



پیشرفت‌های اخیر در سیستم‌های الکتروکاتالیستی تجزیه آب با راندمان بالا.

## چکیده:

تجزیه‌ی الکتروکاتالیستی آب که یکی از روش‌های تولید هیدروژن پاک با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است، که رویکرد اساسی در راستای تحقق جامعه‌ی مبتنی بر هیدروژن در آینده است. اگرچه، توسعه‌ی الکترولیز آب قلیایی موجود در صنعت، به دلیل ترمودینامیک نامطلوب آن که ناشی از پتانسیل اضافی بالای مورد نیاز برای انجام کل فرآیند، به دلیل سینتیک کند انجام واکنش که همراه با انتقال چهار الکترون است، با مشکلاتی روبروست، اما تحقیقات بیشتر در زمینه‌ی تکنولوژی‌های الکترولیز آب با مصرف کم انرژی و راندمان بالا با رویکرد برآوردن نیازهای حوزه‌ی ذخیره‌سازی و مصرف انرژی، امری فوری و اجتناب‌ناپذیر است. پژوهش حاضر مروری بر استراتژی‌های پیشنهادی در حوزه‌ی سیستم‌های الکترولیز آب با راندمان بالا، از جنبه‌های مختلف الکتروکاتالیستی (از تک عاملی تا دو عاملی)، مهندسی الکتروکاتالیست (از پودری تا خودپشتیبان<sup>1</sup>)، منابع انرژی (از غیرقابل تجدید تا تجدیدپذیر)، الکترولیت‌ها (از خالص تا ترکیبی) و پیکربندی سل (از یکپارچه تا مجزا) توجه و تاکید دارد. ارزیابی نقادانه‌ی اصول الکتروشیمی با رویکرد بررسی چالش‌های موجود در بالا بردن راندمان کلی شکافت و تجزیه آب مورد توجه قرار گرفته است. در نهایت، بینش‌های ارزشمندی برای جهت‌گیری توسعه‌ی آینده و شناسایی چالش‌های احتمالی در سیستم‌های پیشرفته، پایدار و با راندمان بالای تجزیه آب، تشریح شده است.

## دورنما و نتیجه گیری: از آزمایشگاه تا واقعیت

H<sub>2</sub> یکی از امیدوارکننده‌ترین گزینه‌های پاک برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی است که می‌تواند در التیام بحران جدی انرژی و تخریب محیط زیست نقش موثری داشته باشد. تجزیه‌ی کامل آب با روش الکتروشیمیایی یکی از رویکردهای بالقوه حیاتی به منظور توسعه‌ی یک جامعه‌ی پایدار و مبتنی بر هیدروژن است، چرا که فرصت خوبی برای غلبه بر محدودیت‌های تولید هیدروژن در مقیاس صنعتی (اصلاح بخار<sup>2</sup>) از طریق بهینه‌سازی الکتروکاتالیست‌های دو کاره‌ی خودپشتیبان، بهبود الکتروده‌های مهندسی، تنظیم شیمی الکترولیت، شکل‌های متنوع منابع تامین انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های الکترولیز منفرد، به خوبی فراهم شده است. در این بررسی، مروری جامع بر پیشرفت‌های اخیر در سیستم‌های تجزیه‌ی آب الکتروکاتالیستی با راندمان بالا از دیدگاه

<sup>1</sup> self-supported

<sup>2</sup> steam reforming

الکتروکاتالیست‌ها، مهندسی الکتروود، الکترولیت‌ها، منبع تامین انرژی و پیکربندی‌های سلولی ارائه شده است. لازم به ذکر است که پیشرفت‌های انجام شده در تحقیقات اولیه، هنوز در سطح آزمایشگاهی و به دور از صنعتی شدن است. به این ترتیب، چالش‌های زیادی به دلیل تفاوت الزامات بین تحقیقات آزمایشگاهی و فرآیندهای تجاری تجزیه‌ی آب وجود دارد که بایستی مورد توجه قرار گیرد. این اعتقاد وجود دارد که مسیرهای تحقیقاتی که در ادامه می‌آیند بسیار مهم هستند و توسعه‌ی فناوری تجزیه‌ی آب را از آزمایشگاه به صنعت ممکن می‌سازند.

اولاً، اغلب الکتروکاتالیست‌های دو عاملی ارزان قیمت موجود برای الکترولیز آب، فقط در محیط‌های قلیایی فعالیت و پایداری از خود نشان می‌دهند، در حالی که الکتروکاتالیست‌های مبتنی بر فلزات کمیاب می‌توانند در محیط‌های اسیدی هم برای تجزیه‌ی آب به خوبی عمل کنند. با جفت شدن و ایجاد ارتباط الکترودها با PEM<sup>3</sup> در شرایط اسیدی، استفاده از الکتروکاتالیست‌های اسیدی کم هزینه و پایدار برای الکترولیز آب بسیار مورد توجه قرار گرفته است. به این ترتیب، طراحی و ساخت نانومواد با کارایی بالا برای واکنش HER<sup>4</sup> و OER<sup>5</sup> در محیط اسیدی در فرآیند الکترولیز آب با PEM موضوعی حیاتی است که باید به آن پرداخته شده و تقویت گردد. در جستجو و انتخاب کاتالیزورهای دو عاملی عالی قابل استفاده در محیط اسیدی، درک اصول مکانیکی نیز بسیار ضروری است. مدل‌سازی نظری و شبیه‌سازی محاسباتی یک رویکرد مؤثر برای شفاف‌سازی سینتیک واکنش و ساختارهای مواد، به‌ویژه برای کاتالیزورهای OER است، که در واقع عموماً بازسازی ساختار سطحی پیچیده در مراحل مختلف واکنش‌های ردوکس<sup>6</sup> (اکسایش و کاهش) را ارائه می‌کند. علاوه بر این، برخی از فناوری‌های پیشرفته‌ی مشخصه‌یابی درجا (در محیط)، مانند تکنیک‌های تشعشع سنکروترون درجا<sup>7</sup>، طیف‌سنجی فوتوالکترون پرتو ایکس درجا<sup>8</sup>، طیف‌سنجی فرسرخ تبدیل فوریه با بازتاب درجا (FTIR) و طیف‌سنجی رزونانس اسپین الکترون درجا (ESR) باید برای ردیابی ذرات در OER استفاده شوند، که برای شناسایی مکان‌های فعال کاتالیستی و کشف مکانیسم‌های عملکرد کاتالیست مفید خواهند بود.

دوم، اکثر الکتروکاتالیست‌های کم‌هزینه‌ی توسعه یافته برای الکترولیز آب قلیایی نمی‌توانند نیازهای با جریان بالا و دوام طولانی مدت در کاربردهای صنعتی را برآورده کنند. در نتیجه، طراحی و ساخت الکتروکاتالیست‌های پایدار، با سایت‌های فعال غنی‌شده و اندازه‌ی بزرگ برای HER و OER برای کاربردهای صنعتی کلیدی است. توسعه

<sup>3</sup> proton exchange membrane

<sup>4</sup> Hydrogen Evolution reaction

<sup>5</sup> Oxygen Evolution reaction

<sup>6</sup> redox

<sup>7</sup> in situ synchrotron radiation techniques

<sup>8</sup> in situ X-ray photoelectron spectroscopy

الکترولایزرهای آب قلیایی صنعتی اغلب به دلیل ترمودینامیک نامطلوب آن‌ها با پتانسیل اضافی (1/23 ولت) مورد نیاز برای انجام کل فرآیند، که از سینتیک کند آن که از شامل انتقال چهار الکترون، سرچشمه می‌گیرد، محدود می‌شود. اگرچه جایگزینی OER با راهکارهای جایگزین، با رویکرد افزایش تعداد سیستم‌های هیبریدی الکترولایزر آب، یک پلتفرم ایده‌آل برای تولید  $H_2$  بیشتر با خواص سینتیکی/ترمودینامیکی مطلوب فراهم می‌کند، هزینه‌ی مواد شیمیایی مورد نیاز آند و بهای تمام شده‌ی محصولات باید در نظر گرفته شوند. همزمان با پیشرفت‌های موجود، تنها تعداد معدودی از واکنش‌های الکترواکسیداسیون آندی نسبتاً ساده با فرآیند HER برای کمک به تولید  $H_2$  ترکیب شده‌اند. راهکارهای جایگزین با ارزش بالقوه بیشتری (مانند جفت اکسایشی C-C و اکسیداسیون C-H فعال) باید برای افزایش تطبیق‌پذیری و آشکار کردن چشم‌اندازهای واقعی این استراتژی نوآورانه ایجاد شود. سوم، هزینه‌های ساخت مرتبط با جنبه‌های مختلف سیستم‌های تجزیه آب باید در نظر گرفته شود. الف) فرآیند ساخت فعلی الکتروکاتالیست‌های خودپشتیبان با کارایی بالا معمولاً شامل فرآیندهای طاقت فرسا و با بازده پایین است. طراحی استراتژی‌های تولید آسان و مقیاس‌پذیر مورد نیاز خواهد بود. ب) دریافت و تبدیل انرژی از محیط (به عنوان مثال انرژی باد، حرارتی، خورشیدی و جزر و مد) توسط سیستم‌های مختلف انرژی سبز به منظور تحقق بخشیدن به تجزیه آب به کمک انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند به طور موثر مصرف انرژی این فرآیند را کاهش دهد. با این حال، معرفی دستگاه‌های فوتوالکتروکاتالیست‌های TENG/TEها/دستگاه‌های بیولیتیک<sup>9</sup> به صورت سری با یک الکترولایزر، هزینه‌ی تولید  $H_2$  را به طور قابل توجهی افزایش خواهد داد. به این ترتیب، بهبود سازگاری تجهیزات و یکپارچگی سیستم‌ها برای تولید کم هزینه‌ی  $H_2$  در کاربردهای عملی آینده بسیار مهم است. ج) هزینه‌ی سنتز RMها نیز باید به میزان قابل توجهی کاهش یابد تا از نظر اقتصادی برای سیستم‌های الکترولایزر آب منفرد در مقیاس بزرگ جذاب باشد. به طور خاص، حلالیت، پایداری، راندمان، و سینتیک انتقال سریع الکترون RMها عوامل محوری در دستیابی به کاتالیست‌های مناسب برای کاربردهای آینده هستند.

در نهایت، طراحی بهینه‌ی الکترولایزرهای آب پیشرفته هنوز راه درازی در پیش دارد. طراحی معقول و بهینه‌سازی الکترولایزرهای آب، از جمله الکترولایزر آب با کمک انرژی تجدیدپذیر/سری/هیبریدی/منفرد، هم برای تحقیقات آزمایشگاهی و هم برای کاربردهای عملی بسیار مهم است. در حوزه‌ی تحقیقات آزمایشگاهی، فعالیت‌هایی مانند شناسایی سایت‌های فعال یا تجزیه و تحلیل مکانیسم‌های موجود در سیستم‌های الکترولایزر آب که در بالا اشاره شد، باید به طراحی الکترولایزرهایی با تنظیمات هدفمند بر اساس نیازهای خاص منجر شوند. به عبارت دیگر، عملکرد سیستم الکترولایزر باید برای اهداف تحقیقاتی نظارت و اندازه‌گیری شود و بنابراین، الکترولایزرها معمولاً

<sup>9</sup> biolytic

باید با سایر دستگاه‌های شناسایی یا آنالیز کوپل شوند تا اطلاعات مرتبط از الکتروکاتالیست‌ها و/یا واکنش‌دهنده‌ها را جمع‌آوری کنند. علاوه بر این، هنگام توسعه‌ی دستگاه‌های الکترولیز به کاربردهای عملی، هر دو جنبه علمی و کارایی باید در نظر گرفته شود.

با وجود این چالش‌های پیچیده، تا کنون پیشرفت قابل توجهی در سیستم‌های الکترولیز آب حاصل شده و این پیشرفت‌ها ادامه دارد. ما کاملاً معتقدیم که با پیشرفت علم و مهندسی مواد، تکنیک‌های مشخصه‌یابی و یکپارچه‌سازی دستگاه‌ها، می‌توان آینده‌ی طلایی همراه با پیشرفت‌های جدی‌تر را در این حوزه پیش‌بینی نمود. پژوهش حاضر برخی از راهنمایی‌های کلیدی را برای توسعه سیستم‌های تجزیه‌ی آب پیشرفته برای تولید انرژی هیدروژن ارائه می‌کند تا کل فرآیند را با تبدیل مقرون به صرفه، بدون آلودگی و تامین انرژی پایدار در کاربردهای عملی، با رویکرد ترویج جامعه‌ی پایدار مبتنی بر هیدروژن، توسعه دهد.

کلیدواژه: تجزیه آب الکتروکاتالیستی، جامعه‌ی مبتنی بر هیدروژن، مهندسی الکترو، تنظیمات سل، چالش‌ها و چشم‌اندازها.

**Refrence:** Lv, X.; Tian, W.; Yuan, Z.; Recent Advances in High-Efficiency Electrocatalytic Water Splitting Systems, *Electrochemical Energy Reviews*, 2023, 23.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s41918-022-00159-1>