

## Design and Fabrication of a Portable Device for Water Extraction from Atmospheric Humidity Using Nanostructured Adsorbents (Metal–Organic Frameworks MOF-801): Green Synthesis and Performance Analysis

Mohammad Aghajani<sup>1\*</sup>, Mehdi Simiyari<sup>2</sup>, Hassan Tavakoli<sup>3</sup>

1- Faculty of New Technologies, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, Imam Ali University, Tehran, Iran

3- Department of Chemistry, Faculty of Basic Sciences, Imam Ali University, Tehran, Iran

### Abstract

With the growing global water crisis and declining access to freshwater, atmospheric humidity has gained attention as a renewable and sustainable source of potable water. This study presents the design and development of a portable device for extracting water from air using nanostructured Metal–Organic Frameworks (MOF-801). The MOF-801 was synthesized via a green method, using only distilled water as the reaction medium and avoiding harmful organic solvents. The resulting framework, with a surface area of approximately 700 m<sup>2</sup>/g, was integrated into a device consisting of a plexiglass chamber, a planar heater for desorption, and a thermoelectric module for vapor condensation and water recovery.

The system operated based on scheduled adsorption–desorption cycles, and performance was evaluated across multiple runs. The MOF demonstrated a water uptake of around 35% by weight under ambient humidity. In semi-industrial operation using 1000 grams of MOF-801, the device was capable of producing approximately 3 liters of water per day. This output can be further enhanced by increasing the number of cycles and optimizing the system. The total daily energy consumption was measured at about 1.6 kWh, translating to a production cost of less than 100 IRR per liter.

These results confirm that MOF-801-based water harvesting systems are not only technically effective but also economically and environmentally viable, offering a promising solution for potable water production in arid environments, emergency conditions, and portable field applications.

### Keywords

Metal–Organic Frameworks (MOFs), Nanostructured Materials, Green Synthesis, Atmospheric Water Harvesting

### Article history:

Received: 29-05-2025

Accepted: 25-08-2025

### Corresponding author:

\*[soroshaghajani47@yahoo.com](mailto:soroshaghajani47@yahoo.com)

## طراحی و ساخت دستگاه قابل حمل استخراج آب از رطوبت هوا با بهره‌گیری از جاذب‌های نانوساختار (چارچوب‌های فلز-آلی MOF-801): سنتز سبز و تحلیل عملکرد

محمد آقاجانی<sup>۱\*</sup>، مهدی سیمپاری<sup>۲</sup>، حسن توکلی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشکده فناوری های نوین، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران
- ۲- دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، دانشگاه افسری امام علی (ع)، تهران، ایران
- ۳- دانشکده علوم پایه، گروه شیمی، دانشگاه افسری امام علی (ع)، تهران، ایران

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۳/۰۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۶/۰۳

با گسترش بحران آب و کاهش دسترسی به منابع آب شیرین، استفاده از رطوبت موجود در جو به‌عنوان منبعی جایگزین و پایدار برای تأمین آب آشامیدنی، مورد توجه جدی قرار گرفته‌است. در این پژوهش، طراحی و ساخت یک سامانه قابل حمل برای استخراج آب از رطوبت هوا با استفاده از جاذب‌های نانوساختار چارچوب فلز-آلی MOF-801 انجام گرفته است. سنتز MOF-801 به روش سبز، با حذف حلال‌های آلی و تنها با استفاده از آب مقطر به‌عنوان حلال، صورت پذیرفت. چارچوب فلز-آلی سنتز شده با سطح ویژه  $700 \text{ m}^2/\text{gr}$ ، در ساختار دستگاهی شامل محفظه طلق شفاف آکرلیکی، گرم‌کن صفحه‌ای برای واجذب رطوبت و پیمانه گرما - برقی برای میعان بخار و جمع‌آوری آب به کار گرفته شد. طراحی چرخه‌های جذب و واجذب با زمان‌بندی مشخص انجام شد و عملکرد دستگاه طی چندین چرخه متوالی مورد آزمون قرار گرفت. همچنین میزان جذب رطوبت توسط جاذب در رطوبت محیط به مقدار ۳۵ درصد وزنی قابل قبول بود. نتایج نشان داد که در مقیاس نیمه‌صنعتی با استفاده از ۱۰۰۰ گرم MOF-801، امکان تولید حدود ۳ لیتر آب در شبانه‌روز فراهم است که این میزان با بهینه‌سازی دستگاه و افزایش تعداد چرخه‌ها قابل افزایش است. همچنین مصرف برق کل سامانه در روز حدود ۱/۶ کیلووات‌ساعت اندازه‌گیری شد که هزینه تولید آب را به کمتر از ۱۰۰ تومان به ازای هر لیتر می‌رساند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از MOF-801 در چنین سامانه‌هایی نه تنها از نظر کارایی فنی، بلکه از نظر اقتصادی و پایداری محیط‌زیستی نیز گزینه‌ای مناسب برای تأمین آب در مناطق خشک، شرایط بحرانی و مصارف پرتابل به شمار می‌آید.

چارچوب‌های فلز-آلی (MOF)، مواد نانوساختار، سنتز سبز، تولید آب از رطوبت اتمسفر

واژگان کلیدی

## ۱- مقدمه

کمبود آب شیرین یکی از چالش‌های اساسی و روبه‌افزایش قرن بیست‌ویکم محسوب می‌شود، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که دسترسی به منابع آب سطحی یا زیرزمینی محدود است. یکی از راهکارهای مطرح برای مقابله با بحران کم‌آبی، فناوری‌های شیرین‌سازی آب است که شامل حذف نمک‌ها و مواد معدنی از آب شور برای تولید آب آشامیدنی می‌باشد. این فناوری‌ها به دو دسته اصلی روش‌های حرارتی (مانند تقطیر ناگهانی چندمرحله‌ای،<sup>۱</sup> MED و تراکم بخار) و روش‌های غشایی (مانند اسمز معکوس و الکترودیالیز) تقسیم می‌شوند. با وجود کارایی بالا، شیرین‌سازی نیازمند مصرف انرژی بسیار زیاد است و عمدتاً وابسته به سوخت‌های فسیلی می‌باشد، که موجب افزایش هزینه‌ها و آسیب‌های زیست‌محیطی می‌شود. همچنین، اجرای این سامانه‌ها در مناطق دورافتاده، حتی در نواحی ساحلی، اغلب به دلیل کمبود زیرساخت‌های انرژی و هزینه‌های بالا، امکان‌پذیر نیست. در نتیجه، توسعه راهکارهای کم‌مصرف، مقرون‌به‌صرفه و قابل حمل برای تأمین آب شرب، به‌ویژه در این مناطق، ضرورت می‌یابد [۱، ۲].

بر اساس آمارها، تنها حدود ۲/۵ درصد از کل منابع آبی کره زمین را آب شیرین تشکیل می‌دهد که از این میزان، سهم آب‌های قابل دسترس برای انسان به کمتر از ۰/۴ درصد می‌رسد. این در حالی است که در مقابل، مقدار قابل توجهی بخار آب به‌صورت دائم در جو زمین حضور دارد - در حدود ۱۵ تریلیون لیتر - که حتی در نواحی محصور در خشکی نیز غلظت بخار آب می‌تواند قابل توجه باشد. برداشت آب از رطوبت جو (AWH)<sup>۲</sup> رویکردی نوآورانه و امیدبخش برای مقابله با بحران کم‌آبی در مقیاس جهانی به شمار می‌رود که وابستگی به منابع آب مایع را کاهش می‌دهد [۳، ۴].

تاکنون سه رویکرد اصلی برای برداشت آب از جو معرفی شده‌است: جمع‌آوری مه، میعان بخار آب از طریق سردسازی زیر نقطه شبنم و استفاده از مواد جاذب برای جذب بخار آب. در میان این روش‌ها، استفاده از جاذب‌ها به دلیل قابلیت عملیاتی شدن در بازه‌های وسیع‌تر دمایی و رطوبتی و عدم نیاز به تجهیزات پیچیده، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است [۵، ۶].

در این راستا، چارچوب‌های فلز-آلی (MOFs)<sup>۳</sup> به عنوان نسل جدیدی از مواد متخلخل بلوری با ویژگی‌هایی نظیر سطح ویژه بسیار بالا، ساختارهای قابل تنظیم، و قابلیت جذب-واحد بازگشت‌پذیر، پتانسیل فراوانی را برای جذب آب از هوا از خود

نشان داده‌اند [۷، ۸].

MOFها ساختارهایی متشکل از خوشه‌های فلزی یا یون‌های فلزی متصل به لیگاند‌های آلی هستند که خواص فیزیکی و شیمیایی منحصربه‌فرد آن‌ها، از جمله تخلخل بالا، آب‌دوستی قابل تنظیم، و پایداری حرارتی و شیمیایی، آن‌ها را به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربرد در فناوری‌های برداشت آب جوی تبدیل کرده است. از میان انواع مختلف MOFها، دسته‌ای از MOFهای مبتنی بر زیرکونیوم مانند MOF-801، MOF-808 و MOF-841 به دلیل ظرفیت جذب آب بالا، پایداری حرارتی مناسب و احیاءپذیری در دماهای پایین (کمتر از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد)، به‌طور ویژه مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این میان، MOF-801 [Zr<sub>6</sub>O<sub>4</sub>(OH)<sub>4</sub>(fumarate)<sub>6</sub>]، با ساختار سه‌بعدی، حفره‌های چندگانه، سطح ویژه بالا و قابلیت سنتز مقرون‌به‌صرفه، به‌عنوان یکی از جاذب‌های برجسته برای جذب بخار آب معرفی شده است [۹، ۱۰].

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که MOF-801 عملکرد چشم‌گیری حتی در رطوبت‌های نسبی پایین دارد؛ برای مثال، کیم و همکاران ظرفیت جذب حدود ۲۵ گرمی جذب آب به ازای هر ۱۰۰ گرم MOF-801 در رطوبت ۲۰ درصد و یاگی و همکاران ظرفیت جذب ۲۲/۵ درصد وزنی را در رطوبت ۱۰ درصد گزارش کرده‌اند. همچنین، طراحی سامانه‌هایی مبتنی بر MOF-801 که توانایی برداشت تا چند لیتر آب به‌ازای هر کیلوگرم جاذب در روز را دارند، بدون نیاز به انرژی خارجی، چشم‌اندازهای عملیاتی این ماده را در مقیاس واقعی تقویت کرده‌اند [۱۱].

عملکرد MOF-801 برای تولید آب از رطوبت موجود در هوا طی سه مرحله اصلی انجام می‌شود:

### ۱. مرحله جذب:

وقتی پودر MOF-801 در محیطی با رطوبت نسبی قرار می‌گیرد (حتی در رطوبت‌های پایین حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد)، مولکول‌های بخار آب موجود در هوا وارد حفره‌های بسیار ریز (نانومتری) این ماده می‌شوند. سطح داخلی حفرات در MOF-801 دارای گروه‌های شیمیایی آب‌دوست مانند هیدروکسیل‌ها و کربوکسیلات‌هاست که با مولکول‌های آب پیوند ضعیف هیدروژنی برقرار می‌کنند. این پیوندها باعث می‌شوند که آب درون ساختار نگاه‌داری شود بدون آنکه ساختار ماده تخریب شود. جذب آب تا زمانی ادامه می‌یابد که ماده اشباع شود (برای MOF-801 معمولاً حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد وزنی است).

### ۲. مرحله وا جذب:

پس از اشباع شدن MOF-801، باید رطوبتی که درون آن

- 1- Multiple-Effect Distillation
- 2- Atmospheric Water Harvesting
- 3- Metal-Organic Frameworks

و در محفظه‌ای جداگانه جمع‌آوری شود. حسگرهای دما و رطوبت نیز به صورت پیوسته داده‌های محیطی را ثبت و تحلیل می‌کنند. تحلیل‌های اولیه عملکرد دستگاه نشان داد که با وجود طراحی ساده، سامانه توانایی استخراج آب در شرایط رطوبت پایین و با مصرف انرژی پهنه را داراست. با در نظر گرفتن امکان تغذیه دستگاه با انرژی خورشیدی و هزینه پایین سنتز MOF-801 به روش سبز، این سامانه پتانسیل بالایی برای استفاده در کاربردهای اضطراری، مناطق دورافتاده و نیز تولید آب در مقیاس خانگی دارد. هدف نهایی این پژوهش، توسعه یک راهکار جامع و عملی برای مقابله با بحران جهانی آب از طریق طراحی و استفاده از جاذب‌های نانو ساختار با قابلیت جذب آب از هوا و پیاده‌سازی آن در قالب یک دستگاه قابل حمل است. در ادامه، عملکرد MOF-801 در شرایط مختلف دمایی و رطوبتی، نرخ جذب و دفع، پایداری چرخه‌ای، و قابلیت احیا نیز به‌طور سازمان یافته مورد بررسی قرار گرفته‌است تا امکان‌سنجی تجاری‌سازی این فناوری به‌صورت کامل تحلیل گردد.

## ۲- بخش تجربی

### ۲-۱- مواد

فوماریک اسید ( $C_4H_4O_4$ )، خلوص  $\leq 99.0\%$ ، زیرکونیوم اکسی کلراید اکتاهیدرات ( $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ )، خلوص  $\leq 99.5\%$ ، فرمیک اسید ( $HCOOH$ )، خلوص  $\leq 98.0\%$ ، اتانول و متانول (خلوص  $\leq 99.0\%$ ، گرید HPLC) و اسید سولفوریک (خلوص:  $95-97\%$ ) همگی از شرکت Sigma-Aldrich خریداری شدند، به همراه آب دیونیزه. شایان ذکر است که تمامی مواد بدون هیچ‌گونه فرآوری اضافی استفاده شدند.

### ۲-۲- دستگاه‌ها و تجهیزات استفاده شده

#### ۲-۲-۱- تجهیزات استفاده شده

اجزای مورد استفاده برای ساخت دستگاه قابل حمل استخراج آب از رطوبت هوا، شامل ساختار محفظه اصلی از جنس پلاستیک شفاف آکرلیکی، مخزنی از جنس شیشه برای چارچوب‌های نانو ساختار آلومینا، سامانه گرمایشی (گرم‌کن و واحد تنظیم‌کننده)، سامانه سرمایشی (شامل: پیمانه گرما-برقی، پره گرماگیر، بادزن‌ها)، حسگر دما و رطوبت و منبع تغذیه می‌باشد که طبق نقشه‌های طراحی تهیه و نصب شدند.

#### ۲-۲-۲- مشخصه یابی

بلوری بودن MOF-801 با استفاده از پراش پرتو ایکس

جذب شده، آزاد شود. این کار با افزایش دما انجام می‌شود. با گرم کردن پودر MOF (معمولاً تا حدود ۹۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد)، پیوندهای ضعیف میان مولکول‌های آب و سطح داخلی حفرات MOF شکسته می‌شود. این فرآیند باعث می‌شود که مولکول‌های آب از ساختار ماده آزاد شوند و به صورت بخار وارد فضای بسته اطراف شوند.

### ۳. مرحله میعان :

در این مرحله، بخار آب آزاد شده از حفرات MOF باید دوباره به آب مایع تبدیل شود. این کار با استفاده از یک سطح سرد انجام می‌شود.

بخار با استفاده از یک بادزن به سمت سطحی که با پیمانه گرما-برقی و سامانه سردکننده خنک شده، هدایت می‌شود. هنگامی که بخار با این سطح سرد برخورد می‌کند، به دلیل کاهش دما، به قطرات آب مایع تبدیل می‌شود. این قطرات سپس توسط شیب یا سینی مخصوص جمع‌آوری به سمت یک مخزن کوچک هدایت شده و ذخیره می‌شوند.

با این وجود، خلأهای پژوهشی قابل توجهی در زمینه ارزیابی جامع اثر پارامترهای محیطی مانند دما و رطوبت نسبی، بررسی نرخ جذب و دفع، و پایداری عملکرد MOF-801 در چرخه‌های متعدد عملیاتی وجود دارد. همچنین، داده‌های محدودی پیرامون پهنه‌سازی فرآیند فعال‌سازی MOF-801 برای حذف کامل آب جذب‌شده در دسترس است.

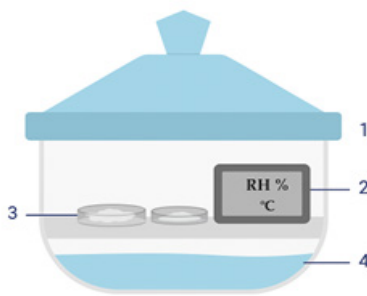
در ادامه این تحقیق، ضمن تعیین دمای فعال‌سازی پهنه برای MOF-801، نرخ جذب آب در بازه‌های زمانی مختلف و پایداری عملکرد جذب در طی چندین چرخه مورد بررسی قرار گرفته است. یک از اهداف این پژوهش، ارائه یک درک دقیق از رفتار MOF-801 سنتز شده به روش سبز، به‌عنوان جاذب پایدار، کارا و قابل بازیافت برای برداشت آب جوی در شرایط واقعی محیطی است.

در فاز بعدی این تحقیق، ماده سنتز شده در یک دستگاه قابل حمل برای برداشت آب جوی به کار گرفته شد تا امکان‌سنجی عملی این فناوری بررسی شود. این دستگاه از یک محفظه پلاستیک شفاف تشکیل شده که درون آن بستری برای نگهداری پودر MOF-801 تعبیه شده است. فرآیند جذب رطوبت ابتدا در شرایط محیطی و با درب باز انجام می‌شود تا پودر به حالت اشباع برسد. سپس با بسته شدن محفظه و فعال‌سازی گرم‌کن، آب جذب‌شده به‌صورت بخار آزاد شده و به کمک جریان هوا به سطح سرد هدایت می‌شود. این سطح سرد که با استفاده از پیمانه گرما-برقی و سامانه خنک‌کننده تقویت شده، موجب می‌شود بخار آب تقطیر شده

یک بار با آب و دو بار با اتانول شسته شد. سپس، در دمای محیط به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد و در نهایت، در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد تحت خلأ به مدت ۳ ساعت خشک شد. در این مطالعه، MOF-801 سنتز شده به روش سبز، با نام G-MOF-801 شناخته می‌شود.

## ۲-۳-۲- آزمون جذب آب

برای ایجاد یک محیط با دمای ثابت و رطوبت کنترل شده، از یک دسیکاتور که با محلول‌های دارای غلظت‌های مختلف اسید سولفوریک پر شده بود، استفاده شد. برای این منظور، اسید سولفوریک با آب دیونیزه رقیق شد تا سطح رطوبت نسبی مشخصی درون دسیکاتور ایجاد شود. علاوه بر این، برای پایش دما و رطوبت، یک دماسنج و رطوبت‌سنج دیجیتال در داخل دسیکاتور قرار داده شد. شمای کلی سامانه مورد استفاده برای تعیین عملکرد جذب در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. شماتیکی از تجهیزات برای تعیین عملکرد جذب MOF-801:

(۱) دسیکاتور، (۲) دماسنج-رطوبت‌سنج دیجیتال، (۳) نمونه در پلیت شیشه‌ای (پتری دیش)، (۴) محلول اسید سولفوریک.

**Figure 1.** Schematic of the equipment for determination of adsorption performance of MOF-801  
desiccator, (2) digital temperature humidity meter, (3) sample (1) in the Petri dish, (4) sulfuric acid solution.

در اولین مرحله، نمونه‌ها در داخل آون قرار داده شدند تا بخار آب جذب‌شده از آن‌ها حذف شود. پس از فرآیند دفع آب، نمونه‌های خشک‌شده وزن شدند و سپس در یک ظرف پتری دیش داخل دسیکاتور قرار داده شدند و اجازه داده شد تا بخار آب را از محیط کنترل شده از نظر رطوبت جذب کنند.

برای اندازه‌گیری ظرفیت جذب جاذب، از روش افزایش وزن استفاده شد که مقدار جذب آب را به‌عنوان جرم آب جذب‌شده به ازای هر واحد جرم جاذب بیان می‌کند و واحد آن گرم در هر ۱۰۰ گرم (g/100g) است.

میزان جذب آب نمونه‌ها مطابق با معادله زیر محاسبه شد:

(XRD)، دستگاه PW ۱۷۳۰ diffractometer، شرکت-PHILIPS، هلند) در بازه  $2\theta$  از ۵ تا ۸۰ درجه با گام  $0.04^\circ$  و استفاده از تابش  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda=1.54\text{\AA}$ ) و مورد بررسی قرار گرفت. (تنظیمات دستگاه شامل ولتاژ ۴۰ کیلوولت و جریان ۳۰ میلی‌آمپر بود). گروه‌های عاملی و پیوندهای شیمیایی MOF سنتز شده با استفاده از طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز<sup>۲</sup> (FTIR، Spectrum RX1، شرکت PERKIN-ELMER، آمریکا) در بازه طول موجی  $4000$  تا  $400$   $\text{cm}^{-1}$  با وضوح طیفی  $1$   $\text{cm}^{-1}$  تحلیل شد. رفتار حرارتی MOF-801 با استفاده از آنالیزگر گرم‌وزنی یا توزین حرارتی<sup>۳</sup> (TGA، دستگاه STA504، شرکت BAHR، آلمان) در محدوده دمایی ۵۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و با نرخ گرمایش ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه در اتمسفر نیتروژن مورد بررسی قرار گرفت.

مساحت سطح ویژه و تخلخل نمونه‌ها از طریق آزمون جذب و اجذب نیتروژن<sup>۴</sup> در دمای ۷۷ کلوین (BELSORP-mini II، شرکت Bel Inc، ژاپن) اندازه‌گیری شد.

مورفولوژی و ترکیب عنصری بلورهای MOF-801 با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی<sup>۵</sup> (FESEM، دستگاه EM8000، شرکت KYKY، چین) بررسی شد. علاوه بر این موارد، میکروسکوپ الکترونی عبوری<sup>۶</sup> (TEM، دستگاه CM120، شرکت PHILIPS، هلند) برای بررسی ساختار و مورفولوژی بلورهای نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

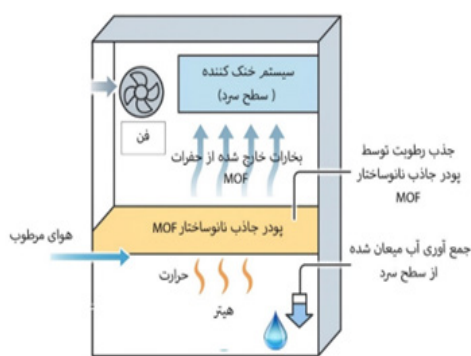
## ۲-۳-۲- روش کار

### ۲-۳-۱- سنتز سبز MOF-801

در روش (سنتز سبز در دمای محیط)، به جای DMF از آب به عنوان حلال برای سنتز MOF-801 استفاده شد که مطابق با گزارش‌های قبلی انجام گردید [۱۲، ۱۳]. در این روش، ۵ گرم  $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر و ۲۰ میلی‌لیتر اسید فرمیک حل شد. پس از ۱ دقیقه هم‌زدن، مقادیری اسید فوماریک نیز اضافه گردید و به مدت ۹۰ دقیقه هم زده شد تا یک محلول همگن تشکیل شود. سپس، محلول حاصل به مدت ۴۸ ساعت در دمای محیط باقی ماند تا یک محلول کدر تشکیل شود که نشان‌دهنده تشکیل MOF-801 است. پس از آن، رسوب سفیدرنگ با استفاده از سانتریفیوژ جمع‌آوری شد و به دنبال آن،

- 1- X-ray diffraction analysis (XRD)
- 2- Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)
- 3- Thermal gravimetric analysis (TGA)
- 4- Adsorption/Desorption Porosimetry (BET)
- 5- Field Emission Scanning Electron Microscope (F-SEM)
- 6- Transmission electron microscopy (TEM)

آکرلیکی تشکیل شده است که درون آن، یک محفظه برای نگهداری پودر جاذب نانوساختار MOF تعبیه شده است. در شرایط اولیه، درب باکس باز بوده و هوای محیط آزادانه در آن جریان دارد. پودر MOF با جذب رطوبت از هوای محیط به حالت اشباع می‌رسد. پس از آن، درب محفظه بسته شده و گرم‌کن تعبیه‌شده در زیر پودر جاذب، فعال می‌شود تا رطوبت جذب‌شده را تبخیر نماید. در مرحله بعد، با خارج شدن بخار از حفرات چارچوب‌های نانوساختار آلی فلزی (MOF) رطوبت محیط در داخل محفظه بسته بالا می‌رود و سپس بخار توسط جریان هوای داخلی به‌وسیله یک بادزن کوچک، به سمت سطح سرد (هیت سینک پایینی) هدایت می‌شود. این سطح سرد توسط پیمانانه گرما-برقی خنک شده و با استفاده از پره گرماگیر و بادزن خنک‌کننده، عملکرد مطلوب‌تری پیدا می‌کند. بخار در تماس با این سطح تقطیر شده و به آب مایع تبدیل می‌شود. آب تولیدشده در نهایت به وسیله یک سینی شیب‌دار از جنس آلومینیوم به یک منبع جمع‌آوری هدایت می‌گردد. همچنین، حسگر دما و رطوبت تعبیه‌شده درون دستگاه، به‌صورت لحظه‌ای شرایط محیط داخلی را پایش می‌کند. دیاگرام کلی جریان فرآیند از جذب تا تقطیر در شکل ۲ و تصویر و شماتیک کلی دستگاه بعد از مونتاژ و نصب قطعات بصورت کامل در شکل ۳ قابل مشاهده است.



شکل ۲. دیاگرام کلی جریان فرآیند از جذب تا تقطیر.

Figure 2. General process flow diagram from absorption to distillation  
تصویر و شماتیک کلی دستگاه بعد از مونتاژ و نصب قطعات بصورت کامل در تصویر زیر قابل مشاهده است.

### ۲-۳-۴-۲- تست عملکرد و ارزیابی دستگاه

دستگاه در شرایط محیطی مختلف (رطوبت‌های نسبی بالا و پایین) آزمایش شد. مدت زمان جذب بطور متوسط: ۲-۳ ساعت

$$(۱) \quad \frac{Mad - Mde}{Mde} - \text{جذب آب}$$

که در آن:

• Mad جرم MOF-801 پس از آزمایش جذب آب است،  
• Mde جرم MOF-801 پس از فرآیند دفع آب از طریق حرارت‌دهی است.

این روش برای چندین مجموعه از شرایط دمایی و رطوبتی مختلف به کار گرفته شد تا عملکرد جذب MOF-801 تعیین شود. تمام آزمون‌های جذب در این مطالعه به مدت ۲۴ ساعت انجام شدند و حداکثر ظرفیت جذب برای هر نمونه، که نشان‌دهنده میزان جذب جاذب در پایان فرآیند ۲۴ ساعته جذب است، با سایر نمونه‌ها مقایسه شد.

### ۲-۳-۳- دمای فعال‌سازی

دمای فعال‌سازی نقش بسیار مهمی در کارایی یک جاذب ایفا می‌کند. این دما نشان‌دهنده دمایی است که در آن، آب جذب‌شده درون ساختار جاذب به‌طور کامل حذف می‌شود.

برای بررسی دمای فعال‌سازی بهینه، نمونه‌های سنتز شده که به مدت ۲ ساعت در معرض رطوبت نسبی ۸۰٪ ( $\pm 5\%$ ) قرار گرفته بودند، تحت شرایط دمایی مختلف (۷۰، ۹۰ و ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد) قرار گرفتند تا آب جذب‌شده از جاذب‌ها حذف شود. سپس، تغییرات جرم نمونه‌ها پس از فرآیند دفع آب به مدت ۱ ساعت اندازه‌گیری شد. پس از آن، آزمون جذب تحت شرایط دمایی ۲۵ درجه سانتی‌گراد ( $\pm 1$  درجه سانتی‌گراد) و رطوبت نسبی ۸۰٪ ( $\pm 5\%$ ) انجام گرفت. در نهایت، عملکرد جذب نمونه‌ها در طول فرآیند ۲۴ ساعته جذب مقایسه شد. هر نمونه بر اساس دمای فعال‌سازی متناظر با آن نام‌گذاری شد. برای مثال، MOF-801-70 به MOF-801 اشاره دارد که در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شده است تا آب جذب‌شده درون آن حذف شود.

### ۲-۳-۴- ساخت دستگاه

پس از سنتز موفق چارچوب‌های نانو ساختار فلزی - آلی در ادامه و در فاز بعد قصد داریم تا دستگاهی طراحی کنیم تا به کمک آن بتوانیم چارچوب‌های نانوساختار آلی فلزی که در فاز قبل سنتز کردیم را بطور عملی به منظور جذب رطوبت از هوا و تولید آب به کار ببریم.

### ۲-۳-۴-۱- شرح کلی عملکرد دستگاه

دستگاه طراحی‌شده از یک محفظه شفاف ساخته شده از پلک

و سنتز شده در بهترین حالت ممکن قادر است بطور تقریبی ۳۵ تا ۴۰٪ درصد وزنی خود رطوبت جذب کند. که این میزان وابسته به پارامترهای مختلفی می‌باشد که در جدول ۱ آن‌ها را بررسی خواهیم کرد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- مشخصه یابی

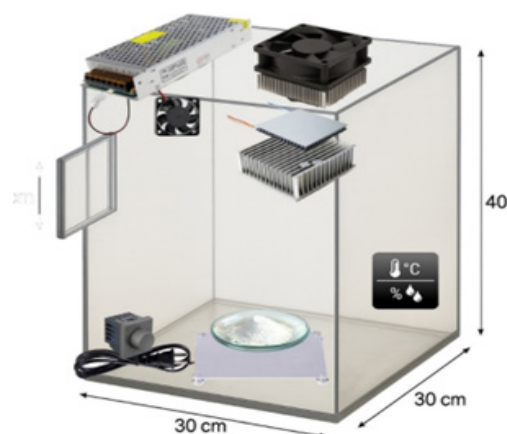
الگوی XRD نمونه MOF-801 سنتز شده در شکل ۴ نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که نمونه دارای پیک‌های مشخصی در زوایای  $8/5^\circ$  و  $9/8^\circ$  درجه می‌باشد. این پیک‌ها به صفحات بلوری (۱۱۱) و (۲۰۰) مربوط به MOF-801 اختصاص دارند. این نتایج با الگوهای XRD گزارش شده در مطالعات قبلی همخوانی دارد و نشان‌دهنده خلوص فازی بالای نمونه‌های پودری است [۱۴، ۱۵]. اندازه دانه در نمونه MOF-801 سنتز شده تقریباً ۶۶ نانومتر اندازه‌گیری شده است. طبق گزارش Grosu، کاهش اندازه دانه می‌تواند فشار نفوذ و خروج را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد که این موضوع می‌تواند مزیتی برای سامانه‌های برداشت آب باشد [۱۶].

همچنین طیف FTIR نمونه MOF-801 سنتز شده در شکل ۵ نشان داده شده است. یک پیک پهن در حوالی  $3416\text{ cm}^{-1}$  حضور گروه عاملی OH را نشان می‌دهد [۱۷]. همچنین پیک‌های مشاهده شده در  $1654\text{ cm}^{-1}$ ،  $1581\text{ cm}^{-1}$  و  $1401\text{ cm}^{-1}$  می‌توانند به پیوندهای C=O-O- نسبت داده شوند [۱۸]. از طرف دیگر، پیک‌های موجود در  $1206\text{ cm}^{-1}$ ،  $986\text{ cm}^{-1}$  و  $794\text{ cm}^{-1}$  به ارتعاشات C-H مربوط می‌شوند [۱۹]. در نهایت، جذب در  $657\text{ cm}^{-1}$  و  $487\text{ cm}^{-1}$  را می‌توان به ارتعاشات  $\text{Zr}_6(\text{OH})_4\text{O}_4$  و کشش نامتقارن Zr-(OC) نسبت داد [۲۰]. همان‌طور که مشاهده می‌شود،

جدول ۱. پارامترهای موثر بر روی میزان جذب.

Table 1. Parameters affecting the absorption rate.

Parameter	Description	Effect on Absorption
Relative Humidity (RH)	The percentage of water vapor in the air relative to saturation	Higher RH → Increased absorption
Ambient and Powder Temperature	Higher temperatures typically reduce absorption capacity	Lower temperature → Better absorption
Type of MOF and Active Surface Area	Structure, surface area, and surface properties of the MOF	MOFs with higher surface area → Greater absorption
Contact Time with Air	The duration of exposure of the sorbent to air	Longer contact time → Higher absorption
Airflow or Ventilation	Controlled airflow enhances moisture and heat exchange	Better ventilation → Improved absorption
Sorbent Mass	Amount of powder used (adsorbent mass)	Higher mass → More water captured
Phase Change Rate (Reusability)	Efficiency of the sorbent after complete drying in previous cycle	Better regeneration → Higher absorption in next cycle
Physical Design of Powder Placement	Thickness and distribution of the sorbent layer on the contact surface with air	Thinner and well-distributed layer → Better absorption



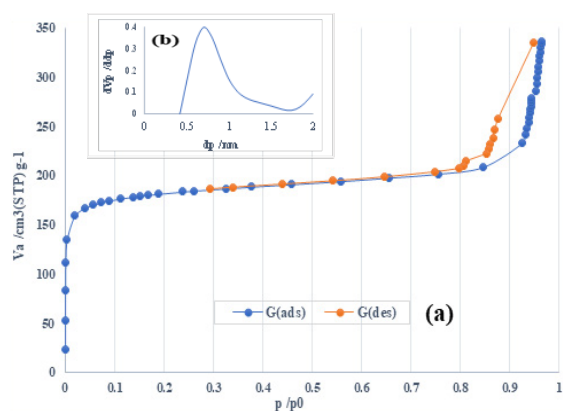
شکل ۳. تصویر و شماتیک کلی دستگاه بعد از مونتاژ و نصب قطعات.

Figure 3. General image and schematic of the device after assembly and installation of parts.

- بسته به رطوبت) و مدت زمان تبخیر و میعان بطور متوسط ۰/۵ الی ۱ ساعت در نظر گرفته شد. مراحل انجام فرایند:
۱. جذب: درپچه باز شده و MOF رطوبت را در مدت زمان ۲ الی ۳ ساعت جذب می‌کند.
۲. تبخیر: درب بسته شده، سامانه گرمایش گرم‌کن روشن و بخار تولید می‌شود و همزمان سامانه سرمایش نیز به منظور ایجاد سطح سرد روشن می‌گردد.
۳. انتقال: بادزن داخلی بخارات تولید شده را به سمت پره گرماگیر سرد هدایت می‌کند.
۴. میعان: بخار روی سطح سرد به قطرات آب تبدیل می‌شود.
۵. جمع‌آوری: به کمک سینی شیب‌داری که در زیر پره گرماگیر سرد نصب شده آب میعان شده به سمت مخزن ذخیره هدایت می‌شود. بررسی نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی نشان داد که MOF انتخابی

نمونه‌ها نقص‌های موجود در شبکه بلوری، مکان‌های متعددی برای جذب آب فراهم می‌کنند. همچنین، غلظت نقص‌ها در نمونه را می‌توان با تغییر مقدار تنظیم‌کننده (اسید فرمیک) در سنتز آبی کنترل کرد. شایان ذکر است که مقدار اسید فرمیک مورد استفاده در این مطالعه، بر اساس تحقیقات قبلی به‌عنوان مقدار بهینه برای دستیابی به بالاترین غلظت نقص در نمونه MOF-801 سنتز شده به روش سبز تعیین شده است [۱۳، ۲۳].

مساحت سطح ویژه نمونه MOF-801 سنتز شده به روش سبز برابر با  $692 \text{ m}^2/\text{g}$  اندازه‌گیری شد. از سوی دیگر MOF-801 دارای یک اندازه حفره اصلی با شعاع  $0.7$  نانومتر است. انتظار می‌رود نمونه MOF-801 سنتز شده به روش سبز عملکرد بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها در زمینه جذب آب داشته باشد. این پیش‌بینی بر اساس پتانسیل نمونه MOF-801 سنتز شده به روش سبز برای داشتن تعداد بیشتری نقص و همچنین سطح ویژه

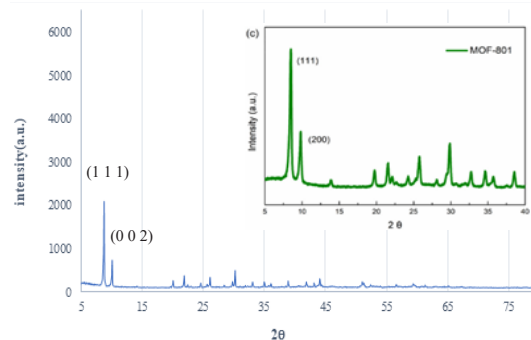


شکل ۶. نمودارهای جذب - واجذب نیتروژن در دمای ۷۷ کلوین و منحنی توزیع اندازه منافذ (تصویر داخل کادر).

Figure 6. The nitrogen adsorption-desorption Graphs at 77 K and pore size distribution curve (inset).

بزرگ‌تر است که امکان ایجاد مکان‌های فعال بیشتری برای تعامل و جذب مولکول‌های آب فراهم می‌کند. شکل ۷ منحنی TGA بلورهای MOF-801 سنتز شده را نشان می‌دهد. کاهش وزن به میزان ۲۳٪ در دمای زیر ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل حذف آب جذب‌شده و مولکول‌های مهمان محبوس درون حفرات جاذب رخ می‌دهد. سپس، کاهش وزن شدیدی از دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد آغاز شده و تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد ادامه می‌یابد که این ناشی از تجزیه اسید فوماریک و شکستن گروه‌های کربوکسیلاتی است. این مشاهده نشان‌دهنده پایداری حرارتی عالی جاذب است [۱۳، ۲۱].

مورفولوژی و اندازه نمونه‌های سنتز شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) و میکروسکوپ

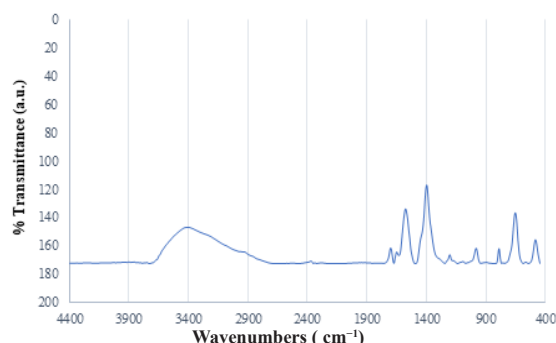


شکل ۴. الگوهای پراش پرتو ایکس چارچوب فلز-آلی زیرکونیوم (الف) در این پژوهش (ب) مرجع [۱۴].

Figure 4. X-ray diffraction patterns of zirconium-based metal-organic framework: (a) in this study, (b) reference.

افزایش مساحت پیک OH در نمونه MOF-801 سنتز شده به روش سبز نشان می‌دهد که این نمونه حاوی گروه‌های عاملی آب‌دوست بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها است. در نتیجه، ممکن است فرصت‌های بیشتری برای تعاملات بین‌مولکولی و پیوندهای هیدروژنی وجود داشته باشد که می‌تواند به بهبود رفتار جذب آب در نمونه MOF-801 سنتز شده به روش سبز منجر شود.

بنابراین، استفاده از آب در سنتز MOF-801، نه تنها مشکل استفاده از حلال‌های سمی مانند DMF را برطرف می‌کند، بلکه



شکل ۵. آزمون طیف سنجی تبدیل فوریه‌ی مادون قرمز.

Figure 5. Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy test.

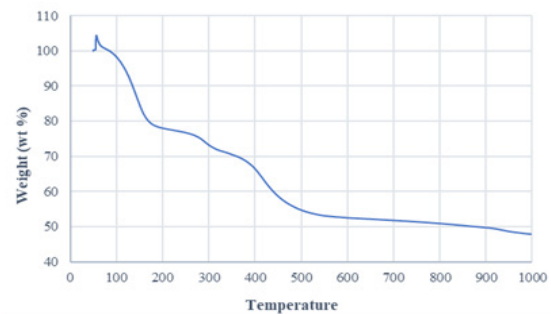
منجر به تشکیل گروه‌های عاملی آب‌دوست بیشتر می‌شود که برای جذب آب مزیت محسوب می‌شود.

نمودار شکل ۶، ایزوترم‌های جذب-دفع نیتروژن و توزیع اندازه میکروحفرات نمونه‌های پودری MOF-801 را نشان می‌دهد که به ایزوترم جذب نوع I مربوط می‌شود [۲۱]. شایان ذکر است که انحنای جزئی در منحنی ایزوترم جذب در نمونه می‌تواند به وجود برخی نقص‌ها نسبت داده شود [۲۲]. علاوه بر این، طبق گزارش Li، افزایش جذب نیتروژن در طی فرآیند جذب فیزیکی در نمونه MOF-801 سنتز شده به روش سبز را می‌توان به وجود بیشترین نقص‌ها در ساختار آن نسبت داد، در مقایسه با سایر

متفاوت است. در شکل ۹ دیده می‌شود که 90-G-MOF-801 در پایان فرآیند ۲۴ ساعته جذب، به حداکثر ظرفیت جذب ۴۱/۳ گرم در هر ۱۰۰ گرم می‌رسد و حداکثر ظرفیت جذب آن ۹۲٪ بیشتر از 70-G-MOF-801 است. همچنین، نمودارهای کوچک داخل کادر در شکل ۹ میزان آب حذف شده از کل آب جذب شده در نمونه‌های مربوطه را در پایان فرآیند دفع نشان می‌دهند. دیده می‌شود که آب جذب شده در 90-G-MOF-801 و 110-G-MOF-801 در طول فرآیند دفع، به‌طور کامل حذف شده است، در حالی که در مورد 70-G-MOF-801، این مقدار ۶۱٪ کاهش یافته است. این تفاوت قابل توجه را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد برای حذف کامل آب جذب شده از حفرات جاذب و آماده‌سازی کافی مکان‌های جاذب برای فرآیند جذب، ناکافی است.

مشخص است که دمای فعال‌سازی ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد نیز تأثیر مطلوبی بر عملکرد جذب نمونه دارد. در مطالعات قبلی نشان داده شده است که MOF-801 در مقایسه با سایر جاذب‌ها، دمای فعال‌سازی پایین‌تری دارد و مشاهدات حاضر نیز تأیید می‌کنند که دمای فعال‌سازی بهینه برای جاذب‌های MOF-801 برابر با ۹۰ درجه سانتی‌گراد است [۱۳، ۱۴].

با مقایسه مقادیر ظرفیت جذب این نمونه با سایر جاذب‌های مشابه که به روش‌های دیگر سنتز شده‌اند، می‌توان این تفاوت در عملکرد را در وهله اول به مساحت سطح ویژه به‌مراتب بزرگ‌تر نمونه MOF-801 سنتز شده به روش سبز نسبت داد. علاوه بر این، وجود نقص‌های ساختاری بیشتر و گروه‌های عاملی آب‌دوست بیشتر در نمونه MOF-801 سنتز شده به روش سبز نسبت به نمونه‌هایی که با روش‌های دیگر سنتز شده‌اند نیز ممکن است در این تفاوت مؤثر باشد. بنابراین، علاوه بر استفاده از آب به‌جای DMF سمی به‌عنوان حلال در سنتز 90-G-MOF-801، این نمونه در مقایسه با نمونه‌هایی که با روش‌های دیگر سنتز شده‌اند،



شکل ۷. نمودار حاصل از آزمون (TGA) مرتبط با نمونه.

Figure 7. Graph obtained from thermogravimetric analysis (TGA) test related to the sample.

الکترونی عبوری (TEM) بررسی شد.

تصاویر FESEM نشان می‌دهند که نمونه MOF-801 سنتز شده به روش سبز دارای پراکندگی و توزیع اندازه یکنواخت می‌باشد، شکل ۸. همچنین نمونه دارای ساختار هشت‌وجهی می‌باشد که تمایل به تبلور به‌صورت ذرات کروی دارد [۲۴]. این یافته‌ها با مطالعات قبلی مطابقت دارند که نشان می‌دهند سنتز MOF-801 مبتنی بر آب عمدتاً منجر به تشکیل ذرات کروی به‌جای ساختارهای هشت‌وجهی می‌شود. از سوی دیگر، با توجه به تصاویر FESEM شکل ۸ - (a, b) و TEM شکل ۸ - (c, d)، مشاهده می‌شود که اندازه ذرات نمونه MOF-801 کمتر از ۲۰۰ نانومتر است که با مقادیر گزارش شده در مطالعات قبلی همخوانی دارد [۲۵].

### ۲-۳- دمای فعال‌سازی

هر نمونه بر اساس دمای فعال‌سازی متناظر با آن نام‌گذاری شده است. برای مثال، 90-MOF-801 به MOF-801 اشاره دارد که تا دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شده است تا آب جذب شده درون آن حذف شود. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود عملکرد جذب در جاذب‌ها بسته به دمای فعال‌سازی

شکل ۸. تصاویر FESEM از 90-G-MOF-801 (a, b) و تصاویر TEM از 90-G-MOF-801 (c, d).

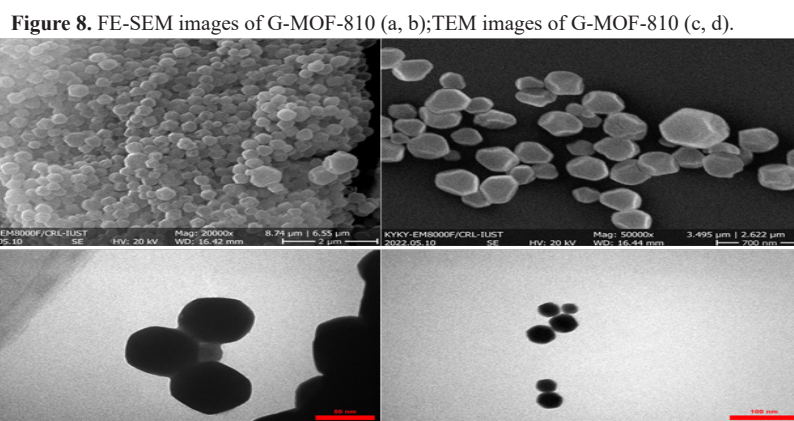
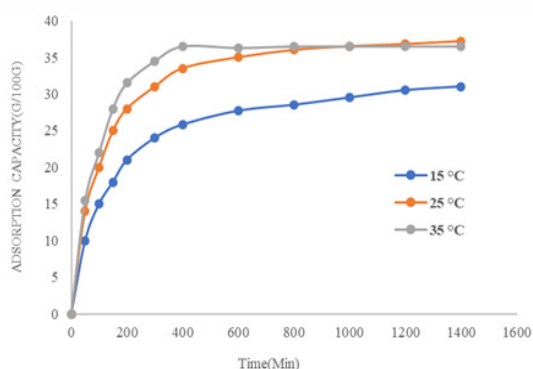


Figure 8. FE-SEM images of G-MOF-810 (a, b); TEM images of G-MOF-810 (c, d).

شدن آن‌ها از مکان‌های جذب درون جاذب‌ها می‌شود. در نتیجه، این امر منجر به کاهش کارایی جذب در نمونه‌ها می‌شود [۲۹].



شکل ۱۰. رفتار جذب آب G-MOF-801 در دماهای مختلف.

**Figure 10.** Water sorption behavior of G-MOF-801 at different temperatures.

بر اساس شکل ۱۰، بیشترین ظرفیت جذب در G-MOF-801 نیز در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود که مقدار آن ۳۷/۲ گرم در هر ۱۰۰ گرم است.

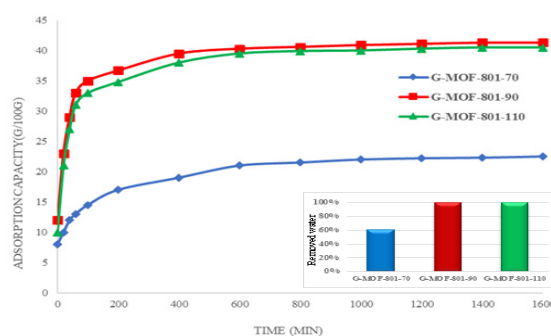
### ۳-۴- تأثیر رطوبت نسبی بر جذب آب

انتظار می‌رود که رطوبت تأثیر قابل توجهی بر عملکرد جذب آب یک جاذب داشته باشد. در این راستا، عملکرد جذب آب جاذب‌های سنتز شده در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد ( $\pm 1$ ) و در شرایط مختلف رطوبت نسبی ۳۰٪، ۵۰٪ و ۸۰٪ ( $\pm 5\%$ ) بررسی شد. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، جاذب G-MOF-801 با افزایش رطوبت، عملکرد جذب بهتری را نیز نشان می‌دهد. به‌طور خاص، با افزایش رطوبت از ۳۰٪ به ۵۰٪، حداکثر ظرفیت جذب G-MOF-801، ۱۶٪ افزایش می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش رطوبت از ۵۰٪ به ۸۰٪، ظرفیت جذب حداکثری این جاذب نیز ۱۴٪ افزایش می‌یابد. این پدیده به‌طور طبیعی به این واقعیت نسبت داده می‌شود که با افزایش رطوبت نسبی، فشار بخار آب نیز در دمای ثابت افزایش می‌یابد که منجر به بهبود جذب آب در جاذب‌ها می‌شود. شایان ذکر است که حتی در رطوبت نسبی ۳۰٪، G-MOF-801 ظرفیت جذب قابل توجهی برابر با ۳۱/۴ گرم در هر ۱۰۰ گرم را نشان می‌دهد. این نتیجه نشان می‌دهد که MOF-801 حتی در شرایط رطوبت پایین (مانند مناطق شمال آفریقا) نیز می‌تواند کارایی قابل قبولی داشته باشد [۲۸].

### ۳-۵- نرخ جذب جاذب‌ها

نرخ جذب در ساعات اولیه نقش بسیار مهمی در تعیین کارایی جذب

عملکرد جذب آب برتری از خود نشان می‌دهد [۲۶، ۲۷].



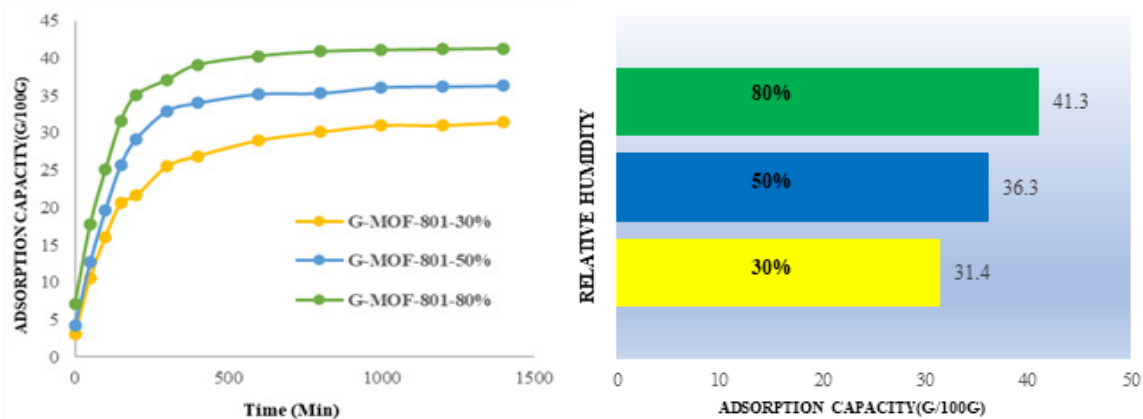
شکل ۹. رفتار جذب آب در G-MOF-801 در طول زمان؛

(ب) تصویر داخل کادر: مقدار آب دفع‌شده از کل آب جذب‌شده در نمونه پس از فرآیند واژب یک‌ساعته.

**Figure 9.** Water sorption behavior of G-MOF-801 with time; Inset: the amount of water removed from the total adsorbed water in corresponding samples after a 1-h desorption process.

### ۳-۳- تأثیر دما بر جذب آب

برای بررسی تأثیر دما بر عملکرد جذب جاذب‌های سنتز شده، نمونه‌ها ابتدا در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد فعال‌سازی شدند. سپس، آزمون‌های جذب در رطوبت نسبی کنترل‌شده ۵۰٪ ( $\pm 5\%$ ) در سه دمای مختلف ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد ( $\pm 1$  درجه سانتی‌گراد) انجام شد. نتایج در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، حداکثر ظرفیت جذب G-MOF-801 در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برابر با ۳۷/۲ گرم در هر ۱۰۰ گرم است، اما هنگامی که دما به ۱۵ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد، ظرفیت جذب به ۳۱ گرم در هر ۱۰۰ گرم کاهش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، حداکثر ظرفیت جذب G-MOF-801 در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد، ۱۵٪ کمتر از مقدار آن در ۲۵ درجه سانتی‌گراد است. به‌طور کلی، در رطوبت نسبی ثابت ۵۰٪، G-MOF-801 در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد عملکرد جذب بهینه خود را نشان می‌دهد. هنگامی که دما به ۳۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، حداکثر ظرفیت جذب G-MOF-801 نسبت به مقدار آن در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، ۳٪ کاهش می‌یابد. علاوه بر این، همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، منحنی‌های جذب آب MOF-801 در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد پس از گذشت ۶ ساعت، علائمی از ناپایداری نشان می‌دهند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که دمای بالا می‌تواند باعث کاهش جزئی در ظرفیت جذب آب جاذب‌ها تحت شرایط رطوبت نسبی ثابت شود. رفتار مشابهی قبلاً در جاذب MIL-101 (Cr) نیز مشاهده شده است [۲۸]. این پدیده را می‌توان به فعال شدن برخی مولکول‌های آب در دماهای بالاتر نسبت داد، که باعث جدا



شکل ۱۱. (الف) رفتار جذب آب G-MOF-801 در رطوبت نسبی‌های مختلف؛

(ب) حداکثر ظرفیت جذب G-MOF-801 در رطوبت نسبی‌های مختلف و در دمای ثابت ۲۵ درجه سلسیوس.

**Figure 11.** (a) Water absorption behavior of G-MOF-801 at different relative humidities; (b) Maximum adsorption capacity of G-MOF-801 at different relative humidities and at a constant temperature of 25°C.

قابل توجهی بالاتری نسبت به چهار ساعت بعدی دارند. بنابراین، در شرایطی که محدودیت زمانی برای استفاده از جاذب جهت جذب آب وجود دارد، MOF-801 می‌تواند به‌عنوان یک گزینه مناسب در نظر گرفته شود، زیرا نشان داده است که در ساعات اولیه فرآیند جذب، سطح بالایی از جذب را ارائه می‌دهد. علاوه بر این، بیشترین نرخ جذب در G-MOF-801 در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۸۰٪ مشاهده شده است. همچنین، مشاهده می‌شود که با افزایش دما و سطح رطوبت نسبی، نرخ جذب I نیز افزایش می‌یابد. بر اساس جدول ۳، می‌توان نتیجه گرفت که حفرات جاذب‌ها در سطوح رطوبتی بالا، در مقایسه با سطوح رطوبتی پایین سریع‌تر اشباع می‌شوند. در نتیجه، با افزایش سطح رطوبت، نرخ جذب II نیز کاهش می‌یابد.

### ۳-۶- عملکرد باز استفاده‌پذیری جاذب

برای یک جاذب مناسب، حفظ کارایی در طی چرخه‌های جذب و

آب هنگام استفاده از جاذب‌ها برای این هدف ایفا می‌کند. یکی از مشاهدات مهم در تمامی منحنی‌های جذب آب MOF-801، نرخ جذب بالایی جاذب‌ها در چهار ساعت اولیه فرآیند جذب است. در نتیجه، بیشتر فرآیند جذب آب در همین بازه زمانی رخ می‌دهد [۲۸، ۳۰]. برای مثال، در شرایط دمایی ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰٪ (شکل ۱۱)، حدود ۷۸٪ از حداکثر ظرفیت جذب در چهار ساعت اول به دست می‌آید. به همین ترتیب، در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۸۰٪، این مقدار به حدود ۹۰٪ افزایش می‌یابد. بنابراین، برای بررسی نرخ جذب G-MOF-801 در شرایط دمایی و رطوبتی مختلف، نرخ جذب در چهار ساعت اول که «نرخ جذب I» نامیده می‌شود، با نرخ جذب در چهار ساعت بعدی که «نرخ جذب II» نام دارد، مقایسه شد. نتایج این بررسی در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است. بر اساس یافته‌های ارائه‌شده در جداول ۲ و ۳، مشخص است که جاذب‌ها در چهار ساعت اول، نرخ جذب آب

جدول ۲. حداکثر ظرفیت جذب و نرخ جذب G-MOF-801 در رطوبت نسبی ۵۰٪.

Table 2. Maximum adsorption capacity and adsorption rate of G-MOF-801 at 50% RH.

Sample	Temperature (°C)	Maximum adsorption capacity (g/100 g)	Adsorption rate I (g kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	Adsorption rate II (g kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )
G-MOF-801	15	31.3	59.0	10.7
	25	36.2	70.2	14.2
	35	36.0	77.0	12.7

جدول ۳. حداکثر ظرفیت جذب و سرعت جذب G-MOF-801 در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد.

Table 3. Maximum adsorption capacity and adsorption rate of G-MOF-801 at 25 °C.

Sample	RH (%)	Maximum adsorption capacity (g/100 g)	Adsorption rate I (g kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	Adsorption rate II (g kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )
G-MOF-801	30	31.5	44.2	17.0
	50	36.2	70.2	14.2
	80	41.1	92.5	7.5

مساحت سطح ویژه جاذب پس از ۲۰ چرخه به  $600 \text{ m}^2/\text{g}$  کاهش یافته است که معادل ۱۳٪ کاهش نسبت به مقدار اولیه آن است. این کاهش می‌تواند به عواملی مانند تخریب جزئی ساختار یا فرسودگی جاذب نسبت داده شود. با این حال، این میزان کاهش را می‌توان ناچیز در نظر گرفت. در نتیجه، نتایج فوق نشان می‌دهند که MOF-801 پایداری عالی‌ای را در طی چرخه‌های متعدد نشان می‌دهد.

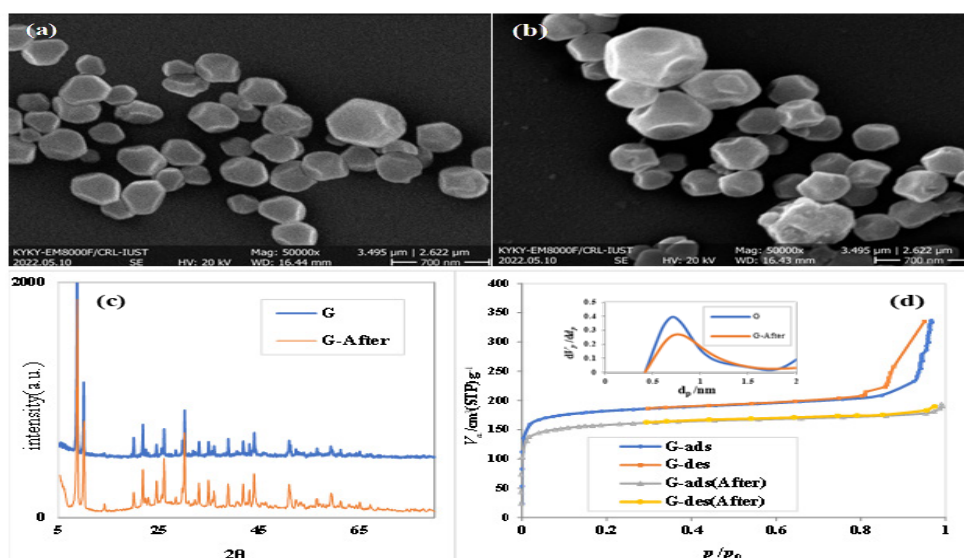
### ۳-۷- بررسی عملکرد بازیافت‌پذیری جاذب

برای بررسی عملکرد بازیافت‌پذیری جاذب، عملکرد جذب آب MOF-801 طی ۶ چرخه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد ( $\pm 1$ ) و رطوبت نسبی  $80 \pm 5\%$  مورد آزمایش قرار گرفت. این ارزیابی با هدف بررسی این موضوع انجام شد که آیا MOF-801 ویژگی‌های جاذب آب خود را به‌طور مداوم حفظ کرده و در دوره‌های طولانی مدت استفاده، بادوام و قابل اعتماد باقی می‌ماند یا خیر. برای این منظور، پس از هر آزمون جذب تحت شرایط دمایی و رطوبتی ذکر شده، جاذب تا دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد گرم شد تا آب جذب‌شده از آن حذف شود و سپس مجدداً تحت شرایط مشابه مورد آزمایش قرار گرفت. حداکثر ظرفیت جذب MOF-801 در پایان فرآیند ۲۴ ساعته جذب، برای هر چرخه در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عملکرد جذب MOF-801 در طول ۶ چرخه نسبتاً ثابت باقی می‌ماند

دفع متوالی، بدون کاهش قابل توجه عملکرد، بسیار حائز اهمیت است [۳۲]. بنابراین، این جنبه در این بخش به‌طور کامل بررسی خواهد شد.

در این بخش ویژگی‌ها و عملکرد MOF-801 در طی چندین چرخه بررسی خواهد شد. شایان ذکر است که هر چرخه ۲۴ ساعت به طول انجامید و این چرخه‌ها تحت شرایط دمایی و رطوبتی مختلف انجام شدند. برای این منظور، پس از هر چرخه جذب، MOF-801 تحت فرآیند دفع آب در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا آب جذب‌شده از آن حذف شود و سپس برای چرخه جذب بعدی مورد استفاده قرار گرفت. شکل‌های a-12 و b-12، تصاویر FESEM از MOF-801 را قبل از اولین چرخه و پس از بیستمین چرخه جذب-دفع نشان می‌دهند. تصاویر FESEM نشان می‌دهند که ذرات MOF-801 پس از طی چندین چرخه جذب-دفع، نشانه‌هایی از تغییر شکل جزئی را نسبت به شکل اولیه خود نشان می‌دهند. علاوه بر این، بر اساس مشاهدات شکل c-12، مشخص است که حتی پس از چندین چرخه، بلورین بودن MOF-801 بدون تغییر باقی مانده است.

نمودار شکل d-12 و نمودار کوچک درون آن، تأثیر ۲۰ چرخه جذب-دفع آب بر جذب فیزیکی نیتروژن و توزیع اندازه حفرات در MOF-801 را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس از چرخه‌های متوالی جذب، اندازه حفرات MOF-801 نسبتاً پایدار باقی مانده و تغییرات قابل توجهی در آن دیده نمی‌شود.



شکل ۱۲. تصاویر FE-SEM از MOF-801 پیش از نخستین چرخه جذب (الف) و پس از بیستمین چرخه جذب - واجذب (ب)؛ الگوی XRD (ج) و ایزوترم فیزیکی جذب نیتروژن در دمای ۷۷ کلوین و منحنی توزیع اندازه حفره‌ها (تصویر داخل شکل) (د) مربوط به MOF-801 در طول آزمون چرخه‌ای جذب - واجذب.

**Figure 12.** FESEM images of GS-MOF-801 before the first adsorption cycle (a) and after the 20th adsorption-desorption cycle (b); XRD pattern (c) and the nitrogen physisorption at 77 K and pore size distribution curve (inset) (d) of G-MOF-801 during adsorption-desorption cycling test.

نرخ جذب سریع در ساعات اولیه، قابلیت به کارگیری این ماده را در سامانه‌هایی با محدودیت زمانی بالا افزایش می‌دهد. پایداری عملکرد MOF-801 در چرخه‌های متعدد جذب-واحد نیز به اثبات رسید و کاهش محسوسی در ظرفیت جذب مشاهده نگردید، که این ویژگی، آن را برای استفاده طولانی‌مدت در سامانه‌های تولید آب از رطوبت هوا مناسب می‌سازد.

به‌طور کلی، این یافته‌ها پتانسیل MOF-801 را به‌عنوان یک جاذب آب نویدبخش با پایداری عالی و عملکرد جذب بهبودیافته نشان می‌دهند که آن را برای برداشت آب حتی در شرایط رطوبت پایین، مناسب می‌سازد.

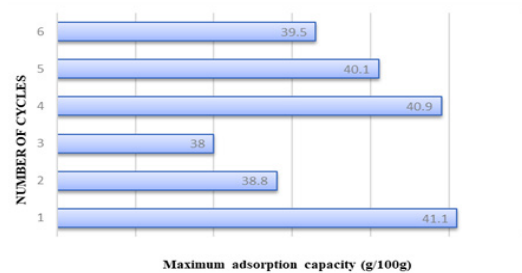
در ادامه، ماده سنتز شده در طراحی و ساخت یک دستگاه قابل حمل برای استخراج آب از رطوبت هوا به کار گرفته شد. این سامانه که شامل اجزایی چون محفظه شفاف، گرم‌کن، پیمانه گرما-برقی، بادزن و پره گرماگیر است، در یک چرخه عملکردی ۳ ساعته (۲/۵ ساعت جذب + ۰/۵ ساعت واحد) موفق شد در مقیاس نیمه‌صنعتی با ۱۰۰۰ گرم MOF-801 حدود ۳ لیتر آب در شبانه‌روز تولید نماید.

تحلیل اقتصادی پروژه نشان داد که استفاده از قطعات داخلی و سنتز ارزان قیمت MOF موجب کاهش چشمگیر هزینه ساخت شده و مصرف انرژی دستگاه (حدود ۱/۶ کیلووات‌ساعت در روز) هزینه تولید آب را به کمتر از ۱۰۰ تومان به‌ازای هر لیتر می‌رساند. همچنین، قابلیت استفاده از پنل خورشیدی به عنوان منبع انرژی، پایداری و بهره‌وری این سامانه را برای مناطق فاقد زیرساخت و شرایط بحرانی افزایش داده است.

مزیت‌های کلیدی این طرح عبارت‌اند از:

- به کارگیری جاذب نانو ساختار پیشرفته با راندمان بالا
  - طراحی ماژولار و قابل حمل مناسب کاربرد میدانی
  - مصرف انرژی پایین و قابلیت بهره‌برداری با منابع تجدیدپذیر
  - امکان تولید آب پایدار در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک
- بنابراین این نتایج نشان می‌دهد که ترکیب نانوفناوری، مهندسی انرژی و طراحی بهینه، راهکارهایی عملی، مؤثر و پایدار برای مدیریت بحران آب فراهم می‌سازند و می‌توانند سهم قابل توجهی در آینده تأمین آب شرب در مناطق خشک ایفا نمایند.

و ظرفیت جذب حدود ۳۹/۵ گرم در هر ۱۰۰ گرم حفظ می‌شود. بنابراین، این جاذب، پایداری عملکرد بالایی را در طی ۶ چرخه نشان می‌دهد. شایان ذکر است که افزایش جزئی مشاهده شده در چرخه‌های چهارم و پنجم می‌تواند به بهبود فرآیند حذف آب از داخل حفرات در طول مرحله دفع آب پیش از چرخه بعدی نسبت داده شود. علاوه بر این، عدم کاهش قابل توجه در ظرفیت جذب در طی این چرخه‌ها نشان می‌دهد که جاذب دچار هیچ‌گونه فرسودگی یا تخریب ساختاری در طی این ۶ چرخه نشده است.



شکل ۱۳. عملکرد جذب آب G-MOF-801 در طی آزمون چرخه‌ای جذب-واحد. Figure 13. The water adsorption performance of GS-MOF-801 during adsorption-desorption cycling test.

## ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، عملکرد جذب آب در چارچوب فلز-آلی G-MOF-801، با تمرکز بر پارامترهایی نظیر گروه‌های عاملی آب‌دوست، مساحت سطح ویژه جاذب و شرایط محیطی مورد بررسی قرار گرفت. سنتز MOF-801 به روش سبز و بدون استفاده از حلال‌های آلی، در دمای محیط انجام شد و نتایج مشخصه‌یابی‌های فاز جامد و سطح نشان داد که نمونه سنتز شده از کیفیت ساختاری بالایی برخوردار است.

از جمله ویژگی‌های مهم MOF-801 سنتز شده به این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- اندازه دانه کوچک‌تر (زیر ۲۰۰ نانومتر)
- حضور بیشتر گروه‌های عاملی آب‌دوست
- سطح ویژه بالا (بیش از ۶۹۰ m<sup>2</sup>/g)
- احتمال وجود تعداد بیشتری نقص در ساختار آن.

این ویژگی‌ها سبب بهبود قابل توجه در ظرفیت جذب رطوبت حتی در رطوبت نسبی پایین گردید. علاوه بر این، جاذب‌ها باید در حداقل دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد فعال شوند تا عملکرد بهینه جذب خود را نشان دهند. حداکثر ظرفیت جذب MOF-801 در شرایط دمایی ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۸۰٪ مشاهده شد. (حداکثر ظرفیت جذب G-MOF-801 برابر با ۴۱/۱ گرم در هر ۱۰۰ گرم). همچنین، MOF-801 حتی در شرایط رطوبت پایین نیز ظرفیت جذب قابل توجهی از خود نشان داد.

## ۵- مراجع

- [1] H. Lin, Y. Yang, Y. C. Hsu, J. Zhang, C. Welton, I. Afolabi, M. Loo, and H. C. Zhou, "Metal-organic frameworks for water harvesting and concurrent carbon capture: a review for hygroscopic materials," *Advanced Materials*, vol. 36, no. 12, pp. 2209073, 2024.
- [2] T. L. Nguyen, A. Ayub, A. Anam, A. M. Aljuwayid, S. W. Alwash, R. Abbass, A. A. K. Ruhaima, E. Potrich, M. Sillanpaa, and S. Gul, "Fabrication of ZnO decorated porous chitosan beads for the sustainable bioremediation of Cr (VI) contaminated water," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 11, no. 5, pp. 110445, 2023.
- [3] M. Bilal, M. Sultan, T. Morosuk, W. Den, U. Sajjad, M. M. Aslam, M. W. Shahzad, and M. Farooq, "Adsorption-based atmospheric water harvesting: A review of adsorbents and systems," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 133, pp. 105961, 2022.
- [4] M. J. Kalmutzki, C. S. Diercks, and O. M. Yaghi, "Metal-organic frameworks for water harvesting from air," *Advanced Materials*, vol. 30, no. 37, pp. 1704304, 2018.
- [5] N. Hanikel, M. S. Prévot, and O. M. Yaghi, "MOF water harvesters," *Nature nanotechnology*, vol. 15, no. 5, pp. 348-355, 2020.
- [6] X. Liu, D. Beysens, and T. Bourouina, "Water harvesting from air: current passive approaches and outlook," *ACS Materials Letters*, vol. 4, no. 5, pp. 1003-1024, 2022.
- [7] H. A. Almassad, R. I. Abaza, L. Siwwan, B. Al-Maythaly, and K. E. Cordova, "Environmentally adaptive MOF-based device enables continuous self-optimizing atmospheric water harvesting," *Nature communications*, vol. 13, no. 1, pp. 4873, 2022.
- [8] J. Xu, T. Li, J. Chao, S. Wu, T. Yan, W. Li, B. Cao, and R. Wang, "Efficient solar-driven water harvesting from arid air with metal-organic frameworks modified by hygroscopic salt," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 59, no. 13, pp. 5202-5210, 2020.
- [9] K. Ahmad, M. A. Nazir, A. K. Qureshi, E. Hussain, T. Najam, M. S. Javed, S. S. A. Shah, M. K. Tufail, S. Hussain, and N. A. Khan, "Engineering of Zirconium based metal-organic frameworks (Zr-MOFs) as efficient adsorbents," *Materials science and engineering: B*, vol. 262, pp. 114766, 2020.
- [10] S. S. A. Shah, A. El Jery, T. Najam, M. A. Nazir, L. Wei, E. Hussain, S. Hussain, F. B. Rebah, and M. S. Javed, "Surface engineering of MOF-derived FeCo/NC core-shell nanostructures to enhance alkaline water-splitting," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 8, pp. 5036-5043, 2022.
- [11] Y. Meng, Y. Dang, and S. L. Suib, "Materials and devices for atmospheric water harvesting," *Cell Reports Physical Science*, vol. 3, no. 7, 2022.
- [12] S. Dai, Farid Nouar, Sanjun Zhang, Antoine Tissot, and Christian Serre., "One-step room-temperature synthesis of metal (IV) carboxylate metal-organic frameworks.," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 133, pp. 4328-4334, 2021.
- [13] N. Prasetya, and K. Li, "Synthesis of defective MOF-801 via an environmentally benign approach for diclofenac removal from water streams," *Separation and Purification Technology*, vol. 301, pp. 122024, 2022.
- [14] M. He, L. Wang, Y. Lv, X. Wang, J. Zhu, Y. Zhang, and T. Liu, "Novel polydopamine/metal organic framework thin film nanocomposite forward osmosis membrane for salt rejection and heavy metal removal," *Chemical Engineering Journal*, vol. 389, pp. 124452, 2020.
- [15] J. Sun, Q. Li, G. Chen, J. Duan, G. Liu, and W. Jin, "MOF-801 incorporated PEBA mixed-matrix composite membranes for CO<sub>2</sub> capture," *Separation and Purification Technology*, vol. 217, pp. 229-239, 2019.
- [16] L. J. Johnson, G. Paulo, L. Bartolomé, E. Amayuelas, A. Gubbiotti, D. Mirani, A. Le Donne, G. A. López, G. Grancini, and P. Zajdel, "Optimization of the wetting-drying characteristics of hydrophobic metal organic frameworks via crystallite size: The role of hydrogen bonding between intruded and bulk liquid," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol.

645, pp. 775-783, 2023.

[17] S. R. Rajpoot, K. Ahmad, H. M. Asif, M. A. Madni, M. W. Tasleem, F. Zafar, H. Majeed, A. Khalid, H. A. S. Hashmi, and M. R. Aslam, "Study of anti-inflammatory and anti-arthritic potential of curcumin-loaded Eudragit L100 and hydroxy propyl methyl cellulose (HPMC) microparticles," *Polymer Bulletin*, vol. 81, no. 5, pp. 4335-4350, 2024.

[18] Q. Li, Q. Liu, J. Zhao, Y. Hua, J. Sun, J. Duan, and W. Jin, "High efficient water/ethanol separation by a mixed matrix membrane incorporating MOF filler with high water adsorption capacity," *Journal of Membrane Science*, vol. 544, pp. 68-78, 2017.

[19] H. M. Asif, F. Zafar, K. Ahmad, A. Iqbal, G. Shaheen, K. A. Ansari, S. Rana, R. Zahid, and S. Ghaffar, "Synthesis, characterization and evaluation of anti-arthritic and anti-inflammatory potential of curcumin loaded chitosan nanoparticles," *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, pp. 10274, 2023.

[20] M. R. Shaik, S. F. Adil, Z. A. AlOthman, and O. M. Alduhaish, "Fumarate based metal-organic framework: an effective catalyst for the transesterification of used vegetable oil," *Crystals*, vol. 12, no. 2, pp. 151, 2022.

[21] M. Ganesh, P. Hemalatha, M. M. Peng, W. S. Cha, and H. T. Jang, "Zr-fumarate MOF a novel CO<sub>2</sub>-adsorbing material: Synthesis and characterization," *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 14, no. 6, pp. 1605-1612, 2014.

[22] M. Saidi, P. H. Ho, P. Yadav, F. Salles, C. Charnay, L. Girard, L. Boukli-Hacene, and P. Trems, "Zirconium-based metal organic frameworks for the capture of carbon dioxide and ethanol vapour. A comparative study," *Molecules*, vol. 26, no. 24, pp. 7620, 2021.

[23] C. Yang, H. Wu, J. Yun, J. Jin, H. Meng, J. Caro, and J. Mi, "Engineering of Defective MOF-801 Nanostructures within Macroporous Spheres for Highly Efficient and Stable Water Harvesting," *Advanced Materials*, vol. 35, no. 31, pp. 2210235, 2023.

[24] G. Zahn, H. A. Schulze, J. Lippke, S. König, U. Sazama, M. Fröba, and P. Behrens, "A water-born

Zr-based porous coordination polymer: modulated synthesis of Zr-fumarate MOF," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 203, pp. 186-194, 2015.

[25] F. Ke, C. Peng, T. Zhang, M. Zhang, C. Zhou, H. Cai, J. Zhu, and X. Wan, "Fumarate-based metal-organic frameworks as a new platform for highly selective removal of fluoride from brick tea," *Scientific reports*, vol. 8, no. 1, pp. 939, 2018.

[26] V. V. Butova, I. A. Pankin, O. A. Burachevskaya, K. S. Vetlitsyna-Novikova, and A. V. Soldatov, "New fast synthesis of MOF-801 for water and hydrogen storage: Modulator effect and recycling options," *Inorganica Chimica Acta*, vol. 514, pp. 120025, 2021.

[27] M. Solovyeva, L. Gordeeva, T. Krieger, and Y. I. Aristov, "MOF-801 as a promising material for adsorption cooling: Equilibrium and dynamics of water adsorption," *Energy conversion and management*, vol. 174, pp. 356-363, 2018.

[28] H. Zhao, Q. Li, Z. Wang, T. Wu, and M. Zhang, "Synthesis of MIL-101 (Cr) and its water adsorption performance," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 297, pp. 110044, 2020.

[29] S. H. Othman, N. R. Kechik, R. A. Shapi'i, R. A. Talib, and I. S. Tawakkal, "Water sorption and mechanical properties of starch/chitosan nanoparticle films," *Journal of Nanomaterials*, vol. 2019, no. 1, pp. 3843949, 2019.

[30] I. Jahan, M. A. Islam, T. H. Rupam, M. L. Palash, K. A. Rocky, and B. B. Saha, "Enhanced water sorption onto bimetallic MOF-801 for energy conversion applications," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 32, pp. e00442, 2022.