs [16]	۱۱/۲۹	۰/۱۱۵	۳۷/۴۶	۰/۱۲۱	۵۰/۰۹	۰/۳۲۹

## ۴- نتیجه گیری

در این کار ائروژلهای سیلیکایی با موفقیت توسط ماده اولیه ارزان قیمت آب شیشه و با روش خشک سازی در محیط تهیه شدند. اثر چندین پارامتر از جمله درصدهای مختلف مواد بهبود دهنده سطحی، نوع ماده

*Science and Technology*, 41, 139-146.

[6] P.B. Sarawade, J.K. Kim, J.K. Park, H.K. Kim, (2006), "Influence of Solvent Exchange on the Physical Properties of Sodium Silicate Based Aerogel Prepared at Ambient Pressure", *Aerosol and Air Quality Research*, 6(1), 93-105.

[7] S. Štandeker, Z. Novak, Ž. Knez, (2007), "Adsorption of toxic organic compounds from water with hydrophobic silica aerogels", *Journal of Colloid and Interface Science*, 310, 362-368.

[8] H. Bargozin, L. Amirkhani, J.S. Moghaddas, M.M. Ahadian, (2009), "Adsorption of water pollutant using functionalized mesoporous silica aerogels: synthesis and adsorption properties", *first international conference on advances in wastewater treatment & reuse (AWTR2009)*, Tehran, Iran.

[9] S. Štandeker, Z. Novak, Ž. Knez, (2009), "Removal of BTEX vapours from waste gas streams using silica aerogels of different hydrophobicity", *Journal of Hazardous Materials*, 165, 1114-1118.

[10] H. Liu, W. Sha, A.T. Cooper, M. Fan, (2009), "Preparation and characterization of a novel silica aerogel as adsorbent for toxic organic compounds", *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 347, 38-44.

[11] P.M. Shewale, A.V. Rao, A.P. Rao, (2008), "Effect of different trimethyl silylating agents on the hydrophobic and physical properties of silica aerogels", *Applied Surface Science*, 254, 6902-6907.

[12] G.S. Kim, S.H. Hyun, (2003), "Synthesis of window glazing coated with silica aerogel films via ambient drying", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 320, 125-132.

[13] A.P. Rao, A.V. Rao, (2008), "Microstructural and physical properties of the ambient pressure dried hydrophobic silica aerogels with various solvent mixtures", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 354, 10-18.

[14] J. Estella, J.C. Echeverri', M. Laguna, J.J. Garrido, (2007), "Effects of aging and drying conditions on the structural and textural properties of silica gels," *Microporous and Mesoporous Materials*, 102, 274-282.

[15] S. Lee, Y.C. Cha, H.J. Hwang, J.W. Moon, I.S. Han, (2007), "The effect of pH on the physicochemical properties of silica aerogels prepared by an ambient pressure drying method", *Materials Letters*, 61, 3130-3133.

[16] F. Su, C. Lu, S. H. (2010), "Adsorption of benzene, toluene, ethylbenzene and p-xylene by NaOCl-oxidized carbon nanotubes", *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 353, 83-91

## Synthesis of nanoporous silica aerogel for adsorption and separation of hydrocarbons from water

L. Amirkhani<sup>1</sup>, H. Bargozin<sup>1</sup>, J.S. Moghaddas<sup>2\*</sup>, M. M. Ahadian<sup>3</sup>

1. Ph.D Student of Chemical Engineering, Transport Phenomena Research Center (TPRC), Sahand University of Technology.
2. Associate Professor of Chemical Engineering, Transport Phenomena Research Center (TPRC), Sahand University of Technology.
3. Assistant Professor of Chemical Engineering, Institute for Nanoscience and Nanotechnology (INST), Sharif University of Technology.

---

### ARTICLE INFO

#### Article history :

Received 2 January 2010

Received in revised form 12 June 2010

Accepted 26 September 2010

---

#### Keywords:

Silica aerogel

Nanoporous

Adsorption

Organic pollutant

Ambient pressure drying

Isotherm

---

### ABSTRACT

Silica aerogels were synthesized successfully from sodium silicate precursor via ambient pressure drying and adsorption of BTX compounds were studied for the first time. The effect of various parameters such as type of alcohols, type of solvents, various percentages of modification agents and the type of modification agents in the synthesis of silica aerogels were investigated. The results show that by use of isopropylalcohol, n-hexane and 20% trimethylchlorosilane in modification step, nanoporous silica aerogels with very high specific surface area could be synthesized. Characterization of silica aerogel show that, 0.11 gr/cm<sup>3</sup> density, 143<sup>0</sup> contact angle, 600 m<sup>2</sup>/gr specific surface area, narrow pore size distribution (16 nm) and 380<sup>0</sup> thermal stability. After synthesis and characterization, the adsorption properties of silica aerogels were investigated and compared. The high concentration, adsorption of various organic materials such as oil compounds, alkanes and BTX compounds were investigated. The results show that silica aerogels have much higher adsorption capacities than activated carbon, which for kerosene and crude oil is 19 and 78 times more adsorption capacity, respectively. At low concentration, the investigation of adsorption isotherm for BTX compounds show that silica aerogels conform with Freundlich isotherm with good accuracy.

---

All rights reserved.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.