Applied Biology, Volume 11, Issue 41, 2021

Review Article

A review of the potentials of metal-organic nanostructures in food safety[1]

Mohammad Ali Ghasemzadeh | Associate Professor, Department of Chemistry, Qom Branch, Islamic Azad University, Qom, Iran **(Corresponding Author).** Ghasemzadeh@qom-iau.ac.ir
Reyhaneh Moughari | B.A. Department of Chemistry, Qom Branch, Islamic Azad University, Qom, Iran. moghari.reyhane@gmail.com
Fatimah Bagheri | B.A. Department of Chemistry, Qom Branch, Islamic Azad University, Qom, Iran. f.baqeri98@gmail.com

Abstract

Background: Food safety has always been a major global challenge for human health. The demand for sustainability, product safety improvement and high quality standards have always been important in all areas of the biological sciences such as the food industry, which requires close monitoring and continuously throughout the food supply chain. In this area, the suitable and satisfactory food packaging in the industry is the basis for maintaining and preserving proper and suitable quality and safety in food. Despite the industry's efforts to produce safe products, food products may become contaminated during the process or from contaminated raw materials. Therefore, to solve the problems and defects related to food safety, several strategies and approaches have been considered and designed. Among various pathways the use of metal-organic frameworks is a new opportunity and challenges to ensure the quality and safety of food. Metal-organic frameworks are known as fundamental class of porous nonmaterial which has unique physical and chemical properties promising in a food safety program. These nanoporus materials have recently attracted a lot of attentions and have found their way into various industries, including the food industry, and have shown great potential for practical development because of a wide range of applications in diverse fields. This article tries to emphasize and introduce this technology with a brief overview of the use of metal-organic frameworks in the food industry in three subsets of packaging, storage and cleaning, and their applications in this industry and the advantages and benefits which come with using it.

Results: In summary, it can be said that MOFs have shown exciting potential in the field of food safety and have shown all their efficiency through the ability to be used in different parts of the process. Emerging MOFs or composite-based MOFs have been considered as a practical coating in intelligent food packaging, for the controlled release of preservatives and to monitor food safety. Therefore, these materials need to have

1. **Received:** 2020/11/10 ; **Accepted:** 2021/03/12
**Copyright © the authors
http://sjoapb.journal.qom-iau.ac.ir

excellent adsorption and stability properties; Be further developed for use in packaging. MOFs have also been shown to be effective in eliminating hazardous substances in the food supply chain. Therefore, the need to synthesize new multifunctional MOFs to remove contaminants is essential. Finally, while MOFs are a promising substance to help improve food safety at various stages of the food chain; However, precise control of the pore size and volume of these frameworks for specific applications is still a challenge, so more attention needs to be paid to achieving high quality MOFs for use in food safety. Further research is also needed on the toxicity of MOFs.

Keywords: Metal-organic frameworks, Food safety, Food packaging, Noanoporous.

بیولوژی کاربردی، دوره ۱۱، شماره ۴۱، بهار ۱۴۰۰

مقاله مروری

مروری بر پتانسیل‌های نانوساختارهای فلزی– آلی در ایمنی مواد غذایی[1]

محمدعلی قاسم‌زاده | دانشیار، گروه شیمی، واحد قم، دانشگاه آزاد اسلامی، قم، ایران (**نویسنده مسئول**). Ghasemzadeh@qom-iau.ac.ir
ریحانه موقاری | کارشناسی، گروه شیمی، واحد قم، دانشگاه آزاد اسلامی، قم، ایران. moghari.reyhane@gmail.com
فاطمه باقری | کارشناسی، گروه شیمی، واحد قم، دانشگاه آزاد اسلامی، قم، ایران. f.baqeri98@gmail.com

چکیده

هدف: ایمنی مواد غذایی، همواره یک چالش بزرگ جهانی برای سلامت انسان بوده است. تمایل به پایداری، بهبود ایمنی محصولات و استانداردهای بالای کیفیت در همه‌ی زمینه‌های علوم زیستی از جمله صنایع غذایی همواره حائز اهمیت بوده که این امر نیازمند نظارت دقیق در سراسر زنجیره‌ی تأمین مواد غذایی می‌باشد. در این حوزه، بسته‌بندی مناسب مواد غذایی در صنعت، پایه‌ای برای حفظ مناسب کیفیت و ایمنی در مواد غذایی است. اما علی‌رغم تلاش صنعت برای تولید محصولاتی ایمن، محصولات غذایی ممکن است در طول فرآیند، آلوده شوند یا از مواد اولیه و خام آلوده تهیه گردند. بنابراین، برای حل مشکلات مربوط به ایمنی غذا، استراتژی‌های متعددی اندیشیده و طراحی شده که در میان این رویکردها، استفاده از چارچوب‌های فلزی- آلی (MOFs)، فرصتی نو برای تضمین کیفیت و ایمنی مواد غذایی است. چارچوب‌های فلزی- آلی به عنوان دسته‌ای کاربردی از مواد نانو متخلخل، دارای خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به‌فردی هستند که وعده‌هایی را در برنامه‌ی ایمنی مواد غذایی نشان می‌دهند. این دسته از مواد، اخیراً توجه زیادی را به خود جلب کرده و راه خود را در صنایع مختلف از جمله صنایع غذایی باز نموده و پتانسیل بالایی را برای توسعه کاربردی در آن به نمایش گذاشته‌اند. پژوهش حاضر تلاش دارد با مروری مختصر درباره استفاده از چارچوب‌های فلزی- آلی در صنایع غذایی، در سه زیرمجموعه بسته‌بندی، نگهداری و پاک‌سازی به معرفی این فناوری پرداخته و به کاربردهای آنها در این صنعت و امتیازاتی که در سایه‌ی استفاده از این مواد حاصل می‌شود، بپردازد.

یافته‌ها: MOFها پتانسیل هیجان‌انگیزی را در زمینه ایمنی مواد غذایی به نمایش گذاشته و همه کارایی خود را از طریق توانایی استفاده در بخش‌های مختلف فرآیند نشان داده‌اند. موادMOF نوظهور یا MOFهای مبتنی بر مواد کامپوزیتی به عنوان یک پوشش کاربردی در بسته‌بندی هوشمند مواد غذایی، برای آزادسازی

۱. **تاریخ دریافت:** ۱۳۹۹/۰۸/۲۰ ؛ **تاریخ پذیرش:** ۱۳۹۹/۱۲/۲۲

کنترل شده مواد نگهدارنده و نظارت بر ایمنی مواد غذایی مورد توجه قرار گرفته‌اند. بنابراین، نیاز است این مواد که دارای خواص جذب و پایداری عالی هستند، بیشتر برای کاربرد در بسته‌بندی پرورش یابند. همچنین MOFها ثابت کرده‌اند که در از بین بردن مواد خطرناک در زنجیره تأمین مواد غذایی، موثر هستند. لذا، نیاز به سنتز MOFهای چند منظوره جدید برای حذف آلاینده‌ها ضروری می‌باشد. در حالی که MOFها یک ماده امیدوارکننده برای کمک به بهبود ایمنی مواد غذایی، در مراحل مختلف زنجیره غذایی هستند، اما کنترل دقیق بر اندازه و حجم منافذ این چارچوب‌ها برای کاربردهای خاص، هنوز یک چالش می‌باشد. بنابراین، نیاز است توجه بیشتری به دستیابی MOFهای با کیفیت بالا جهت استفاده در ایمنی مواد غذایی انجام شود. همچنین در خصوص سمّیت MOFها بایستی تحقیقات بیشتری صورت گیرد.

کلیدواژه‌ها: چارچوب‌های فلزی- آلی، ایمنی مواد غذایی، بسته‌بندی مواد غذایی، نانو متخلخل.

۱. مقدمه

محدوده‌ی زنجیره‌ی تأمین مواد غذایی از مزرعه به سفره، فرآیندی چند مرحله‌ای است که نگهداری، ذخیره‌سازی، بسته‌بندی، حمل و نقل و مصرف را شامل می‌شود (۱). از این‌رو خطرات ایمنی در مواد غذایی می‌تواند در هر مرحله از زنجیره‌ی مواد غذایی رخ دهد. لذا، به‌کارگیری کنترل و نظارت کافی در سراسر زنجیره مواد غذایی، امری مهم و ضروری تلقی می‌شود و نگرانی در مورد ایمنی مواد غذایی برای مصرف‌کننده، باعث شده است تا تحقیقات قابل توجهی برای ارزیابی شیوه‌های مصرف مواد غذایی انجام شود. بدین منظور بسته‌بندی مواد غذایی نقش مهمی در صنایع غذایی ایفا می‌کند که موجب بهبود ذخیره‌سازی، حمل و نقل و ماندگاری مواد غذایی می‌شود (۲). بسته‌بندی مواد غذایی همچنین می‌تواند تأثیر عوامل فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی موثر بر ایمنی مواد غذایی را به حداقل برساند (۳). بنابراین، تلاش‌های زیادی انجام شده است تا فناوری‌های مرتبط با مواد جدید برای بسته‌بندی مواد غذایی توسعه یابد (۴).

در سال‌های اخیر شاهد افزایش روش‌های جدیدی برای ایمنی و بسته‌بندی مواد غذایی بوده‌ایم. در میان روش‌های کارآمد، در سال ۲۰۱۸، Youssef و همکاران در گزارشی از مواد بیونانوکامپوزیت، برای بسته‌بندی مواد غذایی استفاده کردند. در این گزارش از بیوپلیمرهایی مانند پلی‌ساکاریدهایی چون کیتوسان CS (Chitosan)، کربوکسی متیل سلولز CMC (Carboxy Methyl Cellulose) و نشاسته به دلیل خاصیت تجزیه‌پذیری و عدم سمیّت آنها به منظور کاهش خطرات زیست محیطی استفاده شد. در این گزارش از نانو مواد لایه‌ای به منظور بهبود در جلوگیری از نفوذ اکسیژن و کربن دی‌اکسید در بسته‌بندی و همچنین عدم انتشار ترکیبات طعم‌دهنده از فیلم‌های بسته‌بندی استفاده شده است (۵).

Darwesh و همکاران (۲۰۱۹) از فیلم‌های نانوکامپوزیتی که مخلوطی از سلولز استات CA (Cellulose Acetate) و نانونقره هستند، به عنوان یک سیستم بسته‌بندی مواد غذایی ضد باکتریایی و ایمن در محیط زیست استفاده کردند. بدین منظور، نانوذرات نقره Ag NPs (Ag Nanoparticles) با استفاده از ترکیبات پلی فنولیک مختلف تهیه شدند (۶). در سال ۲۰۱۹ Al-Tayyar و همکاران گزارشی از مواد بسته‌بندی تخریب‌پذیر داشتند که می‌توانند نقش مهمی در حفظ سلامت اکوسیستم‌ها ایفا کنند. بدین منظور از ترکیب نانومواد مختلف در پلیمرهای زیست محیطی (مانند کیتوسان، نشاسته سیب زمینی، کربوکسی متیل سلولز، نشاسته ذرت و صمغ عربی) استفاده کردند. این مواد می‌توانند با تقویت فعالیت ضد میکروبی مواد بسته‌بندی شده، خواص مختلفی را بهبود بخشیده و از بروز

پاتوژن‌های ناشی از مواد غذایی جلوگیری کنند (۷). Ibrahim و همکاران (۲۰۱۹)، از فیلم‌های بسته‌بندی پوشش داده شده با نانوامولسیون و پلی لاکتیک اسید PLA (Poly Lactic Acid) به‌عنوان یک سیستم بسته‌بندی با ماندگاری طولانی برای فیله مرغ استفاده کردند (۸).

همچنین Topuz و همکاران (۲۰۱۹) از روش الکترودینگ که امکان تولید مواد بسته‌بندی نانوالیافی با نسبت‌های بزرگ به سطح را فراهم می‌کند، استفاده کردند که بارگذاری بیشتر عوامل فعال در مواد بسته‌بندی را امکان‌پذیر کرد. برخی عملکردهای این فرایند شامل عملکردهای ضدمیکروبی یا ضدقارچ و تهیه مواد ضدعفونی‌کننده مواد غذایی یا محافظت از آنتی اکسیدان‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی بوده است (۹).

Chowdhury و همکاران (۲۰۱۹) از بسته‌بندی هوشمند IP[1] در گوشت طیور و فراورده‌های گوشتی به منظور افزایش ماندگاری، کیفیت و ایمنی فراورده‌ها استفاده کردند (۱۰).

Seo و همکاران (۲۰۱۹)، از کلسیم اکسید به‌عنوان یک عامل ضدمیکروبی با کلسینه کردن مرجان‌های دریایی برای ذخیره‌سازی شیر استفاده کردند. در این پژوهش فیلم‌های کامپوزیت NY/LL-CORALS در بسته‌بندی مواد غذایی، عملکرد ضدمیکروبی بسیار خوبی در برابر باکتری‌های اشرشیاکلی و استافیلوکوکوس اورئوس به‌نمایش گذاشتند که به‌طور قابل توجهی چرخه رشد باکتری‌ها در شیر را به تأخیر می‌اندازد و آنها را به موادی کارآمد برای افزایش ماندگاری مواد غذایی تازه تبدیل می‌کند (۱۱).

بنابراین، ظهور مواد جدید، فرصت‌هایی را برای مقابله با چالش‌های پیش روی بسته‌بندی و ایمنی مواد غذایی فراهم کرده است که در این میان استفاده از چارچوب‌های فلزی- آلی MOFs (Metal-Organic Frameworks) از جدیدترین یافته‌ها در این زمینه می‌باشند (۱۲).

چارچوب‌های فلزی- آلی دسته‌ای از مواد بلوری متخلخل هستند که از خوشه‌های معدنی یا یون‌های فلزی، و با استفاده از لیگاندهای آلی چند منظوره تشکیل شده‌اند (۱۳). این دسته از مواد دارای توزیع اندازه و شکل مشخصی بوده و نوع فلز و اتصال‌دهنده تاثیر بسزایی روی ساختار و خواص چارچوب‌های فلزی- آلی دارد. این چارچوب‌ها حاصل بهره‌گیری از هر دو گروه مواد آلی و غیر آلی بوده و پتانسیل خوبی را در زمینه‌ی ایمنی مواد غذایی به نمایش گذاشته‌اند. MOFها

1. Intelligent Packaging

می‌توانند در مراحل مختلف زنجیره غذایی، برای کمک به بهبود ایمنی و کیفیت مواد غذایی کاربرد داشته باشند.

در این میان، اگرچه گزارش‌های کمی در ارتباط با استفاده از MOFها در حوزه‌ی بسته‌بندی مواد غذایی وجود دارد، اما این ترکیبات دارای خواص فیزیکی و شیمیایی ویژه‌ای مانند تخلخل زیاد، تنوع ساختاری (۱۴)، انعطاف‌پذیری در ساختار، درخشندگی، قابلیت اتصال از لیگاند به فلز یا از فلز به لیگاند، تنظیم اندازه منافذ و وجود مناطق با سطح بالا (حداکثر m^2/g ۱۰۰۰۰) می‌باشند. با توجه به موارد چشم‌گیر یاد شده، استفاده از این چارچوب‌ها بسیار امیدوارکننده بوده (۱۵-۱۶) و آنها را به مواد پیشرفته و سازگار با محیط زیست برای بسته‌بندی مواد غذایی تبدیل کرده است (۱۷-۱۸).

چارچوب‌های فلزی- آلی همچنین در بسیاری از زمینه‌های علمی مختلف، مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از کاربردهای مهم آنها می‌توان به ذخیره‌ی سوخت‌های گازی مانند هیدروژن و متان (۱۹)، جداسازی گاز پروتون و الکترون، انتقال یون (۲۰)، به عنوان کاتالیزگر در واکنش‌های آلی (۲۱) و همچنین برنامه‌های کاربردی پزشکی آنها مثل تشخیص بیماری، تصویربرداری پزشکی و تحویل دارو (۲۲-۲۳) اشاره کرد.

بنابراین، انتظار می‌رود با علم به امتیازات استفاده از چارچوب‌های فلزی- آلی، این دسته از مواد در صنعت مواد غذایی نیز وارد عصر جدید شوند و با رشد و پیشرفت، نقش مهمی را در ایمنی مواد غذایی ایفا کنند. اما مهم است که به ارزیابی سمّیت MOFها نیز توجه زیادی شود. به غیر از اثرات مربوط به مسمومیت‌های فوری، بایستی مسیرهای متابولیکی MOFهایی که پتانسیل استفاده در برنامه‌های مواد غذایی را دارند، در نظر گرفته شود، زیرا آنها می‌توانند ناخواسته وارد بدن انسان شوند و ایجاد سمّیت کنند، اما مطالعات کمی در مورد این مسأله انجام شده است.

در ادامه، استفاده‌ی چارچوب‌های فلزی- آلی در صنایع مواد غذایی در سه زیرمجموعه بسته‌بندی، نگهداری و پاک‌سازی مواد غذایی بررسی می‌شود.

۲. کاربرد چارچوب‌های فلزی- آلی در بسته‌بندی مواد غذایی

تا به امروز بسته‌بندی مواد غذایی پیشرفت‌های چشم‌گیری در جهت دستیابی به کیفیت و ایمنی مواد غذایی در معادلات جهانی داشته است (۲۴). در این راستا تلاشی مداوم برای نوآوری در بسته‌بندی با توجه به نیازها و خواسته‌های مصرف‌کننده انجام شده است. فناوری بسته‌بندی ایمن با

استفاده از چارچوب‌های فلزی- آلی برنامه‌های کاربردی جدیدی را برای حفظ کیفیت و امنیت مواد غذایی معرفی کرده است. به عنوان مثال MOFها توانسته‌اند پتانسیل سودمندی را در جذب انتخابی و دفع مواد شیمیایی برای کنترل رسیدن محصول تازه از خود نشان دهند. علاوه بر آن، از موضوعات مهم فراوری مواد غذایی، محافظت در برابر میکروارگانیسم‌ها و بیماری‌های ناشی از مواد غذایی می‌باشد که این مواد با عملکرد ضد باکتریایی خوب، از آلوده شدن مواد غذایی جلوگیری کرده‌اند (۲۵).

همچنین، حذف آب و اکسیژن، برای بهبود ماندگاری غذاهای مختلف، با به حداقل رساندن واکنش‌های اکسیداسیون که منجر به فساد مواد غذایی می‌شود، همیشه یک چالش قابل توجه هنگام طراحی بسته‌بندی مواد غذایی بوده است. اما MOFها توانایی دستیابی به آب و اکسیژن باقیمانده را در این برنامه از خود نشان داده‌اند (۲۶). فراورده‌های غذایی با برچسب فریبنده نیز از مسائل مهمی است که در بسته‌بندی مواد با آن روبرو هستیم. شناسایی چنین محصولاتی برای محافظت از اصالت غذایی در پاسخ به تقاضای تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان، امری ضروری می‌باشد. از این‌رو در سال‌های اخیر MOFهای نورانی با ویژگی‌های مختلف طیفی و منحصر به فرد، توجه زیادی را به عنوان مواد بالقوه برای برچسب‌گذاری- رمزگذاری امنیتی نامرئی به خود جلب کرده‌اند (۲۷).

در گزارشی، Chopra و همکاران برای جذب و رهاسازی اتیلن و ۱- متیل سیکلوپروپن (1-Methyl CycloPropen) MCP-1 از دو چارچوب فلزی- آلی Basolite C300 و Basolite A520 با هدف بسته‌بندی محصولات تازه و قابل‌فساد استفاده کردند. Basolite C300 یک چارچوب فلزی- آلی بر پایه‌ی مس با یک گروه پیونددهنده‌ی تری مسیک اسید (Trimesic Acid) و Basolite A520 یک چارچوب فلزی- آلی مبتنی بر آلومینیوم با یک گروه پیونددهنده‌ی فوماریک اسید است.

در مطالعه‌ی انجام شده، چارچوب Basolite C300 بر پایه‌ی مس توانست در اتصال و نگهداری اتیلن از سایر ترکیبات آزمایش شده موثرتر عمل کند و هم‌چنین به عنوان یک ماده آزادکننده‌ی اتیلن عملکرد بالایی را برای رسیدن محصول با محتوای آب زیاد در فضای بسته‌بندی از خود نشان دهد. از طرف دیگر، در حالی که Basolite C300 بیشترین میل را برای MCP-1 داشت، اما در حضور هوای مرطوب، MCP-1 را رها نکرد. بنابراین، اتیلن محصور شده در

چارچوب فلزی- آلی Basolite C300 در سیستم‌های بسته‌بندی ترکیبات زیست‌فعال مانند میوه و سبزیجات می‌تواند به سرعت آزاد شده و رسیدن محصول را تنظیم کند. این در حالی است که این چارچوب‌ها بدون اتیلن باعث رسیدن میوه نمی‌شوند. علاوه بر این، نتایج نشان داد، با از بین بردن ترکیبات موجود در فضای بسته‌بندی، روند مداخله‌ی MCP-1 می‌تواند به حداقل برسد (۲۸).

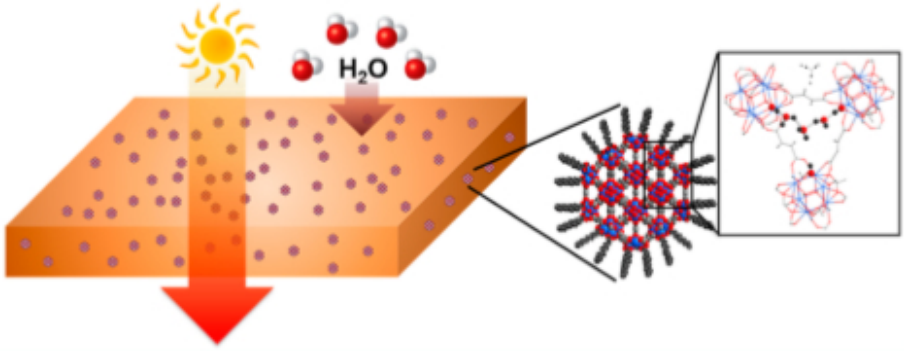
در مطالعات دیگری کوثری و همکاران توانستند لایه‌های نانوکامپوزیت ضد باکتری کیتوسان- پلی اتیلن اکسید CS-PEO (Chitosan-Poly Ethylene Oxide) حاوی نانوساختار ZIF-8 را با قطر ۶۰nm و درصدهای وزنی- وزنی ۳، ۵ و ۱۰%، را با استفاده از روش الکتروریسی (Electrospining) تهیه نمایند.

در این پژوهش‌ها فعالیت ضدمیکروبی CS-PEO و CS-PEO-3% ZIF-8 با استفاده از روش شمارش سلول‌های زنده برای تعیین اثربخشی آنها در کاهش یا متوقف کردن رشد باکتری استافیلوکوکوس اورئوس و اشرشیاکلی مورد ارزیابی قرار گرفت. CS-PEO-3% ZIF-8 فعالیت ضد باکتریایی ۱۰۰% را در مقابل هر دو نوع باکتری نشان داد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که CS-PEO-3% ZIF-8 آب‌گریزی و خاصیت حرارتی و کششی مناسبی را از خود نشان می دهد. بنابراین، ساختار ذکر شده مناسب‌ترین نمونه به عنوان یک ماده‌ی کاربردی امیدوارکننده برای پوشش و بسته‌بندی مواد غذایی می‌باشد (۲۹).

در مطالعه‌ای Yaghi و همکاران از چارچوب فلزی- آلی $[Zr_6O_4(OH)_4(Fumarate)_6]$ MOF-801 که از نور طبیعی خورشید تأمین می‌شود، ساختاری را تهیه نمودند که به عنوان یک ساختار جاذب آب از جو عمل می‌کند. این ساختار در شرایط محیط با استفاده از حرارت کم در برابر نور طبیعی خورشید ($1\ kw.m^2$) قادر به برداشت ۲/۸ لیتر آب در ازای هر کیلوگرم MOF در روز، در رطوبت نسبی کم ۲۰% است و به انرژی اضافی احتیاج ندارد (۳۰).

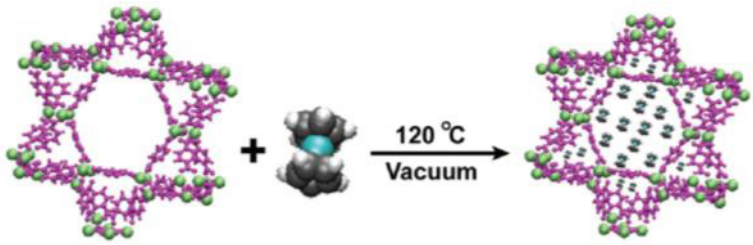
همچنین در مطالعه‌ای دیگر، Bae و همکاران توانستند با استفاده از چارچوب فلزی- آلی MOF-801 و یک کوپلیمر اولفین حلقوی آب‌گریز COC (Cyclic Olefin Copolymer)، فیلم‌های مانع بخار آب بسیار کاربردی را تهیه نمایند (شکل۱). در این مطالعه میزان انتشار بخار آب از فیلم‌ها، یک پیشرفت ده برابری را در مقایسه با لایه زیرین ضمن حفظ شفافیت عالی خود در بیشتر طیف‌های مرئی و خورشیدی نشان می‌دهد. نتایج ارائه شده ثابت می‌کند که استفاده از MOF-801، توانایی فیلم‌ها را در برابر نفوذ آب افزایش داده و راه‌های جدیدی را برای اکتشاف

غشاهای مبتنی بر MOF در برنامه‌های مختلف صنعتی از جمله بسته‌بندی مواد غذایی هموار می‌کند (۳۱).



شکل ۱- فیلم غشایی با ماتریس مختلط که شامل ماتریس پلیمر COC و مهار آب با استفاده از چارچوب LE-$Zr_6O_4(OH)_4$ (Fumarate)$_6$ است.

Zhang و همکاران با استفاده از فروسن محصور شده در MIL-101(Cr) در دمای اتاق، یک استراتژی برای حذف اکسیژن و جداسازی اکسیژن هوا پیشنهاد دادند. فناوری‌های حذف اکسیژن برای بهبود ماندگاری غذا و نوشیدنی‌های مختلف، به دلیل اکسیژن موجود در بسته‌بندی‌ها و واکنش‌های اکسیدکننده مواد غذایی ناشی از آن، ضروری است. در این مطالعه از یک مولکول فلزی- آلی فعال ردوکس- فروسن که از لحاظ حرارتی پایدار می‌باشد و یک MOF بسیار متخلخل با نام MIL-101 استفاده شد (شکل۲). فروسن حاوی لیگاندهای غنی از الکترون π است و انتظار می‌رود با حلقه‌های فنیل فاقد الکترون بیشتر از چارچوب میزبان تعادل π–π دهنده- پذیرنده داشته باشد. در پژوهش مذکور MIL-101 به‌دلیل سهولت نسبی در تهیه مواد با کیفیت بالا، داشتن مناطق سطح بالا و ساختارهای میکرو و مزو به عنوان ماتریس میزبان انتخاب شد (۲۶).



شکل۲- کامپوزیت‌های فلزی- آلی فعال ردوکس، رسوب بخار فروسن (FC) در چارچوب متخلخل MIL -101.

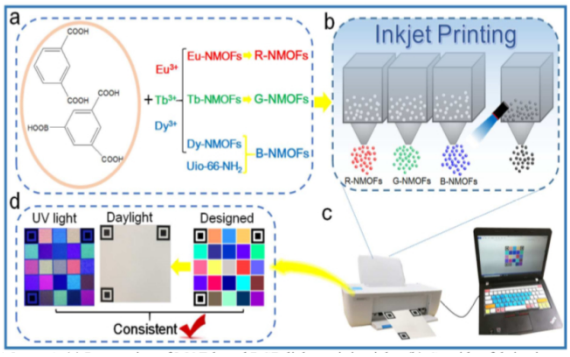
در گزارشی قابل ملاحظه، Liu و همکاران توانستند یک‌سری از چارچوب‌های فلزی- آلی پایدار، با طول موج بلند و لومینسانس طولانی مدت را با محصور کردن رنگ‌های مختلف در MOFهای فسفر سبز [Cd(m-BDC)(BIM)] با موفقیت تهیه نمایند. در پژوهش صورت گرفته، به دلیل انتقال انرژی فسفرسانس ازMOF به رنگ، این چارچوب‌های محصور شده با رنگ، رنگ‌های سبز تا قرمز را منتشر می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد خواص نوری MOFهای نورانی و محصور شده با رنگ، می‌تواند آنها را به موادی امیدوارکننده به عنوان استامپ برای تمبرهای ضد جعل پیشرفته تبدیل کند. بنابراین، این عملکرد یک عنصر امنیتی ایده‌آل در برابر جعل محصولات مارک شده و مواد غذایی بوده و می‌تواند نیاز فوری جهانی را در جلوگیری از صدمات اقتصادی و امنیتی ناشی از جعل مواد غذایی که مشمول دولت، صنعت و مصرف‌کنندگان می‌شود، برطرف سازد (شکل۳) (۱۳).

شکل۳- عکس تمبر ضد جعل در زیر نور طبیعی (سمت چپ)، با برانگیختگی توسط نورUV (شکل وسط) و برانگیختگی اشعه ماوراء بنفش خاموش (سمت راست). زمان قرار گرفتن برای تصویر سمت چپ ۱/٤۰۰ ثانیه، تصویر وسط ۱/۱۰۰ ثانیه و تصویر سمت راست ۱/٤ ثانیه می‌باشد.

پژوهش جالب دیگری که توسط Wang و همکاران انجام شد، بدین ترتیب بود که آنها با استفاده از Eu^{3+}، Tb^{3+}، Dy^{3+} و فتالیک اسید در ترکیب با $UIO\text{-}66\text{-}NH_2$، به نانو مواد MOF منتشرکننده‌ی نور ($nMOF_s$) قرمز، سبز و آبی RGB (Red, Green and Blue) رسیدند. آنها در این پژوهش، کدهای با پاسخ سریع فلورسنت نامرئی را به وسیله انتشار رنگ به عنوان واحد ذخیره‌ی اطلاعات برای یک استراتژی رمزگذاری ضدجعل گزارش کردند.

نانو MOFهای منتشرکننده‌ی نور RGB به عنوان جوهر برای ساخت جعبه‌های ساطع‌کننده نور رنگارنگ که برای رمزگذاری اطلاعات به کار می‌رود، استفاده شدند. در حالی که سه جعبه با سر سیاه برای موقعیت‌یابی تنظیم شده است. در این روند، اطلاعات مربوط به ضد جعل بودن مواد

غذایی را می‌توان تنها با برانگیختگی خاص نور ۲۷۵ nm رمزگشایی کرد، در حالی که آنها با چشم غیر مسلح قابل مشاهده نیستند. در نهایت نتایج نشان داد که الگوی کد پیشنهادی QR (Quick Response) پتانسیل بسیار خوبی برای ضد جعل پیشرفته دارد (شکل۴) (۳۲).



شکل ٤– a) تهیه MOFهای بر پایه‌ی جوهرهای ساطع‌کننده نور RGB، b) ساخت کارتریج، c) طراحی و چاپ و d) ورودی، رمزنگاری و رمزگشایی.

۳. کاربرد چارچوب‌ها در نگهداری مواد غذایی

به دلیل عملکرد ضعیف موجود در حفظ و نگهداری مواد غذایی، نیاز است تا عواملی که منجر به فساد مواد غذایی می‌شوند، در نظر گرفته شوند. در این میان، رشد میکروبی یکی از مهم‌ترین نگرانی‌ها است. بنابراین، تهیه‌ی مواد محافظت‌کننده ضد میکروبی مؤثر، برای به حداقل رساندن خطرات احتمالی مربوط به سلامتی که در نتیجه فساد مواد غذایی ایجاد می‌شوند، امری ضروری است (۲۵). در این زمینه تحقیقات زیادی در رابطه با جلوگیری از رشد میکروب‌ها در حین و بعد از نگهداری مواد غذایی منتشر شده است (۳۳-۳۴). می‌توان گفت MOFها به‌دلیل خاصیت ضد باکتریایی عالی، پتانسیل بالایی در این حیطه دارند (۳۵). تاکنون، چندین نمونه عالی از MOFهای ضد باکتریایی مورد بررسی قرار گرفته است (۳۶). MOFهای مبتنی بر مواد متفاوت، مانند MOFهای آغشته بر روی منسوجات طبیعی یا مصنوعی (۳۷) و فیلم‌های قالب MOF (۳۸)، در این زمینه توسعه یافته و عملکرد ضد باکتریایی قابل توجهی را به نمایش گذاشته‌اند. نتایج نشان داده است که با آزاد شدن کاتیون‌های فلزی از MOFها می‌توان فعالیت‌های ضد باکتری را مهار کرد (۳۶).

علاوه بر این، کنترل برداشت میوه‌ها در آب و هوای خاص، یک گام مهم در بهبود حفظ میوه

است، زیرا محصولات با کیفیتی را در اختیار مصرف‌کنندگان قرار داده و محصولات از دست رفته‌ی پس از برداشت را کاهش می‌دهد. در این میان مشخص است که گاز اتیلن به عنوان یك تنظیم کننده مؤثر در کنترل برداشت میوه در آب و هوای خاص استفاده می‌شود (۳۹). اما استفاده مستقیم از گاز اتیلن برای این منظور می‌تواند خطرات ایمنی درپی داشته باشد. در پژوهش‌های انجام شده مشخص شد که اتیلن محصور شده با چارچوب فلزی- آلی می‌تواند برای برنامه‌های پس از برداشت، برای رسیدن محصول درست قبل از مصرف استفاده شود (۴۰).

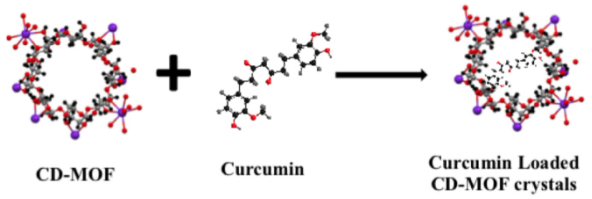
همچنین قابل توجه است که استفاده از مواد نگهدارنده طبیعی، چندین مزیت مختلف مانند سمیّت پایین، داشتن اثرات منفی کم‌تر بر محیط زیست و پذیرش بهتر مصرف‌کننده را شامل می‌شود (۴۱) که بسیاری از این مواد در حفظ مواد غذایی کاربرد دارند. با این وجود، آنچه شناخته شده، این است که بیشتر مواد نگهدارنده‌ی غذایی در شرایط خاص ناپایدار هستند و معمولاً نمی‌توانند مستقیماً برای کاربردهای عملی مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین، لازم است مواد محصورکننده‌ای برای بهبود پایداری تولید شده و آزادسازی کنترل شده‌ی نگهدارنده‌های مواد غذایی طبیعی فراهم شوند (۴۲).

در گزارشی، Wang و همکاران از آلیل ایزوتیوسیانات AITC (Allyl Isothiocyanate) به‌عنوان یک ماده‌ی عطردهنده، طعم‌دهنده و نگهدارنده‌ی مواد غذایی استفاده کردند. در این پژوهش مشخص شد که AITC می‌تواند به طور موثری توسط یک چارچوب فلزی- آلی ریزپردازنده اسیر و آزاد شود. نتایج حاکی از آن است که با افزایش رطوبت نسبی، با استفاده از رهایش کنترل شده AITC از MOF می‌توان شروع به کار کرد، به طوری که انتشار آن طی چند روز پایدار بماند. این مطالعه، اولین نمونه استفاده از تخلخل MOFها در نگهداری مواد غذایی است (۴۳).

در مطالعه‌ای در این راستا، Aguado و همکاران از دو چارچوب فلزی- آلی کبالت ایمیدازولات Co-SIM-1 و ZIF-67 به عنوان موادی با خاصیت ضدباکتریایی، در برابر رشد باکتری‌های گرم منفی سودوموناس پوتیدا و اشرشیاکلی استفاده کردند. نتایج حاکی از آن بود که غلظت هر دو چارچوب در نامطلوب‌ترین شرایط، در مرحله رشد نمایی و در محیط کشت، برای مهار رشد هر دو میکروارگانیسم در محدوده ۵-۱۰mg/L بیش از ۵۰% است. همچنین خواص ضد باکتریایی هر دو چارچوب فلزی- آلی دارای اثر طولانی مدت بود که تقریبا تا سه ماه ادامه

داشت (۴۴).

در گزارشی دیگر، Moussa و همکاران توانستند کورکومین را در چارچوب‌های فلزی- آلی سیکلودکسترین CD-MOF (CycloDextrin) محصور کنند، بدون اینکه باعث تغییر در تبلور آنها شود. حل شدن کریستال‌های CD-MOFs بارگذاری شده در آب منجر به تشکیل یک مجموعه‌ی منحصر به فرد بین کاتیون‌های کورکومین، γ-CD و پتاسیم شد (شکل۵).



شکل ۵- تعامل بین CD-MOF و کورکومین.

این مجموعه جدید که در محیط قلیایی با pH=۱۱/۵ تشکیل شد، حداکثر میزان جذب در ۵۲۰nm و انتشار در ۶۰۰ nm را نشان داد و از همه مهم‌تر ثبات کورکومین در این مجموعه، حداقل ۳ مرتبه نسبت به کورکومین آزاد و کورکومین γ-CD در pH=۱۱/۵ افزایش یافته است. بنابراین، نتایج نشان داد چارچوب CD-MOF با ذخیره و حفظ کورکومین می‌تواند برای برنامه‌های غذایی مورد استفاده قرار گیرد (۴۵).

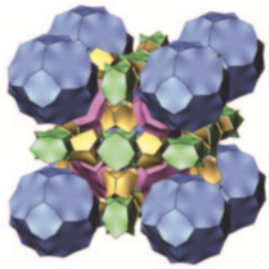
همچنین لشکری و همکاران، در مطالعه‌ای به بررسی عملکرد چارچوب‌های فلزی- آلی، به عنوان سیستم تحویل جدید برای محصورسازی و رهاسازی کنترل شده مولکول‌های آلیل ایزوتیووسیانات AITC فرار، از نظر فنی پرداختند. فرض شد که مولکول‌های بخار آب می‌توانند به عنوان یک محرک خارجی برای آزادسازی مولکول‌های AITC محصور شده در MOF عمل کنند. برای آزمایش این فرضیه، سه چارچوب فلزی- آلی MOF-HKUST-1 و MOF-74 (Zn) و RPM6-Zn براساس خصوصیات ساختاری و خصوصیات مولکولی AITC انتخاب شدند. نتایج نشان داد که این MOFها می‌توانند مولکول‌های AITC را در منافذ خود تحت شرایط رطوبت نسبی کم (۳۵-۳۰٪) در محفظه‌ای قرار داده و حفظ کنند. در مقابل، انتشار مولکول‌های AITC از همه این MOFها در شرایط رطوبت نسبی بالا (۱۰۰-۹۵٪) شروع شد. تمامی این یافته‌ها حاکی از آن است که بخارات آب می‌تواند باعث انتشار AITC از این MOFها شود و

این نشان می‌دهد که توسعه سیستم تحویل AITC-MOFs از لحاظ فنی امکان‌پذیر بوده است (۴۶).

در گزارشی، Zhang و همکاران از چارچوب فلزی- آلی ترفتالات مس CuTPA (Cu Terephthalate) با تخلخل بالا ($۰/۳۹cm^3g^{-1}$) به منظور محصورسازی و رهاسازی گاز اتیلن برای کنترل برداشت میوه‌ها در آب و هوای خاص استفاده کردند.

نتایج نشان داد که ۵۰ mg از این چارچوب، می‌تواند ۶۵۴ µL اتیلن را جذب و ترشح کند، که یک فضای غنی شده با اتیلن کافی برای تنظیم رسیدن میوه ایجاد کرده و در عین حال، سطح ایمنی اتیلن را حفظ می‌کند. مهم‌تر از همه، رفتارهای چارچوب فلزی- آلی با اتیلن، با کاهش استحکام بافت و تسهیل تغییر رنگ مرتبط با رسیدن میوه، این فرایند را تسریع می‌کند. این نتیجه نشان می‌دهد که اتیلن محصور شده می‌تواند برای برنامه‌های پس از برداشت محصول برای تحریک رسیدن محصول قبل از نقطه مصرف استفاده شود (۴۰).

در مطالعه‌ای Smaldone و همکاران از γ- سیکلودکسترین γ-CD (γ-CycloDextrin) که یک الیگوساکارید حلقوی متقارن است، استفاده کردند. این ترکیب توسط نشاسته به طور آنزیمی تولید انبوه می‌شود. در این پژوهش، واحدهای ساختاری γ-CD توسط یون‌های پتاسیم در محیط‌های آبی در دما و فشار محیط قرار می‌گیرند تا یک ساختار مکعبی با مرکز پر با نام CD-MOF-1 تشکیل دهند (شکل۶).



شکل ٦- ساختار CD-MOF-1.

CD-MOFها می‌توانند به طور طبیعی از ترکیبات خوراکی تهیه شوند: ترکیب γ-CD با مواد غذایی یا نمک جایگزین (KCl) یا بنزوات سدیم (افزودنی مواد غذایی E ۲۱۲) MOFهای خوراکی را تشکیل می‌دهد (۴۷).

Yang و همکاران در مطالعه‌ای از دو چارچوب فلزی- آلیMOF-1203 و MOF-1201، که

از یون‌های Ca^{2+} و L-lactate ساخته شده است [$CH_3CH\ (OH)\ COO^-$] استفاده کردند. این دو چارچوب به ترتیب دارای تخلخل دائمی به بزرگی۱۶۰ و m^2g^{-1} ۴۳۰ هستند و می‌توانند سیس-۱و۳-دی کلروپروپن را به عنوان یک ماده فرّار که به منظور ضدعفونی برای دفع آفات در کشاورزی به‌کار می‌رود، محاصره کنند. MOF-1201 میزان آزادسازی ۱۰۰ برابر کم‌تر را در مقایسه با مایع سیس-1و3-دی کلروپروپن تحت شرایط آزمایش یکسان نشان داد (۲۵ درجه سانتی‌گراد، سرعت جریان هوا $cm^3\ min^{-1}$ ۱). هیدرولیز MOF-1201 در آب آن را به اولین نمونه از یک حامل جامد متخلخل تخریب‌پذیر برای چنین مواد ضدعفونی‌کننده‌ای تبدیل می‌کند (۴۸).

٤. کاربرد چارچوب‌های فلزی- آلی در پاک‌سازی مواد غذایی

آلودگی محیطی به یکی از مشکلات بزرگ و اثرگذار ایمنی مواد غذایی تبدیل شده است. می‌توان گفت یک محیط تمیز است که می‌تواند منجر به یک غذای تمیز شود. خطر قرار گرفتن در معرض آلاینده‌های محیطی می‌تواند در نقاط متعددی از زنجیره غذایی مانند منابع گیاهی و حیوانی از طریق آب، خاک یا خوراک وارد شده و بدین ترتیب سلامت انسان را مورد تهدید قرار دهد. هرچند این مسئله ممکن است جزئی و بی‌اهمیت به نظر برسد، اما کنترل مواد خطرناک این آلاینده‌های محیطی در فراورده‌های غذایی یک نیاز ضروری برای توسعه مسائل بهداشتی و ایمنی مواد غذایی می‌باشد، زیرا اگر قبل از مصرف شناسایی نشوند، می‌توانند خطرات قابل توجهی را به دنبال داشته باشند.

تا به امروز بسیاری از چارچوب‌های مبتنی بر مواد، برای جذب و گرفتن مواد خطرناک از محیط زیست، با موفقیت به کار گرفته شده است. MIL-101 (۴۹)، HKUST-1 (۵۰)، ZIF-8 (۵۱)، MAF-6 (۵۲) و MOFهای مبتنی بر Zr (۵۳-۵۴) تنها نمونه‌ی انگشت‌شماری از چارچوب‌هایی هستند که در این برنامه استفاده شده‌اند.

در این راستا، از جمله گزارش‌هایی که با همکاری MOFها در حذف مواد خطرناک موثر بر ایمنی مواد غذایی (۵۵، ۵۶) انجام شده است، می‌توان به موادی چون آلاینده‌های آلی محیط زیست (۵۷- ۵۸)، سموم دفع آفات (۵۹)، داروهای آنتی بیوتیک (۶۰)، یون‌های فلزی (۶۱)، رنگ‌ها (۶۲- ۶۳)، نانومواد (۶۴) و عناصر رادیواکتیو (۶۵- ۶۶) اشاره کرد.

البته از گزارش‌های جالب آنها می‌توان به کاربرد مستقیم چارچوب‌های فلزی- آلی برای

پاک‌سازی نوشیدنی‌ها و روغن‌های غذایی اشاره کرد، که ناشی از عملکرد جذب عالی این چارچوب‌ها و سمّیت پایین آنها است (۶۷).

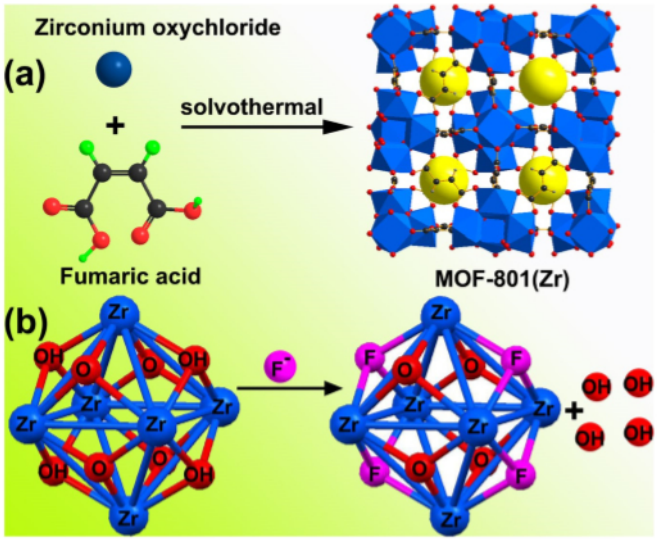
در گزارشی از این نوع، Zhang و همکاران از چارچوبی مبتنی بر آلومینیوم با نام $Al_{12}O\ (OH)_{18}(H_2O)_3(Al_2(OH)_4)(BTC)_6.24H_2O$ که با عنوان MIL-96 معرفی می‌شود، ساختاری را تهیه نمودند که به منظور فلوئورزدایی از آب آشامیدنی مورد استفاده قرار گرفته است. در این ساختار تاثیر پارامترهای مختلفی چون pH، زمان تماس، غلظت اولیه فلوراید و آنیون‌های رقیب برای درک رفتار جاذب تحت شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. ساختار MIL-96 توانست حذف بهینه‌ی یون‌های فلوراید را در محدوده‌ی pH=۳-۱۰ و همچنین حداکثر ظرفیت جذب فلوراید را در مقدار ۳۱/۶۹mg/g در دمای ۲۹۸k از خود نشان دهد. علاوه بر این، تاثیری در حذف فلوراید توسط MIL-96 در حضور آنیون‌های کلرید، نیترات، فسفات، سولفات و بی کربنات مشاهده نشد. نتایج نشان داد که راندمان فلوئورزدایی و میزان آلومینیوم باقی مانده از MIL-96 نسبت به آلومینا یا نانو آلومینای فعال شده بسیار برتر است. بنابراین، می‌توان گفت MIL-96 جاذب امیدوارکننده‌ای است که می‌تواند در فرایندهای آب آشامیدنی به طور بالقوه مورد استفاده قرار گیرد (۶۸).

به همین ترتیب، Vlasova و همکاران توانستند از چارچوب‌های فلزی- آلی Ti-MOF، Al-MOF، Zn-MOF که مبتنی بر ترفتالیک اسید می‌باشند، به عنوان جاذب اسیدهای چرب آزاد و ترکیبات پراکسید برای پاک‌سازی روغن‌های گیاهی تصفیه نشده استفاده کنند. در پژوهش صورت گرفته مشخص شد که چارچوب‌های سنتز شده به دلیل اتصال به اسیدهای چرب آزاد و ترکیبات پراکسید، خاصیت فیزیکوشیمیایی روغن‌های تصفیه نشده را از قبیل طعم و بو بهبود می‌بخشند و از این جهت در مقایسه با جاذب‌های سنتی موثرتر هستند. همچنین، این چارچوب‌ها به راحتی به وسیله‌ی شستشو با حلال حداقل ۵ بار قابل بازیافت هستند. در این مطالعه، بهترین عملکرد برای حذف اسیدهای چرب آزاد و ترکیبات پراکسید با Ti-MOF به دست آمد و حداکثر کارایی حذف آن به ترتیب ۶۴/۸٪ و ۹۳/۴٪ بود (۶۹).

در مطالعه‌ی دیگر، Ke و همکاران دو چارچوب فلزی- آلی مبتنی بر فومارات، MOF-801 و کامپوزیت MOF فومارات کلسیم CaFu (Calcium Fumarate) را برای حذف انتخابی فلوراید از چای آجری سنتز کردند. در این مطالعه زمان جذب، اثر دوز و ظرفیت جذب در غلظت‌ها و

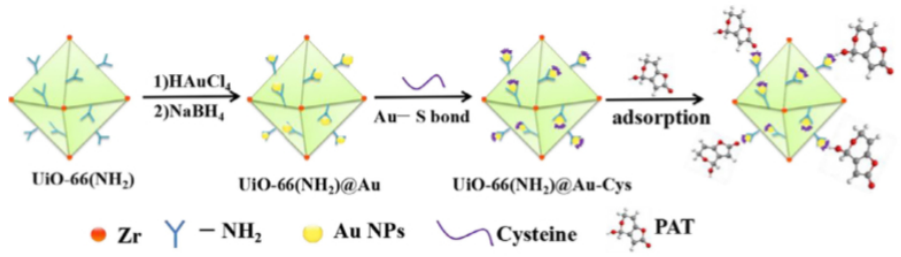
درجه حرارت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج نشان داد بیش از ۸۰٪ فلوراید موجود در چای آجری می‌تواند در ۵ دقیقه اول در دمای اتاق با کمک MOF-801 حذف شود. در حالی که هیچ جذب قابل توجهی برای کاتچین و کافئین موجود در چای آجری رخ نداد. در این پژوهش فلوراید جایگزین گروه‌های هیدروکسیل موجود در MOFها شد و بدین ترتیب از چای آجری حذف گردید (شکل۷) (۷۰).



شکل ۷- a) تصویر شماتیک سنتز MOF-801
b) مکانیسم پیشنهادی برای حذف فلوراید توسط MOF-801.

Liu و همکاران از کامپوزیت UiO-66(NH_2)@Au-Gys با عملکرد سیستئین به عنوان جاذب برای حذف پاتولین PAT (Patulin) از آب سیب استفاده کردند. این ساختار دارای جایگاه‌های فعال فراوان از جمله گروه‌های آمین، هیدروکسیل و کربوکسیل روی سطح کامپوزیت بود که این ویژگی باعث شده است تا حداکثر ظرفیت جذب برای پاتولین از آب سیب ۴/۳۸μg/mg و حداکثر راندمان آن ۸۷٪ باشد (شکل۸). این در حالی است که به مواد مغذی موجود در آب سیب مانند فنول و ویتامین C آسیبی وارد نمی‌شود. در این پژوهش پس از بررسی‌های انجام شده مشخص شد، فرایند جذب خود به خودی و گرماگیر است (۷۱).



شکل ۸- نمایش شماتیک UIO-66(NH_2)@Au-Cys و جذب پاتولین PAT.

در مطالعه‌ای دیگر، Yang و همکاران از چارچوب فلزی- آلی UiO-67 به عنوان جاذب برای از بین بردن رنگ‌های غیرمجاز مواد غذایی (قرمز کنگو و سبز مالاشیت) و از محلول‌های آبی استفاده کردند. حداکثر ظرفیت جذب برای قرمز کنگو ۱۲۳۶/۹mg/g و سبز مالاکیت ۳۵۷/۳mg/g به دست آمد که در نتایج گزارشات این دو، بالاترین میزان جذب را دارند. همچنین UiO-67 می‌تواند بدون کاهش قابل توجهی از ظرفیت خود پس از ۷ چرخه مجدداً استفاده شود. این نتایج پتانسیل‌های موجود در UiO-67، در مدیریت ایمنی مواد غذایی را پیش‌بینی می‌کند (۷۲).

در گزارشی Abdelhameed و همکاران از سنتز چارچوب فلزی- آلی Copper benzene-1,3,5-tricarboxylate (Cu-BTC MOF) جهت جداسازی کامازولن (Chamazulene) از عصاره بابونه استفاده کردند.

این ماده (Cu-BTC MOF) نه تنها میزان جذب مناسبی از کامازولن را در گل بابونه نشان می‌دهد، بلکه خاصیت دفع خوبی نیز دارد. عصاره بابونه‌ی به دست آمده، پس از هر مرحله، با دقت توسط کروماتوگرافی لایه نازک TLC، طیف‌سنجی (UV-VIS) و کروماتوگرافی گازی- طیف‌سنجی جرمی (GC-MS) مورد ارزیابی قرار گرفت (۷۳).

در مطالعه‌ای Xie و همکاران ساختار $Cs_{2.5}H_{0.5}PW_{12}O_{40}$ را که یک ساختار از نوع Keggin می‌باشد، با استفاده از روش سنتزی Solvothermal در چارچوب فلزی- آلی UiO-66 محصور کردند. نتایج نشان داد که این ساختار می‌تواند اسیدهای چرب با زنجیره‌ی متوسط روغن سویا را اسیدولیز کند و لیپیدهای ساختاری کم کالری تولید کند. آزمایش‌های جذب کربن منوکسید در طیف‌سنجی، مادون قرمز نشان داد. جایگاه‌های اضافی لوئیس‌اسید در کاتالیزور اسید جامد تشکیل شده‌اند که برای کاتالیز واکنش اسیدولیز ضروری بودند. در نتیجه، کاتالیزور جامد می‌تواند

بدون استفاده از غیرفعال شدن واضح به دلیل شستشوی اجزای فعال در مخلوط واکنش برای چندین چرخه مجدداً مورد استفاده قرار گیرد (۷۴).

۵. نتیجه‌گیری

در پایان می‌توان گفت MOFها پتانسیل هیجان‌انگیزی را در زمینه ایمنی مواد غذایی به نمایش گذاشته‌اند و همه کارایی خود را از طریق توانایی استفاده در بخش‌های مختلف فرآیند نشان داده‌اند. مواد MOF نوظهور یا MOFهای مبتنی بر مواد کامپوزیتی به عنوان یک پوشش کاربردی در بسته‌بندی هوشمند مواد غذایی، برای آزادسازی کنترل شده مواد نگهدارنده و نظارت بر ایمنی مواد غذایی مورد توجه قرار گرفته‌اند. بنابراین، نیاز است از این مواد که دارای خواص جذب و پایداری عالی هستند، برای کاربرد در بسته‌بندی بیشتر استفاده شود. همچنین MOFها ثابت کرده‌اند که در از بین بردن مواد خطرناک در زنجیره تأمین مواد غذایی موثر هستند. بنابراین نیاز به سنتز MOFهای چند منظوره جدید برای حذف آلاینده‌ها ضروری می‌باشد. در پایان می‌توان گفت، در حالی که MOFها یک ماده امیدوارکننده برای کمک به بهبود ایمنی مواد غذایی، در مراحل مختلف زنجیره غذایی هستند، اما کنترل دقیق بر اندازه و حجم منافذ این چارچوب‌ها برای کاربردهای خاص، هنوز یک چالش است، بنابراین نیاز است توجه بیشتری به دستیابی MOFهای با کیفیت بالا جهت استفاده در ایمنی مواد غذایی انجام شود. همچنین در خصوص سمّیت MOFها بایستی تحقیقات بیشتری صورت گیرد.

References

1. Brody AL, Bugusu B, Jan HH, Sand CK & McHugh TH. Innovative food packaging solutions. *Food Sci.* 2008; 73: 107-116.
2. Banerjee S, Kelly C, Kerry JP, Papkovsky DB. High throughput non-destructive assessment of quality and safety of packaged food products using phosphorescent oxygen sensors. *Trends Food Sci. Technol*. 2017; 50: 85−102.
3. Siracusa V, Lotti N, Munari A & Rosa MD. Poly (butylene succinate) and poly (butylene succinate-co-adipate) for food packaging applications: Gas barrier properties after stressed treatments. *Polym. Degrad. Stab*. 2015; 119: 35-45.
4. Brockgreitens J & Abbas A. Responsive food packaging: recent progress and technological prospects. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf*. 2016; 15: 3-15.
5. Youssef AM & El-Sayed SM. Bionanocomposites materials for food packaging applications: Concepts and future outlook. *arbohydr. Polym*. 2018; 193: 19-27.
6. Marrez DA, Abdelhamid AE & Darwesh OM. Eco-friendly cellulose acetate green synthesized silver nano-composite as antibacterial packaging system for food safety. *Food Packag. Shelf Life.* 2019; 20: 100302.
7. Al-Tayyar NA, Youssef AM & Al-Hindi R. Antimicrobial Food Packaging Based on Sustainable Bio-based materials for Reducing Foodborne Pathogens: A Review. *Food Chem.* 2020; 310: 125915.
8. Ibrahim S & El-Khawas KM. Development of Eco-environmental nano-emulsified active coated packaging material. *J. King Saud. Univ. Sci.* 2019; 31: 1485-1490.
9. Topuz F & Uyar T. Antioxidant, Antibacterial and Antifungal Electrospun Nanofibers for Food Packaging Applications. *Food Res.* 2020; 130: 108927.
10. Chowdhury EU & Morey A. Intelligent packaging for poultry industry. *J. App. Poultry Res.* 2019; 28: 791-800.
11. Thanakkasarane S, Sadeghi K, Lim IJ & Seo J. Effects of incorporating calcined corals as natural antimicrobial agent into active packaging system for milk storage. *Mater. Sci. Eng. C.* 2020; 111: 110781.
12. Mihindukulasuriya SDF & Lim LT. Nanotechnology development in food packaging: A review. *Trends Food Sci. Technol.* 2014; 40: 149-167.
13. Liu J, Zhuang Y, Wang L, Zhou T, Hirosaki N & Xie R-J. Achieving multicolor long-lived luminescence in dye-encapsulated metal-organic frameworks and its application to anticounterfeiting stamps. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2018; 10: 1802-1809.
14. Han S, Wei Y, Valente C, Lagzi I, Gassensmith JJ, Coskun A, Stoddart JF & Grzybowski BA. Chromatography in a Single Metal−Organic Framework (MOF) Crystal. *J. Am. Chem. Soc.* 2010; 132: 16358-16361.
15. Yaghi OM & Li H. Chromatography in a Single Metal−Organic Framework (MOF) Crystal. *J. Am. Chem. Soc.* 1995; 117: 10401-10402.

16. Zhou H, Long JR & Yaghi OM. Introduction to metal-organic frameworks. *Chem. Rev.* 2012; 112: 673-674.
17. Schneemann A, Bon V, Schwedler I, Senkovska I, Kaskel S & Fischer RA. Flexible metal-organic frameworks. *Chem. Soc. Rev.* 2014; 43: 6062−6096.
18. Chang Z, Yang D-H, Xu J, Hu T-L & Bu X-H. Flexible metal-organic frameworks: recent advances and potential applications. *Adv. Mater.* 2015; 27: 5432-5441.
19. Furukawa H, Cordova KE, O'Keeffe M & Yaghi OM. The chemistry and applications of metal-organic frameworks. *Science.* 2013; 341: 1230444-12
20. Chen Y, Zhang W, Zhang Y, Deng Z, Zhao W, Du H, Ma X, Yin D, Xie F, Chen W, Ma X, Yin D, Xie F, Chen Y & Zhang S. In situ preparation of core-shell magnetic porous aromatic framework nanoparticles for mixed-mode solid-phase extraction of trace multitarget analytes. *J. Chromatogr. A.* 2018; 1556: 1-9.
21. Ghasemzadeh MA, Mirhosseini-Eshkevari B & Abdollahi-Basir MH. MIL-53(Fe) metal-organic frameworks (MOFs) as an efficient and reusable catalyst for the one-Pot four-component synthesis of Pyrano[2,3-c]-pyrazoles. *Appl. Organomet. Chem.* 2019; 33: e4679.
22. Esfahanian M, Ghasemzadeh MA & Razavian SMH. Synthesis, identification and application of the novel metal-organic framework Fe_3O_4@PAA@ZIF-8 for the drug delivery of ciprofloxacin and investigation of antibacterial activity. *Artif. Cell Nanomed. B.* 2019; 47: 2024-2030.
23. Nasrabadi M, Ghasemzadeh MA & Zand Monfared MR. Preparation and characterization of uio-66 metal-organic frameworks for the drug delivery of ciprofloxacin and evaluation of their antibacterial activities. *New J. Chem.* 2019; 43: 16033-16040.
24. Silvestre C, Duraccio D & Cimmino S. Food packaging based on polymer nanomaterials. *Progpolymsci.* 2011; 36: 1766-1782.
25. Wang P-L, Xie L-H, Joseph EA, Li J-R, Su X-O & Zhou H-C. Metal−organic frameworks for food safety. *Chem. Rev.* 2019; 119: 10638-10690.
26. Zhang W, Banerjee D, Liu J, Schaef HT, Crum JV, Fernandez CA, Kukkadapu RK, Nie Z, Nune SK, Motkuri RK, Chapman KW & et al. Redox-active metal-organic composites for highly selective oxygen separation applications. *Adv. Mater.* 2016; 28: 3572-3577.
27. Da Luz LL, Milani R, Feix JF & et al. Inkjet printing of lanthanide-organic frameworks for anti-counterfeiting applications. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2015; 7: 27115-27123.
28. Chopra S, Dhumal S, Abeli P & et al. Metal-organic frameworks have utility in adsorption and release of ethylene and 1-methylcyclopropene in fresh produce packaging. *Postharvest Biol. Technol.* 2017; 130: 48-55.
29. Kohsari I, Shariatinia Z & Pourmortazavi SM. Antibacterial electrospun chitosan-polyethylene oxide nanocomposite mats containing ZIF-8 nanoparticles. *Int. J. Biol. Macromol.* 2016; 91: 778-788.
30. Kim H, Yang S, Rao SR & et al. Water harvesting from air with metal-organic frameworks

powered by natural sunlight. *Science.* 2017; 356: 430.

31. Bae YJ, Cho ES, Qu F & et al. Transparent metal-organic framework/ polymer mixed matrix membranes as water vapor barriers. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2016; 8: 10098-10103.
32. Wang Y-M, Tian X-T, Zhang H & et al. Anticounterfeiting quick response code with emission color of invisible metal-organic frameworks as encoding information. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2018; 10: 22445-22452.
33. Makwana S, Choudhary R, Haddock J & Kohli P. In-vitro antibacterial activity of plant based phenolic compounds for food safety and preservation. *LWT - Food Sci. Technol.* 2015; 62: 935-939.
34. Granata G, Stracquadanio S, Leonardi M & et al. Essential oils encapsulated in polymer-based nanocapsules as potential candidates for application in food preservation. *Food Chem.* 2018; 269: 286-292.
35. Wyszogrodzka G, Marszalek B, Gil B & Dorozynski P. Metal-organic frameworks: mechanisms of antibacterial action and potential applications. *Drug Discovery Today.* 2016; 21: 1009-1018.
36. Zhuang W, Yuan D, Li J-R & et al. Highly potent bactericidal activity of porous metal-organic frameworks. *Adv. Healthcare Mater.* 2012; 1: 225-238.
37. Emam HE, Darwesh OM & Abdelhameed RM. In-growth metal organic framework/synthetic hybrids as antimicrobial fabrics and its toxicity. *Colloids Surf. B.* 2018; 165: 219-228.
38. Zhou W, Begum S, Wang Z & Tsotsalas, M. High antimicrobial activity of metal-organic framework-templated porphyrin polymer thin films. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2018;10: 1528-1533.
39. Zhu X, Shen L, Fu D & et al. Effects of the combination treatment of 1-MCP and ethylene on the ripening of harvested banana fruit. *Postharvest Biol. Technol.* 2015; 107: 23-32.
40. Zhang B, Luo Y, Kanyuck K & et al. Development of metal-organic framework for gaseous plant hormone encapsulation to manage ripening of climacteric produce. *Agric. Food Chem.* 2016; 64: 5164-5170.
41. Hyldgaard M, Mygind T & Meyer R. Essential oils in food preservation: mode of action, synergies, and interactions with food matrix components. *Front Microbiol.* 2012; 3:12.
42. Burt S. Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods - a review. *Int. J. Food Microbiol.* 2004; 94: 223-253.
43. Wang H, Lashkari E, Lim H & et al. The moisture-triggered controlled release of a natural food preservative from a microporous metal-organic framework. *Chem. Commun.* 2016; 52: 2129-2132.
44. Aguado S, Quiros J, Canivet J & et al. Antimicrobial activity of cobalt imidazolate metal-organic frameworks. *Chemosphere.* 2014; 113: 188-192.

45. Moussa Z, Hmadeh M, Abiad MG & et al. Encapsulation of curcumin in cyclodextrin-metal organic frameworks: Dissociation of loaded CD-MOFs enhances stability of curcumin. *Food Chem.* 2016; 212: 485-494.
46. Lashkari E, Wang H, Liu L & et al. Innovative application of metal-organic frameworks for encapsulation and controlled release of allyl isothiocyanate. *Food Chem.* 2017; 221: 926-935.
47. Smaldone RA, Forgan RS, Furukawa H & et al. Metal-organic frameworks from edible natural products. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2010; 49: 8630-8634.
48. Yang J, Trickett CA, Alahmadi SB & et al. Calcium L-lactate frameworks as naturally degradable carriers for pesticides. *Am. Chem. Soc.* 2017; 139: 8118-8121.
49. Seo PW, Bhadra BN, Ahmed I & et al. Adsorptive removal of pharmaceuticals and personal care products from water with functionalized metal-organic frameworks: remarkable adsorbents with hydrogen-bonding abilities. *Sci. Rep.* 2016; 6: 34462.
50. Azhar MR, Abid HR, Sun H & et al. Excellent performance of copper based metal organic framework in adsorptive removal of toxic sulfonamide antibiotics from wastewater. *Colloid Interface Sci.* 2016; 478: 344-352.
51. Ahmed I, Bhadra BN, Lee HJ & Jhung SH. Metalorganic framework-derived carbons: Preparation from ZIF-8 and application in the adsorptive removal of sulfamethoxazole from water. *Catal. Today.* 2018; 301: 90-97.
52. Bhadra BN, Song JY, Lee S-K & et al. Adsorptive removal of aromatic hydrocarbons from water over metal azolate framework-6-derived carbons. *Hazard. Mater.* 2018; 344: 1069-1077.
53. Bai Y, Dou Y, Xie L-H & et al. Zr-based metal-organic frameworks: design, synthesis, structure, and applications. *Chem. Soc. Rev.* 2016; 45: 2327-2367.
54. Wei C, Feng D & Xia Y. Fast adsorption and removal of 2methyl-4-chlorophenoxy acetic acid from aqueous solution with amine functionalized zirconium metal-organic framework. *RSC Adv.* 2016; 6:96339-96346.
55. Li J-R, Sculley J & Zhou H-C. Metal-organic frameworks for separations. *Chem. Rev.* 2012; 112: 869-932.
56. Bobbitt NS, Mendonca ML, Howarth AJ & et al. Metal-organic frameworks for the removal of toxic industrial chemicals and chemical warfare agents. *Chem. Soc. Rev.* 2017; 46: 3357-3385.
57. Liu K, Zhang S, Hu X & et al. Understanding the adsorption of PFOA on MIL-101(Cr)-based anionic-exchange metal-organic frameworks: comparing DFT calculations with aqueous sorption experiments. *Environ. Sci. Technol.* 2015; 49: 8657-8665.
58. Liu D, Lang J-P & Abrahams BF. Highly efficient separation of a solid mixture of naphthalene and anthracene by a reusable porous metal-organic framework through a single-crystal-tosingle-crystal transformation. *J. Am. Chem. Soc.* 2011;133: 11042-11045.
59. Gautam RK, Banerjee S, Sanroman MA, Chattopadhyaya MCJ. Synthesis of copper

coordinated dithiooxamide metal organic framework and its performance assessment in the adsorptive removal of tartrazine from water. J. Environ. *Chem. Eng.* 2017; 5: 328-340.

60. Hu T, Lv H, Shan S & et al. Porous structured MIL-101 synthesized with different mineralizers for adsorptive removal of oxytetracycline from aqueous solution. *RSC Adv.* 2016; 6: 73741-73747.
61. Luo X, Shen T, Ding L & et al. Novel thymine-functionalized MIL-101 prepared by post-synthesis and enhanced removal of Hg^{2+} from water. *J. Hazard. Mater.* 2016; 306: 313-322.
62. Tian H, Peng J, Lv T & et al. Preparation and performance study of $MgFe_2O_4$/metal organic framework composite for rapid removal of organic dyes from water. *J. Solid State Chem.* 2018; 257: 40-48.
63. Abdi J, Vossoughi M, Mahmoodi NM & Alemzadeh I. Synthesis of metal-organic framework hybrid nanocomposites based on GO and CNT with high adsorption capacity for dye removal. *Chem. Eng. J.* 2017; 326: 1145-1158.
64. Conde-Gonzalez JE, Pena-Mendez EM, Rybakova S & et al. Adsorption of silver nanoparticles from aqueous solution on copper based metal organic frameworks (HKUST-1). *Chemosphere.* 2016; 150: 659-666.
65. Peng Y, Huang H, Liu D & Zhong C. Radioactive bariumion trap based on metal-organic framework for efficient and irreversible removal of barium from nuclear wastewater. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2016; 8: 8527-8535.
66. De Decker J, Rochette J, De Clercq J & et al. Carbamoylmethylphosphine oxide-functionalized MIL101(Cr) as highly selective uranium adsorbent. *Anal. Chem.* 2017; 89: 5679-5683.
67. Cirujano FG, Luz I, Soukri M & et al. Boosting the catalytic performance of metal-organic frameworks for steroid transformations by confinement within a mesoporous scaffold. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2017; 56: 13302-13306.
68. Zhang N, Yang X, Yu X & et al. Al-1,3,5-benzenetricarboxylic metal-organic frameworks: A promising adsorbent for defluoridation of water with pH insensitivity and low aluminum residual. *Chem. Eng. J.* 2014; 252: 220-229.
69. Vlasova EA, Yakimov SA, Naidenko EV & et al. Application of metal-organic frameworks for purification of vegetable oils. *Food Chem.* 2016; 190: 103-109.
70. Ke F, Peng C, Zhang T & et al. Fumarate-based metal-organic frameworks as a new platform for highly selective removal of fluoride from brick tea. *Sci. Rep.* 2018; 8: 939.
71. Liu M, Wang J, Yang Q & et al. Patulin removal from apple juice using a novel cysteine-functionalized metal-organic framework adsorbent. *Food Chem.* 2019; 270:1-9.
72. Yang Q, Wang Y, Wang J & et al. High effective adsorption/removal of illegal food dyes from contaminated aqueous solution by Zr-MOFs (UiO-67). *Food Chem.* 2018; 254: 241-248.
73. Abdelhameed RM, Abdel-Gawad H, Taha M & Hegazi B. Separation of bioactive chamazulene from chamomile extract using metal-organic framework. *J. Pharm. Biomed.*

Anal. 2017;146: 126-134.

74. Xie W, Yang X & Hu P. Cs2.5H0.5PW12O40 Encapsulated in metal-organic framework UiO-66 as heterogeneous catalysts for acidolysis of soybean oil. *Catal. Lett.* 2017;147: 2772-2782.

استناد به این مقاله

قاسم‌زاده، محمدعلی؛ موقاری، ریحانه؛ باقری، فاطمه (۱۴۰۰). مروری بر پتانسیل‌های نانوساختارهای فلزی- آلی در ایمنی مواد غذایی. *بیولوژی کاربردی*، دوره ۱۱، شماره ۴۱، ص ۴۱-۶۶.