

ساخت ایروژل سیلیکای آب دوست و آب گریز 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 پیش ماده سدیم سیلیکات ساخته شده است. ایروژل تهیه شده با این روش، فوق آب گریز است. برای آب دوست کردن آن، نمونه تهیه شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲ ساعت حرارت داده شد. ساختار نمونه های 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 آب دوستی و آب گریزی نمونه ها، آزمایش سطح تماس قطره آب انجام شده است. پیوندهای شیمیایی نمونه های تهیه شده با استفاده از طیف سنجی فرو قرمز تبدیل فوریه مورد مطالعه قرار گرفته شد. نتایج نشان دادند که با آب دوست شدن ایروژل سیلیکا، اندازه ذرات تشکیل دهنده آن بزرگ تر شده و توزیع اندازه حفره های آن کمتر می شود. زاویه تماس قطره آب با سطح نمونه فوق آب گریز ۱۷۰ درجه است. این عدد برای نمونه آب دوست به ۵۱ درجه می رسد. نتایج این تحقیق در مقایسه با نتایج تحقیقات مشابه، بهبود در خاصیت آب گریزی و حجم کلی قطر حفره و قطر میانگین را برای نمونه فوق آب گریز نشان می دهد. در این تحقیق برای اولین بار اندازه ذرات ایروژل سیلیکای آب دوست و آب گریز با استفاده از نرم افزار دیجیمایزر اندازه گیری شده است.

واژه های کلیدی: ایروژل سیلیکا، فوق آب گریز، فشار محیط، سل ژل، نانوساختار

۱. مقدمه

جامد، یا دود آبی نیز گفته می شود. ایروژل ها متشکل از نانو ذرات به عنوان بلوک های ساختمانی هستند که این نانو ذرات به هم متصل شده و یک ساختار متخلخل با منافذ باز ایجاد کرده اند. به عبارتی دیگر ایروژل یک شبکه جامد متخلخل است که حاوی بسته های هوا است؛ این بسته های هوا درصد بالایی از حجم درون ماده را اشغال می کنند. در واقع ایروژل یک ماده

ایروژل ها^۱ جامدهایی فوق سبک و بسیار متخلخل هستند که با جایگزین کردن مایع درون یک ژل با هوا، بدون افت حجمی ساخته می شوند. 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 $\text{SiO}_2 : \text{Na}_2\text{O} = ۱ : ۳.۳۳$ ، اسید سیتریک ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ ، سامچون)، تری متیل کلروسیلان ($\text{TMCS C}_3\text{H}_9\text{ClSi}$ ، 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.

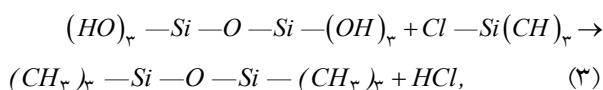
برای تهیهٔ نمونه‌های هیدروژل سیلیکا روش تک‌مرحله‌ای با کاتالیزت اسیدی مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش ابتدا با استفاده از آب یون‌زدایی شده محلول سدیم سیلیکات با چگالی ویژهٔ ۱/۳۵ رقیق شده به‌چگالی ویژهٔ ۱/۰۵ رسید، سپس به ۵ میلی‌لیتر از این محلول رقیق شده ۰/۵ میلی‌لیتر از محلول ۳ مولار اسید سیتریک 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 ویژهٔ بسیار بالا، منافذ باز و تخلخل زیاد آنها اشاره کرد [۱-۴].

ایروژل‌ها 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 ویژهٔ ($500-1500 \text{ m}^2/\text{g}$)، 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 کاتالیزت 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 ابروژل 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 گروه های غیر قطبی (در اینجا متیل) اصلاح شیمیایی شود. گروه متیل جایگزین گروه هیدروکسیل شده و سطح ژل آب گریز می شود. 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 آب گریز ضروری هستند. ترشوندگی سطح مواد می تواند با تغییر خواص فیزیکی و شیمیایی سطح تغییر کند و از حالت آب دوستی به آب گریزی تغییر کند. در این سطوح یک عامل خارجی نظیر گرما، pH، نور، الکتريسيته و مغناطيس می تواند ترشوندگی سطح را تغییر دهد. مدل ونزل^۱ رفتار ترشوندگی سطوح زبر را تشریح می کند. طبق این مدل با افزایش زبری سطح، آب گریزی سطح افزایش می یابد [۱۸]. در مورد ابروژل سیلیکا پس از انجام اصلاح شیمیایی سطح، گروه های غیر قطبی متیل جایگزین گروه های قطبی هیدروکسیل می شوند. مولکول های آب پس از اضافه شدن ماده غیر قطبی تلاش می کنند 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 آب گریز در یکدیگر حل نخواهند شد. با حرارت دادن نمونه آب گریز گروه های متیل جای خود را به گروه های هیدروکسیل می دهند. 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

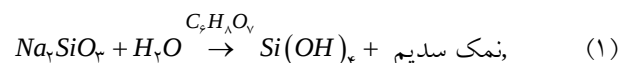
ساختار نمونه های تهیه شده با استفاده از الگوی پراش پرتو

هیدروژل به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۵۰°C درون متانول قرار می گیرد تا آب موجود در حفره های آن توسط متانول جایگزین شود. پس از این مرحله از مخلوط متانول: هگزان: TMCS با نسبت حجمی ۱:۱:۱ برای اصلاح سطحی آلكوژل استفاده شد. به این منظور آلكوژل تهیه شده، در این مخلوط درون تفلون اتوکلاو ۱۰۰ cc قرار گرفت. در این مرحله اتوکلاو به مدت زمان ۲۴ ساعت و در دمای ۵۰°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 ۵۰°C و یک ساعت در دمای ۲۰۰°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 ابروژل سیلیکای آب گریز تهیه شد [۱۷]. یکی از نمونه های آب گریز پس از تهیه به مدت ۲ ساعت در کوره در دمای ۴۰۰°C قرار می گیرد تا نمونه آب دوست شود [۵]. نمونه های آب گریز و آب دوست به ترتیب A و B نامگذاری شده اند.

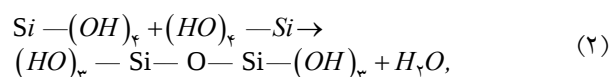
۳. سازوکار انجام آزمایش

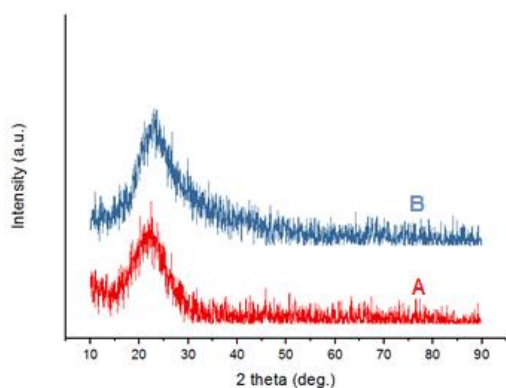
با اضافه شدن اسید سیتریک به محلول سدیم سیلیکات، سدیم سیلیکات با آب واکنش داده و اسید سیلیسیک تشکیل می شود. اسید سیلیسیک چگالیده شده و ذرات کوچک سیلیکا تشکیل می شوند. به تدریج ذرات سیلیکا به هم چسبیده و شاخه های سیلیکا تشکیل می شوند. این شاخه ها نیز یک شبکه تشکیل می دهند و در نتیجه هیدروژل سیلیکا تهیه می شود. واکنش های (۱) و (۲) واکنش های هیدرولیز و چگالش را در این مرحله نشان می دهد [۴].

واکنش هیدرولیز:



واکنش چگالش:





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

FESEM 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 ایزوثرم 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 پراکندگی 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 ۴۰۰°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 ۴۰۰°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 ایزوثرم با استفاده از FESEM مورد مطالعه قرار گرفته است. تصاویر

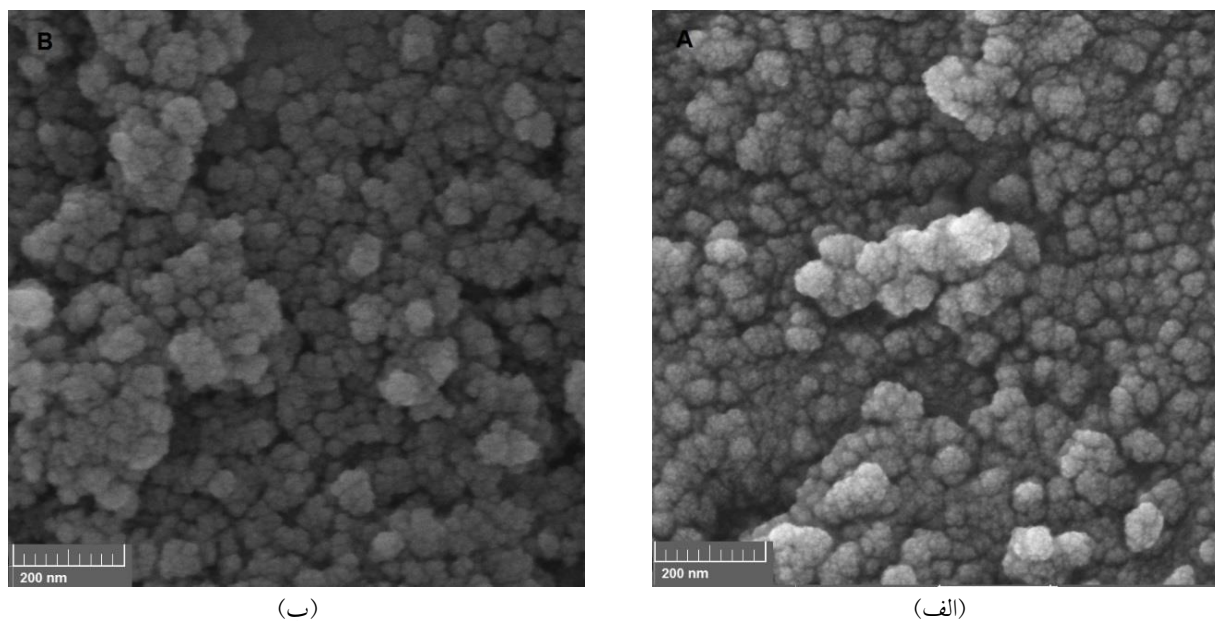
۱. X-ray diffraction

۲. Field emission scanning electron microscope

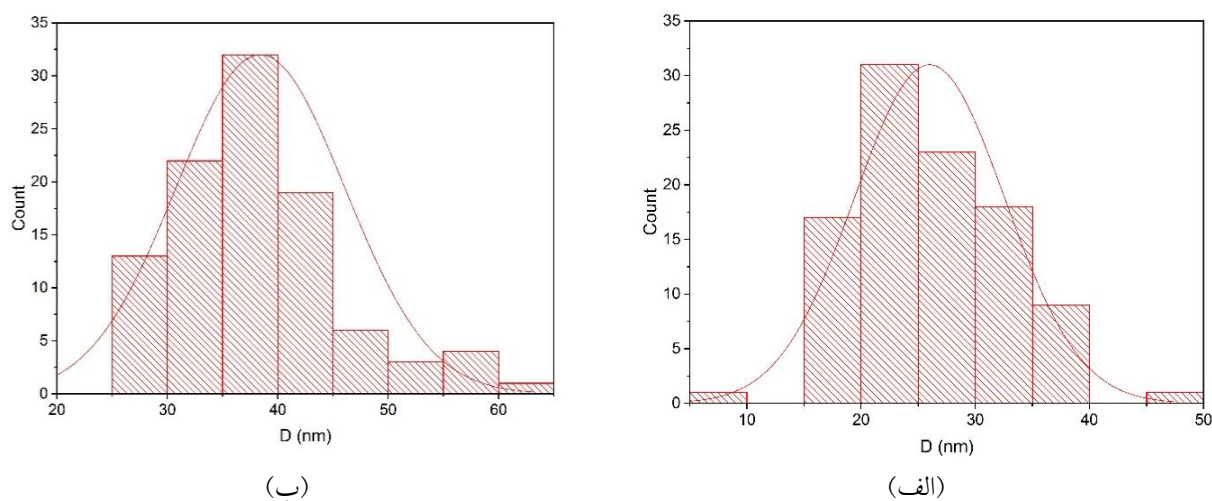
۳. Brunauer-Emmett-Teller

۴. Fourier-transform infrared

۵. Energy-dispersive X-ray



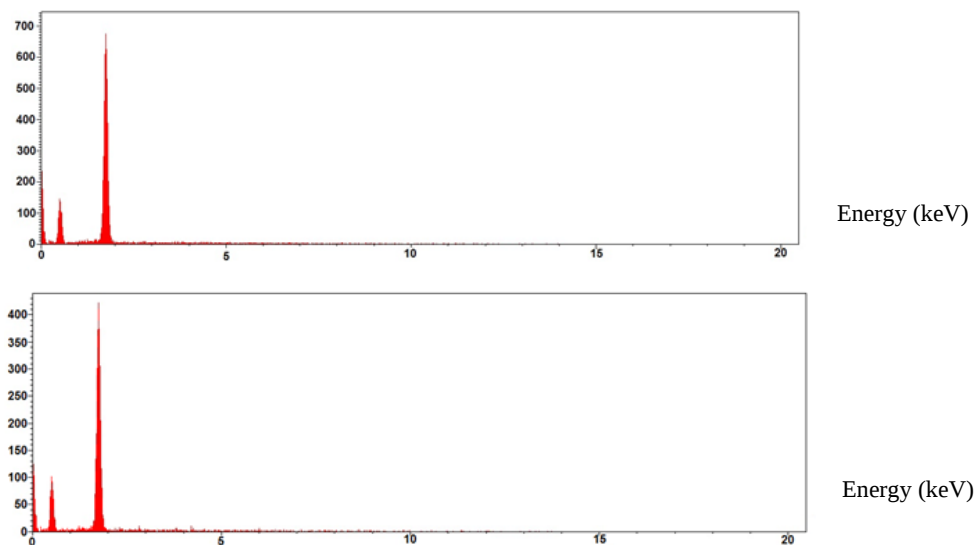
شکل ۲. تصاویر FESEM در مقیاس ۲۰۰ nm، (الف) نمونه آب‌گریز و (ب) نمونه آب‌دوست.



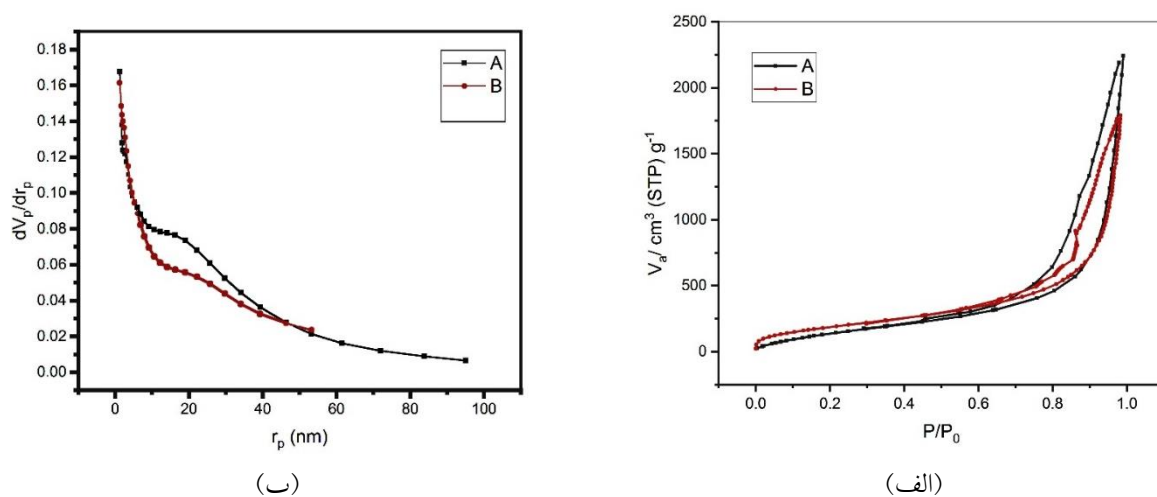
شکل ۳. نمودار توزیع اندازه ذرات با استفاده از دیجیمایزر، (الف) نمونه آب‌گریز و (ب) نمونه آب‌دوست.

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.



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

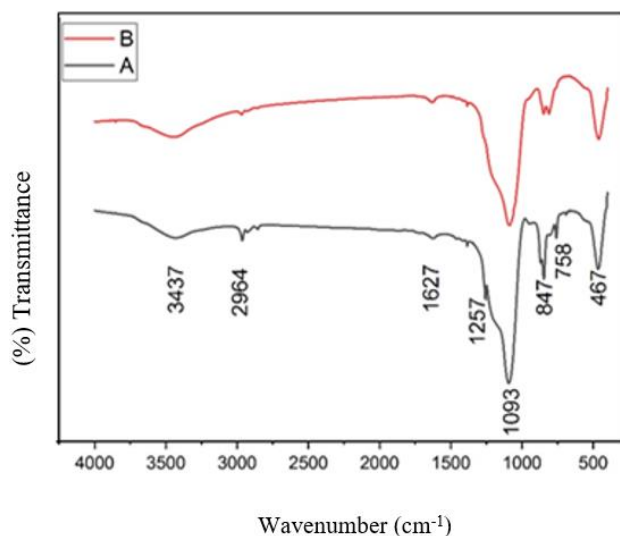
جدول ۲. داده‌های حاصل از آنالیز جذب و واجذب گاز نیتروژن نمونه‌های A و B.

نمونه	مساحت سطح ویژه BET (m^2/g)	قطر میانگین حفره‌ها (nm)	حجم کلی حفره‌ها (g/cm^3) در نقطه $P/P_0 = 0.983$
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 فوری دو نمونه A و B.

جایگزین می شود که گروه های متیل باعث آب گریزی نمونه می شوند.

۶.۴. اندازه گیری زاویه تماس

زاویه تماس قطره آب برای هر دو نمونه آب دوست و آب گریز نشان داده شده است. همان طور که از شکل های ۷. الف و ب مشاهده می شود نمونه آب دوست زاویه تماس ۵۱ درجه و نمونه آب گریز زاویه تماس ۱۷۰ درجه دارد.

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

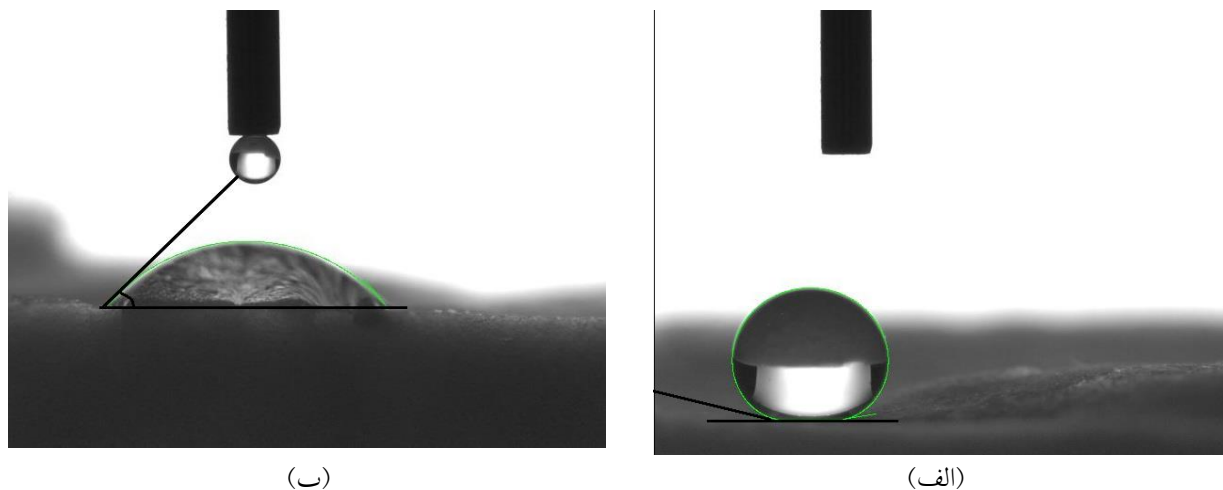
۵. نتیجه گیری

در این تحقیق دو نمونه آب دوست و فوق آب گریز 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 آب گریز نسبت به نمونه آب دوست قله پهن تری دارد. می توان نتیجه گرفت که نمونه آب دوست نظم ساختاری بهتری دارد. تصاویر FESEM نشان داد که هر دو نمونه ساختار متخلخل و اسفنجی

نانومتر است. نتایج نشان می دهند که با آب دوست شدن نمونه ابروژل سیلیکا، ساختار حفره ها تا حدودی فرو می ریزد. همان طور که جدول ۲ نشان می دهد قطر میانگین حفره ها و حجم کلی حفره ها برای نمونه آب دوست کمتر از نمونه آب گریز است.

۵.۴. نتایج طیف سنجی فرو قرمز تبدیل فوری

نتایج FTIR دو نمونه آب دوست و آب گریز 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 آب دوست و آب گریز بدون تغییر مانده است. با کلسینه کردن نمونه، می توان نتیجه گرفت که پیوندهای اصلی آن بدون تغییر باقی می ماند. دو قله جذب در 1627 و 3437 cm^{-1} مربوط به پیوند O-H است و مشاهده می شود که در نمونه آب گریز این قله ها نسبت به نمونه آب دوست ضعیف تر بوده و قله های موجود در 847 و 2964 cm^{-1} که مربوط به پیوند CH_3 است در نمونه آب گریز قوی تر از نمونه آب دوست است. در نمونه آب گریز دو قله جذب در 758 و 1257 cm^{-1} وجود دارد که به ترتیب مربوط به $\text{Si}-\text{CH}_3$ و $\text{Si}-\text{C}$ است [۲۰]. از نتایج حاصل از FTIR می توان نتیجه گرفت که با اصلاح سطحی نمونه، گروه های هیدروکسیل با گروه های 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 $P/P_0 = 0.983$	
۱۴۸	۷۱۹	۱۳۰۴	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 به‌شماره 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 Scii 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.*