Science Popularization

From Reticular Chemistry to Modern Medicine: The Story of the 2025 Nobel Prize in Chemistry

Mohammad Edrisi[*,1], **Hossein Daneshgar**[**,1,2]

Article Info

Article type:
Popularization of Science

Article history:

Receive Date:
06 May 2026

Revise Date:
18 May 2026

Accept Date:
19 May 2026

Available online:
21 June 2026

Keywords:

Reticular chemistry
Noble Prize in Chemistry
Metal Organic Framework
Biomedical Science

The 2025 Nobel Prize in Chemistry was awarded to the pioneers of reticular chemistry, Omar Yaghi, Richard Robson, and Susumu Kitagawa, for the development of Metal-Organic Frameworks (MOFs). Richard Robson's theoretical work in the 1970s and 1980s was truly pioneering and ahead of its time. He was the first to mathematically and geometrically formulate and publish the concept of constructing infinite coordination networks from molecular building blocks. Yaghi and Kitagawa, independently and concurrently, moved toward constructing such networks driven by practical motivations, such as gas storage and separation, and relying on new synthesis techniques. They were not directly inspired by Robson's theory, but they worked within a broader intellectual framework of which he was one of the architects. This is a field that has brought about a fundamental transformation in the design and engineering of molecular structures over the past two decades. Reticular chemistry entails the design and construction of porous frameworks using predictable intra- and intermolecular bonds, which can be tailor-made for diverse purposes. In addition to MOFs, structures such as Covalent Organic Frameworks (COFs) are also of great interest. Due to their exceptionally high pore volume and surface area, chemical stability, functional tunability, design diversity, and rich host-guest chemistry, these compounds have created unprecedented opportunities in modern medicine, industry, and environmental science. This article, focusing on the achievements recognized by the 2025 Nobel Prize, examines the historical development of reticular chemistry, its chemical foundations, and its biomedical applications, including targeted drug delivery, biosensors, medical imaging, and tissue engineering. An analysis of the accomplishments and operational challenges in translating this technology from the laboratory to the clinic is also presented. Compiled with the aim of reviewing historical developments, the principles of reticular chemistry, and biomedical applications, this article outlines the scientific and practical journey of this molecular revolution.

Cite this article: Edrisi, Mohammad; Daneshgar, Hossein (2026). From Reticular Chemistry to Modern Medicine: The Story of the 2025 Nobel Prize in Chemistry. *Science Cultivation*, 16 (1).62-68.

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights.
Publisher: Foundation for the Advancement of Science and Technology in Iran (FAST-IRAN) and Iran Society of Biophysical Chemistry (ISOBC)

[*] Corresponding Author: Researcher; Tel: +982161113381, Fax: +982166404680, E-mail: mohammadedrisi@ut.ac.ir
[**] Corresponding Author. PhD. Tel: +989122053686, E-mail: hossein.daneshgar@ch.sharif.edu
[1] Institute of Biochemistry and Biophysics (IBB), University of Tehran, Tehran, Iran
[2] Department of Inorganic Chemistry, School of Chemistry, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Print ISSN 2008-935X Online ISSN 2783-0934 https:/www.sciencecultivation.ir

از شیمی شبکه‌ای تا پزشکی نوین: روایت نوبل شیمی ۲۰۲۵

محمد ادریسی*[۱]، حسین دانشگر**[۲،۱]

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله ترویجی

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت:
۱۴ اردیبهشت ۱۴۰۵
تاریخ بازنگری:
۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۵
تاریخ پذیرش:
۲۹ اردیبهشت ۱۴۰۵
تاریخ انتشار:
۳۱ خرداد ۱۴۰۵

کلیدواژه‌ها:
شیمی شبکه‌ای
تحولات تاریخی
جایزه نوبل
چارچوب‌های فلز–آلی
زیست‌پزشکی

چکیده

جایزه نوبل شیمی ۲۰۲۵ به پیش‌گامان شیمی شبکه‌ای عمر یاغی، ریچارد رابسون و سوسومو کیتاگاوا، برای معرفی و توسعه چارچوب‌های فلز–آلی (Metal Organic Framework (MOF، اعطا شد. پژوهش نظری ریچارد رابسون در دهه ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ کاملاً نوآورانه و روبه‌جلو و ورای زمان خود بود. او را می‌توان دانشمندی در شیمی دانست که به‌صورت ریاضی و هندسی، مفهوم ساخت شبکه‌های نامحدود کوئوردیناسیونی از واحدهای ساختمانی مولکولی را فرموله و اقدام به انتشار آن کرد. یاغی و کیتاگاوا، به‌طور مستقل و هم‌زمان، با انگیزه‌های کاربردی مانند ذخیره گاز و مدل‌های جداسازی و با تکیه‌بر روش‌های سنتز جدید، به سمت ساخت و توسعه چنین شبکه‌هایی حرکت کردند. آن‌ها مستقیماً از نظریه رابسون الهام نگرفتند، اما در بستر فکری گسترده‌تری کار می‌کردند که رابسون یکی از معماران آن بود. حوزه‌ای که در دو دهه گذشته تحول بنیادینی در طراحی و مهندسی ساختارهای مولکولی ایجاد کرده است. شیمی شبکه‌ای را می‌توان به معنای طراحی و ساخت چارچوب‌هایی با ویژگی تخلخل دانست که با استفاده از پیوندهای درون و برون مولکولی قابل‌پیش‌بینی است. همچنین این ساختارها می‌توانند به‌صورت خاص برای اهداف متنوع ساخته شوند. علاوه بر MOFها، چارچوب‌های آلی کووالانسی (Covalent Organic Framework (COF ازجمله ساختارهای موردتوجه می‌باشند. این ترکیبات به دلیل دارا بودن حجم منافذ و مساحت سطح بسیار بالا، پایداری شیمیایی و قابلیت عملکردی، تنوع در طراحی و شیمی غنی میزبان–میهمان فرصت‌های بی‌سابقه‌ای در پزشکی نوین، صنعت و محیط‌زیست ایجاد کرده‌اند. در این مقاله، باتکیه‌بر دستاوردهای نوبل ۲۰۲۵، تاریخچه، مبانی شیمی شبکه‌ای و کاربردهای زیست‌پزشکی آن مانند دارورسانی هدفمند، حسگرهای زیستی، تصویربرداری و مهندسی بافت بررسی شده است. همچنین چالش‌های انتقال این فناوری از آزمایشگاه به بالین تحلیل شده است.

استناد: ادریسی،محمد و دانشگر،حسین . (۱۴۰۵). از شیمی شبکه‌ای تا پزشکی نوین: روایت نوبل شیمی ۲۰۲۵. *نشاء علم*، ۱۶ (۱)، ۶۲–۶۸.

ناشر: بنیاد پیشبرد علم و فناوری در ایران و انجمن بیوشیمی فیزیک ایران

© نویسندگان حق نشر و کلیه حقوق انتشار را برای خود حفظ می‌کنند.

* عهده‌دار مکاتبات: پژوهشگر؛ تلفن: ۶۱۱۱۳۳۸۱ (۹۸۲۱+)، دورنگار: ۶۶۴۰۴۶۸۰ (۹۸۲۱+)، آدرس الکترونیکی: mohammadedrisi@ut.ac.ir

** عهده‌دار مکاتبات: دکتری، تلفن: ۹۱۲۲۰۵۳۶۸۶ (۹۸+)، آدرس الکترونیکی: hossein.daneshgar@ch.sharif.edu

[۱] مرکز تحقیقات بیوشیمی و بیوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

[۲] بخش شیمی معدنی، دانشکده ی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۱- مقدمه: جایزه نوبل و خاستگاه اندیشه شیمی شبکه‌ای

شیمی ساختارهای شبکه‌ای به‌عنوان شاخه‌ای نوین، توانسته است افق‌های تازه‌ای را در طراحی و مهندسی ساختارهای متخلخل و عملکردگرای مولکولی باز کند. ایده اصلی این حوزه بر پایه این باور شکل گرفت که مولکول‌ها می‌توانند مانند داربست‌های ساختمانی، در ساختارهای سه‌بعدی و یا دوبعدی و تکرارشونده کنار هم قرار گیرند و چارچوب‌های منظم و قابل‌پیش‌بینی بسازند. این مفهوم در اواخر قرن بیستم، هم‌زمان با پیشرفتی هماهنگ در فلزات و مواد آلی شروع به رشد کرد. MOFها[1] وCOFها[2] نمونه‌های شاخصی از این ساختارهای شبکه‌ای هستند که باتوجه‌به نوع پیوند و هندسه مولکولی، می‌توانند خواص فیزیکی و شیمیایی متنوعی داشته باشند. MOFها معمولاً متشکل از خوشه‌های فلزی به‌عنوان گره‌ها و لیگاندهای متقارن آلی به‌عنوان پل‌ها یا اتصال‌دهنده‌ها هستند و در نتیجه شبکه‌ای سه‌بعدی و متخلخل ایجاد می‌کنند. البته در طراحی‌های مدرن ساختارهای دوبعدی نیز این ترکیبات مورد توجه قرار گرفته‌اند. COFها که عمدتاً از پیوندهای قوی کووالانسی بین واحدهای آلی تشکیل شده‌اند، ویژگی‌های مکانیکی و حرارتی بسیار بالایی دارند و باتوجه‌به ظرفیت بالای سطح فعال آن‌ها، امکان اصلاح و طراحی شیمیایی و زیستی برای عملکردهای ویژه وجود دارد. شیمی شبکه‌ای نه‌تنها یک پیشرفت نظری و نوآوری علمی است، بلکه کاربردهای عملی گسترده‌ای نیز باتوجه‌به ایجاد خواص منحصربه‌فرد خود، پیدا کرده است. از جمله کاربردهای مورد استفاده می‌توان به حوزه انرژی، باتری‌ها، ذخیره هیدروژن، تصفیه آب، جذب آلاینده‌های گازی و زیست‌پزشکی اشاره کرد. در حوزه زیست‌پزشکی، این چارچوب‌ها می‌توانند داروها، عوامل تصویربرداری، یا حسگرهای مولکولی را در خود جای دهند و آن‌ها را به‌صورت هدفمند به سلول‌ها یا بافت‌های خاص انتقال دهند. در مواردی خود چارچوب‌ها نیز می‌توانند خواص جالبی را از خود نشان دهند به‌علاوه می‌توان آن‌ها را پاسخگو به متغیرهای زیست‌شیمیایی بدن طراحی کرد. این ویژگی‌ها، همراه با پایداری و تنوع بی‌نظیر ساختاری، شیمی ترکیبات شبکه‌ای را به یکی از مهم‌ترین ابزارهای نوظهور در زیست‌فناوری و پزشکی تبدیل کرده است. تخصیص جایزه نوبل شیمی ۲۰۲۵ به این حوزه، گواهی بر اهمیت بنیادی و کاربردی آن است و توجه جامعه علمی جهان را به طراحی مولکولی دقیق و قابل‌کنترل جلب می‌کند. این مقاله باهدف مرور تحولات تاریخی، اصول شیمی شبکه‌ای و کاربردهای زیست‌پزشکی، مسیر علمی و عملی این انقلاب مولکولی را بررسی می‌کند.

۲- مسیر فکری سه دانشمند

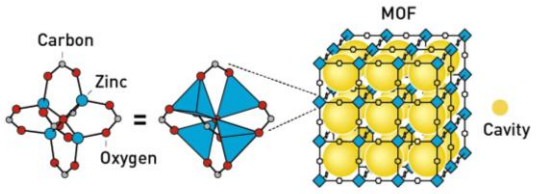
۲-۱. عمر یاغی[3]: معمار کریستال‌های نامحدود

عمر یاغی، شیمی‌دان اردنی-آمریکایی، به‌عنوان یکی از پرشورترین معماران جهان شیمی مولکول‌ها شناخته می‌شود. ایده اصلی پژوهش او ساده و درعین‌حال انقلابی است. اگر بتوان اتم‌ها و مولکول‌ها را مانند آجرهای یک ساختمان بادقت اتمی به هم متصل کرد، می‌توان بی‌نهایت ساختار جدید با خواص سفارشی ساخت. یاغی این رؤیا را به واقعیت تبدیل کرد. زندگی علمی او مسیری الهام‌بخش از کودکی توأمان با سختی بسیار در زندگی تا آزمایشگاه‌های پیشرفته تحقیقاتی را طی کرده است. رؤیای ذهنی او در دوره نوجوانی، قدرت علم شیمی در به دام انداختن و حفظ آب بوده است که می توان ریشه آن را در سختی های کودکی و نوجوانی او قلمداد کرد. پس از دکترا، او مفهوم شیمی شبکه‌ای را بنیان نهاد، یک نظام طراحی برای ساخت MOFها و بعدها COF ها با پیش‌بینی ساختار نهایی مطرح نموده است. از جمله دستاورد او در اواخر دهه ۱۹۹۰، سنتز MOF-5 بود، یک ساختار متخلخل کریستالی با سطحی نزدیک به وسعت یک زمین فوتبال در هر گرم (۱) (شکل ۱). این ماده رکوردهای جالبی را ثبت و ثابت کرد که می‌توان کریستال‌هایی با فضاهای خالی عظیم و کنترل‌شده ایجاد کرد. یاغی و تیم‌اش به طور خستگی‌ناپذیری این شبکه‌ها را برای جذب مقادیر باورنکردنی گازها (مانند هیدروژن برای سوخت پاک یا دی‌اکسیدکربن برای مهار تغییرات آب‌وهوایی)، تصفیه آب با استخراج بخارات آن از هوا در بیابان، و ذخیره‌سازی هدفمند دارو در پزشکی بهینه‌سازی کرده‌اند. یاغی آب را در ساختارهای

[1] Metal Organic Framework
[2] Covalent Organic Framework
[3] Omar M. Yaghi

https://www.sciencecultivation.ir 2783-0934 شاپا الکترونیکی 2008-935X شاپا چاپی

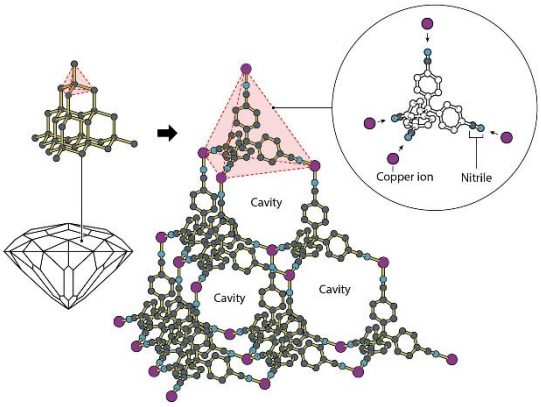
شبکه‌ای دید و این همان لحظه به حقیقت پیوستن رؤیای نوجوانی‌اش بود. انرژی‌های پاک یکی دیگر از انگیزه‌های اصلی اوست. او اغلب با اشتیاق درباره دیدگاهش برای حل چالش‌های جهانی از طریق طراحی مولکولی دقیق سخن می‌گوید. ایشان برنده جایزه مصطفی در سال ۲۰۱۵ و برنده نوبل ۲۰۲۵، به مناسبت تلاش‌های یک‌عمر او برای تبدیل شیمی به هنر خلق فضاهای نو است.



شکل ۱: MOF-5 عمر یاغی

۲-۲. ریچارد رابسون[1]: فیلسوف پیوندهای مولکولی

درحالی‌که یاغی بیشتر بر توسعه سنتز و کاربرد تمرکز دارد، ریچارد رابسون، شیمی‌دان استرالیایی، بنیان‌های فکری و فلسفی شیمی شبکه‌ای را بنیان نهاد. او در دانشگاه ملبورن، سال‌ها قبل از آنکه فناوری‌های آزمایشگاهی آن زمان امکان سنتز چنین ساختارهایی را بدهد، قدرت پیش‌بینی و طراحی شبکه‌های نامحدود مولکولی را در ذهن خود متصور شد. کار پیشگامانه رابسون در اواخر دهه ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰، مفهوم سنگ بنای کل این شاخه از شیمی است. او اولین کسی بود که با الهام از ساختار الماس به طور سیستمی این ایده را مطرح کرد که می‌توان با استفاده از گره‌ها مانند یون‌های فلزی مس به‌جای کربن و اتصال‌دهنده‌ها یا لیگاندهای آلی با انتهای نیتریل، و با درنظرگرفتن قواعد هندسی و تقارن، ساختارهای گسترده سه‌بعدی را از قبل طراحی کرد (۱) (شکل ۲). او نشان داد که شیمی را می‌توان از یک علم تجربی اکتشافی، به یک رشته مهندسی دقیق تبدیل کرد. مفاهیمی که باور آن‌ها در زمان برای سایر شیمی‌دان‌ها سخت دشوار بود. مقالات نظری و دستاوردهای آزمایشگاهی او نقشه راهی بود که دیگران مانند یاغی و کیتاگاوا را راهنمایی کرد، اما نه مستقیم مانند یک رابطه شاگرد استادی و حتی دارای ارتباطی مستقیم بین این سه دانشمند. بلکه کاملاً غیرمستقیم هر سه یک مفهوم را دنبال می‌کردند. رابسون یک متفکر عمیق بود که زیبایی ریاضیاتی و نظم ذاتی در پیوندهای مولکولی را جستجو می‌کرد. کار او ثابت کرد که خواص مواد (مانند تخلخل یا پایداری) مستقیماً از هندسه و نوع اتصالات مولکولی آن‌ها ناشی می‌شود. این بینش، امکان جستجو در فضای وسیعی از ترکیبات ممکن را به‌جای آزمایش تصادفی فراهم آورد. اگر یاغی و کیتاگاوا را معمار عملی بدانیم، رابسون نظریه‌پرداز کلان این قلمرو جدید است. نوبل ۲۰۲۵ برای رابسون تقدیری دیرهنگام اما شایسته از بینش ژرفی است که زمینه را برای یک انقلاب در علم مواد فراهم کرد.



شکل ۲: مدل شبکه‌ای ریچارد رابسون

۲-۳. سوسومو کیتاگاوا[2]: کاشف دنیاهای پویا و انعطاف‌پذیر

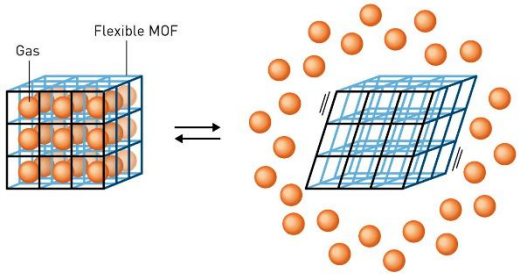
سوسومو کیتاگاوا، شیمیدان ژاپنی، بعد سوم و شگفت‌انگیز شیمی شبکه‌ای را کشف کرد، پویایی! درحالی‌که دیگران در جستجوی ساختارهای سفت‌وسخت و پایدار بودند، کیتاگاوا و تیمش در دانشگاه کیوتو، در اوایل دهه ۱۹۹۰، از اولین گروه‌هایی بودند که MOFها را سنتز کردند و متوجه پدیده عجیبی شدند. برخی از این کریستال‌ها مثل اسفنج زنده، در پاسخ به محرک‌های خارجی دارای پویایی‌ای هستند که گویی تنفس می‌کنند. کیتاگاوا نشان داد که چارچوب‌های متخلخل لزوماً مانند یک اسکلت ساختمانی ثابت نیستند. آن‌ها می‌توانند به طور برگشت‌پذیر منبسط یا منقبض شوند، منافذ خود را در حضور مولکول‌های خاص باز یا بسته کنند، و ساختار خود را تغییر دهند. مطابق شکل ۳، این کشف انقلابی، MOFها را از مواد جاذب ایستا به مواد هوشمند پاسخگو تبدیل کرد. این ویژگی راه را برای حسگرهای فوق‌حساس،

[1] Richard Robson
[2] Susumu Kitagawa

https://www.sciencecultivation.ir 2783-0934 شاپا الکترونیکی 2008-935X شاپا چاپی

سیستم‌های رهایش دارو که تنها در شرایط خاص بدن دارو را آزاد می‌کنند، و جداسازی انتخابی مولکول‌هایی با اختلاف اندک در اندازه یا شکل هموار ساخت. کار کیتاگاوا عمق و ظرافت شیمی شبکه‌ای را افزایش داد. او ثابت کرد که فضای خالی درون این مواد می‌تواند فعال و پویا باشد (۱). رویکرد دقیق و آزمایشگاهی او در سنتز و توصیف این مواد، درک بنیادی ما از نحوه تعامل این چارچوب‌ها با مولکول‌های میهمان را عمق بخشید. به جرات می‌توان اذعان داشت که شاخص شدن این منظر از شیمی ساختارهای شبکه‌ای، یعنی پویایی، تاثیری عمیق بر فعالیت‌های زیستی گذاشت و چراغی جدید بر یک مسیر نو در تحقیقات زیست‌پزشکی و محیط‌زیستی افروخت. نوبل ۲۰۲۵ به کیتاگاوا، قدردانی از کشف جنبه زنده و کاربردی‌تر این معماری‌های مولکولی است که آن‌ها را برای تعامل با دنیای واقعی زیستی و محیط‌زیست ایدئال می‌سازد.

شکل ۳: دستاورد کیتاگاوا در ساخت چارچوب های فلز-آلی پویا و منعطف



باید گفت که کار سه دانشمند مستقل از هم در سه‌گوشه از جهان اما در بستر فکری مشابهی انجام شده است. به بیان ساده، یاغی و کیتاگاوا قاره جدیدی را کشف کردند، اما رابسون نقشه جامع آن قاره را سال‌ها قبل ترسیم کرده بود. نوبل مشترک ۲۰۲۵ به‌درستی از این سه‌گانه تقدیر کرد. دو کاشف نابغه که رؤیا را واقعیت بخشیدند و یک فیلسوف علم که چارچوب فکری آن را ساخت. این، نمایش زیبای همکاری ناخواسته اما ضروری بین نظریه و آزمایش در پیشرفت علم است.

۳- مفهوم شبکه‌سازی در سطح مولکولی و تولد چارچوب‌های متخلخل

شبکه‌سازی مولکولی به معنای ایجاد ساختارهایی است که در آن مولکول‌ها به‌صورت منظم و قابل‌پیش‌بینی با یکدیگر پیوند می‌خورند تا یک چارچوب سه‌بعدی ایجاد شود. ایده اصلی این رشته بر دو اصل انتخاب گره‌های فلزی مناسب و اتصال‌دهنده‌های آلی (ساختار هیبریدی) و پیش‌بینی هندسه و تقارن ساختاری که این مولکول‌ها ایجاد می‌کنند، استوار است. MOFها از اولین و شاخص‌ترین نمونه‌های موفق شبکه‌های متخلخل هیبریدی هستند که به دلیل انعطاف‌پذیری طراحی و حجم داخلی بسیار بالا، موردتوجه ویژه قرار گرفتند. گره‌های فلزی که معمولاً شامل یون‌های گذار یا خوشه‌های فلزی هستند، با لیگاندهای متقارن آلی متصل می‌شوند تا ساختارهایی با تخلخل قابل‌تنظیم شکل دهند [۱]. این ویژگی امکان ذخیره‌سازی مولکول‌های کوچک، انتقال هدفمند دارو، یا ایجاد محیط‌های واکنش شیمیایی خاص را فراهم می‌کند [۲]. COFها که فاقد گروه‌های فلزی‌اند، با استفاده از پیوندهای کووالانسی میان واحدهای آلی، شبکه‌هایی با استحکام مکانیکی بالا و قابلیت اصلاح شیمیایی گسترده را تولید می‌کنند [۳]. تفاوت اصلی COFها با MOFها در ماهیت پیوندها و ترکیب شیمیایی آن‌هاست، اما هر دو نوع چارچوب به دلیل سطح بسیار زیاد و قابلیت عملکردگرایی، فرصت‌های بی‌سابقه‌ای در دارورسانی، تصویربرداری پزشکی و رفع آلودگی‌های زیست‌محیطی پدید می‌آورند [۴]. در طول دو دهه اخیر با پیشرفت در شیمی محاسباتی و کامپیوتری در طراحی و سنتز ترکیبات و ساختارهای شیمیایی، امکان طراحی شبکه‌های مولکولی بادقت اتمی برای کاربردهای مدنظر را فراهم کرده است. این پیشرفت‌ها شامل شبیه‌سازی هندسه شبکه، پیش‌بینی تخلخل، و ارزیابی پایداری ترمودینامیکی هستند. به‌علاوه، توسعه روش‌های خودساخته مولکولی و کاتالیزورهای خاص، امکان تولید چارچوب‌های پیچیده با هندسه کنترل‌شده را فراهم کرده است.

۴- پویایی ساختارهای شبکه‌ای و مهندسی پیوندهای قابل‌پیش‌بینی

یکی از ویژگی‌های کلیدی شیمی شبکه‌ای، امکان کنترل دقیق پویایی و رفتار شبکه‌هاست. برخلاف ساختارهای مولکولی مرسوم که ثابت و ایستا هستند، چارچوب‌های MOF و COF می‌توانند رفتاری پویا و انعطاف‌پذیر در پیوندها و هندسه شبکه خود نشان دهند [۵]. در سطح مولکولی، هر گره و پل اتصال‌دهنده می‌تواند به‌گونه‌ای طراحی شود که تحت شرایط محیطی متفاوت، تغییر شکل داده یا پاسخ دهد، بدون اینکه ساختار کل شبکه تخریب شود [۶]. کنترل این پویایی به چند عواملی مانند ماهیت شیمیایی

https://www.sciencecultivation.ir 2783-0934 شاپا الکترونیکی 2008-935X شاپا چاپی

گره‌ها و پل‌ها، طول و هندسه لیگاندها و نوع تعاملات غیرکووالانسی که عمدتاً با حضور گروه‌های عاملی مختلف در ساختار تقویت می‌شوند، بستگی دارد. مهندسی دقیق این پارامترها امکان طراحی شبکه‌های قابل باز و بسته‌شدن، جذب انتخابی مولکول‌ها و فعال‌سازی پاسخ‌های شیمیایی در محل هدف را فراهم می‌کند. به‌عنوان‌مثال، برخی MOFها می‌توانند در حضور رطوبت یا دما تغییر حجم دهند و مسیر عبور مولکول‌ها را باز یا بسته کنند، پدیده‌ای که در رهایش هدفمند دارو کاربرد دارد [۷]. همچنین این پویایی به بهبود عملکرد زیست‌حسگرها کمک می‌کند. در COFها، طراحی پیوندهای کووالانسی قابل واکنش اجازه می‌دهد که شبکه به طور انتخابی به‌عنوان میزبان با مولکول میهمان واکنش دهد و پاسخ سریع تولید کند. پژوهشگران فعال در شیمی محاسباتی و شبیه‌سازی مولکولی، توانسته‌اند رفتار پویایی شبکه‌ها را پیش‌بینی کنند و ساختارهای بهینه را قبل از سنتز واقعی انتخاب کنند.

۴-۱. از شیمی تا پزشکی: پیوند شبکه‌های مولکولی با داروسازی نوین

یکی از بزرگ‌ترین دستاوردهای شیمی شبکه‌ای، کاربردهای آن در پزشکی نوین است. چارچوب‌های MOF و COF به دلیل سطح فعال بالا، تخلخل قابل‌کنترل، و قابلیت عملکردگرایی انتخابی، ابزار ایده‌آلی برای دارورسانی هدفمند به شمار می‌روند [۸]. این شبکه‌ها می‌توانند داروها را به‌صورت پایدار درون ساختار خود جای دهند و در محل موردنظر رهایش کنترل‌شده داشته باشند [۹]. مزیت اصلی این رویکرد، کاهش عوارض جانبی دارو و افزایش کارایی درمان است. با طراحی دقیق اندازه منافذ و سطح داخلی، می‌توان مولکول دارو را به‌گونه‌ای انتخاب کرد که تنها در بافت هدف آزاد شود. علاوه بر دارورسانی، MOFها و COFها می‌توانند به‌عنوان حامل‌های هم‌زمان چند دارو عمل کنند، به‌طوری که ترکیب‌های دارویی مختلف در یک چارچوب واحد، با الگوهای متفاوت بارگیری مانند بارگیری لایه‌لایه بعد از سنتز بستر و یا همزمان با سنتز قرار گیرند و به طور هماهنگ آزاد شوند. شبکه‌های مولکولی همچنین امکان تزریق داروهای مورداستفاده در تصویربرداری پزشکی و زیستی را فراهم می‌کنند. این امر در تصویربرداری پزشکی و ردیابی سلول‌ها یا بافت‌های خاص، مانند تومورها، اهمیت دارد [۱۰]. همچنین کاربردهای تشخیصی ساختارهای شبکه‌ای متخلخل، باتوجه‌به سطح گسترده فعال و دارای تنوع برای طراحی‌های اختصاصی متنوع و متعدد دکورهای سطحی در طراحی و توسعه حسگرهای تشخیصی در بیماری‌های تخریب عصبی که در سال‌های اخیر میزان مبتلایان شناسایی شده آن بسیار افزایش یافته است، پیشرفت‌های چشمگیری داشته است [۱۱]. کاربرد ترکیبی دارو، تشخیص (Therapeutic and Diagnosis) و تصویربرداری یا جفت‌کردن یک رادیوداروی تشخیصی و یک رادیوداروی درمانی برای هدف قراردادن یک نشانگر زیستی مشترک برای تشخیص و درمان را که اصطلاحاً به ترانوستیک (Theranostics) معروف است، یکی از پیشرفته‌ترین حوزه‌های مورداستفاده و دارای کاربرد از شیمی شبکه‌ای در تحقیقات و خدمات زیست‌پزشکی است.

۴-۲. شبکه‌ها در تشخیص، تصویربرداری و رهایش هدفمند دارو

همان‌گونه که قبل‌تر اشاره شد، چارچوب‌ها می‌توانند مولکول‌های نشانگر یا داروها را در خود جای دهند و تحت شرایط مشخص و معین آزاد کنند، که این امر امکان ردیابی دقیق بافت‌ها و سلول‌های هدف را فراهم می‌آورد. در تصویربرداری پزشکی، استفاده از این شبکه‌ها باعث افزایش وضوح تصاویر و کاهش نیاز به دوز بالای عوامل تضادنوری و وضوح تصویر می‌شود. یکی از کاربردهای برجسته، طراحی زیست‌حسگرها مبتنی بر ساختارهای شبکه‌ای است. این حسگرها قادرند به طور انتخابی با گونه‌های خاص واکنش دهند و تغییر فیزیکی یا شیمیایی قابل‌اندازه‌گیری ایجاد کنند. این تغییر می‌تواند به شکل سیگنال فلورسانس، تغییر رنگ، یا پاسخ الکتروشیمیایی باشد. شبکه‌های پویای قابل باز و بسته شدن، امکان تنظیم حساسیت حسگرها را فراهم می‌آورد و در تشخیص زودهنگام بیماری‌ها بسیار مؤثر است [۱۰]. در رهایش هدفمند دارو نیز چارچوب‌های متخلخل امکان کنترل سرعت و زمان آزادسازی دارو را فراهم می‌کنند. با طراحی اندازه منافذ و عملکرد سطحی چارچوب، دارو می‌تواند تنها در محل بافت هدف آزاد شود. این ویژگی باعث کاهش عوارض جانبی و افزایش کارایی درمان می‌شود [۹]. علاوه بر داروهای شیمیایی، ساختارهای شبکه‌ای می‌توانند مولکول‌های زیستی مانند پروتئین‌ها و قطعات ژنتیکی خاص را نیز حمل کنند و به‌صورت هدفمند به سلول‌ها برای اهداف ازپیش‌تعیین‌شده مانند انجام واکنش‌های آنزیمی یا کریسپر برسانند [۱۲]. همچنین، ترکیب شیمی شبکه‌ای با روش‌های تصویربرداری پیشرفته مانند MRI و CT، امکان ایجاد

https://www.sciencecultivation.ir 2783-0934 شاپا الکترونیکی 2008-935X شاپا چاپی

سیستم‌های ترکیبی دارو تصویربرداری را فراهم کرده است. این سیستم‌ها به پزشکان اجازه می‌دهند که درمان و ردیابی فرایند درمان را به‌صورت هم‌زمان انجام دهند و دقت بالینی را افزایش دهند.

۴-۳. افق‌های آینده: از آزمایشگاه تا بالین

باوجود پیشرفت‌های چشمگیر، چالش‌های مهمی در مسیر ترجمه شیمی شبکه‌ای به کاربردهای بالینی وجود دارد. یکی از اصلی‌ترین مسائل، پایداری شبکه‌ها در شرایط فیزیولوژیکی است. برخی چارچوب‌ها در حضور آب یا یون‌های موجود در محیط بدن ممکن است دچار تخریب شوند که این امر بر ایمنی و کارایی رهایش دارو تأثیر می‌گذارد. مسئله دیگر، تولید انبوه و استانداردسازی این ساختارهای شبکه‌ای متخلخل با ویژگی‌های متنوع فیزیکوشیمیایی است. سنتز MOFها وCOFها در مقیاس صنعتی با حفظ ویژگی‌های ساختاری و تکرارپذیری چالشی اساسی محسوب می‌شود. علاوه‌برآن، مسائل مرتبط با زیست‌سازگاری و دفع چارچوب‌ها پس از انجام عملکرد، نیازمند تحقیقات گسترده در حوزه ایمنی و سم‌شناسی و حتی محیط‌زیستی است. به‌علاوه هویت زیستی این ساختارها و مواجهه آن‌ها با محیط و سلول‌های زنده از مباحث مهم و به‌روز مرز تحقیقات به‌حساب می‌آید [۱۳]. همچنین، ترکیب شبکه‌ها با نانومواد دیگر، زیست‌مولکول‌ها و فناوری‌های هوشمند، مسیر توسعه سیستم‌های چندمنظوره برای دارورسانی و تصویربرداری را هموار کرده است. شیمی شبکه‌ای نه‌تنها تحولی در علم شیمی ایجاد کرده؛ بلکه نمونه‌ای شاخص از همگرایی بین‌رشته‌ای است، جایی که با اشتراک‌گذاری دیدگاه‌های شیمیایی، فیزیکوشیمیایی، محاسباتی، زیستی و پزشکی موجب طراحی ساختاری دقیق می‌گردد که می‌تواند تأثیرات به سزایی در سلامت انسان داشته باشد. تلاش‌های پژوهشی در این حوزه احتمالاً منجر به تولید نسل جدید داروها، حسگرهای زیستی و سیستم‌های تصویربرداری بادقت و کارایی بالا خواهد شد.

این مقاله و یا بخشی از آن قبلا چاپ نشده و توسط ماشین و هوش مصنوعی نگارش نشده است.

از حمایت‌های دکتر علی‌اکبر موسوی موحدی، ریاست مرکز تحقیقات بیوشیمی و بیوفیزیک دانشگاه تهران قدردانی می‌گردد.

وبگاههای رجوع‌شده

(1). Popular information. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach 2026. Mon. 18 May 2026. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2025/popular-information/>

منابع Reference

[1]. Introduction to Metal–Organic Frameworks. Chemical Reviews. 2012;112(2):673-4.

[2]. Wang A, Walden M, Ettlinger R, Kiessling F, Gassensmith JJ, Lammers T, et al. Biomedical Metal–Organic Framework Materials: Perspectives and Challenges. Advanced Functional Materials. 2024;34(43):2308589.

[3]. Geng K, He T, Liu R, Dalapati S, Tan KT, Li Z, et al. Covalent Organic Frameworks: Design, Synthesis, and Functions. Chemical Reviews. 2020;120(16):8814-933.

[4]. Chen C, Shen L, Wang B, Lu X, Raza S, Xu J, et al. Environmental applications of metal–organic framework-based three-dimensional macrostructures: a review. Chemical Society Reviews. 2025;54(5):2208-45.

[5]. Hou Y, Su Z, Wu Y, Ma J. Hierarchically engineered flexible COF/CNT-MOF composite membrane with interpenetrated pores for water purification. Separation and Purification Technology. 2025;358:130310.

[6]. Song Y, Ma S. Pore engineering in metal–organic frameworks and covalent organic frameworks: strategies and applications. Chemical Science. 2025;16(26):11740-67.

[7]. Xiang Y, Wei S, Wang T, Li H, Luo Y, Shao B, et al. Transformation of metal-organic frameworks (MOFs) under different factors. Coordination Chemistry Reviews. 2025;523:216263.

[8]. Edrisi M, Daneshgar H, Rabiee N, Arghavani P, Moosavi-Movahedi F, Zare Karizak A, et al. Doxorubicin bioavailability to human hemoglobin and cancer cells via MOF-A520. Journal of Molecular Liquids. 2024;394:123724.

[9]. Daneshgar H, Bagherzadeh M, Sojdeh S, Safarkhani M, Edrisi M, Ojaghi A, et al. Discovery of valley-hill structures on the surface of MOFs:

Diseases. Advanced Healthcare Materials. 2025;14(26):2404685.

[12]. Rabiee N, Rabiee M. Engineered Metal–Organic Frameworks for Targeted CRISPR/Cas9 Gene Editing. ACS Pharmacology & Translational Science. 2025;8(4):1028-49.

[13]. Daneshgar H, Bagherzadeh M. Logic of Choosing Metal-Organic Frameworks. Logic for Metal–Organic Framework Selection: MOFs for Biomedical Applications. ACS Symposium Series. 1463: American Chemical Society; 2024. p. 39-47.

Enhancing DOX diffusion and release through nature-made channels. Nano Materials Science. 2024.

[10]. Rabiee N, Daneshgar H, Arghavani P, Edrisi M, Rabiee M, Akrami-Hasan-Kohal M, et al. Recent advances in triplet-state materials: A perspective towards bioimaging and biosensing. Coordination Chemistry Reviews. 2026;548:217160.

[11]. Arghavani P, Daneshgar H, Sojdeh S, Edrisi M, Moosavi-Movahedi AA, Rabiee N. Porous Materials for Early Diagnosis of Neurodegenerative

شاپا چاپی 2008-935X شاپا الکترونیکی 2783-0934 https:/www.sciencecultivation.ir