

فتوکاتالیز: واکنشی از نور، امیدی برای آینده‌ای پاک



نویسنده: شیما شعبانی

شده است. فتوکاتالیز، یکی از پیشروترین حوزه‌های پژوهش در شیمی و مهندسی محیط زیست است که از قدرت نور برای پیشبرد واکنش‌های شیمیایی استفاده می‌کند. این فناوری ترکیبی است از شیمی حالت جامد، شیمی سطح، و فیزیک نور که مسیرهای جدیدی را برای حل چالش‌های جهانی مانند آلودگی آب، هوا و انرژی‌های تجدیدپذیر باز کرده است.

اگر بتوان با کمک نور خورشید، آب آلوده را تصفیه کرد، هوا را از گازهای سمی پاک کرد، سطوح را ضدعفونی نمود، و حتی از خود آب، هیدروژن به‌عنوان سوخت تولید کرد، دیگر چه نیازی به سوخت‌های فسیلی و مواد شیمیایی خطرناک است؟ این آرزو، حالا دیگر فقط یک رؤیای علمی‌تخیلی نیست؛ بلکه در دنیای شیمی مدرن، با پدیده‌ای به نام فتوکاتالیز به واقعیت نزدیک

کاربردهایی فراتر از تصور

(۳) تولید هیدروژن: شاید شگفت‌انگیزترین کاربرد فتوکاتالیز، شکافت آب ($H_2O \rightarrow H_2 + O_2$) برای تولید هیدروژن به‌عنوان سوخت پاک باشد. برخلاف روش‌های انرژی‌بر و آلاینده فعلی، در این روش فقط به نور و یک فتوکاتالیست کارآمد نیاز داریم. پژوهش‌ها روی ترکیباتی مانند $G-C_3N_4$ ، نانوذرات CdS و اکسیدهای فلزی اصلاح‌شده، نوید ساخت نسل جدیدی از راکتورهای نوری را می‌دهند.

(۴) پوشش‌های خودتمیزشونده و ضدباکتری: لباس‌ها، دیوارها، پنجره‌ها و حتی ماسک‌هایی طراحی شده‌اند که با بهره‌گیری از فتوکاتالیز در برابر نور، می‌توانند باکتری، ویروس و آلودگی را به‌طور کامل تجزیه کنند.

چالش‌ها و آینده‌پژوهی

با تمام جذابیت‌ها و کاربردهای شگفت‌انگیز، فتوکاتالیز هنوز در ابتدای مسیر صنعتی‌سازی است. برخی از چالش‌های پیش‌رو عبارت‌اند از:

- پایین بودن بازده کوانتومی در نور طبیعی
- جداسازی و بازیابی فتوکاتالیست از محلول
- پایدار نبودن برخی مواد نانویی در چرخه‌های پی‌درپی
- هزینه نسبتاً بالا برای طراحی راکتورهای نوری بزرگ‌مقیاس

با این حال، پیشرفت‌هایی مانند فتوکاتالیست‌های مبتنی بر کربن، نانوکامپوزیت‌های چندمنظوره و استفاده از انرژی خورشیدی متمرکز، امیدها را برای بهره‌برداری صنعتی در مقیاس وسیع بالا برده‌اند.

(۱) تصفیه آب: فتوکاتالیزورها می‌توانند ترکیبات مقاوم آلی مانند داروهای تجزیه‌نشده، رنگ‌های صنعتی، آفت‌کش‌ها و حتی میکروپلاستیک‌ها را از آب حذف کنند. برخلاف روش‌های سنتی که فقط آلاینده را جابه‌جا می‌کنند (مثلاً فیلتر می‌کنند)، فتوکاتالیز ساختار مولکولی آلاینده را شکسته و آن را بی‌خطر می‌کند. جالب است بدانید در یکی از مطالعات دانشگاهی، فتوکاتالیز توانست طی فقط ۶۰ دقیقه، بیش از ۹۵٪ رنگ متیلن بلو (رنگ رایج در صنایع نساجی) را از آب آلوده حذف کند، آن هم بدون استفاده از هیچ ماده شیمیایی دیگر.

(۲) تصفیه هوا: از فتوکاتالیزورها می‌توان در حذف آلاینده‌هایی مثل CO ، NO_x ، فرمالدهید و ترکیبات آلی فرار (VOCs) از هوا استفاده کرد. در کشورهایی مانند ژاپن، روسیه و کره جنوبی، در طراحی دیوارها، شیشه‌ها، آسفالت خیابان‌ها و تونل‌های مترو از روکش‌هایی بر پایه TiO_2 استفاده می‌شود تا آلودگی هوا به‌طور خودکار در حضور نور خورشید کاهش یابد.

فتوکاتالیز چگونه کار می‌کند؟

فتوکاتالیز، در ساده‌ترین تعریف، استفاده از نور برای فعال‌سازی یک کاتالیزگر نوری (فتوکاتالیست) است که در واکنش‌های شیمیایی شرکت می‌کند، بی‌آنکه خود مصرف شود. مهم‌ترین ویژگی این فرایند آن است که می‌تواند در دمای محیط و بدون نیاز به افزودنی‌های شیمیایی خطرناک، واکنش‌هایی را فعال کند که در شرایط معمولی ممکن است ساعت‌ها یا روزها طول بکشند. در این فرایند، معمولاً از نیم‌رساناهایی مانند TiO_2 (تیتانیوم دی‌اکسید) استفاده می‌شود. زمانی که نور (معمولاً فرابنفش یا نور مرئی) به این ماده برخورد می‌کند، الکترون‌هایی از نوار ظرفیت به نوار رسانش منتقل می‌شوند و زوج‌های الکترون-حفره (e^-/h^+) تولید می‌کنند. این زوج‌ها می‌توانند واکنش‌هایی را با آب و اکسیژن در سطح کاتالیزگر آغاز کرده و رادیکال‌های فعال مانند $OH^\cdot$ تولید کنند که قادرند آلاینده‌های پیچیده آلی را به مواد بی‌ضرر مانند H_2O و CO_2 تبدیل کنند.

محدودیت	مزایا	ماده
فقط با UV فعال می‌شود	ارزان، پایدار، غیرسمی	TiO ₂
حساس به pH اسیدی	واکنش‌پذیر، سنتز آسان	ZnO
بازده نسبتاً پایین	فعال با نور مرئی	g-C ₃ N ₄
سمیت و پایداری کم	پاسخ‌گو به نور مرئی	CdS
پیچیده در سنتز	قابل تنظیم، بازده بالا	نانوکامپوزیت‌ها

رای افزایش بازده در نور مرئی، از روش‌هایی مثل دوپینگ، هتروجانکشن‌ها و اصلاح سطح با نانوذرات فلزی مثل Au, Ag و Pt استفاده می‌شود.

فتوکاتالیز نمونه‌ای خیره‌کننده از آن است که چگونه دانش شیمی، با فهم دقیق رفتار الکترون‌ها و سطوح ماده، می‌تواند پاسخ‌هایی نوین برای بحران‌های جهانی ارائه دهد. استفاده از نور، ماده‌ای ساده و همیشگی، برای حل مشکلاتی چون آلودگی آب و هوا، تولید انرژی پاک و ضدعفونی سطوح، نه تنها عملی است، بلکه اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد. در جهانی که با چالش‌های زیست‌محیطی متعددی روبه‌روست، فتوکاتالیز نه یک گزینه، بلکه شاید تنها مسیر علمی برای رسیدن به آینده‌ای پایدارتر باشد.

منابع:

- [1] Fujishima, A., & Honda, K. (1972). Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. *nature*, 238(5358), 37-38.
- [2] Chen, X., & Mao, S. S. (2007). Titanium dioxide nanomaterials: synthesis, properties, modifications, and applications. *Chemical reviews*, 107(7), 2891-2959.
- [3] Singh, A., & Sharma, N. (2024). Photocatalytic hydrogen-future energy. *Materials Chemistry and Physics*, 322, 129342.
- [4] Khojasteh, H., Khezri, B., Heydaryan, K., Sharifi, N., Aspoukeh, P., Khanahmadzadeh, S., ... & Eskandari, V. (2025). Enhancing visible light-driven photocatalysis for water treatment: optimizing Fe₃O₄@ SiO₂@ Cr-TiO₂-S nanocomposite efficiency with silver

and palladium deposition. *Plasmonics*, 20(2), 817-834.

- [5] Peeters, H., Raes, A., & Verbruggen, S. W. (2024). Plasmonic photocatalytic coatings with self-cleaning, antibacterial, air and water purifying properties tested according to ISO standards. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 451, 115529.

