

غشاهای متخلخل پلی آمیدوکسیم با عملکرد دوگانه، تقویت شده با ریزکپسول های β -سیکلودکسترن برای جلوگیری از چسبندگی زیستی و افزایش جذب اورانیوم از آب دریا

فاطمه نجفی کلیانی

کارشناس ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بندرعباس، ایران

چکیده

استخراج اورانیوم از آب دریا به عنوان یک راهکار نوین برای دستیابی به منابع پایدار انرژی هسته ای، در سال های اخیر با استقبال گسترده ای مواجه شده است. با این حال چالش هایی مانند غلظت بسیار پایین اورانیوم، وجود یون های مزاحم در محیط و چسبندگی زیستی روی سطح جاذب ها مانعی جدی در مسیر بهره برداری مؤثر از این روش محسوب می شود. غشاهای متخلخل بر پایه پلی آمیدوکسیم، به دلیل برخورداری از گروه های عاملی فعال، قابلیت بالایی در جذب انتخابی یون های اورانیوم از خود نشان داده اند. در این میان، ترکیب این غشاها با ریزکپسول های β -سیکلودکسترن منجر به ایجاد ساختارهایی با عملکرد دوگانه شده است که به صورت هم زمان حذف مؤثر اورانیوم و مقاومت در برابر بیوفولینگ را ممکن می سازند. در این مقاله مروری، مطالعات انجام شده در زمینه طراحی، ساختاردهی و عملکرد این غشاهای هیبریدی مورد تحلیل قرار گرفته است. سازوکارهای جذب سطحی، رفتار ضد زیستی، نقش ساختار متخلخل در انتقال جرم و تأثیر ویژگی های شیمیایی ترکیبات به کاررفته بر کارایی سیستم به صورت نظام مند بررسی شده اند. علاوه بر آن نوآوری های اخیر در بهینه سازی انتخاب پذیری، پایداری عملکرد در شرایط واقعی و پتانسیل صنعتی سازی این سامانه ها نیز مورد بحث قرار گرفته است. نتایج این بررسی می تواند مسیرهای پژوهشی آینده را در توسعه فناوری های کارآمد برای بازیابی فلزات ارزشمند از منابع آبی، به ویژه آب دریا، روشن سازد.

واژگان کلیدی: غشاهای پلی آمیدوکسیم، β -سیکلودکسترن، استخراج اورانیوم از آب دریا، جذب یون های فلزات سنگین، مهندسی سطح غشا، سیستم های حذف یون در محیط های دریایی



مقدمه

در دهه های اخیر، چالش جهانی تأمین پایدار انرژی با رشد جمعیت، تغییرات اقلیمی و کاهش منابع فسیلی همراه بوده است؛ این در حالی است که انرژی هسته ای، به عنوان یکی از مهم ترین گزینه های جایگزین، با ظرفیت تولید بالا و انتشار کم کربن، جایگاه راهبردی خود را در سید انرژی بسیاری از کشورها تثبیت کرده است. با این وجود، دسترسی به منابع پایدار اورانیوم، به عنوان ماده اولیه حیاتی در چرخه سوخت هسته ای، به عنوان یک دغدغه کلیدی در حوزه انرژی هسته ای باقی مانده است (Abney, ۲۰۱۷). Mayes, Saito, & Dai, (۲۰۱۷). آب دریا، علی رغم غلظت بسیار پایین اورانیوم (تقریباً ۳.۳ میکروگرم در لیتر)، به دلیل وسعت فوق العاده و پایداری ذخایر آن، ظرفیتی بی نظیر برای تأمین اورانیوم در مقیاس جهانی دارد. بهره برداری اقتصادی از این منبع مستلزم توسعه فناوری هایی است که بتوانند در شرایط پیچیده محیط دریایی، شامل حضور یون های مزاحم و آلاینده های زیستی، عملکرد مؤثر و پایدار داشته باشند (Zhang et al., ۲۰۲۳; Parker, Zhang, Rao, & Arnold, ۲۰۱۸). در این راستا، طراحی جاذب هایی با ساختارهای مهندسی شده و عملکرد چندگانه، به یکی از رویکردهای برجسته در حوزه استخراج اورانیوم از آب دریا تبدیل شده است. در میان جاذب های پیشنهادی، غشاهای متخلخل مبتنی بر پلی آمیدوکسیم (PAO)، به واسطه حضور گروه های عاملی آبدوست و توانایی بالای کمپلکس سازی با یون اورانیل، توجه فراوانی را به خود جلب کرده اند. پلی آمیدوکسیم (PAO) یکی از جاذب های پلیمری پرکاربرد در حوزه جذب یون های فلزی، به ویژه اورانیوم، از محیط های آبی به شمار می رود. این پلیمر معمولاً از پلی اکریلونیتریل (PAN) به عنوان پیش ماده سنتز می شود. طی فرایند آمیدوکسیم دار کردن، گروه های نیتریلی (CN-) موجود در زنجیره پلیمری با هیدروکسیل آمین واکنش داده و به گروه های آمیدوکسیم (C(NH₂)=NOH) تبدیل می شوند. ساختار حاصل حاوی سایت های فعال متعددی برای برهم کنش با یون های فلزی است (Ye, ۲۰۲۳). Ye, Hu, Wu, & Yao, (۲۰۲۳). گروه های آمیدوکسیم دارای اکسیژن و نیترोजن های داتیو هستند که می توانند کمپلکس های پایدار با یون های چند ظرفیتی تشکیل دهند. یون اورانیل (UO₂²⁺) به دلیل شعاع یونی خاص و تمایل بالا به تشکیل کمپلکس با اتم های اکسیژن، از طریق پیوندهای داتیو با گروه های آمیدوکسیم برهم کنش می کند. این فرایند موجب جذب انتخابی و قوی اورانیوم حتی در حضور یون های مزاحمی مانند Na⁺، Ca²⁺ و Mg²⁺ می شود (Sharma, Sharma, Bhayani, ۲۰۱۶ & Mishra). ساختار پلی آمیدوکسیم را می توان به صورت فیزیکی در قالب های مختلفی از جمله غشاهای متخلخل، نانوذرات، الیاف و ساختارهای کامپوزیتی پیاده سازی کرد. این ساختارها سطح ویژه بالایی دارند و موجب دسترسی بهتر به سایت های جذب می شوند. افزایش تخلخل، افزایش گروه های عاملی در سطح، و بهینه سازی ابعاد منافذ از جمله راهکارهای رایج برای ارتقای عملکرد جذب در این پلیمر به شمار می رود (Ahmad et al., ۲۰۲۲; Deng et al., ۲۰۲۵). فرایند جذب بر پایه کمپلکس سازی بین گروه های عاملی و یون های فلزی انجام می گیرد و معمولاً از مدل های ایزوترمی لانگمویر و سینتیکی شبه مرتبه دوم تبعیت می کند. استفاده از پلی آمیدوکسیم در محیط هایی با ویژگی های شیمیایی خاص از جمله آب دریا، مستلزم اصلاح سطح و طراحی ساختارهای چندمرحله ای برای افزایش راندمان و دوام عملکردی جاذب است. ساختار مولکولی انعطاف پذیر، قابلیت تنظیم ویژگی های سطحی، و امکان ترکیب با نانوذرات یا ترکیبات زیست سازگار، پلی آمیدوکسیم را به گزینه ای مناسب برای طراحی جاذب های پیشرفته در سیستم های پیچیده محیطی تبدیل می کند (Alali et al., ۲۰۲۴; J.). Chen et al., (۲۰۲۳). این غشاهای واقعی دریایی، با دو چالش عمده مواجه اند: نخست، کاهش انتخاب پذیری در حضور یون های رقابتی مانند Na⁺، Ca²⁺، Mg²⁺ و دوم، رسوب زیستی (Biofouling) که با ایجاد لایه های باکتریایی و آلی بر سطح غشاء، موجب افت راندمان، انسداد منافذ و کاهش طول عمر عملکردی سیستم می شود (Baker & Dudley, ۱۹۹۸; Delauney, Compere, & Lehaitre, ۲۰۱۰). برای غلبه بر این موانع، پژوهشگران به سمت توسعه ی غشاهای دوکاره و



هوشمند حرکت کرده اند؛ ساختارهایی که توانایی جذب انتخابی یون های اورانیوم را هم زمان با مقاومت در برابر آلودگی زیستی در خود ادغام کرده باشند. در این میان، استفاده از ریزکپسول های β -سیکلودکسترین (β -CD) در ترکیب با غشاهای PAO، با هدف ارتقاء خصوصیات سطحی، بهبود پایداری در محیط های آبی و افزایش بازده جذب یون های هدف مورد بررسی قرار گرفته است (Yu et al., ۲۰۲۵a; Pina-Vidal, Luque-Alled, Coronas, & Téllez, ۲۰۲۳; β -سیکلودکسترین-PAO) Cyclodextrin یکی از ترکیبات ماکروسیکلیک پر کاربرد در مهندسی مواد جاذب و سامانه های رهایش کنترل شده است که از اتصال هفت واحد گلوکز از نوع α -(۱ \rightarrow ۴) به یکدیگر تشکیل شده و ساختاری حلقوی با حفره داخلی آب گریز و سطح بیرونی آب دوست ایجاد می کند. این ویژگی منحصربه فرد موجب می شود β -سیکلودکسترین به عنوان حامل یا اصلاح کننده سطحی برای برهم کنش با گونه های آلی و معدنی مورد استفاده قرار گیرد. در ساختار β -سیکلودکسترین، گروه های هیدروکسیل اولیه و ثانویه در لبه های مولکول جای گرفته اند که امکان انجام اصلاحات شیمیایی هدفمند بر روی آن ها را فراهم می کند. این اصلاحات شامل گرافت سازی، کوپلیمریزاسیون یا کپسوله سازی ترکیبات فعال می شود. حضور گروه های هیدروکسیل موجب افزایش آبدوستی، بهبود سازگاری با محیط های آبی و افزایش قابلیت برهم کنش های هیدروژنی با یون های فلزی و ترکیبات قطبی می گردد. حفره آب گریز مرکزی این مولکول توانایی کپسوله سازی ترکیبات آلی و تشکیل کمپلکس های درون حفره ای (inclusion complexes) را دارد. این سازوکار در کاربردهایی مانند حذف آلاینده های آلی، دارورسانی و اصلاح سطح جاذب های معدنی و پلیمری مورد استفاده قرار می گیرد. در ترکیب با پلیمرهایی مانند پلی آمیدوکسیم، β -سیکلودکسترین می تواند با افزایش آبدوستی، کاهش تجمع زیستی، و ارتقای انتقال جرم، کارایی غشا را بهبود دهد. همچنین، β -سیکلودکسترین قادر است از طریق کاهش انرژی سطحی و ممانعت فیزیکی، به کاهش تشکیل بیوفیلم و چسبندگی زیستی کمک کند. در غشاهای ترکیبی، ادغام β -سیکلودکسترین در ماتریس پلیمری یا قرارگیری آن به صورت پوشش سطحی، امکان تنظیم دقیق ویژگی های سطح، کنترل اندازه منافذ و افزایش مسیرهای نفوذ مؤثر برای یون ها را فراهم می سازد (Additives et al., ۲۰۱۶; Gould & Scott, ۲۰۲۳; Liu, Gao, Han, & Qu, ۲۰۲۳; Stella & Rajewski, ۲۰۲۰; Thompson, ۲۰۰۶). این مقاله، با رویکردی مروری و تحلیلی، به بررسی پیشرفت های اخیر در طراحی، ساخت و عملکرد غشاهای هیبریدی PAO/ β -CD در حذف اورانیوم از آب دریا می پردازد. تمرکز بر سازوکارهای جذب، آنالیزهای سطحی، مدل های سینتیکی و ایزوترمی، و نیز ارزیابی عملکرد ضد بیوفولینگ این ساختارها از جمله محورهای اصلی این مطالعه است. همچنین، با نگاهی آینده نگر، فرصت ها و چالش های تجاری سازی این فناوری در مقیاس صنعتی نیز مورد بحث قرار گرفته است.

۲- استخراج اورانیوم از آب دریا

توسعه پایدار منابع انرژی در قرن حاضر، بیش از هر زمان دیگری به اولویت سیاست گذاران و جوامع علمی تبدیل شده است. در میان گزینه های انرژی کم کربن، انرژی هسته ای به دلیل چگالی بالای انرژی و تولید پیوسته، جایگاهی منحصربه فرد در سبد انرژی آینده دارد. با این حال، پایداری بلندمدت این مسیر، به شدت به دسترسی به منابع اولیه ای همچون اورانیوم وابسته است. با توجه به محدودیت ذخایر اورانیوم در معادن زمینی و روند رو به رشد مصرف جهانی، بازیابی اورانیوم از منابع غیرمعارف، به ویژه آب



دریا، به عنوان یک گزینه استراتژیک در حال ظهور است. آب دریا علی رغم رقت بسیار پایین اورانیوم (حدود ۳ میکروگرم در لیتر)، به دلیل وسعت گسترده و تجدیدپذیری مداوم، منبعی تقریباً نامحدود برای استخراج این عنصر حیاتی محسوب می شود. این پتانسیل باعث شده است که پژوهش های بسیاری در زمینه طراحی مواد پیشرفته برای جذب انتخابی اورانیوم در شرایط دریایی شکل گیرد. با این وجود، عملیاتی سازی این فناوری با موانع فناورانه متعددی روبه رو است که کارایی سامانه های جذب را به شدت محدود می سازد (Zhang et al., ۲۰۲۳; Endrizzi, Leggett, & Rao, ۲۰۱۶). تحلیل عملکرد جاذب های سنتی نشان می دهد که بسیاری از آن ها یا ظرفیت جذب کافی در این شرایط ندارند، یا پایداری طولانی مدتشان در محیط دریایی تضمین شده نیست. این موارد موجب شده است که تحقیقات جدید به سمت طراحی جاذب هایی بروند که نه تنها قابلیت بالایی در جذب انتخابی اورانیوم داشته باشند، بلکه در برابر پدیده های زیستی و فیزیکی محیط های واقعی نیز مقاوم باقی بمانند. در همین راستا، استفاده از پلیمرهای فعال سطحی و ساختارهای ترکیبی مانند غشاهای متخلخل با عملکرد دوگانه، به عنوان گزینه ای کاربردی مورد توجه قرار گرفته است.

۳- پلی آمیدوکسیم و β -سیکلودکسترتین

در پاسخ به نیاز فزاینده برای طراحی جاذب هایی با عملکرد هم زمان در حذف یون های اورانیوم و مقاومت در برابر آلودگی زیستی، ترکیب پلی آمیدوکسیم (PAO) و β -سیکلودکسترتین (β -CD) در قالب ساختارهای متخلخل غشایی، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. این دو ترکیب پلیمری به دلیل ویژگی های مکمل خود، توانایی ارتقاء هم زمان ظرفیت جذب، آبدوستی سطحی و مقاومت در برابر رسوب زیستی را دارا هستند (Yu et al., ۲۰۲۵a). پلی آمیدوکسیم از جمله جاذب های پلیمری فعال سطحی است که با برخورداری از گروه های عاملی آمیدوکسیم ($C(NH_2)=NOH$)، تمایل بالایی به تشکیل کمپلکس های پایدار با یون های فلزی چندظرفیتی، به ویژه یون اورانیل (UO_2^{2+})، از خود نشان می دهد. سنتز این پلیمر معمولاً با استفاده از پلی اکریلونیتریل به عنوان پیش ماده آغاز می شود و پس از فرآیند اصلاح شیمیایی، گروه های نیتریلی به آمیدوکسیم تبدیل می گردند. ویژگی بارز PAO، جذب انتخابی یون های اورانیوم حتی در حضور یون های مزاحم و رقیب در محیط های طبیعی است. این عملکرد به واسطه توانایی گروه های آمیدوکسیم در برقراری پیوندهای داتیو با مراکز الکترون دوست در ساختار اورانیل امکان پذیر می شود (Shao, Hou, Chi, Lu, & Ren, ۲۰۲۱; Wen et al., ۲۰۲۱). در کنار عملکرد شیمیایی بالای PAO، β -سیکلودکسترتین به عنوان ترکیبی با ساختار حلقوی ماکروسیکلیک، نقشی کلیدی در بهبود خواص فیزیکی و زیستی غشا ایفا می کند. این ترکیب متشکل از هفت واحد گلوکز است که به صورت یک حلقه شبه استوانه ای با سطح بیرونی آبدوست و حفره داخلی آب گریز سازمان یافته اند. این ویژگی ساختاری منجر به توانایی بالای β -CD در کپسوله سازی ترکیبات آلی، بهبود آبدوستی غشاء و ایجاد برهم کنش های سطحی با ترکیبات زیستی می گردد. علاوه بر آن، وجود گروه های هیدروکسیل در ساختار بیرونی β -CD امکان انجام اصلاحات شیمیایی و پیوندهای کووالانسی با پلیمرهای زمینه مانند PAO را فراهم می کند. ادغام این دو ترکیب در قالب یک غشای ترکیبی، نه تنها موجب افزایش تعداد سایت های فعال برای جذب یون های اورانیوم می شود، بلکه با ارتقای آبدوستی سطح و کاهش انرژی آزاد سطحی، مانع از اتصال و رشد باکتری ها و تشکیل بیوفیلم در سطح غشاء می گردد. بررسی های تجربی نشان داده اند که غشاهای ترکیبی PAO/ β -CD دارای ساختار متخلخل، سطح ویژه بالا و پایداری قابل توجه در محیط های دریایی هستند. از سوی دیگر، حضور β -CD به عنوان عامل پراکنش دهنده در ماتریس پلیمری، باعث توزیع



یکنواخت گروه های عاملی آمیدوکسیم و کاهش تجمع ذرات در طول فرایند جذب می شود (H. Chen, Shao, Li, & Wang, ۲۰۲۰; Stella & Rajewski, ۲۰۱۴). در جدول ۱ مشخصات ساختاری و عملکرد جذب اورانیوم غشاهای تقویت شده با β -سیکلودکسترین نشان داده شده است. با توجه به ویژگی های مکمل این دو ترکیب، غشاهای بر پایه PAO/ β -CD به عنوان یکی از گزینه های شاخص در توسعه جاذب های نسل جدید برای استخراج اورانیوم از آب دریا مطرح شده اند. بررسی سازوکار عملکرد این سیستم ها از منظر شیمی سطح، مورفولوژی و رفتار سینتیکی در ادامه این مقاله مورد بحث قرار خواهد گرفت. در جدول ۲ و ۳ مقایسه ساختار عملکرد غشا و سنتز آن با مواد مشابه نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات ساختاری و عملکرد جذب اورانیوم غشاهای تقویت شده با β -سیکلودکسترین

انرژی جذب (kJ/mol)	R^2 لاتگمویر	بازده (%)	ظرفیت جذب (mg/g)	زمان تماس (min)	دما (°C)	pH محلول	بار سطحی (mV)	زاویه تماس (°)	زیر سطح (Ra , nm)	قطر حفره (nm)	درصد آمیدو کسیم (%)	ترکیب اصلی	نوع غشا
۲۵.۲	۰.۹۹۱	۹۶.۸	۲۱۳.۵	۱۸۰	۲۵	۸.۰	۲۷.۳	۶۲.۵	۴۵.۶	۸۵.۲	۱۵	پلی آمیدوکسیم	PAO-CD



PAO	پلی آمیدوکسیم	۱۵	۷۸.۵	۶۲.۴	۷۵.۰	— ۳۰,۲	۸.۰	۲۵	۱۸۰	۱۷۲.۳	۸۵.۵	۰.۹۸۷	۲۱.۸
PES-CD	پلی اترسولفون	—	۹۰.۱	۴۰.۲	۶۸.۳	— ۲۲,۷	۸.۰	۲۵	۱۸۰	۱۴۵.۷	۷۵.۲	۰.۹۷۶	۱۹.۴

جدول ۲- مقایسه ساختار عملکرد غشا با مواد مشابه

قابلیت بازیابی	ضد Biofouling	pH پهینه	مدل ایزوترم سینتیک	ظرفیت جذب (mg/g)	ساختار فعال	ماده / غشا
پس از ۵٪ چرخه	بله (طبیعی)	۸,۲	Langmuir / Pseudo- ۲nd order	۱۱,۸	β- آمیدوکسیم سیکلودکسترین	PAO/β-CD
کاهش بعد ۳ چرخه	محدود	۸,۰	Freundlich / Pseudo- ۱st	۹,۳	گرافن اکسید اصلاح شده با AO	GO-AO Membrane
ضعیف	ندارد	۷,۵	Langmuir	۶,۵	سلولز اصلاح شده با آمیدوکسیم	Cellulose-AO
مشکل در احیای ساختار	ندارد	۶,۵	Langmuir / Elovich	۱۴,۵	UiO-۶۶-NH ₂ + AO	MOF-AO Composite

جدول ۳- مراحل سنتز و اصلاح سطح غشا



نتیجه عملکردی	هدف ساختاری	مواد واکنش دهنده شرایط	واکنش یا فرآیند	مرحله سنتز
افزایش جذب اختصاصی	ایجاد ساینت گیرنده اورانیوم	pH ۱۰, ۶۰°C, ۶ h	$-CN + NH_2OH \rightarrow -C(NH_2)=NOH$	آمیدوکسیم سازی PAN
کاهش رشد زیستی روی سطح	ایجاد خاصیت ضد biofouling	واکنش کووالانسی ۸۰°C	$\beta-CD-OH + Epoxy-PAN \rightarrow \beta-CD-PAN$	به $\beta-CD$ اتصال سطح
افزایش شار و سطح فعال	ایجاد نانو ساختار متخلخل	کنترل آب، DMF، تخلخل	Electrospinning یا Phase inversion	شکل دهی نهایی غشا

۴- مکانیسم های حذف اورانیوم و کنترل رسوب زیستی در غشاهای ترکیبی PAO/ β -CD

در غشاهای ترکیبی مبتنی بر پلی آمیدوکسیم و β -سیکلودکسترین، فرایند جذب اورانیوم و کنترل رسوب زیستی از طریق مجموعه ای از مکانیسم های شیمیایی، فیزیکی و سطحی انجام می شود. در بخش جذب یونی، گروه های عاملی آمیدوکسیم موجود در ساختار PAO نقش کلیدی در برقراری برهم کنش های داتیو با یون اورانیل ایفا می کنند. این گروه ها با دارا بودن اتم های نیتروژن و اکسیژن، زمینه تشکیل کمپلکس های پایدار با یون های فلزی را فراهم می سازند. ساختار خطی یون UO_2^{2+} موجب می شود تا آمیدوکسیم به صورت ترجیحی در دو محل اتصال، پیوندهای کووالانسی ضعیف برقرار کرده و یون اورانیوم را به صورت انتخابی جذب کند. فرایند جذب در این غشاها اغلب با ایزوترم لانگمویر و مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم توصیف می شود. این موضوع نشان دهنده حاکم بودن مکانیسم جذب شیمیایی و تشکیل پیوندهای سطحی با انرژی بالا است. نفوذپذیری غشاء و پخش شدگی یکنواخت گروه های فعال نیز در کارایی جذب مؤثر است. در ساختارهای متخلخل، ایجاد مسیرهای انتقال مناسب و کاهش مقاومت انتقال جرم، جذب سریع تر و کامل تر یون های هدف را امکان پذیر می سازد. در کنار جذب انتخابی یون ها، مقابله با رسوب زیستی یکی از نقاط قوت این نوع غشاها محسوب می شود. β -سیکلودکسترین، به واسطه ساختار ماکروسیکلیک و حضور گروه های هیدروکسیل سطحی، از طریق ممانعت فضایی و کاهش انرژی سطحی، مانع از اتصال باکتری ها و ذرات آلی بر سطح غشاء می گردد. همچنین، ساختار آب دوست آن باعث کاهش تمایل میکروارگانیسم ها به چسبندگی می شود که در نتیجه، تشکیل بیوفیلم به تعویق افتاده یا متوقف می گردد (Stella & Rajewski, ۲۰۲۰; Sun et al., ۲۰۲۳; Zhong, Wang, Xu, ۲۰۲۲; Guo, & Hu, ۲۰۲۲). بر اساس شواهد تجربی، غشاهای ترکیبی PAO/ β -CD نه تنها در جذب انتخابی اورانیوم عملکرد



مناسبی دارند بلکه پایداری ساختاری و مقاومت در برابر آلودگی زیستی را نیز بهبود می بخشند. این ویژگی ها موجب شده تا این دسته از غشاها به عنوان گزینه ای مناسب برای استفاده در محیط های دریایی پیچیده مورد توجه قرار گیرند.

۵- فناوری های مکمل و راهکارهای بهینه سازی در طراحی غشاهای PAO/ β -CD

با وجود عملکرد قابل توجه غشاهای ترکیبی مبتنی بر پلی آمیدوکسیم و β -سیکلودکسترن در حذف یون های اورانیوم، بهینه سازی ساختار، پایداری عملکرد و پاسخ گویی به شرایط متغیر محیطی همچنان به عنوان ضرورت هایی در مسیر توسعه صنعتی این سامانه ها مطرح هستند. برای ارتقای بیشتر عملکرد این غشاها، مجموعه ای از فناوری های مکمل و رویکردهای نوین در طراحی، سنتز و اصلاح سطحی پیشنهاد شده اند که می توانند خواص فیزیکی و شیمیایی جاذب را به طور چشم گیری بهبود دهند. یکی از راهکارهای مهم در این زمینه، افزودن نانوذرات معدنی یا مغناطیسی به ماتریس پلیمری غشاء است. یکی از رویکردهای مؤثر در بهینه سازی عملکرد غشاهای جاذب، افزودن نانوذرات معدنی یا مغناطیسی به ماتریس پلیمری است. این رویکرد با هدف ارتقاء خواص فیزیکی، شیمیایی و عملکردی غشاء در جذب یون های فلزی مانند اورانیوم از محیط های پیچیده ای نظیر آب دریا مورد توجه قرار گرفته است (Rybak & Li, Meng Lin, Toprak, Kim, & Muhammed, ۲۰۱۰; Kaszuwara, ۲۰۱۵). نانوذراتی همچون Fe_3O_4 (اکسید آهن مغناطیسی)، TiO_2 (دی اکسید تیتانیوم)، SiO_2 ، ZnO و گرافن اکسید (GO) از جمله افزودنی های متداول در ترکیب با پلی آمیدوکسیم یا غشاهای هیبریدی PAO/ β -CD هستند. این نانوذرات، به واسطه اندازه بسیار کوچک، سطح ویژه بالا و قابلیت اصلاح سطحی، تأثیرات چندجانبه ای بر ویژگی های غشاء دارند. در سطح ساختاری، افزودن نانوذرات به ماتریس پلیمری باعث ایجاد منافذ یکنواخت تر، افزایش تخلخل و بهبود پراکنش گروه های عاملی مانند آمیدوکسیم و β -سیکلودکسترن در سراسر غشاء می شود. این ویژگی ها منجر به افزایش سطح تماس بین جاذب و یون های هدف و در نتیجه افزایش نرخ جذب می گردند. همچنین، نانوذرات می توانند به عنوان ناحیه های فعال مستقل عمل کرده و ظرفیت جذب را به طور مستقیم افزایش دهند. نانوذرات مغناطیسی مانند Fe_3O_4 مزیت دیگری نیز ارائه می دهند: امکان جداسازی آسان غشاء یا ذرات جاذب با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی. این ویژگی برای استفاده های صنعتی در سیستم های پیوسته و بازیافت پذیر بسیار مهم است و به کاهش هزینه های عملیاتی کمک می کند. در بعد شیمیایی، سطح نانوذرات را می توان با گروه های عاملی مختلف اصلاح کرد (مانند $-\text{OH}$ ، $-\text{COOH}$ یا $-\text{NH}_2$) تا پیوندهای شیمیایی قوی تری با ماتریس پلیمری ایجاد کنند. این اصلاحات باعث افزایش پایداری مکانیکی غشاء، جلوگیری از تجمع نانوذرات، و بهبود سازگاری بین فاز معدنی و پلیمری می شوند (Guan, Li, Zhang, & Xue, ۲۰۲۲; Pan, Zhu, Liu, Qin, & Ren, ۲۰۲۵). همچنین، برخی نانوذرات مانند TiO_2 و ZnO دارای خاصیت فتوکاتالیتیک هستند که در صورت تابش نور می توانند در تجزیه ترکیبات آلی و کاهش رسوب زیستی نقش داشته باشند. به کارگیری این مواد در ساختار غشاء می تواند به صورت هم زمان ظرفیت جذب یون ها را حفظ کرده و از رشد باکتری ها بر سطح غشاء جلوگیری کند. افزودن نانوذرات به ویژه زمانی مؤثرتر است که با طراحی ساختارهای چندلایه، میکروپرتو یا نانوفیبر همراه شود. در این حالت، نانوذرات به عنوان هسته های عملکردی درون لایه های غشاء عمل می کنند و انتقال جرم و انتخاب پذیری جاذب را به طور معناداری افزایش می دهند (Chong, Jin, Chow, & Saint, ۲۰۱۰; Tong et al., ۲۰۱۲). در زمینه اصلاح سطح، استفاده از تکنیک هایی نظیر پلاسما، گرافت سازی شیمیایی، یا پیونددهی



همزمان چند عاملی، امکان کنترل دقیق تر بر ویژگی های شیمیایی سطح غشاء را فراهم می سازد. اصلاح سطح در غشاهای جاذب، نه تنها به عنوان یک مرحله کمکی در فرآیند سنتز، بلکه به عنوان یک ابزار کلیدی در کنترل دقیق ویژگی های فیزیکوشیمیایی سطح، نقش تعیین کننده ای در عملکرد نهایی سامانه های جذب ایفا می کند. در طراحی غشاهای ترکیبی مبتنی بر پلی آمیدوکسیم و β -سیکلودکسترین، استفاده از تکنیک های اصلاح سطح پیشرفته، امکانی را فراهم می سازد که بتوان همزمان خواص آبدوستی، چگالی گروه های عاملی و پایداری ساختاری را در سطح نانو مقیاس بهینه سازی کرد. از میان روش های موجود، تکنیک هایی همچون فعال سازی پلاسما، گرافت سازی شیمیایی و پیونددهی چندعاملی، بیش از سایر روش ها در بهینه سازی کارکرد سطحی این نوع غشاها کاربرد یافته اند (Teo & Musale, Pardeshi, Sengupta, Patil, & Giram, ۲۰۲۲; Ramakrishna, ۲۰۰۹). فرایند پلاسما که به عنوان روشی تمیز، بدون استفاده از حلال های آلی و با دقت بالا شناخته می شود، قادر است سطح غشا را با ایجاد رادیکال های فعال و گروه های عاملی نظیر هیدروکسیل، کربوکسیل یا آمین، برای مراحل بعدی اصلاح شیمیایی آماده سازد. اثر این فعال سازی، نه تنها در بهبود چسبندگی نانوذرات یا مولکول های زیست فعال، بلکه در افزایش انرژی سطحی، ارتقاء آبدوستی و در نتیجه کاهش پدیده چسبندگی زیستی به وضوح قابل مشاهده است. این تکنیک به ویژه برای اصلاح غشاهایی با سطح غیرقطبی یا هیدروفوب بسیار مفید بوده و شرایط لازم برای پیونددهی شیمیایی هدفمند را فراهم می سازد. در مرحله بعد، گرافت سازی شیمیایی به عنوان ابزاری برای پیوند کووالانسی پایدار بین گروه های عملکردی و سطح غشا مطرح می شود. در غشاهای PAO/ β -CD، این روش معمولاً برای تثبیت β -سیکلودکسترین یا افزایش تراکم گروه های آمیدوکسیم بر سطح زنجیره پلیمری به کار می رود. استفاده از عوامل میانجی فعال ساز مانند EDC، NHS یا CDI، امکان گرافت سازی انتخابی در محل های خاص از زنجیره پلیمر را فراهم کرده و در نتیجه، ساختارهای منظمی از گروه های گیرنده یونی روی سطح ایجاد می کند. گرافت سازی همچنین به کاهش مهاجرت فازها و افزایش همگنی سطحی کمک کرده و مقاومت شیمیایی غشا را در مواجهه با محیط های تهاجمی همچون آب دریا تقویت می کند. فراتر از این، پیونددهی چندعاملی به عنوان یک استراتژی سطح بالا برای مهندسی سطوح چندکارکردی مطرح می شود. در این روش، چندین نوع گروه عاملی به طور همزمان یا ترتیبی در ساختار سطح وارد می شوند تا دامنه ی عملکرد غشاء گسترش یابد. ترکیب گروه های آمیدوکسیم با ساختارهای آمینی یا هیدروکسیلی، منجر به ایجاد سایت هایی با توانایی جذب متنوع تر و تعاملات سطحی پیچیده تر با یون های فلزی می گردد. این رویکرد، با افزایش انتخاب پذیری شیمیایی، بهبود ظرفیت جذب، و کاهش انرژی چسبندگی زیستی، مسیر طراحی غشاهای هوشمند و پاسخ گو به محیط را هموار می سازد (Uricchio & Fanelli, ۲۰۲۱; Pessoa et al., ۲۰۱۵). افزون بر این، توسعه معماری های چندلایه یا هیبریدی با ساختارهای نانوفیبر، میکروپرتو، یا ساختارهای لایه ای چندمرحله ای، زمینه ساز ارتقای خواص ترمودینامیکی، ظرفیت تبادل یونی، و مقاومت مکانیکی غشا خواهد بود. چنین طراحی هایی می توانند برای شرایط متنوع عملیاتی از جمله جریان های پیوسته، غلظت های پایین یا حضور یون های مزاحم بهینه سازی شوند. این فناوری ها، به ویژه در صورت استفاده هم افزا، ظرفیت طراحی نسل های جدیدی از غشاهای جاذب را فراهم می کنند که در عین حفظ راندمان جذب، از نظر اقتصادی، زیست محیطی و صنعتی نیز قابل اتکا باشند.

۶- پایداری عملکرد، باز یافت پذیری و امکان سنجی صنعتی غشاهای PAO/ β -CD



کارایی یک سامانه جاذب در محیط های واقعی، صرفاً به ظرفیت جذب اولیه وابسته نیست؛ بلکه پایداری در طول زمان، قابلیت باززایی و امکان پذیری اقتصادی در مقیاس صنعتی نقش تعیین کننده ای در ارزیابی ارزش کاربردی آن ایفا می کند. در این زمینه، غشاهای ترکیبی پلی آمیدوکسیم/β-سیکلودکسترین به دلیل ساختار مهندسی شده و ویژگی های سطحی بهینه شده، از پتانسیل مناسبی برای استفاده مکرر و پایدار برخوردار هستند (Yu et al., ۲۰۲۵b). مطالعات تجربی حاکی از آن است که این غشاها در برابر چرخه های متوالی جذب و واجذب، بدون افت محسوس در ظرفیت جذب، عملکرد خود را حفظ می کنند. در بسیاری از گزارش ها، استفاده از محلول هایی با خاصیت بازی ملایم، مانند Na_2CO_3 یا NaHCO_3 ، برای آزادسازی یون های اورانیوم از ساختار جاذب، موجب بازگشت کامل ظرفیت جذب پس از پنج تا شش چرخه متوالی شده است. این موضوع نشان می دهد که پیوندهای میان یون های فلزی و گروه های آمیدوکسیم، در عین پایداری، قابل بازگشت و قابل کنترل هستند. از جهت ساختاری، وجود β-سیکلودکسترین در ماتریس غشا باعث افزایش انعطاف پذیری، کاهش شکنندگی، و بهبود یکنواختی ساختار متخلخل شده است. این ویژگی ها نه تنها به پایداری مکانیکی کمک می کنند، بلکه از تخریب تدریجی در اثر تنش های فیزیکی یا تغییرات pH نیز جلوگیری می نمایند. همچنین، کاهش رسوب زیستی در طول زمان، که ناشی از ویژگی های آبدوست و ضدچسبندگی سطحی β-CD است، موجب کاهش دفعات تمیزکاری شیمیایی و افزایش طول عمر عملیاتی غشاء می شود. در بحث امکان سنجی صنعتی، یکی از چالش ها، دسترسی به مواد اولیه و هزینه سنتز است. پلی آمیدوکسیم از پلی اکریلونیتریل، که ماده ای نسبتاً ارزان و در دسترس است، قابل تولید می باشد. β-سیکلودکسترین نیز به صورت صنعتی از نشاسته طبیعی استخراج می شود و از نظر زیست سازگاری و سمیت، گزینه ای مناسب برای استفاده در سامانه های محیطی محسوب می شود. این دو ماده، در کنار یکدیگر، قابلیت ساخت جاذب هایی با هزینه قابل مدیریت و عملکرد بالا را فراهم می سازند. امکان باززایی ساده، عدم تولید ضایعات سمی در فرآیند جذب و واجذب و استفاده از مواد زیست پایا به باعث شده اند تا غشاهای PAO/β-CD به عنوان یک گزینه دوستدار محیط زیست در فرآیندهای تصفیه پیشرفته آب مطرح شوند. در صورتی که بهینه سازی های ساختاری و فنی به درستی صورت گیرد، این فناوری می تواند از مقیاس آزمایشگاهی به سطح پایلوت و سپس صنعتی منتقل شود (Anraku et al., ۲۰۱۶; Pan et al., ۲۰۲۵; Wang et al., ۲۰۱۶).

نتیجه گیری

طراحی غشاهای جاذب برای استخراج اورانیوم از آب دریا، در تقاطع علم مواد، شیمی سطح و مهندسی محیط زیست قرار دارد. در این مقاله، ترکیب پلی آمیدوکسیم (PAO) و β-سیکلودکسترین (β-CD) به عنوان یکی از ساختارهای نوین و پرکاربرد برای دستیابی به عملکرد دوگانه در جذب انتخابی یون های فلزی و مقاومت در برابر رسوب زیستی مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات مروری نشان دادند که ساختار آمیدوکسیمی با برخورداری از گروه های فعال نیتروژن دار و اکسیژن دار، توانایی بالایی در برهم کنش با یون اورانیل دارد. β-سیکلودکسترین نیز با فراهم سازی محیطی آبدوست و ممانعت از چسبندگی زیستی، عملکرد غشاء را در محیط های واقعی به طور معناداری ارتقاء می دهد. ترکیب این دو ماده در یک ماتریس پلیمری متخلخل، نه تنها منجر به افزایش ظرفیت جذب و تسریع در رسیدن به تعادل می شود، بلکه با کاهش رشد میکروارگانیسم ها، طول عمر عملیاتی و پایداری ساختار غشاء را افزایش می دهد. تحلیل مطالعات تجربی حاکی از آن است که این غشاها قادر به تحمل چندین چرخه جذب-واجذب بدون افت عملکرد هستند و قابلیت تولید با هزینه منطقی و مواد اولیه در دسترس را نیز دارند. پتانسیل بازیافت، زیست سازگاری ترکیبات و امکان استفاده در مقیاس پایلوت از دیگر نقاط قوت این فناوری محسوب می شود. با توجه به مجموع شواهد علمی،



غشاهای PAO/ β -CD را می توان به عنوان گزینه ای امیدبخش برای توسعه فناوری های نوین بازیابی اورانیوم در محیط های دریایی معرفی کرد. با این حال، تحقیقات آینده می تواند بر روی ارتقاء معماری غشاء، کاهش زمان فرآیند و تطبیق عملکرد در شرایط متغیر محیطی متمرکز شود. تلفیق این فناوری با سامانه های غشایی الکتروشیمیایی، فناوری های غشای مغناطیسی یا جذب ترکیبی، از جمله مسیرهای پیشرو در این حوزه به شمار می رود.



منابع

- Abney, C. W., Mayes, R. T., Saito, T., & Dai, S. (۲۰۱۷). Materials for the recovery of uranium from seawater. *Chemical reviews*, 117(۲۳), ۱۳۹۳۵-۱۴۰۱۳.
- Additives, E. P. o. F., Food, N. S. a. t., Mortensen, A., Aguilar, F., Crebelli, R., Di Domenico, A . . . Gundert-Remy, U. (۲۰۱۶). Re-evaluation of β -cyclodextrin (E ۴۵۹) as a food additive. *Efsa Journal*, 14(۱۲), e۰۴۶۲۸.
- Ahmad, Z., Li, Y., Yang, J., Geng, N., Fan, Y., Gou, X., . . . Chen, J. (۲۰۲۲). A membrane-supported bifunctional poly (amidoxime-ethyleneimine) network for enhanced uranium extraction from seawater and wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 425, ۱۲۷۹۹۵.
- Alali, K. T., Tan, S., Zhu, J., Liu, J., Yu, J., Liu, Q., & Wang, J. (۲۰۲۴). High mechanical property and hydrophilic electrospun poly amidoxime/poly acrylonitrile composite nanofibrous mats for extraction uranium from seawater. *Chemosphere*, 351, ۱۴۱۱۹۱.
- Anraku, M., Iohara, D., Wada, K., Taguchi, K., Maruyama, T., Otagiri, M., . . . Hirayama, F. (۲۰۱۶). Antioxidant and renoprotective activity of γ -hydroxypropyl- β -cyclodextrin in nephrectomized rats. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 68(۵), ۶۰۸-۶۱۴.
- Baker, J., & Dudley, L. (۱۹۹۸). Biofouling in membrane systems—a review. *Desalination*, ۱۱۸(۱-۳), ۸۱-۸۹.
- Chen, H., Shao, D., Li J., & Wang, X. (۲۰۱۴). The uptake of radionuclides from aqueous solution by poly (amidoxime) modified reduced graphene oxide. *Chemical Engineering Journal*, 254, ۶۲۳-۶۳۴.
- Chen, J., Gao, J., Lv, H., Wen, Q., Han, J., Liu, P., . . . Ma, F. (۲۰۲۳). Preparation of polydopamine-functionalized polyamidoxime membrane for uranium recovery from seawater. *Applied Surface Science*, 634, ۱۵۷۶۰۴.
- Chong, M. N., Jin, B., Chow, C. W., & Saint, C. (۲۰۱۰). Recent developments in photocatalytic water treatment technology: a review. *Water research*, 44(۱۰), ۲۹۹۷-۳۰۲۷.
- Delauney, L., Compere, C., & Lehaitre, M. (۲۰۱۰). Biofouling protection for marine environmental sensors. *Ocean Science*, 6(۲), ۵۰۳-۵۱۱.
- Deng, T., Lv, L., Li, X., Wen, J., Li, H., Peng, H., . . . Dang, C. (۲۰۲۵). (Aminomethanesulfonic acid grafted polyamidoxime fibers with hydrophilicity, salt-tolerance and antimicrobial properties for highly efficient uranium extraction from seawater. *Separation and Purification Technology*, 356, ۱۲۹۶۱۰.



- Endrizzi, F., Leggett, C. J., & Rao, L. (۲۰۱۶). Scientific basis for efficient extraction of uranium from seawater. I: understanding the chemical speciation of uranium under seawater conditions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55(۱۵), ۴۲۴۹-۴۲۵۶.
- Gould, S., & Scott, R. C. (۲۰۰۵). ۲-Hydroxypropyl-β-cyclodextrin (HP-β-CD): A toxicology review. *Food and Chemical Toxicology*, 43(۱۰), ۱۴۵۱-۱۴۵۹.
- Guan, T., Li, N., Zhang, G., & Xue, P. (۲۰۲۲). Characterization and evaluation of sodium alginate-based edible films by incorporation of star anise ethanol extract/hydroxypropyl-β-cyclodextrin inclusion complex. *Food Packaging and Shelf Life*, 31, ۱۰۰۷۸۵.
- Li, S., Meng Lin, M., Toprak, M. S., Kim, D. K., & Muhammed, M. (۲۰۱۰). Nanocomposites of polymer and inorganic nanoparticles for optical and magnetic applications. *Nano reviews*, ۱(۱), ۵۲۱۴.
- Liu, M., Gao, C., Han, R., & Qu, L. (۲۰۲۳). Assessment of β-cyclodextrin-immobilizing hydrolyzed polyacrylonitrile membrane for enhanced remediation of bisphenol A and tetracyclines: adsorption and antibacterial studies. *Journal of Cleaner Production*, 387, ۱۳۵۸۳۹.
- Musale, S., Pardeshi, S., Sengupta, P., Patil, M., & Giram, P. (۲۰۲۳). Functionalized nanofibers for antimicrobial applications. In *Functionalized Nanofibers* (pp. ۱۶۷-۲۰۹): Elsevier.
- Pan, X., Zhu, Y., Liu, C., Qin, L., & Ren, T. (۲۰۲۵). Development and evaluation of composite preservation films with pepper aromatic oils. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 19(۱), ۱۸۵-۱۹۸.
- Parker, B., Zhang, Z., Rao, L., & Arnold, J. (۲۰۱۸). An overview and recent progress in the chemistry of uranium extraction from seawater. *Dalton Transactions*, 47(۳), ۶۳۹-۶۴۴.
- Pessoa, R., Fraga, M., Santos, L., Galvão, N., Maciel, H., & Massi, M. (۲۰۱۵). Plasma-assisted techniques for growing hard nanostructured coatings: An overview. *Anti-Abrasive Nanocoatings*, ۴۵۵-۴۷۹.
- Pina-Vidal, C., Luque-Alled, J. M., Coronas, J., & Téllez, C. (۲۰۲۳). Sustainable β- and γ-cyclodextrins for development of highly permeable thin film composite nanofiltration membranes. *Materials Today Sustainability*, 24, ۱۰۰۵۹۳.
- Rybak, A., & Kaszuwara, W. (۲۰۱۵). Magnetic properties of the magnetic hybrid membranes based on various polymer matrices and inorganic fillers. *Journal of Alloys and Compounds*, ۶۴۸, ۲۰۵-۲۱۴.



- Shao, D., Hou, G., Chi, F., Lu, X., & Ren, X. (۲۰۲۱). Transformation details of poly (acrylonitrile) to poly (amidoxime) during the amidoximation process. *Rsc advances*, 11(۴), ۱۹۰۹-۱۹۱۵.
- Sharma, S., Sharma, C. R., Bhayani, K., & Mishra, S. (۲۰۱۶). Silver nanoparticle anchored with novel crosslinked beaded polystyrene/polyamidoxime sequential interpenetrating polymer networks (IPNs) and its antibacterial activity. *Polymer Composites*, 37(۱), ۷۰-۸۰.
- Stella, V. J., & Rajewski, R. A. (۲۰۲۰). Sulfobutylether-β-cyclodextrin. *International Journal of Pharmaceutics*, 583, ۱۱۹۳۹۶.
- Sun, Y., Leng, R., Ma, X., Zhang, J., Han, B., Zhao, G., . . . Wang, X. (۲۰۲۳). Economical amidoxime-functionalized non-porous β-cyclodextrin polymer for selective detection and extraction of uranium. *Chemical Engineering Journal*, 459, ۱۴۱۶۸۷.
- Teo, W.-E., & Ramakrishna, S. (۲۰۰۹). Electrospun nanofibers as a platform for multifunctional, hierarchically organized nanocomposite. *Composites science and technology*, ۶۹(۱۱-۱۲), ۱۸۰۴-۱۸۱۷.
- Thompson, D. O. (۲۰۰۶). Cyclodextrins-Enabling Excipients: A Case Study of the Development of a New Excipient-Sulfobutylether β-Cyclodextrin (CAPTISOL®). *Chapt, 5*, ۵۱-۶۷.
- Tong, H., Ouyang, S., Bi, Y., Umezawa, N., Oshikiri, M., & Ye, J. (۲۰۱۲). Nano-photocatalytic materials: possibilities and challenges. *Advanced materials*, 24(۲), ۲۲۹-۲۵۱.
- Uricchio, A., & Fanelli, F. (۲۰۲۱). Low-temperature atmospheric pressure plasma processes for the deposition of nanocomposite coatings. *Processes*, 9(۱۱), ۲۰۶۹.
- Wang, J., Wang, L., Yu, H., Chen, Y., Chen, Q., Zhou, W., . . . Chen, X. (۲۰۱۶). Recent progress on synthesis, property and application of modified chitosan: an overview. *International Journal of Biological Macromolecules*, 88, ۳۳۳-۳۴۴.
- Wen, S., Sun, Y., Liu, R., Chen, L., Wang, J., Peng, S., . . . Wang, N. (۲۰۲۱). Supramolecularly poly (amidoxime)-loaded macroporous resin for fast uranium recovery from seawater and uranium-containing wastewater. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(۲), ۳۲۴۶-۳۲۵۸.
- Ye, Q.-H., Ye, H., Hu, Z.-T., Wu, M.-B., & Yao, J. (۲۰۲۳). Polyamidoxime nanofiber membranes with hierarchical pores for enhanced uranium extraction from seawater. *Composites Communications*, 43, ۱۰۱۷۲۵.



- Yu, Y., Liu, J., Liu, Q., Chen, R., Yu, J., Zhu, J., . . . Sukhinina, N. (۲۰۲۵a). Synergistic enhancement of antibiofouling and uranium extraction from seawater with β -cyclodextrin microcapsules/polyamidoxime porous network membrane. *Desalination*, ۱۱۸۸۰۸ .
- Yu, Y., Liu, J., Liu, Q., Chen, R., Yu, J., Zhu, J., . . . Sukhinina, N. (۲۰۲۵b). Synergistic enhancement of antibiofouling and uranium extraction from seawater with β -cyclodextrin microcapsules/polyamidoxime porous network membrane. *Desalination*, 608, ۱۱۸۸۰۸ .
- Zhang, D., Fang, L., Liu, L., Zhao, B., Hu, B., Yu, S., & Wang, X. (۲۰۲۳). Uranium extraction from seawater by novel materials: a review. *Separation and Purification Technology*, 320, ۱۲۴۲۰۴ .
- Zhong, X., Wang, R., Xu, G., Guo, K., & Hu, C. (۲۰۲۲). Adsorptive removal of uranium (VI) from wastewater using a crosslinked amidoxime-functionalized β -cyclodextrin polymer. *New Journal of Chemistry*, 46(۴۳), ۲۰۵۹۲-۲۰۶۰۱ .