



Research Article



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2051728.1986



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

## Investigation of the Structure and Performance of PVC/SiO<sub>2</sub> Nanocomposite Hollow Fibers as a Membrane Contactor

Farzad Javadi<sup>1</sup>, Behzad Mohammadi Alasti\*<sup>1</sup>, Mahsa Amirabedi<sup>3</sup>, Saba Ravashiyan<sup>3</sup>, Parya Amirabedi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Bonab Branch, Islamic Azad University, Bonab, Iran

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Ajabshir Branch, Islamic Azad University, Ajabshir, Iran

<sup>3</sup> Department of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>4</sup> Department of Chemical Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

Received: 26 Jan 2025 Accepted: 25 Apr 2025

### Abstract

Membrane contactors offer a promising solution for acidic gas treatment; however, the wettability of polymeric membranes by liquid absorbents increases mass transfer resistance and lowers gas absorption efficiency. This study developed hydrophobic polyvinyl chloride (PVC) membranes incorporating silica nanoparticles at varying concentrations (0, 1, 1.5, and 2 wt.%). The membranes were characterized using XRD, SEM, TEM, AFM, contact angle measurements, tensile strength, and CO<sub>2</sub> absorption analysis. SEM images confirmed the presence of nanoparticles, and results indicated that 1.5 wt.% nanoparticle addition raised the contact angle from 77° to 94°, thereby reducing wettability. Additionally, tensile strength improved by approximately 10 MPa with nanoparticle inclusion. CO<sub>2</sub> absorption tests demonstrated consistent gas flux in membranes with 1.5 wt.% nanoparticles over 20 days, whereas pristine membranes showed a decline. These findings underscore the potential of nanocomposite membranes to enhance gas absorption and durability in acidic gas treatment processes.

**Keyword:** Polyvinyl Chloride, Nanocomposite, Hydrophobic Nanoparticles, Membrane Contactor, CO<sub>2</sub>.

\* behzad.alasti@gmail.com

### Please Cite This Article Using:

Javadi, F., Mohammadi Alasti, B., Amirabedi, M., Ravashiyan, S., Amirabedi, P., "Investigation of the Structure and Performance of PVC/SiO<sub>2</sub> Nanocomposite Hollow Fibers as a Membrane Contactor", Journal of Farayandno – Vol. 20 – No. 89, pp. 19-38, In Persian, (2025).



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2051728.1986



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

## مطالعه ساختار و عملکرد الیاف توخالی نانوکامپوزیتی PVC/SiO<sub>2</sub> به عنوان تماس‌دهنده غشایی

فرزاد جوادی<sup>1</sup>، بهزاد محمدی الستی<sup>1\*</sup>، مهسا امیرعابدی<sup>2</sup>، صبا روشیان<sup>3</sup>، پریا امیرعابدی<sup>4</sup>

<sup>1</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، واحد بناب، دانشگاه آزاد اسلامی، بناب، ایران

<sup>2</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، واحد عجب شیر، دانشگاه آزاد اسلامی، عجب شیر، ایران

<sup>3</sup> دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>4</sup> دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء (ص)، بهبهان، ایران

دریافت: 1403/11/07 پذیرش: 1404/02/05

### چکیده

استفاده از تماس‌دهنده‌های غشایی در تصفیه گازهای اسیدی از پیشرفت‌های مهم فرآیندهای مهندسی و محیط‌زیستی است. ترشوندگی غشاهای پلیمری توسط جاذب‌های مایع، مهم‌ترین مانع در توسعه این فناوری محسوب می‌شود، زیرا مقاومت انتقال جرم را افزایش داده و جذب گاز را کاهش می‌دهد. در این پژوهش، غشاهای پلی‌وینیل‌کلراید آبگریز حاوی نانوذرات آبگریز سیلیکا با درصدهای وزنی مختلف (0، 1، 1/5 و 2) ساخته شدند. آزمون‌های XRD، SEM، TEM، AFM، زاویه تماس، استحکام کششی و جذب CO<sub>2</sub> برای ارزیابی غشاها انجام گرفت. تصاویر SEM وجود نانوذرات را تأیید نمود و طبق نتایج به دست آمده، افزودن نانوذرات به میزان 1/5% زاویه تماس را از 77° به 94° افزایش داد. همچنین، حضور نانوذرات استحکام کششی را حدود 10 MPa بهبود بخشید. عملکرد غشاها در جذب CO<sub>2</sub> نیز نشان داد که شار گاز در غشاهای نانوکامپوزیتی با 1/5% نانوذره پس از 20 روز ثابت ماند، درحالی‌که شار غشاهای خالص کاهش یافت.

**کلمات کلیدی:** پلی‌وینیل‌کلراید، نانوکامپوزیت، نانوذرات آبگریز، تماس‌دهنده‌های غشایی، کربن دی‌اکسید.

\* behzad.alasti@gmail.com

## 1- مقدمه

در دهه‌های اخیر، انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه دی‌اکسید کربن ( $CO_2$ )، به یکی از چالش‌های بزرگ زیست‌محیطی جهان تبدیل شده است. افزایش سطح  $CO_2$  در اتمسفر به‌طور مستقیم با تغییرات اقلیمی و گرمایش زمین ارتباط دارد. طبق گزارش‌های اخیر، جهان به‌ویژه کشورهای نظیر ایران به دلیل فعالیت‌های صنعتی و مصرف گسترده سوخت‌های فسیلی، سهم زیادی در تولید این گاز داشته‌اند. این گاز علاوه بر تأثیرات مخرب زیست‌محیطی، باعث اسیدی شدن آب دریاها و اقیانوس‌ها نیز می‌شود [4-1]. به همین دلیل، یافتن راهکارهای مؤثر و اقتصادی برای جداسازی و جذب  $CO_2$  از محیط ضروری است. در مواجهه با این چالش‌ها، یکی از راهکارهای کارآمد، استفاده از فناوری‌های نوین برای جداسازی و جذب  $CO_2$  از جریان‌های گازی است. تاکنون روش‌های متداولی مانند برج‌های جذب آمین برای این منظور استفاده شده‌اند، اما این روش‌ها با مشکلات متعددی مانند غیراقتصادی بودن، ماندگی، و کاهش راندمان در مواجهه با جریان‌های گازی مختلف مواجه هستند [5-7]. از سویی دیگر، فناوری‌های غشایی به‌عنوان جایگزینی مناسب برای این روش‌ها مطرح شده‌اند. در میان این فناوری‌ها، استفاده از تماس‌دهنده‌های غشایی به‌طور خاص مورد توجه قرار گرفته است، زیرا این تجهیزات امکان انتقال جرم مؤثر بین فازهای مایع و گاز را بدون اختلاط فراهم می‌آورند. تماس‌دهنده‌های غشایی با داشتن سطح ویژه بالا و قابلیت انعطاف‌پذیری عملیاتی، می‌توانند به طرز قابل توجهی مشکلاتی همچون طغیان و ماندگی را کاهش دهند، در حالی که مصرف انرژی کمتری نسبت به روش‌های سنتی دارند [8-10]. با این حال، ترشوندگی غشاهای پلیمری یکی از چالش‌های اساسی در این روش است که منجر به کاهش کارایی جذب گاز و افزایش مقاومت انتقال جرم می‌شود [11-14]. در سال‌های اخیر، تحقیقاتی برای بهبود خواص آبگریزی غشاها و کاهش مشکل ترشوندگی انجام شده که شامل استفاده از مواد نانوکامپوزیتی و پوشش‌دهی‌های پیشرفته است.

مطالعات نشان می‌دهد که محلول‌های جاذب به‌ویژه محلول‌های آبی ترکیبات آلی نظیر آلکانول آمین‌ها، می‌توانند درون حفرات غشاهای پلیمری نفوذ کنند که در اثر آن، حفرات غشا به مرور زمان در طول عملیات بلندمدت دچار پدیده ترشوندگی خواهند شد. ترشوندگی جزئی، مقاومت انتقال جرم کلی را افزایش داده و اثر منفی بر روی پایداری غشا در طول عملیات بلندمدت خواهد داشت. بنابراین با رفع مشکل ترشوندگی تماس‌دهنده‌های غشایی گاز-مایع، قابلیت عملکردی آن‌ها بهبود زیادی خواهد یافت [15-18]. تحقیقات بسیاری برای کاهش مشکل ترشوندگی غشاهای پلیمری در تماس‌دهنده‌های غشایی انجام شده است که در این میان فوسی-کوفال<sup>1</sup> و همکاران [19] غشای نانوکامپوزیتی آبگریزی پلی‌وینیلیدین‌فلوراید/کربنات کلسیم ( $PVDF/CaCO_3$ ) را به روش جدایش فازی برای جذب  $CO_2$  در تماس‌دهنده غشایی گاز-مایع تهیه کردند. نتایج حاصل از جذب  $CO_2$  نشان داد که شار جذب به دلیل مقاومت ترشوندگی بالای غشای نانوکامپوزیتی در طول مدت حدود 210 ساعت ثابت مانده است. طلاوری و همکاران [20] غشای کامپوزیتی پلی‌وینیلیدین‌فلوراید/کربن نانوتیوب چنددیواره<sup>3</sup> ( $PVDF/MWCNT$ ) را برای استفاده در تماس‌دهنده‌های غشایی تهیه کردند. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از بهبود زاویه تماس غشاهای کامپوزیتی در مقایسه

<sup>1</sup> Fosi-Kofal

<sup>2</sup> Polyvinylidene fluoride

<sup>3</sup> Multi-walled carbon nanotubes

با غشای خالص بود. همچنین امیرعابدی و همکاران [21] غشای نانوکامپوزیتی پلی پروپیلنی حاوی نانوذرات سیلیکای پیوندزنی شده با گروه عاملی متیل را جهت فرایند دفع CO<sub>2</sub> در تماس دهنده های غشایی تهیه نمودند. نتایج به دست آمده حاکی از افزایش پایداری شیمیایی غشاهای نانوکامپوزیتی در مقایسه با غشای خالص بود.

غائی و همکاران [22] غشاهای نانوکامپوزیتی تهیه شده از PVDF و نانوذرات سیلیکایی اصلاح شده با عامل وینیل را در یک سامانه تماس دهنده غشایی جهت جداسازی گاز CO<sub>2</sub> مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که میزان جذب CO<sub>2</sub> به واسطه افزایش خاصیت آگریزی غشاهای نانوکامپوزیت در مقایسه با غشاهای خالص افزایش یافت. رسل<sup>4</sup> و همکاران [23] نانوذرات سیلیکای اصلاح شده با هگزامتیل دیسیلان<sup>5</sup> (HMDS)، دی متیل دی کلروسیلان<sup>6</sup> (DMDCS) و پلی دی متیل سیلوکسان<sup>7</sup> (PDMS) را برای ساخت غشاهای نانوکامپوزیتی PVDF برای جذب CO<sub>2</sub> استفاده کردند. نتایج نشان داد که عملکرد جداسازی و مقاومت در برابر ترشوندگی غشاهای نانوکامپوزیت در مقایسه با غشای خالص بالا بود.

با توجه به اینکه غشاهای میکرو متخلخل به عنوان یک عنصری کلیدی در تماس دهنده های غشایی عمل می کنند، انتخاب ماده پلیمری مناسب برای ساخت غشا و همچنین اصلاح خاصیت آگریزی غشاهای حاصل، به عنوان اولین و اساسی ترین گام در بهبود عملکرد تماس دهنده های غشایی مطرح است. پلیمرهای زیادی جهت فرایند تصفیه گاز با استفاده از تماس دهنده های غشایی مورد استفاده قرار می گیرند که در این میان پلی وینیل کلراید (PVC) به دلیل انعطاف پذیری مناسب، پایداری حرارتی، شیمیایی و مکانیکی مناسب، قیمت پایین و قابلیت تولید انبوه در کشور، توجه زیادی را در سال های اخیر به خود اختصاص داده است. فشندی و همکاران [24] غشاهای الیاف توخالی حاصل از سامانه PVC و حلال 1-متیل-2-پیرولیدون (NMP) جهت جذب CO<sub>2</sub> با استفاده از تماس دهنده های غشایی گاز-مایع به کار برده و اثر سرعت رسیدن را بر ساختار و عملکرد غشاها مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که غشاهای تولید شده علاوه بر قیمت پایین، عملکرد خوبی در مقایسه با سایر غشاهای آگریزی داشتند. در پژوهشی دیگر هاشمی فرد و همکاران [25] غشای PVC را برای استفاده در فرایند آب زدایی از گاز تولید نمودند. به همین منظور، آن ها سطح غشاها را با استفاده از در حضور CaCO<sub>3</sub> اصلاح نموده و سپس اثر پارامترهای عملیاتی را بر روی عملکرد غشاهای تولید شده بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که غشاهای اصلاح شده دارای پایداری عملیاتی بلندمدتی در مقایسه با غشاهای خالص بود. بررسی ها نشان می دهد که علی رغم اهمیت زیاد PVC در تولید تماس دهنده های غشایی به منظور حذف CO<sub>2</sub>، مطالعات بسیار کمی در رابطه با این نوع غشاها انجام شده است. از این رو در این پژوهش، غشاهای الیاف توخالی PVC به دلیل خواص مناسب حرارتی، مکانیکی و شیمیایی به عنوان بستر اصلی انتخاب شد. به منظور بهبود عملکرد این غشاها در جذب CO<sub>2</sub> و افزایش پایداری در برابر ترشوندگی، از نانوذرات آگریزی سیلیکا استفاده شده است. هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر درصد های مختلف نانوذرات سیلیکا بر خواص ساختاری، مکانیکی و عملکردی غشاها و نیز بهبود خواص آگریزی در سیستم تماس دهنده غشایی است که توسط آزمون های مختلف نظیر پراش اشعه ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM)، اندازه گیری

<sup>4</sup> Rosli

<sup>5</sup> Hexamethyldisilazane

<sup>6</sup> Dimethyldichlorosilane

<sup>7</sup> Polydimethylsiloxane

زاویه تماس و استحکام کششی مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین، تلاش شده تا با بررسی پارامترهای مختلف عملیاتی و ساختاری، بهینه‌ترین شرایط برای ساخت غشاهای الیاف توخالی نانوکامپوزیتی با کارایی بالا شناسایی شود.

## 2- تجربی

### 1-2- مواد

PVC (وزن مخصوص:  $14000 \text{ g/cm}^3$ ) به‌عنوان ماده به‌کار رفته در ساخت غشا، از شرکت پتروشیمی غدیر تهیه شد. دی‌متیل‌فرمامید (DMF) (وزن مولکولی:  $73/09 \text{ g/mol}$ ، چگالی:  $0/944 \text{ g/cm}^3$ ) به‌عنوان حلال و دی‌اتانول‌آمین (DEA) (وزن مولکولی:  $105/14 \text{ g/mol}$ ، چگالی:  $1/097 \text{ g/cm}^3$ ) به‌عنوان جاذب شیمیایی از شرکت مرک خریداری شدند. همچنین نانوذرات آبگریز سیلیکا ( $\text{SiO}_2$ ) (ابعاد:  $20 \text{ nm}$ ، چگالی:  $200 \text{ g/l}$  و خلوص:  $99/5\%$ ) ساخت آلمان از شرکت آرتین تجارت اکسیر تهیه شد.

### 2-2- ساخت غشای تخت

برای تهیه نمونه غشاهای تخت، ابتدا مقادیر موردنیاز از PVC، DMF و  $\text{SiO}_2$  توزین شد. در ادامه، PVC توزین‌شده با بخشی از حلال (حدود 75% از آن) درون یک ظرف شیشه‌ای توسط مگنت به مدت 24 ساعت هم زده شد تا یک محلول یکنواخت به‌دست آید. لازم به ذکر است که ظرف حاوی محلول در یک حمام روغن با دمای  $50^\circ\text{C}$  قرار داده شد تا سرعت همگن‌سازی افزایش یابد. پس از این مرحله، نانوذرات سیلیکای آبگریز درون باقی‌مانده حلال ریخته شده و به مدت یک ساعت توسط امواج فراصوت در آن پخش شدند. در نهایت، امولسیون به دست آمده به‌صورت قطره‌قطره به محلول حاوی PVC اضافه شد و به مدت یک ساعت در دمای محیط قرار گرفت تا حباب‌های هوا به صورت کامل از آن خارج شود. در ادامه برای تولید غشاهای تخت، محلول مورد نظر بر روی صفحه شیشه‌ای ریخته شده و توسط تیغه مخصوصی با ضخامت مشخص روی آن ریخته‌گری شد. برای انجام فرایند جدایش فازی، محلول ریخته‌گری شده وارد حمام حاوی آب با دمای  $25^\circ\text{C}$  انعقاد گردید. به‌منظور خارج شدن حلال باقی‌مانده، غشاهای تهیه شده به مدت 4 شبانه‌روز درون حمام آب قرار گرفتند و هر روز آب آن‌ها تعویض شد. در انتها، غشاهای آماده شده در دمای محیط خشک شدند. لازم به ذکر است که نسبت وزنی جامد (نانوذرات و پلیمر) به حلال در تمام غشاها برابر با 17% در نظر گرفته شد و نسبت وزنی نانوذرات به پلیمر نیز به صورت 0، 1،  $1/5$  و 2 درصد تغییر یافت.

### 3-2- ساخت غشای الیاف توخالی

برای انجام آزمون جذب  $\text{CO}_2$  در تماس‌دهنده‌های غشایی، نیاز بود تا غشاهای ساخته شده شکل الیاف توخالی داشته باشند، بنابراین پس از ساخت غشاهای تخت و انجام آنالیزهای مورد نیاز، غشاهای بهینه از نظر مقاومت کششی و اندازه زاویه تماس از میان نمونه غشاهای تخت انتخاب شده و غشای الیاف توخالی با شرایط غشای تخت بهینه ساخته شد.

برای ساخت غشاهای الیاف توخالی، در ابتدا محلول پلیمری همگن با شرایط بهینه، مطابق با روند شرح داده شده برای غشای تخت تهیه شد. محلول به‌دست آمده در حدود یک ساعت در دمای محیط قرار گرفت تا گازگیری کامل از آن صورت گیرد. سپس، درون مخزن دستگاه ساخت غشا ریخته شده و به مدت یک ساعت فرصت داده شد تا عمل

هواگیری تکمیل گردد و در نهایت عملیات ریسندگی غشاهای الیاف توخالی انجام شد. غشاهای الیاف توخالی ریسیده- شده به طور مستقیم وارد حمام انعقاد آب شدند تا فرآیند جدایش فازی انجام گیرد. به منظور خارج شدن حلال باقی مانده، غشاهای تهیه شده به مدت چهار شبانه روز در حمام آب قرار گرفتند و هر روز آب آنها تعویض شد. غشاهای آماده شده در دمای محیط خشک شدند. مشخصه ریسندگی غشاهای الیاف توخالی در جدول 1 آورده شده است.

جدول 1- مشخصه ریسندگی غشاهای الیاف توخالی

مقدار	مشخصه ریسندگی
0/5	قطر داخلی رشته ساز (mm)
0/8	قطر خارجی رشته ساز (mm)
آب شیر	منعقدکننده داخلی
آب شیر	حمام انعقاد خارجی
2	نرخ تغذیه محلول ریسندگی (ml/min)
1/3	نرخ تغذیه منعقدکننده داخلی (ml/min)
0	فاصله هوایی (cm)
25	دمای منعقدکننده داخلی (°C)
25	دمای حمام انعقاد خارجی (°C)
سقوط آزاد	سرعت برداشت (ml/min)

#### 2-4- آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

ویژگی‌های ریزساختاری غشاهای ساخته شده با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM، مدل ZEISS EVO 18، آلمان) و با ولتاژ شتاب‌دهنده 20 kV تعیین شد. برای این منظور، ابتدا نمونه غشاهای تخت در نیتروژن مایع شکسته شده و سپس با لایه نازکی از طلا پوشش داده شدند تا در نهایت تصاویر SEM از مقطع و سطح غشاهای مختلف تهیه گردد.

#### 2-5- پراش اشعه X (XRD)

برای تعیین تأثیر حضور نانوذرات  $\text{SiO}_2$  بر روی ساختار غشاها از آنالیز پراش پرتو X استفاده شد. آنالیز ساختاری غشاهای خالص و نانوکامپوزیت با استفاده از دستگاه پراش اشعه X (XRD، Bruker، D8 Advance، آلمان) با عملکرد تابش  $\text{CuK}\alpha$  در 40 kV و کیلوولت و 40 mA در محدوده  $0-80^\circ (2\theta)$  و با نرخ  $0/02^\circ \text{ s}^{-1}$  انجام شد.

#### 2-6- آزمون زاویه تماس

برای تعیین میزان ترشوندگی غشاهای خالص و نانوکامپوزیت، آزمون اندازه‌گیری زاویه تماس به کار گرفته شد. به همین منظور از دستگاه گونیومتر زاویه تماس (مدل Jikan، CAG-20، ایران) استفاده گردید. در این آزمون، نمونه‌های غشایی تخت با فرمولاسیون مشابه با غشاهای الیاف توخالی ساخته شد و زاویه تماس آنها اندازه‌گیری گردید [26]. برای افزایش دقت نتایج به دست آمده و کاهش خطا، آزمون برای هر نمونه سه بار تکرار شد و در نهایت میانگین آنها گزارش گردید.

## 7-2- آزمون استحکام مکانیکی

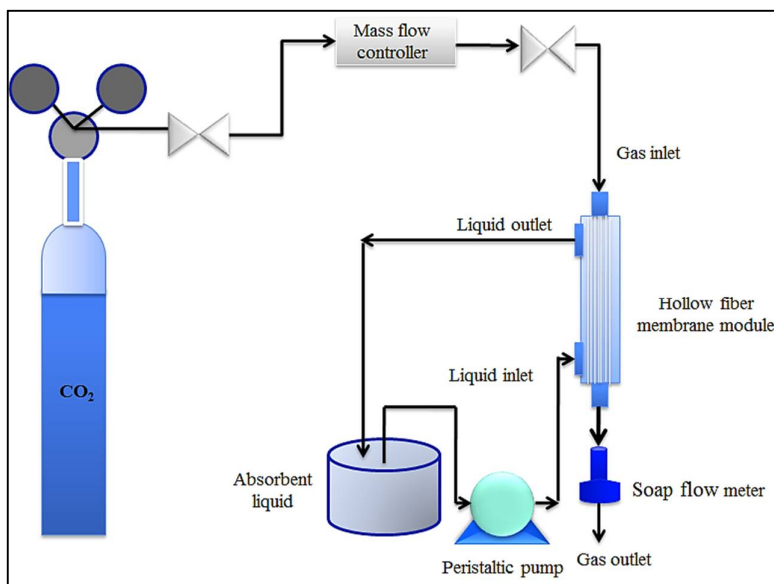
میزان استحکام مکانیکی غشاهای خالص و نانوکامپوزیتی توسط دستگاه کشش (ماشین کشش یونیورسال، مدل STM-5، ظرفیت 5 kN، سنتام) به دست آمد. هر نمونه با طول 10 سانتی متر بریده شد. طول چهار سانتی متر از آن‌ها به عنوان طول مؤثر در نظر گرفته شد و سه سانتی متر از هر طرف برای محکم کردن دو طرف غشا در فک‌های دستگاه، مورد استفاده قرار گرفت. به منظور تکمیل مشخصات مربوط به هر نمونه در قسمت نرم افزار دستگاه، ضخامت آن‌ها توسط ریزسنج به دست آمد. سرعت کشیده شدن در همه موارد (mm/s) 10 بود و آزمایش در مورد هر کدام از نمونه‌ها سه بار تکرار شد و میانگین نتایج گزارش گردید.

## 8-2- میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)

مورفولوژی و زبری سطح غشاها با استفاده از دستگاه AFM (مدل Nanosurf Mobile S، سوئیس) مورد مطالعه قرار گرفت. نمونه با استفاده از یک نوار دو طرفه به یک اسلاید شیشه‌ای متصل شد و سپس سطح توسط یک پروب نیتريد سیلیکون در هوا در شرایط محیطی اسکن شد. اسکن با سرعت  $5 \mu\text{m/s}$  (1 هرتز)، نیروی  $0/15 \text{ nN}$  و اندازه اسکن  $1000 \text{ nm}$  انجام شد.

## 9-2- آزمون جذب $\text{CO}_2$ خالص

به منظور ارزیابی عملکردی غشاهای خالص و نانوکامپوزیتی، آزمون جذب  $\text{CO}_2$  خالص در یک ماژول تماس دهنده غشایی انجام شد. در این آزمون، از محلول آبی حاوی DEA 30 wt.% به عنوان جاذب مایع استفاده گردید. در طول آزمون، مایع جاذب از بخش پوسته و گاز  $\text{CO}_2$  از بخش داخلی غشاها به صورت ناهمسو جریان یافتند. لازم به ذکر است که برای کنترل جریان جرمی مایع جاذب و پمپ کردن آن به داخل پوسته، از پمپ پریستالتیک استفاده شد. در شکل 1 شماتیک فرایند جذب گاز  $\text{CO}_2$  در یک سامانه تماس دهنده غشایی نشان داده شده است.



شکل 1- شماتیک فرایند جذب گاز  $\text{CO}_2$  در یک سامانه تماس دهنده غشایی

همچنین گاز خوراک از یک مخزن حاوی گاز فشرده شده  $\text{CO}_2$  خالص به داخل غشاهای الیاف توخالی تزریق گردید. در این آزمون، اثر سرعت مایع، بر روی عملکرد هریک از غشاهای خالص و نانوکامپوزیتی بررسی شد. همچنین جهت اطمینان از پایداری بلندمدت غشاهای تولید شده، آزمون جذب  $\text{CO}_2$  در طول مدت 20 روز و هر روز به مدت 2 ساعت انجام گرفت. در این میان، به منظور تعیین مقدار  $\text{CO}_2$  جذب شده در مایع خروجی، روش تیتراسیون به کار گرفته شد [27, 28]. مشخصات ماژول تماس دهنده غشایی در جدول 2 آورده شده است.

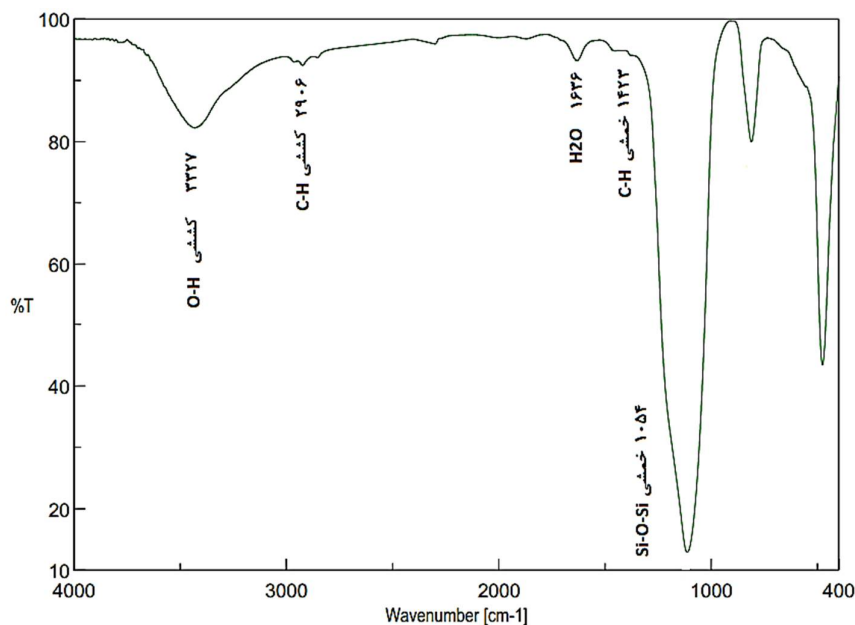
جدول 2- مشخصات ماژول تماس دهنده غشایی

پارامتر	مقدار
قطر خارجی الیاف (mm)	0/8
قطر داخلی الیاف (mm)	0/5
طول مؤثر الیاف (cm)	18
تعداد الیاف	5
قطر داخلی مدول (mm)	10
طول مدول (cm)	24
جنس ماژول	پلکسی گلاس

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- بررسی ویژگی‌های نانوذرات

شکل 2 طیف مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) نانوذرات آبگریز سیلیکا را نشان می‌دهد.

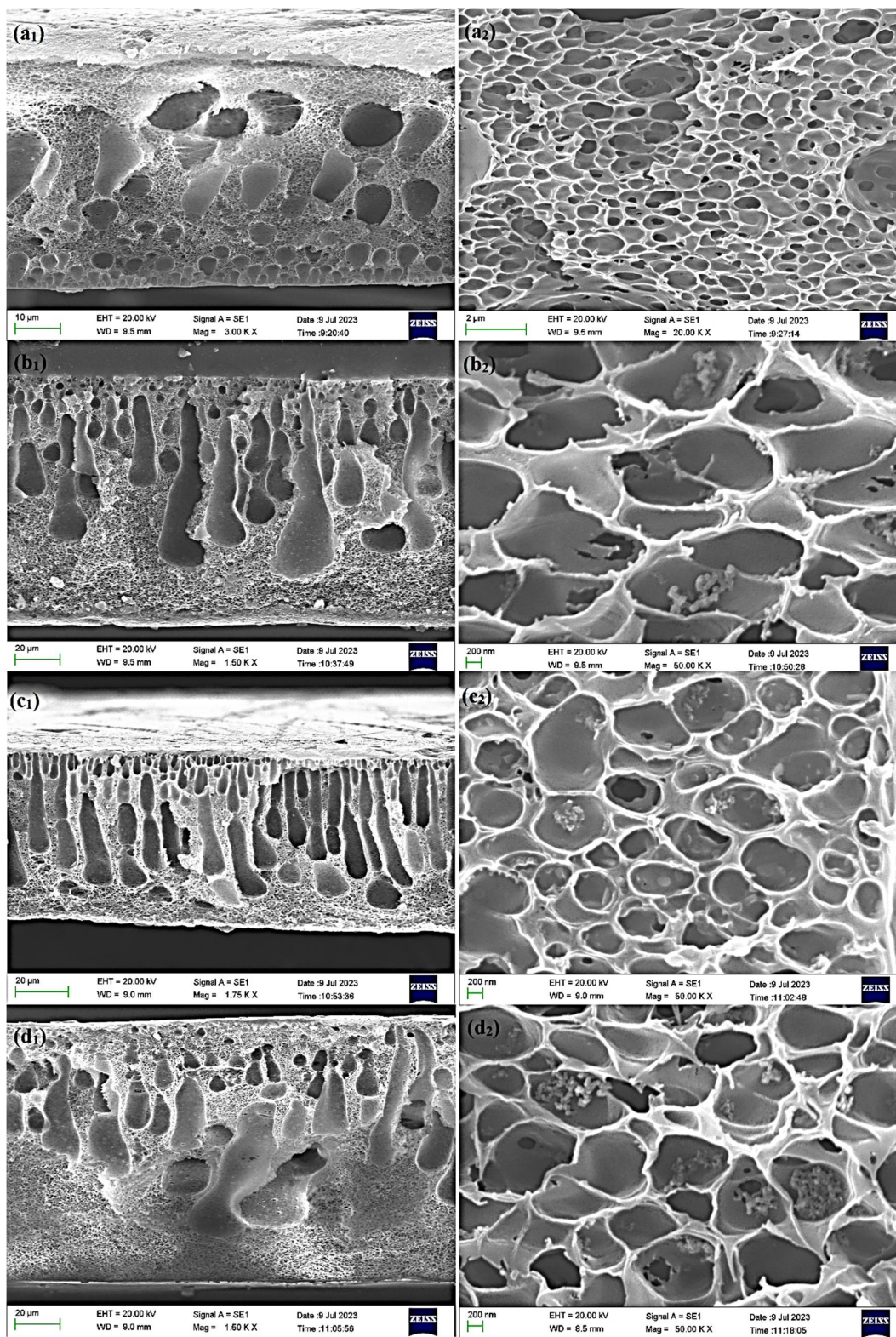


شکل 2- طیف FTIR نانوذرات آبگریز سیلیکا

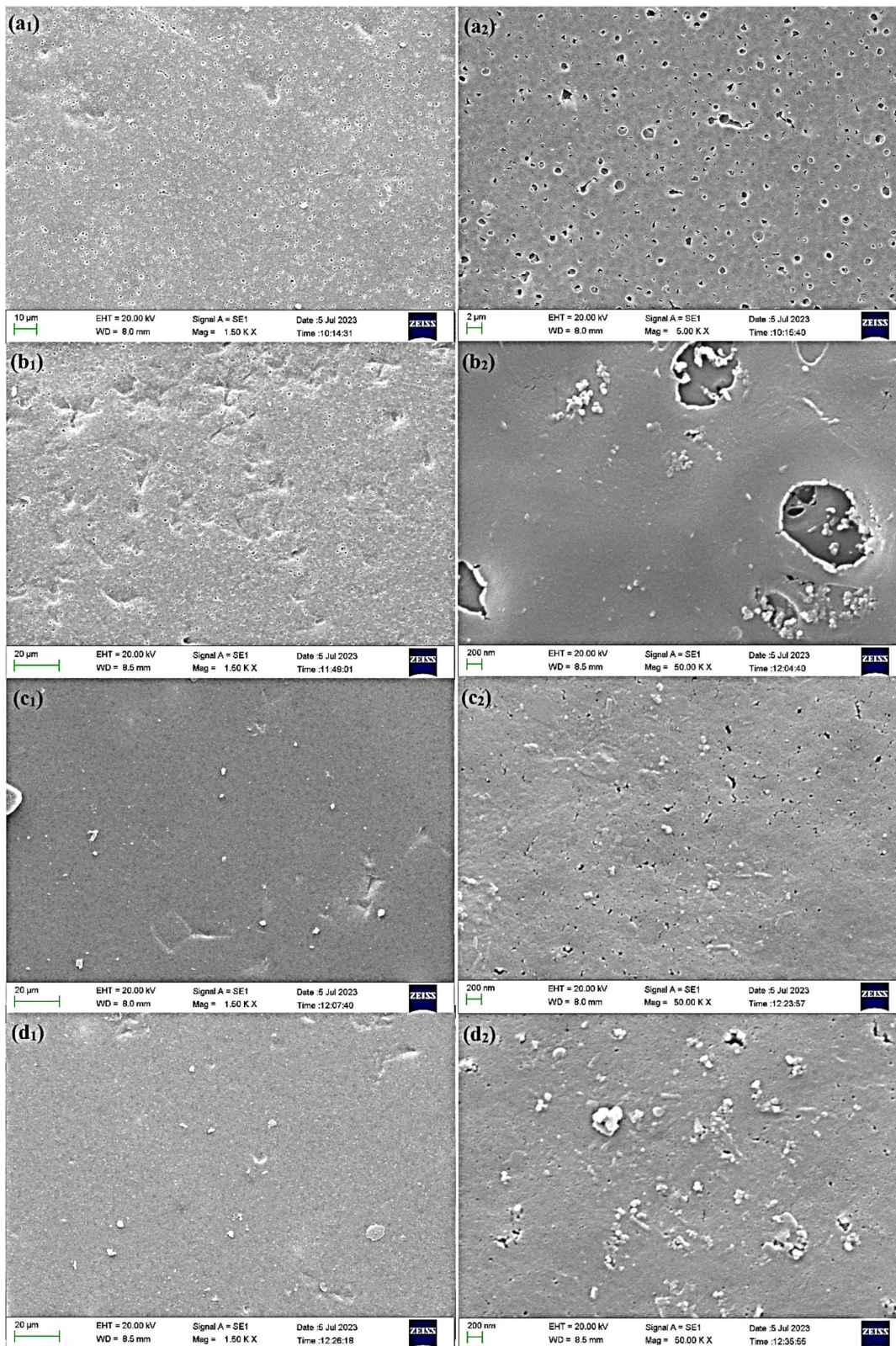
وجود پیک جذب گروه Si-O-Si در  $1054\text{ cm}^{-1}$  و C-H در  $2906\text{ cm}^{-1}$  بیانگر حضور گروه‌های آبگریز در ساختار نانوذرات سیلیکا می‌باشد.

### 3-2- بررسی ساختار غشاهای تخت خالص و نانوکامپوزیت PVC

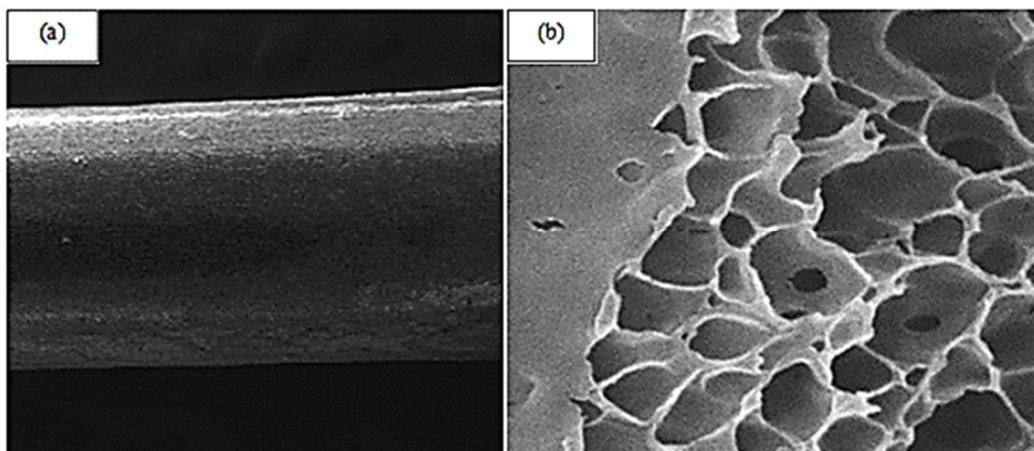
شکل 3 و 4 به ترتیب تصاویر FESEM مربوط به سطح مقطع و سطح رویی غشاهای تخت خالص و نانوکامپوزیتی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که تمامی غشاها دارای ترکیبی از ساختار سلولی و بزرگ حفره‌های انگشت‌مانند می‌باشند. علاوه بر این، این شکل وجود نانوذرات را بر روی سطح و ساختار داخلی غشاهای نانوکامپوزیتی را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که توزیع اندازه نانوذرات به‌طور تقریبی یکنواخت است و این امر مطلوب تلقی می‌شود. همانطور که از تصاویر سطحی غشاها مشخص است، افزودن نانوذرات بیشتر منجر به تجمع آنها در سطح غشا می‌شود. افزودن نانوذرات به محلول پلیمری باعث افزایش ابعاد بزرگ حفره و توقف شکل‌گیری ساختار اسفنج‌مانند در غشا می‌شود [29]. با افزایش نانوذرات در ساختار غشا، بزرگ حفره‌های انگشت‌مانند در سرتاسر ضخامت غشا کشیده شده‌اند. فرض بر این است که حضور بیشتر بزرگ حفره‌های انگشت‌مانند با اثر بازدارندگی و ممانعت نانوذرات در طول فرآیند جدایی فازی مرتبط است. با توجه به تنش بین‌سطحی میان پلیمر و نانوذرات، حفرات سطحی در نتیجه جمع‌شدگی فاز پلیمر طی فرآیند جدایش فازی تشکیل می‌شوند [30]. تغییر شکل حفرات غشاها با افزایش میزان نانوذرات به دلیل تفاوت در گرانشی محلول پلیمری و ناپایداری ترمودینامیکی آن است. با افزایش ناپایداری ترمودینامیکی محلول و کاهش گرانشی، فرآیند جدایی فازی سریع‌تر روی می‌دهد که منجر به افزایش بزرگ حفره‌های انگشت‌مانند می‌شود. لازم به ذکر است که برهمکنش ضعیف میان پلیمر و نانوذرات منجر به اختلال در پایداری ترمودینامیکی محلول می‌شود [19]. لازم به ذکر است که در شکل 5 تصاویر FESEM سطح رویی و سطح مقطع مربوط به غشای PVC الیاف توخالی خالص نشان داده شده است.



شکل 3- تصاویر FESEM سطح مقطع غشاهای PVC تخت حاوی مقادیر مختلف نانوذرات (a) 0%، (b) 0.1%، (c) 0.5% و (d) 2%



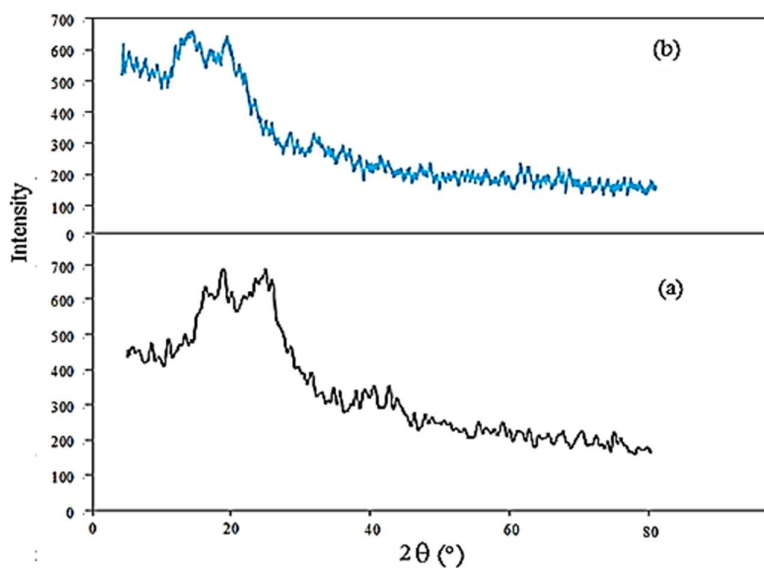
شکل 4- تصاویر FESEM سطح رویی غشاهای PVC تخت حاوی مقادیر مختلف نانوذرات (a) 0%، (b) 1%، (c) 1.5% و 2% (d)



شکل 5- تصاویر FESEM غشاهای PVC الیاف توخالی خالص (a) سطح رویی و (b) سطح مقطع

### 3-3- بررسی الگوی XRD غشاهای تخت

شکل 6 الگوی XRD غشای تخت خالص و نانوکامپوزیتی PVC حاوی 1/5 درصد وزنی از نانوذرات  $\text{SiO}_2$  را نشان می‌دهد. پیک پراش گسترده در محدوده  $2\theta = 10-40^\circ$  ( $17/7$ ،  $24/7$  و  $40/6$ ) مربوط به ساختار آمورف PVC است [31، 32]. علاوه بر این، پیک کوچک مشاهده شده در  $2\theta = 38^\circ$  نشان‌دهنده ساختار نیمه‌بلوری PVC است [33]. در غشاهای نانوکامپوزیتی، افزودن نانوذرات  $\text{SiO}_2$  تأثیر محسوسی بر الگوی XRD غشای PVC خالص نداشته است و این نشان می‌دهد که غشای اولیه با افزودن نانوذرات  $\text{SiO}_2$  به خوبی اصلاح شده و هیچ تغییر ساختاری در آن مشاهده نمی‌شود. لازم به ذکر است که تغییر در شدت پیک پراش فاز نیمه‌بلوری در غشای نانوکامپوزیت نسبت به غشای خالص را می‌توان به حضور نانوذره نسبت داد. حضور نانوذرات  $\text{SiO}_2$  در زمینه پلیمری به عنوان یک عامل هسته‌زا عمل کرده و زنجیره‌ها در اطراف این نانوذرات متبلور شدند.



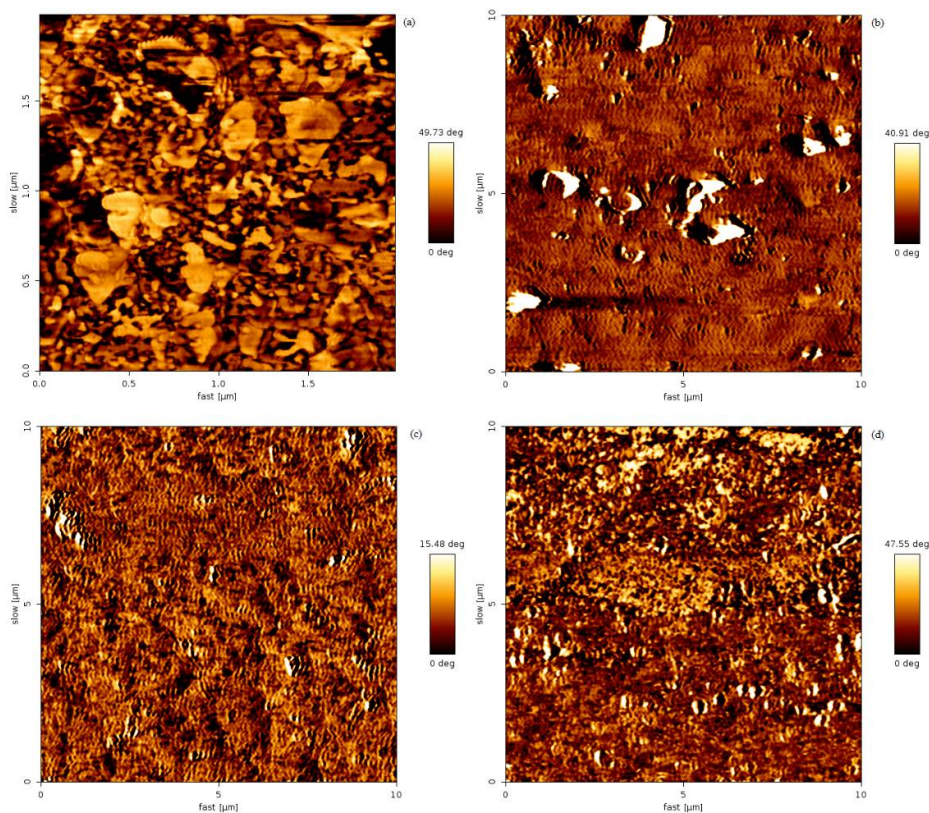
شکل 6- الگوهای XRD برای؛ (a) غشای PVC خالص و (b) غشای نانوکامپوزیتی حاوی 1/5 درصد وزنی از نانوذرات  $\text{SiO}_2$  آبگریز

### 3-4- آزمون زاویه تماس و میکروسکوپ نیروی اتمی

جدول 3 میانگین نتایج به دست آمده از اندازه گیری زاویه تماس غشاهای تخت خالص و نانوکامپوزیتی را نشان می دهد. باتوجه به داده های این جدول می توان دریافت که آبرگری غشاهای PVC با افزودن ترکیب درصد های مختلفی از نانوذرات  $\text{SiO}_2$  بهبود یافته است. یکی از دلایل اصلی افزایش زاویه تماس غشاهای نانوکامپوزیتی افزایش زبری آنها نسبت به غشای خالص PVC است که با استفاده از AFM مورد بررسی قرار گرفت (شکل 7). بر این اساس می توان اظهار داشت که وجود نانوذرات در سطح غشاهای نانوکامپوزیتی باعث افزایش آبرگری و زبری سطح غشا شده است که تصاویر AFM نیز این موضوع را تأیید می کند. لازم به ذکر است که زاویه تماس غشاها با افزایش مقدار نانوذرات آبرگری افزایش یافت. داده های زبری سطح نیز در جدول 4 آورده شده است که تأیید کننده نتایج ارائه شده می باشد.  $R_a$ ،  $R_q$  و  $R_t$  به ترتیب بیانگر میانگین زبری، میانگین ریشه مربع زبری و زبری اوج تا حداقل می باشند.

جدول 3- تأثیر میزان نانوذرات آبرگری  $\text{SiO}_2$  بر روی زاویه تماس غشای PVC

زاویه تماس ( $^\circ$ )	$\text{SiO}_2$ (wt.%)	نمونه
78/2	0/0	1
87/1	1/0	2
88/8	1/5	3
91/0	2/0	4



شکل 7- تصاویر AFM مربوط به غشای PVC با درصد های مختلفی از نانوذرات آبرگری  $\text{SiO}_2$ : (a) 0%, (b) 1%, (c) 1.5% و (d) 2%

جدول 4- نتایج حاصل از بررسی های AFM برای غشاهای مختلف

نمونه	Ra (nm)	Rq (nm)	Rt (nm)
1	8/93	11/06	77/06
2	47/95	66/50	404/30
3	59/24	74/77	630/50
4	67/70	75/88	502/10

داده های جدول 4 نشان می دهد که افزودن نانوذرات به محلول پلیمری منجر به تشکیل سطوح ناهموار در غشا می شود. مقایسه پارامترهای زبری در نمونه های 2-4 با نمونه 1 بیانگر این مطلب می باشد. علاوه بر این، مقایسه نمونه های 2 تا 4 نشان می دهد که با افزایش غلظت نانوذرات از 1 wt.% به 2 wt.%، پارامترهای زبری (به خصوص میانگین زبری) افزایش یافته است.

### 3-5- بررسی استحکام مکانیکی غشاهای تخت

جدول 5 تأثیر مقادیر مختلف نانو ذرات  $\text{SiO}_2$  را بر روی استحکام کششی و ازدیاد طول تا حد پارگی غشاهای PVC خالص و نانوکامپوزیتی نشان می دهد. بر اساس نتایج به دست آمده می توان دریافت که حضور نانوذرات در ساختار غشاهای نانوکامپوزیت به طور قابل توجهی استحکام کششی را نسبت به غشاهای PVC خالص بهبود بخشیده است که می توان آن را به اثر تقویت کنندگی و اصلاح کننده نانو ذرات  $\text{SiO}_2$  در پلیمر PVC نسبت داد. شبکه نانوذرات ممکن است فضاهای میان بافتی درون ماتریس PVC را پر کنند و یکپارچگی ساختاری آن را بهبود بخشند. برهمکنش خوب (مانند نیروهای ضعیف واندروالس و پیوند هیدروژنی) بین نانوذرات  $\text{SiO}_2$  و غشای PVC می تواند بازده انتقال بار و توزیع تنش را بهبود بخشیده و خواص مکانیکی غشا را افزایش دهد. لازم به ذکر است که توزیع یکنواخت نانو ذرات  $\text{SiO}_2$  در ساختار غشایی، همانطور که در تصاویر FESEM نشان داده شده است، می تواند بهبود خواص مکانیکی غشای نانوکامپوزیت PVC را نیز تأیید کند. داده های جدول 5 همچنین نشان می دهد که ازدیاد طول غشاهای نانوکامپوزیت نسبت به غشای خالص کاهش یافته است که می تواند ناشی از سفت شدن ساختار غشا به دلیل وجود نانوذرات  $\text{SiO}_2$  باشد [34]. نتایج به دست آمده با نتایج گزارش شده توسط امیرعابدی و همکاران [21] در رابطه با غشاهای نانوکامپوزیت PP حاوی نانوذرات سیلیکای پیوندزنی شده با یک گروه عاملی متیل مطابقت دارد.

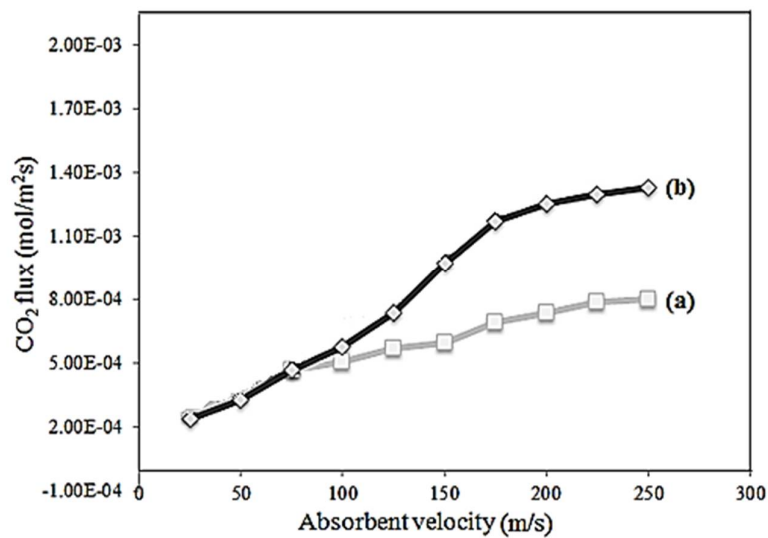
جدول 5- خواص مکانیکی غشاهای PVC حاوی مقادیر مختلف نانوذرات آبگریز  $\text{SiO}_2$ 

نمونه	استحکام کششی (MPa)	ازدیاد طول تا حد پارگی (%)
1	4/2 ± 0/1	33 ± 3
2	5/2 ± 0/1	29 ± 3
3	7/9 ± 0/2	19 ± 2
4	8/2 ± 0/2	17 ± 2

### 3-6- بررسی اثر سرعت جاذب

سرعت جریان مایع جاذب به عنوان یکی از مهم ترین پارامترهای عملیاتی در تماس دهنده های غشایی محسوب می شود؛ زیرا این پارامتر به طور چشمگیری بر روی نرخ انتقال جرم اثرگذار است [35، 36]. بر این اساس، اثر سرعت مایع

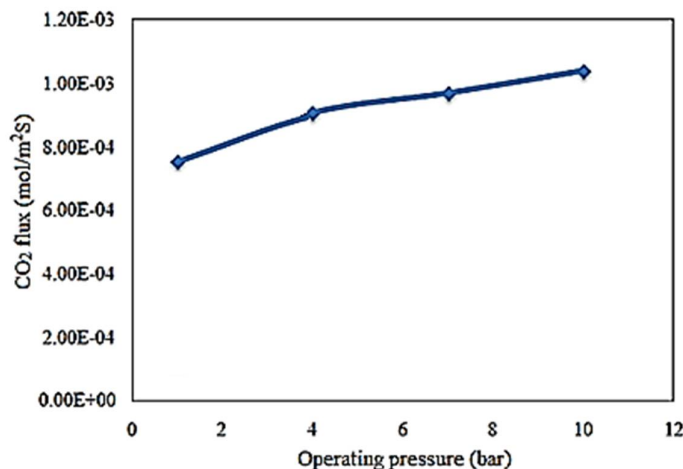
جاذب بر روی شار جذب  $\text{CO}_2$ ، با استفاده از غشاهای خالص و نانوکامپوزیتی PVC حاوی 2 درصد وزنی از نانوذرات  $\text{SiO}_2$  بررسی گردید. انتخاب این نمونه غشایی نیز به دلیل بالاتر بودن اندازه زاویه تماس و استحکام کششی این غشا در مقایسه با نمونه‌های غشایی دیگر صورت گرفت. با توجه به نتایج حاصل از شکل 8 می‌توان دریافت که در مورد هر دو نوع غشا، با افزایش سرعت مایع جاذب، شار جذب  $\text{CO}_2$  افزایش یافته است. در توجیه این پدیده می‌توان گفت که با افزایش سرعت فاز مایع، ضخامت لایه مرزی ایجاد شده بر روی سطح غشا کاهش و در نتیجه ضریب انتقال جرم افزایش یافته است [37]. از سوی دیگر، با مقایسه شار جذب  $\text{CO}_2$  در غشاهای خالص و نانوکامپوزیتی می‌توان دریافت که میزان شار در سرعت‌های پایین مایع جاذب اختلاف چندانی با یکدیگر ندارد، در حالی که با افزایش سرعت جاذب، میزان شار غشاهای نانوکامپوزیتی بیشتر از شار غشای خالص PVC می‌باشد. دلیل این پدیده را می‌توان به احتمال ترشوندگی غشاهای خالص در سرعت‌های بالای جاذب نسبت داد.



شکل 8- نمودار شار جذب  $\text{CO}_2$  بر حسب سرعت جاذب مربوط به (a) غشای PVC خالص و (b) غشای نانوکامپوزیتی حاوی 2 درصد وزنی از نانوذرات آبریز  $\text{SiO}_2$

### 3-7- اثر فشار عملیاتی

از آنجایی که فشار عملیاتی یکی از پارامترهای مهم در عملکرد جذب  $\text{CO}_2$  توسط تماس دهنده‌های غشایی به شمار می‌رود، از این رو تأثیر پارامتر فشار بر شار جذب  $\text{CO}_2$  در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. گاز خوراک به غشاهای لیاف توخالی PVC تزریق شد که نتایج آن در شکل 9 نشان داده شده است.



شکل 9- شار جذب CO<sub>2</sub> در برابر فشار عملیاتی مربوط به غشای نانوکامپوزیت حاوی 2 درصد وزنی نانوذرات آبریز SiO<sub>2</sub>

با توجه به این شکل می‌توان مشاهده نمود که شار جذب CO<sub>2</sub> با افزایش فشار عملیاتی افزایش یافته است که با نتایج به دست آمده توسط مرزوک<sup>8</sup> و همکاران دارد [38] مطابقت خوبی دارد. به طور کلی، افزایش شار جذب CO<sub>2</sub> با افزایش فشار عملیاتی می‌تواند ناشی از دو عامل زیر باشد:

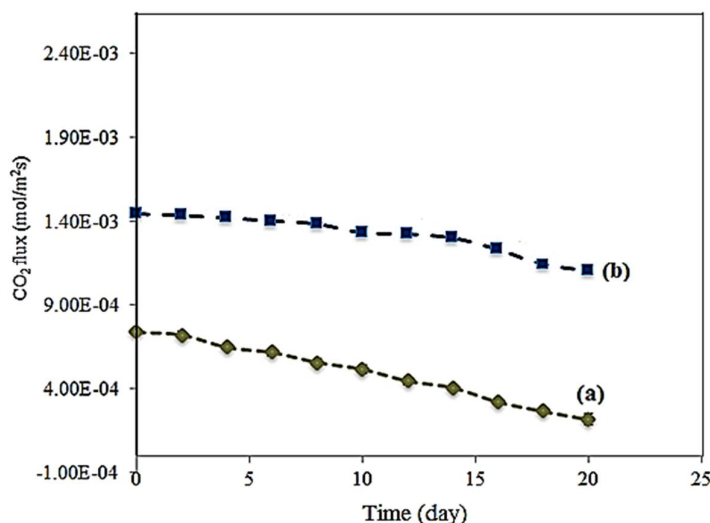
1- افزایش فشار عملیاتی منجر به افزایش فشار جزئی و غلظت CO<sub>2</sub> در بین سطح گاز و مایع می‌شود. در نتیجه، مقدار بیشتری از گاز CO<sub>2</sub> در تماس با مایع جاذب بوده و می‌تواند توسط آن جذب شود.

2- حجم گاز با افزایش فشار عملیاتی متراکم‌تر می‌شود.

نتایج ذکر شده در بالا نیز پایداری مکانیکی بالای غشاهای نانوکامپوزیت حاوی 2 درصد وزنی نانوذرات SiO<sub>2</sub> را به دلیل فشارهای عملیاتی متفاوت ثابت می‌کند.

### 3-8- ارزیابی پایداری شیمیایی غشاها

هرگونه واکنش بین مایع جاذب و غشا، ممکن است باعث تغییرات شدیدی در ساختار داخلی غشا و مورفولوژی سطحی آن گردد [19, 28]. شکل 10 نتایج حاصل از جذب گاز CO<sub>2</sub> توسط محلول DEA با استفاده از غشاهای خالص و نانوکامپوزیتی PVC حاوی 2 درصد وزنی از نانوذرات آبریز SiO<sub>2</sub> را به ازای 20 روز کارکرد و هر روز به مدت 2 ساعت نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، میزان شار جذب CO<sub>2</sub> به ازای غشاهای نانوکامپوزیتی بیشتر از غشای خالص می‌باشد. در این مورد می‌توان گفت که در غشای خالص، با نفوذ محلول DEA به داخل حفرات غشا، سطح تماس مؤثر بین فاز گاز و فاز مایع کاهش یافته و در نتیجه افت قابل توجهی در عملکرد این نوع غشا نسبت به غشاهای نانوکامپوزیتی به وجود آمده است. این نتایج مشابه نتایج کار فوسی-کوفال و همکاران [19] در رابطه با غشای نانوکامپوزیتی PVDF/CaCO<sub>3</sub> می‌باشد.



شکل 10- نمودار پایداری شیمیایی مربوط به غشای PVC خالص و (a) غشای نانوکامپوزیتی حاوی 2 درصد وزنی از نانوذرات آبریز SiO<sub>2</sub>

#### 4- نتیجه گیری

در این پژوهش، غشاهای خالص و نانوکامپوزیتی PVC حاوی نانوذرات SiO<sub>2</sub> ساخته شده و در سامانه تماس دهنده غشایی جهت جذب گاز CO<sub>2</sub> مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از تصاویر SEM حاکی از وجود نانوذرات بر روی سطح و ساختار داخلی غشاهای نانوکامپوزیتی بود. داده‌های مربوط به اندازه‌گیری زاویه تماس نیز نشان داد که غشای نانوکامپوزیتی حاوی 2/5 درصد وزنی از نانوذرات SiO<sub>2</sub> دارای بیشترین اندازه زاویه تماس در مقایسه با غشاهای دیگر است. بررسی خواص مکانیکی غشاهای مختلف نشان داد که حضور نانوذرات در ساختار غشاهای نانوکامپوزیتی به طور قابل توجهی استحکام کششی آنها را نسبت به غشاهای PVC خالص بهبود بخشیده است. نتایج حاصل از آزمون بلندمدت جذب CO<sub>2</sub> در سامانه تماس دهنده غشایی نشان دهنده بهبود قابل توجهی در عملکرد غشای PVC بعد از عملیات اصلاحی با نانوذرات SiO<sub>2</sub> بود. بدین ترتیب می‌توان ادعا نمود که اصلاح سطحی غشای PVC توسط نانوذرات SiO<sub>2</sub> می‌تواند گام مهمی در جهت ارتقای عملکرد تماس دهنده‌های غشایی گاز-مایع فراهم نماید.

#### 5- منابع

- [1] F. Russo, F. Galiano, A. Iulianelli, A. Basile, A. Figoli, "Biopolymers for sustainable membranes in CO<sub>2</sub> separation: a review", *Fuel Processing Technology*, vol. 213, pp. 106643, 2021.
- [2] A. A. Olajire, "CO<sub>2</sub> capture and separation technologies for end-of-pipe applications – A review", *Energy*, 35(6), pp. 2610-2628, 2010.
- [3] X. Chen, G. Liu, W. Jin, "Natural gas purification by asymmetric membranes: An overview", *Green Energy Environment*, 6(2), pp. 176-192, 2021.
- [4] P. Amirabedi, K. Pourkhanali, "An Overview of Emission Sources, Separation Methods and Valuable Crops Producing from CO<sub>2</sub>", *Farayandno*, 17(80), pp. 39-59, 2023.
- [5] E. Kianfar, "A review of recent advances in carbon dioxide absorption–stripping by employing a gas–liquid hollow fiber polymeric membrane contactor", *Polymer Bulletin*, 80(11), pp. 11469-11505, 2023.

- [6] N. P. Khumalo, B. B. Mamba, M. M. Motsa, "Carbon dioxide absorption in a gas-liquid membrane contactor: Influence of membrane properties and absorbent chemistry", *Chemical Engineering Journal Advances*, vol. 18, pp. 100601, 2024.
- [7] K. Kim, H. Lee, H. S. Park, H. Song, S. Kim, "Surface modification of polypropylene hollow fiber membranes using fluorosilane for CO<sub>2</sub> absorption in a gas-liquid membrane contactor", *Heliyon*, 9(9), 2023
- [8] J. M. Vadillo, L. Gómez-Coma, A. Garea, A. Irabien, "Hollow fiber membrane contactors in CO<sub>2</sub> desorption: A review", *Energy Fuels*, 35(1), pp. 111-136, 2020.
- [9] S. Hafeez, T. Safdar, E. Pallari, G. Manos, E. Aristodemou, Z. Zhang, S. M. Al-Salem, A. Constantinou, "CO<sub>2</sub> capture using membrane contactors: A systematic literature review", *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, vol. 15, pp. 720-754, 2021.
- [10] S. Zhao, P. H. Feron, L. Deng, E. Favre, E. Chabanon, S. Yan, J. Hou, V. Chen, H. Qi, "Status and progress of membrane contactors in post-combustion carbon capture: A state-of-the-art review of new developments", *Journal of Membrane Science*, vol. 511, pp. 180-206, 2016.
- [11] S. Raveshiyan, P. Amirabedi, R. Yegani, B. Pourabbas, A. Tavakoli, "CO<sub>2</sub> absorption through PP/fSiO<sub>2</sub> nanocomposite hollow fiber membrane contactor" *Polyolefins Journal*, 9(1), pp. 61-71, 2022.
- [12] P. S. Goh, R. Naim, M. Rahbari-Sisakht, A. F. Ismail, "Modification of membrane hydrophobicity in membrane contactors for environmental remediation", *Separation and Purification Technology*, vol. 227, pp. 115721, 2019.
- [13] S. Raveshiyan, R. Yegani, B. Pourabbas, A. Tavakkoli, "Study on the fabrication of superhydrophobic microporous polypropylene flat membrane using in situ synthesis of modified fluorinated silica nano particles", *Advanced Materials Research*, vol. 829, pp. 371-375, 2014.
- [14] P. Amirabedi, S. Raveshiyan, R. Yegani, "Reducing the Wettability of Porous Polymeric Membranes in Membrane Contactors: An Overview on the Methods and Their Effective Parameters", *Iranian Journal of Polymer Science and Technology* (Persian), vol. 35, pp. 183-22, 2022.
- [15] Y. Zhang, J. Sunarso, S. Liu, R. Wang, "Current status and development of membranes for CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> separation: A review", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 12, pp. 84-107, 2013.
- [16] Y. Zhang, R. Wang, "Gas-liquid membrane contactors for acid gas removal: recent advances and future challenges", *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2(2), pp. 255-262, 2013.
- [17] P. Amirabedi, A. Akbari, R. Yegani, "Fabrication of hydrophobic PP/CH<sub>3</sub>SiO<sub>2</sub> composite hollow fiber membrane for membrane contactor application", *Separation and Purification Technology*, vol. 228, pp. 115689, 2019.
- [18] Z. Sayyah Alborzi, Y. Amini, P. Amirabedi, S. Raveshiyan, A. Hassanvand, "Computational fluid dynamics simulation of a membrane contactor for CO<sub>2</sub> separation: two types of membrane evaluation", *Chemical Engineering & Technology*, 46(10), pp. 2034-2045, 2023.
- [19] M. Fosi-Kofal, A. Mustafa, A. F. Ismail, M. Rezaei-DashtArzhandi, T. Matsuura, "PVDF/CaCO<sub>3</sub> composite hollow fiber membrane for CO<sub>2</sub> absorption in gas-liquid membrane contactor", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 31, pp. 428-436, 2016.
- [20] A. Talavari, B. Ghanavati, A. Azimi, S. Sayyahi, "PVDF/MWCNT hollow fiber mixed matrix membranes for gas absorption by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid", *Progress in Chemical and Biochemical Research*, 4(2), pp. 177-190, 2021.

- [21] P. Amirabedi, A. Akbari, R. Yegani, S. Raveshiyan, "CO<sub>2</sub> Stripping from Monoethanolamine through a Polypropylene/CH<sub>3</sub>SiO<sub>2</sub> Composite Hollow-Fiber Membrane Contactor", *Chemical Engineering & Technology*, 45(8), pp. 1512-1521, 2022.
- [22] A. Ghaee, A. Ghadimi, B. Sadatnia, A. F. Ismail, Z. Mansourpour, M. Khosravi, "Synthesis and characterization of poly (vinylidene fluoride) membrane containing hydrophobic silica nanoparticles for CO<sub>2</sub> absorption from CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> using membrane contactor", *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 120, pp. 47-57, 2017.
- [23] A. Rosli, A. L. Ahmad, S. C. Low, "Enhancing membrane hydrophobicity using silica end-capped with organosilicon for CO<sub>2</sub> absorption in membrane contactor", *Separation and Purification Technology*, vol. 251, pp. 117429, 2020.
- [24] H. Fashandi, A. Ghodsi, R. Saghafi, M. Zarrebini, "CO<sub>2</sub> absorption using gas-liquid membrane contactors made of highly porous poly (vinyl chloride) hollow fiber membranes", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 52, pp. 13-23, 2016.
- [25] S. A. Hashemifard, M. S. Ghodrati, M. Rezaei, A. A. Izadpanah, "Experimental study of gas dehydration via PDMS/CaCO<sub>3</sub> NP-coated PVC hollow fiber membrane contactor", *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 162, pp. 62-73, 2020.
- [26] A. Behboudi, Y. Jafarzadeh, R. Yegani, "Enhancement of antifouling and antibacterial properties of PVC hollow fiber ultrafiltration membranes using pristine and modified silver nanoparticles", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), pp. 1764-1773, 2018.
- [27] P. Amirabedi, R. Yegani, A. Akbari, "Evaluation of Wetting Behavior of Nanocomposite Polypropylene Hollow Fiber Membrane as a Membrane Contactor for CO<sub>2</sub> Removal", *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, 31(4), pp. 331-344, 2018.
- [28] P. Amirabedi, R. Yegani, A. H. Hesaraki, "Hydrophobicity optimization of polypropylene hollow fiber membrane by sol-gel process for CO<sub>2</sub> absorption in gas-liquid membrane contactor using response surface methodology", *Iranian Polymer Journal*, vol. 26, pp. 431-443, 2017.
- [29] A. Razmjou, J. Mansouri, V. Chen, "The effects of mechanical and chemical modification of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on the surface chemistry, structure and fouling performance of PES ultrafiltration membranes", *Journal of Membrane Science*, 378(1-2), pp. 73-84, 2011.
- [30] A. Rahimpour, S. S. Madaeni, A. H. Taheri, Y. Mansourpanah, "Coupling TiO<sub>2</sub> nanoparticles with UV irradiation for modification of polyethersulfone ultrafiltration membranes", *Journal of Membrane Science*, 313(1-2), pp. 158-169, 2008.
- [31] A. M. Abdelghany, G. El-Damrawi, A. G. ElShahawy, N. M. Altomy, "Structural investigation of PVC/PS polymer blend doped with nanosilica from a renewable source", *Silicon*, vol. 10, pp. 1-7, 2018.
- [32] W. E. Mahmoud, "Morphology and physical properties of poly (ethylene oxide) loaded graphene nanocomposites prepared by two different techniques", *European Polymer Journal*, 47(8), pp. 1534-1540, 2011.
- [33] F. Ma, N. Yuan, J. Ding, "The conductive network made up by the reduced graphene nanosheet/polyaniline/polyvinyl chloride", *Journal of Applied Polymer Science*, 128(6), pp. 3870-3875, 2013.

- [34] Y. Zhang, R. Wang, "Fabrication of novel polyetherimide-fluorinated silica organic–inorganic composite hollow fiber membranes intended for membrane contactor application" *Journal of Membrane Science*, vol. 443, pp. 170-180, 2013.
- [35] S. P. Yan, M. X. Fang, W. F. Zhang, S. Y. Wang, Z. K. Xu, Z. Y. Luo, K. F. Cen, "Experimental study on the separation of CO<sub>2</sub> from flue gas using hollow fiber membrane contactors without wetting", *Fuel Processing Technology*, 88(5), pp. 501-511, 2007.
- [36] Y. Lee, Y. J. Park, J. Lee, T. H. Bae, "Recent advances and emerging applications of membrane contactors", *Chemical Engineering Journal*, vol. 461, pp. 141948, 2023.
- [37] J-L. Li, B-H. Chen, "Review of CO<sub>2</sub> absorption using chemical solvents in hollow fiber membrane contactors", *Separation and Purification Technology*, 41(2), pp. 109-122, 2005.
- [38] S. A. Marzouk, M. H. Al-Marzouqi, M. H. El-Naas, N. Abdullatif, Z. M. Ismail, "Removal of carbon dioxide from pressurized CO<sub>2</sub>–CH<sub>4</sub> gas mixture using hollow fiber membrane contactors", *Journal of Membrane Science*, 351(1-2), pp. 21-27, 2010.