

ساخت ایروژل سیلیکای آب‌دوست و آب‌گریز با روش خشک کردن در فشار محیط و بررسی خواص ساختاری آنها

نرگس نوازش و مرتضی زرگروشتری

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز

پست الکترونیکی: zargar@scu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۱۲؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۹/۰۹/۲۰)

چکیده

در این تحقیق، ایروژل سیلیکا با روش سل ژل و خشک کردن در دمای محیط و با پیش‌ماده سدیم سیلیکات ساخته شده است. ایروژل تهیه شده با این روش، فوق آب‌گریز است. برای آب‌دوست کردن آن، نمونه تهیه شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت حرارت داده شد. ساختار نمونه‌های تهیه شده با استفاده از الگوی پراش پرتو ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی، جذب و واجذب گاز نیتروژن مورد مطالعه قرار گرفته است. برای بررسی خاصیت آب‌دوستی و آب‌گریزی نمونه‌ها، آزمایش سطح تماس قطره آب انجام شده است. پیوندهای شیمیایی نمونه‌های تهیه شده با استفاده از طیف‌سنجی فرو قرمز تبدیل فوری مورد مطالعه قرار گرفته شد. نتایج نشان دادند که با آب‌دوست شدن ایروژل سیلیکا، اندازه ذرات تشکیل دهنده آن بزرگ‌تر شده و توزیع اندازه حفره‌های آن کمتر می‌شود. زاویه تماس قطره آب با سطح نمونه فوق آب‌گریز ۱۷۰ درجه است. این عدد برای نمونه آب‌دوست به ۵۱ درجه می‌رسد. نتایج این تحقیق در مقایسه با نتایج تحقیقات مشابه، بهبود در خاصیت آب‌گریزی و حجم کلی قطر حفره و قطر میانگین را برای نمونه فوق آب‌گریز نشان می‌دهد. در این تحقیق برای اولین بار اندازه ذرات ایروژل سیلیکای آب‌دوست و آب‌گریز با استفاده از نرم افزار دیجیمایزر اندازه‌گیری شده است.

واژه‌های کلیدی: ایروژل سیلیکا، فوق آب‌گریز، فشار محیط، سل ژل، نانوساختار

۱. مقدمه

جامد، یا دود آبی نیز گفته می‌شود. ایروژل‌ها متشکل از نانوذرات به‌عنوان بلوک‌های ساختمانی هستند که این نانوذرات به هم متصل شده و یک ساختار متخلخل با منافذ باز ایجاد کرده‌اند. به عبارتی دیگر ایروژل یک شبکه جامد متخلخل است که حاوی بسته‌های هوا است؛ این بسته‌های هوا درصد بالایی از حجم درون ماده را اشغال می‌کنند. در واقع ایروژل یک ماده

ایروژل‌ها^۱ جامدهایی فوق سبک و بسیار متخلخل هستند که با جایگزین کردن مایع درون یک ژل با هوا، بدون افت حجمی ساخته می‌شوند. به این مواد، دود یخ زده^۲، دود جامد^۳، هوای

۱. Aerogels
۲. Frozen smoke
۳. Solid smoke

به آسانی جذب آن شود و در عین حال سطح آن توسط حلال‌های قطبی مانند آب که تنش سطحی بالایی دارند، خیس نشود. تهیهٔ ابروژل سیلیکای آب‌گریز به‌دو روش امکان‌پذیر است: با روش ساخت و یا با اصلاح سطحی آن. در اصلاح سطحی، گروه‌های قطبی OH سطح ابروژل سیلیکا با گروه‌های غیرقطبی جایگزین شده و در نتیجه انرژی آزاد سطحی آن کاهش می‌یابد [۱۶]. در این تحقیق دو نمونهٔ ابروژل سیلیکای فوق آب‌گریز و آب‌دوست ساخته شده و ویژگی‌های ساختاری آنها مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲. مواد اولیه و روش انجام آزمایش

برای تهیهٔ هیدروژل سیلیکا از مادهٔ اولیهٔ ارزان قیمت سدیم سیلیکات استفاده شده است. از مواد زیر برای ساخت ابروژل سیلیکا استفاده شده است: سدیم سیلیکات (Na_2SiO_3) مرک با درصد وزنی ۳۶٪ و نسبت $\text{SiO}_2 : \text{Na}_2\text{O} = 1 : 3.33$ ، اسید سیتریک ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ سامچون)، تری متیل کلووسیلان ($\text{TMCS C}_3\text{H}_9\text{ClSi}$ ، مرک)، متانول (CH_3OH ، سامچون)، هگزان (C_6H_{14} ، سامچون) و از آب یون‌زدایی شده برای تهیهٔ محلول‌ها و شستن نمونه‌های هیدروژل سیلیکا استفاده شده است. در این تحقیق از روش خشک کردن در فشار محیط برای تهیهٔ ابروژل‌های سیلیکا استفاده شده است.

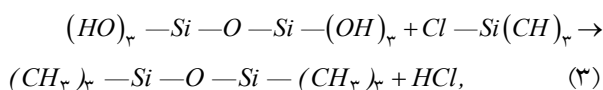
برای تهیهٔ نمونه‌های هیدروژل سیلیکا روش تک‌مرحله‌ای با کاتالیست اسیدی مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش ابتدا با استفاده از آب یون‌زدایی شده محلول سدیم سیلیکات با چگالی ویژه ۱٫۳۵ رقیق شده به چگالی ویژه ۱٫۰۵ رسید، سپس به ۵ میلی‌لیتر از این محلول رقیق شده ۰٫۵ میلی‌لیتر از محلول ۳ مولار اسید سیتریک به صورت قطره قطره اضافه شد. محلول با استفاده از همزن مغناطیسی و در دمای اتاق همزده شد تا هیدروژل سیلیکا تشکیل شد. به منظور افزایش استحکام ساختار، هیدروژل تهیه شده به مدت سه ساعت درون اجاق با دمای 50°C قرار گرفت. پس از آن در مدت زمان ۲۴ ساعت و در دمای 50°C هیدروژل تهیه شده ۴ بار با آب یون‌زدایی شده شسته شد تا یون‌های سدیم آن حذف شوند. پس از آن

خاص با فرمول شیمیایی مشخص نیست، بلکه به‌دسته‌ای از مواد با ویژگی‌های مشخص گفته می‌شود. از ویژگی‌های این مواد می‌توان به چگالی کم، سطح ویژه بسیار بالا، منافذ باز و تخلخل زیاد آنها اشاره کرد [۱-۴].

ابروژل‌ها به‌سه دستهٔ آلی، غیر آلی و دوگانهٔ آلی-غیر آلی تقسیم می‌شوند [۱]. در میان ابروژل‌های شناخته شده ابروژل‌های سیلیکا و کربن به دلیل داشتن ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد مثل سطح ویژه و تخلخل بالا برای مقاصد تمیز کردن محیط زیست بیشتر استفاده شده‌اند.

اولین ابروژل ساخته شده، ابروژل سیلیکا بوده است. مطالعهٔ ابروژل‌های ساخته شده تا کنون نشان می‌دهد که این ابروژل‌ها گسترهٔ مساحت سطح ویژه ($500-1500 \text{ m}^2/\text{g}$)، تخلخل ($80-90\%$) و چگالی ($0.3-0.35 \text{ g/cm}^3$) دارند [۱]. این ابروژل‌ها نسبت به تمام جامدهایی که مورد بررسی قرار گرفته‌اند، پایین‌ترین رسانندگی حرارتی [۵-۶]، ضریب شکست [۷]، سرعت صوت [۸] و ثابت دی‌الکتریک [۹] را دارند. به دلیل داشتن این ویژگی‌های بی‌نظیر در زمینه‌های مختلف از جمله در سامانه‌های انرژی خورشیدی، یخچال‌ها، فلاسک‌های حرارتی، مدارهای مجتمع، حسگرهای گازی و زیستی، باتری‌ها و به‌عنوان حامل دارو در پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۰-۱۴]. همچنین از آنها به‌عنوان کاتالیست و جاذب [۱۵] استفاده می‌شود. ابروژل سیلیکا را می‌توان در دو نوع آب‌دوست و آب‌گریز تولید کرد که نوع آب‌گریز آن مولکول‌های آلی را جذب کرده و در عین حال مولکول‌های آب را جذب نمی‌کند؛ در نتیجه در جذب مایعات آلی، روغن‌ها، جذب مواد آلی از محیط‌های آبی و انتقال مایعات در ابعاد نانو برای کاربردهای شیمیایی و زیست‌فناوری کارایی بیشتری دارد. در واقع با آب‌گریز کردن ابروژل سیلیکا می‌توان انرژی آزاد سطحی آن را در گسترهٔ وسیعی تنظیم کرد. انرژی آزاد سطحی ابروژل نقش بسیار مهمی در رطوبت‌پذیری سطح آن و تنش سطحی فصل مشترک مایع و جامد دارد. مایع آلی تنش سطحی پایینی دارد؛ بنابراین لازم است که انرژی آزاد سطحی ابروژل به‌گونه‌ای تنظیم شود که مایع آلی غیر قطبی آن به طور کامل خیس شده و

تهیه ایروژل سیلیکا با روش خشک کردن در محیط، تنها در صورتی امکان پذیر است که سطوح آن آب گریز باشد؛ بنابراین قبل از مرحله خشک کردن باید سطح نمونه توسط گروه‌های غیر قطبی (در اینجا متیل) اصلاح شیمیایی شود. گروه متیل جایگزین گروه هیدروکسیل شده و سطح ژل آب گریز می‌شود. انرژی آزاد سطح و ساختار هندسی سطح، دو پارامتر مهم بوده که روی ترشوندگی سطح اثر دارند. از نقطه نظر انرژی، انرژی سطحی کم و زبری سطحی زیاد برای ایجاد سطوح آب‌گریز ضروری هستند. ترشوندگی سطح مواد می‌تواند با تغییر خواص فیزیکی و شیمیایی سطح تغییر کند و از حالت آب دوستی به آب‌گریزی تغییر کند. در این سطوح یک عامل خارجی نظیر گرما، pH، نور، الکتروسیسته و مغناطیس می‌تواند ترشوندگی سطح را تغییر دهد. مدل ونزل^۱ رفتار ترشوندگی سطوح زبر را تشریح می‌کند. طبق این مدل با افزایش زبری سطح، آب‌گریزی سطح افزایش می‌یابد [۱۸]. در مورد ایروژل سیلیکا پس از انجام اصلاح شیمیایی سطح، گروه‌های غیر قطبی متیل جایگزین گروه‌های قطبی هیدروکسیل می‌شوند. مولکول‌های آب پس از اضافه شدن ماده غیر قطبی تلاش می‌کنند به نحوی کنار هم قرار گیرند که بیشترین تماس را با یکدیگر داشته باشند. بنابراین آنتروپی سیستم افزایش یافته، در نتیجه دو ماده آب دوست و آب‌گریز در یکدیگر حل نخواهند شد. با حرارت دادن نمونه آب‌گریز گروه‌های متیل جای خود را به گروه‌های هیدروکسیل می‌دهند. علاوه بر آن ممکن است گرما بر روی زبری سطح تأثیر داشته باشد و باعث کاهش زبری سطح و در نتیجه آب دوست شدن نمونه شود [۴]. واکنش اصلاح شیمیایی سطح به صورت واکنش (۳) است:



۴. نتایج

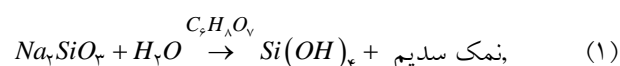
ساختار نمونه‌های تهیه شده با استفاده از الگوی پرانش پرتو

هیدروژل به مدت ۲۴ ساعت و در دمای $50^\circ C$ درون متانول قرار می‌گیرد تا آب موجود در حفره‌های آن توسط متانول جایگزین شود. پس از این مرحله از مخلوط متانول: هگزان: TMCS با نسبت حجمی ۱:۱:۱ برای اصلاح سطحی آکوژل استفاده شد. به این منظور آکوژل تهیه شده، در این مخلوط درون تفلون اتوکلاو ۱۰۰ cc قرار گرفت. در این مرحله اتوکلاو به مدت زمان ۲۴ ساعت و در دمای $50^\circ C$ قرار گرفت. پس از خنک شدن اتوکلاو برای حذف TMCS اضافه، ژل با هگزان شسته شد. در مرحله خشک کردن، ژل ابتدا به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار گرفت. در این مرحله ژل مقداری از حجم خود را از دست داد. پس از این مرحله، ژل به مدت یک ساعت در دمای $50^\circ C$ و یک ساعت در دمای $200^\circ C$ در اجاق قرار داده شد. در پایان مرحله قبل، حجم ژل افزایش یافته و تقریباً به حجم اولیه برگشت. با استفاده از روش فوق دو نمونه ایروژل سیلیکای آب‌گریز تهیه شد [۱۷]. یکی از نمونه‌های آب‌گریز پس از تهیه به مدت ۲ ساعت در کوره در دمای $400^\circ C$ قرار می‌گیرد تا نمونه آب دوست شود [۵]. نمونه‌های آب‌گریز و آب دوست به ترتیب A و B نامگذاری شده‌اند.

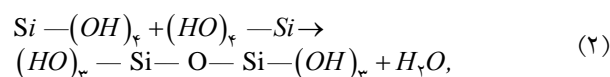
۳. سازوکار انجام آزمایش

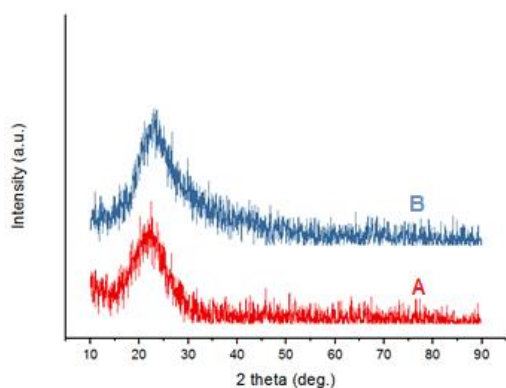
با اضافه شدن اسید سیتریک به محلول سدیم سیلیکات، سدیم سیلیکات با آب واکنش داده و اسید سیلیسیک تشکیل می‌شود. اسید سیلیسیک چگالیده شده و ذرات کوچک سیلیکا تشکیل می‌شوند. به تدریج ذرات سیلیکا به هم چسبیده و شاخه‌های سیلیکا تشکیل می‌شوند. این شاخه‌ها نیز یک شبکه تشکیل می‌دهند و در نتیجه هیدروژل سیلیکا تهیه می‌شود. واکنش‌های (۱) و (۲) واکنش‌های هیدرولیز و چگالش را در این مرحله نشان می‌دهد [۴].

واکنش هیدرولیز:



واکنش چگالش:





شکل ۱. الگوی پراش پرتو X دو نمونه A و B.

در شکل ۲ نشان می‌دهند که هر دو نمونه آب‌دوست و آب‌گریز ساختار متخلخل و اسفنجی دارند. اندازه ذرات دو نمونه با استفاده از نرم‌افزار دیجیمایزر با دقت ± 2 نانومتر اندازه‌گیری شد. شکل ۳ نمودار توزیع اندازه ذرات را نشان می‌دهد. مشاهده شد که میانگین اندازه ذرات نمونه B بزرگ‌تر از نمونه A است. میانگین اندازه ذرات (خوشه) برای نمونه‌های A و B به ترتیب ۲۶ و ۳۸ نانومتر اندازه‌گیری شد.

۳.۴. نتایج پراش انرژی پرتوی ایکس

نتایج EDX نشان داد که درصد جرمی و اتمی کربن در نمونه آب‌دوست نسبت به نمونه آب‌گریز کمتر است. نتایج نشان می‌دهند که دلیل آب‌دوست شدن نمونه، از بین رفتن عوامل اصلاح‌کننده سطحی با افزایش دماست. نتایج حاصل از آنالیز EDX در شکل ۴ نشان داده شده و درصد وزنی و اتمی حاصل از آنالیز EDX در جدول ۱ مرتب شده است.

۴.۴. نتایج جذب و واجذب گاز نیتروژن

شکل ۵ الف نمودارهای جذب و واجذب گاز نیتروژن را نشان می‌دهد. نمودارها طبق تقسیم‌بندی آیوپاک^۶ نوع چهارم بوده و پسماند دارند که نشان می‌دهند در هر دو نوع ایروزل آب‌دوست و آب‌گریز ساختار نانو متخلخل وجود دارد. منحنی پسماند نمونه آب‌دوست نسبت به نمونه آب‌گریز سطح کمتری

ایکس^۱ (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۲ (FESEM)، جذب و واجذب گاز نیتروژن با آزمون BET^۳ مورد مطالعه قرار گرفته است. برای بررسی خاصیت آب‌دوستی و آب‌گریزی نمونه‌ها، آزمایش سطح تماس قطره آب انجام شده است. پیوندهای شیمیایی نمونه‌های تهیه شده با استفاده از طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه^۴ (FTIR) و عنصرسنجی با آزمون پراکنندگی انرژی پرتوی ایکس^۵ (EDX) مورد مطالعه قرار گرفته است.

۱.۴. نتایج پراش پرتوی ایکس

ساختار بلوری و درصد خلوص فاز دو نمونه A و B توسط الگوی پراش اشعه X مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از XRD در شکل ۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که هر دو نمونه در گستره ۲۰ تا ۲۵ درجه دارای یک قله پهن هستند. این دو الگو نشان می‌دهند که هر دو نمونه ساختار آمورف دارند. نمونه A نسبت به نمونه B قله پهن‌تری دارد. با بازپخت نمونه B در دمای 400°C می‌توان نتیجه گرفت که نظم ساختاری نمونه بهبود می‌یابد. نتایج به دست آمده با نتایج حاصل در مرجع‌های [۵] و [۱۹] سازگار است. همچنین به نظر می‌رسد که با بازپخت نمونه B در دمای 400°C اندازه ذرات نمونه افزایش می‌یابد. در واقع می‌توان نتیجه گرفت که اندازه ذرات نمونه آب‌گریز (A) کوچک‌تر از اندازه ذرات نمونه آب‌دوست (B) است.

۲.۴. نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی

ریخت شناسی سطح و اندازه ذرات نمونه‌های ایروزل با استفاده از FESEM مورد مطالعه قرار گرفته است. تصاویر

۱. X-ray diffraction

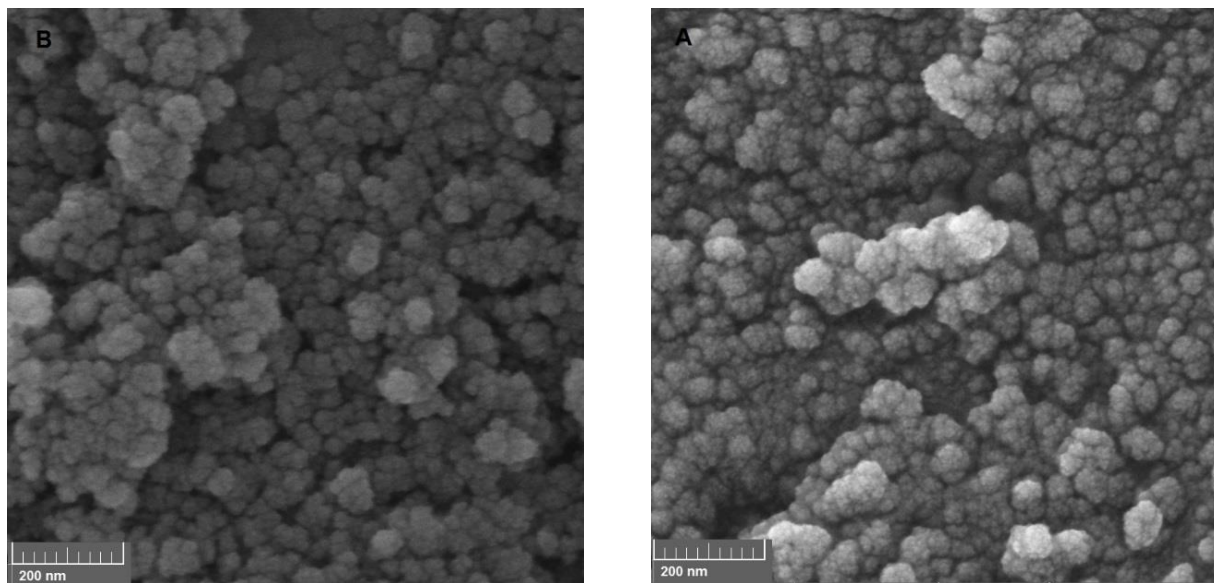
۲. Field emission scanning electron microscope

۳. Brunauer-Emmett-Teller

۴. Fourier-transform infrared

۵. Energy-dispersive X-ray

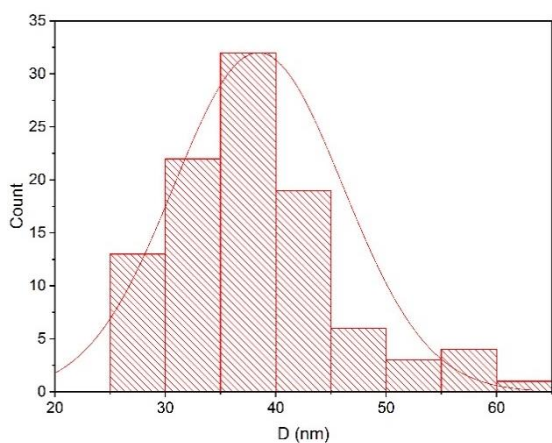
۶. IUPAC



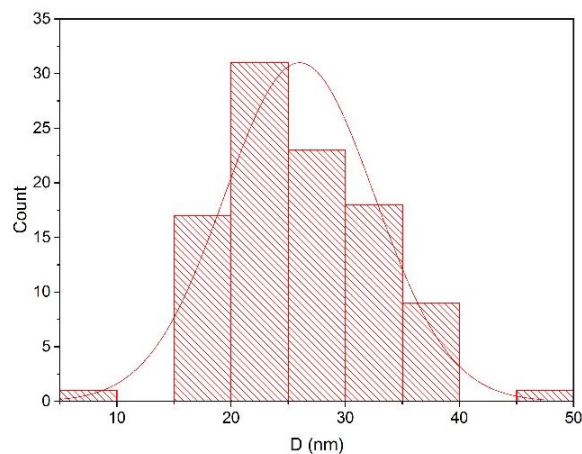
(ب)

(الف)

شکل ۲. تصاویر FESEM در مقیاس ۲۰۰ nm، (الف) نمونه آب‌گریز و (ب) نمونه آب‌دوست.



(ب)

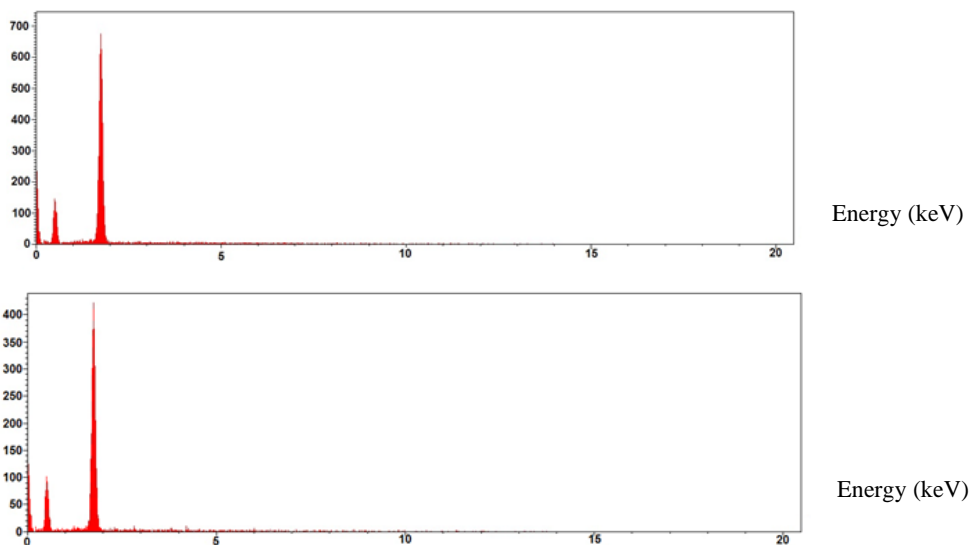


(الف)

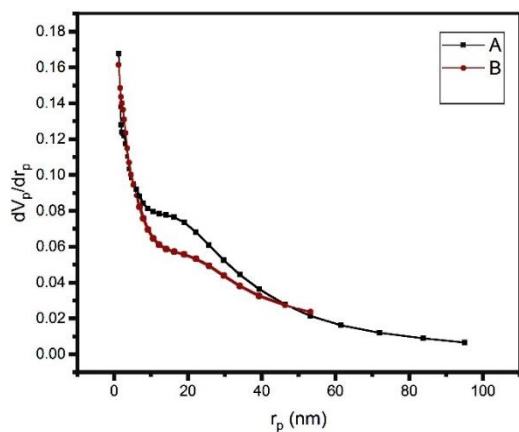
شکل ۳. نمودار توزیع اندازه ذرات با استفاده از دیجی‌مایزر، (الف) نمونه آب‌گریز و (ب) نمونه آب‌دوست.

جدول ۱. درصد وزنی و اتمی حاصل از آنالیز EDX نمونه‌های A و B

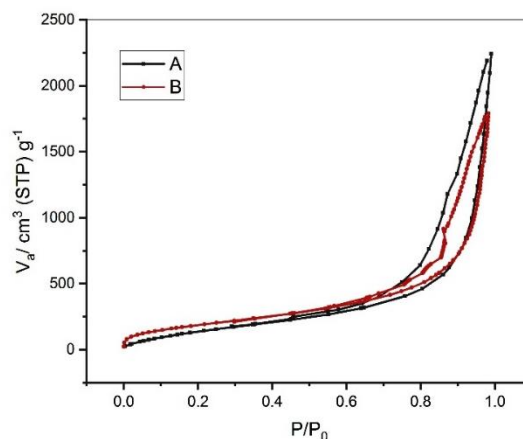
درصد وزنی		درصد اتمی		عناصر
نمونه B	نمونه A	نمونه B	نمونه A	
۴,۰۴	۱۲,۰۷	۶,۷۷	۱۹,۲۳	C
۴۵,۳۹	۴۰,۶۰	۵۷,۰۴	۴۸,۵۴	O
۵۰,۵۶	۴۷,۳۳	۳۶,۱۹	۳۲,۲۳	Si
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	مجموع



شکل ۴. آنالیز EDX نمونه‌های (A) آب گریز و (B) آب‌دوست.



(ب)



(الف)

شکل ۵. (الف) نمودارهای جذب و واجذب گاز نیتروژن و (ب) نمودارهای توزیع اندازه حفره‌های دو نمونه A و B.

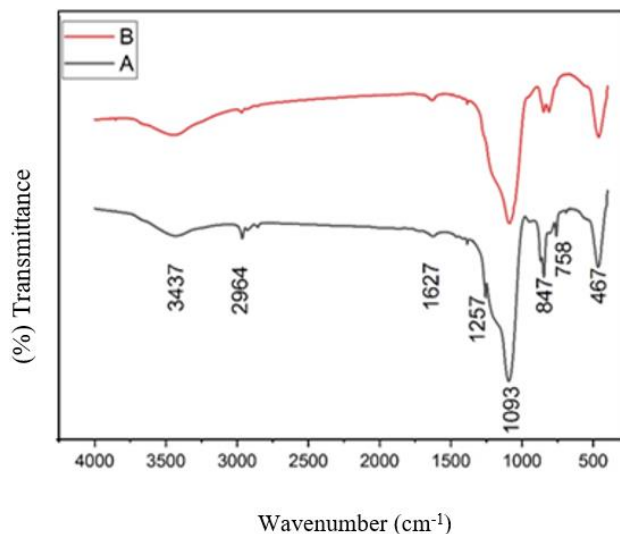
جدول ۲. داده‌های حاصل از آنالیز جذب و واجذب گاز نیتروژن نمونه‌های A و B.

نمونه	مساحت سطح ویژه BET (m ² /g)	قطر میانگین حفره‌ها (nm)	حجم کلی حفره‌ها (g/cm ³) در نقطه P/P ₀ = ۰٫۹۸۳
A	۶۱۸	۲۲٫۳	۳٫۵
B	۶۹۶	۱۶٫۰	۲٫۸

اندازه حفره‌ها برای نمونه آب گریز در محدوده ۱٫۲۲ تا ۹۰٫۰۴ نانومتر و برای نمونه آب‌دوست در محدوده ۱٫۲۲ تا ۵۳٫۲۵

دارد و زودتر به اشباع رسیده است. توزیع اندازه حفره‌ها با استفاده از روش BJH^۱ بررسی شد. مطابق شکل ۵. ب توزیع

۱. Barrett-Joyner-Halenda



شکل ۶. طیف فرو قرمز تبدیل فوریه دو نمونه A و B.

جایگزین می‌شود که گروه‌های متیل باعث آب‌گریزی نمونه می‌شوند.

۶.۴. اندازه‌گیری زاویه تماس

زاویه تماس قطره آب برای هر دو نمونه آب‌دوست و آب‌گریز نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل‌های ۷ الف و ب مشاهده می‌شود نمونه آب‌دوست زاویه تماس ۵۱ درجه و نمونه آب‌گریز زاویه تماس ۱۷۰ درجه دارد.

نتایج این تحقیق برای نمونه آب‌گریز با نتایج تحقیقات مشابه در جدول ۳ مقایسه شده است.

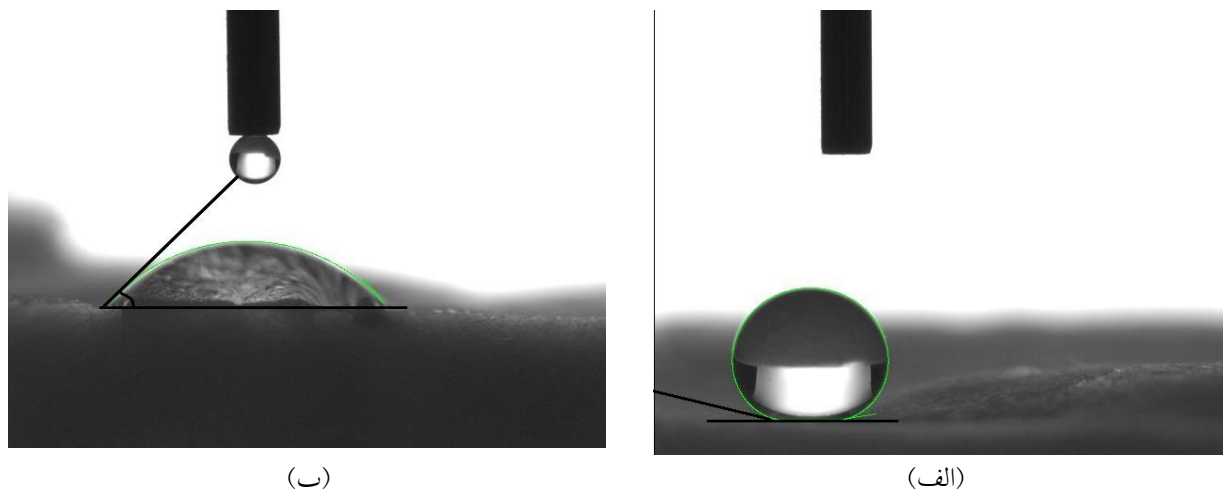
۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق دو نمونه آب‌دوست و فوق آب‌گریز ابروژل سیلیکا ساخته شد. الگوی پراش اشعه X نشان داد که هر دو نمونه در گستره ۲۰ تا ۲۵ درجه یک قله پهن دارند؛ در نتیجه هر دو نمونه ساختار آمورف دارند. نمونه فوق آب‌گریز نسبت به نمونه آب‌دوست قله پهن‌تری دارد. می‌توان نتیجه گرفت که نمونه آب‌دوست نظم ساختاری بهتری دارد. تصاویر FESEM نشان داد که هر دو نمونه ساختار متخلخل و اسفنجی

نانومتر است. نتایج نشان می‌دهند که با آب‌دوست شدن نمونه ابروژل سیلیکا، ساختار حفره‌ها تا حدودی فرو می‌ریزد. همان‌طور که جدول ۲ نشان می‌دهد قطر میانگین حفره‌ها و حجم کلی حفره‌ها برای نمونه آب‌دوست کمتر از نمونه آب‌گریز است.

۵.۴. نتایج طیف سنجی فرو قرمز تبدیل فوریه

نتایج FTIR دو نمونه آب‌دوست و آب‌گریز در شکل ۶ آورده شده است. دو قله جذب در 467 cm^{-1} و 1093 cm^{-1} مربوط به پیوند Si-O-Si است و در هر دو نمونه آب‌دوست و آب‌گریز بدون تغییر مانده است. با کلسینه کردن نمونه، می‌توان نتیجه گرفت که پیوندهای اصلی آن بدون تغییر باقی می‌ماند. دو قله جذب در 1627 و 3437 cm^{-1} مربوط به پیوند O-H است و مشاهده می‌شود که در نمونه آب‌گریز این قله‌ها نسبت به نمونه آب‌دوست ضعیف‌تر بوده و قله‌های موجود در 847 و 2964 cm^{-1} که مربوط به پیوند CH_3 است در نمونه آب‌گریز قوی‌تر از نمونه آب‌دوست است. در نمونه آب‌گریز دو قله جذب در 758 و 1257 cm^{-1} وجود دارد که به ترتیب مربوط به $\text{Si}-\text{C}$ و $\text{Si}-\text{CH}_3$ است [۲۰]. از نتایج حاصل از FTIR می‌توان نتیجه گرفت که با اصلاح سطحی نمونه، گروه‌های هیدروکسیل با گروه‌های متیل



شکل ۷. اندازه‌گیری زاویه تماس قطره آب با سطح نمونه (الف) آب گریز A و (ب) آب دوست B.

جدول ۳. مقایسه نتایج این تحقیق با تحقیقات مشابه.

زاویه تماس قطره آب بر حسب درجه	مساحت سطح ویژه BET [$\text{m}^2 \text{g}^{-1}$]	قطر میانگین حفره‌ها (nm)	حجم کلی حفره‌ها [$\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$] نقطه $P/P_0 = 0/983$	مرجع [۱۷]
۱۴۸	۷۱۹	۱۳،۰۴	۲،۲۷	مرجع [۱۷]
۱۴۳	۵۷۹	۱۶،۵	۲،۳۸	مرجع [۲۱]
۱۷۰	۶۱۸،۸۳	۲۲،۳	۳،۵	تحقیق حاضر

ایروژل سیلیکا را در این تحقیق نسبت به تحقیقات مشابه نشان داد. از نتایج حاصل از FTIR می‌توان نتیجه گرفت که با اصلاح سطحی نمونه، گروه‌های هیدروکسیل با گروه‌های متیل جایگزین می‌شود که گروه‌های متیل باعث آب‌گریزی نمونه می‌شوند. اندازه‌گیری زاویه تماس قطره آب این نتیجه را تأیید کرد. زاویه تماس قطره آب برای نمونه فوق آب‌گریز در این تحقیق در مقایسه با تحقیقات مشابه افزایش یافت.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از دانشگاه شهیدچمران اهواز برای حمایت از این پژوهش با پژوهانه به شماره SCU.SP۹۹.۵۵۹ قدردانی می‌کنند.

دارند. برای اولین بار اندازه ذرات نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار دیجیمایزر اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری اندازه ذرات دو نمونه با استفاده از این نرم‌افزار نشان داد که اندازه ذرات در نمونه آب‌دوست بزرگ‌تر است. نتایج EDX نشان داد که درصد جرمی و اتمی کربن در نمونه آب‌دوست نسبت به نمونه آب‌گریز کمتر است؛ که نشان دهنده از بین رفتن عوامل اصلاح کننده سطحی با افزایش دماست. نمودارهای جذب و واجذب گاز نیتروژن نشان داد که در هر دو نوع ایروژل آب‌دوست و آب‌گریز ساختار نانو متخلخل وجود دارد. این نتایج، نتایج حاصل از FESEM را تأیید می‌کند. توزیع اندازه حفره‌ها با استفاده از روش BJH بررسی شد. نتایج نشان داد که با آب‌دوست شدن نمونه ایروژل سیلیکا، ساختار حفره‌ها تا حدودی فرو می‌ریزد. نتایج حاصل بهبود در ویژگی‌های فیزیکی

مراجع

- 91 (1992) 2004.
12. L W Hrubesh, L E Keene, and V R Latorre, *Mater. Res.* **8** (1993) 1736.
13. M Schmidt, F Schwertfeger, *Non-Cryst. Solids.* **225** (1998) 364.
14. J E Amonette, J Matyas, *Microporous Mesoporous Mater.* **250** (2017) 100.
15. S Meng, J Zhang, W Chen, X Wang, and M Zhu, *Microporous and Mesoporous Mater.* **273** (2019) 294.
16. E Strobach, B Bhatia, S Yang, L Zhao, and E N Wang, *Non-Cryst. Solids.* **462** (2017) 72.
17. U K H Bangi, A Parvathy Rao, H Hirashima, and A Venkateswara Rao, *Sol-Gel Sci Technol.* **50** (2009) 87.
18. Q. Zeng, *Results in Physics.* **10** (2018) 588.
19. M V Khedkar, S B Somvanshi, A V Humbe, and K M Jadhav, *Non-Cryst. Solids.* **511** (2019) 140.
20. D B Mahadik, A Venkateswara Rao, A Parvathy Rao, P B Wagh, S V Ingale, and Satish C Gupta, *colloid and interface science* **356** (2011) 298.
21. M Firoozmandan, J Moghaddas, and N Yasrebi, *J. Sol-Gel Sci Technol.* **79** (2016) 67.
1. S He, D Huang, H Bi, and Z Li, *Non-Cryst. Solids.* **410** (2015) 58.
2. J Fricke and T Tillotson, *Thin Solid Films* **297** (1997) 212.
3. A Du, B Zhou, Z Zhang, and J Shen, *Materials* **6**, 3 (2013) 941.
4. M Aegerter, N Leventis, and M Koebel, "aerogels handbook". Springer New York. (2011).
5. H Han, W Wei, Z Jiang, J Lu, J Zhu, and J Xie, *Colloids Surf A.* **509** (2016) 539.
6. G Liu, R Yang, M Li, *Non-Cryst. Solids.* **356** (2010) 250.
7. T Y Wei, C Yu Kuo, Y J Hsu, S Yuan Lu, and Y Cheng Chang, *Microporous Mesoporous Mater.* **112** (2008) 580.
8. T Y Wei, T F Chang, S Yuan Lu, and Y Cheng Chang, *Am.Ceram. Soc.* **90** (2007) 2003.
9. X Lu, M C Arduinischuster, J Kuhn, O Nilsson, J Fricke, and R W Pekala, *Science.* **255** (1992) 971.
10. M Tabata, I Adachi, Y Ishii, H Kawai, T Sumiyoshi, and H Yokogawa, *Nucl. Instr. and Meth. A.* **623** (2010) 339.
11. J Gross, J Fricke, and L W Hrubesh, *Acoust.Soc. Am.*